

# 지속가능 해양오염퇴적물 정화기술 개발: 피복 및 현장처리기술 최종보고서

2017. 1. 4.

주관연구기관 / 한경대학교  
협동연구기관 / 한국해양과학기술원

해 양 수 산 부  
한국해양과학기술진흥원

## 주 의

1. 이 최종보고서는 해양수산부에서 시행한 해양수산환경기술개발사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 해양수산부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.



# 제 출 문

한국해양과학기술진흥원장 귀하

'지속가능 해양오염퇴적물 정화기술 개발: 피복 및 현장처리 기술'(연구개발 기간: 2011.08.16 ~ 2016.10.30) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2016. 11.

주관연구기관명 : 한국해양대학교 산학협력단 (대표자) 김계환 (인)

협동연구기관명 : 한국해양과학기술원 (대표자) 홍기훈 (인)

공동연구기관명 : 한국건설기술연구원 (대표자) 이대식 (인)

위탁연구기관명 : 한국해양대학교 산학협력단 (대표자) 경갑수 (인)

서강대학교 산학협력단 (대표자) 이희성 (인)

에이치플러스에코 (대표자) 허자홍 (인)

주관연구기관책임자: 김영기

협동연구기관책임자: 김경연

공동연구기관책임자: 이장근

위탁연구기관책임자: 송양재

: 오병근

: 공준

해양수산 연구개발사업 운영규정 제40조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.



## 보고서 요약서

과제 고유 번호	2011-0110	해당 단계 연구 기간	5차년도 2014.08.16.~ 2016.10.30.	단계구분	5차년도/ 최종단계
연구사업명	해양수산환경기술개발사업				
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	지속가능 해양오염퇴적물 정화기술 개발: 피복 및 현장처리 기술			
연구책임자	김영기	해당단계 참여 연구원 수	총: 40 명 내부: 10 명 외부: 30 명	해당단계 연구개발비	정부: 2,385,000천원 기업: 0천원 정부 외: 0천원 계: 2,385,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 88 명 내부: 25 명 외부: 63 명	총 연구개발비	정부: 7,247,000천원 기업: 0천원 정부 외: 0천원 계: 7,247,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	주관연구기관명: 한경대학교 산학협력단 협동연구기관명: 한국해양과학기술원 공동연구기관명: 한국건설기술연구원			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 한국해양대학교			연구책임자: 송영채	
	연구기관명: 서강대학교			연구책임자: 오병근	
	연구기관명: 에이치플러스에코(주)			연구책임자: 공준	
요약				보고서 면수	
<p>런던협약 발효로 준설품질의 해양투기가 원칙적으로 금지됨에 따라 준설품질 후 연안투기장 최종 처분방법에 의해 해양환경정화사업이 이루어지고 있으나 투기장 확보의 어려움으로 준설품질과 투기를 기본으로 하는 해양환경정화사업 수행이 곤란해지고 있다. 이에 대한 해결책으로 오염퇴적물을 제거하지 않고 원위치에서 수계와 차단 및 안정화시키는 현장피복기술과 수거된 오염퇴적물을 현장에서 중간처리를 수행함으로써 발생하는 처분대상 퇴적물을 최소화시키는 현장처리기술을 개발하였다. 개발된 두가지 대안기술은 현장적용시험을 거쳐 유용성을 확인하였다.</p>				1170쪽	

## 〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 준설품질의 해양배출은 “폐기물 및 기타 물질의 투기에 의한 해양오염 방지에 관한 협약”, 즉 런던협약에 의해 국제적으로 규제가 점차 강화되고 있는 추세에 있고 오염퇴적물 해양투기나 처분시 중금속과 유해화학물질의 함량 등에 대하여 국제적으로 action level이 설정되는 등 준설토의 해양 투기가 보다 엄격하게 제한되고 있다.</li> <li>• 본 연구개발사업은 해양오염퇴적물 정화사업을 위해 주로 수행되고 있는 준설토(흡입식 수거)/최종처리방법이 런던의정서에 의한 해양투기 가능 준설품질 규제 강화로 위기에 놓여있는 상황에서 환경 친화적이고 경제성을 가지는 대안기술을 개발하고 실증화를 추진하는 것을 목표로 한다.</li> </ul>				
연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 해양오염퇴적물 피복기술 개발 및 적용시험</li> <li>• 해양오염퇴적물 현장처리기술 개발, 공정 설계 및 적용시험</li> <li>• 해역(오염)유형별 최적 정화공법 선정도구(안)개발</li> <li>• 해양퇴적물 오염특성별 해역유형 구분 기준개발</li> <li>• 해양오염퇴적물 정화·복원 관련 법령 개정안 개발</li> </ul>				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 피복성능평가 시스템 구축을 통한 피복 설계의 기술 고도화 및 합리적이고 매뉴얼 기반 구축</li> <li>• 오염퇴적물 정화사업 활성화로 관련 산업 기술 개발 유발 효과</li> <li>• 관련 기술의 국제 경쟁력 확보로 중국, 동남아시아 등 개발 진행 국가의 정화복원사업 진출 및 해외시장 창출</li> <li>• 한국형 피복공법 기술 정립에 따른 개발도상국 기술이전 및 국내기업 참여를 통한 외화 획득 효과</li> <li>• 피복기술 및 현장처리기술 개발로 중앙정부의 정화·복원사업의 효율 극대화로 사업활성화가 기대됨</li> <li>• 해양퇴적오염물 현장처리기술 실용화를 통한 신규 정화·복원사업 시장 창출</li> </ul>				
핵심어 (5개 이내)	오염퇴적물	정화	피복공법	현장처리	해양환경

## < SUMMARY >

<b>Purpose &amp; Contents</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• According to the London Convention 1972/Protocol 1996, if the characteristics of the dredged material would not meet the requirements of the Convention, treatment such as separation of contaminated fractions or other management options should be considered. Nowadays, disposal management techniques for a beneficial use are studying actively.</li> <li>• This research is to develop environmental-friendly and low cost dredging/ final treatment technology alternative and to propose of substantiation. Owing to the London Convention regulation strengthening, the ocean disposals have much difficulty.</li> </ul>				
<b>Results</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development and application test of capping technology of contaminated marine sediments.</li> <li>• Development, process design, and application test of in-situ treatment technology of contaminated marine sediments</li> <li>• Development of selection tool of optimal remediation process in the sea (contamination) type.</li> <li>• Standard development of the sea type separation in each contamination characteristic of marine sediment.</li> <li>• Development of legislation revised bill related with remediation of contaminated marine sediments.</li> </ul>				
<b>Expected Contribution</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technology improvement and logical manual-based construction of capping design by capping efficiency evaluation system construction</li> <li>• Inductive effect of relative project technology development through remediation project revitalization of contaminated sediment.</li> <li>• Remediation/reconstruction expansion and Foreign market creation of a developing country (China and Southeast Asia, etc.) through international competitive power of relative technique.</li> <li>• Effect of acquisition of foreign currencies through a developing country technology transfer and domestic company participation in conformity with Korean capping process technology</li> <li>• Activation of the project with the central government remediation/reconstruction project budget reduction and remediation/reconstruction project efficiency optimization through capping technology and in-situ treatment technology development.</li> <li>• Market creation of new remediation and reconstruction through in-situ treatment technology commercialization of contaminated marine sediments</li> </ul>				
<b>Keywords</b>	<b>Contaminated Sediments</b>	<b>Remediation</b>	<b>Capping</b>	<b>In-Situ Treatment</b>	<b>Marine Environment</b>

## < CONTENTS >

1. Introduction .....	1
2. Development status of technologies .....	5
3. Performance details and results in research and development .....	11
4. Achievement and contribution related field .....	1167
5. Application plan of research development .....	1173
6. New insights acquired during research processes .....	1174
7. Security grade of R&D outcome .....	1175
8. Registered research facilities & equipment status in NTIS .....	1176
9. Performance of safety measures according to research .....	1177
10. Representative research achievements of R&D tasks .....	1178
11. Other detail .....	1179
12. References .....	1180



## 〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 .....	1
2. 국내외 기술 개발 현황 .....	5
3. 연구 수행 내용 및 성과 .....	11
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....	1167
5. 연구개발성과의 활용 계획 .....	1173
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 .....	1174
7. 연구개발성과의 보안등급 .....	1175
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황 .....	1176
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 .....	1177
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 .....	1178
11. 기타 사항 .....	1179
12. 참고 문헌 .....	1180

## 〈 표 - 목 차 〉

[표 I-가-1] 해양오염퇴적물 정화·복원방법 및 주요내용 .....	11
[표 I-가-2] 오염퇴적물 정화·복원방법과 사전인지 조건 .....	11
[표 I-가-3] 다양한 정화·복원 방법을 결정하기 위한 주요 요소 .....	13
[표 I-가-4] 오염퇴적물 정화·복원 사업실시설계 주요 구성 .....	19
[표 I-가-5] 기술평가 시 기초자료 .....	20
[표 I-가-6] 기술평가 시 고려가 필요한 오염토양 정화기술의 특성 비교 .....	22
[표 I-가-7] 처리기술 선정 행렬에 사용된 범례 .....	23
[표 I-가-8] 기술평가 시 사용되는 요소들의 사례 .....	23
[표 I-가-9] 준설/굴착 대책 선정 시 고려할 요소 .....	26
[표 I-가-10] 미국의 퇴적물 오염평가 방법 .....	27
[표 I-가-11] 준설퇴적물의 투기를 위한 단계별 영향 평가 .....	27
[표 I-가-12] 오염퇴적물 정화·복원 지역에서 사용된 처리기술 현황 .....	28
[표 I-가-13] 전체 비용 중 각 기술별 소요 비용의 비율 .....	29
[표 I-가-14] 각 오염지역에서 사용된 처리·처분 기술별 단위 비용 .....	30
[표 I-가-15] 일본의 준설퇴적물 처리방법에 따른 주요 고려사항 .....	31
[표 I-가-16] 일본의 오염퇴적물 처리기술의 개요 .....	31
[표 I-가-17] 미국, 일본, 유럽의 해양오염퇴적물 처리기술 현황 .....	35
[표 I-다-1] 조사 해역별 유해화학물질 정화지수(CI <sub>HC</sub> ) 분포 .....	49
[표 I-다-2] 조사 해역별 부영양화 정화지수(CI <sub>ET</sub> ) 분포 .....	50
[표 I-다-3] 부영양화 관련 평가항목, 기준농도 및 평가점수 .....	51
[표 I-다-4] 유해화학물질 관련 평가항목, 기준농도 및 산출방식 .....	52
[표 I-다-5] 대상 해역 퇴적물의 평균 오염도 및 정화지수 .....	59
[표 I-라-1] 오염퇴적물 정화방법 선택을 위한 기본조건 .....	62
[표 I-라-2] 오염퇴적물 자연정화방법 사전고려사항 .....	64
[표 I-라-3] 자연정화방법 평가에 요구되는 주요 고려사항 .....	65
[표 I-라-4] 준설방식의 장단점 비교 .....	74
[표 I-라-5] 준설방법의 특징 및 선택 고려사항 .....	75
[표 I-라-6] 기타 지역에서의 해양오염퇴적물 정화·복원 사례 .....	79
[표 I-라-7] 일본의 오염퇴적물 정화·복원사업 주요지침 .....	80
[표 I-라-8] 오염퇴적물 정화사업 추진 현황 .....	82
[표 I-라-9] 국내 오염퇴적물 처리·처분 관련 기술 현황 .....	83
[표 I-라-10] GAIA Project의 목표 및 예산 .....	84
[표 I-라-11] 환경준설에서 사용되는 장비들의 유용성 .....	100
[표 I-라-12] 환경준설에 사용되는 준설선별 탁도 발생원단위 사례 .....	102
[표 I-라-13] 일반 준설에 사용되는 준설선별 탁도 발생원단위 사례 .....	102
[표 I-라-14] 수거공법의 특성 비교 .....	105

[표 I-마-1] Magnetic observations at a reference point .....	108
[표 I-마-2] Results of IGRF at the center of survey area .....	108
[표 I-마-1] XRF 분석에 의한 석회석의 화학적 구성 .....	118
[표 I-마-2] XRF 분석에 의한 제올라이트의 화학적 구성 .....	119
[표 I-마-3] XRF 분석에 의한 굴폐각의 화학적 구성 .....	119
[표 I-마-4] XRF 분석에 의한 적니의 화학적 구성 .....	119
[표 I-마-5] 석회석 동적흡착 모델 값 .....	120
[표 I-마-6] 석회석 평형흡착 모델 값 .....	121
[표 I-마-7] 제올라이트의 동적흡착 모델 값 .....	124
[표 I-마-8] 제올라이트 평형흡착 모델 값 .....	125
[표 I-마-9] 적니 동적흡착 모델 값 .....	127
[표 I-마-10] 적니 평형흡착 모델 값 .....	128
[표 I-마-11] 굴폐각 동적흡착 모델 값 .....	130
[표 I-마-12] 굴폐각 평형흡착 모델 값 .....	131
[표 I-마-13] 반응성 피복 소재별 흡착성능 비교분석 .....	133
[표 I-마-14] Extraction conditions used per gram of soil according to the fractionation scheme of Tessier et al. ....	142
[표 I-마-15] 인천 북항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 .....	142
[표 I-마-16] N과 P와 중금속 제거가 가능한 미세조류 균주 .....	150
[표 I-마-17] TAP(Tris Acetate Phosphate) 배지 조성 .....	151
[표 I-마-18] MC media 조성 .....	151
[표 I-마-19] ASW(Artificial Sea Water media) 배지 조성 .....	152
[표 I-마-20] 시추장비의 성능 .....	158
[표 I-마-21] 미국 현장 피복공법 적용 건수와 피복재 두께 .....	183
[표 I-사-1] 부영양 오염해역 퇴적물 평균 오염도 .....	194
[표 I-사-2] “나”해역 퇴적물의 입도 구성 .....	195
[표 I-사-3] 부영양 우심 해역에서 채취한 퇴적물 및 해수 특성 분석 .....	196
[표 I-사-4] pH, 온도, DO가 인산염 평형 용출 농도에 미치는 영향에 대한 ANOVA 분석 .....	198
[표 I-사-5] pH, 온도, DO가 인산염 용출속도에 미치는 영향에 대한 ANOVA 분석 .....	200
[표 I-사-6] 입자분리 방법 및 특징 .....	204
[표 I-사-7] 오염퇴적물 (중간)처리방법 및 특징 .....	206
[표 I-사-8] 공정수처리 방법 및 특징 .....	210
[표 I-사-9] 탈수 방법 및 특징 .....	214
[표 I-사-10] 오염 토양/퇴적물 처리 시스템 사례별 주요 제원 .....	217
[표 I-사-11] 제강 슬래그 입도별 복토 후 최종 인 농도 .....	222
[표 I-사-12] 부산항 인근 연안 준설토 성상 .....	232
[표 I-사-13] 반응성 차단제의 흡착능 평가를 위한 오염물질 주입 농도 .....	233
[표 I-사-14] 반응성 차단제의 차단효과 평가를 위한 오염물질 주입 농도 .....	234

[표 I-사-15] 준설토 매립장 분석결과 .....	235
[표 I-사-16] 진해만 인근 연안저질 분석결과 .....	235
[표 I-사-17] 여수항 인근 연안저질 분석결과 .....	235
[표 I-사-18] Column 시험에서 와류강도에 따른 부유사 농도 .....	236
[표 I-사-19] Shaking 방법을 이용한 준설토, 벤토나이트, 제올라이트의 표면 개질을 .....	238
[표 I-사-20] batch 및 column 실험에서 오염물질 차단율 비교 .....	245
[표 I-사-21] 반응성 차단제의 질소 및 인 오염물질 차단율 .....	245
[표 I-아-1] 환경적 측면에서 정화복원을 위한 준설의 구분 .....	247
[표 I-아-2] 환경적 측면에서 정화복원의 방법별 장단점 .....	247
[표 I-아-3] 해양오염퇴적물 조사 지침서(해양수산부, 2006)의 구성 .....	250
[표 I-아-4] 기존 해양오염퇴적물 조사 지침서(해양수산부, 2006)와 차별성 구현 .....	251
[표 I-아-5] 대표적인 국외사례(미국) .....	253
[표 I-자-1] 선진국 해양오염퇴적물 처리(중간, 최종) 방법 및 비용 .....	261
[표 I-자-2] 해양오염퇴적물 정화사업의 생산유발효과 .....	269
[표 I-자-3] 해양오염퇴적물 정화사업의 부가가치 유발효과 .....	270
[표 I-자-4] 해양오염퇴적물 정화사업의 취업유발효과 .....	271
[표 I-자-5] 해양오염퇴적물 정화사업 비용-편익의 연간 흐름 .....	274
[표 I-자-6] 연안수질이 인접 시군의 원인별 사망률에 미치는 영향 .....	286
[표 I-자-7] 해양오염정화 시나리오별 연간 예방가능 조기사망자수 추정 .....	287
[표 I-자-8] 통계적 인간생명가치 추정사례 .....	288
[표 I-자-9] 연령별 기대여명 및 연평균임금, 2010년 .....	291
[표 I-자-10] 사망에 따른 평균 임금손실 추정 .....	293
[표 I-자-11] 해양오염 정화기술개발의 건강증진효과의 연간 경제적 가치 .....	294
[표 II-가-1] 피복소재들의 물리화학적 특성 .....	297
[표 II-가-2] 피복소재들의 동적흡착 모델 매개변수 값 .....	298
[표 II-가-3] 피복소재들의 평형흡착 모델 값 .....	300
[표 II-가-4] 피복소재들의 중금속별 흡착성능 비교 .....	302
[표 II-가-5] 피복소재들의 중금속별 흡착성능 비교 .....	303
[표 II-가-6] K항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	304
[표 II-가-7] 피복소재별 중금속의 안정화 성능 평가결과표 .....	309
[표 II-가-8] 혼합 피복소재들의 동적흡착 모델 매개변수값 .....	312
[표 II-가-9] 혼합 피복소재들의 평형흡착 모델 매개변수 값 .....	314
[표 II-가-10] 순환골재의 생태독성 평가 .....	319
[표 II-가-11] 제강슬래그의 환경안전성 평가 및 생태독성 평가 .....	319
[표 II-나-1] 해양퇴적물 중금속 허용 범위 .....	343
[표 II-나-2] 해양저질샘플의 자생미생물 활성화도 실험 조건 .....	349
[표 II-나-3] 해양저질샘플의 물리화학적 특성 .....	353
[표 II-나-4] 생물활성촉진물질 주입에 따른 자생미생물의 군집변화, 15℃ .....	355

[표 II-나-5] 생물활성촉진물질 주입에 따른 자생미생물의 군집변화, 5°C .....	355
[표 II-다-1] 파랑변형해석의 개요 .....	364
[표 II-다-2] STFATE 모델 격자 구성 .....	368
[표 II-라-1] K항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	370
[표 II-라-2] K항 오염퇴적물의 중금속 및 유기오염물질 오염 특성 .....	370
[표 II-라-3] I항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	371
[표 II-라-4] I항 오염퇴적물의 중금속 및 유기오염물질 오염 특성 .....	372
[표 II-라-5] 조사해역 개요 .....	374
[표 II-라-6] 각해역의 함수율 및 입도분석 결과 .....	375
[표 II-마-1] 우리나라의 해양오염퇴적물 처리 관련 기술 동향 .....	382
[표 II-마-2] 토양의 복원기술 선정 시 고려하여야 할 토양의 특성 중 물리적 특성 .....	385
[표 II-마-3] 상용 입자분리 기술의 분리 원리에 따른 분류 및 주요 내용 .....	385
[표 II-마-4] 대상해역의 입도별 분리 결과 .....	390
[표 II-마-5] 기초실험을 근거로 계산된 처리비용 .....	401
[표 II-마-6] 3지역의 토양오염 우려기준 .....	407
[표 II-마-7] 수저준설토사 유효활용기준 및 활용가능 용도 .....	408
[표 II-마-8] N해역 퇴적물 내 1M 염산추출부분 .....	409
[표 II-마-9] 부영양화 관련 오염물질처리 실험 후 1M 염산추출부분 중금속 제거 효율 및 $Cl_{HC}$ 변화 .....	412
[표 II-바-1] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 특허 검색 결과 .....	416
[표 II-바-2] 국제특허분류(IPC)의 출원건수 및 설명 .....	417
[표 II-바-3] 오염원(그룹)에 따른 공정의 초기 선정 .....	423
[표 II-바-4] 일반적인 영향인자를 이용한 공정의 초기선정 .....	424
[표 II-바-5] 영향인자 효과 .....	425
[표 II-바-6] 퇴적토 원수의 고형물 입도에 따른 구성 .....	429
[표 II-바-7] 세척공정과 추출공정의 차이점 .....	436
[표 II-사-1] 해양오염퇴적물 정화·복원사업 현황 .....	446
[표 II-사-2] 해양환경관리법에 따른 해양환경기준 .....	447
[표 II-사-3] 해양오염퇴적물 정화·복원 방법 .....	466
[표 III-가-1] 피복소재들의 물리화학적 특성 .....	472
[표 III-가-2] 피복소재들의 동적흡착 모델 매개변수 값 .....	476
[표 III-가-3] 피복소재들의 평형흡착 모델 값 .....	479
[표 III-가-4] 피복소재들의 혼합 중금속 흡착성능 비교 .....	483
[표 III-가-5] 표면개질한 적니와 활성탄의 평형흡착 모델 값 .....	483
[표 III-가-6] K항, M항 및 I항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	485
[표 III-가-7] 대조군(오염퇴적물)에 함유된 중금속의 존재형태별 농도 .....	486
[표 III-가-8] 피복소재별 중금속의 안정화 성능 비교 .....	489
[표 III-가-9] 피복소재별 유기오염물질 흡착능 비교 .....	490
[표 III-가-10] 순환골재의 생태독성 평가 .....	491

[표 III-가-11] 제강슬래그의 환경안전성 평가 및 생태독성 평가 .....	491
[표 III-가-12] 피복소재 TCLP 용출실험 결과 비교 .....	492
[표 III-가-13] 벤토나이트 지역별 매장량 .....	495
[표 III-가-14] 벤토나이트 생산현황 .....	496
[표 III-가-15] 천연 제올라이트 주요 광산 생산 추이 .....	497
[표 III-가-16] 연도별 천연제올라이트 국내 가격 추이 .....	497
[표 III-가-17] 시도별 공급계획 총괄표 .....	498
[표 III-가-18] 제5차 계획기간의 공재 공급 계획(안) 모래 .....	499
[표 III-가-19] 제5차 계획기간의 바다모래 채취 계획 .....	499
[표 III-가-20] 골재 구매 단가 .....	500
[표 III-가-21] 연도별 골재 생산지 판매 단가 .....	500
[표 III-가-22] 3차 계획기간 중 지역별 골재 판매 단가 .....	500
[표 III-가-23] 경제적, 사회환경적 측면을 고려한 피복소재들의 공급 및 확보의 용이성 비교 .....	502
[표 III-가-24] 조사해역 개요 .....	507
[표 III-가-25] K항 및 I항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	508
[표 III-가-26] 제강슬래그의 두께, 농도, 유량에 따른 인 용출차단 효율 .....	513
[표 III-가-27] 산처리 적니의 두께에 따른 불소 용출차단 효율 .....	514
[표 III-가-28] 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그 피복두께에 따른 K항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단 효율 .....	521
[표 III-가-29] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복두께에 따른 M 항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단 효율 .....	521
[표 III-가-30] 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그 피복두께에 따른 K항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단 효율 .....	522
[표 III-가-31] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복두께에 따른 M 항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단 효율 .....	523
[표 III-가-32] 피복실험 조건 .....	524
[표 III-나-1] 해양지질샘플의 물리화학적 특성 .....	547
[표 III-나-2] 반응표면분석법을 위한 입력 설계변수와 레벨 .....	548
[표 III-나-3] 중심합성계획법을 이용하여 설계한 실험계획 .....	549
[표 III-나-4] 최적운영조건 연구에 사용된 해양 퇴적물시료의 물리화학적 특성 .....	550
[표 III-나-5] 부산북항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	553
[표 III-나-6] 생물활성촉진제의 오염퇴적물 정화 효능평가에 사용된 시료의 물리화학적 특성 .....	555
[표 III-나-7] 호기성조건에서 동정한 해양 퇴적물에 자생하는 미생물 개체수 .....	558
[표 III-나-8] 혐기성조건에서 동정한 해양 퇴적물에 자생하는 미생물 개체수 .....	559
[표 III-나-9] 생물활성촉진제의 입경 및 배치간격과 시간변수에 대한 초기(0month)와 실험 1개월 이후 해양 퇴적물 시료의 번호 .....	562
[표 III-나-10] 최적운영조건 연구 컬럼에서 초기(0month) 및 실험 1개월 후 퇴적물 시료의 물리화학적 특성 .....	562
[표 III-나-11] 부산북항 퇴적물의 물리화학적 특성 .....	565

[표 III-나-12] COD와 AVS를 이용한 연안해역 퇴적물의 오염도평가 방법 .....	566
[표 III-나-13] 부산북항 퇴적물의 중금속 함량과 중금속 존재형태 분포도 .....	566
[표 III-나-14] US EPA의 중금속에 의한 퇴적물의 위해성 가이드라인과 부산북항 퇴적물의 중금속 오염도 .....	567
[표 III-다-1] 입사파 특성 .....	573
[표 III-다-2] 선행연구자들에 의한 최소피복두께 제안 .....	575
[표 III-다-3] 파고 적용 전 피복재 포설조건 .....	576
[표 III-다-4] 침강 후 피복재 단위중량, 간극비 변화 .....	577
[표 III-다-5] 실험조건에 따른 피복재 최대침식량 .....	579
[표 III-다-6] 입력변수값 .....	581
[표 III-다-7] 이론식에 의한 파고변화에 따른 유속 .....	581
[표 III-다-8] 수심 1.0~1.2 m에서의 유속계측결과 .....	582
[표 III-다-9] 수심 1.0~1.2 m에서의 이론값과 계측값의 비교 .....	583
[표 III-다-10] 파고에 따른 피복재 형상(ripple)변화 계산 결과 .....	584
[표 III-다-11] 이론식 및 실험결과에 의한 피복재 형상(ripple) 결과 비교 .....	585
[표 III-라-1] N해역의 2013년 과 2014년 결과 비교 .....	589
[표 III-라-2] Bench-scale test 용 공정수 내 처리제의 농도 .....	596
[표 III-라-3] 부영양화 관련 평가항목, 기준농도 및 평가점수 .....	599
[표 III-라-4] 유해화학물질 관련 평가항목, 기준농도 및 산출방식 .....	600
[표 III-라-5] 고액비의 비율과 교반기 속도에 따른 혼합결과 .....	601
[표 III-라-6] 고액비 1:3의 대상 시료에 대한 적정 교반속도 도출 실험 .....	601
[표 III-라-7] 처리제의 종류에 따른 시간당 반응물의 부피 .....	602
[표 III-라-8] Fenton 산화법의 장·단점 및 대책 .....	619
[표 III-라-9] 선박 페인트 입자, 자력분리가능 입자(MSP) 및 나머지 입자(R)의 대자율 .....	621
[표 III-마-1] N해역 주상퇴적물의 부영양화물질 농도분포 .....	627
[표 III-마-2] N해역 주상퇴적물의 유해화학물질 농도분포 .....	627
[표 III-마-3] N해역 입경별 부영양화물질 농도분포 .....	628
[표 III-마-4] N해역 입경별 유해화학물질 농도분포 .....	628
[표 IV-가-1] 모니터링 계획 시행 및 개발을 위한 권고 6단계 프로세스 .....	664
[표 IV-가-2] 적용 가능한 모니터링 기법 .....	667
[표 IV-가-3] 피복공법 모니터링 방안 .....	668
[표 IV-가-4] 연속 조류관측 개요 .....	669
[표 IV-가-5] 유속계 제원 .....	669
[표 IV-가-6] PC1 정점 유속 통계분석 결과 .....	671
[표 IV-가-7] 부산 감만항 해수 및 표층 퇴적물 조사지점별 위치좌표 .....	671
[표 IV-가-8] 2015년 2월과 5월 현장 피복 대상 지점 표층 퇴적물 중 중금속들의 총농도 변화 .....	683
[표 IV-가-9] 2015년 2월 부산 감만항 조사지점별 위치좌표 .....	688
[표 IV-가-10] 5단계의 BPI-level .....	691

[표 IV-가-11] 조사지점별 중형저서동물의 분류군별 출현양상 .....	692
[표 IV-가-12] 2월에 지점별 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상 및 주요생물 .....	695
[표 IV-가-13] 2월 조사정점별 출현한 대형저서동물의 출현양상 및 서식밀도 .....	696
[표 IV-가-14] 5월 지점별 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상 및 주요생물 .....	697
[표 IV-가-15] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	698
[표 IV-가-16] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 조사지점별 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	699
[표 IV-가-17] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 조사지점별 상위 5.0% 이상인 우점종 .....	699
[표 IV-가-18] 2015년 5월 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	702
[표 IV-가-19] 2015년 5월 출현한 대형저서동물의 조사지점별 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	703
[표 IV-가-20] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수 .....	704
[표 IV-가-21] 2015년 5월 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수 .....	705
[표 IV-가-22] Similarity matrix .....	706
[표 IV-가-23] 2월과 5월에 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상의 비교 .....	707
[표 IV-가-24] 식성지수공식을 응용한 BPI-Levels .....	708
[표 IV-가-25] 2015년 2월 부산항 조사정점별 산출된 BPI-Levels .....	709
[표 IV-가-26] 2015년 2월 부산항 피복지와 대조구 산출된 BPI-Levels .....	709
[표 IV-가-27] 2015년 5월 부산항 피복지와 대조구 산출된 BPI-Levels .....	710
[표 IV-가-28] 강원도 S항 퇴적물 조사 정점 좌표 .....	711
[표 IV-가-29] 폐콘크리트 열처리에 따른 화학적 조성 변화 .....	724
[표 IV-가-30] 동역학적 실험결과에 따른 유사1차 2차 모델 파라미터 .....	725
[표 IV-가-31] 폐콘크리트 열처리에 따른 Freundlich, Langmuir 모델 파라미터 .....	726
[표 IV-가-32] 레드머드의 화학적 조성 .....	730
[표 IV-가-33] 동역학적 실험결과에 따른 유사1차 2차 모델 파라미터 .....	732
[표 IV-가-34] 0.8M-ATRM의 Freundlich, Langmuir 모델 파라미터 .....	733
[표 IV-가-35] 0.8M-ATRM을 이용한 컬럼실험 조건에 따른 결과 .....	735
[표 IV-가-36] 미피복 수조 및 피복 수조의 산소소비량 비교 .....	743
[표 IV-가-37] 해양오염퇴적물 정화사업의 생산유발효과 .....	753
[표 IV-가-38] 해양오염퇴적물 정화사업의 부가가치 유발효과 .....	754
[표 IV-가-39] 해양오염퇴적물 정화사업의 취업유발효과 .....	755
[표 IV-가-40] 준설·피복 비용 (Perelo L.W., 2010) .....	756
[표 IV-가-41] 사업해역 확대의 산업연관 경제과급효과의 편익 .....	757
[표 IV-가-42] 시나리오별 해양오염퇴적물 정화사업 비용-편익 .....	758
[표 IV-나-1] 부산북항 및 부산신항 연안퇴적물의 물리화학적 특성 .....	773
[표 IV-나-2] 반응표면분석법을 위한 입력 설계변수와 레벨 .....	774
[표 IV-나-3] 중심합성계획법을 이용하여 설계한 실험계획 .....	774
[표 IV-나-4] 설계인자들의 CCD matrix와 COD저감, VS저감 및 중금속 안정화 .....	777
[표 IV-나-5] 설계변수에 대한 모델의 정밀도, 결정계수, 유의성 등 quadratic model의 적정성 .....	780
[표 IV-나-6] Pyrosequencing 분석 .....	792



[표 IV-나-7] 부산북항 및 부산신항 연안퇴적물의 물리화학적 특성 .....	795
[표 IV-나-8] 연안오염퇴적물(Sed-A)과 생물활성촉진제 제작을 위한 퇴적물(Sed-B)의 물리화학적 특성 및 해수의 초기성상 .....	801
[표 IV-나-9] GC(Gas chromatography)분석조건과 검출기 조건 .....	803
[표 IV-다-1] 구역별 계획추선 .....	809
[표 IV-다-2] 포설높이 .....	810
[표 IV-라-1] 시험시공 내용 .....	812
[표 IV-라-2] 입사파 특성 .....	816
[표 IV-라-3] 입경, 파고에 따른 실험조건(모형실험 조건) .....	818
[표 IV-라-4] 이론식을 이용한 파고에 따른 유속변화 .....	818
[표 IV-라-5] 이론식을 이용한 파고에 따른 유속변화 .....	819
[표 IV-라-6] 유속계를 이용한 유속 계측 .....	819
[표 IV-라-7] 파고 변화에 따른 유속의 이론 및 실측값의 비교 .....	819
[표 IV-마-1] I항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	824
[표 IV-마-2] 오염퇴적물의 중금속 오염 특성 .....	825
[표 IV-마-3] 대상시료의 부영양화 정화지수 및 유기물 관련 오염물질의 분포특성 .....	828
[표 IV-마-4] 대상시료의 유해화학물질 정화지수 관련 오염물질의 농도분포 .....	828
[표 IV-마-5] 부영양화 관련 평가항목, 기준농도 및 평가점수 .....	829
[표 IV-마-6] 유해화학물질 관련 평가항목, 기준농도 및 산출방식 .....	829
[표 IV-마-7] N해역의 2013년 과 2014년 결과 비교 .....	830
[표 IV-바-1] 고도처리장치 반응조 Air aeration 작동시 반응시료의 온도변화 .....	857
[표 IV-바-2] 고도처리장치 반응조 O <sub>3</sub> aeration 작동시 반응시료의 온도변화 .....	858
[표 IV-바-3] 고도처리장치 반응조 O <sub>3</sub> aeration 작동시 반응시료의 온도변화 .....	859
[표 IV-바-4] 고도처리장치 반응조 O <sub>3</sub> aeration - 해수조건시료 반응시료의 온도변화 .....	865
[표 IV-바-5] 75 (63) $\mu$ m 이하크기의 입자분리를 위한 하이드로싸이클론의 입자분리 효율 .....	872
[표 IV-바-6] 32 $\mu$ m 이하크기의 입자분리를 위한 하이드로싸이클론의 입자분리 효율 .....	872
[표 IV-사-1] 화물자동차의 화물 적재기준 및 운행제한 관련 법령 검토결과 .....	882
[표 IV-사-2] 단위모듈별 주요기능 및 사양 .....	884
[표 V-가-1] P항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	901
[표 V-가-2] P항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 .....	903
[표 V-가-3] O항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	906
[표 V-가-4] O항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 .....	907
[표 V-가-5] K항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	910
[표 V-가-6] K항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 .....	911
[표 V-가-7] P항 퇴적물 및 해수의 특성 .....	912
[표 V-가-8] 석회석, 제올라이트, 모래의 물리화학적 특성 .....	913
[표 V-가-9] O항 퇴적물 특성 .....	919
[표 V-가-10] O항 퇴적물 내 중금속 용출차단을 위한 제올라이트별 물리화학적 특성 .....	919

[표 V-가-11] K항 퇴적물 및 해수의 특성 .....	925
[표 V-가-12] 페콘크리트의 물리화학적 특성 .....	925
[표 V-가-13] 페콘크리트와 900℃ 열처리한 페콘크리트의 화학적 조성 및 비표면적 분석결과 .....	932
[표 V-가-14] 900℃ 열처리한 페콘크리트의 동역학적 실험결과에 따른 모델 파라미터 .....	934
[표 V-가-15] 900℃ 열처리한 페콘크리트의 평형흡착 실험결과에 따른 모델 파라미터 .....	935
[표 V-가-16] 석회석의 화학적 구성성분과 비표면적 .....	940
[표 V-가-17] 900℃ 열처리한 석회석의 동역학적 흡착 실험결과에 따른 모델 파라미터 .....	942
[표 V-가-18] 900℃ 열처리한 석회석의 평형흡착 실험결과에 따른 모델 파라미터 .....	943
[표 V-가-19] Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 동역학적 흡착실험에 따른 모델 파라미터 .....	947
[표 V-가-20] Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 평형 흡착실험에 따른 모델 파라미터 .....	948
[표 V-가-21] G항 오염퇴적물의 물리화학적 특성 .....	953
[표 V-가-22] 피복시공 전후 G항 해수 중금속 농도 평균 .....	955
[표 V-가-23] 5단계의 BPI-level .....	957
[표 V-가-24] 건강도 지수 등급에 따른 구배 .....	958
[표 V-가-25] 시공전 피복지에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상 .....	959
[표 V-가-26] 시공전 대조구에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상 .....	960
[표 V-가-27] 시공후 피복지에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상 .....	961
[표 V-가-28] 시공후 대조구에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상 .....	961
[표 V-가-29] 시공전 전체 해역에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	965
[표 V-가-30] 시공전 피복지에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	965
[표 V-가-31] 시공전 대조구에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	966
[표 V-가-32] 시공후 전체 해역에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	967
[표 V-가-33] 시공후 피복지에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	967
[표 V-가-34] 시공후 대조구에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종 .....	968
[표 V-가-35] 시공후 대형저서동물 건강도 평가 .....	969
[표 V-가-36] 피복재 포설위치 및 지반조사 위치 .....	970
[표 V-가-37] 지반조사 투입장비 .....	971
[표 V-가-38] 포설재 확인 결과 .....	973
[표 V-가-39] 부산 G항 시공 전 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 .....	974
[표 V-가-40] 부산 G항 시공 후 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 .....	976
[표 V-가-41] 부산 G항 대조군 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 .....	976
[표 V-나-1] 중금속 오염 퇴적물의 중금속별 농도 .....	978
[표 V-나-2] 부산북항 및 부산신항 연안퇴적물의 물리화학적 특성 .....	990
[표 V-다-1] 피복재 입경 선정을 위한 입력변수 .....	1005
[표 V-다-2] 원형상 8초(모형상 2.53초) 주기 조건에 대한 피복재 침식 실험결과 .....	1006
[표 V-다-3] 원형상 10초(모형상 3.16초) 주기 조건에 대한 피복재 침식 실험결과 .....	1007
[표 V-다-4] 원형상 12초(모형상 3.80초) 주기 조건에 대한 피복재 침식 실험결과 .....	1008
[표 V-다-5] 시공 중 모니터링 방안 .....	1011

[표 V-다-6] 장기 모니터링 방안 .....	1011
[표 V-라-1] 시공내용 .....	1014
[표 V-라-2] Hemisphere DGPS의 제원 .....	1027
[표 V-라-3] 멀티빔음향측심기의 제원 .....	1027
[표 V-라-4] 모션센서와 자이로컴퍼스의 제원 .....	1028
[표 V-라-5] 표층음속측정기(SVP-70)의 제원 .....	1028
[표 V-라-6] 수중음속단면측정기(SVP-15)의 제원 .....	1029
[표 V-라-7] 패치테스트 실행방법 .....	1032
[표 V-라-8] 음파속도 변화표 .....	1033
[표 V-라-9] 해저면영상조사기(SSS) 제원 .....	1039
[표 V-라-10] 시공구역좌표 .....	1041
[표 V-마-1] 정화 처리시스템의 물질수지 .....	1056
[표 V-마-2] 정화 처리시스템의 각 장치별 소요 전력 .....	1056
[표 V-마-3] 한국전력 전기 요금 체계 .....	1057
[표 V-마-4] 발전기 용량별 연료 소모량 .....	1057
[표 V-마-5] 기존 해양오염퇴적물 정화사업 단가 대비 정화 처리시스템의 운전 비용 .....	1058
[표 V-마-6] 조사정점 및 상세자료 .....	1059
[표 V-마-7] N1 시료의 부영양화 정화지수 및 유기물 관련 오염물질의 특성 .....	1063
[표 V-마-8] 대상시료의 유해화학물질 정화지수 관련 오염물질의 농도 및 정화기준 비교 .....	1063
[표 V-마-9] 부영양화 관련 평가항목, 기준농도 및 평가점수 .....	1064
[표 V-마-10] 고도산화처리 동안의 시료 온도 .....	1070
[표 V-마-11] 세척 및 고도산화처리 동안의 시료 온도 .....	1071
[표 V-마-12] 시간 대 별 고도산화처리장치 내 용존오존 및 용존산소 농도의 변화 .....	1073
[표 V-마-13] 유량 및 고약비 조절을 위한 시료 투입 펌프 속도 .....	1077
[표 V-마-14] 정화 대상 시료의 분급 별 COD농도와 IL .....	1078
[표 V-마-15] 세척 공정(40분) 후 분급 별 부영양화 정화지수 변화 .....	1081
[표 V-마-16] 시료 저류조와 세척조에서의 퇴적물 입자 크기별 구성비 .....	1098
[표 V-마-17] 조립질 분급을 위한 하이드로사이클론에서의 분급효율 .....	1098
[표 V-마-18] 세립질 분급을 위한 하이드로사이클론에서의 분급효율 .....	1099
[표 V-마-19] 세립질 분급 향상을 위한 다단 하이드로사이클론에서의 분급효율 .....	1101
[표 V-마-20] 방류수 수질기준 및 오염퇴적물 정화공정수의 특성 .....	1107
[표 V-마-21] 맹검분석 의뢰 기관 .....	1107
[표 V-마-22] 고도처리공정의 시간에 따른 TOC 농도의 교차분석 결과 .....	1108
[표 V-마-23] 고도처리공정의 시간에 따른 중금속 농도의 교차분석 결과 .....	1109
[표 V-마-24] 사업해역 확대의 산업연관 경제파급효과의 편익 .....	1118
[표 V-바-1] N해역 주상퇴적물의 부영양화물질 농도분포 .....	1129
[표 V-바-2] N해역 입경별 부영양화물질 농도분포 .....	1129
[표 V-바-3] 상용규모 설계에 반영된 연구결과 .....	1130

[표 V-바-4] N해역 대상 오염퇴적물 현장실증 물질수지 ..... 1131  
[표 V-바-5] 단위 모듈별 주요기능 및 사양 ..... 1131

## 〈 그림 - 목 차 〉

[그림 I-가-1] 오염퇴적물 정화·복원 방법선택 순서도 .....	15
[그림 I-가-2] 미육군공병단과 EPA의 오염퇴적물 정화·복원 방법선택 결정구조 .....	17
[그림 I-가-3] Super Fund 프로젝트의 오염퇴적물 정화·복원 방법선택 결정구조 .....	18
[그림 I-가-4] 정화·복원 방법 선택의 접근 방향 사례 .....	19
[그림 I-가-5] 정화기술 선정과정 흐름도 .....	21
[그림 I-가-6] 해양오염퇴적물 정화복원 대책 기술 선정 흐름 .....	25
[그림 I-가-7] 일본의 해양오염퇴적물 재활용 사례 .....	34
[그림 I-다-1] K해역 시추퇴적물의 입도구성 및 퇴적물성 .....	54
[그림 I-다-2] R해역 퇴적물의 조성 .....	55
[그림 I-다-3] S해역 시추퇴적물의 입도구성 및 퇴적물성 .....	57
[그림 I-라-1] 자연정화방법과 관련된 해양오염퇴적물 정화기작 .....	63
[그림 I-라-2] 표면피복방법 디자인 사례 .....	66
[그림 I-라-3] 표면피복방법의 대표적인 사례 .....	67
[그림 I-라-4] 실험실에서 표면피복방법의 형성과정 실험 사례 .....	70
[그림 I-라-5] 표면피복방법의 다양한 디자인 사례 .....	71
[그림 I-라-6] 표면피복방법의 다양한 방법 사례 .....	72
[그림 I-라-7] 준설과정의 일반적인 처리과정 .....	73
[그림 I-라-8] 기계식 및 유압식 준설방법 사례 .....	75
[그림 I-라-9] 미국 환경보호청의 오염퇴적물 관리구조 .....	77
[그림 I-라-10] 미국 뉴욕항에서의 준설 모습 및 PCB 농도 측정 연구 결과 .....	78
[그림 I-라-11] 유럽 로테르담항에서의 오염퇴적물 정화·복원 사례 .....	81
[그림 I-라-12] 각 지방 환경청 관내 토양정화업체의 기간별 변화 .....	83
[그림 I-라-13] 기계식 준설장비 .....	85
[그림 I-라-14] 유압식 준설장비 .....	85
[그림 I-라-15] 버켓라다 준설기 .....	86
[그림 I-라-16] 버켓라다 준설기의 위치제어 및 운용 방법 .....	86
[그림 I-라-17] 그랩 준설선 .....	87
[그림 I-라-18] 그랩 준설선의 준설 유형 .....	88
[그림 I-라-19] 굴삭형 준설기 .....	88
[그림 I-라-20] 굴삭형 준설기의 준설 유형 .....	89
[그림 I-라-21] 바지 이송형 흡입 준설선 .....	90
[그림 I-라-22] 표준 프레임 흡입 준설선 .....	90
[그림 I-라-23] 심층 흡입 준설선 .....	90
[그림 I-라-24] 더스트팬형 준설기 .....	91
[그림 I-라-25] 플레인 흡입준설기에 의한 준설 유형 .....	91
[그림 I-라-26] 환경그랩의 모식도 .....	95

[그림 I-라-27] 케이블에 매달린 환경그랩 .....	95
[그림 I-라-28] 환경그랩과 일반 그랩의 준설과정의 차이] .....	96
[그림 I-라-29] 환경오거준설선 .....	96
[그림 I-라-30] 원통형 모양의 디스크바닥준설선 .....	97
[그림 I-라-31] 국자형헤드와 일반적인 모양 .....	98
[그림 I-라-32] 저혼탁준설헤드 .....	98
[그림 I-라-33] 소형 이동식 오탁방지막과 밀폐형 그랩에 의한 준설 .....	99
[그림 I-라-34] 환경준설의 개념 모식도 및 과정들 .....	100
[그림 I-마-1] Site location of field survey .....	106
[그림 I-마-2] Distribution of sea water depth in the survey area .....	107
[그림 I-마-3] Total magnetic field in the survey area .....	108
[그림 I-마-4] Distribution of magnetic anomaly .....	109
[그림 I-마-5] Ropes shown in sidescan sonar images in the survey area .....	109
[그림 I-마-6] Sub-bottom profiles in the survey area .....	110
[그림 I-마-7] Oasis montajiTM를 이용한 자력값의 해석 결과 .....	112
[그림 I-마-8] 수리모형실험을 위한 오탁방지막의 설치 .....	115
[그림 I-마-9] 유속에 따른 오탁방지막의 변형도 예측 모형 .....	116
[그림 I-마-10] 유속에 따른 오탁방지막의 변형도 .....	116
[그림 I-마-11] 실험 유속에 따른 오탁방지막의 변형도 비교 .....	117
[그림 I-마-12] 유속에 따른 barrier의 거동 .....	117
[그림 I-바-1] 석회석의 흡착평형 .....	120
[그림 I-바-2] 석회석 Freundlich model fit .....	121
[그림 I-바-3] 석회석 pH 변화에 따른 흡착 .....	122
[그림 I-바-4] 해수와 증류수에서의 제거특성 비교 .....	123
[그림 I-바-5] 제올라이트의 흡착평형 .....	123
[그림 I-바-6] 제올라이트 Freundlich model fit .....	124
[그림 I-바-7] 제올라이트 pH 변화에 따른 흡착 .....	125
[그림 I-바-8] 해수와 증류수에서의 제거특성 .....	126
[그림 I-바-9] 적니의 흡착평형 그래프 .....	126
[그림 I-바-10] 적니 Freundlich model fit .....	127
[그림 I-바-11] 적니 pH 변화에 따른 흡착 .....	128
[그림 I-바-12] 해수와 증류수에서의 제거특성 .....	129
[그림 I-바-13] 굴폐각 흡착평형 그래프 .....	129
[그림 I-바-14] 굴폐각 Freundlich model fit .....	130
[그림 I-바-15] 굴폐각 pH 변화에 따른 흡착 .....	131
[그림 I-바-16] 해수와 증류수에서의 제거특성 비교 .....	132
[그림 I-바-17] 반응성 피복소재 후보군 실험 전 후 표면사진 .....	133
[그림 I-바-18] 생물흡착을 통한 중금속 안정화 모식도 .....	141

[그림 I-바-19] 황환원 미생물을 통한 중금속 안정화 모식도 .....	141
[그림 I-바-20] 인천 북항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 비율 .....	143
[그림 I-바-21] 미생물 배양 인큐베이터 (좌)와 혐기성 조건을 gas purging 시설(우) .....	144
[그림 I-바-22] 균주 배양 bottle (좌)와 UV-vis. spectroscope(우) .....	144
[그림 I-바-23] 영양배지에서 다른 pH에서의 Enterobacter cloacae의 성장곡선 .....	144
[그림 I-바-24] 인공바닷물에서 다른 pH에서의 Enterobacter cloacae의 성장곡선 .....	145
[그림 I-바-25] 영양배지에서 다른 pH에서의 Desulfovibrio desulfuricans의 성장곡선 .....	145
[그림 I-바-26] 인공바닷물에서 다른 pH에서의 Desulfovibrio desulfuricans의 성장곡선 .....	145
[그림 I-바-27] Enterobacter cloacae의 중금속에 대한 내성 .....	146
[그림 I-바-28] Desulfovibrio desulfuricans의 중금속에 대한 내성 .....	147
[그림 I-바-29] Pb이온에 의한 기능성 금나노입자의 반응 모식도 .....	148
[그림 I-바-30] Pb이온에 의한 기능성 금나노입자 용액의 색변화 .....	148
[그림 I-바-31] 형광 quenching 효과를 이용한 Pb검출 모식도 .....	148
[그림 I-바-32] 형광 quenching 효과를 이용한 Pb검출 .....	149
[그림 I-바-33] 미세조류의 중금속 독성에서의 생존능력 .....	152
[그림 I-바-34] ICP-OES를 이용한 중금속 농도 측정조건 .....	153
[그림 I-바-35] 미세조류에 의한 중금속(Zn, Cr)의 흡착 곡선 .....	153
[그림 I-바-36] 중금속 연속 흡착 모델 .....	154
[그림 I-바-37] 착저형 해양콘관입시험장비 .....	168
[그림 I-바-38] 해상작업선 .....	168
[그림 I-바-39] 해성점토층 두께분포 .....	170
[그림 I-바-40] 해안선에 따른 해성점토의 특성 .....	170
[그림 I-바-41] 오염 퇴적층 시추시료 사례 .....	171
[그림 I-바-42] 피복방법의 개요 .....	171
[그림 I-바-43] 피복단면 .....	172
[그림 I-바-44] 초연약지반에서의 모래 포설 .....	176
[그림 I-바-45] 피복의 안정해석 .....	177
[그림 I-바-46] 피복 하중에 대한 오염퇴적물의 지지력 검토 .....	180
[그림 I-바-47] 해저퇴적층 표면 .....	180
[그림 I-바-48] 해저 지반 시료 채취(샘플러) 방법 .....	181
[그림 I-바-49] 국내 가용 Setting Barge 현황 및 특성 분석 .....	182
[그림 I-바-50] 피복공법의 개념도 .....	182
[그림 I-바-51] 현장 피복공법 적용 단계 도식 .....	185
[그림 I-바-52] CASE III 시나리오 개념도 .....	186
[그림 I-바-53] 피복재 포설 장비별 피복공법 적용 개념도 .....	187
[그림 I-바-54] 입자 크기에 따른 수심 20 m 침강 시간 .....	188
[그림 I-바-55] 현장 캡핑 설계 예시 .....	189
[그림 I-바-56] Bioturbation 개념도 .....	190

[그림 I-바-57] Illustration of zones of bioturbation .....	191
[그림 I-바-58] hPRB을 이용한 현장 캡핑 개념도 .....	193
[그림 I-바-59] 반응성물질(Reactive materials)의 실용화 단계 .....	194
[그림 I-사-1] 회분식 실험 장치 .....	197
[그림 I-사-2] 통계학적 방법을 활용한 환경조건에 따른 해양퇴적물의 인산염 평형 용출 농도 변화 .....	199
[그림 I-사-3] 회분식 실험 전·후 퇴적물 내 인 존재형태별 상대적 함량 비교 .....	200
[그림 I-사-4] 칼럼 실험 도면 및 장치 .....	201
[그림 I-사-5] 칼럼 실험 시 pH, DO, 온도 .....	201
[그림 I-사-6] 칼럼실험 시간에 따른 인산염 농도 변화 .....	202
[그림 I-사-7] 칼럼실험 시간에 따른 T-N, COD <sub>Mn</sub> 농도 변화 .....	202
[그림 I-사-8] 국내외 오염퇴적물 처리기술 연구동향 .....	203
[그림 I-사-9] 오염토양세척시스템 개략도 .....	215
[그림 I-사-10] 여수시 정화시범사업 설정화장치 .....	215
[그림 I-사-11] 미국 Biogenesis 사례 .....	216
[그림 I-사-12] 독일 METHA Plant 사례 .....	216
[그림 I-사-13] DEME 처리 시스템 .....	217
[그림 I-사-14] 해양오염퇴적물 처리단계별 단위기술 .....	218
[그림 I-사-15] 해양오염퇴적물 현장처리 모듈 및 단위기술예시 .....	219
[그림 I-사-16] 제강슬래그 복토정화법의 모식도 .....	220
[그림 I-사-17] 복토정화법에 사용되는 반응성 재료들의 적용 두께 및 경제성 비교 .....	221
[그림 I-사-18] column 시험에서 air lift 사용 전(좌), air lift 사용 후(우) .....	232
[그림 I-사-19] 반응성 차단제 개발을 위한 토양표면개질 연구개요 .....	233
[그림 I-사-20] 반응성 차단제의 오염물질 흡착능 평가를 위한 연구개요 .....	233
[그림 I-사-21] 반응성 차단제의 차단효과 검증을 위한 Column 시험 개요 .....	234
[그림 I-사-22] Column 시험에서 와류강도에 따른 총질소의 용출 .....	237
[그림 I-사-23] Column 시험에서 와류강도에 따른 총인의 용출 .....	237
[그림 I-사-24] 진탕법을 이용한 계면활성제의 준설토 표면 개질을 .....	238
[그림 I-사-25] 진탕법을 이용한 계면활성제의 벤토나이트 표면 개질을 .....	239
[그림 I-사-26] 진탕법을 이용한 계면활성제의 제올라이트 표면 개질을 .....	239
[그림 I-사-27] 초음파조사법을 이용한 계면활성제의 준설토 표면 개질을 .....	240
[그림 I-사-28] 초음파조사법을 이용한 계면활성제의 벤토나이트 표면 개질을 .....	240
[그림 I-사-29] 초음파조사법을 이용한 계면활성제의 제올라이트 표면 개질을 .....	240
[그림 I-사-30] 극초단파조사법을 이용한 계면활성제의 준설토 표면 개질을 .....	241
[그림 I-사-31] 극초단파조사법을 이용한 계면활성제의 벤토나이트 표면 개질을 .....	241
[그림 I-사-32] 극초단파조사법을 이용한 계면활성제의 제올라이트 표면 개질을 .....	241
[그림 I-사-33] Shaking 방법을 이용한 반응시간별 개질 효율 .....	242
[그림 I-사-34] 반응성 차단제 제작방법 .....	242
[그림 I-사-35] 계면활성제로 표면 개질된 반응성 차단제의 암모니아성 질소 흡착율 .....	243



[그림 I-사-36] 계면활성제로 표면 개질된 반응성 차단제의 질산성 질소 흡착률 .....	244
[그림 I-사-37] 계면활성제로 표면 개질된 반응성 차단제의 총인 흡착율 .....	244
[그림 I-사-38] 반응성 차단제를 복토한 Column 실험에서 총질소의 용출농도 .....	246
[그림 I-사-39] 반응성 차단제를 복토한 Column 실험에서 총인의 용출농도 .....	246
[그림 I-아-1] 오염된 퇴적물의 자연적인 복원과정 .....	248
[그림 I-아-2] 오염퇴적물 노출 시나리오 모델링 framework .....	255
[그림 I-아-3] 인간건강보호를 위한 효율평가를 위한 개념 모델 .....	256
[그림 I-아-4] 생태복원 관점의 효율평가를 위한 개념 모델 .....	256
[그림 I-자-1] 투입-산출분석의 흐름도 .....	267
[그림 I-자-2] 투입-산출분석의 데이터 구조 .....	268
[그림 I-자-3] 해역별 화학적 산소요구량 추이, 2002-2010년 .....	281
[그림 I-자-4] 연안수질과 인접 시군 원인별 사망률 간의 상관관계, 2005-2010년 .....	284
[그림 I-자-5] 연령별 연평균임금 추정 결과, 2010년 .....	291
[그림 I-자-6] 연령별 사망에 따른 임금손실 추정 결과 .....	293
[그림 II-가-1] 피복소재들의 SEM 이미지 .....	296
[그림 II-가-2] 피복소재들의 동적흡착 특성 비교 .....	298
[그림 II-가-3] 피복소재들의 Freundlich model과 Langmuir model 비교 .....	299
[그림 II-가-4] 피복소재들의 pH 변화에 따른 흡착 특성 비교 .....	301
[그림 II-가-5] 해수와 담수에서의 혼합중금속 제거 특성 비교 .....	302
[그림 II-가-6] 피복소재들에 의한 유기오염물질(Naphthalene)의 흡착 제거 비교 .....	303
[그림 II-가-7] 중금속 안정화 실험용 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도 .....	304
[그림 II-가-8] K항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 비율 .....	305
[그림 II-가-9] 순환골재를 이용한 처리기간에 따른 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과 .....	306
[그림 II-가-10] 제강슬래그를 이용한 처리기간에 따른 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과 .....	307
[그림 II-가-11] 벤토나이트를 이용한 처리기간에 따른 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과 .....	308
[그림 II-가-12] 각 피복소재별 Naphthalene 고정화 흡착 제거율 비교 .....	310
[그림 II-가-13] 혼합 피복소재들의 동적흡착 특성 비교 .....	311
[그림 II-가-14] 혼합 피복소재들의 Freundlich model과 Langmuir model 비교 .....	313
[그림 II-가-15] 혼합 피복소재들의 pH 변화에 따른 흡착 특성 비교 .....	315
[그림 II-가-16] 해수와 담수에 있어서 혼합 피복소재들의 중금속 흡착 특성 비교 .....	316
[그림 II-가-17] 혼합 오염물질(중금속+유기오염물질)에서의 각 피복소재별 중금속 흡착 제거율 비교 .....	317
[그림 II-가-18] 혼합 오염물질(중금속+유기오염물질)에서의 각 피복소재별 흡착 제거율 비교 .....	318
[그림 II-가-19] 컬럼 실험 모식도 및 인(Phosphorus)용출차단 컬럼실험장치 .....	320
[그림 II-가-20] PAHs(Naphthalene) 컬럼 실험 모식도 및 PAHs(Naphthalene)용출차단 컬럼실험장치 .....	321
[그림 II-가-21] 중금속 용출차단 수조실험장치 모식도 및 중금속 용출차단 수조실험장치 .....	321
[그림 II-가-22] 제강슬래그의 피복두께, 유량(유속), 농도에 따른 인 용출차단 효율 .....	323
[그림 II-가-23] 활성탄 컬럼실험에 따른 PAHs(Naphthalene)용출차단 효율 .....	323
[그림 II-가-24] 순환골재, 벤토나이트, 모래 피복에 따른 pH변화 .....	324

[그림 II-가-25] 순환골재, 벤토나이트, 모래 피복에 따른 pH, EC, DO 변화 .....	324
[그림 II-가-26] 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 pH 변화 .....	325
[그림 II-가-27] 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 EC, DO 변화 .....	325
[그림 II-가-28] 순환골재, 벤토나이트, 모래피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도 (a: As <sup>3+</sup> , b: Zn <sup>2+</sup> ) .....	326
[그림 II-가-29] 순환골재, 벤토나이트, 모래피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도 (a: Pb <sup>2+</sup> , b: Ni <sup>2+</sup> , c: Cu <sup>2+</sup> , d: Cr <sup>6+</sup> ) .....	326
[그림 II-가-30] 순환골재, 벤토나이트, 모래피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도(Cd <sup>2+</sup> ) .....	327
[그림 II-가-31] 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도 (a: As <sup>3+</sup> , b: Zn <sup>2+</sup> ) .....	327
[그림 II-가-32] 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도 (a: Pb <sup>2+</sup> , b: Cu <sup>2+</sup> , c: Cr <sup>6+</sup> ) .....	328
[그림 II-가-33] 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도 (a: Ni <sup>2+</sup> , b: Cd <sup>2+</sup> ) .....	328
[그림 II-가-34] 순환골재, 벤토나이트, 모래 피복에 의한 퇴적물 내 중금속 안정화/고정화 효율 .....	330
[그림 II-가-35] 석회석, 활성탄, 제강슬래그 피복에 의한 퇴적물 내 중금속 안정화/고정화 효율 .....	332
[그림 II-가-36] 활성탄, 유기점토, 벤토나이트 피복에 따른 오염퇴적물 내 PCBs(2,4'-Dichlorobiphenyl) 용출도 .....	332
[그림 II-가-37] 생태 수조 실험 장치 .....	333
[그림 II-가-38] 피복소재에 의한 유기물 저감 효과 .....	334
[그림 II-가-39] 피복소재에 의한 영양염류 저감 효과 .....	334
[그림 II-가-40] 피복소재에 의한 중금속 용출 저감 효율 비교 .....	335
[그림 II-가-41] 피복소재에 의한 중금속 안정화 효율 비교(순환골재 피복) .....	335
[그림 II-가-42] 피복소재에 의한 중금속 안정화 효율 비교(모래 피복) .....	336
[그림 II-가-43] 피복소재에 의한 중금속 안정화 효율 비교(대조군) .....	336
[그림 II-가-44] 피복소재에 의한 탁도(Turbidity)의 변화 비교 .....	337
[그림 II-나-1] 미생물의 생체 흡착 및 생체 축적에 의한 중금속 제거 .....	338
[그림 II-나-2] 산화·환원을 이용한 중금속 안정화 .....	339
[그림 II-나-3] 미생물 성장곡선 .....	339
[그림 II-나-4] 생물소재에 의한 중금속 제거효율 비교 .....	340
[그림 II-나-5] SRB(Sulfate reducing bacteria)의 중금속 안정화 메커니즘 .....	341
[그림 II-나-6] Desulfovibrio desulfuricans의 이온성과 비양이온성 중금속의 제거량 .....	341
[그림 II-나-7] Desulfovibrio desulfuricans의 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 의 유무에 따른 중금속의 제거] .....	342
[그림 II-나-8] 황환원균에 의한 Cr <sup>6+</sup> 의 제거 양상 .....	342
[그림 II-나-9] Desulfovibrio desulfuricans 의 중금속에 대한 내성 .....	343
[그림 II-나-10] 다양한 중금속 허용 범위 기준 농도에서의 제거율 .....	344
[그림 II-나-11] 순환골재의 표면 및 미생물이 고정화된 순환골재 표면 SEM 이미지 .....	345
[그림 II-나-12] 담체와 미생물 담체를 이용한 양이온성 제거율 비교 .....	346
[그림 II-나-13] 담체와 미생물 담체를 이용한 비양이온성 제거율 비교 .....	347

[그림 II-나-14] 해양저질조사를 위한 샘플링 .....	347
[그림 II-나-15] 해양저질샘플의 입도분석 .....	348
[그림 II-나-16] 해양저질샘플의 미생물 군집분석 .....	348
[그림 II-나-17] 해양저질샘플의 COD 분석 .....	348
[그림 II-나-18] 해양저질샘플의 자생미생물의 활성 실험 .....	349
[그림 II-나-19] 불형태로 제작한 생물활성촉진제 .....	350
[그림 II-나-20] 생물활성촉진물질을 담지한 활성탄; GAC .....	351
[그림 II-나-21] 실험실 규모의 컬럼 실험 .....	352
[그림 II-나-22] 생물활성촉진볼을 이용한 현장칼럼실험 .....	352
[그림 II-나-23] 배양온도에 따른 유기물 분해율 .....	356
[그림 II-나-24] 생물활성촉진물질로 배양한 해양저질의 중금속분포도 .....	357
[그림 II-나-25] 셀룰로스 아세테이트 코팅 생물활성촉진볼 SEM이미지 .....	358
[그림 II-나-26] 생물활성물질을 담지한 입상 활성탄의 SEM이미지 .....	359
[그림 II-나-27] 정체조건에서의 생물활성촉진물질의 용출 .....	360
[그림 II-나-28] 난류조건에서의 생물활성촉진물질의 용출 .....	361
[그림 II-나-29] 폴리머 코팅 생물활성촉진볼을 이용한 칼럼실험 .....	362
[그림 II-다-1] B항 분류 체계도와 신항인근 인공매립지 .....	363
[그림 II-다-2] 피복공법 예상후보지 및 준설현황 .....	363
[그림 II-다-3] 피복공법 적용이 가능한 준설선 현황 .....	364
[그림 II-다-4] 피복재 입도분포 .....	365
[그림 II-다-5] 실내실험 후보시료별 입도분포 .....	365
[그림 II-다-6] 피복재 포설 실내실험 장비 .....	366
[그림 II-다-7] 실리카 분말을 활용한 피복재 침강 및 침식 실내실험 결과 .....	367
[그림 II-다-8] 가는 모래를 활용한 피복재 침강 및 침식 실내실험 결과 .....	367
[그림 II-다-9] STFATE 기본 격자망도 .....	368
[그림 II-다-10] 처분시 사용되는 그레브 준설선 .....	369
[그림 II-다-11] 실내실험과 수치해석 결과 비교 .....	369
[그림 II-라-1] 중금속 안정화 실험용 오염퇴적물 샘플링(K항) .....	370
[그림 II-라-2] K항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 비율 .....	371
[그림 II-라-3] I항의 시료 채취지점 .....	371
[그림 II-라-4] I항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 비율 .....	372
[그림 II-라-5] 해양저질조사를 위한 샘플링 .....	373
[그림 II-라-6] 각해역의 입자별 함량 .....	375
[그림 II-라-7] 각해역의 입자별 화학적 산소요구량(COD) 농도 .....	376
[그림 II-라-8] 각해역의 입자별 강열감량(IL) 농도 .....	376
[그림 II-라-9] 각해역의 입자별 산 휘발성황화물(AVS) 농도 .....	376
[그림 II-라-10] 각해역의 입자별 총 유기탄소(TOC) 농도 .....	376
[그림 II-라-11] 각해역의 입자별 중금속 농도 .....	378

[그림 II-마-1] 퇴적물 내 오염물질의 존재 형태 .....	379
[그림 II-마-2] 오염물질의 결합 형태에 따른 첨가제의 처리 가능성 .....	381
[그림 II-마-3] 다양한 장치에 따른 분리 가능 범위 .....	387
[그림 II-마-4] Vibratory Sieve Shaker, Fritsch, Germany .....	389
[그림 II-마-5] 대상 해역의 입자 분리 결과 입도 분포 및 평균 .....	390
[그림 II-마-6] 각 해역의 입자별 부영양화 정화지수(CIET) 및 평균 .....	391
[그림 II-마-7] 각 해역의 입자별 유해화학물질 정화지수(CIHC) 및 평균 .....	391
[그림 II-마-8] 대상해역 퇴적물의 입경별 상대적인 분포 .....	392
[그림 II-마-9] 하이드로 싸이클론을 이용한 입자 분리 메커니즘 .....	393
[그림 II-마-10] 세척기반 처리기술 공정 흐름도 .....	396
[그림 II-마-11] 각 해역 퇴적물의 입자별 TOC 제거율 .....	398
[그림 II-마-12] 각 해역 퇴적물의 입자별 COD 제거율 .....	399
[그림 II-마-13] 각 해역 퇴적물의 입자별 IL 제거율 .....	400
[그림 II-마-14] 기초실험 전·후 각 해역 퇴적물의 입자별 부영양화 정화지수 .....	400
[그림 II-마-15] 계면활성제로 처리한 퇴적물의 입자별 TOC 제거효율 .....	403
[그림 II-마-16] 계면활성제로 처리한 퇴적물의 입자별 COD 제거효율 .....	404
[그림 II-마-17] 계면활성제로 처리한 퇴적물의 입자별 IL 제거효율 .....	405
[그림 II-마-18] 심화 실험 전·후 각 해역 퇴적물의 입자별 부영양화 정화지수 .....	406
[그림 II-마-19] 분리 및 세척 처리기술 통합 공정 제안 .....	411
[그림 II-바-1] 전 세계 국가별 특허 점유율 현황 .....	416
[그림 II-바-2] 기술 분류별 점유율 현황 .....	417
[그림 II-바-3] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 전체 특허출원현황 .....	419
[그림 II-바-4] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 미국 특허출원현황 .....	419
[그림 II-바-5] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 한국 특허출원현황 .....	419
[그림 II-바-6] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 일본 특허출원현황 .....	420
[그림 II-바-7] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 유럽 특허출원현황 .....	420
[그림 II-바-8] 해양오염 퇴적물의 적용 가능한 처리기술 선정절차 .....	422
[그림 II-바-9] 해양오염퇴적물 처리 시스템 기본 개념도 .....	426
[그림 II-바-10] 해양오염퇴적물 처리시스템의 위치에 대한 기본 개념도 .....	426
[그림 II-바-11] 미세토 분리를 위한 가압부상공정 실험 장치 .....	429
[그림 II-바-12] 퇴적토양 회석수의 입자 크기 분포 .....	430
[그림 II-바-13] 퇴적토 회석수의 미세기포에 의한 부상을 통한 상부 고형물의 입자크기 분포 .....	430
[그림 II-바-14] 퇴적토 회석수의 미세기포 부상에 의한 중간부 고형물의 입자 크기 분포 .....	431
[그림 II-바-15] 퇴적토 회석수의 침전 고형물의 입자크기 분포 .....	432
[그림 II-바-16] 퇴적토 침전 상등액의 입자 분포 .....	432
[그림 II-바-17] 일반적인 토양세척공정 .....	434
[그림 II-바-18] 세척공정시 오염물질의 제거기작 .....	436
[그림 II-바-19] 토양세척장치의 종류 .....	438

[그림 II-바-20] 일반 교반조 .....	438
[그림 II-바-21] 입자분리기반 개념설계도 .....	441
[그림 II-바-22] 세척기반 개념설계도 .....	441
[그림 II-바-23] 세척 및 입자분리 통합 처리기술 공정별 개념설계도 .....	443
[그림 III-가-1] 피복소재 선정 주요 조건 .....	470
[그림 III-가-2] 혼합 중금속 흡착에 있어서 다양한 피복소재간의 흡착 특성 비교 .....	470
[그림 III-가-3] 반응성 피복소재들 SEM 이미지 .....	471
[그림 III-가-4] 반응성 피복소재들의 FTIR 특성 .....	473
[그림 III-가-5] 반응성 피복소재들의 Kinetic 특성 비교 .....	474
[그림 III-가-6] 피복소재들의 Freundlich model과 Langmuir model 비교 .....	477
[그림 III-가-7] 피복소재들의 pH 변화에 따른 흡착 특성 비교 .....	481
[그림 III-가-8] 해수와 담수에서의 혼합중금속 제거 특성 비교 .....	482
[그림 III-가-9] 피복소재들의 Freundlich model과 Langmuir model 비교 .....	483
[그림 III-가-10] 흡착제 양에 따른 Cr <sup>6+</sup> 의 흡착 특성 변화 .....	484
[그림 III-가-11] 대조군(오염퇴적물)에 함유된 중금속의 존재형태별 비율 .....	487
[그림 III-가-12] 피복재 첨가에 의한 오염퇴적물 내 중금속 안정화 변화 .....	489
[그림 III-가-13] 각 피복소재별 PAH 및 PCB 고정화 성능 평가 비교 .....	490
[그림 III-가-14] 2008년도 지역별 순환골재 가격동향 .....	493
[그림 III-가-15] 철강슬래그의 종류 및 재활용 용도(최상원, 2007) .....	494
[그림 III-가-16] 벤토나이트와 산성백토의 광산 분포도 .....	495
[그림 III-가-17] 1m <sup>3</sup> 규모 현장모사 수조 전경 및 피복소재들의 피복 후 전경 .....	502
[그림 III-가-18] 피복소재에 의한 COD 및 영양염류의 저감 효과 .....	503
[그림 III-가-19] 피복소재에 의한 중금속 용출 저감 효율 비교 .....	504
[그림 III-가-20] 피복소재에 의한 COD 및 영양염류의 저감 효과 .....	505
[그림 III-가-21] 피복소재에 의한 중금속 용출 저감 효율 비교 .....	506
[그림 III-가-22] 유력대상 해역 오염퇴적물 내 중금속 존재형태별 오염 현황 .....	509
[그림 III-가-23] 유력대상 해역 피복시공 환경 분석 .....	509
[그림 III-가-24] 인, 불소 용출차단 컬럼 실험 모식도 .....	511
[그림 III-가-25] 현장모사형 파랑수조 실험장치 제원 및 모식도 .....	511
[그림 III-가-26] 제강슬래그의 피복두께, 농도, 유량에 따른 인 용출차단 효율 .....	513
[그림 III-가-27] 산처리 적니의 두께에 따른 불소 용출차단 .....	514
[그림 III-가-28] 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그 피복에 따른 EC 변화 .....	515
[그림 III-가-29] 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그 피복에 따른 pH 변화 .....	516
[그림 III-가-30] 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그 피복두께에 따른 K <sub>2</sub> O 오염퇴적물 내 중7속 용출차단 .....	517
[그림 III-가-31] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복에 따른 EC 변화 .....	518
[그림 III-가-32] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복에 따른 pH 변화 .....	519
[그림 III-가-33] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복두께에 따른 M <sub>2</sub> 오염퇴적물 내 중금속 용출차단 .....	520

[그림 III-가-34] (a) Macrofauna communities and (b) meiofauna abundances in the different capping material treatments at the end of the experiment .....	525
[그림 III-가-35] 현장 피복공법 적용 10단계 .....	529
[그림 III-나-1] SRB의 sulfate 환원 메커니즘 .....	535
[그림 III-나-2] 목표 해안 주변의 퇴적물에 존재하는 여러 종류의 메탈 이온의 농도 .....	536
[그림 III-나-3] 해수의 pH에서 존재하는 Hydrogen sulfide의 형태 및 비율 .....	537
[그림 III-나-4] 인공바닷물 배지의 pH 변화 .....	538
[그림 III-나-5] 영양 배지 및 인공바닷물 배지에서의 <i>D. desulfuricans</i> 의 성장곡선 .....	538
[그림 III-나-6] 배지의 pH변화에 따른 <i>D. desulfuricans</i> 의 성장곡선 .....	539
[그림 III-나-7] Yeast의 농도 변화에 따른 <i>D. desulfuricans</i> 의 성장곡선 .....	539
[그림 III-나-8] Yeast가 중금속 제거에 미치는 영향 .....	540
[그림 III-나-9] Lactate의 농도 변화에 따른 <i>D. desulfuricans</i> 의 성장곡선 .....	540
[그림 III-나-10] FeSO <sub>4</sub> 의 농도 변화에 따른 <i>D. desulfuricans</i> 의 성장곡선 .....	540
[그림 III-나-11] 0.05% w/v FeSO <sub>4</sub> 첨가 배지에서 pH 변화에 따른 <i>D. desulfuricans</i> 의 성장곡선 .....	541
[그림 III-나-12] 각 담체 종류별 중금속 제거율 및 성분 조성 .....	542
[그림 III-나-13] 피복재를 이용한 미생물 담체의 SEM 이미지 .....	543
[그림 III-나-14] <i>D. desulfuricans</i> 를 이용한 인공해수 내의 중금속 제거율 .....	544
[그림 III-나-15] 피복재를 이용한 미생물 담체의 중금속 제거율 .....	545
[그림 III-나-16] 피복재를 이용한 담체와 미생물 담체의 중금속 제거율 비교 .....	546
[그림 III-나-17] 폴리머 코팅한 생물활성촉진제 .....	547
[그림 III-나-18] 최적운영인자 연구에 사용된 생물활성촉진제의 제작 .....	550
[그림 III-나-19] 생물활성촉진제의 최적 배치간격연구를 위하여 제작된 오염퇴적물물 .....	550
[그림 III-나-20] 생물활성촉진제의 최적운영조건 연구를 위한 Bench scale 현장실험 .....	551
[그림 III-나-21] 오염퇴적물에 자생하는 미생물의 DNA 분리에 사용한 키트 .....	552
[그림 III-나-22] 부산북항 오염퇴적물 시료의 채취위치 및 채취모습 .....	554
[그림 III-나-23] 시간에 따른 오염저질내 미생물 개체수 변화 .....	556
[그림 III-나-24] 시간에 따른 오염저질 내 pH(a), COD(b), TN(c), TP(d), VS(e)의 변화 .....	556
[그림 III-나-25] 생물활성촉진제의 효능시험 컬럼에서 오염퇴적물의 중금속 분포 변화 .....	558
[그림 III-나-26] 혐기성 및 호기성 조건에서 배양된 해양 퇴적물 시료의 자생미생물 균락 .....	559
[그림 III-나-27] 해양 퇴적물 시료에서 자생하는 미생물 DNA band .....	559
[그림 III-나-28] 해양 퇴적물 시료에서 자생하는 미생물 군집의 문(phylum)과 종(species) .....	561
[그림 III-나-29] 생물활성촉진제의 입경 및 배치간격에 따른 오염퇴적물 내 중금속의 존재형태 변화 .....	563
[그림 III-나-30] 생물활성촉진제의 입경 및 배치간격에 따른 시험 오염퇴적물의 SEM(Simultaneously Extraction of Heavy metal) 농도 및 SEM/AVS 비의 변화 .....	564
[그림 III-나-31] 퇴적물 재부상실험에서 시간에 따른 해수 내 황산염의 농도변화 .....	567
[그림 III-나-32] 퇴적물의 재부상 시간에 따른 해수 중의 중금속 농도변화 .....	568
[그림 III-나-33] 부산북항 퇴적물내 함유된 중금속 존재형태와 3시간 재부상 후 중금속 존재형태 .....	569
[그림 III-나-34] 3시간 동안의 재부상한 퇴적물의 양에 따른 해수 내 황산염농도 변화 .....	569
[그림 III-나-35] 3시간 동안 재부상한 퇴적물의 양에 따른 해수에서의 중금속 농도 .....	570

[그림 III-다-1] 해수의 pH에서 존재하는 Hydrogen sulfide의 형태 및 비율 .....	572
[그림 III-다-2] 윈터치 강사기 .....	572
[그림 III-다-3] 입사파의 파고 및 주기 .....	573
[그림 III-다-4] 피복재의 입도분포 .....	574
[그림 III-다-5] 침강 후 피복재 형상(중양부 3.0~4.0 m 구간) .....	575
[그림 III-다-6] 1회 포설량에 따른 침강형상의 비교 .....	576
[그림 III-다-7] 파고 적용 전 후의 피복재 형상의 변화(case 1~case 3) .....	577
[그림 III-다-8] 파고 적용 전 후의 피복재 형상의 변화(case 4~case 6) .....	578
[그림 III-다-9] 파고 적용 후 피복재 최대침식량의 산정(case 7~9) .....	579
[그림 III-다-10] 유속계측 사례 .....	582
[그림 III-다-11] 파고 0.2 m 적용 후 피복재 반복 주기 산정 .....	584
[그림 III-라-1] 현장 조사 및 시료채취 사진 .....	586
[그림 III-라-2] N 해역의 Sieve전과 Sieve후의 오염물질 농도 .....	587
[그림 III-라-3] N 해역 Sieve전과 Sieve후 중금속 농도 .....	588
[그림 III-라-4] N 해역 Sieve전과 Sieve후 중금속 농도 .....	588
[그림 III-라-5] 현장처리기술 시험 장치의 기본 개념 .....	591
[그림 III-라-6] 시험 장치 설계도 .....	593
[그림 III-라-7] 제작된 시험 장치 .....	594
[그림 III-라-8] 처리제 조건에 따른 반응 시 부피변화 측정 실험 .....	595
[그림 III-라-9] 처리제 조건에 따른 부피변화 측정 실험 .....	595
[그림 III-라-10] 연속공정 설계를 위한 벤치스케일 실험 .....	597
[그림 III-라-11]. 미세기포 공정 추가 설계를 위한 벤치스케일 실험(bench-scale test) .....	597
[그림 III-라-12] 자력분리기 이용 중금속 및 선박기원 유해물질을 함유한 자성입자(MSP) 분리과정 및 분리된 자성입자(MSP) .....	598
[그림 III-라-13] 처리제 조건에 따른 반응 시 부피변화 측정 실험 .....	601
[그림 III-라-14] Tween 80 0.05%가 포함된 처리제의 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 강열감량의 변화 .....	603
[그림 III-라-15] 처리제의 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 COD의 변화 .....	604
[그림 III-라-16] 처리제의 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 TOC의 변화 .....	604
[그림 III-라-17] 처리제의 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 TN의 변화 .....	605
[그림 III-라-18] 처리제의 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 TP의 변화 .....	605
[그림 III-라-19] 처리제의 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 중금속 농도의 변화 .....	607
[그림 III-라-20] 처리제의 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 PAHs 및 PCBs 농도의 변화 .....	608
[그림 III-라-21] 연속공정 설계를 위한 벤치스케일 실험(bench-scale test) .....	609
[그림 III-라-22] 연속처리 시 퇴적물의 처리시간에 따른 부영양화관련 평가물질의 농도변화 .....	609
[그림 III-라-23] 연속처리 시 퇴적물의 처리시간에 따른 기타 유기물관련 오염물질의 농도변화 .....	610
[그림 III-라-24] 연속처리 시 처리제의 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 중금속의 변화 .....	613
[그림 III-라-25] 미세기포 공정 추가 설계를 위한 벤치스케일 실험 .....	614
[그림 III-라-26] 처리공정에 미세기포 폭기(micro-bubble aeration) 시 처리 시간에 따른 퇴적물의 부영양화관련 평가물질의 농도변화 .....	615

[그림 III-라-27] 처리공정에 미세기포 폭기(micro-bubble aeration)시 처리 시간에 따른 퇴적물의 중금속 농도변화 .....	616
[그림 III-라-28] 처리제의 여러 가지 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도의 시간에 따른 퇴적물 내 생물이용가능 중금속 농도변화 .....	618
[그림 III-라-29] Fenton 반응의 메커니즘 .....	619
[그림 III-라-30] 항만 인근 퇴적물의 입도분포 및 자력분리가능 입자(MSP)의 분포 .....	621
[그림 III-라-31] 선박기원 오염물질 함유 퇴적물의 자력 분리 결과 .....	622
[그림 III-라-32] 대상해역 퇴적물의 입경별 상대적인 분포 .....	623
[그림 III-라-33] 하이드로 싸이클론을 이용한 입자 분리 메커니즘 .....	623
[그림 III-라-34] 분리 및 세척 처리기술 통합 공정 제안 .....	625
[그림 III-마-1] 단계별 공정설계 절차 .....	629
[그림 III-마-2] 해양오염퇴적물 정화설비 주요 공정 구성 .....	630
[그림 III-마-3] 입자분리 및 세척기반 통합 현장처리기술 상세공정 흐름도 .....	631
[그림 III-마-4] 해양오염퇴적물 정화설비 배치도(Lay-out) .....	647
[그림 IV-가-1] 모니터링 구현, 데이터 수집 및 분석하는 동안 의사결정 경로 .....	666
[그림 IV-가-2] 모니터링 결과 관리 의사 결정 경로 .....	666
[그림 IV-가-3] 조류 정점도 및 설치 모식도 .....	669
[그림 IV-가-4] PC1 정점의 평균 유속 .....	670
[그림 IV-가-5] PC1 정점의 유향 .....	670
[그림 IV-가-6] 부산 감만항 해수 및 표층 퇴적물 조사지점도 .....	672
[그림 IV-가-7] 부산 피복 대상지 해수 및 퇴적물 현장조사 .....	673
[그림 IV-가-8] 2015년 2월(피복 전)과 5월(피복 후) 조사 지점 해수의 pH와 수온 변화 .....	674
[그림 IV-가-9] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 조사 지점 해수의 투명도와 염분 변화 .....	675
[그림 IV-가-10] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 조사 지점 해수의 DO와 SS 변화 .....	676
[그림 IV-가-11] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 조사 지점 해수의 COD 변화 .....	676
[그림 IV-가-12] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 조사 지점 해수의 T-N과 T-P 변화 .....	677
[그림 IV-가-13] 2015년 2월과 5월 현장 피복 대상 조사 지점 해수중 중금속들의 농도 변화 .....	679
[그림 IV-가-14] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 지점 해수 중 유기오염물질 (PAHs, PCBs)의 농도 변화 .....	679
[그림 IV-가-15] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 지점 표층퇴적물의 pH와 함수율 및 입도 특성 .....	680
[그림 IV-가-16] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 지점 표층 퇴적물의 IL와 AVS .....	681
[그림 IV-가-17] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 지점 표층 퇴적물의 COD와 TOC 변화 .....	682
[그림 IV-가-18] 2015년 2월과 5월 현장 피복 대상 지점 표층 퇴적물의 T-N과 T-P 변화 .....	683
[그림 IV-가-19] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 퇴적물 중 중금속 존재비 변화 특성 .....	685
[그림 IV-가-20] 2015년 2월(피복 전) 피복 대상지 퇴적물 깊이별 COD, TOC, T-N 및 T-P 항목들 .....	686
[그림 IV-가-21] 2015년 2월(피복전) 피복 대상지 퇴적물 깊이별 중금속 농도 분포 변화 특성 .....	687
[그림 IV-가-22] 2015년 2월 부산 감만항 조사지점도(사업대상지) .....	688
[그림 IV-가-23] 현장조사 사진 .....	689



[그림 IV-가-24] 2015년 2월 부산 감만항에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현	691
[그림 IV-가-25] 2015년 2월 부산 감만항에서 출현한 중형저서 동물의 조사지점별 출현양상	692
[그림 IV-가-26] 2015년 5월 부산 감만항에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현 양상	693
[그림 IV-가-27] 2월 및 5월 피복지와 대조구에서 출현한 중형 저서동물의 변화양상	693
[그림 IV-가-28] 2월에 출현한 저서동물의 분류군별 출현비율	694
[그림 IV-가-29] 2월 대형저서동물의 조사정점별 출현양상 및 서실밀도	696
[그림 IV-가-30] 5월에 출현한 저서동물의 분류군별 출현비율	697
[그림 IV-가-31] 2월 피복예정지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수	704
[그림 IV-가-32] 5월 피복예정지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수	705
[그림 IV-가-33] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 조사지점별 집괴분석수치도	706
[그림 IV-가-34] 2015년 피복지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 월별 종조성 변화	707
[그림 IV-가-35] 2015년 부산항에서 출현한 대형저서동물 최우점종의 월별 변화 양상	708
[그림 IV-가-36] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 섭식 특서에 따른 저서오염지수	710
[그림 IV-가-37] 2014년 11월 강원도 S항 퇴적물 조사 정점	711
[그림 IV-가-38] 2014년 11월 현장 조사 및 시료채취 사진	712
[그림 IV-가-39] S항의 조사 지점별 저서 퇴적물의 물리적 특성	713
[그림 IV-가-40] S항의 조사 지점별 저서 퇴적물의 부영양화 물질 오염도	714
[그림 IV-가-41] S항 조사 지점간 퇴적물 내 중금속 농도 변화	715
[그림 IV-가-42] 실험 구성 (a) 파랑수조 모식도, (b) 파랑수조의 퇴적물 및 피복소재 구성 단면, (c) 파랑수조를 이용한 실험실 규모의 용출실험 사진	716
[그림 IV-가-43] 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사 피복에 따른 pH 및 EC 변화	717
[그림 IV-가-44] 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사 피복에 따른 중금속 용출 결과	719
[그림 IV-가-45] 1m <sup>3</sup> 규모 현장모사 수조 전경 및 피복소재들의 피복 후 전경	720
[그림 IV-가-46] 피복소재에 의한 오염물질 저감 효과	721
[그림 IV-가-47] 피복소재에 의한 중금속의 용출 저감 효과	722
[그림 IV-가-48] 폐콘크리트 열처리에 따른 동역학적 실험결과	725
[그림 IV-가-49] 폐콘크리트 열처리에 따른 평형흡착 실험결과	726
[그림 IV-가-50] 용액의 pH 변화에 따른 열처리 폐콘크리트의 흡착 실험결과	727
[그림 IV-가-51] 용액 내 경쟁이온 및 농도에 따른 열처리 폐콘크리트의 흡착 실험결과	727
[그림 IV-가-52] 연속식 컬럼실험에 따른 열처리 폐콘크리트 실험결과	727
[그림 IV-가-53] 연속식 컬럼실험 모식도	729
[그림 IV-가-54] 레드머드 산처리에 따른 불소 흡착결과	730
[그림 IV-가-55] 레드머드 열처리에 따른 불소 흡착결과	731
[그림 IV-가-56] 0.8M-ATRM의 동역학적 실험결과	732
[그림 IV-가-57] 0.8M-ATRM의 평형흡착 실험결과	733
[그림 IV-가-58] 용액의 pH에 따른 0.8M-ATRM의 불소 흡착 실험결과	734
[그림 IV-가-59] 0.8M-ATRM의 주입량 변화에 따른 불소 흡착 실험결과	734
[그림 IV-가-60] 0.8M-ATRM 충전두께에 따른 연속식 조건에서의 불소흡착 결과	735

[그림 IV-가-61] 석회석, 제올라이트 열처리 조건에 따른 중금속 제거특성 .....	737
[그림 IV-가-62] 폐콘크리트 열처리 조건에 따른 Cr 제거특성 (좌) 10 mg/L, (우) 50 mg/L .....	737
[그림 IV-가-63] 튜브퍼니스 구성도 및 이미지 .....	738
[그림 IV-가-64] FeCl <sub>2</sub> 3H <sub>2</sub> O 농도에 따라 표면처리된 석회석 이미지 .....	738
[그림 IV-가-65] FeCl <sub>2</sub> 3H <sub>2</sub> O 농도에 따라 표면처리된 석회석, 제올라이트의 Cr(10 mg/L) 흡착특성 ..	739
[그림 IV-가-66] FeCl <sub>2</sub> 3H <sub>2</sub> O 농도에 따라 표면처리된 석회석의 시간에 따른 Cr 흡착특성(좌) Cr 5 mg/L, (우) Cr 10 mg/L .....	739
[그림 IV-가-67] 산소소모 수조실험 모식도(a) 및 산소소모 수조실험 이미지 .....	740
[그림 IV-가-68] 미피복 수조 및 피복 수조의 (a) pH, (b) EC 변화 .....	742
[그림 IV-가-69] 미피복 수조 및 피복 수조의 퇴적물 내 산소소비 경향 .....	743
[그림 IV-가-70] 석회석, 제올라이트, 폐콘크리트 피복에 따른 중금속 용출 경향 (a) As, (b) Cr, (c) Cu, (d) Ni, and (e) Pb .....	744
[그림 IV-가-71] 석회석, 제올라이트, 폐콘크리트 피복에 따른 중금속 평균 용출속도 .....	746
[그림 IV-가-72] 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사 피복에 따른 중금속 평균용출속도 결과비교 ..	748
[그림 IV-가-73] 투입-산출분석의 데이터 구조 .....	752
[그림 IV-나-1] SRB의 sulfate 환원 메커니즘 .....	759
[그림 IV-나-2] 제올라이트(a) 및 순환골재(b) 표면 전하 측정 .....	760
[그림 IV-나-3] 제올라이트 및 순환골재를 이용한 미생물 담체의 SEM 이미지 .....	761
[그림 IV-나-4] 제올라이트(a) 및 순환골재(b)를 이용한 미생물 담체의 온도에 따른 중금속 제거율 ..	762
[그림 IV-나-5] 제올라이트(a) 및 순환골재(b)를 이용한 미생물 담체의 중금속 농도에 따른 제거율 ..	763
[그림 IV-나-6] 제올라이트(a) 및 순환골재(b)를 이용한 담체와 미생물 담체의 중금속 제거율 비교 ..	763
[그림 IV-나-7] 미생물 담체를 이용한 해양 퇴적물 피복 정화 모식도 .....	764
[그림 IV-나-8] 미생물 담체를 이용한 생물학적 피복 정화 실험 .....	764
[그림 IV-나-9] 5°C 및 25°C에서 각 단계별 구리(Cu) 농도 .....	766
[그림 IV-나-10] 5°C 및 25°C에서 각 단계별 아연(Zn)의 농도 .....	766
[그림 IV-나-11] 5°C 및 25°C에서 각 단계별 니켈(Ni)의 농도 .....	767
[그림 IV-나-12] 5°C 및 25°C에서 각 단계별 크롬(Cr)의 농도 .....	768
[그림 IV-나-13] 시간에 따른 미생물 spreading 모식도 .....	769
[그림 IV-나-14] 시간에 따른 미생물 확산 효과에 의한 피복소재의 미생물 담체화 .....	769
[그림 IV-나-15] 미생물 담체를 피복재에 도포하여 7일 경과 후 SEM 이미지 .....	770
[그림 IV-나-16] 미생물 담체를 이용한 ball 제작 .....	771
[그림 IV-나-17] 시간에 따른 미생물 담체 ball의 변화 .....	771
[그림 IV-나-18] 최적운영인자 연구에 사용된 생물활성촉진제의 제작 .....	775
[그림 IV-나-19] 생물활성촉진제의 최적운영조건 연구를 위한 Bench scale 현장실험 .....	776
[그림 IV-나-20] 실측 pH값과 모델 예상값 .....	778
[그림 IV-나-21] pH의 등고선과 3차면 표면도 .....	779
[그림 IV-나-22] 실측 값과 모델 예상 값 (a) COD reduction (b) VS reduction .....	782
[그림 IV-나-23] COD(a, b, c)와 VS (d, e, f)등고선과 3차표면도 (a, d)시간고정 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b, e) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c, f)BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향 .....	784

[그림 IV-나-24] 실측 값과 모델 예상값 Fe 안정화 .....	784
[그림 IV-나-25] Fe 안정화에 대한 등고선과 3차표면도 (a) 시간고정 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c) BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향 .....	785
[그림 IV-나-26] 실측 값과 모델 예상값 Cr 안정화 .....	786
[그림 IV-나-27] Cr 안정화에 대한 등고선과 3차표면도 (a) 시간고정 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c) BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향 .....	786
[그림 IV-나-28] Cd과 Cu 안정화의 실측 값과 모델 예상값 .....	787
[그림 IV-나-29] Cd(a, b, c)와 Cu(d, e, f) 안정화에 대한 등고선 및 3차표면도 (a, d) 시간고정 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b, e) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c, f) BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향 .....	789
[그림 IV-나-30] Zn(a)과 Pb(b) 안정화의 실측 값과 모델 예상값 .....	790
[그림 IV-나-31] Cd(a, b, c)와 Cu(d, e, f) 안정화에 대한 등고선 및 3차표면도 (a, d) 시간고정 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b, e) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c, f) BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향 .....	791
[그림 IV-나-32] 변수들을 종합한 중금속 안정화에 대한 겹침선 .....	792
[그림 IV-나-33] Pie charts showing the percentage of abundance of the phylum with species level of the microbial communities (a) Sediment initial sample (b) Sediment final sample (4thmonth) (c) comparative analysis of relative abundance in species level .....	793
[그림 IV-나-34] 진화관계분류 (a) 초기샘플, (b) 4개월 후 퇴적물샘플 .....	794
[그림 IV-나-35] Pilot-scale 생물활성촉진제 현장적용성 평가를 위한 생물활성촉진제 .....	795
[그림 IV-나-36] 생물활성촉진제 실용화를 위한 Pilot장치 준비 및 해상 설치 .....	796
[그림 IV-나-37] Pilot-scale의 현장실험반응조 내 해수의 pH 및 수온변화와 오염퇴적물의 COD, Water content, TS, VS 감소율 .....	798
[그림 IV-나-38] 최적화된 생물활성촉진제 주입에 따른 오염퇴적물의 중금속 형태 분포변화 .....	799
[그림 IV-나-39] 생물활성촉진제 주입에 의한 PAH 농도변화 .....	800
[그림 IV-나-40] 생물활성촉진제 주입깊이의 영향평가를 위한 실험장치 .....	802
[그림 IV-나-41] 오염퇴적물 상부 해수의 pH 변화, 온도 및 생물활성촉진제 주입깊이에 따른 COD, TS and VS의 농도변화 .....	805
[그림 IV-나-42] 생물활성촉진제 주입깊이에 따른 중금속 분포변화 .....	806
[그림 IV-다-1] 해저지형조사 모식도와 소나헤드 빔 각도 .....	809
[그림 IV-다-2] 도면제작 흐름도 .....	810
[그림 IV-다-3] 시험시공 모식도 .....	811
[그림 IV-다-4] 작업바지선 평면도 (예시) .....	811
[그림 IV-다-5] 시공 순서도 .....	811
[그림 IV-라-1] 포설간격 및 이동 .....	813
[그림 IV-라-2] 포설작업 .....	813
[그림 IV-라-3] 멀티빔음향측심기 해저지형조사결과 [해저지형(좌), 해저면영상(우)] .....	814
[그림 IV-라-4] 반응성 피복재 포설결과 횡단면도(3월 8일) .....	814

[그림 IV-라-5] 원지반과 모래 포설 데이터 비교 .....	815
[그림 IV-라-6] 횡단면도 .....	815
[그림 IV-라-7] 피복재 3 종류의 입도분포 .....	817
[그림 IV-라-8] 주기적 파랑에 따른 침전물의 이송(Komar and Miller, 1974)) .....	820
[그림 IV-라-9] $D_{50}=0.21$ 피복재를 사용한 침식 실험 결과 .....	820
[그림 IV-라-10] $D_{50}=0.54$ 피복재를 사용한 침식 실험 결과 .....	821
[그림 IV-라-11] $D_{50}=0.96$ 피복재를 사용한 침식 실험 결과 .....	822
[그림 IV-라-12] 피복재 포설 최적화 시공 방안 .....	823
[그림 IV-마-1] 오염퇴적물 샘플링(I항) .....	824
[그림 IV-마-2] I항 해양퇴적물 내 중금속 존재 형태 특성 .....	825
[그림 IV-바-1] 현장 처리기술 공정 시험용 장치 설계도(세척, 입자분리) .....	833
[그림 IV-바-2] 현장 처리기술 공정 시험용 장치 설계도(세척, 입자분리) .....	834
[그림 IV-바-3] 현장 처리기술 공정 시험용 장치 P&ID(세척) .....	835
[그림 IV-바-4] 수력 싸이클론(Hydro-cyclone) 상세 설계도( $75\mu\text{m}$ 및 $32\mu\text{m}$ 분급용) .....	836
[그림 IV-바-5] 입자분리 시험장치 상세 설계도 .....	837
[그림 IV-바-6] 고도처리 시험장치 설계도 .....	839
[그림 IV-바-7] 여러 가지 저농도 산화제 비교를 위한 실험 .....	841
[그림 IV-바-8] 여러 가지 저 농도 $\text{H}_2\text{O}_2$ 의 유기물 제거결과 .....	841
[그림 IV-바-9] 5L반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리조건 기초 시험 .....	843
[그림 IV-바-10] 5L 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리조건 보완 시험 .....	845
[그림 IV-바-11] 5L 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 COD, IL 의 농도변화 .....	846
[그림 IV-바-12] 5L 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 TOC, TN, TP 의 농도변화 .....	847
[그림 IV-바-13] 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Ni 의 농도변화 ...	848
[그림 IV-바-14] 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Cu의 농도변화 ...	848
[그림 IV-바-15] 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Zn의 농도변화 ...	849
[그림 IV-바-16] 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Pb의 농도변화 ...	849
[그림 IV-바-17] 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Cd의 농도변화 ...	849
[그림 IV-바-17] 5L 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 (in 해수) 처리조건 시험(해수 사용) ...	851
[그림 IV-바-18] 5L 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 COD, IL의 농도변화(해수 사용) .....	852
[그림 IV-바-19] 5L 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 TOC, TN, TP 의 농도변화(해수 사용) .....	853
[그림 IV-바-20] 5L 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Ni의 농도변화(해수 사용) .....	854
[그림 IV-바-21] 5L 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물 Cu의 농도변화(해수 사용) .....	854
[그림 IV-바-22] 5L 반응조 시험 및 1M $\text{H}_2\text{O}_2$ + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Zn의 농도변화(해수 사용) .....	854

[그림 IV-바-23] 5L 반응조 시험 및 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Pb의 농도변화(해수 사용) .....	855
[그림 IV-바-24] 5L 반응조 시험 및 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Cd의 농도변화(해수 사용) .....	855
[그림 IV-바-25] 고도처리장치 반응조 Air aeration 작동시 반응시료의 온도변화 .....	857
[그림 IV-바-26] 고도처리장치 반응조 O <sub>3</sub> Aeration 작동시 반응시료의 온도변화 .....	858
[그림 IV-바-27] 고도처리장치 반응조 O <sub>3</sub> Aeration 작동시 반응시료의 온도변화 - 2차 .....	858
[그림 IV-바-28] 반응 기포 과다발생 제거용 임펠러 및 성능 .....	860
[그림 IV-바-29] 2차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 (in 증류수)) 결과 퇴적물의 COD, IL의 농도변화 .....	861
[그림 IV-바-30] 2차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 (in 증류수)) 결과 퇴적물의 TOC, TN, TP의 농도변화 .....	862
[그림 IV-바-31] 2차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 (in 증류수)) 결과 퇴적물의 Ni의 농도변화 .....	863
[그림 IV-바-32] 2차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 (in 증류수)) 결과 퇴적물의 Cu의 농도변화 .....	863
[그림 IV-바-33] 2차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 (in 증류수)) 결과 퇴적물의 Zn의 농도변화 .....	863
[그림 IV-바-34] 2차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 (in 증류수)) 결과 퇴적물의 Pb의 농도변화 .....	864
[그림 IV-바-35] 2차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 (in 증류수)) 결과 퇴적물의 Cd의 농도변화 .....	864
[그림 IV-바-36] 3차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 결과 퇴적물의 COD, IL의 농도변화(해수 사용) .....	866
[그림 IV-바-37] 3차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80(해수 사용)) .....	867
[그림 IV-바-38] 3차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 결과 퇴적물의 COD, IL의 농도변화(해수 사용)) .....	868
[그림 IV-바-39] 3차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 결과 퇴적물의 Ni의 농도변화(해수 사용) .....	869
[그림 IV-바-40] 3차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 결과 퇴적물의 Cu의 농도변화(해수 사용) .....	869
[그림 IV-바-41] 3차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 결과 퇴적물의 Zn의 농도변화(해수 사용) .....	869
[그림 IV-바-42] 3차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 결과 퇴적물의 Pb의 농도변화(해수 사용) .....	869
[그림 IV-바-43] 3차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 결과 퇴적물의 Cd의 농도변화(해수 사용) .....	870
[그림 IV-바-44] 3차 고도처리장치 시험 (O <sub>3</sub> + 1M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + Tween 80 (in 해수)) .....	873
[그림 IV-바-45] 각 공정의 유기물 제거효율 비교 .....	875
[그림 IV-바-46] 각 공정의 중금속 제거효율 비교 .....	876
[그림 IV-바-47] 4차년 연구를 통하여 개발한 오염퇴적물 처리공정도 .....	877
[그림 IV-사-1] 모듈화 장치 운송수단인 저상 트레일러 예시 .....	882

[그림 IV-사-2] 모듈화 공정 흐름도 .....	885
[그림 V-가-1] P항 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도 .....	899
[그림 V-가-2] P항 유기물 오염도 현황(2007년 KIOST) .....	899
[그림 V-가-3] P항 지점별 pH, 입도분포, COD, TOC, T-N, T-P .....	901
[그림 V-가-4] P항 1~6지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과 .....	904
[그림 V-가-5] O항 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도 .....	904
[그림 V-가-6] O항 중금속 오염도 현황 .....	905
[그림 V-가-7] O항 지점별 pH, 입도분포, COD, TOC, T-N, T-P .....	906
[그림 V-가-8] O항 1~5지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과 .....	908
[그림 V-가-9] K항 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도 .....	908
[그림 V-가-10] K항 오염퇴적물 샘플링 작업 현황 .....	908
[그림 V-가-11] K항 지점별 pH, 입도분포, COD, TOC, T-N, T-P .....	910
[그림 V-가-12] K항 1~6지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과 .....	911
[그림 V-가-13] 석회석, 제올라이트, 모래 피복에 따른 pH (a)와 EC (b) 변화 .....	914
[그림 V-가-14] 석회석 (a), 제올라이트 (b), 모래 (c) 피복에 따른 퇴적물 내 T-N 용출특성 .....	915
[그림 V-가-15] 석회석 (a), 제올라이트 (b), 모래 (c) 피복에 따른 퇴적물 내 T-P 용출특성 .....	916
[그림 V-가-16] 석회석 (a), 제올라이트 (b), 모래 (c) 피복에 따른 퇴적물 내 COD 용출특성 .....	917
[그림 V-가-17] 석회석, 제올라이트, 모래 피복에 따른 퇴적물 내 오염물질 용출속도: (a) T-N, (b) COD .....	918
[그림 V-가-18] aeration condition에서 등급별 제올라이트 피복에 따른 pH (a)와 EC (b) 변화 .....	921
[그림 V-가-19] unaeration condition에서 등급별 제올라이트 피복에 따른 pH (a)와 EC (b) 변화 .....	921
[그림 V-가-20] aeration condition에서 등급별 제올라이트 피복에 따른 해수 내 중금속 농도 변화: (a) As, (b) Cd, (c) Cu, (d) Ni, (e) Zn .....	922
[그림 V-가-21] unaeration condition에서 등급별 제올라이트 피복에 따른 해수 내 중금속 농도 변화: (a) As, (b) Cd, (c) Cu, (d) Ni, (e) Zn .....	924
[그림 V-가-22] 폐콘크리트 혼합 수조 실험에 따른 pH (a)와 EC (b) 변화 .....	926
[그림 V-가-23] 폐콘크리트 혼합 수조 실험에 따른 중금속 및 영양염류 농도변화: (a) As, (b) Cd, (c) Cr, (d) Cu, (e) Ni, (f) Pb, (g) Zn, (h) T-P .....	927
[그림 V-가-24] 폐콘크리트 열처리 온도 변화에 따른 Cr(VI) 흡착실험 결과 .....	932
[그림 V-가-25] 900°C 열처리한 폐콘크리트의 동역학적 실험 결과 .....	934
[그림 V-가-26] 900°C 열처리한 폐콘크리트의 Intraparticle diffusion model 분석 .....	934
[그림 V-가-27] 900°C 열처리한 폐콘크리트의 평형흡착 실험 결과 .....	935
[그림 V-가-28] 900°C 열처리한 폐콘크리트의 pH 변화에 따른 Cr(VI) 흡착량 변화 .....	936
[그림 V-가-29] 900°C 열처리한 폐콘크리트의 음이온 경쟁에 따른 Cr(VI) 흡착 .....	937
[그림 V-가-30] 해수와 담수에서의 Cr(VI) 흡착 제거 .....	937
[그림 V-가-31] 석회석 열처리를 위한 튜브퍼니스 설치도(a) 및 사진(b) .....	938
[그림 V-가-32] 석회석의 열처리 온도에 따른 중량손실율(a)과 양이온교환능력(b) 변화 .....	940
[그림 V-가-33] 석회석의 열처리 온도에 따른 Cu <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> 흡착량 .....	941
[그림 V-가-34] 900°C 열처리한 석회석의 동역학적 흡착실험: (a) Cu <sup>2+</sup> , (b) Cd <sup>2+</sup> .....	941

[그림 V-가-35] 900℃ 열처리한 석회석의의 평형 흡착실험: (a) Cu <sup>2+</sup> , (b) Cd <sup>2+</sup> .....	942
[그림 V-가-36] 900℃ 열처리한 석회석의의 pH 변화에 따른 흡착 실험결과 .....	943
[그림 V-가-37] vermiculite의 Fe 피복에 따른 Cr(VI) 흡착능 변화 .....	946
[그림 V-가-38] Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 흡착을 위한 동역학적 실험결과 .....	947
[그림 V-가-39] Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 흡착을 위한 평형 실험결과 .....	948
[그림 V-가-40] 온도변화에 따른 Fe 피복 vermiculite의 동역학적 실험결과 (좌)와 열역학적 흡착결과 (우) .....	948
[그림 V-가-41] pH 변화에 따른 Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 흡착특성 .....	949
[그림 V-가-42] 음이온 존재에 따른 Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 흡착 .....	950
[그림 V-가-43] Fe 피복 vermiculite의 주입량 변화에 따른 Cr(VI) 제거 특성 .....	951
[그림 V-가-44] G항 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도 .....	951
[그림 V-가-45] 피복시공 전후 G항 지점별 pH, 입도분포, COD, TOC, T-N, T-P .....	953
[그림 V-가-46] 피복시공 전후 G항 지점별 해수 중금속 농도 .....	955
[그림 V-가-47] G항 서식생물상 현장조사 .....	956
[그림 V-가-48] 시공전 부산 G항에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상 .....	959
[그림 V-가-49] 시공후 부산 G항에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상 .....	959
[그림 V-가-50] 시공전 부산 G항에서 출현한 중형저서동물의 조사지점별 출현양상 .....	960
[그림 V-가-51] 시공전 부산 G항에서 출현한 중형저서동물의 분류군별·정점별 출현양상 .....	961
[그림 V-가-52] 시공전 부산 G항에서 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상 .....	962
[그림 V-가-53] 시공전 부산 G항에서 출현한 대형저서동물의 조사정점별 출현양상 및 서식밀도 .....	962
[그림 V-가-54] 시공후 부산 G항에서 출현한 대형저서동물의 출현종수 및 서식밀도 출현양상 .....	964
[그림 V-가-55] 시공후 부산 G항에서 출현한 대형저서동물의 출현종수와 서식밀도 .....	964
[그림 V-가-56] 시공전 부산 G항 피복지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수 .....	968
[그림 V-가-57] 시공후 부산 G항 피복지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수 .....	969
[그림 V-가-58] 시추공영상 촬영의 모식도 .....	971
[그림 V-가-59] 포설재 상하부의 입자크기 변화 .....	973
[그림 V-가-60] 시추공영상 촬영의 모식도 .....	974
[그림 V-가-61] 부산 G항 1~10지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과 .....	975
[그림 V-가-62] 부산 감만항 1~5, 7지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과 .....	977
[그림 V-나-1] 인공 오염퇴적물 환경에서 제올라이트의 중금속 안정화모델 .....	978
[그림 V-나-2] 인공 오염퇴적물 환경에서 미생물담체의 중금속 안정화모델 .....	979
[그림 V-나-3] 30일 후 25℃ 온도조건에서 미생물담체 ball과 접촉한 제올라이트의 SEM image .....	979
[그림 V-나-4] 시간의 변화에 따른 Cu에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화 .....	980
[그림 V-나-5] 시간의 변화에 따른 Zn에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화 .....	980
[그림 V-나-6] 시간의 변화에 따른 Ni에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화 .....	981
[그림 V-나-7] 시간의 변화에 따른 Cr에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화 .....	981
[그림 V-나-8] 미생물담체와 제올라이트와의 피복소재로서 활용 후 중금속 안정도 .....	982
[그림 V-나-9] 미생물담체의 피복소재로 활용 후 온도의 영향 .....	983

[그림 V-나-10] 미생물담체의 피복소재로 활용 후 시간의 영향 .....	984
[그림 V-나-11] 미생물담체 ball을 이용한 실제해양환경의 다성분 중금속 오염퇴적물 안정화 실험 (a)안정화 실험샘플, (b)실험진행준비, (c)현장적용사진 .....	985
[그림 V-나-12] 실제 해양환경에서 미생물담체 ball의 중금속 안정화 모델 (a)해양환경 적용 전, (b)적용 15일 후, (c)적용 30일 후 .....	985
[그림 V-나-13] 시간의 변화에 따른 Cu에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화 .....	986
[그림 V-나-14] 시간의 변화에 따른 Zn에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화 .....	986
[그림 V-나-15] 시간의 변화에 따른 Ni에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화 .....	987
[그림 V-나-16] 시간의 변화에 따른 Cr에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화 .....	987
[그림 V-나-17] 환산염 환원균의 중금속 제거 메카니즘 모식도 .....	988
[그림 V-나-18] 미생물담체 ball 제작 모식도 .....	989
[그림 V-나-19] 부산신항 퇴적물시료의 채취모습 .....	990
[그림 V-나-20] 생물활성촉진제의 실 해역 현장 적용성 평가를 위한 생물활성촉진제 대량제조 .....	991
[그림 V-나-21] 생물활성촉진제 현장 효능평가를 위한 북항 연안퇴적도에 생물활성촉진제 설치 및 퇴적도 샘플링 .....	992
[그림 V-나-22] 10m×10m의 부산 북항 현장실험 연안해역의 pH(a) 및 수온(b) 변화와 북항 연안퇴적물의 COD(c), VS(d) 감소율 .....	993
[그림 V-나-23] 10m×10m의 생물활성촉진제 현장실험의 오염퇴적물 내 중금속 형태 분포변화: (a) Cr, (b) Cd, (c) Cu, (d) Zn, (e) Pb, (f) Fe .....	994
[그림 V-나-24] 연안오염 퇴적물에서 중금속 안정화 기작연구를 위한 시료준비 .....	995
[그림 V-나-25] 오염퇴적물의 중금속 안정화 메카니즘을 평가하기 위한 분석장비 .....	996
[그림 V-나-26] chelating agent와 reducing agent로 처리한 오염퇴적물의 형태학적 분석(SEM) .....	997
[그림 V-나-27] 바탕시험구(Control) 샘플과 오염퇴적물에 Zeolite(b), Zeolite+HDTMA(c), Zeolite+HDTMA+EDTA(d), Zeolite+HDTMA+chitine(e)를 첨가한 EDX분석 .....	998
[그림 V-나-28] 초기오염퇴적물 샘플과 오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA+EDT 샘플의 TEM images와 EDX spectrum images와 element mapping .....	999
[그림 V-나-29] X-선 회절분석(Control, S1:오염퇴적물+BES+zeolite, S2:오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA, S3:오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA+EDTA, S4:오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA+Chitin) .....	1000
[그림 V-나-30] FT-IR spectrum과 결정 유형(crystallinity pattern); Control(Initial), S3(오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA+EDTA) .....	1001
[그림 V-나-31] 온도 5°C와 15°C 및 pH 4, 7, 8.5에서 반응시킨 샘플의 pH변화, TS, VS 및 COD변화 .....	1002
[그림 V-나-32] 오염퇴적물에 Zeolite, Zeolite+HDTMA, Zeolite+HDTMA+EDTA, Zeolite+HDTMA+chitine을 각각 첨가하여 온도 15°C에서 반응시킨 오염퇴적물의 중금속 형태변화 .....	1003
[그림 V-다-1] 매뉴얼 책자 표지 .....	1004
[그림 V-다-2] 피복제 입경과 유속의 상관관계 .....	1005
[그림 V-다-3] 실험결과를 반영한 수정식과 기존식의 비교 .....	1006
[그림 V-다-4] 피복층 설계의 단계별 흐름도 .....	1009
[그림 V-다-5] 셋팅바지를 이용한 자유낙하식 시공 순서도 .....	1010
[그림 V-다-6] 바지와 상자형 버킷을 이용한 목구투하방식 피복시공 순서 .....	1010



[그림 V-라-1] 상자형 버켓과 피복재 포설용 크레인 .....	1012
[그림 V-라-2] 시공순서도 .....	1013
[그림 V-라-3] 실제 시공 과정 .....	1013
[그림 V-라-4] 버켓 포설을 위한 좌표도 .....	1014
[그림 V-라-5] 시험시공 모식도 .....	1014
[그림 V-라-6] 제올라이트 포설 후 멀티빔수심조사(MBES) 결과 .....	1015
[그림 V-라-7] 제올라이트 포설 후 해저면영상조사(SSS) 결과 .....	1015
[그림 V-라-8] 모래 포설 후 멀티빔수심조사(MBES) 결과 .....	1016
[그림 V-라-9] 모래 포설 후 해저면영상조사(SSS) 결과 .....	1016
[그림 V-라-10] 피복재 포설 6개월 경과 후 멀티빔수심조사(MBES) 결과 .....	1020
[그림 V-라-11] 피복재 포설 6개월 경과 후 해저면영상조사(SSS) 결과 .....	1020
[그림 V-라-12] 피복 전과 제올라이트 포설 후의 수심변화도 .....	1024
[그림 V-라-13] 제올라이트 포설 후와 모래 포설 후의 수심변화도 .....	1024
[그림 V-라-14] 피복재 포설 6개월 후의 수심변화도 .....	1025
[그림 V-라-15] 피복 전과 피복 6개월 경과 후의 수심변화도 .....	1026
[그림 V-라-16] 해저지형도 제작을 위한 시스템 구성 .....	1026
[그림 V-라-17] 작업 흐름도 .....	1029
[그림 V-라-18] DGPS 위치결정 모식도 .....	1030
[그림 V-라-19] 멀티빔 수심측량 모식도 .....	1030
[그림 V-라-20] 멀티빔 송수신각(128°) .....	1030
[그림 V-라-21] 멀티빔 취득 프로그램(PDS2000™) .....	1031
[그림 V-라-22] 선박 3 성분 지향각 .....	1032
[그림 V-라-23] 센서 옵셋 .....	1032
[그림 V-라-24] 음속도 프로파일 예시 .....	1033
[그림 V-라-25] 멀티빔 자료처리 순서도 .....	1034
[그림 V-라-26] 센서옵셋을 포함한 Vessel Editor 작성 .....	1035
[그림 V-라-27] Navigation 및 Attitude 보정 설정 .....	1035
[그림 V-라-28] 조위 보정 예시 .....	1036
[그림 V-라-29] 오측심 수동 및 자동 제거 .....	1037
[그림 V-라-30] 해저면영상조사 시스템구성도 .....	1038
[그림 V-라-31] 해저면영상조사 모식도 .....	1039
[그림 V-라-32] 사이드스캔소나 자료처리 순서도 .....	1040
[그림 V-라-33] 해저지형 사전조사 결과 .....	1041
[그림 V-마-1] 현장 정화처리 실증장치 .....	1055
[그림 V-마-2] N해역 시료 채취 정점, 채취 장비 및 시료 채취 과정 .....	1060
[그림 V-마-3] 퇴적물 채취 정점 .....	1061
[그림 V-마-4] 퇴적물 시료 채취 및 이송 순서 .....	1062
[그림 V-마-5] bench-scale의 고도산화처리 효율 실험 .....	1067

[그림 V-마-6] ICP-MS .....	1069
[그림 V-마-7] 산화제 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (0.05%, Tween80 첨가)에 의한 퇴적물 내 유기물 저감 효과 .....	1069
[그림 V-마-8] 고도처리 후 대상 퇴적물의 색 변화 .....	1070
[그림 V-마-9] 고도산화처리에 의한 부영양화 관련 평가물질의 변화 .....	1070
[그림 V-마-10] 세척과 고도산화처리 의한 부영양화 관련 평가물질의 변화 .....	1071
[그림 V-마-11] 시험 운전 시 고도처리장치 내 용존오존 및 용존산소 농도 변화 .....	1073
[그림 V-마-12] 현장 처리 기술 공정 실증 단계 흐름도 .....	1076
[그림 V-마-13] 정화 처리 시간에 따른 퇴적물 내 COD함량 변화 .....	1079
[그림 V-마-14] 정화 처리 시간에 따른 퇴적물 내 IL 변화 .....	1080
[그림 V-마-15] 정화 처리 시간에 따른 퇴적물 내 TOC함량(%) 변화 .....	1080
[그림 V-마-16] 세척 공정에서의 산화제 주입 조건 확립을 위한 잔류과산화수소 농도 측정 .....	1082
[그림 V-마-17] 잔류 과산화수소 농도의 시간별 감소 .....	1083
[그림 V-마-18] 0.5 M의 산화제(과산화수소) 간헐주입 세척 공정에서의 COD농도(mg/g) 변화 .....	1085
[그림 V-마-19] 0.5 M의 산화제(과산화수소) 간헐주입 세척 공정에서의 IL(%) 변화 .....	1086
[그림 V-마-20] 1.0M의 산화제(과산화수소) 간헐주입 세척 공정에서의 COD농도(mg/g) 변화 .....	1086
[그림 V-마-21] 1.0M의 산화제(과산화수소) 간헐주입 세척 공정에서의 IL(%) 변화 .....	1087
[그림 V-마-22] 1.0M 과산화수소 주입에 따른 퇴적물 분급 별 COD농도(mg/g)의 변화 .....	1087
[그림 V-마-23] 시료의 분급을 위해 사용된 자동 입자 선별기와 시료 균질화를 위한 시료 분쇄 단계 ..	1088
[그림 V-마-24] 산화제 간헐주입 조건에서의 시료의 분급별 COD(mg/g) 농도 변화 .....	1089
[그림 V-마-25] 산화제 간헐주입 조건에서의 시료의 분급별 IL(%) 농도 변화 .....	1090
[그림 V-마-26] 산화제 간헐주입 조건에서의 시료의 분급별 TOC(%) 농도 변화 .....	1090
[그림 V-마-27] 산화제 간헐주입(1.0M) 조건에서의 분급별 중금속 농도 변화 .....	1091
[그림 V-마-28] 고도산화공정의 처리 시간에 따른 유기물 저감 효과 .....	1094
[그림 V-마-29] 고도산화처리공정의 주입량 변경 후 시간에 따른 유기물저감효과 .....	1095
[그림 V-마-30] 고도산화처리공정의 주입량 변경 후 시간에 따른 중금속 저감 효과 .....	1096
[그림 V-마-31] 실험실 내에서의 활성탄 여과 과정 및 공정수의 총유기탄소 측정 .....	1103
[그림 V-마-32] 공정수의 여과 전후에 대한 부유물질 농도(mg/L) 비교 .....	1104
[그림 V-마-33] 공정수의 여과 전후에 대한 총 유기탄소 농도(mg/L) 비교 .....	1105
[그림 V-마-34] 공정수 여과 전후에 대한 공정수 내 화학적산소요구량 농도(mg/L) 비교 .....	1105
[그림 V-마-35] 공정수 여과 전후에 대한 공정수 내 총질소 농도(mg/L) 비교 .....	1106
[그림 V-마-36] 공정수 여과 전후에 대한 공정수 내 총인 농도(mg/L) 비교 .....	1106
[그림 V-마-37] 기관별 상대적인 함량비로 나타낸 TOC변화(%), 맹검분석을 통한 유기물 저감 효과의 검증 .....	1108
[그림 V-마-38] 기관별 상대적인 함량비로 나타낸 중금속변화(%), 맹검분석을 통한 유기물 저감 효과의 검증 .....	1110
[그림 V-마-39] 실증 현장(2016년 9월 22일) .....	1115
[그림 V-바-1] 유류오염 토양세척 장치 공정 흐름 및 현장 설치 예시 .....	1122
[그림 V-바-2] 중금속오염 토양세척 장치 공정 흐름 및 현장 설치 예시 1 .....	1123
[그림 V-바-3] 중금속오염 토양세척 장치 공정 흐름 및 현장 설치 예시 2 .....	1124

[그림 V-바-4] 국외 중금속오염 토양세척 장치 공정 흐름 예시 .....	1125
[그림 V-바-5] 국외 수저오염퇴적물 정화 장치 공정 흐름 예시 .....	1126
[그림 V-바-6] 토양 세척 적용 시 적용가능한 입도범위 .....	1127
[그림 V-바-7] 입자분리 및 세척기반 통합 현장처리기술 P&ID .....	1133
[그림 V-바-8] 입자분리 및 세척기반 통합 현장처리기술 정화설비 배치도 .....	1134
[그림 V-사-1] 열린 해역 사례 .....	1157
[그림 V-사-2] 폐쇄 해역 사례 .....	1157
[그림 V-사-3] 반폐쇄 해역 사례 .....	1158



# 제1장. 연구개발과제의 개요

---

## 제1절. 연구개발 목적

- 국내 해양오염 퇴적물 정화사업은 현재까지 준설(흡입식 수거) 및 최종처리에 의해 주로 수행되어지고 있다. 최종처리방법 중 경제성 등의 이유로 가장 빈번하게 사용되고 있는 해양투기방법이 “폐기물 및 기타물질의 투기에 의한 해양오염 방지에 관한 협약” (“런던 협약”) 가입과 더욱 강화된 “런던의정서” 가입에 따라, 2016년부터 근본적으로 불가능해 지므로 대책 강구가 요구된다.
- 준설 및 해양투기의 기존 방법에 의해 발생된 준설물질은 오염도에 따라 해양투기가 불가능하므로 적절한 중간처리를 통해 해양투기가 가능하도록 하거나 육상 매립 등의 방법으로 처리하는 것이 대책이 될 수 있다. 물리적, 화학적 세척 등 알려져 있는 중간처리방법을 사용할 경우 현재 방법대비 70% 이상의 정화 사업 비용 증가가 예상된다.
- 최종처리방법으로 육상 매립을 추진할 경우, 육상 매립지 확보가 관건이나 현재 국내 여건상 매립지 확보가 곤란하다. 따라서 해양오염퇴적물을 존재하는 위치에서 처리할 수 있는 원위치 처리방법이 가장 적절한 대안으로 요구된다. 본 연구개발사업에는 원위치 처리방법으로 피복공법, 물리·화학적 현장처리법 등에 대한 개발을 수행하며, 개발된 결과는 현장시험을 통해 실증화를 추진한다.
- 반응성 피복기술 (대안 1)
  - 반응성 피복기술은 반응성 피복소재와 시공·설계방법의 개발이 핵심적인 요소기술이다. 반응성 피복소재로는 중금속, 유기오염물, 부영양물질의 물리·화학적 흡착을 통한 제거를 수행하는 피복재(활성탄, 석회석, 제올라이트, organoclay, bentonite, coke 등)와 중금속, 유기오염물, 부영양물질의 제거능을 가지는 해양미생물 등 생물소재를 개발한다.
  - 핵심 반응성 소재 외에도 모래, 자갈 등의 피복재를 해역 특성에 맞게 시공할 수 있도록 하는 설계·시공법의 개발이 필수적이며, 개발된 설계·시공법은 매뉴얼화한다.
- 현장처리기술 (대안 2)
  - 물리·화학적 과정에 기초한 처리방법은 상대적으로 오염도가 높은 경우에도 신속하게 접근 할 수 있는 대안으로 평가되며, 현재 준설(수거)하여 이송된 오염퇴적물을 대상으로 육상에서 처리하는 시설로 발전되었고, 공정설비를 최적화하여 오염해역 현장(on-site)에서 처리함으로써 경제성 및 활용도를 크게 향상시킬 수 있다.
  - 육상처리시설로 개발된 기존 공정을 단순히 scale-down하여 해상으로 옮겨가는 것이 아니라 처리 목적별 핵심기술별로 모듈화(module)하고 오염해역 및 퇴적물의 오염특성에 맞게 단위 모듈을 조합하고 소형화(compact)하여 효율적인 모듈 조합형 현장처리 기술을 제시한다.
  - 최종적으로 모듈 조합으로 구성된 현장 처리기술 공정은 기술검증을 통하여 신뢰성을 확보하며, 연구결과로 제시되는 상용 규모 설계에 따라 장치를 제작할 경우, 정화사업 현장에서 바지선에 탑재되거나 인접한 연안에 설치하여 활용할 수 있는 기술이 구현된다.

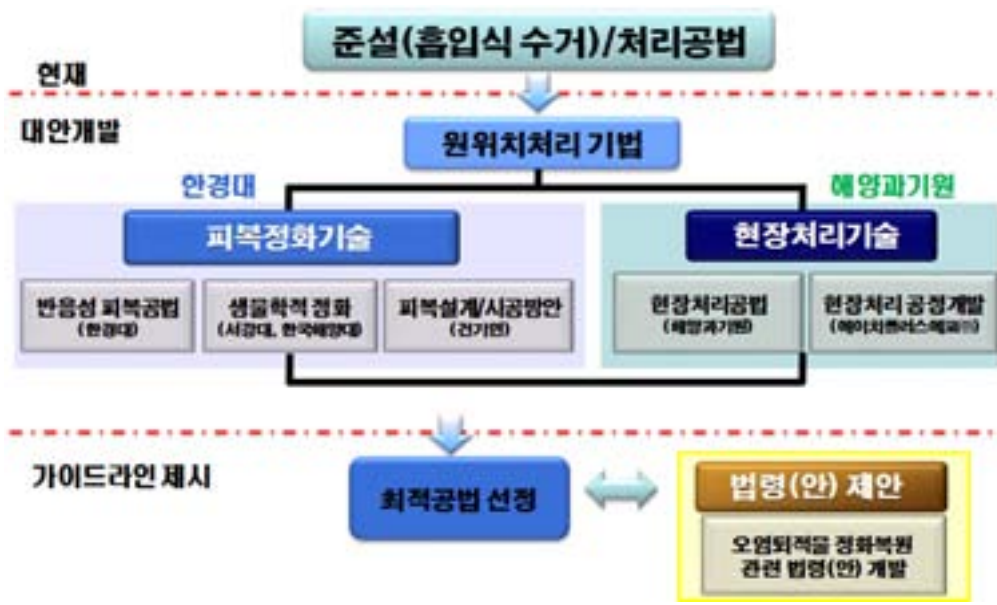
---

## 제2절. 연구개발의 필요성

- 1960년대 이후 급속한 산업화, 도시화로 인하여 오염물질에 대한 관리가 부족한 상태에서 많은 오염물질이 해양으로 유입되어 퇴적물의 오염을 가속화시켜 왔다. 현재까지 조사결과, 우리나라 항만 해역 등 도시해역 20여 곳 이상의 해저 퇴적물이 주민건강과 생태계를 위협할 정도로 오염된 것을 확인하였다.
- 해양퇴적물 오염 성분은 중금속, PCBs, PAHs 등 유기오염물, 부영양물질화 등으로 다양하며, 복합적 오염특성을 보이고 있다. 2004년부터 2015년까지 해양수산부에서 오염 우려해역 조사결과(27개, 전체 대상 해역 대비 2.94%) 77.8%인 21개 해역에서 시급하게 정화복원이 필요할 정도로 오염된 퇴적물(물량 약 800만 m<sup>3</sup>)을 발견하였다.
- 현행 정화사업은 흡입식 전용 수거선에 의한 수거, 중간처리, 최종처리 구조로 되어있으며, 수거된 오염퇴적물은 중간처리(탈수, 악취제거, 오염도 저감 등)가 필요하다. 정화사업이 필요한 해역 중에는 연안매립(준설토투기장 병합처리 등)을 위한 최종처리장 확보가 곤란한 곳이 있다. 따라서 정화사업 현장에서 사용할 수 있고, 신뢰성 있는 현장 처리기술 및 최종처리장 확보의 어려움을 해소할 수 있는 원위치 처리기술이 요구된다.
- 해양오염퇴적물 정화사업은 1980년대 이후 2007년까지는 준설로 제거하여 외해에 투기한 단순 이동 방식이었는데, 2008년부터 해양배출 규제에 의해 투기가 불가능해짐에 따라 수거 예정 해양오염퇴적물의 처리(중간, 최종)방안의 사전 확보가 정화사업 추진에 필수적인 사항이 되었다. 현재, 오염물질의 정화 기작(mechanism)이 유사한 입자분리, 세척 등 일부 토양오염 처리에 기초한 기술을 일부 수정·보완하여 정화사업에서 도입을 시도하고 있지만, 실증 또는 검증된 신뢰성 있는 처리기술은 없다. 육상 오염토양은 해양오염퇴적물과 입경분포, 함수율, 염소 이온의 존재 등 물성과 유기물 함량, 주요 오염물질 등에서 차이가 있으므로, 육상 오염토양 정화기술을 해양오염퇴적물 정화사업에 그대로 사용할 수 없으므로 해양오염퇴적물 정화사업에 활용 가능한 다양한 대안 기술의 개발이 시급하다.(미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 다양한 대안기술 개발 및 적용)
- 현재 정화사업에서 수거, 처리 등 과정에서 비용이 많이 소요되므로, 낮은 비용, 높은 효율의 정화 방안을 개발하여 소요 비용을 절감하고, 보다 효율적인 정화사업 추진이 필요하다. 현행 정화사업에서는 해양오염퇴적물 평균처리단가는 105천원/m<sup>3</sup>이 소요(부산남항 정화사업 사례)되며, 일반 준설의 경우 약 50천원/m<sup>3</sup>이다.
- 선진국의 경우, 해양오염퇴적물 처리(중간, 최종)시 평균 단가는 약 80천원/m<sup>3</sup> (50천원/m<sup>3</sup>~130천원/m<sup>3</sup>)이며, 해양오염퇴적물 정화사업 현장에서 피복정화 등 다양한 원위치 처리공법을 사용하고 있다. 원위치 처리공법은 최종처리장 확보의 애로 해소뿐 만 아니라, 다른 최종처리 방안에 비하여 평균 처리단가가 낮다. 다양한 원위치 처리공법을 국내 개발하여 실제 정화사업에 사용할 경우, 상당한 정부예산을 절감할 수 있다. (최소 20% 이상 정화사업비 절감)
- 해양환경 개선으로 지역주민 생활환경 개선 및 관광, 레저 등 다양한 목적으로 해역 이용 활성화 및 해역 이용 부가가치 상승이 가능하고, 기술개발을 통해 국내 해양오염퇴적물 정화기술의 선진화와 신기술의 해외시장 진출이 가능하다. 중국 등 저개발국가에서는 현재 하천, 호소, 연안 등의 오염퇴적물 정화사업이 시작단계 또는 준비 단계이므로 관련 기술을 개발하여 산업화할 경우, 향후 상당한 규모의 해외시장 개척이 가능하다.

### 제3절. 연구의 범위

- 본 연구는 해양오염퇴적물 정화사업을 위해 주로 수행되고 있는 준설(흡입식 수거)/최종 처리방법이 런던의정서에 의해 해양투기 가능 준설물질 규제강화로 위기에 놓여있는 상황에서 환경 친화적이고 경제성을 가지는 대안기술을 개발하고 실증화를 추진하는 것을 목표로 하며, 구체적인 연구체계는 다음과 같다.



[기술 연구개발 체계도]

- 해역의 오염특성 및 해역이용현황, 해저면 특성 및 지리적 특성 등을 고려하여 수거에 의한 현장 외 처리, 피복공법, 수거 후 현장처리 등 본 과제에서 개발된 기술을 포함하고, 다양한 정화방안들을 활용하여 최적의 정화방안을 도출 및 시행하기 위한 도구를 개발하고 이를 지침안으로 제시한다.
- 선진국(미국, 일본, 유럽)들은 현재의 정화사업 문제점을 극복하기 위해 현장에서 오염퇴적물을 처리하기 위한 신기술 개발을 활발히 수행하고 있으며, 국내에서 해양오염퇴적물 피복정화기술에 대해서는 극소수의 실험실 규모의 기초연구가 전부이며, 실증화를 목표로 하는 반응성 피복소재군 및 시공, 설계방안 등에 대한 개발실적은 전무하다. 협소한 국토를 가지는 여건 상 매립을 위한 가용부지 사용 제한과 국제 환경규제(런던의정서)에 대한 적극적 대응을 위해서 해양오염퇴적물 현장정화 기술개발은 반드시 필요하다. 해양오염퇴적물 현장정화의 핵심기술인 피복공법 현장 적용을 위해서는 설계 매뉴얼 작성이 선행되어야 하며, 이를 통해 현장 적용의 기준을 제시하고 신기술 적용의 발판을 마련할 필요가 있다. 나아가 실증화 단계에서는 설계 매뉴얼에 따른 시공 및 유지관리를 통한 장기적 평가를 바탕으로 지침 마련의 기초자료로 활용하고 산·학·연 협동연구 결과의 테스트 베드로 활용하여 선진국과의 기술격차를 줄여 세계 수준의 해양오염퇴적물 현장정화 기술을 확보하고자 한다. 화학적/생물학적 반응성 피복물질 제품 개발 및 비반응성(물리적 차단) 및 반응성(물리적 차단과 능동적 처리) 공법 기술 개발에 관한 것으로, 연구 성과로부터 관련 원천기술 및 실용기술의 확보, 설계 및 시공 매뉴얼 제시와 이에 따른 실증사업 및 기술보완을 수행한다. 토착 미생물군에 의한 자연정화능력을 활성화시키기 위하여 저질에 자생하는 황산염환원균, 아나모스균 등의 활성을 촉진시키는 방법으로 자정능

---

력을 향상시키기 위한 생물활성촉진제를 개발하고 효능을 검증한다.

- 해양오염퇴적물 현장 처리기술은 해양오염퇴적물을 수거 후 수거 현장 또는 인접한 해역이나 연안에서 해양퇴적물에 함유된 오염물질을 목적으로 하는 최종처리방안에 적합한 수준까지 처리할 수 있는 기술을 개발하는 것이 목적이다. 이를 위하여 현재 국내 관련 정화기술 중 오염물질의 처리 기작이 유사한 오염토양 정화기술에서 주로 사용되는 입자분리 및 세척처리에 기초하여 두 처리 공정을 개별적으로 정용하지 아니하고 상호 유기적으로 연결하여 하나의 일관된 흐름 속에서 처리할 수 있는 새로운 처리기술을 개발할 필요가 있다. 최종 결과물으로써 해양오염퇴적물에 함유된 오염물질의 처리 기작을 규명하고, 입자분리 및 세척 기반 처리기술을 개발하며, 처리기술에 대한 실증을 통하여 신뢰성을 확보함과 동시에 특허출원/등록 등 지적재산권을 창출하여 새로운 기술을 이전하고, 또한 처리 공정에 대한 상용 규모 설계를 하여 향후 처리장치를 제작하여 실제 해양오염퇴적물 정화복원 사업 현장에서 원활하게 활용 될 수 있는 기반을 확보할 필요가 있다.



## 제2장. 국내외 기술 개발 현황

---

### 제1절. 국외 기술개발 현황

- 해양오염퇴적물 정화기술 및 산업은 미국을 중심으로 캐나다, 일본, 노르웨이, 독일, 영국 등 선진국이 주도하고 있다. 선진국에서는 해양오염퇴적물의 정화기술로 감시하 자연정화 기법(Monitored Natural Attenuation, MNA), 준설후 처리기법, 피복기법의 세가지가 동등한 가치를 인정받고 있으며 정화사업 대상 해역의 지정학적 특성과 오염 특성에 따라 적합한 정화기법을 하나 또는 그 이상 복합적으로 선정하여 사용하고 있다. 오염퇴적물이 있는 해역에서도 오염특성에 따라 오염정도가 심하지 않고 해수로의 유출이 주변 생태계 및 인간활동에 위해를 가하지 않는 정도라면 감시 하 자연정화기법을 적용하고 있으며, 오염에 의한 생태계 파괴 및 인간활동에 위해가 가해질 정도인 경우에는 준설 및 피복기법을 해역 특성에 따라 선택적으로 적용하고 있다.
- 미국에서는 1980년대 오대호 관리프로그램을 시작으로 수많은 오염퇴적물 정화복원 기술을 개발하여 현재 약 250여개 기술이 오염 지역 및 오염특성에 따라 개별적, 복합적으로 사용되고 있으며, 다양한 정화복원 기술이 지속적으로 개발되고 있다.
- 수거 해양오염퇴적물의 처리기술 분야에서는 물리/화학적 처리기술로 현장 복토, 봉쇄, 고정화/안정화 처리방법 및 고립처분 방법 등이 개발되어 활용되고 있다. 해양오염퇴적물의 중간 처리기술은 입자분리, 생물학적처리, 화학적처리, 추출/세척, 고정화(고형화/안정화), 열처리(과괴, 탈착) 등 주로 6가지 처리기술이 개발되어 사용되고 있다. 최근 독일에서는 오염된 퇴적물을 수거 현장에서 처리하여 해저면으로 되돌려 주는 기술이 개발되었으며, 파일럿 장비 시범운용을 거쳐 현장 적용 단계에 있다.
- 피복기술로는 오염퇴적물을 수계로부터 고립시키는 물리적 차단을 위한 단순 피복기술에서 오염물질의 안정화, 고정화를 통하여 오염의 근본적 완화를 도모하는 반응성 피복기술의 개발 및 적용이 활발히 이루어지고 있다. 노르웨이는 현재 준설된 퇴적물은 hazardous material로 분류되어 재활용이 불가하여 고정화 후 재활용을 추진하고 있고, 최근 피복기술의 현장 적용이 활발하다. 현재 산업화가 급속도로 진행되고 있는 중국, 동남아시아 등 지역에서 해양환경에 대한 인식 변화로 해양오염퇴적물 정화·복원산업에 대한 새로운 시장 창출이 기대되고 있다.
- 구미 선진국의 경우 황산염환원균 등과 같은 미생물을 이용하는 현장생물정화기법(In-situ bioremediation)으로 오염된 토양, 지하수, 해양 등을 저비용으로 처리하기 위한 연구를 활발히 진행하여 왔으며, 최근에 실용화 가능성을 확인하고 현장적용기술에 대한 연구를 진행하고 있다. 일본의 경우는 석회석을 저질 상부층에 투여하여 유기물질을 분해를 촉진하는 기술을 개발하여 실용화하고 있는 실정이다. 이전에 연구된 오염된 퇴적토 처리기술로는 고로슬래그, 석고, 유기점토와 벤토나이트 등을 활용하여 복토하는 방법으로 오염물과 청수를 단순 차단하는 방법이 많았으나, 본 연구에서 개발하고자 하는 생물활성촉진제와 반응성 차단제와는 효율성과 비용면에서 큰 차이가 있다.
- 미국 텍사스주립대의 Holmes 교수 연구팀은 mixed marine bacteria를 이용하여 해양 침전물 속의 아연과 카드뮴을 처리하였음. 아연과 카드뮴을 이용하여 박테리아를 먼저 선별하였으며, 선별된 박테리아를 이용해 144시간동안 아연과 카드뮴의 농도 감소를 확인하였음. 이를 통해 marine bacteria를 이용한 해양 퇴적물 오염물 정화 기술 개발의 가능성을 보여 주었지만, 구체적인 균주 개발을 진행하지 않았고, 지속 시간 및 정화 방법에 관한 구체적인 기술 개발이 미흡하다.

- 
- 일본의 Kochi 대학의 Nankoku 교수 연구팀은 특정한 여러 개의 marine bacteria가 가지는 수은에 대한 강한 저항력을 이용하여 수은, 카드뮴, 납과 같은 중금속을 정화하였음. 이 균주는 *Alcaligenes faecalis*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus* sp., *Pseudomonas aeruginosa*, *Brevibacterium iodinium*의 다섯가지로 개발되었으며, 이를 이용해 72시간에서 96시간 사이에 70%의 카드뮴 처리능과 98%의 납 처리능을 보여주었음. 이를 토대로 독성을 가진 중금속의 생물 정화 기술에 응용될 수 있을 것으로 보인다.
  - 중국 Xiamen 대학의 Zhong 교수 연구팀은 박테리아를 이용한 PAH 분해 정화 기술을 제시하였음. Marine bacteria를 이용하여 균주를 선별하였고, 균주의 종을 밝혀내었으며 그를 이용해 PAH의 효과적인 분해를 유도하였음. PAH의 구성요소 중 세 가지인 phenanthrene, fluoranthene, pyrene 세 가지를 89% 이상의 높은 수율로 분해하는 데 성공하였음. 이 세 가지의 균주는 *Aureobacterium* sp., *Arthrobacter* sp., *Rhodococcus* sp.로 구분하였음. 이와 같이 marine bacteria를 이용한 해수의 중금속 및 PAH 처리에 관한 연구는 활발히 진행되었지만, 여전히 해양 퇴적물 정화 기술에 관한 연구는 진무하다.
  - 미생물 담체 기술 개발에 대한 해외 연구도 활발하게 진행되었음. 무기물, 유기물, 생체물질과 같은 다양한 물질이 사용되는데 대표적으로 중국의 An 교수 연구팀은 산화철과 폴리우레탄 복합체를 이용하여 미생물 고정화 담체를 제작하여 담수 처리에 응용하였음. 이 담체는 toluene을 정화시키기 위해 사용되었으며, 가장 많이 연구되는 담체 중 하나인 폴리우레탄 담체에 비해 월등한 처리 효율을 보였음. 또한 뛰어난 안정성을 보유하여 중금속 수처리 기술에 많이 응용될 것으로 예상된다.
  - 생체 재료 중 하나인 키토산을 이용한 생물담체에 대한 연구도 진행되었음. 중국 베이징의 Xiaojun Ma 교수 연구팀은 알긴산염-키토산-알긴산염 복합체를 마이크로캡슐화한 담체를 이용하여 미생물의 성장 및 안정성을 관찰하였음. *Escherichia coli*와 *Saccharomyces cerevisiae*의 두 가지 균주를 고정화하였으며 이를 통해 생체 분자로 제작된 담체 내의 미생물의 활성 최적화를 구축함, 그러나 산화철 및 키토산을 이용한 담체는 대량생산이 쉽지 않고 가격 면에서 경쟁력이 부족하며, 해양 정화에 최적화되어있지 않은 단점이 존재한다.
  - 구미 선진국의 경우 최근에 토양오염, 지하수, 해양 오염 등의 정화를 위하여 황산염환원균 등과 같은 미생물을 이용하여 현장생물정화기법(In-situ bioremediation)으로 오염물질을 저비용으로 처리하기 위한 연구를 활발히 연구되고 있으며 실용화 가능성이 확인되어 현장적용기술에 대한 연구가 진행 중에 있다. 가까운 일본의 경우는 석회석을 저질 상부층에 투여하여 유기물질을 분해를 촉진하는 기술을 개발하여 일부 실용화하고 있는 실정이다.
  - 최근 국외 피복정화 및 현장처리기술 적용현황
-

대상 해역	현황
Lower Duwamish Waterway (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 워싱턴주 시애틀의 superfund site인 Lower Duwamish Waterway(수로구역) 피복정화를 2007년 설계하여, 2012년 시공완료(Seattle Public Utilities)</li> <li>- 전체 정화대상 중 25% (10,000cy)를 준설, 75% (30,000cy)를 피복기술로 정화</li> <li>- 12 inch sand layer(0.5% GAC포함)와 gravel layer로 설계함</li> </ul>
Hamburg harbor (독일)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- North sea에서 30년간의 유지준설을 수행함.</li> <li>- 3백만 m<sup>3</sup>/yr를 relocation 처리</li> <li>- 1993년부터 1백만m<sup>3</sup>/yr를 METHA에서 중간처리 후 land treatment하고 있음 (Hamburg Port Authority)</li> </ul>
Port of Tyne (영국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2003년 Port of Tyne에 제거대상 오염퇴적물 160,000m<sup>3</sup> 확인</li> <li>- TBT, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn, PAH가 주요 오염물</li> <li>- 3개 부두 60,000m<sup>3</sup>(94,000ton)의 first trial capping project(영국 해역 첫 시도)를 수행</li> <li>- 오염퇴적물을 해안 4마일 해역으로 이동 후, capping 시행 (2004-2005년, 총 3.2백만파운드)</li> <li>- 피복두께 : 평균 0.2-0.25m (최대 1.0m)</li> <li>- 지속적인 모니터링과 피복층 유지(0.6m) 수행 중 (The Centre for Environment, Fisheries &amp; Aquaculture Science)</li> </ul>
Oslo harbor (노르웨이)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 노르웨이 Oslo harbor의 내부의 오염퇴적물 450,000m<sup>3</sup>를 이동처분 후 0.4m의 crushed rock(부산물)로 피복(Oslo Port Authority)</li> <li>- 향후 700,000m<sup>3</sup> 준설, 1,000,000m<sup>3</sup> 피복 계획임</li> <li>- 추가로 광범위한 피복정화 계획을 추진함</li> </ul>
Eagle harbor(미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 워싱턴주 Eagle harbor에 1994년부터 2008년까지 피복공법 시공 (U.S. Army Corps of Engineers)</li> <li>- 10년이상 장기 모니터링 수행 중</li> </ul>
Puget Sound (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 워싱턴주 Puget Sound만의 Naval Shipyard에 2012년 activated carbon cap 시공(US Navy, 피복소재의 환경적 영향 고려 선정)</li> <li>- Cu, Zn, Pb, PCB, PAH가 주요 오염물질</li> <li>- 2013-2015년까지 매년 모니터링 계획을 수립</li> <li>- Sediment profile image (SPI) camera를 활용</li> <li>- Placement cost : \$11.62/sq.ft (소재비용, 운송, 시공비 포함), 144천원/m<sup>2</sup></li> </ul>
The gulf of Mexico, Gautier, MS (미국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 피복 시공(2011년)</li> <li>- 22,000m<sup>3</sup> organoclay RCM, 44,000 kg bulk organoclay(Pier주변)를 사용함</li> </ul>
Grenlandfjord (노르웨이)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수십 km<sup>2</sup>에 걸쳐 광범위한 dioxin 오염</li> <li>- Thin cap(3cm)을 설계, 시공함(Activated carbon 1cm, clay 3.7cm, lime stone 2.1cm 확인)</li> <li>- 100×100m의 filed test를 수행(30m, 100m 수심해역, 2009년)</li> <li>- 30m 해역에 activated carbon(1-2 cm)의 효과가 가장 우수함(2년후 효과 지속)</li> </ul>

○ 최근 국외 피복소재 기술동향

기관	현황
AquaBlok Ltd(미국)	- Organoclay를 주성분으로 하는 다양한 AquaBlok 제품군을 개발하여 피복소재로 상용화
Biologge(노르웨이)	- 미국 Aquablok사와 기술제휴로 유사제품을 상용화 - Reactive Core Mat(RCM)을 개발하여 시공성이 우수한 피복공법
CETCO(미국)	- 두 층의 geotextile에 1.9 kg/m <sup>2</sup> 의 GAC 또는 3.8 kg/m <sup>2</sup> 의 organoclay 부착

## 제2절. 국내 기술개발 현황

- 현행 해양오염퇴적물 정화·복원사업 체계에 따른 정화사업은 2008년 이후 시작되어 부산 남항과 부산 용호만과 여수 신항, 울산 방어진항의 4개 해역에서 정화사업이 완료되었으며, 현재 울산 장생포항 및 진해 행암만에서 정화사업이 추진 중에 있다. 울산연안특별관리해역 중 울산만 일부 해역(염포 부두~현대 중공업 조선소)과 포항 동빈내항에서 해양오염퇴적물 분포 현황 조사(타당성 조사 대체, 2015년)를 수행 중이며, 해역별로 각각 실시설계(2016년) 및 정화사업(2017년부터)이 시작될 예정이다. 또한 진해 행암만, 울산 장생포항에서 실시설계(2014년)가 완료되어, 2015년부터 정화사업이 시작되었다. 현재 해양수산부에서 관리하는 “국가 해양오염퇴적물 정화사업 우선순위”에 총 18개 해역에서 정화사업이 계획되고 있으며, 해양오염퇴적물 분포 현황조사가 지속적으로 추진될 예정이므로, 향후 정화사업이 전국 연안의 오염 우려 해역으로 지속적으로 확대 실시가 예상된다.
- 해양수산부에서 2004년부터 2015년까지 27개 오염 우려 해역(전체 국가관리 해역 대비 4.3%)을 대상으로 실시한 해양오염퇴적물 분포 현황 조사결과, 21개 해역(77.8%)에서 정화복원이 필요할 정도로 오염된 퇴적물을 발견하였으며, 대상 물량은 최소 8백만m<sup>3</sup> (단가: 105천원/m<sup>3</sup>) 이상으로 최소 8천4백억원 ~ 1조원이상 해양오염퇴적물 정화복원 시장이 형성 될 것으로 판단된다.(참고: 토양오염정화시장 약 1천억 원/년)
- 현재 추진되는 정화사업에서는 오염된 퇴적물을 수거한 후 적절한 중간처리를 거쳐 연안매립(신선대 투기장)으로 최종 처리하고 있지만, 현재까지 사용되고 있는 중간처리 기술이 다양한 해역 및 오염 특성에 대응할 수 없으며, 정화사업 현장 인근에 중간처리용 부지 확보에 애로가 발생하고 있다. 특히 해양 퇴적물은 대부분 미세토양(silt, clay)으로 구성되어 있음에도 현재 국내 상용 처리기술은 75 $\mu$ m 이하의 미세입자의 처리에 부적합하다. 이에 따라 정화사업의 추진에 애로가 발생하고 있고, 향후 지속적인 연안오염 정화사업 수행에 걸림돌이 될 것으로 예상되며, 이를 해소하기 위하여 정화사업 현장의 다양한 해역 및 오염 특성에 대응할 수 있는 새로운 정화·복원 기술 개발이 시급히 요구된다.
- 해양수산부는 해양오염퇴적물의 조사와 정화·복원사업의 통일된 절차나 기준을 마련하기 위한 기존 고시(해양오염퇴적물 조사 및 정화복원 범위 등에 관한 규정, 국토해양부 고시 제2011-700호, 2011. 11. 30)를 일부 개정하여 고시하였다.(해양오염퇴적물 조사 및 정화복원 범위 등에 관한 규정, 해양수산부 고시 제2013-206호, 2013. 8. 30., 일부개정)
- 해양오염퇴적물 피복 및 현장처리 기술이 개발될 경우, 해양뿐만 아니라 하천, 호소 등 다양한 수역에서 오염된 퇴적물 정화사업에 활용할 수 있으므로 국내·외 관련 산업 활성화를 통하여 기술적, 사회적 파급 효과뿐만 아니라 창조경제에도 크게 이바지 할 것으로 예상된다. 또한 개선된 환경은 국민들의 삶의 질을 향상시킬 것이다.

- 한양대학교에서는 유독 중금속 오염물질의 제거 및 처리를 위한 미생물 균주를 선별하고 개발함. 주로 biosorption과 bioaccumulation을 이용하여 카드뮴, 수은, 은, 납, 니켈, 아연 등의 중금속을 처리하였으며 그 해당 균주는 sulfate-reducing bacteria등과 같은 sulfide 이온 생성 유도 박테리아와 *Phanerochaete chryosporium*, *Pseudomonas aeruginosa* 등과 같은 미생물들이 사용됨. 이는 여러 미생물을 이용한 중금속 다성분 제거 시스템을 구성할 수 있는 기반기술로 예시할 수 있다.
- 순천대학교에서는 순천만을 모델로 하여 환경정화 역할을 기대할 수 있는 미생물에 대한 기초자료를 수집. 특히 토양으로부터 다환 방향족 화합물인 PAH를 획득하여 PAH의 분해능을 갖는 4개의 균주(SCB1, SCB2, SCB6, SCB7)를 선별하였고 이들을 각각 *Burkholderia* sp., *Alcaligenes* sp., *Achromobacter* sp., *Pseudomonas* sp.로 동정하였음. 이를 이용하여 PAH 분해균주들이 PAH로 오염된 토양환경의 정화작용에 중요한 역할을 할 수 있음을 제시했음. 하지만 담수용 미생물 균주만이 개발되었으며 상대적으로 해수 및 퇴적물의 중금속 및 PAH 분해용 미생물에 관한 연구는 거의 없다.
- 생물담체에 관한 연구도 활발히 진행되었음. 한국해양대학교에서는 대나무활성탄을 이용한 생물담체를 개발하여 원유로 오염된 해양저질의 정화에 응용하였음. 오염된 해안으로부터 수종의 미생물 군집을 농화배양하여 분해가 가능한 미생물군집을 분리하였음. 이 미생물은 *Alcanivorax* sp. 로 밝혀졌으며, 이를 대나무활성탄등과 혼합하여 생물담체를 구성하여 5주 동안 Petroleum hydrocarbon(THP)의 90% 분해효율을 나타내었다.
- 담체 개발에는 여러 가지 물질이 이용되는데 경북대학교에서는 3원 공중합 양이온 유기 고분자를 이용하여 유색 폐수용 고효율 고분자 담체 개발에 성공하였음. 유기 고분자 단독 및 복합사용으로 인한 유색 폐수 제거 매커니즘을 규명하고 각각의 유기 고분자 응집제에 대한 효율을 평가하여 최적 유색폐수 처리 기술을 확보하였다.
- 폐수의 생물학적 처리를 위한 효율적인 담체의 개발은 기업체에서도 활발히 연구되었음. 포항공대와 (주)POSBEE 는 미생물 막 담체가 가지는 고부하량 처리 및 미생물 활성 유지가 상대적으로 용이하다는 장점을 이용해 BioF를 개발하였음. 이는 활성탄, 슬래그, 미네랄 등이 적절히 혼합된 활성무기물로 구성이 되어있어 비중을 조절할 수 있으며, 균일한 분산이 이루어지게 하였음. 그러나 아직 해수용 미생물 담체 개발은 진행이 부진한 상태이며 해양 퇴적물의 정화를 위한 피복형 담체 개발은 전무한 상태이다.
- 국내에서 진행된 연안저질에서의 유기오염물질 및 부영양화 원인물질과 관련한 연구는 아직까지 단순히 퇴적물내의 오염물질 함량을 조사분석하는 정도에 머물고 있으며, 오염된 저질의 정화 및 처리에 대한 연구는 아직 걸음마 단계이다. 연안해역 환경이 심각하게 오염되었음에도 불구하고 그 동안 정화를 위한 기술개발 실적이 미흡했던 것은 해양환경이라는 영역이 워낙 광범위한 반면 이 분야에 대한 국내 전문가들이 많지 않기 때문인데, 국민 생활환경과 밀접한 육상오염분야의 연구에 비해 해양오염분야는 상대적으로 관심도가 낮았기 때문으로 평가된다.
- 본 연구에서 개발 하고자 하는 기술은 구미 선진국에서 최근 연구하여 보고 된 바에 따른 미생물을 이용한 방법이나 일본에서 개발한 석회를 이용한 처리법과는 구별되는 독창적인 것으로서 반응성 차단제를 이용하여 저질에 존재하는 오염물질의 이동성을 제한하고 자정능력을 향상시키기 위한 경제적인 현장생물정화기술의 개발에 대한 것이다.
- 국내 주요 관련 업체
  - 해양환경관리법에서 해양오염퇴적물 정화사업은 등록업으로 규정되어 있으며, 정화사업 추진과 직접 관련되는 업체는 ‘퇴적오염물질수거업’에 해당되며, 2015년 6월 현재 25개 업체가 등록되어 있다.

(주)조양산업	(주)선양	(주)태길종합건설	(주)한진중공업
대기해양(주)	(주)신대양	(주)코스코	코리아쌀베지(주)
(주)이구해양	중흥해양개발	(주)오대양선박	(주)에이치엔
(주)대안해양	(주)프런티어오프쇼어 서비스	(주)남서해양개발	(주)신해강
해륙산업(주)	범조해양	한국해양(주)	해우환경
(합)보령환경	보고해양개발	(주)케이시	(주)케이에이치제이
신성환경(주)			

- 현재 정화사업에서 사업자 선정은 외국에서처럼 사전 기술심사(Pre-Qualification)가 아닌 적정 금액 입찰로 진행되고 있기 때문에 해양오염퇴적물 정화사업을 원활하게 수행할 수 있는 장비를 갖추지 못한 업체가 많으며, 사업자로 선정된 업체도 주로 5~6개 업체의 장비/시설/인력을 임차하거나 하도급을 통하여 정화사업을 수행하고 있어서 특히 정화사업 중 환경관리에 대한 세심한 주의가 요구되고 있다.
- 중금속, 유해화학물질 등 각종 오염물질에 의해 오염된 퇴적물의 처리에 활용 가능한 유사한 기술을 보유하고 있는 업종으로는 토양환경보전법에 규정된 '토양정화업체'가 있으며, 2014년 10월 현재 86개 업체가 등록되어 있다.
- 현재 토양정화업체가 보유한 상용 처리기술 중 대표적인 입자분리(Particle separation) 및 세척(Washing/ Extraction) 처리기술로 해양오염퇴적물의 처리 정도를 실증한 결과 미세입자에 함유된 오염물질을 제어할 수 있도록 수정, 보완한다면 해양오염퇴적물 정화사업에 활용 가능한 것으로 보고되었다.
- 국내에서 진행된 연안저질에서의 유기오염물질 및 부영양화 원인물질과 관련한 연구는 아직까지 단순히 퇴적물내의 오염물질 함량을 조사분석하는 정도에 머물고 있으며, 오염된 저질의 정화 및 처리에 대한 연구는 아직 걸음마 단계에 있다. 연안해역 환경이 심각하게 오염되었음에도 불구하고 그 동안 정화를 위한 기술개발 실적이 미흡했던 것은 해양환경이라는 영역이 워낙 광범위한 반면 이 분야에 대한 국내 전문가들이 많지 않기 때문이다.
- 또한, 우리의 생활환경과 밀접한 육상오염분야의 연구에 비해 해양오염분야는 상대적으로 관심도가 낮았기 때문으로 평가된다. 본 연구에서 개발 하고자 하는 기술은 구미 선진국에서 최근 연구하여 보고 된 바에 따른 미생물을 이용한 방법이나 일본에서 개발한 석회를 이용한 처리법과는 구별되는 독창적인 것으로서 반응성 차단제를 이용하여 저질에 존재하는 오염물질의 이동성을 제한하고 자정능력을 향상시키기 위한 생물활성촉진제의 개발과 이를 이용한 경제적인 현장생물정화기술의 개발에 대한 것이다.

# 제3장. 연구 수행 내용 및 성과

## 제1절. 1차년도 연구의 내용 및 결과

### 1. 1차년도 연구개발 목표

- 해양오염퇴적물 정화사업을 위해 수거방법 개선, 피복공법, 현장처리기술, 모니터링 기법을 위한 기초 요소기술을 개발

### 2. 1차년도 연구개발 내용 및 범위

#### 가. 해역(오염)유형별 최적 정화공법 의사 결정도구(초안) 개발

- 해양오염퇴적물 정화·복원 방법의 선정은 대상지역의 특성, 해역 및 퇴적층의 생지화학적 특성 그리고 주변지역의 사회·경제학적 특성 등을 고려하여 가장 효율적인 방법을 선택하는 것이 중요하다.

[표. I-가-1] 해양오염퇴적물 정화·복원방법 및 주요내용

정화·복원 방법	주요 내용	장점	단점/한계점
자연정화	자연적인 분해, 퇴적	인위적인 복구에 따른 2차 오염 방지	장시간 기간 필요 정화추이에 따른 장기모니터링 필요
현장처리법 표면피복법	생물적, 화학적 고정 및 안정화 오염지역 피복 (모래, 자갈, 지오그리드 등)	환경친화적인 기술 상대적으로 저비용 효과적인 오염물질 봉쇄 2차 오염 영향 적음	해수유동 특성 등에 따라 효과미비 가능 피복물질의 침식가능 피복물질의 변화 및 장기 모니터링 필요
퇴적물제거법	준설	안정적인 기술체계 확립 항만에서는 항로개선 준설 효과	제거퇴적물 처리에 따른 2차 오염 가능 상대적 고비용

### (1) 방안 선정 시 검토 사항

#### (가) 조건 검토

- 대상 지역 및 환경 특성에 적합한 정화·복원 방안을 단수, 또는 복수로 선택할 경우 동일한 환경조건에서 각각의 정화·복원 방법을 평가하여 최적의 방법을 선택하는 것이 중요하다.

[표. I-가-2] 오염퇴적물 정화·복원방법과 사전인지 조건

주요특징	자연정화방법	표면피복방법	준설방법
지역적 특성	미래의 주변육상 지역의 이용 및 새로운 구조물 건설이 예정된 지역에는 부적합	적절한 형태 및 양의 표면피복물질 공급이 양호한 지역	준설된 오염퇴적물의 처리 및 폐기장소의 확보가 가능한 지역

	수용가능한 시간내에서 생물학적 유용성 혹은 오염물의 독성 감소가 지속적으로 나타나는 지역에 적합	수심이 비교적 얕아 표면피복방법을 수행하기에 적합한 지역 대형선박의 이동이나 정박에 따라 표면피복물질이 손상받을 가능성이 적은 지역에 적합	해저에 케이블 혹은 기타 구조물이 존재하는 지역에서는 부적합 항해준설이 예정되거나 시행 중인 지역에 적합
인간 및 생태학적 환경	표면피복방법 혹은 준설방법에 의해 비가역적으로 손상될 수 있고 환경적으로 민감한 지역에 적합	장기간에 걸친 오염퇴적물의 영향이 생태계 환경에 악영향을 미치거나 서식지 파괴 혹은 퇴적층 교란이 일어나지 않아야 하는 지역	퇴적물 제거가 퇴적물의 교란이나 생태서식지 파괴보다 우선되는 지역에 적합
유체역학적 조건	퇴적층의 침식이나 이동 가능성이 적어 오염물질의 확산가능성이 낮은 경우에 적합	유체역학적 특성들이 표면피복물질을 침식가능성이 적을 경우 육상유입원이 표면피복지역에 재퇴적되지 않고 오염물질이 확산가능성이 낮을 경우 적합	조류나 수괴의 움직임이 적어 준설 중 재부유 혹은 이동 가능성이 비교적 낮은 경우에 적합
퇴적물의 특징	퇴적물이 응집성이 높아 재부유 가능성이 적을 경우 적합	표면피복방법을 통해 퇴적물이 피복을 지지할 수 있는 충분한 힘의 고밀도를 가지고 수분이 낮을 경우에 적합	퇴적층 상부에 해양쓰레기나 기타 유해물질의 제거가 준설과 병행하여 쉽게 처리될 수 있는 경우
오염물질의 특징	오염물질이 쉽게 생물학적으로 분해되거나 낮은 독성물질로 변형될 가능성이 높을 경우에 적합 오염정도가 낮으며 확산영역이 크지 않을 경우 적합 오염물질이 낮은 정도의 생물학적 축적정도를 갖을 경우 적합	표면피복방법을 통해 오염물질의 확산이나 이동이 일어날 가능성이 적은 경우에 적합	비교적 높은 오염도를 가지고 있으며 불연속적인 영역까지 확산될 가능성이 높을 경우 적합

- 모든 해양오염퇴적물 정화·복원 방법은 특정 장소에 적용될 경우 장, 단점을 가지며, 개별적으로 완전하게 확인하는 것이 해양오염퇴적물 관리에 매우 중요하다. 즉, 해양의 환경에서의 오염된 퇴적물로부터의 관리는 해양 및 지상의 환경들 양쪽 모두에 부가의 위험들의 발생의 결과를 가져올 수 있다. 오염된 물질들의 제거는 오히려 현존하는 생태계에 충격을 줄 수 있으며, 오염물들을 다시 유동화시켜 인간 및 환경에 부가의 위험들을 가져올 수 있다. 따라서 오염된 퇴적물 장소에서의 관리 결정들은 각 대체 관리 활동들의 상대적 위험요소들에 기초하여야 한다. 표 I-가-3은 관리자가 정화·복원 방법을 결정하는데 도움을 줄 수 있는 비교표이며, 이 비교들은 다양한 조건에 기초해서 구성되었다. 해



당 지역의 구체적인 비교 분석이 아닌 세 가지 정화·복원 방법 간의 차이점을 구별하기 위해 구성되었으며 구체적인 지역분석은 더 복잡적이고 많은 지역 고유의 상황 등을 포함해야 한다.

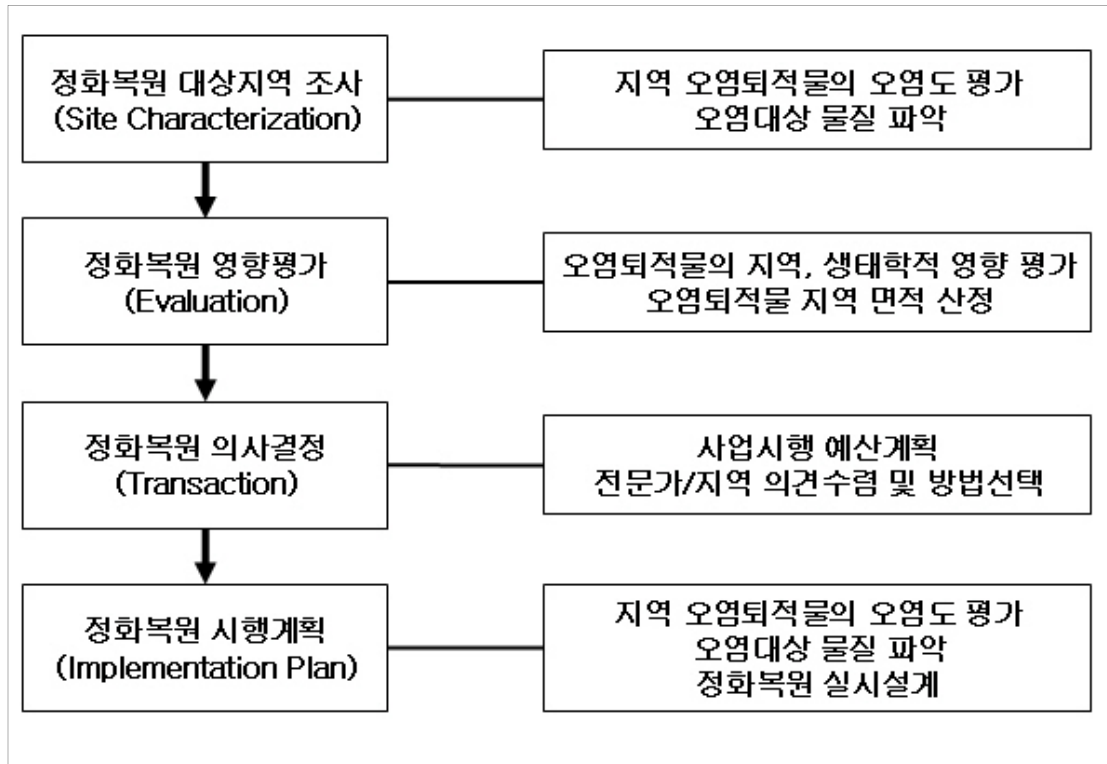
[표. I-가-3] 다양한 정화·복원 방법을 결정하기 위한 주요 요소

결정요소	자연정화방법	표면피복방법	준설방법
환경보호	일반적으로 환경보호를 위한 자연적인 진행과정에 따라 결정 저수준의 짧은 시간동안의 보호를 제공할 수 있으나 육상오염원이 적절한 차단으로 장기간의 환경보호 가능	충분한 표면피복물질에 따라 지속성 확인 가능 일반적으로 보통의 환경보호를 제공 확장된 지역, 표면 피복 방법의 설계 등에 따라 장기간의 유지 가능	부유토사와 준설 잔여물질의 확산 정도에 따라 결정 보통의 환경보호를 제공할 수 있으나 잔여물질 및 부유토사 그리고 준설토사 등의 처리방법에 따라 주변환경 피해 우려
법적인 요건	일반적으로 화학 및 생물학적 오염평가 등을 적용하여 평가	화학 및 생물학적 오염평가 등을 적용 수질환경보호법, 공유수면이용관련법 및 연안지역보호관련법 등을 고려하여 결정	화학 및 생물학적 오염평가 등을 적용 수질환경보호법, 공유수면이용관련법 및 연안지역보호관련법 등을 고려하여 결정 준설토 등의 처분은 폐기물관리관련법 등을 고려하여 결정
장기적인 영향	지역적인 특성에 따라 (오염원 유입현황 등) 저수준에서 고수준까지의-위험 감소와 잔여 위험도-장기적인 영향 개발계획 등에 따른 오염원 유입으로 인하여 체계적인 자연정화·복원이 불가능할 가능성 등에 대한 주의 5년 이상의 장기적인 사후 관리 필수	표면피복물질의 설계, 종류, 방법, 저질지역의 지질학적 특성 등에 따라 저수준의 잔여위험도에서 고수준의 위험도 까지 영향을 가짐 오염물질이 피복물질 하부에 남겨져 있기 때문에 장기적으로 오염물질의 유출을 주의 5년 이상의 장기적인 사후 관리 필요	오염원 유입이 차단될 경우 준설 후 잔여퇴적물에 의해 고수준의 위험도를 가지나 일반적으로 낮은 장기적 영향을 가지고 있음 오염퇴적물을 제거할 때 발생하는 부유토사에 의한 이차오염 주의 준설퇴적물의 이동 및 처리 과정에 발생하는 이차오염 주의
단기간의 영향	자연정화 초기에는 오염된 퇴적물에 의한 주변생태계의 영향이 있으나 오염유입원이 차단된 이후 점차 감소 초기 단계에는 자연정화지역에서의 어폐류 개발 제한 보호를 달성할 수 있는 최장의 시간은 자연적인 진행 상황과 오염물질의 생물학적 분해 가능성에 좌우 보호를 달성하기 위해 걸리는 시간은 불확실	표면피복설계, 피복물질의 종류 등에 따라 단기간적인 생태계 영향이 틀림 표면피복의 배치와 최초 단계에서 방출될 수 있는 오염물질로 인하여 단기간적으로 영향 존재 목표를 달성하기 위해 가장 단기간에 완료 가능 생물군의 완벽한 회복은 장시간 소요	준설에 따른 부유토사의 방출과 준설토의 이동 및 처리에 따른 이차오염 영향이 큼 준설하는 동안 생물군에 영향을 끼칠 가능성이 있음 준설 물질과 준설토의 취급 방법과 처리는 준설하는 동안 지역사회에 혼란을 야기 보호를 달성하는데 걸리는 시간은 프로젝트의 크기와 복잡성에 따라 상이함 생물군의 완벽한 회복은 장시간 소요

시행 능력	<p>자연적인 진행과정에 대한 불확실성과 퇴적물의 안정성과 관련한 불확실성 때문에 지역환경 특성에 따라 성공여부가 좌우됨</p> <p>모니터링과 사후평가에 따른 분석 작업은 체계적으로 확립되어 있음</p>	<p>표면피복방법 및 피복물질 선택 그리고 설계와 관련된 토목기술은 체계적으로 확립되어 있음</p> <p>표면피복 건설은 수심과 흐름, 경사와 해저 물질의 지질학적 안정성, 그리고 피복물질 자체의 안정성을 포함한 몇 가지 조건 중요</p> <p>피복물질의 보존성을 모니터링하는 방법과 피복물질을 통한 오염물질의 이동에 관련된 이해도 높음</p> <p>표면피복물질의 안정도를 높이기 위해 수역의 사용과 관련된 규제 필요</p>	<p>준설방법과 기술과 관련된 토목기술 확립은 우수함</p> <p>육상 매립지에의 처분 기술은 잘 확립되어 있으나 수중 처분 방법들은 덜 확립되어 있고 장기적인 모니터링 요구</p> <p>준설효과 및 이차오염에 따른 환경영향평가 기술은 체계적임</p> <p>준설과 관련하여 수역이용과 관련한 규제 필요</p> <p>준설토 처리를 위한 육상시설에 대하여 규제와 지역의 이해 필요</p>
비용	<p>일반적으로 정화·복원 방법 시행에 대한 직접적인 지출이 필요치 않음</p>	<p>기본적인 지출은 MNR보다 높고 준설보다는 낮음</p> <p>장기간의 지속비용과 모니터링비용은 일반적으로 MNR과 준설 비용보다 높음</p>	<p>기본적인 비용은 MNR이나 표면피복보다 높음</p> <p>장기간의 모니터링 비용은 MNR과 표면피복방법 보다 낮음</p>
비용	<p>장기간의 모니터링은 정화·복원 목표점이 일치했을 때 까지 지출되며, 장기간의 모니터링은 일반적으로 퇴적물 안정성에 따라 결정</p>	<p>장기간의 오퍼레이션과 지속성 (O&amp;M)은 표면피복의 안정성과 표면피복을 통한 오염물질 흐름을 차단하는 시간에 따라 결정</p>	<p>기본적인 비용은 MNR이나 표면피복보다 높음</p> <p>장기간의 모니터링 비용은 MNR과 표면피복방법 보다 낮음</p> <p>장기간의 O&amp;M 기간은 잔여 오염물질과 준설토의 처리비용과 시간에 따라 결정</p>
지역적 영향	<p>표면피복이나 준설과 같은 인위적인 정화·복원방법 시행에 따른 지역적인 교통량 증가, 혼란 등이 적음</p> <p>인위적인 방법사용에 따른 생태계의 혼란이 적음</p>	<p>적극적인 정화·복원 시행과 함께 보다 자연친화적인 방법사용에 따른 효과</p> <p>준설이나 자연정화방법에 비해 단시간에 빠른 효과 가능</p> <p>비용대효과면에서 오염퇴적물 정화방법으로 신뢰도가 높음</p>	<p>가장 적극적인 정화·복원 방법으로 해당수역에서 오염퇴적물을 제거</p> <p>항로유지 등 일반준설이 필요한 지역일 경우 예산절감 효과</p> <p>준설에 따른 이차오염 가능성이 있으며 생태계에 혼란 가능성</p>
지역의 수용	<p>난점으로는 “아무 것도 안하는” 치료법으로 인식되어 관리의 부재에 대한 불만 제기 가능성</p> <p>자연정화능력 산정의 불확실성에 따른 목표도달 가능성이 떨어질 경우의 혼란 가능성</p>	<p>난점으로는 지역내에 여전히 오염퇴적물이 표면피복물질에 의해 덮여 있는 것으로 인식</p> <p>표면피복물질의 침식이나 이동 가능성에 따른 혼란 가능성</p>	<p>준설선의 이동, 작업, 준설물질의 처리 등에 따른 지역적인 교통량 증가 등 혼란</p>

(나) 선정 방안

- 해양오염퇴적물 정화복원 방안 선정을 위해서는 대상지역 조사를 통해 해양퇴적물의 오염도를 평가하고, 주요 오염물질을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 조사결과에 따라 대상 범위 및 물량을 산정하는 과정을 거친 후 전문가 및 지역주민의 합의와 의견수렴을 거쳐 다양한 정화·복원 방법에 대한 선별과정을 거쳐야 한다. 이를 통하여 오염퇴적물 정화·복원사업을 위한 실시설계가 이루어지고 이에 따라 사업이 지속적 그리고 체계적으로 수행되어야 함.



[그림. I-가-1] 오염퇴적물 정화·복원 방법선택 순서도

① 정화·복원 대상지역 조사 (Site Characterization)

- 대상지역의 조사는 지역의 특성과 오염현황을 판단하는 가장 중요한 일차적인 과정이다. 사전조사를 통하여 정화·복원 사업예산의 원활한 운영이 가능하며 예기치 않은 변수로 인한 변경이 적어져 효과적인 사업을 진행할 수 있다. 이러한 과정을 통하여 기본적인 수질, 퇴적물, 생물조사 뿐만 아니라 생물독성 실험, 어류조사 등을 통해 퇴적물과 생태계와의 오염상관도 작성하고 오염퇴적물이 해양생태계 혹은 지역에 미치는 영향을 분석하는 과정의 기본적인 데이터를 제공하고 사후 사업평가의 Background DB를 제공할 수 있다.

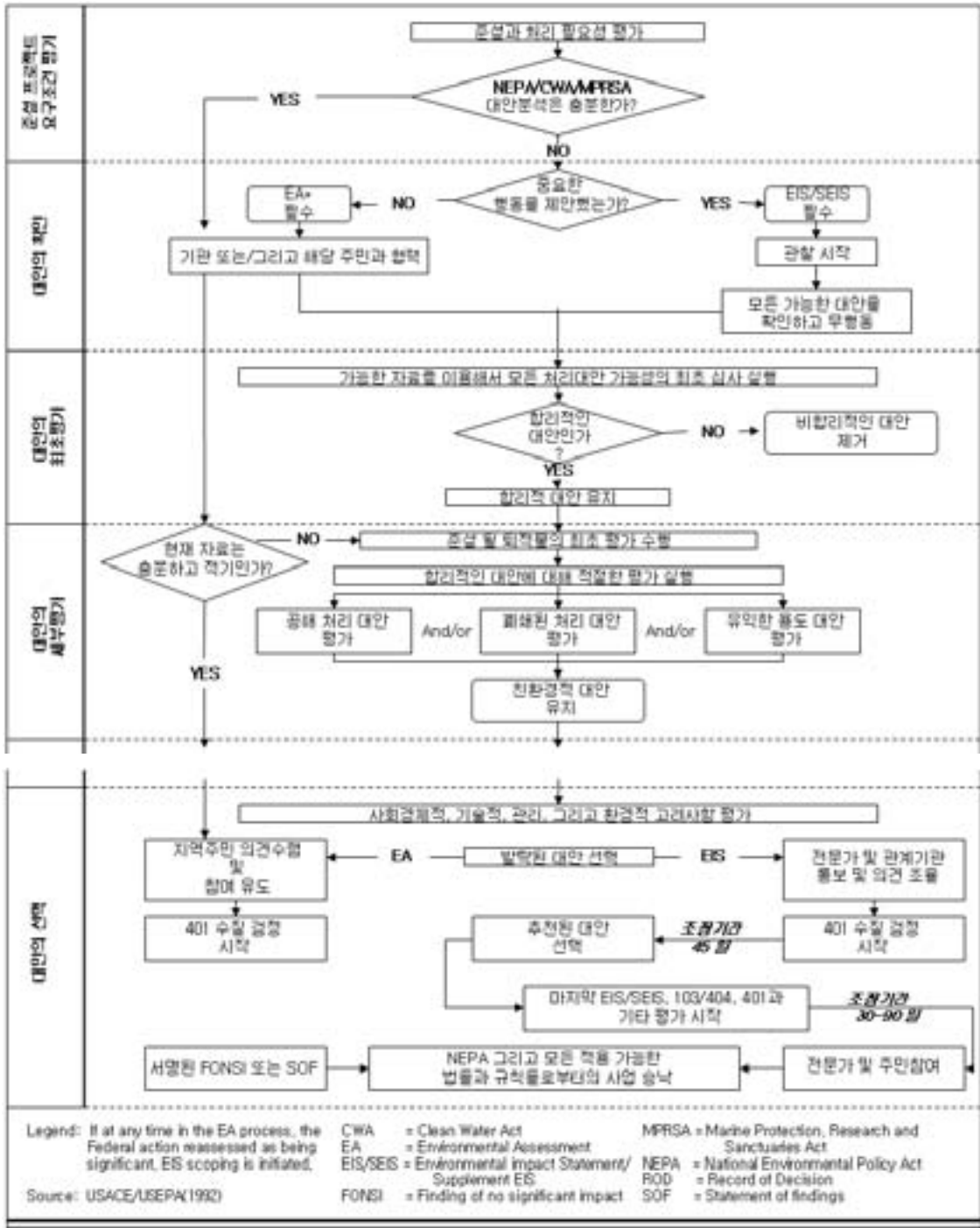
② 오염퇴적물 정화·복원 영향평가 (Evaluation)

- 영향평가 과정은 오염퇴적물 지역에 대한 생태계에 미치는 영향에 대한 과학적인 접근과정으로 오염원 추적, 역학조사 등을 통하여 오염퇴적물의 범위를 산정한다. 사전조사를 통해 파악된 퇴적물 오염지역에 대한 세부적 과학적인 연구가 수행되어야 하고 사전조사와 영향평가를 바탕으로 오염된 퇴적물 정화·복원 범위를 산정하고 이에 따른 예산상의 계획을 수립할 수 있다. 또한 환경생태계 및 사회경제학적 관점에서 접근법을 통하여 오염퇴적물 정화·복원 범위, 방법 선택을 위한 의사결정 단계를 추진하게 되고 다양한 정화·복원 시행에 따른 환경에 미치는 영향 평가 및 오염저감예측 모델링 과정을 수행한다.

---

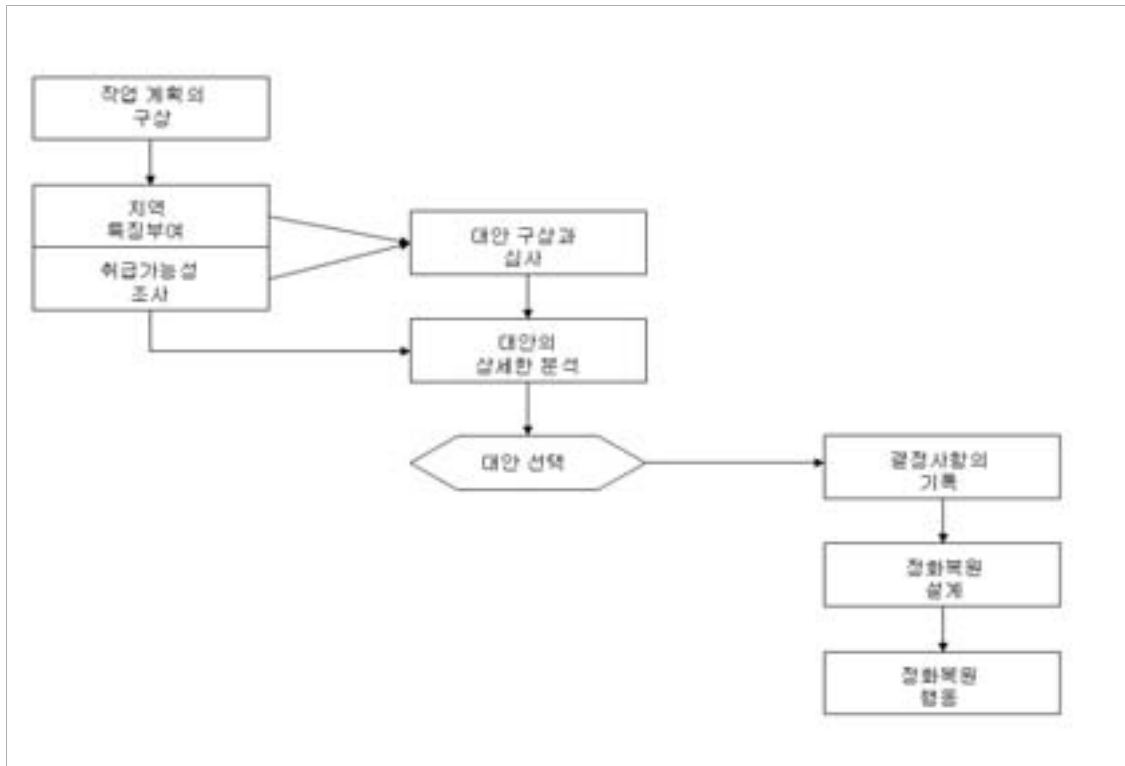
### ③ 오염퇴적물 정화·복원 의사결정 및 방법선택

- 의사결정 단계에서는 사업목적의 이해, 예산집행 계획, 사업 후 장단점 분석 등을 결정하고 전문가 및 지역주민의 합의와 의견 수렴이 중요하다. 사전조사와 영향평가를 통한 대상지역 환경에 적합한 오염퇴적물 정화·복원 방법을 선택하게 되는 과정으로 비용 분석을 통하여 비용 대 정화·복원 사업효과가 뛰어난 방법 선택을 유도해야 한다.
- 목적과 환경에 따른 오염퇴적물 정화·복원 기술 및 방법을 Screening Process 를 통하여 선별하는 다기준평가기법(Multi-Criteria Decision)을 통하여 분석요소간 상대적 중요도를 수치화하여 정량적인 형태로 결론을 도출하는 과정을 거치며 과거의 정화·복원 사업 사례 분석을 통하여 시행착오가 적은 사업계획안 수립이 가능하다.
- 오염퇴적물 정화·복원 방법을 선택하는 정책 결정 계획은 복잡한 문제나 논리적 순서 또는 결과로 인한 문제에 접근하는데 있어서의 거쳐야 할 과정이다. 계획은 순서도나 활동의 구조 그리고 정해져야 하는 결정들로 나타낼 수 있다. 정책 결정 계획은 보통 매우 특수한 곳에 적용시키기 위해 개발된다. 오염된 퇴적물을 관리하는 것은 다른 환경 정화, 회복보다 다양한 목적을 야기한다. 다른 목적들에는 항로의 건설과 유지, 급수를 받아들이는 곳에 퇴적된 퇴적물을 깨끗이 하는 것, 수로 내부에서의 건설, 저수지와 흐름제어, 급수, 재활용 또는 다른 목적을 위한 저수지로서의 활용 등이 있다. 오염된 퇴적물 관리의 모든 목적에 맞는 단 하나의 정책 결정 계획은 없다. 오염된 퇴적물 관리에 적용된 두가지의 적용된 계획은 미육군공병단과 미환경보호청에 의해 개발된 기술적 관리 구조와 수퍼펀드 프로젝트를 위해 확립된 결정 구조가 있다. 그림 I-가-2는 미육군공병단과 미환경보호청에 의해 개발된 기술적 관리 구조로 Clean Water Act; Marine Protection, Research and Sanctuaries Act; 그리고 the National Environmental Policy Act(NEPA) 간의 평균적인 요구들 도출하기 위해 계획 되었다. 이 구조는 오염된 준설 물질을 깨끗이 정화하는 것을 관리하기 위해 개발 되었으며 기존의 정책 결정 계획에서 발전 되었다. Corps/USEPA의 관리 구조는 여러 단계의 정책 결정 과정이다. 정화·복원되어야 할 퇴적물의 정보는 처분 대안의 적용성을 복합성의 증가 순으로 결정하기 위해 평가한다. 비오염화 되기로 한 퇴적물은 더 넓고 다양한 처분대안에 적용될 수 있고 평가 과정 초기에 결정될 수 있다. 정책 결정 구조에서 더 확장된 평가를 요구하는 오염된 퇴적물은, 추가적인 테스트를 하고 보통 더 적은 처분 옵션을 가진다. Corps 규정은 이 구조가 항해 프로젝트로 인한 준설물질의 관리와 Clean Water Act 의 섹션 404에 따른 준설 물질 방출을 위한 허가 프로그램의 운용에 사용 되도록 요구하고 있다.



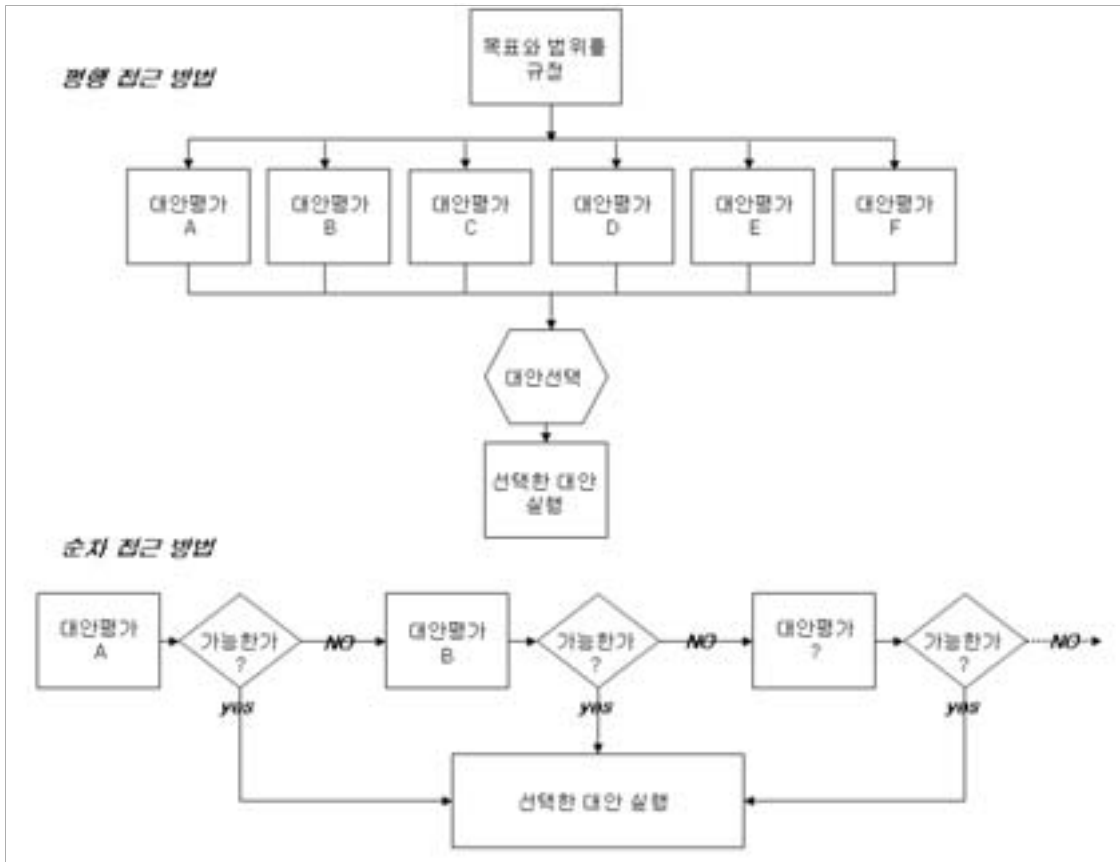
[그림. I-가-2] 미육군공병단과 EPA의 오염퇴적물 정화·복원 방법선택 결정구조

- 미국의 경우, 슈퍼펀드 프로젝트 정책 결정 구조에는 두 가지의 주요 구성요소가 있다: 구체적인 조사와 실행가능성 연구 (RI/FS)이다. 오염된 퇴적물이 포함된 슈퍼펀드 사이트에서 구체적인 조사는 다른 정보들과 함께 퇴적물의 성분과 오염물질의 확장성을 알 수 있다. 실행가능성 연구는 취급되거나 취급되지 않은 모든 합리적이고 구체적인 대안을 포함해야 한다.



[그림. 1-가-3] Super Fund 프로젝트의 오염퇴적물 정화·복원 방법선택 결정구조

- 오염퇴적물 정화·복원 방법 선택에 대한 접근방향의 사례로 미국의 환경청과 육군공병단에서 주로 사용하는 방법 중의 하나이다. 각각의 접근방법은 이익과 불이익이 있다. 수평적인 접근방법을 선택하게 될 경우 다양한 오염퇴적물 정화·복원 방법을 동일한 조건에서 평가하여 최적의 조건을 선택할 수 있는 장점과 다양한 옵션을 비교하여 다양한 방법을 선택적으로 적용이 가능하다. 그러나 많은 정화·복원 방법에 대해 개별적으로 평가를 내리기 위해서는 그만큼 비용과 시간이 투자되어야 하기 때문에 빠른 판단이 요구되는 오염퇴적물 관리를 위해서는 부적절한 경우도 발생할 수 있다. 그에 반해 수직적인 접근방법은 현재 가용한 예산 및 기술적 가능성이 높은 정화·복원 방법을 기준으로 하여 대상지역 현황에 따라 보충적인 성격의 정화·복원 방법을 추가 선택하여 시행할 수 있다. 그러나 한정적인 방법을 채택하고 수행할 가능성이 높기 때문에 좀 더 미래지향적인 기술개발에 대해 소홀히 할 수 있다는 단점이 있다.



[그림. I-가-4] 정화·복원 방법 선택의 접근 방향 사례

- 한편, 해양오염퇴적물 정화·복원사업 실시설계 단계에서는 설정된 예산과 선택된 정화·복원 방법 등에 대하여 실시지역의 세부적인 설계도를 작성하는 과정이 중요하다. 또한, 사업 시행 전후의 환경모니터링 뿐만 아니라 사업 중의 환경모니터링과 발생가능성이 있는 다양한 사고대책과 관련된 매뉴얼이 필요하며 효과적인 시간 및 예산 배분을 통하여 시행계획을 수립해야 한다.

[표. I-가-4] 오염퇴적물 정화·복원 사업실시설계 주요 구성

예산 운용 계획	장단기간의 정화·복원 사업 관련 예산 운용 분배 사업공정과 예산시행 계획	
세부 시행 계획	사업방법에 대한 예비 및 시행 검사 및 시물레이션 사업대상 지역의 정화·복원 세부 실시설계	
	준설	범위, 심도(준설량), 방향, 공법, 처리방법 등
	표면피복	범위, 피복종류, 두께, 공법, 안정화방법 등
환경모니터링 계획	사업 시행 후 공사중 및 공사후의 환경모니터링 방법 오염정화사업 효과검증 방법	

(2) 국·내외 사례 검토

- 해양오염퇴적물 정화사업 과정에서 적합한 처리기술을 평가하기 위한 절차를 마련하고자 국내·외 사례를 평가하고, 우리나라에서 활용할 수 있는 처리기술에 적합한 평가방안을

검토하였다.

**(가) 국내 사례: 환경부 오염토양 정화기술 평가방안**

- 현재 우리나라의 해양오염퇴적물 정화·복원 사업에서 기술 선정 사례가 없으므로, 오염물질의 저감 기작(Mechanism)이 유사한 오염토양 정화 기술 선정 사례를 유사 사례로서 검토한다.
- 환경부는 오염토양 정화 현장에 적용할 기술평가 시 먼저, 기술의 분류, 특성, 처리 가능한 오염물질과 장단점을 비교하여 평가한다. 표 I-가-5에 기술평가 시 기초자료를 사례로 나타내었다.

**[표. I-가-5] 기술평가 시 기초자료 (사례)**

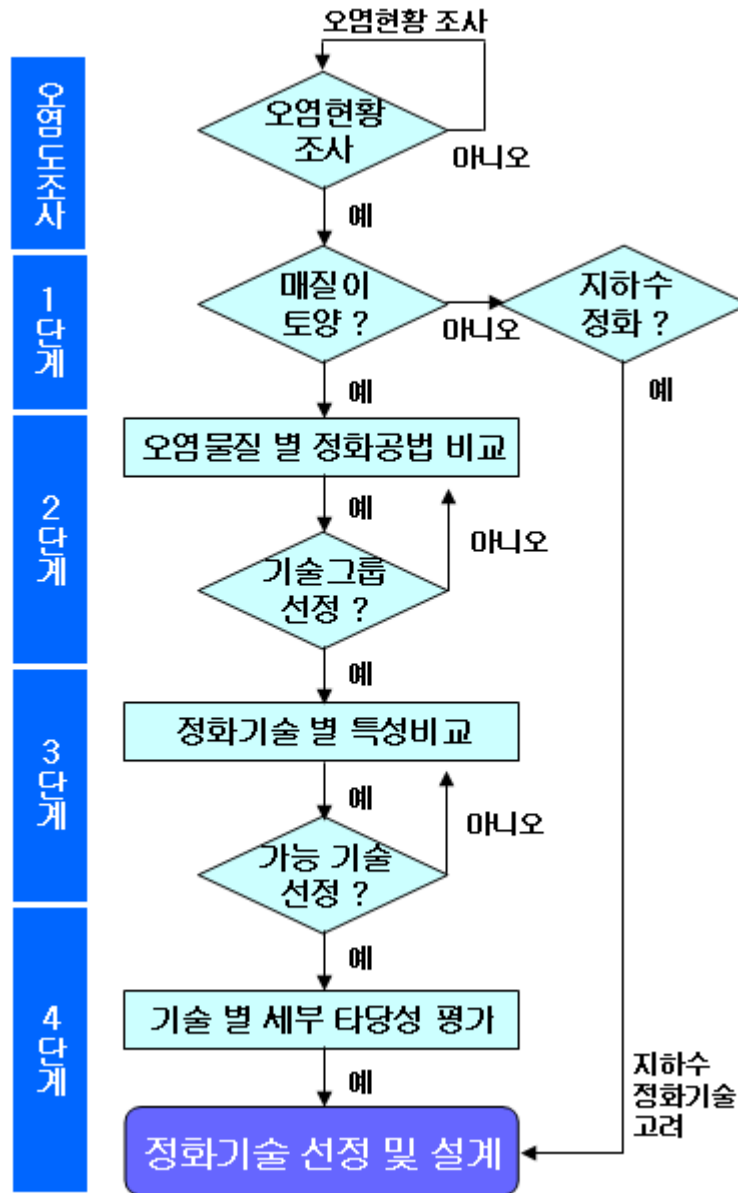
기술분류	처리장소	현장처리		현장 외 처리
	공정원리	생물학적 처리	물리/화학적 처리	열적 처리
	적용지역	불포화지역		포화지역
	적용매질	토양		지하수
	상용화 단계	상용화	소규모	실험실
처리물질	- 유류계탄화수소, 비염소계 용매, 살충제, 유기화합물질 - 비할로겐 VOCs 및 SVOCs, 유류			

- 기술평가 시 각 단계별 유효성 평가절차는 다음과 같다.
  - 1단계: 기술의 초기 적용성 평가 - 기술이 정화·복원 방법으로 고려대상인지 여부를 신속하게 결정한다.
  - 2단계: 기술의 세부 적용성 평가 - 기술이 효과적으로 적용될 수 있는지 토양 및 오염물질의 특성 등 세부 기준을 평가하며, 실내 및 현장실험, 자료 등 검토를 통해 기술의 적용가능 여부를 최종 판단한다.
  - 3단계: 기술의 설계평가- 기본 설계를 위한 설계인자 및 충분한 적용성 평가시험이 수행되었는지 여부를 평가한다.
  - 4단계: 운영 및 모니터링 계획 평가- 시운전 계획, 운영/모니터링 계획의 적정여부, 정화과정 중 모니터링 항목 등이 적절한지 검토한다.
- 기술평가 결과를 기초로 실제 정화사업에 사용할 기술을 선정하는 방법은 다음과 같다.
  - 1단계: 매체별 적용기술 그룹의 선정- 오염도 조사를 바탕으로 오염지역 및 매체에 따라 정화범위를 구분하여 매체별 적용 가능한 기술을 선정한다.
  - 2단계: 오염물질별 적용기술 그룹의 선정- 1단계 과정을 통하여 기술을 선정한 후, 오염물질별 정화기술 비교표를 이용하여 오염물질의 종류에 따른 적용 가능한 기술그룹을 선정한다.
  - 3단계: 기술 특성별 적용기술 그룹의 선정- 2단계 과정을 통하여 기술 그룹을 선정한 후, 오염토양 정화기술의 특성 비교표를 이용하여 기술별 특성에 따른 정화기술 그룹을 선정한다.



- 4단계: 최적 기술의 선정- 3단계 기술특성별 적용기술 그룹이 선정된 다음, 기술별 가이드라인 및 기타 기술 관련 자료를 참고하여 최적기술을 선정한다.

○ 오염토양 정화기술 선정과정의 흐름도와 기술평가 시 고려가 필요한 오염토양 정화기술의 특성 비교를 그림 I-가-5와 표 I-가-6에 각각 나타내었다.



[그림. I-가-5] 정화기술 선정과정 흐름도

[표. I-가-6] 기술평가 시 고려가 필요한 오염토양 정화기술의 특성 비교

인자	내용
개발상태 (상용화 정도)	F(Full scale), P(Pilot scale), L(Laboratory scale)
단독 적용 여부 (배가스처리 제외)	가능 / 불가능
부산물 (공정중 발생)	고체(S), 액체(L), 증기(V), 없음(N)
운영비 및 초기자본	O&M: 운영비 및 유지비용 Cap: 시설비와 같은 초기 투자비 B: 운영비 및 초기 투자비 모두 N: 운영비 및 초기 투자비 모두 아님
처리장소	현장처리(in-situ) / 현장외 처리(ex-situ)
적용 용이성 (설계, 시공, 운전, 유지)	높음(4개사 이상), 보통(2~4개사), 낮음(2개사 미만)
처리효과 (대상 오염물질별)	높음(효과있음), 보통(부분적 효과), 낮음(효과없음)
정화기간 (20,000톤 정화시)	현장처리: 높음(1년 이하), 보통(1~3년), 낮음(3년 이상)
	현장외 처리: 높음(0.5년 이하), 보통(0.5~1년), 낮음(1년 이상)

(나) 외국 사례

① 미국 환경보호청(USEPA)의 오염물질 정화기술 평가방안

- 정화기술 평가 시 사용하는 정화기술 선택 행렬(The Remediation Technologies Screening Matrix: RTSM)은 정화사업을 위한 기술을 선택함에 있어 사용자에게 친숙한 도구이며, 토양과 지표수 정화에 필요한 64개 기술(현장처리, 현장외 처리)을 포함한다. 기술 선정 시 사용되는 변수는 오염원, 기술 개발상태, 총 비용, 정화 소요 시간을 포함한다. 기술평가 시, 정화기술에 대하여 다양한 요소를 평가한 결과를 행렬로 구성하여, 각 사업의 특성(오염원, 비용 등)에 가장 부합되는 기술을 선정하기 위한 기초자료로 활용한다.
- 정화기술 선택 행렬에서 고려해야할 요소(Factor)<sup>1)</sup>는 다음과 같다.
  - 기술의 종류 (Tehnology Profile Number)
  - 기술의 개발 상태(Development Status)
  - 단독적용 여부(Typical Treatment Train)
  - 부산물(Residuals Produced)

1) [http://www.frttr.gov/matrix2/section3/sec3\\_int.html](http://www.frttr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html), Federal Remediation Technologies Roundtable Decision Support Tools (DSTs) Matrix (<http://www.frttr.gov/optimization/treatment.htm>)





- 부산물(Residuals Produced)
- 운영비, 초기자본(O&M or Capital Intensive)
- 적용성 (Availability)
- 오염물질(Contaminants Treated)
- 시스템 신뢰성 / 유지관리성 (System Reliability/Maintainability)
- 처리시간(Clean Time)
- 총 소요경비(Overall Cost)

○ 처리기술 선정 행렬에 사용된 범례와 기술평가 시 사용되는 요소들의 사례를 아래에 각각 나타내었다.

[표. I-가-7] 처리기술 선정 행렬에 사용된 범례

요소	정의			
	F(Full scale) 실제 정화 현장에서 사용		P(Pilot scale) 현장(실험실) 실증실험에 적용	
개발상태	Y 단독 적용가능		N 타 기술과 혼합하여 적용	
단독적용여부	Y 단독 적용가능		N 타 기술과 혼합하여 적용	
부산물	S 고체	L 액체	V 증기	N 없음
운영비, 초기자본	O&M 운영비, 유지비	Cap 시설비, 초기투자비	B 운영비, 초기투자비 모두	N 운영비, 초기투자비 모두 아님

[표. I-가-8] 기술평가 시 사용되는 요소들의 사례

요소 / 정의	나쁨 	보통 	좋음 	기타 
적용성 기술 설계, 시공, 유지보수 가능 업체수	2개미만	2~4개	4개이상	-
오염물질 다음 8종 (S)VOCs(할로젠, 비할로젠), 연료, 무기물, 방사성물질, 폭발물	효과없음 (P, F)	제한적 효과있음 (P, F)	효과있음 (P, F)	오염물질에 따라 다름
시스템 신뢰성 다른 효과적인 기술에 대한 기대되는 신뢰성과 유지성능	신뢰성 낮고, 유지성능 높음	신뢰성 보통, 유지성능 보통	신뢰성 높고, 유지성능 낮음	-
정화시간 20,000톤 정화시 소요 시간	3년이상 (현장처리)	1~3년	1년미만	오염물질에 따라 다름
	1년이상	0.5~1년	0.5년미만	오염물질에

	(현장외처리)			따라 다름
총비용 설계, 제조, 운전, 유지보수 등 정확에 소요되는 모든 경비	\$300/톤 이상	\$100~ 300/톤	\$100/톤 미만	오염물질에 따라 다름

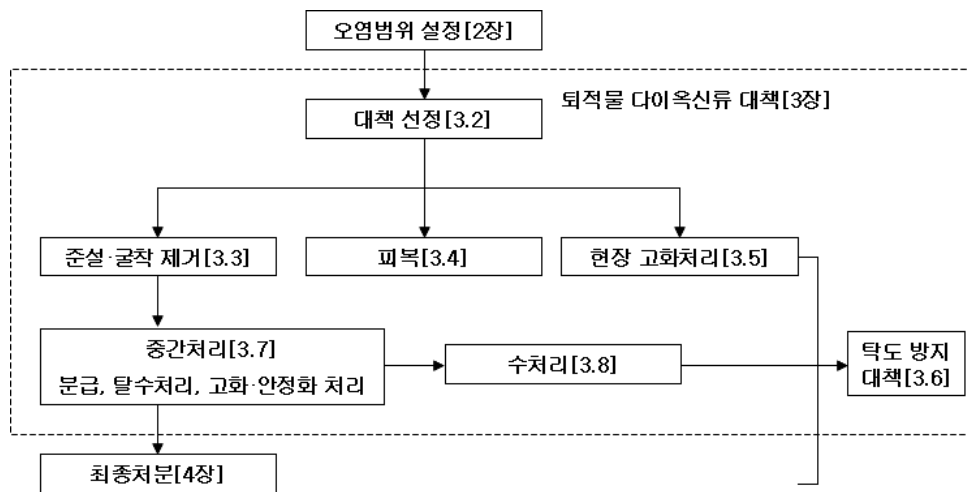
## ② 미국 육군 공병대 기술연구센터의 환경준설 기술지침

- 정화기술 선정을 위해서는 사전에 대상 해역 조건과 퇴적물 특성에 대한 평가가 필수적이다. 먼저 기존 조사결과를 기초로 대상 해역 수심, 해저지형, 해황 등 조건과 퇴적물의 입도, 오염도 등 특성을 평가하고, 추가조사 등 기존 조사결과를 보완하기 위한 방안을 강구한다.
- 공법 선정 시 대상 해역에 대하여 검토해야할 세부 조건은 다음과 같다.
  - 오염원
  - 조사정점
  - 수계로의 접근
  - 해역의 이용목적
  - 주변 인프라
  - 운송/처리 부지
  - 수심
  - 해저지형
  - 수리학
  - 기반암/경질 퇴적층
  - 해안선 안정도
  - 협잡물의 존재 여부
  - 계절적인 준설 제약과 생물 서식 고려
  - 겨울철 결빙 조건
  - 주위 수질 및 대기질
- 환경준설에 사용되는 공법의 선정은 우선 준설장비 형식에 따라 수력식(펌프식), 기계식, 혼합식으로 구분되며, 장비의 선정은 정화사업에서 설계, 대안 선정 및 가능성 평가 단계에서 매우 중요하다.
- 장비의 성능을 평가할 때 고려가 필요한 요소는 다음과 같다.
  - 수거율
  - 함니율
  - 수직/수평 수거 정밀도
  - 최소/최대 수거 심도
  - 퇴적물 재부유 제어
  - 오염물질 유출 제어
  - 잔류 퇴적물 제어 및 정화 수준
  - 이송(파이프라인, 바지선 등)
  - 공법 사용 설비의 위치 제어, 조종성 및 이동성/접근성
  - 공법의 유효성
  - 협잡물 존재 여부

- 기반암 분포
- 해저면 지형(경사면 등)
- 다양한 조건에 대한 대응 능력
- 잔류물 제거

### ③ 일본 항만 다이옥신류 대책 기술지침

- 일본의 경우, 해양오염퇴적물 정화복원 대책 기술로서는 해저면에서 오염된 퇴적물을 물리적으로 제거하는 준설·굴착(Dredging/Excavation), 오염물질을 주변 환경과 차단시키는 청정물질에 의한 피복(Capping), 오염퇴적물을 현장에서 처리하는 현장 고화처리(In-situ solidification) 방법이 주로 사용된다. 한편, 피복과 현장 고화처리는 오염물질의 용출 방지 효과가 유지되고 있는 것을 확인하기 위하여 장기간의 모니터링이 필요하다.



[그림. I-가-6] 해양오염퇴적물 정화복원 대책 기술 선정 흐름

- 이러한 대책의 선정에 있어서는 조건을 충족하는 대책을 대상으로 위험(Risk) 저감효과, 시공의 난이도, 시공시 발생하는 부유물질 확산 등 2차 오염의 위험, 비용 등을 비교/검토를 실시하고, 기존 구조물에 대한 영향, 해역 이용에의 영향 등을 고려하여, 해역 특성에 대응한 최적 대책을 선정하며, 단계적 대책의 검토도 실시한다.
- 준설·굴착 제거의 경우, 오염된 퇴적물의 제거 범위(면적, 두께)는 환경 기준값을 초과하는 오염된 퇴적물의 분포 범위를 원칙으로 한다. 다만, 이 경우 반드시 제거한 퇴적물의 최종 처리를 수반하기 때문에 최종 처리량을 가능한 한 감축할 수 있는 공법 및 제거 범위를 결정하는 것이 매우 중요한 요소가 된다.

[표. I-가-9] 준설/굴착 대책 선정 시 고려할 요소

요인	내용
시공능력	해당 공사의 시공토량에 대한 적용성
범용성	현재 존재하는 선박, 기계에 의한 공사의 적용성
상용토질	제거하는 퇴적물에 대한 상용성, 부유 퇴적물의 유무
퇴적심도	제거 퇴적물의 퇴적심도, 층두께에 대한 적용성
퇴적형상	제거 대상 퇴적물이 존재하는 장소의 평면형상
파고, 유속	제거 퇴적 해역의 파고, 조류
장애물	장애물, 쓰레기 등의 혼입에 대한 상용성
선박통항 장애	항행 선박에의 장애 유무, 정도
최종 처리장 규모, 거리	배수 처리의 필요 유무, 최종 처리장의 규모, 거리
시공 장소 제약	준설선, 기계의 규모, 이동성에 의한 적용성
탁도, 분진	제거시의 탁도, 분진 발생량의 많고, 적음
소음, 진동, 악취	제거시의 소음, 진동, 악취의 유무, 많고, 적음

- 피복의 경우 피복층의 두께 및 피복물질은 용출 억제효과 및 지속 기간 등을 고려하여 결정하여야 하며, 피복층 두께의 결정은 다음 조건을 충족하여야 한다.
  - 충분한 퇴적물의 부상 및 용출 억제 효과를 장기적으로 지속이 가능
  - 저서생물의 피복층내로의 침투깊이 이상
  - 대상 해역 해황의 영향에도 효과가 장기간 유지
  - 대상 해역 퇴적토의 강도특성에 적합
  - 선박의 정박장소에서는 앵커에 의한 퇴적물의 교란을 방지
- 피복의 경우 효과의 지속성을 확인하기 위하여, 수질과 피복층의 오염도 변화 및 피복층 위로 오염된 퇴적물의 재 퇴적 상황과 피복층의 두께변화를 지속적으로 모니터링 하여야 하며, 결과에 따라 다른 대책을 실시하거나, 유지 관리 보수 등 필요한 조치를 취해야 한다.
- 현장 고화처리는 장기적인 효과를 확보할 수 있는 고화 품질 및 소요 고화 층 두께의 확보가 중요하며, 고화재, 교반혼합의 차이에 따라 현장고화와 공기중 고화로 분류된다.
- 오탐방지 대책은 공사로 인한 오탐확산을 방지하고 공사 중 감시점에서 감시기준을 만족하는 공법을 선정하는 것이 중요하다, 이 경우 공사에 의한 부유물질 발생량을 예측해서, 오탐확산계수 등에 의한 그 범위를 구하고, 기본 감시점에서 오탐농도가 감시기준치를 초과할 경우 오탐방지판 또는 오탐방지막에 의한 오탐 대책을 검토하여야 한다.
- 한편 준설·굴착할 경우 퇴적물에 함유된 오염물질을 제어하기 위하여 중간처리가 필요하며, 최종처리를 효과적이고 경제적으로 실시하기 위하여 최종처리에 적합한 수준으로 오염도를 저감시키는 것이 중요하다. 중간처리의 목적은 1) 최종처리 대상 오염퇴적물 양의 감량화(분급, 탈수처리), 2) 용출부상억제, 안정화(고화·안정화처리), 3) 주변/작업 환경의 위험 저감(고화·안정화처리)이다.

(다) 선진 처리기술 선정 사례 검토

① 미국의 해양오염퇴적물 정화·복원 처리기술 사용 현황

- 미국에서의 퇴적물 관련 기준은 준설된 퇴적물을 수계에 투기하기 위해 현실적으로 필요한 퇴적물 투기기준의 설정에서 비롯되었다. 최초의 투기기준은 1973년 미국 환경보호청

이 준설퇴적물을 관리하기 위해 마련된 연방수질국의 오염평가방법과 기준이다. 준설퇴적물의 경우에도 종합적인 독성평가를 통하여 조사한 후 연방정부 혹은 지방정부 차원의 평가방법에 따라 평가한 후 기준을 초과하면 수계에 악영향을 미칠 것으로 판단하여 투기를 허용하지 않거나 투기 전에 적절한 처리를 요구하고 있다. 준설퇴적물의 투기를 위한 평가는 단계적으로 수행되며 각각의 단계마다 투기대상의 준설퇴적물이 환경에 미치는 영향, 특히 저서생물에 미치는 영향을 정확히 판단할 수 있도록 자세한 분석과 조사를 요구하고 있으며 이러한 단계화된 영향평가는 기존의 자료를 효과적으로 이용할 수 있고 불필요하게 많은 검사를 요구하지도 않으며 환경에 대한 악영향을 정확히 파악할 수 있는 검사체계라는 장점이 있다.

[표. I-가-10] 미국의 퇴적물 오염평가 방법

방법	주요 내용
퇴적물 독성	독성오염물질을 함유한 퇴적물에 실험대상 생물을 일정시간 노출시켜 생물의 반응과 생물학적 독성실험을 통하여 퇴적물의 독성을 측정
공극수 독성	퇴적물 공극수의 독성을 화학적 분석을 통하여 정량화한 후 독성원인물질 파악
조직잔여 검사	특정오염물질에 대해 생물조직에 악영향이 없는 수준의 안전한 퇴적물에 함유된 오염물질 농도를 경정, 허용기준 이상의 잔여 농도는 만성수질기준, 생물농축계수, 만성 오염물질 반응실험 등을 통하여 검사
저서생물 군집검사	오염된 퇴적물에 의한 해양저서생물 군집구조 변화양상 파악
종합적 퇴적물 오염평가	같은 퇴적물에 대해 퇴적물 오염물질 농도 퇴적물 독성, 저서생물 군집변화 조사, 퇴적물 오염물질 농도, 퇴적물 독성과 생물학적 영향을 비교하여 생물에 대한 악영향 정도를 파악하여 종합적으로 퇴적물의 오염도 평가

[표. I-가-11] 준설퇴적물의 투기를 위한 단계별 영향 평가

단계	평가	수층	저층
1	<기존자료분석> 기존의 자료분석을 통해 준설퇴적물의 악영향 가능성 평가	악영향 가능성에 대한 전반적 판단 다음단계에서 고려 또는 배제해야 할 오염물질 선택 악영향 가능성이 없는 오염물질 배제를 위한 제한적 실험	
2	<화학적 분석> 수층과 저층 퇴적물의 화학분석을 통한 스크린	수층의 오염물질 농도측정 및 모델 수질환경기준과 비교	유기오염물질의 이론적인 생물농축 가능성 평가 관련 환경기준과 비교
3	<생물학적 분석> 일반적인 독성검사와 생물농축 검사	수층 오염물질의 독성 측정: 혼합작용 후 단기적 독성검사	퇴적물에 대한 독성 및 생물농축 검사: 단기적 독성평가
4	<생물학적 분석> 사안의 특성에 적합한 독성검사 및 생물농축 검사	사안특성에 따라 수층오염물질의 장기적 독성영향검사 (현장검사 병행)	사안특성에 따라 저층퇴적물 및 저서생물의 장기적 독성영향검사 (현장검사 병행)

- 1980년 폐기물에 의해 오염된 환경을 복원하기 위한 법률(The Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act: CERCLA)을 제정한 이후, 이 법률에 근거하여 조성된 슈퍼펀드(Superfund)를 재원으로 현재까지 약 150곳의 오염지역을 정화·복원하였다. 정화·복원한 지역 중 11곳은 각 지역에서 정화·복원 비용만 5천만\$가 넘는 대규모 오염지역이었다. 전체 오염퇴적물 처리·처분을 실시한 지역 중 122개 지역의 오염 원인물질은 난분해성 미량 유기오염물질인 폴리클로리네이티드비페닐(PCBs, 20.7%)과 다환방향족탄화수소류(PAHs, 7.4%), 비소(5.2%), 납(3.7%) 등 중금속 그리고 난분해성 독성물질인 DDT(4.4%), 다이옥신(1.5%) 등 17종류였다. 이러한 오염지역에서 사용된 처리기술은 현장 처리(on-site treatment/disposal)과 현장 외 처리(off-site treatment/disposal) 등 11개 기술을 기초로, 한 가지 또는 몇 가지 기술이 함께 사용되었다. 상기 오염지역에서 사용된 처리기술 현황을 표 I-가-12에 나타내었다.

[표. I-가-12] 오염퇴적물 정화·복원 지역에서 사용된 처리기술 현황

차 례	처 리 기 술	사 용 현 황 ( 건 )	비 율 (%)
1	현장 피복	1	0.8
2	기타 현장 처리(중간, 최종)	1	0.8
3	매립	36	28.3
4	지오투브 처리 후 매립	2	1.6
5	고화처리 후 매립	3	2.4
6	안정화 처리 후 매립	5	3.9
7	건조 후 재이용 및 최종처리	1	0.8
8	열처리 후 최종처리	3	2.4
9	소각 후 최종처리	2	1.6
10	처리시설에서 처리 후 최종처리	6	4.7
11	수중 고립 최종처리	6	4.7
12	기타 (미보고)	66	48.0
사용된 기술 총계		127	100

- 슈퍼펀드 오염지역에서 주로 사용된 처리기술은 매립으로, 단순 매립과 적절한 처리 후 매립이 46건 (36.2%)이며, 고화처리 등 중간처리 후 최종처리(처분)이 12건 (9.5%)이다. 또한, 수중 고립 처분이 6건 (4.7%)이며, 현장 처리/처분은 2건 (1.6%)으로써, 그 사용 빈도가 매우 낮다. 각 오염지역의 정화·복원에서 전체 비용 중 각 기술별 소요 비용이 차지하는 비율을 정리하여 표 I-가-13에 나타내었다.



[표. I-가-13] 전체 비용 중 각 기술별 소요 비용의 비율

기술명	사용 수 (건)	평균 (%)	최소 (%)	최대 (%)	표준편차 (%)	중앙값 (%)
피복	6	24.26	0.24	63.68	24.93	19.78
수계 고립	5	11.52	0.49	26.09	9.20	10.39
찌꺼기 제거/처리	4	4.10	1.85	6.20	1.79	4.18
환경 모니터링	4	5.38	1.25	11.73	4.92	4.26
굴착	18	33.17	2.96	100.00	27.58	26.53
매립	18	19.71	4.98	45.95	11.44	17.39
흡착 / 탈착	8	16.66	1.92	39.46	15.03	13.18
지역 관리	7	11.96	3.14	18.19	6.33	14.73
토양 처리	9	23.06	3.27	69.38	18.86	22.06
지역 처리장	9	6.71	0.80	19.57	5.76	5.20
지역 저장	7	3.24	0.42	15.56	5.51	0.87
투입비용	1	10.56	10.56	10.56		10.56
운송	3	25.52	7.37	58.23	28.39	10.94
수처리	11	9.85	0.77	35.50	10.38	6.16

- 전체 비용 중 굴착(33.17%)과 매립(19.71%) 그리고 운송(25.52%) 비용이 많은 부분을 차지하며, 피복(24.26%)과 토양처리(23.06%) 순으로 비용이 소요된다. 또한, 소요되는 비용은, 처리할 부피가 증가함에 따라 단위 부피당 처리 비용이 감소하는 것으로 나타났다. 각 오염지역에서 사용한 처리(중간, 최종) 기술별로 소요되는 단위 비용은 표 I-가-14와 같다. 수처리를 제외하면, 각 기술별 단위 비용은 수력 준설(56.58 \$/cubic yard)과 건조 굴착(63.01\$/cubic yard)이 가장 저렴하다. 이와 반대로, 습식 굴착(98.96 \$/cubic yard), 굴착(153.66 \$/cubic yard) 그리고 TSCA 매립장 매립(187.96 \$/cubic yard) 비용이 높게 나타났다. 또한, 매립은 최소 비용과 최대 비용 사이에 편차가 매우 크지만, 평균은 70.62 \$/cubic yard(중앙값은 50.85 \$/cubic yard)로서 다른 기술에 비하여 상대적으로 단위 비용이 저렴하다. 이런 이유 때문에 전체 사용된 처리기술 중에서 매립이 가장 많이 사용되었다.

[표. I-가-14] 각 오염지역에서 사용된 처리·처분 기술별 단위 비용

기술명	사용 수 (건)	평균 (\$/cy)	최소 (\$/cy)	최대 (\$/cy)	표준편차 (\$/cy)	중앙값 (\$/cy)
건조 굴착	5	63.01	11.33	123.63	47.57	43.65
굴착	18	153.66	11.39	735.39	213.50	71.03
수력 준설	8	56.58	11.47	176.46	59.05	30.94
매립	15	70.62	1.89	199.97	64.58	50.85
기계적 준설	5	69.77	11.55	197.96	75.68	43.65
지역 관리	7	80.97	0.88	216.63	80.94	92.86
전체 경비	59	572.81	8.91	3,010.3	695.34	333.63
TSCA 매립	10	187.96	9.24	439.51	129.54	177.39
수처리	11	0.04	0.0026	0.15	0.05	0.03
습식 굴착	3	98.96	34.49	177.26	72.39	85.13

② 일본의 해양오염퇴적물 정화복원 처리기술 사용 현황

- 일본은 아직까지 미국처럼 저서생물 보호를 위한 퇴적물 환경기준 또는 지침이 개발되지 않은 상태이다. 그러나 유기물 또는 유해물질로 오염되어 수질이나 어패류에 악영향을 미칠 가능성이 있는 퇴적물의 제거 여부를 판단하는 기준으로서의 퇴적물 제거 기준은 설정되어 있다. 일반적으로 유기물이나 영양염류 등에 의해 오염된 유기오염퇴적물에 대해서는 용수이용 목적, 자연환경적인 특성 등을 고려하여 단위 사업별로 퇴적물과 준설토의 관리기준을 설정하고 있다<sup>2)</sup>. 준설 등으로 제거된 퇴적물의 처리방안은 해당 퇴적물이 존재하는 수역을 폐쇄한 후 복토에 의해 봉입하거나 복토만에 의해 봉입하는 방법, 준설 또는 굴삭 후 처리지 등으로 수송하여 보관 또는 처분하는 방법 등을 활용하고 있으며 신규 기술의 채용에 있어서는 실험시공을 시행하는 등 신중히 수행하고 있다. 제거 퇴적물의 입도, 강열감량 등을 측정하며, 해당 제거 퇴적물의 성상을 파악함과 동시에 해당 수역의 지형, 해상, 해류의 현황 및 조업 시기, 어류 현황 등을 고려하여 기준에 적합한 퇴적물의 처리를 관리하고 있다.
- 제거 퇴적물의 입도, 강열감량 등을 측정하며, 해당 제거 퇴적물의 성상을 파악함과 동시에 해당 수역의 지형, 해상, 해류의 현황 및 조업 시기, 어류 현황 등을 고려하여 기준에 적합한 퇴적물의 처리를 관리하고 있다. 제거 퇴적물의 처리는 해역에서 선박으로 매립하는 방법, 육상에 매립하는 방법, 그리고 표면피복방법을 사용하여 봉입하는 방법 등을 주로 수행하고 있다(표 I-가-15)

2) 이창희, 김은정, 1998, 호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안, 한국환경정책·평가연구원, pp.54-56.

[표. I-가-15] 일본의 준설퇴적물 처리방법에 따른 주요 고려사항

처리방법	주요 고려 사항
해역 매립	일본의 해양오염방지법 시행령(1971년 정령 201호)에 의거하여 매립장소에서 제거 퇴적물 및 해수가 해역에 유출 또는 침출되지 않도록 보호 암반, 기타 시설을 계획 시안을 함유하는 제거 퇴적물은 「해양오염방지법 시행령 제5조 제1항에서 규정하는 매립장소 등에 배출하려고 하는 유해폐기물과 관련된 판정기준을 정하는 총리부령」(1973년 총리부령 제6호)의 제3조에서 정하는 판정기준에 적합한 상태로 매립
육상 매립	제거 퇴적물을 육상 등에 매립하는 경우는 「유해 산업폐기물에 관한 판정기준을 정하는 총리부령」(1973년 총리부령 제5호)의 제1조에서 정하는 판정기준 (이하 「판정기준」이라 한다)에 의하여 처리
봉입	지하수에 관계된 공사 착공 전의 조사결과가 별도로 정하는 기준에 부적합한 수역에서는 봉입과 같은 처리는 시행 금지 봉입을 행하는 경우 제거 퇴적물과 물의 직접적인 접촉을 방지하기 위해 콘크리트 등의 불투수성 재료를 사용하여 완전히 피복을 하거나, 또는 실판 등으로 처리지역을 공공 용수역과 차단하지 않는 방법을 사용

- 또한 일본은 퇴적물질의 효율적인 관리를 위하여 “준설토사의 해양투기 및 유효활용에 관한 기술지침”(2006년(H16) 6월, 국토교통성 항만국)을 제정하였다. 이 지침은 준설토사 등으로부터 제거된 퇴적물질을 처리가 가능한 부분까지 처리하여 재활용하고, 폐기물로서 해양에 배출되는 양을 최대한 감축하기 위한 것이다. 상기 지침의 시행으로 준설토에 의해 제거된 퇴적물은 다양한 처리기술로 처리 후 여러 목적으로 재활용되고 있으며, 매립 등 최종 처리량은 지속적으로 감소되고 있다. 처리된 퇴적물은 주로, 토지조성을 위한 항만 매립, 복토재로 사용, 해안선 보전을 위한 양빈, 간석지 조성 등의 목적으로 재활용되고 있다.
- 일본에서 주로 사용되는 오염퇴적물의 처리기술은 분리, 탈수·건조, 안정화, 소성가공 등으로 크게 네 가지로 구분할 수 있다. 이 중 고도안정처리나 소성처리는 건설오니를 대상으로 개발이 진행된 기술인데, 처리비가 다소 비싸다는 점을 제외하면 오염퇴적물에도 충분히 적용 가능한 기술이다. 그러나 오염퇴적물의 소성처리를 위해서는 전처리로서 탈염공정이 필요하다. 오염퇴적물 처리기술은, 지금까지 각 지방 정비국 또는 관련 단체 등을 중심으로 개발이 계속 진행되고 있다. 일본에서 주로 사용되는 오염퇴적물 처리기술을 정리하여 표 I-가-16에 나타내었다.

[표. I-가-16] 일본의 오염퇴적물 처리기술의 개요

공법분류	기술명	대상 토질	개량토 품질
	분리처리	사질의 퇴적물이 대상	분리에 의해 사질토를 얻을 수 있으며, 분리 가능한 입경은 0.02~0.3mm이상임
탈수·건조처리	토목탈수 기술	탈수: 자갈, 모래자갈, 모래 등의 조립토 자연건조: 사질토, 점성토 가능	Traffic-ability를 얻을 수 있는 콘 지수가 품질 개선의 목표임

		(교반이 없으면 효과 저하)	
	기계탈수 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가압탈수 필터프레스: 75<math>\mu</math>m이하(모래는 사전에 제거)</li> <li>• 벨트프레스: 5mm이하 정도</li> <li>• 진공탈수: 5mm이하 정도</li> <li>• 원심탈수: 5mm이하 정도</li> </ul>	제4종 개량토 (콘 지수 200 kN/m <sup>2</sup> ) 정도를 목표로 함
	고도기계탈수기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 고압 드럼 프레스 모래 분리 제거는 불필요(입경 5mm이하) 가압 처리는 불필요(함수비 100%~)</li> <li>• 고압 필터프레스 모래는 사전에 제거(입경 75<math>\mu</math>m이하) 오니의 함수비가 낮은 경우는 가수 처리</li> </ul>	제3종 개량토 (콘 지수 400 kN/m <sup>2</sup> ) 로 사용가능
안정처리	고도안정처리기술	실트, 점성토를 대상으로 모래가 많은 경우는 사전에 제거	제품의 형상은, 자갈, 모래, 분체 등의 가공이 가능 압축력에 따라 수백~2만 kN/m <sup>2</sup> 정도를 얻을 수 있다
	원위치 고화처리기술 플랜트 고화처리 기술	원칙적으로 모든 토질에 적용가능 함유성분(유기물, 부식도 등)에 따라 특수 고화제를 사용	개량토의 요구 품질을 확보할 수 있는 고화제의 종류, 첨가량을 시험에 의해 확인하는 것으로, 필요한 품질의 개량토를 얻을 수 있음
	관 중 오니 혼합처리 기술	원칙적으로 액상 한계 이상의 높은 함수비의 점성토 퇴적물을 대상으로 하고 있지만, 낮은 함수비라도 가수하여 적용가능	
	경량오니 처리토기술	원칙적으로 점성토 퇴적물을 대상으로 하지만, 사질이라도 미립분을 별도 첨가하여 적용가능	
소성처리	대부분의 퇴적물에 사용가능하지만, 시멘트 등을 포함하는 것(고화처리토 등)은 적용 불가능	일반적으로는, 흡수율(JIS A 1110), 압축 강도(JIS Z 8841) 등에 의해 품질관리가 되며, 기준치는 이용 용도에 따라 설정됨	

- 일본에서는 준설·굴착으로 제거한 해양오염퇴적물을 다음과 같은 다양한 처리기술을 사용하여 처리 산물을 여러 목적으로 재활용하고 있다.
- SGM(Super Geo-Material) 경량토공법 : 준설토사에 물을 첨가하여 슬러리상태로 만든 다음 시멘트 등의 고화제나 기포, 발포제 등 경량화제를 첨가하여 혼합함으로써, 일반적인 토사보다 밀도가 낮은 경량지반재료로서 사용하는 방법. 실제 적용 사례는, 추부국제공항(中部國際空港, 일본 아이치(愛知)현 소재) 인공섬 조성공사 시 인공섬 북쪽 1/3 및 준비용지 조성 등에 사용함. 인근 나고야 항 등의 준설토사를 사용하여 약 860m<sup>3</sup>의 고화 처리한 토사를 매립하여 인공섬을 조성함.

- 중성고화공법: 후지기계(주)<sup>3)</sup> : 지금까지 폐기물로 처분되었던 오염퇴적물이나 건설오니를 중성 고화제를 사용하거나, 현장에서 고화 유닛을 사용하여 균질한 품질의 중성토양으로 개질하는 방법.
- 퇴적물 환경정화공법(고요(五洋)건설(주))<sup>4)</sup> : 준설토사의 분급처리(관로 분급공법)와 분급 후의 세립분을 포함한 수처리(클레이 필터공법)의 두 개의 공법으로 구성되어, 기존 방식으로는 처리가 곤란한 처리수에 포함되는 세립분을 대량으로 처리하여 모래를 회수할 수 있음. 관로 분급공법은 토사 압송 중의 관로 도중에 연속성을 해치지 않고 준설토사를 모래와 세립자로 분리해, 모래만을 회수하는 공법으로, 기존의 펌프선이나 화물 운반선 배치선과의 편성으로 대량 처리가 가능함. 클레이 필터공법은 특수한 배수 재질을 이용한 간단한 설비로 효율적으로 처리수를 탈수·여과 해, 세립질의 회수와 처리수의 직접 방류를 가능하게 하는 공법임.
- DRES 공법(준설토사 재생 처리 공법, Daiho(주))<sup>5)</sup> : 준설토사에 포함되는 자갈, 모래 등을 분리한 다음, 분리된 오수를 고압 탈수하여 콘 지수 > 800 kN/m<sup>2</sup>의 제2종 처리토로 처리함으로써, 준설토사의 용적을 감축시키고 처리토사의 재이용을 가능하게 하는 방법. 이 시스템은, 준설토사를 균질인 슬러리 상태로 하는 오니 분해기, 자갈과 모래를 분리하는 분급기, 실트와 점토를 4 MPa의 초고압으로 탈수하는 필터 프레스, 탈수 케이크를 해쇄하는 해쇄기를 조합해 시스템화한 것임. 처리 후 배출되는 자갈·모래(10~25%)는 건축자재로 재이용되며, 탈수 케이크(40~60%)는 노상재나 성토재로 유효 활용할 수 있음. 항만 준설토사 이외 하천 등 육상기인 준설토사에도 적용할 수 있음.
- 혼테란공법<sup>6)</sup> : 혼테란은 프랑스어로 좋은 흙을 의미함. 이 방법은, 건설오니이나 준설토사에 폐 종이 파쇄물과 시멘트계 고체화재를 첨가·혼합하는 것으로써, 뛰어난 강도특성, 높은 내구성을 가지는 성토재, 매반환재, 방초재를 생성하는 기술임. 또한, 용도에 따라서, 건설오니(침전이 어려운 오니)나 정수오니에 폐 종이 파쇄물, 응집제 및 조제를 첨가·혼합하는 것으로써, 보수성의 높은 녹화 기반재(하천 재방 조성용)를 생성할 수도 있음.
- 한편, 일본에서는 수질개선, 녹지조성, 폐기물 호안매립 등 지금까지 항만에서 주로 시행한 환경정책에 추가하여 최근 여러 나라에서 주목받고 있는 해양환경, 자연재생, 환경교육, 경관, 재이용, 지구 온난화 등에 대한 정책을 반영하기 위하여, “항만환경의 관리와 향후 정책의 기본적인 방향(港湾環境の課題と今後の港湾環境政策の基本的な方向)”(2004년(H16) 9월 7일, 국토교통성 항만국)이 수립되었다. 이러한 정책의 변화에 따라, 현재까지 준설토사를 이용하여 자연환경을 재생한 사례는, 홋카이도현 쿠시로 항과 카나가와현 카와사키 항의 두 경우가 있다.

3) <http://www.kk-fujiki.jp/environmental/stabilization.html>

4) [http://www.penta-ocean.co.jp/news/d\\_news20050118.html](http://www.penta-ocean.co.jp/news/d_news20050118.html)

5) <http://www.daiho.co.jp/tech/kankyo1/index.htm>

6) <http://www.sunahara.co.jp/bonterrain/about.html>



[그림. I-가-7] 일본의 해양오염퇴적물 재활용 사례(방파제 조성)

#### (라) 해양오염퇴적물 처리기술별 소요 비용 검토

- 오염된 해역에서 수거(준설)한 퇴적물의 처리는 물리적, 화학적, 생물학적 기작에 기초한 한 가지 또는 몇 가지 기술을 사용하여 퇴적물에 함유된 유기물, 지속성유기오염물질, 중금속 등 각종 오염물질들을 저장시키는 것이다. 이러한 오염퇴적물 중간처리에는 입자분리, 세척, 안정화·고형화, 오염물질 파괴·추출·열처리 등의 처리기술이 주로 사용되고 있다. 중간처리 과정에서 생성된 물질은 복토재 등 다양한 용도로 재활용 될 수 있으며, 더 이상의 처리 또는 재활용이 어려운 물질은 육상, 연안, 또는 해양에서 매립, 고립처분장 등 다양한 공법으로 최종처리(처분)된다. 오염퇴적물의 최종처리(처분)시 소요되는 비용은 연안처분(매립)은 8~25유로/m<sup>3</sup>, 수중처분은 7~36유로/m<sup>3</sup>(평균 11유로/m<sup>3</sup>)로서, 다른 처리방안에 비하여 다소 낮으며, 열처리는 49~68유로/m<sup>3</sup>로 나타났다. 열처리는 처리과정에서 에너지 소모를 수반하기때문에, 다른 처분기술 보다 소요비용이 높은 것으로 나타났다. 처리 후 벽돌 등 제품을 생산하여 재활용하기 위해서는 약 14~20유로/m<sup>3</sup>가 소요되며, 수거 해양오염퇴적물을 탈수 후 육상에서 매립하기 위해서는 약 33~43유로/m<sup>3</sup>가 소요되는 것으로 나타났다.
- 미국, 일본, 유럽에서는 오염퇴적물 처리에서 특별한 경우를 제외하고는 기술적인 한계나 오염물질 제어에 문제점이 없기 때문에, 대상 오염퇴적물의 처리기술의 선정시 오염물질의 저감에 가장 효과적이며, 최소의 비용으로 환경에 가장 적합한 처리기술을 선택하고 있다. 오염된 해역의 퇴적물을 준설(수거)하여 육상에서 처리하는 것이 해양환경 보전의 관점에서는 가장 적합한 방법이다. 그러나 상기 처리기술별 소요 비용에 많은 차이가 있으므로, ①연안처분(매립), ②수중처분, ③준설 후 처리, 재활용 및 육상매립의 순서로 처리방안이 사용되고 있다. 미국, 일본, 유럽 등에서 오염퇴적물 처리에 주로 사용하는 처리기술의 특징, 장점과 단점 그리고 처리비용을 정리하여 표 I-가-17에 나타내었다.

[표. I-가-17] 미국, 일본, 유럽의 해양오염퇴적물 처리기술 현황

처리기술	세부 기술	사용 국가	비용	특징	장점	단점	비고		
중 간 처 리	입자분리	입자분리	일본	2,000 ¥/m³	-원심분리 -여과	-입경별로 분리 -소규모 플랜트	-분리 후 오염물질이 많이 포함된 세립토 처리가 필요	1	
	세척기술	세척정화	미국	30~40 \$/m³	-물리·화학적 방법으로 세척 -오염물질 분리	-오염물질과 오염되지 않은 퇴적물을 분리 -최종 처분량을 감축 -소규모 플랜트	-세척과정에서 폐수발생, 처리가 필요	2	
		토양세척	미국	29~35 \$/cy				3	
	안정화· 고형화	고화	일본	3,000~ 8,000 ¥/m³	-오염퇴적물과 고화재 등 약품을 혼합하여 처리	-처리 후 건축자재로 재활용 가능 -최종 처분 시 오염물질이 유출되지 않음 -소규모 플랜트 설치가 가능	-입자분리, 세척기술에 비하여 소요 비용이 많음	1	
		현장고화	일본	2,000~ 8,000 ¥/m³				1	
		경량 오니토	일본	8,000~ 10,000 ¥/m³				1	
		고도안정	일본	5,000~ 13,000 ¥/m³				1	
		고화	네델 란드	23~41 유로/m³				4	
		고형 안정화	미국	195 \$/cy				3	
		시멘트 고정	미국	45~60 \$/cy				2,3	
	오염물질 파괴· 추출· 열처리	유리화	미국	46 \$/cy	-생물학적 분해 -물리·화학적 처리 -화학, 독성물질 제거	-고온에서 휘발성 유기오염물질 제거효율이 좋음 -PCBs 등 난분해성 오염물질 제거 효율이 좋음	-소요 비용이 많음(Cost effective) -처리장치 등이 필요함 -대규모 전문 처리시설이 필요함	2	
		소성처리	일본	7,000~ 15,000 ¥/m³				1	
		열적고정	네델 란드	45~70 유로/m³				4	
		용매추출	미국	219 \$/cy				3	
		생물정화	미국	270 \$/cy				3	
		탈염	미국	313 \$/cy				3	
		열적 기체상 저감	미국	426 \$/cy				3	
		소각	미국	37~ 1,285 \$/cy				3	
	최	육상처분	매립	미국	2~200	-매립 처분	-기존 매립장 활	-침출수 처리 필	4

처리기술	세부 기술	사용 국가	비용	특징	장점	단점	비고
중	준설, 탈수, 매립	독일	\$/cy 33~43 유로/m <sup>3</sup>		용 가능 -매립 후 부지 조성 등 유효활용 가능 -내륙 폐쇄수계(호수)에 매립 처분 가능 -오염퇴적물을 육상에서 생물화학적 반응에 의해 개량	요 -토양 및 지하수 오염 우려 -준설 현장에서 내륙까지 이송에 비용과 시간이 소요	4
		독일	10~20 유로/m <sup>3</sup>				4
		네델란드	11~25 유로/m <sup>3</sup>				4
		인공섬 조성 후 매립처분	네델란드				8~25 유로/m <sup>3</sup>
처	수중처분	유럽	1~5 유로/m <sup>3</sup>	-수중 고립 처분장 조성, 배치 후 피복	-준설 현장 주위에 적지가 있을 경우 고립 처분장 조성 용이 -자연적으로 오목한 지형인 경우, 처분장 조성 없이 배치한 다음 피복으로 처분 가능 -피복재로 처분장 주위의 오염되지 않은 토사를 사용할 수 있음	-전처리한 오염퇴적물을 수중 고립 처분장에 배치할 때 오염물질이 주위에 확산되거나 해류에 의해 이동할 수 있음 -처분 후 모니터링 필요 -반수중처분일 경우 오염물질이 해수로 유출될 가능성이 있음	4
		유럽	7~36 유로/m <sup>3</sup>				4
		유럽	9~17 유로/m <sup>3</sup>				4
		미국	10~4만 \$/Acre				2
		처리 후 재활용	METHA 처리				독일
경량골재 생산	유럽		15~32 유로/m <sup>3</sup>	4			
블럭생산	유럽		15~20 유로/m <sup>3</sup>	4			
고형물 생산	유럽		20~40 유로/m <sup>3</sup>	4			

○ 한편, 2004년부터 2011년까지 국내 25개 오염 우려 해역 퇴적물의 오염도를 조사한 결과, 해양오염퇴적물 정화사업이 필요한 해역은 부산 북항(1,365,872m<sup>3</sup>), 마산항(1,265,819m<sup>3</sup>) 등 18개 해역이며, 대상 물량은 최소 약 8백만m<sup>3</sup> 이상이다.



- 중앙정부에서 해양오염퇴적물 분포 현황조사를 지속적으로 추진하는 현실과 상기 물량을 현재 정화사업 수준(약 105천원/m<sup>3</sup>)으로 소요 비용을 추산하면 최소 8천4백억원 ~ 1조원 이상의 예산이 필요할 것으로 예상된다.
- 국내 해양오염퇴적물 정화복원사업을 원활하게 추진하기 위해서는 미국, 일본, 유럽 등에서 사용되는 다양한 선진 기술을 기초로 우리나라 실정에 맞는 처리기술을 시급하게 개발·보급하여 실제 정화사업 현장에서 다양한 처리기술이 활용될 필요가 있을 것으로 판단된다.

### (3) 최적 정화공법 선정 의사결정 도구 개발

#### (가) 개요

- 최적 정화공법 선정을 위해서는 우선 대상해역에서 정화·복원사업의 목적과 기준을 개발하고, 사전 조건을 검토한 다음 각 대안별로 평가를 수행한다. 그 결과에 따라 각 대안을 비교하여 가장 적합한 대안을 결정하는 것이 타당하다.

#### (나) 의사결정 시 고려할 요소

- 해양오염퇴적물 정화·복원사업을 위해서는 기존 조사자료, 현지 조사 또는 주민 신고 등에 의해 오염 우려 지역에 대한 오염 현황을 정확하게 파악하여야 하며, 조사자료가 부족할 경우, 추가 정밀조사 등을 실시하여 그 결과에 따라 오염지역을 판정하며, 정화·복원 대상 범위(면적)와 물량(부피)를 결정하여야 한다.
- 상기 과정에서 대상 지역에서 주요 오염물질 및 오염 정도 평가결과가 도출된 다음, 정화·복원사업 의사결정에 앞서서 대상 지역의 오염 방지 및 오염원 관리를 위하여 (비, 점)오염원 정비 즉, 더 이상의 오염물질 유입을 차단하기 위한 조치를 실시하여야 한다.
- 대상 지역의 오염원 정비가 완료된 다음 더 이상의 오염물질의 유입되지 아니하는 것으로 판명될 경우에 한하여, 정화·복원사업 추진 여부 및 방안에 대한 의사를 결정하여야 한다.
- 해양오염퇴적물 정화·복원 방안은 자연정화방법(Monitored natural recovery), 현장피복방법(In-situ capping), 준설(Dredging)의 3가지 방안으로 크게 나눌수 있다. 현재 우리나라에서는 해저면에서 오염된 퇴적물을 펌프식 설비에 의해서 물리적으로 제거하는 수거로만 규정되어 있지만, 향후 수거 이외의 정화·복원 방안이 개발되어 사용될 경우를 고려하여 3가지 방안 모두를 검토한다.
- 정화·복원 방안 선정을 위해서는 다음 사항에 대하여 평가를 실시하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

#### ■ 대상 지역 및 퇴적물 특성 평가

- 대상 지역 오염이 퇴적물 오염에 기인한 것인지, 오염된 퇴적물을 제거할 경우, 환경이 개선될 것인지를 기존 자료와 모델을 사용하여 평가
- 퇴적물 및 오염물질의 소멸과 이동을 평가
- 인간의 건강과 생태계에 미치는 영향을 평가
- 오염원 제어의 효율성과 필요성을 평가
- 잠재적인 정화·복원의 가능성을 평가
- 정화·복원에 앞서서 조건과 계획을 사전 검토

- 정화·복원사업 후 평가 방안 계획
- 세부 평가 항목은 다음과 같다.
  - 오염원
  - 조사정점
  - 수계로의 접근
  - 해역의 이용목적
  - 주변 인프라
  - 운송/처리 부지
  - 수심
  - 해저지형
  - 수리학
  - 기반암/경질 퇴적층
  - 해안선 안정도
  - 협잡물의 존재 여부
  - 계절적인 준설 제약과 생물 서식 고려
  - 겨울철 결빙 조건
  - 주위 수질 및 대기질

#### ■ 정화·복원 목적, 정화 수준, 방안 설정

- 정화·복원사업은 단순히 오염된 퇴적물을 제거 또는 정화 조치를 실시하기 위함이 아니며, 의사결정 시 상당한 규모의 예산이 소요되므로, 대상 지역의 수질을 개선하기 위함인지, 환경을 개선하기 위함인지, 환경을 개선하여 생태계를 회복시키기 위함인지 등 사업의 목적을 분명하게 설정하여야 한다.
- 또한 사업시 대상 퇴적물의 오염을 어느 정도 수준으로 저감 또는 관리할 것인지 사전 검토가 필요하다. 선진 외국의 사례에서도 정화·복원사업 대상 지역에서 어느 하나의 방안만을 실시하는 경우는 드물며, 한 지역이라도 지형, 오염도 등에 따라서 다양한 정화방안(공법)이 사용되고 있다. 또한 오염도 저감 수준은 소요 비용, 처리 시간뿐만 아니라 사회적인 수용성과도 직접 관련되므로, 저감 수준의 결정은 정화방안 및 공법 선정에 있어서 매우 중요하다.
- 한편 정화방안으로는 선진국의 경우, 자연정화방법을 기본으로 현장피복방법 및 준설을 사용한다. 이 경우, 각 방안은 대상 지역 및 오염 특성을 기초로 각 방법의 제한 조건을 평가하여 선택적으로 사용하고 있다.
- 우선 자연정화방법의 경우
  - 중금속 등 유해화학물질의 오염도가 높거나 (CIHC>2인 구역이 50% 이상),
  - 지역주민의 생활환경과 직접 관련 되거나 (주거지역, 수변구역 등 존재),
  - 대상 지역에 직접 영향을 미칠수 있는 오염원(산업시설 등)이 존재하거나,
  - 정화·복원 조치가 단기간에 완료되어야 하는 사유가 있는 경우에는 정화방법 선정에 제한된다.
- 현장피복방법의 경우, 유해화학물질 오염도(CIHC>2인 구역의 정화지수(CIHC) 평균값 × 정점분포율)가 유기물 오염도(CIET>6인 구역의 정화지수(CIET) 평균값 × 정점분포율)보다 높거나, 정화·복원 조치 시 선박의 통행 등 최소한의 수심 확보에 어려움이 예상되거나, 대상 지역 해황(30년 평균)을 고려 피복 형상의 장기간 유지가 곤란하거나, 대상 지역 특성(경사면, 퇴적 형상 등) 등으로 시공이 곤란할 경우에는 정화방법 선정에 제한된다.

- 수거(준설)의 경우, 선진 사례를 고려하면, 특별하게 제한되거나 시공에 장애가 발생하는 경우는 없다. 그러나 이 경우 해양오염퇴적물 수거 의사를 결정하기 전에 반드시 오염도 저감 등을 위한 중간처리 및 처리 후 산물을 재활용 또는 고립처리 등 최종처리 공법을 선정하여야 한다.

■ **공법(장비) 적합성**

- 선진 해양오염퇴적물 정화·복원 사례 검토 결과, 수거 공법 등 장비 사용에 대한 제한은 없으며, 대상 지역 및 오염 특성에 따라 다양한 공법 또는 장비가 사용되고 있다. 특히 정화·복원 방안이 수거일 경우, 사용되는 공법(장비)에 따라 함수율 등 수거 후 처리(중간, 최종)에 영향을 미치므로 적합한 공법(장비)를 선정하는 것이 매우 중요하다.
- 상기의 경우 적합한 공법(장비) 선정을 위해서는 다음과 같은 사항들의 평가가 필요하다.
- 시공능력, 범용성, 상용토질, 퇴적심도 및 형상, 파고/유속, 장애물 존재 여부, 최종처리장 규모(잔여 유효 용적) 및 이송 거리, 시공/장소 제약, 탁도/분진 및 소음/진동/악취 발생 여부

요인	내용
시공능력	해당 공사의 시공도량에 대한 적용성
범용성	현재 존재하는 선박, 기계에 의한 공사의 적용성
상용토질	제거하는 퇴적물에 대한 상용성, 부유 퇴적물의 유무
퇴적심도	제거 퇴적물의 퇴적심도, 층두께에 대한 적용성
퇴적형상	제거 대상 퇴적물이 존재하는 장소의 평면형상
파고, 유속	제거 퇴적 해역의 파고, 조류
장애물	장애물, 쓰레기 등의 혼입에 대한 상용성
선박통항 장애	항행 선박에의 장애 유무, 정도
최종 처리장 규모, 거리	배수 처리의 필요 유무, 최종 처리장의 규모, 거리
시공 장소 제약	준설선, 기계의 규모, 이동성에 의한 적용성
탁도, 분진	제거시의 탁도, 분진 발생량의 많고, 적음
소음, 진동, 악취	제거시의 소음, 진동, 악취의 유무, 많고, 적음

※ 적합성 평가: 좋음(3), 보통(2), 나쁨(1)

- 상기 사항의 적합성 평가는 각 항목별로 적합성을 좋음(3), 보통(2), 나쁨(1)로 산정하여 전체 합이 24점 이상인 경우, 정화·복원사업에 활용 가능한 공법(장비)로 판정함이 타당하다. 또한, 활용 가능한 공법(장비) 중 적합성 평가 점수가 높은 순으로 정화복원사업에의 활용을 우선 고려하고, 만약 제약조건이 있을 경우 그 다음 공법(장비)의 사용을 검토하여 가장 적합한 공법(장비)를 선정하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 또한, 모니터링(사업 전, 중, 후) 결과를 기초로 공법(장비) 사용 중 2차 오염 등 환경에 저해현상이 발생할 경우, 해당 공법(장비)를 수정, 보완할 필요가 있다.
- 한편 수거 후 처리는 재활용 등 최종 처리 시 관련 환경기준에 대응할 수 있는 처리 공법(장비)를 사용하여야 한다.

**별첨: 최적 정화공법 선정 의사결정 도구(안)**

---

## 제1장 총칙

**제1조(목적)** 이 규정은 해양환경관리법 제18조(해양환경개선조치) 제1항의3호 ‘오염된 퇴적물의 수거’에 따른 정화·복원사업에서 적합한 정화공법을 선정 할 때 그 절차나 기준 등을 정함을 목적으로 한다.

**제2조(정의)** 이 규정에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

1. “자연정화공법”이란 퇴적물에 함유된 오염물질 등을 자연적인 생화학적 반응을 촉진시켜서 분해·정화시키는 공법을 말한다.

## 제2장 정화공법 선정 절차 등

**제3조(전제 조건)** 해양오염퇴적물 정화·복원사업을 실시하기 위해서는 다음 조건에 적합하여야 한다.

1. 우려지역 오염 현황을 정확하게 조사, 평가하여 대상 범위 및 물량을 산정
2. 대상 지역 오염 방지 및 오염원 관리 조치 실시
3. 오염원 관리 조치 후 더 이상의 오염물질 유입되지 아니할 경우, 정화·복원사업 의사 결정

**제4조(대상 지역 및 퇴적물 특성 평가)** 정화·복원사업 대상 지역 및 퇴적물 특성 평가는 다음 절차에 의한다.

### 1. 대상 지역 평가

가. 대상 지역 오염이 퇴적물 오염에 기인한 것인지, 오염된 퇴적물을 제거할 경우, 환경이 개선될 것인지를 기존 자료와 모델을 사용하여 평가

나. 퇴적물 및 오염물질의 소멸과 이동을 평가

다. 인간의 건강과 생태계에 미치는 영향을 평가

라. 오염원 제어의 효율성과 필요성을 평가

마. 잠재적인 정화·복원의 가능성을 평가

바. 정화·복원에 앞서서 조건과 계획을 사전 검토

사. 정화·복원사업 후 평가 방안 계획

### 2. 퇴적물 특성 평가

가. 오염원(주요 오염물질) 및 조사정점

나. 수계로의 접근

다. 해역의 이용목적

라. 주변 인프라

마. 운송/처리 부지

바. 수심

사. 해저지형

아. 수력학

자. 기반암/경질 퇴적층

차. 해안선 안정도

---

- 카. 협잡물의 존재 여부
- 타. 계절적인 준설 제약과 생물 서식 고려
- 파. 겨울철 결빙 조건
- 하. 주위 수질 및 대기질

**제5조(정화·복원 목적 및 정화 수준 설정)** ① 대상 지역 정화·복원사업의 목적을 구체적으로 설정하여야 한다.

② 대상 퇴적물의 오염을 어느 정도 수준으로 저감 또는 관리할 것인지 정화 수준을 설정하여야 한다.

**제6조(정화공법 선정)** ① 정화공법은 다음 각 호 중 하나 또는 여러 공법을 선정할 수 있다.

1. 자연정화방법
2. 현장피복방법
3. 수거

② 자연정화방법을 선정하는 절차는 별표 1과 같다.

③ 현장피복방법을 선정하는 절차는 별표 2와 같다.

④ 수거는 제2항 및 제3항에 따른 공법 선정이 적합하지 아니하는 경우 선정할 수 있다.

1. 해양오염퇴적물을 수거하기 위해서는 정화복원사업 의사결정 전에 수거 예정 해양오염퇴적물의 처리(중간, 최종, 재활용 포함) 방안을 선정하여야 한다

**제7조(수거 공법 선정)** ① 정화공법으로서 수거를 선정할 경우, 적합한 공법(장비)를 선정하는 절차는 별표 3과 같다.

② 수거 해양오염퇴적물의 처리는 재활용 등 최종처리 시 관련 환경기준에 대응할 수 있는 처리 공법(장치)를 사용하여야 한다.

[별표 1]

### 자연정화방법 선정 절차

(제6조제2항 관련)

다음 제한 조건에 해당되지 아니할 경우 자연정화방법을 선정할 수 있다.

1. 중금속 등 유해화학물질의 오염도가 높아서 자연의 자정작용으로 정화시키기 곤란한 경우  
(예: 전체 대상 구역 중 퇴적물의 유해화학물질정화지수(CI<sub>HC</sub>)가 2 이상인 구역이 50% 이상)
2. 지역주민의 생활환경과 직접 관련 되는 지역  
(예: 대상 해역 인근에 주거지역, 수변구역, 횃집 또는 어시장 등 상업시설 존재)
3. 대상 해역에 직접 영향을 미칠 수 있는 산업시설 등 오염원이 존재할 경우

4. 정화·복원 조치가 단기간에 완료되어야 하는 사유가 있는 경우

[별표 2]

### 현장피복방법 선정 절차

(제6조제3항 관련)

다음 제한 조건에 해당되지 아니할 경우 자연정화방법을 선정할 수 있다.

1. 유해화학물질 오염도( $CI_{HC}>2$ 인 구역의 정화지수( $CI_{HC}$ ) 평균값 × 정점분포율)가 유기물 오염도( $CI_{ET}>6$ 인 구역의 정화지수( $CI_{ET}$ ) 평균값 × 정점분포율) 보다 높을 경우
2. 정화·복원 조치 시 선박의 통항 등 최소한의 수심 확보가 어려울 경우
3. 대상 지역에서 피복 형상이 장기간 유지가 곤란할 경우  
(예: 해황(30년 평균)을 고려 피복이 어렵거나, 선박의 투묘, 양묘 등 영향이 예상되는 지역)
4. 지형 특성으로 시공이 곤란할 경우  
(예: 경사면 또는 퇴적 형상으로 시공이 곤란한 지역)

[별표 3]

### 수거공법 선정 절차

(제7조 관련)

수거공법은 다음 절차에 따라 선정한다.

1. 공법의 적합성은 다음과 같이 각 요인별 평가점수의 합을 산정하여 평가한다.

요인	내용
시공능력	해당 공사의 시공토량에 대한 적용성
범용성	현재 존재하는 선박, 기계에 의한 공사의 적용성
상용토질	제거하는 퇴적물에 대한 상용성, 부유 퇴적물의 유무
퇴적심도	제거 퇴적물의 퇴적심도, 층두께에 대한 적용성
퇴적형상	제거 대상 퇴적물이 존재하는 장소의 평면형상
파고, 유속	제거 퇴적 해역의 파고, 조류
장애물	장애물, 쓰레기 등의 혼입에 대한 상용성
선박통항 장애	항행 선박에의 장애 유무, 정도
최종 처리장 규모, 거리	배수 처리의 필요 유무, 최종 처리장의 규모, 거리

시공 장소 제약	준설선, 기계의 규모, 이동성에 의한 적용성
탁도, 분진	제거시의 탁도, 분진 발생량의 많고, 적음
소음, 진동, 악취	제거시의 소음, 진동, 악취의 유무, 많고, 적음
비고	
1. 적합성 평가: 좋음(3), 보통(2), 나쁨(1)	

2. 각 요인별 적합성 평가 점수의 합이 24점 이상인 경우, 정화복원사업에 활용 가능한 공법(장비)로 평가한다.
3. 활용 가능한 공법(장비) 중 적합성 평가 점수가 높은 순으로 우선순위 공법(장비)로 선정한다.
4. 만약 선정된 공법(장비)으로 시공이 곤란할 경우 차순위 공법(장비)를 선정한다.

## 나. 다양한 정화기술 적용을 위한 법령 개정 방안 검토

자문: 한양대학교 법학전문대학원 교수/변호사 김 홍균

### (1) '해양환경관리법'의 개정 필요성과 방향

#### (가) 필요성

- 해양오염퇴적물 정화·복원 기술의 필요성이 강함
- 개발 기술이 실제 현장에 도입·적용될 수 있도록 「해양환경관리법」 등 관련 법령의 정비 필요
- 현재 오염퇴적물 또는 준설토사 그리고 그 수거, 처리, 처분 등에 대한 개념 정의 및 구체적인 지침이나 기준이 미비한 상태임
- 「해양환경관리법」상 해양환경관리업의 등록기준에 따르면 전용수거선이 진입할 수 없는 해역 또는 현장 여건상 다른 장비의 사용이 요구되거나, 피복처리가 필요할 경우 등에 장비/공법의 사용이 제한되고 있음
- 개별 법률에 산재된 오염퇴적물 관련 규정의 개정이 쉽지 않고, 가능한 한 1회적인 방법으로 문제해결을 하기 위해서는 주관 부처 소관 법률인 「해양환경관리법」의 부분 개정이 바람직 한 것으로 보임

#### (나) 방향

- 관련 법령의 정비 차원에서 개정안을 조속히 마련할 필요성이 있음
  - 현실성, 효율성을 고려하여 「해양환경관리법」의 부분 개정이 바람직
  - 오염퇴적물 관리의 통일성과 효율성을 제고하기 위해 「해양환경관리법」 내에 오염퇴적물의 환경기준, 수거부터 처리·처분까지의 일련의 규정을 둘 필요가 있음
  - 적용범위 및 관할과 관련해서 발생할 수 있는 불필요한 분쟁을 막는다는 차원에서 타 법과의 충돌을 방지하기 위하여 「해양환경관리법」 적용 시 다른 법률의 적용을 배제한다는 식의 특례 규정을 둘 필요성이 있음

---

## (2) 법제의 정비방안

### (가) 오염퇴적물, 준설토사 등에 대한 개념 정립

- 준설토사는 수계로부터 준설했던 물질을 말하지만 퇴적물이란 준설했던 이전에 수계에 있는 물질이며 오염퇴적물이란 원론적으로 “오염물질이 축적되어 오염도가 일정 기준을 넘는 퇴적물”이라 할 것임
    - 「토양환경보전법」은 오염토양을 “오염도가 우려기준을 넘는 토양”이라고 정의하고 있음(제11조 제3항)
  - 「해양환경관리법」을 비롯한 현행 법률은 퇴적물, 오염퇴적물, 준설토사에 대한 개념을 정의하고 있지 않고 오히려 혼동해서 사용하고 있음
  - 현행 「해양환경관리법」은 (수저)준설토사를 폐기물로 파악하고 있음(동법 시행규칙 제12조 제1항, 별표 6)
  - 오염된 퇴적물 자체는 폐기물이 아니나, 오염된 퇴적물을 수거(준설했)하여 처리하는 경우에는 「폐기물관리법」상 (사업장)폐기물에 해당할 여지가 있음
  - 준설토사를 폐기물로 본 판례가 있음(대법원 2006. 5. 11. 선고 2006도631 판결). 한편 “토양은 폐기물 기타 오염물질에 의하여 오염될 수 있는 대상일 뿐 오염토양이라 하여 동산으로서 ‘물질’인 폐기물에 해당한다고 할 수 없고, 나아가 오염토양은 법령상 절차에 따른 정화 대상이 될 뿐 법령상 금지되거나 그와 배치되는 개념인 투기나 폐기 대상이 된다고 할 수 없다”고 판시하면서 오염토양의 폐기물성을 부인한 최근 판례도 있음(대법원 2011. 5. 26. 선고 2008도2907 판결)
  - 「해양환경관리법」상의 폐기물 정의와 「폐기물관리법」상의 폐기물 정의가 모호하게 규정되어 있고, 양자간에 다소 다른 점이 있어 해석·적용에 혼란을 가중하고 있음
    - 「폐기물관리법」은 ‘폐기물’을 “쓰레기·연소재·오니·폐유·폐산·폐알카리·동물의 사체 등으로서 사람의 생활이나 사업활동에 필요하지 아니하게 된 물질”로 정의하고 있음에 비해(동법 제2조 제1호), 「해양환경관리법」은 “해양에 배출되는 경우 그 상태로는 쓸 수 없게 되는 물질로서 해양환경에 해로운 결과를 미치거나 미칠 우려가 있는 물질(제5호·제7호 및 제8호에 해당하는 물질을 제외)”로 정의하고 있음(제2조 제4호)
    - 「해양환경관리법」상의 폐기물 정의는 폐기물 개념을 예시적, 포괄적으로 정의하고 있는 「폐기물관리법」의 규정 형식과 다름
    - 「해양환경관리법」상의 폐기물 정의는 폐기물의 관리와 관련하여 일반법의 성격을 갖는 「폐기물관리법」상의 폐기물 정의와 조화를 이루는 방향으로 개정되거나 해석되어야 할 것임
  - 「해양환경관리법 시행규칙」 제12조 제1항과 관련한 별표 6에 적시된 해양배출이 가능한 ‘폐기물’에는 분뇨, 액상의 폐수, 오니, 수산물가공잔재물, 수저준설토사 등 무독성의 수용성 유기성 물질이 포함되는데, 이는 다분히 의제적인 성격이 있음
  - 특히 수저준설토사가 「해양환경관리법」과 「폐기물관리법」상의 폐기물 정의에 정확히 부합하는지는 의문임
    - 「폐기물관리법」상 쓰레기·연소재 등은 하나의 예시에 불과하고 “사람의 생활이나 사업활동에 필요하지 아니하게 된 물질”이 바로 폐기물임
    - 결국 폐기물 여하의 판단기준은 ‘불필요성’임
    - 불필요성 여하를 주관적인 의사를 기준으로 하여야 한다는 견해가 있을 수 있으나, 이러한 견해는 자칫 폐기물 개념을 상대화할 수 있으므로 폐기물 여부는 객관적인 기준으로 판단하여야 할 것임
    - 즉 객관적으로 사용가치가 없다고 사회통념상 승인되는 경우에 폐기물로 보는 것이 타당함
-



- 다만 버리는 자나 사용하는 자의 주관적인 사정은 폐기물인지 여부를 판단하는 데 하나의 고려요소로 작용할 것임
- 이러한 관점에서 '수저준설토사는 사회통념상 사람의 생활이나 사업활동에 필요하지 않게 된 것이 아닐 뿐만 아니라 배출자의 의사에 의해 버린 것이거나 버리고자 하는 것이 아니기 때문에 폐기물이라고 단정할 수 없음
- 폐기물의 해양배출제도와 관련하여 런던협약과 1996년 의정서에서는 폐기물 및 기타물질(Waste and other matter)로 표현하고 있는데, 이에 부합하기 위해 차후 해양배출과 관련된 해양환경관리법령(법 제23조, 시행규칙 12조)에서 폐기물을 '폐기물 및 기타물질'로 변경하는 것이 적절하다고 생각함
  - 그리고 '기타물질'에는 수저준설토사를 포함시킬 수 있을 것임
  - 이는 수저준설토사가 폐기물이 아니라는 입장에 부합하는 입법임
  - 이는 불필요성을 기준으로 하고 있는 『폐기물관리법』상의 폐기물 개념과도 조화를 이룰 수 있을 것임
- 오염된 퇴적물 또는 준설토사를 폐기물로 이해할 경우에는 폐기물의 관리 및 규제와 관련하여 타법에 특별한 규정이 없는 경우 일반법의 성질을 갖는 『폐기물관리법』이 적용되고 동법상의 처리기준 및 방법에 의하여야 한다는 논란이 있을 수 있음. 이러한 귀결은 오염퇴적물을 투기나 폐기 또는 해양배출의 대상으로만 볼 수 있고, 자칫 오염된 퇴적물을 수거(준설)하는 유인을 상당부분 감소시킬 우려가 있음. 차제에 오염퇴적물 또는 준설토사를 폐기물에서 제외하거나 폐기물과 달리 취급할 필요가 있음

#### (나) 오염퇴적물의 수거·처리·처분 등 개념의 정립

- 오염퇴적물은 수거(제거), 운반(이동), 저장(보관, 배치), 처리(treatment), 처분(disposal), 사용 등의 단계를 거쳐 이루어지나, 현행 「해양환경관리법」은 해양환경개선조치와 관련 오염된 퇴적물의 경우 “수거”에 대해서만 언급하고 있음
- 오염퇴적물의 유효한 관리방안을 수립하기 위해서라도 「해양환경관리법」에서 ‘수거’의 개념을 구체적으로 정립할 필요가 있음
- 수거가 준설을 포함하는 개념인지 불분명하나, 동법상 ‘수거’의 개념에는 퇴적오염물의 ‘준설’ 역시 포함되는 것으로 보아야 할 것임
- 법률의 공백·흠결상태에 있는 ‘운반·보관·처리·처분’ 등에 대해서는 새로이 규정해야 할 것임
- 기술개발이 추진되고 있는 해양오염퇴적물 수거 현장(해상, 선박 위)에서의 처리(분리, 세척, 오염도 저감, 발생 폐수 수처리 등), 처리 산물의 해저면에의 배치, 처리 산물의 유효활용 등을 포함하고 있는 현장처리기술과 청정 물질로 해양오염퇴적물 위에 피복(Capping: 배치)하여 물리적(또는 화학적, 물리·화학적, 생물학적)으로 차단하려고 하는 피복정화기술 등이 현장에 효율적으로 도입·적용되기 위해서는 오염퇴적물의 수거뿐만 아니라 운반·보관·처리·처분 등에 대한 근거규정을 둘 필요가 있음
- 미국의 자원보전회복법(Resource Conservation and Recovery Art, RCRA)은 처분(disposal)과 처리(treatment)를 구분하고 있음
- 「폐기물관리법」은 처리를 “폐기물의 수집, 운반, 보관, 재활용, 처분”으로, 처분을 “폐기물의 소각(燒却)·중화(中和)·파쇄(破碎)·고형화(固化) 등의 중간처분과 매립하거나 해역(海域)으로 배출하는 등의 최종처분”으로 정의하고 있음. 이러한 구분을 「해양환경관리법」에서도 원용하는 것이 무난하다고 판단됨
- 오염퇴적물의 수거·운반·보관·처리·처분상의 특이성을 고려하여 관련 규정을 신설할

---

필요가 있음

- 준설물질에는 준설토사, 폐기물 등이 혼재되어 그 분리가 사실상 어려운 점을 고려하여 「해양환경관리법」에서 준설물질에 관하여 별도 규정을 두고 수거(준설), 운반(이동), 보관, 처리, 처분 등 전 과정에 걸쳐 단계별로 가능한 한 자세한 규정을 시행령 등에서 정해야 할 것임

#### (다) 해양환경관리업의 정비

- 수거업의 신설
  - 「해양환경관리법」상 폐기물해양수거업 및 퇴적오염물질수거업을 수거·처리를 포함하는 처리업으로 개선해야 할 것임
  - 이를 위해 해양환경관리업을 “오염물질수거·처리업”으로 변경하는 방안을 고려
- ‘등록’에서 ‘허가’로 전환
  - 「폐기물관리법」상 다른 사람의 폐기물을 위탁받아 처리하고자 하는 경우 폐기물처리업의 ‘허가’를 요하나, 「해양환경관리법」은 보다 완화된 규제수단인 ‘등록’을 요함
  - 완화된 제재수단의 채택은 폐기물의 해양투기를 조장하고 폐기물로 인한 해양오염 문제로 이어질 수 있음
  - 폐기물해양배출업을 포함한 ‘해양환경관리업’의 범주 안에 있는 ‘해양오염방제업’, ‘폐기물해양수거업’, ‘오염퇴적물수거업’ 등을 허가제로 전환할 필요성이 있음

#### (라) 합리적인 해양환경관리업 등록기준의 마련

- 「해양환경관리법」은 해양환경관리업의 등록기준으로 퇴적오염물질 전용수거선 및 펌프식 설비를 요구하고 있음(시행규칙 별표 14)
- 그 결과 전용수거선이 진입할 수 없는 해역 또는 현장 여건상 다른 장비의 사용이 요구되거나, 피복처리가 필요할 경우 등에 장비/공법의 사용이 제한되고 있음
- 이에 등록기준 중 장비에 대한 제한 규정을 완화시킬 필요가 있으며, 개발 예정 기술을 포함하여 다양한 장비/기술/공정(외국 또는 향후 개발 예정 기술 포함)을 사용할 수 있도록 개정안을 마련할 필요가 있음
- 퇴적오염물질전용수거선에서 논란이 되고 있는 “진공흡입식 펌프 또는 이와 동등한 성능을 가진 펌프”라는 규정은 사실상 진공흡입식 펌프만을 허용함으로써, 시장진입을 지나치게 제한하기 때문에 기본적으로 문제가 있음.
- 반드시 “진공흡입식” 펌프일 것을 요하지 않는다고 보는 것이 유연성을 제고한다는 차원에서 타당하며 특정 기술의 적용을 요구하는 기술기준은 유연성·형평성 차원에서 그리고 다양한 기술개발 및 적용을 제한하는 요인이라는 점에서 지양해야 함
- “퇴적오염물질전용수거선이란 퇴적오염물질 수거작업 시 부유물질의 발생으로 인한 환경피해를 최소화할 수 있는 진공흡입식 펌프 또는 ‘이에 준하는 설비, 장비’를 장착한 선박을 말한다. 이에 준하는 설비, 장비 등 필요한 사항은 국토해양부장관의 고시로 정한다.”로 개정하는 것을 검토할 필요가 있음
- 시행규칙 제36조 제3항 관련 별표 14의 비고 제8호의 개정 필요성
  - “퇴적오염물질등 수거업무 수행 시 반드시 퇴적오염물질수거업으로 등록된 퇴적오염물질전용수거선을 사용하여야 한다.”라는 규정에 단서 규정을 드는 방안
  - 예컨대, “다만, 퇴적오염물질 전용수거선이 수거업무를 수행하는 장소에 출입할 수 없는 등 부득이한 경우에는 그러하지 아니하다”

- 전용수거선의 진입이 불가능한 경우와 같이 사용의 제약이 있을 경우, 국토해양부장관의 승인절차를 거쳐 전용수거선 이외의 설비 또는 장비로 수거가 가능하도록 함

**(마) 다른 법률과의 충돌 방지**

- 「폐기물관리법」, 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」, 「토양환경보전법」, 「건설 폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률」, 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」, 「골재채취법」, 「환경정책기본법」, 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 등의 법률이 오염퇴적물 또는 준설토사에 대해 적용될 수 있음
- 그 결과 적용범위 및 관할의 혼란을 발생할 수 있음
- 오염퇴적물의 수거·운반·보관·처리·처분 등에 관하여 「해양환경관리법」 규정을 우선 적용하고 다른 법률에 특별한 규정이 있는 경우에만 당해 법률이 정하는 바에 따르도록 규정할 필요성 있음
- 예컨대, ① 오염물질의 수거·처리에 관한 사항은 이 법을 다른 법률에 우선하여 적용하고, 이 법에서 규정되지 아니한 사항은 관계 법률의 규정을 적용한다, ② 폐기물의 배출, 처리에 관하여 다른 법률에 특별한 규정이 있는 경우에는 그 법률이 정하는 바에 의한다. 다만, 제○조 내지 제○조의 규정은 그러하지 아니하다. 로 규정함이 타당함

**다. 해양퇴적물 오염특성별 해역유역 구분 기준개발**

**(1) 개요**

- ‘오염퇴적물’의 정의는 인간의 건강 또는 환경에 위협을 가하는 것으로 간주되는 수생 퇴적물(미국 환경보호청(US EPA), 1993)이다. 사람의 생활이나 산업활동에 기인한 유기물, 지속성유기오염물질(persistent organic pollutants: POPs), 중금속을 포함한 각종 오염물질들은 하천, 대기 등 다양한 경로를 통하여 해양에 유입된다. 유입된 각종 오염물질들은 해류에 의해 이동, 확산되면서, 침강, 재부유 및 재침강의 순환을 거치면서 해저면에 침적되어 궁극적으로 퇴적물을 오염시킨다. 해양에서 오염된 퇴적물은 저서생물 등 해양생물에 만성 또는 급성 독성을 포함한 악영향을 미치며, 먹이사슬에 따라 상위 생태계 파괴, 생물농축 등 해양환경에 문제를 유발한다. 연안의 폐쇄된 지형의 해역에서 퇴적물에 유기물이 다량 축적되면, 유기물을 분해하는 과정에서 다량의 산소가 소모되어 퇴적물과 해수층에 산소결핍을 유발하여 저서생물의 서식환경을 파괴할 수 있다. 또한, 퇴적물이 부패되는 과정에서 황화수소 등 악취를 수반한 가스가 발생하여 생활환경에 악영향을 미친다. 특히 중금속은 쉽게 분해되지 않으며, 지속성유기오염물질은 반감기가 수년에서 수십년에 이르므로, 해양오염퇴적물의 정화에는 많은 시간과 재원이 소요된다<sup>7)</sup>.
- 국내에서는 2008년 이전까지 수거된 준설토사에 대하여 해양배출기준의 적용이 이루어지지 않은 관계로 대부분 해양배출로 처리됨에 따라, 오염도를 저감시키기 위한 처리기술의 적용이 이루어진 사례가 없다. 한편, 국내·외 육상 토양오염 정화현장에서는 입자분리 (particle separation), 세척(soil washing), 추출(extraction), 생물학적처리(bioremediation), 화학적처리(chemical treatment), 고형·안정화(solidification/stabilization), 열처리(thermal deposition/incineration) 등 7가지 정화기술이 주로 사용되고 있다.
- 해양퇴적물은 토양과 하천 퇴적물에 비해 대개 입자의 크기가 작은 니질(silt, 입경 4~63 μm)과 점토(clay, 입경 4μm 이하)로 구성되며, 유기물 함량이 많으며 또한, 염분을 함유하고 있다. 입경이 작아질수록 표면적이 증가하므로 오염물질들이 흡착 또는 결합하기가 용이하여 오염도는 상대적으로 증가한다. 미국, 유럽, 일본 등의 경우, 해저면에서 제거(준설토)한 오염된 퇴적물에 함유된 중금속을 제거하기 위하여, 오염물질들의 제거 원리가

---

유사한 상기 7가지 토양오염 정화기술이 주로 사용되고 있으며, 처분방안으로는 재활용을 포함하여 연안, 육상, 해상 등에서 고립처분이 사용되고 있다. 그러나 현재 국내에서는 해양오염퇴적물 정화사업에 이러한 정화기술들이 사용된 사례가 없다. 또한, 해양오염퇴적물에 활용 가능한 오염토양 정화기술은 미세입자(입경 75 $\mu$ m 이하)에 함유된 중금속 제거에 한계가 있기 때문에 매우 제한된다<sup>8)</sup>. 한편 퇴적물은 오염물질들과의 물리·화학적 결합상태에 따라 물(distilled water)에 의해 추출될 수 있는 흡착상태(adsorbed fraction), Hydroxylamine hydrochloride(in acetic acid)에 의해 추출될 수 있는 산화상태(oxidizable fraction), Hydrogen peroxide에 의해 추출될 수 있는 환원상태(reducible fraction) 및 Hydrofluoric acid/nitric acid에 의해 추출될 수 있는 잔류상태(residual fraction)로 구분된다<sup>9)</sup>.

## (2) 시험 가능 해역 평가 방안

- 개발 예정인 해양오염퇴적물 정화기술을 시험하기 위한 해역 평가는, 개발될 기술이 최적화되기 전임을 고려하여, 중금속 등 유해화학물질의 오염도가 비교적 낮으며, 유기물 오염도가 높은 해역이 적합하므로 우선 ①퇴적물의 오염도를 평가한 다음, ②퇴적층의 입도, 조성 등 물성과 ③퇴적물의 주요 오염물질을 평가하고, ④수심 및 ⑤해역의 지정학적 위치, 이용목적 및 적용 가능성을 종합적으로 검토할 필요가 있다.

## (3) 대상 해역 검토

### (가) 대상 해역 퇴적물의 오염도 평가

- 해양수산부는 해양오염퇴적물 정화·복원체계 구축을 위하여 2004년부터 2011년까지 부산 남항 등 25개 해역에서 퇴적물의 오염현황을 조사하였다. 조사결과를 퇴적물 정화·복원 기준<sup>10)</sup>에 따라 유해화학물질 정화지수(CIHC:: Clean-up Index, Harmful chemicals) 및 부영양화 정화지수(CIET: Clean-up Index, Eutrophication)로 평가한 결과를 표 I-다-1와 I-다-2에 각각 나타내었다.

---

7) 대한환경공학회지, 32(12), PP1069-1079, 2010.

8) 대한환경공학회지, 32(12), 1069-1079, 2010.

9) The Journal of the Oceanological Society of Korea, 15(2), 180-184, 1983.

10) 해양오염퇴적물 조사 및 정화복원 범위 등에 관한 규정, 국토해양부 고시 제2011-700호, 2011. 11. 30.

[표. I -다-1] 조사 해역별 유해화학물질 정화지수(CIHC) 분포

해역	최소		최대		평균	정점수	평균	정점분포율	유해화학물질오염도	오염순위
	CI		CI		CI	(CI≥2)	(CI≥2)	(CI≥2)		
	CI		CI		CI	N	CI	%		
A	0.59	111.3	32.2	10	35.3	90.9	32.1	1		
B	4.13	91.5	17.9	21	17.9	100	17.9	2		
C	0.22	271.3	17.8	5	58.6	29.4	17.2	3		
D	14.3	17.9	15.7	5	15.7	100	15.7	4		
E	2.79	69.3	13.1	18	13.1	100	13.1	5		
F	3.87	57.5	10.2	21	10.2	100	10.2	6		
G	0.35	29.9	8.0	12	10.3	75.0	7.7	7		
H	0.11	12.2	4.7	8	6.6	66.7	4.4	8		
I	0.1	16.9	5.0	7	8.9	46.7	4.2	9		
J	0.3	32.6	4.5	17	6.5	63.0	4.1	10		
K	1.00	11.5	4.0	7	5.4	63.6	3.4	11		
L	0.00	18.1	3.9	9	7.6	45.0	3.4	12		
M	0.30	4.9	2.5	12	3.4	54.5	1.9	13		
N	0.17	4.7	2.1	12	3.0	54.5	1.6	14		
O	0.06	5.5	1.7	5	3.9	38.5	1.5	15		
P	0.36	5.7	1.5	5	3.4	29.4	1.0	16		
Q	0	3.4	1.5	3	2.8	33.3	0.9	17		
R	0	2.9	0.9	2	2.6	15.4	0.4	18		
S	0	2.5	1.2	3	2.4	13.6	0.3	19		
T	0.2	2.0	0.6	2	2.0	10.5	0.2	20		
U	0	0	0.5	0	-	0	-	21		
V	0	0	0.4	0	-	0	-	22		
W	0	0	0.3	0	-	0	-	23		
X	0	0.6	0.4	0	-	0	-	24		
Y	0	1.4	0.5	0	-	0	-	25		

[표. I -다-2] 조사 해역별 부영양화 정화지수(CIET) 분포

해역	최소	최대	평균	정점수 (CI≥6)	평균 (CI≥6)	정점 분포율 (CI≥6)	유기물 오염도	오염 순위
	CI	CI	CI	N	CI	%		
A	0	13	7.6	9	8.9	81.8	7.3	1
C	5	11	7.5	14	8.1	82.4	6.6	2
F	5	11	7.3	15	8.3	71.4	5.9	3
N	4	7	6.1	17	6.6	77.3	5.1	4
E	5	9	6.7	12	7.5	66.7	5.0	5
B	1	11	6.2	13	7.6	61.9	4.7	6
G	3	9	6.2	10	7.3	62.5	4.6	7
U	0	7	5.1	11	6.9	57.9	4.0	8
T	1	10	5.6	9	7.6	47.3	3.6	9
K	2	10	5.9	5	7.8	45.5	3.5	10
I	0	11	4.3	5	8.8	33.3	2.9	11
H	1	7	4.9	5	6.8	41.7	2.8	12
M	4	9	5.1	7	7.1	31.8	2.3	13
V	0	6	3.7	3	6.0	20.0	1.2	14
R	0	9	3.5	2	7.5	15.4	1.2	15
Y	0	6	4.4	5	6	17.2	1.0	16
S	0	8	2.5	3	7.0	13.6	1.0	17
Q	0	6	2.2	1	6.0	11.1	0.7	18
L	0	7	3.8	1	7.0	5.0	0.4	19
W	0	6	3.7	1	6.0	5.6	0.3	20
P	0	6	3.2	1	6.0	5.6	0.3	21
J	3	6	4	5	6	3.7	0.2	22
D	2	4	2.6	0	-	0	-	23
O	0	5	1.7	0	-	0	-	24
X	0	5	2.9	0	-	0	-	25

○ 퇴적물의 오염평가는 “해양오염퇴적물 조사·정화·복원 체계 구축”(‘04~’07) 및 “해양오염퇴적물 처리방안 및 기술개발”(‘07~’10) 연구용역 결과에 따라 고시된 정화·복원 범위 등에 관한 규정<sup>11)</sup>에 의거 평가한다. 고시에서는 퇴적물의 오염원인 물질에 따라 유해화

학물질 및 부영양물질로 나누고, 부영양물질은 항목별 오염도에 따라 평가한 점수에 따라 정화·복원지수(Cleanup Index, Eutrophication: CIET)를 산정한다.

- 유해화학물질에 대해서는 각 항목별로 기준 1과 기준 2를 설정하고, 기준 2를 초과하는 농도를 가진 오염물질을 우려대상 오염물질로 정의하고, 기준 1을 초과하고 기준 2 보다 낮은 농도를 가진 오염물질을 감시대상 오염물질로 정의한다. 퇴적물에서 우려대상 오염물질이 존재하는 경우, 해당 해역에 대하여는 동 유해화학물질의 근원과 입력 등을 조사하여 해저퇴적물에 동 물질이 축적되지 않도록 조치하거나 감소시킬 수 있는 방안을 시행할 필요가 있다. 감시대상 오염물질이 존재할 경우는 해당해역에 대하여 동 물질의 근원을 규명하고, 더 이상의 오염이 진행되지 않도록 방안을 강구하여야 한다. 이러한 유해화학물질로 오염된 퇴적물의 정화·복원 범위 설정은 각 항목들의 평가점수에 따라 정화·복원지수(Cleanup Index, Harmful chemicals: CIHC)를 산정하여 평가한다.
- 유해화학물질의 평가는 중금속(비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 수은, 니켈, 납, 아연), 지속성 유기오염물질(총폴리클로리네이티드비페닐(tPCB), 총다환방향족탄화수소류(tPAH) 등), 선박기인 오염물질(Tributyltin: TBT) 등 항목들을 대상으로 한다. 부영양물질 및 유해화학물질 정화·복원지수(Cleanup Index: CI) 산정방법은 다음 별표 2 및 별표 3과 같다.
- 한편, 정화·복원 범위 설정은 부영양화 정화·복원지수(CIET)가 6이상 이거나, 유해화학물질 정화·복원지수(CIHC)가 2이상인 경우 정화복원 대상 구역으로 설정할 수 있다. 다만, 해역의 이용목적이 선박의 통행, 화물의 하적 등으로서 사람의 생활환경에 미치는 영향이 작을 경우 예외적으로 유해화학물질 정화·복원지수(CIHC)가 4이상인 구역을 정화·복원 대상 범위로 설정할 수 있다.

[표. I -다-3] 부영양화 관련 평가항목, 기준농도 및 평가점수 (제9조제2항 관련)

항 목	단 위	기준농도	평가점수
강열감량 (IL)	% (건중량)	5 미만	0
		15 미만	3
		15 이상	6
화학적산소요구량 (COD)	mg/g (건중량)	13 미만	0
		20 미만	1
		30 미만	2
		40 미만	4
		40 이상	6
산취발성황화물 (AVS)	mg/g (건중량)	0.6 미만	0
		1 미만	1
		5 미만	2
		10 미만	4
		10 이상	6
비고			
1. 부영양화 관련 항목들에 대한 각각의 평가점수는 해저퇴적물시료에서 구한 항목들의 분석치로부터 기준농도 구간별 설정된 수치로 한다.			

11) 해양오염퇴적물 조사 및 정화복원 범위 등에 관한 규정, 국토해양부 고시 제2011~700호, 2011. 11. 30

[표. I -다-4] 유해화학물질 관련 평가항목, 기준농도 및 산출방식 (제8조제2항 관련)

항 목	단 위	기준 1	기준 2	비교
비소(As)	ppm(건중량)	9.0	41.6	공통
카드뮴(Cd)	"	0.68	4.21	"
크롬(Cr)	"	80	370	"
구리(Cu)	"	24	108	"
수은(Hg)	"	0.15	1.0	"
니켈(Ni)	"	23	52	"
납(Pb)	"	50	220	"
아연(Zn)	"	200	410	"
폴리클로리네이티드비페닐(PCBs)	ppb(건중량)	21.6	189	"
다환방향족탄화수소(PAHs)	"	4,000	45,000	"
클로로데인(Chlordane)	"	0.5	6.0	선택
다이엘드린(Dieldrin)	"	0.02	8.0	"
디디티(DDT)	"	1.6	46	"
유기주석화합물(TBT)	"	5.0	105	"

비교

1. 유기염소계 농약 성분에 해당되는 클로로데인(Chlordane), 다이엘드린(Dieldrin), 디디티(DDT)은 주변의 농경지 등으로부터 이들의 과다한 유입 가능성이 제기되는 해역에 한하여 포함하며, 유해방오도로 성분에 해당되는 유기주석화합물(TBT)은 선박건조 등으로 인하여 해저퇴적물에 유기주석화합물의 축적으로 인한 영향이 문제가 될 수 있는 해역에 한하여 평가항목에 포함한다.

2. 유해화학물질 관련 항목들에 대한 각각의 평가점수는 해저퇴적물시료에서 구한 항목들의 분석치로부터 기준 1과 기준 2의 기준농도를 이용하여 다음과 같이 산출한다.

가. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 1 이하의 농도범위를 가진 항목은 항목별 평가점수를 0으로 한다.

나. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 2와 동일한 농도를 가진 항목은 항목별 평가점수를 1로 한다.

다. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 1 이상이면서 기준 2 미만의 농도범위를 가진 항목에 대한 평가점수는 분석치에서 기준 1의 농도를 뺀 값을 기준 2의 농도에서 기준 1의 농도를 빼준 값을 나눈 값 [(분석치 - 기준 1의 농도) ÷ (기준 2의 농도 - 기준 1의 농도)] 으로 한다

라. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 2 이상인 항목들에 대한 평가점수는 분석치를 기준 2의 농도로 나눈 값(분석치 ÷ 기준 2의 농도)으로 한다.

- 유해화학물질오염도의 경우 오염도가 비교적 높은 해역(6이상, 정화복원 대상 구역 정화 지수가 6일 경우, 전체 조사구역 중 오염지역이 83%이상), 중간정도 해역(1이상, 정화지수 2일 경우 오염지역 50%이상), 비오염 해역을 제외한 나머지를 오염도가 낮은 해역으로 설정할 수 있다. 한편 유기물오염도의 경우 오염도가 비교적 높은 해역(4.5이상, 정화



---

지수 6일 경우 오염지역 75% 이상), 중간정도 해역(1.0이상, 정화지수 6일 경우 오염지역 17% 이상), 비오염 구역을 제외한 나머지를 오염도가 낮은 해역으로 설정할 수 있다.

- 총 25개 조사해역 중 22개 해역이 유해화학물질 또는 부영양화 물질에 의해 오염된 해역이며, 나머지 6개 해역은 오염되지 않은 해역이다. 전체 해역 중 현재 해양오염퇴적물 정화·복원 사업이 추진 중에 있거나, 재개발 공사(준설, 매립 포함) 중에 있거나, 실시설계 및 정화·복원 사업이 예정(1~2년 이내)된 해역에서, 개발에 최소 3년 이상의 기간이 소요되는 해양오염퇴적물 정화기술의 시험은 매우 제한될 것으로 판단된다. 그러므로 상기 6개 해역(A, B, D, I, J, T)과 유해화학물질/부영양화 정화지수 평가결과 비오염으로 나타난 6개 해역(O, U, V, W, X, Y)을 평가 대상에서 제외한다.
- 나머지 13개 대상해역 중, 유기물 오염도에 따라서 오염도가 비교적 높은 5개 해역(C, F, N, E, G), 중간정도인 5개 해역(K, H, M, R, S) 그리고 낮은 4개 해역(Q, L)으로 구분할 수 있다. 한편 유해화학물질 오염도에 따라서 오염도가 비교적 높은 4개 해역(C, E, F, G), 중간정도인 6개 해역(H, K, L, M, N, P) 그리고 낮은 3개 해역(Q, R, S)로 구분할 수 있다.
- 개발 예정인 해양오염퇴적물 정화기술을 시험하기 위한 해역은 개발될 기술이 최적화되기 전임을 고려하여, 중금속 등 유해화학물질의 오염도가 비교적 낮으며, 유기물 오염도가 높은 해역이 적합하다고 사료된다. 그러므로 유해화학물질 오염도가 비교적 높은 4개 해역과 유기물 오염도가 낮은 3개 해역을 역시 평가 대상에서 제외하고, 나머지 6개 해역(N, K, H, M, R, S)을 평가 대상으로 한다.
- 상기 해역 중 1개 해역(N)은 유기물 오염도가 비교적 높으며, 유해화학물질 오염도가 중간정도인 대상 해역 조건에 충족되며, 3개 해역(K, H, M)은 유기물 오염도 및 유해화학물질 오염도가 각각 중간정도로서 개발 예정 해양오염퇴적물 정화기술 시험에 적합할 것으로 사료된다. 나머지 2개 해역(R, S)은 유기물뿐만 아니라 유해화학물질 오염도가 비교적 낮으므로, 개발 예정 해양오염퇴적물 정화기술의 처리능력 평가에서 다소 제한될 수 있다.

## (나) 대상 해역 퇴적물의 물성 및 수심

### ① N 해역

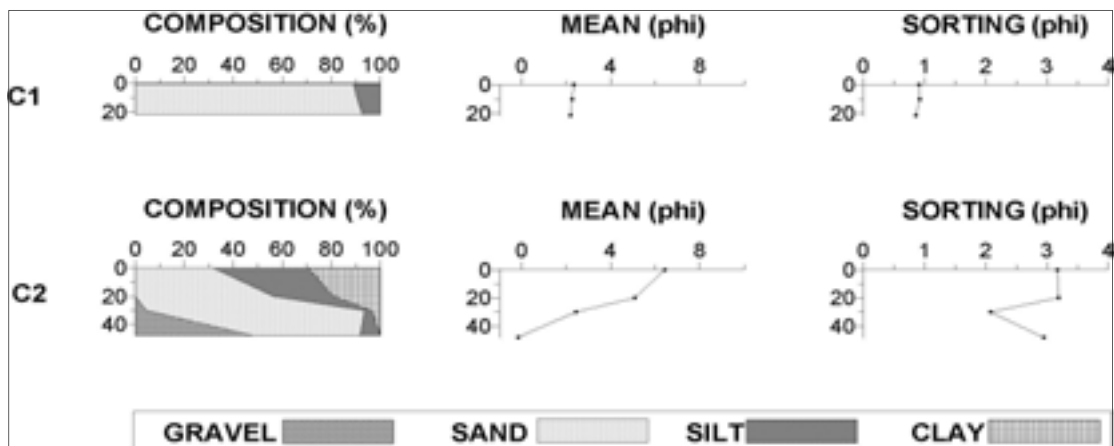
- 대상해역의 시추 퇴적물을 이용하여 오염층을 포함하는 제 1 퇴적층의 수직적 특성 파악을 위하여 고해상 지층 탐사기 기록(SES-96)과 비교할 수 있는 4개 정점을 선정하여 수중용 바이브로 코어를 이용한 시추퇴적물을 채취하였다. 채취된 시추퇴적물의 길이는 99~184 cm로 채취됐으며, 정점 2번에서 최대 184 cm, 정점 3번에서 최소 99 cm 이다. 정점 2번과 3번은 과거 준설지 내의 위치 정점이고 1번과 4번은 준설이 이루어지지 않은 정점 시추퇴적물 채취 위치이다. 정점 2의 퇴적물의 경우 1, 3, 4번 정점과 전 층에 걸쳐서 퇴적물이 검은색으로 최근의 준설지내에서의 퇴적층 오염을 나타내고 있다. 이는 준설지내의 퇴적층이 주변과 비교하여 오염 정도가 심한 퇴적물의 유입을 나타내고 있다.
- 대상해역의 수심은 2~13 m 범위이고, 과거 준설지의 경계가 뚜렷하게 나타난다. 과거 준설지역은 9~13 m의 분포가 나타난다. 준설지 이외 다른 구역(어항 지역)은 2~5 m로 준설지와는 경계 구역에서 5 m에서 10 m로 급격한 수심 변화를 보인다. 특히 내측의 북서쪽 경계 구역은 서쪽 경계(준설지 경계)에 비하여 수심 변화 정도가 상대적으로 완만하며 이는 북서쪽으로 부터의 퇴적물 유입을 의미하는 것으로 판단된다. 유입된 퇴적물은 준설지내에서 남서 및 서쪽으로 서서히 이동되어 해저면의 불규칙한 지형분포로 나타난다.
- 대상해역의 음향영상 모자의 결과에 의하면 해저면은 매우 불규칙한 반사 음파 형태가

조사구역의 전체에서 나타나며, 준설지역의 경계가 뚜렷하게 남북 방향의 흔적으로 3부두를 중심으로 한 좌우에서 나타난다. 특히 준설지내의 해저면 음파 반사 강도는 상대적으로 주변과 비교하여 약하게 나타나거나(밝게 나타남; 음파의 흡수를 의미) 불규칙한 영상 기록을 확인할 수 있는데, 이는 해저면을 구성하고 있는 퇴적물에 음파신호의 상대적 흡수를 크다는 것을 의미하고 해저면의 요철이 심한 것을 의미하는 것으로 액상의 오니 퇴적물 또는 매우 부드러운 퇴적물로 구성되어 있음을 판단할 수 있다.

- 조사구역에서 오염퇴적물의 분포는 전체 조사면적 5,970,150 m<sup>2</sup> 중 약 49.8% 정도인 2,974,000 m<sup>2</sup>이며, 물량은 약 1,265,819 m<sup>3</sup>에 해당한다.

## ② K 해역

- 시추퇴적물 1은 21.5 cm의 총길이를 가지고 very dark gray의 색깔을 나타내며 뚜렷한 구조를 나타내고 있지 않다. 패각이 10 cm 이후부터 나타나고 있다. 퇴적물은 80% 이상의 모래함량을 나타내고 있으며 하부로 갈수록 모래함량이 증가하고 있어 평균입도가 하향 조립해지고 분급도 또한 양호해지고 있다. 시추퇴적물 2는 총길이가 48 cm로 0~23 cm은 dark grayish brown, 23~48 cm은 light brownish gray 색을 보이고 있다. 뚜렷한 구조는 보이지 않으며 41 cm부터 자갈과 패각이 증가하고 있다. 자갈은 30 cm 이후부터 나타나는 반면, 점토는 상대적으로 감소하고 있다. 퇴적물은 하향 조립해지고 있다.
- 조사해역 수심 지형 분포는 내항 안벽 부근의 조사된 수심 2m로부터 항 입구의 수심 12m로부터 외해로 점차 깊어진다. 내항의 안벽 부근은 준설로 인한 해저면의 흔적이 불규칙하게 나타난다. 어항 주변은 대부분 수심 5m 이하로 완만함을 알 수 있다.
- 조사해역의 해저면 음향영상 모자이크 결과 도면으로 수심지형의 변화에 따른 해저면의 퇴적물 분포에 따른 영상의 큰 차이는 나타나지 않는다. 그러나 외곽 방파제 측, 항 입구 주변의 해저면에는 공사중 흘러 내린 것으로 판단되는 공사용 인공구조물등에 의한 해저면의 불규칙한 요철에 의한 해저면 영상 특성이 나타난다. 특히 어항으로 이어지는 내항의 입구 주변 해저면에는 어구에 의해 끌린 흔적이 많이 나타난다.
- 조사구역에서 대부분의 구역이 해양오염퇴적물 정화복원 사업 범위에 포함되며, 오염퇴적물 분포는 총 조사면적 361천 m<sup>2</sup> 중 91.1%인 약 329천 m<sup>2</sup>에서 물량은 약 8,441천 m<sup>3</sup>에 해당한다.



[그림. I-다-1] K해역 시추퇴적물의 입도구성 및 퇴적물성

### ③ H해역

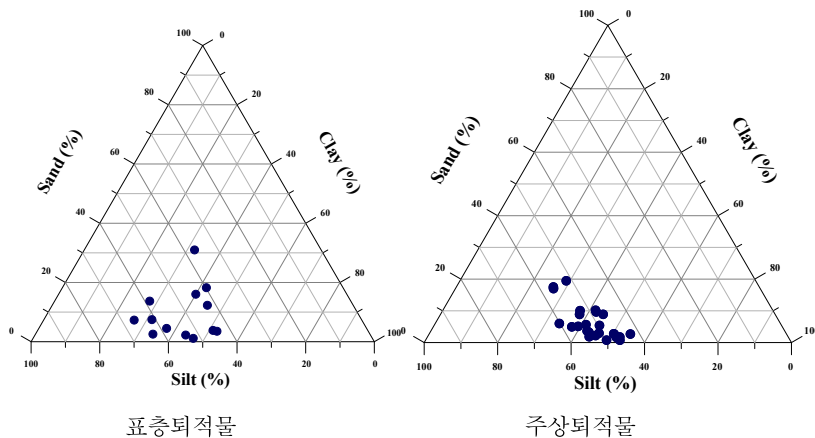
- 대상해역의 시추퇴적물은 약 25 cm 획득되었다. 퇴적물은 빨질 모래질 퇴적물로 전층이 암회색으로 오염이 상당히 진행되어 있는 것으로 확인되었다.
- 대상해역의 수심은 3~13 m의 분포를 보인다. 해저지형은 여객터미널을 주변 연안으로부터 돌산도 사이에 조사구역중 수로의 상대적 낮은 수심의 구릉형태 지형이 나타나고, 일부 구역은 깊은 수로(9~13 m)가 북동-남서 방향으로 분포하고 있다. 특히 일부 구역은 조사구역중 가장 깊은 13 m의 수심 분포가 나타난다. 이러한 급한 수심 변화를 보이는 수로의 골은 연안을 따라 돌산 대교를 지나는 수로로 이어져 있다.
- 대상해역 해저면 음향영상 모자이크 결과 도면에 의하면 하천 하구를 중심으로 낮은 해저면 반사 강도를 나타내는 것으로 보아 하천으로 부터의 퇴적물 유입에 따른 해저면의 불규칙한 변화를 확인 할 수 있으며, 다른 조사구역에서는 해저면이 굽은 입자의 모래, 자갈 등으로 구성되어 강한 반사파 해저면 기록을 나타낸다. 연안 인접 지역에는 어구, 앵커 등에 의해 끌린 흔적이 일부 나타난다. 전반적으로 연안의 인접된 지역을 제외하며, 해저면은 빠른 유속에 따른 침식 활동으로 인해 해저면의 굴곡 요철은 심하지 않고, 상대적으로 매끄러운 기록을 보인다. 따라서 해저면의 음파는 상대적으로 강하게 나타난다.
- 조사구역에서 오염퇴적물의 분포는 전체 조사면적 51,600㎡중 약 81.0% 정도인 41,794 ㎡에서 물량은 약 8,358 ㎡에 해당한다.

### ④ M해역

- 대상 해역에서 퇴적물 오염도 자료 이외의 지구물리 조사자료 없음.

### ⑤ R해역

- 대상 해역 표층 퇴적물의 평균입도는 각각 왕모래~점토인 6.6~8.9Φ (평균 7.9Φ)의 범위로 나타났다. 내측 수로구역에서는 정점 3과 4에서 상대적으로 평균입도가 커져 8Φ이상의 값을 보였으며 다른 수로 구역에서는 안쪽의 정점 IN-5, IN-6, IN-8, IN-9에서 평균입도 8Φ이상의 값을 나타냈다. Folk (1968)의 분류법에 따라 조사구역의 퇴적상은 대부분이 Mud질이나 silt질로 구성되어 있다.
- 주상퇴적물의 평균입도는 전 정점의 모든 깊이에서 실트질 퇴적물의 입도인 7.0~9.2 Φ 범위였다. 평균입도는 깊이별로 큰 차이를 보이지 않았으며, 조사구역의 퇴적상은 대부분이 Mud질로 구성되어 있다.
- 대상 해역 수심은 1~10 m의 분포를 보인다.

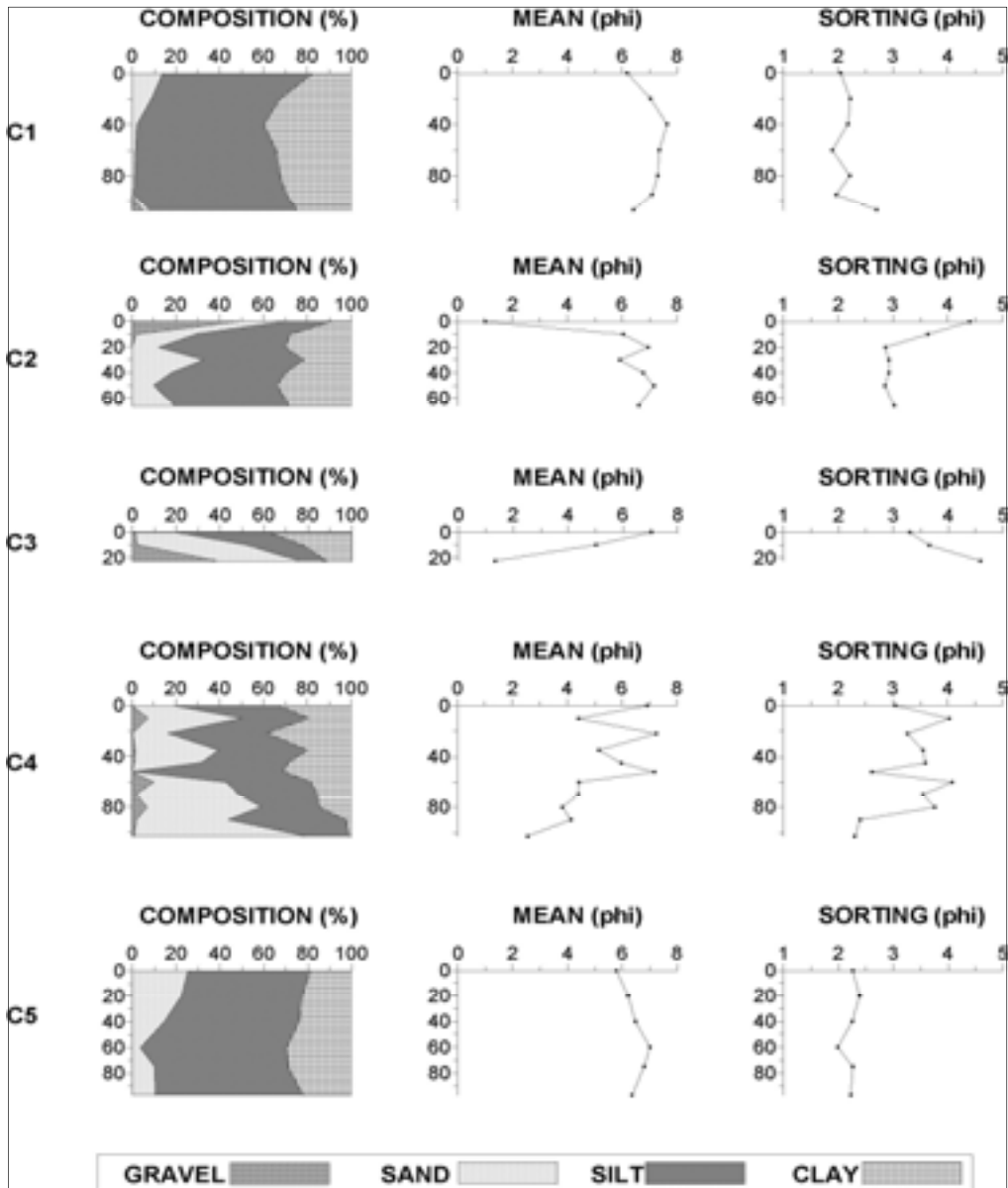


[그림. I-다-2] R해역 퇴적물의 조성

---

## ⑥ S해역

- 대상 해역에서는 총 5개(C1~C5)의 시추퇴적물이 채취하였다. 전반적으로 시추퇴적물 상부에서는 olive gray, gray 색을 나타내고 있으며 하부로 갈수록 gray와 dark gray을 나타내고 있다. 그리고 항 중앙에 있는 C2와 C4 시추퇴적물과 비교해서 항 구석에 위치하고 있는 C1, C3, C5 시추퇴적물에는 상대적으로 black이 부분적으로 많이 나타나고 있다. 또한 C4와 C5 시추퇴적물은 각각 98 cm 이후에 olive yellow, 69 cm 이후에 light yellowish brown과 light gray가 나타나고 있다. 전체적으로 뚜렷한 구조는 나타나지 않지만 부분적으로 불연속적이고 변형된 희미한 층리를 보이고 있다. C5 시추퇴적물을 제외한 나머지 시추퇴적물에서 자갈이 나타나고 있는데 C1과 C3은 최하부, C2 시추퇴적물은 표층에서만 나타나고 있다. C4 시추퇴적물은 10% 이하지만 전체적으로 나타나고 있다. 시추퇴적물의 평균입도와 분급도의 수직적 분포변화는 C1과 C5보다 C2, C3, C4 시추퇴적물에서 크게 나타나고 있다. 먼저, C1, C5의 경우, C1의 퇴적물이 C5의 퇴적물보다 상대적으로 세립하지만 수직적 분포에서는 60 cm 까지 세립해지다가 그 이후 조립해지고 있고 분급도의 수직적 분포도 유사하게 분포하고 있다. 나머지 시추퇴적물인 C2, C3, C4는 평균입도가 상대적으로 조립과 세립을 반복하는 반면에 분급도는 평균입도와 반대로 조립해지면 불량해지고 세립해지면 양호해지고 있지만 뚜렷한 경향성을 보이고 있지는 않다.
- 조사구역은 안벽 부근의 약 2m로부터 가장 중앙의 약 9.5 m의 수심 분포를 보인다. 특히 선박 통행 구간에서 해저면에 깊은 골이 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 일부 구역을 제외하면 수심 유지를 위한 전 구역에서의 준설 등에 의한 지형 변화를 확인할 수 있으며, 특히 중앙에는 인위적일 것으로 판단되는 폭 3~5 m의 남북을 통과하는 골이 형성되어 있는 특이한 지형변화가 나타난다. 해저면의 상층부는 다양한 규모의 요철로 인해 매우 복잡한 지형 특징이 나타나고, 일부 안벽 부근에는 주변과 비교하여 상대적으로 2 m 이상 낮은 수심의 지형 형태가 보이기도 한다.
- 대상 해역 해저면 음향영상에서는 일부 안벽 부근의 상대적인 단단한 해저면에 의한 강한 해저면 반사파 음향영상을 제외하고 전반적으로 일정한 해저면 퇴적물에 의한 기록 양상이 나타난다. 그러나 선박 통행 구역 주변의 해저면은 해수의 유통에 따라 해저면의 노출을 확인할 수 있으며, 주변과 비교하여 단단한 정도를 확인할 수 있다.
- 조사구역에서 오염퇴적물의 분포는 전체 조사구역 2,220,573 m<sup>2</sup>중 약 7.9%인 176,500 m<sup>2</sup>에서 물량은 약 64,276 m<sup>3</sup>에 해당한다.

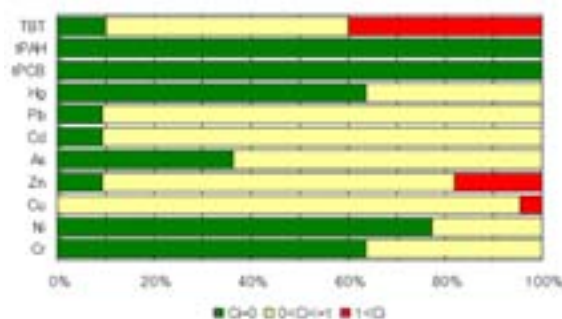


[그림. I -다-3] S해역 시추퇴적물의 입도구성 및 퇴적물성

(다) 대상 해역 퇴적물의 주요 오염물질

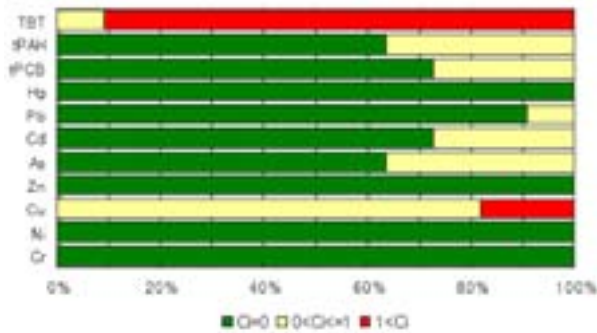
① N 해역

- TBT, Cu, Zn가 소수의 정점에서 기준 2를 초과하는 것으로 나타났다. Cu는 전 정점에서 기준 1을 초과하고 있으며 Pb, Cd, Zn는 90% 이상의 정점에서 기준 1을 초과하고 있다.



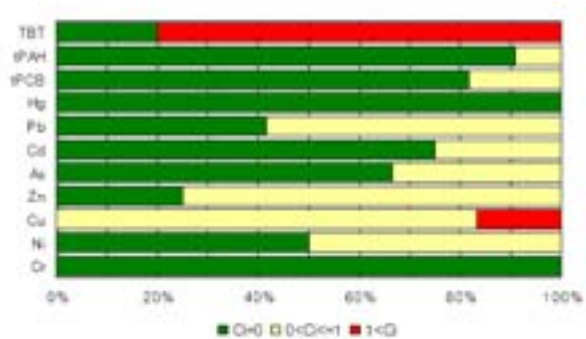
### ② K 해역

- 우려 대상 오염물질은 TBT > Cu이며, 감시 대상 오염물질은 PAH, AS > PCB, Cd > Pb이다.



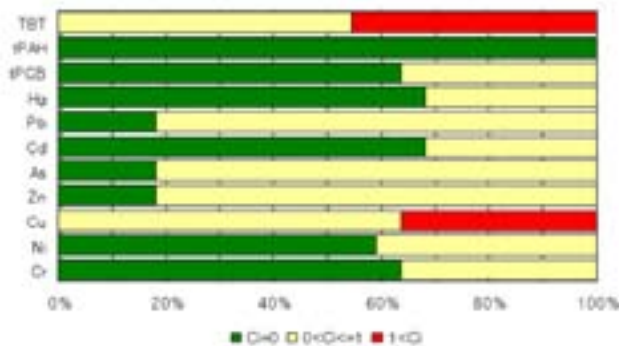
### ③ H 해역

- 80%의 정점에서 TBT가, 그리고, 약 15%의 정점에서 Cu가 기준 2를 초과하고 있다. Cu는 모든 정점에서, 그리고, Pb, Zn, Ni이 50% 이상의 정점에서 기준 1을 초과하고 있다.



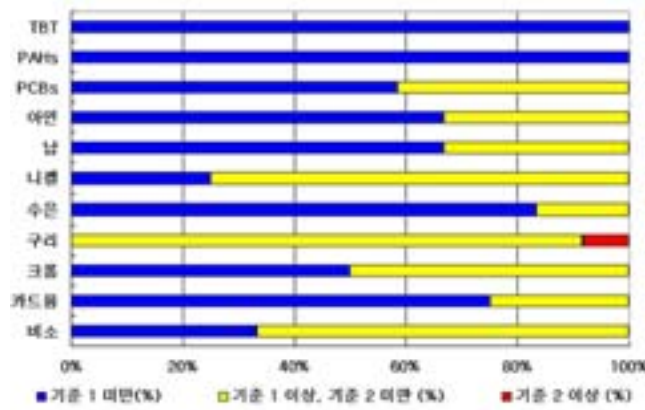
### ④ M 해역

- 전체 정점 중 약 30~40% 이상의 TBT와 Cu 항목들이 기준 2를 초과하는 것으로 나타났다. Cu는 그 외 모든 정점들에서도 기준 1을 초과하였다.



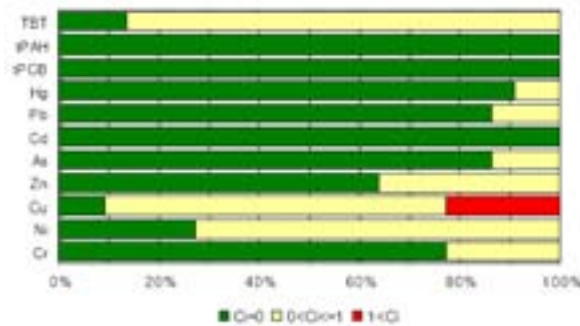
### ⑤ R 해역

- 해양오염퇴적물 정화·복원기준 중 기준 2를 초과하는 우려대상 오염물질은 구리이며, 기준 1 이상, 기준 2 미만인 감시대상 오염물질은 니켈>비소>크롬>PCBs>아연, 납>카드뮴>수은이다. 한편, 주상퇴적물 조사결과 역시 니켈, 구리, 비소는 모든 정점에서, 크롬과 수은은 일부 정점의 퇴적층에서 해양오염퇴적물 정화복원기준 중 기준 1을 초과하였다.



### ⑥ S 해역

- Ni이 20% 이상의 정점에서 기준 2 이상이였으며, TBT, Hg, Pb, As, Zn, Ni 및 Cr이 부분적으로 기준 1 이상의 농도를 보였다.



[표. I-다-5] 대상 해역 퇴적물의 평균 오염도 및 정화지수

구분	단위	N	K	H	M	R	S
COD	mg/g	20	27	16	19	11	19
AVS	mg/g	1.8	0.6	1.5	0.9	0.6	0.3
IL	%	11.2	6.9	7.3	6.8	7.3	4.2
TOC	%	2.3	3.4	1.7	1.8	0.9	0.6
TN	%	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
Al	%	6.4	4.4	8.1	8.8	7.6	7.6
Fe	%	4.5	2.2		3.8	3.3	3.2
Mn	mg/kg	717	269	811	489	585	463
Cr	mg/kg	79	21	54	93	82	70

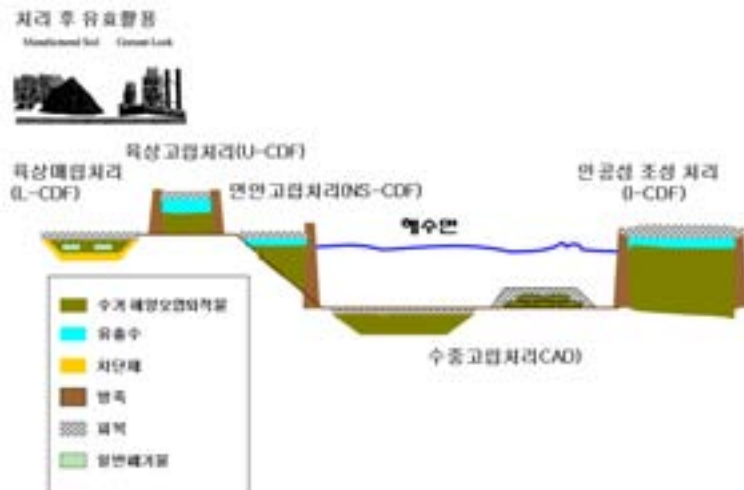
Ni	mg/kg	17	9	23	23	27	26
Cu	mg/kg	73	83	97	89	49	77
Zn	mg/kg	321	119	242	254	178	178
As	mg/kg	10	8	9	10	9	7
Cd	mg/kg	1.37	0.54	0.62	0.60	0.45	0.16
Pb	mg/kg	74	34	58	73	45	40
Hg	mg/kg	0.141	0.078	0.062	0.177	0.105	0.066
PCBs	μg/kg	10	20	21	22	25	5
PAHs	μg/kg	1,681	4,012	2,410	516	175	376
TBT	μg/kg	108	337	461	105	7	39
CIHC	-	2.07	3.99	4.68	2.49	0.86	1.17
CIET	-	6	6	5	5	3	2

(라) 대상 해역 특성 검토

- 대상 해역 중 N은 육역에 인접한 내만이며, 무역항으로서 해상 교통과 물류의 중심 해역이다. K는 연안항으로서 어업과 수산물 유통 중심 해역이며, 화물의 운송이 빈번한 다목적 해역이다. H는 무역항으로서 해상교통의 중심 해역이다. M, R, S는 무역항으로서 화물운송과 물류가 중심이 되는 해역이다. 단 R은 일부 수로 형태로 이루어진 구역이 있으며, 이 구역에는 소형선박을 제외하면 선박의 통행이 적다.
- 6개 대상 해역은 대부분 무역항 또는 연안항 항계 내에 위치한 해역으로서 수심은 선박이 통항하는 일반적인 항만구역과 같이 약 2~13m 정도이며, 주요 오염물질은 유해화학물질의 경우, 선박활동에 기인하는 TBT 및 선박 도료의 발색제 등에 주로 사용되는 Cu, Zn이며, 유기오염물질의 경우 COD와 퇴적물의 부패 정도를 간접적으로 나타내는 AVS이다.

(마) 요약

- 해양오염퇴적물 정화·복원 사업에서는 수거한 퇴적물을 그대로 또는 적절한 처리 후 유효 활용하거나, 육상, 연안, 해상 등에서 다양한 방법으로 최종처리하고 있다<sup>12)</sup>.





- 그러나 수거한 해양오염퇴적물을 그대로 최종처리하기 곤란한 경우, 퇴적물에 함유된 오염도를 저감시키는 처리(중간)를 한 다음 최종처리한다. (중간)처리의 목적은 최종처리(재활용 포함) 및 관련 환경기준에 적합할 정도로 오염도를 저감시키는 것이다. 현재 미국 등 선진국은 수거 해양오염퇴적물의 오염도를 저감시키는 처리(중간)에 입자분리, 생물학적처리, 화학적처리, 추출/세척, 고정화(고형화, 안정화), 열처리(파괴, 탈착) 등 6가지 처리기술을 사용하고 있다<sup>13)</sup>. 상기 처리기술 중 국내 오염도양 정화기술에 주로 사용되는 기술은 입자분리 및 세척 처리기술이다.
- 일반적인 오염도양 정화기술은 75 $\mu$ m 이하 입자를 분리하여 육상 폐기물처리장에서 매립 처리한다. 한편, 해양오염퇴적물은 모래에 비하여 입경이 매우 작은 미사질(Silt, 0.063mm ~ 0.004mm)과 점토질(Clay, 0.004mm 이하)로 구성되어 있어서 일반적인 오염도양 정화기술을 적용하기에는 매우 제한된다. 그러나 문헌<sup>14)</sup>에는 진해만 해양퇴적물을 물로 세척한 결과 퇴적물에 함유된 중금속 중 Cd은 70.8%, Cu는 0.5%, Pb은 1.4%, Zn은 1.3% 용출되는 것으로 나타났다. 해양오염퇴적물 정화·복원 사업이 예정되는 울산 방어진 및 진해 행암만 퇴적물을 이용한 국내 대표적인 처리기술(입자분리, 세척정화)의 실증실험 결과에서도 As, Cd, Pb, Hg 등 퇴적물에 함유된 중금속이 약 70 ~ 90% 제거되는 것으로 나타났다. 그러므로 해양퇴적물에 함유된 주요 오염물질과 결합형태 및 분해기작에 근거하여 현존 처리기술을 수정, 보완하여 최적화 시킨다면, 수거 예정 해양오염퇴적물 처리(중간)에 충분히 적용이 가능할 것으로 사료된다.
- 개발 예정인 해양오염퇴적물 정화기술을 시험하기 위한 해역으로는 개발될 기술이 최적화되기 전임을 고려하여, 중금속 등 유해화학물질의 오염도가 비교적 낮으며, 유기물 오염도가 높은 해역이 적합하데, 해역별 퇴적물의 오염도, 물성, 주요 오염물질, 수심 및 해역 특성을 검토한 결과를 종합하면 대상해역으로 6개 해역(N > K, H, M > R, S)이 적합할 것으로 사료된다.

## 라. 해역유형별 해양폐기물 최적 수거공법 개발

### (1) 해양오염퇴적물 처리방안 검토

- 오염퇴적물 정화·복원 관련 연구는 1980년대 미국 오대호 관리프로그램을 시작으로 다양한 기술방법이 소개되기 시작하여 “오대호 오염퇴적물 평가와 복구 프로그램”을 통해 체계화되었다<sup>15)</sup>. 이러한 연구를 통하여 약 250여 가지 이상의 오염퇴적물 처리방안이 개발되었고 각각의 기술과 방법에 대한 안정성, 경제성 및 효율성 평가를 통하여 다양한 오염 우려 해역에서 오염된 퇴적물의 정화·복원 사업에 적용되어 왔다<sup>16)</sup>. 현재 일반적으로 많이 사용되는 정화·복원 방법은 장기간 모니터링을 병행한 자연정화방법 (Monitored Natural Recovery), 오염된 퇴적물을 오염되지 않은 청정물질로 피복하는 현장피복방법 (In-Situ Capping) 및 오염된 퇴적물을 물리적으로 제거하는 준설(Dredging) 등이 있다 (표 I-라-1).

12) Capping of contaminated dredged material case study, port of tyne, United Kingdom, International Maritime Organization(IMO), 2007. 3. 15, LC/SG 30/INF.3

13) 해양오염퇴적물 처리방안 및 기술개발[II], 국토해양부, 2009. (연구기관: 한국해양연구원)

14) The Journal of the Oceanological Society of Korea, 15(2), 180-184, 1983.

15) 해양오염퇴적물 처리방안 및 기술개발[III], 국토해양부, 2010. 10. (연구기관: 한국해양연구원)

16) USEPA, Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) 1992 Work Plan, EPA/Great Lakes National Program Office, Chicago, IL., 1992.

[표. I-라-1] 오염퇴적물 정화방법 선택을 위한 기본조건

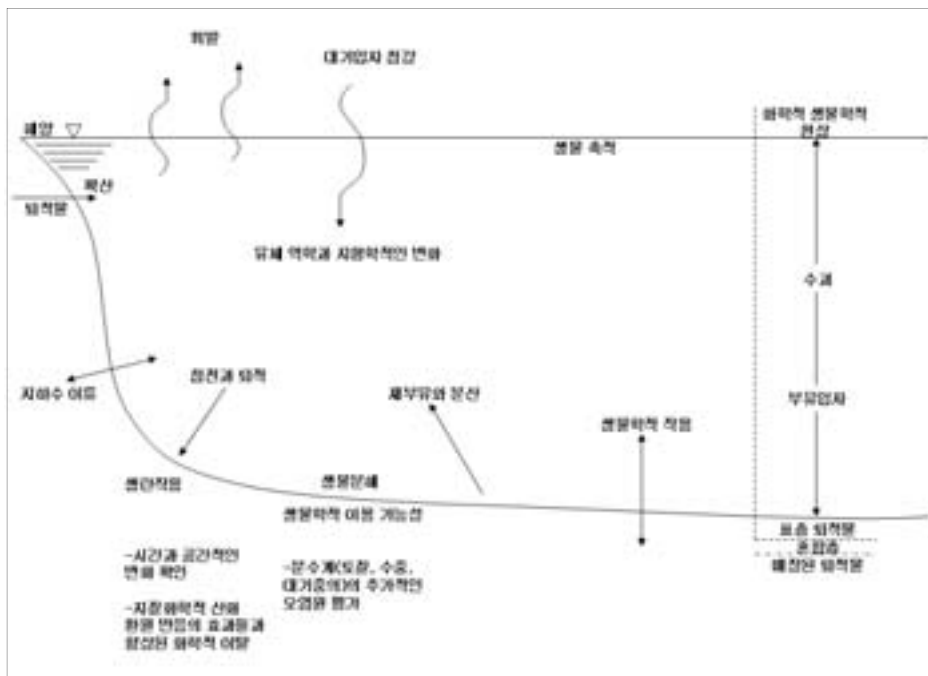
구분	조건
자연정화	오염원이 관리되지 않아 복구의 대안이 없음 인위적인 조치 없이도 적절한 기간 내에 정화 가능 인위적인 복구조치가 더 큰 악영향을 끼칠 가능성 정화 추이에 대한 모니터링 필요
현장처리	유체의 흐름이 약해 침식이 일어날 가능성이 없음 준설이나 공사 등 퇴적물을 교란시킬 계획 없음 오염물질의 성질 파악 필요 공사 중·후 효과에 대한 모니터링 필요
표면피복	주변지역에 미치는 영향, 오염퇴적물 이동, 생물교란 지역의 물리, 지질, 화학적 파악 시간에 따른 피복물질의 변화 예측 및 모니터링
준설	퇴적물 제거로 인한 악영향이 미약 수로 유지 등을 위해 퇴적물 제거가 반드시 필요 제거퇴적물의 투기 등 처리에 따른 문제점 고려

- 적절한 처리방안의 선택은 특정 오염물질의 존재 및 유해성, 정화 기간 중 해역의 이용 문제, 영향을 받는 지역의 면적, 복구 방안의 실용 가능성, 해당 지역의 수리특성, 정화에 소요되는 시간, 정화와 관련된 책임 소재 및 지역의 사회·경제학적 요소 등의 많은 요인에 의해 좌우된다. 미국 등 선진국의 경우 조건만 충족된다면 자연정화법을 해양오염퇴적물 처리를 위한 기본적인 방법으로 간주한다. 그러나 이 경우, 지속적이고 체계적인 환경모니터링을 통해 관리할 필요가 있다.

(가) 자연정화방법 (Monitored natural recovery)

① 개요

- 자연정화방법은 퇴적물에 함유된 오염물질, 독성 등을 자연의 생화학적 반응을 통하여 자연스럽게 분해되고 정화되는 과정에 기초한다. 그러나 단순히 자연분해에 의지하여 정화되는 것을 기대하는 것이 아니라 장기적인 모니터링과 오염원 차단에 집중적인 시간과 예산을 투자하여야 성공적인 자연정화방법이 효과를 거둘 수 있다. 이를 위하여 오염물질의 종류와 거동특성, 정화기간 중 해역의 이용 계획 및 해역의 생지화학적 특성 등을 정확히 파악하고 모니터링하는 것이 중요하다. 퇴적물의 자연정화방법은 물리적, 생물학적 그리고 화학적 기작(mechanism)을 통하여 이루어지는데 성공적인 자연정화방법을 위해서는 이러한 메커니즘에 대한 이해와 평가가 중요하다.



[그림. I-라-1] 자연정화방법과 관련된 해양오염퇴적물 정화기작

- 자연정화방법을 선택하기 위해서는 몇 가지 사전 고려사항이 있는데, 일차적으로 퇴적물과 주변 환경에서 자연정화가 어떠한 과정을 거쳐 발생하고 어떠한 결과를 도출하는지 이해하는 것이 필요하다. 사후결과에 대해서는 충분한 양의 자료를 바탕으로 시뮬레이션을 통하여 예측되어야 하는데 이러한 예측은 시행 전뿐만 아니라 자연정화방법이 시행되는 순간에도 지속적으로 시행되어야 한다. 이를 위해서는 오염된 퇴적물 현장과 더불어 그 주변해역에서 지속적으로 환경모니터링이 이루어지고 그 자료를 바탕으로 위험도 조사, 환경영향평가 및 사회경제학적 영향평가가 수행되어야 한다.
- 미국, 유럽 등에서는 오염된 퇴적물을 인위적인 방법을 사용하여 정화·복원하기에 앞서 일차적으로 자연정화방법이 효과를 거둘 수 있는지 사전검토 후 인위적인 자연정화방법을 선택하는 시스템을 주로 활용하고 있다. 비록 전체적으로 자연정화방법을 시행하기 어려운 경우에도 일부분 혹은 상당히 많은 면적에 대해 자연정화방법을 다른 정화·복원 방법과 병행하여 시행하고 있다(표 I-라-2).

[표. I -라-2] 오염퇴적물 자연정화방법 사전고려사항

사전고려사항	평가방법
자연정화·복원 주변지역에 대한 육상 및 개발 가능성	사회경제학적 조사/평가
오염퇴적물이 장시간 자연정화 시 미치는 주변지역의 영향	
오염퇴적물 해역으로의 오염원 유입 가능성	오염유입원 조사/평가
시간에 따른 자연정화가 해역의 오염퇴적물을 정화시키는 속도와 범위에 대한 타당성	퇴적환경조사/평가 (물리, 지질학적 평가)
오염퇴적물의 지지기반 움직임	
오염퇴적물의 재부유 및 침식 가능성	
오염퇴적물내의 생화학적 분해 정도	퇴적환경조사/평가 (생화학적 평가)
오염퇴적물 내 주요오염인자의 농도 정도 및 생물학적 축적 가능성	

## ② 특성

- 자연정화방법의 최대 장점은 환경변화에 민감한 생태계에 큰 변화 없이 시행이 가능하다는데 있다. 현장처리방법이나 준설 등은 최대한 2차 오염을 방지하는데 노력을 기울여도 어느 정도는 역효과가 발생할 가능성이 있기 때문에 생태계 그 자체의 정화능력을 통하여 오염된 퇴적물을 복원하는 것은 큰 의미가 있다. 그러나 관리자의 입장에서 자연정화 방법은 자연정화능력에 힘입어 이루어지기 때문에 저예산으로 시행이 가능할 수 있다는 오해가 가능하다. 그러나 시행 그 자체에 따른 비용은 매우 적으나 사전조사와 지속적인 모니터링에 많은 예산이 투입되어야 하기 때문에 반드시 저예산으로 실행이 가능하지는 않다는 것은 주지의 사실이다. 또한, 사업 시행을 위한 건설물이나 인프라 구축이 필요하지 않다는 것이다. 그에 따라 오염퇴적물 정화에 필요한 준설선이나 오염퇴적물 운반선 등이 필요하지 않아 해역의 자연적인 이용 및 관리에 친환경적으로 적용이 가능하다. 그러나 해양환경모니터링을 위한 무인자동화 측정시설이나 모니터링을 위한 해양조사선의 활동은 불가피하기 때문에 완전한 자연정화방법은 현실적으로 어렵다. 그러나 다른 오염정화활동과 비교하여 상대적으로 인위적인 관리가 덜하기 때문에 육상에서의 오염유입원이 완전하게 차단되고 해역의 정화능력이 뒷받침된다면 자연정화방법이 가장 환경친화적으로 활용될 수 있다.
- 자연정화방법의 단점은 해역의 자연정화능력이 항상 일정하지 않고 외부의 인위적 혹은 자연적인 요소로 인하여 정화능력이 현저히 떨어지고 오염퇴적물의 확산이 일어날 가능성이 있다는 것이다. 일차적으로 자연정화방법을 선택하게 될 때 오염된 퇴적층의 침식이나 운반이 매우 적은 상황에서 시행하게 되는데 강한 자연적인 원인 (태풍이나 자연적인 침식활동 등)이나 예측 불가능한 인위적인 요소가 개연하게 될 경우 안정적으로 퇴적되어 있는 오염물질이 이동하거나 확산되어 자연정화 기작이 불안정화할 수 있다. 또한 자연정화방법은 표면피복이나 준설과 같은 정화·복원 방법에 비해 그 효과가 매우 더디게 나타나게 되기 때문에 정화·복원 효과에 대해 단기적으로는 불확실성이 높아지게 된다. 실제 많은 사전조사와 데이터를 바탕으로 자연정화능력에 대해 시뮬레이션을 시행하

게 될 경우 자연정화능력수치 (flux rate of natural recovery)를 산정하는데 어려움이 많다. 예측된 정화능력수치보다 정화기간이 길어지고 빠른 정화·복원 결과를 도출할 필요가 있는 지역이나 사회적인 조건이 평가에 영향을 미칠 경우 장기간동안 자연정화방법을 지속할 당위성이 떨어지게 되고 실패할 가능성이 높아지게 된다. 따라서 자연정화방법을 시행할 경우에는 과학적인 요소뿐만 아니라 사회경제학적인 요소까지 반영한 다양한 변수에 대해 세밀하고 체계적인 예측모델링의 수립이 필수적이다.

### ③ 평가방법

- 자연정화방법의 평가 즉, “지정된 해역에서 오염된 퇴적층이 자연정화방법을 선택할 경우 정화·복원 될 것인가?” 하는 질문에 답을 해야 하는데 이를 위해서는 자연정화의 기작뿐만 아니라 지역의 특성 및 다양한 환경의 예측모델링 결과에 크게 좌우된다. 다른 정화방법의 선택 및 평가와 같이 자연정화방법의 평가를 위해서 계절별 그리고 다년간의 주변 육상, 해양 및 퇴적환경에 대한 자료축적이 중요하며 이를 바탕으로 오염퇴적물이 자연적으로 분해과정을 거치며 해양생태계에 미치는 영향을 시간과 공간 개념을 도입하여 정확하게 파악되어야 한다.
- 이와 같은 지역적, 생지화학적 특성을 파악하고 다양한 변수에 대하여 모델을 구축한 후 예측가능한 자연정화방법의 장단점을 파악하여 평가한다. 이러한 사전평가를 기초로 기타 다양한 정화·복원 방법의 사전평가와 비교하여 비용적, 환경적 및 정책적인 측면에서 우위에 있다고 판단될 경우 관련기관의 전문가와 지역의 이해당사자들과 충분한 논의를 거쳐 시행하는 것이 바람직하다(표 I-라-3).

[표. I-라-3] 자연정화방법 평가에 요구되는 주요 고려사항

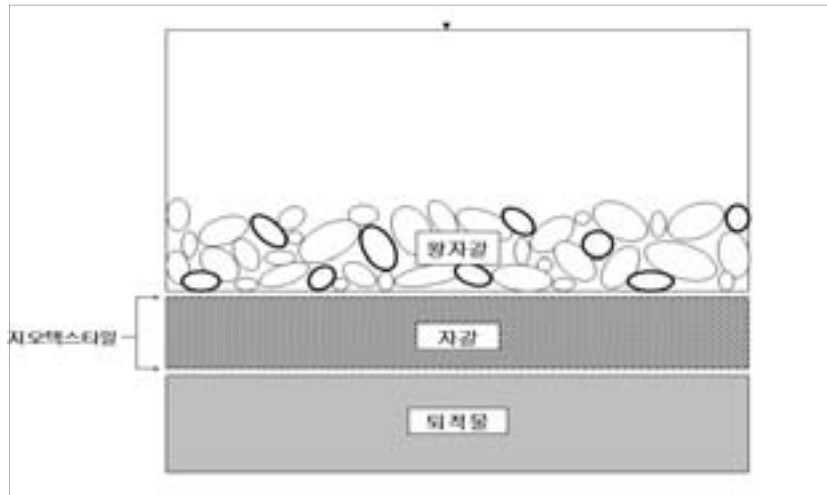
주요 고려 사항
오염유입원의 종류 및 특성
퇴적물의 지질학적 특성 (Bed Mapping 등)
해역의 현재 및 과거 오염물질의 분포
퇴적물의 침식, 운반 및 생화학적 분해작용 특성
해역의 수심 및 물리학적 특성
자연적인 고에너지 상태(태풍 등)에서의 퇴적물 부유물질의 확산 특성
과거 인위적인 영향에 따른 퇴적물의 이동 혹은 주변생태계 영향 특성

- 이상과 같이 육상오염원이 완벽하게 제어되고 안정된 퇴적층 환경과 생화학적 분해 가능성이 매우 높은 지역일 경우에는 자연정화방법이 비용대효과면에서 오염된 퇴적물을 정화·복원하기 위한 주요한 방법 중의 하나이다. 그러나 인구밀집이 높은 연안지역의 경우 인위적인 많은 변수가 작용하기 때문에 한 지역에서 하나의 정화·복원 방법으로 오염된 퇴적물을 완벽하게 정화·복원 하는 것은 어렵다. 따라서 다양한 인위적인 정화·복원 방법을 병행하여 시행하는 것을 현대의 적절한 오염퇴적물 정화·복원 사업설계의 기본이라고 할 수 있다.

## (나) 현장피복방법 (In-Situ Capping)

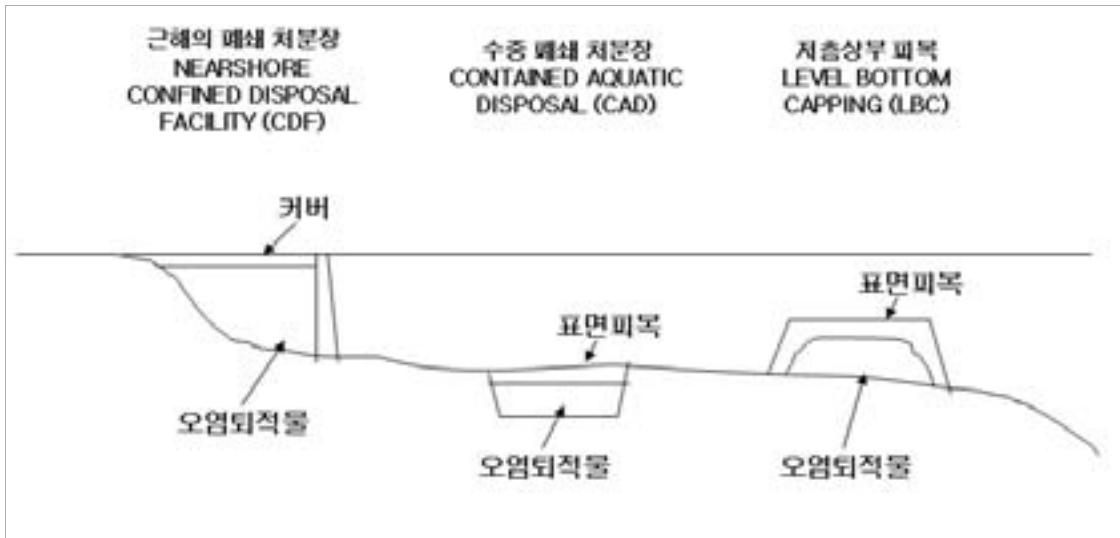
### ① 개요

- 자연정화가 불가능한 경우, 선택할 수 있는 처리공법으로는 오염퇴적물을 제거하지 않고 현장에서 직접 처리하는 방법 (고정화/안정화, 표면피복, 주위와 차단 또는 봉입)과 제거 후 처리하는 방법으로 크게 구분되는데 표면피복은 수저의 오염된 지역만 정밀하게 피복하여 피복물질을 수저에 잔류시키는 방법과 피복물질이 수상으로 노출될 만큼 다량의 피복물질을 투입하는 방법이 있는데 앞의 경우에 모래, 자갈, 지오텍스타일, 지오그리드 등의 다양한 피복재가 이용될 수 있다 (그림 I-라-2).



[그림. I-라-2] 표면피복방법 디자인 사례

- 오염퇴적물이 주위에 미치는 악영향을 차단하기 위해 오염물질의 종류와 차단지역의 안정성에 따라 금속 쉬트, 흙벽, 자갈 (흙 혼합)벽 등을 삽입 및 설치하는 방법이 사용될 수 있으며 그 외 다양한 방법이 있다.
- 표면피복방법은 오염된 퇴적물을 수계에서 고립화 시키는 목적으로 사용되는데 퇴적물의 종류, 오염도 및 주변환경에 따라 다양한 피복물질을 사용하게 된다. 대표적으로는 깨끗한 퇴적층, 모래 혹은 자갈을 사용하며 좀 더 발전된 형태로는 Geotextile 등 다양한 성분의 물질을 피복재로서 사용하고 있다. 피복물질의 종류와 방법 등은 다음과 같은 기본조건을 고려하여 결정한다.
- 오염퇴적물에서의 유해한 생물 혹은 화학성분이 수층으로 용해되거나 이동하지 못하기 물리적인 고립이 가능한 여부
- 오염퇴적물이 표면피복방법을 선택하여 고립화 시킨 후 퇴적물의 이동 혹은 침식 여부



[그림. I-라-3] 표면피복방법의 대표적인 사례

- 오염퇴적물의 형상과 위치에 따른 표면피복방법의 다양한 사례를 보여주고 있는데 해안가가 아닌 경우에는 대부분 오염된 퇴적물을 저층 표면 아래에 위치시키고 그 위에 표면피복물질로 고립화 시키는 방법이 대표적이다. 이와 같은 경우 다른 방법에 비해 표면피복물질이나 오염퇴적물의 침식 혹은 이동이 제한되기 때문에 보다 효과적인 오염퇴적물의 고립효과를 보일 수 있다.
- 미국 북서부 지역 등의 수퍼펀드 지역 중 약 15개소에서 독립적으로 표면피복방법을 사용하여 오염퇴적물을 정화하고 있으며, 기타 지역에서도 자연정화방법 및 준설방법 등과 병행하여 오염된 퇴적물을 관리하고 있다. 그러나 표면피복방법을 사용하는 것은 연안지역 저층의 퇴적층의 움직임이나 육상에서 운반 혹은 침식된 부유물질이 저층에 퇴적되는 환경영향을 정확히 파악해서 표면피복 후 발생할 수 있는 오염물질의 확산을 최소화시키는 방안 마련이 필수적이다. 미국에서 표면피복방법의 연구와 사례는 미국 환경청의 Assessment and Remediation of Contaminated Sediment (ARCS) Program Guidance for In-Situ Subaqueous Capping of Contaminated Sediments (U.S. EPA 1998d)와 Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program Remediation Guidance Document (U.S. EPA 1994d) 등에 잘 나타나 있는데, 표면피복방법 선택을 위한 필수조건을 다음과 같이 강조하고 있다.
  - 표면피복방법에 사용될 표면피복물질의 종류와 특징
  - 표면피복방법을 사용하기에 필요한 인프라 종류
  - 표면피복물질을 오염퇴적물 위에 설치하기에 적합한 수심 정도
  - 표면피복방법을 사용하는 해역의 생지화학적 특성
  - 자연 혹은 인위적인 사고로 인하여 발생할 수 있는 표면피복물질의 손실 가능성
  - 장기간 표면피복물질의 이동이나 침식 가능성
  - 표면피복물질을 통해 자연적으로 배출 혹은 운반될 수 있는 오염퇴적물의 변화

## ② 특성

- 현장피복방법의 가장 큰 장점은 자연정화방법이나 준설 등에 비해 상대적으로 빠른 시일 안에 오염된 퇴적물을 해양환경에서 고립화시킬 수 있다는 것이다. 또한 오염퇴적물의 처리, 운반에 필요한 인프라 시설이 필요하지 않기 때문에 비용적인 측면에서도 매우 유리한 것으로 알려져 있다. 특히 준설방법을 시행할 경우 준설오염물질의 수분을 제거하

고 처리하기 위한 육상처리시설이 필요하게 되는데 현장피복방법을 사용할 경우 이러한 육상처리시설을 최소화할 수 있고 준설퇴적물 처리에 불가피한 악취나 지하수 오염 등 이차오염 방지를 최소화할 수 있기 때문에 지역에서의 반감도 최소화 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 깨끗한 퇴적층으로 오염퇴적층을 분리시키기 때문에 깨끗한 퇴적층 위에 새로운 해양생태계 조성이 가능해지고 이에 따른 자연정화능력이 증가하게 되어 자연스럽게 해양퇴적층의 생태계 복원이 가능해지는 장점을 가지고 있다. 그러나 표면피복방법의 가장 큰 단점으로 지적되는 것은 해양퇴적층에 여전히 오염퇴적물질이 존재한다는 것이다. 예기치 않은 인위적인 사고 혹은 자연적인 재해에 의해 표면피복물질이 손상받을 수 있고 이에 따라 오염물질이 해양생태계에 유출될 경우 많은 비용을 투자한 표면피복공법이 수포로 돌아갈 수 있기 때문이다. 또 다른 단점은 표면피복물질로 사용된 퇴적층이 원래의 해양저층환경과 조화를 이루지 못하여 오히려 해양생태계에 악영향을 미칠 가능성이 있다는 것이다. 기존 퇴적환경과 전혀 다른 퇴적층이 인위적으로 생성되기 때문에 이로 인하여 저층의 해양생태계에 교란이 일어날 수 있고 이에 따른 환경오염이 발생할 가능성이 있기 때문이다. 따라서 표면피복방법을 오염퇴적물의 정화·복원 방법으로 선택할 경우 기존의 해양퇴적층의 생지화학적 환경조사를 세밀하고 체계적으로 사전 조사가 이루어져야 하며 사업시행 전·후에 지속적인 해양환경모니터링을 통하여 환경영향평가가 수행되어야 한다<sup>17)</sup>.

○ 표면피복방법 사업 시행 시 주요 고려사항은 다음과 같다.

- 표면피복방법의 주요요소에 대한 이해: 물리적인 고립, 안정화 및 오염물질 이동제거
- 표면피복물질의 선택은 오염퇴적물의 재부유, 용해 혹은 이동하지 않을 상황을 고려하여 선택
- 육상오염유입원이 제어되어 방법 시행 후 퇴적층이 재오염될 가능성이 낮은 지역
- 표면피복물질방법은 수심이 얇고 퇴적환경의 경사가 적으며 저층유동이 적은 지역에 적합
- 해역의 주요이용 용도가 선박의 왕래가 적고 비교적 인위적인 사고 가능성이 적은 지역에 적합
- 해양저층환경에 대하여 과거 생지화학적 자료가 풍부하여 사업시행 후 미래예측모델링 수립이 가능 여부
- 풍부한 경험의 해양토목공사 경험이 많은 시행사 선택 가능성 여부
- 사업 시행 전후 해양환경모니터링이 지속적으로 가능한지의 여부
- 주기적으로 표면피복물질의 사후관리 가능 여부

### ③ 표면피복방법의 기능적요소

○ 표면피복방법은 세 가지 주요한 기능을 위해 디자인 되었다. 이 세 가지 기능은 물리적 고립, 안정화/침식방지, 그리고 화학적 고립이다. 몇몇 경우에서, 다수의 층에 있는 서로 다른 물질들이 예의 기능들을 만족시키기 위해 사용되기도 하고, 어떤 때는 한 개의 층에서 여러 가지 기능을 수행 할 수도 있다.

### ㉞ 물리적 고립

○ 표면피복방법은 해양 환경이 오염된 침적물에 노출된 정도를 감소시킬 수 있는 수준이

17) U.S. EPA. 1998. Assessment and Remediation of Contaminated Sediments (ARCS) Program Guidance for In-Situ Subaqueous Capping of Contaminated Sediments.



되어야 한다. 또한 표면피복방법의 물리적 고립은 표면피복방법 물질들의 고화도 고려해야 한다. 장기간의 보호를 제공하기 위해서, 표면피복방법은 오염된 침전물로부터 유기화합물을 충분히 분리시킬 수 있을 정도로 두꺼워야 한다. 여기에는 두 가지 목적이 있다. 1) 유기화합물이 오염물질로부터 노출된 부위를 줄이기 위해서, 2) 저서생물이 침적된 오염물을 표면으로 이동시키는 능력을 저하시키기 위해서이다. 두 번째 목표를 구성하기 위해서는, 효과적인 혼합층의 깊이와 침적물의 윤탁과 연관 되어진 유기물의 밀도를 고려해서 표면피복방법의 두께를 결정해야 한다. 특히 해양 환경에서는, 저서생물의 군체 형성 잠재력에 의해 표면피복방법의 두께가 결정될 여지가 크다. 군체 형성이나 표면피복방법이 저서생물에 의해 방해되는 것을 예방하는 것은 표면피복방법의 디자인에 고려될 수 있으며, 생물학적 모니터링 개발에도 관계가 있다. 관리자는 표면피복방법을 디자인 할 때 고화에 대해서 고려해야 한다. 세밀한 특징을 가지는 표면피복물질이 고화 될 수 있는 것은 그들의 무게 때문이다. 고화될 수 있는 양이 한정되어 있기 때문에 그에 따라서 표면피복방법의 최소한의 두께를 알 수 있다. 고화에 대한 평가는 침식에 반대되는 의미로 표면피복방법 표층 깊이 또는 고화에 의한 표면피복방법 두께에 대한 차별화된 모니터링 데이터를 이해하는데 있어서 중요하다.

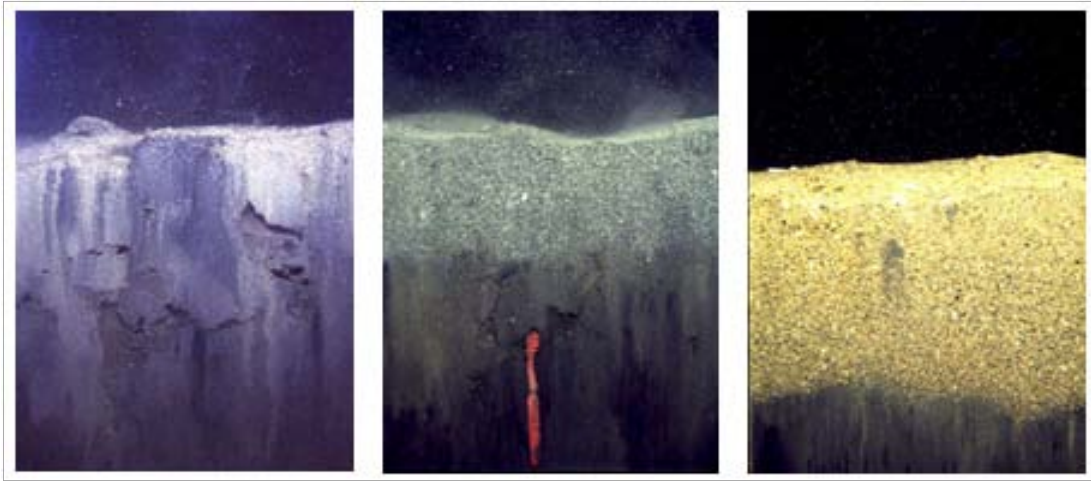
#### ㉞ 안정화 및 침식방지

- 표면피복방법의 이 기능은 오염된 침적물과 표면피복방법 그 자체를 표면 피복된 장소에서 중지되어지거나 이동되어지는 것으로부터 안정화하기 위해 고려되어야 한다. 일반적으로 침식의 가능성은 강, 조수, 파도에 의해 야기된 흐름, 선박에 의해 발생한 난류, 그리고 극소한 크기의 침적물 영역, 광물학과 저층바닥 용적 밀도(*bed bulk density*)에 의해 적용된 침식작용의 크기에 기반 한다. 지진의 간섭에 의한 가능성도 있으며, 특히 오염된 침적물 과/또는 표면피복 물질을 침식시키는 작용을 최소화하고자 설계되어야 한다. 침식 보호의 디자인의 특징은 표면피복의 크기와 대상지역에서 측정된 극심한 침식력이 일어날 확률로 결정되며, 일반적으로 표면피복방법은 백년에 한번 발생할 힘에 대해서도 견딜 수 있도록 디자인 되어야 한다. 다른 고려해야 할 점으로는 특히 고농도의 유기화합물로 구성된 오염된 침적물을 표면피복 내부에서 혐기성 분해가 발생함으로 위험한 가스가 생길 가능성이 있다는 것이다. 특히 약한 삼투를 할 수 있는 물질로 만들어진 표면 피복 침적물에서 가스 발생은 현격한 상승 힘들과 표면피복물질 위에서 물리적 안정성의 위험이 발생 할 수 있기 때문에 지속적인 모니터링을 통하여 점검해야 한다.

#### ㉞ 화학적 고립

- 표면피복방법이 물리적 고립에 맞게 디자인 되었다면, 이동하는 오염물과 함께하는 작은 입자로 된 침적물의 이동 역시 통제되어야 한다. 오랜 시간에 걸쳐 분자 확산에 의해 오염물이 이류에 의해 용해되어 발생하는 수직 이동은 가능하나 초기 표면피복방법 디자인 선택에서는 화학적 고립에 관하여 숙고한 후 디자인이 되어야 한다. 표면피복물질의 수압 전도성, 오염된 침적물, 밑에 있는 깨끗한 침적물과 기반암을 포함시켜야 한다. 그와 같은 조건들은 표면피복 디자인에서 신중하게 고려되어야 한다. 오염된 침적물에 고속으로 흐르는 지하수는 용납되어서는 안 될 노출을 야기할 수도 있다. 이 부분에 대해서, 추가적인 보호 대책 없이 표면피복을 하는 것은 효과적인 개선책이 안 될 수도 있다.
- 표면피복을 해야 할 일부 지역에서 non-aqueous phase liquids(NAPL)가 나타나면, 잠재적인 오염물의 이동 과정을 신중하게 고려해야 한다. NAPL은 피복물질의 압밀작용에 따라 또는 지하수로의 유출에 따라 외부수역으로 이동 될 수도 있다. 필드 샘플링과 실험실 규모 테스트를 통해 이러한 테스트를 할 수 있도록 설계 되어야 하며 전통적인 표면피복 설계가 별로 영향을 미치지 못하는 상황에서는 피복 설계를 위해 불침투성의 물질 또는

반응이 좋은 물질을 고려해 볼 수 있다.

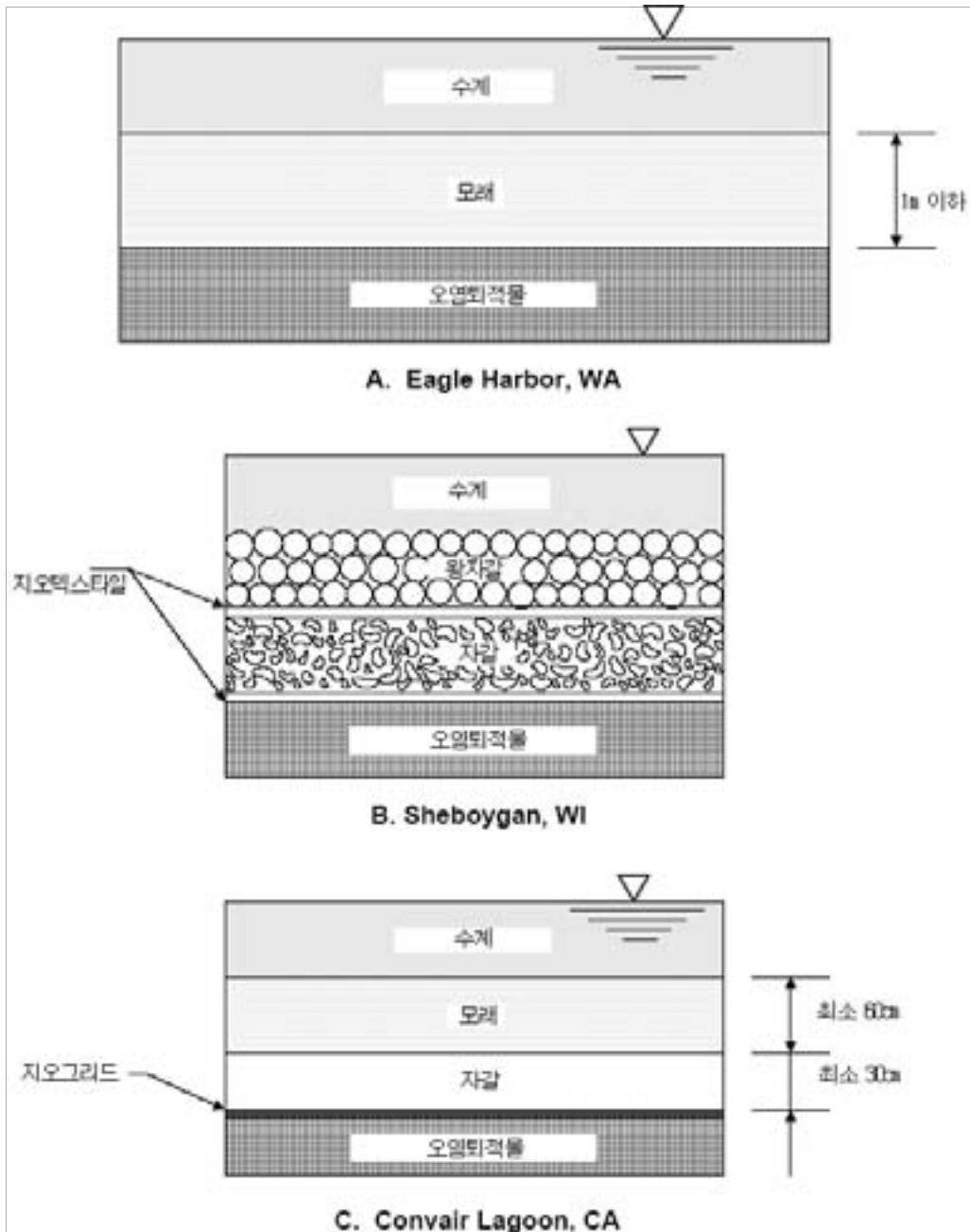


[그림. I-라-4. 실험실에서 표면피복방법의 형성과정 실험 사례]

- 실험실 테스트는 구체적인 침적물의 확산과 화학적 분배 계수를 계산할 수 있다. 몇 가지 수치 모델들은 피복물질로 들어가거나 통하는 이류와 확산 과정에 기반하는 오염물의 장기간의 움직임 예측 가능하게 해준다. 모델들은 영역을 달리하는 표면피복물질들의 다양한 두께에 대한 영향성을 평가할 수 있다. 침적물, 전체 침적물의 공극수 농도 그리고 시간에 따른 피복물질의 침식을 포함한 모델에 의해 결과를 도출한다.

#### ㉔ 표면피복물질의 선택

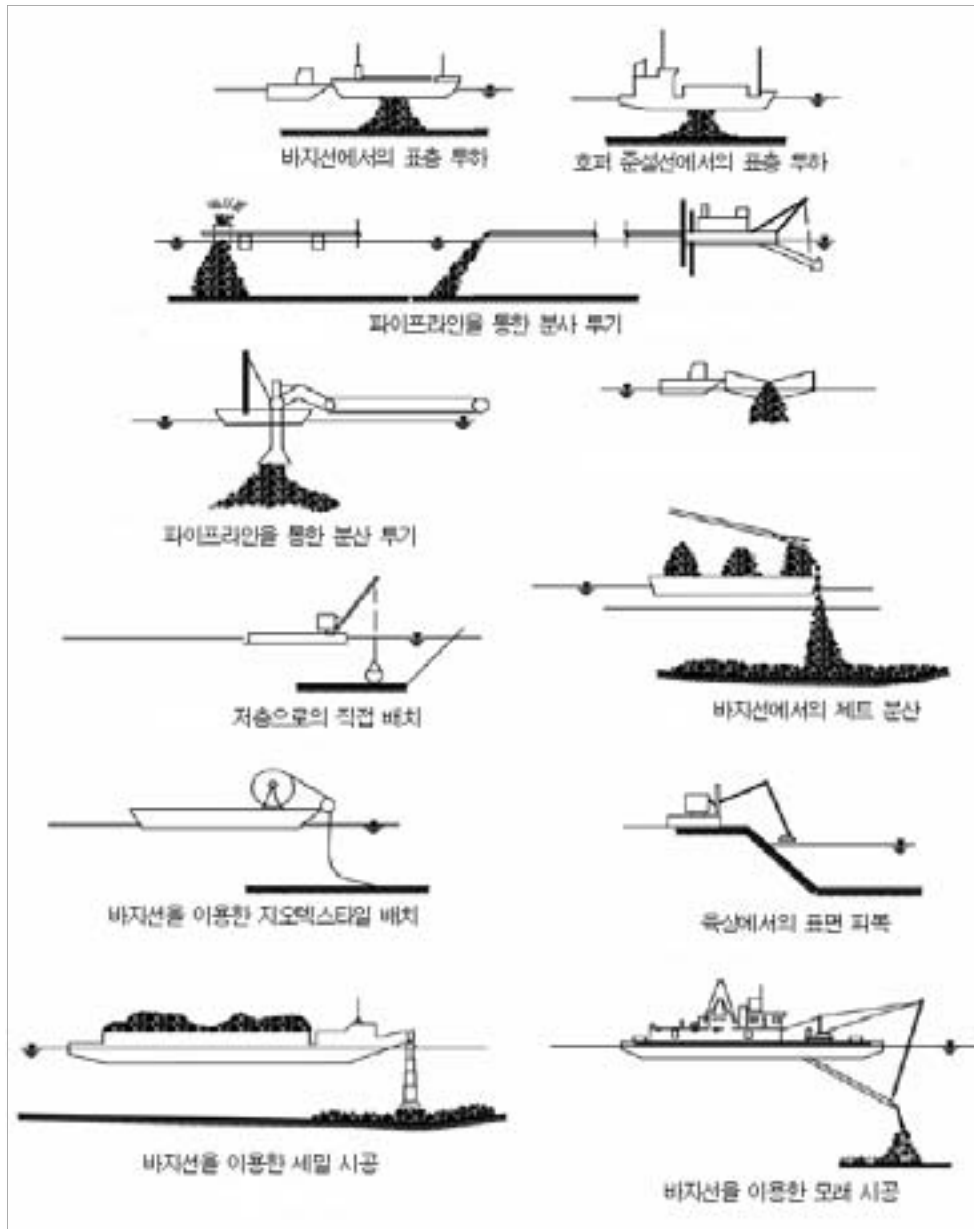
- 표면피복은 일반적으로 깨끗한 조립질 퇴적물로 구성되어 있다. 관리자는 예상된 생물교란 효과, 고화, 침식, 그리고 연관되어진 다른 길고 짧은 노출 과정, 오염물과 연관되어진 위험도 등을 고려해야 한다. 예를 들어 표면피복방법의 침식 가능성이 크다면 보호의 정도는 표면 피복의 두께를 증가 시킨다던가 아니면 표면 피복이 침식에 더 강한 내성을 갖출 수 있도록 표면 피복 구성 물질을 더 큰 알갱이로 쓰거나 또는 방호물질로서 사용할 수 있을 것이다. 다공질 토목섬유는 오염물의 고립에 기여하지 않으나 표면 피복 물질과 함께 아래 깔려진 침적물이 혼합되거나 이동되어지는 것을 감소시킬 수 있다. 표면 피복은 공정된 모래 위에 자연적으로 생긴 모래로 구성되는 것이 일반적이다. 그 이유는 표면 피복 방법을 통한 오염물의 이동 봉쇄를 자연적인 모래에 포함된 양호한 결정과 유기탄소가 화학적 고립을 더 효과적으로 해주기 때문이다.
- 특수화된 물질들은 화학적 고립 용적을 향상시키거나, 모래 표면 피복에 비교해서 표면 피복의 두께를 감소시키는데 사용할 수 있다. 예로 가공된 점토 물질, carbon, apatite, coke, organoclay, zero-valent iron 그리고 zeolite 와 같은 물질들이 있으며 합성 토목섬유는 예의 물질들 중 한 가지 이상 포함되는 것이 일반화 되고 있다.



[그림. I-라-5] 표면피복방법의 다양한 디자인 사례

#### ④ 표면피복의 배치방법

- 세립질 표면피복물질, 지오텍스타일 및 기타 보호물질 등 다양한 장비 타입과 배치 방법이 표면피복에 사용되어 왔다. 중요한 고려사항 배치방법의 선택의 중요한 고려사항은 표면피복물질의 정확한 배치의 필요성이 포함되어 있다. 표면피복물질의 층들을 점진적으로 쌓이도록 만들어 주는 것이 바닥에 깔려 있는 오염된 침전물을 바꾸어 놓거나 혼합하는 것을 감소시키는데 중요한 배치과정이다.



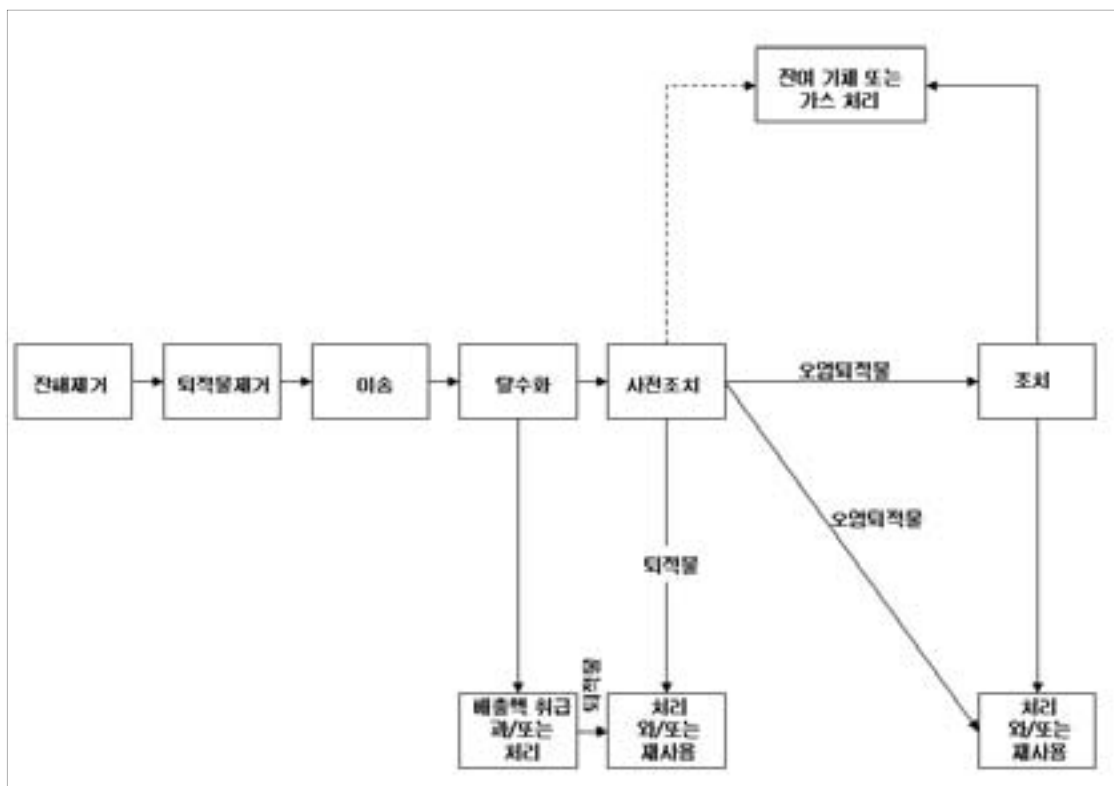
[그림. I-라-6] 표면피복방법의 다양한 방법 사례

- 세립질 표면피복물질은 몇 가지 방법으로 조정되고 위치할 수 있다. 기계적 방법으로 표면피복물질을 해저에 설치 할 때 중력에 의지하며, 그들이 적용할 수 있는 깊이에 제한을 받는다. 세립질 물질은 또한 액체상태로 표면피복방법에 사용될 수 있는데 수층 표면이나 수중에 파이프를 이용해서 해저에 방출할 수 있는 곳에서 이러한 액체상태의 방법들은 오염퇴적물의 재부유를 방지하면서 정확한 배치 가능성을 제공한다. 보호용 물질을 표면피복방법에 사용하는 것은 바지선이나 해안선에서 전통적인 장비인 크랩셀 혹은 특수한 장치를 이용해 설치할 수 있다. 설치하는데 필요한 장비의 종류 예는 그림 I-라-6에서 볼 수 있다.
- 침전물 재부유와 표면피복 설치시 오염물 방출을 관찰하는 것은 중요하다. 표면피복설치는 오염된 침전물을 재부유시킬 수 있다. 오염물 역시 압밀 작용 또는 표면피복 설치시 바닥에 깔린 침전물의 혼란으로 인해 수괴에 유입될 수 있다. 표면피복물질을 천천히 그리고 균일하게 적용시키면 침전물 파괴와 재부유의 양을 최소화 할 수 있다. 그러므로 설계 계획에 최소화 계획과 건설 중·후에 지속적으로 관찰 하는 것을 계획해야 한다.

## (다) 준설방법 (Dredging)

### ① 개요

- 많은 오염퇴적물의 처리방법이 있지만 오염퇴적물을 근본적으로 수저에서 제거한다는 점에서 준설을 통한 퇴적물 제거가 지금까지는 가장 기본적인 처리방법이라 할 수 있다. 수로유지, 레저시설의 수심유지 등과 같은 일반퇴적물의 준설과는 달리 최근 주요 논의되고 있는 환경준설(Environmental Dredging) 즉, 오염퇴적물의 준설에 있어 특별히 고려해야 할 점은 오염퇴적물의 재부유와 수반된 오염물질 누출의 최소화 및 제거작업의 정확성이 더욱 요구된다는 사실이다. 특히 오염퇴적물의 준설은 오염된 퇴적물질을 해양환경에서 제거하여 대상해역의 오염도를 저감시키고 준설된 오염물질을 수분제거부터 시작된 처리 과정을 거쳐 후처리하는 것이 매우 중요하다.
- 준설과정의 일반적인 처리과정 사례를 보여주고 있는데 간단한 준설공법의 경우에는 2~3가지의 처리과정을 거쳐 준설오염물질이 처리되는 반면 복잡한 공법의 경우에는 위의 모든 과정으로 처리되기 때문에 관리자의 입장에서 이러한 처리과정에 대한 이해와 개념 정립이 필요하다. 오염퇴적물의 준설방법 선택은 미국에서 수행되는 수퍼펀드 지역에서 대부분 시행되고 있는데 지역적, 사회경제적 및 환경적 특성에 따라 앞서 소개된 자연정화방법이나 표면피복방법과 병행하여 오염퇴적물 정화·복원 사업을 시행하고 있다. 국내에서 1988년 이후 마산만을 시작으로 수행되고 있는 오염퇴적물 정화·복원 사업에서 주로 사용되고 있는 방법이다. 특히 준설방법이 선택되는 경우에는 관리대상 오염물질의 영향이 해양생태계나 주변지역에 미치는 영향이 크고 단기간 내에 정화·복원이 필요한 경우 시행되고 있다.



[그림. I-라-7] 준설과정의 일반적인 처리과정

### ② 특성

- 해양오염퇴적물을 정화 혹은 제거하는데 있어 준설방법을 선택했을 때의 가장 큰 장점은

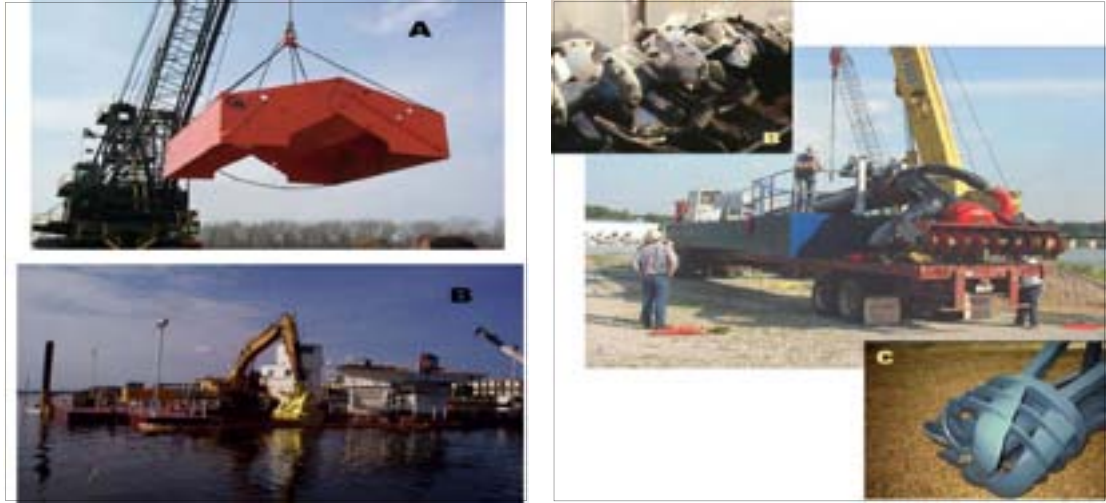
무엇보다 오염퇴적물을 대상 환경 내에서 제거가 가능하다는 것이다. 이러한 장점은 오염퇴적물이 장기간적으로 해양생태계에 미치는 영향이 크거나 혹은 예측하는데 어려움이 많을 경우 수행되는데 준설 후 단기간 내에 해양환경에 미치는 효과가 크기 때문에 많은 경우 우선적으로 선택되어 시행된다. 그러나 준설방법을 시행할 경우 준설된 퇴적물질을 후처리해야 하기 때문에 전체적인 비용은 자연정화방법이나 표면피복방법에 비해 높다. 특히 준설된 오염물질을 환경안정수치에 근접시키기 위해서는 수배에서 수십배의 추가비용 부담이 들기 때문에 비용대 효과를 고려하여 처리하는 체계적인 관리가 필요하다. 또한 준설방법이 현대화되고 그와 관련된 경험과 다양한 연구가 진행되고 있지만 준설 및 운반 등에 따른 이차오염을 완벽하게 관리하기 어렵기 때문에 준설에 따른 환경피해는 준설방법 선택에 있어서 간과하지 못할 단점으로 지적받고 있다. 이와 같이 준설방법에 대해서는 다양한 장단점이 나타나고 있으나 해양환경이나 퇴적층의 생지화학적 특성 등에 대하여 사전조사 및 영향평가가 부족할 경우 비교적 용이한 방법으로 오염된 퇴적물을 현장에서 제거하는 것을 시각적으로 인지하고 단기적으로 대상 해역의 오염도가 감소하기 때문에 많은 국가와 지역에서 선택되어 수행되어 왔다.

### ③ 준설방법의 기술선택

- 준설방법은 크게 기계식, 유압식 방법으로 나뉘는데 기계식은 퇴적물에 직접적인 힘을 가하여 퇴적물을 제거한 후 떠내는 방법이고 유압식은 원심펌프를 이용하여 퇴적물을 흡입하는 방법으로 일반적으로 퇴적물 제거를 원활히 하기 위해서 흡입부에 커터헤드를 장착하고 있다. 기계식의 경우 밀폐형 버킷 (또는 크램셸)을 이용한다 하더라도 준설과정에서 상당량의 퇴적물이 재부유되기 때문에 오염퇴적물 제거에 이용되기 위해서는 사전에 치밀한 부유물 확산 방지책이 수반되어야 한다. 미국 및 캐나다의 경우 퇴적물의 재부유를 감소시킬 수 있다는 점에서 유압식준설방법이 많이 이용되고 있는데 최근에는 재부유를 저감하고 흡입퇴적물에 포함된 수분의 함량을 줄이기 위한 준설기술 개발에 주력하고 있다. 유압식의 경우 커터의 종류 및 운용방식에 따라 다양한 준설방법이 사용되고 있는데 유럽이나 일본에서는 유압식의 일종인 압축식 준설방법이 오염퇴적물 준설에 사용되고 있다. 압축식 준설방법은 준설물질의 흡입을 위해 원심력 대신 압축공기 또는 정수압을 이용한다는 차이점이 있으며 타 방법에 비해 준설 중 퇴적물 재부유가 상대적으로 적다는 장점이 있다. 표 I-라-4와 그림 I-라-8은 기계식 및 유압식 준설방법에 대한 비교와 운용사례를 나타낸 것이다.

[표. I-라-4] 준설방식의 장단점 비교

준설방식	장점	단점
기계식	퇴적물의 함수량과 관계없이 굴착 가능 고도의 준설 운용성 대부분의 고형물질 제거 가능	다량의 퇴적물 재부유 준설물질의 재처리 필요 유압식에 비해 높은 준설 비용
유압식	퇴적물의 재부유 적음 처리지역으로 직접 수송되기 때문에 재처리과정 단순 기계식 준설에 비해 낮은 준설비용	처리장으로 수송된 퇴적물에 함유된 수분 제거 과정 필요 수송관이 해양교통에 방해 고형물질의 완전한 제거어려움



[그림. I-라-8] 기계식 및 유압식 준설방법 사례

- 준설능력 및 기술에 따라 사전에 고려해야할 준설 대상지역의 환경 평가 및 특성을 위한 것으로 각각의 기술에 대하여 상대적으로 효율성이 높은 방법을 선택하는데 중요한 참고 자료로 활용될 수 있다<sup>18)</sup>. 그러나 지역적인 특성과 퇴적층의 환경에 따라 다양한 변수가 존재하기 때문에 더 많은 상황을 고려해야만 비용 및 효과적인 측면에서 성공적인 사업 수행이 이루어져야 한다. 또한 새로운 기술과 방법이 지속적으로 개발되기 때문에 신기술에 대한 이해와 효과검증이 병행되어야 보다 환경친화적인 방법의 선택이 가능하다.

[표. I-라-5] 준설방법의 특징 및 선택 고려사항

구분	기계식 준설		유압식 준설		
	클램셸	버킷	커터헤드	단순흡입	유압식
준설능력 (m <sup>3</sup> /h)	45~200		20~90		지역특성
수직정확도 (cm)	15	15	10	10	15
수평정확도 (cm)	10	10	10	10	10
준설깊이 (m)	N/A	N/A	15	15	45
퇴적물 재부유 가능성	고	고	중	저	저
퇴적물 유출 가능성	고	고	중	중	중
기동성 및 기기운반성	고	고	저	저	저
퇴적물 제거능력	고	고	저	저	중
상대적 제거 비용	저	저	고	고	중
외부환경에 따른 운용 유연성	고	고	고	저	저

18) U.S. Army Corps of Engineering, 1998. Guidance for Subaqueous Dredged Material Capping.

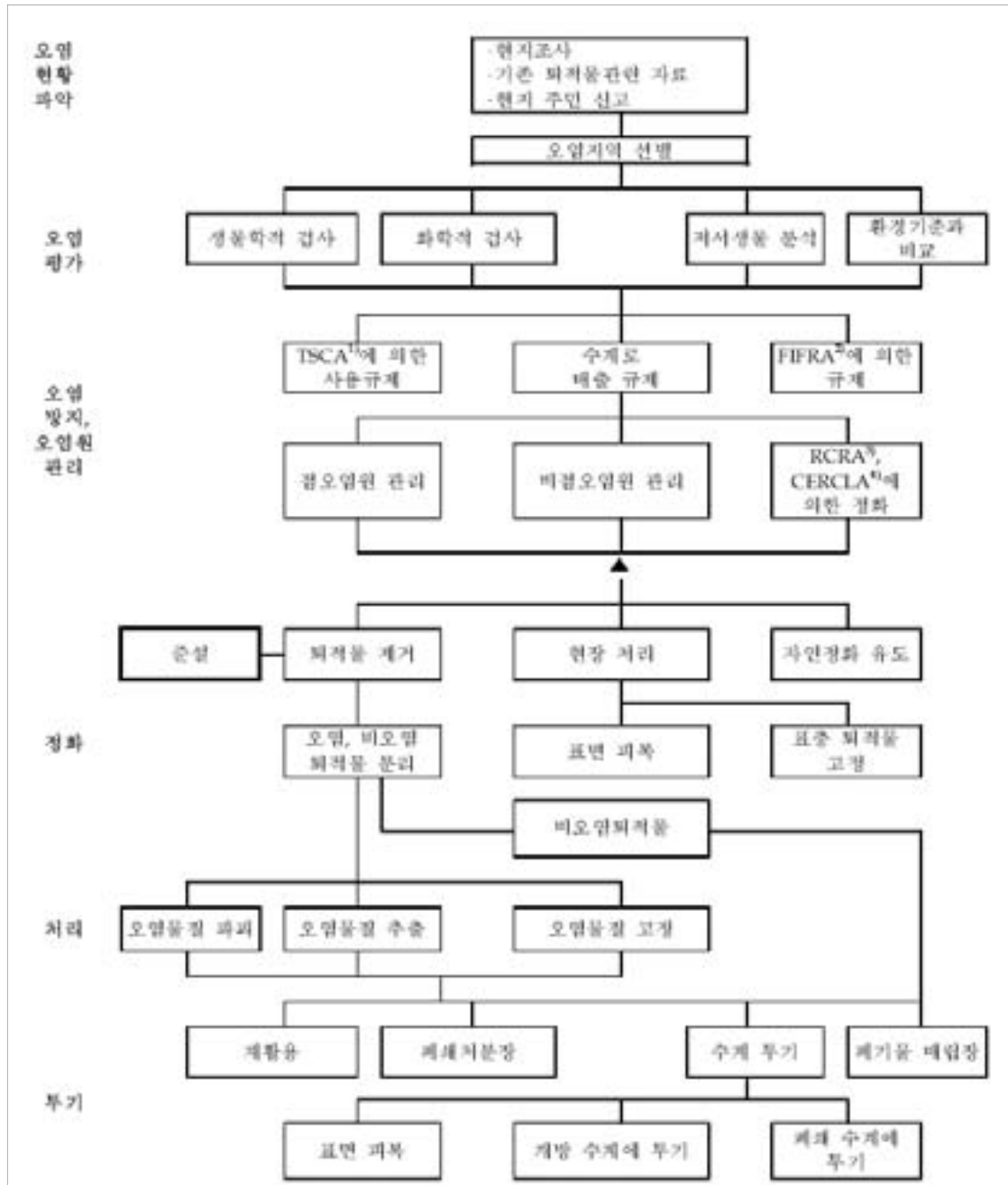
---

## (2) 해양오염퇴적물 정화공법 선진 사례 검토

### (가) 미국의 사례

- 미국에서는 1970년대 이후부터 오염퇴적물 문제가 지속적으로 제기되어 이에 대한 관리가 수행되었음에도 불구하고 큰 성과를 거두지 못했다는 자체 평가가 있었다. 이에 대한 근본적인 원인 중 하나로 지적된 것은 오염퇴적물의 평가가 기형어류 발생, 오염에 강한 종의 출현, 특정 저서생물 종의 사멸 등의 현상에만 의존하였기 때문에 생태계 및 국민건강에 미치는 악영향을 근거로 설정된 연방정부 차원의 퇴적물 평가기준이 부재하였다는 점이다.
- 실제로 퇴적물 오염평가를 위해 프로그램마다 다양한 방법들이 사용되어 왔는데 이는 퇴적물 오염은 수질오염의 경우와는 달리 같은 오염물질 농도라 하더라도 지역적인 특성, 퇴적물 특성, 생물에 의한 이용성 (Bioavailability) 등에 따라 실제 생물에 미치는 독성이 매우 달라지기 때문이다(그림 I-라-9) 현재 미국 환경보호청에서 개발한 오염퇴적물 관리 방법은 퇴적물 오염현황 파악을 위한 스크린 단계에서부터 최종적인 유해성 평가까지 각 단계마다 오염퇴적물 영향을 평가할 수 있는 다단계 검사구조 (Tiered Testing Structure)를 기본으로 한다. 이는 각 단계마다의 검사방법을 표준화해야 한다는 어려움은 있으나 일단 완성되면 지역적 특성 및 관리 목적에 따라 유연하게 적용할 수 있고 평가에 일관성을 유지할 수 있는 장점이 있다.





[그림. I-라-9] 미국 환경보호청의 오염퇴적물 관리구조

### ① Puget Sound

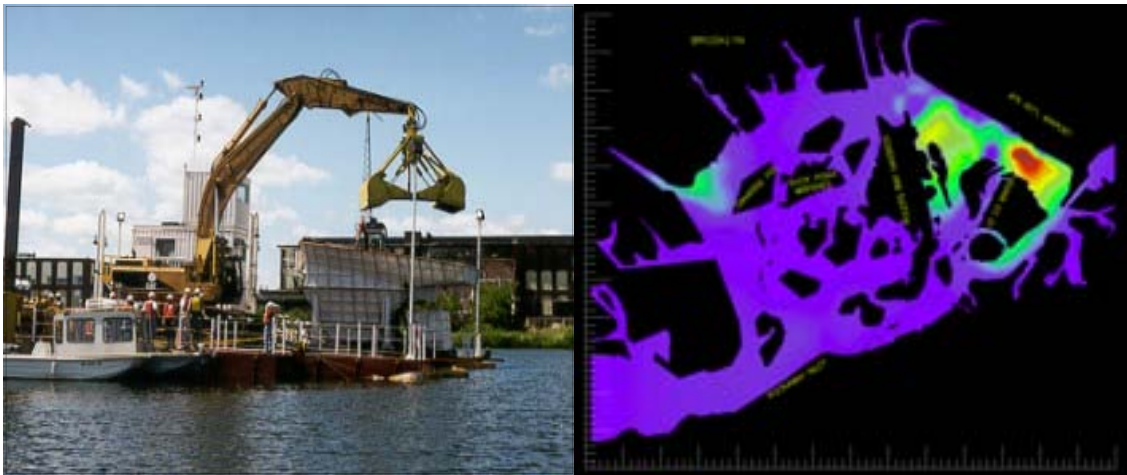
- 워싱턴주 콜롬비아강을 중심으로 펼쳐진 반폐쇄성 해역으로 주정부의 퇴적물관리기준을 바탕으로 1993~1999년 Puget Sound의 퇴적물오염현황조사 실시 후 현재 정화·복원사업이 진행 중에 있다. 대상지역을 총 93개 지역으로 세분화하여 각 지역의 특성 및 현황에 맞는 오염퇴적물 정화방법(자연정화방법 포함)을 선택하고 있으며, 각 세부지역은 0.2~266에이커에 달하는 다양한 면적을 가지고 있고 그에 따라 소요되는 예산도 최소 50만달러에서 최고 1,000만달러까지 책정하고 있다. 연방정부(EPA)의 기준설정방법이외에 생태영향 등 다양한 방법을 고려하여 오염퇴적물의 오염도를 평가하고 있으며, 준설퇴적물의 처리 및 투기와 관련된 비용의 지나친 증대를 고려하여 이와 관련된 지침을 폐지하거나 완화하여 현실적 대응 가능토록 조치하고 있다.

## ② New Bedford Harbor (Superfund Site)

- 메사추세츠주 반폐쇄성 Buzzards Bay 내에 위치한 상업항으로서 주변 공장지대에서부터 많은 양의 PCBs와 중금속 오염부하가 심한 지역으로 알려져 있다. 1970년대 후반부터 항만 주변 퇴적물뿐만 아니라 해양생태계에서 매우 높은 농도의 PCBs가 발견되어 오염우심해역으로 알려졌고 1980년대부터 오염퇴적물 제거를 위한 다양한 정화·복원사업이 시행되고 있다.
- 해양환경생태계조사를 통해 오염이 매우 심한 지역 (Hot Spot)과 그 외의 지역으로 구분하여 오염퇴적물의 정화·복원 우선순위 선정하여 정화·복원 사업을 시행하고 있으며 각각의 오염퇴적물 정화방법에 대하여 장단점 분석 및 소요예산을 산정하여 오염이 매우 심하고 선박운항을 위해 준설이 필요한 항로에 대해서는 오염퇴적물을 준설제거하고, 오염이 심하지 않은 지역은 피복을 덮어 복원하는 방법 등을 다각적 선택하고 있다.

## ③ New York-New Jersey Harbor

- 미국에서 가장 활동이 활발한 항구 중의 하나인 뉴욕-뉴저지항은 다양한 유기성 및 무기성물질에 의해 오염되어 있는 대표적인 지역이다. 특히 다이옥신, PCBs, PAHs 및 중금속에 의한 오염도는 매우 심각한 수준으로 알려져 항로개선을 위한 준설과 함께 오염퇴적물 제거준설 사업을 실시하고 있다.
- 특히 준설된 오염퇴적물의 해양투기는 금지되어 있기 때문에 [Dredged Material Management Plan]을 설정하여 오염도에 따라 분류하고 오염도가 높은 퇴적물은 폐쇄처리장에서 처리하고 기준 이하의 퇴적물은 벽돌이나 타일재료로 재활용하여 준설이후 퇴적물 처리의 좋은 사례를 보여주고 있다.



[그림. I-라-10] 미국 뉴욕항에서의 준설 모습 및 PCB 농도 측정 연구 결과

[표. I -라-6] 기타 지역에서의 해양오염퇴적물 정화·복원 사례

Site	지역	내용
NewPort Naval Education Center	로드아일랜드 해군기지	해군기지이용에 따른 유류, PCBs 및 중금속 등 오염 직접적인 악영향은 없으나 장기적 환경영향 주요 오염지역을 표면피복방식과 준설방식을 병행하여 정화작업 시행(2000~2006)
Cold Spring pier, Hudson River	뉴욕 허드슨강 하구	주변 배터리공장에서 배출되는 오폐수의 영향으로 중금속 (카드뮴, 아연, 니켈 등)오염 오염이 심각하고 연안해양생태계에 악영향을 미치는 지역은 일차적으로 준설을 통해 정화사업 시행(1995) 그 외의 지역은 장기적 감시와 정화사업 시행 (진행 중)
Lavaca Bay	텍사스주 라바카만	주변 공업지역으로부터의 유기합성화합물 (PAHs) 및 수은 오염 약 60km <sup>2</sup> 의 수은오염퇴적물 준설(1994) 오염도가 낮은 퇴적물은 자연정화방법을 사용하여 정화·복원 시행 (5-10년 주기의 장기간 환경모니터링 시행)
Bailey Waste Disposal Site	텍사스주 베일리 연안	연안도시지역 오폐수를 통해 중금속, 벤젠, 페놀 등 주요오염 관리대상 오염도가 심하지 않고 연안 안쪽에 위치하고 있어 오염퇴적물을 표면피복처리하여 정화·복원 사업시행(1996)
Commencement Bay	워싱턴주 Puget Sound 타코마시 연안항	약 1,400km <sup>2</sup> 의 오염퇴적물 준설하여 연안해역 저층과 육상에 매립(2000~2004) 세부적으로 4개 지역으로 구분하여 중금속(Cd, Cu, Pb)에 의해 오염도가 높은 지역은 준설하여 오염퇴적물 제거 기타 지역은 표면피복 혹은 자연정화 방법을 사용하여 오염퇴적물 정화·복원 사업 시행

(나) 일본의 사례

- 1990년대 말 오염퇴적물 제거, 감시, 공사방법, 처리와 관련된 [퇴적물 처리 및 처분 등에 관한 잠정지침] 제정하여 관리하고 있다 (표 I -라-7). [감시], [공사방법] 및 [보관 및 처리]에 관한 기본조건과 유의사항을 지침으로 제시하며 퇴적물의 특성, 해당 수역의 지형, 해역의 상태, 해류 특성 및 어업기간과 어류 현황 등의 지역적 특성을 감안하여 탄력적인 운용 권고하고 있다.
- 오염퇴적물 정화·복원 방법으로 자연정화, 현장처리 및 준설 등을 사용하여 오염퇴적물을 처리하며 특히 2차 오염 방지를 위하여 공사전후 철저한 모니터링을 통하여 관리하는 것이 특징이다. 주요관리대상 오염물질은 수은 및 PCB를 중점적으로 관리하여 대상 해역의 퇴적물의 유해물질 농도와 해역의 평균조차 및 용출률 등을 고려하여 결정하고 있으며 제거된 퇴적물 중 수은, 시안을 포함하고 관정기준에 부적합한 퇴적물은 콘크리트 고품화로 누출을 방지한 후 공용수역 및 지하수와 차단되는 장소에 매립하는 방법을 선택하고 있다.

[표. I -라-7] 일본의 오염퇴적물 정화·복원사업 주요지침

구분	내용
퇴적물 오염평가	화학적 오염도 평가: 퇴적물의 화학적 분석 (감열감량, COD, 황화물, PCB, 수은 등 유해물질) 생물학적 오염도 평가: PCB, 수은 등 특정유해물질에 대해서는 퇴적물에서의 용출량과 어업실태 등 반영
오염퇴적물 정화·복원	준설: 오염퇴적물 제거 현장처리: 표층퇴적물 고정, 표면피복 등
오염퇴적물 처분	오염물질 추출, 고정: 폐쇄처분장 이용 / 투기 / 매립 유해물질에 따라 적합한 처리/처분 방법 고려
2차 오염 방지	공사수역 외부에 미치는 영향 모니터링 악취, 유해물질 및 부유물질 모니터링 감시대상이 PCB일 경우 대기 중 PCB농도 모니터링 3개월 이상 장기간 공사가 진행될 경우 유해물질(수은, PCB 등)이 어패류에 미치는 영향조사
효과검증	퇴적물 제거 후 유해물질의 화학적 분석 등을 통하여 사후환경영향 관리 공사 후 식용어패류에 대한 오염평가

(다) 호주의 사례

- 준설에 의해 오염퇴적물을 정화·복원할 경우 다음 내용과 같은 사항에 대해 검증절차를 거친 후 시행하고 있다: 준설지역의 선정 - 준설지점의 선정 - 준설지역의 물리적 화학적 현황 - 퇴적물의 생화학적 분석결과 - 환경기준치와의 비교분석 - 준설 시행 중 및 사후 환경적 영향예측 - 장기적 환경모니터링 방법
- 준설과 관련된 운영지침(Best Practice Environmental Management Guidelines for Dredging)은 준설해역 수괴 및 생태계에 미치는 영향 등을 고려하여 다음과 같이 설정되어 있다.
  - 수괴에 미치는 영향: 오염퇴적물로 인해 주변수역에 미치는 화학, 생물학적 영향
  - 퇴적물의 물리, 화학, 지질적 구성
  - 퇴적물의 오염도 현황: 주요 관리대상 오염물질의 현황과악
  - 준설방법: 주변해역이나 대기에 영향을 최소화할 수 있는 준설방법 선택
  - 준설량 설정: 공사 후 양호한 환경으로 정화시킬 수 있고 경제적인 여건을 고려하여 준설량 선정
  - 이차오염방지 방법선정: 준설에 따른 주변지역으로의 확산방지 방법 등 선정
  - 주민의견 수렴: 공사 전 상세한 계획, 예측자료 및 도표 등을 활용하여 지역주민에 통보하고 의견 수렴
  - 모니터링방법 선정: 준설공사 중 그리고 사후 환경모니터링 방법 선정
- 중앙 및 지방정부에서는 이와 같은 내용을 받아 Coastal Management Act (1995), Environmental Effects Act (1978), Environment Protection Act (1981) 및 Environment

Protection and Biodiversity Conservation Act (1999) 등을 고려하여 시행 결정 및 관리 감독을 수행하고 있으며 주요 사례지역으로는 호주 멜버른시 빅토리아만 지역의 연안항인 Western Port 및 Port Phillip Bay 등이 있다.

#### (라) 유럽의 사례

- 1980년대 초반부터 퇴적물질 오염평가 기준과 정화방법 개발을 위한 연구가 영국, 프랑스, 독일, 네덜란드 등지에서 개별적 추진하여 왔다. 현재는 유럽퇴적물관리 네트워크(SedNet)를 구성하여 유럽연합차원에서 오염퇴적물의 오염도 평가 및 정화, 복원 체계 확립(디마스 2005 회의) 하고 있는 상황이다. 전통적인 수질오염원 관리차원에서 발전된 수저퇴적물에 서식하는 저서생물보호를 위한 생태적인 관점에서 관리하고 있으며 오염정도가 심각한 경우(지역주민의 건강성 문제, 오염의 확산 및 저서생태계 장기적인 생태계 영향 등 고려)를 제외하고 대부분 자연정화 방안 선택을 권고하고 있다. 특히 비용에 비해 효과가 미비한 준설-처리 공법을 탈피하여 환경친화적인 오염퇴적물 제거기술 개발 확대에 집중하고 있다.
- 주요사례로는 독일이 발원지인 라인강 하구역에 위치한 로테르담항에서 오염퇴적물 제거 사업을 들 수 있는데 2003년부터 적용된 TBT 사용금지 유럽조약에 따라 연안항내 퇴적물에 축적되어 있는 유기화합물질을 제거하기 위하여 해양오염퇴적물 정화사업을 시행하고 있다. 특히 비소, 아연 등 포함한 중금속류와 PCBs 등 유기화합물을 중점관리대상으로 선정하여 오염된 퇴적물 준설범위를 최소화하여 설정, 준설된 오염퇴적물을 육상 폐쇄 처분장에서 분리 및 처리하는 방법을 시행하고 있다.



[그림. I-라-11. 유럽 로테르담항에서의 오염퇴적물 정화·복원 사례]

### (3) 국내 해양오염퇴적물 처리기술 현황

#### (가) 개요

- 우리나라의 해양오염퇴적물 정화사업은 1988년 마산만 오염해역 준설사업을 기원으로 2012년 현재까지 약 24년 동안 마산만 등 전국 8개 해역에서 실시되었다. 정화사업 시행 초기에는 해양퇴적물에 축적된 유기물의 분해(부패)로 인한 악취발생 등 주로 민원에 의하여 사업을 실시하였으며, 2007년부터 과학적이고 합리적인 조사 및 평가결과를 기초로 정화사업 추진 여부 의사를 결정하여 추진하고 있다. 정화사업 시행 초기에는 해양오염퇴적물의 정화방법으로서 준설이 선택되었고, 처리방안으로서 마산만의 경우 해면매립, 그 이외 해역에서는 해양에 배출하여 최종 처리하였다. 그러나 해양환경 보호에 대한 국내·외의 인식변화 및 해양배출처리기준(해양환경관리법 시행규칙 제12조제2항 관련 별표 8)이 강화됨에 따라 수거 예정 해양오염퇴적물의 해양배출 대안 처리(중간, 최종) 방안의

사전 확보가 필요하게 되었으며, 대안 처리방안 확보의 어려움으로 사업이 중단(동해 묵호항)되거나 사업 추진에 애로(울산 방어진, 진해 행암만 등)가 발생하기도 하였다. 이러한 여건의 변화로 인하여 해양오염퇴적물 정화사업의 원활한 추진을 위하여 정화사업의사를 결정하기 전에 수거 예정 해양오염퇴적물의 대안 처리(중간, 최종) 방안의 확보가 시급히 요구되고 있다. 한편, 2008년 이후 실시되는 정화사업에서는 해양오염퇴적물을 수거(준설)하여 적절한 처리(탈수, 악취제어, 오염도 저감 등) 후 최종 처리방안으로서 연안에 매립(준설토투기장 병합)하여 처리하고 있다. 한편, 정화사업이 완료된 해역에서는 퇴적물뿐만 아니라 수질 환경이 개선되었고, 악취로 인한 환경문제가 해소되었으며, 어족자원과 관광객이 증가하는 등 지역주민들의 생활환경 개선에 크게 이바지하였다.

[표. I -라-8] 오염퇴적물 정화사업 추진 현황

차 례	사업해역	사업기간	물량 (천㎡)	사업비 (백만원)	정화· 복원방법	처리· 처분방법
1	마산항	'90~'94	2,111	28,496	준설	해면매립
2	축산항	'96~'97	23	330	준설	해양배출
3	주문진항	'96~'00	231	7,750	준설	해양배출
4	포항구항	'97~'06	651	34,606	준설	해양배출
5	청초호	'00~'04	569	21,736	준설	해양배출
6	여수 선소	'00~'05	600	23,653	준설	해양배출
7	묵호항	'06~'08(중단)	289	17,930	준설	해양배출
8	행암만	'06(실시설계)*	268	16,390	준설	해양배출
9	부산남항	'09~사업중	255.6	28,500	수거 (준설)	처리후 연안매립
10	부산용호만	'09~'12	67.7	9,739	수거 (준설)	처리후 연안매립
11	여수신항	'11~'12	390	37,450	수거 (준설)	처리후 연안매립
12	방어진항	'12~사업중	274	15,349	수거 (준설)	처리후 해양배출
13	부산감천항	'09(타당성조사) 실시설계 예정	56**	미정	수거 (준설)	미정

주] \* : 처리·처분 대안 변경을 위한 실시설계 변경 필요

\*\* : 물량 및 사업비는 추정치, 실시설계 종료후 물량 및 사업비 산정가능

- 우리나라의 정화사업에서는 해양오염퇴적물을 수거한 직후 전처리(탈수, 악취제어, 탈수액상수처리 등)를 제외하면, 처리(중간, 최종)기술로는 오염토양 정화사업 현장에서 주로 사용되는 입자분리 또는 세척기술을 부분 수정하여 시험 적용하고 있으며, 일부 업체에서

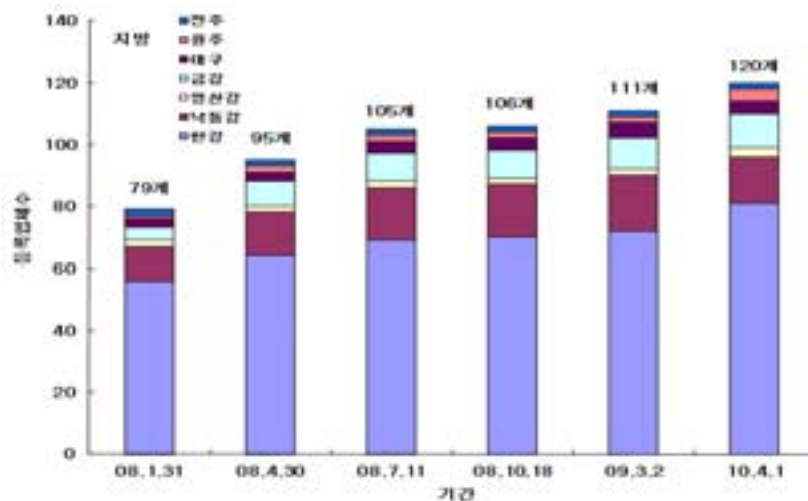
는 육상, 해상 처리 플랜트 개발을 시도하고 있다. 한편, 오염퇴적물 정화·복원과 관련된 기술 특허 (17건) 및 유사기술로써 오염토양 정화, 복원 기술 특허 (50건) 등 활용 가능한 기술이 보고된 바 있다<sup>19)</sup>.

[표. I-라-9] 국내 오염퇴적물 처리·처분 관련 기술 현황

차례	기술 종류	세부 내용	건수	소계
1	오염퇴적물 정화·복원 기술 특허	준설 관련 기술	4	17
		준설 후 처리 관련 기술	5	
		기타 처리 기술	8	
2	오염토양 정화·복원 기술 특허 (유사기술)	물리적 처리 기술	18	50
		물리·화학적 처리 기술	11	
		생물학적 처리 기술	17	
		유류오염 방제 기술	4	
총계				67

(나) 국내 유사기술 현황

- 해양오염퇴적물 처리 기작(Mechanism)이 유사한 오염토양 정화기술은 2008년 1월 31일 기준 79개 업체가 등록되어 있었으나, 2009년 3월 2일 111개 업체로 증가하였고, 최근 2010년 4월 1일 기준 120개 토양정화 업체가 등록되어 있다.



[그림. I-라-12] 각 지방 환경청 관내 토양정화업체의 기간별 변화

- 환경부는 2008년 1월부터 현장기술 개발을 통한 선진적인 토양지하수 통합관리기반을 구축하고, 환경시장의 90% 이상을 국내기술로 대체하기 위하여 “토양·지하수 오염방지기술개발사업(GAIA Project)”(사업기간: 2008년~2010년[총 10년], 사업예산: 1,397억원[민간 예산 234억원 제외])을 추진하고 있다. 2008년 이후, 토양정화업체의 급격한 증가는 이러한 수요의 증가에 기인된 것으로 사료된다.

19) “해양오염퇴적물 처리방안 및 기술개발 I”, 국토해양부, 2008. 6. (연구기관: 한국해양연구원)

[표. I-라-10] GAIA Project의 목표 및 예산

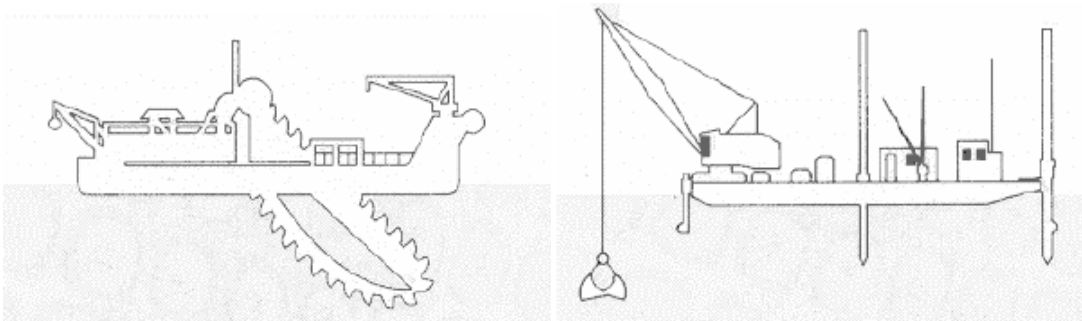
구분		1단계 (‘08~‘11)	2단계 (‘12~‘14)	3단계 (‘15~‘17)
기본목표	우리나라 토양·지하수 환경시장의 90% 이상을 국내기술로 대체	요소기술 개발	현장기술 개발	통합관리 기반 구축
사업예산 (억원)	계	1,631	758	558
	정부(환경부)	1,397	649	478
	민간	234	109	80

- 2000년 이후, 우리나라에서 적용된 오염토양 정화방법 중,
  - 토양증기추출법 (Soil vapor extraction)
  - 생물학적통풍법 (Bioventing)
  - 토양세척법 (Soil washing)
  - 화학적 산화/환원법 (Chemical oxidation / reduction)의 순으로 활용되고 있는데, 이중 토양세척법과 오염토양 정화를 위하여 활용되는 입자분리(Soil separation) 기술은 해양오염퇴적물 정화를 위한 처리기술로 활용이 가능한 것으로 사료된다.
- 해양오염퇴적물은 해역별 특성에 따라, 점토(Clay), 미사질(Silt) 및 사질(Sand) 등 다양한 입경으로 구성되어 있는데 반하여, 현재 우리나라에서 활용되는 토양오염 정화기술은 대부분의 경우, 0.075mm 이하의 미세토양을 처리하는데 제한이 되기 때문에, 향후 토양오염 정화기술을 해양오염퇴적물 정화사업에 사용하기 위해서는 미세토양까지 처리 가능한 기술의 개발이 필요하다.

#### (4) 해양오염퇴적물 수거공법

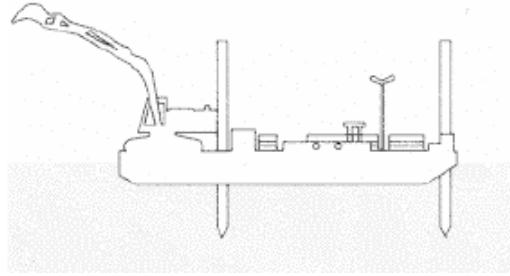
##### (가) 개요

- 해양오염퇴적물을 정화방법 중 가장 직접적인 방안은 해저면에서 오염된 퇴적물을 제거하는 준설(수거)이다. 준설은 일반적으로 기계식(mechanical)과 유압식(hydraulic)으로 나누며, 기계식 준설은 준설될 물질을 끌어 올리기 위하여 다양한 디자인의 하나 또는 여러 개의 버킷 등의 용기를 사용하여 퇴적물을 퍼올리는 방법이다. 기계식 준설은 수거방법 및 용기의 모양, 작동 방법 등에 따라 버킷, 그랩, 디퍼를 사용하는 방식으로 구분된다(그림 I-라-13). 유압식 준설은 커다란 진공청소기와 비슷하며, 흡입구에 절삭기를 장착한 것과 그렇지 않은 것이 있다(그림 I-라-14).



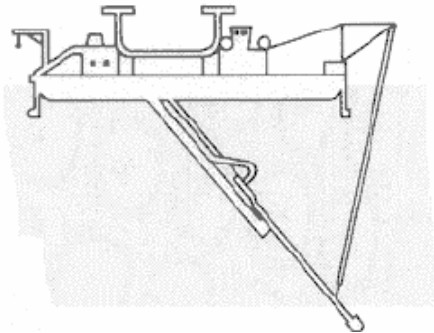
a) 버킷 레더(Bucket ladder dredger)      b) 그랩(Grab dredger)



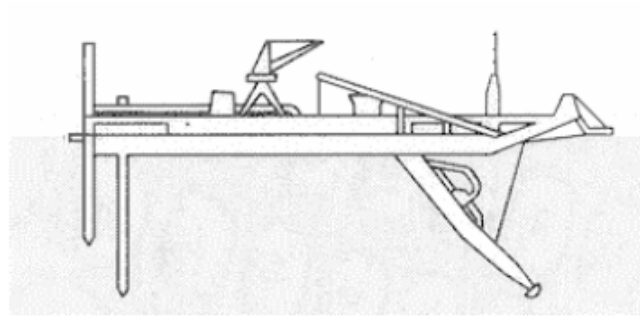


c) 디퍼, 백호우(Dipper and backhoe dredger)

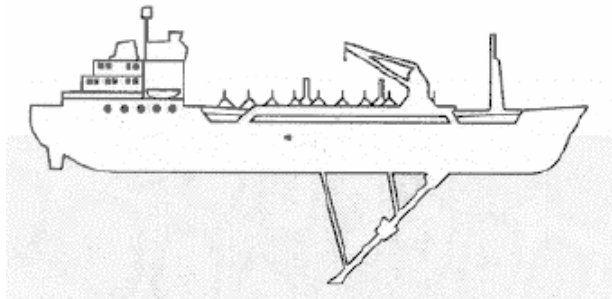
[그림. I-라-13] 기계식 준설장비



a) 플레인 석션(Plain suction dredger)



b) 컷터(Cutter dredger)



(c) 트레일 석션 호퍼(Trailing suction hopper dredger)

[그림. I-라-14] 유압식 준설장비

### ① 기계식 준설

#### ㉞ 버켓라다 준설 (Bucket ladder dredge)

- 버켓라다 혹은 버켓 체인 준설기는 일련의 버켓들이 사다리라고 불리는 장치에 붙어 있다. 버켓은 롤러에 의하여 지지되는데, 순환식으로 아랫 부분에서 채워진 준설물은 최상부에서 비워진다. 버켓의 크기는 30 ~ 1,200리터로 다양하다.

#### ■ 작동방법

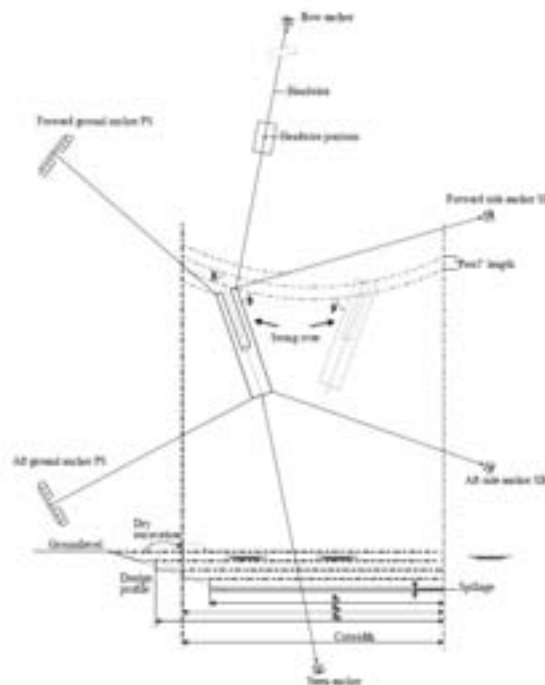
- 버켓라다준설기는 6가닥의 앵커 와이어에 의하여 위치를 제어한다. 후미 앵커 주위를 좌우로 움직이며 준설한다. 후미 앵커와이어와 선미 와이어는 1,000m 보다 길어질 수 있다. 좁은 작업 반경에서 퇴적물 위로 와이어가 끌리는 것을 방지하기 위하여, 와이어는 끝단의 플랫폼에 의해 지지된다. 준설 범위는 200m 이상을 커버할 수 있다. 좌우로 이동하는 속도는 퇴적물의 상태에 따라 조절 가능하며, 준설 폭은 멈춤쇠의 길이에 의한다.



[그림. I-라-15] 버킷라다 준설기 (Bucket ladder dredger)

■ 적용 지역

- 버킷 준설은 부드러운 오니부터 부드러운 암석까지 거의 모든 퇴적물의 준설에 적용 가능하다. 그 적용범위는 버킷 체인의 강도 및 동력의 크기에 좌우된다. 최대 준설수심은 준설기의 크기에 따른다. 보통 최대 준설수심은 30m 이상이다. 최소수심은 약 8m 이다. 현장의 밀도조건하에서 퇴적물을 그대로 펄 수 있기 때문에, 최근 오염된 오니준설에 자주 사용된다. 버킷라다 준설기는 외해 조건에서는 사용이 어렵고 유압식 준설기들에 비해 작업효율이 비교적 낮다.



[그림. I-라-16] 버킷라다 준설기의 위치제어 및 운용 방법

---

### ㉔ 그랩, 크랩셸 준설기 (Grab or Clamshell dredger)

- 그랩준설기는 세계적으로 가장 보편적으로 사용되는 준설방법의 하나이다. 준설물을 저장할 수 있는 호퍼를 가진 경우도 있고, 그렇지 않은 경우에는 바지에 의해 운송된다. 준설기는 앵커나 지지대에 의해 계류된다. 용량은 그랩의 부피로 표현되며, 1 ~ 200m<sup>3</sup> 까지 다양하다. 그랩의 개폐는 호이스트 와이어나 유압식 실린더에 의하여 제어된다.

#### ■ 작동방법

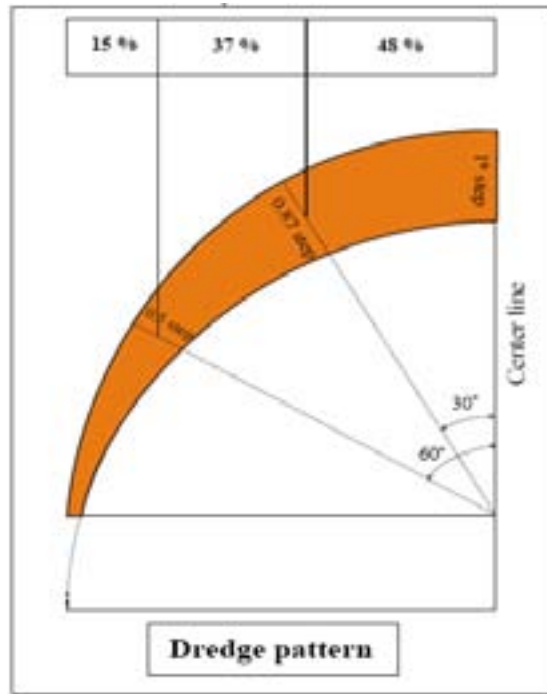
- 그랩준설기는 앵커링과 위치제어 시스템이 준설의 효율을 크게 좌우한다. 매 정지위치에서 가능한 넓은 면적에서 준설이 이루어질 수 있다. 중앙선을 기점으로 멀어질수록 준설 용량은 감소한다. 한 조각의 그랩을 정지하여 준설을 하기 때문에 위치제어가 중요하다. 지지대를 가진 준설기가 와이어에 의하여 작동되는 것보다 더 정밀하게 준설을 수행할 수 있다.



[그림. I-라-17] 그랩 준설선

#### ■ 적용 지역

- 대형 그랩준설선은 대규모 준설에 사용된다. 반면에 작은 용량의 그랩준설은 대부분 항내에서 접근이 어렵거나, 수심변화가 크고 소용량일 경우, 안벽을 따라 와이어나 쓰레기 등이 많은 장소, 깊은 구덩이에서 모래나 자갈 등을 채취할 때 등 특별한 목적에 사용된다.



[그림. I-라-18] 그랩 준설선의 준설 유형

㉔ 굴삭형 준설기 (Backhoe and front shovel)

- 유압식 크래인이 굴삭기와 전방향 삽에 장착될 수 있다. 굴삭기가 대부분 사용되며 두 장비의 차이는 굴삭기는 버킷을 준설선에서 끌어당겨 준설하는데 반해 전면 삽날형은 미는 방식이다. 정치는 세 개의 지지대에 의하여 확보되고 두 개는 플랫폼의 선수 양편에 고정되고 하나는 후면에서 움직인다. 준설 수심은 약 15m (최대 25m) 이다. 버킷의 크기는 수 m<sup>3</sup>에서 20m<sup>3</sup>까지 다양하다.



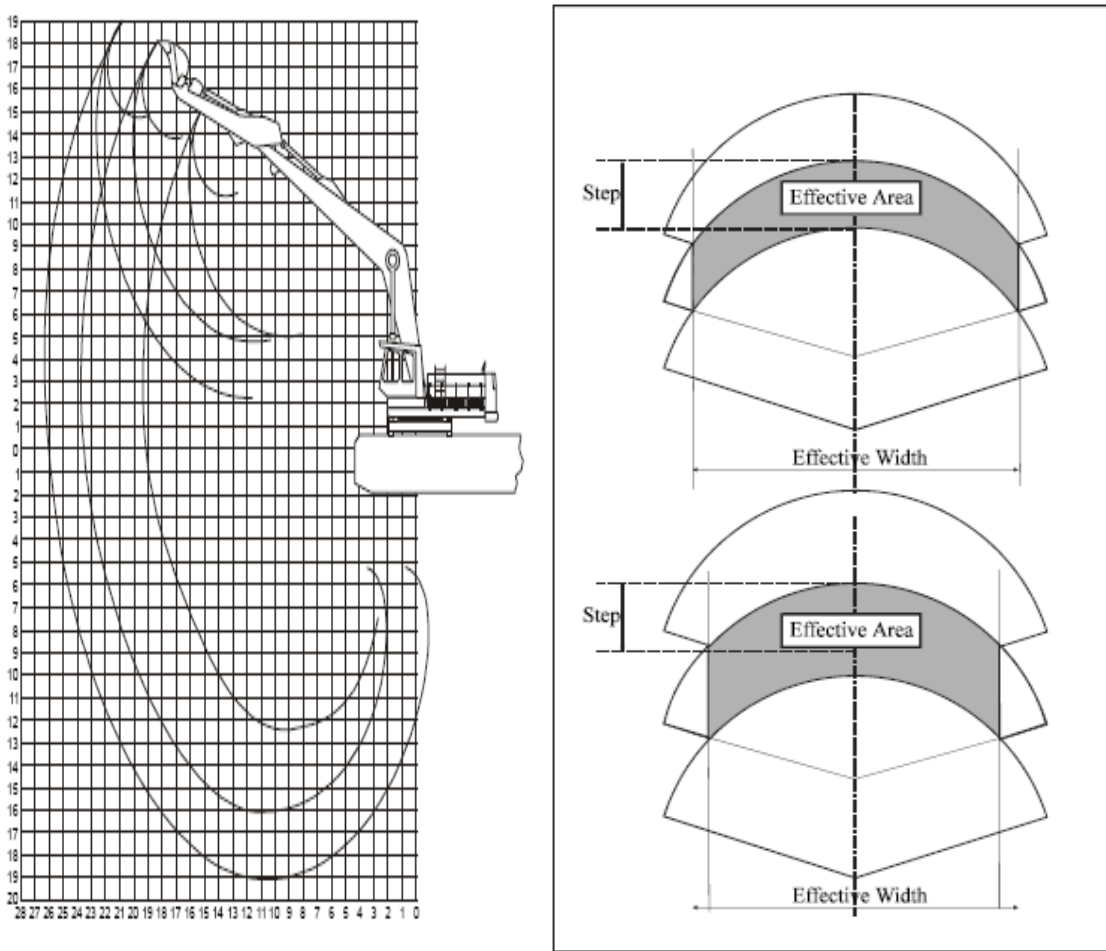
[그림. I-라-19] 굴삭형 준설기

■ 작동방법

- 준설장비의 무게가 지지대를 통하여 바닥으로 전달되기 때문에 퇴적물을 굴삭할 때에 충분히 앵커링이 된다. 따라서, 파도에 덜 예민하게 반응한다. 붐대와 팔의 작은 반경으로 굴삭폭은 10 ~ 20 m로 한정된다. 효율적인 준설범위는 좌우로 벌릴 수 있는 각도와 플랫폼에서 앞으로 뺄 수 있는 거리에 따른다.

■ 적용 지역

- 수심이 25m를 넘지 않는 지역에서 그랩준설과 비슷하게 사용된다.



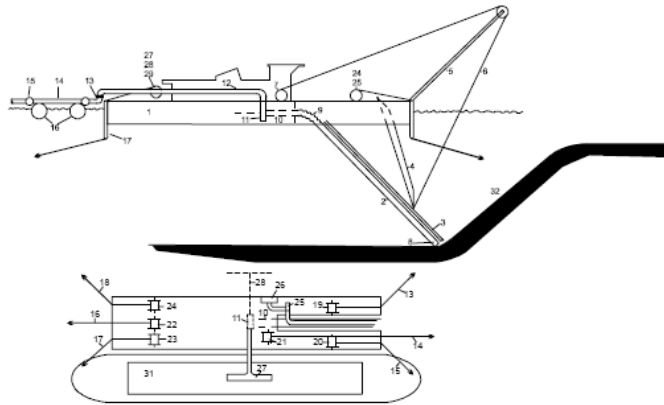
[그림. I-라-20] 굴삭형 준설기의 준설 유형

② 유압식 준설

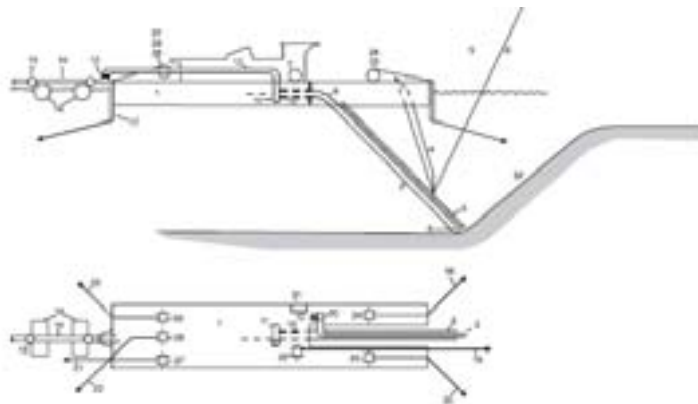
㉠ 플레인 흡입 준설기 (Plain suction dredger)

- 플레인흡입 준설기는 하나의 준설펌프를 가지며, 하나 이상의 와이어에 의하여 위치가 제어되는 정적인 준설기이다. 준설 펌프는 흡입 파이프와 운송용 파이프에 연결된다. 흡입 파이프는 플랫폼의 전면에 위치해 있다. 이런 종류의 준설기는 퇴적물이 자유롭게 흐르는 모래이거나 깎아야 할 벽의 높이가 충분할 때 (적어도 10m) 효율적이다. 대부분의 흡입준설기는 흡입구 근처에서의 혼합 형성 과정을 개선하기 위하여 물분사 펌프를 장착하고 있기도 한다. 플레인 흡입 준설기의 종류는 바지에 준설물을 실을 수 있는 바지 저장

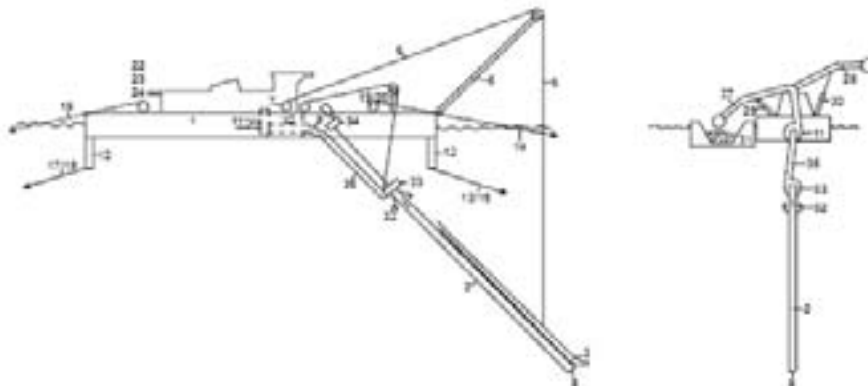
고 흡입준설기(Barge loading suction dredger): 직접 펌프로 운송하기에는 거리가 너무 길 경우 사용된다. 표준형 플레인 흡입 준설기(Standard suction dredger)는 파이프라인을 통하여 준설물질을 매립지로 보낼 때, 사용된다. 깊은 수심에서 사용되는 대수심 흡입준설기(Deep suction dredger)는 수중펌프가 장착되고 준설 수심이 30m 를 초과할 경우 일반 표준형 보다 더 적절하게 사용될 수 있다. 더스트팬준설기(Dustpan dredger)는 넓은 흡입구를 가지고 있으며 얇은 심도의 준설을 가능하게 해 준다.



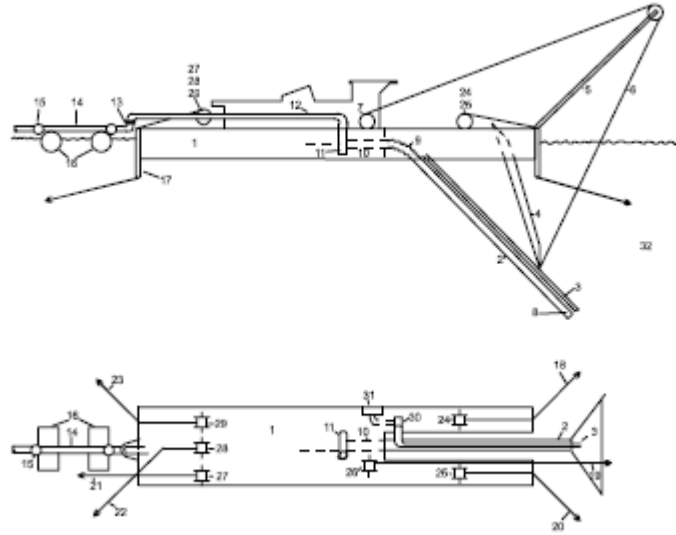
[그림. I-라-21] 바지 이송형 흡입 준설선 (Barge loading suction dredger)



[그림. I-라-22] 표준 플레인 흡입 준설선 (Standard plain suction dredger)



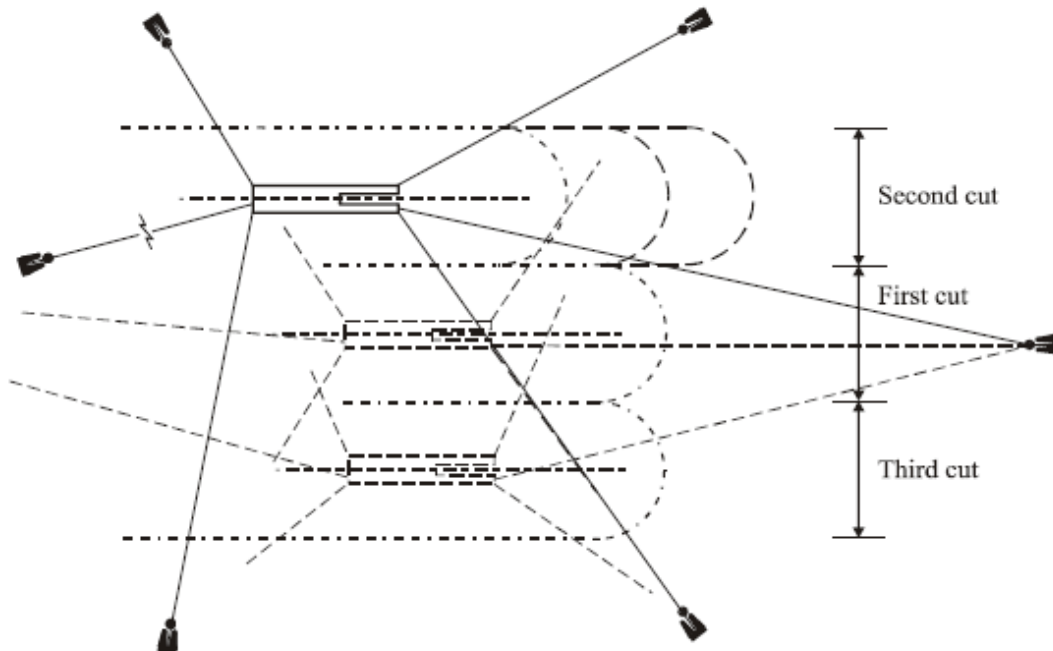
[그림. I-라-23] 심층 흡입 준설선 (Deep suction dredger)



[그림. I-라-24] 더스트팬형 준설기 (Dustpan dredger)

■ 작동 방법

- 준설펌프에 의하여 형성되는 흡입구 주변의 흐름에 의해 만들어지는 배사과정(breaching process)과 침식에 기초하여 준설이 이루어진다. 배사과정이란 지역적 불안정 혹은 흡입구 경사면을 따라 흐르는 밀도류의 침식으로 인하여 퇴적물이 절단되는 과정으로 준설된다.



[그림. I-라-25] 플레인 흡입준설기에 의한 준설 유형

- 준설의 길이는 채취구역내에서 앵커의 위치에 의한다. 앵커의 위치를 재조정하지 않고보다 많은 준설이 가능하도록 앵커를 놓는다. 앵커 와이어의 길이와 퇴적물의 배사가능성이 준설길이를 좌우한다.

## ■ 적용 지역

- 절삭기가 없기 때문에 이런 유형의 준설기는 점착성이 없는 퇴적물에 적합하다. 특별한 장치가 있으면 외해 조건에서도 준설이 가능하다. 100m 가 넘는 깊은 구덩이에서도 채취가 가능하다. 이런 종류의 준설기는 시멘트산업용 모래 채취나 매립지에서 채취갱을 파는데 흔히 사용된다.

### (나) 상용 준설기의 환경영향 검토

- 일반적으로 상용 준설선에 의한 준설작업은 간혹 환경에 역영향을 미칠 수 있다. 이러한 영향 간략히 기술하면 다음과 같다:
- 오염된 물질의 과다 준설: 상용 준설선은 준설깊이에 대하여 그 조절 범위가 낮은 정밀도를 가진다. 이러한 이유로 처리 혹은 저장할 준설물질에 대하여 과도한 부피를 초래한다. 특히 큰 면적에 대하여 오염퇴적물 층을 준설할 경우 준설물량이 커질 수 있다.
- 과다 부유퇴적물: 준설지역 혹은 처분지역 인근에서 상용 준설선에 의한과다한 부유물질의 생성은 민감한 지역 생물들에 위험을 초래할 수 있다. 부유물질이 오염되었을 경우, 오염물질이 수층으로 확산될 수 있다.
- 유출층의 형성: 상용 준설선에 의하여 느슨해진 층을 불안정하게 제거할 경우, 자연적으로 해저면의 침식 작용에 의하여 많은 양의 부유물질이 발생하게 된다. 이러한 부유물질은 산호초와 같이 민감한 지역 인근이라면 또는 퇴적물에 흡착된 오염물질들이 방출 혹은 확산될 경우 위험을 초래할 수 있다.
- 준설물질의 회석: 상용 준설선에 의하여 제거된 가는 입자를 가진 물질들은 많은 양의 물과 혼합될 때, 저장 혹은 처리하여야 할 준설물질의 부피를 증가시키게 된다.
- 상기 영향의 각각은 개별 사업의 준설 대상 물질의 특성과 사용되어지는 준설장비/기술의 종류에 따라 크게 좌우된다. 준설은 퇴적물을 부수고, 채취하고, 준설물질을 수직·수평 방향으로 이동 및 재배치하는 과정들을 포함한다. 이러한 과정들에 대한 운용원칙들은, 세가지 범주의 준설방법으로 분류될 수 있다: 기계식 준설, 흡입식 준설, 기계식/흡입식 혼합 준설.

#### ① 기계식 준설

- 기계식 준설은 물질을 자르거나 끌어올리기 위한 기계식 발굴 장치들을 사용하는 모든 설비들을 포함한다. 이러한 범주에 속하는 준설은 그랩준설, 백호준설, 버킷라다준설이 있다.

#### ㉞ 그랩준설

- 준설지점의 정확도가 제한된다. 발굴용 버킷은 매회 위치를 재조정해야 되며 상용장비의 위치조정 능력은 부족하다. 개방형 버킷을 가진 상용 그랩 준설선은 퇴적물을 끌어 올리는 동안 발굴물질들이 누출되어 손실이 발생한다. 이러한 끌어 올리는 동작에, 그랩으로부터의 누출은 수층의 전 깊이를 통하여 일어날 수 있다. 퇴적물을 바지에 실을 동안 넘치거나 튀어서 손실이 발생될 수 있다. 더구나, 아주 넓은 면적의 앵커를 요구한다. 때문에 해상교통에 지장을 초래할 수 있다.
- 그랩준설선의 준설량은 준설지점의 수심에 제한을 받는다. 대형 그랩준설선의 작업량은



---

시간당 1,000~2,000m<sup>3</sup>/h 까지 이른다.

#### ㉔ 백호 준설선

- 백호준설선의 주요 단점들은 다음과 같다:
  - 준설지점의 정밀도가 낮다. 발굴용 버킷을 매회 위치를 조정하여야 한다. 상용장비의 위치 제어 능력이 빈약하다.
  - 개방형 버킷으로 준설물질을 부상시킬 때 막대한 양의 부유 퇴적물이 누출될 수 있다. 누출은 전수층에 걸쳐서 발생할 수 있다.
  - 백호준설선의 작업능력은 작업자의 숙련도에 크게 의존된다. 가장 큰 백호준설선으로 작업 능력은 500m<sup>3</sup>/h 까지 이른다.

#### ㉕ 버킷라다준설선

- 버킷라다준설선은 유럽에서 처음 사용되었다. 사다리 모양의 무궤도 버킷 체인을 가지고 있다. 준설시 체인이 사다리를 따라 회전한다. 가장 낮은 위치의 버킷이 해저면을 파서 버킷으로 끌어 올린다. 버킷 체인이 회전할 때, 위로 올라와 최상단부의 사다리에서 발굴 물질이 부어지게 된다. 버킷라다준설선은 그랩준설선과 백호준설선들 이상의 장점들을 가지고 있다. 사다리가 동일 지점에 있는 한 준설위치의 정밀도가 더 높아지게 된다. 물에 의한 준설물의 회석은 크지 않지만, 다음과 같은 단점들을 가지고 있다.
  - 개방형 버킷으로 발굴물을 부상시킬 때, 많은 양의 부유 퇴적물이 누출될 수 있다.
  - 비슷한 양의 작업능력을 가진 기타 준설선과 비교하여 작업단가가 높다.
  - 넓은 면적을 차지하는 앵커들이 해상교통을 방해할 수 있다.
  - 버킷라다준설선의 작업량은 소량에서 1,500m<sup>3</sup>/h 까지 이른다.

### ② 유압식준설선

#### ㉖ 흡입준설선(Suction Dredger)

- 흡입준설선은 가장 간단한 유형의 유압식준설선이다. 부유바지로부터 흡입파이프를 바닥에 내려 준설펌프로 흡입하는 방식이다. 간혹 흡입라다가 장착되기도 한다. 흡입파이프로 물질을 끌어 올린 후에 유압을 이용하여 부유 파이프라인을 통하여 해안가나 바지에 배출한다. 흡입준설선은 준설위치의 정밀도가 낮다는 단점이 있으며 흡입 과정에 제어할 수 없는 과정으로 인하여 상당량의 유출이 있을 수 있다. 수송목적으로 발굴물질에 물이 첨가되기도 하며, 발굴물질의 회석이 상당하다. 흡입준설선의 용량과 발굴물질의 특성에 따라, 준설량이 좌우되며 50~5,000m<sup>3</sup>/h 까지 다양하다.

#### ■ 절삭흡입준설선(Cutter Suction Dredger)

- 절삭흡입준설선은 보통 자력선이 아니고 절삭 톱날을 가진 회전 절삭기로 해저면을 파헤친다. 떨어져 나간 물질은 절삭기에 정지된 흡입구로 흡입된다. 준설헤드의 이동이 고정점으로부터 제어되기 때문에 준설위치에 대한 정밀도가 좋다. 회전 절삭기 주변 해저면의 교란으로 준설지역에 상당량의 부유퇴적물을 형성하는 높은 위험도를 가진다. 준설물과 함께 흡입파이프를 통하여 물도 함께 흡입되기 때문에 준설물질의 회석이 크다. 흡입준설선과 같이, 준설율은 절삭흡입준설선의 크기와 발굴물질의 특성에 따라, 50~5,000m<sup>3</sup>

---

/h 까지 다양하다.

## ■ 배향흡입호퍼준설선(Trailing Suction Hopper Dredger)

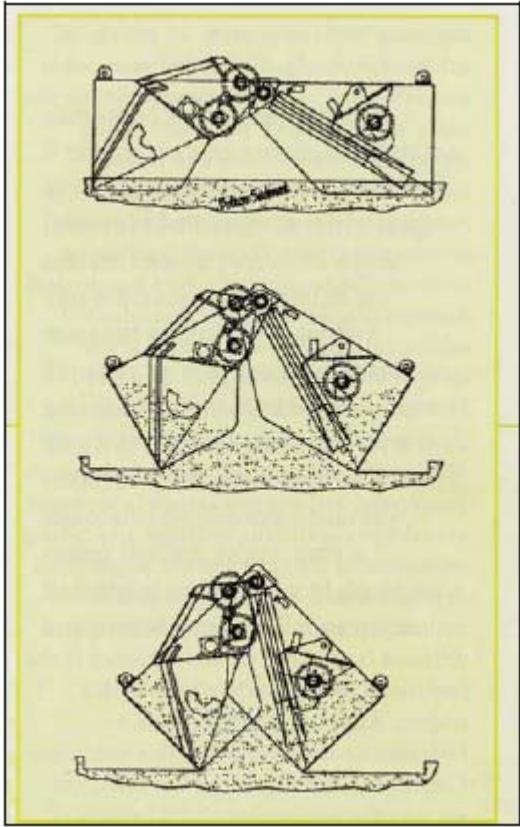
- 배향흡입호퍼준설선(TSHD)는 흡입라다를 가진 자항식 준설선이다.

### (다) 기타 혁신 준설기술

- 과거 약 30년에 걸쳐서, 환경문제가 오염된 퇴적물을 포함하는 기본 혹은 유지준설작업에서 중요한 고려사항으로 증가하여 왔다. 환경적으로 수용가능하고 경제적으로 가용한 기술들이 거의 모든 현대 준설사업에서 주요 고려사항중의 하나가 되었다. 지난 10년간, 환경적으로 친화적인 방법으로 오염퇴적물을 제거하기 위한 목적으로 많은 준설선과 준설헤드들이 특정한 사업들에 고안되어 왔다. 이러한 환경준설(Environmental dredging)의 바람직한 특성들은 다음과 같다.
  - 오염되지 않은 물질과의 혼합 및 과다 준설을 방지하면서, 높은 준설위치 정밀도로 오염퇴적물층을 제거
  - 주변수층으로의 오염퇴적물의 확산 및 부유물을 최소화하면서 오염퇴적물을 준설
  - 가능한 준설과정에서 희석을 최소화함으로써 해저면에서의 밀도와 유사하게 준설.
- 준설시 발생하는 부유물을 최소화하는 것은 환경에 역영향을 감소시키는데 있어 확실히 중요하다. 준설위치의 높은 정밀도는 운송, 저장, 처리 부피를 줄여주며 오염퇴적물을 보다 효율적으로 제거하는 것이다. 준설과정에서 희석을 최소화함으로써 달성되는 준설물질의 높은 밀도는 저장 혹은 처리하여야 할 부피를 줄여준다. 몇 종류의 개선된 환경준설선들과 여러 나라에서 사용중인 환경 친화적으로 개선된 새로운 준설기술과 적절한 변경사항들을 가진 상용 준설선들을 아래에 정리하여 기술한다.

### ① 환경그랩

- 환경그랩은 과다준설을 최소화하고 그랩버킷으로부터의 유출을 방지하기 위하여 다음의 특징들을 갖는 특별히 고안된 그랩이다. 환경그랩의 특성은 다음과 같다.
  - 그랩을 열고 닫을 때, 절삭면이 동일한 수평면을 가진다.
  - 그랩의 개폐가 유압 혹은 기계식으로 특별히 조작되는 케이블에 의해 수행됨.
  - 그랩이 닫힐 때, 유출을 최소화하기 위하여 모든 개방구가 봉쇄된다.
- 케이블의 전환점 위치를 정밀하게 측정하기 위하여 크레인 붐대 꼭대기에 위치 확인 장치가 설치된다. 준설시 그랩의 깊이를 정확하게 확인하기 위하여 케이블길이 측정 장치가 사용된다.

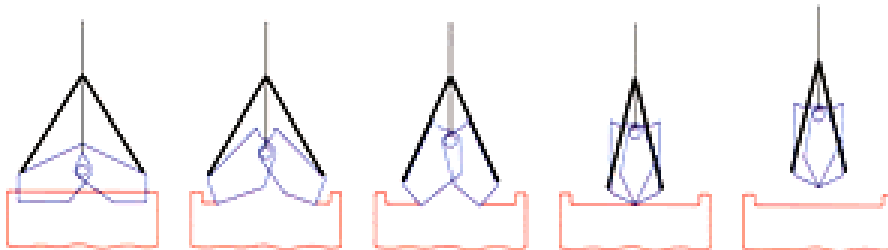


[그림. I-라-26] 환경그랩의 모식도

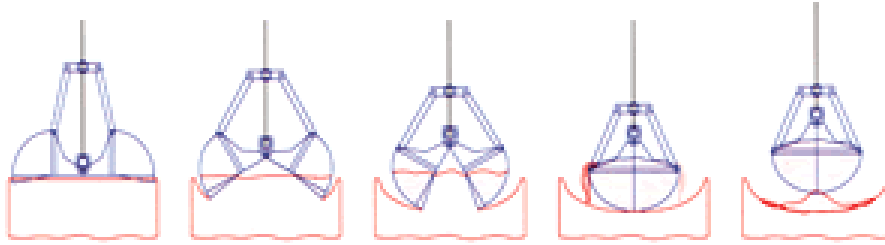


[그림. I-라-27] 케이블에 매달린 환경그랩

- 환경그랩은 그랩준설선이나 백호준설선에 장착될 수 있다. 케이블크레인에 매달린 그랩의 위치제어 정밀도가 높다. 환경그랩은 실트커터와 같은 기타 보호 수단과 함께 보통 사용된다. 환경그랩의 준설율은 그랩버킷의 크기에 주로 좌우되며 시간당 수백 m<sup>3</sup> 로 제한된다.
- 일반적으로 밀폐형으로 제작되는 환경그랩은 수거과정에서 컷터로 수평 굴착하므로 얇은 층 준설이 가능하며, 필요한 최소한의 퇴적물을 “넓게”, “얇게” 또는 “균일”하게 준설할 수 있다. 특히, 준설과정에서 밀폐형 구조의 특성에 의해 수질오염이나 잉여 퇴적물의 발생을 차단할 수 있기 때문에 부유물질의 발생 등 2차 오염을 예방할 수 있다. 환경그랩과 달리, 항로 유지준설 등에는 가장 일반적으로 사용되는 일반 그랩 또는 버킷은 개폐 구조 등의 관계로 잉여 퇴적물이 발생하며, 준설시 두께제어가 어려워서 필요 이상의 두께를 준설한다.



(a) 환경그랩의 준설과정



(b) 일반 그랩 준설과정

[그림. I-라-28] 환경그랩과 일반 그랩의 준설과정의 차이

## ② 환경오거준설선

- 오거준설선은 수년간 유럽에서 주로 호수의 정화사업에 사용되어져 왔다. 아래에 열거된 몇가지 특정한 환경 특성을 가진 작동원리들과 결합되어, 환경오거준설선은 오염퇴적물의 얇은 층들을 제거하기 위하여 고안되어졌다(그림 I-라-29). 환경오거준설선의 특성은 다음과 같다.
  - 준설물질이 흡입헤드에 의해 펌프로 끌어 올려진다. 때문에 슬러리가 고농도로 압축될 수 있다.
  - 준설과정이 밀폐된 공간 내에서 이루어질 수 있다.
  - 실트스크린이 오거 주변에 설치되어 혼탁도가 보호망 내에 한정될 수 있다.
  - 환경 범주에서 상용준설선과 비교하여, 환경오거준설선은 다음과 같은 여러가지 개선점들을 가진다.
    - 매우 정적인 준설선으로 절산헤드의 정밀위치 조정 및 자동으로 조절되는 제어 시스템과 결합하여 5cm 이내의 허용오차로 작업을 할 수 있다.
    - 오거는 스킵트에 의하여 환경으로부터 폐쇄되어 있다. 때문에 절삭도구 주변에서 퇴적물의 부유가 거의 없다.
    - 오거는 준설선의 흡입구를 향하여 퇴적물을 자르고 운송한다. 이러한 특징으로 펌핑과정을 잘 제어하면, 준설층을 최소한도로 제거할 수 있다.
    - 물에서 감시가 잘 되는 제어시스템을 가져 준설물질 운송시 필요로 하는 물의 양을 최소한도로 줄일 수 있다.
    - 환경오거준설선의 준설율은 오거의 크기에 따라 500m<sup>3</sup> 정도까지 된다.



[그림. I-라-29] 환경오거준설선

### ③ 디스크바닥준설선(Disc Bottom Dredger)

- 디스크바닥준설선은 기계식과/유압식을 혼용한 준설선이다. 평평하고 바닥이 폐쇄된 수직적으로 회전하는 축을 가진 원통형 모양의 절삭기를 장착한 정적인 준설선이다(그림 I-라-30).



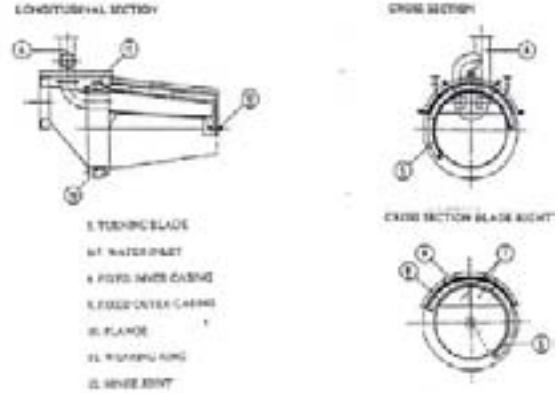
[그림. I -라-30] 원통형 모양의 디스크바닥준설선

- 절삭 퇴적물을 제거하기 위한 흡입구는 유출을 방지하기 위하여 절삭기의 내부에 위치하여 있다. 절삭된 퇴적물을 봉쇄하여 과도한 용량의 물이 들어오는 것을 방지한다. 준설위치 조절이 아주 높은 정밀도로 이루어질 수 있다. 절삭면을 목표로 하는 수 cm의 두께로 위치를 조정할 수 있다. 디스크 바닥 절삭 도구 주위를 완전하게 밀폐되게 설계하여 절삭된 퇴적물의 확산을 방지한다. 따라서, 부유퇴적물의 형성이 최소화되며 절삭도구에 아주 근접하게 제한된다(IADC, 1998).

### ④ 국자형준설기(Scoop Dredger)

- 국자형준설기는 절삭흡입준설기를 특별히 오염퇴적물 준설에 맞게 성능을 향상시킨 것이다. 반대 회전방향에서 준설이 가능하도록 양날형 기능을 가진드랙헤드가 달려 있다. 준설선의 흡입구에 퇴적물을 긁어 넣기 위하여 방향을 바꿀 수 있는 날을 사용한다. 회전 끝단에서 날은 반대방향으로 바뀌며, 준설선은 앞쪽으로 1.5~2.5m 움직이고 반대방향으로 계속하여 긁어낸다(Vandycke and Lefever, 1997)<sup>20)</sup>. 국자 끝에 회전 절삭기가 없기 때문에 혼탁과 물의 첨가가 최소화된다. 동시에 회전부가 없다는 것은 준설지역의 폐기물들에 대한 방해로 최소화시킨다. 준설물질에서의 기포 버블의 발생으로 라다 펌프의 공동화현상을 유발할 수 있으며 이로 인하여 펌프의 성능을 저하시킬 수 있다. 이를 방지하기 위하여 특별히 제작된 가스제거장치가 부착되기도 한다.

20) Vandycke, s> and Lefever, J., 1997. Instrumentation of environmental dredgers. Proceedings of the CEDA Dredging Days, pp.209-221..



[그림. I-라-31] 국자형헤드와 일반적인 모양

### ⑤ 저혼탁준설헤드(Low-Turbidity Dredge Head)

- 저혼탁준설헤드(LTDH) 혹은 청소헤드(Sweephead)라고 불리는 장비가 벨기에의 Jan de Nul에 의하여 개발되었다. 저혼탁준설헤드는 절삭기흡입준설선에 장착된다(그림 I-라-32). 특징은 다음과 같다(McLellan and Hopman, 2000)
  - 고정밀도로 퇴적물의 얇은 층을 제거할 수 있다.
  - 현장 퇴적물과 비슷한 밀도로 준설할 수 있다.
  - 얇은 수심에서도 작업이 가능하다.
  - 혼탁도 발생과 오염물질의 이동을 감소시키기 위하여 퇴적물에 기계적인 혼란을 최소화한다.
- 저혼탁준설헤드는 두 개의 입구를 가지며 추가적으로 기계식 움직임없이 작업을 할 수 있다. 헤드에 유압식 밸브가 준설방향을 향하여 입구를 열게 해 준다.



[그림. I-라-32] 저혼탁준설헤드

### ⑥ 환경준설 장비 사례: 일본

- 일본의 오염해역 준설사업에서 사용되는 장비는 다음과 같다.
  - 그랩 준설선: 타고노우라항의 다이옥신 오염해역 준설(2000년)에 사용
  - 펌프준설선: 일반 해역 준설에 사용하는 장비를 사용
  - 드래그석션 준설선: 일반해역 준설에 사용하는 장비를 사용
  - 고농도 오니 준설설: 오니를 대상으로 높은 함니율로 수거가 가능하며, 일반 해역 준설에도 사용
  - 환경보호형 밀폐형 그랩 준설선: 수거시 2차 오염 예방을 위한 밀폐형 그랩을 사용
- 한편, 오염해역 준설에서 그랩 등 일반 준설장비도 사용되고 있지만, 소형 이동식 오타방지막 등 2차 오염을 예방할 수 있는 장비와 공법을 사용하고 있다.

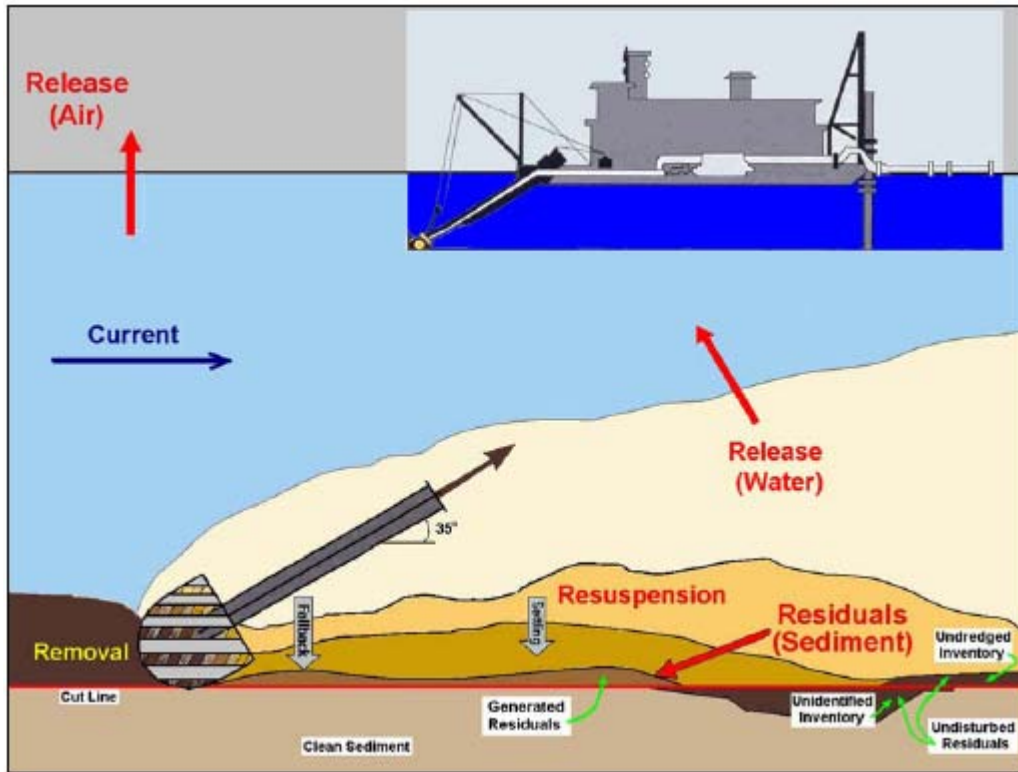


[그림. I-라-33] 소형 이동식 오타방지막과 밀폐형 그랩에 의한 준설

#### (라) 환경준설의 고려사항 검토

- 환경준설은 퇴적물 정화를 목적으로 오염된 퇴적물을 제거하는 것이다. 환경준설은 여러 종류의 장비 및 접근법이 사용되어 왔으며, 오염된 준설물질을 처리·처분과 잔류물들에 대한 관리가 따르게 된다. 준설이 항구나 수로에서 선박통항을 증가시키고 유지하기 위하여 수세기에 걸쳐서 수행되어 왔지만, 환경준설 개념은 비교적 새로운 영역에 속한다. 미국에서도 정화복원 경험에 기초한 환경준설에 대한 가용한 출판자료들은 과거 약 20여 년 이내에 개발되어져 왔다. 그러나, 오늘날까지 계획단계에서의 세부적인 정보, 장비의 선정, 작업전략 설계, 효능의 예측 등을 포함한 포괄적이고 기술적인 환경준설에 대한 지

침서가 존재하지 않고 있다.



[그림. I-라-34] 환경준설의 개념 모식도 및 과정들

- 환경준설작업의 목적들은 통상 다음과 같은 내용을 포함하고 있다.
  - 제거될 오염퇴적물을 깨끗한 퇴적물을 과도하게 제거하지 않고 충분히 정확하게 준설
  - 후속의 처리 혹은 처분 조건을 고려하여 적절한 작업기간내에 준설
  - 오염퇴적물의 재부유를 감소/제어, 재부유 퇴적물의 하류방향으로의 이동 제어, 수층과 대기로 관심 오염물질들의 누출 감소/제어
  - 잔류물 형성을 감소/제어

[표. I-라-11] 환경준설에서 사용되는 장비들의 유용성

준설 형태	유용성	제조사	분류
Enclosed clamshell	세계적	다수	M
Backhoe	세계적	다수	M
Cutterhead	세계적	다수	H(M)
Clean-up	일본	TOA Harbor Works	H(M)
Matchbox	네덜란드	Volker Stevin Dredging Co.	H
Refresher	일본	Penta Ocean Construction Co.	H(M)
Plain suction	세계적	다수	H



Dustpan	미국	다수	H
Hopper dredges	세계적	다수	H
Horizontal auger	세계적	다수	H(M)
Delta	미국	Delta Dredge & Pump	H(M)
PNEUMA	세계적	PNEUMA S.R.L. (Italy)	H(P)
Oozer	일본	Toyo Construction Co.	H(P)
Airlift	세계적		H(P)
Bucket wheel	세계적		H(M)
Screw-impeller	일본	Ube Industries, Ltd.	H(M)
Disc-bottom	네덜란드	다수	H(M)

주) M:기계식, H:유압식, H(M):유압식(기계식 컷터 포함), H(P):유압식(정압펌프)

- 일반적으로 특별한 사업 목적에 적합한 유형의 준설 장비들을 선택하는데 있어서, 다음과 같이 주요 요인들이 고려되어야 한다.
  - 규모 요인 - 수심, 준설지의 크기, 준설심도. 수심은 준설장비가 통과하기에 충분히 깊어야 한다. 어떤 특수 준설선을 사용하기에 적절한 공간이 있어야 한다.
  - 물리적 요인 - 기상조건과 준설물질의 특성에 제한을 받지 않아야 된다. 해황조건은 준설선의 위치제어에 영향을 미친다.
  - 작업 조건 - 해양구조물 인근에서의 준설과 같이 제한된 작업 면적 혹은 해상교통으로 인하여 작업 요인이 제한을 받는다.
  - 환경 요인 - 수질 해양생태계에 대하여, 특히 오염퇴적물의 처분과 관련된 작업시, 준설 및 처분 작업의 환경 영향과 관련된다.
- 특히, 환경준설을 위한 장비들을 선택하는 경우에는 다음과 같은 사항들의 검토가 필요하다.
  - 퇴적물의 준설(흡입)방법: 기계식, 유압식, 혼합식, 기타
  - 퇴적물의 준설(흡입)특성: 굴삭, 흡입, 커터 장착 여부, 차폐막 장착 여부
  - 준설 깊이 제어: 박층준설 시 최소 준설 가능 깊이 등
  - 준설시 양수량과 함니율: 유압식일 경우 평균 양수량과 함니율
  - 단위시간당 준설범위: 퇴적물 조성별 단위시간당 준설범위 및 물량
  - 준설장치(흡입구) 위치 제어 방안
  - 탁도(부유물질) 발생 정도
- 환경준설에서는 사용되는 준설장비의 특성 그리고 해저면 퇴적물 조성, 유속, 유향 등 해역의 특성에 따라 탁도의 발생 정도가 달라진다. 그러므로 준설장비별 탁도 영향을 예측·평가하여 그 결과를 기초로 준설장비를 선정하는 것이 타당하다.

[표. I-라-12] 환경준설에 사용되는 준설선별 탁도 발생원단위 사례

형식	사양	입경 분율		발생 원단위 ( $\times 10^{-3}t/m^3$ )	시간당 발생량 ( $\times 10^{-3}t/s$ )	수거 능력 ( $m^3/h$ )
		실트 이하	점토 이하			
밀폐형 그랩	8m <sup>3</sup>	80.0	14.0	3.5	0.185	190
펌프식 오니준설선	4,000PS	90.0	40.0	1.35	0.13	347
펌프식 오니준설선	1,590PS	99.5	50.5	1.34	0.080	215
펌프식 오니준설선	147PS	98.0	57.0	0.44	0.017	215
고농도 오니준설선		93.7	64.8	0.21	0.012	200

[표. I-라-13] 일반 준설에 사용되는 준설선별 탁도 발생원단위 사례

공법	사용선박	형식	취급 토사			발생원단위 ( $10^{-3} t/m^3$ )
			조립토	세립토	실트, 점토(%)	
준설공정	펌프준설선	4,000PS (2,942KW)		○	99.0	36.35
				○	98.5	22.47
				○	69.2	45.23
	그랩준설선	8m <sup>3</sup>		○	74.0	24.83
			4m <sup>3</sup>		○	58.0
				○	54.8	84.20

(마) 국내 수거 공법 검토

- 현재 해양오염퇴적물 수거는 해양환경관리법 제70조 제1항5호(퇴적오염물질수거업), 같은 법 시행령 제56조 관련 별표11(기술능력 기준) 및 같은 법 시행규칙 제36조 제3항 관련 별표14(등록기준)에 의거 퇴적오염물질수거업 등록 업체가 펌프설비를 갖춘 퇴적오염물질전용수거선을 사용하여 해양오염퇴적물을 수거하도록 규정되어 있으며, 퇴적오염물질수거업 등록업체는 총 19개(11. 5. 기준)이다.
- 주요 수거 공법에 대한 조사(2010년) 결과<sup>21)</sup>, 총 13개 공법(전용수거선) 중 국내에서 개발된 선박은 4척, 미국 또는 일본에서 정화사업에 사용되었던 오니준설선 등 장비를 중고로 도입한 선박은 5척, 바지선을 활용한 선박은 4척이다. 퇴적오염물질전용수거선에 설치된 펌프설비의 종류는 진공흡입식 펌프 5개, 원심펌프 1개, 유압트래쉬펌프 2개, 기압차 펌프 2개, 우즈펌프 1개 등 다양한 펌프설비가 활용되고 있다. 상기 등록된 전용수거선 13척 중 총 7척은 실제 외국의 오염퇴적물 정화사업에서 사용된 장비들이다. 등록된 전용수거선 중 4척은 수거 가능 심도가 13 ~ 20m이며, 나머지는 수거 가능 심도가 9m까지로 나타났다. 등록된 전용수거선 중 1척은 선박 내부에 해양오염퇴적물을 수거하기 위한 설비

---

이외에 수거한 퇴적물의 오염도 저감을 위한 처리장치와 수처리 설비가 설치된 것으로 보고되었다.

- 해양오염퇴적물의 수거(준설) 공법 검토에는 다음 7가지 사항이 필요하다.
  - 퇴적물의 준설(흡입)방법: 기계식, 유압식, 혼합식, 기타
  - 퇴적물의 준설(흡입)특성: 굴삭, 흡입, 컷터 장착 여부, 차폐막 장착 여부
  - 준설 깊이 제어: 박층준설 시 최소 준설 가능 깊이 등
  - 준설시 양수량과 함니율: 유압식일 경우 평균 양수량과 함니율
  - 단위시간당 준설범위: 퇴적물 조성별 단위시간당 준설범위 및 물량
  - 준설장치(흡입구) 위치 제어 방안
  - 탁도(부유물질) 발생 정도

### ① 국내 수거 공법 검토

- 2010년 조사결과를 상기 7가지 사항으로 평가한 결과를 종합하면 다음과 같다.

#### ㉠ 준설(흡입)방법

- 현재 우리나라의 퇴적오염물질 수거공법(총 13개)은 모두 유압식 즉, 펌프설비를 사용하여 해양오염퇴적물을 흡입하여 수거하는 방법이 사용되고 있다. 현행 해양환경관리법 시행규칙 별표 14 해양환경관리업의 등록기준 중 5. 퇴적오염물질수거업에는 펌프설비에 의한 수거만을 규정하고 있으며, 기계식, 혼합식 또는 기타 수거공법은 규정되어 있지 않다. 한편, 미국, 유럽, 일본 등에서는 환경준설(Environmental Dredging)의 개념을 도입하여, 다양한 수거공법이 활용되고 있다. 그러므로 향후 수거시 환경에 영향을 최소화 할 수 있는 다양한 수거공법의 개발 및 현장 적용이 시급한 것으로 사료된다.

#### ㉡ 준설(흡입)특성

- 현행 수거공법 중 대부분의 수거공법은 대상 퇴적층이 오니층일 경우, 수거에 효과적인 공법이다. 사질 등 다양한 형태의 퇴적층에 적용할 수 있는 공법은 3개 공법으로 제한적이다.

#### ㉢ 준설 깊이 제어

- 대상 해양오염퇴적물의 수거시 깊이 제어는 두 가지 방식으로 구분된다. 먼저 백호우 등 장비를 수동 조작에 의해 깊이를 제어하는 방식(6개 공법)과 프로그램에 의한 기계적 조작에 의해 흡입구를 제어함으로써 깊이를 제어하는 방식(7개 공법)이 있다. 또한, 수거시 해황(해류, 파랑 등)의 영향을 받지 않고, 수거선박의 정밀한 자세제어가 가능한 공법은 전체 13개 공법 중 6개 공법이다. 현행 수거공법으로는 수거선의 자세제어가 어려우며, 전체 수거공법 중 약 절반인 6개 공법이 수동 조작으로 깊이를 제어하므로, 정밀한 수거가 이루어지기는 매우 어렵다. 그러므로 현행 수거공법에 의한 준설 깊이 제어는 시급히 개선할 필요가 있는 것으로 사료된다.

#### ㉣ 양수량 및 함니율

- 현행 수거공법에 의한 양수량은 최소 100m<sup>3</sup>/h, 최대 623m<sup>3</sup>/h, 평균 280m<sup>3</sup>/h (표준편차 154

m<sup>3</sup>/h)이며, 함니율은 10 ~ 30%(최대 40%)로 나타났다. 평균 양수량에 함니율을 고려하면 해양오염퇴적물의 실제 수거량은 약 28 ~ 84m<sup>3</sup>/h인 것으로 평가할 수 있다. 펌프설비에 의한 수거일 경우, 공법의 특성에 따른 함니율에 의해 해양오염퇴적물의 실제 수거량이 결정된다. 또한, 운반, 오염도 저감을 위한 중간처리 등을 위해서는 처리대상 물량을 감축하고, 탈수하는 과정이 반드시 필요하다. 그러므로 향후 해양오염퇴적물 수거 효율을 높이고, 탈수 등 중간처리 비용을 저감시킬 수 있는 다양한 수거공법을 개발할 필요가 있는 것으로 사료된다.

#### ㉞ 단위시간당 준설범위

- 현행 수거공법의 단위시간당 준설범위에 대한 관련 자료는 없으므로, 현 단계에서 평가할 수 없다. 그러나 향후 관련 자료 축적하고, 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

#### ㉟ 준설장치(흡입구) 위치 제어

- 대상 해양오염퇴적물의 수거시 준설장치(흡입구) 위치 제어는 두 가지 방식으로 구분된다. 먼저 백호우 등 장비를 수동 조작에 의해 흡입구를 제어하는 방식(6개 공법)과 프로그램에 의한 기계적 조작에 의해 흡입구를 제어하는 방식(7개 공법)이 있다. 또한, 수거깊이 제어의 경우와 같이 해황에 영향을 받지 않고, 수거선의 정밀한 자세제어가 가능한 공법은 6개 공법뿐이므로, 대부분의 수거공법에서 흡입구의 정밀한 위치제어는 매우 어려운 것으로 판단된다. 그러므로 향후 흡입구의 정밀한 위치 제어는 시급히 개선할 필요가 있는 것으로 판단된다.

#### ㊱ 탁도(부유물질) 발생정도

- 현행 수거공법의 탁도(부유물질) 발생정도에 대한 관련 자료는 일부에 국한되므로, 현 단계에서 평가하기는 매우 제한된다. 다만, 대표적인 2개 공법의 특성조사 결과, 수거 작업시 수거 펌프를 중심으로 반경 20m 경계선의 바닥으로부터 2m 상부에 위치한 수층에서 측정된 부유물질 농도가 주변해수의 부유물질 농도보다 20mg/L 이상을 초과하지 않는 것으로 사료된다. 그러나 향후 다른 수거공법에 대한 특성조사를 실시하여 수거시 해양 환경에 영향이 발생하지 아니하는지를 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### ② 외국의 환경준설 공법 검토

- 현재 국내에서는 유압식에 의한 펌프설비로 해양오염퇴적물을 수거하고 있다. 그러나 미국, 유럽, 일본에서는 기계식, 유압식, 혼합식, 기타 공법 등 다양한 공법들이 해양오염퇴적물 준설(수거)에 사용되고 있다. 표 I-라-14에 대표적인 수거공법의 특성을 나타내었다.

21) 해양오염퇴적물 처리방안 및 기술개발[III], 국토해양부, 2010. 10(연구기관: 한국해양연구원)

[표. I-라-14] 수거공법의 특성 비교

구분	기계식 준설		유압식 준설		
	클램셸	버킷	커터헤드	단순흡입	유압식
준설능력 (m <sup>3</sup> /h)	45~200		20~90		지역특성
수직정확도 (cm)	15	15	10	10	15
수평정확도 (cm)	10	10	10	10	10
준설깊이 (m)	N/A	N/A	15	15	45
퇴적물 재부유 가능성	고	고	중	저	저
퇴적물 유출 가능성	고	고	중	중	중
기동성 및 기기운반성	고	고	저	저	저
퇴적물 제거능력	고	고	저	저	중
상대적 제거 비용	저	저	고	고	중
외부환경에 따른 운영 유연성	고	고	고	저	저

- 현재 선진국에서는 환경준설(Environmental Dredging)의 개념이 정착되어, 과도한 준설을 방지하고, 높은 정밀도로 오염된 퇴적층만을 제거하며, 수거시 오염퇴적물의 확산 및 부유물질의 발생을 억제하는 다양한 수거공법들이 사용되고 있다. 혁신적인 준설공법으로는 환경그랩, 환경오거준설선, 디스크바닥준설선, 국자형준설기, 저혼탁준설헤드 등이 사용되고 있다.

### ③ 개선방안

- 국내 해양오염퇴적물 수거공법의 선진화를 위해서는 다음과 같은 개선이 필요할 것으로 사료된다.

#### ㉞ 펌프설비 이외의 다양한 수거공법 개발

- 현행 수거공법은 유압식 즉 펌프설비에 의한 흡입으로 해양오염퇴적물을 수거하므로, 수거시 다량의 해수를 포함하게 되므로, 수거후 운송 및 중간처리를 위해서는 대상물량을 감축할 필요가 있다. 또한, 오염도를 낮추기 위한 중간처리는 처리 대상물질의 함수율을 공정에 적합한 수준으로 저감시킬 필요가 있다. 이 경우, 수거 직후 탈수 등을 위한 공정에 많은 시간과 비용이 요구되므로, 미국, 유럽, 일본 등의 환경준설에 사용되는 수거공법과 같은 수거시 환경에 미치는 영향이 작은 기계식, 유압식, 혼합식 및 기타 혁신적인 수거공법을 국내에 시급히 도입하여 우리나라의 특성에 적합한 수거공법을 개발하고, 이를 실제 정화사업에 사용하는 것이 타당한 것으로 사료된다.

㉔ 선박항행을 방해하지 않는 혁신적인 수거공법 개발

- 정화사업 현장에서는 오탉방지막이 사용되는데, 이 경우 대형 선박의 통항이 제한될 수 있다. 일본의 경우 소형 이동식 오탉방지막을 수거선에 설치하여 기계식, 유압식 또는 환경그랩 등을 사용하여 해양오염퇴적물을 수거하고 있다. 이러한 공법은 선박의 항행을 방해하지 않고, 인접지역에 선박이 통행할 경우, 신속히 이동할 수 있으므로 항로구역에서도 해양오염퇴적물의 수거가 가능하다. 또한, 사용하는 오탉방지막은 해저면까지 설치할 수 있으므로 수거과정에서 부유토사의 확산 등 2차오염을 방지할 수 있다. 그러므로 이러한 수거공법 역시 국내 정화사업에 도입이 시급한 것으로 판단된다.

㉕ 정화사업시 대상 해역별 최적 수거공법 선정을 위한 기술심사 도입

- 외국의 정화사업에서는 대상 해역별 특성에 적합한 수거공법과 처리방안을 선정하기 위한 사전 기술심사(Prequalification: PQ)가 보편화 되어있다. 현재 우리나라의 정화사업에서는 가격에 의한 투찰로 사업수행자를 선정하고 있으므로, 선정된 사업수행자의 수거선 또는 수거공법으로 수거시 수거효율이 낮거나, 대상 해역의 특성에 적합하지 않을 경우, 사업추진이 지연되는 등 많은 문제점이 발생하고 있다. 그러므로 이러한 문제점을 보완하고, 효율적인 정화사업 추진을 위해서는 향후 대상 해역별 최적 수거공법 선정을 위한 사전 기술심사(PQ) 제도의 도입을 검토할 필요가 있는 것으로 사료된다.

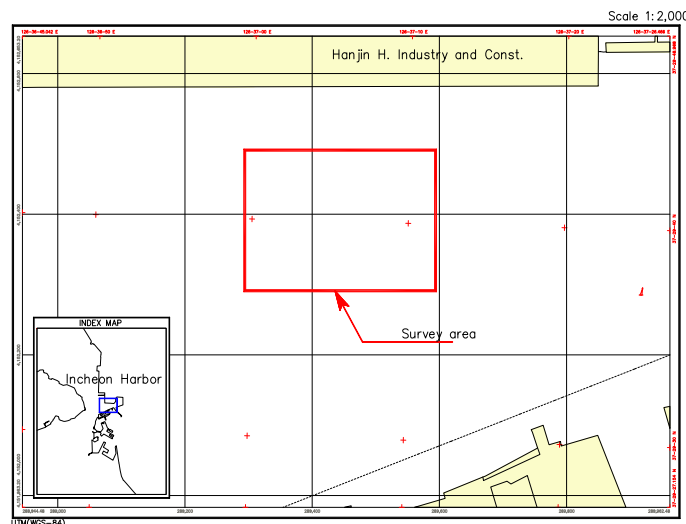
마. 선박부착형 오탉확산방지 시설 설계 및 성능시험

(1) 오염지역 사전조사 및 현장탐사기술 개발

(가) 현장조사를 통한 해저면 탐사기술의 검토

① 현장조사 방법

- 현장조사 지역은 인천 북항, 만석부두 전면해상을 선택하였다. 최근에 항만 준설이 이루어진 곳으로서, 오염퇴적물의 존재 가능성이 높으므로 이 지역을 선정하여 수심, 지자기, 해저 영상, 저층탐사를 수행하였다. 해상에서의 위치는 DGPS(Trimble DSM132)에 의하여 파악하였다. 정확도는 1m 미만이다.



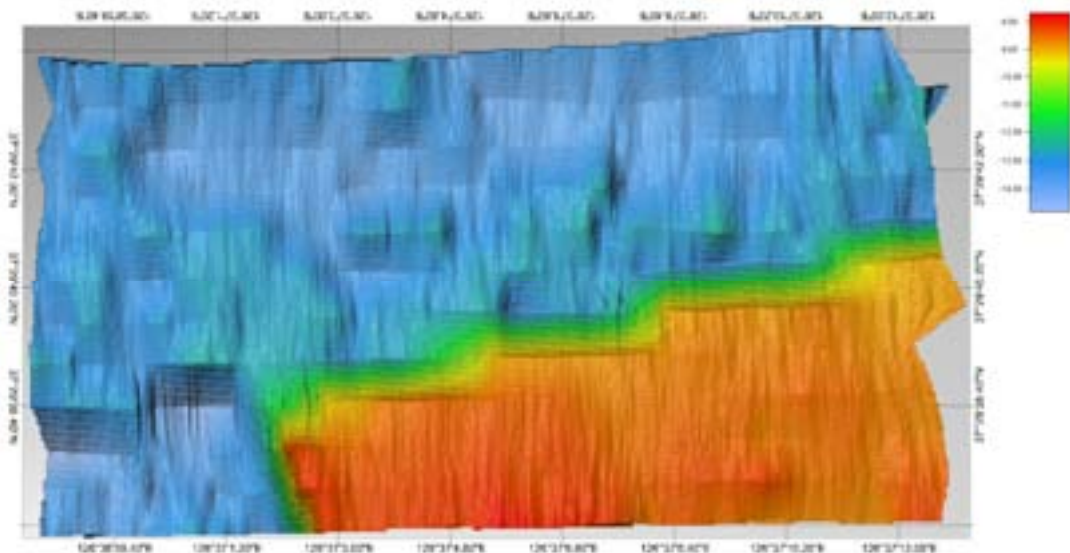
[그림. I-마-1] Site location of field survey

- 수심측량은 소나테크의 음향측심기(AquaRuler 200S)를 이용하였다. 측심 간격을 20m로 하였으며, 사전에 설정한 항적선에 따라 이동하면서 수심을 측량하였다. 작업 중의 음속 변화에 따른 영향을 보정하였으며, 인천검조소의 실시간 조위정보를 이용하여 조위를 반영하였다.
- 지자기 조사는 미국의 Marine Magnetics 사의 Overhauser 센서를 이용하였다. 작동 범위는 18,000~120,000nT의 범위에서 작동하며 조사선과 간격을 30m 이상 유지하여 조사선에 의한 영향을 최소화하였다. 자력계의 위치는 DGPS의 자료를 기준으로 예인거리를 반영하여 결정하였다. 국제 지자기장값과 일변화를 반영하여 지자기 이상치를 산출하였다. 국제지자기장에 대한 정규보정은 IGRF11를 이용하였다.
- 해저면 영상조사는 소나테크의 음파탐지기 SeaView400을 이용하였으며 DGPS 값을 이용하여 위치정보를 연동하였다. 해저 전면을 주사할 수 있도록 수심에 따라 주파수를 조절하여 400kHz의 고주파로 수행하였으며 좌우현의 폭을 각각 60m로 유지하였다.
- 지층탐사는 소나테크의 탄성파탐사 장비인 Z-TAM II를 이용하였다. 탐사 심도는 최대 600m이며 분해능은 6~8cm, 주파수는 2~7kHz로서 기존의 3.5kHz 지층 탐사장비에 비해 지층 투과력 및 해상도가 우수하다.

## ② 현장조사 결과

### ㉠ 수심

- 조사지역에서의 수심은 DL(-) 7.9~14.3m 범위로 나타났다. 북측이 상대적으로 깊은 수심 14m 내외를 보였고, 동남동 방향으로는 수심이 8m 범위를 가지는 것으로 나타났다. 북측의 수심이 깊은 것은 선박운항의 안전성을 확보하고 원활한 항만기능을 지원하기 위하여 2009년 시행된 항로 증심준설사업의 결과이다(MMK, 2009).



[그림. I-마-2] Distribution of sea water depth in the survey area

### ㉡ 지자기

- 지자기값에 대한 일보정은 임의의 지점을 기준점으로 선정하고 작업시간 전, 중, 후의 3회에 걸쳐 기준점의 자력을 측정하여 관측된 값을 선형적으로 보정하였다. 기준점은 조사지역으로부터 서쪽으로 약 150m 떨어진 곳을 선정하였으며, 기준점에서의 측정된 자력

값은 표 I-마-1과 같다.

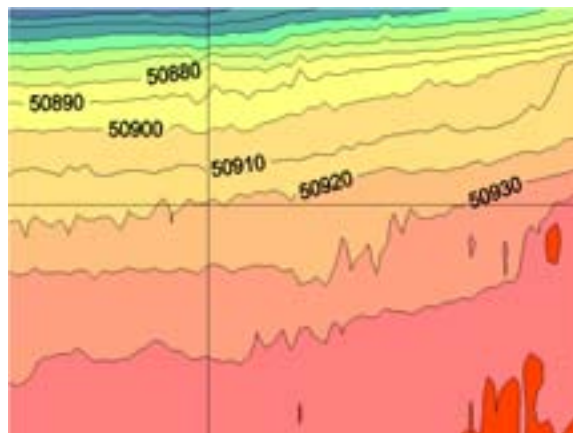
[표. I-마-1] Magnetic observations at a reference point

	Before survey	Mid-survey	After survey
Observation	50934nT	50928nT	50937nT
Difference	-	-6nT	+3nT

- 정규보정으로써 국제표준지자기장(IGRF)를 이용하였다. 조사지역이 넓은 경우 위치별 보정이 필요하나 본 연구에서는 중앙 지점에 대한 IGRF 계산 결과를 이용하였다. 그 결과는 표 I-마-2와 같다. 지자기장의 일 보정 후 조사지역에 대한 총 자력값의 분포는 그림 I-마-3과 같다. 북쪽이 다소 낮은 59,000nT 이하를 보이고, 남쪽은 그 이상의 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 일 보정 후 국제 표준지자기장 값을 제하여 자기 이상치를 산정하였으며, 자기 이상치에 대한 조사지역에서의 분포는 그림 I-마-4과 같다.
- 지자기 탐사는 특정 지점에 존재하는 자성체의 존재 유무를 파악하기 위하여 수행되는 것이 일반적이다. 조사대상 지역의 자성체는 표준지자기와 다른 편차를 유발한다. 특히 철을 다량으로 함유한 철 구조물, 철성분을 포함한 합금 및 조사구역에 존재하는 암층 등이 대표적인 자성체이다. 전자력의 분포는 50,783~50,962nT의 분포를 보인다. 북쪽에서는 비교적 낮은 자력치가 나타났으며 남서쪽에서 대체로 높은 자력치가 얻어졌다. 전자력 이상치의 범위는 -181.3~-8.3nT의 분포를 보였다. 조사구역의 북측에서는 표준지자기 값에 비해 차이가 상대적으로 큰 값을 보였다.

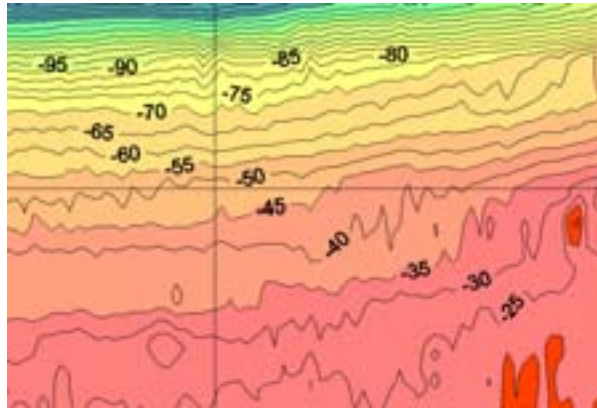
[표. I-마-2] Results of IGRF at the center of survey area

Date	Declination in decimal degrees	Inclination in decimal degrees	Horizontal Intensity in (nT)	East Component (nT)	North Component (nT)	Vertical Component (nT)	Total Field (nT)
2012.06.22	-7.94	54.10	29888.30	-4131.04	29601.44	41282.30	50966.06



[그림. I-마-3] Total magnetic field in the survey area (in nT)

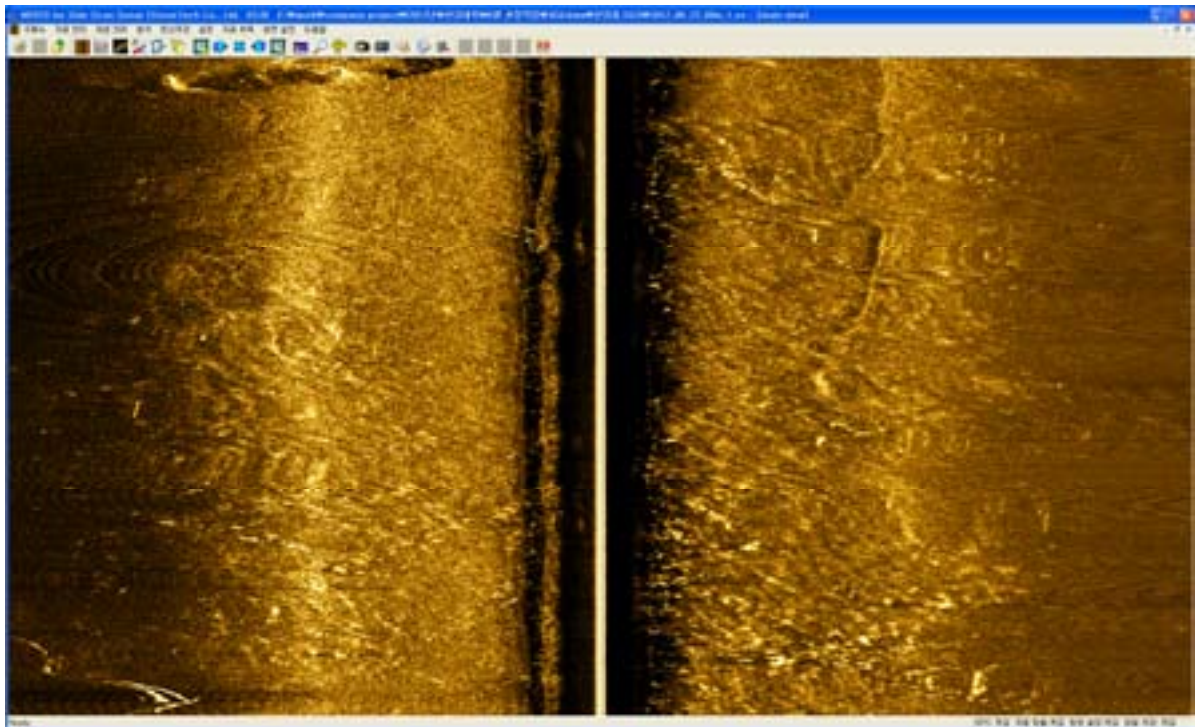




[그림. I-마-4] Distribution of magnetic anomaly (in nT)

### ㉔ 해저영상

- 사이드스캔소나(Sidescan Sonar)를 이용하여 얻어진 자료는 모자이크 영상구성과 후처리과정을 통해 조사 지역에 대한 영상도로 작성된다. 영상기록으로 로프의 존재와 앵커에 의한 바닥 교란 등이 확인되었다. 그 외에 저층에서의 특이한 상태는 파악되지 않았다.

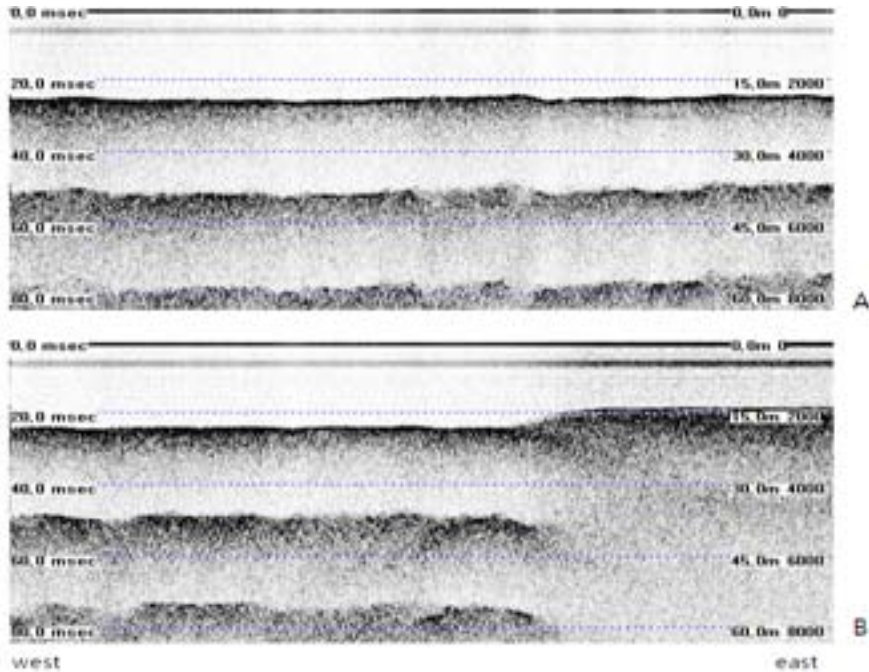


[그림. I-마-5] Ropes shown in sidescan sonar images in the survey area

### ㉕ 지층

- 탄성파탐사 장비를 이용하여 해저층으로부터 반사되어 오는 음파를 디지털 신호로 처리한 결과 준설작업이 이루어진 북측과 퇴적층이 아직 남아 있는 남측의 저층을 확인할 수 있었다. 암석이나 퇴적물 내에서 음파 전달 속도를 비교해 보면 미고결 퇴적물에 비해 고결퇴적물에서 더 빠르게 나타난다. 그리고 포화된 퇴적물이 불포화된 퇴적물보다 음파 전달속도가 더 빠르다. 그림 I-마-6은 천부지층탐사기(sub-bottom profiler)를 이용하여 얻은 조사지역에서의 결과를 보여주고 있다. 그림 I-마-6의 A는 북측의 동서 단면에 대

한 탐사 영상을 나타내고, B는 남측의 동서단면에 대한 영상을 나타내고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 북측에서는 준설사업이 완료되어 비교적 퇴적물이 없어 2, 3차 반향파를 나타내고 있으나 남측의 동쪽에서는 퇴적물이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 수심이 비교적 낮은 남동쪽의 지역에서는 퇴적물이 약 3m 내외로 존재하는 것을 알 수 있다. 반면 상대적으로 수심이 깊은 북측 지역에서는 표층에 세립질 퇴적물이 존재하고 표층 아래로는 고히름층이 존재하는 것을 확인할 수 있다.



[그림. I-마-6] Sub-bottom profiles in the survey area  
(A: northern section, B : southern section)

#### (나) 자력탐사 활용성 검토

- 호소나 해양에서의 오염퇴적물 조사는 일반적으로 채취된 시료를 분석하여 이루어진다. 이러한 조사는 격자망을 구성하여 이루어지며 보간법을 통해 퇴적물의 두께나 오염물 농도에 대한 도면이 성과물로 얻어진다. 조사 지역이 넓은 경우에는 시료 채취 지점의 간격이 너무 커서 보간법에 의한 결과의 신뢰성이 떨어지기 마련이다. 신뢰성 높은 조사를 위해서는 보다 많은 곳에서 시료를 채취하는 것이 간단한 방법이나 비용이 크게 증가하여 현실적으로 불가능할 수 있다.
- 이러한 시료조사 방법의 대안으로 적용이 가능한 것이 지구물리학적 방법이다. 최근에는 하천이나 호소에서 오염퇴적물의 조사를 위해 음향, 전기, 자력 탐사 등의 방법이 시도된 바 있다.
- 음향탐사법을 이용하여 오염퇴적물의 두께를 파악하거나, 오염도 분류, 그리고 오염물 흡착에 영향을 미치는 퇴적물의 밀도나 조성 등을 조사한 연구도 있다. 음향탐사법에 의한 조사법의 단점은 바닥에 식생이 분포하거나 기포가 차있는 퇴적층에서는 적용이 곤란하다는 것이다. 이러한 문제로 인해 미국의 EPA에서는 추가의 연구를 더 이상 진행하지 않았다.

- 자력탐사는 기존의 시료 채취에 의한 방법의 대안으로 평가받고 있다. 자력탐사법은 토양 오염도 조사와 대기오염물질 분포 조사에 적용된 바 있다(Locke and Bertine, 1986). 이후 오염된 토양의 대자율과 탄화수소, 중금속, 기타 연소와 관련된 오염물질의 존재와의 관계가 밝혀졌다(Pozza et al., 2004). 자력 특성과 오염퇴적물의 두께 등이 밝혀지기도 하였다. 캐나다의 온타리오 호 해밀턴 항에서 수행된 연구에서는 중금속의 농도와 자성 산화물의 농도가 밀접하게 관련되어 있는 것으로 나타났다. 자력탐사에 의한 퇴적층의 오염도는 퇴적물이 지속적으로 쌓여 있어도 파악할 수 있는 장점이 있다(Mayer et al., 1996). 홍콩에서도 이와 유사한 연구 결과가 보고된 바 있다(Chan et al., 1997).
- 대자율을 직접 측정하는 방법은 신속하고 신뢰성 있는 퇴적물 오염도 분석방법이지만 몇 가지 단점을 갖고 있다. 첫째 이 방법 역시 퇴적물의 시료 채취를 통해 오염도를 분석하여야 하며, 둘째 측정치는 특정 지점의 값으로서 보간법을 통해 오염지도가 작성되어야 한다.
- 이러한 문제를 극복한 방법이 Pozza et al.(2004)에 의한 방법이다. 이들은 시료채취에 의해 파악된 오염도와 수면에서 자력계를 이용하여 측정된 대자율과의 관계를 도출하여 원격으로 보다 신속하게 오염도를 조사할 수 있음을 보여주었다. 이 방법의 가장 큰 장점은 단 시간 내에 오염현황을 신속히 분석할 수 있다는 것이다. 자력탐사에 의한 방법은 시료 채취 단독에 의한 방법에 비해서 보다 정밀한 오염현황도를 작성할 수 있다. 시료채취에 의한 방법을 완전히 대체할 수는 없지만, 넓은 지역에 대해 매우 효율적이고 정밀한 오염현황 조사가 가능하다.
- 현장에서 조사되는 총 자력값(total field or magnetic flux density, B)은 대자율에 비례하여 다음과 같이 나타낸다.

$$B = H + 4\pi M = (1+4\pi\kappa)H$$

- 여기에서 H는 field strength(Oersteds)이고, M=자화강도(Oersteds)이다. 따라서 B를 측정함으로써 바닥의 오염퇴적물에 대한 대자율에 대한 정보를 간접적으로 얻을 수 있다. 이러한 방법은 이미 고고학이나 환경관련 조사방법으로 지표면에서 주로 적용되어 오고 있다.
- 암성 생성 당시 자기장에 의해 자화된 것이 현재까지 보존되는 것을 잔류자기라고 한다. 이러한 잔류자기는 토양이나 퇴적물 표면에서 나타날 수 있으므로 종종 자력탐사 결과에 영향을 미치게 된다. 그러나 잔류자기는 총 자력값에서 추출할 수 없다. 그러나 잔류자기량이 작거나 주변 자력값에 비해 무시할 수준이면 겉보기 대자율(apparent magnetic susceptibility,  $\kappa_a$ )이 가능하다.

$$\kappa_a(r,\theta) = 1 / \{2\pi FH(r)\Gamma(\theta)S(r,\theta)\}$$

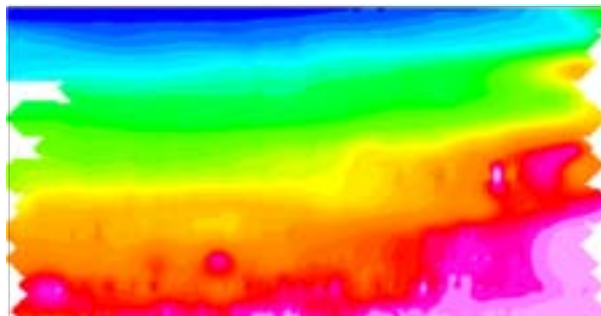
- 여기에서  $H(r) = e^{-hr}$ 는 하향연속 연산자,  $\Gamma(\theta)$ 는 자극화 변환 함수,  $S(r,\theta)$ 는 자력원을 사각형 프리즘이라고 가정하여 고려되는 기하학적 요소,  $r$ 는 주파수로서 단위 길이당 radian의 값을 가진다.  $\theta$ 는 주파수 위상각이다. 자극화 변환 함수와 기하학적 요소의 계산에는 지자기의 복각과 편각 등을 고려한다.
- 자력측정치에 대한 주파수 영역 필터링의 목적은 자료의 conditioning과 자기 이상치의 특성을 쉽게 해석할 수 있도록 하는 것이다. 이러한 주파수 영역 관련이론은 1969년 Allan Spector의 박사학위 논문에서 제안되었다. 자력 프로파일이나 격자는 삼각함수의

무한급수로 표현된다.

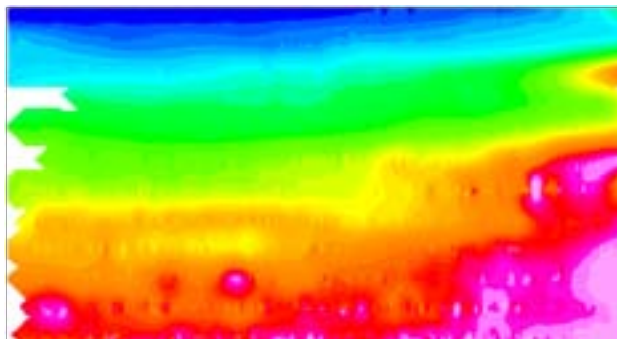
- 수면에서 얻어진 자력측정치는 필터링을 통해 바닥 저층에서의 자력값으로 환산되며, 지자기의 기하학적 보정 등을 거쳐 걸보기 대자율 혹은 자화율로 계산된다. 이러한 연산과정에서 먼저 국제 지자기장(International Geomagnetic Reference Field, IGRF)이 고려되어야 한다. IGRF는 국제측지지구물리연맹(International Union of Geodesy and Geophysics)에서 매 5년마다 정기적으로 발표하는 자료로서 전 세계의 측정치와 위성관측치를 토대로 만들어진 지구전체 규모의 표준 지자기장이다.
- 자력측정 결과로부터 대자율을 계산하기 위해서는 국제 지자기장을 이용하여 현장에서의 표준 지자기값을 보정해 주어야 한다. 현장에서 채취된 퇴적물 시료를 이용하여 측정된 실제 대자율 값과 수면에서 관측된 자력값으로부터 얻어진 걸보기 대자율로부터 관계를 도출한 후 걸보기 대자율을 이용할 수 있다. 잔류자기 값을 관측 자력값으로부터 분리하는 것은 곤란하므로 대자율 계산결과는 다소 높게 계산될 수 있다. 따라서 걸보기 대자율은 퇴적층의 실제 대자율에 대한 정성적 지표로서 이용되어야 한다.

걸보기 대자율을 추정하기 위한 자료처리 과정은 다음과 같다.

1. 일 보정
2. 위치보정
3. 극치 또는 outlier 제거
4. 격자망 구성 - 최소곡률 알고리즘
5. 수심 보정
6. 자극화 변환
7. 자성물질에 의한 자장 영향의 제거



a) 전자기값의 분포



b) Downward continuation 필터링 후 대자율 분포

[그림. I-마-7] Oasis montaji™를 이용한 자력값의 해석 결과

---

## (2) 선박부착형 오탉방지막 설계 인자 도출

### (가) 오탉방지막의 효과 및 연구동향

- 항만 및 어항공사 전문시방서(2005)에서는 오탉 방지막의 규격으로서 오탉방지막의 재료, 앵커, 구조형상과 시공에 대해서 규정하고 있으나, 오탉 방지 효과를 고려한 체원이나 규격은 기술하지 못하고 있다. 시방서에서는 오탉 방지막의 구조 형상 요건으로서 단지 내 구성, 부력유지와 복원력, 방지막의 형상 유지를 위한 steel chain을 규정하고 있을 뿐이다. 시공에 대한 설명에서는 바람이나 유수 및 파랑 등에 의하여 파손 또는 유실되지 않도록 하는 것과, 매 공사일 현장 점검, 해저면에 설치하는 앵커의 형식, 방지막의 이음부, 선박 통행을 고려한 설치 등을 언급하고 있다. 오탉방지막의 설치는 사전에 시험 설치하여 오탉수의 확산방지 효과 등 본래 목적을 충족하는지의 여부를 검토한 후 공사를 실시하여야 하는 것으로 되어 있으나 확산방지 효과에 대한 정략적 기준 등이 설정되어 있지 못한 실정이다.
- 홍 등(2008)은 오탉방지막이 설치된 경우에 대해 수리모형실험과 3차원 수치 모형을 이용하여 오탉방지막 주변에서의 유속특성과 방지막의 투수율에 따른 상하류 수위차를 분석한 바 있다. 이들의 결과에서는 방지막의 깊이가 지나치게 증가하는 경우 하단부에서 유속이 크게 증가하여 퇴적물이 재부유될 가능성을 지적하였으며, 방지막의 투수율은 조밀도가 어느 정도 수준 이상이 되면 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.
- 오와 송(2003)은 우리나라와 일본과의 오탉방지막 설계 기준 비교를 통해 일본의 경우 파고가 높거나 유속이 빨라서 해상조건이 험할 경우 설치하지 않고, 설치하더라도 공사종류별, 해상조건별로 방지막의 형식을 달리하여 설계하고 있음을 언급하였다. 일본의 경우 수심에 따라서 부체의 높이가 조정되는 부침식 등 다양한 오탉방지막이 설계되어 시공되고 있다.
- 조위 변화에 따른 오탉방지막 계류라인의 거동을 분석한 경우도 있다(홍과 김, 2002). 조위에 따라 구조물로서 오탉방지막의 안정성을 해칠 수 있으며, 오탉방지막의 안정성을 위해서는 계류선의 초기 직선 긴장각 또한 고려해야 하는 것으로 나타났다.
- 3차원 수치모형을 이용한 오탉방지막의 오염물질 및 준설토 확산에 대한 저감효과를 분석한 사례도 있다(홍, 2010). 모형 적용결과, 점착성토사의 경우 침강 및 재부유 등의 특성에 따라 접근 유속이 작은 경우 오탉방지막에 의한 확산저감효과가 있으며, 점착성 토사가 오탉방지막에 근접해서 투입되는 경우 오탉방지막의 설치 위치, 막체 깊이 등은 유속에 따라 조절할 필요가 있는 것으로 나타났다. 비점착성 토사의 경우에는 오탉방지막을 설치하지 않아도 확산범위나 농도는 크지 않았다. 수치모형 실험을 위한 오염물질에 대한 설정이 명확하게 제시되어 있지는 않으나 오탉방지막의 효과는 크게 나타나는 것으로 평가되었다.
- 해역 점성토 지반에서 오탉방지막을 고정시키기 위한 기초 앵커에 대한 연구 또한 이루어진 바 있다(권 등, 2003). 중력식이나 닻가지형의 앵커가 이용되고 있으나 이들의 연구에서는 suction 콘크리트 블록을 제안하였다.
- 준설풀공사 시에 발생하는 부유물질의 확산과 이를 막기 위한 오탉방지막의 효과에 대해 현장 조사 연구도 이루어진 바 있다(김과 정, 1998). 부표에 의한 조사해역의 최강 유속은 60cm/s 이상으로서, 부유물질 농도 조사시에는 29cm/s로 나타났으며, 오탉방지막의 내외측 부유물질 농도는 각각 20~140mg/L, 20~30mg/L로서 부유물질 차단효과가 매우 높은 것으로 평가하였다.
- 오와 송(2002)은 국내 해안별 오탉방지막의 운영실태를 조사하여 문제점을 진단하고 이를 해결하기 위한 방안을 제안하였다. 서해안에서는 해수 중 부유물질의 배경농도가 높아 오탉방지막의 효과를 명확하게 평가하기 어려웠으나, 바닥의 퇴적물이 오탉 방지막의 설

치에 따라 커지는 유속에 의해 재부유 가능성이 있음을 언급하였다. 또한 서해안의 바닥은 연약지반으로서 앵커의 침하를 해결해야 할 문제 중의 하나로 지적하였다. 남해안에서는 조류속이 빨라 오탉방지막을 연구 결과도 없이 막연하게 이중으로 설치한 사례를 언급하면서, 해역의 특성에 맞게 방지막 설계와 시공이 이루어져야 함을 강조하였다. 특히 일본에서 이용되고 있는 수하식과 자립식을 혼합하는 사례를 언급하면서 해역과 저층의 특성을 충분히 고려할 필요가 있음을 강조하였다. 동해안에서는 유속이 작고 퇴적물이 주로 사질이므로 침강이 빨라서 부유물질의 확산이 크지 않음에도 불구하고 오탉방지막을 설치하여 선박 운항에 영향을 미치는 경우가 있었다. 즉, 서해안과 같이 저질이 점토질인 경우 배경농도가 높기 때문에 오탉방지막의 효과가 감소하며, 사질인 해역에서는 오탉방지막을 오탉발생원에서 최대한 가깝게 설치해야 한다.

- 항만공사시 부유토사의 거동 특성에 관한 연구에서는 매립과 그랩 준설공사 시에 발생원으로부터 부유물질의 농도 변화를 살펴보았다(이 등, 2003). 부유토사 발생이 가장 많은 이들 공사를 대상으로 조사한 결과, 부유물질의 이동은 약 700m 이상에 걸쳐 발생하였다. 부유토사의 이동을 저감하기 위해서는 오탉방지막의 설치 위치를 발생원으로부터 가까운 거리에 설치하는 것이 바람직하고 막체의 길이는 길게 설치하여 저층으로 확산되는 부유토사의 확산을 저감시킬 수 있는 것으로 분석되었다.
- 해양매립사업으로 인한 환경영향을 줄이기 위한 연구(맹 등, 2005)에서는 부유토사 저감 대책의 문제점으로서 오탉방지막 설치의 문제, 설치비용 및 제품의 문제, 유지관리의 문제를 지적한 바 있다. 오탉 방지막은 사업의 종류, 해역의 지형과 물리적인 특성을 고려하여야 함에도 불구하고 공사기간에 오탉방지막을 설치하여 오탉 방지 효과가 크지 않을 수 있다는 것이다. 그리고 오탉방지막의 설치 비용을 12개월을 기준으로하거나 1년 이상의 사업기간 동안 견딜 수 있도록 설계하고는 있으나, 실제로 파손되는 사례가 많다. 공사 중에 유지관리가 적절히 이루어지지 않아 오탉방지막의 손상이나 막 공극이 막히는 등의 문제가 앞으로 해결해야 할 과제라고 할 수 있다.
- 일본의 사토(佐藤) 등(2005)은 준설에 따른 오탉방지효과를 실험적으로 분석한 바 있다. 이들 연구에서는 조류속이 측정되지 않아 흐름에 대한 영향은 파악할 수 없었으나, 그랩 준설공사가 이루어지는 현장에서 격자형 오탉방지막의 내외부에서 부유물질 농도를 분석하여 그 효과를 평가하였다. 수심 6.5m인 해역에서 오탉방지막은 5m 깊이로 설치한 조건에서 오탉 방지막 내외측 각각 1m 떨어지고 수심 3.5m와 5.5m의 지점에서 부유물질 농도를 분석하였다. 부유물질의 차단효과는 3.5m 지점에서 37.8~91.3%로서 평균 81%, 5.5m 지점에서는 2.1~86.8%로서 평균 61.5%로 나타났다. 현장의 저질 분석결과 토립자 밀도는  $2.29\text{g/cm}^3$ ,  $75\mu\text{m}$ 이하의 실트와 점토질 성분은 62.2%를 가졌다.
- 대부분의 오탉방지막에 대한 연구는 부유물질 확산 저감효과 평가에 대한 것들로서, 오탉 방지막의 적정 설계에 대한 내용은 거의 없는 실정이다. 오탉 방지막의 설계는 동수역학적 특성과 저질의 물리적 특성을 충분히 고려하여야 한다. 국내에서 시공되는 오탉방지막은 대부분 투수도가 매우 낮은 재질로 이루어지고, 바닥으로의 길이 또한 명확한 기준 없이 시공되고 있다. 앞에서 언급된 연구들에서 지적된 바와 같이 오탉방지막은 발생원에서 가깝게 설치하는 것이 효과적이다. 따라서 준설이나 매립이 이루어지는 선박 주변에 설치할 수 있는 선박 부착형 오탉방지막이 보다 효과적일 수 있다. 선박 부착형 오탉 방지막을 설계하기 위해서는 조류속과 방지막의 제원을 고려한 오탉방지효과를 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 수리 모형실험을 통해서 선박 부착형 오탉방지막 설계를 위한 유속과 방지막 제원에 흐름특성을 분석하였다.

(나) 유속 및 제원에 따른 오탉방지막의 거동 해석

① 수리모형 실험

㉠ 현행 오탉방지막의 문제점

- 사업의 종류, 해역의 지형과 물리적 특성을 고려치 않음
- 파손 사고가 발생하는 경우가 많으며
- 선박 운행에 지장 초래함으로써 각종 민원이 유발되고 있음

㉡ 새로운 오탉방지막의 필요성

- 준설과 같은 오탉유발 사업에 대한 특성을 충분히 반영하지 못하고 형식적으로 설치
- 오탉방지효과를 충분히 고려하지 못하고 있음
- 제원에 따른 설치 조건을 설정하여야 하며, 유지관리가 필수적임

㉢ 오탉방지막 설계를 위한 수

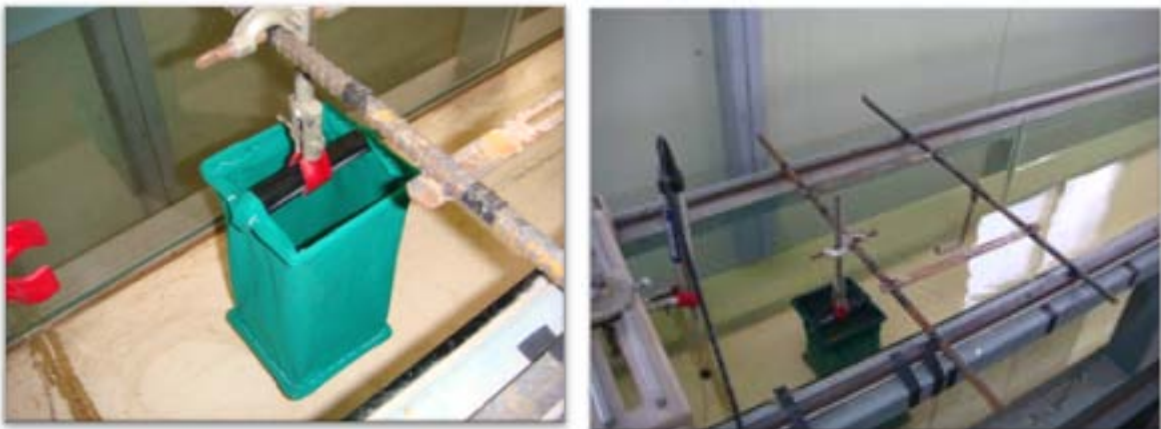
- 오탉방지막 설치에 따른 유속분포 조사
- 유속에 따른 오탉방지막의 변형을 고찰하고 이를 최소화할 수 있는 방안에 대해 검토

㉣ 오탉방지막 변형 최소화 방안

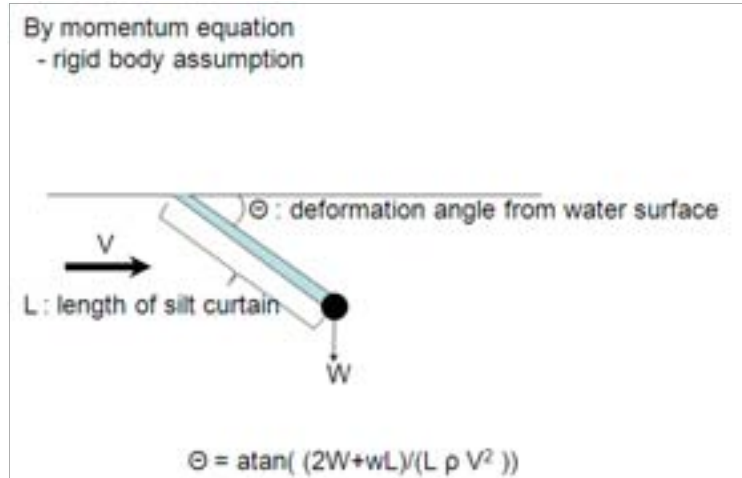
- 제원의 변경
- 운동량 최소화

㉤ 개수로 실험 방법

- 30×40cm 의 개수로 단면에서 수행
- Froud 상사법칙을 적용하여 결과 해석
- 1/100 축소 모형
- 3차원 유속계를 이용하여 유속과 흐름방향을 측정



[그림. I-마-8] 수리모형실험을 위한 오탉방지막의 설치



[그림. I-마-9] 유속에 따른 오탐방지막의 변형도 예측 모형

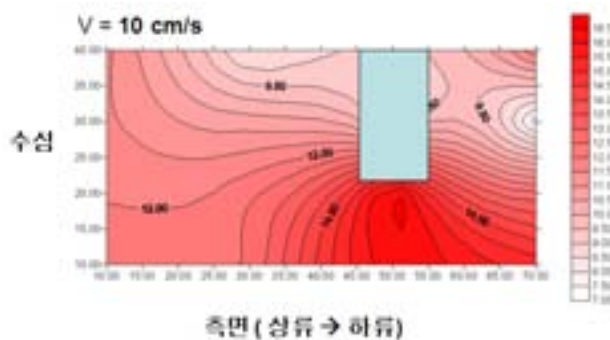
## ② 실험 결과

### ㉑ 오탐방지막의 거동

- 유속의 상승에 비례하여 오탐방지막에 가해지는 힘이 증가
- 현장 실 유속 1m/s 조건에서는 오탐방지막이 제 기능을 상실하게 되는 것을 확인
- 바닥에 chain 등을 통해 중량을 높이더라도 변형도를 줄이는데에는 한계가 있음

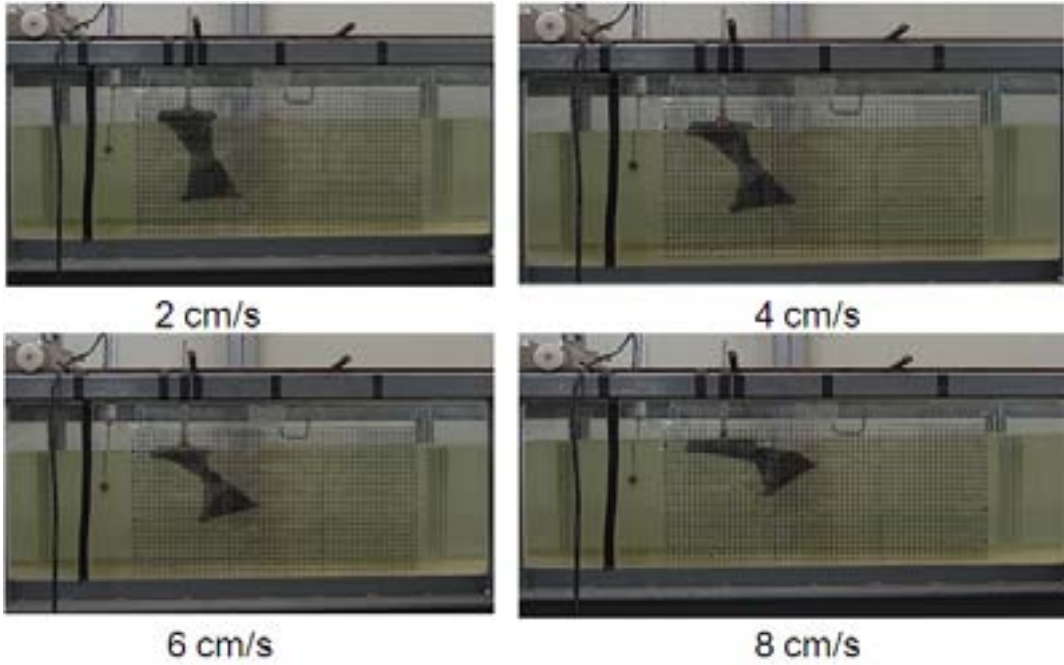
### ㉒ 오탐방지막 설계 방안

- 오탐방지막 단독으로는 변형도를 최소화하는데 한계가 있고, 제기능을 하지 못하므로, 흐름의 상류측에서 유속을 저감할 수 있는 barrier 가 절대적으로 요구됨
- 접근 유속을 저감할 수 있는 Barrier는 하단에 H빔 등으로 가라 앉히고, 부체를 상부에 고정시키는 방법이 바람직함
- 유속의 증가에 따라서 Barrier가 바닥으로 기우는 것을 줄이기 위하여 가운데 부분이 돌출되는 형식으로 설계할 필요 있음
- Barrier의 재질은 오탐방지막과 같은 고가의 투수성이 매우 작고, 인장강도가 크지 않고, 흐름을 낮출 수 있는 구조와 재질로 설계가 가능



[그림. I-마-10] 유속에 따른 오탐방지막의 변형도



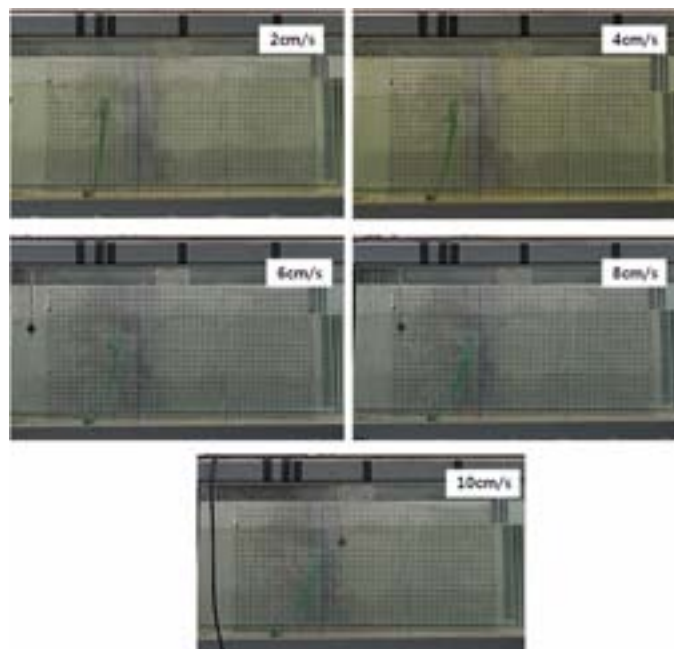


[그림. I-마-11] 실험 유속에 따른 오락방지막의 변형도 비교

(다) Barrier 설치에 따른 유속 저감 효과

① Barrier의 제원

- 건설용 안전망 : 메쉬크기 3-5mm
- 재질 : 나일론
- weight : D10mm 원형철근 × 120mm
- 부체 : 폴리스타이렌 - 20×20×120mm



[그림. I-마-12] 유속에 따른 barrier의 거동

## ㉔ Barrier 하류측 유속

- 유속이 적은 2cm/s인 경우에는 barrier 하류측의 유속이 거의 정체상태
- 유속 4cm/s 이상인 경우 상류측 유속의 50% 이하로 관측

## 바. 해양오염퇴적물 피복정화 기술 개발

### (1) 반응성 피복소재의 선정 및 평가

- 반응성 피복소재는 경제성 및 활용성에 있어 비교적 효율적인 소재로 판단되는 천연광물 및 산업폐기물을 선정 평가함
- 천연광물 : 석회석, 인회석, 제올라이트, 벤토나이트
- 산업폐기물 : 적니, 굴폐각
- 1차년도 주요 제거 및 안정화 대상은 7가지 중금속을 선택하여 실험을 실시함
- 인천북항의 오염퇴적물을 샘플링하여 중금속 함량 및 존재형태에 대한 현황을 조사함
- 인천북항의 오염퇴적물을 대상으로 반응성 피복소재 후보군을 적용하여 퇴적물내 중금속 존재형태의 변화를 분석함

### (가) 반응성 피복소재의 후보군 선정

#### ① 천연광물

##### ㉕ 석회석(Lime Stone)

- 해수속의 화학침전 또는 석회질의 폐각의 화석화 등에 의해 만들어진 광물
- CaO를 약 90% 이상 함유하고 있으며 비교적 가격이 저렴한 장점이 있음



[표. I -바-1] XRF 분석에 의한 석회석의 화학적 구성

contents	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SrO
%(w/w)	94.9	3.0	1.3	0.3	0.3	0.1	0.1

##### ㉖ 제올라이트(Zeolite)

- 알루미늄 산화물과 규산 산화물의 결합으로 생겨난 음이온 알칼리 금속 및 알칼리 토금속이 결합되어 있는 광물
- SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 약 75%, 12% 정도 함유되어 있음
- 천연제올라이트는 생성되는데 시간이 많이 걸리고 가격이 비교적 높은 단점이 있음

[표. I -바-2] XRF 분석에 의한 제올라이트의 화학적 구성



contents	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	SrO
%(w/w)	76.5	12	3.3	2.5	1.9	1.7	1.3	0.3	0.1	0.1	0.07	0.02

(나) 산업폐기물

㉞ 굴폐각(Oyster Shell)

- 굴 양식사업에서 배출되는 폐기물로 매년 약 30만 톤의 굴폐각이 배출되고 있음(경남도(2010))
- 매년 토양개량제로 약 13만톤, 종패로 3.5만톤이 활용되지만 약 12만톤은 활용이 미비함
- CaO 가 90% 이상으로 구성되었음



[표. I -바-3] XRF 분석에 의한 굴폐각의 화학적 구성

contents	CaO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Cl	MgO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	K <sub>2</sub> O
%(w/w)	90.9	2.2	1.8	1.6	1.2	0.8	0.6	0.3	0.3	0.2	0.2

㉟ 적니(Red Mud)

- 알루미늄 제련에 있어 Bayer법에 의해서 보크사이트로부터 알루미나를 채취한 잔사이며, 철의 산화물을 다량으로 함유하고 있음
- 1993년 알루미늄 제조공장이 착공된 이후 연간 약 10만톤의 적니가 발생되고 있음
- 적니는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>가 각각 20%이상으로 구성 되어있음



[표. I -바-4] XRF 분석에 의한 적니의 화학적 구성

contents	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
%(w/w)	28.5	27.6	20.1	13	6.6	3.3	0.4	0.3	0.2	0.1	0.04

- 이상 공급이 용이하고 상대적으로 비용이 저렴한 천연광물 및 산업폐기물 중 중금속 흡착 및 안정화에 효과적일 것이라 판단되는 석회석(Lime Stone), 제올라이트(Zeolite), 굴폐각(Oyster shell), 적니(Red Mud)를 1차년도 반응성 흡착소재의 후보군으로 선정하여 평가하고자 하였음

(2) 반응성 피복소재 후보군을 이용한 중금속 흡착제거 평가

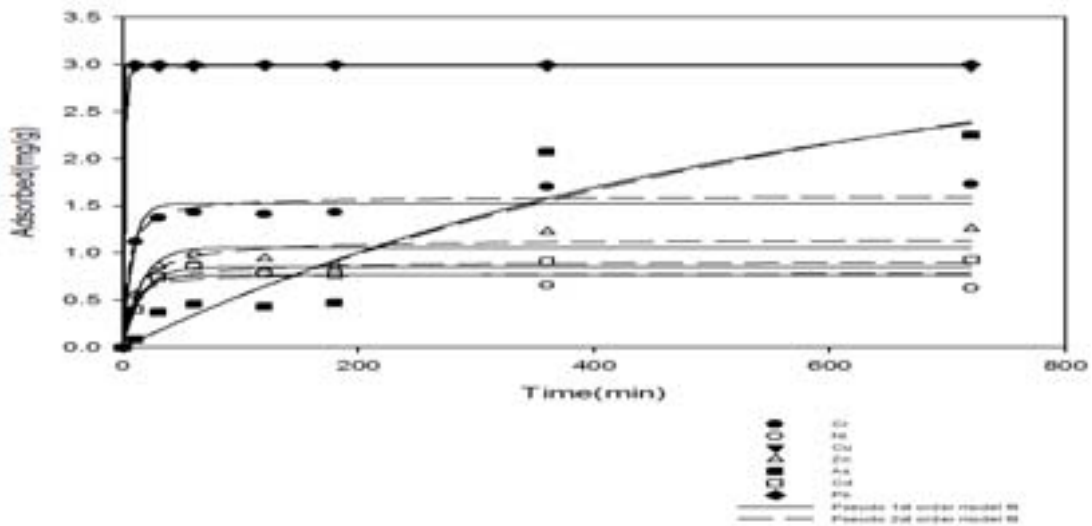
(가) 중금속 흡착제거 방법론

- 중금속 흡착제거의 효율성을 판단하기 위하여 실험실 규모의 회분식 실험을 실시하였으며 중금속 Cr, Cu, Cd, Pb, Ni, Zn, As를 대상으로 실험을 수행하였음
- 반응성 피복소재의 흡착특성을 평가하기 위하여 동적흡착, 평형흡착, pH 변화에 따른 흡착, 해수환경에서의 흡착특성을 3회 반복하여 실험하였고, 분석결과를 평균하여 제시. 동적흡착특성과 평형흡착특성은 각각 Pseudo First model과 Freundlich model을 적용하여 분석.

(나) 천연광물

① 석회석

㉠ 동적흡착특성



[그림. I -바-1] 석회석의 흡착평형

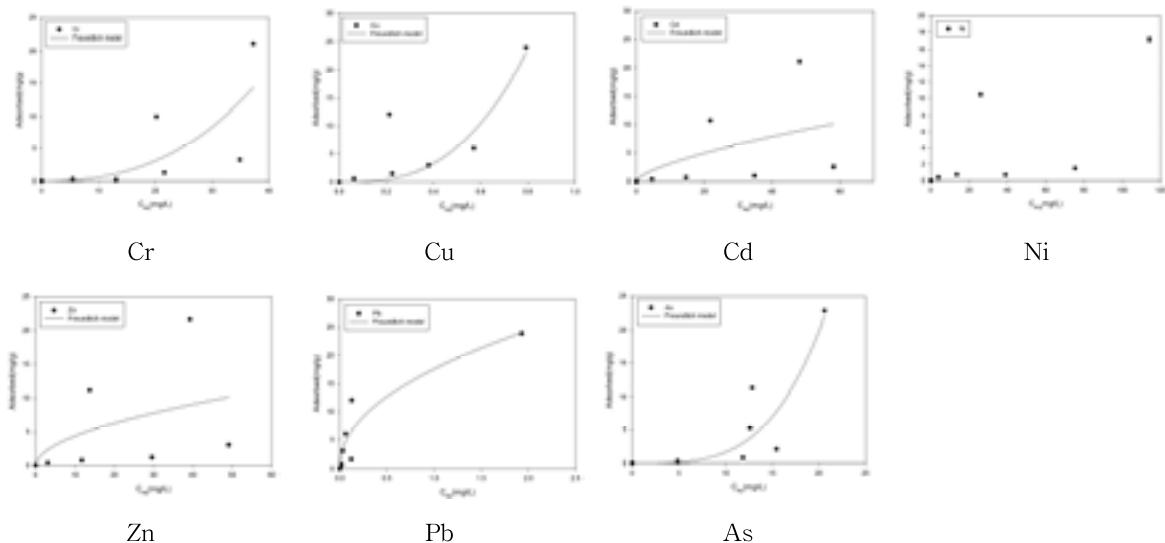
[표. I -바-5] 석회석 동적흡착 모델 값

Pseudo 1st model				
		qe (mg/g)	k1 (l/h)	R2
Lime Stone	Cr	1.5257	0.1260	0.9457
	Ni	0.7635	0.0883	0.9138
	Cu	2.9766	0.5847	1.0000

Zn	1.0589	0.0657	0.8940
As	3.1747	0.0019	0.8961
Cd	0.8540	0.0658	0.9690
Pb	2.9984	4.8963	1.0000

- 매질체인 석회석을 0.5g과 중금속 농도 50mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 7, 25°C, 100rpm의 조건으로 24시간 교반하여 동적흡착실험을 수행한 결과 Cr, Cu, Pb, Cd, Zn, Ni은 1시간대 흡착평형을 이뤘지만 As의 경우 흡착평형에 도달하지 않았다(그림 I-마-1). 또한 Pseudo First model을 이용한 흡착속도는 Pb>Cu>Cr>Ni>Cd>Zn>As의 순으로 빠른 반응속도를 나타냈다(표 I-마-5).
- 석회석의 경우 Cr, Cu, Pb, Cd, Zn, Ni에 대하여 흡착제거에 상대적으로 빠른 반응을 나타냈지만 As의 경우 흡착의 용량의 적정성 및 속도를 파악하기 위해서는 장시간의 반응 시간이 필요한 것으로 판단되며 추가실험에 의한 데이터구축이 필요하다고 판단된다.

㉔ 평형흡착특성



[그림. I-마-2] 석회석 Freundlich model fit

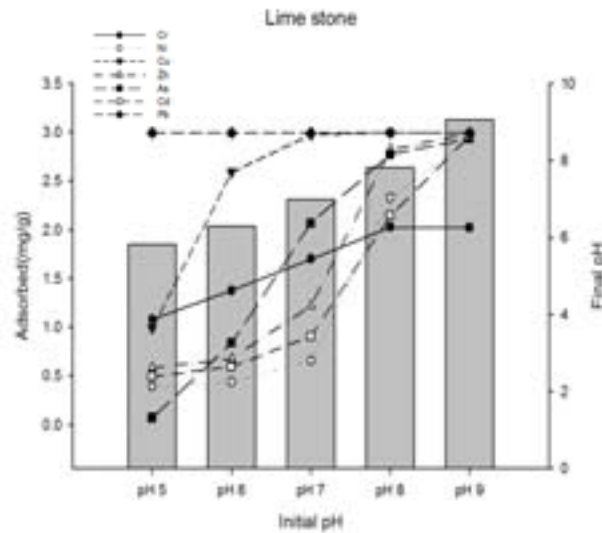
- 석회석 0.5g과 중금속 농도 10, 25, 50, 100, 200, 400mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 7, 25°C, 100rpm, 교반시간 6시간의 조건으로 평형흡착실험을 수행하였다.
- Freundlich 모델을 적용한 결과 흡착 분배계수는 Cu>Pb>Zn>Cd>Cr>As 순으로 높았으며 Pb>Zn>Cd 순으로 흡착경향이 강한 것으로 나타났다.
- 하지만 석회석의 Ni 흡착제거의 경우 Freundlich 모델에 부합하지 않는 결과를 나타내었다.

[표. I-마-6] 석회석 평형흡착 모델 값(Freundlich model fit)

	K(L/g)	1/n	R <sup>2</sup>
Cr	0.0018	2.4764	0.5176

Cu	44.8198	2.8524	0.6830
Cd	0.6614	0.6705	0.2399
Ni	-	-	-
Zn	1.2910	0.5282	0.2208
Pb	17.5736	0.4757	0.8672
As	0.0004	3.6185	0.7793

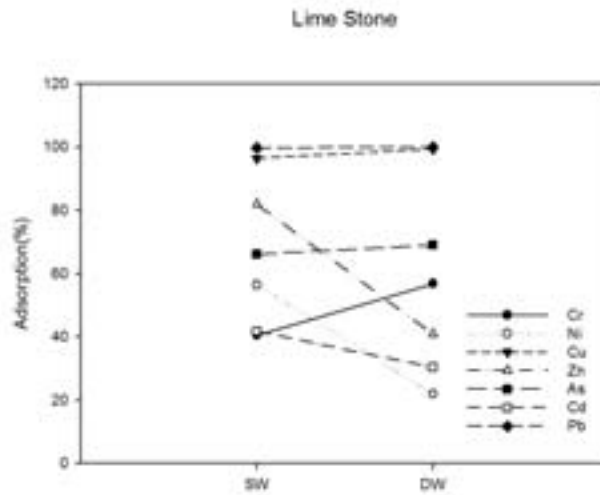
㊦ pH 변화에 따른 흡착 특성



[그림. I-바-3] 석회석 pH 변화에 따른 흡착

- 석회석 0.5g과 중금속 농도 50mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 5~9사이로 조절하여 교반 시간 6시간의 조건으로 흡착실험을 수행한 결과 pH가 높아짐에 Cr을 제외한 중금속의 흡착제거량이 높아지는 것으로 나타났다. 이는 pH의 상승에 따른 중금속이온의 공침 및 수산화 침전에 의한 제거가 동반되는 것으로 판단된다.
- 하지만 해양환경의 조건이라 할 수 있는 pH 7 범위에서는 상대적으로 낮은 pH에서 침전 반응이 일어나는 Pb와 Cu를 제외한 나머지 중금속은 80% 이하의 흡착제거율을 나타내었다.

㉔ 해수에서의 제거 특성

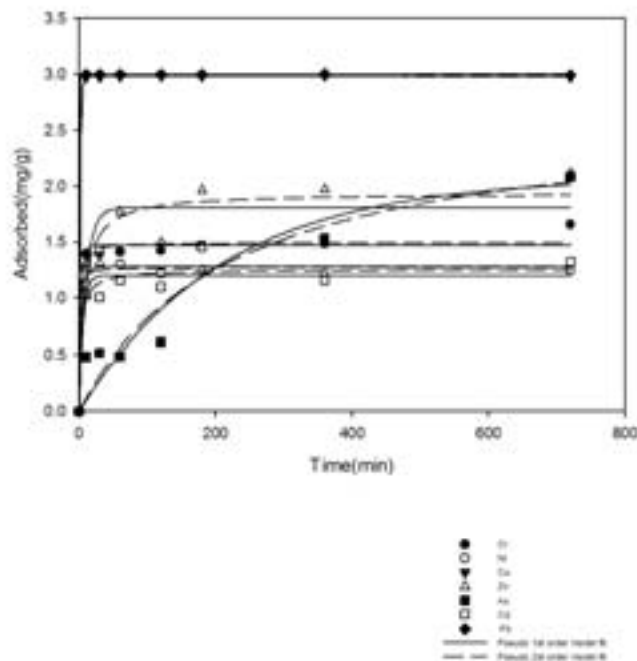


[그림. I-바-4] 해수와 증류수에서의 제거특성 비교

- 석회석 0.5g, 혼합중금속 농도가 50mg/L이 되도록 해수에 회석하여, 6시간의 조건으로 흡착실험을 수행하였다. 그 결과 Zn, Ni, Cd의 해수에서의 흡착제거 경향은 증류수에서의 흡착제거 경향보다 높은 것으로 나타났지만 Cr, Cu, As의 흡착제거 경향은 감소하는 추세로 나타났다.
- 이는 해수에서의 다양한 성분들이 중금속 흡착제거에 영향을 주는 것으로 판단된다.

② 제올라이트

㉑ 동적흡착특성



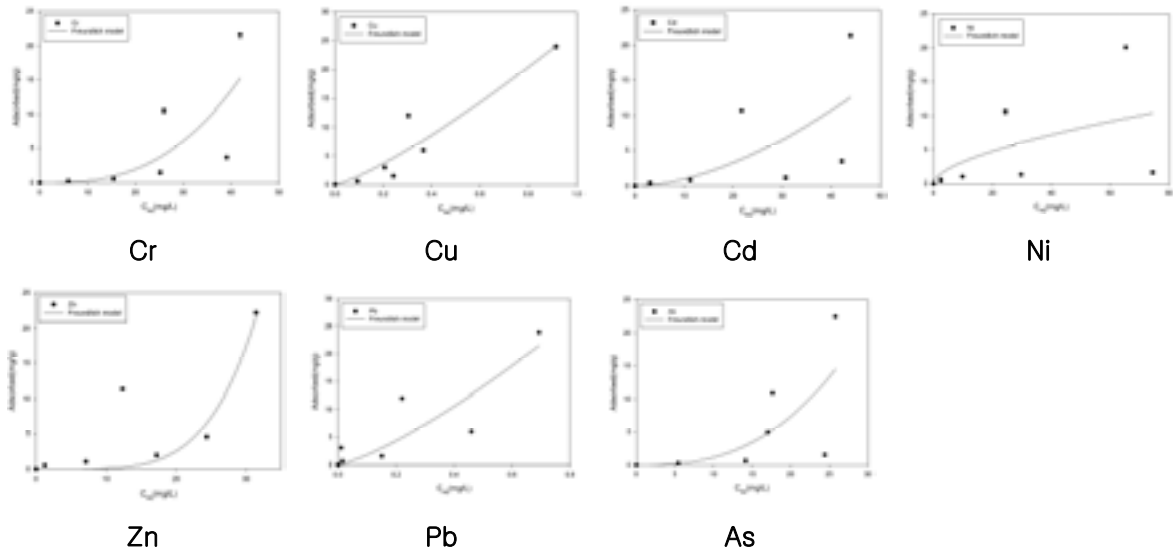
[그림. I-바-5] 제올라이트의 흡착평형

- 매질체인 제올라이트 0.5g과 중금속 농도 50mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 7, 25℃, 100rpm의 조건으로 24시간 교반하여 동적흡착실험을 수행한 결과 Cr, Cu, Pb, Cd, Zn, Ni은 3시간대 흡착평형을 나타내었고 As의 경우 석회석의 실험과 유사하게 실험 기간내에는 평형에 도달하지 않았다. 제올라이트의 동적흡착결과(Pseudo First model fit)도 석회석과 유사한 Pb>Cu>Cr>Ni>Cd>Zn>As의 순서의 반응속도를 나타내었다.

[표. I -바-7] 제올라이트의 동적흡착 모델 값

Pseudo 1st model				
		qe (mg/g)	k1 (1/h)	R <sup>2</sup>
Zeolite	Cr	1.4725	0.2937	0.9758
	Ni	1.2767	0.2175	0.9745
	Cu	2.9824	0.6308	1.0000
	Zn	1.8082	0.0987	0.8648
	As	2.0792	0.0048	0.8856
	Cd	1.2035	0.1815	0.9036
	Pb	2.9976	6717.3535	1.0000

㉞ 평형흡착특성



[그림. I -바-6] 제올라이트 Freundlich model fit

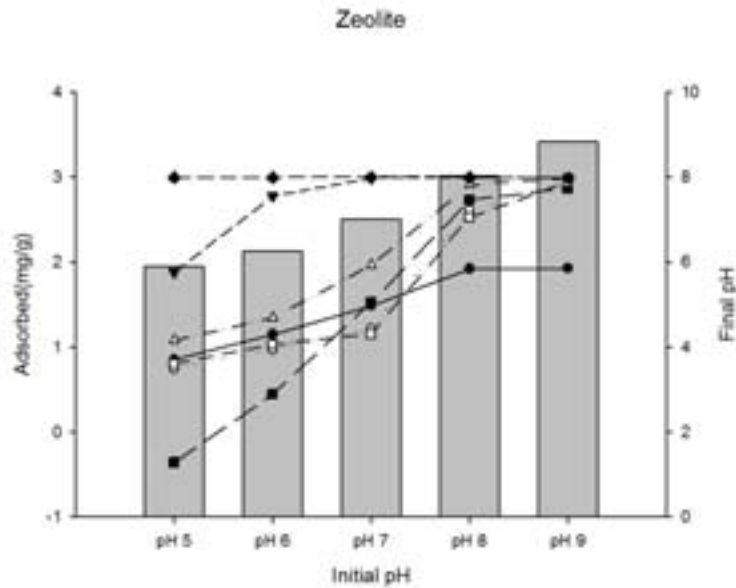
- 제올라이트 0.5g과 중금속 농도 10, 25, 50, 100, 200, 400mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 7, 25℃, 100rpm, 교반시간 6시간의 조건으로 평형흡착실험을 수행하였다.
- Freundlich 모델을 적용한 결과 흡착 분배계수는 Pb>Cu>Ni>Cd>As>Cr 순으로 높았으며 흡착의 친화도를 나타내는 n 값이 Ni의 경우 0.5986으로 타 중금속이온에 비하여 흡착경향이 강한 것으로 나타났다.



[표. I -바-8] 제올라이트 평형흡착 모델 값(Freundlich model fit)

	K(L/g)	1/n	R <sup>2</sup>
Cr	0.0005	2.7718	0.5689
Cu	26.8687	1.2365	0.8922
Cd	0.0192	1.7149	0.4055
Ni	0.7855	0.5986	0.2972
Zn	1.7361E-006	4.7397	0.6796
Pb	34.5730	1.2979	0.7513
As	0.0026	2.6496	0.4628

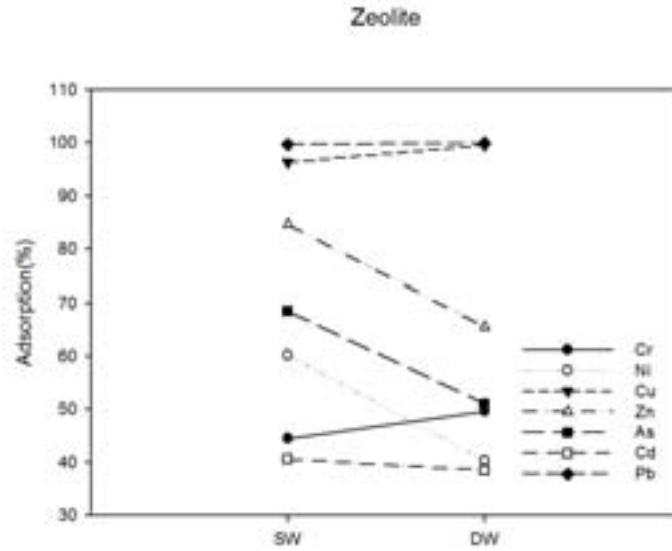
㉔ pH 변화에 따른 흡착 특성



[그림. I -바-7] 제올라이트 pH 변화에 따른 흡착

- 제올라이트 0.5g과 중금속 농도 50mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 5~9사이로 조절하여 교반시간 6시간의 조건으로 흡착실험을 수행한 결과 pH가 높아짐에 따라 중금속의 흡착 제거량도 높아지는 경향이 나타났다. 이는 석회석을 이용한 실험과 마찬가지로 pH의 상승에 따른 중금속이온의 공침 및 수산화 침전에 의한 제거가 동반되는 것으로 판단된다.
- 제올라이트의 경우도 해양환경의 조건이라 할 수 있는 pH 7 범위에서는 Pb, Cu를 제외하고는 80% 이하의 흡착제거율을 나타냈다.

㉔ 해수에서의 제거 특성



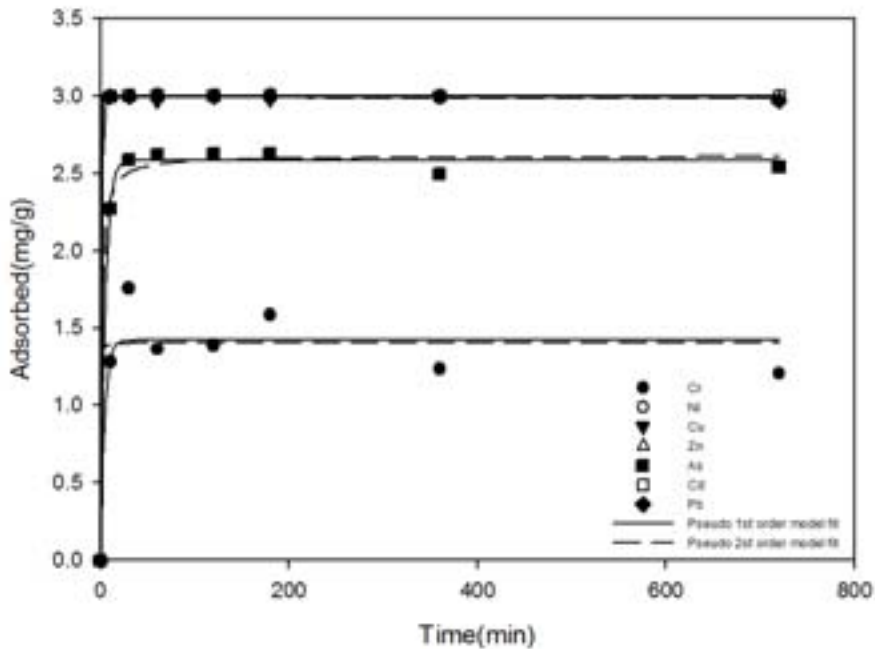
[그림. I-바-8] 해수와 증류수에서의 제거특성

- 제올라이트 0.5g, 혼합중금속 농도가 50mg/L이 되도록 해수에 희석하여 6시간의 조건으로 해수에서의 흡착실험을 수행하였다. 그 결과 Zn, As, Ni, Cd의 해수에서의 흡착제거 경향은 증류수에서의 흡착제거 경향보다 높은 것으로 판단되지만 Cr과 Cu의 흡착제거 경향은 감소하는 추세로 나타났다.

(다) 산업폐기물

① 적니

㉔ 동적흡착특성



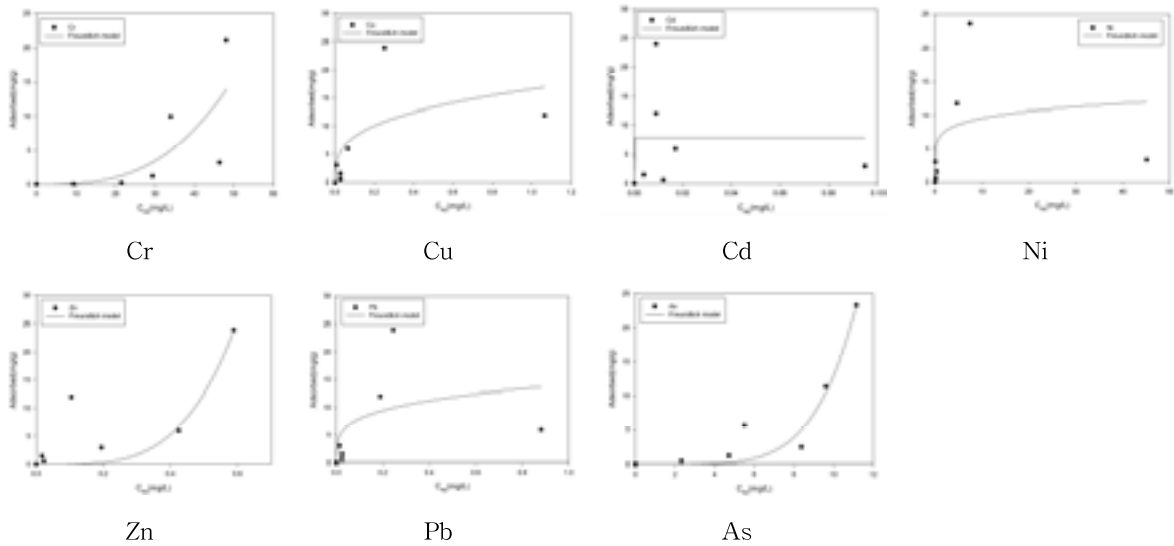
[그림. I-바-9] 적니의 흡착평형 그래프

- 매질체인 적니 0.5g을, 중금속 농도 50mg/L의 혼합중금속 30ml에, pH 7, 25°C, 100rpm의 조건으로 24시간 교반하여 동적흡착실험을 수행한 결과 7가지 중금속에 대하여 1시간대 평형을 나타내었다.
- 적니의 동적흡착결과(Pseudo First model fit) Ni>Cu>Pb>Cd>Zn>Cr>As의 순으로 빠른 반응속도를 나타냈음

[표. I -바-9] 적니 동적흡착 모델 값

Pseudo 1st model				
		qe (mg/g)	k1 (1/h)	R <sup>2</sup>
Red Mud	Cr	1.4218	0.2376	0.8854
	Ni	2.9991	32160.6665	1.0000
	Cu	2.9906	137.0083	0.9999
	Zn	2.9912	0.7362	1.0000
	As	2.5847	0.2109	0.9975
	Cd	2.9986	5.9881	1.0000
	Pb	2.9934	17.3660	0.9999

㊦ 평형흡착특성



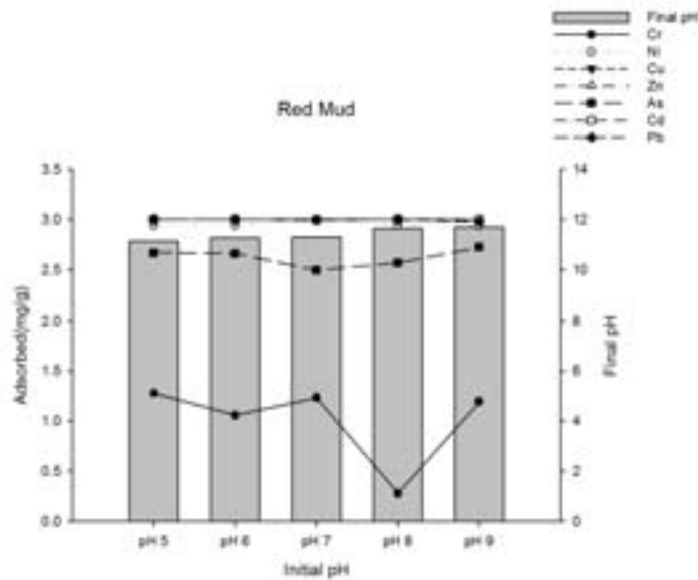
[그림. I -바-10] 적니 Freundlich model fit

- 적니 0.5g과 중금속 농도 10, 25, 50, 100, 200, 400mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 7, 25°C, 100rpm, 교반시간 6시간의 조건으로 평형흡착실험을 수행하였다.
- Freundlich 모델을 적용한 결과 분배계수는 Zn>Cu>Pb>Cd>Ni>Cr>As 순으로 높았으며 Cd>Ni>Pb>Cu 순으로 흡착경향이 강한 것으로 나타났다.

[표. I-바-10] 적니 평형흡착 모델 값(Freundlich model fit)

	K(L/g)	1/n	R <sup>2</sup>
Cr	0.0002	2.9531	0.5500
Cu	16.6134	0.3140	0.4670
Cd	7.8485	8.4925E-011	0.1171
Ni	6.7288	0.1506	0.2417
Zn	187.1995	3.8951	0.6588
Pb	14.1003	0.2509	0.3124
As	5.4095E-005	5.3803	0.9191

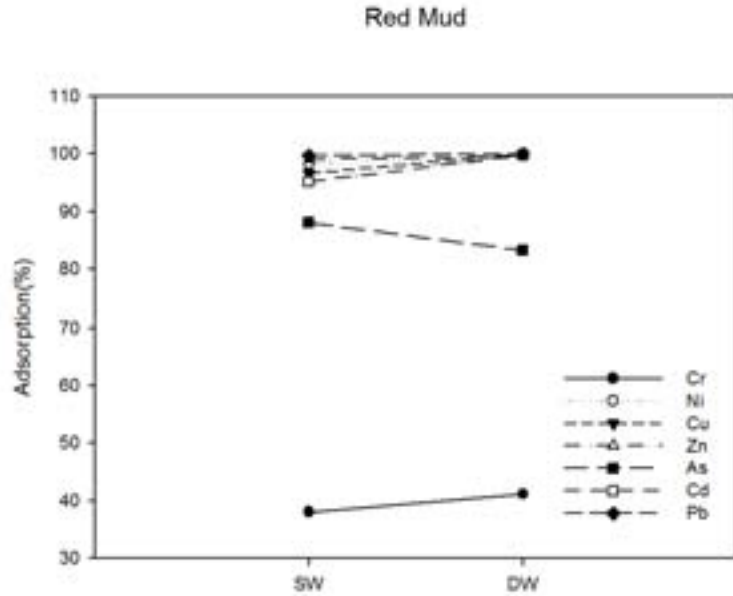
㉔ pH 변화에 따른 흡착 특성



[그림. I-바-11] 적니 pH 변화에 따른 흡착

- 적니 0.5g과 중금속 농도 50mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 5~9사이로 각각 조절하여 교반시간 6시간의 조건으로 흡착실험을 수행한 결과 Cr을 제외한 모든 중금속에 대하여 높은 흡착제거율을 나타내었다. pH의 변화를 살펴본 결과 적니의 경우 초기 pH와는 무관하게 10 이상의 pH를 나타내었다. 이는 알칼리성분이 많이 포함되어있는 적니의 영향으로 판단된다.

㉔ 해수에서의 제거 특성

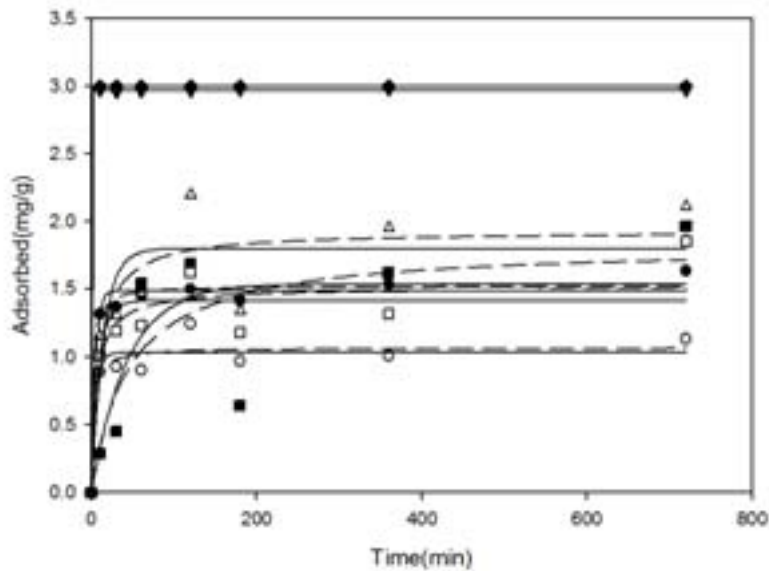


[그림. I-바-12] 해수와 증류수에서의 제거특성

- 적니 0.5g, 혼합중금속 농도가 50mg/L이 되도록 해수에 희석하여 6시간의 조건으로 해수에서의 흡착실험을 수행하였다. 그 결과 As는 해수에서의 흡착제거 경향이 증류수에서의 흡착제거 경향보다 높은 것으로 판단되지만 Cr, Cu, Ni, Cd, Zn의 흡착제거 경향은 약간씩 감소하는 추세로 나타났다.
- 이는 해수에서의 다양한 성분들이 중금속 흡착제거에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 적니에 포함된 강한 알칼리성분이 해수에 중화되면서 영향을 미치는 것으로 판단된다.

② 결과

㉔ 동적흡착특성



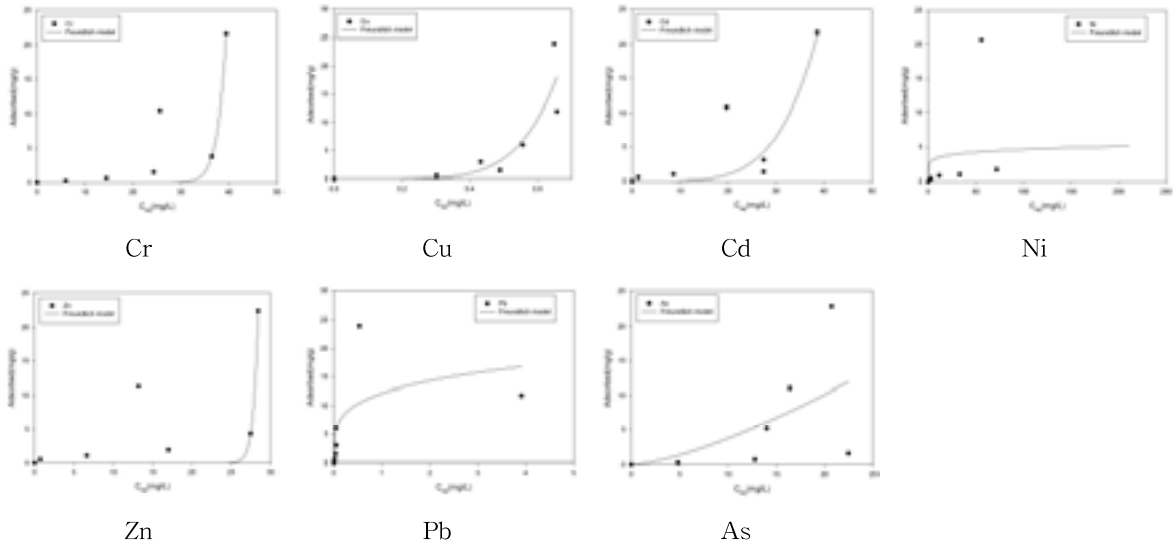
[그림. I-바-13] 굴폐각 흡착평형 그래프

- 매질체인 굴폐각 0.5g을 중금속 농도 50mg/L의 혼합중금속 30ml에, pH 7, 25°C, 100rpm의 조건으로 24시간 교반하여 동적흡착실험을 수행한 결과 Cr, Cu, Pb, Cd, Zn, Ni은 3시간대 평형을 이뤘고 As의 경우 6시간대에 평형을 나타내었다. 굴폐각의 Pseudo First model을 이용한 흡착속도는 Cu>Pb>Cr>Ni>Cd>Zn>As의 순으로 빠른 반응속도를 나타내었다.

[표. I -바-11] 굴폐각 동적흡착 모델 값

Pseudo 1st model				
		qe (mg/g)	k1 (l/h)	R <sup>2</sup>
Red Mud	Cr	1.4859	0.2185	0.9795
	Ni	1.0367	0.1914	0.9141
	Cu	2.9667	2188.0568	1.0000
	Zn	1.7957	0.0711	0.7946
	As	1.5331	0.0235	0.6870
	Cd	1.4177	0.1109	0.8307
	Pb	2.9983	6.9821	1.0000

㊤ 평형흡착특성



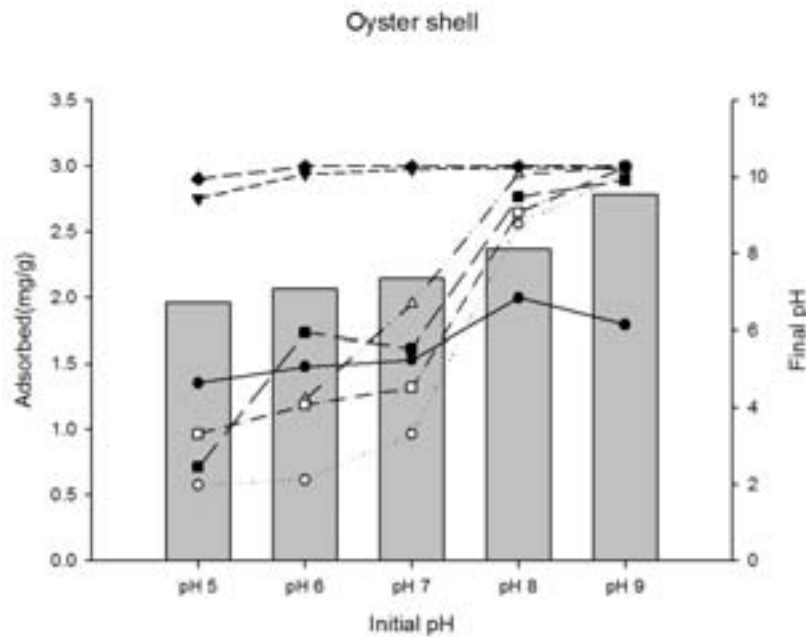
[그림. I -바-14] 굴폐각 Freundlich model fit

- 굴폐각 0.5g과 중금속 농도 10, 25, 50, 100, 200, 400mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 7, 25°C, 100rpm, 교반시간 6시간의 조건으로 평형흡착실험을 수행하였다.
- Freundlich 모델을 적용한 결과 흡착 분배계수는 Cu>Pb>Ni>As>Cd>Cr>Zn 순으로 높았으며 Ni>Pb 순으로 흡착경향이 강한 것으로 나타났다.

[표. I-바-12] 굴폐각 평형흡착 모델 값(Freundlich model fit)

	K(L/g)	1/n	R <sup>2</sup>
Cr	2.2489E-034	21.9268	0.7085
Cu	217.5098	5.9167	0.7905
Cd	7.7657E-007	4.6870	0.7178
Ni	2.5141	0.1323	0.0543
Zn	1.1604E-068	47.6587	0.6738
Pb	12.1436	0.2354	0.4454
As	0.1398	1.4288	0.3171

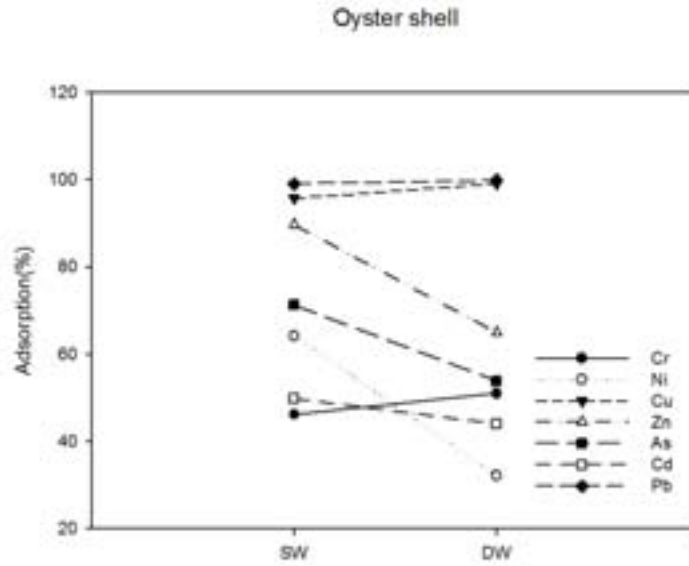
㉔ pH 변화에 따른 흡착 특성



[그림. I-바-15] 굴폐각 pH 변화에 따른 흡착

- 굴폐각 0.5g, 중금속 농도 50mg/L의 혼합중금속 30ml를 pH 5~9사이로 각각 조절하여 교반시간 6시간의 조건으로 흡착실험을 수행한 결과 Cr을 제외한 다른 중금속 이온은 pH가 높아짐에 따라 흡착제거율도 높아지는 경향을 나타내었다.
- 하지만 해양환경의 조건이라 할 수 있는 pH 7 범위에서는 Pb, Cu를 제외한 중금속은 80% 이하의 흡착제거율을 나타내었다.

㉔ 해수에서의 제거 특성



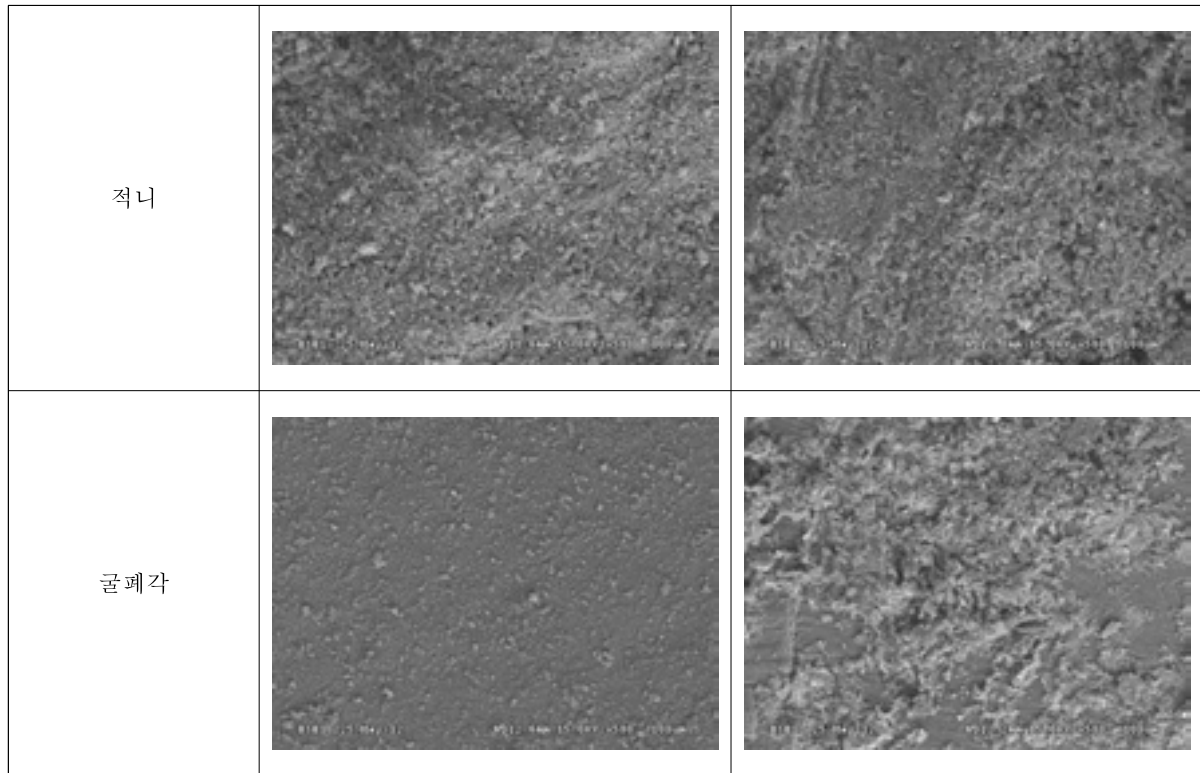
[그림. 1-바-16] 해수와 증류수에서의 제거특성 비교

- 굴폐각 0.5g, 혼합중금속 농도가 50mg/L이 되도록 해수에 희석하여, 6시간의 조건으로 해수에서의 흡착실험을 수행하였다. 그 결과 Cr, Cu를 제외한 중금속의 흡착제거 경향은 증류수에서 보다 해수에서 더 높은 것으로 나타났다.

(라) 1차년도 반응성 피복소재 성능평가 결과

500배 확대	중금속 반응 전	중금속 반응 후
석회석		
제올라이트		





[그림. I-바-17] 반응성 피복소재 후보군 실험 전 후 표면사진

[표. I-바-13] 반응성 피복 소재별 흡착성능 비교분석

구분	소재	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
천연광물	석회석	△	×	◎	×	△	×	◎
	제올라이트	×	×	◎	△	△	×	◎
산업폐기물	적니	×	◎	◎	◎	○	◎	◎
	굴폐각	△	×	◎	△	△	×	◎

◎ : 매우우수(90% 이상), ○ : 우수(70~90%), △ : 보통(50~70%), × : 나쁨(50% 미만)

- 천연광물인 석회석, 제올라이트와 산업폐기물인 굴폐각, 적니를 이용한 반응성 피복 소재별 흡착성능을 평가한 결과하였다.
- 천연광물인 석회석과 제올라이트, 산업폐기물인 굴폐각은 Cu, Pb의 흡착제거에 우수한 편이지만 나머지 Cr, Ni, Zn, As, Cd의 흡착제거에는 70% 이하의 흡착제거능력을 나타내었다.
- 산업폐기물인 적니는 Ni, Cu, Zn, Cd, Pb에 매우 우수한 흡착제거능력을 나타냈고 As에 대해서는 70%이상의 흡착제거능력을 나타내어 다른 소재에 비해 상대적으로 높은 제거율을 나타내었다. 하지만 Cr의 흡착제거에는 큰 영향을 보이지 않아 향후 Cr의 흡착제거에 효율적인 소재의 개발 및 평가가 필요하다.

(2) 인천북항의 오염현황

(가) 일반현황

인천북항				
인천광역시 동구 화수동				
위도 37.48902933127216 경도 126.6297858953476				

- 실험실 규모의 반응성 피복소재의 현장적용성 평가를 위하여 오염퇴적물을 채취, 실험에 사용하고자 하였으며 오염퇴적물은 인천광역시 동구 화수동에 위치한 인천북항에서 표층 약 10~30cm 깊이의 토양을 채취하였다. 습시료는 원소분석을 실시하고 건시료는 상온에서 풍건 후 체를 사용하여 이물질을 분리하여 3회 반복하여 실험 및 분석하였고, 평균값을 제시하였다. 인천북항 퇴적물의 물리화학적 특성은 아래와 같다.

[인천북항 퇴적물의 물리화학적 특성]

Sediment	Values
pH	8.04
Sand(%)	15.0
Silt(%)	77.5
Clay(%)	7.5
C(%)	1.54
N(%)	0.17

[중금속 함량]

	Exchangeable	carbonate	Oxide	Organic	Residual	Total	기준
Cr	1.2	1.3	6.9	4.2	19.6	33.2	80-370
Ni	0.5	1.4	2.7	2.6	8.3	15.5	23-52
Cu	0.8	0.6	4.5	60.7	18.6	85.2	24-108
Zn	1.5	6.6	97.9	18.6	25.2	149.8	200-410

<b>As</b>	2.6	1.3	2.6	0.2	31.1	37.8	9-41.6
<b>Cd</b>	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.7	0.68-4.21
<b>Pb</b>	0.3	4.2	22.9	8.1	14.9	50.4	50-220

- 인천북항 퇴적물의 중금속 함량을 분석하였다. 분석방법은 Tessier 등(1979)이 제안한 연속추출법을 사용하여 중금속의 존재별 함량을 파악하고 각 중금속의 존재형태 총합을 함량을 산정하였다.
- 전체적으로 안정화 존재(광물형태+유기물형태) 비율은 Cu>As>Cr>Ni>Pb>Cd>Zn 순으로 나타났다.
- 인천북항의 퇴적물 분석결과 Cu, As의 오염도가 기준치를 초과하여 오염이 심각한 상태이며 Cr, Ni, Zn, Cd, Pb의 함량은 기준치를 미달하였다.

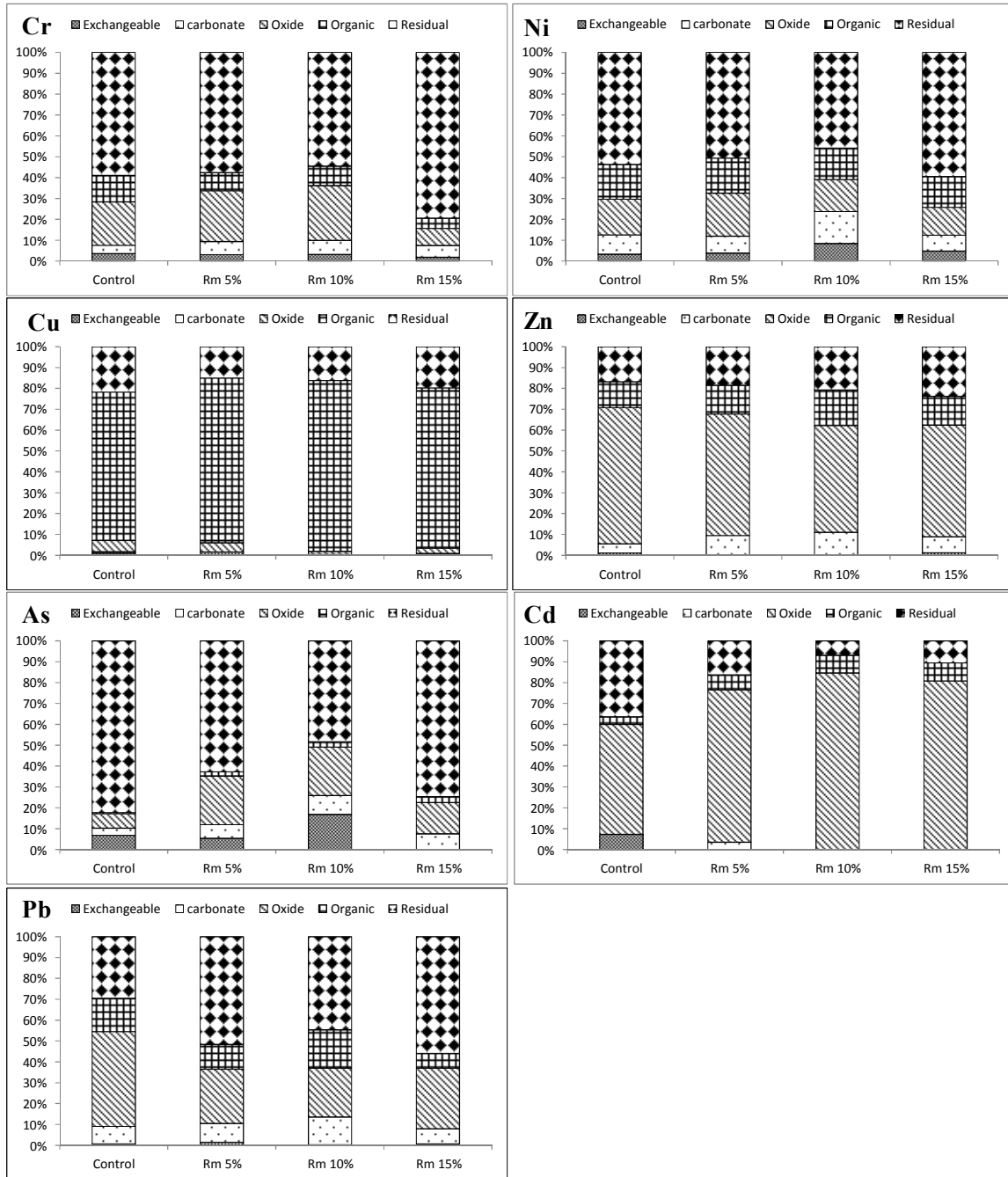
**(나) 오염퇴적물의 중금속 존재형태 변화 평가**

**① 중금속 존재형태 방법론**

- 산업폐기물(적니, 굴폐각)과 천연광물(제올라이트, 인회석)에 의한 오염 퇴적물 내 중금속 존재형태 변화를 평가하기 위하여 Tessier 등(1979)이 제안한 연속추출법을 수행하였음. 분석은 3회 반복하여 실시하였고, 평균값을 나타내었음
- 안정화제의 첨가량 변화(5%, 10%, 15%)에 의한 중금속(Cr, Cu, Cd, Pb, Ni, Zn, As) 안정화의 변화를 평가하였음

② 산업폐기물을 이용한 중금속 존재형태 변화

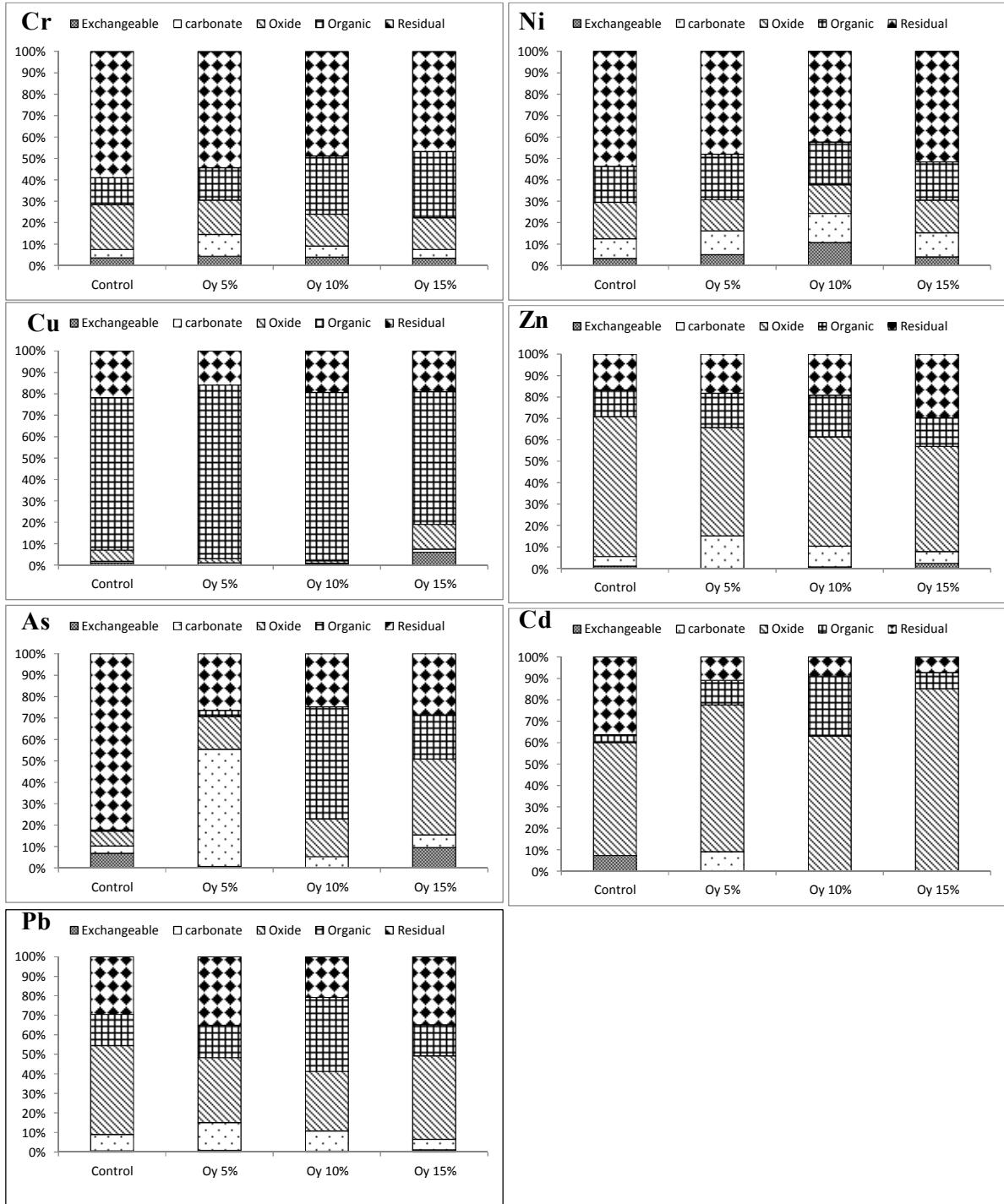
㉑ 적니



○ 가장 안정한 광물 형태의 존재 변화는 Cr, Pb에서 높은 효율을 보였다.

○ 첨가량 증가와 효율에서는 상관관계를 보이지 않았다.

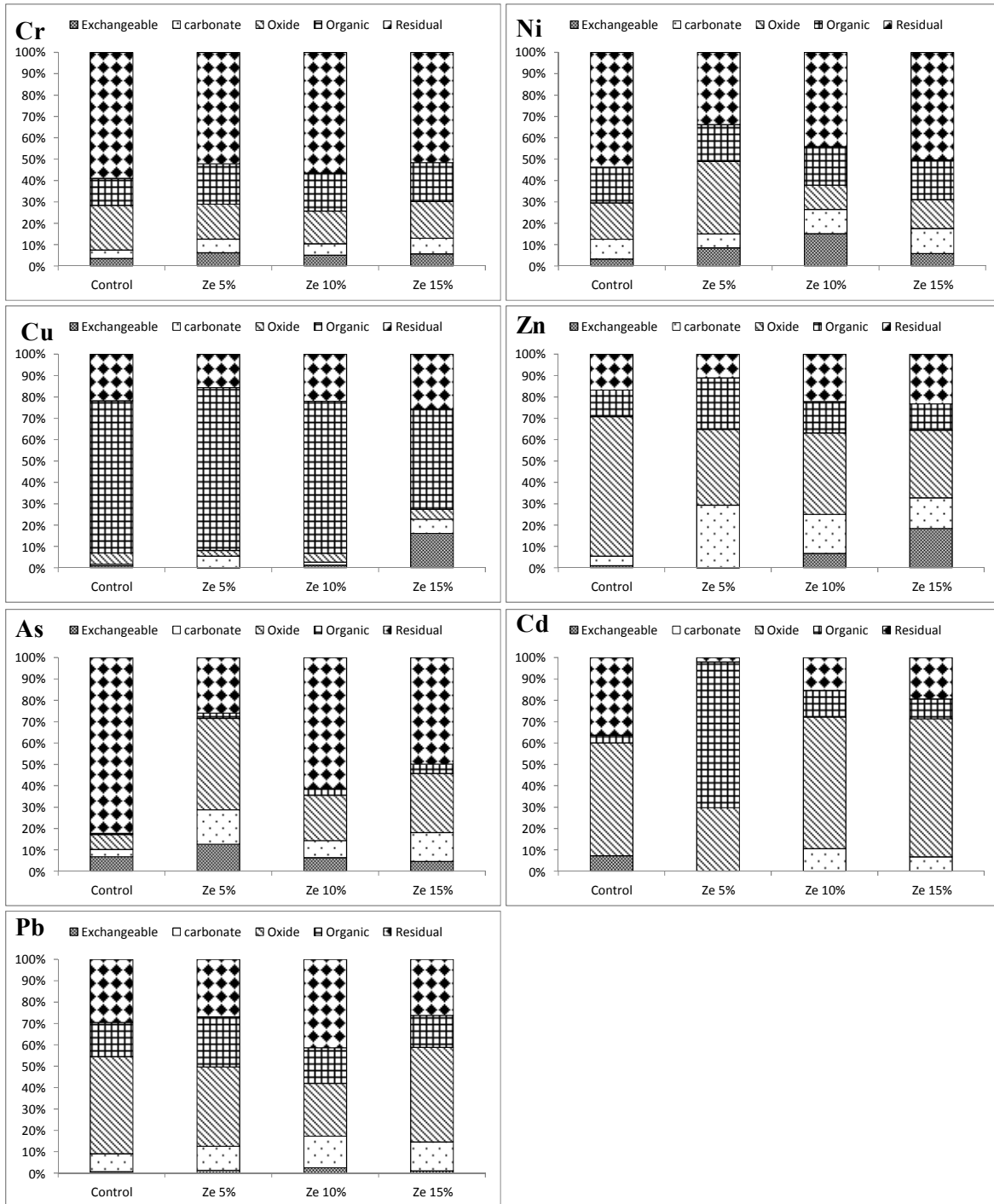
㉠ 굴패각



- 가장 안정한 광물 형태의 존재 변화는 Zn에서 높은 효율을 보였다.
- 첨가량 증가와 효율에서는 상관관계를 보이지 않았다.

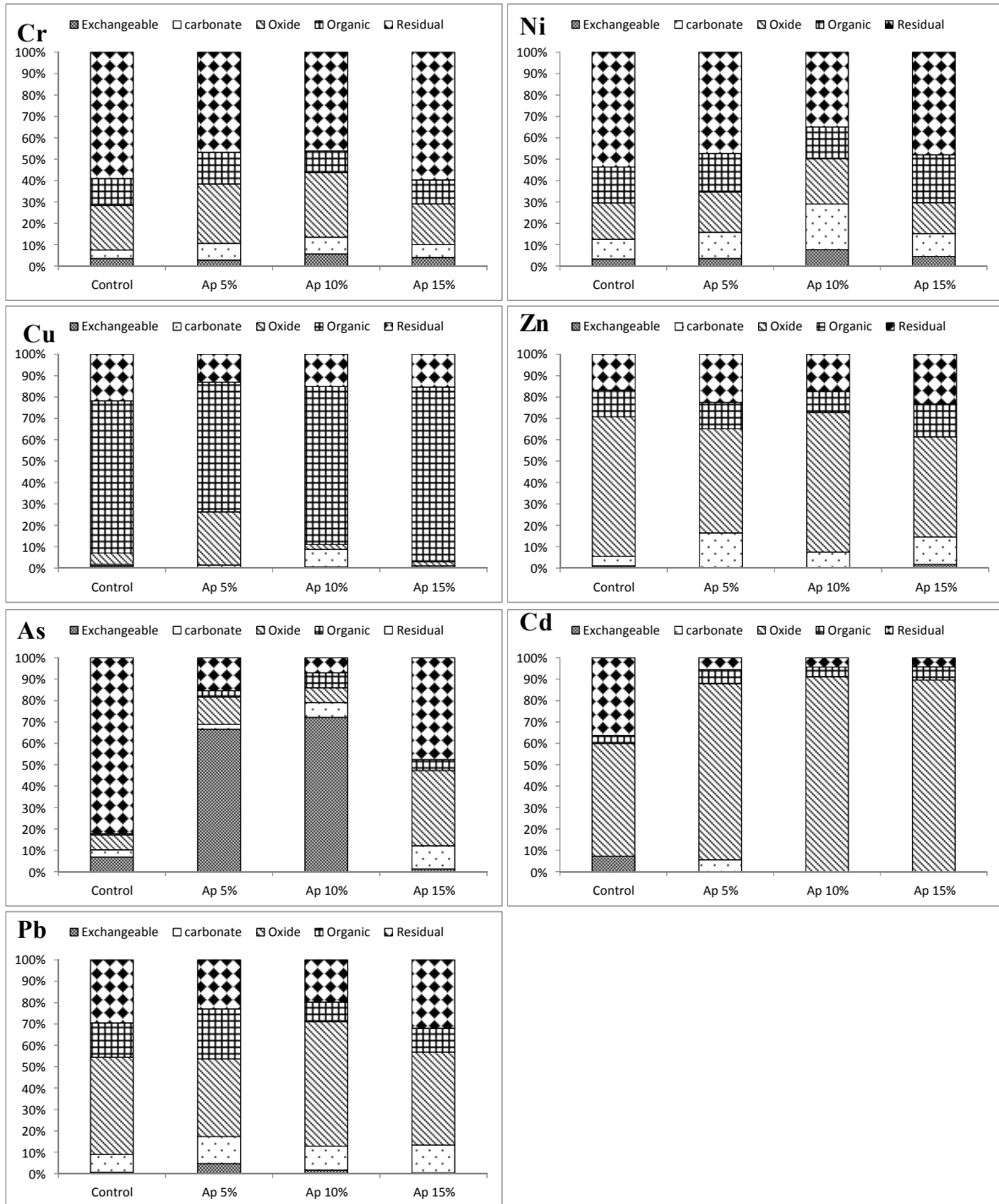
(다) 천연광물을 이용한 중금속 존재형태 변화

① 제올라이트



- 가장 안정한 광물 형태의 존재 변화는 Zn에서 높은 효율을 보였다.
- 첨가량 증가와 효율에서는 상관관계를 보이지 않았다.

## ② 인회석



- 가장 안정한 광물 형태의 존재 변화는 Pb에서 높은 효율을 보였다.
- 첨가량 증가와 효율에서는 상관관계를 보이지 않았다.

(라) TCLP 용출 특성 평가

① 피복소재별 안정화 성능 분석표

TCLP 용출결과		Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
적 니	5%	○	◎	◎	×	◎	◎	◎
	10%	○	◎	◎	×	◎	◎	◎
	15%	○	◎	◎	×	◎	◎	◎
제올라이트	5%	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎
	10%	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎
	15%	◎	◎	◎	×	◎	◎	○
석 회 석	5%	◎	◎	◎	○	◎	◎	○
	10%	◎	◎	○	×	◎	◎	◎
	15%	◎	◎	○	×	◎	◎	◎
폐 굴 각	5%	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎
	10%	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎
	15%	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎

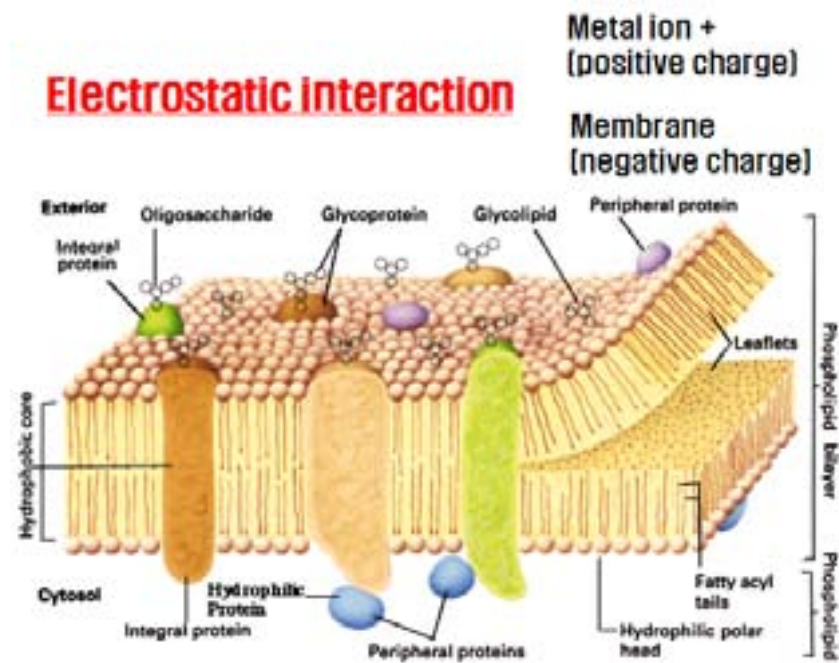
◎: 매우 우수(90-100%), ○: 우수(70-90%), △: 보통(50-70%), ×: 나쁨(50% 미만)

- 안정화제로 사용한 적니, 제올라이트, 석회석, 굴폐각은 전체적인 중금속 용출을 감소시켰다.
- 중금속 중 Zn에서는 모든 안정화제가 낮은 효율을 보였다.

(3) 미생물을 기반으로 하는 중금속에 대한 기초적 특성 조사

- 중금속의 생물학적 처리기법은 매우 경제적이고 효율적이며, 환경에 적응이 용이하여 이를 오염지역에 직접 도입함으로써, 보다 효율적이고 환경 친화적으로 오염물질의 경감을 기할 수 있음.
- 중금속에 대한 생물학적 처리 중 하나는 미생물에 의해 흡착되는 성질을 이용하여 금속 이나 금속화합물이 변형되거나 고형화 또는 무독화되는 것임. 생물흡착 과정은 음이온으로 하전된 미생물의 표면 특성을 이용하여 미생물을 흡착공정의 흡착제로 사용 가능한 방법으로서 다당류, 단백질 및 지방질로 구성된 미생물 세포벽의 음전하 작용기(카르복실기, 인산기, 수산기 등)가 용해상태에서 양전하를 띠는 Ni, Cd, Cu, Pb, Zn 등의 중금속을 흡착할 수 있음.

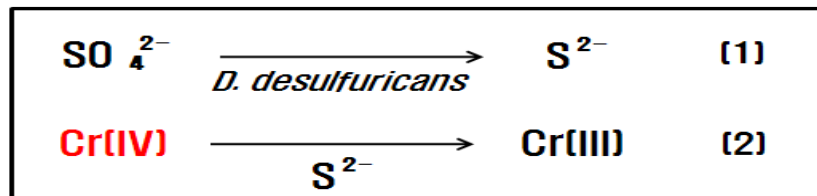




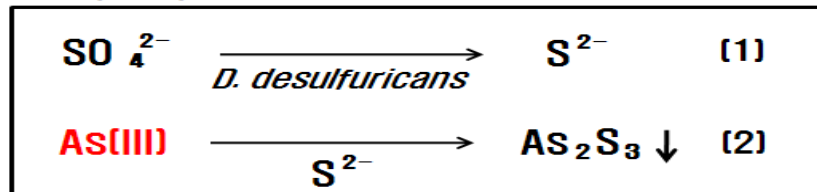
[그림. I-바-18] 생물흡착을 통한 중금속 안정화 모식도

- 일반적으로 As, Cr 등의 몇 가지 금속은 용해된 상태에서 산소와 결합한 음이온을 형성하여 최종적으로 음전하를 띠거나 전하를 띠지 않으므로 정전기적 결합을 통한 제거를 기대할 수 없는 것으로 알려져 있음.

❖ Bioreduction



❖ Bioprecipitation



[그림. I-바-19] 황환원 미생물을 통한 중금속 안정화 모식도

- 황환원 미생물에 의해서 sulfate( $SO_4^{2-}$ )가 sulfide( $S^{2-}$ )로 환원되고 hydrogen sulfide를 형성하고 그 sulfide에 의해서 금속이 환원되어 비용해성 metal sulfide를 생성하여 침전시켜서 제거되거나 독성이 경감됨.
- Cr(IV)는 독성이 매우 강하나, 그것이 전자를 받아서 환원되면 Cr(III)로 변하게 되고 이것은 독성이 매우 낮고 침전물을 쉽게 형성함.
- 이동도가 상대적으로 높고 독성이 강한 비소 As(III)는 미생물학적으로 금속화합물로 만들어 지질매체에 고정화하는 효과로 제거함.

- 그 밖에 에너지를 이용하여 능동적으로 금속을 체내에 전달시켜 무기금속화합물 동화과정을 거치면서 금속을 체내에 축적하는 것을 생물축적 과정을 통해서 제거되기도 함.

**(가) 해양퇴적물 내 중금속의 존재 형태**

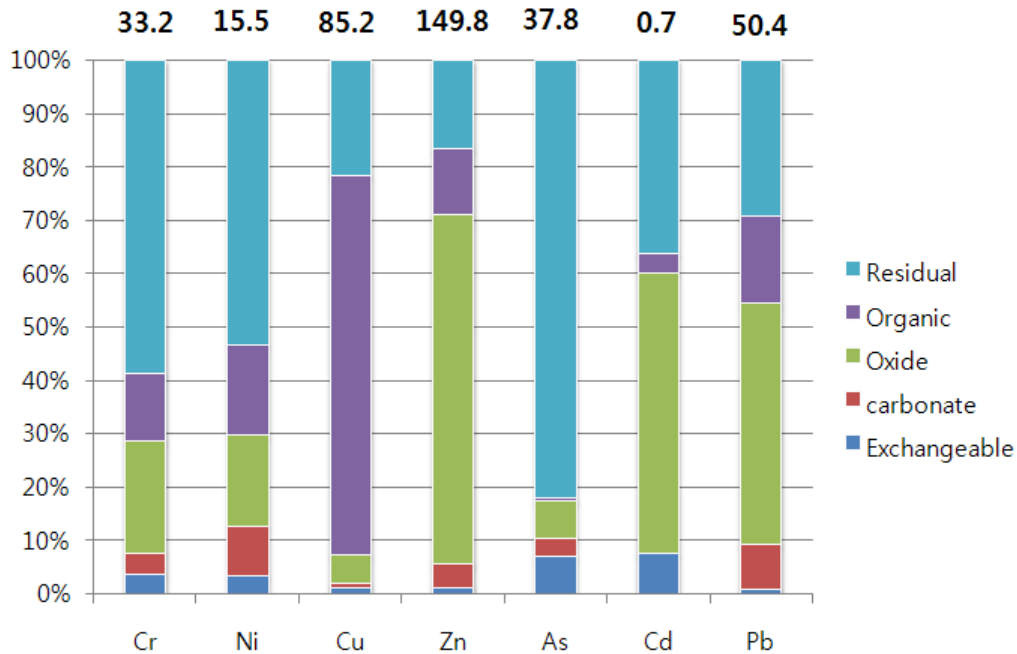
- 일반적으로 해양퇴적물은 90%가 silicate와 carbonate로 구성되어 있으며, 5%가 iron oxides, manganese oxides 그리고 5% 미만이 sulfides로 구성되어 있음.
- 인천 북항에 퇴적물 시료의 중금속 존재 형태를 조사하였음.
- 실험에 사용된 방법은 1979년 A. Tessier에 의해서 Anal. Chem에 발표된 “Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals”에 근거하여 진행함.

**[표. I -바-14] Extraction conditions used per gram of soil according to the fractionation scheme of Tessier et al. (1979)**

<b>Exchangeable</b>	8ml 1M MgCl <sub>2</sub> (pH7), 1hr, room temperature, continuous agitation
<b>Carbonate</b>	8ml 1M NaOAc (pH5), 5hrs, room temperature, continuous agitation
<b>Oxide</b>	20ml 0.04M NH <sub>2</sub> OH·HCl in 25%HOAc, 5hrs, 96°C, some agitation
<b>Organic</b>	3ml 0.02M HNO <sub>3</sub> and 2ml 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pH2), 2hrs, 85°C, some agitation; additional 3ml 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 3hrs, 85°C, some agitation; 5ml 3.2M NH <sub>4</sub> OAc in 20% HNO <sub>3</sub> , 0.5h, room temperature, continuous agitation
<b>Residual</b>	0.5ml conc. HNO <sub>3</sub> , 5ml HF and 2ml HCl, digestion in Teflon bomb, dissolution in 15% HCl
<b>Total</b>	Triple acid attack of 0.5ml conc. HNO <sub>3</sub> + 5ml HF + 2ml HCl, digestion in Teflon bomb, dissolution in 15% HCl

**[표. I -바-15] 인천 북항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 (단위: ppm)**

	<b>Exchangeable</b>	<b>carbonate</b>	<b>Oxide</b>	<b>Organic</b>	<b>Residual</b>	<b>Total</b>	<b>기준</b>
Cr	1.2	1.3	6.9	4.2	19.6	33.2	80-370
Ni	0.5	1.4	2.7	2.6	8.3	15.5	23-52
Cu	0.8	0.6	4.5	60.7	18.6	85.2	24-108
Zn	1.5	6.6	97.9	18.6	25.2	149.8	200-410
As	2.6	1.3	2.6	0.2	31.1	37.8	9-41.6
Cd	0.1	0.0	0.4	0.0	0.3	0.7	0.68-4.21
Pb	0.3	4.2	22.9	8.1	14.9	50.4	50-220



[그림. I-바-20] 인천 북항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 비율

- 퇴적물에서 추출 가능한 총 Cu의 농도가 85.2 ppm, As의 농도는 37.8 ppm, Cd의 농도는 0.7 ppm, Pb는 50.4 ppm으로 기준 하한 허용치를 초과함으로 이러한 중금속이 용탈되어 수계로 지속적으로 유입될 가능성이 높을 것으로 사료됨.
- Cr, Ni의 경우, 잔류상과 산화성 비율이 높으며 이는 광물 격자 내에 존재하여 이동도가 다른 금속에 비해 낮음을 의미함.
- Cu, As의 경우 비록 기준치를 초과하였지만, 상대적으로 이동도가 낮은 잔류상과 산화성 비율이 높게 나타남.
- 그러나 Cd, Pb의 경우는 기준치를 초과함과 동시에 상대적으로 다른 금속에 비해 이동도가 높은 형태로 존재하기 때문에 지속적으로 수계로 쉽게 유입될 가능성이 높아 각별한 주의가 필요함.

(나) 중금속 제거능이 우수한 해양미생물 배양법

- 중금속에 대해서 *Enterobacter cloacae* [KCTC1685, KCTC2361], *Desulfovibrio desulfuricans* [KCTC5768], PCBs에 대해서 *Dehalococcoides ethenogenes* [ATCC BAA-2100] 그리고 PAHs에 대해서 *Pseudomonas stutzeri* [ATCC 14405], *Vibrio cyclotrophicus* [ATCC 700982]을 선별함.
- 당해연도 연구에서는 중금속에 대한 것 *Enterobacter cloacae*, *Desulfovibrio desulfuricans*을 가지고 연구하였음.
- 위에서 언급한 균주 및 해양퇴적물 상에서의 조건은 절대 혐기성 조건이기 때문에 혐기성 균주 배양 조건을 구비함.

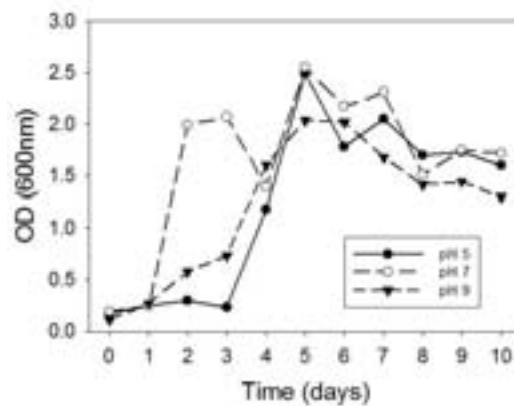


[그림. I-바-21] 미생물 배양 인큐베이터 (좌)와 혐기성 조건을 gas purging 시설(우)

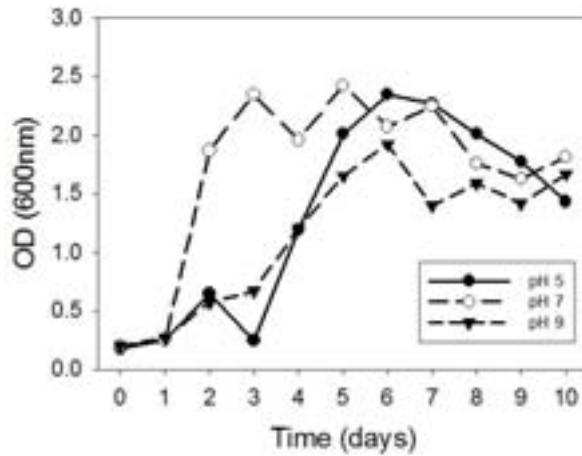


[그림. I-바-22] 균주 배양 bottle (좌)과 UV-vis. spectroscope(우)

- 두 가지 배지 조건으로 실험을 하였음. 하나는 영양배지이며 다른 하나는 인공바닷물을 제조하여 pH 5 (약산성), pH 7 (중성), pH 9 (약알칼리성)로 변화시키면서 두 미생물의 성장곡선을 측정하였음.

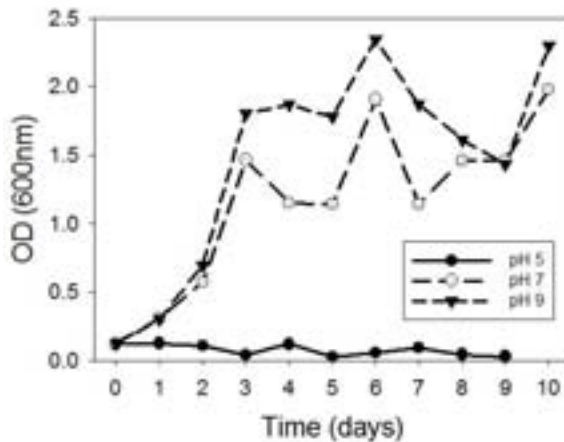


[그림. I-바-23] 영양배지에서 다른 pH에서의 *Enterobacter cloacae*의 성장곡선

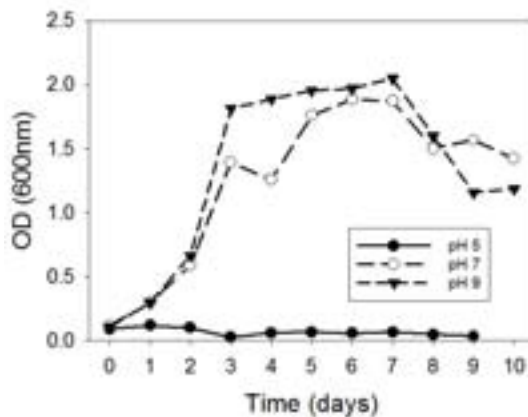


[그림. I -바-24] 인공바닷물에서 다른 pH에서의 *Enterobacter cloacae*의 성장곡선

- 대체적으로 영양배지와 인공바닷물에서 모두 *Enterobacter cloacae*은 잘 성장하는 것을 볼 수 있으며, pH 7에서 빠른 적응에 접종 하루 만에 급격한 성장을 하는 경향을 보이고 있으나 pH 5, pH 9에서는 접종 후 3일정도가 지난 후에 급격한 성장을 함. 모두는 급격한 성장 후 2틀 정도 후에 정지상태의 경향을 보이기 시작함.



[그림. I -바-25] 영양배지에서 다른 pH에서의 *Desulfovibrio desulfuricans*의 성장곡선

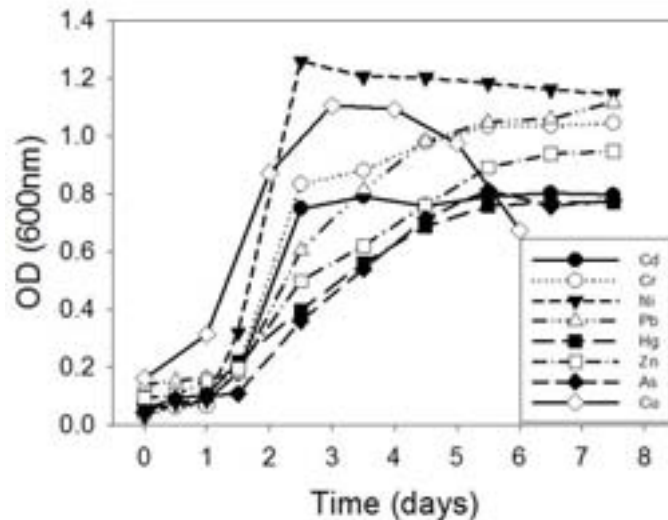


[그림. I -바-26] 인공바닷물에서 다른 pH에서의 *Desulfovibrio desulfuricans*의 성장곡선

- pH 7과 pH 9에서 대체적으로 영양배지와 인공바닷물에서 모두 *Desulfovibrio desulfuricans*은 잘 성장하는 것을 볼 수 있으나, pH 5에서 접종 후 9일이 지나도 성장하지 않는 특성을 보임. pH 7과 pH 9에서는 접종 후 이틀이 지난 후부터 급격한 성장을 하다가 4~5일이 지난 후부터 정지 상태의 특성을 보임.

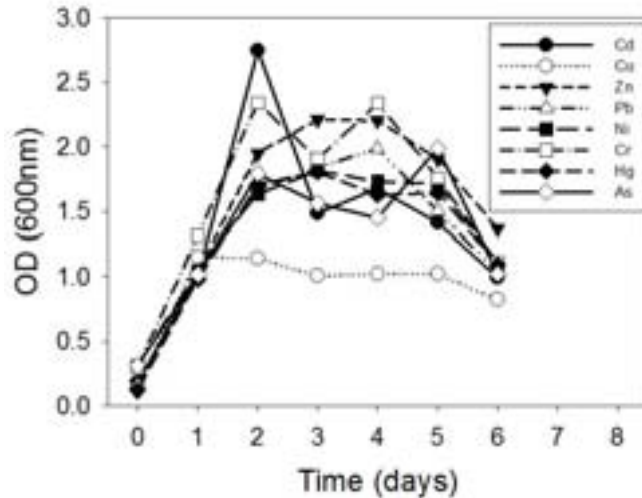
(다) 중금속에 대한 해양미생물의 내성

- 해양오염물에서 처리하고자 하는 대상 중금속으로 총 8개를 선정하였음. 용해상태에서 양 전하를 띠고 있는 Ni, Cu, Zn, Pb, Hg, Cd 그리고 용해된 상태에서 산소와 결합한 음이온을 형성하여 최종적으로 음전하를 띠거나 전하를 띠지 않으므로 정전기적 결합을 통한 제거를 기대할 수 없는 Cr, As 임.
- 해양미생물을 이용한 중금속 처리에 앞서 먼저 선별된 해양미생물이 선정한 중금속에 대해 내성을 가지고 있는지 검사를 할 필요가 있음.
- 실험에 사용된 중금속의 농도는 8개 각각에 대해서 50 ppm임.



[그림. I -바-27] *Enterobacter cloacae*의 중금속에 대한 내성

- 위의 그림에서 보는 바와 같이 8개의 중금속에 대해서 대체적으로 좋은 내성을 가지고 있음을 볼 수 있으나, Cu의 경우 접종 후 4일 후부터 서서히 성장이 떨어지는 경향을 보이고 있음.
- 실험에 사용된 중금속의 농도는 8개 각각에 대해서 50 ppm임.



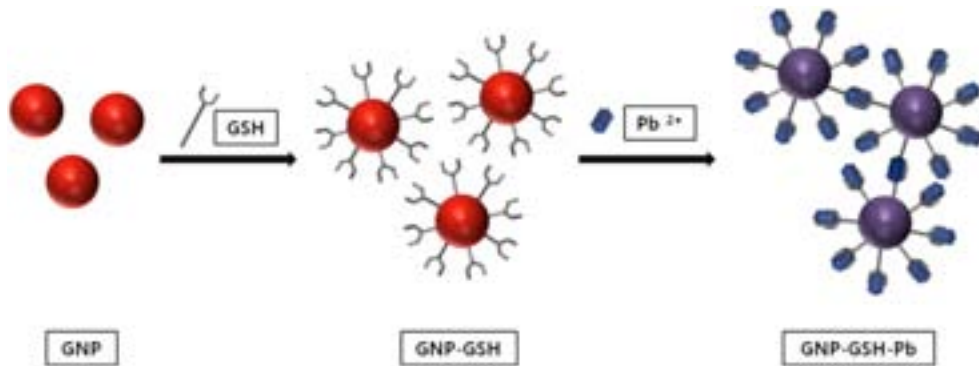
[그림. I -바-28] *Desulfovibrio desulfuricans*의 중금속에 대한 내성

- 위의 그림에서 보는 바와 같이 8개의 중금속에 대해서 대체적으로 좋은 내성을 가지고 있음을 볼 수 있으나, Cu의 경우 미생물의 OD가 다른 금속에 비해 다소 떨어지는 경향을 보이고 있음.

#### ■ 간단 신속한 중금속의 정량적 검출방법 모색

- 일반적으로 중금속 검출 방법으로는 원자흡수분광법(AAS, Atomic Absorption Spectroscopy)을 이용하거나, 유도쌍극플라즈마 질량분석법(ICP-MS, Inductively coupled plasma mass spectrometry) 라는 방법을 이용.
- 중금속을 불꽃반응 시킬 때 발생하는 빛을 분석해서 금속의 함량을 계산해 내는 것이 AAS이고, 플라즈마 상태로 만든 후 강한 자기장이 발생하는 영역을 통과시켜 중금속의 질량별로 분리한 후 그 양을 측정하는 것이 ICP-MS임.
- 본 연구에서 중금속 처리능을 검사하기 위하여 미생물에 의한 중금속 처리 전후의 양을 정량적으로 분석할 시 ICP-MS를 서울대, 환경대 등에서 외부의 전문 검사기관에 의뢰하여 사용하였음.
- 그러나, 검사에 걸리는 시간이 보통 2주 이상 걸리고, 비용도 많이 들며 매우 전문적인 지식을 가지고 숙련된 인력이 필요하며 분석이 어려운 금속이 나타나기도 하였음.
- 따라서 위와 같은 단점을 극복하고 간단하고 신속하게 중금속을 정량적으로 검출할 수 있는 방법을 모색하였음. 본 기술이 성공적으로 마무리된다면 현장에서 중금속 on-site 검사가 가능할 것으로 사료됨.
- 일차적으로 인천 북항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 함량 및 형태 비율의 검사에서 가장 문제시 되고 지속적으로 검사할 필요가 있는 Pb를 측정할 수 있는 모델로 결정했음.
- 중금속 센서의 원리는 Pb의 경우는 용액상에서 2가의 양이온 금속이며 이는 glutathione 이라는 매우 짧은 펩타이드와 강하게 결합하는 특성을 가지고 있음. 따라서 glutathione 으로 modified된 금나노입자를 제작한 후 그 용액에 Pb 수용액을 주입시키면 금 나노입자는 서로 응집(aggregation)이 되어 용액으로 색이 빨간색에서 회색으로 변하게 됨.
- 일반적으로 금나노입자는 bulk상태와는 달리 입자상태에서는 520 nm 근처의 빛을 흡수하기 때문에 금나노입자 용액의 색은 빨간색을 띠며, 이것이 응집되면 흡수되는 빛의 파장

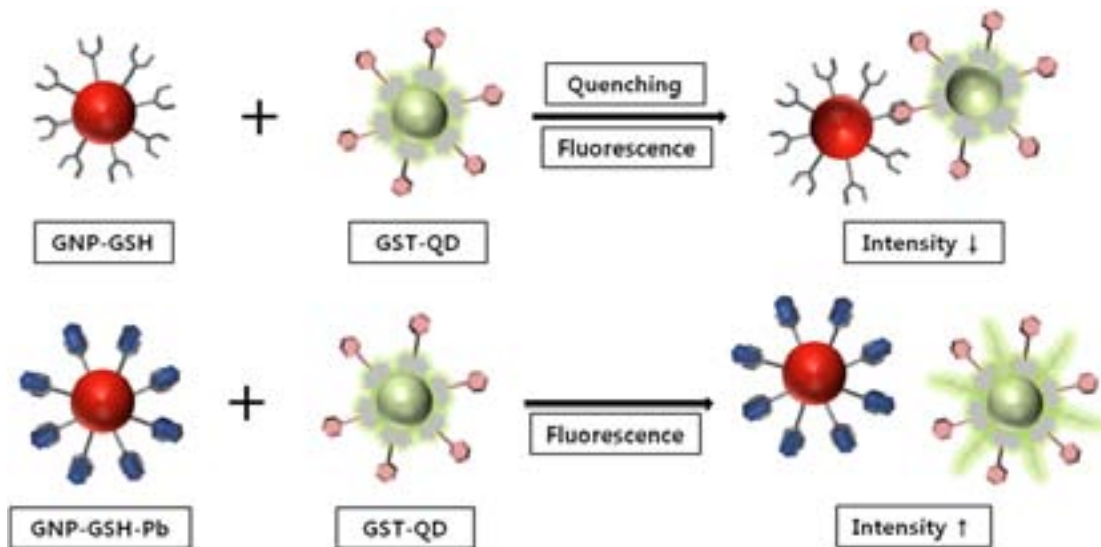
이 red-shift가 발생되어 회색으로 형태를 띠게 되는 것임.



[그림. I-바-29] Pb이온에 의한 기능성 금나노입자의 반응 모식도



[그림. I-바-30] Pb이온에 의한 기능성 금나노입자 용액의 색변화

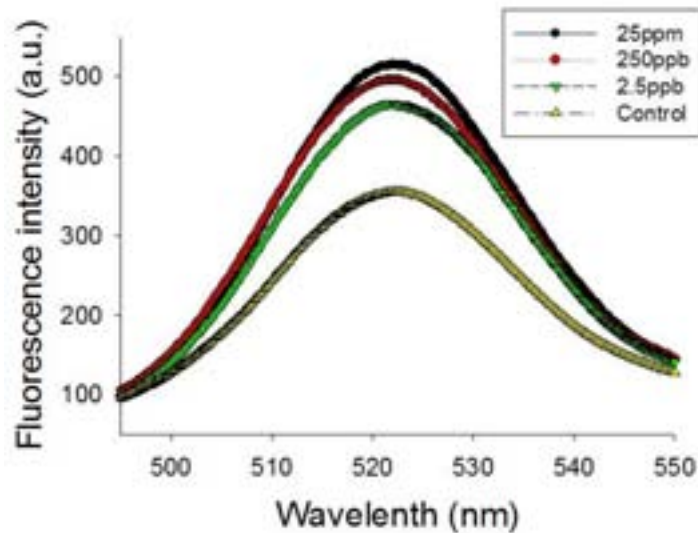


[그림. I-바-31] 형광 quenching 효과를 이용한 Pb검출 모식도

- 기본 반응은 GSH와 GST의 친화적 반응임. GSH로 표면처리된 금나노입자와 GST로 표면처리된 Q-dot 사이에서는 GSH와 GST의 친화적 결합에 의해서 반응이 발생되며 그로 인하여 Q-dot의 형광특성은 quenching이 발생하여 형광은 감소된 상태가 됨. 그러나 중금속 Pb이온이 존재하면 그 중금속 이온은 금나노입자 상의 GSH와 반응하기 때문에



GSH와 GST의 친화적 결합은 감소하여 그로 인하여 형광의 세기는 증가함.



[그림. I-바-32] 형광 quenching 효과를 이용한 Pb검출

- 그러나, 다른 금속인 Ni, Cu이온을 반응시켰을 때에는 위와 같은 형광의 증가하는 현상이 발생하지 않았음.
- 위의 결과를 토대로 차년도에서는 반응의 최적으로 조건을 도출하고자 함.

#### (4) 오염성분의 제거능이 우수한 미세조류 선별 및 고농도 세포배양

- 미세조류는 물리적, 또는 생물학적인 중금속의 흡착 기작이 있다. 미세조류의 세포막에 존재하는 다양한 작용기와 더불어 Metallothionein이라는 싸이오닌 단백질(Thionein proteins)이나 Vacuole, Organic compounds에 의해 생물학적인 흡착을 할 뿐만 아니라 작용기에 의해, 이온교환이나 Coordination에 의해서 물리적으로도 중금속을 흡착시킨다. 따라서 해양 오염물 속의 질소, 인을 영양분으로 활용하고 더불어, 중금속 성분의 제거능이 우수한 미세조류 선별하기 위한 기반 기술을 개발하는 것이 급선무다.
- 미세조류의 세포 표면에는 여러 가지 기능기가 존재하여 이러한 중금속을 물리적으로 흡착시킬 수 있을 뿐 아니라, 미세조류 세포는 Methallothionein, Cytochrome 등과 같은 세포 내 단백질과 유기물도 함유하고 있어서 중금속을 세포 내부의 액포로 흡수시킬 수 있는 생물학적 제거가 가능하다. 이러한 중금속 흡수/흡착 기작들을 활용하여 미세조류 세포가 자체적으로 가지고 있는 중금속 흡착제로서의 활성을 이용할 수 있는 기술을 오염정화 기술을 개발하고자 하였다.

- 우선, 해양오염퇴적물의 정화작용 능력을 가진 미세조류 및 부영양화에 영향을 미치는 N 과 P의 제거가 가능한 미세조류 중을 기존 선행연구에 대한 분석을 통하여 탐색하였다. 따라서, 기 확보된 미세조류 균종들에 대한 정보자료를 수집하고 분석결과를 토대로 질 소, 인, 중금속 성분의 제거능이 있는 미세조류 선별하였다 (표 I-마-16).

[표. I-마-16] N과 P와 중금속 제거가 가능한 미세조류 균주

중금속 오염 정화능력을 가진 미세조류	
- <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> : Cd, Hg, Pb	- <i>Nannochloris oculata</i> : Cr
- <i>Chlorella sorokiniana</i> : Cr, Ni, Pb, Zn	- <i>Phaeodactylum tricornutum</i> : Al, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn
- <i>Chlorella vulgaris</i> : Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn	- <i>Porphyridium purpureum</i> : Al, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn
- <i>Chlorella miniata</i> : Cu, Ni	- <i>Scenedesmus abundans</i> : Cd
- <i>Cyclotella cryptica</i> : Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, U	- <i>Scenedesmus quadricauda</i> : Cu, Ni, Zn
- <i>Heterosigma akashiwo</i> : Cd, Pb	- <i>Spirulina platensis</i> : Cd, Cr, Cu
- <i>Lyngbya taylorii</i> : Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	- <i>Ulothrix cylindricum</i> : As

N, P 제거능력을 가진 미세조류	
- <i>Anabaena doliolum</i>	- <i>Palmellopsis gelatinosa</i>
- <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	- <i>Phormidium sp.</i>
- <i>Chlorella vulgaris</i>	- <i>Selenastrum capricornutum</i>
- <i>Chlorella sorokiniana</i>	- <i>Scenedesmus bijugatus</i>
- <i>Chlorella kessleri</i>	- <i>Scenedesmus intermedius</i>
- <i>Chlorella emersonii</i>	- <i>Scenedesmus quadricauda</i>
- <i>Chlorosarcinopsis sp.</i>	- <i>Scenedesmus bicellularis</i>
- <i>Dunaliella salina</i>	- <i>Scenedesmus obliquus</i>
- <i>Euglena sp.</i>	- <i>Scenedesmus acutus</i>
- <i>Macrochloris sp.</i>	- <i>Spirulina maxima</i>
- <i>Nannochloris sp.</i>	

- 먼저 이중에서 실험에 사용할 미세조류로는 제거능력이 탁월하다고 알려진 *Chlamydomonas reinhardtii*와 *Chlorella sorokiniana*을 선택하였고, 대조구로 *Chlorococcum littorale*, *Ettlia oleoabundans* (*Neochloris oleoabandans*)을 균주로 선택하였다.

- 다음의 균주들은 *Chlorococcum littorale*을 제외하고 TAP 배지를 사용하였으며 *Chlorococcum littorale*는 ASW와 MC(KNO<sub>3</sub>) 배지를 1:1로 섞어 배지로 사용하였다. 미세조류의 광배양은 삼각 플라스크와 광배양 incubator를 이용하였고, 배양 조건으로는 23°C, 175 rpm으로 광량 45 uE/m<sup>2</sup>/s에서 배양하였다.
- *Chlorella sorokiniana*는 1.4 g/l까지 배양하였고 *Chlamydomonas reinhardtii*는 1.33 g/l, *Chlorococcum littorale*은 1.15 g/l 그리고 *Neochloris oleoabundans*는 1.32 g/l까지 고농도로 배양한 후 1 g/l 로 희석하여 증금속 제거를 위한 초기조건을 동일하게 설정하였다. 고농도 세포 배양은 각 균주별로 모두 세포농도를 OD 660가 3.0 이상 도달할 때까지 고농도로 배양하였다.

[표. I -바-17] TAP(Tris Acetate Phosphate) 배지 조성

Stock solution	Volume	Component	Concentration in stock solution	Concentration in final media
tris base	2.42 g	H <sub>2</sub> NC(CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub>		2.00 ·10 <sup>-2</sup> M
TAP slats	25ml	NH <sub>4</sub> Cl	15 g/l	7.00 ·10 <sup>-3</sup> M
		MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	4 g/l	8.30 ·10 <sup>-4</sup> M
		CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	2 g/l	4.50 ·10 <sup>-4</sup> M
Phosphate solution	1ml	K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	28.8 g/100ml	1.65 ·10 <sup>-3</sup> M
		KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	14.4 g/100ml	1.05 ·10 <sup>-3</sup> M
Trace elements solution (Hutner trace elements)	1ml	NaEDTA ·2H <sub>2</sub> O	5.00 g/100ml	1.34 ·10 <sup>-4</sup> M
		ZNSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	2.20 g/100ml	1.36 ·10 <sup>-4</sup> M
		H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	1.14 g/100ml	1.84 ·10 <sup>-4</sup> M
		MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	0.50 g/100ml	4.00 ·10 <sup>-5</sup> M
		FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.50 g/100ml	3.29 ·10 <sup>-5</sup> M
		CoCl <sub>2</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.16 g/100ml	1.23 ·10 <sup>-5</sup> M
		CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.16 g/100ml	1.00 ·10 <sup>-5</sup> M
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> MoO <sub>3</sub>	0.11 g/100ml	4.44 ·10 <sup>-6</sup> M		
Acetic acid	1ml	CH <sub>3</sub> COOH		

[표. I -바-18] MC media 조성

Solution	Concentration	Concentration in final media
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1.25	1.25 g / 500ml
KNO <sub>3</sub>	1.25	1.25 g / 500ml
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	1.25	1.25 g / 500ml
A5 solution		1ml / 500ml
Fe solution		1ml / 500ml

[표. I -바-19] ASW(Artificial Sea Water media) 배지 조성

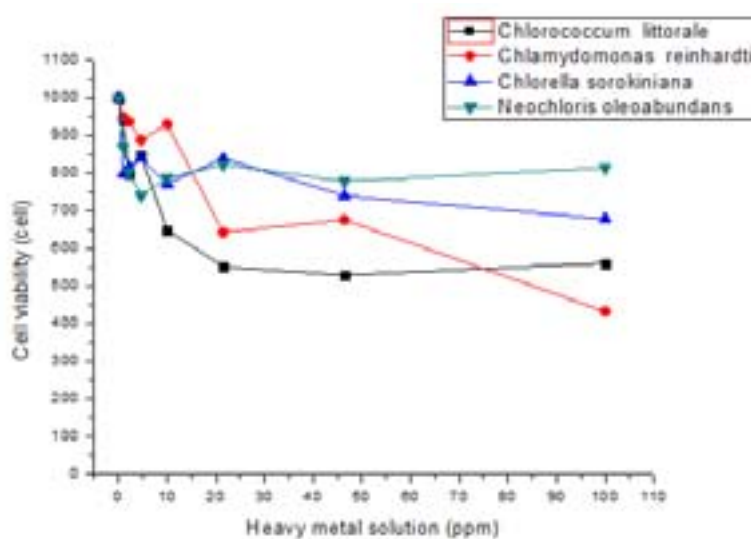
a. Dry component			
Mineral Salt	Concentration	Concentration in stock solution	Concentration in final media
NaCl	400 mM		23.38 g/l
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	20 mM		4.93 g/l
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	10 mM		1.1 g/l
KBr	1.7 mM		0.12 g/l
KCl	10 mM		0.74 g/l
MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	20 mM		4.06 g/l

b. Wet component			
Solution	Concentration	Concentration in stock solution	Concentration in final media
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.2 mM	12.36 g/l	1 ml
NaNO <sub>3</sub>	0.88 mM	75 g/l	1 ml
Vitamin Mix	stock*		0.5 ml
TRIZMA	5%, pH7.8	50 g/l	5 ml

\*stock of vitamin solution : Vitamin B12(1.0 g/l) 1ml/l, Biotin(0.1 g/l) 10ml/l, Thiamine HCl 0.2 g/l

(가) 중금속 독성에 대한 미세조류의 생존능력

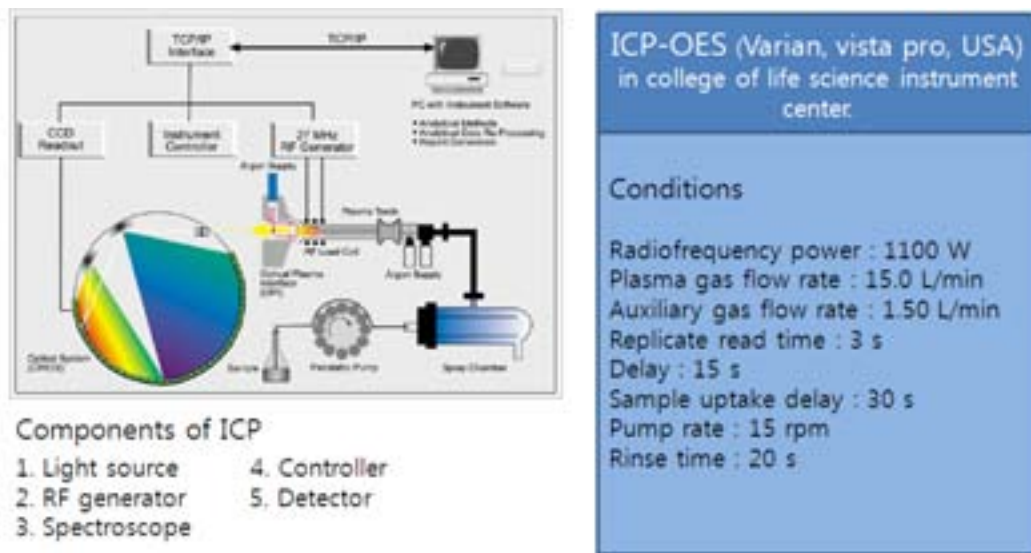
- 중금속이 함유되지 않은 조건에서의 세포수를 1000으로 정하여 기준으로 정하고 중금속의 농도를 100ppm까지 점차 증가시켜 실험해보았다. 이때, 중금속 용액에서 활성상태의 미세조류의 세포수를 haemato cytometer로 측정하였다. 중금속 용액에서 세포 수는 처음에 비해 감소하나 일정 농도 이상의 중금속에서는 *Chlamydomonas reinhardtii*를 제외하고 완만하게 감소함.



[그림. I -바-33] 미세조류의 중금속 독성에서의 생존능력

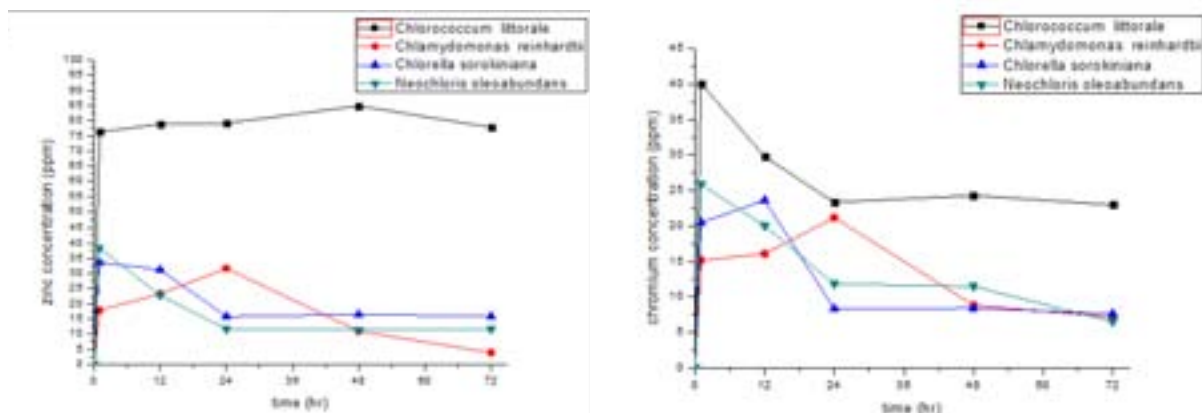
(나) 미세조류에 의한 중금속 흡착

- 중금속 흡착능의 측정은 다음과 같이 실행하였다. 먼저 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, CdSO<sub>4</sub>, CuSO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub> 등의 성분을 함유하는 인위적인 중금속용액을 제작하였고, 중금속 stock용액을 희석하여 1ppm에서 100ppm까지 여러 (6단계) 농도의 중금속 용액을 만들었고 이를 미세조류 세포와 혼합하여 일정한 온도(23℃)와 pH 6에서 흡착반응을 일으켰다.
- 이때, 미세조류 세포는 우선 4가지 균종의 생세포를 활용하였는데 고농도로 배양된 미세조류 세포를 원심분리로 회수한 후 1회 세척하고 여과를 거쳐 건조시킨 후에 사용하였다. 이후, 1시간 12시간 24시간 48시간 72시간 마다 10 mL의 샘플을 채취하여 ICP-OES analysis 분석을 통하여 중금속 흡착율을 계산하였다.



[그림. I -바-34] ICP-OES를 이용한 중금속 농도 측정조건

- 시간과 농도에 따라 측정하여 최종적으로 분석된 결과, 중금속의 종류에 따라 흡착율이 달랐으며 농도에 따라 미세조류의 중금속 독성에 대한 내성에 의해서 흡착율이 낮아지거나 탈착율이 증대되기 하였고, Zn용액을 이용한 중금속 제거 실험을 통해 *Chlorococcum littorale* 이 가장 높은 흡착율(79.4 mg/L)을 보이는 것으로 나타남.

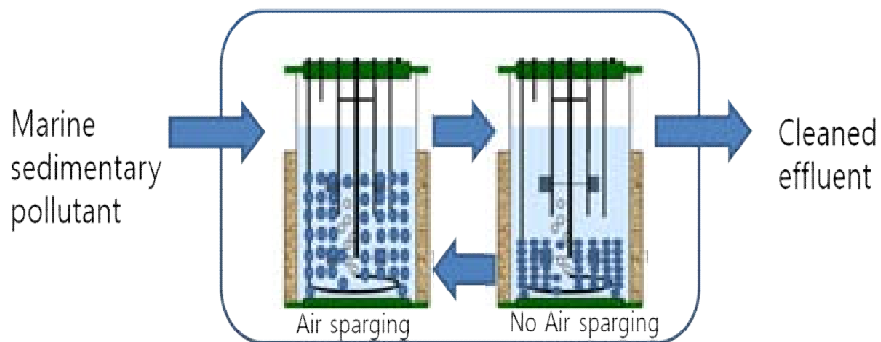


[그림. I -바-35] 미세조류에 의한 중금속(Zn, Cr)의 흡착 곡선

○ 이러한 흡착곡선을 바탕으로 향후 진행될 연구 내용은 측정된 미세조류 흡착 데이터를 이용하여 미세조류 종에 따른 중금속 흡착 패턴과 이에 따른 세포 생존능을 비교하는 것이며,

- a. Langmuir model
- b. Langmuir Freundlich model
- c. Toth model

○ 위 3가지 흡착 모델 식에 실험을 통해 얻어진 기대치를 대입하여 중금속 흡착량을 예측하고 가장 적합한 흡착 예측 모델을 규명할 수 있다. 이를 바탕으로 향후에는, 단일 세포로 이루어진 미세조류를 고정화하여 연속적으로 중금속을 흡착해 나가는 연속 처리공정을 다음과 같이 개발하고자 한다 (그림 I-마-38).



[그림. I-마-36] 중금속 연속 흡착 모델

(5) 지형 탐사 모니터링 장비 및 운영 알고리즘 기술 현황 및 적용 사례 조사:  
오염지역 수중 지형 탐사 기법 조사

(가) 수중 환경인식용 소나/영상시스템 기술 조사

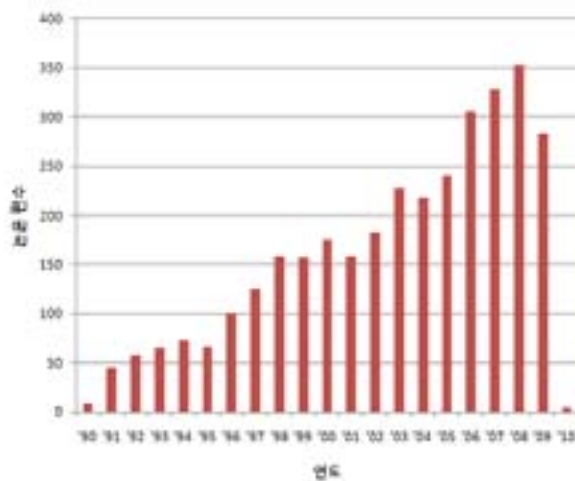
○ 관련 특허는 1970년대 후반에 출원이 시작되어 1980년대 후반부터 1990년대 중반까지 빠른 속도로 출원이 증가하였으나, 1990년대 후반에 큰 폭으로 감소하였고, 2000년대 접어들어 다시 급속히 증가하는 모습을 보이고 있음. 미국특허와 일본특허가 우세하게 나타나고 있으며, 출원인도 미국 및 일본 기업이 핵심특허를 주도하고 있음[연안해역 관리 및 환경모니터링을 위한 무인수중로봇 특허동향, 특허청, 2008]



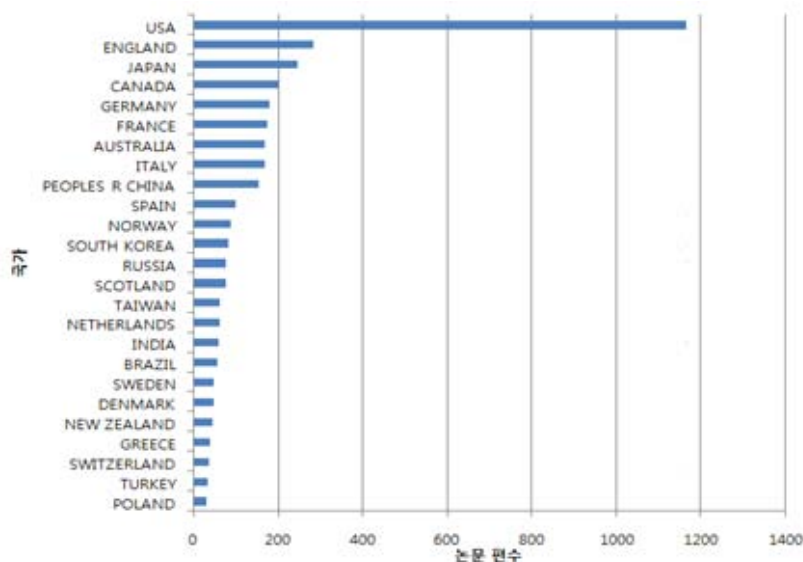
- 수중 환경 인식 기술에서는 어군 탐지 또는 수중 상황 관측 장치에 관한 특허와 해저면의 이미지를 탐색하고 기록하는 논문이 주요 기술로 발표되고 있음.
- 수중 소나 및 영상/소나 신호 처리 및 분석 기술에서는 소나 장치를 사용한 수중 추적 시스템과 빔의 형성이나 조정에 관한 특허가 핵심특허로 출원되었고, 소나 시스템의 오차분석 및 처리에 관한 논문이 주로 발표됨

(나) 수중 지형 탐사 기술 관련 논문 조사

- 수중 지형 탐사기술과 관련된 논문의 발행건수는 1990년 초반부터 발행되기 시작하여 최근까지 꾸준한 증가 추세를 보이고 있으며, 2008년도에 가장 높은 발표를 보임[수중작업 능력 고도화를 위한 다기능 지능형 수중로봇 기술분야 특허동향, 특허청, 2009]

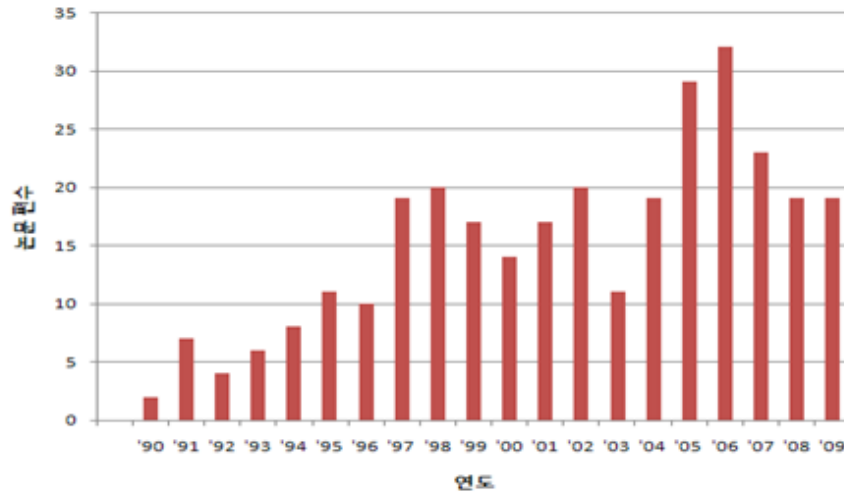


- 국가별 논문발행은 미국이 가장 많은 연구 결과를 보이며, 영국, 일본, 캐나다, 독일, 프랑스 순의 결과를 보이고 있는 것으로 나타났으며, USN이 가장 많은 논문수를 보였으며, US GEOL SURVEY, WOODS HOLE OCEANOLOG INST, RUSSIAN ACAD SCI, MIT, TEXAS A&M UNIV 등의 기관이 주요 선도 기관으로 나타남

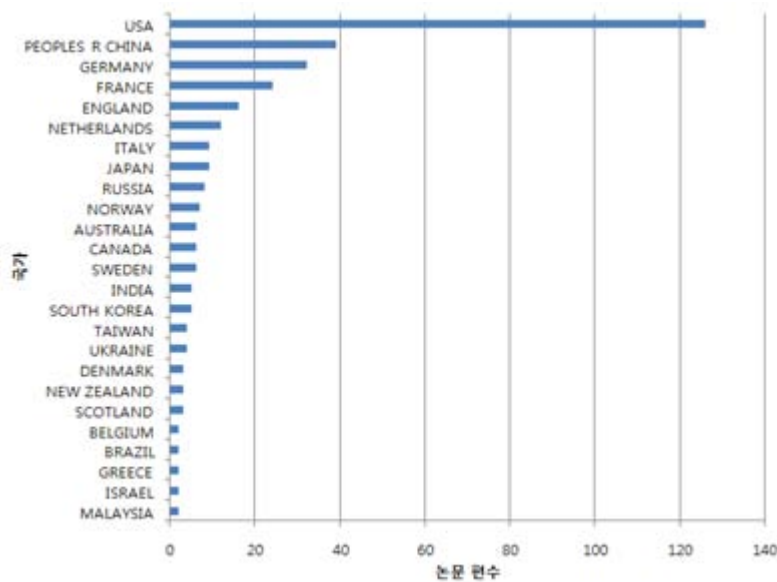


(다) 수중 3차원 소나/레이더 기술 논문 조사

- 수중 3차원 소나/영상/레이더 기술과 관련된 논문의 발행건수는 1990년대 초반부터 발행되기 시작하여, 1997년 이후부터 최근까지 약 15건 내외로 꾸준히 발행되고 있음[수중작업능력 고도화를 위한 다기능 지능형 수중로봇 기술분야 특허동향, 특허청, 2009]



- 국가별 논문발행은 미국이 가장 많은 연구 결과를 보이고 있으며, 중국, 독일, 프랑스, 영국 순의 결과를 보이고 있는 것으로 나타났으며, USN이 가장 많은 논문수를 보이며, 그 다음으로는 NASA, UNIV HAMBURG, UNIV KIEL, RUTGERS STATE UNIV, FLORIDA ATLANTIC UNIV 등의 기관이 주요 선도 기관으로 나타남



(라) 수중 지형 탐사 및 3차원 레이더 기술 관련 특허 조사

- 수중 지형 탐사기술과 관련된 핵심 특허는 시스템에 관한 특허 6건, 장치에 관한 특허가 1건으로 조사됨. 세부 기술별로 보면 물 압력, 위치, 깊이를 측정하는 계측장치, 3차원 맵핑 시스템, 계측장치의 위치변경, 진동과 검출방법, 수중센서를 이용한 DATA 보정 등에 대한 기술들이 출원됨



출원 번호	특 허 명
JP2000-260273	해저의 지하 구조 탐사 방법 및 동 방법을 실시하기 위한 장치
JP2001-208062	해저 지층 탐사 시스템
US2002-480072	Underwater sampling and mapping apparatus
KR2004-0079373	수중 지반 계측 시스템 및 그 설치 방법
KR2006-0103300	해저 지형을 3차원적으로 가시화하는 시스템 및 이의 방법
KR2006-0103301	해양에서 측량되는 자료를 3차원적 형태로 가시화하는 시스템 및 이의 방법
JP2006-191392	수저토사 두께 계측 장치 및 표사 관측 시스템

- 3차원 수중 소나/레이더 기술분야의 핵심특허는 방법에 관한 특허 3건, 시스템에 관한 특허 6건, 장치에 관한 특허 2건으로 조사됨. 세부 기술별로 보면 다방면의 초음파, 광원을 이용한 수중 레이더, 전방위 개념의 레이더 방식등에 관한 특허기술들이 출원됨

출원 번호	출원명
US2001-909141	Sonar beamforming system
US2002-232812	Frequency division beamforming for sonar arrays
US2003-397355	Automatically tracking scanning sonar
US2004-996008	System and method for underwater target detection from broadband target returns
US2005-199162	Forward-looking sonar and underwater image display system
US2008-076953	Underwater Detection Device
US2009-319586	Side scan sonar imaging system with enhancement
US2009-319594	Side scan sonar imaging system with boat position on display
US2009-319604	Side scan sonar imaging system with associated GPS data
US2009-348925	Airborne Laser-Acoustic Mine Detection System

**(마) 해양퇴적물 채취 및 현장 오염도 측정 장비 및 운영 기술 현황 및 적용 사례 조사**

**① 해양오염퇴적물 채취 및 모니터링 장비 조사**

- 해양오염퇴적물 채취 및 모니터링 장비는 개별적인 장비로 개발 및 운영

**■ 시추 및 채취장비**

- 현재 세계적으로 해양지반의 특성을 규명하기 위하여 사용하고 있는 방법은 단순 시추조사, 시료채취 및 지반조사장비의 운영 등이 있다. 표 I-마-20은 시추장비별 시추 깊이<sup>22)</sup>를 살펴보면 대체적으로 매우 깊은 수심에서도 가능하며, 코어형 시추기는 표층 0.1 ~

6.0m 내외 까지 사용 가능하지만, 굴진형 시추기의 경우에는 윈치 등의 부대장비가 지원된다면 아주 깊은 심도까지 시추가 가능하다. 우리나라의 경우, 현재까지는 별도의 해양 시추장비가 없으며, 대부분 해외 장비를 활용하고 있다.

[표. I -바-20] 시추장비의 성능 (일반적인 경우에 대한 데이터)

Equipment Description	Maximum Water Depth [m]	Penetration [m]
Drill mode borings from vessels Unlimited	Unlimited*	Unlimited*
Rock corer (seabed unit)	200m	2m ~ 6m
PRODTM seabed drilling/coring	20m ~ 2,000m	2m ~ 100m
Basic gravity corer	Unlimited*	1m ~ 8m
Piston corer	Unlimited*	3m ~ 30m
Vibrocorer	1,000m	3m ~ 8m
Box corer	Unlimited*	0.3m ~ 0.5m
Seabed push-in sampler	250m	1m ~ 2m
Grab sampler (mechanical)	Unlimited*	0.1m ~ 0.5m
Grab sampler (hydraulic)	200m	0.3m ~ 0.5m

\*의미는 윈치와 각종 부대 장비에 의해서 결정.

## ② 해양오염퇴적물 모니터링 장비 제안

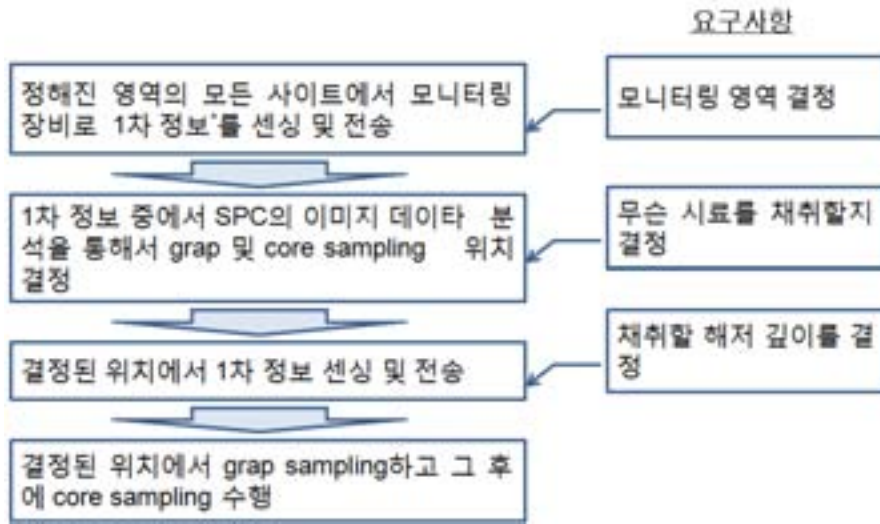
- 다음 그림은 본 연구를 통해서 제안하는 해양오염퇴적물 모니터링 장비의 구상도이고 주요 구성 부분은 수온, 용존산소, 포화도, 탁도, 염분, 전도도, 유속 등을 측정하는 접촉 센서들, 수면의 현재 상태를 실시간으로 촬영하는 수면촬영 카메라, 퇴적물의 퇴적층을 실시간으로 촬영하는 SPC(Segment Profile Camera), 해저 표층의 퇴적물을 채취하는 Surface Grab Sampler와 Core Sampler, 배위에서 센서 데이터, 영상 데이터를 모니터링 가능하도록 하는 무선통신 모듈로 구성된다. 표면의 상태 영상은 수면촬영카메라, 해저표층 30cm 이하 퇴적층 영상은 SPC, 해저표층 50cm 이하의 퇴적물 채취는 surface grab sampler, 해저표층 1m 이하의 퇴적물 채취는 core sampler가 이용할 수 있어서 다양한 깊이의 해저표층의 오염도를 모니터링 가능하다.



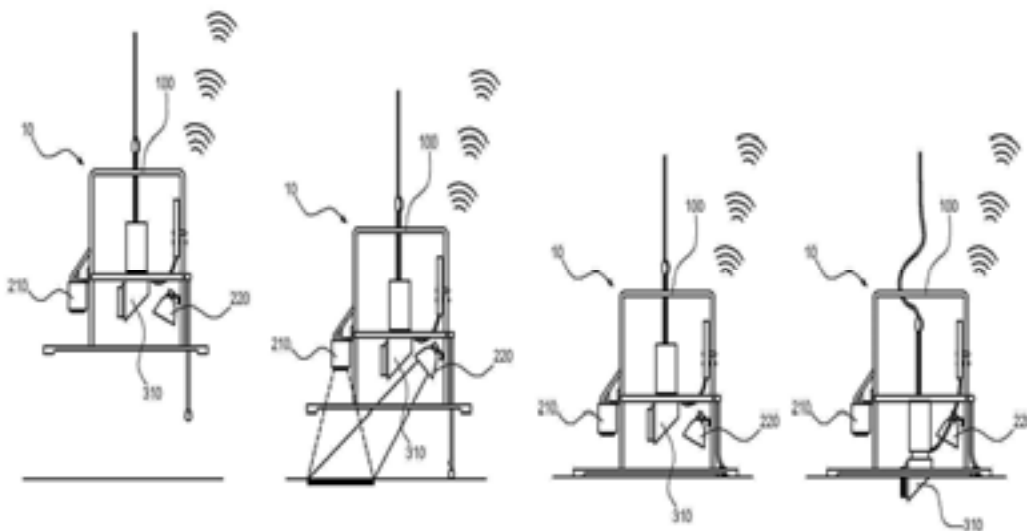
22) 『해양지반조사분야 Geo-Mechatronics 기술 조사』 활동 보고서, 한국해양연구원, 장인성, 2008. 11.

### ③ 해양오염퇴적물 모니터링 장비 운영 알고리즘 제안

- 해양오염퇴적물 모니터링 장비의 운영은 다음 그림과 같은 순서도에 따라서 진행된다. 먼저, 해양오염퇴적물의 오염도를 모니터링할 영역을 결정 한 후에 그 정해진 영역의 모든 사이트에서 1차 정보를 감지하여 관리자에게 전송한다. 둘째, 1차정보 중에서 SPC 영상 분석을 통해서 좀 더 세밀한 정보를 얻기위한 시료채취 사이트를 결정한다. 셋째, 결정된 시료채취 사이트에서 다시 1차정보를 감지하고 그 후에 시료채취를 수행한다. 이러한 장비 운영 알고리즘을 이용하면 모니터링 시간을 줄이고 해양오염퇴적물의 오염도 정보를 깊이별(해저표층 ~ 최대 2 m)로 검출할 수 있다.



- 여기서 1차 정보는 다음 그림과 같이 퇴적물 샘플링 장치 중에서 SPC 촬영을 운영에 의해서 얻어진다. 먼저 모니터링 장비가 해저표면으로 내려가면서 실시간으로 수온, 용존산소, 포화도, 탁도, 염분, 전도도, 유속을 측정하는 데이터와 수면 및 수중의 현재 상태를 실시간으로 촬영한 영상 데이터를 관리자에게 무선(음향신호)으로 전송한다. 둘째, 수중촬영에 의한 해저표층의 상태를 모니터링에 의해서 모니터링 장비를 해저표면에 안전하게 안착한다. 셋째, SPC를 해저표층에 유압장비를 이용해서 침투시킨 후에 해저면 퇴적층 영상을 관리자에게 무선으로 전송한다.

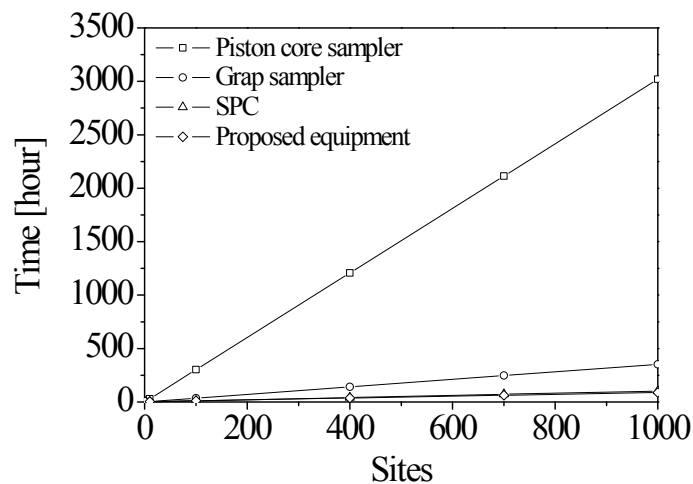


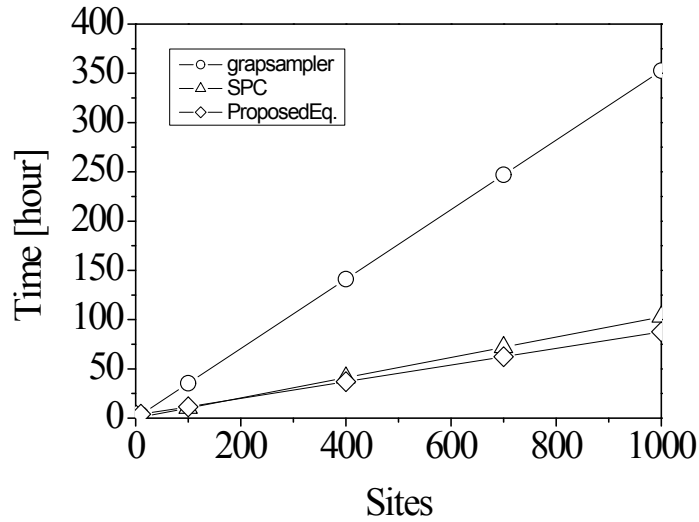
④ 제안한 해양오염퇴적물 모니터링 장비의 모니터링 운영속도

- 수심이 20m에서 해양오염퇴적물의 1회 시료채취 및 모니터링 시간을 장비별로 비교한 결과는 다음과 같다. 단, 각 처리시간은 대략적인 평균 시간을 사용한다. 1회 모니터링인 경우에 제안한 해양오염퇴적물 모니터링 장비의 모니터링 운영속도가 가장 오랜 시간이 걸림을 나타낸다.

시간	Piston core Sampler	grap sampler	SPC	Proposed equipmnets
준비시간	7200	600	300	7200
입수시간	5	5	5	5
시료채취/ 모니터링 시간	5	5	5	15
출수시간	60	60	60	60
출수 후 샘플링 분리시간	3600	600	0	3600
총 채취 시간	10870	1270	370	10880

- 제안한 모니터링 장비를 앞에서 설명한 장비 운영 알고리즘에 따라서 1회 침수에 1회 코어 채취, 1회 그랩 채취, 여러 사이트의 SPC 촬영에 의한 분석이 이루어진다. 여러 사이트를 모니터링 및 채취하는 경우에 시간을 비교한 결과는 다음 그림과 같다. 각 처리시간은 대략적인 평균 시간을 사용해서 정확한 예측 결과를 보이지는 않으나 대략적인 모니터링 운영 시간의 경향은 알 수 있다. 제안한 해양오염퇴적물 모니터링 장비가 사이트가 100개 이상이면 코어 채취기, 그랩 채취기, SPC보다 모니터링 시간을 단축함을 보인다.





⑤ 해양오염퇴적물 모니터링 장비 구성에서의 주요 업무 및 국산화 가능범위 결정 (0~100%)

- 해양오염퇴적물 모니터링 장비의 설계 기술 (100% 주관)
- 해양오염퇴적물 모니터링 장비를 위한 개별 장비 및 부품들의 조립 기술 (기본 프레임 외 주 제작 및 센서부분 조립설계)
- 해양오염퇴적물 모니터링 장비의 운영 메커니즘(100%)
- 개별 구성 요소 기술: SPC image processing 알고리즘 (80%, 개발 TOOL에 기반을 둔 자체개발)
- 개별 구성 요소 기술: 센서 기술 ( 기존 센서 최적화 및 적용 기술 개발)

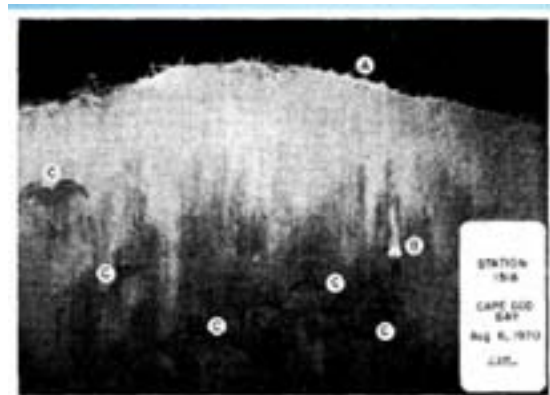
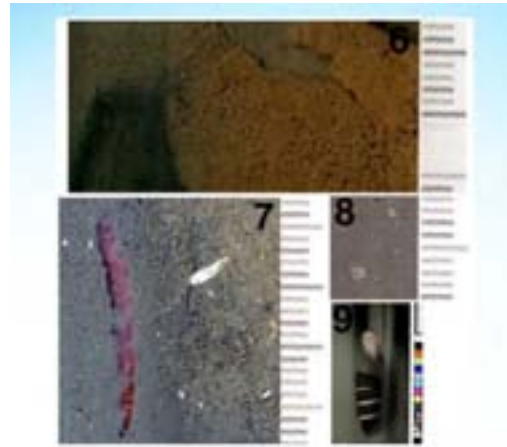
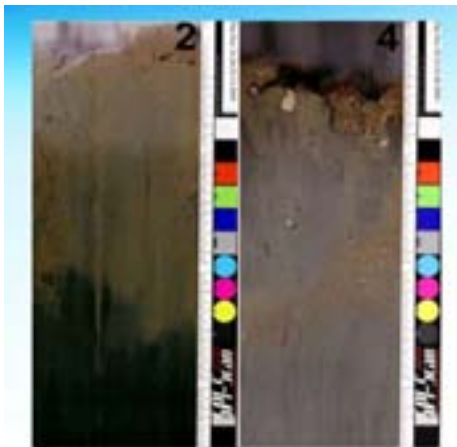
(바) SPC의 이미지 분석방법 및 개발환경 조사

■ SPC의 PARAMETER 및 관측범위 조사

PHYSICO-CHEMICAL SPI PARAMETERS	Observation
Grain size	usually estimated visually; coarser sediments may be quantified through automated particle analysis
Prism penetration depth	as a proxy for sediment fabric
Mud clasts	number, size, oxidized or reduced
Sediment surface relief	must allow for image orientation/scale
Redox area/depth	ARPD
Redox contrast	Relict redox boundaries

Methane gas vesicles	number, size, depth
Hydrocarbons	H-spots (Diaz et al. 1993), or spectroscopically (Rhoads et al. 1997)
Site-specific observations	
<b>Biological SPI Parameters</b>	<b>Observation</b>
Epifauna	number, taxa
Tube density	number per linear centimetre
Feeding voids	epifaunal, infaunal, mixed, area
Apparent species richness	
Successional stage	I, II, or III defined in relation to the Pearson-Rosenberg model and that of Rhoads and Germano (1982)
Site-specific observations	particular fauna, bacterial mats, etc.

■ SPC 통해 얻은 영상의 주요 예



---

## ■ SPC 영상을 통한 검출 주요 정보

- SPC 영상은 대개 해양퇴적물이 산화층을 포함하고 있는지를 검출(해양동물이 퇴적층의 환기시키고 있는 양), 산화된 해양퇴적물을 검출, burrow나 void를 강조하기 위한 해양퇴적물-물-표면(sediment -water -interface; SWI) 검출, 퇴적물의 알갱이 크기 검출한다.

### ① SPC의 이미지 분석 알고리즘 조사

#### ■ 이미지 분석 개발 환경 검토 및 조사

- OpenCV 등 컴퓨터비전의 상용 최적 개발 환경 활용 검토하고 The VSG IPA TOOLBOX 등 MATLAB의 무료 제공 개발 환경 구축한다. 또한, 연구자의 다년간 비전 검사 목적의 개발 모듈을 최적화하여 적용한다.
- SPC 이미지 분석 기존 알고리즘 정리 및 검토(논문/ 특허): SPI DB 구축

#### ■ SPC 이미지 분석 단계별 방법

- 먼저, 잡음 제거 전처리는 Low Pass Filtering, Histogram Equalization, Median Filtering, Gaussian Filtering을 수행한다. 둘째, Enhancement는 Minterm Filtering, Region Stretching을 수행한다. 셋째, Featuring extraction & Frequency Analysis는 color transform, LoG, Edge detection, FFT, Kalman Filtering을 수행한다. 넷째, Grouping은 Autocorrelation, feature oriented clustering을 수행한다. 마지막으로 퇴적물 및 그 크기를 검출하기 위해서 Region growing, Quad Tree Segmentation, Labeling, Morphological operation 등을 수행한다.

### ② 해양오염퇴적물 모니터링 장비 프레임 구조 설계

- 사용 재질 (SUS 304 : Stainless Steel)의 물성

항복 응력 :  $1.72339e+008$  N/m<sup>2</sup>

인장 응력 :  $5.13613e+008$  N/m<sup>2</sup>

탄성 계수 :  $2e+011$  N/m<sup>2</sup>

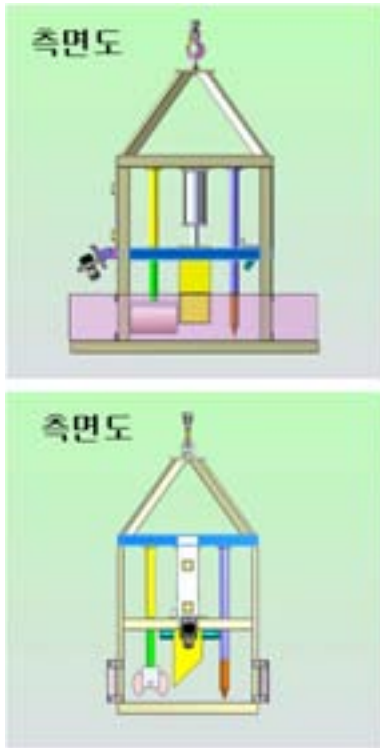
포아송비 : 0.28

질량 밀도 :  $7800$  kg/m<sup>3</sup>

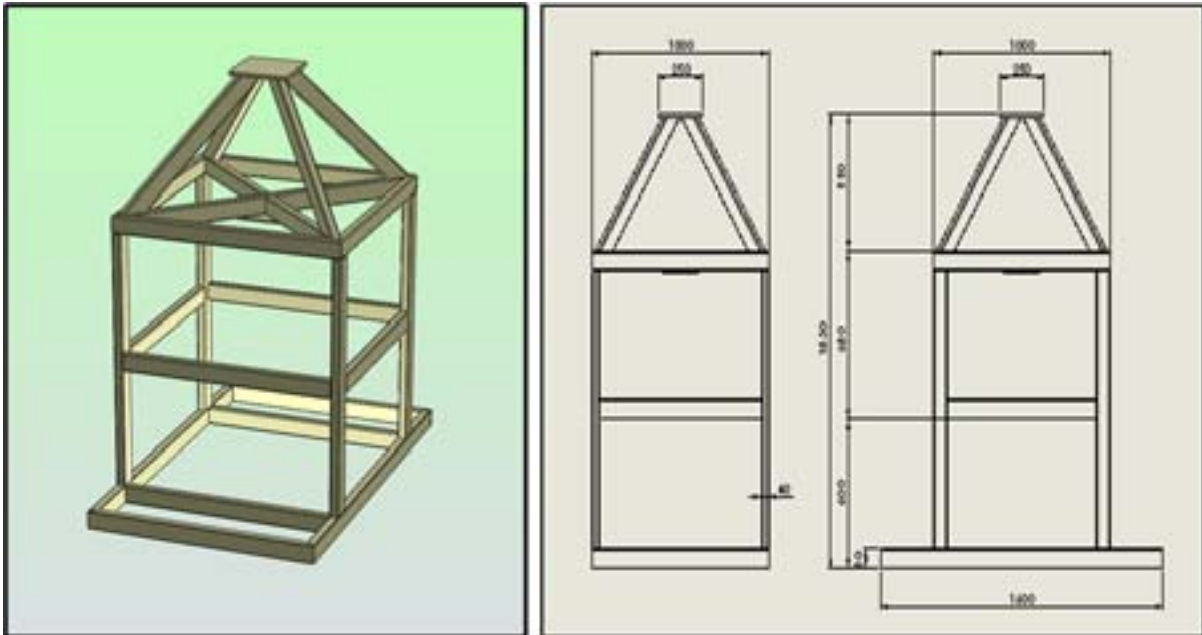
전단계수 :  $7.7e+010$  N/m<sup>2</sup>

열 팽창률 :  $1.1e-005$  /Kelvin

- 시험 조건 : 수중 50m 잠수시 받는 수직압력  $5\text{kgf/cm}^2$  작용 가정
- Design/Analysis Program: Solidworks
- 해석 유형: 정적 해
- 사각 파이프를 이용한 장비 설계도
- 다음 그림은 사각 파이프를 이용한 장비설계도면을 나타낸다.

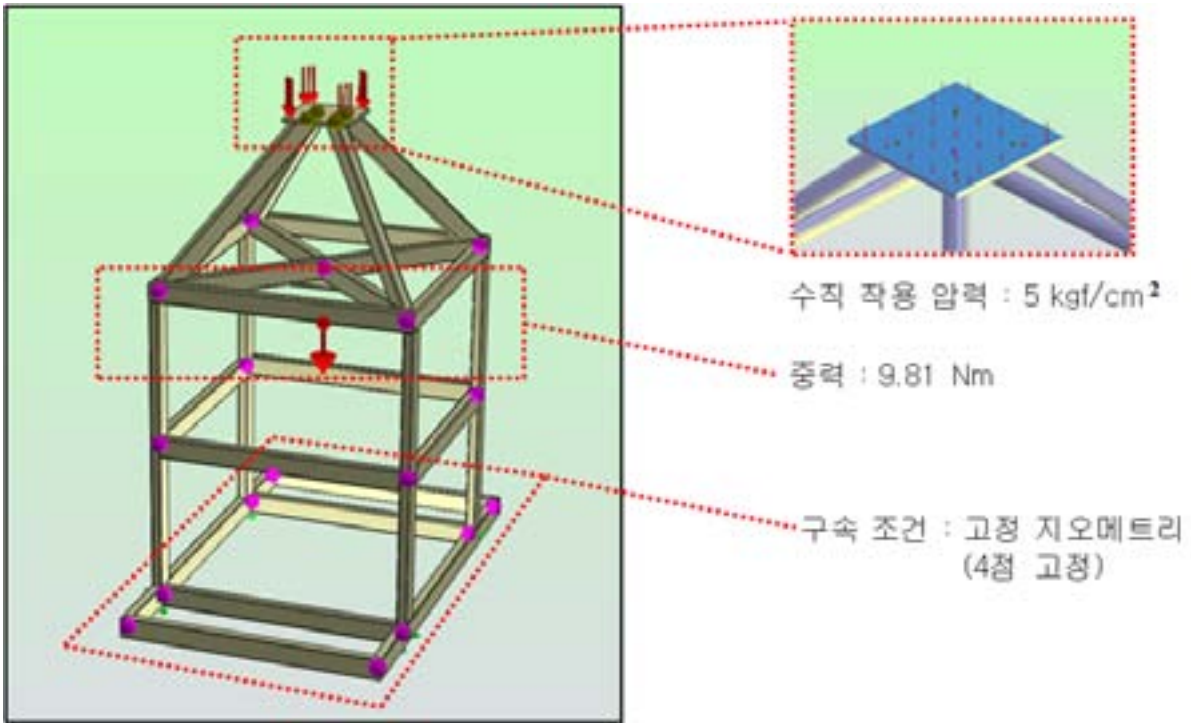


- 다음 그림은 사각 파이프를 이용한 장비설계의 모델링에 사용된 구조의 실제 치수를 나타낸다.

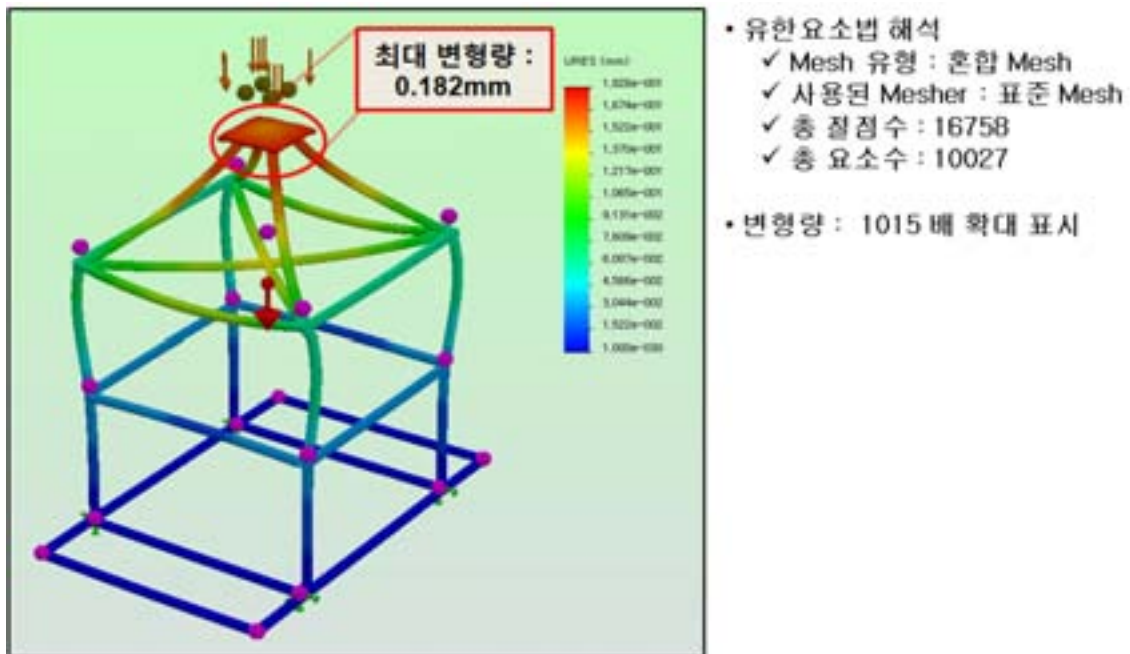


- 다음 그림은 구속조건과 하중조건을 나타낸다. 수직 작용 압력은  $5 \text{ kgf/cm}^2$ 이고 중력  $9.81 \text{ Nm}$ 이 작용하고 구속조건은 4점을 고정한 고정 지오메트리를 사용한다.



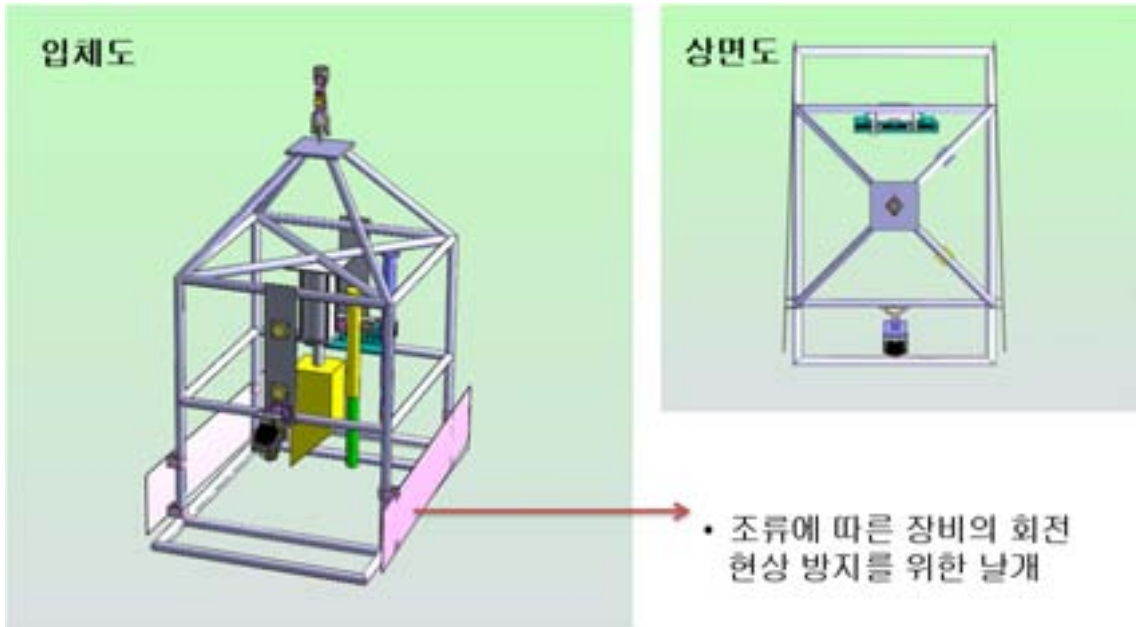


○ 다음 그림은 유한요소법 해석한 결과와 프레임의 변형량을 해석한 결과를 나타낸다. 최대 변형량이 0.182 mm으로 변형이 거의 발생하지 않으므로 수중 50m까지 사용이 가능함을 보인다.

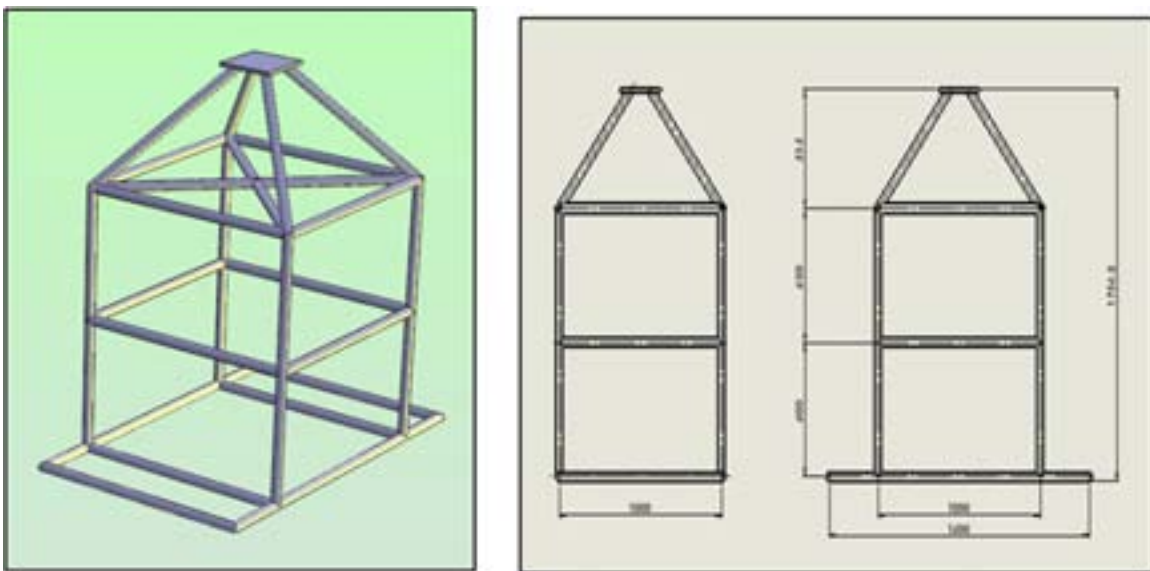


■ 원형 파이프를 이용한 장비 설계도

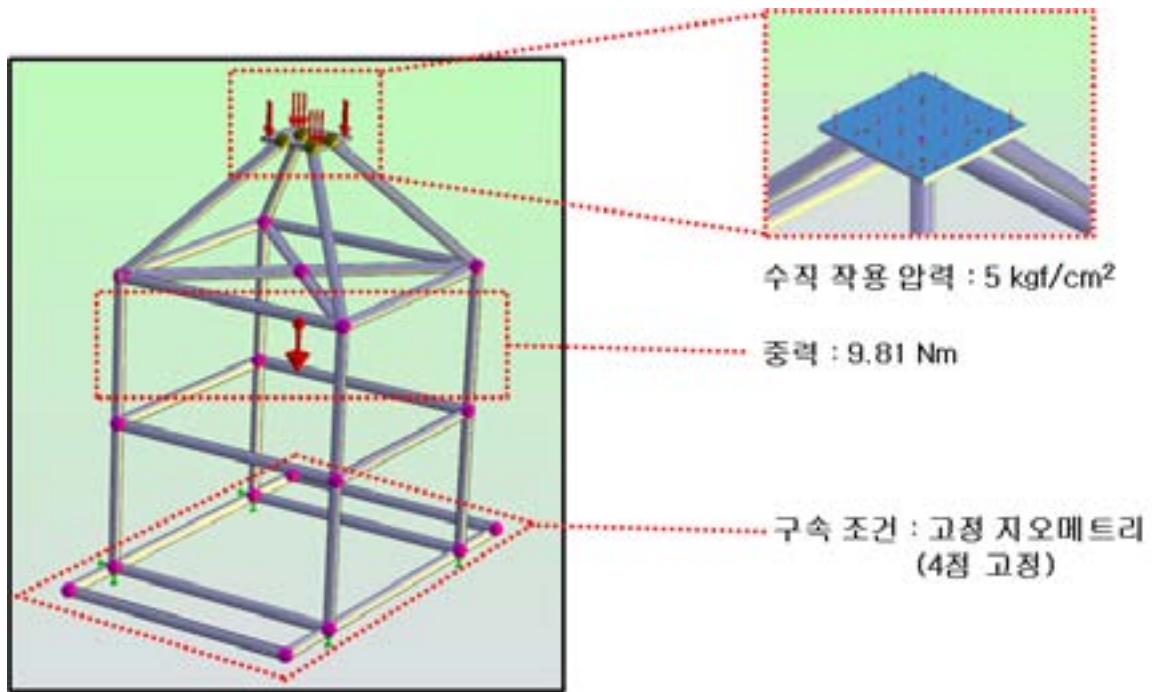
○ 다음 그림은 원형 파이프를 이용한 장비설계도면을 나타낸다.



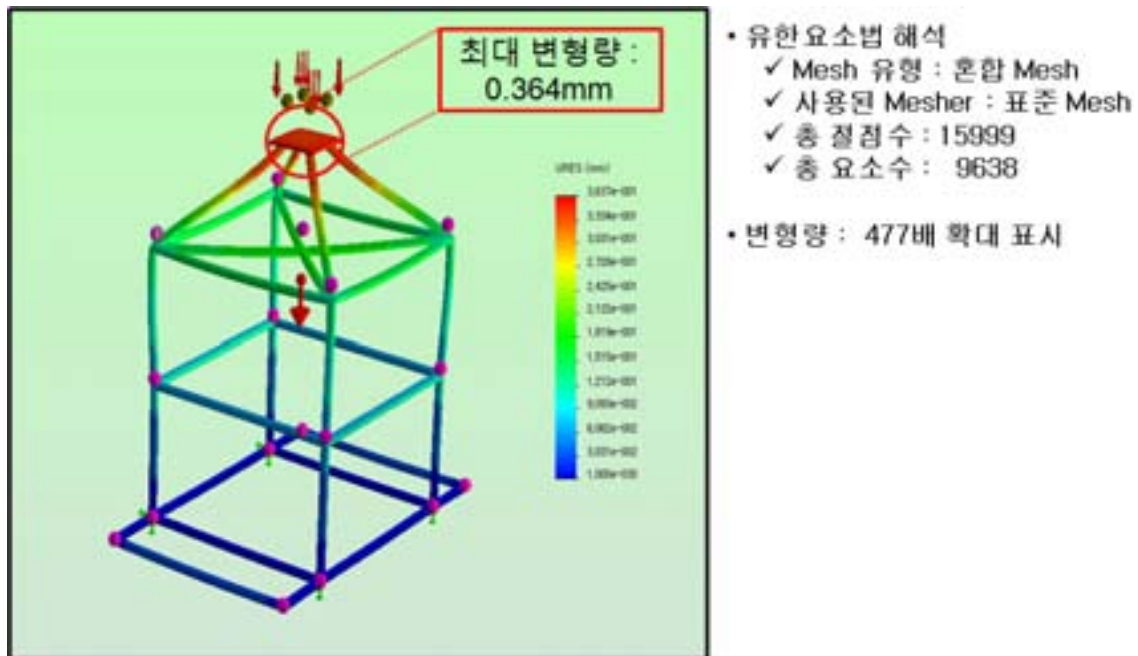
- 다음 그림은 원형 파이프를 이용한 장비설계의 모델링에 사용된 구조의 실제 치수를 나타낸다.



- 다음 그림은 원형 파이프를 이용한 장비설계의 구속조건과 하중조건을 나타낸다. 수직 작용 압력은  $5 \text{ kgf/cm}^2$ 이고 중력  $9.81 \text{ Nm}$ 이 작용하고 구속조건은 4점을 고정한 고정 지오메트리를 사용한다.



- 다음 그림은 원형 파이프를 이용한 장비설계의 유한요소법 해석한 결과와 프레임의 변형량을 해석한 결과를 나타낸다. 최대 변형량이 0.364 mm으로 변형이 거의 발생하지 않으므로 수중 50m까지 사용이 가능함을 보인다.



(사) 결론

- 유한요소법에 의한 수직 압력에 대한 사각 파이프 구조나 원형 파이프 구조에 대한 해석

결과를 분석하면 두 구조 모두 변형량은 크지 않은 것으로 해석된다. 유속에 대한 저항력에 고려할 때 원형 파이프 구조가 더 유리할 것으로 판단된다. 현재 유속에 따른 모니터링 장비의 회전 현상을 보완하기 위해 양측면에 고정형 날개로 부착하고 있다.

### (6) 피복설계를 위한 해저 지반조사

- 우리나라는 해안선을 따라 연약한 퇴적층이 분포하고 있으며, 이러한 연약지반의 공학적 특성을 파악하는 것은 각종 구조물의 설계에 앞서 매우 중요한 일이다. 일반적으로 연약지반의 특성을 파악하기 위해서는 현장의 원위치 시험과 채취된 시료를 가지고 수행되는 실내시험을 이용하게 된다. 이때 정도 높은 시험과정이 중요함은 물론이거니와 이를 통해서 얻은 자료의 처리와 분석 또한 설계에 적지 않은 영향을 끼치게 된다. 특히, 연속적으로 이루어진 해안선을 따라 변화하는 연약퇴적층의 공간적 특성을 파악한다면 보다 쉽게 전반적인 연안지역의 지반공학적 성질을 알 수 있다.
  - 피복설계를 위한 지반조사의 목적
  - 지층의 분포 확인
  - 퇴적물 및 하부지반의 지반의 전단강도 파악
  - 퇴적물 및 하부지반의 압밀특성 파악
  - 실내시험을 위한 시료 채취

### ■ 해저 지반조사

- 해양 구조물 및 해양관련 시설물을 설계 및 시공하는데 있어 해저 지반의 물성을 파악할 수 있는 해양지반조사가 반드시 필요하다.
- 해양에서의 지반조사는 기상조건에 크게 영향을 받을 뿐만 아니라 작업환경이 위험하고 해양지반조사 장비의 부재로 인해 시험에 대한 많은 어려움 있다.
- 현재 초장대 교량 사업의 일환으로 대수심(100m 내외)조건에서 50m 심도까지 해저지반 보링 및 시료채취, 그리고 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)을 수행할 수 있는 수중무인 지반조사장비에 대한 개발 연구가 진행 중이다.



[그림. I-바-37] 착저형 해양콘관입시험장비  
(최대 수심 50m 내외)



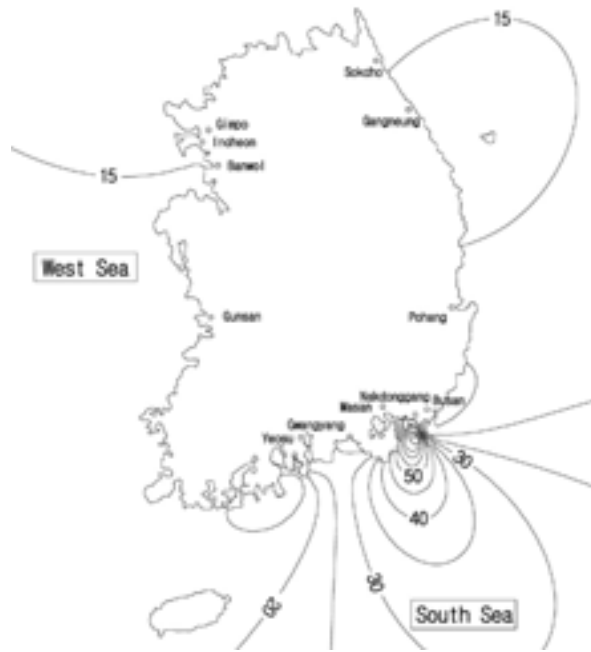
[그림. I-바-38] 해상작업선(최대 수심 20m)

---

## (가) 연안 해성 퇴적토층의 분포 및 특성

### ① 우리나라 연안 해성 퇴적토층의 분포

- 일반적으로 퇴적층은 구성된 기반암의 종류 또는 퇴적이력의 다양성으로 상이한 지반특성을 나타낸다. 특히, 국내의 서해안 및 남해안 지역에 주로 분포하는 해성점토(marine clay)로 구성된 매우 연약한 지반의 역학적 성질은 퇴적물의 성분, 입자크기의 분포, 입자형상, 흡착이온 및 간극수의 특성, 조류, 온도 등에 의해 상당한 영향을 받는다. 뿐만 아니라, 응력이력, 간극수 변화, 용탈과정, 가스형성 등의 지반공학적 특성은 매우 복잡한 양상을 나타낸다. 해성점토는 대부분의 다른 연약지반과 비교할 때 압축성이 매우 크다. 해성점토의 전형적인 특성은 높은 함수비와 매우 작은 지지력이라 할 수 있다. 또한, 점토 퇴적물의 체적변화나 침하는 실트 및 점토입자의 함유량에 의존하며 특히, 콜로이드성 점토(colloidal clay)의 함유에 따라 달라진다.
  - 삼면이 바다로 이루어진 한반도는 크게 서해안, 남해안 및 동해안으로 구분할 수 있다. 우리나라의 서해안 연안 중 조수간만의 차가 심한 김포, 반월, 인천, 아산 등에서는 실트질 모래 또는 모래질 실트가 풍화암 바로 위에 퇴적되어 있는 곳이 많고, 그 위에 실트질 점토층이 분포한다. 이 두 층을 합한 두께는 30m 까지 이르나 지층의 경계가 명확하지 않은 경우가 많고 입자는 큰 실트 함량이 높다. 그에 반해 군산, 목포 등 서해안 남부는 조수간만의 차가 작아 점성토층의 강도가 작고 압축성이 크며 두께는 25m에 이른다. 이 층 아래에는 얇은 자갈층과 풍화암층이 나타난다.
  - 남해안은 중력작용에 의해 퇴적된 것으로 추정되는 자갈 및 전석층이 풍화암층 위에 놓이고 그 위에 점성토층이 퇴적되어 있다. 이러한 지층구조는 순천에서 여수, 남해, 마산, 부산에 이르기까지 유사하게 나타난다. 점성토층의 두께는 부산항에서 15m, 마산, 여수 등지에서는 대략 10m 정도이며, 자갈 및 전석층의 두께는 2~3m 가량이다. 남해안의 하구 중에서 낙동강 하구와 섬진강 하구(광양만)는 우리나라의 대표적인 연약지반 분포지대로, 낙동강 하구는 퇴적층의 두께가 70m가 넘는 지역도 있다.
  - 동해안 연안에는 지표 부근에 매우 연약한 실트질 점토층이 존재하며 이층 아래에 모래층 또는 모래 섞인 자갈층이 함께 분포한다. 강릉 및 속초 지방의 실트질 점토층은 유기질을 많이 함유하고 있으며 액성한계와 함수비가 대단히 높다. 하부의 모래층 또는 모래 섞인 자갈층은 해수면 상승으로 동해안의 급격한 하천의 수류작용에 의해 운반되어 형성된 것으로 판단된다. 이층 아래에는 모암이 풍화되어 이루어진 풍화암층이 있다. 연약층의 두께는 포항지역의 경우 최대 16.5m, 강릉과 속초지역은 10m 이내이다. 아래 그림은 각 연안에서의 연약층 두께를 등고선으로 나타낸 것이다.
-



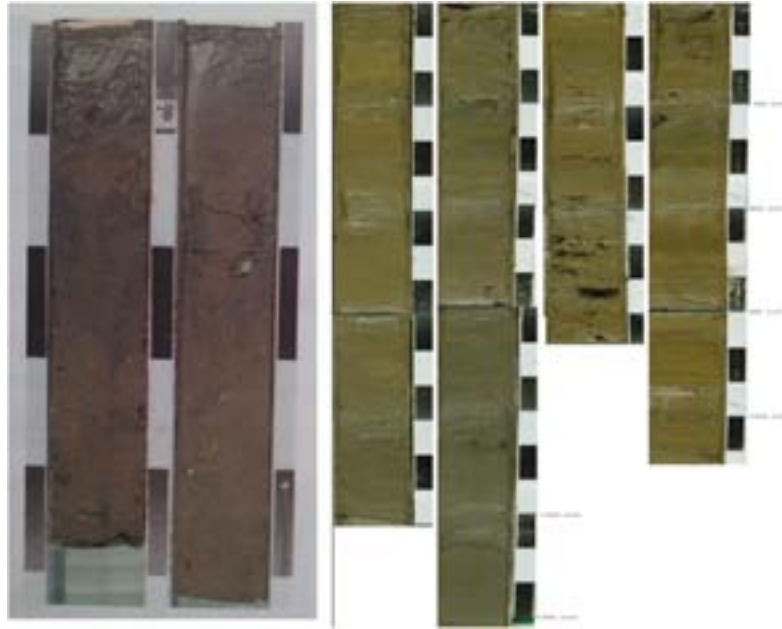
[그림. I-바-39] 해성점토층 두께분포

② 우리나라 연안 해성 퇴적토층의 특성

- 국내 점성토 지반의 자연함수비는 30~70% 정도이며 액성한계도 이와 유사. 유기물 함량이 높은 지역은 자연함수비가 100% 이상으로 높은 곳도 있는데 마산, 속초 등에서 발견된다.
- 점성토층의 두께는 지역에 따라 8~70m로 다양한데 남동해안 인접지역이 가장 두껍고 남서해안을 따라 서해안으로 갈수록 얇아진다.
- 과압밀비(OCR)는 1-2정도로 정규압밀-약간 과압밀이며 비배수 전단강도는 10~40kP로 심도가 깊어져도 별 영향을 받지 않고 일정하거나 불규칙한 분포를 보이는 경우도 많다.
- 해안선에 따른 해성점토의 특성은 아래 그림에 나타낸 바와 같이 서해안 및 동해안에서 광양을 중심으로 한 남해안으로 갈수록 함수비, 소성, 압축성 등의 특성은 점차 커지고 단위중량은 낮아지는 경향이 있는 것으로 알려져 있다.



[그림. I-바-40] 해안선에 따른 해성점토의 특성

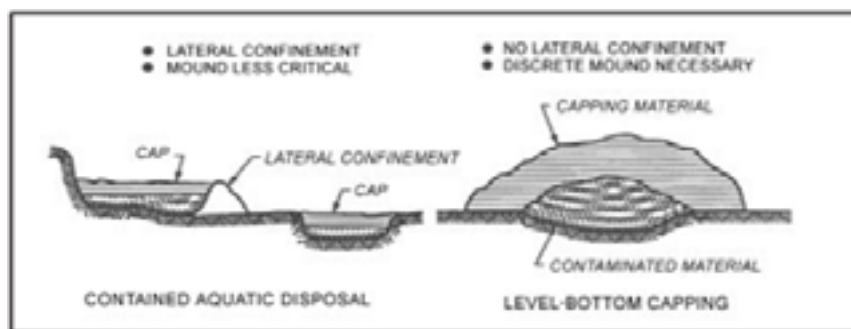


[그림. I-바-41] 오염 퇴적층 시추시료 사례

(나) 설계시공 매뉴얼 주요항목

① 현장피복

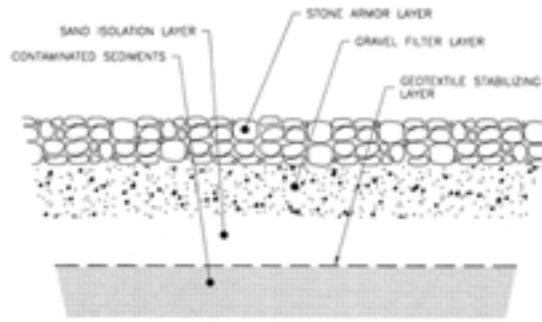
- 피복은 오염물질을 깨끗한 차폐재료로 덮어 격리시키는 것이다. LBC(Level Bottom Capping)는 평평하거나 경사진 원 바닥 지반위에 쌓인 오염물질을 피복재료로 덮는 방법이며 CAD(Contained Aquatic Disposal)는 LBC와 유사하지만 오염물질이 수평방향으로 확산되는 것을 방지하기 위하여 구덩이나, 범(berm) 등의 수평방향의 구속을 위한 대책을 제공하는 방법이다. 일반적으로 CAD 방법을 사용하면 피복재를 줄일 수 있으므로 비용을 줄일 수 있다.



[그림. I-바-42] 피복방법의 개요

- 피복공법은 현장에서 적용할 수 있는 오염퇴적물의 정화복원 공법이지만 개념적으로 향로준설과 같은 준설토에 대한 피복과 오염물 정화복원 목적의 피복은 구별되어야 한다. 전자의 경우는 준설토가 수중생태계를 오염시킬 가능성이 있어 피복을 적용하는 것으로 준설토는 주변의 퇴적토에 비해 약간 더 오염되어 있는 정도이다. 오염정화 목적에서의 피복은 오염물질이 수중에 노출되는 것을 차단함으로써 실질적으로 독성오염물질을 제거하는 의미이다. 이 경우에 오염퇴적토는 정화공법을 적용해야 할 만큼 오염되어 있는 경

우이다.



[그림. I-바-43] 피복단면

### ■ 주요 피복재료

- 자연적인 입상재료(모래, 자갈 등)
  - 세립토보다 안정하며 재부유하지 않는다.
  - 저서생물의 침투가 적다.
- 토목섬유
- 반응성 피복재

### ■ 현장피복의 설계 적용이론

- 수리학적(보호 피복석, 필터) 원리
- 화학적(오염물 확산 및 이동) 원리
- 지반공학적(침하 및 안정) 원리

### ■ 현장피복의 장단점

- 시행의 용이성, 추가적인 처분지의 불필요, 상대적으로 낮은 비용, 효과적인 오염물질 봉쇄 효능
- 장기적인 관점에서의 효용성, 향후 투기지역의 정화가 재 요구될 경우 문제가 복잡해진다.

### ■ 현장피복 시공의 초기 자본

- 피복 종류별 비용, 시공 장비 및 노무비 등으로 구성
- 피복설계, 시공 위치의 접근성, 수심 및 기타 요소에 의한 영향을 받는다.
- 피복으로 사용될 양질의 토사를 인근 지역에서 준설하여 활용할 수 있다면 초기 비용은 현저하게 감소한다.

### ■ 현장피복의 유지관리 비용

- 주기적인 피복의 보강



- 
- 장기간의 모니터링 비용 등을 포함.

### ■ 피복설계의 쟁점

- 준설토의 피복은 초기에 오염물질을 개방된 수중에서 포설해야 한다. 따라서 피복의 설계에 있어서 다음과 같은 몇 가지 문제들을 신중하게 고려해야 한다.
- 포설하는 동안 수중에 미치는 영향: 오염 물질의 수중으로의 잠재적인 방출, 잠재적인 독성의 평가를 고려해야 한다.
- 피복포설의 유효성: 피복재료, 오염토와 피복재의 준설과 포설방법, 현장조건과의 적합성, 재료의 물리적 성질, 준설과 포설기술 등을 고려해야 한다.
- 장기적인 피복의 보전성: 오염물의 물리적인 차단, 잠재적인 저서생물에 의한 교란 가능성, 침전물의 압밀침하, 이류(移流, advection)/확산으로 인한 피복을 통한 장기적인 오염물질의 이동 가능성, 조류, 파랑, 닛, 선박, 얼음 등에 의한 물리적인 교란이나 침식 가능성 등을 고려해야 한다.

### ■ 피복공법의 적용 가능성

- 피복공법은 수중에서 심하게 오염된 오염물질을 수중환경으로부터 격리시킬 필요가 있을 때 적용 가능한 여러 가지 방법 중 하나이며 다음과 같은 침전물, 현장 조건 및 운영조건에서는 적용할 수 없으며 다른 방법을 고려해야 한다.
- 포설 중 수중으로 오염물이 방출, 확산되어 수중에 허용할 수 없는 영향을 미치는 경우
  - 오염준설토나 피복재의 확산거동이 좋지 않아 피복을 효과적으로 포설할 수 없을 때
  - 현장에서의 에너지 및 운영 조건이 장기적으로 필요한 피복두께를 유지할 수 없을 때
  - 장기적인 모니터링과 유지관리를 수행할 수 없을 때

### ■ 피복의 설계 개념

- 성공적으로 피복 사업을 수행하기 위해서는 공학, 생물/생태, 화학, 준설 관련 전문가가 필요하며 성공적인 피복을 위해서 필요한 기본적인 기준은 오염물질을 수중 생태계로부터 격리시키기 위한 피복의 두께로 피복은 효과적으로 포설되고 유지되어야 한다.

### ■ 피복의 기능

- 오염물질의 수중 환경으로부터의 격리
- 오염물질이 재부유하거나 다른 곳으로 이동하지 못하도록 오염물질을 안정화
- 피복과 수중으로 용해된 오염물질이 용출되는 양을 감소시킴

### ■ 피복의 설계 과정

- 사업관련 자료 및 설계기준의 수집
- 오염퇴적물의 특성 파악
- 피복 현장 선택
- 피복재료의 선택과 특성 파악
- 오염물 포설 방법 및 장비 선택

- 항법 및 위치 제어 장비 선택
- 현장, 재료 및 장비의 적합성 평가
- 포설 중 오염물 수중 확산 및 혼합 가능성 예측
- 피복 설계 결정
- 안정성, 침식 및 압밀 평가
- 모니터링 프로그램 개발
- 오염퇴적토와 피복재료의 특성 파악
  - 오염물 특성 파악의 필요성: 오염물과 피복재료의 특성과악은 오염물 혹은 피복재료의 수중 포설 시 수중환경에 미치는 영향이 허용가능한 정도인지 판정하기 위해서 필요하며 또한 피복 후의 장, 단기적 거동을 예측하기 위해서는 물리적, 공학적 특성에 대한 파악이 필요하다.
  - 오염 퇴적토의 특성과악: 피복되어지는 오염퇴적물의 특성은 어느 정도 피복공법이 고려되기 이전에 얻어질 것이다. 오염퇴적물은 물리적, 화학적, 생물학적 관점에서 특성을 파악하여야 한다.
  - 물리적 특성과악
    - 지반공학적 해석과 평가가 수행되기 위해서는 흙의 공학적 거동을 결정하는 물리적인 특성들에 대하여 결정하여야 한다. 이를 위해서는 침전물 및 퇴적층에 대한 샘플링이 필요하며 샘플된 시료에 대한 실험을 실시해야 한다.
    - 물리적 특성 파악은 포설 중과 포설후의 거동을 예측하기 위해 매우 중요하다. 물리적 특성은 포설 중 확산과 퍼짐 정도 파악, 둔덕(mound) 형성 특성 파악, 장단기 안정성과 침식에 대한 저항성을 평가하기 위해 필요하다.
    - 물리적 특성 파악은 육안에 의한 분류, 현장함수비, 고체 농도(solid concentration), 밀도, 소성지수(Atterberg limits), 유기물함량, 입도분포, 비중, 흙의 분류 등을 포함해야 한다. 각 시험은 규정된 표준적인 지반공학 시험절차에 따라야 한다.
    - 그 밖에 압밀, 전단특성 등에 관련된 지반공학적 자료가 수집되어야 한다. 이들 자료는 피복현장의 지반공학적 안정성 평가를 위해 반드시 필요한 자료들이다.

## ② 지반공학적 설계고려의 필요성

- 현장피복공법에 있어서 대부분의 오염퇴적물이 세립질의 실트 또는 점토이며 높은 함수비와 낮은 전단강도를 가지기 때문에 지반공학적 고려사항은 매우 중요하다. 만약 이러한 퇴적물이 준설된 후 다른 처리 지역에 해양투기되는 경우라면 준설 후 퇴적물에 많은 물이 혼합되어 더욱 낮은 전단강도를 가지게 되므로 상황은 더욱 악화된다. 일반적인 지반공학 관련 건설 프로젝트에서는 높은 전단강도와 낮은 함수비를 요구하므로 해양퇴적물 피복 현장의 경우와는 완전 반대의 상황에 처하게 된다.
- 흙의 전단강도는 흙의 밀도, 입자분포, 함수비, 소성 등의 영향을 받는 흙의 특성이다. 전단강도는 오염 퇴적토의 상부에 포설되는 피복재료를 지지하는 능력을 뜻하는 퇴적토의 지지력, 피복에 의해 형성되는 사면의 안정문제와 밀접한 관련이 있다. 오랜 시간에 걸쳐 퇴적물에 압밀이 진행된다면 전단강도는 다소 증가하게 되고 상부에 소정의 두께로 설치된 모래 피복부를 지탱하는 능력도 향상되게 될 것이다. 이러한 전단강도의 증가율은 퇴적재료의 종류, 퇴적토의 두께, 퇴적토의 초기상태, 하중으로 작용하는 상부 피복의 두께 등에 영향을 받게 된다. 사면의 안정에 있어 가장 위험한 시기는 간극수압이 가장 크고, 과잉 간극수압이 소산될 시간이 충분하지 않은 피복이 수행되는 바로 직후의 상태이다. 마

---

찬가지로 지지력에 있어서도 오염 퇴적토의 전단강도가 가장 작은 피복 실시 바로 직후가 가장 지지력이 작은 위험한 상태이다.

- 오염 침전물의 경우 대개 세립의 실트나 점토가 주를 이루고 높은 함수비를 나타내므로 상부에 가해지는 피복재료의 하중에 의해 흡입자가 압축을 받아 흙 속의 과잉간극수가 배출되면서 흙이 압축변형하는 압밀현상이 크게 발생하기 쉽다.
- 피복되는 퇴적 지반의 압밀 가능성을 평가하기 위해서는 피복, 하부 오염 침전물, 그 아래의 하부퇴적층의 압밀 정도를 고려해야 한다. 압밀을 정량화하는 것은 다음과 같은 문제점에 대한 고려가 필요하다.
- 압밀에 의한 높이(elevation)의 변화는 침식에 의한 높이 변화와 구분되어야 한다. 침식에 의한 해저 표면의 높이 감소도 마찬가지로 피복의 두께를 원래대로 복원하기 위한 보수 조치를 필요로 한다.
- 피복 사이트의 장기적인 안정을 검토하기 위해서는 압밀이 반드시 고려되어야 한다. CAD 처분의 경우 압밀이 발생하여 높이가 감소하면 여분의 준설 침전물을 처분할 수 있는 공간이 발생하게 된다.
- 압밀해석은 오염된 침전물로부터 상부의 피복으로의 간극수의 이동 가능성을 평가하는데 필요한 정보를 제공해준다. 이는 장기적인 오염물의 용탈을 평가하는데 필요한 사항이다. 피복과 관련된 중요한 지반공학적 고려사항은 피복 시스템의 안정과 침하 문제이다. 가장 중요한 문제는 피복의 포설 직후 포설로 인한 무게를 지탱하는 단기 안정성 문제이며 침하는 시간에 따라 피복의 무게에 의해 발생하는 장기적인 압밀침하의 문제이다.

### ③ 지반공학적 고려사항

#### ㉞ 연약지반(Soft Ground)의 정의

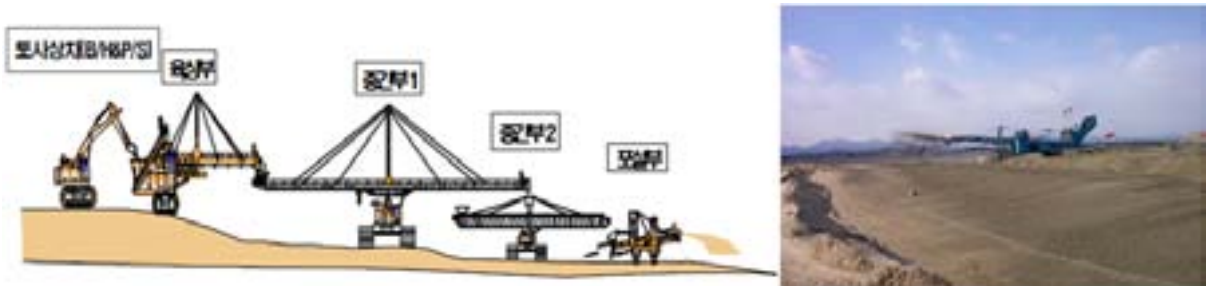
- 강도가 약하고 압축되기 쉬운 흙. 즉, 압축성이 커서 상부 구조물을 지지할 수 없는 자연 상태의 지반
- 점토나 실트와 같은 미세한 입자의 흙이나 간극이 큰 유기질토, 또는 peat나 느슨한 모래 등으로 이루어진 토층으로 구성되어 있으며 지하수위가 높고 제체 및 구조물의 안정과 침하 문제를 야기시키는 지반을 말한다.
- 연약지반상에 놓이는 구조물에 대해서는 그 하중으로 인한 지반으로의 응력의 전달, 이로 인해 예상되는 지지력의 크기와 침하 등이 그 구조물에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 면밀한 검토가 필요하다.
- 연약지반을 판단하는 기준은 그 지반에 축조되는 구조물의 종류, 공법과 공기에 따라 다르다. 일반적으로 점토지반과 모래지반으로 나누어 경험수치로 지반의 연약한 정도를 판단할 수 있다. 그러나 종합적인 판단을 위해서는 그 지반을 구성하고 있는 각 토층의 두께, 물리적인 특성 및 공학적인 특성을 파악하여야 한다.
- 지반의 연약한 정도를 점토는 굳기(consistency)로 표시하고 모래는 상대밀도로 표시한다. 점토지반에서 측정된 N값은 전단강도 및 연약한 점토를 판단하는데 개략적인 추정치만을 제공하므로 실제 설계 적용시에는 신중하게 검토하여야 한다.

#### ㉟ 초연약지반 ('Super' or 'Extremely' soft soil)

- 지반공학에서 사용되는 표준용어는 아니지만 큰 함수비와 극히 낮은 전단강도를 갖는 준설매립층이나 침전물에 사용 (샘플링 장비를 지지하지 못하고 SPT값이 0) 한다.
- 표준적인 샘플링 방법으로 샘플링이 곤란하고 표준 실내시험이나 현장시험에 의한 전단

강도 시험이 불가능하다.

- 전단강도가 매우 낮은 초연약지반 위에 모래를 포설하기 위해서는 모래를 얇게 포설하고, 포설 높이의 차이로 인한 불균등 하중이 발생하지 않게 해야 한다. 육상에서의 모래 포설은 아래 그림과 같이 모래를 얇게 뿌리는 방법을 많이 사용한다. 수중에서의 모래 포설도와 유사하게 시공할 수 있으며 해저 오염토적 지반의 전단강도에 따라 피복의 하중을 지지할 수 있을 정도의 두께로 균등하게 포설할 수 있다면 전단파괴는 발생하지 않을 것이다.



[그림. I-바-44] 초연약지반에서의 모래 포설(육상)

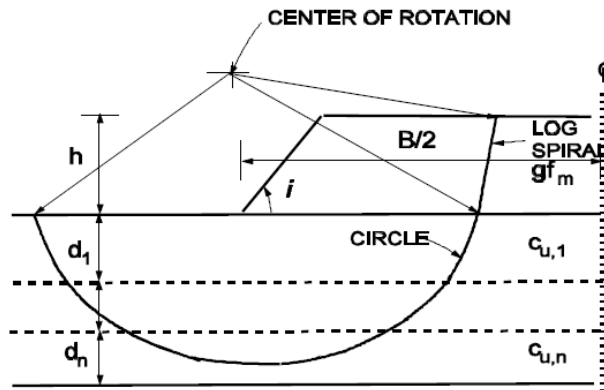
#### ㉔ 피복 하중에 의한 압밀침하 검토

- 세립질의 피복재는 자중에 의하여 압밀이 발생할 수 있으며 하부의 오염토적물의 경우는 대부분이 모래나 자갈 등의 피복재료의 자중에 의하여 압밀이 발생하게 된다. 따라서 피복의 설계에 있어서 피복두께의 변화와 모니터링 결과의 해석이라는 관점에서 압밀을 고려해야만한다. 피복재의 두께는 압밀을 고려하여 허용 최소두께를 유지하도록 하여야 한다. 압밀해석을 통하여 모니터링에 의한 피복 표면의 위치 변화를 적절하게 해석할 수 있게 된다.
- 현장피복을 위한 피복재가 사질토로 분류된다면(즉, 200번 체 통과율이 50% 보다 작으면) 압밀 침하량을 상쇄하기 위한 여유량을 둘 필요가 없다. 그러나 피복재가 실트나 점성토로 분류된다면 피복재에 대한 압밀해석이 필요하며 필요한 피복두께가 유지될 수 있도록 압밀침하량을 고려한 피복두께의 여유량을 두어야 한다.
- 대부분의 오염토적물은 압축성이 매우 크고, 모니터링 결과의 해석에 있어서 압밀에 의한 피복표면의 표고 변화와 침식에 의한 피복 두께의 변화를 구분하기 위해서 피복재료가 압축성이 아니더라도 원지반의 오염토적물에 대한 압밀해석은 대개 필요하다.
- 또한 압밀도는 오염토적토와 피복재 속의 물이 압밀에 의해 얼마나 배출되었는가에 대한 정보를 제공하기도 하므로 오염물질의 이동을 평가하는데 사용될 수 있다.
- 압밀에 의한 변형율이 클 것으로 예상되므로 대변형율을 고려한 압밀해석이 요구된다. 압밀을 평가하는데 있어 피복재료와 오염토적물의 압밀침하량을 구분하여 결정하여야 한다.
- 대변형을 고려한 압밀해석을 위하여 MOUNDS(Poindexter-Rollings 1990)가 개발된 바 있다. 이 모델은 압밀의 크기와 속도를 계산하며 압밀진행에 따른 전단강도 증가에 대한 정보를 제공한다. 이 모델을 사용하기 위해서는 자중압밀시험/표준압밀시험(USACE 1970 과 USACE 1987)에서 얻은 데이터가 필요하다.
- MOUND와 CONSOL(Gibson, Schiffman, Cargill 1981; Wong과 Duncan 1984) 모델이 Long Island sound(Silva 등, 1994)의 3곳의 준설 피복의 압밀침하 예측에 사용되었으며

측량결과에 따르면 10-13년 동안 3.5m의 표고 감소가 관찰되었다. 압밀해석과 측량결과를 비교한 결과 침식에 의한 것이라기보다는 압밀에 의하여 표고 감소가 발생한 것으로 판단되었다. 정확한 압밀예측을 위해서는 오염퇴적물의 간극비와 유효응력에 대한 지반공학적인 정보가 필요하다.

### ㉔ 피복 하중에 대한 사면안정성 검토

- 주로 피복층의 선단에서 발생하며, 파괴가 예상되는 면에서의 전단응력과 전단강도를 비교하여 안전율을 산정한다.
- 안정성 검토는 가장 파괴 가능성이 높은 파괴면을 고려하며, 한계평형법, 유한요소법 및 유한차분법(강도감소법)을 사용하여 수행한다.
- 현장피복 사면의 안정해석은 한계평형법에 의한 프로그램을 사용하여 해석한다. 만약 사면의 안정성이 확보되지 않는다면 토목섬유 보강이 필요하거나 피복재를 포설하기 전에 압밀이 더 진행되도록하여 전단강도가 증가하도록 하여야 한다. 해석을 통하여 소요의 안전율을 확보하기 위해 요구되는 토목섬유 보강재의 강도를 구할 수 있다.



[그림. I-바-45] 피복의 안정해석

- 현장피복재는 완전히 물속에 잠겨있게 되므로 수중단위중량( $\gamma'$ )이 사용되고 모래의 전단강도는 내부마찰각  $\phi'$ 이 설계에 사용된다. 피복 상부의 물의 깊이는 유효응력에 영향을 미치지 않으므로 파도와 같은 외부하중이 지나치게 크지만 않다면 피복의 안정에 영향을 미치지 않는다. 오염 퇴적층은 그림과 같이 각기 다른 비배수 전단강도를 가진 여러 층으로 고려할 수도 있다. 각층의 비배수전단강도는 상수나 깊이에 따른 선형 증가하는 값으로 입력할 수도 있다.
- 물의 깊이는 포설시 모래입자의 침강속도에 영향을 미쳐 오염 퇴적물에 도달할 때 가하는 충격에너지가 달라질 수 있음을 유의해야 한다. 이는 연약한 침전물로의 관입 (penetration) 깊이에 영향을 미쳐 모래의 단위중량에 영향을 미친다. 모래의 전단강도는 또한 모래의 단위중량에 영향을 받게 된다. 그러나 수중에서의 흙의 물성치를 정확하게 파악하는 것은 매우 어려우며 현재로는 이러한 효과는 무시하는 것이 타당한 것으로 여겨진다. 즉, 설계에 있어서 잠재적인 불확실성 면에서 물성치의 정량화는 보장되지 않는다고 할 수 있다.
- 긴 사면의 경우에는 사면의 단부효과를 무시하고 안정해석을 수행할 수 있다. 비배수해석의 경우 안전율  $F_s$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$F_s = \frac{c_u}{\gamma z(1/2 \sin 2\alpha)}$$

- 여기서,  $c_u$ 는 비배수전단강도,  $\gamma$ 는 단위중량(수중의 경우 유효단위중량),  $z$ 는 활동면까지의 깊이,  $\alpha$ 는 사면의 경사이다. 무한사면해석은 길고 연속적인 사면의 안정해석에 적합하며, 불안정한 재료로 구성된 사면의 두께가 사면의 높이에 비해 작은 경우가 해당된다.
- 해석 프로그램을 사용하는 경우에 평균해수면을 고려하며, 물은 사면의 표면에 수직하게 작용하는 힘으로 고려된다. 해석은 피복이 수행되기 전과 피복 시공 직후의 조건에 대하여 고려되어야 한다. 더불어 시간이 진행됨에 따라 압밀이 진행되는 상황을 고려할 수도 있다. 이때 압밀의 진행에 따라 흙의 밀도와 전단강도가 증가하게 되고 이러한 조건을 해석에서 고려하면 압밀이 사면안정에 미치는 영향을 고려할 수 있다. 깊이에 따른 전단강도의 분포에 사면의 안정이 크게 영향을 받으며 여러 파괴모드에 대하여 안전율이 가장 작은 파괴면을 찾는 작업을 프로그램에서 수행하게 된다. 이때 찾아진 파괴면과 이에 대응하는 안전율을 해석결과로 얻게 된다.
- 일반적으로 해석에서 피복의 시공은 일시에 균일하게 수행되는 것으로 가정하지만 실제로 이러한 시공은 불가능하다. 사면이 형성된 오염퇴적물 지반에 피복을 시공할 때 사면의 토우(toe) 부분에서 사면의 정상부 방향으로 시공이 진행된다면 압성토 역할로 인하여 안전한 시공이 될 것이다. 그러나 낮은 부분의 피복이 시공되지 않은 상황에서 사면 정상부로 시공이 진행된다면 사면의 안전율은 감소하게 되므로 사면의 안정이 염려되는 현장에서는 현장의 조건과 시공상황 등을 고려한 시공방법을 고려해야 할 것으로 판단된다.
- 한계평형법에 의한 안정 해석은 사면이 불안정한지, 안정한지만을 계산하며 파괴 후의 형상에 대해서는 예측하지 못한다. 일단 사면의 파괴가 발생하면 파괴면 부근의 상향 경사가 급해지므로 연속적인 파괴가 발생할 수도 있다.

#### ㉓ 피복 하중에 대한 오염퇴적물의 지지력 검토

- 작용하중에 대한 지반의 지지력은 소성평형해석의 고전적인 지반공학 문제로 거의 모든 토질역학 및 기초공학 교과서에서 다루어진다. 지지력 해석을 위해서 모래로 구성되는 피복 부분은 침전퇴적토 지반의 전체 폭에 비해서는 좁은 긴 표면하중으로 모델링되며 이 때 얇은 사면들은 무시된다. 이는 모래가 침전 퇴적토 지반 위에 부분적으로 포설되는 조건을 나타내며 수학적으로는 연속줄기초의 해석에 사용되는 평면변형 조건에 대한 해에 해당한다.
- 지지력 해석에 있어서 모래 피복은 넓은 영역에 걸쳐 작용하는 기초로 고려된다. 기초의 접촉압력은 피복의 유효단위중량  $\gamma'$ 와 피복의 두께  $h$ 에 의한 등가의 상재하중  $q$ 로 대체된다.

$$q = \gamma' h$$

- 오염 퇴적토 지반의 지지력은 다음과 같이 연속 줄기초의 지지력으로부터 계산할 수 있다.

$$q_{ult} = \frac{Q}{A} = cN_c + \gamma DN_q + 0.5\gamma BN_\gamma$$

- 여기서,  $q_{ult}$ 는 극한 지지력 ( $\text{kN/m}^2$ ),  $Q$ 는 하중 ( $\text{kN}$ ),  $A$ 는 기초의 면적 ( $\text{m}^2$ ),  $c$ 는 흙의 점착력( $\text{kN/m}^2$ ),  $N_c, N_q, N_\gamma$ 는 지지력 계수,  $\gamma$ 는 흙의 단위중량( $\text{kN/m}^3$ )으로 수중에서는 퇴적토의 유효단위 중량을 사용함,  $D$ 는 지표면으로부터 기초의 바닥까지의 깊이 ( $\text{m}$ )로 본 문제의 경우  $D=0$ ,  $B$ 는 기초의 폭 ( $\text{m}$ ).
- 비배수 해석( $\phi=0$ )의 경우  $N_\gamma=0$ 이므로 세 번째 항은 0이며, 피복과 같은 경우 표면하중의 경우에는  $D=0$ 이므로 두 번째 항도 0이 된다.
- 표면하중이 작용할 때 평면조건의 경우  $N_c=5.14$ 이다. 따라서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q_{ult} = 5.14c_u$$

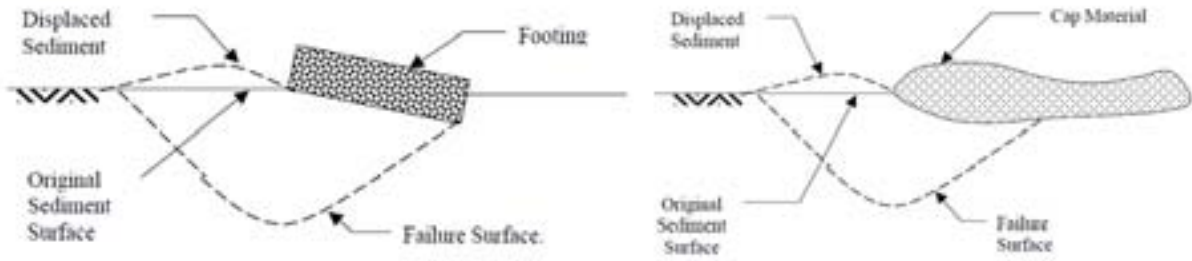
- Terzaghi는 국부전단파괴에 대하여 경험적으로 전단강도 정수를 2/3로 저감하여 사용할 것을 제안했다(Terzaghi and Peck, 1967). 피복 프로젝트의 경우 오염 퇴적물 층이 연약하여 국부전단파괴를 고려한다면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q_{ult} = 2/3 \times 5.14c_u$$

- 설계에서 허용지지력은 극한지지력을 안전율로 나누어 계산하므로 허용가능한 피복의 두께는 다음과 같이 구할 수 있다(안전율 3을 적용).

$$h_{allow} = 1.14c_u/\gamma'$$

- 전형적인 값으로  $\gamma' = 5\text{kN/m}^3$ 과 비배수전단강도  $c_u = 1 \sim 2\text{kPa}$ 을 고려하면 허용 가능한 피복의 두께는 20에서 50cm가 된다. 대부분의 모래 피복 프로젝트에 사용된 피복의 두께와 일치하는 값이다.
- 그러나 Terzaghi가 국부전단파괴에 대하여 경험적으로 전단강도 정수를 2/3로 저감하여 사용한 것은 이론적인 근거가 없고 연약지반에 건설되는 구조물의 변형을 감소시키려는 의도에서 사용된 것으로 지지력을 작게 평가하여 허용 가능한 피복 두께를 감소시키는 결과를 주게 되므로 전단강도 값을 감소시키지 않고 사용하는 경우도 있다. Rollings와 Rollings(1998)에 의하면 New York District 준설토 처리의 해석결과 전단강도를 감소시키지 않은 경우의 해석결과가 현장 성과와 잘 일치하였다고 한다.



[그림. I-바-46] 피복 하중에 대한 오염퇴적물의 지지력 검토

㉞ 연약한 오염퇴적토의 피복 설계, 시공 문제점

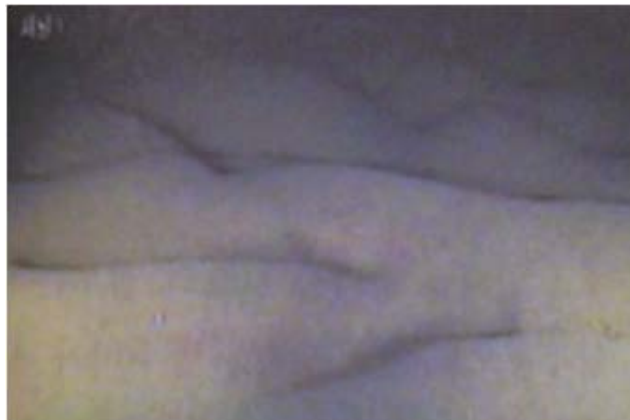
- 초연약지반에서는 침강/압밀에 관한 이론은 제안되어 있지만 전단이나 지지력에 관한 이론은 존재하지 않는다.
- 초연약지반의 경우의 전단강도를 측정하기 위한 방법도 극소수이다.

㉟ 피복 하중에 대한 오염퇴적물의 지지력 검토

- Terzaghi의 지지력 공식 적용성 여부 문제
- 액성한계의 1~1.5배까지는 Terzaghi의 지지력 공식을 사용할 수 있을 것 같으나 그 이상의 고함수비에는 의문임.

현장피복 시공 중 전단파괴 사례

- 초연약 지반인 오염퇴적토의 전단강도가 피복을 지지하기에 불충분한 경우에 발생.
- New York Mud Dump Site  
약한 오염도의 퇴적침전물을 포설하고 모래로 피복 시공한 경우로, 침전물 포설시 수평변형이 발생하고 모래 피복시 추가 변형이 발생함.
- Boston Harbor Navigation Improvement Site  
CAD cell을 모래로 피복한 경우이며, 시공 후 모니터링 결과 모래 피복이 없거나 모래와 침전물이 혼합된 영역 관찰됨
- 원지반이 평평하지 않고 불규칙하게 굴곡진 경우 균등한 두께로 시공하기 어렵다.



[그림. I-바-47] 해저퇴적층 표면

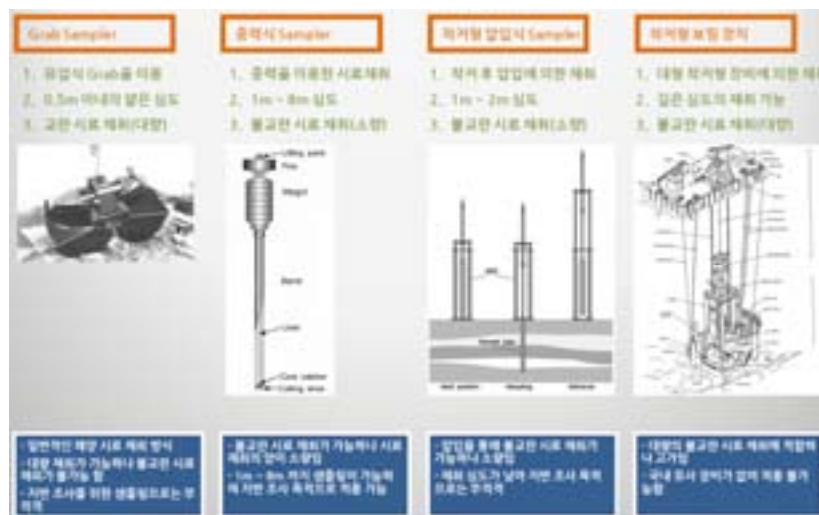


㉠ 요약

- 해양오염퇴적물에 대한 처리방법으로서 현장피복방법(In-Situ Capping)은 물리적 고립, 안정화 및 침식방지, 화학적 고립화의 목적을 만족시켜야 하며 기존에 수행된 사례로부터 오염물을 장기적으로 격리시킬 수 있는 효과적인 방법임을 알 수 있다.
- ISC를 적절하게 적용하기 위해서는 현장여건, 피복의 조건, 설계변수와 시공방법 등을 고려해야 하며 시공방법의 결정, 시공 중과 시공 후의 피복의 안정성을 확보하기 위해서는 다음과 같은 지반공학적 설계사항을 고려해야 한다.
  - 지반조사(오염퇴적지반의 지층특성, 전단강도, 압밀특성 등 파악)
  - 오염퇴적층의 지지력
  - 시공 중 사면의 안정
  - 피복 및 오염퇴적층의 압밀
- 적절한 설계와 더불어 현장여건에 적합한 피복 포설을 위한 시공능력이 매우 중요하다.

(7) 유력 후보지 정밀지반조사 계획 수립

- 해저오염퇴적물은 초기 높은 함수율을 갖는 연약지반으로 비교적 적은 상재하중(피복재 자중)만으로도 침하와 파괴가 발생함.
- 이러한 해저 지반의 역학적 특성과 침하에 따른 오염물 이동을 예측하기 위해서는 불교란 시료 채취가 반드시 수행되어야 함.
- 현장 불교란 시료는 수저 퇴적토의 물리적 화학적 특성 분석, 저서생물군 파악, 오염물의 정량적 분석, 압밀에 따른 침하량 산정과 압밀속도 분석과 같은 실내시험에 사용됨.
- 국내외에서 사용되고 있는 해저 지반 시료 채취용 샘플러를 문헌조사와 국내 전문업체 자문을 통해 확인하였고 크게 그랩(Grab) 샘플러, 중력식 샘플러, 해저 착저형 샘플러로 구분됨.
- 해저 착저형 샘플러가 가장 불교란 시료 채취에 적합한 방식이지만 국내에서는 타 사업에서 시범적으로 개발하고 있는 단계로 단기적으로 현장 적용이 사실상 불가능 함.



[그림. I-바-48] 해저 지반 시료 채취(샘플러) 방법

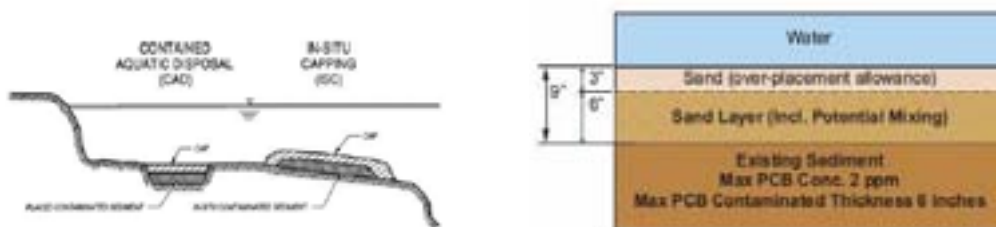
- 국내에서는 그랩과 증력식 샘플러가 보편적으로 사용되고 있으나, 불교란 시료를 확보하기에는 어려움이 예상된다.
- 따라서, 경제성, 타당성, 현장 적용성을 고려한 본 사업에 가장 적합한 방식은 국내 해양 건설에 사용되는 Setting Barge위에 일반적으로 지상에서 사용되는 시추장비를 이용하는 방식이 가장 적합함.
- 높은 함수율의 해저오염퇴적물 회수를 위한 샘플러 보완이 필요할 것으로 예상되며 참여 기업 선정 시 기술개발을 병행할 필요가 있음.

구분	2013년	2014년	2015년	Setting Barge
현황				
이동 및 부상	200t 이상	200t 이상	200t 이상	200t 이상
이동 속도	-공률: 3000/2000 -속도: 200/100 -용량: 20000/100	-공률: 3000/2000 -속도: 200/100 -용량: 20000/100	-공률: 3000/2000 -속도: 200/100 -용량: 20000/100	-공률: 3000/2000 -속도: 200/100 -용량: 20000/100
최대 수심 (해저면 기준)	200m 이상	200m 이상	200m 이상	200m 이상
장비	중간부품 (장착)	부식, 2000, 2000 이상	부식, 2000, 2000 이상	부식, 2000, 2000 이상
	모터	부식, 2000, 2000 이상	부식, 2000, 2000 이상	부식, 2000, 2000 이상
	제어실	부식, 2000, 2000 이상	부식, 2000, 2000 이상	부식, 2000, 2000 이상
	시추장비	부식, 2000, 2000 이상	부식, 2000, 2000 이상	부식, 2000, 2000 이상
비고	○	○	○	○

[그림. I-바-49] 국내 가용 Setting Barge 현황 및 특성 분석

(가) 국외 피복공법 사례조사 및 분석

- 선진 국외 사례 고찰을 통해 피복공법에 필요한 엔지니어링 접근법을 분석하고 국내 오염퇴적토의 특성과 연구 인프라를 반영한 향후 연구내용을 도출하여 설계 매뉴얼 작성에 필요한 기초자료를 확보하고자 함.
- 피복공법은 그림 I-바-52와 같이 오염된 퇴적물 위에 오염되지 않은 새로운 층의 모래, 퇴적물, 또는 자갈과 같은 재료를 포설하여 오염물이 상부 수층으로 이동하는 것을 제한하는 방법으로, 오염된 퇴적물을 상부수층과 물리적으로 분리하거나 퇴적토를 안정화하여 유해물질이 저서생물 또는 상부 수층으로 이동하는 것을 감소시키는 역할을 수행함.
- 크게 두가지 방법으로 해저면 함몰지에 오염퇴적물을 매립하고 피복재를 포설하는 방식 (Confined Aquatic Disposal, CAD)과 오염퇴적물 상부에 직접적으로 피복재를 포설하는 방식(In Situ Capping, ISC)으로 구분됨.



[그림. I-바-50] 피복공법의 개념도 (Schuck, 2010)

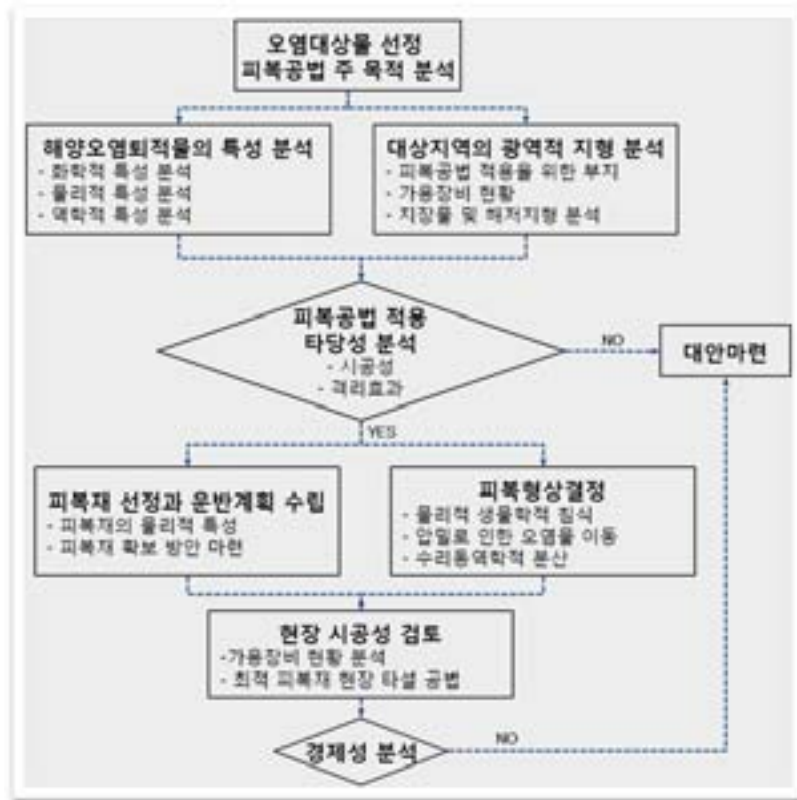
- 피복공법의 주요기능으로는 물리적 격리, 오염퇴적토 안정화, 그리고 화학적 격리가 있음.
- 물리적 격리는 저서생물(benthic organisms)로 인한 오염퇴적토의 교란을 방지할 목적으로 피복재를 일정 두께로 포설하여 새로운 층을 형성함. 저서생물의 오염퇴적토 교란은 깨끗한 상부수층으로 오염물 이동을 가속시킬 뿐만 아니라 교란으로 발생하는 미립자를 저서생물이 흡수하여 내부에 축적되고 결국에는 인류 건강을 위협함. 물리적 격리를 고려한 피복재의 두께를 결정하기 위해서는 우선적으로 저서생물의 다양한 종을 분석하고, 특히 해저면에서 서식하는 저서생물의 경우에는 최대 침투 깊이를 고려하여 피복재의 두께를 선정해야 함.
- 오염퇴적토의 안정화는 외적환경에 의해 직접적으로 침식과 오염퇴적토의 이동을 방지하는 목적으로 피복재를 사용함.
- 화학적 격리는 오염물의 농도구배로 인한 확산으로 발생하는 오염물 이동과 압밀로 인한 간극수의 이동으로 발생하는 오염물 이동을 방지하는 목적으로 피복재를 사용함.
- 미국에서는 1970년부터 현장 피복공법이 사용되어 왔으며, 1990년 이후 피복공법의 적용 사례가 급격히 증가하고 있음.
- 오염퇴적물이 주로 배출되는 상업지역에 접한 연안과 하천에서 피복공법이 사용되고 있으며 피복재의 두께는 10cm이하에서 3m이상까지 다양하게 시공되고 있음.

[표. I -바-21] 미국 현장 피복공법 적용 건수와 피복재 두께

연도	건수	피복재 두께	건수
1970	2	$t \leq 10\text{cm}$	2
1980	12	$10\text{cm} < t \leq 30\text{cm}$	9
1990	29	$30\text{cm} < t \leq 60\text{cm}$	23
2000	26	$t > 60\text{cm}$	37
계획 중	12		
합계	81	합계	71

- 다수의 시공을 통한 경험을 바탕으로 미국에서는 압밀에 의한 오염물 격리 성능저하, 하저생물에 의한 교란, 그리고 조류(과동에너지)에 의한 침식을 고려한 설계의 필요성이 제기되었고, 마침내 미국에서는 1987년에 ARCS(Assessment and Remediation of Contaminated Sediement) 프로그램을 통해 다양한 오염퇴적토의 현장 처리방안에 관한 연구가 진행되었음.
- ARCS 프로그램은 우선 오염퇴적토의 화학적 특성과 오염물 분석을 1994년까지 완료하였고, 오염퇴적토의 특성에 적합한 현장 처리방안을 제시하였음.
- 피복공법은 ARCS 프로그램에 기술된 다양한 현장 처리방안에 선정되었으며 1998년에는 미국 환경보호청(United State Environmental Protection Agency, USEPA)에서 피복공법에 필요한 고려사항을 정리한 “Guidance for In-Situ Subaqueous Capping of Contaminated Sediments”가 발간되었음.
- 다양한 오염퇴적물 현장 처리공법 중에서 최적공법 선정을 위한 타당성 조사는 설계과정에서 결정됨. USEPA에서는 현장 피복공법을 적용하기 전에 시공성과 경제성을 고려한 타당성조사를 실시해야 한다고 강조하고 있음.
- USEPA의 보고서를 토대로 현장 피복공법의 적용 단계를 분석하면 다음과 같다.

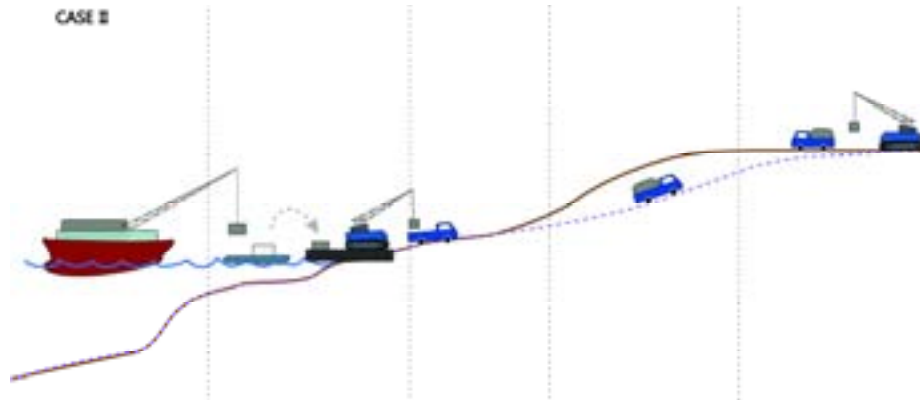
- 
- 1) 오염퇴적물 처리 후 최종 목표 농도
  - 2) 오염퇴적물이 위치한 지역의 지리적 특성
    - 가) 지리적 측면: 수심, 조류, 저면 경사, 파동에너지
    - 나) 사용적 측면: 항해, 해저스포츠, 상수원, 폐수 방류
    - 다) 공학적 측면: 오염퇴적물 하부 지층구조와 물리적 특성, 기반암의 깊이, 지하수 흐름
  - 3) 오염퇴적물의 특성
    - 가) 물리적, 화학적, 생물학적 특성
    - 나) 심도별 특성과 확장 영역
    - 다) 오염퇴적물 처리 후 최종 목표 농도를 고려한 피복재 포설 면적 선정
  - 4) 현장 피복공법의 1차 적용성 검토
    - 가) 1에서 3까지의 데이터를 토대로 현장 피복공법의 1차 적용성 검토
  - 5) 피복재 선정
    - 가) 운송과 하역을 고려한 피복재 활용지 선정
  - 6) 피복재의 형상 결정
    - 가) 피복 두께와 필요시 반응성 물질을 고려한 다층형 피복 적용
    - 나) 반드시 장기적 측면에서 접근: 화학적 격리와 생물학적 교란, 압밀, 침식을 고려
    - 다) 일반적으로 사용되는 깨끗한 사질토가 대상지역에서 침식에 민감한 경우, 굵은 자갈을 이용한 보호층 형성: 필요시 부직포를 이용한 사질토와 자갈의 경계면 분리
  - 7) 장비와 최적 피복시공법 선정
  - 8) 설계된 피복공법으로 최종 목표 농도 확보 가능성 평가
  - 9) 모니터링과 유지관리 시스템 구축
    - 가) 시공 모니터링: 피복재 시공에서 발생하는 오염퇴적물 교란 정도 확인
    - 나) 장기 모니터링: 피복공법의 성능평가 및 필요시 추가 피복 시공
  - 10) 경제성 분석
- 10단계의 과정에서 가장 공학적 접근이 필요한 피복형상결정과 피복재 포설에 관한 실증적 연구를 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers)에서 실시하였음(Palermo et al., 1999).
- 미공병단에서 수행한 피복공법 연구는 Los Angeles에 위치한 Palos Verdes Shelf에 1,1,1-trichloro-2,2-bis (p-chlorophenyl) ethane (DDT)와 polychlorinated biphenyl hydrocarbon(PCB)로 오염된 퇴적토를 대상으로 피복공법의 타당성을 평가하고 설계하였으며, 연구결과를 바탕으로 시험적용(Pilot Test)하였음 (Fredette et al., 2002).
-



[그림. I -바-51] 현장 피복공법 적용 단계 도식

(나) 피복공법 개략 건설비 산정을 위한 경제성 평가 시나리오 도출

- 국외사례 조사를 바탕으로 피복공법의 경제성이 미치는 1차적 요인은 피복재 공급원에 따른 시공성에 기인함.
- 피복공법의 시공성은 피복재 공급원과 오염퇴적물 거리에 따라 3가지 경우로 요약됨.
  - CASEI : 오염퇴적물 인근 피복재 공급원 선정 (선박1대사용, 준설 후 포설)
  - CASEII : 오염퇴적물 근해에서 피복재 공급원 선정 (선박 2대이상 활용방안검토)
  - CASEIII : 육상 피복재 공급원 선정
- CASEIII의 경우, 다양한 운송수단과 피복재 야적을 위한 여유부지 조성이 필요하여 경제성 측면에서 가장 비효율적임. 육상운송은 트레일러를 이용하여 운송하는 것으로 계획하고 피복공법 적용대상 지역 사전조사를 통해 접안여건 및 하역여건을 조사하여 하역장을 선정하며, 현장조사 시 피복재 포설 장비가 접안시설로 접근이 가능한지를 판단하고 필요시 포설 장비가 탑재된 선박을 접근가능 거리에 정박하고 바지선을 이용하여 포설재를 환적하여 운반하는 방법을 적용함.

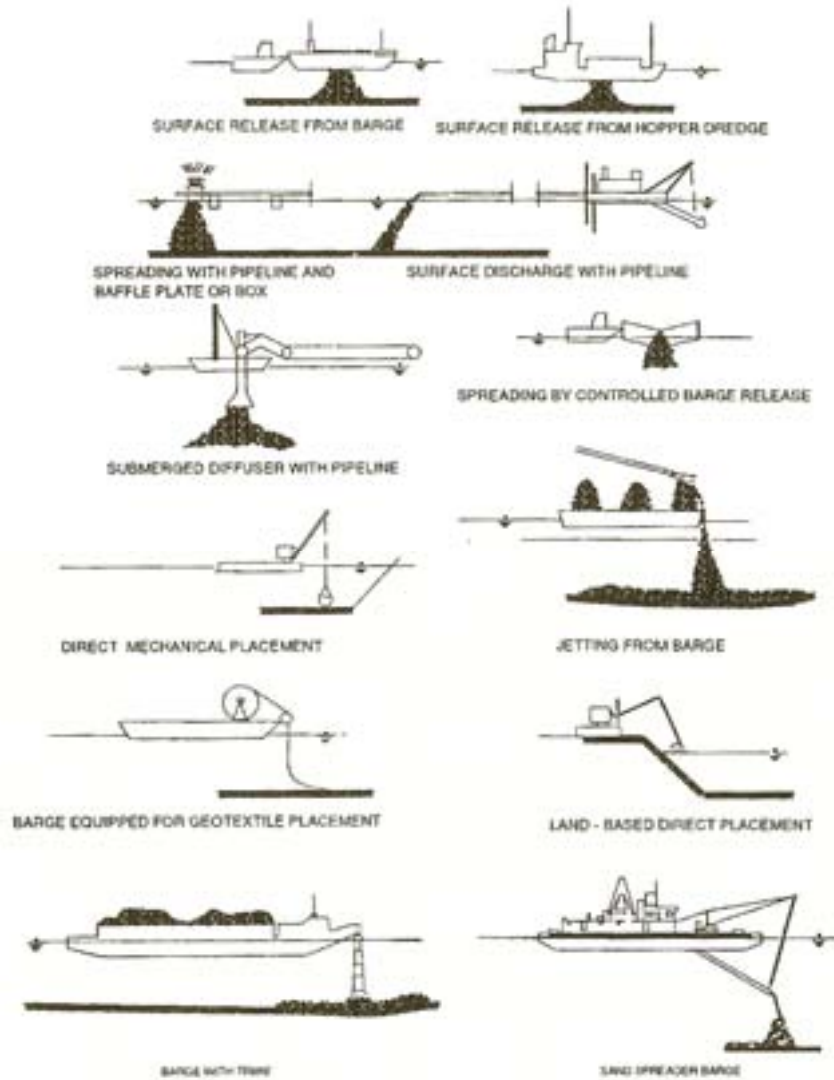


[그림. I-바-52] CASE III 시나리오 개념도

- 피복재 공급원을 오염대상 지역 인근에서 확보가 어려울 경우(CASE III), 4대강 준설사업과 연계하여 양질의 준설토를 피복재로 활용하는 연계 방안 수립을 통해 피복재 구매 비용을 절감하여 경제적인 측면에서 효과를 확대할 필요가 있음.

**(다) 피복공법 현장 시공성 검토**

- 미국과 일본에서는 피복공법이 보편적으로 현장에서 적용되고 있으며, 지속적인 연구를 통해 피복 전용 선박을 제작하여 활용하고 있음.
- 피복 전용 선박과 같은 대형 인프라 개발은 본 사업의 연구범위와 예산에는 포함되지 않음. 따라서, 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 장비를 활용하여 피복공법을 적용하고자 국내 건설업체 전문가 자문을 통해 준설선을 활용하는 것으로 결정함.
- 미국에서도 피복공법 적용 초기에는 바지선(barge)이나 호퍼준설선(Hopper dredger)에서 피복재를 수면에서 한번에 투하하였음.
- 결과적으로 피복재 포설에는 성공하였으나 대량의 피복재 투하에 따른 충격에너지로 인한 교란, 오염퇴적물 영향 범위를 벗어난 광범위 포설, 그리고 수저면 형상 변경에 따른 세굴(scour) 발생의 문제를 야기 시켰음.
- 정확한 피복재 포설은 포설범위의 최소화, 저서생물 피해 최소화, 피복재 용량 최소화, 그리고 모니터링 최소화를 통한 공기단축, 오염물 격리 효과 극대화, 그리고 비용절감과 직결됨.
- 피복재 포설 장비는 일반적으로 사용되는 바지선과 호퍼준설선을 이용하여 부가적으로 피복재의 포설을 위한 장비를 의미함. 이러한 장비를 크게 분류하면 다음과 같음 (Palermo, 1998).
  - 수면 투하 개조식(Modified surface release)
  - 수저 유출식(Submerged discharge)
  - 수저 확산식(Submerged diffuser)
  - Tremie 방식(Gravity-fed downpipe, tremie)
  - 강제 펌프식(Hopper dredge pumpdown)



[그림. I-바-53] 피복재 포설 장비별 피복공법 적용 개념도 (Palermo, 1998)

(라) 설계시공 매뉴얼 주요항목 도출

- 피복공법 설계는 최종 목표 농도에 부합되도록 피복재의 두께를 결정하는 것이 핵심임.
- 상부수층으로 유출되는 오염물의 농도가 저서생물과 인체에 미치는 영향이 미미하도록 희석시키는 효과를 갖도록 새로운 층을 형성하는 방법과 오염물이 장기적으로도 유출되지 않도록 완전 격리시키는 방법으로 구분할 수 있음.
- 따라서 이러한 두 가지 목표에 따른 피복재의 두께는 상당한 차이가 있으며, 적용대상 지역의 용도에 맞게 최적의 피복재 두께를 결정하는 것은 경제적 측면에서 중요함.
- 미국에서 조사된 결과에 따르면 피복재 두께가 3배 증가하면 시공가격에서 약 2.5배 증가함.
- 이는 피복재를 오염퇴적물이 위치한 인근에서 깨끗한 퇴적토를 준설하여 사용할 경우 (CASE I)에 해당하며, 피복재를 다른 지역에서 구매하여 운송할 경우 시공 비용이 상당히 증가할 것으로 예상됨
- 본 연구에서는 피복공법의 경제성과 효율성을 결정하는 피복재의 두께를 결정할 때 반드시 고려되어야 할 사항들을 살펴보고 설계에 필요한 데이터 확보를 위해 필요한 사항들을 정리하고자 함.

### ① 피복재 선정(Capping Materials)

- 피복재 선정에서 피복재 시공방법은 우선적으로 고려되어야 함. 일반적으로 사용되는 시공방법으로는 수면에서나 일정수심에서 피복재를 투하하여 자중에 의한 침강으로 오염퇴적토 위에 포설함.
- 만약 피복재의 자중이 적고 입자크기가 적은 경우에는 수중에서 부유하며 주변 수질을 악화 시킬뿐만 아니라 조류의 흐름에 영향을 받아 피복재가 목표지점에 도달(오염퇴적물 상부)하기 어려움(그림 I-마-56(a)).



[그림. I-마-54] 입자 크기에 따른 수심 20m 침강 시간(Stoke's Law);  
a) 실트와 점토 (약 37분 소요), b) 모래 (약 100초 소요)

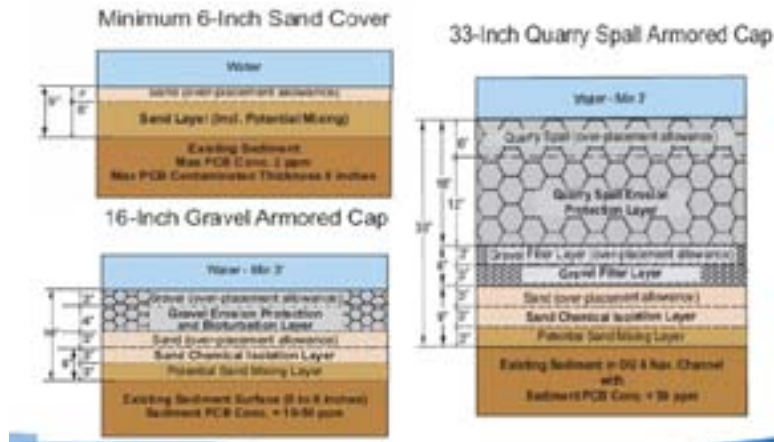
- 반대로 피복재의 자중이 너무 크고 입자크기가 크면 피복재가 오염퇴적물에 도달 시 충격에너지가 크므로 오염퇴적물을 교란 시킬뿐만 아니라 오염물 격리에도 효과가 없음.
- 따라서 피복재의 물리적 특성 분석을 통해 밀도(Density), 입도분포(Grain Size Distribution), 그리고 점착성(Cohesiveness)을 확인해야 함. 일반적으로 사용되는 피복재는 실트와 사질토가 효과적인 피복재로 알려져 있으며, 사질토는 시공이 용이한 장점이 있으나 장기적 격리에는 실트가 효과적임.(Brannon et al., 1985).

### ② 피복형상(Cap Dimension)

- 피복형상은 피복보호층(Armor layer), 피복재 두께(Thickness), 피복범위(Area)를 포함.
- 피복보호층은 파동에너지에 의한 침식과 지진으로 인한 피복재 교란을 방지하기 위해 피복재 상부에 굵은 골재를 포설하여 형성함.
- 미공병단의 연구에 따르면 수심 40m에서 70m 사이에 적용된 피복공법에는 피복보호층이 필요치 않다고 기술되어 있음(Palermo et al., 1999).
- 피복범위는 최종 목표 농도에 준하여 오염물 확산 범위를 선정하여 결정함.
- 피복재의 두께는 오염퇴적물과 피복재의 물리적 화학적 특성, 조류와 파동에너지, 저서생물의 교란, 피복재의 자중에 따른 오염퇴적물의 압밀, 그리고 시공방법을 고려하여 결정함.



## Cap Design Examples



[그림. I-바-55] 현장 캡핑 설계 예시 (Schuck, 2010)

- 따라서 저서생물의 특성, 압밀, 침식, 시공공법, 그리고 장기적 오염물 이동(이류와 확산)을 고려하여 최종 두께를 선정함.
- 선행연구 결과에 따르면 피복재의 두께가 50cm인 경우 저서생물의 교란에 따른 피해는 미미하다고 밝혀졌음(Brannon et al., 1985).
- 미국의 현장 피복공법 경험을 토대로 오염물 이동을 격리하기 위해 약 30cm, 저서생물에 의한 교란 방지를 위해 약 30~60cm, 파동에너지에 의한 침식을 고려한 여분의 두께를 설정하고 있음. 따라서 피복재의 최종 두께는 최소 60cm이상으로 경험적으로 밝혔음.
- 미국의 현장 피복공법 사례에서도 52%가 60cm이상의 피복재 두께를 사용하였음. 그러나 경험을 바탕으로 설정된 결과를 보편적으로 활용하기에는 피복공법 적용 대상지역의 상이한 환경적 요인으로 어려움.
- 최근 들어 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 기법이 다양하게 소개되고 있으며, 이러한 피복공법의 현장 특성을 고려하여 피복재의 두께를 결정하는데 사용되고 있음. 국내에서도 전문가 활용을 통한 피복재의 두께를 결정할 수 있는 시뮬레이션 기법을 정리한다면 향후 연구에 많은 도움이 될 것으로 판단됨.
- 피복재 두께를 결정하는 순서를 정리하면 다음과 같다.
  - 태풍을 포함한 파동에너지에 따른 침식 검토
  - 지진에 의한 교란 검토
  - 저서생물에 의한 교란 검토
  - 피복재와 오염퇴적물의 압밀 검토
  - 시공방법 검토
  - 이류(advection)와 확산(dispersion)을 고려한 오염물 이동 검토

### ③ 침식(Erosion)

- 파동에너지에 따른 침식의 영향을 고려하기 위해서는 외적 환경요인을 분석하는 것이 가장 중요함.
- 해안 지역에서는 태풍으로 인한 피해를 고려하고 하천 지역에서는 홍수로 인한 최고 유속에서의 피복재 침식을 고려해야 함.
- 또한 피복재의 생애주기를 설정하고 생애주기 내에서 발생 가능한 최악의 기상조건을 반

영하여 설계하는 것이 바람직함.

- 예를 들어 현장 피복으로 오염물 격리에 필요한 최소 주기를 25년으로 산정할 경우 25년 주기의 태풍이나 홍수를 고려하여 설계에 반영함.
- 미공병단에서는 수치해석 모델(USACE Long Term FATE, LTFATE)을 이용하여 가상의 태풍조건을 고려한 피복재의 입자크기에 따른 침식영향 두께를 산정하였음(Palermo et al., 1999).
- 시물레이션에 사용된 기상조건은 20년 주기에 발생 가능한 최악의 태풍을 선정하여 파고 5.5m를 설정하였음.
- 피복재로는 0.3mm 사질토, 0.1mm 사질토, 그리고 실트와 점토를 이용하여 침식의 영향범위를 산정하였음. 입자 크기가 작고 자중이 비교적 가벼운 실트와 점토의 경우, 수심 30m이하에서는 약 30cm 침식이 예상되며 0.1mm와 0.3mm 사질토의 경우 각각 20cm와 8cm의 침식이 예상되는 것으로 조사됨.
- 수심 40m 이상에서는 침식에 따른 피해가 미미한 것으로 밝혀져 기존의 연구에서 밝혀진 결과(수심 40~70m 침식 피해가 미미하여 피복보호층 불필요)와 유사함.
- 시물레이션 결과를 토대로 미공병단에서는 수심 40m이하에서 입자크기 0.1mm이하의 사질토를 이용할 경우 피복 보호층이 별도로 포설되어야 한다고 강조하고 있음. 또한 실트와 점토는 오염물 이동을 격리 시키는 효과는 높지만 침식에 따른 피해가 예상되므로 피복재로써 적합하지 않다고 결론지었음.
- 이밖에도 지진에 따른 교란과 오염퇴적물의 액상화에 따른 피복재의 함몰 파괴를 고려할 필요가 있음.
- 오염퇴적물이 위치한 지역에서 발생 가능한 지진의 영향 범위를 산정하고 오염퇴적물의 액상화 민감성을 판정하여 설계에 반영함.
- 또한 오염퇴적물이 위치한 저면의 지질학적 형상, 특히 저면 경사로 지진에 따른 오염퇴적물과 피복재의 자중으로 인한 흐름을 고려해야 함.

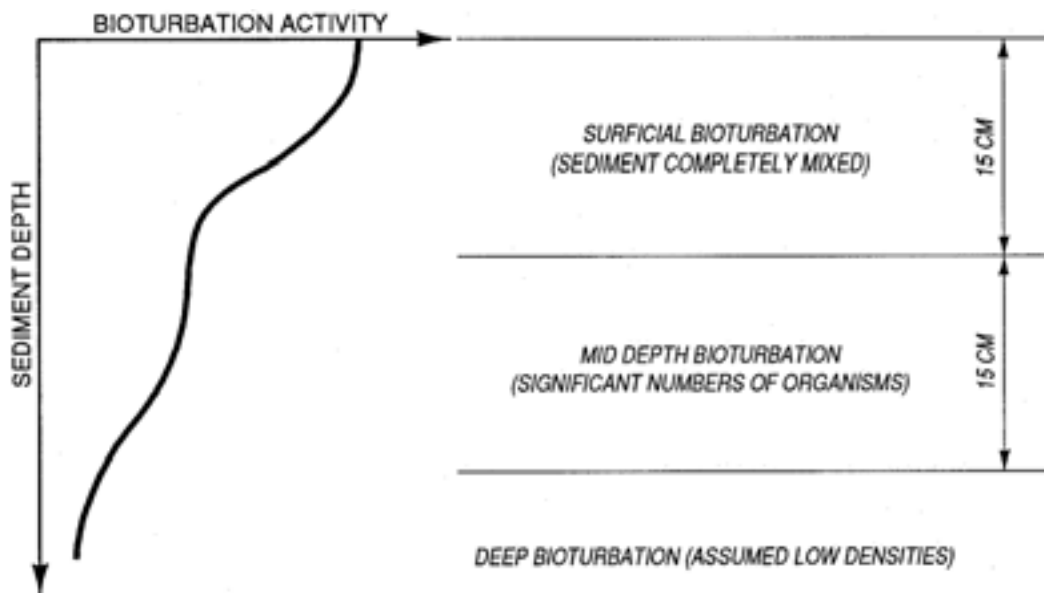
#### ④ 저서생물 교란(Bioturbation)

- 생물교란이란 저서동물들의 섭이 또는 서식처 형성과정에서 야기되는 저서 환경의 물리-화학적 교란현상을 의미함.
- 예를 들어, 유기쇄설물이 해저의 퇴적물에 도착하면 대형저서동물을 비롯한 여러 동물들이 소모하게 되며 그 결과로 퇴적물의 표층 수 cm 는 교란 또는 교반이 되는 일련의 과정을 의미함.



[그림. I-바-56] Bioturbation 개념도 (Menzie, 2010)

- 퇴적물 및 표층수의 교란을 야기하는 저서동물의 모든 행동은 크게 굴진, 잠행, 포복 등의 운동과 서식을 위한 굴착 활동 그리고 먹이 섭취와 배설 활동 등으로 구분할 수 있으며, 이에 따라 굴착, 관개, 퇴적입자의 섭취 및 정화 등이 생물교란에 포함됨.
- 생물교란 활동상의 수직분포의 이해는 효과적인 피복 디자인을 위하여 도움이 되며, 이에 따라 저서생물군들의 생물학적 활동성의 이해가 가장 중요함.
- 또한 생물교란이 발생하는 깊이는 미생물의 활동이나 기질의 특성(결정입도, 유기물함량, 공극수 등)에 영향을 받으며, 일반적인 생물교란은 그림 I-마-60과 같이 깊이에 따라 3개의 구역으로 나눌 수 있음.
- 첫 번째 구역은 퇴적물의 깊이가 15cm 이하에 해당하는 퇴적물/물의 계면에 인접한 상위층으로 얕은 생물교란을 하는 미생물들에 의하여 혼합되기 쉬우며, 이 표면 구역은 대개 산화-환원 불연속(redox potential discontinuity), 산소와 무산소 퇴적물 사이의 경계와 관련이 있음.
- 두 번째 구역은 15cm 이하의 중간 깊이 구역에 해당하는 퇴적물 층으로 많은 조개류 및 연체동물의 서식하는 구역임. 조개의 크기와 연체동물이 아가미 호흡을 할 때 물을 외부로 출입시키는 통로인 수관의 길이에 영향을 받으며 퇴적물의 깊이가 깊어질수록 생물교란의 활동성은 감소함.
- 또한 생물교란 과정의 실제적인 강도는 계절에 따른 해저 개체군의 변화와 함께 일시적으로 달라짐. 예를 들어 Wheatcroft와 Martic(1996)은 Massachusetts Bay의 32m 깊이 구역에서 채취한 봄, 가을 샘플들이 차이가 있는 것을 발견하였으며, 관찰된 차이에 대하여 계절에 따라 생물교란의 우세종들이 이동했다고 추측하고 있음.
- 해저 구역 내 생물교란에서 공간적/시간적 규모가 변화함에도 불구하고 일반적인 생물교란의 구역별 패턴은 해저 서식지 내 10cm~40cm의 범위로 지속되었으며, 생물교란에서 우세한 과정은 표면의 혼합과 중간 깊이에서 발생하는 생물 확산일 것으로 예상됨.
- 세 번째 구역은 생물교란 작용을 일으키는 생물이 존재할 가능성이 있는 구역을 나타낸 것으로 첫 번째와 두 번째 구역에 관여하는 생물보다는 낮은 밀집도를 갖고 있음.



[그림. I-마-57] Illustration of zones of bioturbation (Palermo et al., 1999)

- 대다수의 해저 미생물은 15-20 cm 위에 서식함에 따라 일반적으로 생물교란은  $9.8 \pm 4.5$

---

cm 표면에서 일어나며(Boudreau, 1998), 생물교란의 이론은 확산과정으로써 수학 논리적으로 표현됨(Berner, 1980; Guinasso et al., 1975).

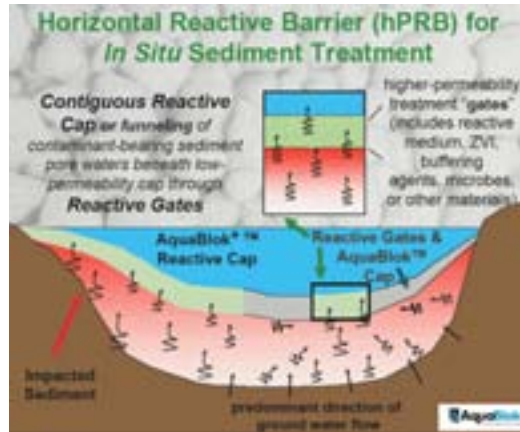
- 생물교란은 연안퇴적물의 지화학적 환경에 큰 영향을 미치는데, 예를 들면 유기물 과정, 질소순환, 미생물 생태학, 표층해수와 물질 교환을 들 수 있으나 이전의 많은 연구결과가 있었음에도 불구하고, 생물교란의 지화학적 특성에 미치는 영향에 관한 정확한 연구는 매우 부족한 상태이며 이를 정량적으로 예측하기는 더욱 어려움.
- 과거의 경험을 비추어 볼 때, 생물교란은 주로 대형 저서동물의 지속적인 퇴적물 내 지화학적 반응과 물질 플럭스를 바꾸는 역할을 하고 있지만 얼마나, 어떻게 이들 과정을 통제하는가에 관한 내용은 아직 풀리지 않고 있어 생물교란에 관한 정량적, 역학적인 연구가 필요함.

### ⑤ 압밀효과(Consolidation)

- 피복재의 자중에 따른 피복재와 오염퇴적물에 압밀이 발생함. 오염퇴적물의 초기 높은 함수율로 인해 비교적 작은 상재하중에서 압밀이 발생함.
- 침식을 고려한 피복재를 선정할 경우 0.3mm 이상의 사질토 피복층은 압밀에 따른 침하는 미미할 것으로 판단됨.
- 오염퇴적물이 압밀되면 과잉간극수압으로 인한 동수구배(Hydraulic gradient)가 발생하고 순간적인 간극수 흐름(Transient advective flow)가 발생함. 이러한 간극수의 흐름은 오염물 이동을 도와주고 가속시켜 피복공법의 효율성이 설계에서 예측된 결과보다 저하됨.
- 또한 피복재 포설 시 시공기간을 단축시킬 목적으로 대량의 피복재를 일시에 포설할 경우 오염퇴적물은 피복재 자중으로 인한 파괴가 예상됨. 단계별 피복재 포설을 통해 오염퇴적물을 압밀시켜 지지력을 확보해야 하며, 이러한 단계별 시공에는 압밀 속도 예측이 핵심기술임.
- 압밀로 인해 발생하는 오염퇴적물의 침하량과 압밀속도의 정확한 예측을 위해서는 불교란 시료를 이용한 실내실험이 필수적임.
- 일반적으로 지반공학에서 사용되는 샘플링튜브를 이용하는 방식으로는 한계가 있음.
- 초기 높은 함수율로 인해 오염퇴적토가 샘플링튜브 내부에 정착되지 않고 흘러내리는 문제가 있으며 개량된 피스톤 샘플러도 수저면하에서 수압에 의해 피스톤을 충분히 고정될 수 없음(임종석 등, 1996).
- 샘플러는 압밀시험에 필요한 시료뿐만 아니라 오염물 농도 측정을 위한 대량의 시료를 채취할 수 있다면 현장 시료 채취에서 발생하는 비용적 부담을 줄일 수 있음.
- 압밀과 오염물 이동 해석은 기존 연구를 통해 활발히 진행되었음(Moo-Young et al., 2003; Fox 2007; Lee and Fox, 2009). 미공병단에서 수행한 연구에서는 압밀에 의한 오염퇴적물의 간극수 유출량을 오염퇴적물의 침하량을 이용하여 산정하고 피복재 두께에 반영하여 설계하였음 (Palermo et al., 1999). 그러나 압밀에서 발생하는 간극수의 흐름은 오염물 이동 해석에 별도로 계산될 수 없으며, 오염물 이동 해석에서 이류에 해당하는 부분은 압밀로 인한 순간적인 간극수 흐름을 포함하여 복합적으로 해석되어야 함(Lee and Fox, 2009).
- 압밀은 오염물 격리와 피복 시공성에 직접적인 영향을 미치므로 불교란 시료 확보를 통한 실내시험 결과를 토대로 정량적 침하량 산정과 압밀속도 분석이 필요하며, 수치해석을 통한 오염물 격리 효과를 검증할 필요가 있음.

## ⑥ 반응성 피복재(Reactive Capping Materials)

- 최근에는 현장 캡핑의 여러 방법 중 반응성물질을 사용하여 오염된 퇴적토를 물리적으로 분리하거나, 보다 적극적으로 오염물질을 흡착하거나 분해할 수 있는 반응성 피복재(Active/Reactive caps)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있음.
- 반응성 피복재는 흡착(sorption), 반응(reaction), fixation, 또는 투수성을 감소시키는 방법을 통하여 기존의 방법보다 적극적으로 오염물의 이동을 제어하는 방법으로 기존의 Permeable Reactive Barrier(PRB)와 반응면에서 거의 유사하여 수평형(Horizontal) PRB 라는 이름으로 불리기도 함.



[그림. I-바-58] hPRB을 이용한 현장 캡핑 개념도

- 현재 다음과 같은 반응성 피복재들이 각기 다른 목적으로 사용되고 있으며 아래 그림은 이러한 재료들의 실용화정도를 보여주고 있음.
  - Clay(bentonite 등): 투수성 조절
  - 탄소재질의 흡착제(활성탄 등): 소수성 유기오염물 sequestration
  - Organoclays: NAPL과 일부 용존오염물 control
  - Clay와 흡착제의 혼합물
  - Phosphate additives: metals
  - Iron Sulfide: Hg와 MeHg control
  - Siderite( $\text{FeCO}_3$ ): pH control
  - Zero valent iron: chlorinated organic compounds
  - Oxygen or hydrogen release compounds/technologies
  - Biopolymers
  - Electrochemical controls on redox conditions(Speculative)

**Demonstrated**



- **Activated Carbon or other carbon sources**
- **Organoclays**
  - NAPL control
- **Phosphate additives (Apatite)**
  - Metals
- **Zero valent iron**
- **Oxygen or hydrogen release compounds**
- **Biopolymers (Knox research)**
  - Can bind metals and organics

**Speculative**

[그림. I -바-59] 반응성물질(Reactive materials)의 실용화 단계 (Madalinski, 2008): 위에서 아래로 내려올수록 최근에 연구가 시작된 재료들로 효과 및 성능이 뛰어날 것으로 기대

**사. 해양오염퇴적물 현장처리 기술 개발**

(1) 해양오염퇴적물의 부영양화 유발 특성 기존 자료 분석

(가) 부영양 오염해역 퇴적물 자료 수집 및 특성 유형 검토

- 2004년부터 2011년까지 25개 해역을 대상으로 한 국토해양부(구 해양수산부)의 퇴적물 오염현황 조사 결과 활용.(해양수산부, 2007; 국토해양부, 2011)
- 조사 해역 중 퇴적물이 부영양화 물질에 의해 오염되어 있고, 향후 3년간 해양오염퇴적물 정화·복원 사업이 추진되지 않을 3개 해역을 분석 대상으로 함.
- 해당 해역의 부영양화 관련 퇴적물 평균 오염도는 다음 표와 같음.

[표. I -사-1] 부영양 오염해역 퇴적물 평균 오염도

구분	단위	가	나	다
강열감량	%	11.2	6.9	7.3
COD	mg/g	20	27	16
AVS	mg/g	1.8	0.6	1.5
TOC	mg/g	23	34	17
TN	mg/g	2	1	2
CIET*	-	6	6	5

\*부영양화 정화지수 (Clean-up Index, Eutrophication)

① “가”해역 및 퇴적물 특성

- 내만에 위치한 무역항으로 해상 교통과 물류의 중심 해역임.
- 수심: 2~13 m (어항 지역은 2~5 m, 준설 지역은 9~13 m)
- 과거 준설로 인해 불규칙한 지형 분포를 나타내며, 퇴적물 입도 특성에 의해 해저면의 요철이 심함.
- 퇴적물은 검은 색으로 액상의 오니 또는 매우 부드러운 입자로 구성되어 있음.

② “나”해역 및 퇴적물 특성

- 연안에 위치한 다목적 해역으로 어업과 수산물 유통, 화물 운송이 활발함.
- 수심: 2~12 m (어항 지역 2~5 m, 준설지역 5~12 m)
- 과거 준설로 인해 불규칙한 지형 분포를 나타냄.
- 퇴적물은 암회색 또는 갈색을 띠며, 다음 표와 같이 모래의 함량이 높고, 하부로 갈수록 큰 입자(모래+자갈)의 비율이 늘어남.

[표. I-사-2] “나”해역 퇴적물의 입도 구성

구분	자갈(gravel)%	모래(sand)%	미사질(silt)%	점토질(clay)%
평균	7.5	70.3	14.7	7.4
표준편차	17.8	25.7	12.5	12.0

### ③ “다”해역 퇴적물 특성

- 무역항으로 해상 교통의 중심 해역임.
- 수심: 3~12 m
- 빠른 유속으로 인해 해저면의 굴곡과 요철이 심하지 않음.
- 퇴적물은 암회색이며, 미사질과 모래가 대부분을 차지함.
- 연안지역을 비롯하여 수심이 얇은 지역이 상당 수준 존재함. 따라서 피복 만으로는 전체 오염 해역을 정화할 수 없고, 준설 및 현장처리가 일정 부분 이상 적용되어야 할 것으로 사료됨.
- 퇴적물 평균 오염도가 유사한 경우에도 퇴적물 입도 구성이 상이하게 나타남. 퇴적물의 입도 분포는 부영양 물질을 포함한 오염 물질의 함유량, 용출 정도, 투수 계수, 골재로서의 활용 가능성 등에 영향을 미치므로, 해양오염퇴적물 정화기술 적용 지역 및 기술 선정 시 이에 대한 면밀한 검토가 필요함.

## (2) 해양오염퇴적물의 부영양화 유발 특성 현장조사

### (가) 해양퇴적물의 부영양화 유발 특성 평가 목적 및 범위

- 해양퇴적물은 주로 육상에서 유입되거나 해수 부영양화 작용으로 생성된 유·무기 입자 물질이 해저에 침전하여 형성된 불용성 물질임.
- 해양퇴적물은 해역 내 환경 조건의 변화에 따라 영양염류 (인, 질소), 유기물, 중금속, 특정 유기화학물질을 해수로 용출하거나, 해수로부터 흡착하며, 그 정도와 반응 속도 역시 환경 조건에 따라 상이해짐.(Lee and Lee, 2000)
- 인 등의 부영양 물질이 퇴적물로부터 수계로 이동하는 현상에는 pH, DO, 온도 등 환경 요인과 퇴적물 및 수계의 오염 물질 농도 등이 복합적으로 작용함.(Ingall et al., 1990; Carman et al., 2000)
- 해역 내 환경 조건 변동에 따른 해양퇴적물의 부영양화 유발 특성 평가는 해역 수질 개선 방안 수립, 해양 퇴적물의 정화 필요성 평가, 해양 퇴적물 정화 기술 선정/설계/시공 등을 위한 필수적인 전제 조건이나, 현재까지 이에 대한 연구 결과가 보고된 바는 극히 미미함.(Ryding and Forsberg, 1977; Hakanson and Jansson, 1983; Böstrom, 1983; 조 등, 2011)
- 따라서 본 과제에서는 부영양 우심 해역의 퇴적물을 채취하여 오염 유발물질 함량 및 특성을 분석한 후, 해수와 퇴적물간의 부영양 물질 이동 현상을 실험을 통해 고찰하여, 해

양오염퇴적물의 부영양화 유발 특성을 평가함.

**(나) 부영양 우심 해역 퇴적물의 오염 유발물질 함량 및 특성 조사**

- 퇴적물 및 해수는 서해 연안에서 채취하였으며, 퇴적물은 간조 시 표층 10 cm 이내, 해수는 만조 시 해수면 50 cm 이내에서 채취함.
- 해양환경공정시험기준에 따라 분석된 퇴적물과 해수의 특성은 다음 표와 같음.
- 퇴적물 내 강열감량, COD, AVS로부터 도출된 부영양화 정화지수(CIET)는 7로 해당 해역은 정화복원 대상 구역으로 설정이 가능한 지역으로 판단됨.
- 부영양 물질인 인의 퇴적물 내 함량은 1.57 mg P/g 임.
- 퇴적물 내 인의 존재형태는 수중 생태계에서 인의 농도를 결정하는데 매우 중요한 요인이며, Williams et al. (1976)이 제안한 방법에 따라 본 퇴적물을 분석한 결과 R-P > A-P > Ads-P > NAI-P의 순으로 인이 분포하고 있는 것으로 파악됨.
- A-P: 미립자의 표면에 흡착된 인(adsorbed P; Ads-P)
- NAI-P: 철이나 알루미늄 등과 착물을 이룬 인 (nonapatite inorganic P)
- A-P: 인회석과 같은 광물에 포함된 인 (apatite P)
- R-P: 유기인 (residual P)
- 본 연구에 사용된 해수의 총인 농도는 해역별 수질기준의 III 등급에 해당되어 부영양 우심 해역임을 확인.(국토해양부, 2008)

**[표. I-사-3] 부영양 우심 해역에서 채취한 퇴적물 및 해수 특성 분석**

퇴적물								
함수율 (%)	강열감량 (% (건중량))	CODMn (mg/g, 건중량)	A V S (mg/g, 건중량)	인 (mg/g,건중량)				
				T-P	Ads-P	NAI-P	A-P	R-P
50.72	10.20	33.4	0.53	1.57 (100 %)	0.19 (12 %)	0.9 (6 %)	0.63 (40 %)	0.66 (42 %)
해수								
pH	T-P (mg/L)		PO <sub>4</sub> (mg/L)		T-N (mg/L)		COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	
8.12	0.08		0.02		0.71		1.1	

- 해수와 퇴적물 간의 부영양 물질 이동 조사를 위해서는 계절 및 기타 요인에 의한 온도, pH, DO 등의 환경 인자 변동을 고려해야 함.
- 해당 연안 해역의 수질 관련 통계자료(국가해양환경통합정보시스템, 1997~2011)에 따르면 평균 pH는 7.4~8.4이며, 온도는 2, 5, 8, 11월 각각 평균 3, 14, 24, 16℃이고, DO는 평균 최소 5.3 mg/L, 최대 12.7mg/L 임.

**(다) 해수-퇴적물 간 부영양 물질 이동조사**

- 환경 조건이 해수-퇴적물간 부영양 물질에 미치는 영향을 3회 반복실험으로 수식화
- 수리학적 흐름의 영향을 배제한 상태에서 pH, DO, 온도가 해수와 퇴적물간의 부영양 물질 이동에 미치는 영향을 회분식 실험을 통해 고찰함.
  - 퇴적물 대 해수 비율 = 1:4 (w/v)



- pH: 7~9
- 온도: 10~20℃
- DO: 0.7~7 mg/L
- 교반: 200 rpm
- Chloroform 주입 (생물학적 요인 배제)



[그림. I-사-1] 회분식 실험 장치

- 용출에 따른 해수 내의 시간 별 인산염 농도는 아래의 일차식을 통해 해석되었으며, (김 등, 2005) 본 실험에서의 모든 조건에서  $R^2$  값이 0.90을 넘어 해석이 유의미한 것으로 나타남.

$$\frac{dC}{dt} = k(C_{eq} - C) \quad (1)$$

- 식 (1)에서  $C$ 는 시간 별 용출 농도 ( $\text{mg PO}_4^{3-}\text{-P/L}$ ),  $C_{eq}$ 는 평형 용출 농도 ( $\text{mg PO}_4^{3-}\text{-P/L}$ ),  $t$ 는 시간 (h),  $k$ 는 일차 반응 속도 상수 ( $\text{h}^{-1}$ )를 의미함.

식(1)을 통해 도출된 동력학적 상수에 pH, 온도, DO가 미치는 영향은 상호작용을 고려한 아래의 선형 회귀 분석식을 통해 도출됨

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{13}x_1x_3 \quad (2)$$

- 식 (2)에서  $y$ 는 동력학 상수( $C_{eq}$  또는  $k$ ),  $x_1$ 은 pH,  $x_2$ 는 온도 (℃),  $x_3$ 는 DO ( $\text{mg/L}$ ),  $\beta$ 는 각 항에 대한 회귀분석 계수를 의미함.

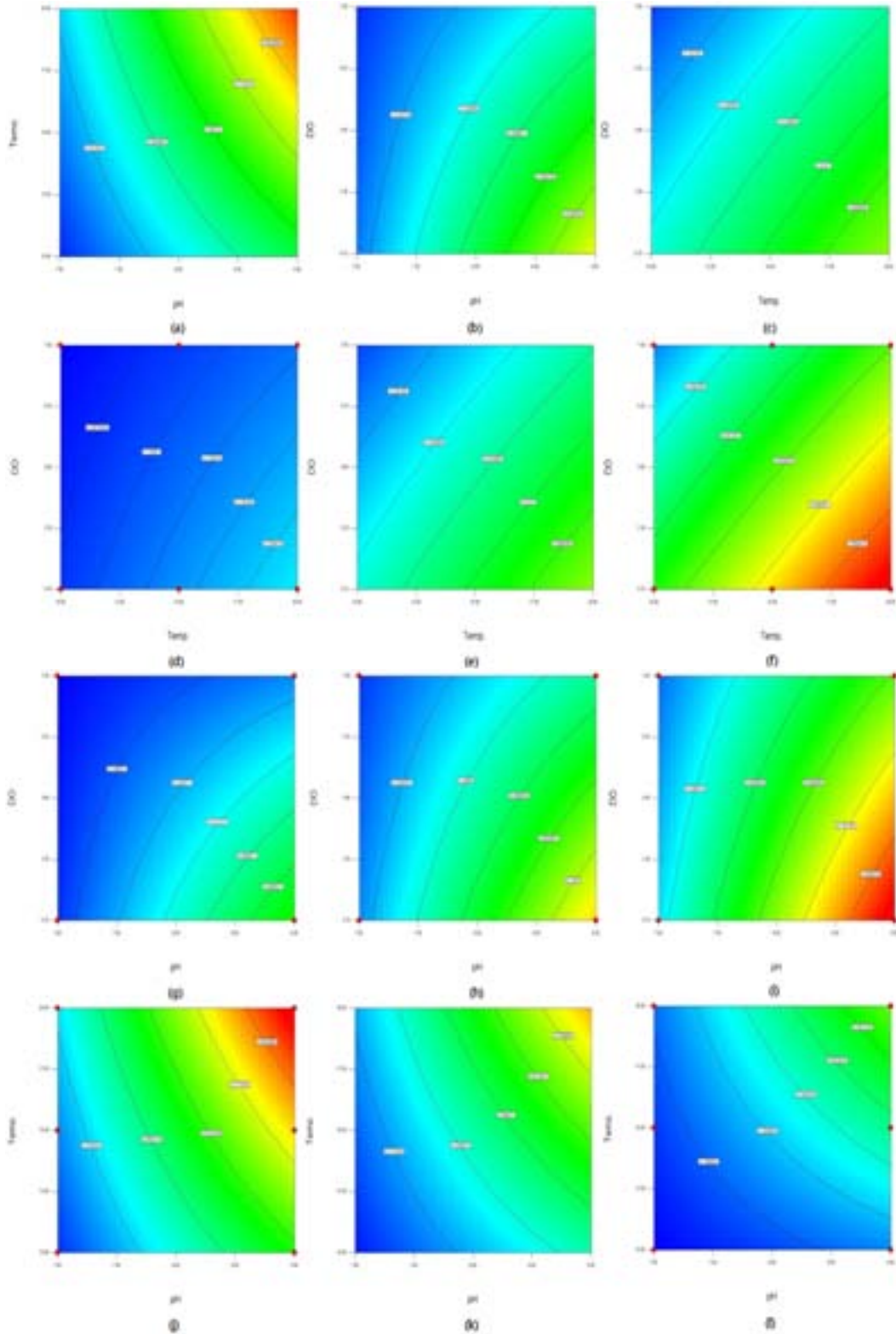
환경 조건이 평형 용출 농도에 미치는 영향을 고찰한 결과, 표 I-바-4에 도시한 바와 같이 본 연구에서 검토된 환경 조건과 유의미하게 연관이 있으며, 식 (2)와 같이 환경 조건들 간의 상호작용을 고려한 선형 모델(2FI)이 가장 적합한 것으로 나타남. 도출된 관계식은 아래와 같음.

- 인산염 평형 용출 농도( $\text{mg PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) =  $-0.67313 + 0.085063 (\text{pH}) - 0.10049 (\text{Temperature, } ^\circ\text{C}) + 0.19055 (\text{DO, mg/L}) + 0.017108 (\text{pH})(\text{Temperature, } ^\circ\text{C}) - 0.026728 (\text{pH})(\text{DO, mg/L}) - 0.00115635 (\text{Temperature, } ^\circ\text{C})(\text{DO, mg/L})$

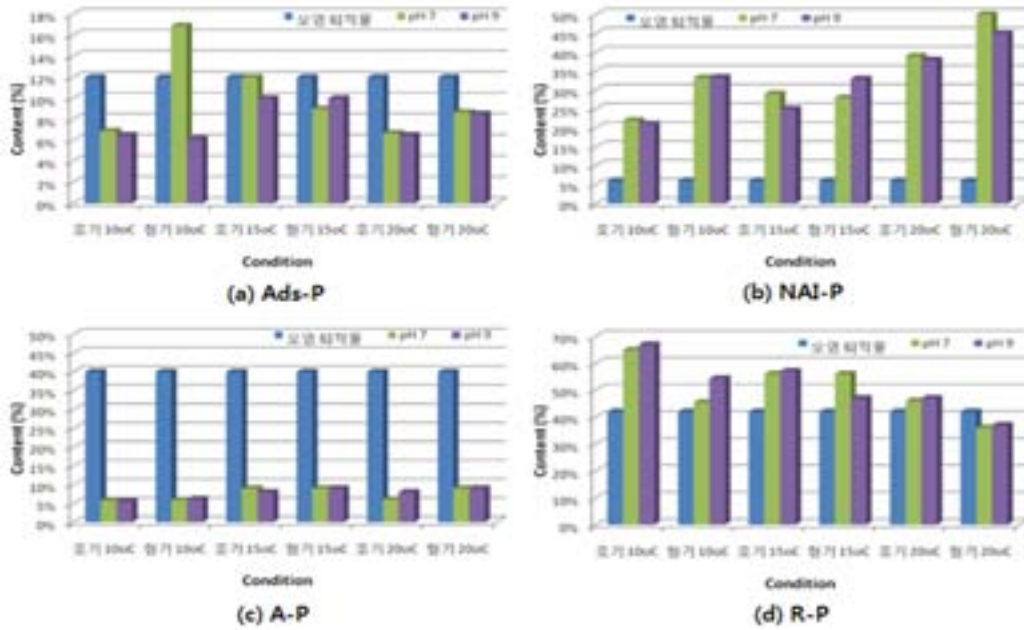
[표. I -사-4] pH, 온도, DO가 인산염 평형 용출 농도에 미치는 영향에 대한 ANOVA 분석

Fit tests					
Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F
Mean vs Total	1.89	1	1.89	-	-
Linear vs Mean	1.08	3	0.36	15.77	0.0010
2FI vs Linear	0.15	3	0.049	6.56	0.0348
Quadratic vs 2FI	3.896	1	3.896	0.042	0.8469
Cubic vs Quadratic	0.031	3	0.010	1.95	0.4744
Residual	5.367	1	5.367	-	-
Total	3.16	12	0.26	-	-
Model summary statistics					
Source	Std. Dev.	R-squared	Adjusted R-squared	Predicted R-squared	PRESS
Linear	0.15	0.8553	0.8011	0.6737	0.41
2FI	0.086	0.9707	0.9355	0.8271	0.22
Quadratic	0.096	0.9710	0.9203	0.7502	0.32
Cubic	0.073	0.9958	0.9534	0.0855	1.16

- 선형 모델의 p값과 R2값은 각각 0.0348(판정기준 : > 0.05)과 0.9707로 높은 유의성을 보임.
- DO가 낮고 온도와 pH가 높을 수록, 평형 용출 농도가 확연히 증가하는 경향을 보임.
- pH 증가 (7.0→9.0), 온도 증가 (10 → 20℃), DO 감소 (7 → 0.7 mg/L)는 각각 인산염 평형 용출 농도를 2-3 배 증가시킴.
- 용출 속도는 본 연구에서 검토된 pH, 온도, DO 범위에서는 환경 조건과 특별한 상관관계를 갖지 않는 것으로 나타남.(표 I -마-5 참조)
- 일반적으로 인의 용출은 생물학적, 또는 비생물학적 요인에 의해 영향을 받으나,(조우정 등, 2011) 본 연구에서는 해수 내 chloroform 주입으로 미생물 활동이 배제되었으므로, pH, 온도, DO의 변화가 비생물학적 요인으로서 인 용출에 영향을 미치는 것을 확인함.
- 용출이 진행된 후, 퇴적물 내 인의 존재 형태 분포 순서가 R-P > NAI-P > Ads-P > A-P 인 것으로 나타남. 용출 전 퇴적물 내 인 존재형태 분포 순서와 비교했을 때, NAI-P 분율이 증가하고, A-P 분율이 감소함.



[그림. I-사-2] 통계학적 방법을 활용한 환경조건에 따른 해양퇴적물의 인산염 평형 용출 농도 변화; (a) DO 2.0 mg/L 조건에서 pH, 온도의 영향 (b) 14°C 조건에서 pH, DO의 영향 (c) pH 8.0 조건에서 온도, DO의 영향, (d) pH 7에서의 온도, DO 영향, (e) pH 8에서의 온도,DO 영향, (f) pH 9에서의 온도, DO 영향, (g) 10°C에서의 pH, DO 영향, (h) 15°C에서의 pH, DO 영향, (i) 20°C에서의 pH, DO 영향, (j) DO 0.7 mg/L에서의 pH, 온도 영향, (k) DO 3.8 mg/L에서의 pH, 온도 영향, (l) DO 7.0 mg/L에서의 pH, 온도 영향



[그림. I-사-3] 회분식 실험 전·후 퇴적물 내 인 존재형태별 상대적 함량 비교

(라) 칼럼 실험 결과

- 실제 해역 환경을 모사한 칼럼 실험 수행.(그림 I-바-4, I-바-5 참조)
- 칼럼 총 부피: 18 L (높이: 90 cm, 지름 16 cm)
- 반응조의 아래 부분에 오염 퇴적물을 3.2 kg 채우고, 표면 부분은 고르게 한 후 퇴적물 채취 해역의 해수 12.8 L를 채워 용출실험 실시.(총 유효부피 13 L)
- 시료 채취는 실험 시작 후 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144시간이 경과하여 25 cm 지점의 밸브에서 실시함.

pH: 7.5-8.0

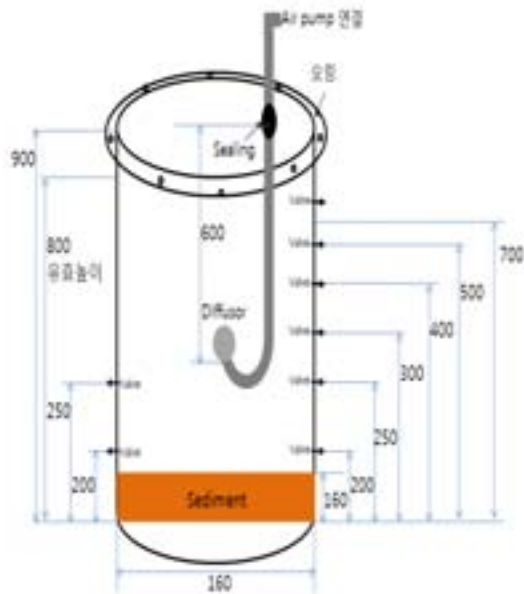
온도: 22±2°C

DO: 7-10 mg/L

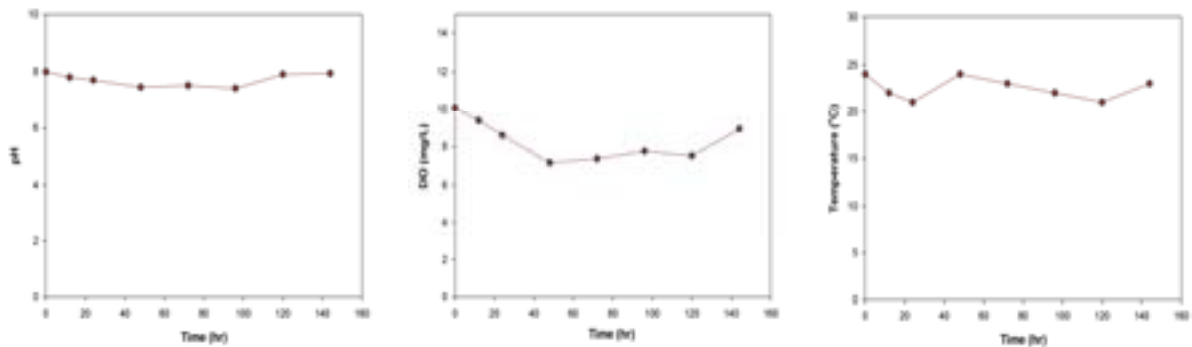
[표. I-사-5] pH, 온도, DO가 인산염 용출속도에 미치는 영향에 대한 ANOVA 분석

Fit tests					
Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F
Mean vs Total	0.99	1	0.99	-	-
Linear vs Mean	1.64	3	0.55	3.03	0.0930
2FI vs Linear	0.72	3	0.24	1.68	0.2846
Quadratic vs 2FI	0.37	1	0.37	4.19	0.1102
Cubic vs Quadratic	0.32	3	0.11	3.57	0.3668

Residual	0.03	1	0.03	-	-
Total	4.08	12	0.34	-	-
Model summary statistics					
Source	Std. Dev.	R-squared	Adjusted R-squared	Predicted R-squared	PRESS
Linear	0.42	0.5322	0.3568	-0.0956	3.38
2FI	0.38	0.7673	0.4880	-0.4360	4.43
Quadratic	0.30	0.8863	0.6872	-0.1309	3.49
Cubic	0.17	0.9903	0.8931	-1.0987	6.47



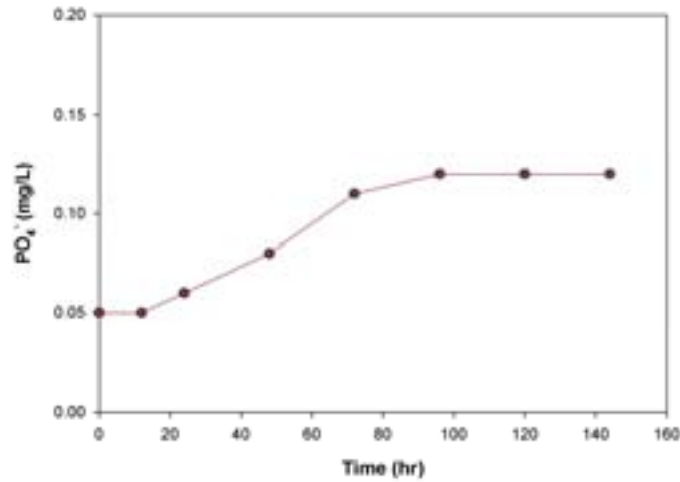
[그림. I-사-4] 칼럼 실험 도면 및 장치



[그림. I-사-5] 칼럼 실험 시 pH, DO, 온도

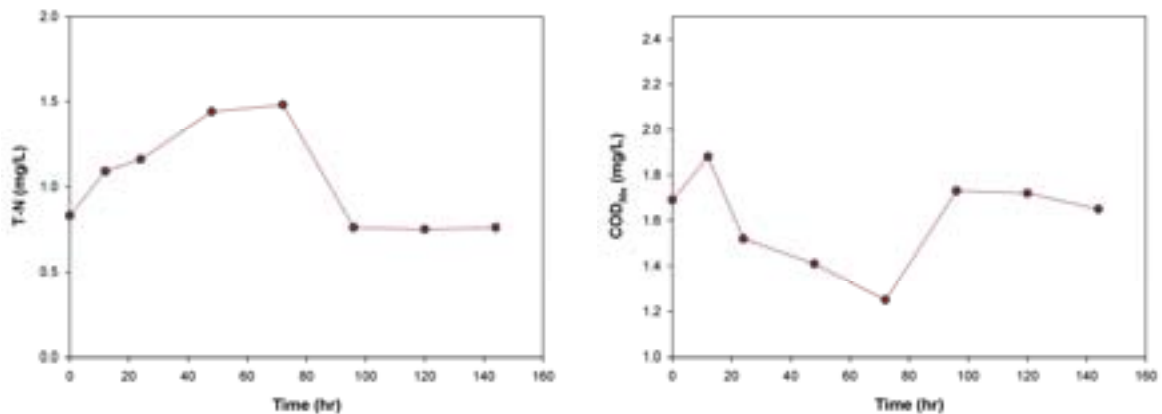
- 칼럼 실험 결과, 회분식 실험 결과와 유사하게 DO가 충분한 호기조건에서는 부영양 물질 용출농도가 높지 않다는 사실을 확인함.
- 인산염은 12시간 경과 후부터 용출이 시작되어 96시간까지 농도가 증가한 후에는 증가폭이 미미하였으며, 95시간에서의 인산염 농도는 0.12 mg/L로, 회분식 실험 결과에서 도출된 평형 용출 농도 (0.4178 mg  $PO_4^{3-}$ -P/L)에 비해 낮음.(그림 I-바-6 참조)
- 이는 회분식 실험에서는 pH, 온도, DO 외에는 진탕 교반을 통해 용출을 방해할 수 있는

다른 요인이 배제되었는데 반해, 실제 해역 상황과 유사한 칼럼 실험에서는 퇴적물 내에서의 물질 전달, 퇴적물과 해수 경계면에서의 물질 전달 등 다양한 요인이 포함되었기 때문으로 판단됨.(조대철 등, 2011)



[그림. I-사-6] 칼럼실험 시간에 따른 인산염 농도 변화

- T-N은 72 시간에 최대 용출 농도를 나타낸 후 다시 낮아진 후 96시간 이후에는 농도 변화가 거의 없음.(그림 I-바-7 참조)
- COD<sub>Mn</sub>은 시간 경과에 따라 변동하다가 96시간이후 농도변화가 거의 없는 것으로 분석됨.
- T-N, COD<sub>Mn</sub> 과 같이 입자성 유기물을 포함하는 측정값의 경우 칼럼 실험 초기에 수리학적 유동에 영향을 받아 농도가 증가하였다가 이후 평형 상태로 수렴한 현상으로 사료됨.(기보민 등, 2010; 조대철 등, 2011)

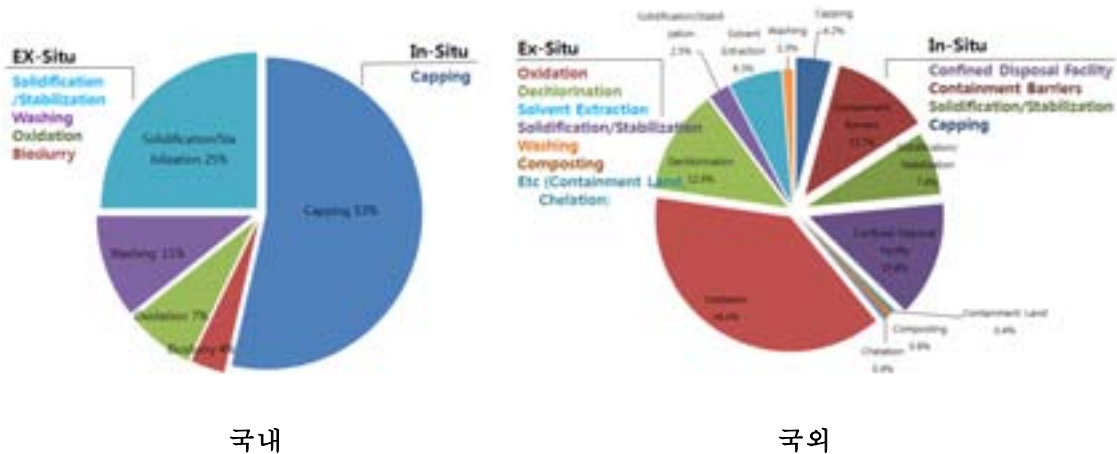


[그림. I-사-7] 칼럼실험 시간에 따른 T-N, COD<sub>Mn</sub> 농도 변화

### (3) 현장처리기술 조사

- 현장피복의 대안기술로서 원위치상에서의 현장처리기술은 아직까지 정립되지 않은 분야

로 관련성이 있는 단위기술을 중심으로 검토함. 국내외 연구동향조사에서도 퇴적물을 대상으로 한 연구사례는 원위치(in-situ)기술로는 피복이 중심이며, 고형화/안정화 등의 방법이 대안으로 연구되었음. 오염물을 분리/제거하는 세척, 산화 등의 처리기술들은 위치외(ex-situ)기술로 연구되었음. [검색기관 : KISS, NDSL(국내), Science Direct(국외), 검색기간 : 2000~2012, 검색어 : 퇴적물(Sediment), 처리(Treatment), 기술(Technology), 토양처리 배제]

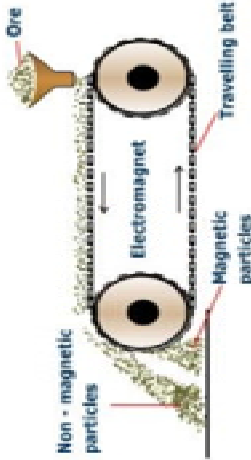
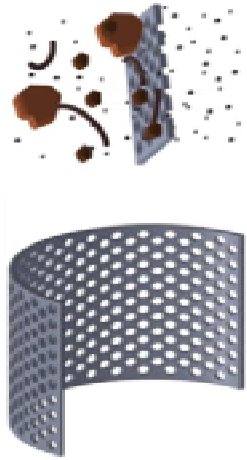
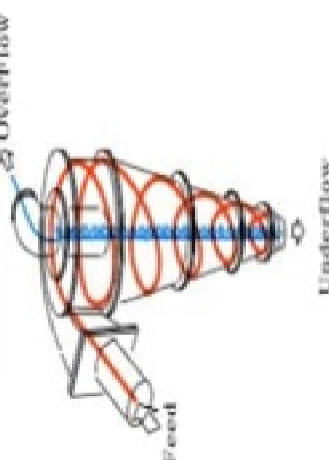


[그림. I-사-8] 국내외 오염퇴적물 처리기술 연구동향

(가) 오염퇴적물 입자분리 단계

- 오염퇴적물은 유기물, 영양염류, 유해화학물질 등을 함유하고 있으며, 오염물질은 큰 입자 (sand, gravel)에 비하여 작은 입자(silt, clay)에 강하게 흡착되어 있으므로 퇴적물 처리에서 입자분리 단계는 필수적인 공정으로 평가됨.
- 입자분리는 일반적으로 스크린, 사이클론, 자력선별 등 물리적인 방법을 이용하여 입자의 크기에 따라 선별할 수 있음. 협잡물과 모래이상의 입자는 스크린을 통해서 분리 가능하며, 미세입자(silt, clay)는 사이클론을 통해 분리함. 필요시 자력선별을 통해 금속성분 제거.
- 이러한 입자분리 공정들은 습식으로 진행되기 때문에 오염된 공정수가 발생하며, 후속처리가 반드시 필요함.

[표. I-사-6] 입자분리 방법 및 특징

분리 단계	원리	특징	적용성
Magnetic Separation		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 생황폐기물 소각바닥재의 급속 선별을 위해 3,800 G의 자력세기를 이용하여 원성분을 분리.</li> <li>· 미세입자의 급속성분을 제거하기 위해 12,000 G의 자력세기를 이용.</li> <li>· 건식분리법 75 <math>\mu\text{m}</math> 이상의 입자를 분리에 이용, 습식분리법은 다양한 크기를 갖는 물질의 분리에 이용.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 105 <math>\mu\text{m}</math>이하의 미세입자를 대상으로 고자력(12,000 G) 이용 자성산물의 분포율이 AS(26.3%), Cd(63.5%), Cu (83.9%), Ni(21.0%), Pb(38.6%)로 조사되었음.</li> <li>· R.A. Rikers, et(1997)는 HIMS를 이용하여 63~1000 <math>\mu\text{m}</math>의 오염된 도양에 적용하였을 때 Cu(83%), Cr(77%), Pb(46%), Zn(79%)의 처리효율을 보였음.</li> </ul>
Mechanical Screening		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 스크린의 공극 크기에 따라 헝점물, 모래 등 큰 입자 제거 가능</li> <li>· 미세입자 분리를 위해 후단처리로 반드시 Hydrodynamic Classification (사이클론) 설치.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Trommel스크린(50 mm), 탈수스크린(1~50 mm), 진동탈수스크린(20 mm망→ 8 mm 망에 의한 선별), 탈수스크린(3 mm)을 이용</li> <li>· 이(2011)는 세척선별시스템에서 4.5 mm이하의 크기로 분리하였음.</li> </ul>
Hydrodynamic Classification		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 일반적으로 pressure: 0~4 bar, flow rate: 0~200 L/min.</li> <li>· Impoundment Basin: 20 <math>\mu\text{m}</math>~30 <math>\mu\text{m}</math>로 10 <math>\mu\text{m}</math> 이하는 화하응집 필요.</li> <li>· Hydraulic Classifier: 74 <math>\mu\text{m}</math>~149 <math>\mu\text{m}</math>, 고행물 농도가 높은 것에 적용.</li> <li>· 사이클론 : 미립자의 분리가 가능, 고행물 농도가 10~20%인 경우 불가능.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 직렬 연결된 사이클론(1 차 1 mm 이상, 2 차 0.02 mm)를 이용.</li> <li>· 김(2001)은 3, 7%의 유입고형물 농도, 1.0 kg/cm<sup>2</sup>압력 이상에서 90%이상의 분리효율을 얻었음.</li> <li>· 이(2011)는 사이클론을 이용하여 0.63 <math>\mu\text{m}</math>의 피적물을 분리하였음.</li> <li>· 0.075 mm이상(사질토)과 0.075 mm이하(미세토)로 분리하였음.</li> </ul>

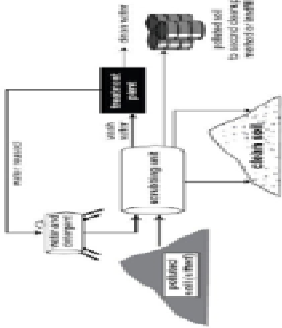



---

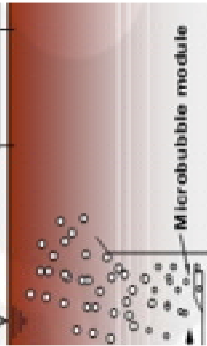
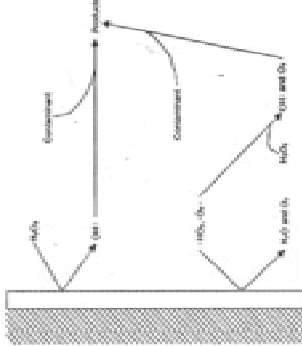
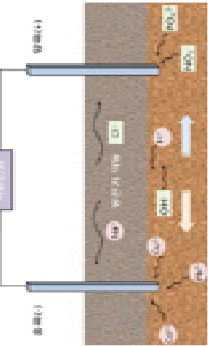

### (나) 오염퇴적물 (중간)처리 단계

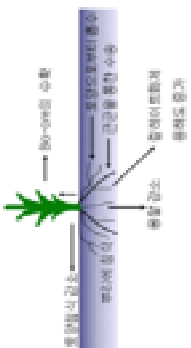

- 오염퇴적물 처리기술은 물리·화학적, 생물학적, 열적 처리방법으로 크게 구분됨. 생물학적 처리의 경우 오염농도, 수심, 처리시간, 처리효율 면에서 거리가 있으며, 열적 처리는 고농도 오염에서도 높은 제거효율을 나타내지만 수분함량이 많을수록 처리효율은 감소되고, 2차 오염물질 발생 및 고에너지 소모로 인해 원위치 처리방법으로는 적합하지 않음.
- 세척(washing)공정은 난분해성 유기물 및 중금속으로 오염된 퇴적물을 처리할 수 있는 방법으로서 처리시간이 짧고 오염물질의 제거효율이 좋음.
- 세척공정은 퇴적물의 입경별로 #20-40(425~850  $\mu\text{m}$ )의 58%, #40-60(250~425  $\mu\text{m}$ )은 49%, #60-100(150~250  $\mu\text{m}$ )은 29%의 오염물질 제거효율을 보여 입경이 작을수록 처리효율이 감소됨.
- 세척 시 첨가되는 세척제의 특성( $\text{H}_3\text{PO}_4$ 의 경우  $\text{As} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn}$ 의 순으로 중금속이 용출되고,  $\text{HCl}$ 의 경우  $\text{Cd}$ 제거율은 높은 반면  $\text{As}$ 의 제거율이 낮음)에 따라 대상물질, 제거효율 다름.
- 부상(flotation)은 장치가 간단하여 공간을 줄일 수 있는 장점과, 미세기포를 이용하여 미세입자(silt 및 clay)에 대해서도 분리능이 있음.
- Bubble 생성량은 압력에 비례하지 않는 특징을 가지고 있고, Flotation은 단독공정보다는  $\text{H}_2\text{O}_2$ 와 같은 산화제와 복합적으로 사용할 시 TPH와 같은 난분해성 물질에 대한 제거효율이 증가함.
- 산화(oxidation)공정은 펜톤 및 오존 등의 강력한 산화력을 바탕으로 난분해성 유기물질을 빠른 시간에 제거 가능 하지만, 과량의 슬러지발생이라는 문제점을 가지고 있음.
- 최근 연구되고 있는 동전기법은 입자사이가 작은 clay성 토양에서 효율이 증가하고 전압 2.5 mA일 때 styrene의 제거율이 37.2%에서 1.0%  $\text{H}_2\text{O}_2$  주입 시 53.2%의 제거율을 나타내는 등 복합공정에서 제거율이 상승하는 것으로 나타나고 있지만, 현재까지는 유류 및 중금속으로 오염된 토양처리에 시도되고 있음.

[표. 1-사-7] 오염토질 (중간)처리방법 및 특징

처리방법	원리	특징	적용성
<p>Washing</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>· #20-40(425~850 μm), #40-60(250~425 μm), #60-100(150~250 μm)로 입경이 작아질수록 오염물 제거효율을 감소.</li> <li>· 세척시간에 따른 제거효율은 30 분(40%), 60 분(43%), 90 분(47%)로 세척시간에는 민감하지 않음.</li> <li>· 세척액(HCl, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, EDTA)을 비교하였을 때 As의 제거에는 H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>가(88.16%) 효과적으로 나타남.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· HCl 200, 0.2 mM 일 때 중금속제거력은 Cr(75%, 46%), Zn(96%, 45%), Pb(91%, 3.5%)제거.</li> <li>· 미국의 Biogenesis사에서 세척공정을 이용하여 중금속 및 난분해성 유기물로 오염된 퇴적물 정화 적용.</li> <li>· H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>로 오염토양 처리 결과 TPH를 95%까지 제거.</li> </ul>
<p>Acid extraction</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>· HCl(0.05~0.5 M)을 이용하여 중금속 용출율은 As를 제외한 Cr, Zn등 대부분의 중금속이 80%이상 용출효과를 나타냄.</li> <li>· 7 가지 유기산(10 mM)을 24 시간동안 Cd, Cu와 교환, Cd는 EDTA-인산 혼합제(96.3%), Cu는 EDTA-붕산 혼합제(83%)에서 제거효율 높음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 카드뮴 오염토양 20 g에 EDTA(1~100 mM)를 첨가한 다음 24 시간 반응 후 카드뮴 제거효율이 1 mM에서 51%이고 10~100 mM에서는 90% 이상 제거.</li> <li>· H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>는 특히 As제거에 효과가 좋고, Cd는 0.5 M에서 70% 가까이 제거, Ni, Zn는 제거 효율 낮음 (150 rpm, 6 h).</li> </ul>

물리·화학적 처리

<p><b>Flotation</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 비표면적이 큰 silt 및 clay 입자의 소수성과 친수성의 차이를 이용하여 분리가능.</li> <li>· 초음파 주파수(15, 20 kHz) 60 분에 따른 TPH 제거율은 58%, 48%로 주파수가 낮을수록 효율 높음.</li> <li>· 3 kgf/cm<sup>2</sup>와 6 kgf/cm<sup>2</sup>에서의 40 μm 이하의 입자 발생률이 91%와 85%로 가압압력이 낮을수록 입경 40 μm 이하의 기포가 감소.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 2 L/min + 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>으로 TPH로 오염된 토양의 제거효율은 120 분 동안 47% 제거.</li> <li>· 공기유량 2 L/min + 15% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>에 30 분과 120 분일 때의 중금속 처리율(Zn : 39%, 57%), (Ni : 38%, 57%) 제거.</li> </ul>
<p><b>Oxidation (Fenton, Ozone)</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>· Fenton 반응 전 에탄올 주입 시 처리효율 증가.</li> <li>· Fenton 산화 시 산소의 생성량이 많을시 산화효율이 감소됨.</li> <li>· 오존발생물은 산소유량 0.5 L/min일 때 오존발생률 3.91%, 산소유량 2 L/min 일 때 오존발생률 2.62%로 산소유량과 오존발생률은 같이 증가되지 않음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 디젤 10000 mg/kg으로 오염된 토양에 과산화수소와 철의 비(1:0, 30:1, 15:1, 5:1, 1:1)에 서는 비율에 상관없이 과산화수소 주입 후 약 30 분내 모든 반응 거의 완료.</li> </ul>
<p><b>Electro kinetic</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 입자사이의 작은 clay성 토양에서 효율이 증가(투수계수 10<sup>-4</sup>~10<sup>-5</sup> cm/V sec).</li> <li>· 양이온중금속(Zn, Cu, Cd, Ni)은 제거가 가능하지만 음이온화합물(Hg, As, Cr)은 제거효율이 떨어짐.</li> <li>· 중금속(Cu, Zn)과 페놀 등시 처리 시 중금속보다 페놀이 먼저 분해되고 그 후 중금속이 제거됨.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 진류세기 2.5 mA, styrene의 제거효율은 37.2%, 1.0% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 첨가 시 제거율 53.2%로 향상, 10 mA + 1.0% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 일 때 제거율 72%로 증가.</li> <li>· 5.97 W/h, 950 h 후 As 43%제거(21)</li> <li>· 동전기와 미생물분해를 복합공정에서 200 mg/kg 의 phenanthrene으로 오염토양에 대해 1 주일 동안 137 mg/kg 제거.</li> </ul>
<p><b>Phytoremediation</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 식물의 종류에 따라 제거되는 오염원물질이 다름.</li> <li>· 식물의 뿌리에서만 정화가 일어나므로 오염물의 깊이가 중요한 고려요소임.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Zn(6,067 mg/kg), Cd(548 mg/kg)을 식물체 배를 이용하여 정화하는데 10~15 년 소요.</li> <li>· 콩과식물을 이용할 경우 50 cm 내외, 수목인 경우 2~3 m 이상의 범위 적용가능.</li> </ul>

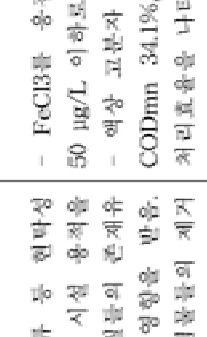
처리				
열처리	Thermal Description		<ul style="list-style-type: none"> <li>Rotary Dryer(300~600℃), Conveyor Furnace(300~400℃), Thermal Screw(130~260℃)의 적정 온도범위 가짐.</li> <li>60 분 동안 300℃를 유지할 경우 0.7 kW/hr, 50 0℃를 유지할 경우 1.8 kW/hr로 전력사용량 증가.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>300℃ 에서 30분 처리공정 후 98%이상의 처리효율을 가지므로 처리시간과 효율에 있어 좋음.</li> <li>함수율 30%와 10%의 토양의 TOC 제거효 율 비교, 300℃에서 함수율 30%인 토양이 함 수율 10%인 토양에 비해서 365.4%의 처리효 율 감소.</li> </ul>

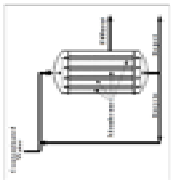
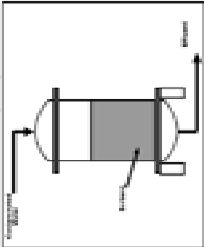
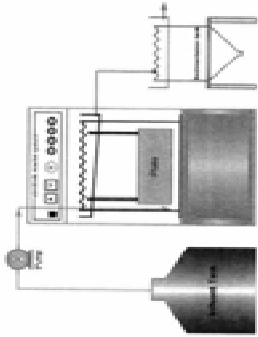
---


### (다) 공정수처리 단계

- 공정수는 오염퇴적물 처리 시 입자분리, 세척, 탈수 등 공정 전반에 걸쳐 발생 예상되는 폐수로 토양세척 및 토양수세공정의 폐수처리 방법을 포함하여 유사기술을 검토하였음.
- 처리방법은 물리화학적 처리와 생물학적 처리로 크게 구분할 수 있으며, 실증화 이상의 대규모 육상 토양처리시설의 경우 배출되는 폐수를 인근 폐수처리시설과 연계하거나 전처리를 조합하여 생물학적 처리방법을 적용하는 사례가 많음. 그러나 기존의 생물학적 처리방법을 원위치 상에서 구현하기에는 오염부하, 소요시간, 공간 등 제약사항이 많을 것으로 사료됨.
- 물리·화학적 처리방법으로는 응집·침전, 막 여과, 흡착, 이온교환법, 전기화학적법 등이 연구됨.
- 응집·침전법은 용해성 유, 무기물질과 중금속, 부유물질 등 여러 오염물질들을 동시에 다량 처리 가능. 지속적인 응집제의 투여가 필요하며 침전지, 여과 및 탈수 과정이 필요. 공간에 대한 고려 필요함.47,48)
- 가압 부상법은 유입농도에 영향을 받지 않고 안정적인 처리효율을 유지. 온도에 영향을 거의 받지 않으며 짧은 체류시간으로 안정화가 가능하며, 침전조가 필요 없음.
- 막 여과법을 사용할 경우 일정한 양질의 수질을 확보가 가능. 부지가 적게 사용되기 때문에 적용성이 높음. 그러나 해수의 염으로 인해 유발될 수 있는 문제점들과 막힘현상을 고려하여야 함.
- 흡착처리법은 오염물질들에 포함된 부유성 고형물, 유기물, 실리카 물질 등에 의해 흡착제 표면이 막힐 수 있고, 유량이 많은 상태에서는 오염물질의 흡착효과를 감소시킴.
- 전기응집/산화 공법은 다양한 종류의 유기물과 합성오염물질이 포함된 폐수처리에 적용. 기존의 물리화학적 처리방법에 비하여 간단. 저온조작, 빠른 반응속도, 고가 또는 유해한 산화제가 불필요한 장점이 있음. 소형화가 가능함. 또한 해수를 전해질로 사용할 수 있을 것으로 사료되나 검증이 필요함.

[표. I-사-8] 공정수처리 방법 및 특징

처리방법	원리	특징	적용
<p>응집침전</p>	 <p>응집침전법은 응집제를 이용해 용해성을 띠는 상용액 내의 대량오염물질을 불용해성의 고체로 응집하여 제거하는 방법.</p>	<p>유, 무기물질, 중금속, 박도, 조류 등 현탁성 물질 제거에 유효함. 속도가 빨라 시설 용적을 적게 필요로 함. pH, 다른 오염물질들의 존재유무, 오염중금속의 원자기에 의해 영향 받음. 응집제의 종류에 따라 다양한 오염물질의 제거가 가능. 침전지 및 고형물의 탈수, 여과과정이 필요함.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- FeCl<sub>3</sub>를 응집제로 이용하여 arsenic의 양을 50 µg/L 이하로 줄임.</li> <li>- 액상 고분자 양이온 응집제를 주입하여 처리, CODmn 34.1%, SS 93.8%, n-hexane 81.0%의 처리효율을 나타냄.</li> <li>- 응집제는 7% 황산알림을 사용, Al은 95%, Fe 98%, Mn는 98%이상의 처리효율을 보임.</li> </ul>
<p>가압부상</p>	<p>가압된 공기포 포화시킨 가압수를 대기압 상에서의 부상조로 방출시켜 가압상태에서 용존된 미세기포를 방출시켜 수중의 오염물질입자를 기포에 부착, 부상시킨.</p>	<p>BOD, SS, COD, 스킵, 오일, 그리스, 등의 부유고형물을 효율적으로 제거 가능. 유입 농도에 영향을 받지 않고 안정적임 처리효율을 유지할 수 있고 온도에 영향을 거의 받지 않으며 짧은 체류시간으로 안정화에 많은 시간을 소요하지 않음. 운영비 및 동력비가 크고 높은 박도는 처리가 어려움. 침전조가 필요 없음. 응집·침전에 비해 부지소요면적이 적으며 효율이 높으나 원수의 성질에 따라 처리효율이 달라짐.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DAF 공정을 이용한 토양세척수 재이용 시스템에서 SS는 98.17%, CODMn은 66.13%, T-N은 76.00%, T-P 62.46%, n-Hexane물질은 81.54%, ABS 3.47%의 제거율을 보임.</li> <li>- 약산성에서 중성 범위일 때 가압부상 시 TPH, SS의 제거율이 높음.</li> </ul>

<p>막여과분리</p>	 <p>막여과 분리공정은 서로 다른 두 상 사이에 위치하는 막이 양을 교환, 및 조절함.</p>	<p>멤브레인은 분자량, 멤브레인을 통과하는 입자의 크기, 압력조건에 따라 분류됨. 또한 pH와 온도 역시 영향을 받음. 막 여과법을 사용화 할 경우 자동화가 가능하며 일정한 양질의 수질을 확보가 가능함.</p>	<p>- EDTA와 금속이 함유된 포양세척폐수를 MEUF를 사용하여 처리. Cd, Cu, Pb, Zn의 제거효율은 92~95%로 나타남.</p> <p>- NF membrane, 전기화학적 cell을 이용 세척액으로 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-NaCl 사용 시 Pb, Mn, Cu 모두 97%제거, HCl 사용 시, Pb 88%, Cu 64%, Cu 93%가 제거.</p>
<p>흡착처리</p>	 <p>흡착처리법에서 오염물질들은 흡착제 표면에 농축되면서 용액으로부터 대부분 제거.</p>	<p>활성탄, 활성알루미늄 등이 주로 사용. 폐수로부터 금속 또는 유기오염물질을 제거하는데 널리 사용. 폐수에 존재하는 부유성 고형물, 유기물, 실리카 물질 등에 의해 흡착제 표면이 막힐 수 있고 흡착제의 효율을 낮이기 위해서는 적절한 pH를 맞추는 것이 중요. 유량증가로 인한 흡착효과가 줄어듦.</p>	<p>- 포양세척법으로 처리하고 나온 폐수를 처리, 흡착제로 montmorillonite를 사용. As, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn 90%이상, Ni 75% 제거.</p>
<p>전기화학</p>	 <p>전기분해, 응집, 산화 등이 일어나 유·무기물 및 중금속 제거.</p>	<p>저온조각, 빠른 반응속도, 고가 또는 유해한 산화제 불필요 등의 장점. 생물학적 처리방법에 비교해 처리 시간이 빠르며 소형화가 가능하고, 부수적으로 살균효과도 기대 할 수 있음. 전기 분해시 양극에서 강력한 산화력을 지닌 산소, 염소가 생성, 유기물을 산화하고, 금속의 경우 용출, 산화, 피막형성, 금속의 부동태화 등 여러 반응이 일어남. 음극에서 생성된 수소에 의해 유기물질의 부상, 유기물질이 환원됨. 금속이온이 존재한다면 석출 됨.</p>	<p>- EAOP공정을 이용하여 처리한 연구를 보면 60분의 반응 시간 후, 25 mA cm<sup>-2</sup> 의 조건에서 Pb와 EDTA는 99%, Zn은 92%, Ca는 90%가 제거</p> <p>- 염화물에 강한 DSE(Dimensionally stable electrodes, Ru-Ir-Coated Platinum)를 전극으로 사용. 무극막 시스템의 경우에서 155.6A/m<sup>2</sup>의 전류밀도에서 체류시간 100초 동안 암모니아 제거율 95%, 격막 시스템의 경우 100초 동안 98%의 제거효율을 보임.</p>

<p>생물학적 처리</p>	<p>회전원판</p>	 <p>회전원판의 미생물막과 폐수를 접촉시켜 처리, 보통 면적의 40%가 물에 잠기도록 함.</p>	<p>공정이 비교적 간단하며, 운전비용이 적으며, 표면적이 넓어 짧은 접촉시간이 필요. 슬러지발생량도 적음. 생물학적 처리이기 때문에 온도, pH, 폐수의 농도, 유량 등 다양한 인자를 고려해야함. 공경수의 질소, 인 제거에 적합할 것으로 보임.</p>	<p>- 용집을 위해 적어도 100g/m<sup>3</sup>의 철염(FeClSO<sub>4</sub>)을 주입, 응집 보조제로 anionic을 사용. Trickling Filter를 이용하여 암모늄 이온들을 제거, 회전원판을 이용하여 암모늄 이온들을 제거. 장급속의 경우 60~90%, 암모늄 이온의 경우 78~85%의 제거.</p>
----------------	-------------	--	---	---



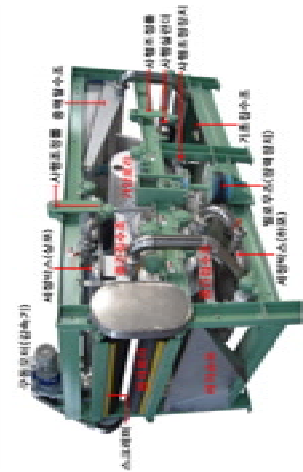


---

### (라) 탈수 단계

- 입자분리 단계, 퇴적물처리 단계 및 공정수처리 단계에서 배출되는 분리된 입자, 처리된 퇴적물, 공정 슬러지는 높은 함수량을 가지고 있어 2차오염 유발 우려가 있으며, 유효활용이나 최종처분을 위한 이송 등 후속적인 프로세스를 위하여 탈수과정이 필연적으로 요구됨.
- 토양/퇴적물 정화 공정에 사용되는 퇴적물 탈수방법을 중심으로 살펴본 결과, 원심분리기, Filter Press, Belt Press를 주로 이용하는 것으로 조사됨.
- 탈수보조제 주입장치를 포함한 진공벨트필터(Vacuum Belt Filter)를 이용하여 미세토 (<0.075 mm 이하) 탈수 시도.
- 원심분리장치를 이용하여 0.02~1 mm를 포함한 슬러지를 함수율 44%로 탈수하였고 Filter Press를 이용하여 농축된 슬러지를 탈수하여 처리.
- Biogenesis는 원심분리를 이용하여 정화된 오염토양을 탈수.
- METHA Plant에서는 Filter Press와 Belt Press를 이용하여 미세토를 처리함. METHA Plant에서 Silt의 처리를 위해 Screen Belt Press를 이용하여 48%의 함수율로 처리.

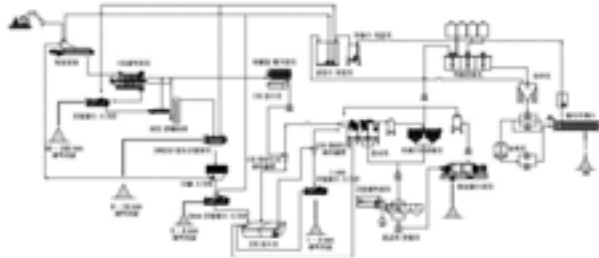
[표. 1-사-9] 탈수 방법 및 특징

처리방법	원리	일반적 특징	적용성
원심분리		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 원심력을 응용해서 고체와 액체, 또는 비중이 다른 액체를 분리시키는 방법.</li> <li>· 함유율: 70~80%.</li> <li>· 탈수속도: 1~90 m<sup>3</sup>/hr.</li> <li>· 95%~99%로 고형물 회수 가능.</li> <li>· 소요면적: 적음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 해양오염피해를 정화 후 60%의 함유율로 탈수하였음.</li> <li>· 함유율 44%를 포함하는 0.02mm~1mm입자를 분리하였음.</li> <li>· Biogenesis의 오염토양세척 System에 적용.</li> </ul>
Filter press		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 필터를 사용하여 높은 압력으로 원탁액 속에서 고체입자를 여과-분리하는 장치.</li> <li>· 함유율: 50~65%.</li> <li>· 탈수속도: 1~3.6 kg DS/m<sup>2</sup> hr.</li> <li>· 약 99%로 고형물 회수 가능.</li> <li>· 소요면적: 많음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· METHA Plant에서 분리된 Silt(63 μm)의 퇴적물 처리에 적용.</li> <li>· 공정수 처리를 위해 약품처리 후 농축된 슬러지를 탈수하기 위해 사용.</li> </ul>
Belt press		<ul style="list-style-type: none"> <li>· 준설토를 벨트(여과포) 사이에 넣고 압착하며, 롤러 사이를 거치면서 수분을 제거하는 원리.</li> <li>· 함유율: 70~80%.</li> <li>· 탈수속도: 100~200 kg DS/m<sup>2</sup> hr.</li> <li>· 90%~95%로 고형물 회수가능.</li> <li>· 소요면적: 적음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· METHA Plant에서 미세토를 Screen Belt Press를 이용하여 48%의 함유율로 처리.</li> </ul>

(마) 오염 토양/퇴적물 처리 시스템 주요 사례

① 국내 사례

- 중금속으로 오염된 토양을 처리하기 위해 pilot 규모의 토양세척설비를 구축하여 시간당 3 ton의 토양을 사이클론으로 입자분리 후 세척공정을 이용하여 처리함. 세척공정에서 발생된 폐수는 3가 철로 개질된 활성탄을 이용하여 처리 후 탈수하여 처리함.



[그림. I-사-9] 오염토양세척시스템 개략도

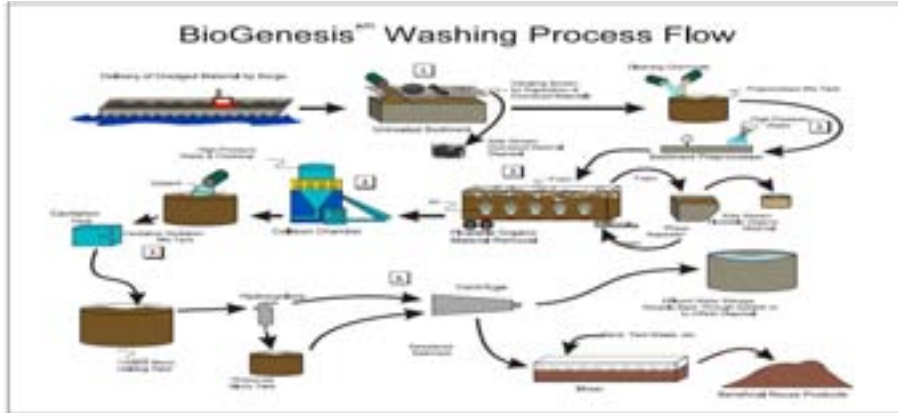
- 유류와 중금속으로 오염된 토양을 연속 입자선별을 거친 후 미세기포반응조에서 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 및 NaOH를 첨가하여 유류 및 중금속을 제거하고, 세척공정에서 발생된 폐수는 약품반응조, 침전조, 농축조로 구성된 폐수처리공정으로 유입되어 처리함. TPH는 약 90%, As의 경우 88%의 제거효율을 보임.
- 어장정화시험사업으로 전기분해/침전반응을 이용하여 오염된 퇴적물을 처리. 드럼스크린과 자력선별기, 원심분리기를 이용하여 중금속 및 자갈, 모래 등을 분리하고, 미세부유물질 및 폐수처리는 전기반응 침전분리공정을 통한 응집침전과 막여과공정(3~5 μm)을 통하여 최종 해양 배출함.



[그림. I-사-10] 여수시 정화시험사업 설정화장치

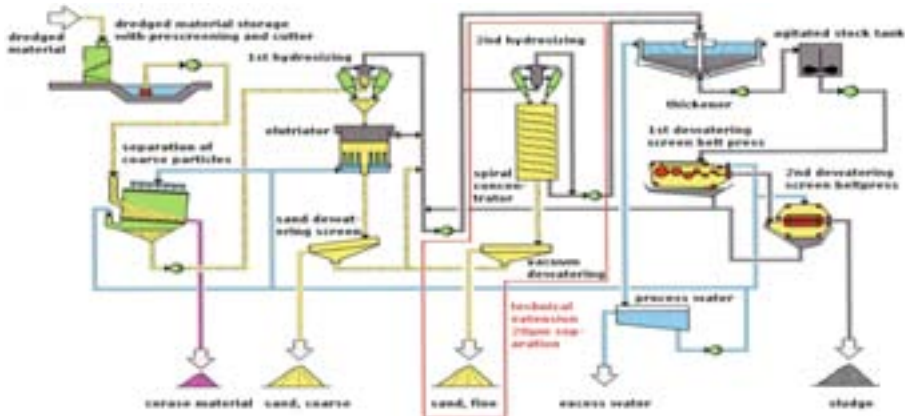
② 국외 사례

- 미국 Biogenesis는 New York 등지에서 중금속, PAHs, PCBs, Dioxin 등으로 오염된 토양을 시간당 15 m<sup>3</sup> 처리하는 플랜트 운영. 유입된 퇴적물은 계면활성제 및 세척제와 혼합하고, Collision Chamber에서 Cavitation/Oxidation의 반응을 이용하여 퇴적물 입자에 붙어있는 오염물질을 분리/산화시켜 처리함. 공정에서 발생된 폐수는 Sand Filter와 Carbon Filter에서 미세입자를 제거함.



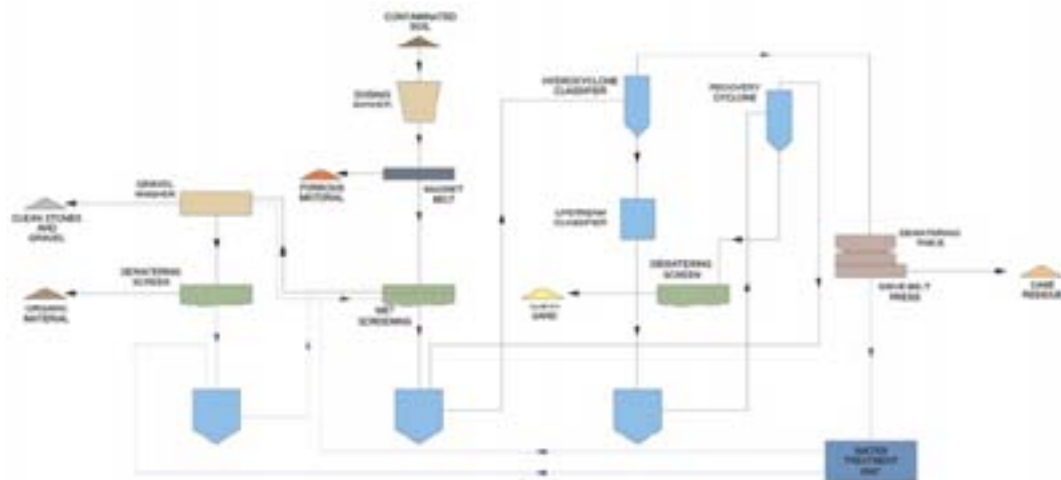
[그림. I-사-11] 미국 Biogenesis 사례

- METHA Plant는 항로의 유지준설을 위해 매년 600,000 ton의 퇴적물을 세척공정을 이용하여 처리하는 공정으로 Bar-Screen과 Rotary Screen을 이용하여 입자분리하고, 사이클론을 이용하여 부유물질들을 제거함. 공정수는 SARA Plant에서 철염( $Fe \cdot ClSO_4$ )과 생물학적 처리를 이용하여 중금속(60~90%), 암모늄 이온(75~85%)의 처리효율을 냄.



[그림. I-사-12] 독일 METHA Plant 사례

- 벨기에의 DEME는 중금속 및 PAH로 오염된 토양을 스크린, 사이클론 및 세척공정을 이용하여 50~100 ton/hr의 규모로 처리하는 시스템으로 PAH: 80~90%, Mineral Oil: >90%, Cyanides: 65~75%, Heavy metals: 65~75%의 제거효율을 나타냄.



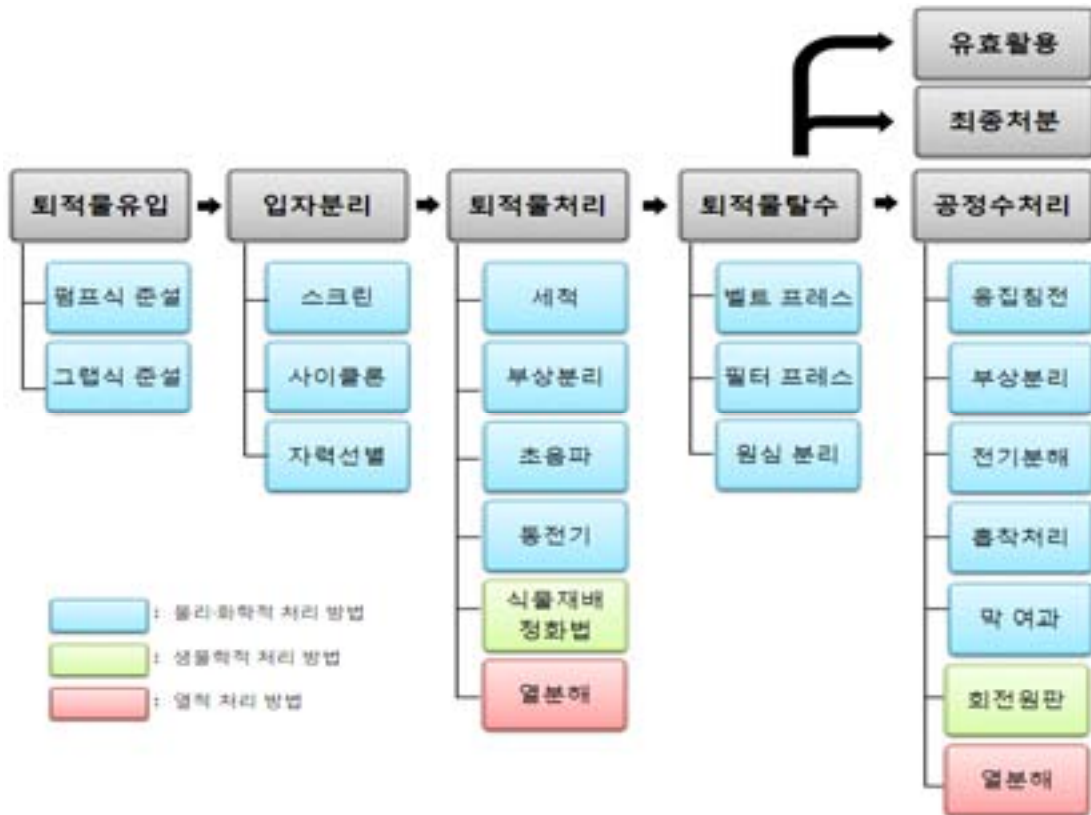
[그림. I-사-13] DEME 처리 시스템

[표. I-사-10] 오염 토양/퇴적물 처리 시스템 사례별 주요 제원

	국내			국외		
	환경부 (2012)14)	환경부 (2009)10)	여수시 시범 사업 (2008)68,71)	Biogenesis7 0,71)	DEC72)	M E T H A Plant3)
대상오염물질	중금속(토양)	TBH, 중금속(토양)	퇴적물	중금속, PAHs, PCBs, Dioxin(퇴적물)	PAH, Mineral Oil, 중금속(토양)	유기물, 영양염류, 중금속(퇴적물)
처리용량	3 ton/hr	15 m <sup>3</sup> /hr	-	15 m <sup>3</sup> /hr	50 ~ 100 ton/hr	70 ton/hr
입자분리	사이클론	스크린, 사이클론	스크린, 자력선별, 원심분리기	스크린(1/4 inch) 사이클론	스크린 사이클론	스크린, 사이클론(63 μm, 20 μm)
퇴적물(중간)처리	용출(인산 등)	미세기포 반응조(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , NaOH), 용출(황산)	-	세척, Cavitation/Oxidation	세척	세척, 가압부상, 농축
공정수처리	흡착(3가철로 개질된 활성탄)	중화, 응집침전	전기반응 침전분리막여과(3~5 μm)	응집후(alum, polymer) 흡착, 여과(활성탄필터투과)	폐수처리공정	응집 침전, 생물학적처리(Trickling Filter, RBC)
탈수	HVBF(진공을 이용한 미세토 정밀 탈수장치)	필터프레스	-	원심분리기	필터프레스	벨트프레스

(바) 해양오염퇴적물 처리 시스템 모듈화 기본 계획

- 해양오염퇴적물의 정화처리에 적용 가능한 기술들을 단계별로 구분, 해당 단위기술들을 검토하여 다음과 같이 모듈화 기본 계획을 작성하였음.



[그림. I-사-14] 해양오염퇴적물 처리단계별 단위기술

① 입자분리 모듈

- 스크린은 모래입자 이상 크기의 물질들을 선별하는 데에 사용할 수 있음. 해양 저서생물의 사체, 굴·패각 등으로 인한 공정설비의 고장 방지를 위해 스크린이 필요할 것으로 사료됨.
- 오염퇴적물은 미세입자에 오염도가 집중되어 있기 때문에 입자선별을 통하여 유효활용분과 처리대상을 구분함으로써 전체 공정에 걸리는 부하를 축소시키고 시간을 줄일 수 있음. 사이클론은 미세입자의 분리에 효율적인 대안임.
- 자력선별의 경우 오염토양정화에는 입자상 중금속 물질의 양이 적어 적용사례가 드므나 해양의 경우 선박으로부터 박리된 도료, 철판 등을 감안하여 자력선별의 도입을 검토할 필요가 있음.

② 퇴적물 (중간)처리 모듈

- 원위치상에서 구현되어야하는 현장처리기술임을 감안할 때 생물학적처리 및 열적처리 방법들은 공간, 시간, 수분함량 및 에너지 소모 측면에서 기술적인 제약이 있으므로 물리·화학적 단위기술들이 효율적일 것으로 판단됨.
- 모래, 자갈보다는 주로 실트, 점토 같은 미립자의 표면에 오염물질들이 흡착되어 있으므로 미립자의 표면에 붙어있는 오염물질들을 분리/제거하는 단위기술이 필요함. 세척, 부

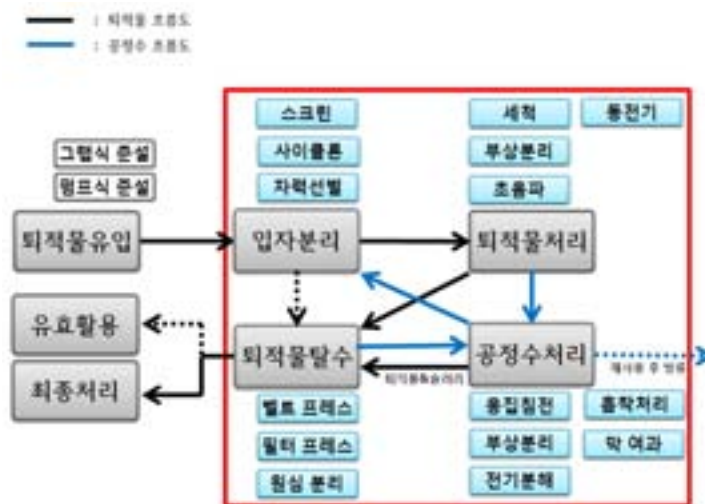
상분리, 산화 등의 물리·화학적 단위기술들이 있으며, 예를 들어 세척의 경우 세척제의 종류에 따라 유·무기물질, 중금속의 (복합)처리 및 제거효율에 차이가 있으므로 해역의 오염특성에 따라 각 단위기술들의 세부적인 검토 후 적합한 핵심단위기술(들)을 바탕으로 모듈구성이 이루어져야 함.

### ③ 공정수처리 모듈

- 공정수는 입자분리 단계, 퇴적물처리 단계, 탈수 단계에서 사용 후 배출되는 폐수로 적정 처리 후 우선적으로 각 공정에 재사용하거나 방류하게 됨.
- 퇴적물처리 모듈에서와 같은 논리로 물리·화학적 방법(가압부상, 응집침전, 막 여과, 전기분해 등)이 선호되나, 단위기술별로 약품투입, 공간구성(침전조 필요 여부), 선행 퇴적물처리기술과의 연계성 등에서 차이가 있으므로 모듈구성을 위해서는 해역 오염특성에 따른 단위기술별 적용성 검토가 선행되어야 함.

### ④ 탈수 모듈

- 입자분리, 퇴적물처리 및 공정수처리 단계에서 배출되는 분리된 입자, 처리된 퇴적물, 공정 슬러지는 높은 함수량을 가지고 있음. 2차오염 유발 방지, 유효활용이나 최종처분을 위해 탈수 모듈의 구성이 반드시 필요함.
- 오염 토양/퇴적물 정화 사례를 살펴보면 원심분리, Filter press, Belt press 등의 단위기술들이 주로 활용되고 있음. 탈수효율은 퇴적물의 특성, 수분함량, 사용되는 보조약품에 따라 달라질 수 있으므로 탈수 후 활용도나 최종처분 시 요구되는 수분함량 기준을 고려하여 단위기술의 선택이 이루어져야 함.



[그림. I-사-15] 해양오염퇴적물 현장처리 모듈 및 단위기술예시

## (4) 슬래그계 복토재 성능평가

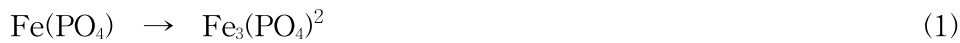
### (가) 국내외 관련 문헌 및 기술동향 조사

- 복토정화법(in-situ capping)은 오염된 퇴적층 위에 비오염 층을 설치함으로써 물리적, 화학적으로 퇴적물 내 오염물질이 주변 수체로 유입되는 것을 차단하는 방법
- 복토정화법은 복토층에 의한 오염물질의 화학적 흡착, 물리적 고립/차단, 생물교란 작용의 감소, 자연 회복의 촉진 등을 통해 퇴적층 내 오염물질의 수층 내 용출을 억제시킬 수 있

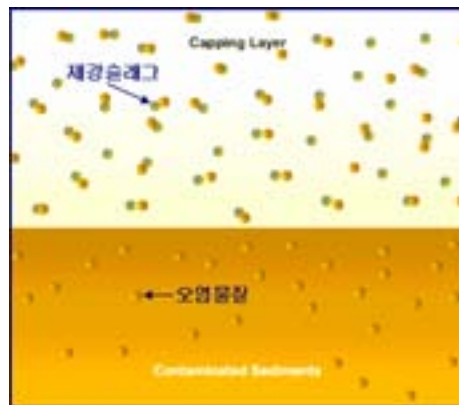
음. 따라서 복토정화법을 적용할 경우 오염퇴적층의 고립 및 주변수와의 반응 차단, 생물에 의한 교란 방지, 건강한 저서 생태계의 회복 등을 고려하며, 알려진 재료별 오염물질 제거 기능은 다음과 같음.

- Aquablok® ; 퇴적물로부터의 오염물질 확산 및 이류 유입 제어
- Zero-valent iron(Fe(0)) ; Dechlorination 및 중금속 환원 촉진
- Phosphate mineral(Apatite) ; 중금속 흡착 촉진
- Cokes ; 흡착 관련 반응 촉진
- BionSoil® ; 유기오염물질 분해 촉진
- Natural organic sorbent ; 흡착 관련 반응 촉진
- 전로 제강슬래그(BOFS) ; 인산염/황화수소 및 중금속 흡착 제거

○ 무산소 환경에 해당하는 폐쇄성 내만역과 오염된 내수면의 퇴적층 내에서 황화수소와 인산염은 다음과 같은 반응을 통해 주변 수역 내로 용출됨(K.Sugawara et al., 1957).



○ 제강슬래그 복토를 통해 슬래그 내의 Fe, Mn 등 금속 성분이 황화물을 형성하여 황화수소 용출을 억제시키게 되며(반응 (4)), 이어서 위의 반응 (3)이 일어나지 않게 되어 인산염의 수층 내 유입을 차단하게 됨.



[그림. I-사-16] 제강슬래그 복토정화법의 모식도

○ 제강슬래그의 경우 슬래그 내에 존재하는 칼슘 성분(Free CaO)이 수층 내 존재하는 인산염과 반응하여 다음과 같이 난용성의 수산화아파타이트(Hydroxy-Apatite)를 형성함. 따라서 이 반응을 통해 퇴적층으로부터 용출되는 인산염의 수층 용존 농도 증가를 억제할 수 있음.



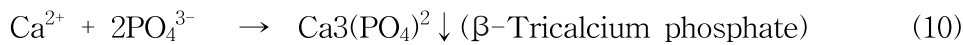
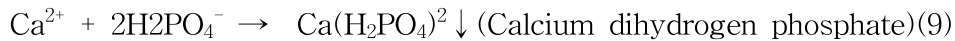
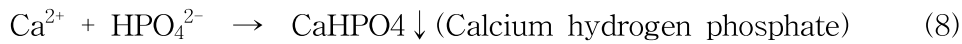
○ 제강슬래그 복토시 물리적 용출 억제 효과는 약 50 %, 흡착에 의한 제거 효과는 약 40 %, 그리고 화학적 반응에 의한 효과는 약 10 %로 추정됨 (H. Yamada et al., 1987).



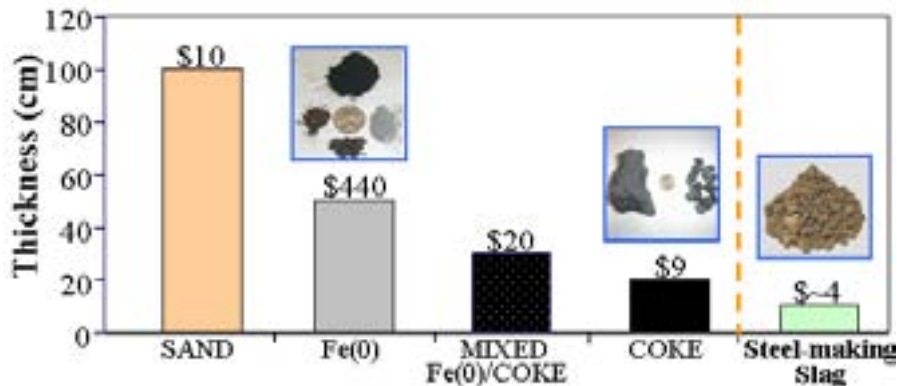
- 제강슬래그 복토에 의해 복토층 상부 저층수 중의 인산염과 황화수소는 다음 반응들을 통해서도 그 농도가 저감되는 것으로 설명할 수 있는데, 먼저 철 이온에 의한 인산염 제거는 다음을 통해 가능함.



- 또한, 위의 반응 (5)외에도 제강슬래그로부터 유리된 칼슘 이온은 아래의 반응들을 통해서도 인산염의 제거가 가능함.



- 다른 재료들과 비교할 때 제강슬래그는 복토 두께 10 cm 수준으로 그 투입량을 줄일 수 있어 재료비 및 시설비를 50% 가까이 절감 가능함. 또한, 생산 공정을 통해 적용 환경에 적합한 입도 선별이 가능하므로 일반 모래에 비해 품질 관리가 용이하고 범용적임

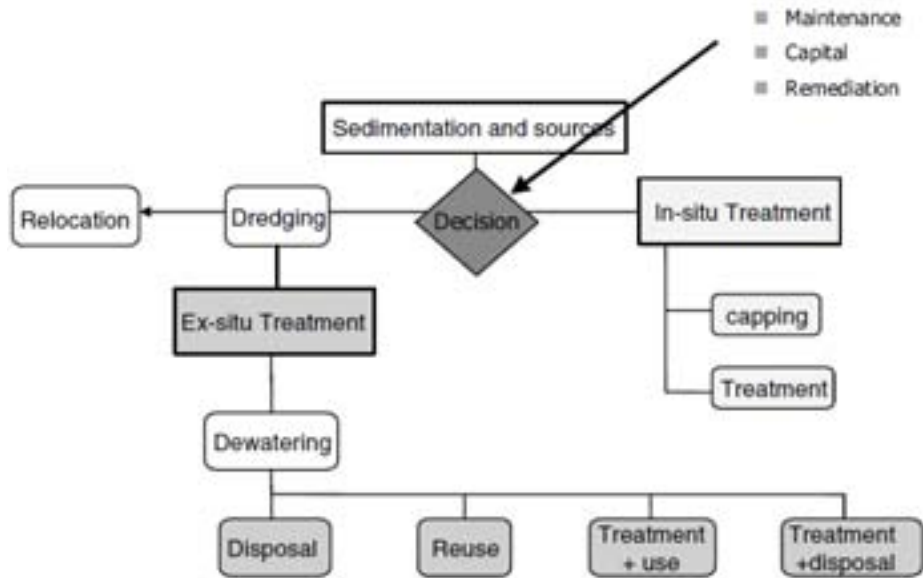


[그림. I-사-17] 복토정화법에 사용되는 반응성 재료들의 적용 두께 및 경제성 비교

- 유럽의 퇴적물 처리기술 현황 (Sediment and Dredged Material Treatment \_Synthesis of the Sed NetWork Package 4 Outcomes)

#### (나) Management options for dredging/treatment

- 현장 폐쇄처분(confined disposal) 방법은 경제성면에서 가장 유리하고, 제대로 시공되고 사후 관리된다면 환경적으로도 안전한 것으로 알려져 있으며, 특히 수중 폐쇄처분(subaquatic confined disposal)의 경우 일반적으로 육상 처리보다 비용 효율적인 것으로 평가됨



(다) Modified overview on available treatment chains

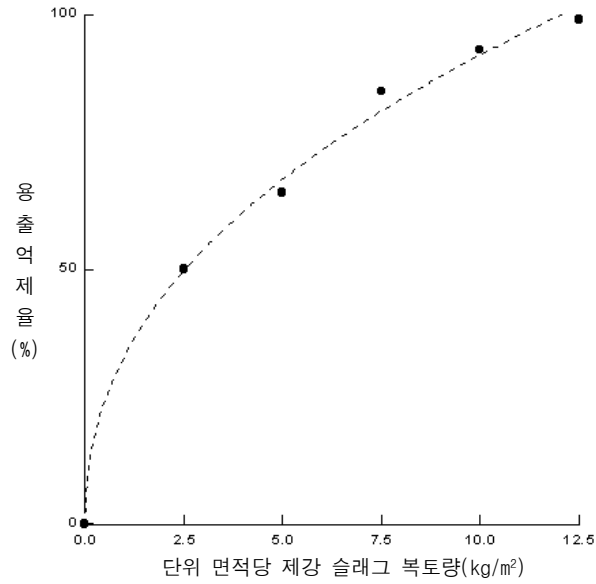
- 현재 생물/화학적인 처리를 통한 수중 폐쇄처분(subaquatic confined disposal) 기술이 연구개발 단계에 있으며, 아울러 육상 이송후 안정화 및 부가 공정을 통해 인공 골재나 건축용 재료 등으로 활용하는 고부가가치화 기술개발이 진행 중에 있음
- 국내 여건을 고려할 경우 해역에서 물리화학적 과정을 통한 수중 폐쇄처분 후 새로운 저서생태계를 조성하여 연안 생산성을 증대시키는 기술, 현장처리를 통해 바로 고부가가치 재료로 생산하는 기술 등을 본 연구의 stretch target으로 설정할 수 있을 것으로 판단됨

(라) 복토재 성능평가

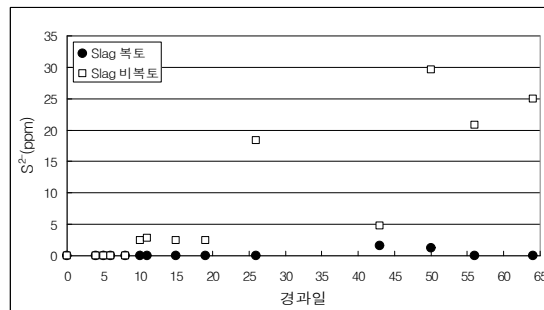
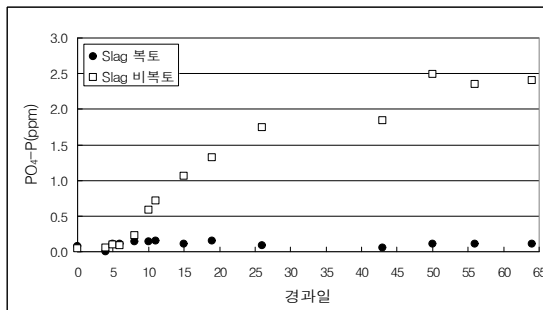
- 적정 입도 및 복토량 : 오염 정도에 따라 5~8 mm 이하 입도의 제강슬래그를 최소 1에서 7~8cm 두께로 복토

[표. I -사-11] 제강 슬래그 입도별 복토 후 최종 인 농도

대조구(퇴적물 미복토시)	실험구(제강슬래그 입도별)	
1.67	<1 mm	0.21
	1 - 5 mm	0.018
	5-10 mm	0.015
	10-20 mm	0.029
	>20 mm	0.042



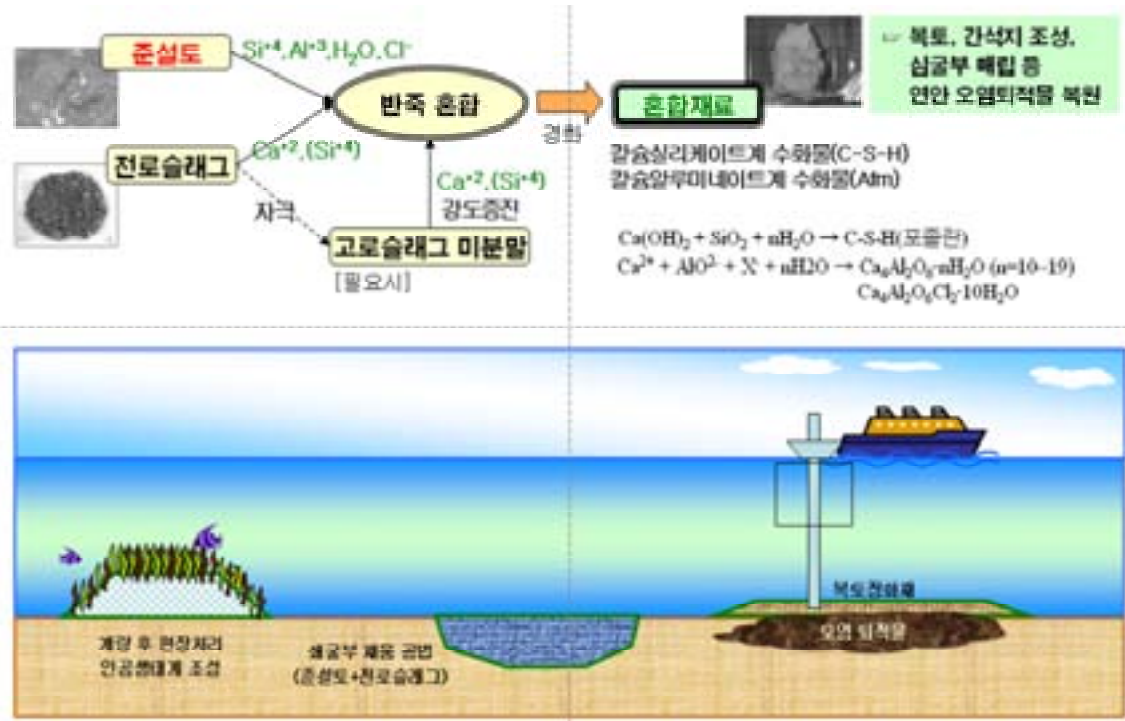
- 오염퇴적물 대상 철강슬래그 피복 정화 성능 평가 (Lab.) : 인산염 및 황화수소 용출 95% 이상 억제, 중금속 흡착제거능 확인



- 환경안전성 평가 (해양생물 영양단계별 독성평가) 결과 독성 영향 없음 : 박테리아, 식물 플랑크톤, 해조류, 로티퍼, 어류 등

① 현장처리 정화재 성능평가

- 준설토 현장 처리 기술 : 제강슬래그를 활용한 준설토 혼합 개량(현장처리)공법 (강도 향상, pH 저감, 인/황화수소/중금속 흡착 등)



- 준설토 대 제강슬래그 혼합비 : 겉보기체적으로 입도 5mm 이하의 제강슬래그 20~40% 대 준설토 80~60% 혼합 처리



- 준설토 및 제강슬래그 혼합 개량 (현장처리) 효과 평가 : 인산염 및 황화수소 용출 90% 이상 억제, pH 안정화, 전단강도 20 kN/m<sup>2</sup> 가능

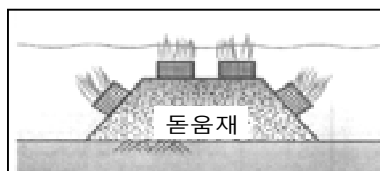
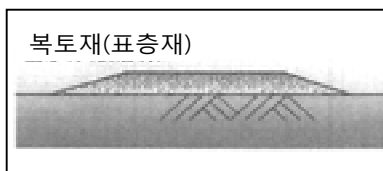


유해물질 용출 등 환경안전성 영향 없음

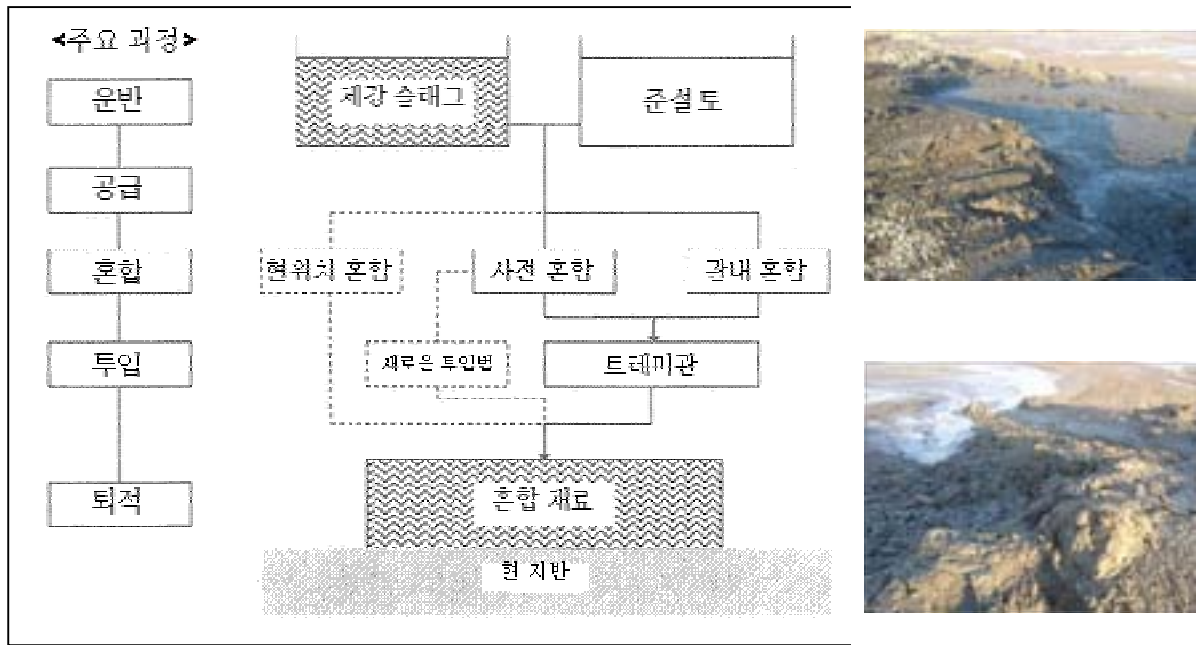
## ② Pilot 시험 최적엔지니어링 방안 도출

용도	엔지니어링요건
복토재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유해 물질의 용출량은 관리 기준 이하일 것</li> <li>• 주변 해수의 pH 상승을 기준값 이내로 억제할 것</li> <li>• 시공 시에 부유 물질로 인해 물이 탁해지는 것을 최소화 할 것</li> <li>• 표면은 저생 생물이 서식할 수 있는 정도의 경도를 상한으로 할 것 (전단 강도:20kN/m<sup>2</sup>정도)</li> <li>• 팽창으로 인한 영향의 유무를 검토할 것</li> </ul>
표층재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유해 물질의 용출량은 관리 기준 이하일 것</li> <li>• 주변 해수의 pH 상승을 기준값 이내로 억제할 것</li> <li>• 시공 시에 부유 물질로 인해 물이 탁해지는 것을 최소화 할 것</li> <li>• 표면은 저생 생물이 서식할 수 있는 정도의 경도를 상한으로 할 것 (전단 강도:20kN/m<sup>2</sup>정도)</li> <li>• 법면 구배는 혼합 재료를 시공할 때의 한계 경사각보다 완만하게 할 것</li> </ul>
해안 저지대 · 간석지 조성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유해 물질의 용출량은 관리 기준 이하일 것</li> <li>• 주변 해수의 pH 상승을 기준값 이내로 억제할 것</li> <li>• 시공 시에 부유 물질로 인해 물이 탁해지는 것을 최소화 할 것</li> <li>• 표면은 저생 생물이 서식할 수 있는 정도의 경도를 상한으로 할 것 (전단 강도:20kN/m<sup>2</sup>정도)</li> <li>• 팽창으로 인한 영향의 유무를 검토할 것</li> <li>• 성토부는 경사면의 안정을 확보할 수 있는 전단 강도를 가질 것</li> <li>• 법면 구배는 혼합 재료를 시공할 때의 한계 경사각보다 완만하게 할 것</li> </ul>
세굴 적지 · 뒤채움재	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 유해 물질의 용출량은 관리 기준 이하일 것</li> <li>• 주변 해수의 pH 상승을 기준값 이내로 억제할 것</li> <li>• 시공 시에 부유 물질로 인해 물이 탁해지는 것을 최소화 할 것</li> <li>• 직접적으로 해수에 접하는 경우 부착 생물 등이 서식할 수 있는 정도의 경도를 상한으로 할 것(전단 강도:20kN/m<sup>2</sup>정도)</li> <li>• 팽창으로 인한 영향의 유무를 검토할 것</li> <li>• 표층은 주변지반과 동일 강도로 하고, 국부적인 세굴 발생을 방지할 것</li> </ul>

### ㉠ 적용 이미지



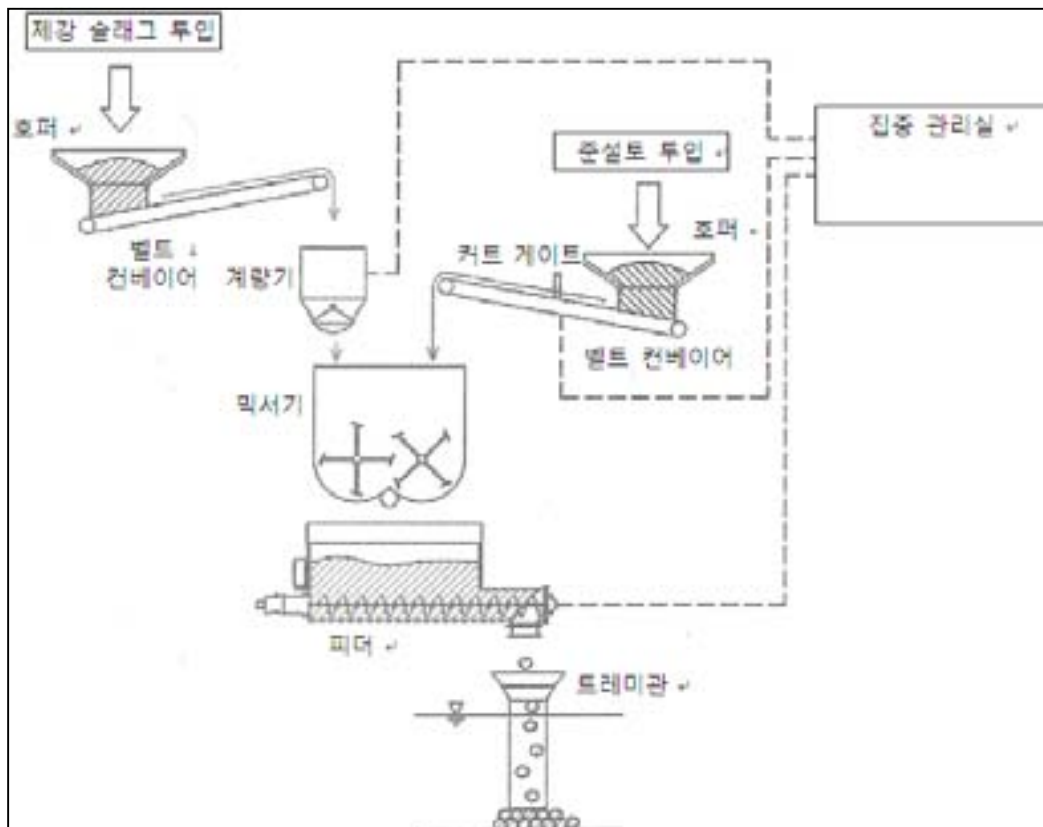
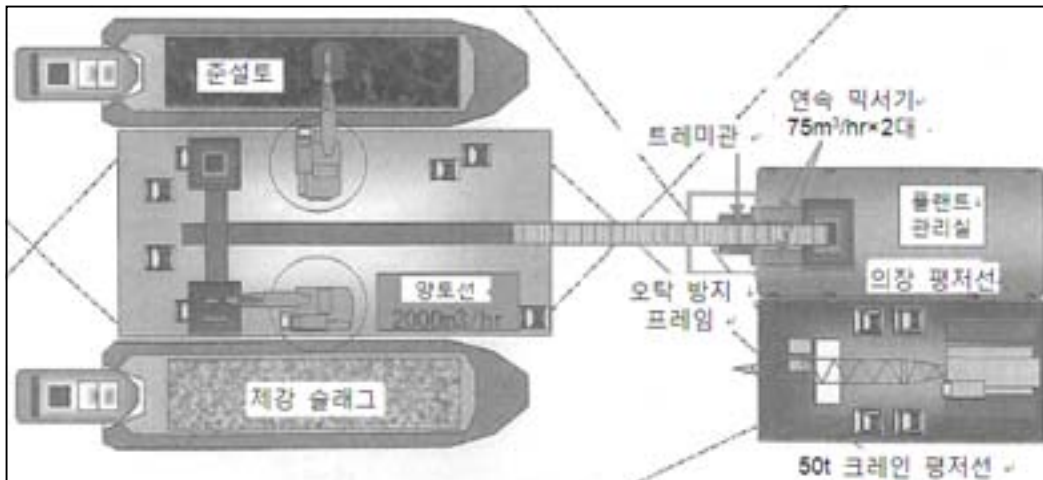
㉔ 현장 적용 Flow



혼합 과정	투입 과정	실해역 시공 기술 실시 예
① 바지선 내 교반 공법	(a) 직접 투입 공법	(1) 프리믹스 공법×트레미 투입 공법 (2) 프리믹스 공법×펌프 타설 공법 (3) 바지선 내 교반 공법×트레미 투입 공법 (4) 플랜트 혼합×트레미 투입 공법 (5) 트레미관 내 혼합 공법 (6) 원위치 혼합 공법
② 프리믹스 공법	(b) 트레미 투입 공법	
③ 관중 혼합 공법	(c) 펌프 타설 공법	
④ 트레미관 혼합 공법		
⑤ 원위치 혼합 공법		

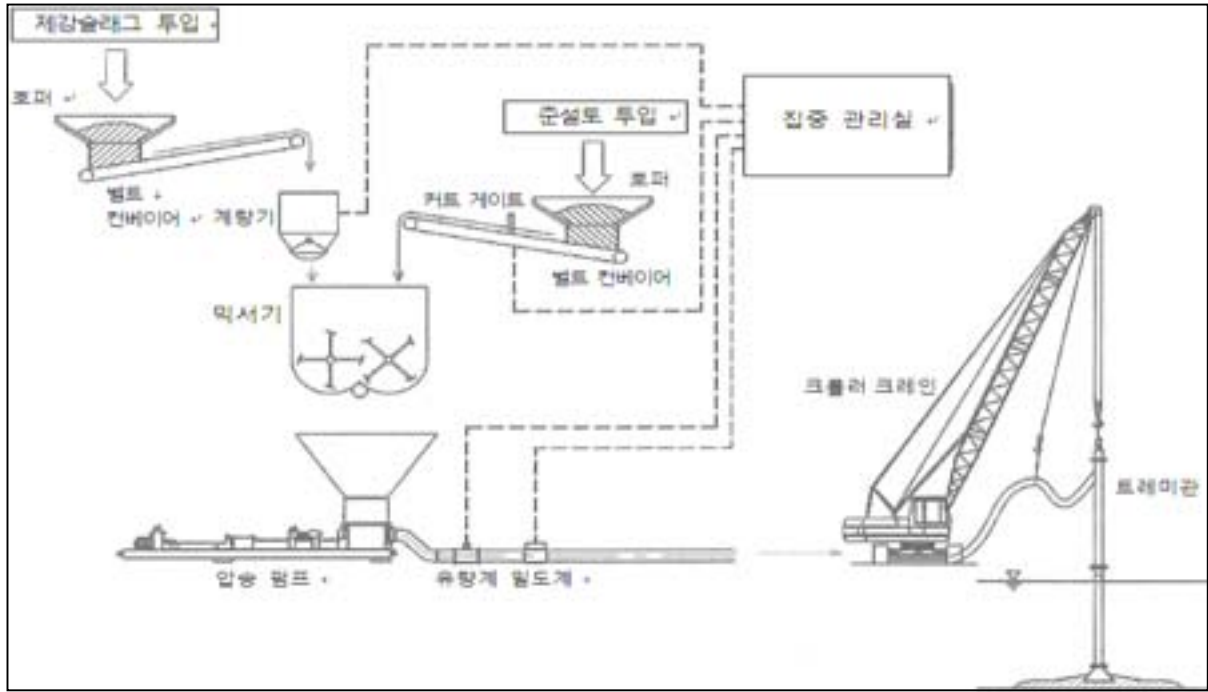
③ 프리믹스 공법 × 트레미 투입 공법

- 준설토와 전로계 제강슬래그를 작업선상 사전 혼합 플랜트에서 혼합한 뒤 연속적으로 혼합 재료를 만드는 공법
- 석재 운반선 등으로 운반한 준설토와 제강슬래그를 사전 혼합 플랜트의 각 호퍼에 공급한 뒤 계량해서 소정의 혼합비가 되도록 조정 후 기계식 믹서기에 재료를 넣고 강제적으로 교반·혼합해서 혼합 재료 생성
- 믹서기에서 혼합 시간을 조정함으로써 혼합 품질을 향상시킬 수 있음
- 시간당 혼합 재료 생성량은 믹서기 능력에 따라 결정되므로, 대규모 시공일 경우 시공 비용의 상승 가능성이 있음.



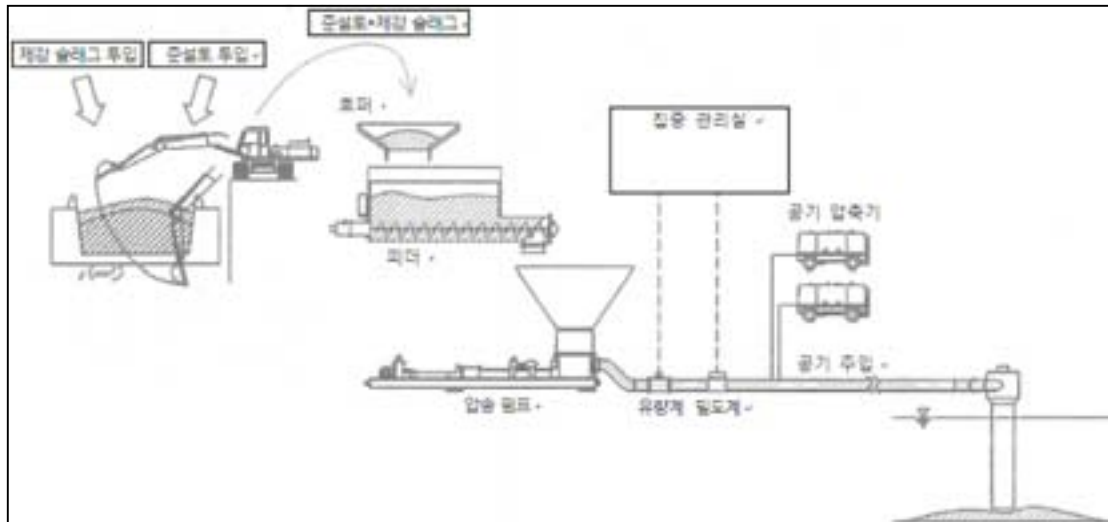
④ 프리믹스 공법 × 펌프 타설 공법

- 펌프 압송 방식은 강도 발현이 작고 분리성이 큰 혼합 재료에 적합하며, 구조물의 강도 기준값이 큰 경우에 적합

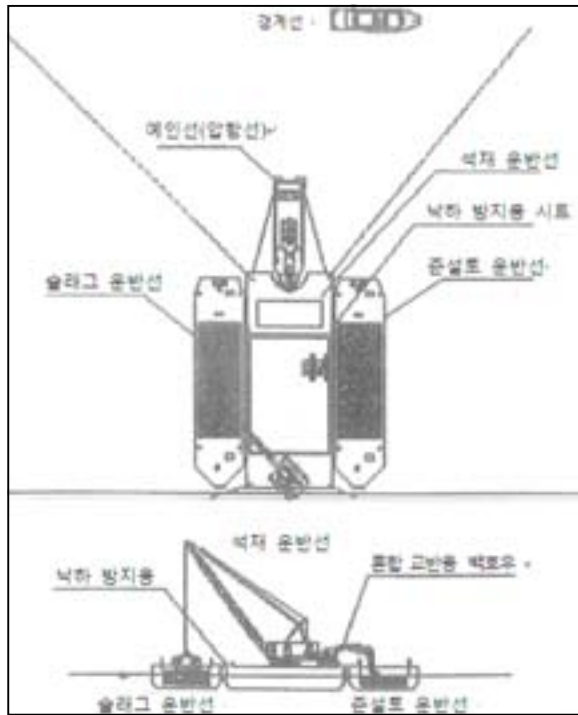


⑤ 바지선 내 교반 공법 × 트레미 투입 공법

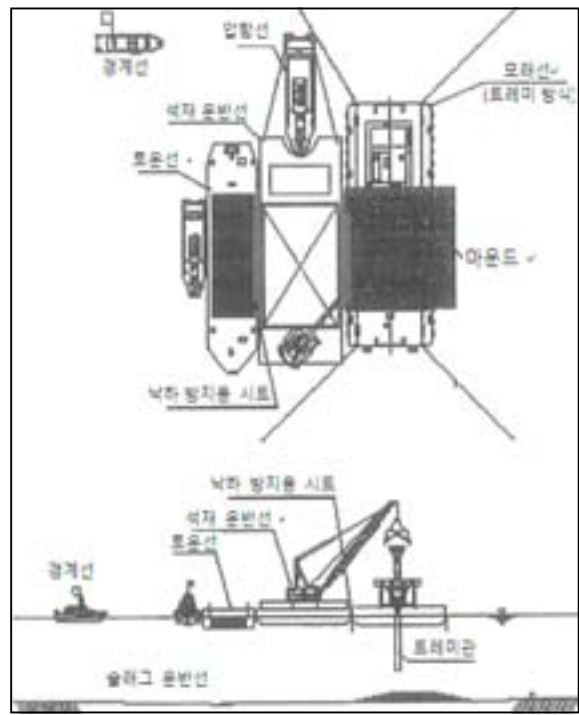
- 바지선 내 교반 공법은 바지선 내의 준설토에 전로계 제강 슬래그를 투입한 뒤, 백 호우로 교반·혼합해서 혼합 재료를 생성하는 공법
- 특별한 기술을 필요로 하지 않기 때문에 비교적 비용이 낮은 공법이지만, 프리믹스 공법에 비해 혼합 재료의 혼합 품질이 떨어진다는 점, 혼합 재료의 강도가 증가됨에 따라 작업성이 현저히 저하된다는 점에 유의해야 함







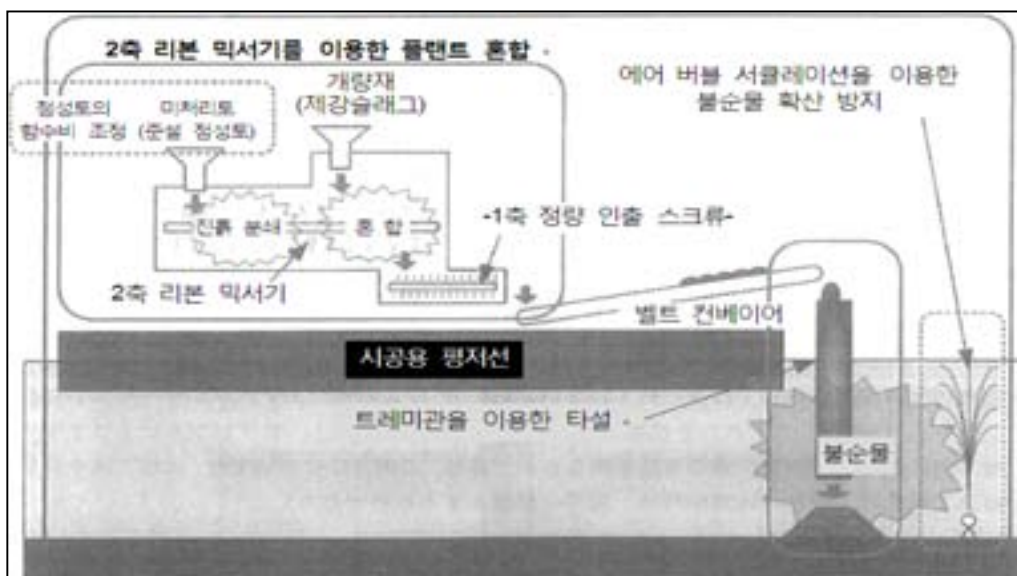
준설토 및 제강슬래그 교환 상황



혼합 재료 투입 상황

### ⑥ 플랜트 혼합 × 트레미 투입 공법

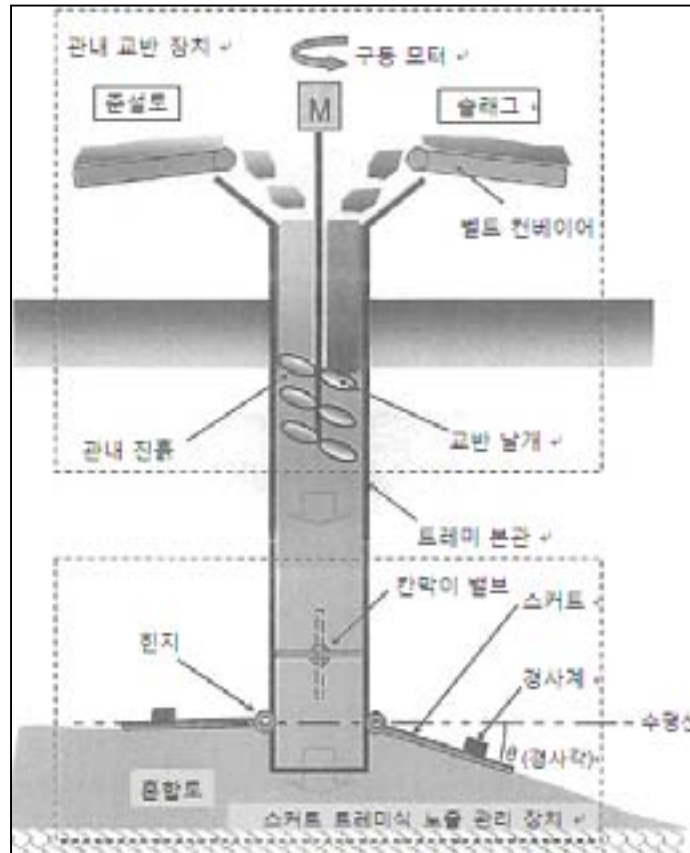
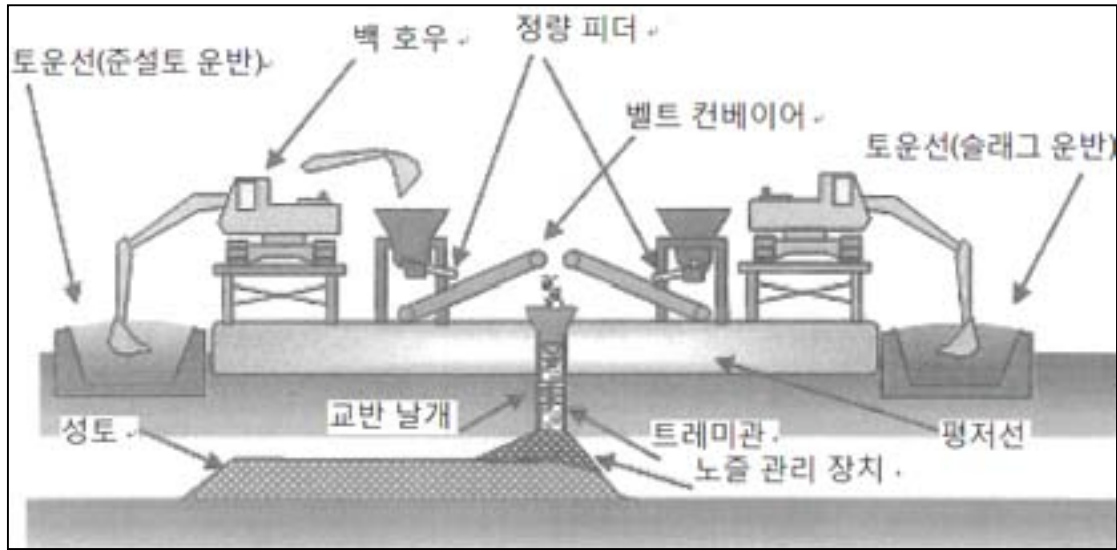
- 평저선에 장착한 플랜트식 2축 리본 믹서기로 준설토와 제강슬래그를 혼합한 뒤, 벨트 컨베이어로 반송하고 트레미를 이용해 해중에 투입해서 구조물을 구축하는 시스템
- 준설토는 플랜트 평저선에 접안한 바지선에서 백 호우로 인도하고, 제강슬래그도 접안한 석재 운반선에서 인도함



### ⑦ 트레미관 내 혼합 공법

- 트레미관 안에서 준설토와 제강슬래그를 혼합하는 연속식 혼합 투입 시스템
- 혼합 타설 장치는 수중 타설용 평저선에 현수되어 관 상부의 준설토와 슬래그 투입구, 준

설토와 슬래그를 혼합·교반하는 관내 교반 장치 부분, 칸막이 밸브, 트레미관 하단의 트레미관 노즐 관리 장치 등으로 구성

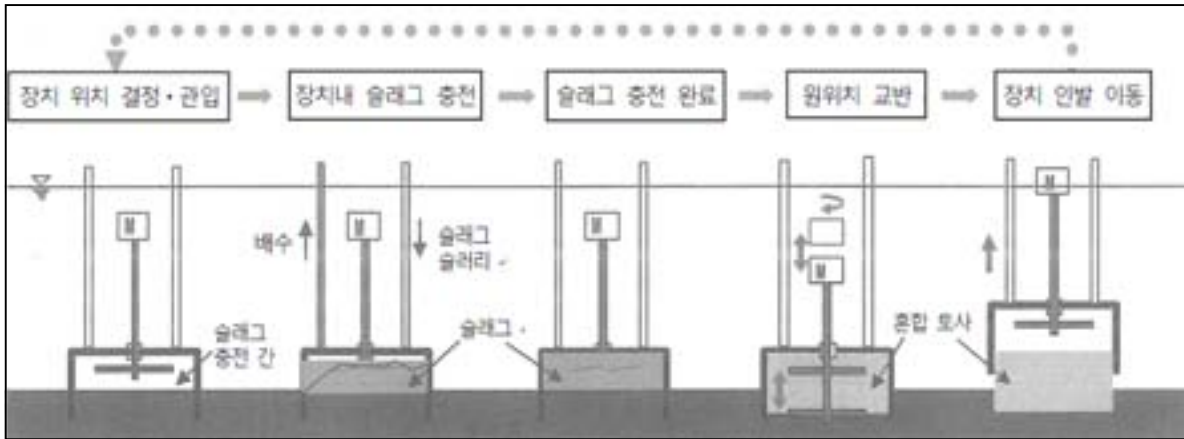


### ⑧ 원위치 혼합 공법

- 복토 시공 및 복토재와 현지 저질과의 혼합을 동시에 실시하는 새로운 복토 시공 방법으로, 준설토와 모래, 저질 개량재의 혼합을 목적으로 함
- 복토 교반 장치를 소정의 깊이까지 관입한 뒤에 제강슬래그를 슬러리 충전하고, 그 후에 현지 저질과 제강슬래그가 소정의 혼합비가 되도록 혼합

### ㉞ 특징점

- 슬래그 충전 및 퇴적물과의 혼합은 프레임에 둘러싸인 내부에서 실시하므로 시공 장소 주변 해수에 불순물 발생이 적음
- 프레임의 관입 깊이를 조정함으로써 슬래그 충전량을 정확하게 관리할 수 있음
- 교반장치의 스트로크를 조정해 퇴적물과 혼합 비율을 자유롭게 조정할 수 있음



### (5) 반응성 차단제

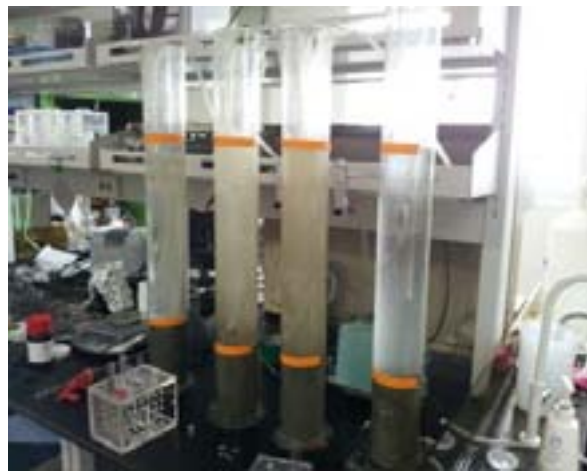
- 1차년도 연구개발은 연안저질에 함유된 오염물질의 재 용출에 의해 발생하는 연안해수의 수질 악화와 부영양화 현상을 완화시키기 위한 현장 차단기술과 관련된 것으로 오염된 연안저질을 반응성 물질(reactive material)로 복토(capping)하여 오염물질의 이동을 제한하는 것이 주 목표이다.

#### (가) 오염된 연안저질의 오염물질 분포형태 조사

- 오염된 연안저질의 오염물질 분포형태 조사를 위해 준설토 매립장 1곳(개발준설), 연안해역 2곳을 선정하여 강열감량, COD, T-N, T-P 분석을 실시하였다. 해양 퇴적물 채취는 반빈그랩을 이용하여 표층 해양 퇴적물을 채취하였으며, 채취한 퇴적시료는 해양공정시험법(국토해양부 2010)에 의거 분석하였다.

#### (나) 오염된 연안저질에서 질소 및 인의 용출에 미치는 영향조사

- 연안저질오염물질은 매우 안정된 상태로 외부요인의 간섭이 없는 상태에서 용출되는 오염물질의 농도는 매우 낮을 것으로 예상된다. 그러나 외부요인에 의해 안정된 상태의 연안저질이 부유할 경우 오염물질 용출 가능성은 증가하며, 주변 해역 환경에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 오염된 연안저질에서 오염물질의 용출에 미치는 영향조사를 위해 4개의 원통형 column(직경 10cm, 높이 100cm 유효용량: 6.3L)에 15cm두께의 인공 오염 저질(암모니아성 질소 25mg/L, 질산성질소 10mg/L, 인2.5mg/L)을 넣고, air lift 를 이용하여 각각 0, 5, 10, 25ml/min의 속도로 공기를 주입 했다.
- 운전기간은 총 5일이며, 1일 간격으로 해수시료를 채취하여 분석하였다. 채취한 해수시료는 해양환경공정시험방법(국토해양부 2010)에 의거하여 암모니아성 질소, 질산성질소, 총인항목을 분석하였다.



[그림. I-사-18] column 시험에서 air lift 사용 전(좌), air lift 사용 후(우)

(다) 반응성 차단제 개발

① 준설토의 흡착제 사용에 대한 적합성 평가

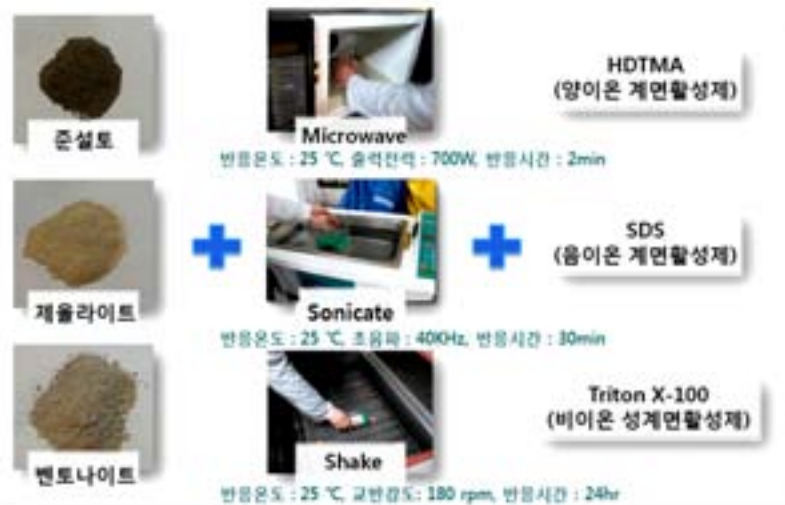
- 연안 준설토는 대부분 미세한 실트질로 구성되어 있으며, 오염물질의 흡착력이 크고 공극율이 낮아 오염물질의 차단제(흡착제)로 적합한 물질이다. 따라서 다양한 분야에서 흡착제로 연구되어지는 제올라이트, 벤토나이트와 준설토를 비교·분석하여 준설토의 사용 적합성을 판단하고자 한다.

[표. I-사-12] 부산항 인근 연안 준설토 성상

Testing method molecular formula	Busan dredged material
Percentage of sand [%]	18.40
Percentage of silt and clay [%]	81.60
Passing #200 sieve[%]	80.68

② 계면활성제의 종류 및 개질방법에 따른 준설토 표면개질연구

- 계면활성제를 이용하여 준설토의 표면특성을 변화시켜 선택적으로 오염물질 흡착능을 증가시킨다. 계면활성제란 한 분자 내에 친수성기(hydrophilic)와 소수성기(hydrophobic)를 동시에 갖는 양친매성 (amphipathic) 물질로 계면에 흡착하여 계면의 자유 에너지를 낮추어 계면의 성질을 현저히 변화시키는 물질을 말한다.
- 이러한 계면활성제를 준설토 표면에 흡착시켜 준설토가 가지는 치환능력을 향상시키고, 화학적 특성을 변화시킴으로서 반응성 차단제를 제작하고, 이를 이용해 제거대상 오염물질을 선택적으로 흡착시켜 안정화시키는 소기의 목적을 달성하고자 한다.
- 효율적인 반응성 차단제 제작을 위해 3가지 계면활성제(HDTMA, SDS, TX-100)을 3가지 개질방법(Microwave, Sonicate, Shaking 방법)으로 표면개질 하였다.
- 흡착된 계면활성제의 농도를 측정하기 위해 TOC 분석방법을 사용하였으며, 실험개요는 다음과 같다.



[그림. I-사-19] 반응성 차단제 개발을 위한 토양표면개질 연구개요

(라) 반응성 차단제의 오염물질 흡착능 평가

- 회분식 실험을 통해 해수에서 반응성 차단제의 질소 및 인의 흡착능을 평가하였다. 반응성 차단제의 흡착능 평가를 위해 HDTMA, SDS, TX-100을 이용하여 진탕법으로 표면개질한 반응성 차단제와 준설토(Non-modified dredging soil)를 준비하였다.
- 회분식 실험은 제작된 반응성 차단제와 해수를 1:20의 비율로 12시간동안 반응시켰으며, 반응온도는 15°C, 교반강도는 200rpm에서 실시하였다.



[그림. I-사-20] 반응성 차단제의 오염물질 흡착능 평가를 위한 연구개요

[표. I-사-13] 반응성 차단제의 흡착능 평가를 위한 오염물질 주입 농도

Component	Concentration (mg/L)
NH <sub>4</sub> -N	26
NO <sub>3</sub> -N	11
T-P	2.5

(마) 반응성 차단제의 차단효과 검증

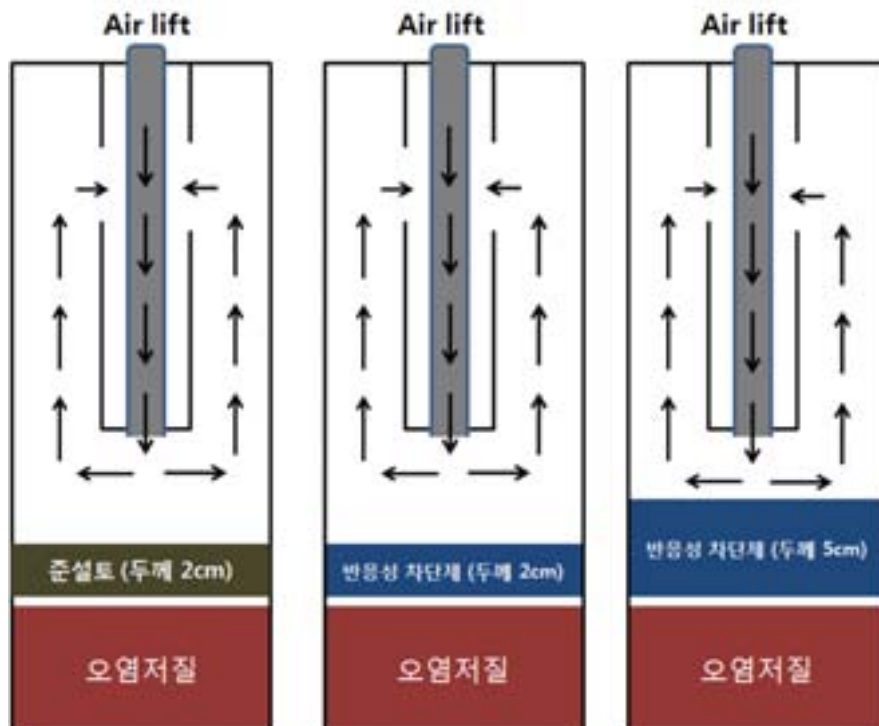
- 반응성 차단제의 오염물질 흡착능력을 평가한 결과는 양이온 계면활성제를 이용하여 표

면개질한 반응성차단제가 적조 유발오염물질(암모니아성 질소, 질산성 질소, 인)의 흡착 능력이 가장 우수하였다. 이러한 결과를 토대로 양이온계면활성제를 사용한 반응성 차단제의 차단효과를 검증하고, 반응성 차단제의 두께에 따른 차단효과를 알아보기 위해 다음과 같이 Column 시험을 실시하였다. column(직경 10cm, 높이 100cm 유효용량: 6.3L)에 15cm두께의 인공오염 저질(암모니아성 질소 25mg/L, 질산성질소 10mg/L, 인2.5mg/L)을 넣고, air lift 를 이용하여 10ml/min의 속도로 공기를 주입 했다.

- Column 1은 표면개질하지 않은 준설토(Non-modified dredging soil) 2cm, Column 2는 양이온 계면활성제로 표면개질한 반응성 차단제(Reactive barriers) 2cm, Column 3은 양이온 계면활성제로 표면개질한 반응성 차단제 5cm 를 복토하였다. 와류강도는 air lift를 이용하여 10ml/min 으로 고정하였다. 운전기간은 총 3일이며, 1일 간격으로 해수시료를 채취하여 분석하였다. 채취한 해수시료는 해양환경공정시험방법(국토해양부 2010)에 의거하여 암모니아성 질소, 질산성질소, 총인항목을 분석하였다.

[표. I -사-14] 반응성 차단제의 차단효과 평가를 위한 오염물질 주입 농도

Component	Concentration (mg/L)
NH <sub>4</sub> -N	25
NO <sub>3</sub> -N	10
T-P	2.5



[그림. I -사-21] 반응성 차단제의 차단효과 검증을 위한 Column 시험 개요

(바) 오염된 연안저질의 오염물질 분포형태 조사



준설토 매립장



여수 연안 인근



진해 연안 인근

[표. I-사-15] 준설토 매립장 분석결과

항목	결과
PH (at 25℃)	8.01
CEC (meq/100g)	15.29
COD (mg/kg)	12,981.82
T-N (mg/kg)	2.3
T-P (mg/kg)	0.86
강열감량 (%)	7.253

[표. I-사-16] 진해만 인근 연안저질 분석결과

항목	결과	중금속(mg/kg)	결과
강열감량 (%)	6.45	Cd	1.60
COD (mg/Kg)	21,670	Cr	114.11
TKN (mg/Kg)	8.23	Cu	51.42
NO <sub>2</sub> -N (mg/Kg)	0.45	Fe	48,398
NO <sub>3</sub> -N (mg/Kg)	2.78	Pb	35.3
T-P (mg/Kg)	1.7	Zn	159

[표. I-사-17] 여수항 인근 연안저질 분석결과

항목	결과	중금속(mg/Kg)	결과
강열감량 (%)	6.59	Cd	불검출
COD (mg/Kg)	23,200	Cr	50.094

TKN (mg/Kg)	10.64	Cu	9.445
NO <sub>2</sub> -N (mg/Kg)	0.45	Fe	25,690
NO <sub>3</sub> -N (mg/Kg)	6.78	Pb	36.046
T-P (mg/Kg)	1.2	Zn	불검출

- 오염된 연안저질의 오염물질 분포형태 조사를 위해 개발준설 준설토 매립장 1곳, 도시에 인접한 연안해역 2곳을 선정하여 강열감량, COD, T-N, T-P 분석을 실시하였다. 분석결과, 강열감량의 경우 인근 연안저질은 약 6.5%로 준설토 매립장의 7%와 비슷하지만, 연안저질의 COD 농도는 20,000ppm 이상이며, 준설토 매립장 COD는 12,000ppm 으로 큰 농도 차이를 보이고 있다.
- 총 질소의 경우 준설토 매립장의 경우 2.3ppm으로 상당히 낮은 질소 농도를 보이지만, 진해만과 여수항 인근연안저질은 각각 11.46, 18.68ppm으로 매립장 준설토에 비해 높은 질소농도를 나타냈다. 총인의 경우 지점에 따른 별 다른 차이를 보이지 않았다.
- 준설토 매립장에 비해 연안저질의 오염물질 농도가 높은 이유는 연안해역 주변 양식장과 더불어 인근도시에서 유입되는 점오염원 및 비점오염원에 의한 오염물 유입을 원인으로 보고 있으며, 저질오염농도는 주변환경의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

**(사) 오염된 연안저질에서 질소 및 인의 용출에 미치는 영향조사**

- Column 시험에서 해수의 와류강도에 따른 질소 및 인의 용출농도를 평가하였다. 실험결과, 해수의 와류강도가 증가할수록 부유사의 양은 증가하였으며, 5일후 부유한 부유사의 양은 각각 115.74, 254.52, 294.34, 590.48mg (0L/min, 5L/min, 10L/min, 25L/min)으로 와류강도가 증가함에 따라 부유사의 양도 증가하는 것을 볼 수 있었다.

**[표. I -사-18] Column 시험에서 와류강도에 따른 부유사 농도**

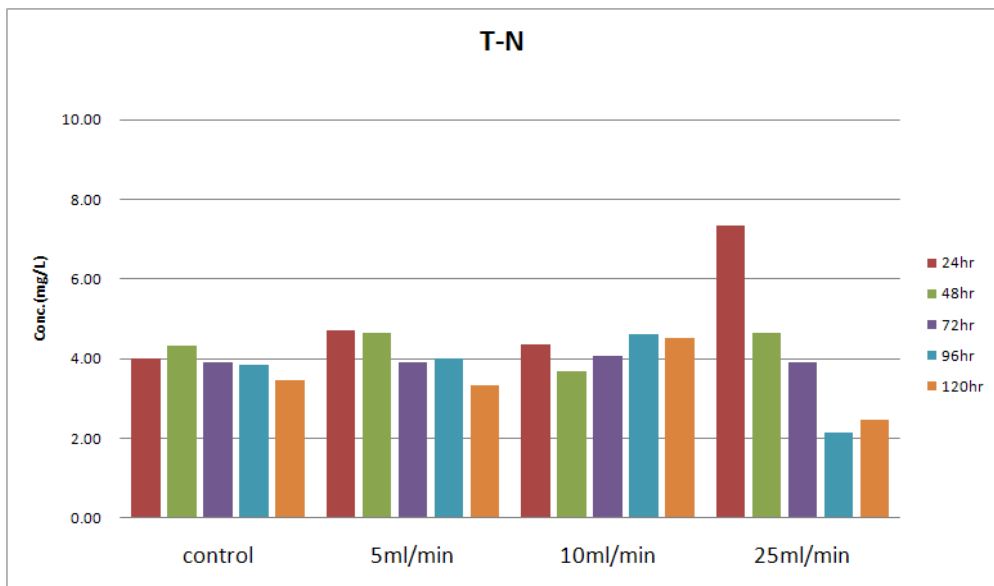
조건	72 hr (mg/L)	120 hr (mg/L)	부유한 흙의 양(mg)
0L/min	38.24	46.67	115.7416
5L/min	82.54	102.22	254.5278
10L/min	112.25	131.11	294.34195
25L/min	298.64	324.44	590.4808

- 오염저질에서 와류강도에 따른 질소의 용출 농도는 0ml/min(control), 5ml/min 10ml/min 조건에서는 질소의 용출농도가 약 4ppm으로 비슷한 용출경향을 나타내었다. 그러나 25ml/min 조건에서는 7.3ppm(반응시간 24hr)의 질소 용출이 일어났으며, 점차적으로 감소하였다. 이러한 결과는 25ml/min 이상(태풍 및 강한 조류가 존재하는 연안)조건에서 활발하게 질소의 용출현상이 일어나며, 특히, 강한 흐름이 시작되는 초기 급격하게 질소용

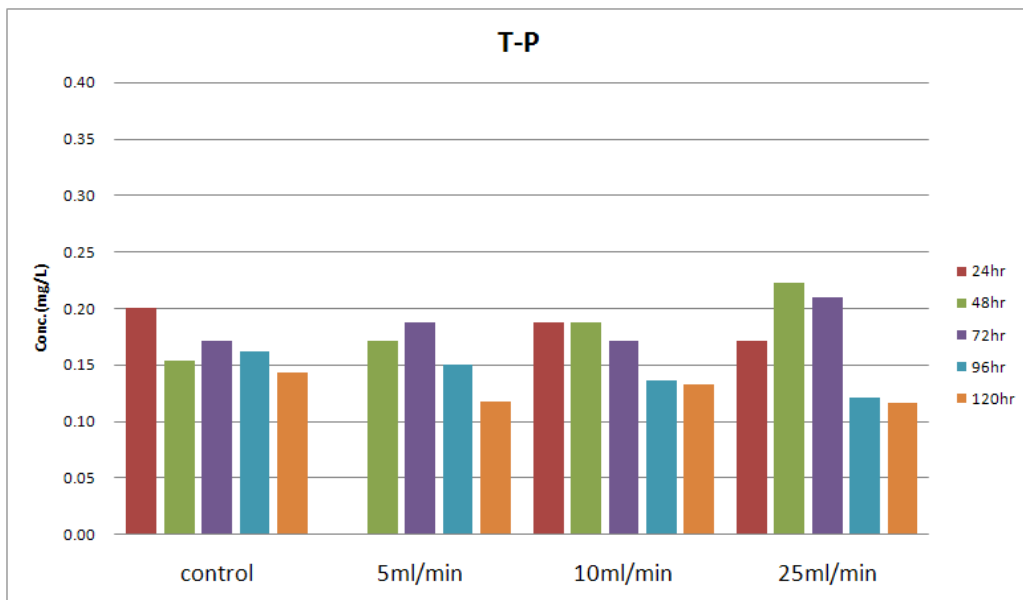


출이 일어나는 것으로 보여진다.

- 이러한 결과는 연안저질의 부유사가 인의 용출에 별 다른 영향을 주지 않으며, 오염된 저질에서 인의 재용출은 외부요인의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 문헌에는 인(인산)의 경우 pH 3~9의 토양용액에서는  $\text{HPO}_4^{2-}$ 로 존재하며, 인의 거동에 관여하는 주된 금속 이온은  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  등이다. 인은 가용성염으로서 토양에 첨가해도 대부분의 인은  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  등의 난용성 인화합물이 되어 토양에 집적되기 때문에 토양 용액중의 인 농도는 극히 낮고, 또 토양에 집적되어 있는 유기인 화합물은 인산이  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  등의 양이온과 결합해서 난용성의 형태로 되는 경우가 많다고 설명하고 있다. (渡辺紀元, 토양정화능에 관한 연구). 결국 연안저질 내에 존재하는 점토광물에 의해 인은 난용성의 형태로 존재하며, 주변 해역환경에 주는 영향이 적은 것으로 보여진다.



[그림. I-사-22] Column 시험에서 와류강도에 따른 총질소의 용출



[그림. I-사-23] Column 시험에서 와류강도에 따른 총인의 용출

(아) 반응성 차단제를 이용한 부영양화 물질 제거 실험

① 준설토의 흡착제 사용에 대한 적합성 평가

- 본 연구에서 흡착제로 사용될 준설토의 사용 적합성을 평가하기 위해서 선행연구가 많이 진행된 벤토나이트, 제올라이트와 준설토의 표면개질율을 비교하여 준설토의 흡착제 사용 가능성에 대해 알아보고자 하였다.

[표. I-사-19] Shaking 방법을 이용한 준설토, 벤토나이트, 제올라이트의 표면 개질율

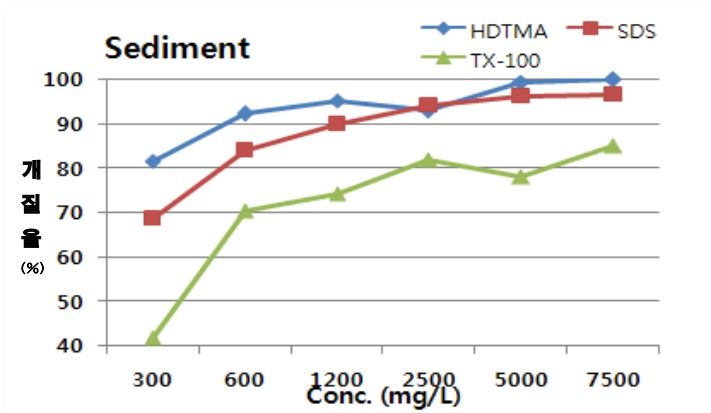
계면활성제의 종류	준설토	벤토나이트	제올라이트
	개질율 (%)		
HDTMA	92	92.5	84
SDS	83	86.4	87.4
TX-100	70.3	77.8	69.5

- 3가지 토양을 계면활성제의 농도 600ppm에서 진탕법으로 표면개질 하였을 때, 벤토나이트가 최고 92.5%(HDTMA)로 가장 좋은 개질율을 나타내었으며, 제올라이트가 69.5%(TX-100)로 가장 낮은 개질율을 나타내었다. 여기서, 개질율이란 개질실험을 하는 동안 흡착된 계면활성제의 백분율을 의미한다. 그러나 실질적으로 준설토, 벤토나이트, 제올라이트 간에 개질율은 큰 차이를 보이지 않았으며, 준설토의 흡착제 사용이 가능한 것으로 나타났다.

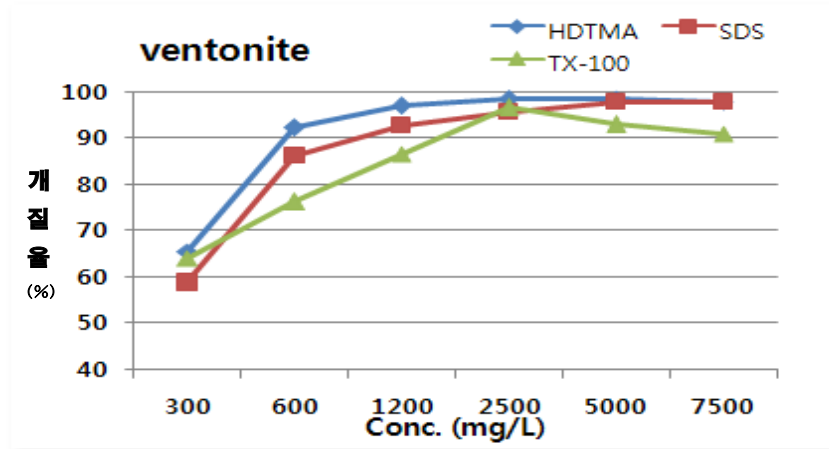
② 계면활성제의 종류 및 개질방법에 따른 준설토 표면개질연구

㉠ Shaking 방법을 이용한 준설토 표면개질 연구

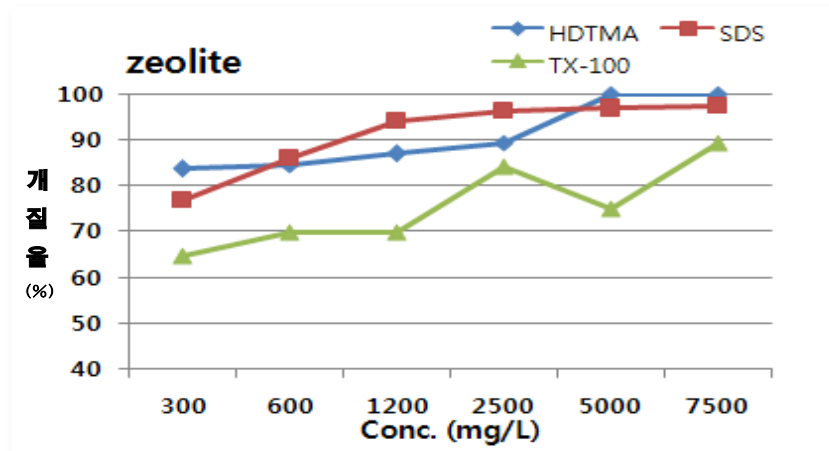
- Shaking 방법을 이용한 토양 표면개질 실험에서는 계면활성제의 농도가 낮을 경우 70-80%의 개질효율을 보였으며, 계면활성제의 종류에 따라 개질효율이 차이를 보였다. 그러나 계면활성제의 농도가 증가하면서 토양의 표면개질효율은 증가하였으며, 양이온 및 음이온 계면활성제는 600ppm 농도에서 90% 이상의 개질율을 나타냈다.



[그림. I-사-24] 진탕법을 이용한 계면활성제의 준설토 표면 개질율



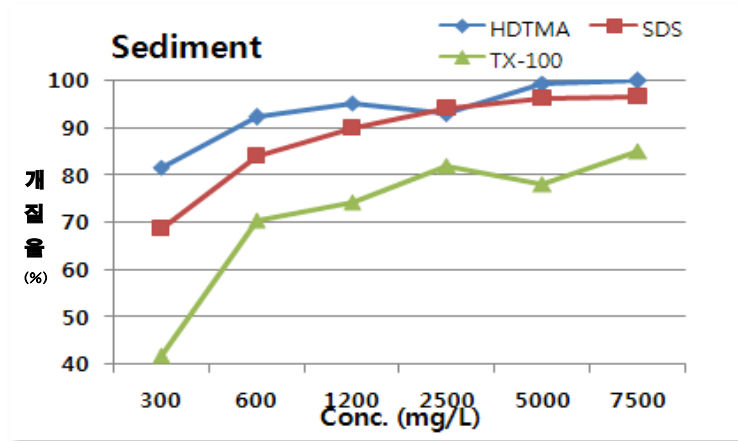
[그림. I-사-25] 진탕법을 이용한 계면활성제의 벤토나이트 표면 개질율



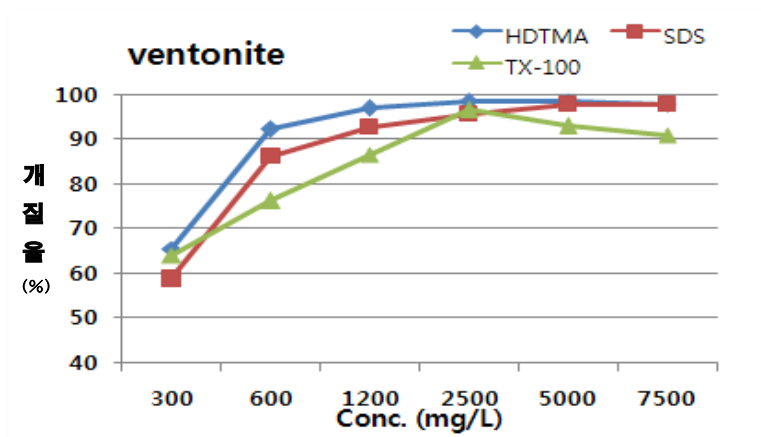
[그림. I-사-26] 진탕법을 이용한 계면활성제의 제올라이트 표면 개질율

㉠ 초음파조사법을 이용한 준설토 표면개질 연구

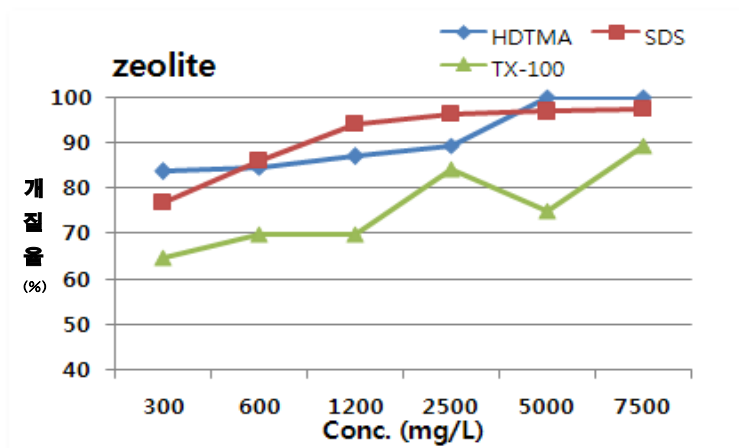
- 초음파조사법을 이용한 토양 표면개질 실험에서는 계면활성제의 농도가 낮을 경우 65-85%의 개질효율을 보였다. 그러나 진탕법에서와 같이 계면활성제의 농도가 증가하면서 토양의 표면개질효율은 증가하였으며, 양이온 및 음이온 계면활성제의 경우 1200ppm 농도에서 개질율은 90% 이상이었다.



[그림. I-사-27] 초음파조사법을 이용한 계면활성제의 준설토 표면 개질율



[그림. I-사-28] 초음파조사법을 이용한 계면활성제의 벤토나이트 표면 개질율

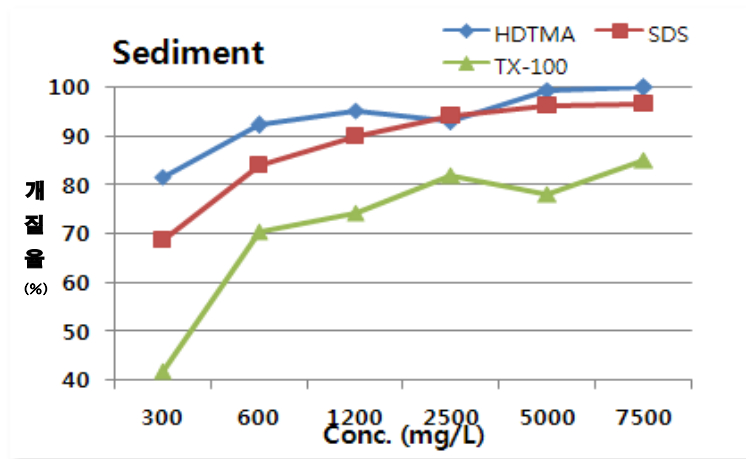


[그림. I-사-29] 초음파조사법을 이용한 계면활성제의 제올라이트 표면 개질율

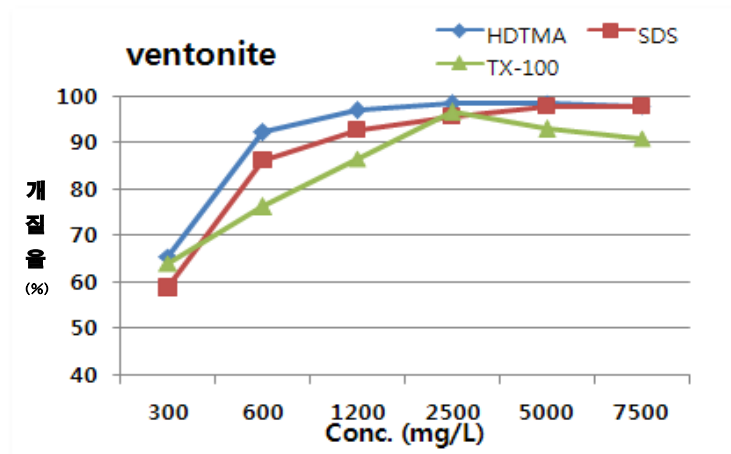
㊤ 극초단파조사법을 이용한 준설토 표면개질 연구

- 극초단파조사법을 이용한 토양 표면개질 실험의 경우 계면활성제 농도가 낮은 경우 개질율은 60-70%이었다. 그러나 계면활성제의 농도가 증가하면서 토양의 표면개질효율은 증가하였다. 극초단파조사법을 이용한 제올라이트, 벤토나이트, 준설토의 개질율을 비교하였

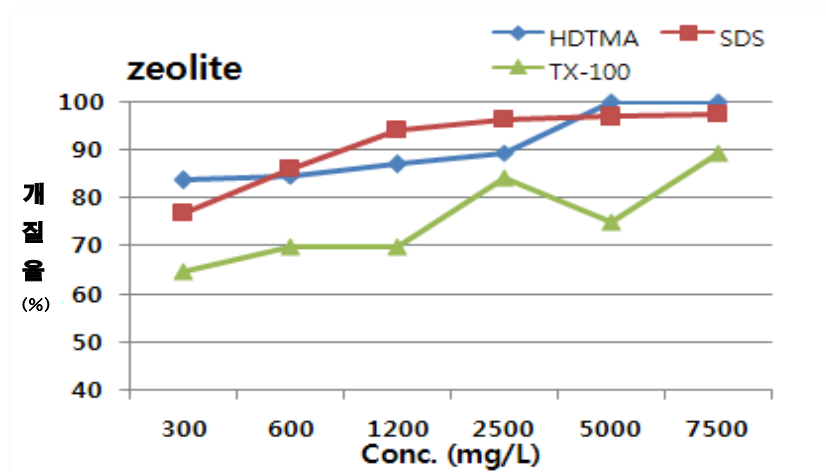
을 때, 토양의 종류에 따른 표면개질율은 양이온, 음이온 계면활성제를 이용한 표면개질율은 토양별로 큰 차이를 보이지 않았지만, 비이온성 계면활성제를 이용한 표면개질율은 벤토나이트와 제올라이트에 비해 준설토가 효율이 떨어지는 것으로 나타났다.



[그림. I -사-30] 극초단파조사법을 이용한 계면활성제의 준설토 표면 개질율



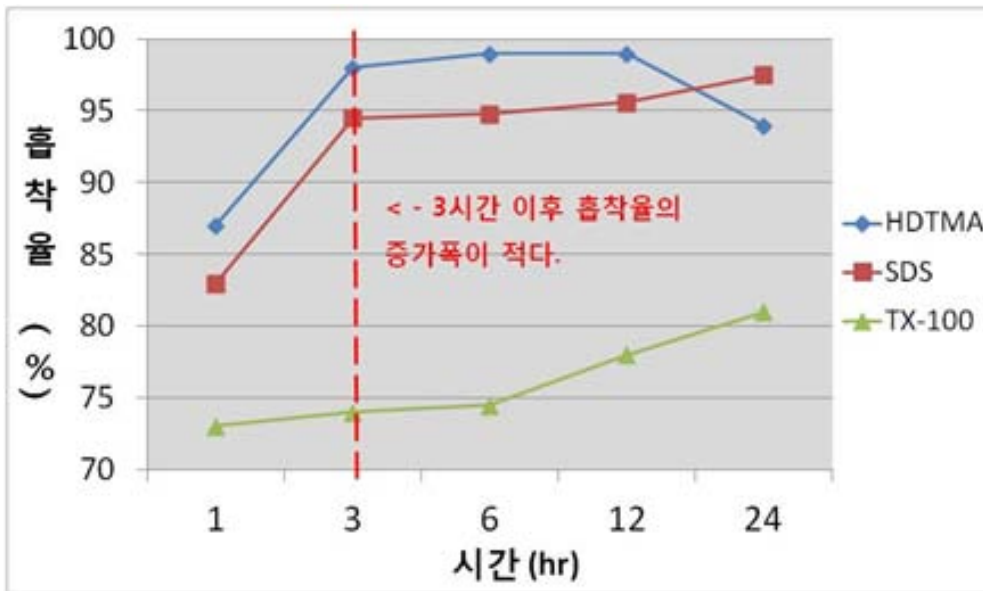
[그림. I -사-31] 극초단파조사법을 이용한 계면활성제의 벤토나이트 표면 개질율



[그림. I -사-32] 극초단파조사법을 이용한 계면활성제의 제올라이트 표면 개질율

㉔ 반응시간별 표면개질 효율 연구

- 반응성 차단제를 개발하기 위해 개질 방법에 따른 개질 효율을 평가하였을 때, Shaking 방법, 초음파조사법, 극초단파조사법 등과 같은 개질방법에 따른 개질율의 차이는 보이지 않았다. 따라서 현장 적용이 용이하고, 경제적인 Shaking 방법을 준설토 표면개질방법으로 채택하였다.
- 추가적으로, 효율적인 준설토 표면개질을 위해 반응시간에 따른 개질효율 연구를 실시하였다. 연구 결과, 반응 약 3시간 이후 개질 효율은 90%이상으로 증가하였으며, 반응 시간에 따른 개질율 증가폭이 급격히 감소하는 것으로 나타났다.



[그림. I-사-33] Shaking 방법을 이용한 반응시간별 개질 효율

㉕ 반응성 차단제 제작

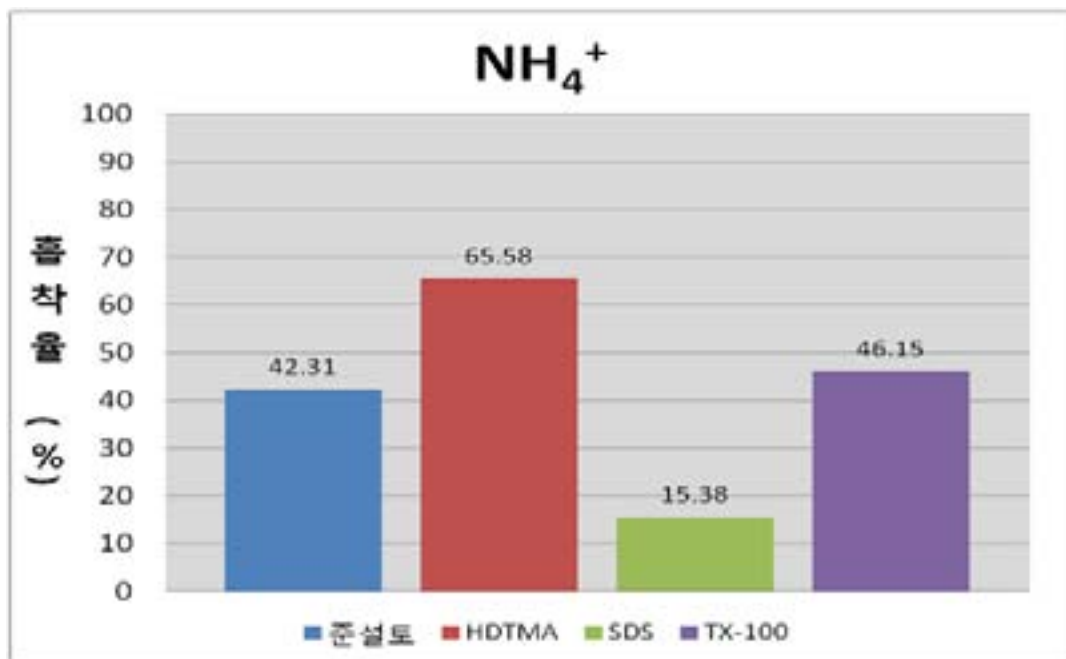
- 반응성 차단제 제작과 관련된 연구를 진행한 결과 준설토를 3시간 진탕시켜 반응시키는 것이 가장 효율적이고 경제적인 방법으로 나타났다. 개질방법으로 Shaking 방법을 결정한 이유는 초음파조사법과 극초단파조사법의 경우 현장 적용이 어렵고, 대규모의 반응성 차단제 제작에 한계점이 많으며, 제작비용이 경제적이지 못하기 때문이다. 또한, 진탕방법과 비교하여, 준설토 표면개질효율의 차이가 크지 않아 진탕방법을 가장 적합한 방법으로 결정하였다.



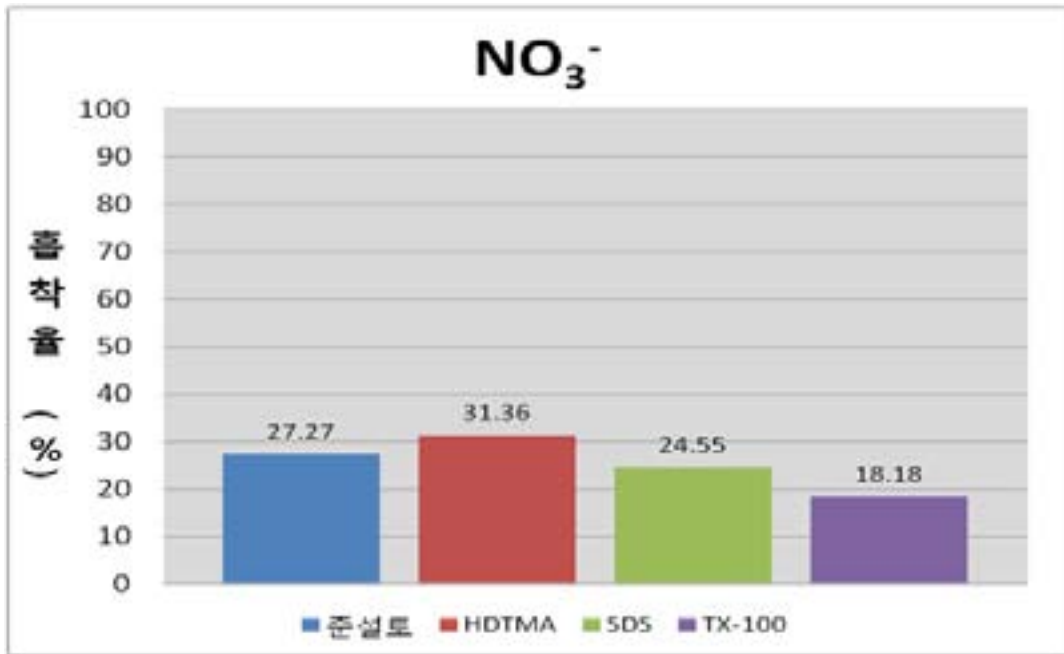
[그림. I-사-34] 반응성 차단제 제작방법

### (자) 반응성 차단제의 오염물질 흡착능 평가

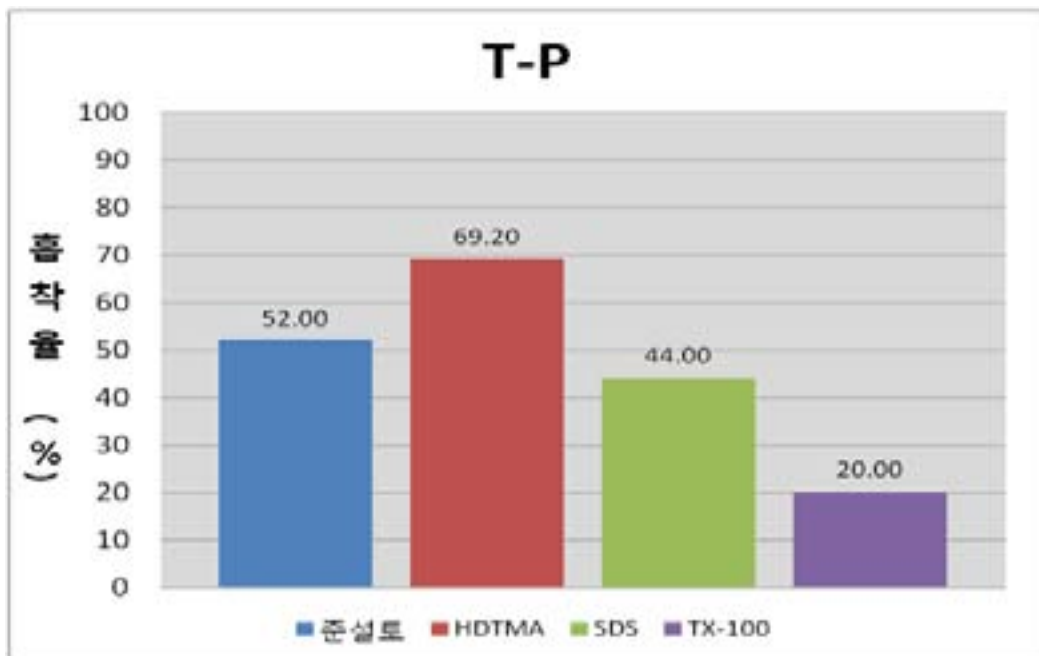
- 반응성 차단제의 오염물질 흡착능력을 평가하기 위해 회분식 실험을 실시하였다. 먼저 양이온(HDTMA), 음이온(SDS), 비이온성(TX-100)계면활성제를 사용하여 준설토의 표면을 개질하여 반응성 차단제를 제작하였으며, 제작된 반응성 차단제의 질소 및 인 오염물질의 흡착능력을 비교하였다. 실험결과, 계면활성제 종류에 따른 반응성 차단제의 암모니아성 질소 흡착율은 양이온 계면활성제에 의해 표면개질된 준설토가 65.58% 로 가장 높은 효율을 나타냈으며, 음이온 계면활성제에 의해 표면개질된 준설토는 15.38%로 가장 낮은 암모니아성 질소 흡착효율을 보였다.
- 질산성 질소의 흡착율은 양이온 계면활성제에 의해 표면개질된 준설토가 31.36% 로 가장 높은 효율을 나타냈으며, 비이온성 계면활성제로 표면개질된 준설토는 18.18%로 가장 낮은 질산성 질소 흡착효율을 보였다.
- 총인의 흡착율은 양이온 계면활성제에 의해 표면개질된 준설토가 69.20% 로 가장 높은 효율을 나타냈으며, 비이온성 계면활성제로 표면개질된 준설토는 20.00%로 가장 낮은 총인 흡착효율을 보였다.
- 본 연구팀이 직접 개발한 반응성 차단제에 대해 적조유발 오염물질인 질소, 인의 흡착능을 평가하였을 때, 양이온 계면활성제를 이용하여 표면개질한 반응성 차단제가 암모니아성 질소, 질산성 질소, 인에 대해 가장 높은 흡착효율을 보였다. 이에 더하여 양이온 계면활성제를 사용하여 표면개질한 반응성 차단제의 질소, 인 흡착효율은 준설토(Non-treatment)와 비교하였을 때, 암모니아성 질소 55%, 질산성 질소 15%, 인 33% 더 증가하였다.



[그림. I-사-35] 계면활성제로 표면 개질된 반응성 차단제의 암모니아성 질소 흡착율



[그림. I-사-36] 계면활성제로 표면 개질된 반응성 차단제의 질산성 질소 흡착율



[그림. I-사-37] 계면활성제로 표면 개질된 반응성 차단제의 총인 흡착율

### ① 반응성 차단제의 오염물질 차단효과 검증

- 반응성 차단제의 오염물질 차단효과를 평가하기 위해 Column 실험을 실시하였다. 먼저 준설토(Column-1, Non modified soil)와 양이온(HDTMA)계면활성제를 사용하여 제작한 반응성 차단제(Column-2, Reactive barriers)를 인공오염토양위에 2cm 깊이로 복토하였다. Column-1, 2를 비교한 결과, 암모니아 오염물질에 대한 반응성 차단제의 차단율은 Column-1보다 Column-2가 약10-12%정도 증가한 것을 볼 수 있었다. 또한, 인 오염물질에 대한 차단율은 Column-1보다 Column-2가 20-47%증가하였다. 따라서 실제 해양환경에 반응성 차단제를 복토할 경우, 연안저질을 외부 환경에서 물리적, 화학적으로 보호할 수 있으며 용출되는 오염물질의 양도 줄일 수 있는 것으로 증명되었다.



[표. I -사-20] batch 및 column 실험에서 오염물질 차단율 비교

오염물질	Batch 실험	Column 실험
	반응성 차단제	반응성 차단제
총 질소 차단율(%)	준설토에 비해 20.82% 증가	준설토에 비해 10-12% 증가
총 인 차단율(%)	준설토에 비해 33% 증가	준설토에 비해 20-47% 증가

- 이에 더하여 batch 실험과 column 실험의 오염물질(총질소, 총인)차단율을 비교해 보았다. 비교결과, 총인의 경우에 비슷한 차단율을 보이는 반면, 총 질소의 경우는 차단율이 감소하는 것을 볼 수 있다.
- 암모니아성 질소의 차단율이 감소하는 이유는 3가지로 볼 수 있다.  
 와류를 발생시키기 위한 공기공급으로 암모니아성 질소의 탈기현상 발생.  
 와류를 발생시키기 위한 공기공급으로 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화됨.  
 이온화경향이 큰 질산성 질소의 생성은 총 질소의 차단율을 감소시킴. (반응성 차단제의 질산성 질소 흡착율은 암모니아성 질소에 비해 약 1/2 정도이다.)
- 이러한 결과는 해수속의 DO 농도 증가는 반응성 차단제의 차단율을 감소시킬 수 있다는 것을 증명하는 것이다.

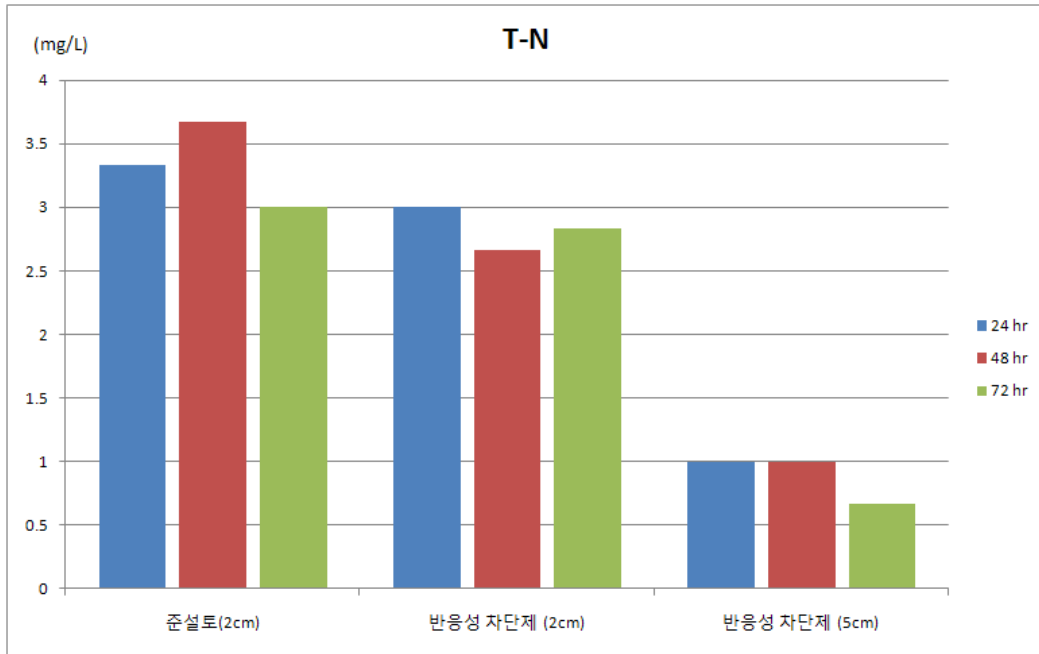
② 반응성 차단제의 복토 두께에 따른 차단효과 연구

- 반응성 차단제의 복토 두께에 따른 오염물질 차단효과를 평가하기 위해 Column 실험을 실시하였다. 2개의 column중 하나의 column에 양이온(HDTMA)계면활성제를 사용하여 제작한 반응성 차단제를 인공오염토양위에 2cm(Column-2)깊이로 복토하고 나머지 column에 상기 동일한 반응성 차단제를 5cm(Column-3)깊이로 복토하였다. 총질소와 인 오염물질의 차단율은 column-3이 column-2보다 각각 25-33%, 57-69% 증가하였다. 반응성 차단제의 두께가 증가할수록 토양에서 용출되는 오염물질에 대한 차단율이 증가하는 것으로 나타났으며, 3차년도 과제 수행시 반응성 차단제의 복토두께와 관련된 연구가 추가적으로 필요하다고 생각된다.

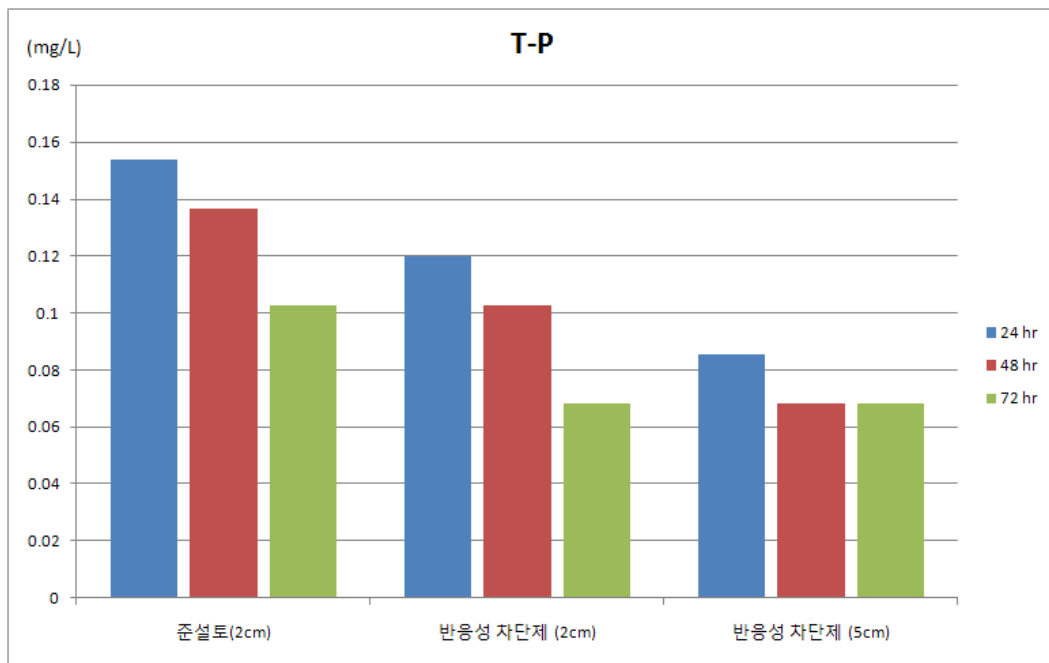
[표. I -사-21] 반응성 차단제의 질소 및 인 오염물질 차단율

오염물질	반응성 차단제의 오염물질 차단율
총 질소	84% (60% 이상)
총 인	72.4% (80% 이상)

- ()안의 내용은 성과지표에 대한 최종목표치 -



[그림. I-사-38] 반응성 차단제를 복토한 Column 실험에서 총질소의 용출농도



[그림. I-사-39] 반응성 차단제를 복토한 Column 실험에서 총인의 용출농도

#### 아. 정화기술 효율평가 모니터링 방법 정립

##### (1) 정화기술 효율평가 모니터링 방법 정립

- 정화기술 효율평가 모니터링은 과거 정립된 오염현황 조사 지침과는 달리 오염퇴적물 정화사업 시행에 따른 해역 오염 현황을 평가하기 위한 것으로서, 조류의 방향과 유속 등을 고려할 수 있는 모니터링 체계로 정립
- 해양오염퇴적물 정화기술 효율평가 방법에 있어서 기존 해양오염퇴적물 조사지침서(해양수산부, 2006)의 '오염해역 정화 · 복원 · 준설 사업해역 환경모니터링 지침'은 일반적인 해양환경모니터링 체계를 그대로 답습하고 있어 정화기술 효율평가 적용에 한계가 있

을 것으로 예상되며, 따라서 본 연구를 통해 해양오염퇴적물 특성별, 정화기술별 특화된 정밀한 모니터링 기술의 개발이 요구됨.

- 특히, 정화기술별 해양환경의 교란 정도가 매우 상이할 것으로 예측되며, 이의 회복 및 복원의 정도도 차이가 있을 것으로 예상됨에 따라 차이를 확인하고 오염퇴적물 정화에 최적의 기술을 선택할 수 있는 평가 기술개발이 요구됨.

**(2) 정화복원 및 효율평가의 개념**

- 정화복원에 있어서 해양오염퇴적물에 의한 환경 위해
- 독특한 수서환경에 대한 이해를 기반으로 정화복원
- 오염퇴적물의 환경 위하는 1) 오염물질의 노출경로, 2) 다양한 환경매체에서의 오염물질의 농도분포 (어류 또는 다른 생물, 수질, 퇴적물), 3) 생물이용도가 높은 표층퇴적물과 관련이 있음
- 퇴적물의 안정성(stability)이 매우 중요함

**[표. I -아-1] 환경적 측면에서 정화복원을 위한 준설의 구분**

구분	항로준설 (Navigational dredging)	환경준설 (Environmental dredging)
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수심유지를 목적으로 준설</li> <li>• 준설량이 많은 것이 특징</li> <li>• 높은 생산성</li> <li>• 저비용</li> <li>• 다양한 준설토 처분</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 환경 위해 관점의 준설</li> <li>• 높은 수준의 환경관리</li> <li>• 준설량이 상대적으로 소량</li> <li>• 낮은 생산성</li> <li>• 고비용</li> <li>• 준설토 처분의 제한</li> </ul>

**[표. I -아-2] 환경적 측면에서 정화복원의 방법별 장단점**

구분	자연정화 (Monitored natural recovery)	현장피복 (in-situ capping)	환경준설 (dredging)
내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 장기간 모니터링을 병행하여 자연정화능력에 의한 오염퇴적물의 정화·복원 유도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 생물적, 화학적 고정 및 안정화</li> <li>• 오염지역 피복 (모래, 자갈, 지오그리드 등)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 준설장비를 투입하여 직접 오염퇴적물 제거</li> </ul>
특성	장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 환경친화적인 기술</li> <li>• 상대적으로 저비용</li> <li>• 효과적인 오염물질 봉쇄</li> <li>• 2차 오염 영향 적음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 안정적인 기술체계 확립</li> <li>• 항만에서는 항로개선 준설 효과</li> </ul>
	단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상대적으로 오랜 기간 필요</li> <li>• 정화추이에 따른 장기모니터링 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 해수유동 특성 등에 따라 효과미비 가능</li> <li>• 피복물질의 침식가능</li> <li>• 피복물질의 변화 및 장기 모니터링 필요</li> </ul>

**(가) 퇴적물 오염지역의 자연적인 복원의 과정**

### ① 오염된 퇴적물의 자연적인 위해 저감 과정

- 오염물질의 생물학적 분해 또는 비생물학적 전환(화학반응) 등과 같은 전환과정(transformation processes)를 통해서 퇴적물 생태독성이 감소하는 것
- 오염물질의 이동성과 생물학적 이용도(bioavailability)는 퇴적물 matrix에 오염물질의 흡착 또는 다른 과정을 통해 생태 위해의 감소
- 오염된 표층퇴적물이 깨끗한 퇴적물과의 혼합(자연적인 또는 인위적인) 새로운 퇴적물에 의해 아래쪽으로 이동(burial)됨에 따라 노출 수준의 감소
- 입자 흡착에 의한 이동 또는 확산, 이류 등을 통한 water column으로의 오염물질의 이동에 따라 노출 수준의 감소

### ② 자연적인 복원(natural recovery)의 주요 과정

- 물리, 생물, 화학적 과정을 통해 오염된 퇴적물은 자연적인 복원을 이루게 되나, 많은 시간을 소요하게 됨.

물리적 과정

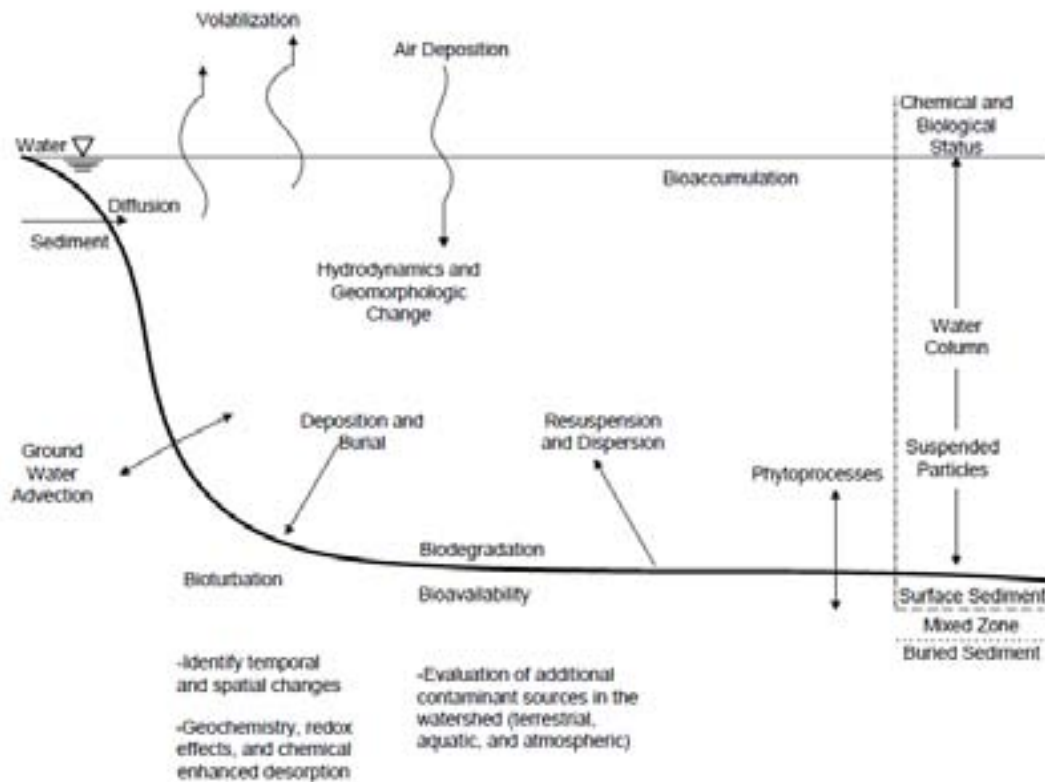
수층 내 입자의 퇴적, 이송, 확산, 희석, 생물학적 교란, 증발 등의 과정

생물학적 과정

생물학적 분해, 전환, 수서식물에 의한 복원, 생물학적 안정화

화학적 과정

산화/환원, 흡착 또는 생물학적 이용도가 저감되거나 안정화되는 결과로 나타나는 다른 여타의 과정



[그림. I-아-1] 오염된 퇴적물의 자연적인 복원과정

---

### ③ 정화복원 효율평가

- 오염된 해양퇴적물을 다양한 정화복원 기술을 활용하여 제거 또는 정화 후 현장에 복원하였을 때, 인간의 건강과 환경에 대한 위해를 수용할 수 있는 수준까지 저감한 정도를 평가하는 것
- “Net Risk Reduction”을 평가
- “효율평가”와 “얼마나 많은 양의 오염된 퇴적물을 제거하였는가”는 다름
- 다양한 요소에 대한 specific한 평가가 필요함
- 효율평가에 있어서 퇴적물 안정성을 포함해야 함
- 효율평가를 위한 위해 감소(net-risk reduction)의 측정 개념
- 정화복원의 잠재적인 효과를 고려한 위해 감소의 정도를 측정하는 것
- 위해란 오염된 퇴적물에 노출되는 강도, 노출의 정도를 통해 평가
- 특히, 단일화학물질보다는 다양한 물질의 복합적이고 부정적인 영향을 고려하는 것
- 오염된 지역에서의 위해 감소의 정도를 측정하는 것은 오염된 퇴적물의 mass, volume, 농도의 변화를 측정하는 것
- 직접적인 측정방법은 surrogate matrices를 이용하여 위해를 측정
- 현장분석의 가장 좋은 방법은 쉽고, 충분한 정확성과 정밀한 방법을 이용하는 것 (시간과 비용을 고려한)

### ④ 생태독성시험, biological community indexes, tissue-residue analyses

- 하지만 이러한 방법도 정확한 위해를 표현하는데 있어서는 제한적임.
- 효율평가에 있어서 자연적인 복원의 고려
- 상위영양단계의 생물에서 오염물질의 감소가 장기적으로 관찰
- 퇴적물 주상시료 분석 자료에서 시간적인 경과에 따라 오염퇴적물의 농도가 감소하는 경향이 관찰
- 표층퇴적물에서의 오염물질의 농도, 퇴적물 독성, 퇴적물 내의 오염물질의 함량의 감소가 장기적으로 관찰

### (3) 정화복원 효율평가를 위한 지침서(안) 개발 개념

- 정화복원 효과평가를 위한 framework
  - 오염된 퇴적물에 의한 위해 감소에 초점을 두고 평가
  - 위해감소를 평가하는데 있어서 중요한 요인들
  - 수서생물에 있어서 특정 오염물의 농도분포
  - 오염된 퇴적물이 분포하는 수괴에서의 농도분포
  - 표층퇴적물에서의 농도분포
  - 수서생태계 서식지 질에 대한 평가
  - 기타 요인으로는 정화복원 계획 및 비용 등이 있음
  - 특이적 효율평가 기법의 정립
  - 정화사업의 대상이 되는 오염된 퇴적물 및 이용되는 정화공법, 오염된 지역, 퇴적물의 특
-

- 성에 맞는 효율평가 기법의 정립이 요구됨
- 정화사업 특이적(project-specific) 효율평가 기법
  - 정화사업의 특성, 오염된 퇴적물의 양, 면적, 두께 등을 고려
  - 지역특이적(site-specific) 효율평가 기법
  - 수리, 수문, 기후, 사회기반시설, 잠재적 자원 요소 등을 고려
  - 오염퇴적물 특성 특이적(sediment-specific) 효율평가 기법
  - 쇄설물, 오염퇴적물의 물리화학적 특성, 관심오염물질(COCs) 등의 고려
  - 정화공법 특이적(engineered-specific) 효율평가 기법
  - 수거, 피복, 현장처리, 복합공법 등의 다양한 정화공법을 고려
  - 환경준설의 효율평가를 위한 개념의 정립
  - 정화복원 사업이 요구되는 지역 및 다른 대규모 환경준설사업을 확인
  - Define criteria for selecting projects for committee evaluation from the list of environmental-dredging projects
  - Select projects that represent a variety of site conditions
  - Evaluate each project with respect to measures of short-term and long-term effectiveness
  - Make recommendations for improved design, implementation, and monitoring of future environmental-dredging projects
  - 기존 해양오염퇴적물 조사 지침서(해양수산부, 2006)의 분석
  - 지질특성 분석 및 오염조사를 위한 시료채취 가이드
  - 퇴적물 분석항목별 시험방법
  - 수심지형 및 지구물리 탐사방법을 소개
  - 부록, 사업해역환경모니터링 지침

[표. I -아-3] 해양오염퇴적물 조사 지침서(해양수산부, 2006)의 구성

장	항	내용 및 비교
1장 총칙	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 목적, 적용범위</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 오염퇴적물 실태조사의 목적 및 범위를 규정</li> </ul>
2장 조사항목	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 조사항목 선정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 선정대상 항목의 소개 및 나열</li> </ul>
3장 퇴적물의 지질특성 및 오염조사를 위한 시료채취	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시료채취 위치확인, 정점선정, 밀도, 방법 및 시료 취급</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항목별 구체적인 방법의 소개 및 유의사항 기술</li> </ul>
4장 퇴적물의 분석항목별 시험방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 입도, 함수율, 중금속, 유기화합물 등에 대한 시험방법</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 개별 항목별 시험방법 (해양환경공정시험기준과 동일)</li> </ul>
5장	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수심지형, 해저면 탐사, 지층탐사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수심 및 지형확인을 위한</li> </ul>

수심지형 및 지구물리 탐사방법		지구물리탐사 기법의 소개
부록: 오염퇴적물 정화,복원, 준설 사업해역 환경모니터링 지침		<ul style="list-style-type: none"> <li>조사지점 선정, 조사기간 및 항목, 시료채취 및 시험분석, 조사기관</li> </ul>

[표. I -아-4] 기존 해양오염퇴적물 조사 지침서(해양수산부, 2006)와 차별성 구현

분야	기존	효율평가 모니터링	차이점
목적	오염해역 준설에 따른 효과분석, 2차오염, 해양환경 변화의 모니터링	오염퇴적물 정화기술에 따른 효율평가 및 종합적 모니터링	정화기술 효율평가에 목적을 두고 정밀 해양환경 모니터링
적용범위	<ul style="list-style-type: none"> <li>퇴적물의 정화, 복원에 대한 필요성이 제기되는 해역</li> <li>기타 퇴적물 오염 가능성이 존재한다고 판단되는 해역</li> </ul>	오염퇴적물 정화를 실시한 해역	정화기술 효율평가 및 정화효율 평가에 적용
지점선정 기준	해수 수질, 해저퇴적물, 부유퇴적물, 생물독성영향, 저서 생물서식환경 등 일반적 분류에 따른 지점의 지정	오염퇴적물 특성별 정화기술 적용 효율을 평가하기 위해 충분한 광역적 지점 선정 및 모니터링 목적에 따른 지점 분류	종합적 고려에 따른 모니터링 지점의 선정 및 지점별 모니터링 목적에 따른 분류
조사 시료의 채취	퇴적물 지질특성 및 오염 조사를 위한 시료 채취	정화 효율평가를 위한 시료채취	제한된 지역에서 효율평가를 위한 시료채취 방법의 개발
조사기간 및 주기	해수 수질 4회/년, 해저퇴적물, 수중생물독성영향 등 1회/년	정화기술별 기간 및 주기의 설정	기존 지침은 너무 일반적이면, 모니터링 목적에 특화된 기간 및 주기의 설정
조사항목	해수 수질, 해저퇴적물 오염물질 분석, 수중생물독성, 생물 농축 등	오염퇴적물 특성 또는 분류별 오염물질 분석 및 정화기술별 생물독성 평가, 생물농축 조사 등	오염퇴적물 특성별, 정화기술별로 특화된 생물독성 평가 등의 적용
분석항목별 시험방법	총 20항의 시험방법을 수록, 유해물질 분석에 초점	생물독성평가 항목의 시험방법의 개발 및 수록	신규 시험방법의 개발 및 적용
시료채취 및	해양환경공정시험법을 따	해양환경공정시험법에 따	일치

시험분석 방법	름	름	
조사기관	공신력 있는 기관	전문기관	유사
참고문헌	해양수산부, 2006	개발 예정	

**(가) 모니터링 계획수립 지침의 개발 및 흐름**

- 오염퇴적물 정화복원 사업의 효율평가를 위한 모니터링 계획수립을 위한 지침의 개발을 위한 절차 및 흐름
- 효율평가의 목적에 충실한 모니터링 계획의 목적, 개념, 범위, 항목 등을 고려할 수 있는 지침의 개발
- 모니터링 자료의 수집 및 분석의 절차, 자료의 메타데이터의 범위의 설정 등을 고려
- 효율평가 모니터링을 위한 자료의 범위, 항목 설정을 위한 고려사항의 제시
- 모니터링 계획수립 사항에 포함되는 자료의 범위, 경계의 설정, 분석방법 제시 등 계획수립을 위한 사항의 제시
- 모니터링 분석결과의 활용목적에 따른 방향 설정시 고려사항 제시

Step 1	모니터링 계획의 목적 확인 • 정화복원 효과 평가를 위한 모니터링 목적 설정
Step 2	모니터링 계획 개념 수립 • 모니터링 개념 모델 정립 • 모니터링의 가설과 질문 정립
Step 3	모니터링 목적, 범위, 항목 등의 설정
Step 4	모니터링 실시 계획 수립 • 요구 자료의 확인 • 모니터링 경계 범위의 설정 • 자료 수집, 분석 방법 확인 • 모니터링 QAPP 준비
Step 5	모니터링 실시 및 자료 분석 • 모니터링 자료의 수집 및 분석 • 분석결과를 활용한 사후 모니터링 방향 설정
Step 6	모니터링 결과를 활용한 사후 관리 • 정화복원 목적 달성을 위한 모니터링 결과의 활용 • 사후 지속적인 모니터링 방향 설정 • 모니터링 자료의 효용성이 부족한 경우 원인 탐색

**(4) 국외사례 분석 - 오염퇴적물 정화복원 효과평가**

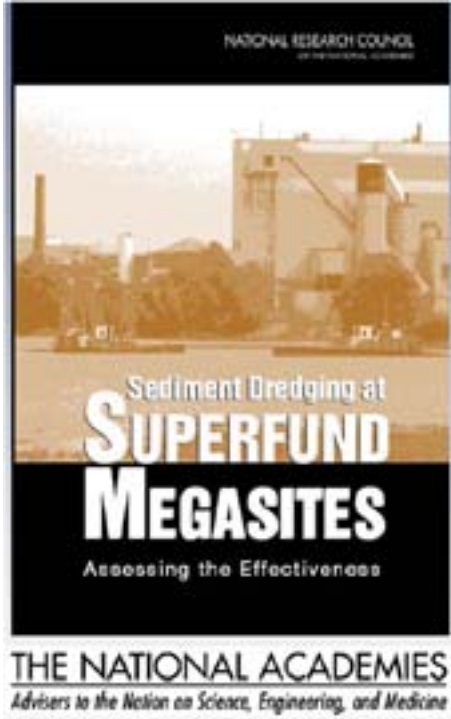

**(가) 국외사례의 분석**

- 미국 EPA가 관할하는 superfund지역에 대한 오염된 퇴적물 관리를 위해 정화복원사업의 효율을 평가하고, 대규모로 진행되는 정화복원사업들을 관리하기 위한 목적으로 퇴적물 준설에 대한 효율평가 수행에 대한 방법론을 제시하고 있음.
- 유해폐기물처리 지역에 대한 오염된 퇴적물의 복원을 위한 가이드를 제시하고 있으며, 이는 미국 national sediment quality survey를 기초로 하여 미국 전역에 대한 퇴적물의 오



염정도를 확인하고, 복원을 위한 정화사업을 시행할 때, 고려해야 할 사항들에 대해 언급하고 있음.

[표. I -아-5] 대표적인 국외사례(미국)

제목	Sediment dredging at superfund megasites: Assessing th effectiveness	Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites
발간	Committee on Sediment Dredging at Superfund Megasites Board on Environmental Studies and Toxicology Division on Earth and Life Studies	US EPA Office of Emergency and Remedial Response (now Office of Superfund Remediation and Technology Innovation (OSRTI))
기관	National Research Council, 2007	US EPA, 2005
주요 내용	오염퇴적물의 관리 환경위저감의 효과 (평가체계) 준설효과의 평가 준설효과 확인을 위한 모니터링	오염퇴적물 개선을 위한 의사결정 퇴적물 개선 실시를 위한 고려 자연적 개선에 대한 모니터링 퇴적물 개선 실시 및 장기 모니터링
표지		

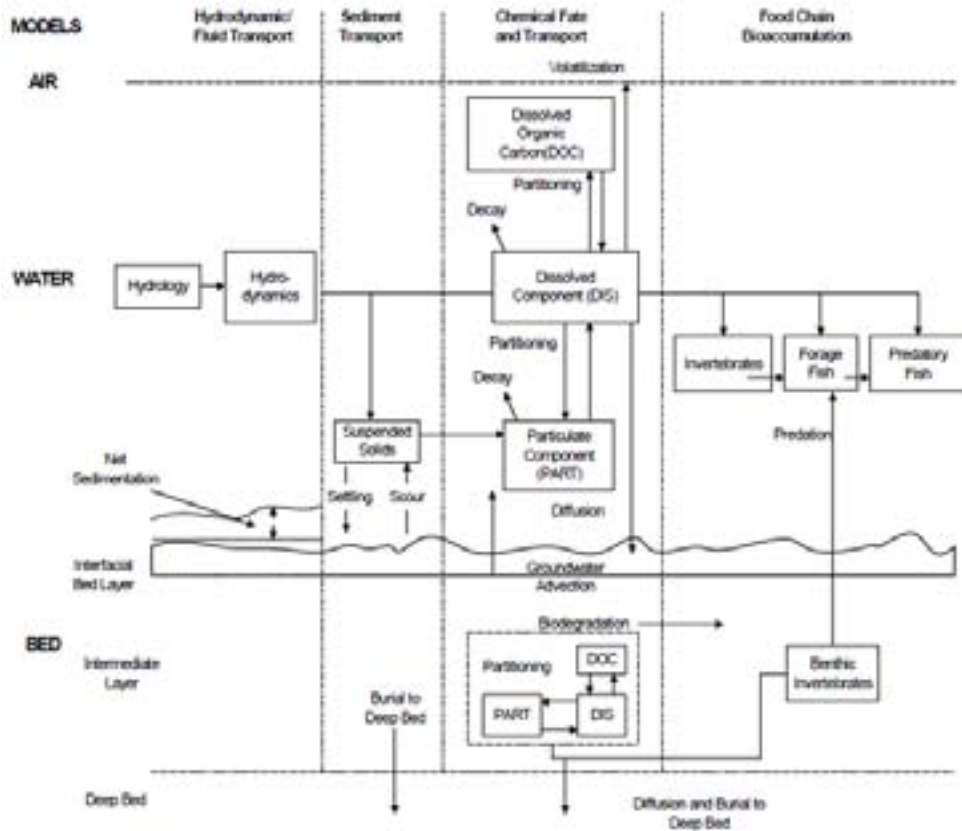
분야	주요 사례분석 및 내용
정화복원 사업 추진	<ul style="list-style-type: none"> <li>정화복원사업 추진을 위한 Tiered Approach</li> <li>오염퇴적물로 인한 위해 관리의 원리 (평가기반 연구)</li> </ul>
효율평가 Framework	<ul style="list-style-type: none"> <li>효율평가를 위한 선행 모니터링의 필요</li> <li>효율평가를 위한 사전 준비 단계에서의 요구 자료</li> <li>오염퇴적물 노출 시나리오 모델링 Framework</li> <li>인간건강 보호를 위한 효율평가를 위한 개념 모델</li> <li>생태복원 관점의 효율평가를 위한 개념 모델</li> <li>정화기술 효율평가를 위한 Tiered Approach</li> </ul>
기술 특이적평가방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>효율평가에 있어서 지역특이적 평가(SSA, Site Specific Assessment)방법 및 활용</li> <li>효율평가를 위한 SRA (Screening Risk Assessment)의 활용</li> </ul>

### ① 오염퇴적물로 인한 위해 관리의 원리 (평가기반)

- 배출원 관리가 우선적
- 이해관계자의 참여 및 개방
- 중앙정부, 지자체, 이해관계자의 조직화 및 신탁관리
- 퇴적물 안정성이 고려된 conceptual site model의 정의 및 개발
- 오염된 퇴적물의 위해에 기반을 둔 반복적 접근방식(Iterative approach)의 사용
- 정화복원 대상 지역(오염된 퇴적물) 정확한 평가 및 site model에 대한 가정 및 불확실성에 대한 고려
- 오염된 퇴적물로 인한 위해에 기반을 둔 목표를 달성하기 위하여 site-specific, project-specific, sediment-specific 위해 관리의 접근
- 오염된 퇴적물로 인한 위해 관리 목표를 달성하기 위해 퇴적물 정화 수준에 대한 보장
- 정화복원의 한계를 인식하고 최대한의 효과를 달성하기 위한 노력
- 단기간의 위해를 최소화하고 장기간의 보호를 목표로하는 정화복원 방법의 고려
- 퇴적물 정화복원 활동 동안의 모니터링 및 효율에 대한 평가 및 기록
- 효율평가를 위한 선행 모니터링의 필요
- 오염지역 특성 파악
- 퇴적물 내에 존재하는 오염물질, 표층수, 생물상, 지하수, 일반토양 등의 오염물질의 정도를 확인.
- 퇴적물과 범람원의 오염물질의 수직적, 수평적 요소의 분포를 확인.
- 오염물질의 근원을 파악하고 지속적인 오염요소를 관찰.
- 퇴적물의 안정성에 영향을 끼치는 지형학적 특징과 오염과정을 이해.
- 오염물질이 화학적, 생물학적인 영향을 미치는 요인을 파악하고, 오염물질의 생체이용률을 이해.
- 생태학적, 인간적인 관점에서 오염물질의 노출경로를 파악.
- 오염물질의 지형학적인 위험요소와 현재 및 미래에 인간에게 미치는 위해성을 파악.
- 자연적 회복의 가능성 및 정화효율성을 평가하기 위한 데이터를 수집하고 원위치 캡핑과

퇴적물의 제거 등 혁신적인 기술을 개발.

- 모든 자료를 통하여 정화작업의 효과를 모니터링하고 사용할 수 있는 데이터의 기준을 제공.



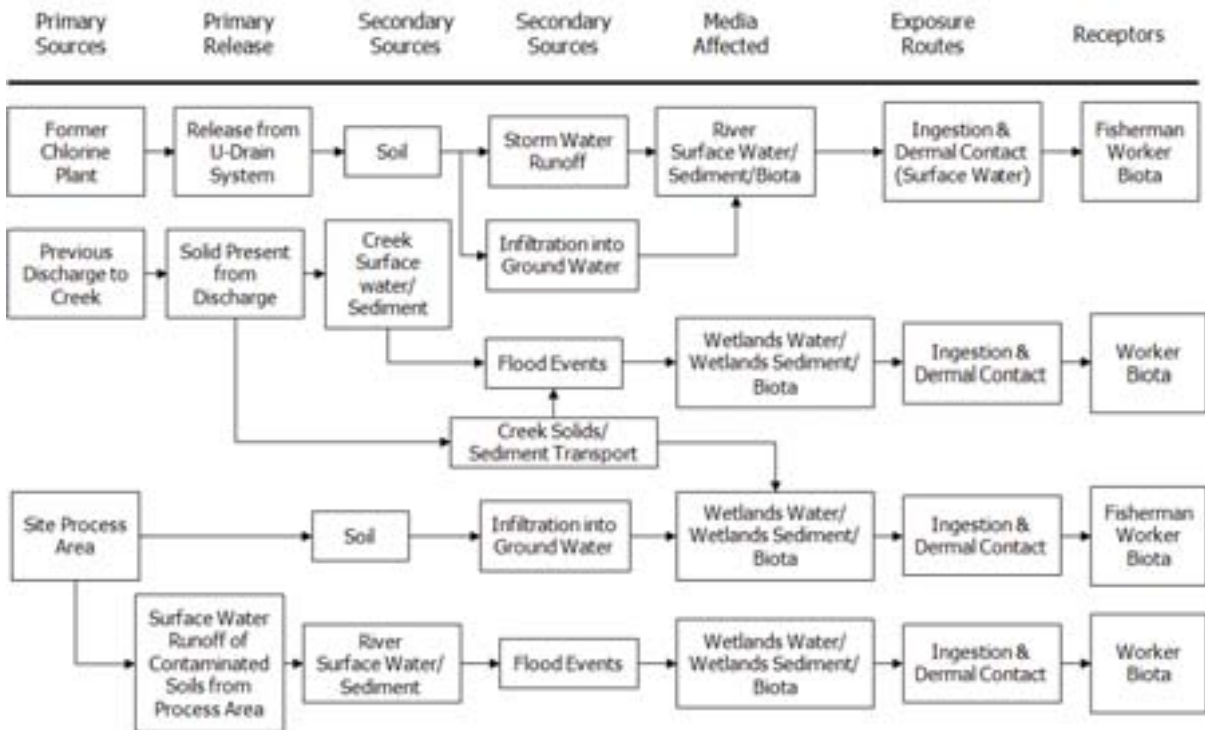
[그림. I-아-2] 오염퇴적물 노출 시나리오 모델링 framework

② 효율평가를 위한 사전준비 단계에의 요구자료

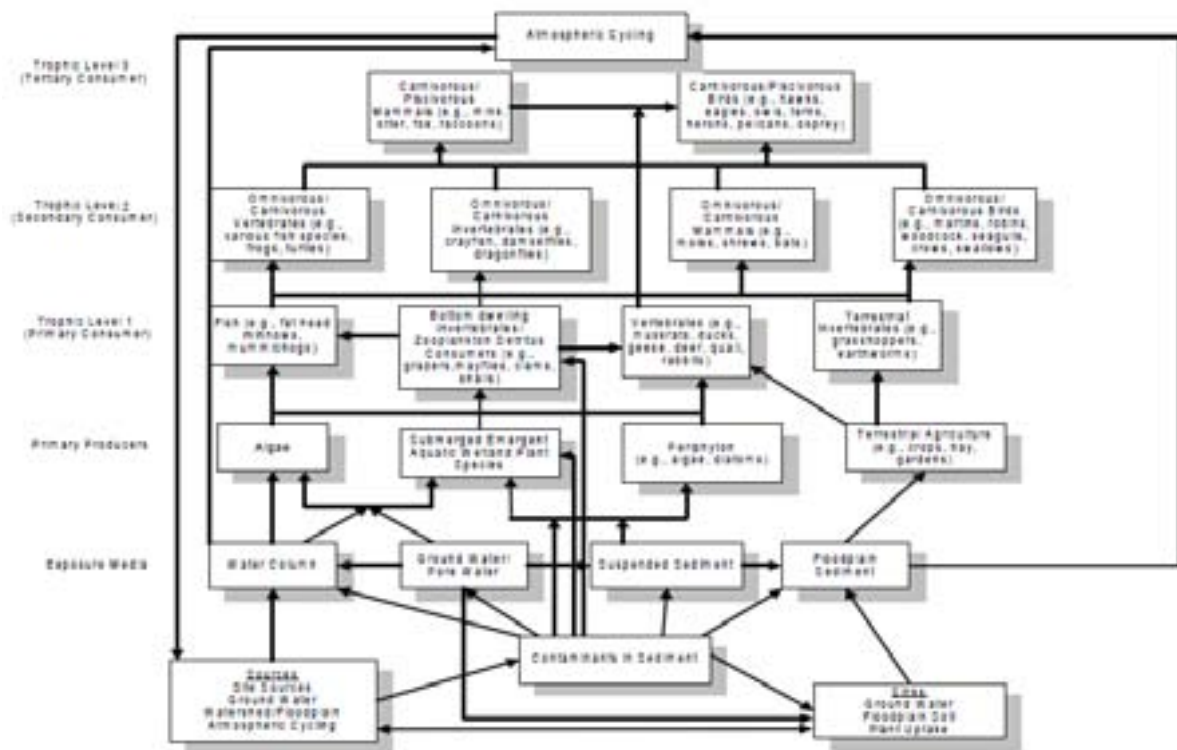
- 정화복원 대상지역에 대한 지역특이적(site-specific) 개념 모델의 개발
- 퇴적물과 오염물질의 거동 및 이동에 대한 평가
- 인간건강과 생태위해성평가의 실시
- 오염원(유입원) 관리의 효과에 대한 평가
- 복원효과의 잠재성에 대한 평가
- 정화복원 이행에 앞서 현재 상태에 대한 조사 및 보고
- 선택된 복원 방법에 대한 디자인 및 이행

③ 개념모델의 설정

- 인간건강보호의 관점에서 효율평가를 위한 개념 모델의 구성
- 오염물질의 거동에 따른 노출경로를 고려한 개념모델의 설정
- 생태복원 관점에서 효율평가를 위한 개념 모델의 구성



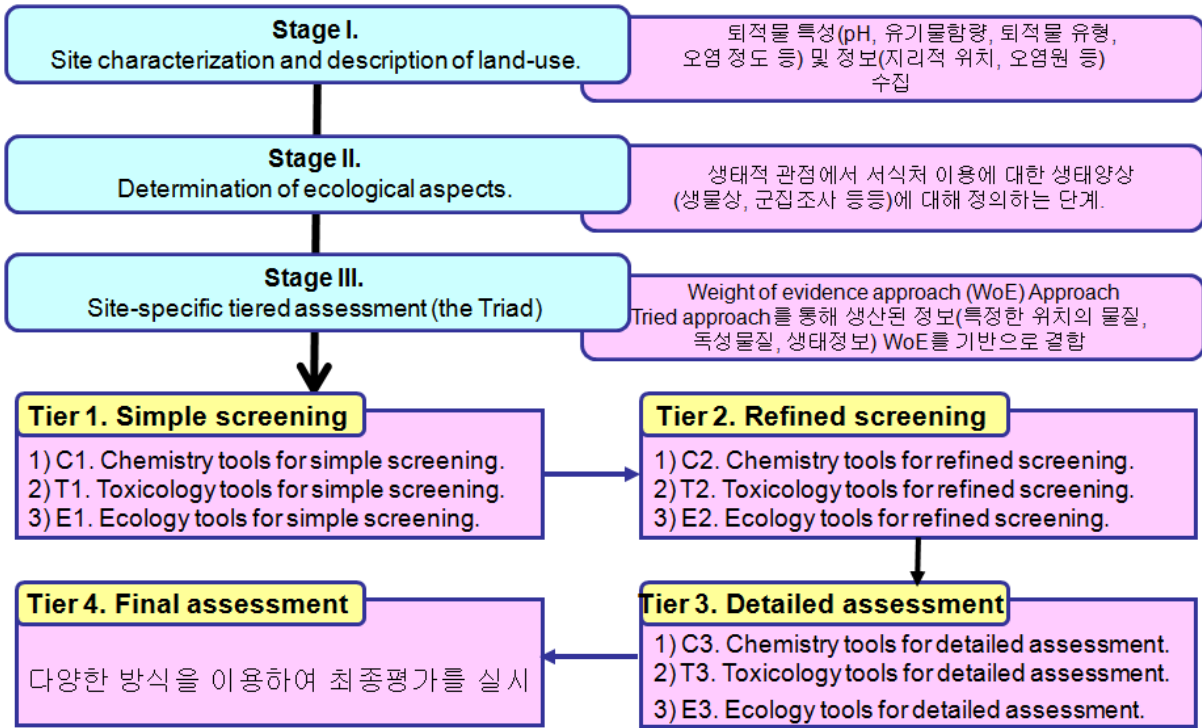
[그림. I-아-3] 인간건강보호를 위한 효율평가를 위한 개념 모델



[그림. I-아-4] 생태복원 관점의 효율평가를 위한 개념 모델

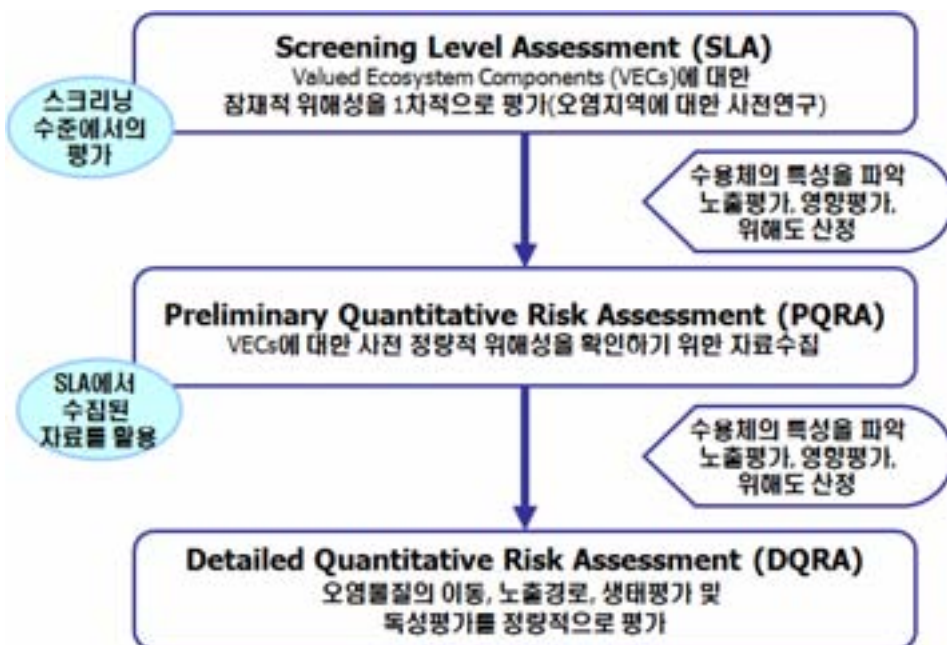
④ 정화기술 효율평가를 위한 tiered approach

- 정화복원 이행에 앞서 현재 상태에 대한 조사 및 보고
- 선택된 복원 방법에 대한 디자인 및 이행



⑤ 정화복원 효율평가를 위한 지역특이적 평가(SSA, site-specific assessment)

- Generic guidance for contaminated site
- 일반 가이드에서 제시하는 기준과 상대적인 오염농도 비교를 통한 평가
- 관심물질(유해화학물질)에 의해 영향을 받을 수 있는 잠재적으로 민감한 지역에 대한 선별
- 적절한 일반적 기준을 적용하여 기술-경제적으로 실현 가능한 평가



**⑥ 효율평가를 위한 SRA (Screening Risk Assessment)의 활용**

- 오염퇴적물의 잠재적인 관심 오염물질 (COPCs, contaminants of potential concern)에 대한 확인과 정화복원 지역의 오염 정도가 인간 건강 또는 환경에 대한 위협의 정도가 수용가능 정도인지 여부를 확인하는 과정
- 퇴적물 오염 정도에 대한 screening value가 인간의 건강(간접적) 또는 직접적으로 퇴적물과 접촉하는 생물 등에 대해 위협이 우려되는 정도를 평가
- 2차 오염 또는 이차독성(생물농축에 의한 영향) 등에 대해서는 제한적임
- Site-specific에 따른 Specific screening value의 활용
- 오염된 퇴적물에 대한 노출 시나리오에 따라 인간건강에 대한 위협과 생태위해를 개별적으로 고려한 screening value를 따로 설정할 수 있음
- 효율평가를 위한 모니터링 방안의 제시
- 오염퇴적물 정화복원 효율평가를 위하여 활용 가능한 물리탐사, 화학분석, 생물평가의 방안을 다양하게 고려한 세부 평가항목의 설정
- 물리탐사 모니터링 방안으로는 퇴적물의 침식 또는 퇴적율의 측정, 입도분석, 퇴적물 균질성 또는 이질성의 평가를 위한 퇴적물의 지구물리적 특성의 측정 등의 활용
- 퇴적물 화학과 관련된 화학분석 방안으로는 오염물질의 공극수에서의 분포, 거동 파악을 위한 총유기탄소 함량의 측정 등이 적용
- 오염퇴적물 위해 관련하여 독성영향평가, 생물학적 군집의 변화 측정 등이 활용되는 생물평가 방안이 적용될 수 있음

물리탐사 방안	화학분석 방안	생물평가 방안
퇴적물 침식 또는 퇴적의 측정 지하수 advective flow Particle size Surface water flow rates 퇴적물 균질성/이질성	퇴적물화학 공극수에 대한 생분해,분포 총유기탄소 함량 등	Toxicity bioassay Changes in the biological assemblages at sites
Sediment Geophysical Properties Water column Physical Measurement (e.g., turbidity, total suspended solids) Bathymetry Data Side scan Sonar data Settlement Plate data Sediment profile camera data Subbottom profiler data	Sediment grab samplers Core devices (e.g., vibracore, gravity piston, or drop tube samplers) Direct water column measurements (probes) Surface water samplers Semi-permeable membrane devices Seepage meters	Benthic community analysis Toxicity testing (acute and chronic lethal and sublethal effects) Tissue sampling Caged fish/invertebrate studies (bioaccumulation) Sediment profile camera studies

**자. 사업의 경제성분석 및 평가**

**(1) 해양오염퇴적물 정화사업의 경제성**

**(가) 연구 배경과 목적**

- 우리나라는 과거 오염물질에 대한 관리가 부실한 상태에서 급속한 경제발전을 이룩해 온

---

결과 오염물질이 해양으로 유입되어 퇴적물에 의한 해양오염을 가속화시켜 왔음

- 우리나라 항만 해역 등 20여 곳 이상의 도시해역이 중금속, 유기염소계 화학물질, 부영양화 등을 유발하는 해저퇴적물로 인해 주민 건강과 생태계를 위협할 정도로 오염되어 있는데, 최근 조사 자료에 의하면 정화대상 해양오염퇴적물의 양이 약 800만-1,000만  $m^3$ 에 달하는 것으로 추산되고 있음
- 하지만 이에 대한 관리는 제대로 수행되지 않고 있어 오염물질이 해양으로 유입됨에 따라 해양오염 수준이 날로 심각해지고 있음
- 현재 준설에 의해 수거된 오염퇴적물은 외해 투기나 고립처분(특정 근해에 쌓는 것)에 의해 최종 처분되고 있음
- 해양오염퇴적물 정화는 준설에 의해 침적 쓰레기 수거 후 흡입방식으로 이루어지고 오염퇴적물을 수거하여 중간처리 및 최종처리 과정을 거치는 방식을 따르고 있음
- 그러나 기존의 해양퇴적오염물질 제거 방식은 중간 처리에 시간과 비용이 많이 소요되고 2차 오염문제를 유발할 가능성이 있으며, 수거효율도 그리 높지 않은 등 개선의 여지가 많은 것으로 평가되고 있음
- 더욱이 폐기물의 해양투기로 인한 해양오염을 방지하기 위해 마련된 국제협약인 「런던협약」(London Convention, 1975년 발효)의 배출조건을 강화한 「런던협약 의정서」(우리나라는 2009년 1월 22일 가입)에 의해 2012년 이후에는 준설물질의 외해 투기가 매우 어려워질 전망으로 외해투기를 위해서는 물리적·화학적 세척 등의 중간처리가 필요하고 이에 대해 막대한 비용 증가가 예상되고 있음
- 이러한 가운데 침적 쓰레기 수거 과정에서 오염퇴적물 수층 확산, 빈번한 흡입구 막힘 현상으로 효율성이 떨어져 이를 해소하기 위한 새로운 기술개발이 필요한 실정임
- 또한 해양오염퇴적물 정화사업 해역 대부분은 선박밀집 해역으로 오염퇴적물 수거시 오탐방지막 설치로 인한 선박통행 지장으로 해역이용권자와의 마찰이 상존하므로 해역 이용권자와의 마찰을 최소화할 수 있는 수거공법 개발 및 적용이 필요함
- 이상에서 살펴본 바와 같이 런던의정서 발효 이후 오염물질의 해양투기를 위해서는 중간처리가 필수적이게 되었을 뿐만 아니라, 정화사업이 필요한 해역 중 연안매립을 위한 최종처리장 확보가 어려운 곳에 대해서는 최종처리장이 필요하지 않은 원위치처리기술 개발의 필요성이 매우 높다고 할 수 있음
- 이러한 필요성에 대해 본 연구에서는 해양오염퇴적물 정화기술 개발의 경제적 의의 분석을 통해 동 기술개발의 산업적인 과급효과 및 향후 기술개발로 획득할 수 있는 경제적 효과를 예상해 봄
- 이를 위해 본 연구에서는 해양오염퇴적물 정화사업의 직접편익과 동 사업에 투입되는 비용(외생부문의 충격)이 창출하는 경제적 과급효과(내생부문의 산출액 및 취업자 수)를 ‘투입산출분석’(input-output analysis)을 통해 계량화함
- 이렇게 산정한 비용과 편익을 기반으로 할인율을 적용한 해양오염퇴적물 기술개발 사업의 현재가치를 화폐가치로 추계하여 제시함

## (나) 해양오염퇴적물 정화기술의 경제적 의의

### ① 국내외 산업동향

- 해양오염퇴적물 정화사업은 「해양환경관리법」 상 ‘퇴적오염물질수거업’이라는 등록업으로 규정되어 있으며, 법령에 규정된 ‘퇴적오염물질전용수거선’을 사용하여 해양오염퇴적물을 수거하여 처리하고 있음

- 
- 해양오염퇴적물 정화사업 외에 현재 우리나라의 해양환경 보전과 관련된 대표적인 정책 사업으로는 2002년부터 실시 중인 오염상태가 심각한 5개 해역 (인천-시화호 연안, 광양만, 마산만, 부산연안, 울산연안)을 특별관리해역으로, 환경상태가 양호하고 보전가치가 높은 해역 (함평만, 완도-도암만, 득량만, 가막만)을 환경관리해역으로 설정한 제도가 있음
  - 그리고 마산만처럼 오염물질의 해역내 유입량이 환경수용량을 초과하여 해양환경이 지속적으로 악화되는 지역에서는 각종 오염물질 배출량의 총량이 해역의 환경수용량 범위 내에서 유지되도록 관리하는 “연안오염총량관리제도”를 도입하여 추진하고 있음
  - 아직까지 해양오염퇴적물 정화사업과 관련한 국내 시장규모는 크지 않아 2011년 현재 15개 업체가 등록되어 있는 수준임
  - 참고로 중금속, 유해화학물질 등 각종 오염물질에 의해 오염된 퇴적물의 처리에 활용 가능한 유사한 기술을 보유하고 있는 업종으로 『토양환경보전법』에 규정된 ‘토양정화업체’(2011년 현재 120개 업체가 등록)가 있음
  - 그러나 해양수산부(2004-2007)와 국토해양부 부산지방해양항만청(2008)의 국가 해양오염퇴적물 분포조사 및 오염해역 퇴적물 정화·복원 타당성 조사 결과에 의하면, 우리나라의 정화·복원이 요구되는 오염퇴적물의 물량은 18개 해역에 600만<sup>m<sup>3</sup></sup> 이상에 달해 잠재적인 시장규모가 크다고 할 수 있음
  - 해양오염퇴적물을 현재 사업이 시행 중인 부산남항 오염퇴적물 정화사업의 평균단가인 105,000원/<sup>m<sup>3</sup></sup>으로 산술적으로 환산할 경우, 약 1조원의 사업비가 소요되는 새로운 시장이 형성될 것으로 전망됨
  - 특별관리해역, 전국 무역항 등에 대한 추가 조사가 이루어질 경우, 정화소요 오염퇴적물 물량 및 시장규모도 현재의 2배 이상이 될 것으로 추정되고 있음
  - 여기에 장기적으로 해외시장성까지 고려한다면 오염퇴적물 정화 시장 규모는 더욱 커질 수 있음
  - 현재까지 시장성이 크지 않았던 해양오염퇴적물 정화·복원 관련 연구는 한경대학교, 한국해양대학교, 고려대학교, 한국해양연구원, 건설기술연구원, 포항산업과학연구원 등에 소속된 부족한 수의 전문인력들이 진행해 왔음
  - 해양오염퇴적물의 조사, 오염특성규명, 해양환경모니터링 분야는 관련 대학 및 전문 연구기관에 인력·장비 등 인프라가 갖추어져 있으나, 해양오염퇴적물 정화사업과 관련된 수거·피복 등 현장처리, 오염도 저감 등 중간처리, 최종처리에 대한 연구 인프라는 기초적인 수준에 머물러 있는 실정임
  - 정부는 2010년까지 해양오염퇴적물 정화사업에 약 1,400억 원의 사업비를 투입하였으나, 현재까지의 국내 기술개발은 주로 주민 요구를 수용하기 위한 소극적인 수준에 머물러 있는 것으로 평가됨
  - 2008년 준설물질의 해양배출 처리기준이 법제화되기 이전에는 준설 후 외해 투기의 단순한 사업 과정으로 수행되었으며, 미국·일본·유럽 등과 같은 다양한 정화기술 개발에 대한 수요가 전무했다고 볼 수 있음
  - 2008년부터 해양오염퇴적물 정화사업에서 발생된 오염 준설물질에 대한 해양 투기가 사실상 불가능하게 됨에 따라 해양투기 이외의 최종처리 방안을 마련하기 위한 수요가 발생함
  - 이에 정화사업 유사기술의 평가, 준설토 투기장에서의 최종처리지 환경관리방안 연구, 수중고립처분장 마련을 위한 설계기술 확보 등의 연구가 수행되어 왔음
-



- 주요 선진국들은 일찍부터 해양오염퇴적물 정화사업에 많은 기술적·재정적 투자를 해왔음
- 미국은 1980년 『포괄적환경배상책임법』(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act; CERCLA)에 근거한 특별기금 조성을 통해 연방정부 주도로 정화사업을 추진하고 있으며, 주정부도 자체적인 오염퇴적물 정화프로그램에 많은 예산을 투입하고 있음
- 캐나다는 연방정부가 모두 11,000 곳의 오염부지를 설정하여 2006년까지 15년간 35억 달러를 정화사업비로 사용하였으며, 2007-2013년 기간 중에는 오염퇴적물 정화사업비로 2.56억 달러를 계상하고 있음
- 독일은 오염부지 정화사업에 매년 약 5억 유로의 공공사업비를 소요하고 있음
- 일본은 역사상 최악의 수산물 수은 중독 사건인 미나마타병 사건으로 일찍이 해양오염퇴적물 정화사업을 시작했는데, 1977년 10월부터 1990년 3월까지 14년간 486억 엔을 투자함
- 현재까지도 전국 각지의 해양오염퇴적물 정화사업에 상당한 비용을 사용하고 있는 것으로 알려지고 있으며, 최근에는 『공해방지 사업비 사업자 부담법』(公害防止事業費事業者負担法)에 따라 오염 원인자가 정화사업 비용을 부담하는 사례가 증가하고 있음 (예: 시마네 현의 마카타 공업단지 부근 폐기물 처리업자 등이 이 지역 정화사업에 소요되는 비용을 부담하고 있음)

## ② 기술개발로 예상되는 경제적 효과

### ㉞ 해양오염퇴적물 정화사업 소요 비용 절감

- 현재 해양오염퇴적물 정화를 위한 수거·처리 과정에서 소요되는 비용을 낮추면서 효율성은 제고하는 정화방안을 개발해야 함
- 선진국은 해양오염퇴적물 정화사업 현장에서 최종처리장 확보의 애로 해소뿐만 아니라, 다른 최종처리 방안에 비해 평균 처리단가가 낮은 피복처리·약품처리 등 다양한 원위치 처리공법을 사용하고 있음
- 그 결과 선진국의 해양오염퇴적물 처리시 평균 단가는 약 80천원/m<sup>3</sup> (50천원/m<sup>3</sup>~130천원) 수준임에 비해, 우리나라의 현행 해양오염퇴적물 처리단가는 평균 105천원/m<sup>3</sup>이 소오 (부산남항 정화사업 사례)되며 일반 준설의 경우 약 50천원/m<sup>3</sup> 수준임
- 우리나라도 다양한 원위치 처리공법을 자체 개발하여 성공적으로 정화사업에 사용할 경우, 정화사업비의 절감을 기대할 수 있음

[표. 1-자-1] 선진국 해양오염퇴적물 처리(중간, 최종) 방법 및 비용

기술명	세부 기술	사용 국가	비용	특징	장점	단점
중	입자분리	입자분리	일본 2,000 ¥/m <sup>3</sup>	-원심분리 -여과	-입경별로 분리 -소규모 플랜트	-분리 후 오염물질이 많이 포함된 세립토 처리가 필요
	세척기술	세척정화	미국 30~40 \$/m <sup>3</sup>	-물리·화학적 방법으로 세척 -오염물질 분리	-오염물질과 오염되지 않은 퇴적물을 분리 -최종 처분량을 감축 -소규모 플랜트	-세척과정에서 폐수 발생, 처리가 필요
		토양세척	미국 29~35 \$/cy			
안정화·고형화	고화	일본	3,000~8,000	-오염퇴적물과 고화재 등 약품을 혼합하	-처리 후 건축자재로 재활용 가능	-입자분리, 세척기술에 비하여 소요 비용

기술명	세부 기술	사용 국가	비용	특징	장점	단점
간			¥/m <sup>3</sup> 2,000~8,000	여 처리	-최종 처분 시 오염물질이 유출되지 않음 -소규모 플랜트 설치가 가능	이 많음
		현장고화	일본			
		경량오니토	일본			
		고도안정	일본			
		고화	네덜란드			
		고형안정화	미국			
		시멘트고정	미국			
처리	오염물질 파괴·추출·열처리	유리화	미국 46 \$/cy	-생물학적 분해 -물리·화학적 처리 -화학, 독성물질 제거	-고온에서 휘발성 유기오염물질 제거효율이 좋음 -PCBs 등 난분해성 오염물질 제거효율이 좋음	-소요 비용이 많음 (Cost effective) -처리장치 등이 필요함 -대규모 전문 처리시설이 필요함
		소성처리	일본 7,000~15,000 ¥/m <sup>3</sup>			
		열적고정	네덜란드 45~70 유로/m <sup>3</sup>			
		용매추출	미국 219 \$/cy			
		생물정화	미국 270 \$/cy			
		탈염	미국 313 \$/cy			
		열적기체상저감	미국 426 \$/cy			
소각	미국 3 7 ~ 1,285\$/cy					
최	육상	매립	미국 2~200 \$/cy	-매립	-기존 매립장 활용 가능 -매립 후 부지 조성 등 유효활용 가능 -내륙 폐쇄수계(호수)에 매립 처분 가능 -오염퇴적물을 육상에서 생물화학적 반응에 의해 개량	-침출수 처리 필요 -토양 및 지하수 오염 우려 -준설 현장에서 내륙까지 이송에 비용과 시간이 소요
		준설, 탈수, 매립	독일 33~43 유로/m <sup>3</sup>			
		준설, 탈수, 매립	독일 10~20 유로/m <sup>3</sup>			
		토양경작	네덜란드 11~25 유로/m <sup>3</sup>			
중	연안	인공섬 조성 후 매립처분	네덜란드 8~25 유로/m <sup>3</sup>	-매립	-연안 지역 매립 후 부지 조성 등 유효활용 가능 -연안 인근 반폐쇄수계에 매립처분 가능 -수중 고립 처분장에 비해 일부만 제방을 축조하면 되므로 매립장 조성에 유리	-지형에 따라서 처분장 조성에 영향을 받음
처	수중	준설 이동배치	유럽 1~5 유로/m <sup>3</sup>	-수중 고립 처분장 조성, 배치 후 피복	-준설 현장 주위에 적지가 있을 경우 고립 처분장 조성 용이	-전처리한 오염퇴적물을 수중 고립 처분장에 배치할 때 오염

기술명	세부 기술	사용 국가	비용	특징	장점	단점	
리					-자연적으로 오목한 지형인 경우, 처분장 조성 없이 배치한 다음 피복으로 처분 가능 -피복재로 처분장 위의 오염되지 않은 토사를 사용할 수 있음	-물질이 주위에 확산되거나 해류에 의해 이동할 수 있음 -처분 후 모니터링 필요 -만수중처분일 경우 오염물질이 해수로 유출될 가능성이 있음	
		반수중처분 (Subaqueous disposal)	유럽	7~36 유로/m <sup>3</sup>			
		모래분리반수중처분	유럽	9~17 유로/m <sup>3</sup>			
		현장피복	미국	10 ~ 4만 \$/Acre			
	처리 후 재활용	METHA 처리	독일	15~20 유로/m <sup>3</sup>	-오염물질들의 열분해 -생물·화학적 반응에 의한 오염물질 제거 -소결	-처리된 오염퇴적물을 성형 후 고온에서 소성처리에 의해 오염물질들이 열분해로 제거	-여러 단계의 처리 필요 -소요 비용이 많음 -재활용품을 소비할 시장이 필요 -재활용품에 관한 법규가 미비
		경량골재 생산	유럽	15~32 유로/m <sup>3</sup>			
		블럭생산	유럽	15~20 유로/m <sup>3</sup>			
		고형물 생산	유럽	20~40 유로/m <sup>3</sup>			

자료: 국토해양부(2008)

#### ㉠ 해양오염퇴적물 정화사업 추진에 따른 해역의 부가가치 증대

- 해양오염퇴적물 정화를 통해 얻을 수 있는 효과로는 해양환경 개선으로 지역주민 생활환경 개선 및 관광·레저 등 다양한 목적으로 해역이용 활성화와 해역이용의 부가가치 상승을 기대할 수 있음
- 즉 해양오염퇴적물이 제거되면 수질개선 및 악취 감소 등을 통해 지역주민의 생활환경이 개선되고 해당지역에 대한 관광 및 레저산업이 활성화됨에 따라 지역의 부가가치가 상승하게 됨
- 예를 들어 연안 등지에서 포획되는 낙지 같은 수산물 내에 식품안전 기준치를 초과하는 양의 카드뮴 등 중금속이 포함되어 있거나 홍게에 폐기물이 부착되는 문제가 언론에 보도된 바 있는데, 해양오염퇴적물 정화사업을 통해 이러한 문제가 해소된다면 관련 지역의 수산업이 보다 활성화될 수 있어 단순히 환경이 개선되는 효과를 넘어 해양의 경제적 가치가 크게 증대되는 실질적 효과도 거둘 수 있을 것임

#### ㉡ 산업연관효과를 통한 연구·개발의 시너지 효과

- 해양오염퇴적물 정화기술 개발 및 사업시행 과정에서 해양 대형 토목구조물 설계·시공기술 등과 관련된 건설업 부문, 연구사업 부문, 기타 화학·생물학적 기술과 관련된 산업에 이르기까지 해양오염퇴적물 정화복원과 관련된 직·간접적인 경제활동부문에 대한 산업연관효과를 통한 연구·개발의 시너지 효과를 기대할 수 있음

#### ㉢ 해양오염퇴적물 정화기술 국제 경쟁력 제고

- 기술개발을 통해 국내 해양오염퇴적물 정화기술의 선진화와 신기술의 해외시장 진출이 가능함
- 산업화가 급속도로 진전되고 있는 중국과 동남아시아 지역에서는 현재 하천, 호수, 연안 등의 오염퇴적물 정화사업이 시작 또는 준비 단계에 있으므로 관련 기술을 개발하여 산업화할 경우 향후 해외시장 개척이 가능함

---

## (다) 해양오염퇴적물 정화기술 개발의 경제성 평가

### ① 해양오염퇴적물 정화사업 경제성 분석의 특성

- 거시적 관점에서 해양오염퇴적물 정화사업의 성과는 먼저 경제적 가치를 지닌 기술발전의 형태로 나타나고 다음으로 상용화를 통한 경제적 잉여의 창출을 가져와 궁극적으로 경제성장에 기여한다고 볼 수 있음
- 그러나 모든 기술개발사업에 대한 투자가 경제적 가치를 지니는 것은 아니므로 사업의 시행에 앞서 투입 대비 산출, 비용 대비 편익 등에 대한 파악이 전제되어야 함
- 그리고 이러한 사업의 경제성 분석은 투자와 관련된 직·간접적인 투입과 산출, 비용과 편익을 화폐가치로 측정하는 것은 물론 기술가치와 시장성 등을 종합적으로 파악하여 실현 가능성을 충분히 검토하는 과정을 포함함
- 그런데 본 연구에서 의도하는 경제성 분석은 다음과 같은 세 가지 특징을 가지고 있음
- 첫째, 본 연구는 상용화를 전제로 미래의 가상적 상황에 대한 경제적 가치를 추정하는 것으로서 비용-편익 분석에 대한 경제성 추정의 정확도를 보완할 필요가 있다는 점임
- 특히 화폐가치로의 환산이 어려운 환경문제에 대한 고려가 필요함
- 둘째, 해양오염퇴적물 정화사업은 국민의 세금으로 재원이 조달되는 공공사업으로 사업의 수혜대상 역시 국가적 후생의 증가를 누리는 국민이라는 점임
- 셋째, 해양오염퇴적물 정화사업에 대한 정부차원의 지원은 직접적으로 해당 산업의 생산 및 부가가치 창출, 고용창출을 유발하는 효과 외에도 국가적으로는 기술의 선점효과에 대한 투자 성격을 동시에 지니고 있다는 점임
- 즉 해양오염퇴적물 정화사업은 국가적으로 매우 중요하며 연구개발을 포함하여 많은 사업비가 요구됨에도 불구하고 단기적인 화폐이익의 실현이 불확실하여 민간부문에서 이를 적극적으로 추진할 유인을 가지지 못하는 문제를 내포하고 있음
- 대부분의 공공사업이 일정한 가치를 가지고 추진되나 모든 투자가 기회비용을 수반한다는 점에서 대안적인 사업간 효율성 비교를 통해 정책이 결정되어야 할 것임
- 그런데 이러한 정책결정에 있어서의 문제는 공공사업의 ‘비용’(cost)은 공적자금의 투입액으로 파악이 가능하지만, ‘편익’(benefit)은 사업의 특성상 시장가격기구를 통하여 직접적으로 표현되지 않는다는 특성을 지닌다는데 있음
- 또한 미래의 산업구조 변화, 수요변화, 가격변화 등 분석대상과 관련된 시장여건이 불확실한 상태에서 이루어지는 경제성 분석은 많은 불확실성을 내포하고 있다고 할 수 있음
- 특히 해양오염퇴적물 정화사업과 같은 공공사업의 추진은 기업 등 영리조직의 의사결정과는 차이가 큼
- 영리조직은 사업별로 예상 수익과 비용을 분석하여 순이익이 기대되는 사업을 추진하지만, 정부는 공공사업을 통하여 자신의 이익을 추구하는 것이 아니라 국민의 복지와 경제적 이익을 추구하는 것이므로 공공사업의 결과는 시장에서 평가되지 않는 편익을 고려해야 하기 때문임
- 경우에 따라서는 사업을 시행함으로써 얻게 되는 자산의 시장가격을 적용하거나 사업시행에 따라 절감되는 예산을 측정하여 사업의 수익성을 평가하는 것이 전혀 불가능한 것은 아니나, 일반적으로 시장에서 평가되지 않는 공공재의 영역에서는 시장가격을 통한 수익성 평가가 정확하지 않을 가능성이 많음
- 특히 해양오염퇴적물 정화사업과 같은 경우 환경이라는 변수를 수반하기 때문에 시장가격을 통한 수익성 평가가 어려운 공공사업이라고 할 수 있음

- 본 장에서는 이러한 경제적 불확실성을 수반하는 해양오염퇴적물 정화사업의 추진이 비용-편익의 관점에서 수지가 있는지 여부를 분석함
- 즉 해양오염퇴적물 정화사업에 소요되는 예상 비용과 직접적 편익 및 산업연관분석 측면에서의 간접편익을 중심으로 동 사업의 경제적 타당성을 평가해 봄

## ② 비용편익분석의 개요

- 지속가능한 개발이 국가정책의 중요한 관심사로 부각되면서 중앙정부나 지방자치단체가 실시하고 있는 공공투자사업에 대한 타당성 문제가 항상 관심사가 되고 있음
- 비용-편익분석은 이처럼 논쟁의 소지가 있는 정책에 대해 사업적 타당성을 판단하기 위한 중요한 근거로 널리 사용되고 있는 방법으로, 경영에서 직접적으로 발생하는 비용과 편익만이 산정되는 기업 차원의 투자 산출과는 달리 공공투자에 있어서는 이 정책을 통해 제3자에게 발생하는 효과도 고려 대상이 됨
- 비용-편익분석 기법은 어떠한 정책사업을 평가하고 서로 다른 정책제안들에 대해 우선순위를 부여하기 위한 도구로서 정책결정자들에게 유용하게 이용되고 있음
- 비용-편익 분석이 미흡할 경우 다수 공공사업의 경제적 타당성에 대한 불확실성을 키워 정책적 정당성에 대한 신뢰를 낮추게 하는 결과를 초래하게 되므로 제대로 된 절차와 과정에 따라 경제성을 평가하는 것이 매우 중요함
- 비용-편익 분석은 공공부문에 있어서 자원의 이용은 경제적 효율성에 의존한다는 인식에서 출발하므로 어떤 사업은 정책수단을 통해 달성 가능한 추가적인 편익이 그에 소요되는 추가비용을 넘어설 때에야 경제적으로 합리적이라는 평가가 내려지게 됨
- 국가시책은 재정수단과 연관되어 있기 때문에 한정적인 자원을 경제적 순편익이 최대가 될 수 있도록 만족도가 가장 높은 곳에 투입해야 함
- 가장 기본적인 비용-편익분석 방식은 편익(B)의 현재가치에서 비용(C)의 현재가치를 뺀 것으로 정의되는 ‘순현재가치’(net present value, NPV)가 양(+)의 값을 가질 때 해당사업이 경제성이 있는 것으로 평가하는 것임

$$NPV = \frac{B_0 - C_0}{(1+r)^0} + \frac{B_1 - C_1}{(1+r)^1} + \dots + \frac{B_n - C_n}{(1+r)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t},$$

(여기서  $t=0, 1, 2, \dots, n$ ,  $r$ 은 사회적 할인율,  $n$ 은 사업의 기간을 의미)

- 이 같이 순현재가치가 널리 사용되는 평가기준이기는 하지만 대규모 사업일수록 유리한 결과를 나타내는 한계가 있음
- 이러한 문제 때문에 총편익의 현재가치(B)와 총비용의 현재가치(C)의 비율로 경제적 효과를 판별하는 ‘편익-비용 비율’(benefit-cost ratio)이 자주 이용됨. 즉

$$\frac{B}{C} = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} / \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

- 비용-편익 분석에 있어서는 비용과 편익의 구성요소를 잘 파악하는 것이 중요한 문제임
- 첫째, 사업의 비용은 연구비, 개발비, 사업준비과정에 소요되는 비용, 투자비용, 사업유지 및 운영비용과 같은 “직접비용”과 사업계획기간 중 제3자에게 발생하는 간접비용으로 구

---

분됨

- 둘째, 사업의 편익은 자금이 투자되어 해당 사업으로부터 직접 발생하는 직접편익과 사업으로부터 직접 이득을 얻는 사람들이 아닌 제 3자에게 발생하는 간접편익으로 구분됨
- 다음으로 비용-편익분석 절차에서 중요한 단계 중 하나는 비용과 편익요소에 대한 화폐 가치화 작업임
- 경제 전체적인 측면에서 합리적이라고 판단되는 정책수단은 해당 정책의 도입에 의해 추가적으로 발생하는 편익이 여기에 드는 추가비용(한계비용)보다 높아야 하는데, 사회적 이득과 손실에 관한 정보는 일반적인 화폐단위로 표시됨으로써 비로소 체계적으로 비교될 수 있기 때문임
- 한편 공공사업에서 비용-편익 분석을 적용할 때 시차를 두고 발생하는 편익과 비용의 비교 가능성에 대한 문제가 발생함
- 예를 들어 비용은 초기에 집중적으로 발생하는데 비해 편익은 여러 해에 걸쳐 나타나는 것이 일반적이므로 비용과 편익을 서로 비교 가능하도록 만들기 위해서는 이들을 하나의 공통된 시점을 기준으로 환산해야 하는데, 이와 같은 시차에 의한 문제는 ‘할인율’(discount rate)을 이용하여 해결하게 됨
- 즉 할인율이란 상이한 시점에서 발생하는 수익이나 비용을 동일한 시점에서의 가치로 환산하는데 이용하는 환산율로써 평가하고자 하는 대안의 비용-편익 요소가 경상가격으로 표시되었을 경우에는 명목할인율을 사용하여 다음과 같이 정의되는 할인계수를 이용하여 평가함

$$\text{할인계수} = \frac{1}{(1+r)^t}$$

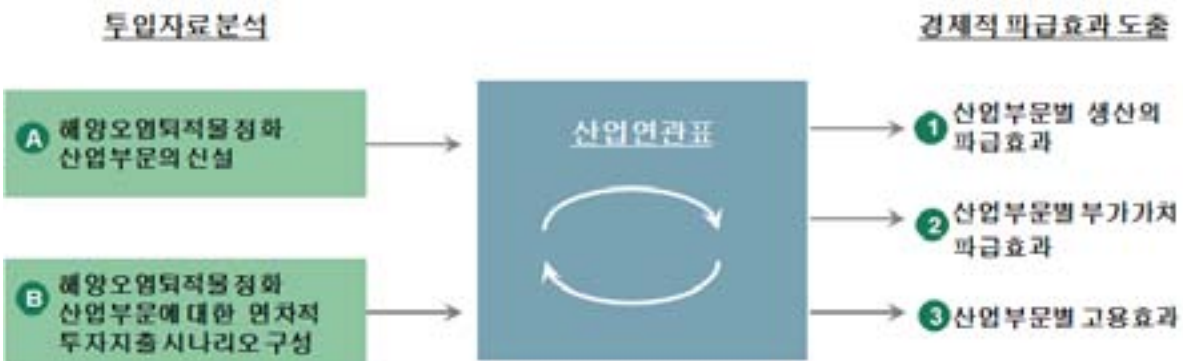
(단  $r$ 은 할인율,  $t=0, 1, 2, \dots, n$ ,  $n$ 은 사업 기간을 의미)

- 이론적으로 적정할인율 수준은 유사한 기존의 투자에서 요구되고 있는 수익률을 유추하여 적용하며 이는 해당 투자를 선택함으로써 다른 사업에 투자할 기회를 잃게 된다는 것을 반영한 것으로서 결국 의사결정자의 기회비용으로 해석될 수 있음
- 자본·금융시장이 잘 발달되어 있는 경우에는 각 경제주체들이 자본 또는 금융시장에서 요구하는 수익률이 각자의 기회비용을 가장 적절히 반영하게 되므로 자본의 가중평균비용을 할인율로 사용하는 것이 바람직함
- 할인율이 높은 경우 장기적인 사업의 결과는 별로 좋지 않게 나오는데 이것은 미래의 화폐크기에 대한 현재가치가 낮게 평가되어 현재비용이 미래의 편익보다도 높게 평가되기 때문임
- 따라서 너무 낮은 할인율이 선택되면 사회적으로 바람직하지 못한 규제나 투자가 시행될 수 있고 반대로 너무 높은 할인율이 선택되면 사회적으로 바람직한 규제나 투자가 시행되지 않을 가능성이 있음
- 본고에서 사업자 관점의 평가에 적용되는 경제성은 비용과 편익의 비율에 의해 판정하며, 비용과 편익의 현재가치(PV)는 특정시점  $t$ 에서의 가치인  $V_t$ 에 할인계수를 곱해서 구함.  
즉

$$PV = V_t \cdot \frac{1}{(1+r)^t}$$

### ③ 산업연관분석

- 일반적으로 한 재화나 서비스의 생산에 있어 각 산업은 원재료의 거래관계를 토대로 직·간접적으로 상호 연관되어 있으며, 생산활동을 통해 이루어지는 이러한 산업간의 상호의존 관계를 수량적으로 파악하는 분석 방법이 바로 ‘투입-산출분석’(input-output analysis) 혹은 산업연관분석임
- 산업연관분석은 선형연립방정식 체계로 이루어진 일반균형 모형에 기초를 두고 있으며, 각 선형방정식은 한 산업의 생산물이 경제 전체에 배분(수요)되는 구조를 나타내기 때문에 산업간 연관성을 고려하여 특정 목적 사업에 대한 계량적 평가를 가능하게 해준다는 측면에 그 유용성을 평가받고 있음
- 투입-산출모형은 세분화된 경제 지역과 부문에서 수집된 데이터를 이용하여 만들어지며, 통상 국가 단위에서 연별로 거래된 상품의 화폐단위로 측정 표기한 산업연관표를 기본으로 분석이 이루어지게 됨
- 생산된 물품은 생산부문간 거래에 의한 중간재로서의 소비 외에도 가계·정부·해외 등 외생적인 구매자들의 최종수요를 충족시키는데 사용되기도 함
- 해양오염퇴적물 정화기술 개발은 다양한 분야의 기술적 융합과 인프라 구축 등 체계적인 시스템을 필요로 함
- 해양오염퇴적물 정화기술 개발 및 사업시행 과정에서 대형 토목구조물 설계·시공기술 등과 관련된 건설업 부문, 연구사업 부문, 기타 화학·생물학적 기술과 관련된 산업에 이르기까지 해양오염퇴적물 정화 복원과 관련된 직·간접적인 경제활동부문에 대한 산업연관 효과를 통한 연구·개발의 시너지 효과를 기대할 수 있음
- 연구에서는 그림 I-아-1과 같이 산업연관분석을 통해 해양오염퇴적물 정화기술 개발의 국내 전 산업부문에 걸친 경제적 파급효과를 분석함
- 이를 위해 한국은행의 『산업연관표』(2009년 연장표 기준자료)를 이용하여 생산, 부가가치, 고용의 파급효과를 계량화함



[그림. I-자-1] 투입-산출분석의 흐름도

- 한편 투입-산출분석은 1년 동안 국민경제 내에서 발생하는 재화와 서비스의 생산 및 처분과 관련된 모든 거래내역을 내생변수로 하여 내생부문과 관계없이 결정되는 외생부문 값의 변동이 이들 내생변수 값에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴봄으로써 국민경제적 파급효과를 설명함
- 따라서 산업연관표를 이용하여 해양오염퇴적물 정화기술 개발 사업의 생산·부가가치·고용 등 측면에서 국내 산업에 미치는 파급효과를 추정하기 위해서는 통상적으로 단계별 투자소요 금액 및 관련 산업부문을 내생부문에서 외생부문으로 이동 설정하여 파급효과

분석을 위한 투입산출구조로 사용하여야 함

- 이상과 같은 외생부문의 충격 각각이 내생부문의 산출액 및 취업자수에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해 다음의 그림 I-아-2와 같이 n개의 국산중간투입내역을 국산 부문과 수입부문을 합친 총투입액으로 나눈 내생산업부문의 투입계수행렬( $A_{nm}^d$ )과 1개의 외생부문 투자액(산출액) 벡터( $Y_{n,1}$ )로 구성된 투입산출표를 고려함
- 여기에서 투입계수행렬은 수입된 재화나 서비스로 인한 산출효과를 배제하고 일정액의 생산활동이 “국내” 산업 각 부문에의 산출, 부가가치, 고용에 미치는 직·간접적인 파급효과를 측정하기 위해 수입거래금액을 제외한 국산투입계수를 사용함

	산출		노동계수
투입	내생부문	외생부문	$l_{n,1}$
	$A_{nm}^d$	$Y_{n,1}$	
	부가가치	$v_{1,n}$	

[그림. I-자-2] 투입-산출분석의 데이터 구조

주: 내생 산업부문행렬( $A_{nm}^d$ )의 각 열의 각 셀은 생산물 한 단위를 생산하기 위하여 필요한 각 산업부문 생산물의 크기를 나타내는 투입계수임

- 한편 분석에는 상품생산을 위한 중간투입 구조와 함께 산업별 부가가치 계수의 행벡터( $v_{1,n}$ ) 및 노동계수의 열벡터( $l_{n,1}$ )를 이용함
- 이 중 부가가치 계수는 총 산출액(투입액) 중 피용자보수·영업잉여·고정자본소모 등 생산활동에 노동과 자본을 제공하는 경제주체들에 귀속되는 소득에 관한 정보(기능적 소득분배)를 제공함
- 그리고 노동계수는 단순히 피용자(임금근로자)만을 의미하는 고용계수의 개념에 자영업자와 무급가족 노동자까지 포함하는 포괄적인 개념으로써의 취업계수를 사용함
- 아래에서 수행하게 될 경제적 파급효과는 해양오염퇴적물 정화기술 개발 사업의 추진으로 인한 국민경제활동의 변화를 의미하며, 총산출, 총부가가치, 고용창출에 의해 계량화됨
- ‘총산출’(total output)은 국민경제내 모든 소비의 합으로 정의되며, 최종재 생산에 중간재로 판매되는 중간수요를 포함함
- 총생산 유발효과:  $X^d = (I - A^d)^{-1}Y$  (여기서  $I$ 는 주대각원소가 1이고 그밖에 요소는 모두 0인 단위행렬)
- ‘총부가가치’(gross value added)는 GDP의 대리변수로서 산업부문별 산출액에서 생산을 위해 투입된 중간비용을 공제한 것으로 피용자보수, 영업잉여, 고정자본소모, 순생산세의 합으로 정의됨
- 부가가치효과:  $V = \hat{v} X^d$  (여기서  $\hat{v}$ 는 부가가치계수의 대각행렬)
- ‘고용’(employment)은 신규 투자사업이 유발하는 추가적인 고용증가의 합으로 정의됨
- 취업유발효과:  $Lw = \hat{l} X^d$  (여기서  $\hat{l}$ 는 취업유발계수의 대각행렬)
- 해양오염퇴적물 정화기술 개발 사업의 생산·부가가치·고용효과를 계산해 내기 위해서는 기존의 산업 부문(28 대분류기준 경제활동부문)을 확장하여 한국은행의 403 경제활동부문기분표에 근거하여 해양오염퇴적물 기술과 관련된 부문(이하 해양오염퇴적물정화부문



또는 정화부문)을 별도로 분리 추출하여 설정하여야 함

- 이를 통해 해양오염퇴적물정화부문이 동 부문 이외의 여러 경제활동부문의 산출물을 중간재로 수요한다고 보고 해양오염퇴적물정화부문이 직·간접적으로 여타 부문의 생산활동에 미치는 영향을 분석할 수 있음
- 즉 이 경우의 생산유발효과는 해양오염퇴적물정화부문에서 1단위의 생산 또는 투자 등 최종수요가 발생하였을 때 여타 부문에서 발생하는 생산액의 증가를 총합한 효과이고, 부가가치유발효과는 생산유발효과와 마찬가지로 해양오염퇴적물정화부문에서 1단위의 생산 또는 투자 등 최종수요가 발생하였을 때 여타 부문에서 발생하는 부가가치 즉 GDP의 증가를 총합한 효과이며, 취업유발효과는 해양오염퇴적물정화부문에서 10억 원에 해당하는 생산 또는 투자 등 최종수요가 발생하였을 때 여타 부문에서 발생하는 취업자 수의 총 증가 효과를 나타냄
- 해양오염퇴적물 정화기술 중 피복정화기술을 실시하기 위해서는 현장시공 인프라 구축과 관련하여 오염퇴적층의 격리 등을 위해 선박이나 특수기계를 필요로 하고, 기타 하역 여건, 접하 여건 인프라와 장비가 소요됨
- 이를 감안하여 본 연구에서의 해양오염퇴적물정화부문은 403부문 산업연관표에서 239부문(기타특수목적용기계), 282부문(기타 선박), 311부문(항만시설), 315부문(농림수산물목), 319부문(기계조립설치), 320부문(기타건설)을 포함함
- 한편 산업연관분석을 위해 해양오염퇴적물정화부문에서의 최종지출액이 시설투자가 집중되는 1차년도에 초기투자비용으로 85%가 사용되고 나머지 15%는 사업운영비로 이후 9년간 균등 배분된다고 가정함
- 즉 1차년도 6,426억 원, 나머지 9개년 도에 연도별로 126억 원씩 투자된다고 가정함

이상과 같은 시나리오 하에서의 산업별 총생산효과가 <표 I-아-2>에 나타나 있는데, 시설투자가 이루어지는 1차년도에 1조 3,469억원의 직·간접 생산유발효과가 발생하고, KDI 예산타당성분석에서와 같이 연간 할인율을 5.5%로 동일하게 적용하였을 때 이후 사업운영비가 투입되는 9년간 1,836억원 등 10년간 총 1조 5,305억원의 생산유발효과가 발생함

즉 생산유발효과는 실제 소요사업비의 약 2배 수준으로 나타났으며, 이를 산업별로 살펴보면 최종수요 발생으로 직접효과의 영향을 많이 받는 정화부문이 가장 큰 생산유발효과를 보이며, 다음으로 1차금속제품, 금속제품, 부동산 및 사업서비스, 일반기계, 화학제품, 도소매 등의 순으로 생산유발효과가 큰 것으로 나타남

[표. I-자-2] 해양오염퇴적물 정화사업의 생산유발효과

(단위: 백만원)

	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차 년도	7차 년도	8차 년도	9차 년도	10차 년도	연도 합계
농림수산물	3,032	56	53	51	48	45	43	41	39	37	3,445
광산품	4,012	75	71	67	64	60	57	54	51	49	4,559
음식료품	4,621	86	81	77	73	69	66	62	59	56	5,251
섬유및가죽제품	3,493	65	62	58	55	52	50	47	45	42	3,970
목재및종이제품	9,278	172	163	155	147	139	132	125	119	112	10,542
인쇄및복제	1,614	30	28	27	26	24	23	22	21	20	1,834
석유및석탄제품	31,844	592	561	532	504	478	453	429	407	386	36,185
화학제품	44,934	835	792	750	711	674	639	606	574	544	51,060
비금속광물제품	34,969	650	616	584	554	525	497	471	447	424	39,736
제1차금속제품	178,809	3,323	3,150	2,986	2,830	2,683	2,543	2,410	2,285	2,165	203,184
금속제품	67,290	1,251	1,185	1,124	1,065	1,010	957	907	860	815	76,462

일반기계	49,314	916	869	823	780	740	701	665	630	597	56,036
전기및전자기기	27,414	509	483	458	434	411	390	369	350	332	31,151
정밀기기	6,906	128	122	115	109	104	98	93	88	84	7,847
수송장비	11,929	222	210	199	189	179	170	161	152	144	13,555
기타제조업제품	2,459	46	43	41	39	37	35	33	31	30	2,794
전력가스및수도	16,719	311	295	279	265	251	238	225	214	202	18,997
건설	1,977	37	35	33	31	30	28	27	25	24	2,247
도소매	36,460	678	642	609	577	547	518	491	466	442	41,430
음식점및숙박	9,288	173	164	155	147	139	132	125	119	112	10,554
운수및보관	22,143	412	390	370	350	332	315	298	283	268	25,161
통신및방송	8,450	157	149	141	134	127	120	114	108	102	9,602
금융및보험	23,408	435	412	391	371	351	333	316	299	283	26,599
부동산및사업서비스	57,281	1,065	1,009	957	907	859	815	772	732	694	65,089
공공행정및국방	289	5	5	5	5	4	4	4	4	4	329
교육및보건	7,372	137	130	123	117	111	105	99	94	89	8,376
사회및기타서비스	9,220	171	162	154	146	138	131	124	118	112	10,477
기타	17,298	322	305	289	274	260	246	233	221	209	19,656
정화부문	655,037	12,174	11,540	10,938	10,368	9,827	9,315	8,829	8,369	7,933	744,330
총 계	1,346,859	25,032	23,727	22,490	21,318	20,207	19,153	18,155	17,208	16,311	1,530,460

주: 연차별 금액은 연간할인율을 5.5%로 적용한 수치 기준임

- 정화사업의 실시로 인해 예상되는 부가가치 유발효과 규모는 10년간 총 4,887억 원에 달하는 것으로 예상됨
- 부가가치 유발효과에 경우도 정화부문의 최종수요가 발생함에 따라 정화부문이 가장 크게 나타났으며, 이어서 부동산 및 사업서비스, 1차금속제품, 도소매, 금속제품, 금융 및 보험, 일반기계 등의 순으로 부가가치 유발효과가 큰 것으로 나타남

[표. I -자-3] 해양오염퇴적물 정화사업의 부가가치 유발효과

(단위: 백만원)

	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차 년도	7차 년도	8차 년도	9차 년도	10차 년도	연도 합계
농림수산물	1,581	29	28	26	25	24	22	21	20	19	1,797
광산품	2,347	44	41	39	37	35	33	32	30	28	2,667
음식료품	1,175	22	21	20	19	18	17	16	15	14	1,335
섬유및가죽제품	1,042	19	18	17	16	16	15	14	13	13	1,183
목재및종이제품	2,547	47	45	42	40	38	36	34	33	31	2,894
인쇄및복제	629	12	11	10	10	9	9	8	8	8	714
석유및석탄제품	6,465	120	114	108	102	97	92	87	83	78	7,347
화학제품	9,016	168	159	151	143	135	128	122	115	109	10,245
비금속광물제품	10,620	197	187	177	168	159	151	143	136	129	12,068
제1차금속제품	26,469	492	466	442	419	397	376	357	338	321	30,077
금속제품	18,184	338	320	304	288	273	259	245	232	220	20,663
일반기계	12,967	241	228	216	205	194	184	175	166	157	14,734
전기및전자기기	5,771	107	102	96	91	87	82	78	74	70	6,558
정밀기기	1,763	33	31	29	28	26	25	24	23	21	2,003
수송장비	2,834	53	50	47	45	43	40	38	36	34	3,220
기타제조업제품	693	13	12	12	11	10	10	9	9	8	787
전력가스및수도	4,850	90	85	81	77	73	69	65	62	59	5,511
건설	790	15	14	13	13	12	11	11	10	10	898
도소매	21,303	396	375	356	337	320	303	287	272	258	24,207
음식점및숙박	3,525	65	62	59	56	53	50	48	45	43	4,005
운수및보관	8,301	154	146	139	131	125	118	112	106	101	9,433

통신및방송	3,734	69	66	62	59	56	53	50	48	45	4,243
금융및보험	12,990	241	229	217	206	195	185	175	166	157	14,760
부동산및사업서비스	38,881	723	685	649	615	583	553	524	497	471	44,181
공공행정및국방	195	4	3	3	3	3	3	3	2	2	221
교육및보건	4,891	91	86	82	77	73	70	66	62	59	5,557
사회및기타서비스	4,706	87	83	79	75	71	67	63	60	57	5,348
기타	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
정화부문	221,840	4,123	3,908	3,704	3,511	3,328	3,155	2,990	2,834	2,687	252,080
총계	430,106	7,994	7,577	7,182	6,808	6,453	6,116	5,797	5,495	5,209	488,738

주: 연차별 금액은 연간할인율을 5.5%로 적용한 수치 기준임

- 한편 해양오염퇴적물정화사업의 총생산유발효과(10년간 1조 5,305억원)에 취업유발계수의 대각행렬을 곱해서 구한 전산업의 고용창출효과는 9,858명에 이르는 것으로 분석됨<sup>23)</sup>
- 산업부문별로는 정화사업이 전체 고용효과의 43.2%로 가장 높게 나타났으며, 이어서 노동집약적인 산업인 광산품, 도소매, 부동산 및 사업서비스, 금속제품, 운수 및 보관업 등의 순으로 나타남

[표. I -자-4] 해양오염퇴적물 정화사업의 취업유발효과

(단위: 명)

	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차 년도	7차 년도	8차 년도	9차 년도	10차 년도	연도 합계
농림수산물	99	2	2	2	2	1	1	1	1	1	112
광산품	1586	29	28	26	25	24	23	21	20	19	1802
음식료품	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
섬유및가죽제품	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27
목재및종이제품	36	1	1	1	1	1	1	0	0	0	41
인쇄및복제	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
석유및석탄제품	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
화학제품	89	2	2	1	1	1	1	1	1	1	101
비금속광물제품	111	2	2	2	2	2	2	2	1	1	126
제1차금속제품	137	3	2	2	2	2	2	2	2	2	156
금속제품	337	6	6	6	5	5	5	5	4	4	383
일반기계	184	3	3	3	3	3	3	2	2	2	209
전기및전자기기	60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	68
정밀기기	39	1	1	1	1	1	1	1	1	0	44
수송장비	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
기타제조업제품	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
전력가스및수도	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
건설	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
도소매	853	16	15	14	13	13	12	11	11	10	969
음식점및숙박	192	4	3	3	3	3	3	3	2	2	218
운수및보관	217	4	4	4	3	3	3	3	3	3	247
통신및방송	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25
금융및보험	122	2	2	2	2	2	2	2	2	1	139
부동산및사업서비스	460	9	8	8	7	7	7	6	6	6	522
공공행정및국방	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
교육및보건	104	2	2	2	2	2	1	1	1	1	118
사회및기타서비스	144	3	3	2	2	2	2	2	2	2	164
기타	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
정화부문	3745	70	66	63	59	56	53	50	48	45	4255
총계	8675	161	153	145	137	130	123	117	111	105	9858

- 그러나 투입-산출분석을 이용한 정책효과의 분석에 있어 다음과 같은 해석상의 한계에 주목할 필요가 있음
- 첫째, 투입-산출분석은 가격변수를 이용하지 않고 경제주체의 행태를 오로지 선형으로만 가정하기 때문에 생산증가에 따른 가격의 하락 등 변화를 고려한 동태적이고 중·장기적인 효과를 정확하게 반영하지 못한다는 한계가 있음
- 둘째, 투입-산출계수 자체에 지출·수입 행태에 관한 구체적인 정보가 나타나 있지 않을 뿐만 아니라, 승수분석의 경우 효용극대화·이윤극대화 등의 가정을 통해 경제주체의 의사결정이 직접적으로 경제에 영향을 미칠 수 없는 구조임
- 예컨대 투입-산출표의 열은 해당 산업부문이 특정년도의 소득으로 행 계정들의 상품을 구입하고 간접세를 납부하는 등의 경제행위를 기록하나, 그 산업에서 왜 소득을 이러한 방식으로 지출하였는가를 나타내지는 못함
- 셋째, 투입산출분석은 생산측면에서의 유발효과만을 설명하는 것으로 소득을 통해 유발되는 파급효과를 파악하지 못하기 때문에 추계결과가 실제의 국민경제적 파급효과를 과소평가하고 있을 가능성도 내포함
- 넷째, 경제적 파급효과는 한 부문의 투입과 산출 간 연관관계를 나타내는 기술계수가 고정된 규모수익 불변의 법칙 하에서 계산되기 때문에 규모의 경제를 감안할 경우 그 정도의 차이가 발생할 수밖에 없음

#### ④ 비용편익분석에 의한 경제성 평가

- 해양오염퇴적물 정화사업의 경제적 가치를 분석하는데 있어 해양오염퇴적물의 정화에 소요되는 비용과 이를 통해 얻을 수 있는 편익을 화폐가치로 측정하는 것은 매우 어려운 문제임
- 이는 최근 일본에서 발생한 대지진의 여파로 손상된 핵발전소가 유발한 환경오염이 세계적인 문제로 확산되면서도 아직까지 신뢰할만한 피해 금액의 추정치가 제시되지 못하고 있는 데서도 잘 알 수 있음
- 시장가격이 존재하는 경우 시장가격에 서비스 변화량을 곱해서 비용과 편익의 화폐가치를 측정할 수 있으나(주로 사적 편익 및 비용이 이에 해당함), 환경 편익과 비용은 화폐가치로 측정하기 어려움
- 따라서 본 연구에서는 다음에서 설명하는 가정과 시나리오를 통해 비용요인과 편익요인을 식별하고 화폐가치화 함
- 먼저 현행 부산남항정화사업을 예로 들면 해양오염퇴적물의 평균처리단가는 105천원/ $m^3$ 으로 선진국에 비해 약 1.3배 높은 수준으로 파악됨
- 미국과 같은 선진국의 경우 해양오염퇴적물 처리(중간 및 최종)시 5,000원/ $m^3$ -130,000원/ $m^3$  정도가 소요되어 중간 단가는 약 80,000원/ $m^3$  수준으로 파악되고 있음
- 그리고 우리나라의 해양오염퇴적물 양이 약 800만-1,000만 $m^3$ 에 달한다는 추정규모를 수용한다면 이를 기준으로 다음과 같이 해양오염퇴적물 정화사업의 비용을 산정해 볼 수 있음
- 먼저 원위치처리공법을 국내에서 개발하여 해양오염퇴적물 정화사업에 이용하는 경우 최소 20% 이상의 정화사업비 절감효과가 발생할 것으로 추정되고 있는데, 이에 따라 처리단가가 84,000원/ $m^3$  수준이 되면 선진국 평균 단가수준에 근접하게 될 것으로 예상해 볼 수 있음

- 다음으로 퇴적물 양에 정화사업비의 평균치를 곱하면 해양오염퇴적물 처리정화에 드는 비용이 6,720억-8,400억 원 수준으로 중간 값을 취할 경우 약 7,560억 원에 이를 것으로 추산됨
- 한편 해양오염퇴적물이 제거되면 수질개선과 해양경관의 개선이 이루어지고 이로 인해 사회적으로 다음과 같은 직접적 편익의 발생이 기대됨
- 첫째, 주변 해역이 청정화 됨에 따라 수영·낚시 등의 해양스포츠 활동이 활발해 짐
- 둘째, 청정화된 해양으로부터 식용에 적합한 어류의 포획 가능성이 제고됨에 따라 주변 해역에서의 어업생산성이 증가함
- 수질개선에 의해 지역주민 등이 얻게 되는 직접적인 편익을 화폐가치로 환산하기 위해 다음과 같은 실증사례를 인용함
- 즉 기존 연구에 의하면 Thunder Bay 등 미국 하천 연안 17개소에 대한 퇴적물 처리에 의한 직접 편익으로 볼 수 있는 해양스포츠, 어업활동, 어업관련 스포츠, 경관개선 등의 효과가 지니는 평균 가치가 미화 약 1천만 달러(1989년 기준)에 달하는 것으로 추정됨
- 본 연구에서는 정성적 가치를 화폐가치로 환산할 마땅한 방법이 없는 상태에서 미국의 1989년 사례를 reference로 삼아, 우리의 경우 해양오염퇴적물 정화로 인해 얻게 되는 연간 가치가 100억 원이라고 가정함
- 물론 1989년 이후의 물가상승률을 감안하면 이 같은 직접편익 규모는 더 증가할 것으로 예상되나, 본 연구에서는 미국의 1989년도 수질개선 가치를 직접편익의 화폐가치에 대한 최저 한계 값으로 간주함
- 참고로 새로운 해양오염퇴적물 정화처리 기술이 개발되어 20%의 정화사업비 절감효과가 발생할 것으로 가정할 경우 해양오염퇴적물이 900만 $m^3$ 라고 가정할 경우 1,890억 원의 기회비용 절감에 의한 직접편익이 발생함
- 반면 20%의 정화사업비 절감효과를 가져오는 기술을 개발하기 위해서는 연구투자 비용도 동시에 발생하는데, 본 연구에서는 편의상 기회비용의 절감에 의한 직접편익과 연구개발비용이 동일하다고 가정하여 실제 비용편익비율의 계산에 있어 이 두 가지 요인을 반영하지 않음
- 앞서의 산업연관분석에서와 같이 해양오염퇴적물 정화부문에 대한 투입은 동 경제활동부문에 대한 지출을 수반하므로 최종수요를 발생시킴
- 즉 해양오염퇴적물 정화사업에 대한 비용지출은 동 부문에서의 최종지출을 통해 경제 전반으로 여타부문에서의 생산, 부가가치 및 취업유발 등의 효과를 발생시키며, 이 효과는 해양오염퇴적물 정화를 통해 경제 전체적으로 유발되는 간접적인 편익이라고 할 수 있음
- 따라서 해양오염퇴적물 정화에 대한 비용편익분석은 이상에서 기술한 비용, 수질개선을 통한 직접 편익과 산업연관분석 측면에서의 간접 편익의 합으로 계산할 수 있는 총편익을 비교하는 방식으로 수행할 수 있음
- 구체적으로 해양오염퇴적물 정화사업을 10년간 수행하는 것으로 가정하여 전체 투입비용 7,560억 원의 85%인 6,426억 원을 1차년도 시설투자비 등 사업비용으로 지출하고 나머지 15%인 1,134억 원을 이후 9개년 도에 관리비용 명목으로 균등 지출한다고 가정함
- 연간 직접 편익의 하한을 100억 원으로 가정하고 상기비용 투입시 산업연관분석으로부터 도출한 간접편익을 이용하여 총편익을 산정함
- 통상 국가적으로 특정 할인율을 권고하고 있지는 않으나, 상이한 시점에서 발생하는 수익과 비용을 1차년도와 동일한 가치로 환산하기 위해 연구시점 현재 『한국개발연구원』이 대규모 사업의 예산타당성 분석에서 사용하고 있는 할인율 5.5%를 모든 연도에 대해 적

용합

- 단 해양오염퇴적물의 정화로 인해 얻게 되는 연간 직접편익(100억 원)은 해마다 경상가치가 5.5%씩 증가한다고 보아 할인율 통해 현재가치화한 금액이 매년 100억 원으로 일정하다고 가정함
- 이상과 같은 가정을 반영하여 다음과 같은 세 가지의 시나리오 분석을 수행함
- 첫째, 사업성공확률 및 R&D 기여도 모두 100%일 경우의 Baseline scenario임
- 둘째, 사업성공확률을 한국과학기술평가연구원(KISTEP) 지침에 따라 한국산업기술진흥원과 한국산업기술평가원에서 집계한 2005년~2009년의 R&D 수행 과제 중 사업화에 성공한 사업의 비율 48.74%를 적용할 경우의 Medium scenario임
- 셋째, Medium scenario에 R&D 기여도도 KISTEP 지침에 따라 28.1%를 적용할 경우의 Worst scenario임
- 시나리오별 비용과 편익의 연간 흐름이 표 I-아-5에 제시되어 있는데, 해양오염퇴적물 정화사업을 10년간 시행하는 경우의 B/C 비율은 가장 낙관적인 경우 2.1096로 나타났으나, 사업 성공확률 48.74%를 적용할 경우 B/C 비율은 1.0282 수준으로 낮아지며, 여기에 R&D 기여도를 28.1% 적용할 경우에는 B/C 비율이 0.2889 수준에 불과하게 됨

[표. I-자-5] 해양오염퇴적물 정화사업 비용-편익의 연간 흐름

(단위: 백만원)

Baseline scenario (사업성공 확률=100%, R&D 기여도=100%)

	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차 년도	7차 년도	8차 년도	9차 년도	10차 년도	연도 합계
직접 편익	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	10,000
간접 편익	1,346,859	25,032	23,727	22,490	21,318	20,207	19,153	18,155	17,208	16,311	1,530,460
비용	642,600	11,943	11,321	10,730	10,171	9,641	9,138	8,662	8,210	7,782	73,0198

Medium scenario (사업성공 확률=48.74%, R&D 기여도=100%)

	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차 년도	7차 년도	8차 년도	9차 년도	10차 년도	연도 합계
직접 편익	487.4	487.4	487.4	487.4	487.4	487.4	487.4	487.4	487.4	487.4	4,874
간접 편익	1,346,859	12,201	11,565	10,962	10,390	9,849	9,335	8,849	8,387	7,950	745,946
비용	642,600	11,943	11,321	10,730	10,171	9,641	9,138	8,662	8,210	7,782	73,0198

Worst scenario (사업성공 확률=48.74%, R&D 기여도=28.1%)

	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차 년도	7차 년도	8차 년도	9차 년도	10차 년도	연도 합계
직접 편익	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	1,370
간접 편익	1,346,859	3,428	3,250	3,080	2,920	2,768	2,623	2,486	2,357	2,234	209,611
비용	642,600	11,943	11,321	10,730	10,171	9,641	9,138	8,662	8,210	7,782	73,0198

주: 사업 1차년도에 발생하는 해양오염퇴적물 정화사업 투자비용은 사업성공확률 및 R&D 기여도와 무관하게 투입되는 투자개

---

넘으로 간주하였고, 이후의 관리비용 투입은 사업성공확률과 R&D기여도를 감안하여 지출이 발생하는 것으로 가정하였기 때문에 1차년도 간접편익이 모든 시나리오 분석에 있어 동일하게 제시됨

### (라) 경제성 평가의 한계와 과제

- 우리나라가 가입되어 있는 「런던협약 의정서」에 의해 2012년 이후에는 준설품질의 외해 투기가 매우 어려워질 전망이다
- 외해투기를 위해서는 물리적·화학적 세척 등의 중간처리가 필요하고 이에 대해 막대한 비용의 증가가 예상되고 있음
- 따라서 「한국해양연구원」의 해양오염퇴적물 정화기술 개발은 환경적인 문제를 넘어 경제적으로도 매우 중요한 사안이라고 할 수 있음
- 본 연구에서는 기존 방식에 비해 효율성 및 단가 측면에서 개선된 새로운 기술개발에 의해 해양오염퇴적물 정화사업을 실시하는 경우 얻을 수 있는 비용과 편익을 중심으로 동사업의 경제적 타당성을 살펴보았음
- 이를 위해 사업성공 여부와 관계없이 R&D 사업 자체로 발생하는 거시경제적 관점에서의 편익인 산업연관분석 및 비용편익분석을 실시하였는데, 해양오염퇴적물 정화사업의 비용 대비 편익이 가장 낙관적인 경우 2.1배로 나타나 경제성이 높은 것으로 판단되나, 평균적인 R&D 수행과제의 사업성공확률과 R&D 기여도 모두를 감안할 경우 1보다 작게 나타나는 것으로 분석됨
- 물론 이와 같은 연구 결과는 관련 기술의 경제적 특성이 아직 명확하게 제시되지 않은 상황에서 대략적으로 발생할 수 있는 비용과 편익요인을 가상의 시나리오를 통해 살펴보았다는 점에서 상당한 제약을 지니고 있음에 유의할 필요가 있음
- 무엇보다 연구개발사업 및 구조물 투자를 민간과 공동으로 추진하는 경우 기술사용 권리 문제와 민간부담금을 지불하게 되는 기업의 인센티브 고려에 따라 비용과 편익 분석의 결과가 달라질 수 있음
- 또한 비용편익분석은 사업으로 인한 현재 및 미래의 편익과 비용을 현재가치로 할인하여 비교하며 일반적으로 편익과 비용의 시간구조가 상이하므로 사업의 영향기간, 할인율의 크기에 따라 평가결과가 달라질 수밖에 없음을 감안해야 할 것임

## (2) 해양오염정화의 건강증진효과

### (가) 서론

- 해양오염은 크게 두 가지 경로를 통해 국가경제와 개인의 삶에 영향을 미칠 수 있다. 첫째, 해양오염으로 수산물의 품질이 낮아져 어업소득이 줄고, 관광가치 하락으로 관광수입이 줄어드는 것은 해양오염의 대표적인 경제적 영향이다. 이러한 경로를 통해 발생하는 경제적 비용을 줄이는 것은 해양오염 정화기술 개발의 가장 직접적인 경제적 혜택이 된다. 둘째, 해양오염 정화의 또 다른 중요성은 개인의 건강증진효과에서 찾을 수 있다. 오랜 기간에 걸쳐 오염원에 노출되거나 오염된 수산물을 섭취하게 되면 각종 유해질병 및 만성질환의 유병률이 높아진다. 건강수준의 악화는 의료비 증가를 초래하고, 경제활동에서 생산성을 저하시킬 수 있다. 따라서 해양오염 정화기술 개발을 통해 개인의 건강을 증진할 수 있다면 이는 주요한 사회경제적 편익이 된다.
- 전자와 비교해 볼 때 후자의 편익은 매우 비정형적인 특성을 지닌다. 무엇보다 ‘건강’이라는 무형의 변수를 활용하여 기술개발의 경제적 가치를 정량화하는 것은 쉽지 않은 일이다. 이러한 어려움 때문에 해양오염의 비용이나 오염개선의 경제적 가치를 추정함에 있어 기존 연구에서는 건강증진효과를 적극적으로 반영하지 못하였다. 그러나 해양환경은

---

일상생활에서 빈번히 접하는 환경요소이며 수산물은 대표적인 영양공급원인 점을 고려한다면, 해양오염 정화기술의 경제성을 평가함에 있어 건강개선효과와 이의 경제적 가치를 간과해서는 안 된다.

- 본 연구에서는 해양오염정화에 따른 건강개선효과의 메커니즘과 중요성을 다양한 측면에서 검토하고, 원인별 사망률과 같은 건강지표를 활용하여 정화기술개발의 경제적 가치를 추정하고자 한다. 우선 2장에서는 질병환경, 기후변화, 대기오염 등과 같은 환경문제가 개인의 삶에 미치는 영향을 다각도로 살펴보고 환경개선의 중요성을 논의한다. 특히 선행연구 고찰을 통해 환경오염의 부정적인 영향은 장기적인 관점에서 더욱 중요하며, 환경개선의 긍정적인 효과는 영유아기에서 더욱 유의미하다는 점을 강조한다. 3장에서는 논의의 초점을 해양오염으로 좁히고, 국내·외 해양오염 및 오염개선 사례를 건강증진효과를 중심으로 살펴본다. 4장에서는 우리나라 연근해 해양수질 자료와 시군 원인별 사망률 자료를 활용하여 해양오염개선의 효과를 실증적으로 분석한다. 해양수질개선을 통해 특정 질병에 의한 사망률을 얼마나 감소시킬 수 있는지를 추정하는 것이 주요 목적이다. 5장에서는 사망률 감소 추정 결과를 토대로 건강증진측면에서 해양오염개선의 경제적 가치를 산출한다. 이를 위해서 본 연구는 통계적 인간생명가치(statistical value of life)의 개념을 소개하고, 인간생명가치 추정방법의 장단점을 논의한다.

#### (나) 환경문제의 중요성

- 환경(environment)이 생활수준(standard of living)의 주요 결정요인이라는 것은 다양한 시기를 대상으로 수많은 연구에 의해 뒷받침되어 왔다. 경제학 관점에서 ‘생활수준’은 소득과 같은 물질적인 요소뿐만 아니라, 교육, 건강, 수명과 같은 비물질적인 요소들도 반영하는 개념이다. 환경문제는 인류가 정착생활을 시작하면서부터 대두되기 시작하였고, 산업화와 도시화를 거치면서 그 문제점이 더욱 부각되었다. 기존의 연구들은 질병환경, 수질오염, 기후변화, 대기오염 등 다양한 환경문제가 개인의 인적자본 축적과 평생 건강에 막대한 영향을 미칠 수 있음을 보여 왔다. 한편 일반적으로 환경이 개인의 물질적, 비물질적 생활수준에 미치는 영향은 오랜 기간에 걸쳐 축적되어 나타난 결과이다. 따라서 기존의 연구들은 중·장기적인 관점에서 환경의 중요성을 강조해오고 있다.
- 역사적인 연구로는 Steckel and Rose (2002)와 Floud et al. (2011)의 연구를 들 수 있다. Steckel and Rose (2002)는 남·북아메리카 대륙의 유적지에서 발굴한 뼈로부터 건강정보를 추출하여 건강지표를 구하고 인류 건강수준의 장기추이를 추정하였다. 연구결과에 따르면 적어도 15세기까지 인류의 건강수준은 지속적으로 악화되어 왔으며, 주요 원인으로 정착생활에 따른 환경문제를 꼽고 있다. 점차 많은 사람들이 정착지로 모여들어 정착지의 위생환경이 악화되고 전염병의 발병 위험률이 높아짐에 따라 개인의 건강수준이 악화되었다는 것이다.
- 이러한 추세는 산업화와 도시화가 활발히 진행되던 산업혁명기에 더욱 뚜렷이 나타났다. 19세기 미국은 새로운 동력원의 개발과 신기술 도입으로 생산성의 급격한 향상을 경험하였고, 그 결과 소득이 늘어나고 고도의 경제성장을 누리게 된다. 소득증대는 평균적으로 개인의 영양공급 향상으로 이어지기 때문에 일반적으로 국가소득과 국민들의 평균 신장(height) 사이에 양의 상관성이 예상된다. 그러나 예상과 달리 19세기 전반에 걸쳐 미국 성인들의 평균 신장은 큰 폭으로 감소하였고, 평균 수명 역시 지속적으로 감소하였다. Floud et al. (2011)은 이러한 결과의 주요 원인으로 도시화와 산업화에 따른 환경문제를 들고 있다. 특히 영유아들은 도시위생악화로 초래된 질병환경의 위험에 쉽게 노출되었고, 유해질병의 잦은 감염은 질병퇴치에 필요한 에너지수요를 증가시켜 결국 신체 성장을 저해하는 주요한 요인이 되었다.



- 무엇보다 19세기 미국의 대표적인 환경문제는 수질오염이었다. 이 시기 대도시들은 주변의 호수나 강으로부터 식수를 조달하였다. 19세기 말이 되어서야 하수시설(sewage system)이 본격적으로 도입되었기 때문에 도시의 공장 및 생활폐수 등은 쉽게 식수원을 오염시켰다. 따라서 20세기 초 식수에 대한 염소처리(chlorination) 또는 필터처리(filtration)가 대도시에 보급되기 전까지 장티푸스(typhoid)와 같은 수인성 질병은 대표적인 사망원인이었다. Cutler and Miller (2005)의 비용-편익 분석 결과에 따르면, 20세기 초 상수시설 확충을 위한 연간 비용은 도시 당 3천만 달러(2003년 가격 기준)에 달하였으나 건강증진에 따른 연간 편익의 경제적 가치는 도시 당 7억 달러(2003년 가격 기준)였다고 평가하고 있다.
- 19세기 중엽 이후 최근까지는 정량분석을 위한 자료 수집이 매우 용이한 시기이다. 따라서 환경문제의 중장기적인 영향에 대한 연구는 19세기 중엽 이후를 대상으로 활발하게 이루어졌다. 특히 최근의 많은 연구들은 개인의 건강 수준은 장기간에 걸쳐 축적되며, 영유아기와 청소년기에 경험한 건강유해요인은 성인기의 건강 수준과 밀접한 관련이 있음을 규명하여 왔다(Barker 1998). 이는 영유아기 유해환경 노출로 인해 초래된 건강문제는 장기간에 걸쳐 삶의 질을 저하시킬 수 있음을 시사한다. 대표적인 연구로 Almond (2006)는 1918-1919년 전 세계를 강타한 인플루엔자가 유행하던 시기에 태어난 영아들은 교육 수준이 낮고, 성인이 되었을 때 장애(disability) 가능성이 높고, 소득수준이 낮았음을 보인다. 또한 기후(온도 및 강수량)를 매개로 한 질병환경인 말라리아의 장기적인 영향에 대한 연구들을 살펴보면, 영유아기 말라리아 환경에의 빈번한 노출은 영양상태 악화와 면역 저하 등을 초래하여, 이로 인해 또 다른 질병의 감염을 초래할 수 있다. 특히 임신 중 산모의 말라리아 감염은 저체중 신생아 출산 확률과 영아 사망률을 높일 수 있으며, 영유아기에서의 감염은 성장기에 인지능력과 교육성과를 낮추고, 성인기의 소득에도 부정적 영향을 끼치는 것으로 연구되었다(Sachs and Malaney 2002; Chima et al. 2003; Bleakley 2007; Hong 2007).
- 한편 세계보건기구는 기후변화를 전 지구적 관심이 필요한 환경문제로 꼽고 있다(WHO 2009). 기후변화는 온실가스의 과도한 배출로 인한 지구 평균 기온의 급격한 상승을 의미하는 지구온난화 뿐만 아니라 최근 빈번히 관측되고 있는 기록적인 가뭄, 폭우, 혹서, 한파 등과 같은 기후환경의 변화를 포괄하는 개념이다. 선행연구들에 따르면 기후변화는 다양한 경로를 통해 개인의 평생건강에 영향을 미칠 수 있다. 첫째, 극단적인 기온(혹서 및 한파)과 강수량의 변동(폭우와 태풍 등)은 사망률에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. Patz et al. (2005)은 1980년 이후 인류의 생산활동에 기인한 기후변화는 전 세계적으로 연간 150,000명의 생명을 앗아간 것으로 추정하였다. 또한 Deschênes and Greenstone (2011)은 미국 자료를 이용하여 향후 1세기 동안 기온의 상승으로 인해 연간사망률이 0.5-1.7% 상승할 것으로 추정하였다. 둘째, 기후변화(특히 기온의 상승)는 출산결과와 같은 생애초기건강에 부정적인 영향을 주게 되어, 생애주기의 인적자본축적과 평생건강에 직·간접적으로 영향을 줄 수 있다(Deschênes, Greenstone and Guryan 2009). 셋째, 기후변화는 기후를 매개로 한 유해질병(말라리아, 세균성 이질, 홍역 등)의 확산을 초래하여, 국민의 질병부담을 높일 수 있다(Thomson et al. 2006; Karl, Melillo, and Peterson 2009). 넷째, 기후는 농업생산의 주요 생산요소이므로, 기후변화는 농업생산성과 더불어 국민들의 영양수준 및 인적자본축적에 영향을 끼칠 수 있다(Maccini and Yang 2009). 요약하자면 기후변화가 개인의 건강에 영향을 미칠 수 있는 경로는 매우 다양하며, 그 영향의 범위는 단기적인 사망률 상승에서부터, 장기적으로 생애주기에 걸쳐 건강자본과 인적자본축적의 저해를 초래할 수 있다.
- 오늘날 또 다른 주요 환경문제는 대기오염이라 할 수 있다. 대기 중에 오염물질이 존재할 경우, 인체의 폐 조직은 호흡을 통해 여러 가지 질병위험에 노출된다. 일반적으로 오염된

---

대기에 노출되면 호흡기 질환이 발병되거나 악화되며, 장기적으로는 인체의 면역기능을 약화시켜 천식·알레르기 질환을 유발할 가능성이 높아진다. 최근 미국 환경보호청(EPA)은 대기오염으로 인한 조기사망자수가 교통사고로 인한 사망자수의 3배에 달한다고 발표하고 있다.

- 특히 임신기간 중 대기오염에 장기간 노출되면, 대기 중의 독성이 자궁 내 태아의 세포활동을 바꾸고 태아에게 공급되는 산소를 차단하여 저체중아와 조산아를 출산할 위험이 높아지게 된다(Longo 1977). 이와 같은 부정적인 출생결과는 출생아의 신체적 성장을 저해할 뿐 아니라 향후 성인기의 건강상태 등에도 부정적인 영향을 끼칠 수 있다(Behrman and Rosenzweig 2004; Adler and Ostrove 1999; Marmot and Wilkinson 1999; Cutler and Lleras-Muney 2006).
- 이상에서는 질병환경, 수질오염, 기후변화, 대기오염 등 다양한 환경문제의 중요성을 장기적인 관점에서 살펴보았다. 환경의 유형이 다름에도 불구하고, 각 환경문제는 공통적으로 생애주기에 걸쳐 건강수준을 낮추고 인적자본축적에도 부정적인 영향을 미칠 수 있음을 검토하였다. 무엇보다 환경문제의 중요성은 개인의 삶에 미치는 영향이 중·장기적이라는 점이다. 또한 태아기 그리고 영유아기 유해환경에의 노출은 막대한 사회경제적 손실을 초래할 수 있다는 점도 강조할 필요가 있다.

#### (다) 해양오염과 건강

- 지구표면의 71%를 차지하고 있는 바다는 에너지원, 수산자원, 광물자원, 운송루트 등의 측면에서 중요한 경제적 위치를 차지하고 있다. 그 동안 인류는 해양환경의 개발을 통한 경제이득 창출에 더욱 관심을 가져왔으며, 해양환경 보호의 필요성은 비교적 최근에 부각되기 시작하였다. 특히 해양오염이 개인의 건강에 미치는 영향에 대한 관심이 부쩍 늘어가고 있는 추세이다.
- 해양오염으로 인한 건강문제는 오염된 수산물의 섭취와 녹조의 번식으로 발생하는 독성물질(aerosolized toxins)의 흡입에 의해서 주로 발생한다. 건강문제를 야기하는 요소들은 크게 병원체(pathogens), 오염원(pollutants) 그리고 유해조류(harmful algal bloom; HAB)로 구분할 수 있다.
- 각종 유해질병을 야기할 수 있는 박테리아, 바이러스 그리고 기생충(parasites) 등의 병원체가 바다에서 발생하는 이유는 매우 다양하다. 일부 병원체는 조류나 어류의 분비물에서 자연적으로 발생하기도 하며, 일부는 공장 및 생활 폐수 또는 농장에서 발생한 가축의 분비물 등이 바다로 흘러들어가 인위적(anthropogenic)으로 발생하기도 한다. 이러한 병원체는 수산물 섭취 또는 수영 등의 행위를 통해 인체에 유입될 수 있으며, 다양한 유해질병을 유발하는 위험을 지닌다.
- 대부분 선행연구들은 수영객들이 이용하는 해변의 수질을 측정하고, 수질에 따라 건강상의 차이가 나타나는지를 살펴보았다. 몇 가지 예를 들자면, Haile et al. (1999)은 미국 로스앤젤레스 산타모니카 해변을 방문한 22,000명의 수영객들을 대상으로 조사한 결과, 육상으로부터 오염물질이 정화되지 않고 유입되는 해변일수록 수영객들에게 있어 호흡기 및 소화기 질환의 증상이 유의미하게 발견되었다. 역시 미국 캘리포니아의 6개 공공 해변에서 8,800명의 수영객을 대상으로 실시된 조사 결과에 따르면, 해양수질지표(enterococci, fecal coliforms, total coliforms)가 좋지 않을수록 수영객들은 피부질환이나 설사병의 확률이 유의미하게 높았다.
- 다음으로 해양오염의 오염원(pollutants)은 다양한 산업용 화학물질을 의미한다. 대표적으로 산업화에 따라 수은, 카드뮴, 구리, 아연, 납 등 공장폐수의 중금속이 바다로 흘러들어가 어패류나 해초 등을 오염시키게 되고, 오염된 수산물을 장기간 섭취할 경우 내분비 장

에, 신장 장애, 암, 신경질환 등 다양한 공해병을 초래할 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 이러한 오염원은 단지 공장폐수로부터 발생하는 것은 아니다. 농장에서 사용된 농약이 바다로 유출되기도 하며, 비가 오면 대기 중의 공해물질이 바다로 떨어지기도 한다. 최근에는 선박사고에 따른 기름 유출과 육상에서 유기된 플라스틱류의 쓰레기들도 주요한 오염원으로 지목되고 있다.

- 인간활동의 부산물인 중금속에 의한 해양오염은 해양생태계의 먹이사슬을 따라 그 농도가 점점 커진다는 문제를 가진다. 따라서 수산물 속에는 바닷물에 들어 있는 중금속 농도보다 수십 배 이상 높은 것으로 알려져 있다. 일본 큐슈에서 발생해 미나마타병을 일으킨 수은 중독 사건은 중금속에 의한 해양오염 피해의 대표적인 사례이다. 이 병이 처음 발생한 것은 1953년인데, 1989년 말까지 미나마타 만(Minamata Bay) 주변의 구마모토현과 가고시마현에서 발생한 미나마타 환자수는 최대 4천명으로 추산되고 있으며, 이 중에 사망률은 약 40%에 달하였다고 한다(Harrison 2001).
- 더욱 중요한 사실은 임산부가 수산물을 많이 섭취하는 경우, 수산물에 포함된 중금속이 태아에게 영향을 끼쳐 출생 후 뇌신경 발달 장애를 초래할 수 있다는 점이다. 또한 일부 연구에 따르면, 중금속에 오염된 어패류를 장기간 섭취할 때 태아와 아동들의 발달에 부정적인 영향을 끼친다고 한다.<sup>24)</sup>
- 마지막으로 유해조류(harmful algal bloom; HAB)의 번식에 따른 독성물질의 발생 역시 해양오염의 주요한 원인이다. 유해조류의 번식은 일반적으로 해양생태계의 부영양화(eutrophication)의 결과이다. 부영양화는 해양생태계에 유기물질이 유입되어 질소와 인과 같은 영양물질이 과도하게 많아져 조류(algae)의 광합성량과 번식이 급속히 증가하는 현상을 의미한다. 부영양화가 과도하게 진행된다면, 과다 증식한 플랑크톤이 해수면을 덮어 햇빛을 차단하고 광합성을 하지 못하는 해조류가 생존을 위해 호흡을 하면서 수중생태계의 산소부족을 초래한다. 결국 산소공급량이 부족하여 호소에 서식하는 동식물들이 다량 폐사하는 일이 종종 발생한다.
- 폐사한 동식물과 플랑크톤의 사체는 미생물에 의해 분해되고, 이 과정에서 해양의 산소농도는 더욱 감소할 뿐만 아니라 독성물질이 발생하게 된다. 이러한 독성물질이 인체에 흡입되면 마비성 패독(paralytic shellfish poisoning), 신경성 패독(neurotoxic shellfish poisoning)과 같은 독성물질에 의한 신경조직의 파괴에서부터 기억상실성 패독(amnesic shellfish poisoning)과 같은 만성적인 간질환까지 다양한 건강문제를 초래할 수 있다.
- Wang (2008)의 추계에 따르면 전 세계적으로 매년 50,000-500,000의 유해조류의 번식에 따른 패독(shellfish poisoning) 사고가 발생하고 있으며, 사망률은 약 1.5%에 달하는 것으로 추정된다. Hallegraeff (1993)은 유해조류 관련 사망은 전 세계적으로 매년 300명 정도로 추산한 바 있다. 패독은 사망을 초래할 뿐만 아니라 의료비 증가, 어업 활동 감소, 그리고 관광 수입 저하 등 다양한 유형의 경제적 손실을 초래할 수 있다.

23) 한국은행의 『투입산출표』에서 노동계수(취업계수)는 산출액 10억원을 생산하는데 직접 필요한 노동량을 나타내고 취업유발효과를 구하는데 필요한 총생산유발액의 단위는 1백만원이므로 실제 취업유발효과를 구하는데 있어서는 취업계수와 생산유발액을 곱한 값을 1,000으로 나누어 단위의 통일을 기하였음

24) Source: <http://www.epa.gov/mercury/eco.htm>

---

이러한 간접비용까지 고려한다면 해양오염의 피해는 더욱 커질 수 있으며, 실제 Hoagland et al. (2002)는 1987-1992년 유해조류로 초래된 경제적 손실의 규모는 약 5천만 달러에 달한다고 추정하였다.

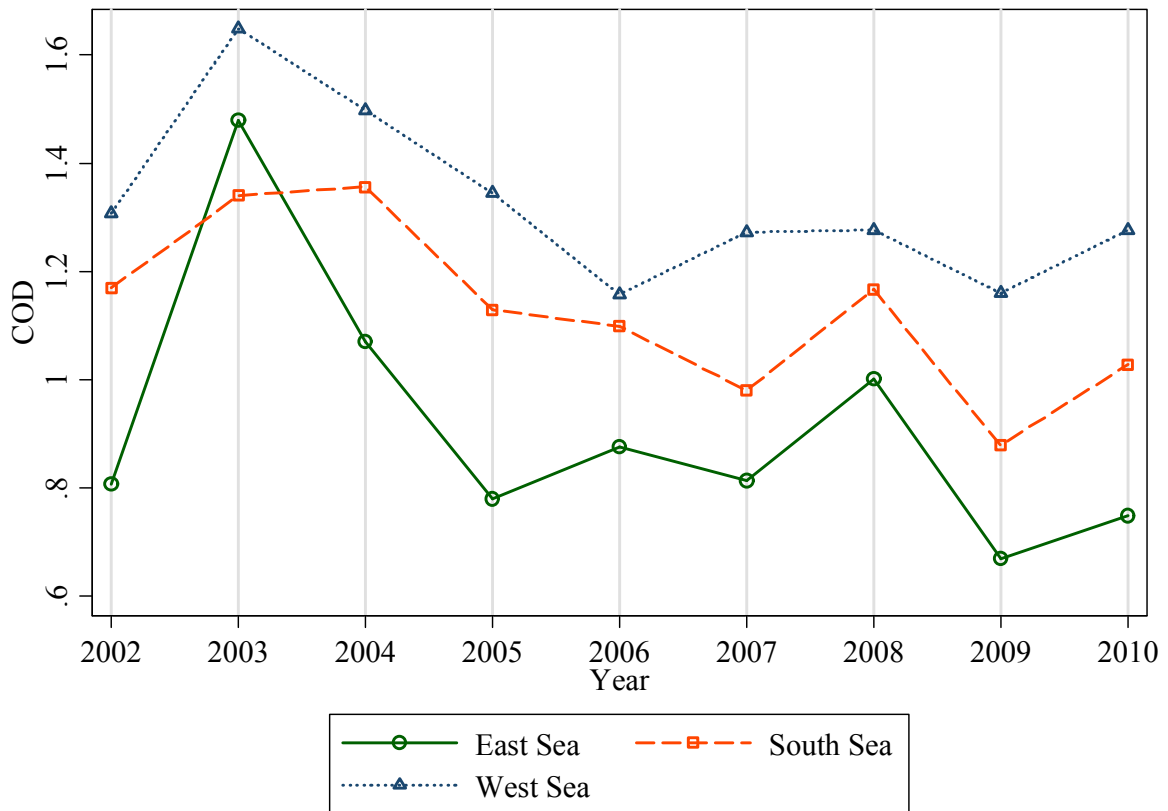
- 지금까지 병원체, 오염원 그리고 유해조류 등 주요 원인을 중심으로 해양오염이 인류건강에 미치는 경로와 사례를 간략하게 살펴보았다. 그러나 해양오염이 건강에 미치는 영향에 대한 선행연구들은 앞 절에서 살펴본 다른 유형의 환경문제들에 비해 그리 활발하지 않았다. 다른 환경문제의 분석결과를 볼 때, 해양오염이 건강에 미치는 영향 역시 중·장기적으로 더욱 중요하다고 판단되지만, 이를 뒷받침하는 기존 연구 결과들을 찾아보기 힘들다. 주된 이유는 해양오염이 건강문제를 야기하는 생물학적 메커니즘이 충분히 밝혀지지 않았고, 각 경로에 따른 결과를 정량화하는 것이 어렵기 때문이다. 더불어 해양오염의 영향에 대한 관심이 비교적 최근의 일이라 자료 축적 기간이 짧다는 것도 또 다른 원인이다.
- 비슷한 이유로 해양오염이 건강에 미치는 영향을 분석한 국내 연구는 많지 않은 실정이다. 몇 가지 선행연구들을 살펴보면 다음과 같다. 김영아 외 (2011)의 연구는 2008년 국민건강영양조사 결과를 활용하여 어패류 섭취에 따른 혈중 중금속(카드뮴, 수은, 납) 농도를 분석하였다. 그 결과 어패류(특히 명태, 조기, 조개류, 젓갈류 등) 섭취를 많이 하는 사람일수록 혈중 중금속 농도가 높게 나타났다. 특히 주 1일 이상 위에서 나열한 어패류를 섭취하는 경우 혈중 중금속 농도가 미국 환경청 허용 기준을 넘었으며, 이는 우리나라 어패류의 중금속 오염 정도가 심각할 수 있음을 시사한다. 한편 Kim et al. (2006)은 63명의 임산부를 대상으로 한 조사를 토대로 월 4회 이상 생선을 섭취하는 임산부는 그렇지 않는 그룹에 비해 혈중 수은 농도가 유의미하게 높았음을 보였다. 또한 이효진·김기범 (2010)은 충남 서산에서 채취한 낙지의 부위별 중금속 농도를 분석하고 이를 세계보건기구의 중금속 허용기준과 비교하였다. 이를 통해 과도한 또는 장기간에 걸친 낙지의 섭취는 중금속에 따른 인체 위해성을 높일 수 있다는 결론을 제시하였다.
- 요약하자면 국내에서는 특정 수산물의 섭취에 따른 중금속 중독 가능성에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 우리나라의 전반적인 해양오염 실태나 해양오염의 포괄적인 영향에 대한 정량분석은 찾아보기 힘들다. 따라서 기존의 국내 연구들을 토대로 해양오염개선의 효과를 정량화하는 것은 쉽지 않다. 다음 절에서는 자료가 허용하는 범위 안에서 우리나라 연안의 해양오염 정도를 파악하고, 사망률에 미치는 영향 분석을 통해 해양오염 정화 기술 개발의 경제적 편익을 산출할 수 있는 분석을 시도하고자 한다.

#### (라) 실증분석: 우리나라 연안수질과 국민건강

- 해양오염 정화기술 개발이 건강증진을 촉진할 수 있는지를 검토하기 위해서는 해양오염 개선 정도의 단위 당 한계효과(marginal effect)를 추정할 필요가 있다. 예를 들자면, 해양오염지표를 평균 수준에서 10% 감축시킬 때, 개인의 건강지표는 몇 % 개선될지 그리고 추정된 건강증진 효과가 통계적으로 유의미한지를 정량적으로 평가하는 작업이다. 한계효과는 과거 자료를 활용한 회귀분석을 통해 추정하거나, 특정한 설정 하에서 시뮬레이션을 수행한 후 추정할 수도 있다. 후자의 경우에는 개인을 실험 대상으로 하기 때문에 시뮬레이션의 실현가능성이 매우 낮다. 따라서 본 연구는 전자인 회귀분석 방법을 이용한다.
- 본 연구에서 검토하는 해양오염 퇴적물 정화기술 개발사업은 우리나라 연안 해안의 오염된 퇴적물 줄이기 위해 반응성 피복정화기술을 개발하는 사업이다. 따라서 향후 기술개발이 완료되면 주로 연안 해안의 수질개선효과가 예상된다. 이러한 특성을 반영하여 연안수질의 추이 등을 살펴보기 위해 본 연구에서는 국토해양부의 '연안수질현황' 자료를

이용한다.<sup>25)</sup> 연안수질현황은 전국의 50여개 연안에 대하여 표층의 염분, 수소이온농도, 용존산소량(DO), 화학적 산소요구량(COD), 용존무기질소, 총질소, 용존무기인, 총인, 규산 규소, 부유물질, 클로로필 등 12가지 지표를 제공하고 있다. 자료 수집은 2002년부터 시작되었으며, 현재 2010년까지 수집이 가능하다.

- 연안수질현황에서 제공하는 12가지 지표 중 본 연구에서는 ‘화학적 산소요구량’을 연안수질지표로 사용한다. 화학적 산소요구량은 유기물 등의 오염물질을 산화제로 산화 분해시켜 정화하는 데 소비되는 산소량을 ppm(part per million 백만분률) 또는 mg/l로 나타낸 값이다. 물이 많이 오염될수록 유기물이 많이 존재하므로 산화분해에 필요한 산소량이 증가한다. 따라서 화학적 산소요구량이 클수록 해양오염이 심하다고 할 수 있다.
- 화학적 산소요구량을 이용한 수질 평가 기준은 다음과 같다. 1 mg/l 이하는 1등급 수질로 분류되며, 수산생물의 서식과 해수욕에 적합한 수질로 평가된다. 2등급 수질은 화학적 산소요구량이 1-2 mg/l인 경우이며, 1등급 수질 외의 수산생물(예: 송어, 김) 서식이 가능하며 해양관광 등에 활용될 수 있다. 화학적 산소요구량이 2-4 mg/l인 경우에는 수산생물의 서식이 적합하지 않은 3등급 수질로 분류된다.<sup>26)</sup>



[그림. I-자-3] 해역별 화학적 산소요구량 추이, 2002-2010년

출처: 국토해양부 연안수질현황

주: 각 해역에 속한 연안의 화학적 산소요구량의 연도별 평균값임.

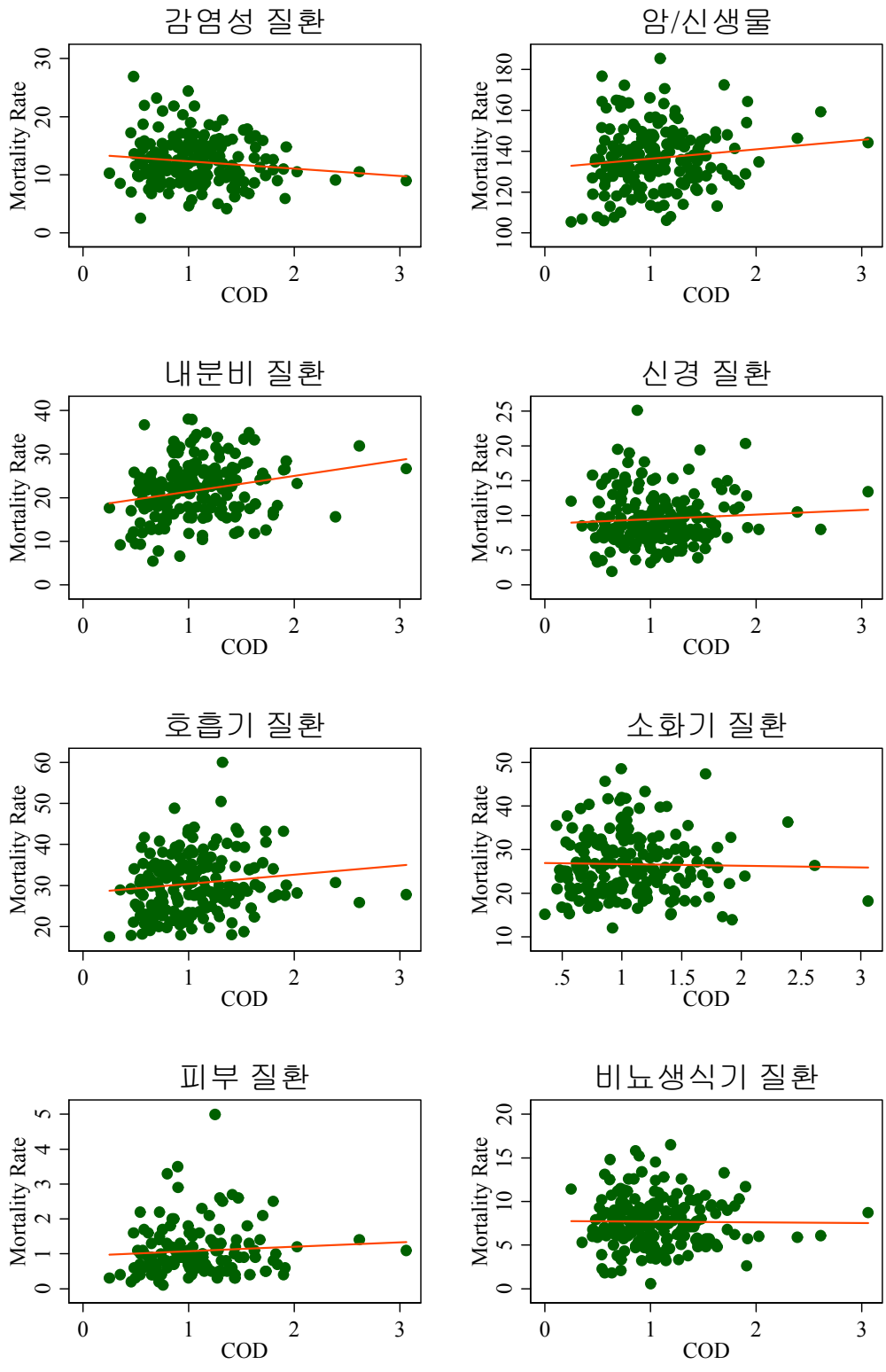
- 
- 해역 간에 수질 차이가 현격하게 나타남을 볼 수 있다. 동해 연안은 수질이 가장 좋고, 반면 서해 연안의 수질은 좋지 않은 것으로 측정되었다. 해역별 격차는 2002-2010년 동안 일정하게 유지되고 있다. 그러나 각 해역의 수질은 시간이 지남에 따라 조금씩 개선되고 있음을 확인할 수 있다. 2003-2006년 사이 수질 개선이 급격하게 관측되었지만, 2006-2010년에는 주목할 만한 변화가 발견되지 않았다.
- 

---

25) '연안수질현황'은 전국 연안의 전반적인 해양오염 현황을 파악할 수 있는 유일한 자료로 판단된다.

26) 정부는 해양수질개선을 위해 관계부처 합동으로 해양환경보전종합계획을 수립(96~)하여 오염해역의 퇴적물 준설, 수중침적폐기물 수거사업, 연안지역 환경기초시설 설치 등을 지속적으로 추진하고 있다. 특히 향후 해양수질관리는 해양오염원의 약80%를 차지하는 육상오염원의 해양유입을 사전에 차단하는데 역점을 두고 있다.

- 
- 다음으로 해양오염 또는 오염개선 의 결과인 건강지표를 측정하기 위해 통계청의 사망원인통계 자료를 활용한다. 특히 연안수질현황에서 조사된 50개 연안에 인접한시군의 사망률을 주요 건강지표로 활용한다. 시군 사망률의 사용은 해양오염으로 초래되는 건강의 피해는 연안 인접 지역에서 유의미하게 나타난다는 가정을 기반으로 한다. 일반적으로 건강문제가 오염된 수산물의 섭취와 수영 등을 통해 독성물질이 인체에 유입되어 나타난다는 점을 고려한다면, 각 연안의 인접 시군에서 그 영향이 더욱 크다는 가정은 타당하다.
  - 한편 앞 절에서 논의한 경로(병원체, 오염원, 유해조류)를 통해 해양오염이 건강의 위해요소로 작용한다면 사망률보다는 유해질병의 발병률이 좀 더 유용한 건강지표가 될 수 있다. 그러나 시군 단위에서 전염병의 연간 발병률 자료를 수집하는 것이 쉽지 않았다. 또한 유해질병 발병률은 해양오염의 단기적인 효과를 측정하는데 유용할 수 있다. 이에 비해 사망률의 활용은 중·장기간에 걸친 해양오염에의 노출 효과를 측정하기에 보다 적합한 지표라고 판단된다. 같은 맥락에서 각 연안에 인접한 지역 주민은 다른 지역(보다 내륙) 주민들보다 장기간에 걸쳐 해양오염의 오염원과 경로에 노출될 가능성이 높다. 이 역시 건강지표로 시군 사망률의 이용이 타당함을 시사한다.
  - 통계청의 사망원인통계는 한국질병분류코드에 따라 사망원인을 19개 대분류로 나누었다. 앞 절에서 살펴 본 선행연구들의 분석에 따르면, 해양오염은 감염성 질환, 암, 내분비 교란, 신경질환, 호흡기 질환, 소화기 질환, 피부질환, 비뇨생식기계통의 질환 등을 유발하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 절에서는 이들 8가지 질병에 의한 사망률을 주요한 변수로 간주하고자 한다.
  - 지역별 사망원인통계는 국가통계포털에서 수집할 수 있으나, 시군별 통계는 2005년이 시작 시점이다. 따라서 분석기간은 2005-2010년으로 한다. 또한 시군의 사망률은 해당 지역의 연령분포에 따라 크게 달라진다. 이를 감안하여 본 연구에서는 연령분포를 가중치로 하여 계산한 ‘연령표준화 사망률’을 사용한다.
-



[그림. I-자-4] 연안수질과 인접 시군 원인별 사망률 간의 상관관계, 2005-2010년  
 주: 연안수질의 지표는 화학적 산소요구량(mg/l)이며, 시군 사망률은 인구10만 명 당 연령표준화 사망률임.



- 각 연안의 인접 시군에서 발생한 8가지 사망원인별 사망률과 해당 연안의 수질간의 상관성을 산포도(scatter plot)를 통해 살펴보면 그림 I-자-4와 같다. 산포도를 토대로 판단할 때, 암/신생물, 내분비 질환, 신경 질환, 호흡기 질환에 의한 사망률은 해당 연안의 화학적 산소요구량과 양의 상관성을 가지는 것으로 관측되었다. 화학적 산소요구량이 높을수록 연안수질이 나쁜 것을 의미하므로, 양의 상관성은 수질이 나쁜 연안 인근의 시군일수록 위에서 나열한 원인에 의한 사망률이 높다고 말할 수 있다. 반면 감염성 질환에 의한 사망률은 연안의 화학적 산소요구량과 약한 음의 상관관계를 보이고 있으며, 피부질환과 비뇨생식기 질환에 의한 사망률은 연안수질지표와 관련성이 없어 보인다.
- 그러나 시군의 원인별 사망률에 영향을 미치는 요인은 단지 연안수질만이 아니다. 이와 더불어 다양한 지역 특성을 통제해야하며, 통제 후 추정된 결과가 통계적으로 유의미한지도 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 해당 시군의 8가지 원인별 사망률을 종속변수로 하고, 이를 연안수질지표인 화학적 산소요구량과 지역 특성 변수에 회귀분석하여 해양수질개선의 한계효과를 추정하고자 한다. 회귀분석을 위한 모형은 다음과 같다.

$$\ln(M_{ijt}) = \alpha + \beta \ln(COD_{ijt}) + \delta_j + \delta_t + X_{jt} \Gamma + \epsilon \quad (1)$$

- 위 식에서  $M_{ijt}$ 는 j광역시도에 속한 i시군의 t년도에서의 원인별 사망률(인구10만 명 당 연령표준화 사망률)을 의미하며,  $COD_{ijt}$ 는 해당 시군에 접한 연안의 t년도 화학적 산소요구량(mg/l)이다. 사망률과 화학적 산소요구량 변수에 로그를 취하여 지역별 연안수질 차이가 건강에 미치는 한계효과를 퍼센트 단위로 추정하고자 하였다. 한편 수질지표 외에 시간에 따라 변하지 않는 지역 특성을 통제하기 위해 광역시도고정효과( $\delta_j$ )를 사용하였고, 사망률의 연간 추이 등을 반영하기 위해 시간고정효과( $\delta_t$ )를 통제하였다. 마지막으로 시간에 따라 변하는 지역 특성을 통제하기 위해 각 년도 광역시도 단위에서의 인구 1인당 지역내총생산(Gross Regional Domestic Product; GRDP), 경제활동참가율, 60세 이상 인구비중, 그리고 인구 1인당 병상수 등을 설명변수( $X_i$ )로 사용하였다.
- 위 식(1)에 따라 모든 변수들과 고정효과를 통제한 결과는 표 I-자-6의 모형 (5)에서 제시하고 있으며, 모형 (1)-(4)에서는 통제변수를 달리함에 따라 결과의 차이가 얼마나 다른 지를 보여준다. 표에서 제시한 회귀계수는 화학적 산소요구량 변수의 회귀계수(식(1)에서  $\beta$ 값)이며, 괄호 안의 값은 강건표준오차(robust standard error)이다. 각 회귀계수는 각 회귀모형과 원인에 대한 개별 회귀분석의 결과를 보여주고 있으며, 지면의 제약으로 지역특성변수나 고정효과에 대한 분석결과는 제시하지 않았다.

[표. I-자-6] 연안수질이 인접 시군의 원인별 사망률에 미치는 영향

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
시도고정효과	NO	YES	NO	YES	YES
연도고정효과	NO	NO	YES	YES	YES
지역특성변수	NO	NO	NO	NO	YES
감염성 질환	-0.0730 (0.0678)	0.0025 (0.0768)	-0.1034 (0.0667)	-0.0333 (0.0740)	-0.0101 (0.0773)
암/신생물	0.0452* (0.0229)	0.0218 (0.0195)	0.0368 (0.0232)	0.0052 (0.0190)	0.0038 (0.0203)
내분비 질환	0.2394*** (0.0629)	0.1649** (0.0780)	0.2120*** (0.0564)	0.1076 (0.0764)	0.1064 (0.0758)
신경 질환	0.0861 (0.0754)	0.0375 (0.0928)	0.1451* (0.0737)	0.1305 (0.0946)	0.1332 (0.0976)
호흡기 질환	0.1160*** (0.0441)	0.1372*** (0.0499)	0.0984** (0.0466)	0.1118** (0.0511)	0.1266** (0.0536)
소화기 질환	0.0142 (0.0561)	-0.1061 (0.0741)	-0.0007 (0.0589)	-0.1490* (0.0796)	-0.1318 (0.0811)
피부 질환	0.2433* (0.1313)	0.1881 (0.1511)	0.2376* (0.1282)	0.1718 (0.1478)	0.1928 (0.1558)
비뇨생식기 질환	0.0262 (0.0795)	0.1357 (0.1075)	0.0782 (0.0807)	0.2331** (0.1152)	0.2426** (0.1169)
표본수	185	185	185	185	185

주: 표에서 제시한 회귀계수는 화학적 산소요구량 변수의 회귀계수(식(1)에서  $\beta_5$ )이며, 괄호 안의 값은 강건표준오차(robust standard error)임. 각 회귀계수는 각 회귀모형과 원인에 대한 개별 회귀분석의 결과를 보여주고 있으며, 지면의 제약으로 지역특성변수나 고정효과에 대한 분석결과는 제시하지 않음. \*, \*\*, \*\*\*는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 의미함.

- 회귀분석의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 회귀모형(5)을 기준으로 볼 때, 연안수질의 회귀계수는 호흡기와 비뇨생식기 질환의 사망률에서 통계적으로 유의미한 양의 값을 가진다. 이는 화학적 산소요구량이 높을수록 (즉 해안수질이 나쁠수록) 인접 시군의 호흡기 및 비뇨생식기 질환에 의한 사망률인 높다는 것을 의미한다. 회귀계수를 이용하여 효과의 크기를 살펴보면, 연안의 화학적 산소요구량이 10% 감소하면, 호흡기 및 비뇨생식기 질환에 의한 사망률은 각각 1.3%, 2.4% 감소할 수 있음을 시사한다. 중금속은 대표적인 내분비계 장애물질(endocrine disrupters)이며, 비뇨생식기 질환을 유발한다는 것은 잘 알려진 사실이다(Waring and Harris 2005). 또한 선박이나 공장에서 배출하는 질소산화물과 황산화물은 호흡기 질환을 유발하는 대표적인 해양 오염원으로 알려져 있다.<sup>27)</sup>
- 둘째, 회귀모형(5)에서 광역시도와 연도 고정효과의 사용은 매우 제한적인 회귀분석모형이다. 좀 더 느슨한 통제를 했을 경우 호흡기와 비뇨생식기 이외의 사망률에서도 통계적으로 유의미한 영향을 찾을 수 있다. 특히 일부 회귀모형에서 연안의 수질이 나쁠수록 암/신생물, 내분비 질환, 신경 질환, 피부 질환 등의 사망률은 높은 것으로 추정되었다. 비록 모형(5)에서 강한 회귀모형을 사용할 때 통계적 유의성이 떨어지기는 하지만, 이러한 결과들은 앞 절에서 살펴 본 국내외 사례와 어느 정도 일치함을 보여준다.

27) 최근 개정된 국제해상오염방지협약은 선박의 공해물질 방지를 엄격히 제한하고 있다. 질소산화물의 경우 2016년까지 현행기준의 80% 감축을 선박에 강제적으로 적용하며, 황산화물은 현행 4.5% m/m에서 2020년까지 0.5% m/m로 감소시키도록 규정하며 이를 선박에 강제적으로 적용할 예정이다.

- 그렇다면 향후 해양오염 정화기술의 개발로 연안수질이 향상된다면 건강증진 효과는 얼마나 될까? 또한 건강증진효과의 경제적 가치는 얼마나 될까? 이러한 질문에 답하기 위해서는 무엇보다 예상되는 건강증진효과를 정량화할 필요가 있다. 특히 본 연구에서는 위 회귀분석결과를 활용하여 건강증진효과를 사망률 감소 또는 예방 가능한 조기사망자수로 계산하고자 한다.
- 우선 오염정화기술개발에 따른 해양오염개선의 정도를 가정해야 한다. 그러나 기술개발이 완료되고 실제로 적용되지 않은 상황에서 해양오염개선 정도를 예상하는 것은 어려운 일이다. 따라서 기술개발에 따른 해양오염개선 시나리오를 몇 가지 산정하고, 각 시나리오에 따른 사망률 개선효과를 추정해 본다.
- 기술개발에 따른 연안수질개선 정도는 2005-2010년 전국 연안의 평균적인 화학적 산소요구량인 1.07 mg/l을 기준으로 설정하였다. 시나리오 1과 2는 정화기술개발 후 연안의 화학적 산소요구량 평균이 각각 현행의 90%와 50% 수준으로 낮아질 것으로 가정한다. 시나리오 3은 정화기술개발에 따라 전국의 연안수질 평균이 현재 수질이 가장 좋은 연안의 화학적 산소요구량인 0.25 mg/l로 낮아진다고 가정한다. 이 가정에 따르면 현행 수준의 23% 수준으로 오염도가 낮아지는 것이다. 마지막으로 시나리오 4는 현행의 10% 수준으로 화학적 산소요구량 평균이 떨어진다는 가정이다. 4가지 시나리오 중 어떤 것이 가장 현실적인지는 좀 더 분명한 근거가 뒷받침되어야 하지만 기술개발의 특성을 고려할 때, 시나리오 2가 가장 현실적인 가정이라고 판단된다.
- 다음으로 각 시나리오에 따라 화학적 산소요구량이 낮아질 때, 사망률 감소분의 산출은 표 I-아-6의 회귀분석 결과를 활용하였다.<sup>28)</sup> 표 I-자-6의 회귀모형(5)에서 통계적으로 유의미한 결과를 보인 호흡기와 비노생식기 질환 사망률에 미칠 수 있는 효과만을 살펴본다. 시나리오 2를 기준으로 추정결과를 보면, 호흡기 질환에 의한 사망률은 현행(2010년 기준) 인구10만 명 당 30.56에서 향후 27.99으로 하락할 것으로 예상되며, 비노생식기 질환에 의한 사망률은 7.67에서 6.48로 하락할 것으로 예상된다.

[표. I-자-7] 해양오염정화 시나리오별 연간 예방가능 조기사망자수 추정

시나리오	화학적 산소요구량		인구10만 명 당 사망률 예상		분석 시군의 인구합계	분석 시군 내 추정 사망자수		분석 시군 내 연간 예방가능 조기사망수		
	mg/l	개선율	호흡기	비노생식기		호흡기	비노생식기	호흡기	비노생식기	합계
2005-2010년 평균	1.07		30.56	7.67	4,584,027	1,401	352			
시나리오 1	0.96	0.90	30.16	7.48	4,584,027	1,382	343	19	9	27
시나리오 2	0.54	0.50	27.99	6.48	4,584,027	1,283	297	118	54	172
시나리오 3	0.25	0.23	25.42	5.39	4,584,027	1,165	247	236	105	340
시나리오 4	0.11	0.10	22.83	4.39	4,584,027	1,047	201	354	150	505

주: 추정방법은 본문 참조.

28) 식(1)의 회귀모형과 회귀계수(β)를 고려하고 지역 특성이 동일하다고 가정하면, 해양오염개선(COD0에서 COD1으로)에 따른 예상 사망률

$$(M1)은 다음과 같이 추정할 수 있다: M_1 = \frac{M_0}{(COD_0/COD_1)^\beta}.$$

- 이상에서 산출한 사망률 개선효과를 분석대상 시군 총 인구에 적용하면 개선효과를 사망자수 감소폭으로 변환할 수 있다. 이때 사망자수를 감소시킨다는 것은 해양오염개선을 통해 조기사망을 예방할 수 있다는 의미이다. 2010년 말 기준 본 연구에서 사용한 시군의 총 인구는 4,584,027명으로 전국 인구의 10%에 조금 미치지 못한다. 향후 시군 인구가 동일하다는 가정 하에 시나리오별 인구 10만 명 당 사망률 예상치를 시군 총 인구에 적용하면 각 원인별 사망자수를 계산할 수 있다. 최종적으로 예방 가능 사망자수는 현행 수준에 비해 사망자수가 얼마나 줄어들지는 의미한다. 시나리오 2를 기준으로 평가할 때, 향후 해양오염 정화기술개발로 연안의 해양오염도가 50% 수준으로 감축된다면 호흡기와 비뇨생식기 질환에 의한 사망자수가 각각 연간 118명과 54명 줄어들 것으로 예상된다.

**(마) 해양오염개선에 따른 건강증진의 경제적 가치**

- 앞 장에서는 해양오염개선에 따른 건강증진효과를 ‘예방가능 조기사망자수’라는 개념으로 정량화하였다. 일반적으로 이러한 성과의 경제적 가치 또는 편익의 크기는 예방가능 사망자 1인당 경제적 가치를 추정한 후, 이를 총 예방가능 조기사망자수에 곱하여 구할 수 있다. 결국 건강증진 측면에서 기술개발의 경제적 가치는 해양오염에 따른 사망자를 1명 구할 때 발생하는 사회경제적 가치의 크기에 좌우된다. 경제학에서는 사망감소의 경제적 가치를 흔히 ‘통계적 인간생명가치(Value of Statistical Life: VSL)’이라고 표현하고 있다. 본 절에서는 ‘통계적 인간생명가치’ 추정에 관한 선행연구들을 살펴보고, 인적자본접근법을 바탕으로 해양오염개선에 따른 건강증진의 경제적 가치를 추정해 보고자 한다.

**① 선행연구검토**

- 통계적 인간생명가치의 추정방법은 그 목적에 따라 다양하다. 흔히 쓰이는 방법은 특정 정책으로 기대되는 사망률 감소에 대한 지불의사금액(willingness to pay)을 측정하는 ‘조건부가치추정법(contingent valuation method: CVM)’의 활용이다. 예를 들어, 사망 위험률을 낮추기 위한 행위 또는 정책(금연, 안전벨트 착용, 암검진 등)에 대해 얼마나 지불할 의사가 있는지를 설문조사하여 사망감소의 경제적 가치를 추정한다. 좀 더 구체적으로 설명하자면, 1/10,000의 확률만큼 사망가능성 감소를 가져다주는 특정 행위나 재화·서비스 구입에 대해 얼마나 지불할 의사가 있는지를 설문조사한 후, 그 평균값에 10,000의 곱하여 1의 확률로 사망률이 감소할 경우의 지불의사금액을 추정하는 방법이다.

**[표. I -자-8] 통계적 인간생명가치 추정사례**

연구	적용사례	분석방법	통계적 인간생명가치
신영철·조승현 (2003)	미래의 사망가능성 감소에 대한 지불의사	지불의사접근법	4억 6600만원
이용진 외 (2004)	벤젠으로 인한 암 사망	지불의사접근법	3억 6,000만원
신영철 (2008)	암검진 행위	위험회피형태접근법	3억 2,110만원
한국보건산업진흥원 (2008)	응급사망	인적자본접근법	1억 8,000만원
김태윤·이형우 (2003)	사망배상금 판례	인적자본접근법	2억 1,300만원
김태윤·이형우 (2003)	보험금지급	인적자본접근법	2억 2,000만원

- 이와 같은 추정법을 이용한 최근의 국내 연구와 결과는 표 I -자-8에서 요약하고 있다. 신영철·조승현 (2003)은 40-60세 응답자들을 대상으로 짧게는 10년에서 길게는 30년 이후인 70-80세에 사망가능성을 5/1,000의 확률만큼 감소시켜 주는 제품에 대한 지불의사를

---

설문조사하였고, 이를 바탕으로 평균적인 통계적 인간생명가치를 4억 6,600만원으로 추정하였다. 이용진 외 (2004)의 연구는 울산지역에서 1인의 통계적 인간생명가치를 추정하기 위해 30-70세 성인 500명을 대상으로 향후 10년간 환경오염(벤젠)으로 인한 암 사망 가능성이 5/1,000 (연간 5/10,000) 감소하는 상황에 대한 지불의사를 조사하였고, 그 결과 평균적으로 3억 6,600만원의 값을 도출하였다.

- 그러나 조건부가치추정법은 재화의 특성과 가상적 시장 상황을 응답자에게 설명을 해주고 가치를 부여하게 하는 과정을 거치게 된다. 본질적으로 가상적인 상황을 설정하여 특정 사망확률 감소에 대한 가치를 도출하기 때문에 결과를 신뢰하기 힘들다는 비판이 있어왔다. 또한 사망확률이 다른 두 상황에 대한 지불의사를 제시함에 있어 사망확률을 충분히 고려하지 못한 응답자들은 사망확률이 높고/낮음으로 인식하여 지불의사를 제시할 가능성이 높다. 이 경우 특정 사망확률 감소의 한계지불의사가 과대평가될 수 있다. 더불어 응답자가 사망확률에 대한 충분한 이해가 있어도 제시한 사망확률의 크기에 따라 지불의사가 달라질 수 있다. 사망확률과 지불의사 간에 비선형적인 관계가 있다면 특정 확률에 대한 지불의사금액을 1의 확률로 비례적 변환을 시키는 것은 적잖은 편이를 동반할 수 있다.
- 조건부가치추정법의 또 다른 유형은 특정 위험을 회피하는 행위의 가치를 측정하는 ‘위험 회피형태 접근법’이다. 이러한 유형의 연구로는 신영철 (2008)의 예를 들 수 있다. 신영철 (2008)은 2001년도 ‘국민건강영양조사’ 결과에서 관측되는 개인의 암검진 행위와 암검진에 의한 사망률 감소폭 등을 활용하여, 암 검진 행위라는 위험회피행위의 경제적 가치를 추정하였다. 이때 추정한 통계적 인간생명가치는 3억 2,110만원이었다.
- 한편 조건부가치추정법과 더불어 자주 쓰이는 추정방법은 ‘인적자본접근법’이다. 이 방법은 인간이 소득의 형태로 사회적 후생 증가에 기여한다는 전제를 기반으로 한다. 즉 사망으로 인해 발생하는 임금 또는 소득의 손실을 인간생명가치로 간주하며, 일반적으로 사망시점 이후 기대되는 임금과 소득의 현재가치를 합하여 추정한다. 따라서 인적자본접근법의 목적함수는 국민총생산이라 할 수 있으며, 조건부가치추정법의 목적함수는 선호에 입각한 개인의 후생이라 할 수 있다.
- 인적자본접근법을 활용한 한국보건산업진흥원 (2008)은 응급의료 3대 질환인 외상, 급성 심근경색, 급성뇌졸중 사망자의 인구분포를 조사하고, 응급질환 사망으로 발생하는 임금 손실의 현재가치를 추산하였다. 그 결과 사망에 따른 1인당 경제적 비용은 약 1억 8천만원으로 추정되었다.
- 인적자본접근법의 다른 사례는 손해배상판결에서의 사망배상금과 보험지급사례라고 할 수 있다. 일반적으로 사망배상금은 사망으로 상실된 평생 예상 수익(소득 또는 임금)의 현재가치 합에서 예상되는 소비액 또는 생계유지비를 제외하는 방식으로 산출된다. 김태윤·이형우 (2003)의 연구결과에 따르면 사망배상금과 관련된 39개의 판례를 수집하여 검토한 결과 평균적인 사망배상금은 약 2억 1,300만원 이었다. 역시 김태윤·이형우 (2003)는 정채용·이의용 (1995)의 교통사고 보험금 지급액 산정 연구를 활용하여 2억 2,000만원의 인간생명가치를 산출하였다. 이때 평균 보험금의 산출에는 총상실수익의 현재가치와 위자료를 포함하였다.
- 그러나 인적자본접근법은 사망에 따른 소득상실만을 고려한다는 문제를 가진다. 개인은 삶을 유지하면서 경제활동 외에도 다양한 형태의 유·무형적인 가치를 창출한다. 개인의 여가활동도 이에 포함될 수 있으며, 개인의 소비활동 역시 직·간접적으로 경제적/사회적 가치 창출에 영향을 미칠 수 있다. 또한 삶을 유지하는 동안 개인이 경험하는 즐거움과 행복도 넓은 의미에서 사회적 가치라고 할 수 있다. 이러한 측면을 고려할 때 표 I-아-8에서 보는 것처럼 인적자본접근법으로 추정한 인간생명가치는 다른 방법으로 추정한

결과보다 상대적으로 낮다.

- 이상에서 살펴본 바와 같이 사망감소의 경제적 가치를 추정하는 방법은 다양하며, 그 추정결과도 적잖은 편차를 가지고 있다.<sup>29)</sup> 기존 연구들의 연구방법을 볼 때, 해양오염 정화 기술개발에 따른 사망률 감소의 경제적 가치를 도출할 수 있는 가장 현실적인 방법은 특정 확률로 사망확률이 낮아질 수 있는 해양오염 정화기술개발을 응답자에게 설명하고 이에 대한 지불의사금액을 설문조사하는 것이다. 이는 지불의사추정법에서 설정한 사망률 감소가 동일하다고 해도 각 정책이나 기술개발에 대한 개인의 선호가 다르므로 해양오염의 지불의사금액은 표 I-아-8의 기존 연구와 크게 다를 수 있기 때문이다.

## ② 임금손실만을 고려한 편익 산출

- 지불의사접근법의 활용이 여의치 않은 현 시점에서 본 연구는 대안적인 방법으로 인적자본접근법을 활용하고자 한다. 인적자본의 지표로는 임금자료를 활용한다. 사회경제적 관점에서 사망의 가장 직접적인 기회비용은 노동활동을 통한 국가생산성 유지일 것이다. 일반적으로 실질임금은 노동생산성의 지표로 간주되므로, 임금을 인적자본의 지표로 사용하는 것은 타당하다고 판단된다. 그러나 오염정화기술개발을 통해 사망을 예방할 수 있다면 다양한 측면에서 사회경제적 혜택이 발생할 수 있는데 이를 임금손실예방만으로 제한한 것은 매우 보수적인 설정임에 유의할 필요가 있다. 반면 연령별 임금자료를 활용하면 편익 추정에 있어 연령별 인구분포를 고려할 수 있다는 장점을 가진다.
- 우선 사망에 따른 임금손실의 크기는 다음 식에서처럼 사망시점 이후 기대여명까지 얻을 수 있는 임금의 현재가치 합으로 나타낼 수 있다.

$$V_a = \sum_{t=a}^{a+e} \frac{W_t}{(1+r)^{t-a}} \quad \text{식(2)}$$

$a$ : 연령,  $e$ : 기대여명,  $W_t$ : 연령  $t$ 에서의 연평균임금,  $r$ : 할인율

- 위 식을 이용하여 사망에 따른 임금손실을 추정하기 위해서는 연령대별 임금자료와 특정 연령에서의 기대여명에 대한 자료가 요구된다. 우선 연령대별 임금자료는 2010년 지역별 고용조사 자료를 활용한다. 지역별 고용조사 자료로부터 근로자의 연평균 임금을 계산한 결과는 표 I-아-9와 같다. 그러나 유아, 청소년 그리고 고령층의 경우에는 노동활동을 하지 않기 때문에 임금자료가 없거나, 임금 정보가 있는 경우에도 표본의 수가 작다는 문제가 있다. 임금자료가 누락된 경우에 해당 연령대의 인적자본 수준을 0으로 가정해야 한다는 한계를 가진다.
- 본 연구에서는 개인의 노동생산성을 측정하는 임금의 패턴이 연령에 따라 연속적으로 변한다는 가정 하에서, 18-75세의 연령별 연평균 임금 분포를 이용하여 0-17세 그리고 76-100세의 임금을 추정하였다. 좀 더 구체적으로 설명하자면, 지역별 고용조사 자료에서 구한 18-75세 각 세별 연평균임금의 로그값을 연령과 연령의 제곱에 OLS 회귀분석하고, 회귀계수를 활용하여 0-100세의 연평균임금을 추정하였다.<sup>30)</sup>

29) 이러한 편차는 해외사례에서 더욱 크게 나타난다. OECD (2012)는 인간생명가치를 추정한 전 세계 856개 사례를 검토한 바 있다. 전체 1/3의 추정결과가 통계적 인간생명가치를 1백만 달러 이하로 추정하였지만, 1천만 달러 이상으로 추정한 결과도 10% 이상에 달한다. 또한 환경부문의 평균값은 약 9백만 달러로 가장 높고, 교통부문 약 7백만 달러, 그리고 보건부문은 약 4백만 달러로 나타났다. 해외사례와 비교할 때, <표 I-아-8>에서 제시한 국내사례의 인간생명가치 추정치는 매우 작다. 이렇게 인간생명가치 추정결과가 큰 편차를 보이는 주요 원인은 국가별로 소득수준, 관심 정책의 유형, 추정방법, 국가별 개인 선호 정도 등이 다르기 때문이다. 이는 특정한 정책이나 국가사업에 의한 사망감소 편익을 추정함에 있어 그에 합당한 추정방법과 결과를 적용하지 않으면 경제적 편익의 편이가 상당할 수 있다는 점을 시사한다.

30)  $\ln(WAGE_t) = \alpha + \beta AGE_t + \gamma AGE_t^2 + \varepsilon$ ,  $t$ : 18-75세  $\overline{WAGE}_t = \exp(\bar{\alpha} + \bar{\beta} AGE_t + \bar{\gamma} AGE_t^2)$

- 남성과 여성의 평균임금은 모든 연령대에서 차이를 보이고 있다. 이런 차이를 반영하여 성별로 사망에 따른 임금손실을 계산하면 남녀 간에 적잖은 차이가 발생한다. 본 연구에서는 예방가능 사망자수를 추정함에 있어 성별을 구분하지 않았기 때문에 성별 구분 없이 전체 연평균임금을 사용한다. 그림 I-자-5은 연령별 연평균 임금 추정결과를 보여주고 있다. 실제 연평균임금과 추정치는 매우 유사한 분포를 보이고 있으며, 임금은 40대 초반에서 가장 높고, 0세와 100세로 갈수록 0에 가까운 값으로 추정되었다.



[그림. I-자-5] 연령별 연평균임금 추정 결과, 2010년

주: 추정방법은 본문 참조. 나이는 만나이임. 남성/여성 전체 연평균임금을 나타냄.

- 다음으로 일정 연령에서 기대되는 수명 즉 ‘기대여명’은 국가통계포털의 2010년 생명표 (life table) 자료를 이용하였다. 5세별 기대여명은 표 I-지-9에서 보여주고 있으며, 2010년 출생집단의 평균기대여명은 80.8년이며, 2010년에 만 나이로 100세 집단의 평균기대여명은 2.6년이다. 임금의 경우와 같이 기대여명은 남녀 간에 적잖은 격차를 가지지만, 본 연구에서는 성별에 따라 분석하지 않고, 각 세별 평균기대여명 자료를 활용하였다.

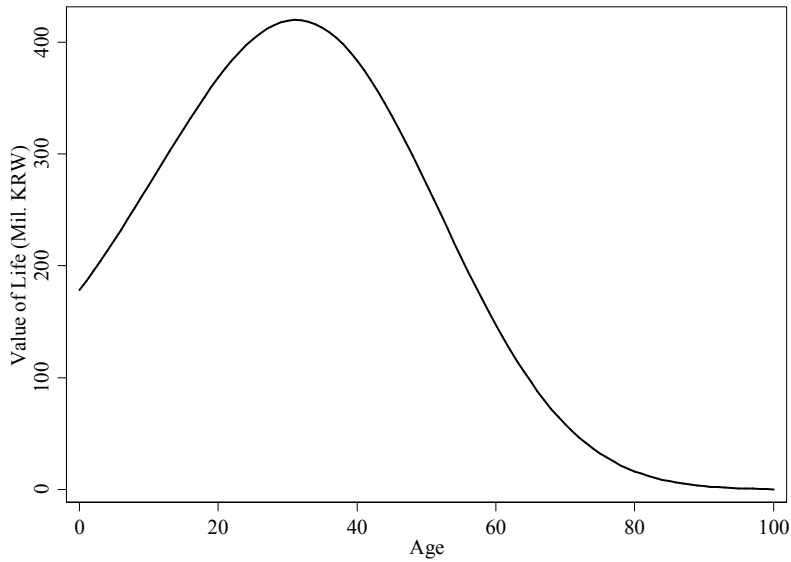
[표. I-자-9] 연령별 기대여명 및 연평균임금, 2010년

연령	기대여명 (년)			근로자 연평균임금 (만원)		
	전체	남성	여성	평균	남성	여성
0	80.8	77.2	84.1			
5	76.1	72.6	79.4			
10	71.2	67.6	74.4			
15	66.2	62.6	69.4			
20	61.3	57.8	64.5	1074.5	1152.9	1047.4
25	56.4	52.9	59.6	1775.8	1797.5	1760.7
30	51.6	48.1	54.7	2240.5	2414.8	1976.1

35	46.8	43.3	49.9	2557.4	2866.4	1962.8
40	42.0	38.6	45.1	2710.9	3274.3	1821.7
45	37.3	34.0	40.2	2705.8	3346.7	1792.9
50	32.7	29.5	35.5	2594.3	3299.1	1599.5
55	28.3	25.2	30.8	2450.2	3096.8	1446.8
60	23.9	21.1	26.2	1835.2	2345.2	1153.3
65	19.7	17.2	21.6	1256.9	1569.9	816.2
70	15.8	13.5	17.3	918.9	1256.8	610.4
75	12.2	10.3	13.3	596.8	718.3	522.6
80	9.1	7.6	9.8			
85	6.6	5.5	7.0			
90	4.8	4.0	5.0			
95	3.5	3.0	3.6			
100	2.6	2.3	2.7			
주: 각 세별 자료 중 위 연령에 대해서만 보고함. 각 연령은 만 나이임. 자료: 기대여명 - 통계청 인구/가구 완전생명표(각 세별), 연평균임금 - 통계청 2010년 지역별 고용조사의 월평균임금 추정치에 12를 곱하여 계산함.						

- 연령대별 연평균임금 추정결과와 평균기대여명을 위 식(2)에 대입하여 추정한 연령대별 사망에 따른 임금손실의 현재가치 합은 그림 I-자-6와 같다. 사망에 따른 임금손실을 다시 해석하면, 조기사망을 예방하여 기대여명까지 수명이 연장되었을 때 얻을 수 있는 경제적 가치를 임금으로 나타낸 것이라 할 수 있다. 즉 임금자료로 추정한 사망감소의 경제적 가치는 31세에서 4억 1,995만원으로 가장 높게 추정되었고, 0세와 100세로 갈수록 사망감소의 경제적 가치는 연속적으로 줄어들게 된다.
- 이상의 결과를 활용하여 해양오염 정화기술개발의 편익 산출에 적용할 수 있는 사망자 1인당 평균적인 임금손실의 규모가 얼마나 될지 가능해보자. 앞 절에서 예방가능 조기사망자수를 추정할 때, 호흡기와 비뇨생식기 질환 사망률을 이용하였다. 따라서 1인당 임금손실 또는 경제적 가치를 추정함에 있어 두 가지 원인별 사망률의 연령분포를 고려할 필요가 있다. 표 I-자-10에서는 2010년 호흡기 및 비뇨생식기 질환 사망자의 연령분포를 가중치로 활용하였고, 그 결과 사망에 따른 평균적인 임금손실은 약 4,473만원으로 추정되었다. 만약 가중평균을 하지 않고 임금손실을 산술평균하거나, 사망자의 연령분포가 아니라 전체 인구의 연령분포를 가중치로 이용하게 되면, 사망에 따른 평균적인 임금손실이 2억 원 이상으로 추정된다. 이렇게 큰 차이가 나는 이유는 본 연구에서 활용한 호흡기 및 비뇨생식기 질환 사망자의 다수가 고령층에 집중되어 있기 때문이다. 연령분포를 반드시 고려할 필요가 있음을 시사한다.





[그림. I-자-6] 연령별 사망에 따른 임금손실 추정 결과

주: 각 연령은 만나이임. 2010년 가격으로 추정함.

[표. I-자-10] 사망에 따른 평균 임금손실 추정

연령대	연령대별 평균 임금손실: 백만원 (V)	2010년 호흡기 및 비뇨생식기 사망자 분포		
		사망자 (N)	비중 (R)	V*R
1세미만	178.2	29	0.0012	0.22
1-9세	223.5	41	0.0018	0.39
10-19세	317.0	25	0.0011	0.34
20-29세	397.2	43	0.0018	0.73
30-39세	410.9	118	0.0050	2.07
40-49세	338.0	427	0.0183	6.17
50-59세	215.0	1,027	0.0439	9.45
60-69세	103.1	2,698	0.1154	11.90
70-79세	36.1	7,125	0.3048	10.99
80세이상	4.9	11,841	0.5066	2.47
사망에 따른 평균 임금손실: 백만원 ( $\Sigma V*R$ )				44.73

주: 호흡기 및 비뇨생식기 사망자의 연령 분포는 통계청의 2010년 사망원인통계에서 구함.

- 끝으로 1인당 평균 임금손실 추정치를 표 I-자-7에서 구한 해양오염개선 시나리오별 예방가능 사망자수에 적용해보자. 표 I-자-11의 결과 중 시나리오 2를 기준으로 살펴보면, 오염정화기술개발로 연안의 화학적 산소요구량 평균이 현행의 50% 수준으로 감소한다면 호흡기 및 비뇨생식기 질환에 따른 사망을 연간 172명 예방할 수 있다. 이들 예방가능 사망자의 1인당 기대여명까지 임금의 현재가격은 약 4,473만원으로 추정되므로 이를 적용하

면, 오염정화기술개발에 따른 사망감소의 경제적 가치는 연간 76.99억 원으로 추정된다.

[표. I-자-11] 해양오염 정화기술개발의 건강증진효과의 연간 경제적 가치

시나리오	화학적 산소요구량		연간 예방가능 조기사망수 (명)	조기사망예방 경제적 가치 (억원, 2010년 기준)
	mg/l	개선율		
2005-2010년 평균	1.07			
시나리오 1	0.96	0.90	27	12.27
시나리오 2	0.54	0.50	172	76.99
시나리오 3	0.25	0.23	340	152.09
시나리오 4	0.11	0.10	505	225.76

주: 본문 참조.

- 그러나 표 I-자-11의 결과는 기술개발에 따른 건강증진편익을 과소 추정할 개연성이 높다. 첫째, 본 연구에서는 연안수질의 영향이 인접 시군에서만 발생한다고 가정하였다. 그러나 정도의 차이가 있을 수는 있지만 해양오염의 부정적인 영향이 다른 시군에서도 발생할 여지가 충분히 있다. 둘째, 위 결과는 표 I-자-6의 회귀분석 중 회귀모형(5)의 결과를 활용하여 호흡기 및 비노생식기 질환에 따른 사망에만 초점을 맞추어 얻은 결과이다. 다른 회귀모형을 기준으로 하면 다른 원인에 따른 사망감소도 고려해야 하며 이 경우 편익의 크기가 증가할 수 있다. 셋째, 사망률은 해양오염의 중·장기적인 효과를 반영할 수 있지만 단기적인 영향의 추정에는 적합하지 않을 수 있다. 해양오염개선을 통해 단기적으로 다양한 유해질병의 발병률이 저하된다면 이를 통한 의료비용 절감, 노동손실 절감, 단기적인 건강증진 등의 사회적 편익이 발생할 수 있다.<sup>31)</sup> 넷째, 사망감소의 경제적 가치를 산출함에 있어 인적자본 손실 또는 임금손실만을 고려하고 있으나, 개인의 수명이 연장될 때 얻게 되는 효용은 임금 이외에도 소비증가, 여가활용 등 다양하게 존재한다. 이를 고려할 경우 실제 사회경제적 편익은 더욱 클 수 있다.

#### (바) 요약 및 결론

- 본 연구는 해양오염 퇴적물 정화기술개발이 국민건강증진을 개선하는 효과의 경제적 가치를 추정하는 것을 목적으로 하였다. 환경개선의 건강증진효과는 매우 비정형적인 특성을 가지므로 이를 정량화하는 것은 쉽지 않은 일이다. 하지만 다양한 환경문제가 중·장기적으로 개인의 건강과 인적자본축적에 영향을 미친다는 선행연구들을 고려할 때, 해양오염개선의 건강증진효과를 간과해서는 안 될 것이다.
- 해양오염 정화기술개발이 가져오는 건강증진효과의 가치를 추정하기 위해 본 연구에서는 해양오염개선의 시나리오를 여러 가지로 산정한 후 각 시나리오에 따른 사망률 감소 효과를 추정하였다. 또한 임금과 기대여명 자료를 활용하여 사망 1인당 인적자본손실의 크기를 산출하였다. 가장 현실적인 결과를 요약하자면, 정화기술개발로 연안수질의 화학적 산소요구량 평균이 현행의 50% 수준으로 감소하게 될 때, 연간 예방 가능사망자수는 172명으로 추산되며, 이의 경제적 가치는 연간 76.99억 원(2010년 가격)으로 추정된다. 그러나 이 결과는 단기 효과의 누락, 여가나 소비 등을 통해 발생하는 효용 누락 등의 이유로 실제 경제적 가치를 과소 추정할 가능성이 높다고 판단된다.

31) 해양오염개선은 사망에 이르지 못한 사람들에게도 건강증진이라는 혜택을 줄 수 있다. 이러한 건강증진 혜택은 DALY(disability-adjusted life year) 또는 QALY(quality-adjusted life year) 등으로 측정이 가능하다. DALY와 QALY는 질병의 부담을 수명(life year)로 추정하는 지표로서, 만약 지표의 측정이 가능하다면 여기에 인간생명가치 추정결과를 적용하여 편익을 계산할 수 있다.

- 
- 마지막으로 본 연구는 여러 가지 한계가 있음을 밝히고자 한다. 첫째, 환경문제의 효과는 비교적 장기적으로 나타나지만 수집 가능한 자료를 활용하여 장기적인 효과를 파악할 수 없었다. 향후 해양오염의 경제적 가치를 보다 엄밀히 추정할 수 있는 충분한 자료의 구축이 요구된다. 둘째, 해양오염이 건강에 미치는 효과는 사망률 이외에도 전염병 발병, 만성 질환, 인지능력, 출생결과 등 다양한 측면에서 발생할 수 있지만 역시 자료 부족으로 인해 이러한 경로를 엄밀히 분석할 수 없었다는 한계를 지닌다. 셋째, 해양오염이 건강에게 미치는 영향은 직접적인 건강에 대한 영향 이외에도 생태계 교란 등을 통한 간접적인 영향도 배제할 수 없다. 그러나 이러한 영향의 경제적 비용과 가치를 추정하기에 앞서 생물학적 메커니즘과 그 근거가 여전히 충분하지 않다는 문제점을 가진다.

## 제2절. 2차년도 연구의 내용 및 결과

### 1. 2차년도 연구개발 목표

- 해양오염퇴적물 정화·복원사업에서 현재 사용되는 기술(준설, 중간 및 최종처리)의 문제(수거 해양오염퇴적물 처리, 최종처리장 확보 애로 등)를 해결하기 위한 대안으로 피복정화 및 현장처리기술을 개발하기 위한 기반연구 수행

### 2. 2차년도 연구개발 내용 및 범위

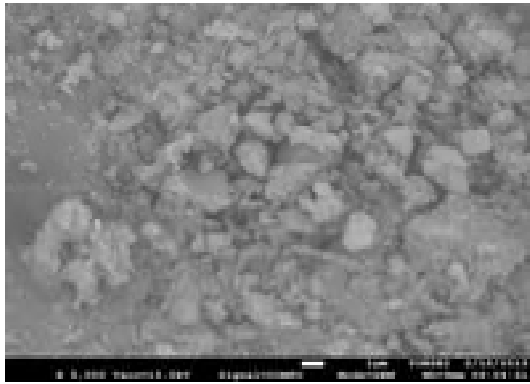
#### 가. 반응성 피복소재 개발

(1) 국내해역 오염특성을 고려한 중금속 및 유기오염물질 안정화 성능을 가진 반응성 피복소재 도출

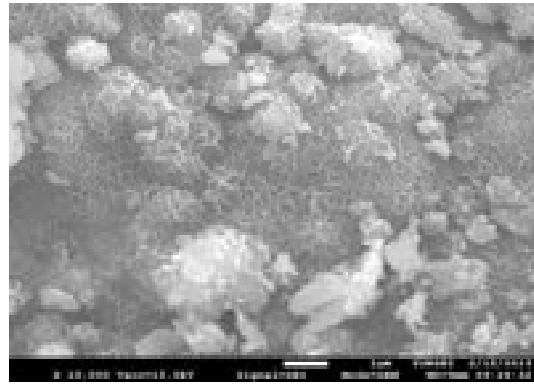
(가) 중금속 및 유기오염물질 대상 반응성 피복소재 도출

#### ① 반응성 피복 소재의 물리·화학적 특성

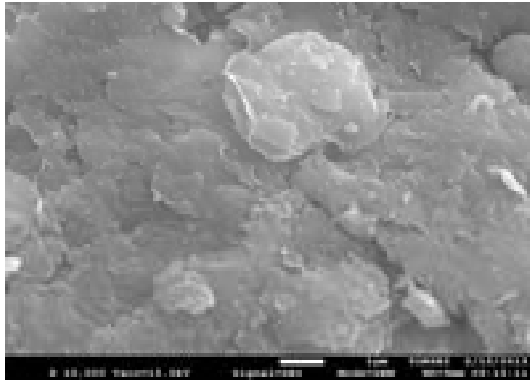
- 전자현미경(SEM)을 이용해 피복소재들의 표면 특성을 관찰
  - 순환골재와 제강슬래그는 표면이 좁 거친 특징을 갖고 있는 반면 벤토나이트, 활성탄 등은 비교적 매끄러운 표면 구조를 가짐
  - 특히 활성탄은 미세기공이 발달되어 있음을 알 수 있음
-



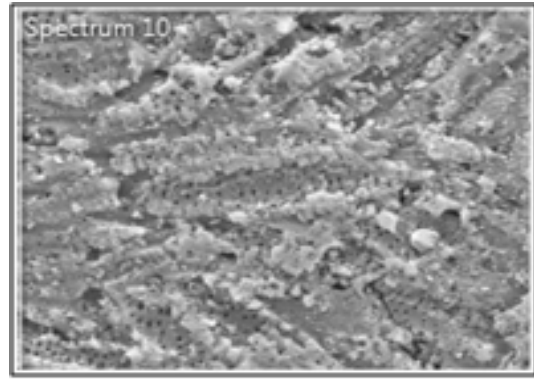
순환골재(Recycled aggregate)



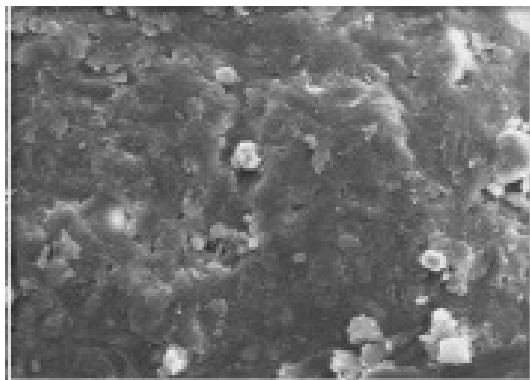
제강슬래그(Steel slag)



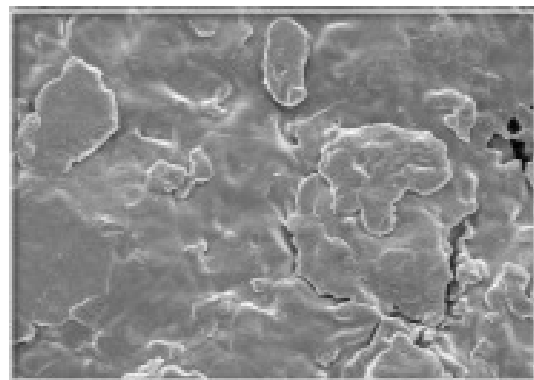
벤토나이트(Bentonite)



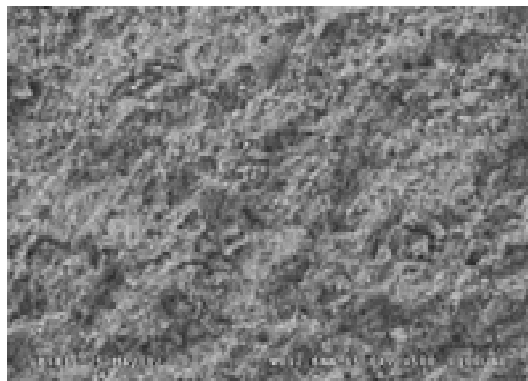
활성탄(Activated carbon)



유기점토(Organic clay)



영가철(Zerovalent iron)



제올라이트(Zeolite)

[그림 II-가-1] 피복소재들의 SEM 이미지

- 피복소재의 화학적 구성성분 분석결과  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  등을 포함하고 있는 소재들이 다수이며 따라서 중금속 제거에 적합한 흡착력을 가질 수 있음(표 II-가-1 참고)

- 비표면적은 활성탄 > 제올라이트 > 벤토나이트 > 유기점토 > 순환골재 > 제강슬래그 > 영가철 순으로 나타남

[표 II-가-1] 피복소재들의 물리화학적 특성

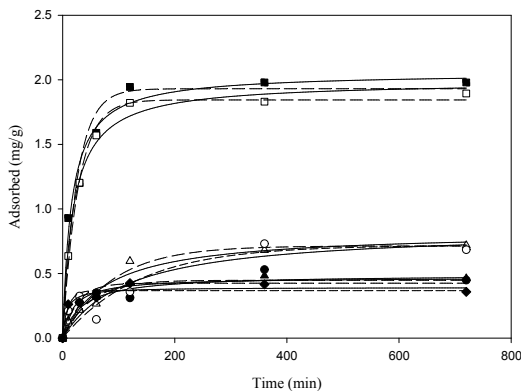
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Surface areas (m <sup>2</sup> /g)
순환골재	9.9	6.0	38.4	1.5	0.4	36.2	-	-	0.1	5.981
제강슬래그	-	40.6	16.3	-	-	30.0	-	-	2.1	0.188
벤토나이트	16.5	3.3	72.8	2.4	0.2	1.6	0.4	0.01	-	16.245
활성탄	0.02	0.02	0.3	-	0.01	0.02	0.1	-	0.01	1130.466
유기점토	4.5	1.1	15.8	1.6	0.07	0.6	0.16	0.01	0.02	10.473
영가철	-	99.9	0.04	-	-	-	0.02	-	-	0.175
제올라이트	12.0	1.7	76.5	2.5	0.3	1.9	0.1	-	0.1	40.378

(나) 반응성 피복소재 성능평가

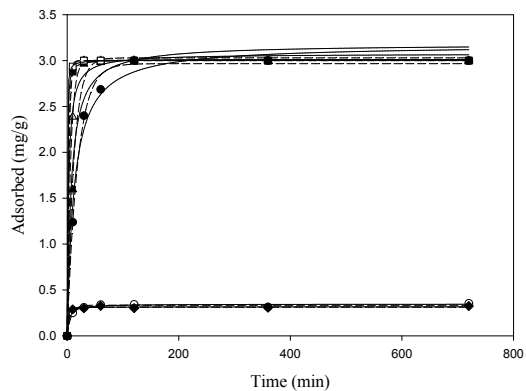
① 혼합 중금속(Cr<sup>6+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, As<sup>3+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>) 흡착제거 성능평가

㉞ 피복소재들의 동적흡착 특성

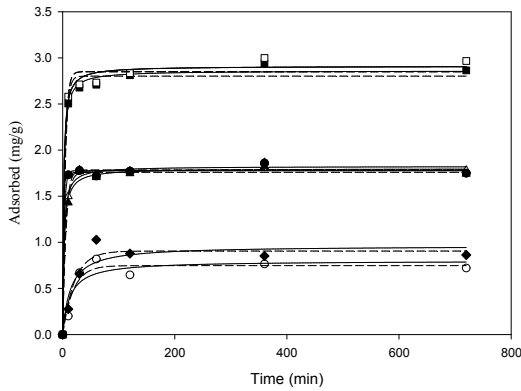
- 반응성 피복소재의 흡착능을 비교하기 위하여 동일한 양의 혼합 중금속용액(50 mg/L)과 피복소재를 50 mL 튜브(0.5g, 30 mL)에 투입한 후 25°C, 100rpm에서 정해진 시간마다 시료 채취하여 중금속 농도를 ICP-MS (Agilent 7500 Series, USA)로 측정하여 흡착특성을 분석함. 모든 실험은 3회 반복하여 수행하였고, 평균값을 제시하였음
- 피복소재별, 중금속 종류에 따라 약간의 차이는 있지만 대체적으로 3시간 이내에 흡착 평형에 도달함
- 제강슬래그, 활성탄은 중금속 흡착에 상대적으로 높은 효율을 나타냄
- 혼합중금속 중 Cu, Pb가 일반적으로 높은 흡착경향을 나타냄



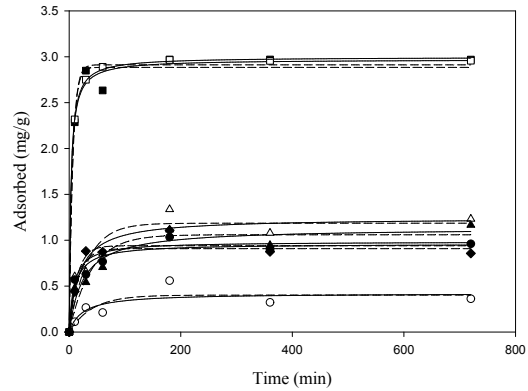
<순환골재(Recycled aggregate)>



<제강슬래그(Steel slag)>



<벤토나이트(Bentonite)>



<활성탄(Activated carbon)>

[그림 II-가-2] 피복소재들의 동적흡착 특성 비교

Symbols: (▲) Ni, (△) Zn, (■) Cu, (□) Pb, (●) Cd, (○) As, and (◆) Cr.

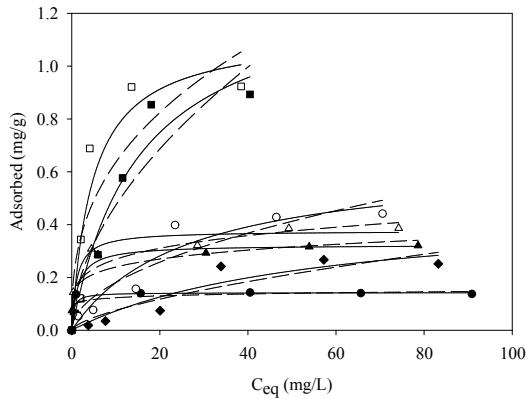
점선: Pseudo-first-order model, 실선: Pseudo-second-order model

[표 II-가-2] 피복소재들의 동적흡착 모델 매개변수 값

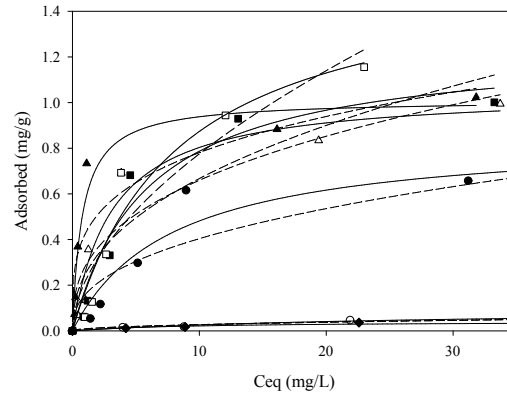
		Pseudo-first-order model			Pseudo-second-order model		
		$q_e$ (mg/g)	$K_1$ (L/min)	$R^2$	$Q_e$ (mg/g)	$K_2$ (g/mg/min)	$R^2$
Recycled Aggregate	Ni <sup>2+</sup>	0.448	0.021	0.943	0.490	0.060	0.977
	Zn <sup>2+</sup>	0.714	0.011	0.970	0.824	0.016	0.960
	Cu <sup>2+</sup>	1.931	0.039	0.956	2.056	0.031	0.982
	Pb <sup>2+</sup>	1.844	0.036	0.996	1.987	0.027	0.993
	Cd <sup>2+</sup>	0.425	0.038	0.829	0.468	0.111	0.897
	As <sup>3+</sup>	0.718	0.007	0.817	0.839	0.010	0.819
	Cr <sup>6+</sup>	0.367	0.098	0.884	0.392	0.374	0.929
Steel slag	Ni <sup>2+</sup>	3.029	0.082	0.994	3.179	0.045	0.966
	Zn <sup>2+</sup>	3.003	0.159	0.999	3.073	0.131	0.994
	Cu <sup>2+</sup>	3.000	0.321	1.000	3.014	0.776	0.999
	Pb <sup>2+</sup>	3.000	0.384	1.000	3.007	1.479	1.000
	Cd <sup>2+</sup>	2.966	0.053	0.996	3.172	0.026	0.988
	As <sup>3+</sup>	0.334	0.133	0.987	0.346	0.800	0.989
	Cr <sup>6+</sup>	0.312	0.253	0.993	0.316	3.211	0.993
Bentonite	Ni <sup>2+</sup>	1.756	0.168	0.997	1.799	0.243	0.994
	Zn <sup>2+</sup>	1.785	0.183	0.996	1.824	0.273	0.995
	Cu <sup>2+</sup>	2.802	0.223	0.993	2.860	0.224	0.997
	Pb <sup>2+</sup>	2.850	0.234	0.990	2.910	0.231	0.995
	Cd <sup>2+</sup>	1.776	0.360	0.996	1.784	1.748	0.996
	As <sup>3+</sup>	0.747	0.054	0.935	0.800	0.098	0.882
	Cr <sup>6+</sup>	0.905	0.047	0.951	0.961	0.077	0.894
Activated Carbon	Ni <sup>2+</sup>	1.060	0.026	0.900	1.133	0.035	0.931
	Zn <sup>2+</sup>	1.186	0.031	0.882	1.242	0.046	0.916
	Cu <sup>2+</sup>	2.884	0.157	0.988	2.970	0.117	0.991
	Pb <sup>2+</sup>	2.912	0.156	0.996	2.997	0.117	0.999
	Cd <sup>2+</sup>	0.909	0.061	0.898	0.961	0.107	0.949
	As <sup>3+</sup>	0.402	0.025	0.757	0.422	0.100	0.737
	Cr <sup>6+</sup>	0.940	0.07	0.945	0.985	0.121	0.916

### ㉔ 피복소재들의 평형흡착 특성

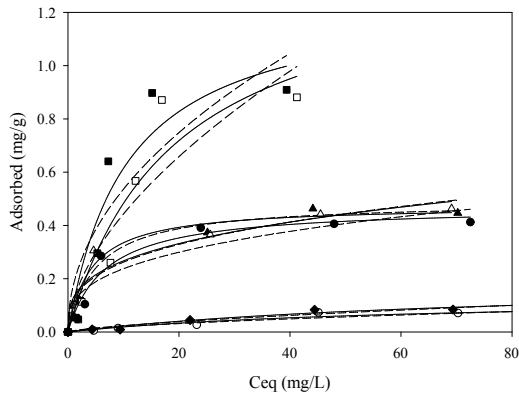
- 피복소재의 중금속 흡착능을 비교하기 위하여 다양한 농도의 혼합 중금속용액과 피복소재를 50 mL 튜브(0.5g, 30 mL)에 투입한 후 25°C, 100rpm에서 정해진 농도로 평형이 되는 충분한 시간만큼 반응시켜 잔류 중금속 농도를 측정함
- 평형흡착 실험결과 피복소재에 의한 중금속 흡착경향은 다층흡착이 아닌 단층흡착의 경향을 나타내고 있으며, 피복소재와 중금속간의 흡착강도가 높은 것으로 나타남
- 단층흡착을 가정한 Langmuir 모델 모사결과 최대흡착량은 활성탄이 가장 높았으며, 순환골재와 제강슬래그가 비교적 낮은 단위질량당 흡착량을 나타냄



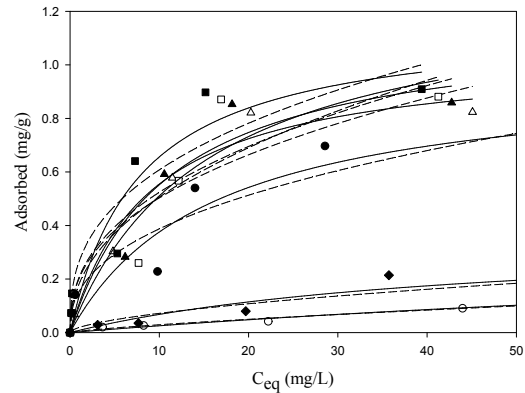
<순환골재(Recycled aggregate)>



<제강슬래그(Steel slag)>



<벤토나이트(Bentonite)>



<활성탄(Activated carbon)>

[그림 II-가-3] 피복소재들의 Freundlich model과 Langmuir model 비교

Symbols: (▲) Ni, (△) Zn, (■) Cu, (□) Pb, (●) Cd, (○) As, and (◆) Cd.

점선: Freundlich model, 실선: Langmuir model

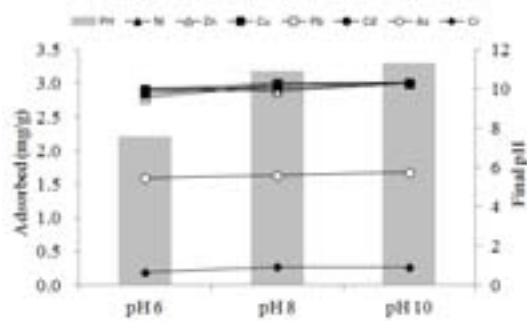
[표 II-가-3] 피복소재들의 평형흡착 모델 값

		Freundlich model			Langmuir model		
		K (L/g)	1/n	R <sup>2</sup>	Q <sub>m</sub> (mg/g)	K (L/mg)	R <sup>2</sup>
Recycled Aggregate	Ni <sup>2+</sup>	0.161	0.171	0.937	1.379	0.323	0.948
	Zn <sup>2+</sup>	0.167	0.208	0.913	1.130	0.376	0.955
	Cu <sup>2+</sup>	0.137	0.538	0.907	15.381	1.324	0.960
	Pb <sup>2+</sup>	0.267	0.376	0.802	4.764	1.130	0.910
	Cd <sup>2+</sup>	0.103	0.079	0.845	0.415	0.142	0.871
	As <sup>3+</sup>	0.056	0.513	0.984	25.685	0.643	0.92
	Cr <sup>6+</sup>	0.017	0.645	0.861	54.740	0.470	0.898
Steel slag	Ni <sup>2+</sup>	0.423	0.266	0.856	0.791	1.012	0.952
	Zn <sup>2+</sup>	0.281	0.370	0.896	3.099	1.052	0.956
	Cu <sup>2+</sup>	0.247	0.432	0.867	5.928	1.253	0.953
	Pb <sup>2+</sup>	0.216	0.556	0.909	8.299	1.598	0.948
	Cd <sup>2+</sup>	0.158	0.407	0.854	7.803	0.857	0.932
	As <sup>3+</sup>	0.009	0.480	0.976	28.271	0.099	0.989
	Cr <sup>6+</sup>	0.009	0.480	0.976	8.899	0.041	0.942
Bentonite	Ni <sup>2+</sup>	0.123	0.327	0.925	5.224	0.489	0.978
	Zn <sup>2+</sup>	0.130	0.314	0.921	4.185	0.475	0.965
	Cu <sup>2+</sup>	0.176	0.482	0.826	10.643	1.268	0.912
	Pb <sup>2+</sup>	0.118	0.573	0.851	19.076	1.404	0.908
	Cd <sup>2+</sup>	0.110	0.335	0.870	6.700	0.471	0.952
	As <sup>3+</sup>	0.050	0.642	0.913	62.064	0.136	0.941
	Cr <sup>6+</sup>	0.005	0.691	0.952	76.973	0.195	0.968
Activated Carbon	Ni <sup>2+</sup>	0.205	0.408	0.913	10.959	1.157	0.934
	Zn <sup>2+</sup>	0.200	0.400	0.935	8.795	1.043	0.965
	Cu <sup>2+</sup>	0.263	0.364	0.899	7.743	1.164	0.919
	Pb <sup>2+</sup>	0.180	0.449	0.886	15.337	1.294	0.899
	Cd <sup>2+</sup>	0.152	0.406	0.910	15.911	0.973	0.908
	As <sup>3+</sup>	0.005	0.762	0.981	154.256	0.413	0.981
	Cr <sup>6+</sup>	0.019	0.586	0.895	44.071	0.367	0.928

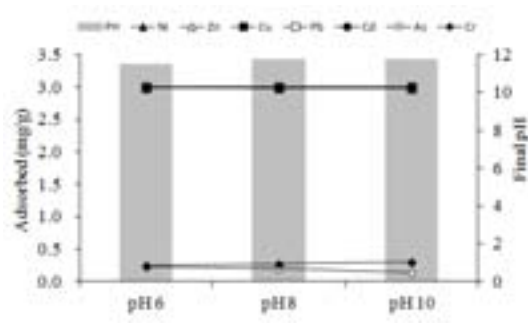
㊦ pH 변화에 따른 흡착 특성 변화

- pH에 따른 중금속 흡착 경향을 알아보기 위하여 실험을 수행하였고, pH는 6, 8, 10 으로 설정, 평형이 일어나는 충분한 시간만큼 반응시켜 잔류 중금속 농도를 측정
- pH가 증가할수록 대부분의 양이온 중금속 흡착량은 증가하는 경향을 나타냄
- 이와 반대로 음이온 특성을 보이는 As, Cr은 비교적 낮은 흡착량을 나타냄

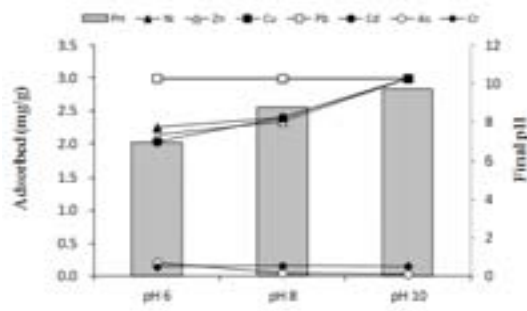




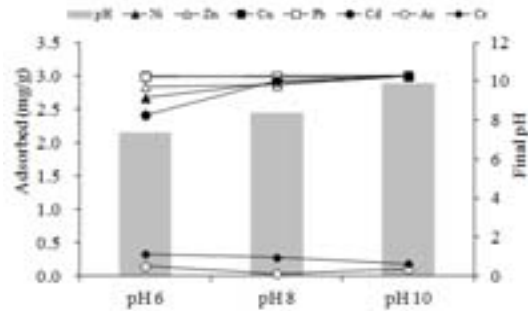
<순환골재(Recycled aggregate)>



<제강슬래그(Steel Slag)>



<벤토나이트(Bentonite)>

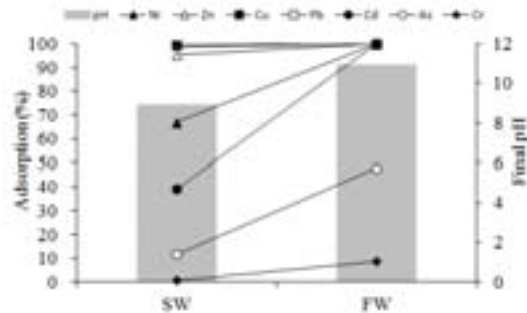


<활성탄(Activated Carbon)>

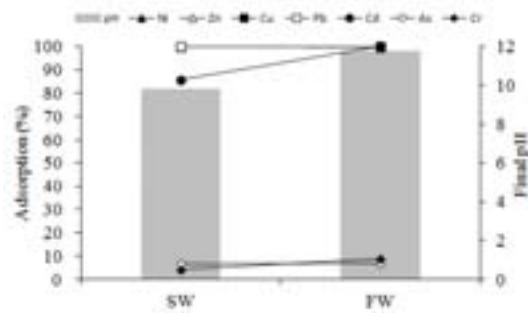
[그림 II-가-4] 피복소재들의 pH 변화에 따른 흡착 특성 비교

㉔ 해수 및 담수에서의 흡착 특성

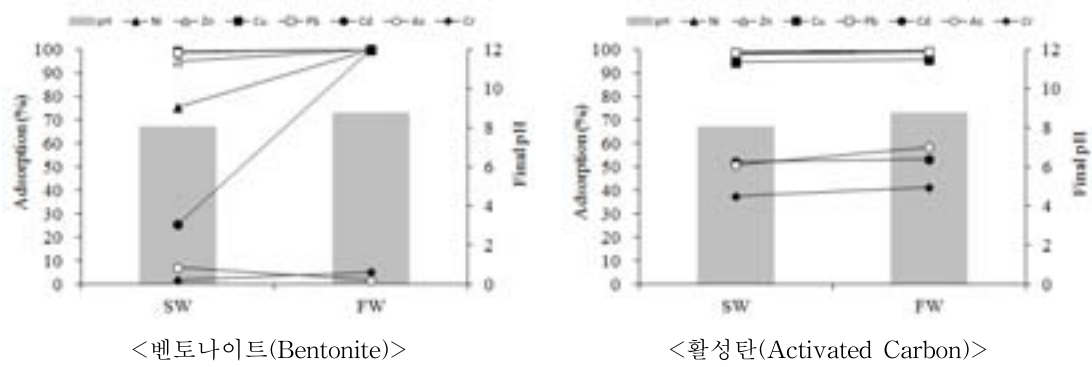
- 해수와 담수에서 피복소재의 흡착능 차이를 알아보기 위해 모든 조건이 동일한 상태에서 평형이 되는 충분한 시간만큼 반응시켜 잔류 중금속 농도를 측정함
- 실험결과 중금속 흡착제거의 경향은 담수가 해수보다 높은 것으로 나타남
- 이는 해수에 존재하는 이온들의 간섭에 의한 영향으로 판단됨



<순환골재(Recycled aggregate)>



<제강슬래그(Steel Slag)>



[그림 II-가-5] 해수와 담수에서의 혼합중금속 제거 특성 비교(SW:해수, FW:담수)

○ 하지만, 해수에서도 유효한 흡착능을 관찰함

㉔ 해수 환경에 있어서 다양한 피복소재들의 중금속 흡착성능 비교

- 해수에서 각 피복소재의 중금속 흡착율을 비교, 분석함
- 활성탄은 7가지 중금속 대해서 전체적으로 우수한 흡착능을 보임
- 해수환경에 있어서 활성탄을 제외한 피복소재들의 비소(As), 크롬(Cr) 흡착능은 낮음

[표 II-가-4] 피복소재들의 중금속별 흡착성능 비교

소재	Ni <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	As <sup>3+</sup>	Cr <sup>6+</sup>
순환골재	○	○	◎	◎	△	△	×
제강슬래그	○	○	◎	◎	×	×	×
벤토나이트	○	○	◎	◎	×	×	×
활성탄	◎	○	○	◎	◎	△	△

◎: 매우 우수(90%이상), ○: 우수(70-90%), △: 보통(50-70%), ×: 미흡(50% 이하)

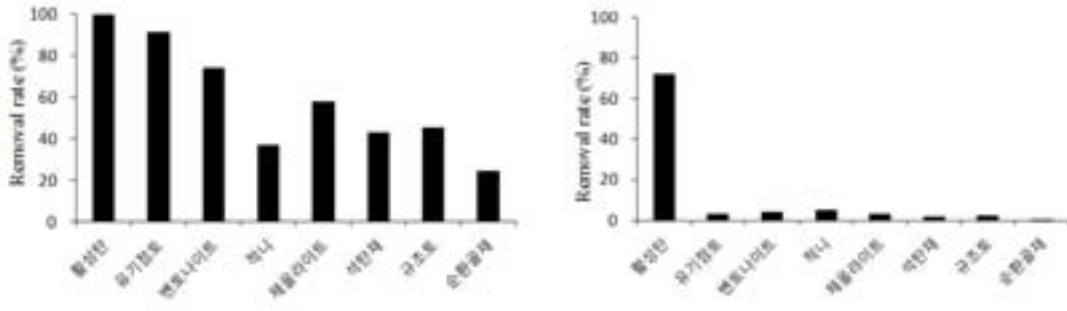
㉔ 유기오염물질 고정화 성능평가

㉕ PAH (Naphthalene) 흡착 제거 특성

- PCBs(Naphthalene)의 회분식 흡착실험은 중금속 흡착실험과 동일한 조건으로 수행함
- PCBs(Naphthalene)의 제거에 있어 활성탄, 유기점토, 벤토나이트가 70% 이상의 높은 제거성능을 보이고 있음
- 이와 반대로 적니, 순환골재 등은 낮은 제거성능을 나타냄

㉖ PCB (2, 4'- Dichlorobiphenyl) 흡착 제거 특성

- 유기오염물질(2, 4'- Dichlorobiphenyl)의 흡착 고정화 성능평가를 위하여 흡착실험을 수행한 결과 활성탄이 90% 이상의 제거성능을 나타냄
- 활성탄을 제외한 다른 피복소재들의 PCB 흡착 제거율은 매우 미미함



<순환골재(Naphthalene)>

<2, 4'- Dichlorobiphenyl>

[그림 II-가-6] 피복소재들에 의한 유기오염물질(Naphthalene)의 흡착 제거 비교

㉔ 다양한 피복소재들에 있어서 유기오염물질(PAH, PCB) 흡착성능 평가 결과 비교

- 유기오염물질(PAH, PCB)의 흡착, 고정화 성능평가 결과
- PAH의 제거에는 활성탄, 유기점토, 벤토나이트가 매우 효과적임
- PCB의 제거에는 활성탄이 효과적임

[표 II-가-5] 피복소재들의 중금속별 흡착성능 비교

	활성탄	유기점토	벤토나이트	적니	제올라이트	석탄재	규조토	순환골재
PAH (Naphthalene)	◎	◎	○	×	△	×	×	×
PCB (2, 4'-Dichlorobiphenyl)	○	×	×	×	×	×	×	×

◎: 매우 우수(90%이상), ○: 우수(70-90%), △: 보통(50-70%), ×: 미흡(50% 이하)

(2) 도출된 반응성 피복소재들의 오염물질 이동 물리적 차단 및 오염물질 안정화, 고정화 성능 평가

(가) 중금속 존재형태 변화에 의한 안정화성능 평가

- 실험실 규모의 반응성 피복소재의 현장적용성 평가를 위하여 피복 유력 후보지 중 한곳인 K항의 오염퇴적물을 채취
- 습시료는 풍건후 체를 이용하여 이물질들을 분리하여 실험 및 분석에 사용하였음
- 실험에 사용된 오염퇴적물의 연속추출방법은 1979년 A. Tessier에 의해서 Anal. Chem.에 발표된 "Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals"에 근거하여 진행하였고, 모든 시료는 3회 반복하여 분석
- 연속추출단계는 1단계(Exchangeable), 2단계(Carbonate), 3단계(Oxide), 4단계(Organic), 5단계(Residual)로 나누어 평가를 수행하였으며, 1단계에서 5단계로 갈수록 안정화된 상태를 나타내며, 1-3단계는 외부환경변화 및 환경외력에 의해 수계로 용출되기 쉬운 형태로 분석함



[그림 II-가-7] 중금속 안정화 실험용 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도(K항)

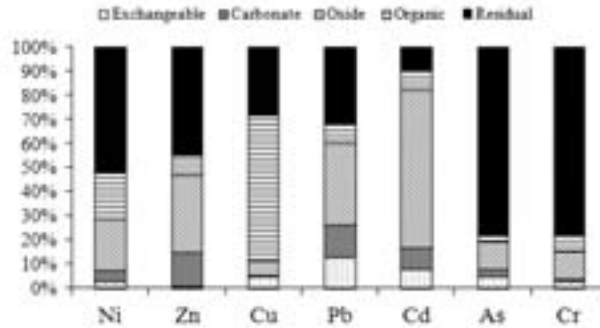
① 해양오염퇴적물 내 중금속 존재형태별 오염 현황

- 표 II-가-6은 K항의 해양오염퇴적물의 물리화학적 특성을 나타내고 있음
- K항의 오염퇴적물은 미립질 약산성의 특징을 나타내고 있음
- Ni, Cu, Zn, As, Cd는 기준1을 초과하고 있음을 알 수 있음
- tPCBs와 tPAHs는 기준에 미달하는 값을 보이고 있으나 TBT는 기준1을 초과하고 있음
- 이러한 값으로부터 K항의 퇴적물은 중금속과 유기오염물질 등의 복합적인 오염현상을 나타내고 있는 것으로 평가

[표 II-가-6] K항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	Values	기준(기준1-기준2)
pH	8.3	-
silt-clay (%)	90	-
water contents (%)	55	-
Cr (mg/kg)	65.7	80-370
Ni (mg/kg)	37.9	23-52
Cu (mg/kg)	67.3	24-108
Zn (mg/kg)	203.7	200-410
As (mg/kg)	30.8	9-41.6
Cd (mg/kg)	0.94	0.68-4.21
Pb (mg/kg)	42.4	50-220
tPCBs (ug/kg)	11.6	21.6-189
tPAHs (ug/kg)	1803.6	4000-45000
TBT (ug/kg)	12.0	5.0-105

- 그림 II-가-8은 K항의 해양오염퇴적물내의 중금속 존재 형태 비율을 나타내고 있음
- 기존 연구결과를 보면, 자연환경에서 용출되기 쉬운 형태는 Exchangeable, Carbonate, Oxide 형태로 알려지고 있음
- 이러한 사실로 볼 때 K항 해양퇴적물 내에서 용출되기 쉬운 중금속은 Pb, Cd > Zn, Ni > As, Cr > Cu 일 가능성이 높음



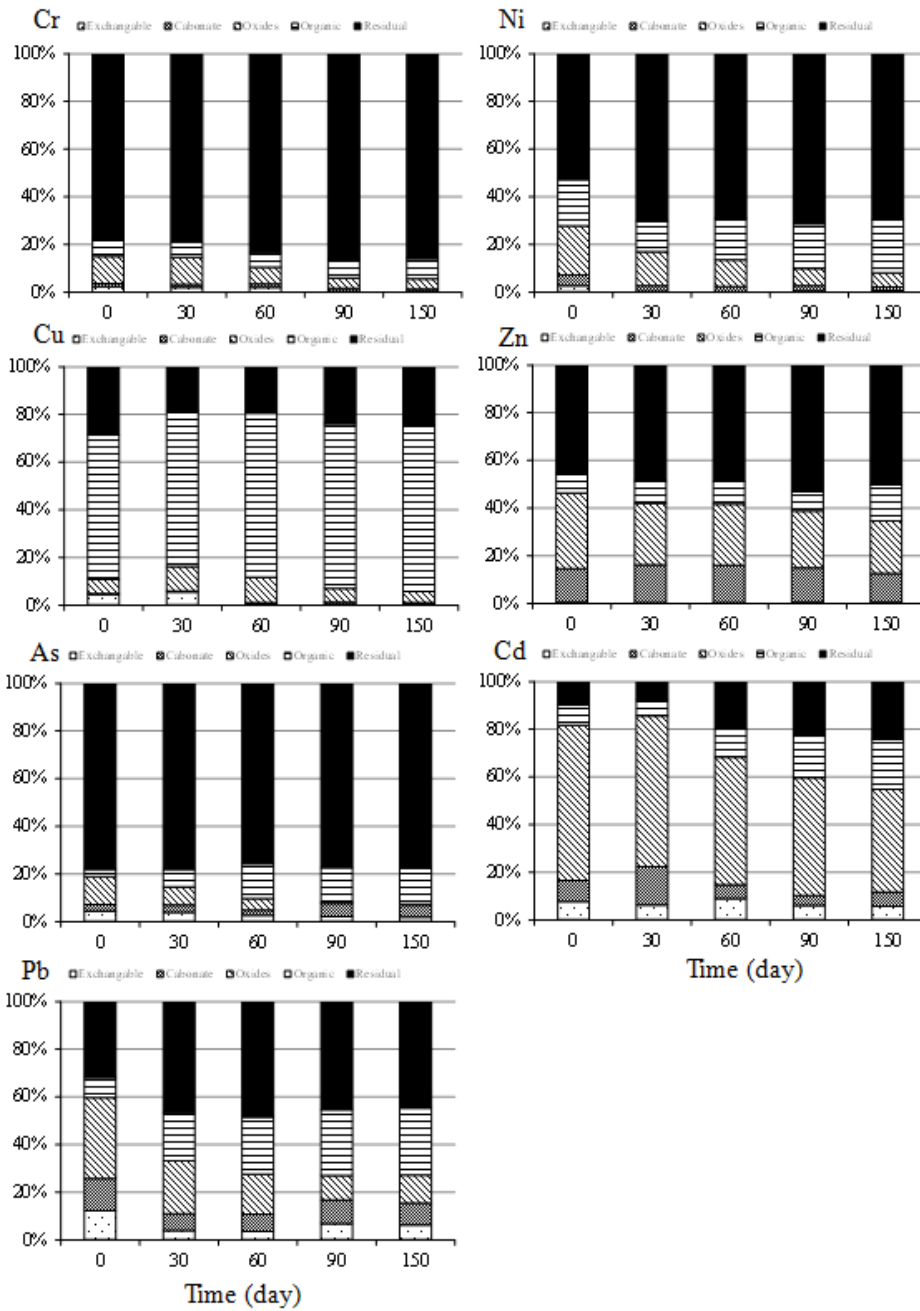
[그림 II-가-8] K항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 비율

### ① 해양오염퇴적물 내 중금속 안정화 평가

- 피복소재 중 순환골재, 제강슬래그, 벤토나이트 및 순환골재/벤토나이트를 혼합하여 사용하였음
- 해양오염퇴적물 내 중금속 존재형태 변화를 보기 위하여 연속추출법을 수행하여 오염퇴적물 내 중금속 안정화를 평가함
- 본 안정화 실험은 150일 동안 수행하였으며, 주기적으로 오염퇴적물 내 중금속 존재형태별 변화를 관찰하였음
- 중금속의 안정화는 대조군과 비교하여 5단계 중 용출이 쉬운 형태인 1단계 (Exchangeable), 2단계 (Carbonate), 3단계 (Oxide)의 감소를 중점으로 평가하였음

### ㉔ 순환골재를 이용한 중금속 안정화 효능 평가

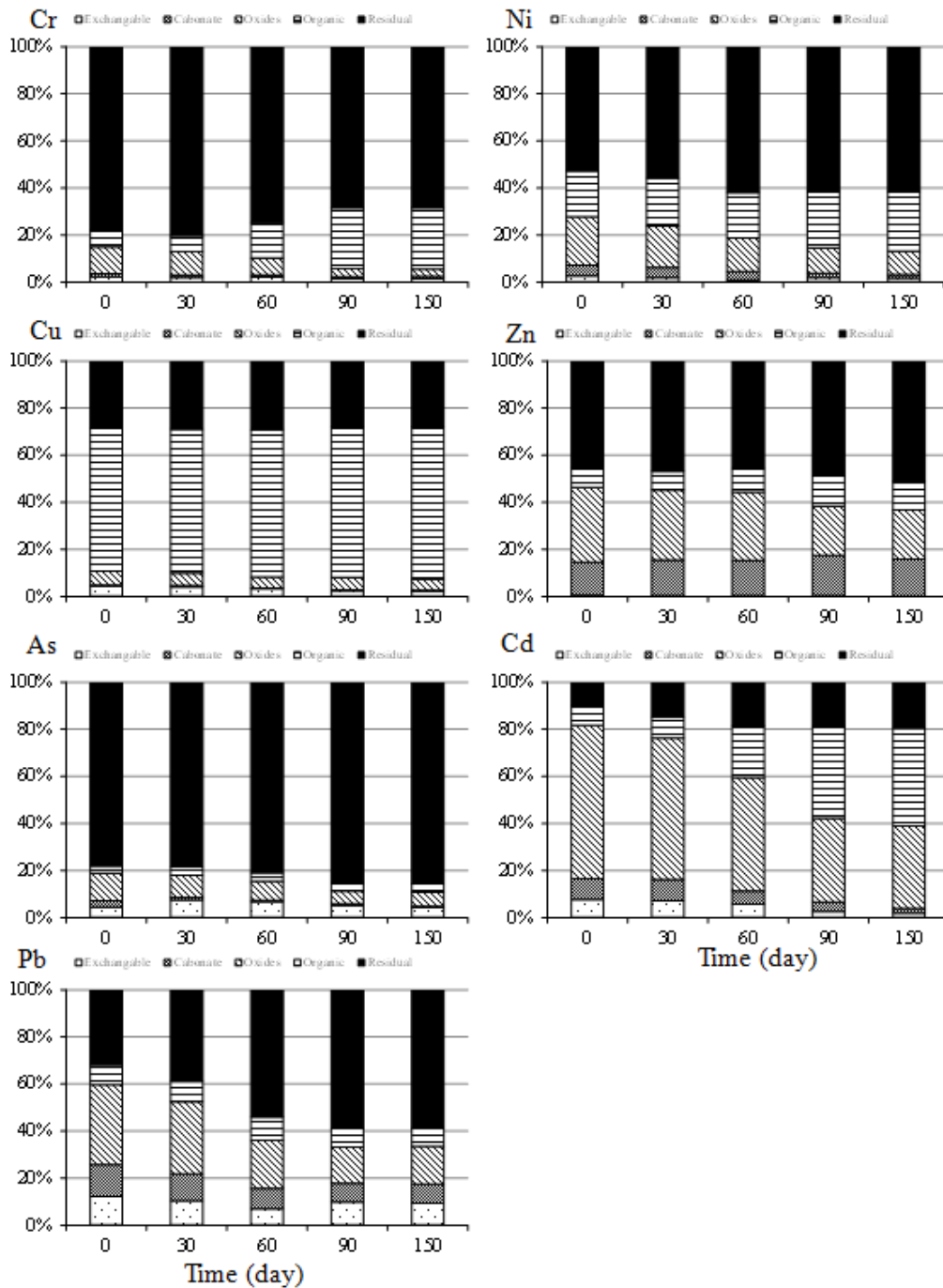
- 순환골재를 이용한 중금속 안정화는 초기 30일에서 60일 동안에 가장 큰 변화를 보이며 그 이후에는 변화폭이 줄어듦.
- 대부분의 중금속에서 Oxide 형태 비율이 감소를 보이며 더불어 Residual 형태의 비율이 증가함
- Ni이 주어진 실험 조건 하에서 가장 좋은 안정화 효율을 보임



[그림 II-가-9] 순환골재를 이용한 처리기간에 따른 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과

⊕ 제강슬래그를 이용한 중금속 안정화 효능 평가

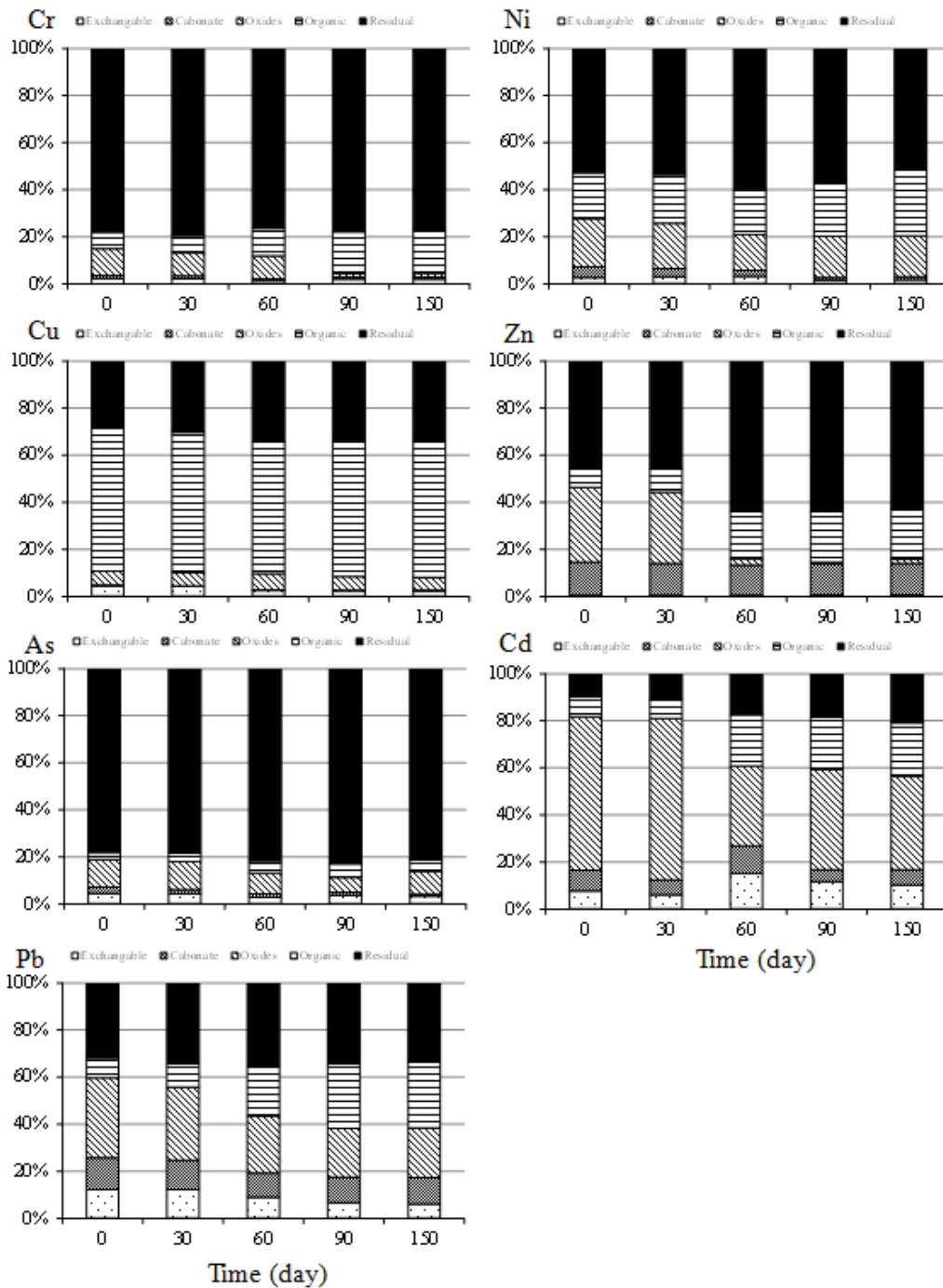
- 제강슬래그를 이용한 중금속 안정화는 150일 간의 실험기간 동안 지속적인 안정화가 이루어짐
- Cd은 Oxide 형태 비율이 감소하는 반면 Organic 형태 비율이 증가함
- Cd과 Pb이 가장 우수한 안정화 효율을 보임



[그림 II-가-10] 제강슬래그를 이용한 처리기간에 따른 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과

㊤ 벤토나이트를 이용한 중금속 안정화 성능 평가

- 벤토나이트를 이용한 중금속 안정화는 150일 간의 실험기간 동안 지속적인 안정화가 이루어짐
- Cr과 Cd의 경우 Oxide 형태 비율이 감소하는 반면 Organic 형태 비율이 증가함
- Ni, Cd과 Pb이 가장 우수한 안정화 효율을 보이고 있음



[그림 II-가-11] 벤토나이트를 이용한 처리기간에 따른 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과

㉔ 순환골재/벤토나이트 혼합 피복소재를 이용한 중금속 안정화 효능 평가

- 순환골재/벤토나이트 혼합 피복소재를 이용한 중금속 안정화는 실험기간 동안 지속적인 안정화가 진행되고 있음
- Cr, Zn, Cd, Pb의 경우 Oxide 형태 비율이 감소하는 반면 Organic 형태 비율이 증가하는 경향을 보임
- Cr과 Zn이 가장 좋은 안정화 효율을 보이고 있음



㉞ 피복소재별 중금속 안정화 성능 종합 비교

- 대조군과 피복소재별 150일간의 안정화 실험 결과를 바탕으로 중금속 안정화 성능을 종합적으로 비교 평가함
- 대조군의 1단계(Exchangeable), 2단계(Carbonate), 3단계(Oxide)의 외부환경 변화 및 환경외력에 의해 용출되기 쉬운 중금속 존재형태가 피복소재에 의해 얼마나 감소되었는가로 안정화 성능을 평가함
- 중금속 안정화 성능은 대체적으로 낮은 결과를 보이는 이유는 실험에 이용된 오염퇴적물 내 오염물질이 장시간에 걸쳐 안정화되어 있는 상태이므로 피복소재에 의한 추가적인 안정화의 속도가 느리기 때문으로 판단됨

[표 II-가-7] 피복소재별 중금속의 안정화 성능 평가결과표

소재	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
순환골재	△	○	△	△	×	×	△
제강슬래그	×	×	×	×	×	△	×
벤토나이트	×	×	△	△	×	×	×
순환골재/벤토나이트	△	×	×	△	×	×	×

◎: 매우우수(90-100%), ○: 우수(70-90%), △: 보통(50-70%), ×: 미흡(50%미만)

(나) 유기오염물질 흡착에 의한 고정화 성능 평가

① 유기오염물질(PAHs, PCBs) 고정화 제거율 평가

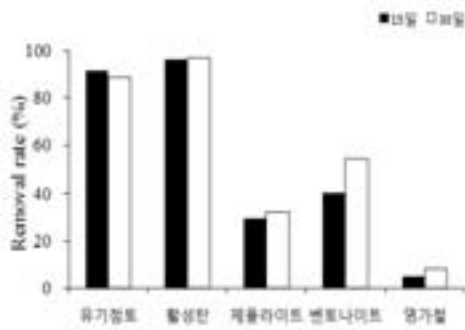
- 유기오염물질을 인공적으로 퇴적물에 오염시킨 후, 피복소재를 첨가하여 일정 기간 동안 반응 하였으며, 퇴적물 내 존재하는 간극수의 유기오염물질 농도 변화를 3반복 분석함
- 실험기간은 30일로 15일, 30일에 시료를 채취하여 농도 변화를 분석함

㉞ PAH(Naphthalene) 고정화 제거율 비교

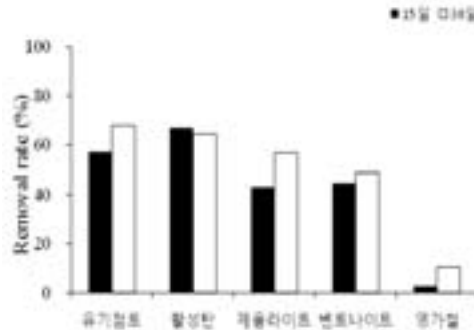
- 간극수내 Naphthalene의 고정화에 의한 제거는 활성탄(97%) > 유기점토(90%) > 벤토나이트(45%) > 제올라이트(30%) > 영가철(6%) 순으로 나타남
- 처리기간에 따른 고정화 제거율은 15일 보다 30일에서 더 높은 제거율을 보이고 있음

㉞ PCB(2, 4'- Dichlorobiphenyl) 고정화 제거율 비교

- 피복소재에 의한 간극수 내 2, 4'- Dichlorobiphenyl 고정화 제거율은 활성탄(67%) > 유기점토(57%) > 벤토나이트(44.8%) > 제올라이트(43%) > 영가철(2.6%) 순으로 나타남



<Naphthalene>



<2, 4'- Dichlorobiphenyl>

[그림 II-가-12] 각 피복소재별 Naphthalene 고정화 흡착 제거율 비교

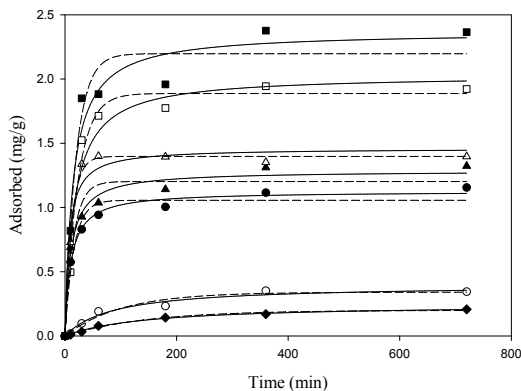
- 처리기간에 따른 고정화 효율에서는 15일 보다 30일에서 고정화 제거율이 높은 경향을 보임

(3) 국내 복합오염특성에 부합하기 위하여 각각 다른 특징을 가지는 반응성 피복소재를 복합사용할 경우 단일 피복소재 사용과 비교하여 피복성능 비교 (간섭효과, 상승효과 등 분석)

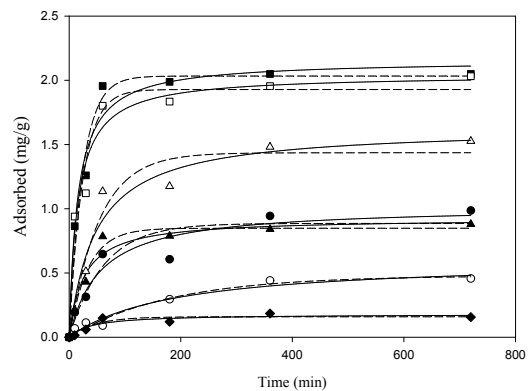
(가) 혼합 피복소재의 중금속 흡착 제거 성능

㉞ 혼합 피복소재들의 동적흡착 특성

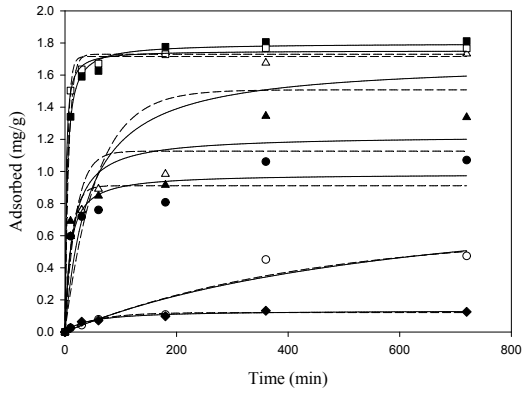
- 혼합 피복소재(순환골재/벤토나이트, 순환골재/제강슬래그, 제강슬래그/벤토나이트, 활성탄/순환골재, 활성탄/제강슬래그, 활성탄/벤토나이트)의 시간에 따른 중금속 흡착실험을 3회 반복하여 수행하였고, 평균값을 제시함
- 혼합 피복소재를 이용한 중금속 흡착 동특성은 중금속 종류에 따라 약간의 차이는 있지만 대체적으로 3시간 경과 후 평형에 도달함
- 중금속의 평형 흡착량은 활성탄/제강슬래그와 활성탄/벤토나이트가 높은 흡착량을 보였고 제강슬래그/벤토나이트가 가장 낮은 흡착경향을 보였음
- 중금속 종류별 흡착량은  $Cu^{2+}$ 와  $Pb^{2+}$ 이 가장 높은 흡착 특성을 나타내고 있음
- 혼합 피복소재를 사용한 경우, 단일 피복소재를 사용한 경우와 비교하여 상승효과나 간섭효과가 나타나지 않음. 따라서 각각 다른 중금속에 우수한 흡착성능을 가지는 피복소재의 혼합사용은 다양한 중금속의 흡착제거에 유효하게 적용될 수 있음



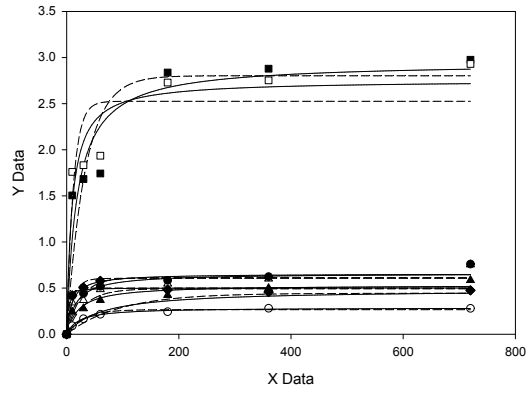
<순환골재/벤토나이트 혼합 소재>



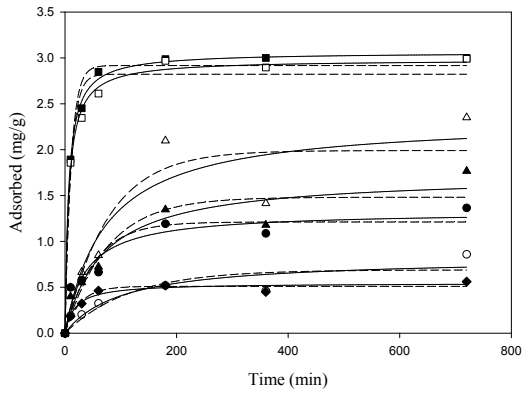
<순환골재/제강슬래그 혼합 소재>



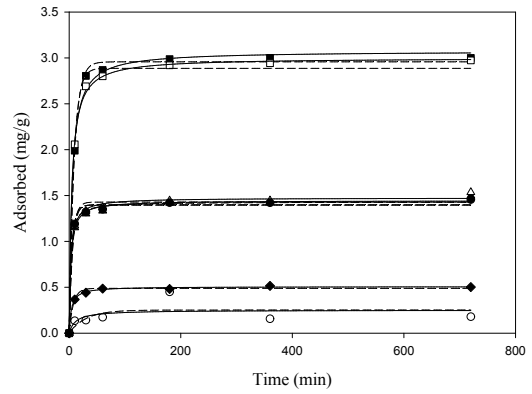
<제강슬래그/벤토나이트 혼합 소재>



<활성탄/순환골재 혼합 소재>



<활성탄/제강슬래그 혼합 소재>



<활성탄/벤토나이트 혼합 소재>

[그림 II-가-13] 혼합 피복소재들의 동적흡착 특성 비교.

Symbols: (▲) Ni, (△) Zn, (■) Cu, (□) Pb, (●) Cd, (○) As, and (◆) Cd.

점선: Pseudo-first-order model, 실선: Pseudo-second-order model

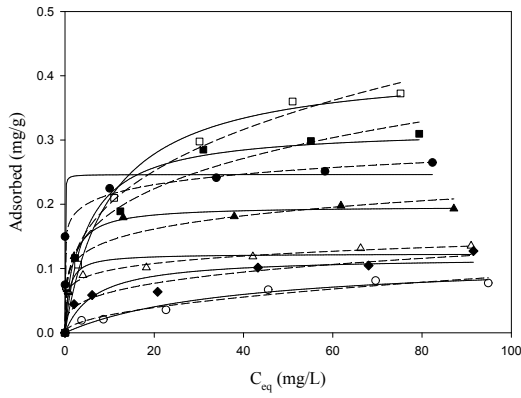
[표 II-가-8. 혼합 피복소재들의 동적흡착 모델 매개변수값]

		Pseudo-first-order model			Pseudo-second-order model		
		q <sub>e</sub> (mg/g)	K <sub>1</sub> (L/min)	R <sup>2</sup>	Q <sub>e</sub> (mg/g)	K <sub>2</sub> (g/mg/min)	R <sup>2</sup>
Recycled aggregated/Bentonite composite	Ni <sup>2+</sup>	1.2019	0.065	0.942	1.285	0.075	0.984
	Zn <sup>2+</sup>	1.398	0.080	0.995	1.459	0.097	0.967
	Cu <sup>2+</sup>	2.197	0.050	0.961	2.366	0.030	0.967
	Pb <sup>2+</sup>	1.887	0.043	0.981	2.030	0.030	0.960
	Cd <sup>2+</sup>	1.056	0.063	0.964	1.126	0.086	0.993
	As <sup>3+</sup>	0.341	0.010	0.962	0.398	0.029	0.970
	Cr <sup>6+</sup>	0.200	0.007	0.990	0.247	0.028	0.994
Recycled aggregated/Steel Slag composite	Ni <sup>2+</sup>	0.848	0.029	0.979	0.924	0.042	0.964
	Zn <sup>2+</sup>	1.436	0.019	0.958	1.634	0.013	0.963
	Cu <sup>2+</sup>	2.033	0.041	0.980	2.156	0.031	0.976
	Pb <sup>2+</sup>	1.928	0.041	0.950	2.044	0.032	0.968
	Cd <sup>2+</sup>	0.886	0.016	0.904	1.020	0.018	0.938
	As <sup>3+</sup>	0.479	0.006	0.969	0.607	0.009	0.962
	Cr <sup>6+</sup>	0.159	0.022	0.900	0.179	0.138	0.880
Steel Slag/Bentonite composite	Ni <sup>2+</sup>	1.127	0.051	0.790	1.224	0.058	0.876
	Zn <sup>2+</sup>	1.508	0.018	0.798	1.689	0.014	0.873
	Cu <sup>2+</sup>	1.730	0.144	0.984	1.798	0.152	0.997
	Pb <sup>2+</sup>	1.716	0.207	0.995	1.753	0.323	0.999
	Cd <sup>2+</sup>	0.911	0.084	0.872	0.985	0.112	0.932
	As <sup>3+</sup>	0.617	0.002	0.913	0.973	0.002	0.908
	Cr <sup>6+</sup>	0.121	0.018	0.948	0.135	0.169	0.974
Activated Carbon/Recycled aggregated composite	Ni <sup>2+</sup>	0.493	0.032	0.873	0.533	0.088	0.935
	Zn <sup>2+</sup>	0.614	0.040	0.848	0.659	0.093	0.916
	Cu <sup>2+</sup>	2.803	0.030	0.853	2.948	0.018	0.920
	Pb <sup>2+</sup>	2.526	0.084	0.846	2.753	0.624	0.926
	Cd <sup>2+</sup>	0.606	0.085	0.855	0.656	0.170	0.924
	As <sup>3+</sup>	0.266	0.033	0.980	0.288	0.162	0.996
	Cr <sup>6+</sup>	0.500	0.184	0.957	0.503	1.521	0.947
Activated Carbon/Steel Slag composite	Ni <sup>2+</sup>	1.482	0.013	0.899	1.725	0.009	0.928
	Zn <sup>2+</sup>	1.991	0.013	0.856	2.334	0.006	0.864
	Cu <sup>2+</sup>	2.916	0.092	0.983	3.062	0.005	0.998
	Pb <sup>2+</sup>	2.822	0.093	0.969	2.981	0.050	0.996
	Cd <sup>2+</sup>	1.212	0.019	0.888	1.326	0.021	0.923
	As <sup>3+</sup>	0.689	0.009	0.806	0.821	0.012	0.859
	Cr <sup>6+</sup>	0.510	0.038	0.970	0.546	0.102	0.965
Activated Carbon/Bentonite composite	Ni <sup>2+</sup>	1.399	0.170	0.986	1.445	0.250	0.996
	Zn <sup>2+</sup>	1.429	0.168	0.987	1.474	0.245	0.996
	Cu <sup>2+</sup>	2.957	0.110	0.998	3.075	0.067	0.995
	Pb <sup>2+</sup>	2.886	0.121	0.995	2.999	0.077	0.999
	Cd <sup>2+</sup>	1.396	0.189	0.993	1.431	0.326	0.999
	As <sup>3+</sup>	0.2519	0.033	0.450	0.251	0.348	0.440
	Cr <sup>6+</sup>	0.489	0.133	0.988	0.507	0.506	0.997

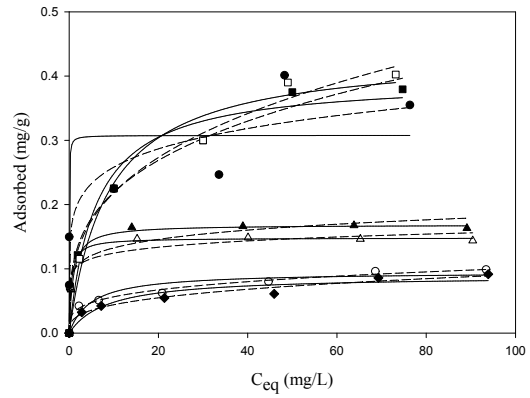
② 혼합 피복소재들의 평형흡착 특성

- 혼합 피복소재간에 있어서 혼합 중금속의 평형흡착 실험을 3회 반복하여 수행함
- 대부분의 피복흡착제에서 1/n이 1보다 작은 값을 형성하여 전체적으로 강한 흡착경향을 나타내고 있음
- 천연광물/폐기물 혼합 피복소재보다 활성탄과 혼합한 피복소재들에서 최대흡착량은 높게

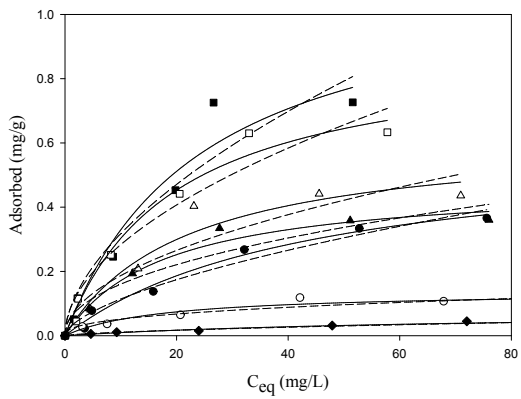
나타나고 있음



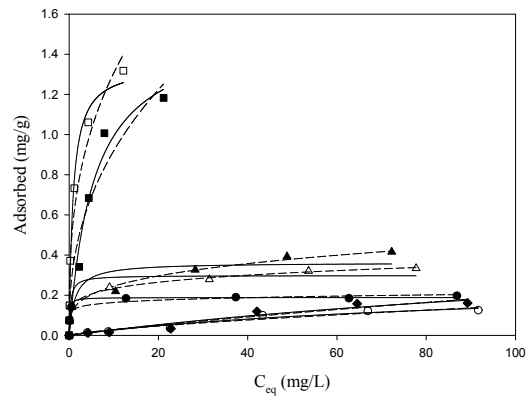
<순환골재/벤토나이트 혼합소재>



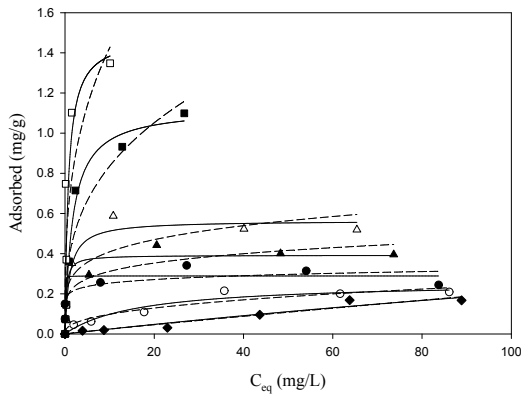
<순환골재/제강슬래그 혼합소재>



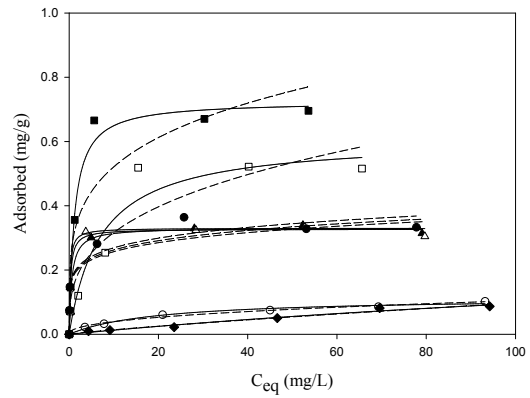
<제강슬래그/벤토나이트 혼합소재>



<활성탄/순환골재 혼합소재>



<활성탄/제강슬래그 혼합소재>



<활성탄/벤토나이트 혼합소재>

[그림 II-가-14] 혼합 피복소재들의 Freundlich model과 Langmuir model 비교.

Symbols: (▲) Ni, (△) Zn, (■) Cu, (□) Pb, (●) Cd, (○) As, and (◆) Cd.

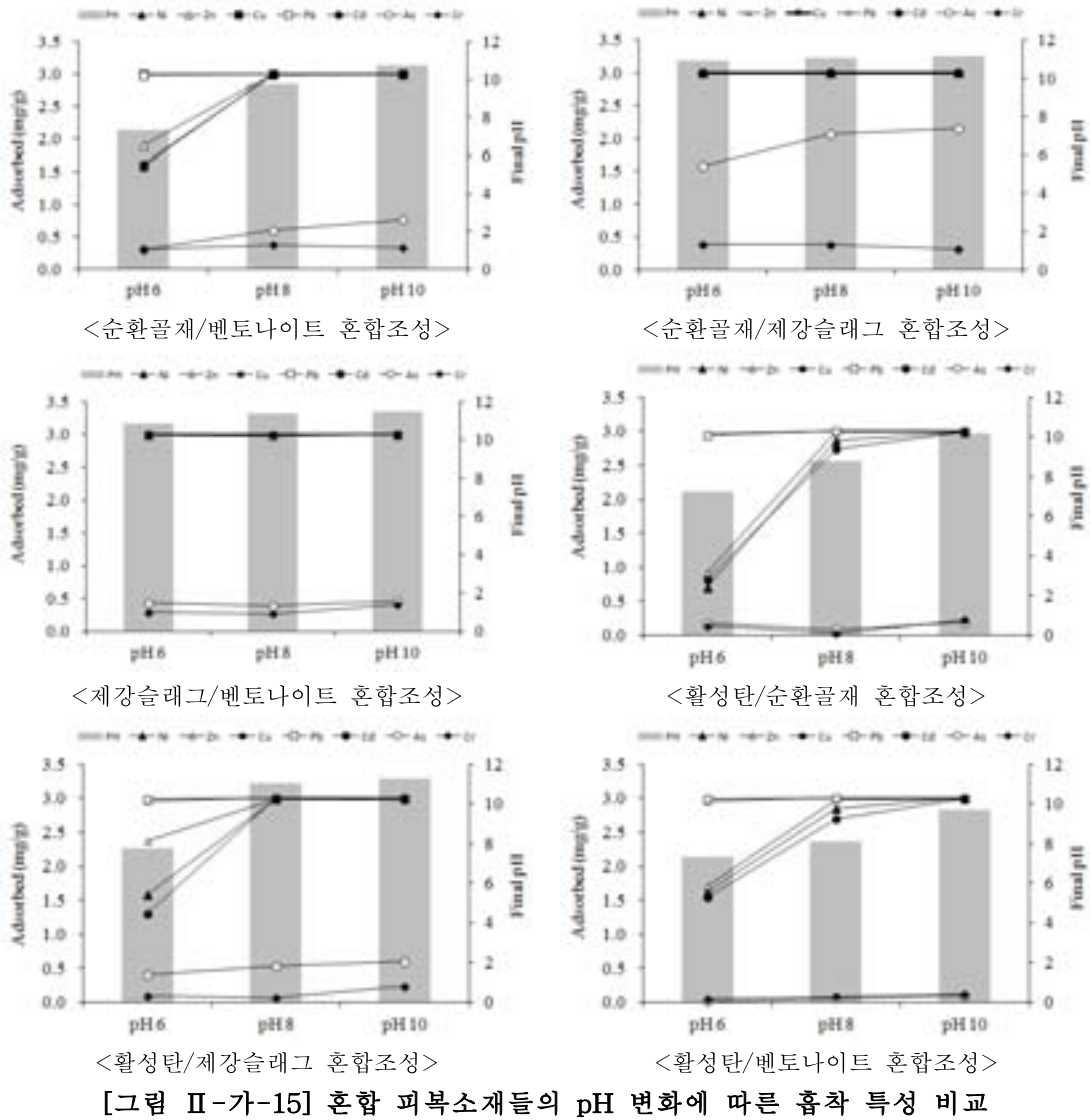
점선: Freundlich model, 실선: Langmuir model

[표 II-가-9] 혼합 피복소재들의 평형흡착 모델 매개변수 값

		Freundlich model			Langmuir model		
		K (L/g)	1/n	R <sup>2</sup>	Q <sub>m</sub> (mg/g)	K (L/mg)	R <sup>2</sup>
Recycled aggregated/Bentonite composite	Ni <sup>2+</sup>	0.096	0.174	0.941	1.502	0.197	0.995
	Zn <sup>2+</sup>	0.069	0.148	0.996	0.848	0.123	0.943
	Cu <sup>2+</sup>	0.098	0.276	0.984	4.781	0.319	0.954
	Pb <sup>2+</sup>	0.094	0.329	0.986	10.040	0.418	0.963
	Cd <sup>2+</sup>	0.171	0.100	0.957	0.020	0.246	0.962
	As <sup>3+</sup>	0.009	0.503	0.959	36.753	0.115	0.965
	Cr <sup>6+</sup>	0.032	0.295	0.969	6.778	0.118	0.888
Recycled aggregated/Steel Slag composite	Ni <sup>2+</sup>	0.097	0.137	0.945	0.873	0.169	0.994
	Zn <sup>2+</sup>	0.098	0.103	0.944	0.462	0.148	0.999
	Cu <sup>2+</sup>	0.111	0.295	0.992	5.952	0.396	0.954
	Pb <sup>2+</sup>	0.104	0.322	0.988	8.704	0.436	0.953
	Cd <sup>2+</sup>	0.182	0.151	0.893	0.030	0.308	0.818
	As <sup>3+</sup>	0.032	0.251	0.990	4.892	0.095	0.923
	Cr <sup>6+</sup>	0.022	0.313	0.975	8.556	0.089	0.912
Steel Slag/Bentonite composite	Ni <sup>2+</sup>	0.055	0.461	0.906	17.896	0.478	0.968
	Zn <sup>2+</sup>	0.058	0.505	0.877	21.734	0.625	0.942
	Cu <sup>2+</sup>	0.086	0.569	0.926	24.683	1.143	0.954
	Pb <sup>2+</sup>	0.085	0.522	0.946	19.653	0.898	0.981
	Cd <sup>2+</sup>	0.028	0.611	0.971	43.842	0.595	0.988
	As <sup>3+</sup>	0.021	0.389	0.916	17.324	0.138	0.949
	Cr <sup>6+</sup>	0.003	0.635	0.955	72.073	0.078	0.965
Activated Carbon/Recycled aggregated composite	Ni <sup>2+</sup>	0.131	0.272	0.988	1.314	0.362	0.885
	Zn <sup>2+</sup>	0.154	0.180	0.984	0.313	0.298	0.953
	Cu <sup>2+</sup>	0.355	0.413	0.956	5.609	1.550	0.970
	Pb <sup>2+</sup>	0.584	0.350	0.963	0.860	1.348	0.990
	Cd <sup>2+</sup>	0.130	0.100	0.955	0.123	0.188	0.993
	As <sup>3+</sup>	0.006	0.715	0.947	94.673	0.273	0.963
	Cr <sup>6+</sup>	0.004	0.843	0.935	174.196	0.517	0.947
Activated Carbon/Steel Slag composite	Ni <sup>2+</sup>	0.207	0.179	0.920	0.292	0.392	0.932
	Zn <sup>2+</sup>	0.258	0.199	0.821	1.016	0.564	0.953
	Cu <sup>2+</sup>	0.388	0.333	0.940	1.701	1.129	0.990
	Pb <sup>2+</sup>	0.669	0.328	0.744	0.762	1.489	0.796
	Cd <sup>2+</sup>	0.202	0.098	0.876	0.011	0.289	0.896
	As <sup>3+</sup>	0.039	0.396	0.920	16.618	0.261	0.946
	Cr <sup>6+</sup>	0.003	0.932	0.941	395.728	0.991	0.945
Activated Carbon/Bentonite composite	Ni <sup>2+</sup>	0.186	0.150	0.913	0.284	0.328	0.993
	Zn <sup>2+</sup>	0.182	0.150	0.834	0.568	0.331	0.943
	Cu <sup>2+</sup>	0.305	0.233	0.865	1.170	0.725	0.989
	Pb <sup>2+</sup>	0.150	0.325	0.887	7.034	0.609	0.942
	Cd <sup>2+</sup>	0.189	0.153	0.942	0.196	0.331	0.975
	As <sup>3+</sup>	0.015	0.425	0.990	19.647	0.115	0.986
	Cr <sup>6+</sup>	0.002	0.842	0.976	250.576	0.334	0.978

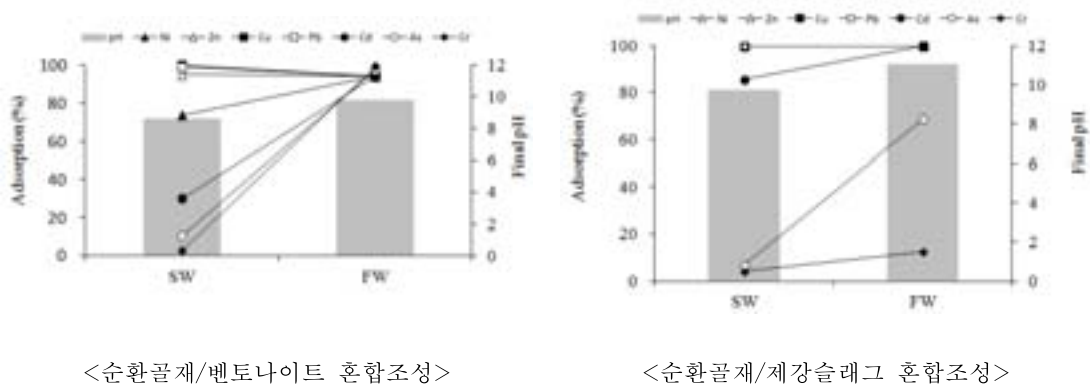
③ pH 변화에 따른 혼합 피복소재들의 흡착 특성 변화

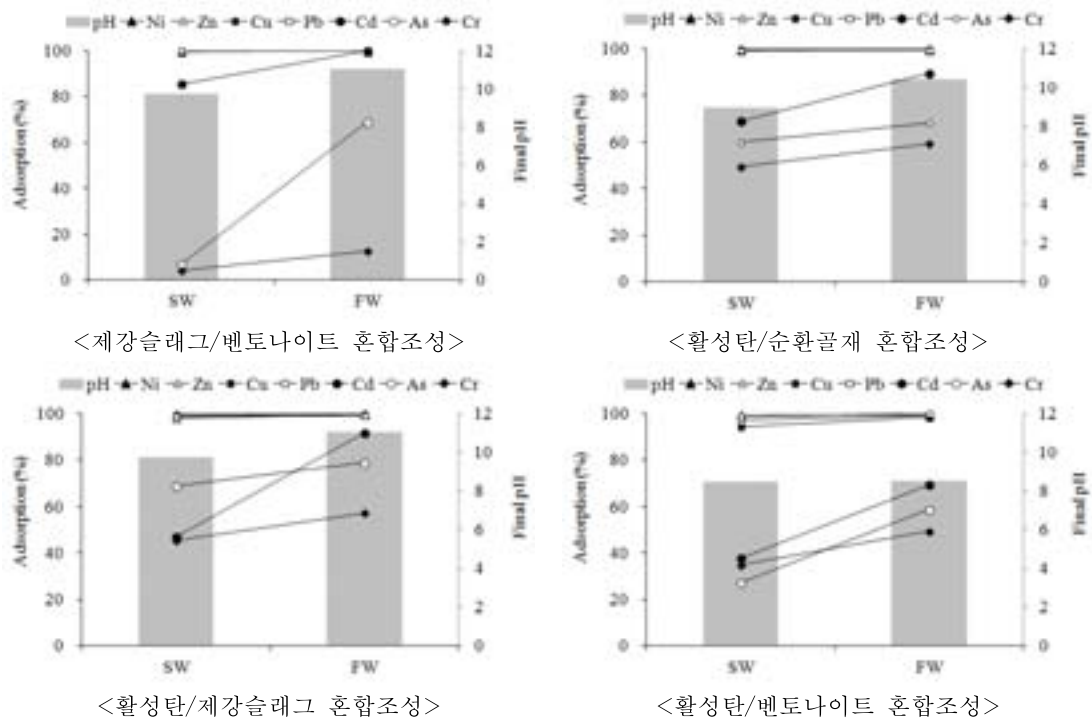
- 혼합 피복소재를 사용한 경우 시료의 pH 변화에 따른 중금속 흡착실험을 수행함
- 혼합 피복소재를 사용한 경우 pH가 증가할수록 대부분의 중금속 흡착량은 증가하는 경향을 보임, 이는 pH 상승에 따른 metal oxide 생성이 증가한 것에 기인하는 것으로 판단됨
- 단위질량당 흡착량은 다른 중금속들과 비교해 As<sup>3+</sup>와 Cr<sup>6+</sup>은 낮은 흡착량을 보임



#### ④ 해수 및 담수에서의 중금속 흡착 특성

- 해수와 담수조건에 따른 혼합 피복소재의 혼합 중금속 흡착 실험을 수행함
- 혼합 피복소재는 대체적으로 해수보다 담수에서 높은 흡착 제거율을 보임
- 활성탄과 혼합된 피복소재들은 해수와 담수에서 거의 같은 흡착 특성을 보임





[그림 II-가-16. 해수와 담수에 있어서 혼합 피복소재들의 중금속 흡착 특성 비교]

(나) 단일 및 혼합 피복소재의 혼합 중금속 흡착 제거능 종합 비교

- 단일 피복소재와 혼합 피복소재간의 혼합 중금속 흡착 제거능을 살펴본 결과, 복합 피복소재사용에 따른 중금속 제거율의 상승효과나 간섭효과가 나타나지 않았음
- 따라서 각기 다른 중금속에 효과적인 제거능을 보이는 피복소재의 복합사용은 전반적인 중금속 제거율을 향상시킬 수 있음
- 하지만 혼합 피복소재 구성 성분으로 활성탄을 사용할 경우, 타 피복소재의 영향을 받아 활성탄 표면에 발달되어 있는 기공의 막힘 현상 등에 의해 활성탄의 흡착능이 떨어지는 것으로 판단됨
- Cr의 경우, 혼합 피복소재 중 활성탄과 혼합한 피복소재를 사용할 때 단일소재보다 높은 흡착능을 보이고 있음

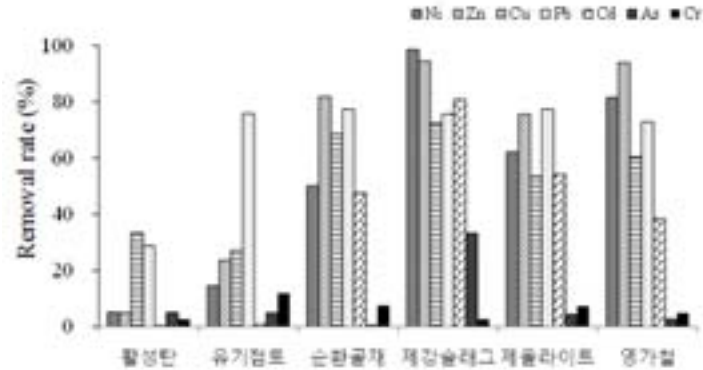
(다) 중금속과 유기오염물질간 상호 간섭작용 시험

① 혼합 오염물질(중금속+유기오염물질)에서 각 피복소재별 중금속 흡착 제거능 비교

- 혼합 중금속 흡착 제거율을 보면 대체적으로 Ni, Zn, Cu, Pb(활성탄, 유기점토 제외)이 약 60% 이상의 흡착 제거율을 보임
- As, Cr 등은 사용된 피복소재에서 10% 미만의 제거율을 보임
- 각 피복소재별 중금속 제거 특성은 산화제 특성을 가지는 피복소재가 중금속 흡착능이 우수한 결과를 보임
- 중금속 흡착능이 우수하였던 활성탄은 중금속과 유기오염물질을 혼합한 실험에서는 제일 낮은 중금속 제거율을 보이고 있음
- 이러한 결과는 활성탄과 유기점토 같은 피복소재는 중금속과 유기오염물질간의 경쟁 흡착이 일어나고, 중금속보다 유기오염물질이 흡착경쟁에서 앞서는 이유로 혼합오염일 경우



중금속 제거능이 떨어지는 것으로 사료됨



[그림 II-가-17. 혼합 오염물질(중금속+유기오염물질)에서의 각 피복소재별 중금속 흡착 제거율 비교]

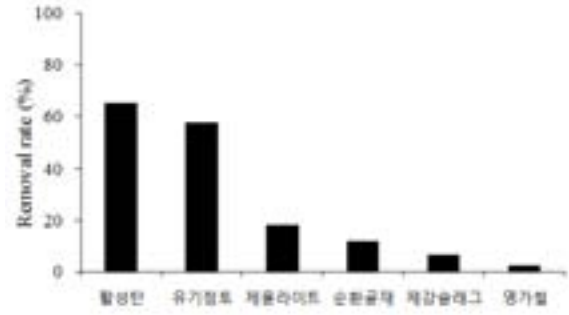
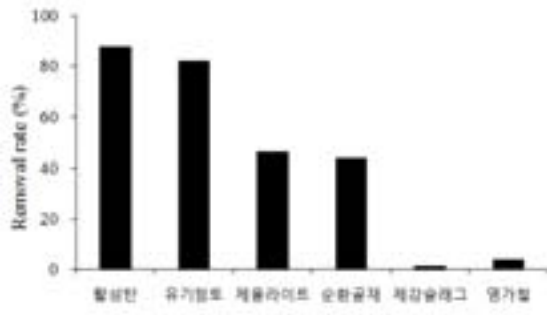
② 혼합 오염물질(중금속+유기오염물질)에서 피복소재별 유기오염물질 흡착 제거능 비교

㉠ Naphthalene 흡착제거능 비교

- 혼합 오염물질 시료에서 유기오염물질(Naphthalene)의 흡착 제거능 실험 결과, 활성탄과 유기점토가 약 80%이상의 흡착제거능을 나타냄
- 그 외 제올라이트 및 순환골재에서는 약 50%의 흡착 제거능을 보였고, 제강슬래그와 영가철에서는 10% 미만의 낮은 흡착 제거능을 나타냄
- 이러한 결과는 중금속 흡착 제거능과 서로 상반된 결과로 혼합오염특성을 가지는 시료에 대해서 중금속과 유기오염물질의 제거에 각기 다른 피복소재가 우수한 성능을 보이는 것으로 나타남

㉡ 2, 4'- Dichlorobiphenyl 흡착제거능 비교

- 중금속과 유기오염물질 혼합오염 시료에서 활성탄과 유기점토는 약 60%의 2, 4'-Dichlorobiphenyl 제거율을 보여 제올라이트, 순환골재 등의 다른 피복소재들보다 높은 제거 효율을 보이고 있음
- 특히, 활성탄과 유기점토처럼 유기오염물질에 높은 흡착율을 보이고 있는 피복소재는 나프탈렌 흡착 실험과 비교하여 약 10-20% 제거율이 낮게 나타남
- 이는 2, 4'- Dichlorobiphenyl이 Naphthalene보다 큰 분자량을 갖고 있어 상대적으로 흡착 제거가 어려운 것으로 판단됨



<Naphthalene>

<2, 4'- Dichlorobiphenyl>

[그림 II-가-18] 혼합 오염물질(중금속+유기오염물질)에서의 각 피복소재별 흡착 제거율 비교

③ 단일 오염물질과 혼합 오염물질에 있어서 각 피복소재별 오염물질 흡착 제거능 종합비교

㉞ 단일 오염물질간 흡착 제거능 비교

- 각각의 단일 오염물질에서는 피복소재의 물리화학적 특징에 따라 특정 중금속 및 유기오염물질에 대한 높은 흡착능을 나타내고 있음
- 중금속 흡착 제거에는 활성탄, 순환골재, 제강슬래그, 벤토나이트 등이 높은 흡착 제거능을 보임
- 유기오염물질에는 활성탄, 유기점토, 벤토나이트, 제올라이트 등이 비교적 높은 흡착 제거능을 보임

㉟ 혼합 오염물질에서 피복소재 흡착 제거능 비교

- 중금속과 유기오염물질에서 각각 높은 흡착 제거능을 보인 활성탄의 경우 혼합 오염물질(중금속+유기오염물질)에서는 선택적 유기오염물질 흡착에 의해 중금속 흡착 제거능이 낮아지는 특성을 보임
- 단일 오염물질(중금속 또는 유기오염물질)에서 높은 흡착 제거능을 보인 대부분의 피복소재들은 해당 오염물질에 대해 여전히 높은 흡착제거능을 보임
- 피복소재중 비표면적과 표면의 관능기에 의해 중금속과 유기오염물질의 흡착 매커니즘은 달라지는 것으로 사료됨
- 즉, 폐기물 및 천연광물들은 비표면적이 적으나 양이온 교환에 의해 중금속 흡착 제거능이 뛰어난
- 반면 활성탄과 유기점토는 비표면적이 넓고 표면에 음이온 흡착이 가능하기 때문에 오염물질에 대한 높은 흡착 제거능을 보이고 있음

(4) 현장 적용시 환경 영향 파악을 위한 피복소재의 안정성 검증 시험

(가) 생태독성실험

① 순환골재

- 건설폐기물인 순환골재를 이용한 피복소재로의 활용 가능성을 검증하기 위하여 해양미생물 생태독성 평가를 수행함
- 발광박테리아를 이용한 상대발광저해율이 0%(기준: <30%이하)가 나와 “독성 없음”으로 판명됨

- 미세조류의 경우 96시간동안 배양후 EC50 평가 후 “독성 없음”으로 판명됨

[표 II-가-10] 순환골재의 생태독성 평가

시험 생물종	발광박테리아 ( <i>Vibrio fischeri</i> )	미세조류 ( <i>Dunaliella tertiolecta</i> )
평가기준 (표준시험법)	상대발광저해율 30% 이하일 경우에는 “독성 없음”으로 판정	96 hr EC <sub>50</sub>
순환골재 용출 원액의 독성유무 (<2 mm)	0%(독성 없음)	EC <sub>50</sub> : > 100 %(독성 없음)

② 제강슬래그

- 환경안전성 평가 (해양생물 영양단계별 독성평가) 결과 독성 영향 없음 : 박테리아, 식물 플랑크톤, 해조류, 로티퍼, 어류 등
- 생태환경 안정성 평가
  - 유해물질 용출 등 환경안전성 영향 없음
  - 해양생물 영양단계별 독성평가 결과 독성 영향 없음

[표 II-가-11] 제강슬래그의 환경안전성 평가 및 생태독성 평가

기준 및 항목 구분	Hg	B	Cu	Zn	As	Se	Cd	Pb	Cr <sup>+6</sup>	CN
폐기물 용출 기준 (환경부)	0.005	-	3	-	1.5	-	0.3	3	1.5	1
해역 수질 기준 (국토해양부)	0.0005	-	0.02	0.1	0.05	-	0.01	0.05	0.05	0.01
적조구제물질용출기준 (농수식품부)	0.0005	-	0.02	0.1	0.05	0.01	0.01	0.05	0.05	0.01
제강슬래그 용출시험 결과	<0.0001	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.0002	<0.0002	<0.01	<0.005

시험 생물종	박테리아 <i>Vibrio fischeri</i>	식물플랑크톤 <i>Iso. galbana</i>	해조류 <i>Ulva pertusa</i>	로티퍼 <i>B. plicatilis</i>	어류 <i>C. variegatus</i>	단각류 <i>M. acherusicum</i>	다모류 <i>P. aibuhitensis</i>
평가 기준 (표준시험법)	30min EC <sub>50</sub>	72h EC <sub>50</sub>	24h EC <sub>50</sub>	24h LC <sub>50</sub>	96h LC <sub>50</sub>	10d LC <sub>50</sub>	96h LC <sub>50</sub>
제강슬래그 용출 원액의 독성유무 (<2 mm)	X	X	X	X	X	X	X

(5) 킬럼 및 모형수조를 이용한 현장 모사조건에서의 피복소재 성능검증

(가) 킬럼 및 모형수조를 이용한 현장 모사조건에서의 피복소재 성능 검증

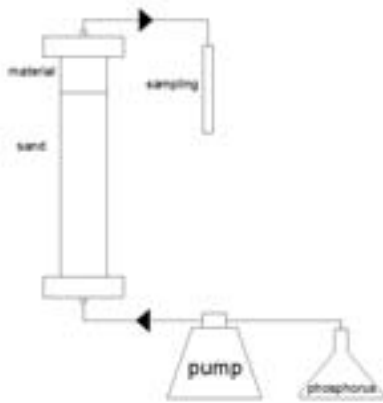
① 피복소재의 선정

- 인(Phosphorus) 용출 차단 킬럼실험을 위한 피복소재로는 회분식 실험에서 반응성 피복소재로 선정된 제강슬래그(Steel Slag)를 사용하여 수행
- PAHs(Naphthalene) 용출 차단 킬럼실험을 위한 피복소재로는 회분식 실험에서 유기오염물질의 반응성 피복소재로 선정된 활성탄(Activated Carbon)을 사용하여 수행
- 중금속(Cr<sup>6+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, As<sup>3+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>)의 용출 차단 현장모사형 수조실험을 위한 피복소재로는 본 연구에서 반응성 피복소재로 선정된 순환골재(Recycled Aggregate), 벤토나이트(Bentonite), 제강슬래그(Steel Slag), 석회석(Lime Stone), 활성탄(Activated Carbon), 모래(Sand)를 사용하여 수행
- PCBs(2, 4'- Dichlorobiphenyl) 용출 차단 현장모사형 수조실험을 위한 피복소재로는 본 연구에서 유기오염물질의 반응성 피복소재로 선정된 활성탄(Activated Carbon), 유기점토(Organic Clay), 벤토나이트(Bentonite)를 사용하여 수행

② 용출차단 킬럼장치의 구성 및 실험 조건

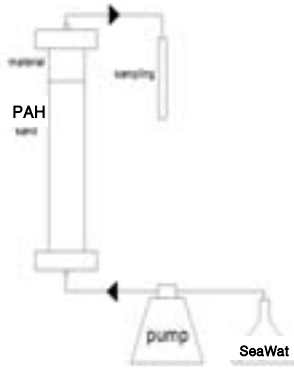
㉔ 용출차단 컬럼장치 및 현장모사형 수조장치의 구성

- 장치는 지름 50 mm, 길이 300 mm의 원형컬럼으로 컬럼본체와 유입수 반응조, 미세정량 펌프, 자동시료채취기로 구성되었으며 컬럼 하단부에 오염수를 주입하여 컬럼 상단부에 유출수가 배출되는 상향식(Upflow)구조로 구성되었음
- 일반적으로 clay질이 대부분으로 구성된 퇴적물은 투수계수가 매우 적음. 따라서 컬럼 내부압력과 원활한 실험진행을 위하여 퇴적물을 대체하여 해사로 충전하였고, 해사 상단부에 반응성 피복소재를 피복하여 진행하였음



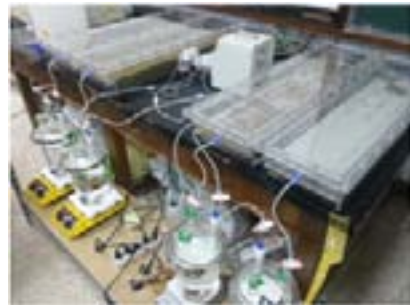
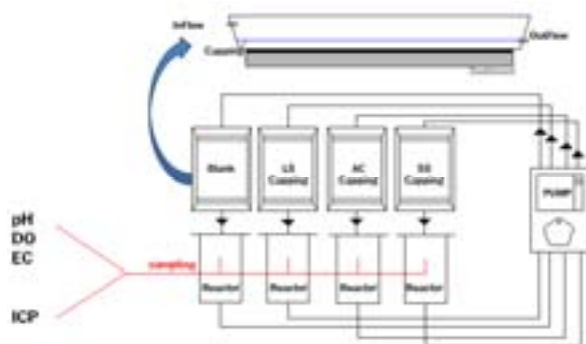
[그림 II-가-19. 컬럼 실험 모식도 및 인(Phosphorus)용출차단 컬럼실험장치]

- 퇴적물 내 중금속 용출차단 현장모사형 수조실험장치는 길이 800 mm, 폭 200 mm, 높이 150 mm의 직사각형 형태로 수조본체와 유입 및 유출수 반응조, 정량펌프로 구성되었으며, 반응조의 해수가 수조본체에 유입되어 본체 내에서 흐름을 일으킨 후 다시 반응조에 유입되는 순환식구조로 구성되었음
- 피복소재에 의한 용출차단 효율을 파악하기 위하여 퇴적물 내 중금속의 용출이 쉽게 일어날 수 있도록 인위적으로 오염을 시켜서 실험을 수행하였음
- 퇴적물 내 유기오염물질 용출차단 현장모사형 수조실험장치는 길이 240 mm, 폭 50 mm, 높이 50 mm의 직사각형 형태로 수조본체와 유입 및 유출수 반응조, 정량펌프로 구성되었으며, 반응조의 해수가 수조본체에 유입되어 본체 내에서 흐름을 일으킨 후 다시 반응조에 유입되는 순환식구조로 구성되었음 또한 빛에 의한 유기오염물질의 분해를 방지하고자 알루미늄 호일을 이용하여 수조본체와 반응조를 차광하였음



[그림 II-가-20. PAHs(Naphthalene) 컬럼 실험 모식도 및 PAHs(Naphthalene)용출차단 컬럼실험장치]

- 피복소재에 의한 용출차단 효율을 파악하기 위하여 퇴적물 내 유기오염물질의 용출이 쉽게 일어날 수 있도록 인위적으로 오염을 시켜서 실험을 수행하였음



[그림 II-가-21. 중금속 용출차단 수조실험장치 모식도 및 중금속 용출차단 수조실험장치]

#### ㉔ 용출차단 컬럼장치 및 현장모사형 수조 실험 조건

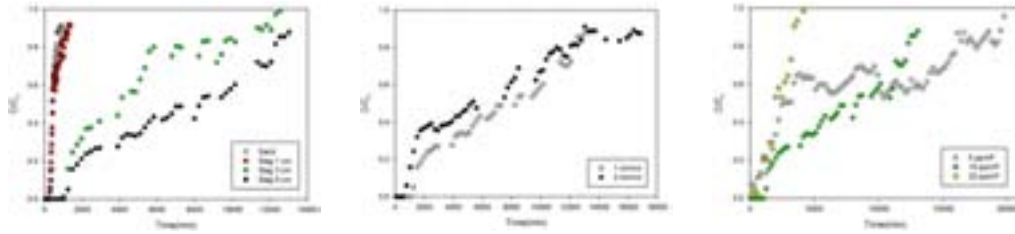
- 컬럼 실험에서는 퇴적물 내 존재하는 영양염류의 용출차단 효율을 평가하고자 W항에서 채수한 해수에 인(Phosphorus)이 5, 10, 20 mg/L의 농도가 되도록 인위적으로 오염시켜 실험을 진행하였음
- 반응성 피복소재로는 제강슬래그(Steel Slag)를 사용하였고, 반응성 피복소재의 두께, 유량(유속), 오염물질(Phosphorus) 농도를 달리하여 실험을 진행하였음
- 시료는 잔류된 인(Phosphorus)의 농도를 알아보기로 아스크로빈산 환원법으로 발색하여 분광광도계로 잔류농도를 분석하였음
- 유기오염물질 PAHs(Naphthalene)의 용출차단 효율을 평가함에 있어 빛에 의한 유기오염물질의 분해를 방지하기 위하여 알루미늄 호일로 빛을 차단하였으며, 오염물질의 용출을 유도하기 위해서 해사(입경 1 mm이하)에 나프탈렌을 인위적으로 오염시켜 컬럼에 충전하였고, 오염된 해사 위에 활성탄(Activated Carbon)을 5 cm 두께로 피복하여 실험을 진행하였음
- 시료는 잔류 PAHs(Naphthalene)의 농도를 알아보기로 유기용매로 추출 후 GC로 분석함

- 모형수조 실험에서는 퇴적물내 존재하는 중금속의 용출차단 효율을 평가하고자 I항에서 채취한 퇴적물에 중금속( $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ )을 인위적으로 오염시켜 실험을 진행하였음
- 모형수조 퇴적층 수조에 오염퇴적물을 4 cm 높이로 채우고 각각의 피복소재를 약 1 cm 두께로 충전하였으며, W항에서 채취한 해수를 여과, 멸균하여 유량(유속) 10 ml/min의 조건으로 수평으로 흐름을 주어 실험을 수행하였음
- 모형수조 실험은 32일간 수행하였고 반응조에 유입된 오염해수는 일 1회 샘플링하여 pH, DO, EC를 측정하였으며, 중금속의 용출정도를 알아보기 위하여 ICP 분석을 실시하였음
- 모형수조 실험 후 퇴적물과 흡착소재간 반응에 의한 퇴적물 내 중금속 안정화/고정화 효율을 평가하기 위하여 Tessier(1979)가 제안한 단계별 추출법(Sequential Extraction Method)을 적용하여 실험을 진행하였음
- 각 모형수조의 퇴적물 표층(Surface)과 표층 1 cm 깊이(Subsurface) 지점에서 시료를 채취하여 퇴적물 내 존재하는 중금속을 1단계(Exchangeable Fraction), 2단계(Bound onto carbonate Specially Adsorbed Fraction), 3단계(Bound onto Fe-Mn Oxide Fraction), 4단계(Bound onto Organic and Sulphide Fraction), 5단계(Residual Fraction)로 구분하여 안정화/고정화 효율을 평가하였음
- 퇴적물 내 존재하는 유기오염물질의 용출차단 효율을 평가하고자 I항에서 채취한 퇴적물에 PCB를 인위적으로 오염시켜 실험을 진행하였음
- 모형수조에 PCB로 오염된 퇴적물을 약 1 cm 높이로 채우고 각 피복소재인 활성탄(Activated Carbon), 유기점토(Organic Clay), 벤토나이트(Bentonite)를 1 cm 두께로 피복하였으며, W항에서 채수한 해수를 여과, 멸균하여 유량(유속) 10 ml/min의 조건으로 수평으로 흐름을 주어 실험을 수행하였음
- 유기오염물질 용출차단 실험은 11일간 수행하였고 반응조에 유입된 오염해수는 일 1회 샘플링하여 유기오염물질의 용출정도를 알아보기 위하여 GC 분석을 실시하였음

### ③ 용출차단 컬럼실험 및 모형수조실험의 결과

#### ㉞ 제강슬래그(Steel Slag)에 의한 인(Phosphorus) 용출차단

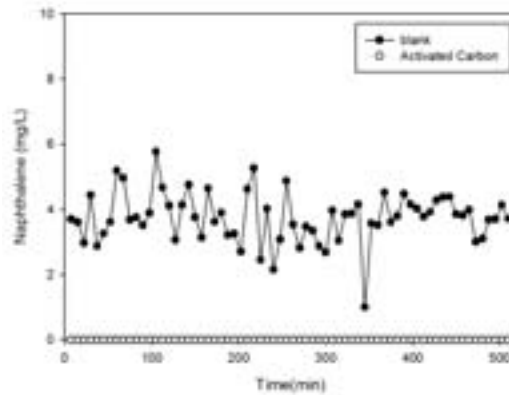
- 제강슬래그(Steel Slag)의 두께를 1, 3, 5 cm로 달리하여 용출차단 효율을 실험한 결과 3 cm이상의 두께에서 약 12000분(200시간)경과시 파과점(Breakthrough point)에 도달하였음
- 제강슬래그(Steel Slag)의 두께를 5 cm로 하고 유량을 각 1 ml/min과 2 ml/min으로 달리 하였을 때는 파과점(Breakthrough point)에 큰 차이를 보이지 않았음
- 제강슬래그(Steel Slag)의 두께를 5 cm로 하고 인(Phosphorus)의 농도를 각 5, 10, 20 mg/L로 달리하였을 때 10 mg/L 이하의 농도에서 약 12000분(200시간)이후에 파과점(Breakthrough point)에 도달하였음
- 이상의 결과로 제강슬래그(Steel Slag)의 인(Phosphorus)용출차단을 위한 컬럼 실험결과 농도 10 mg/L이하에서 피복소재의 두께 3 cm가 효과적이었음



[그림 II-가-22] 제강슬래그의 피복두께, 유량(유속), 농도에 따른 인 용출차단 효율

㊤ 활성탄(Activated Carbon)에 의한 PAHs 용출차단

- 활성탄(Activated Carbon)에 의한 PAHs(Naphthalene)의 용출 차단 효율을 알아보기 위하여 컬럼실험을 수행하였고, 그 결과 활성탄(Activated Carbon)을 피복하지 않은 대조군에서는 시간이 지남에 따라 지속적으로 Naphthalene이 용출되는 경향을 나타내었지만 (Avg:  $3.75 \pm 0.7683$  mg/L), 활성탄(Activated Carbon)을 5 cm 피복한 컬럼에서는 PAHs(Naphthalene)가 전혀 검출되지 않아 용출 차단 및 저감효과를 나타내고 있음

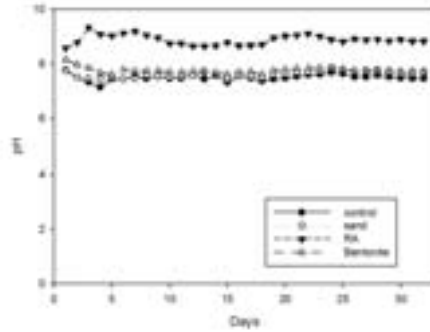


[그림 II-가-23] 활성탄 컬럼실험에 따른 PAHs(Naphthalene)용출차단 효율

㊤ 반응성 피복소재에 의한 pH, EC, DO의 변화

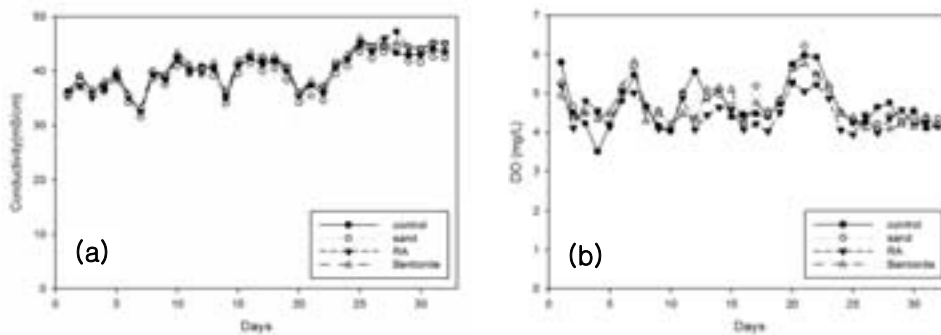
■ 순환골재(Recycled Aggregate), 벤토나이트(Bentonite), 모래(Sand)

- 순환골재, 벤토나이트, 모래의 피복에 따라 pH 경향을 살펴본 결과 벤토나이트와 모래는 대조군과 큰 차이가 없는 pH(7.5 - 8)를 나타내었지만, 순환골재의 경우 상대적으로 높은 pH(8.5 - 9.5)를 나타내었음
- 본 모형수조는 피복소재와 접하는 물의 부피비가 약 1:1로 피복소재가 pH에 미치는 영향이 크게 나타나지만, 순환골재를 실제 해역에서 피복할 경우는 pH의 영향은 미미할 것으로 판단됨



[그림 II-가-24] 순환골재, 벤토나이트, 모래 피복에 따른 pH변화

○ 순환골재, 벤토나이트, 모래 피복에 따른 EC(전기전도도)와 DO(용존산소) 변화를 측정한 결과 대조군과 큰 차이가 없는 것으로 나타나 피복에 따른 환경변화가 미미한 것으로 판단됨

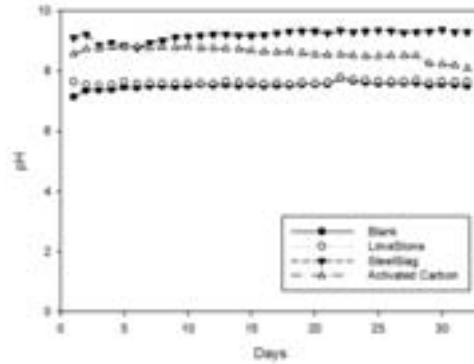


[그림 II-가-25] 순환골재, 벤토나이트, 모래 피복에 따른 pH, EC, DO 변화

■ 석회석(Lime Stone), 제강슬래그(Steel Slag), 활성탄(Activated Carbon)

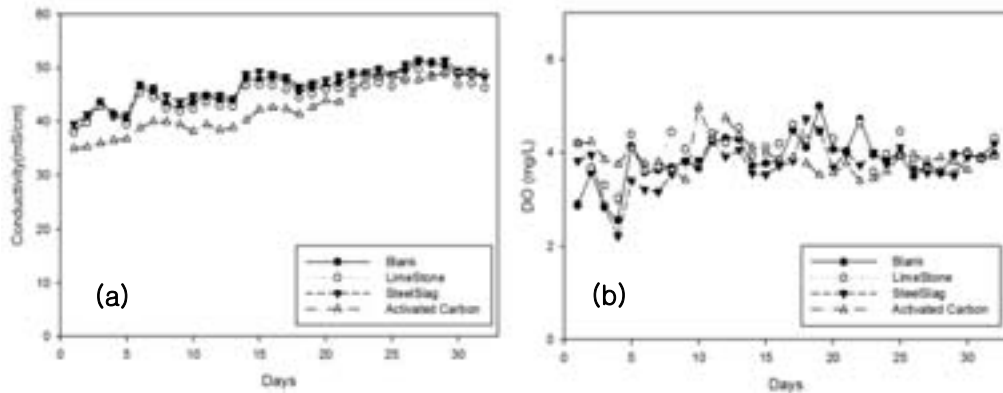
- 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 pH 경향을 살펴본 결과 석회석은 대조군과 큰 차이가 없는 pH(7 - 7.5)를 나타내었지만, 제강슬래그, 활성탄의 경우 상대적으로 높은 pH(8.5 - 9.5)를 나타냄, 활성탄의 경우 27일차부터 pH가 낮아지는 경향을 보임
- 본 모형수조는 피복소재와 물의 부피비가 약 1:1로 피복소재가 pH에 미치는 영향이 크게 나타나지만, 제강슬래그를 실제 해역에서 피복할 경우는 pH의 영향이 매우 미미할 것으로 판단됨





[그림 II-가-26] 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 pH 변화

- 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 EC(전기전도도)와 DO(용존산소) 변화를 측정함
- EC의 경우 석회석, 제강슬래그는 대조군과 큰 차이가 없었지만 활성탄은 석회석, 제강슬래그보다 낮은 EC값을 나타내었으며 실험 23일차 이후 석회석, 제강슬래그와 큰 차이가 없는 것으로 나타났음
- DO의 경우는 대조군과 석회석, 제강슬래그, 활성탄과 큰 차이가 없는 값으로 나타났음

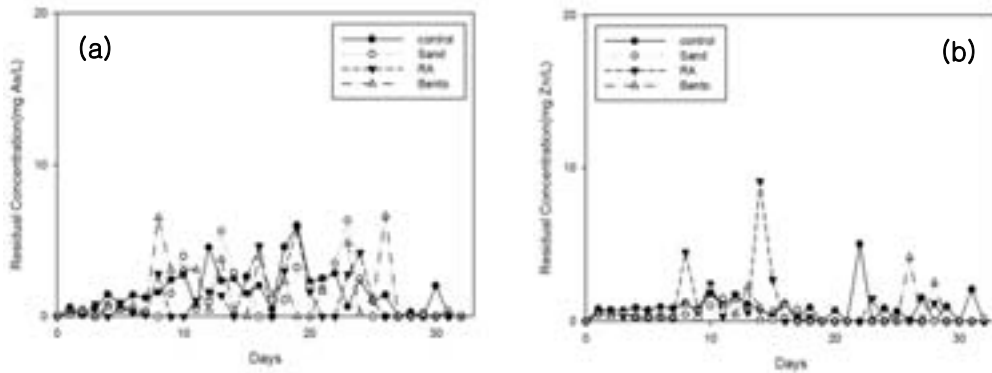


[그림 II-가-27]. 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 EC, DO 변화  
(a: EC, b: DO)

㉔ 피복소재에 의한 중금속 용출차단 효율

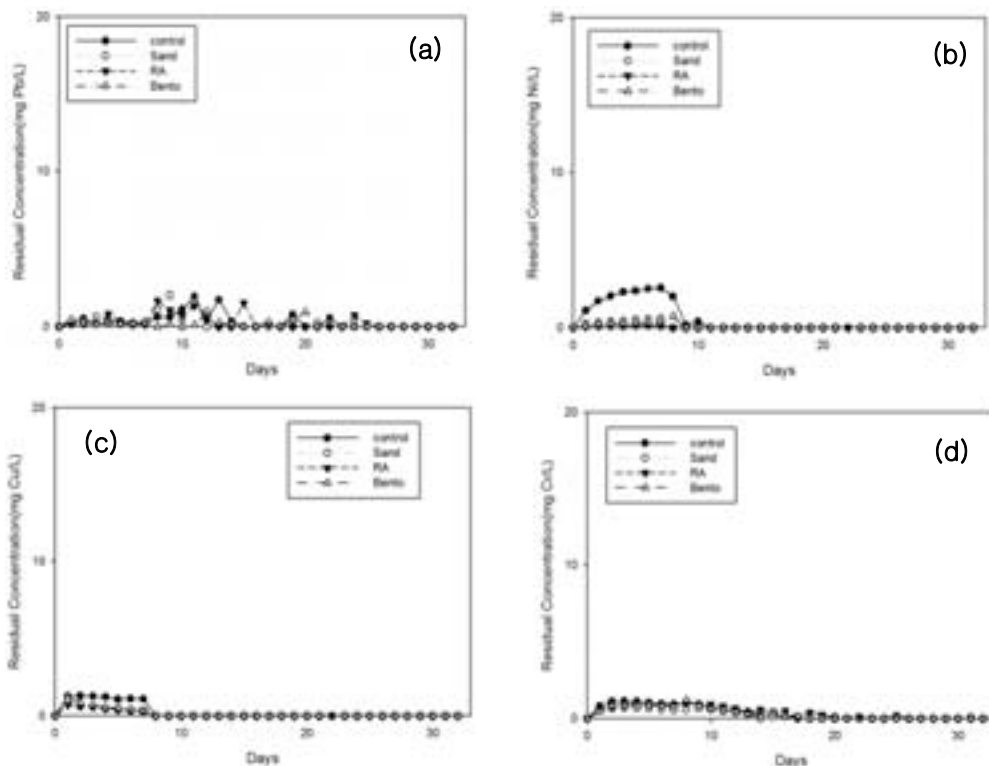
■ 순환골재(Recycled Aggregate), 벤토나이트(Bentonite), 모래(Sand)

- $As^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$ 을 퇴적물에 인위적으로 오염시켰을 때 용출되는 경향은 매우 불규칙적인 것으로 나타났지만 농도가 지속적으로 증가하지 않는 경향을 보여 용출은 미미한 것으로 판단됨. 또한 순환골재, 벤토나이트, 모래에 의한 용출차단효과도 크지 않은 것으로 나타났음



[그림 II-가-28] 순환골재, 벤토나이트, 모래피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도  
(a: As<sup>3+</sup>, b: Zn<sup>2+</sup>)

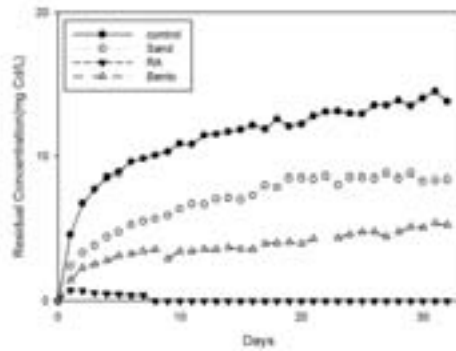
- Pb<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup>을 퇴적물에 인위적으로 오염시켰을 경우 퇴적물과의 강한 결합을 형성하여 해수로 용출되는 양은 극히 미량 또는 거의 없는 것으로 나타났음
- 이로 인하여 순환골재, 벤토나이트, 모래에 의한 중금속(Pb<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup>)의 용출 차단 경향은 파악이 어려움



[그림 II-가-29] 순환골재, 벤토나이트, 모래피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도(a: Pb<sup>2+</sup>, b: Ni<sup>2+</sup>, c: Cu<sup>2+</sup>, d: Cr<sup>6+</sup>)

- Cd<sup>2+</sup>을 퇴적물에 인위적으로 오염시켰을 경우 시간이 지남에 따라 지속적으로 용출되는 경향을 나타냈음
- 피복소재에 의한 Cd<sup>2+</sup>의 용출차단 효율이 모래 < 벤토나이트 < 순환골재 순으로 높은 것

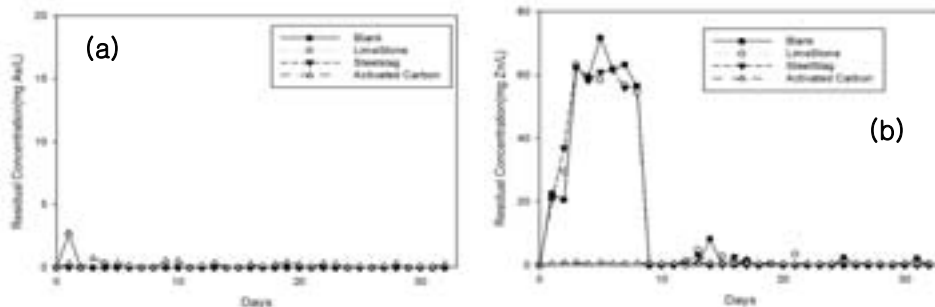
으로 나타났음



[그림 II-가-30] 순환골재, 벤토나이트, 모래피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도(Cd<sup>2+</sup>)

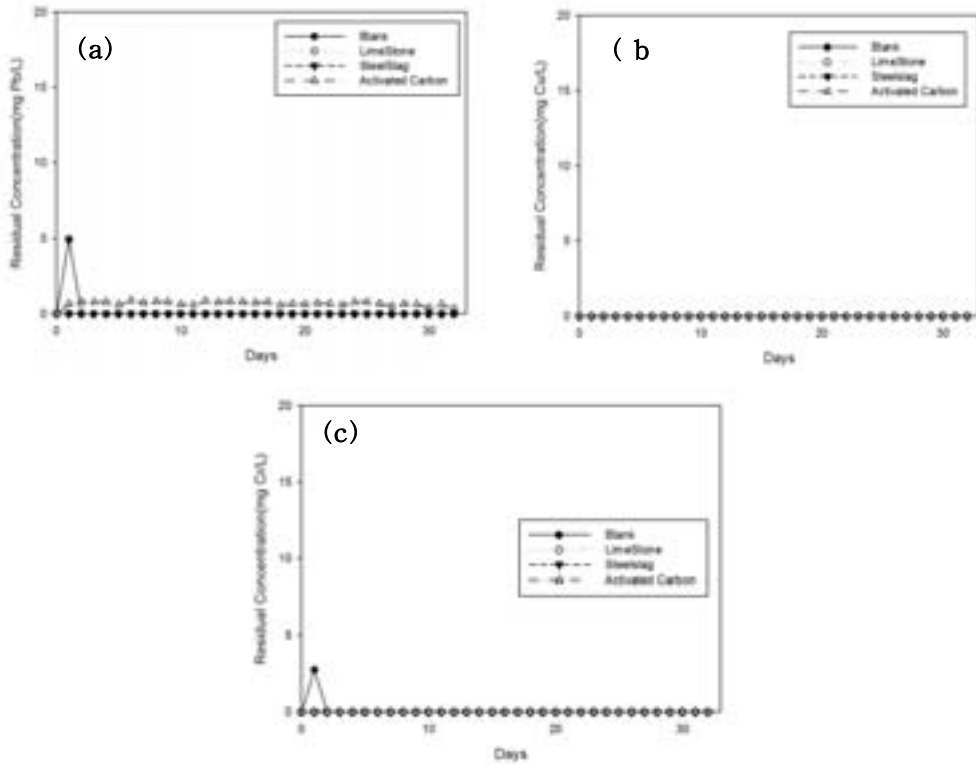
■ 석회석(Lime Stone), 제강슬래그(Steel Slag), 활성탄(Activated Carbon)

- Zn<sup>2+</sup>은 퇴적물에 인위적으로 오염시켰을 때 용출되는 경향이 매우 불규칙적인 것으로 나타났지만 시간이 경과하면서 용출이 일어나지 않는 경향을 나타냈고, As<sup>3+</sup>는 퇴적물에서 용출이 일어나지 않는 경향을 나타내었음
- 하지만 활성탄을 피복하였을 경우 대조군에서 용출되지 않았던 As<sup>3+</sup>가 미량으로 용출되는 결과를 나타냄



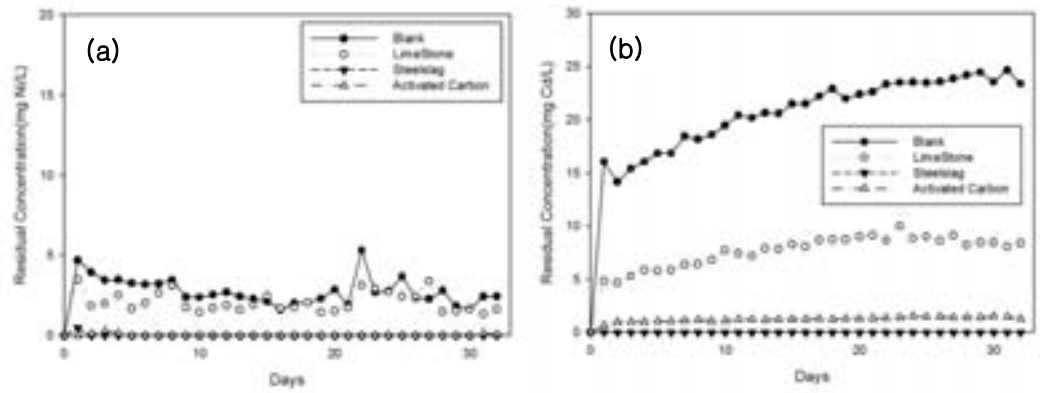
[그림 II-가-31] 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도 (a: As<sup>3+</sup>, b: Zn<sup>2+</sup>)

- Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup>을 퇴적물에 인위적으로 오염시켰을 경우 퇴적물과의 강한 결합을 형성하여 해수로 용출되는 양이 극히 미량 또는 없는 것으로 나타났음
- 석회석, 제강슬래그에 의한 중금속(Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup>)의 용출 경향은 없는 것으로 나타났지만 활성탄을 피복하였을 때 Pb<sup>2+</sup>의 경우 미량 용출되는 경향을 나타냄



[그림 II-가-32] 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도 (a:  $Pb^{2+}$ , b:  $Cu^{2+}$ , c:  $Cr^{6+}$ )

- $Ni^{2+}$ 을 퇴적물에 인위적으로 오염시켰을 경우 초기에 용출이 진행되는 경향을 알 수 있었으며, 석회석에 의한 용출차단효과가 미미하였지만 제강슬래그, 활성탄에 의한 용출차단은 효율은 높은 것으로 나타났음
- $Cd^{2+}$ 을 퇴적물에 인위적으로 오염시켰을 경우 시간이 지남에 따라 지속적으로 용출되는 경향을 나타냈음
- 피복소재에 의한  $Cd^{2+}$ 의 용출차단 효율이 석회석 < 활성탄 < 제강슬래그 순으로 높은 것으로 나타났음
- 6가지 피복소재에 의한 퇴적물 내 중금속( $Cd^{2+}$ ) 용출차단 효율은 모래 < 석회석 < 벤토나이트 < 활성탄 < 순환골재 = 제강슬래그 순으로 나타남

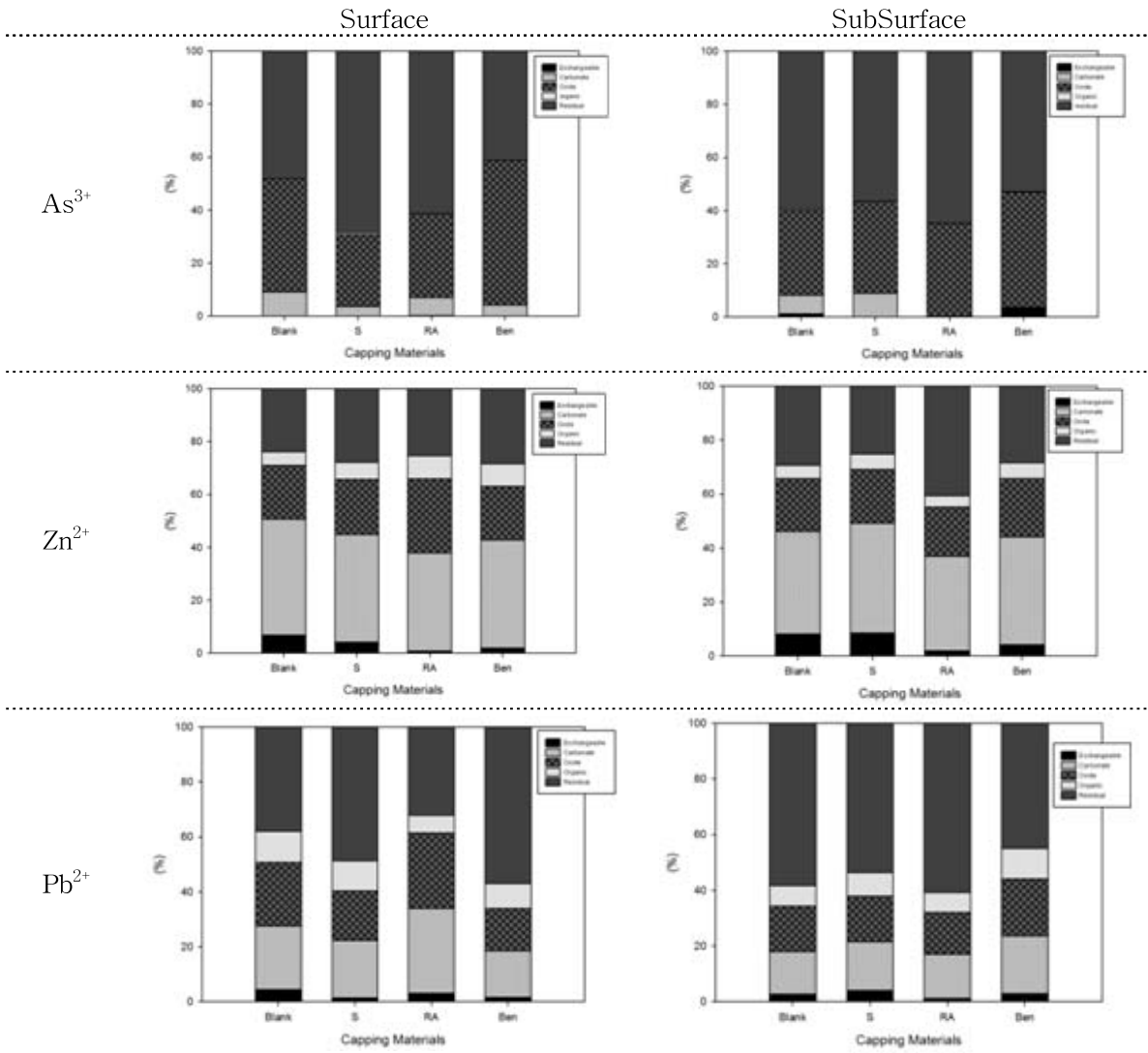


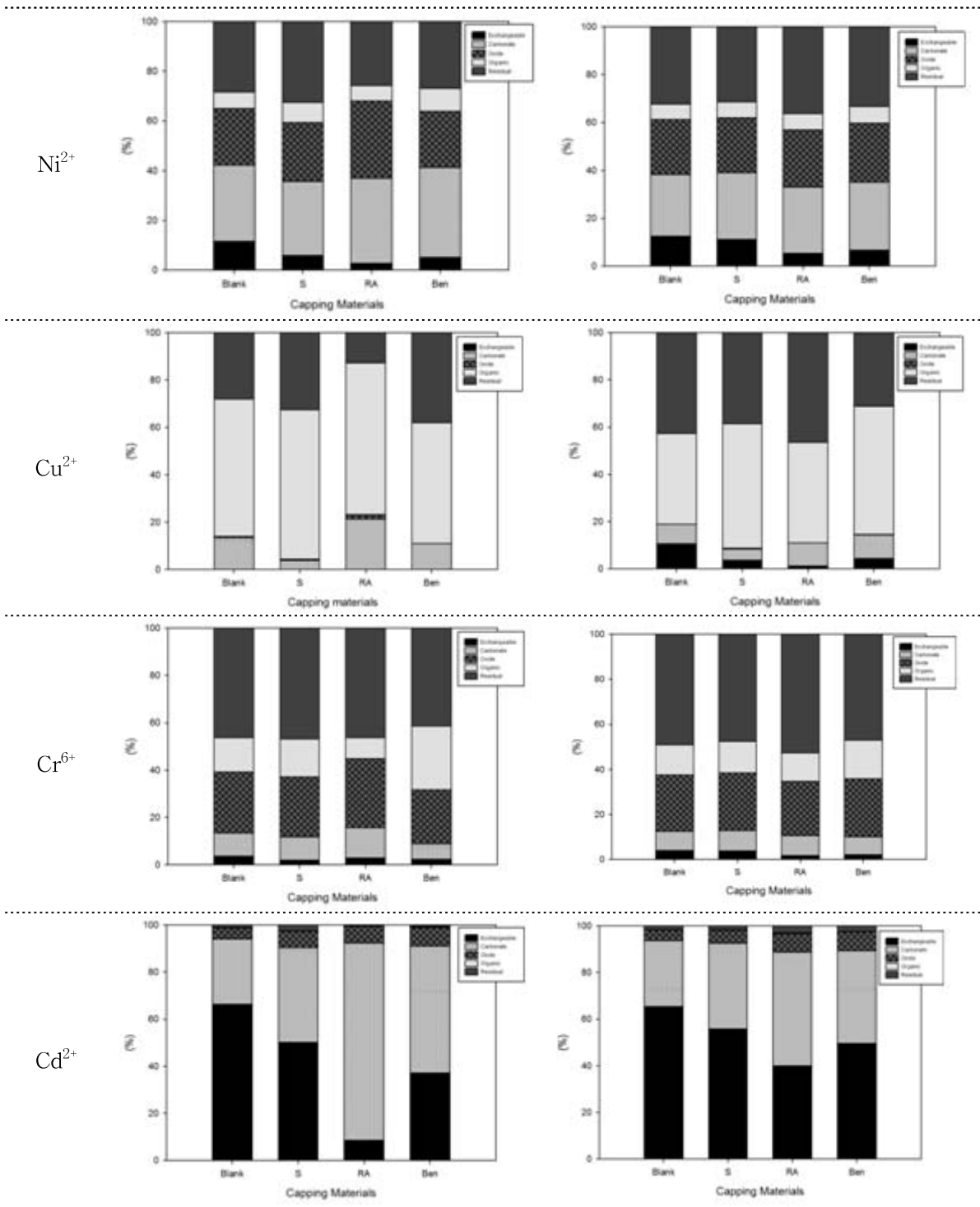
[그림 II-가-33] 석회석, 제강슬래그, 활성탄 피복에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출도 (a:  $Ni^{2+}$ , b:  $Cd^{2+}$ )

㉔ 피복소재에 의한 퇴적물 내 중금속 안정화/고정화 효율

■ 순환골재(Recycled Aggregate), 벤토나이트(Bentonite), 모래(Sand)

- 피복소재인 순환골재, 벤토나이트, 모래에 의한 퇴적물 내 중금속 안정화/고정화 효율을 파악하기 위하여 총 5단계의 중금속 단계별 추출 중 주변 환경변화에 의하여 비교적 쉽게 용출될 수 없는 단계인 4단계 이상의 중금속 함량에 대하여 실험을 진행
- 퇴적층 표면에서 1 cm 깊이의 Subsurface 층을 분석한 결과 4, 5단계의 변화 폭이 피복소재를 피복한 시료와 대조군 시료간 큰 차이가 없는 것으로 나타났음
- 퇴적층 표면인 Surface 층을 분석한 결과 4, 5단계의 변화 폭이 피복소재별로 다양했으며, Subsurface와 비교하였을때 피복소재와 접하고 있는 퇴적층 표면의 반응성이 있는 것으로 판단됨
- 피복소재에 의한 퇴적물 내 중금속 안정화/고정화 실험결과 순환골재는  $As^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$ , 벤토나이트는  $Zn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ , 모래는  $As^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ 에 효과적인 것으로 나타났음





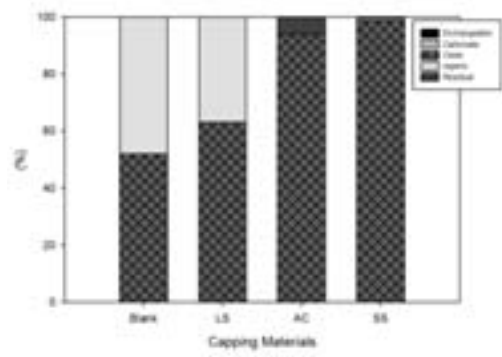
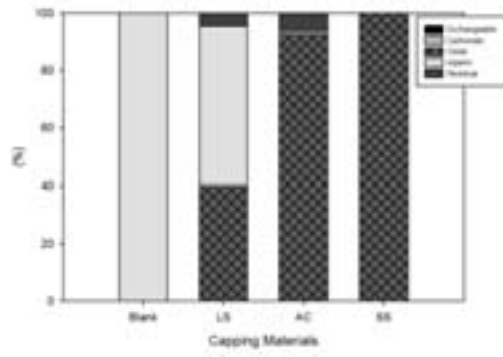
[그림 II-가-34] 순환골재, 벤토나이트, 모래 피복에 의한 퇴적물 내 중금속 안정화/고정화 효율

■ 활성탄(Activated Carbon), 석회석(Lime Stone), 제강슬래그(Steel Slag)

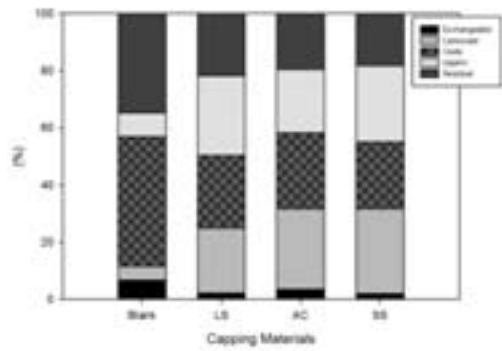
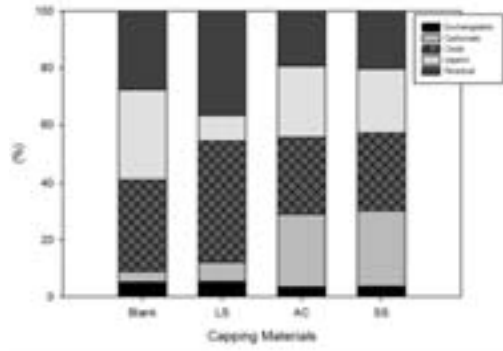
Surface

SubSurface

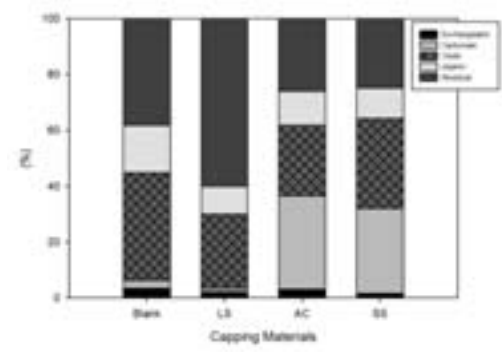
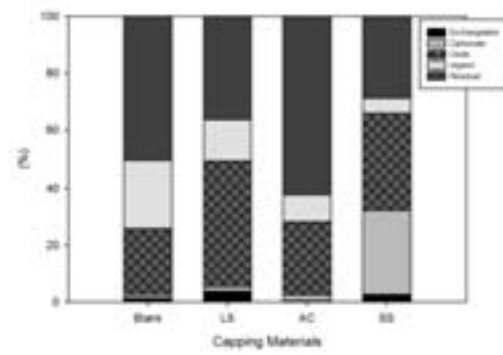
As<sup>3+</sup>



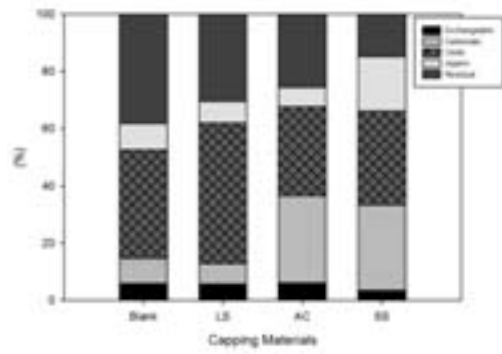
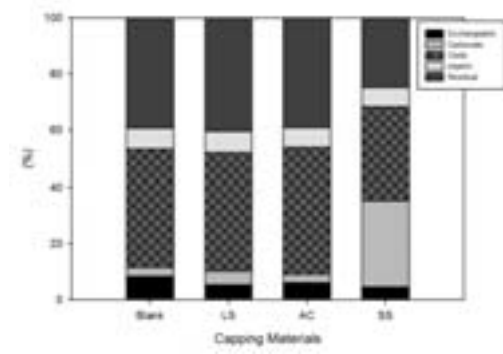
Zn<sup>2+</sup>



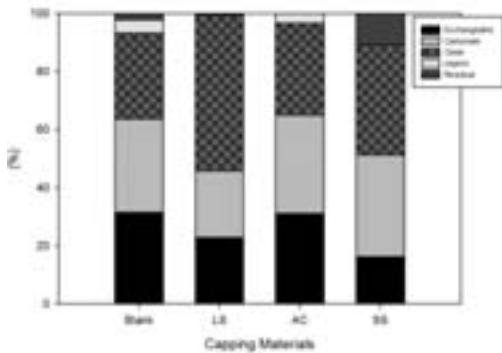
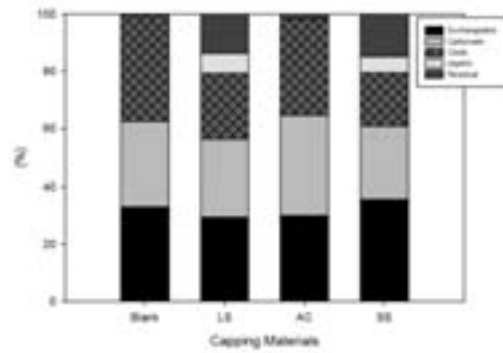
Pb<sup>2+</sup>

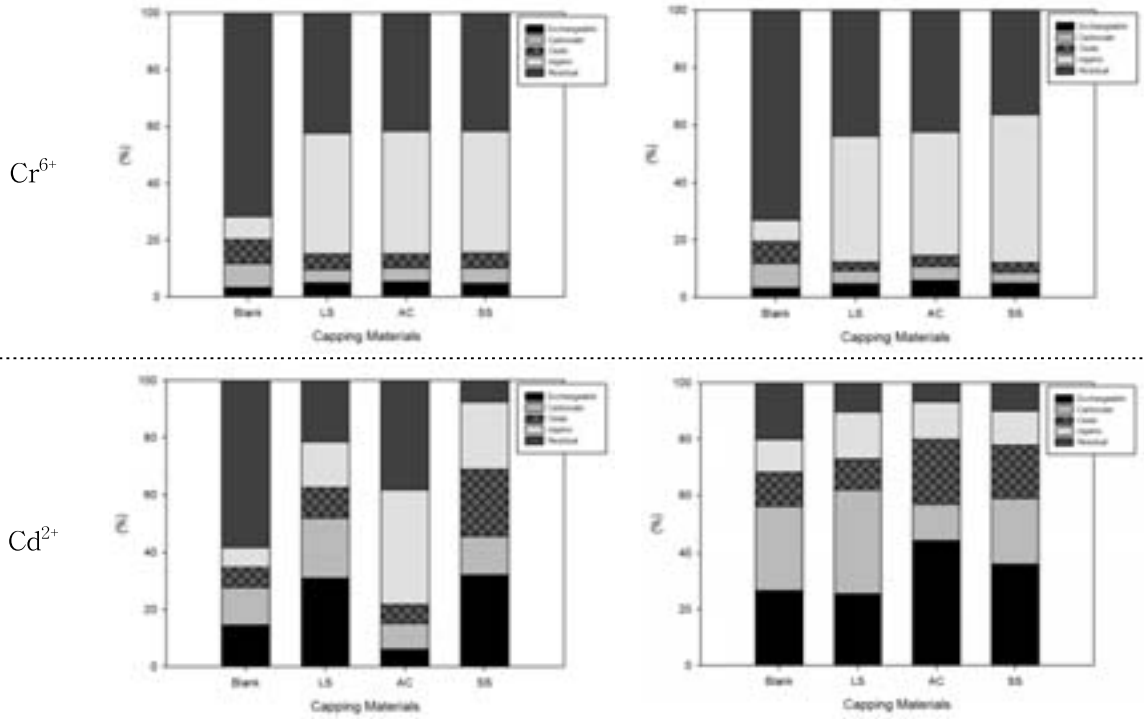


Ni<sup>2+</sup>



Cu<sup>2+</sup>

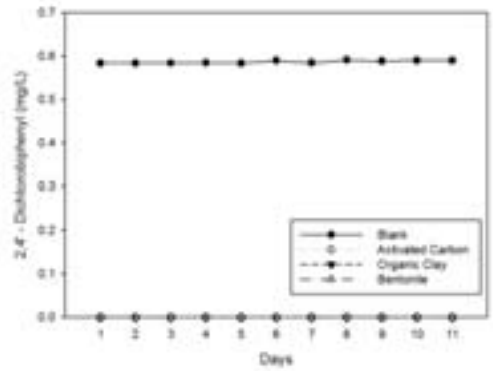




[그림 II-가-35] 석회석, 활성탄, 제강슬래그 피복에 의한 퇴적물 내 중금속 안정화/고정화 효율

㉞ 피복소재에 의한 PCBs 용출차단 효율

○ 활성탄(Activated Carbon), 유기점토(Organic Clay), 벤토나이트(Bentonite)에 의한 퇴적물 내 PCBs(2,4'-Dichlorobiphenyl)의 용출차단 효율을 알아보기 위하여 수조실험을 수행하였고, 그 결과 대조군(Blank)에서는 1일차부터 11일차까지 약 0.58 mg/L 농도의 PCBs가 검출되었지만, 활성탄(Activated Carbon), 유기점토(Organic Clay), 벤토나이트(Bentonite)를 피복한 수조에서는 PCBs가 검출되지 않아 용출차단 및 저감효과를 나타내고 있음



[그림 II-가-36] 활성탄, 유기점토, 벤토나이트 피복에 따른 오염퇴적물 내 PCBs(2,4'-Dichlorobiphenyl) 용출도

(나) 생태수조를 이용한 현장 모사 시험

○ 유효 용량 1 m<sup>3</sup>의 수조에 오염퇴적물(대조군)과 오염퇴적물을 순환골재, 모래로 피복한 후, 수중생물(우렁, 갯지렁이)을 사육하며 수질 및 오염퇴적물의 변화를 3회 반복 측정하여 비교 분석함





<생태수조 실험 전경 (좌: 순환골재 피복, 중: 모래 피복, 우: 대조군)>



<생태수조 순환골재 피복>



<생태수조 모래 피복>



<생태수조 대조군>

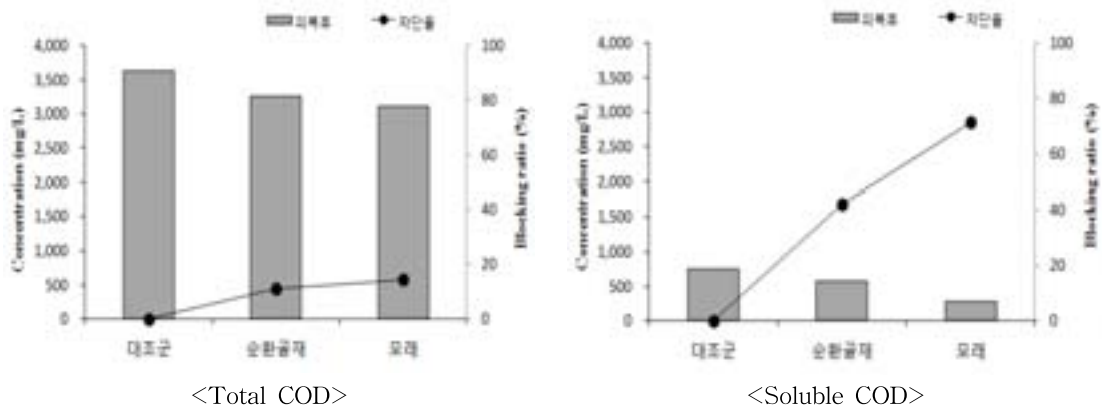


피복 후 수중생물 서식모습(좌 : 우럭, 우: 갯지렁이)

[그림 II-가-37] 생태 수조 실험 장치

### ① 피복소재에 의한 유기오염(COD)의 저감 효과

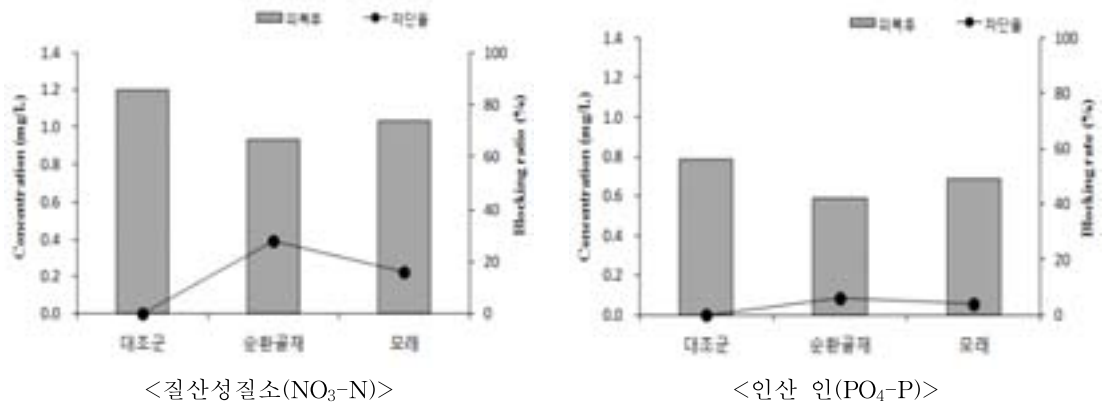
- 대조군의 유기오염 감소비를 고려한 총 COD 저감 효과에서 순환골재(11%) 보다 모래(14%)를 사용할 경우 더 높은 차단 효과를 보이고 있음
- 용존 COD 저감 효과에서는 대조군 대비 순환골재와 모래는 각각 42%와 71%의 저감 효과를 보이고 있음



[그림 II-가-38] 피복소재에 의한 유기물 저감 효과

② 피복소재에 의한 영양염류의 저감 효과

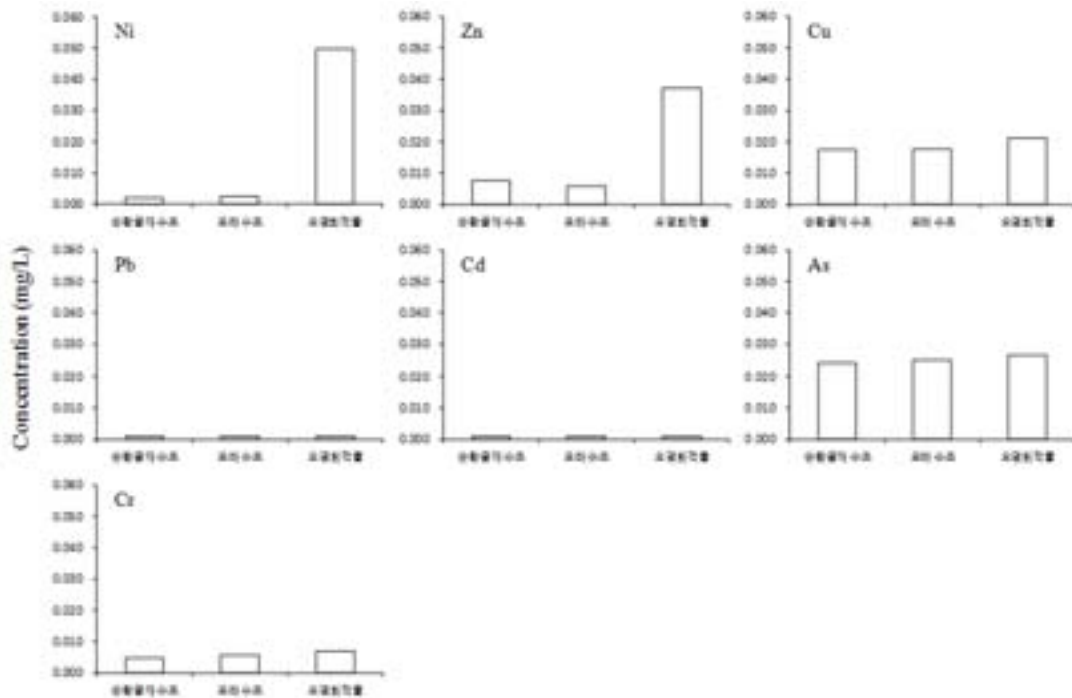
- 질산성 질소의 용출 차단은 대조군과 비교해 보면, 순환골재는 약 28%, 모래는 16%의 차단 효과를 나타내고 있음
- 인산염 인인 경우 피복소재의 차단 효과를 살펴보면, 순환골재는 약 6.2%, 모래는 3.9%의 차단 효과를 보이고 있음



[그림 II-가-39] 피복소재에 의한 영양염류 저감 효과

③ 피복소재에 의한 중금속 용출 저감 효과

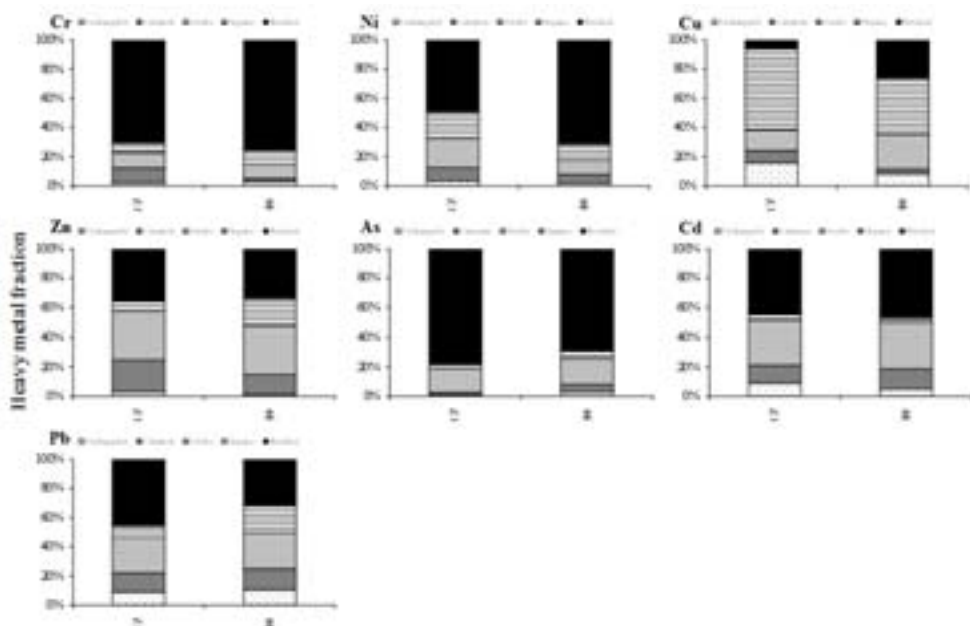
- 생태수조 내 수계에서 피복소재 피복 전후의 중금속 농도 변화를 나타낸 결과임
- 피복소재와 관계없이 수계 내 중금속 Ni, Zn, Pb, Cd은 피복 소재 피복 전보다 피복 후, 수계내에서 중금속 농도가 현저히 낮게 검출되는 것을 알 수 있음
- 반면 중금속 Cu, As, Cr 등은 피복 전후, 생태수조 내에 극히 미량 존재하거나, 큰 농도 변화가 없음.



[그림 II-가-40] 피복소재에 의한 중금속 용출 저감 효율 비교

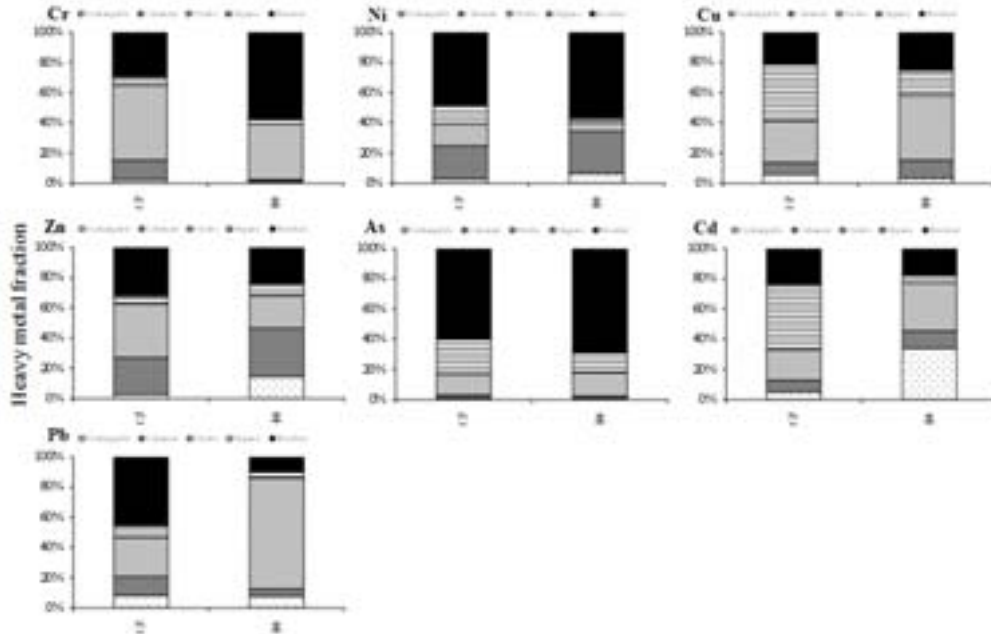
④ 피복소재에 의한 오염퇴적물 내 중금속 안정화 변화 비교

- 오염퇴적물 내 중금속 안정화 변화를 알아보기 위해 피복소재 투입 전·후 중금속 안정화 변화를 30일간의 피복 실험기간을 통해 분석하였음
- 환경변화에 변화기 쉬운 1단계(Exchangeable), 2단계(Carbonate), 3단계(Oxide)의 부분에 대해서 각 중금속별 피복소재 투입 전, 후의 안정화 변화는 매우 미미한 결과를 나타남
- 순환골재에서는 타 중금속들보다 Zn의 안정화가 높게 나타남



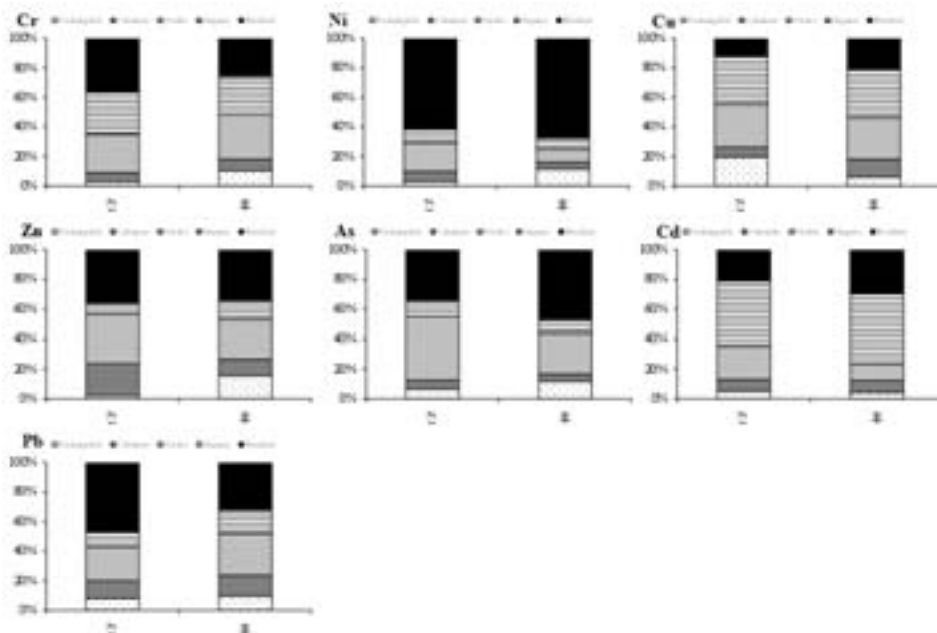
[그림 II-가-41] 피복소재에 의한 중금속 안정화 효율 비교(순환골재 피복)

- 오염퇴적물 내 중금속 안정화 변화를 알아보기 위해 모래의 피복 전·후 중금속 안정화 변화를 분석하였음
- 모래 피복시 Cr의 안정화 비율이 높게 나타난 반면, Cu, Cd, Pb의 안정화가 낮아지는 결과를 나타냄
- 특히 이러한 현상은 안정한 4, 5단계가 불안정한 3단계인 Oxide 형태로 변화한 결과로 나타남



[그림 II-가-42] 피복소재에 의한 중금속 안정화 효율 비교(모래 피복)

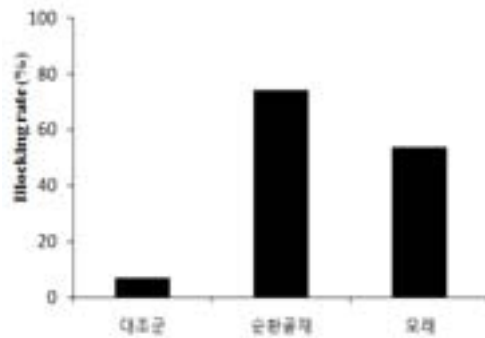
- As, Cd의 안정화가 진행되고 있지만, 다른 중금속의 안정화에는 큰 변화가 없는 것으로 나타남



[그림 II-가-43] 피복소재에 의한 중금속 안정화 효율 비교(대조군)

### ⑤ 피복소재에 의한 탁도의 변화 비교

- 피복소재 피복에 의한 오탁정도를 알아보기 위해 생태수조의 피복 소재 피복 전·후 탁도의 변화를 관찰하였음.
- 대조군과 비교해 보면 피복소재에 의한 피복시 대조군에 비해 상대적으로 탁도가 낮게 나타남
- 생태수조 내 피복소재에 의한 탁도저감 효율은 대조군 대비 순환골재 70%, 모래 50%의 효과를 나타냄



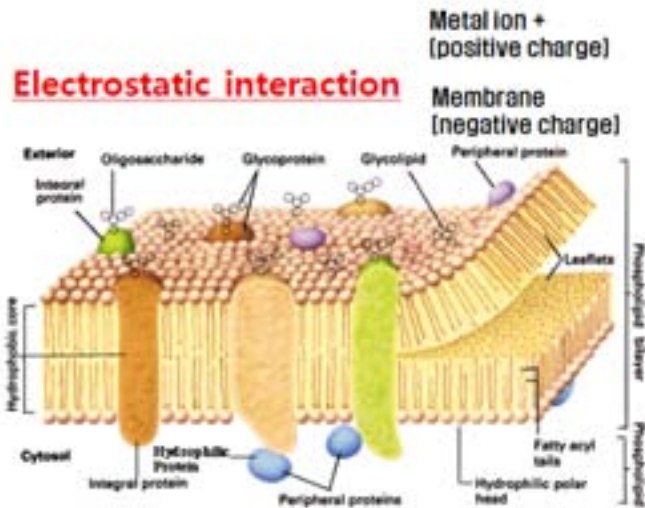
[그림 II-가-44] 피복소재에 의한 탁도(Turbidity)의 변화 비교

#### 나. 오염정화를 위한 생물 소재 개발

(1) 국내 해역별 오염특성을 고려한 중금속 안정화 성능을 가진 생물소재 도출 (서강대)

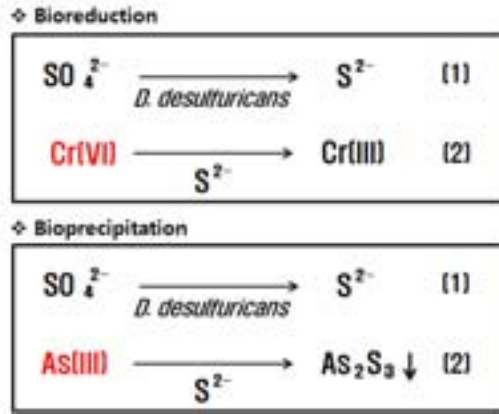
(가) 오염 정화를 위한 생물 소재 개발

- 본 연구에 사용한 중금속의 종류는 Cd, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, As 7종임
- 중금속에 대한 생물학적 처리 중 하나는 미생물에 의해 흡착되는 성질을 이용하여 금속 이나 금속화합물이 변형되거나 고형화 또는 무독화되는 것임. 생물흡착 과정은 음이온으로 하전된 미생물의 표면 특성을 이용하여 미생물을 흡착공정의 흡착제로 사용 가능한 방법으로서 다당류, 단백질 및 지방질로 구성된 미생물 세포벽의 음전하 작용기(카르복실기, 인산기, 수산기 등)가 용해상태에서 양전하를 띠는 중금속을 흡착할 수 있음



[그림 II-나-1] 미생물의 생체 흡착 및 생체 축적에 의한 중금속 제거

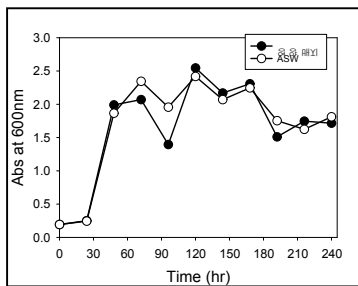
- Cd, Cu, Zn, Pb, Ni 은 용해상태에서 양이온인 중금속으로 미생물의 생체 흡착 및 생체 축적에 의한 안정화가 가능함
- As, Cr 등의 몇 가지 금속은 용해된 상태에서 산소와 결합한 음이온을 형성하여 최종적으로 음전하를 띠거나 전하를 띠지 않으므로 정전기적 결합을 통한 제거가 어려우며, 물리적 방법으로도 제거효율이 매우 낮음
- Cr은 자연계에서 낮은 농도로도 생물체에 암, 돌연변이, 태아기형 등을 유발하기 때문에 대표적인 환경오염 물질로 지정됨
- Cr은 전이금속의 형태로 -2가에서 +6가까지 다양한 형태가 있지만 그 중에서 +3가와 +6가가 가장 안정한 형태이기 때문에 자연계에서 대부분을 차지함
- Cr(IV)는 물에 대한 용해성이 크고, 독성을 나타내고 있으며 강력한 산화제이기 때문에 암을 특히 유발할 수 있으며, 이에 반하여 Cr(III)는 독성과 이동도가 낮고 주로 중성의 pH에서 불용성 산화물의 형태인 침전물로 존재함. 따라서 중성의 pH에서 Cr(III)는 침전물을 형성하므로 바닷물 용액 속으로 유입이 어렵기 때문에 Cr(VI)를 Cr(III)으로 환원시켜 제거하는 방법을 이용할 수 있음
- As는 금속이 갖는 성질과 비금속이 갖는 성질을 동시에 갖고 있는 준중금속으로서, 토양, 물, 공기, 암석 등에서 널리 분포하고 있음
- As는 -3, 0, +3, +5 등 4개의 원자가 상태로 존재할 수 있는데 일반적으로 환원 상태 하에서는 3가 As [arsenite; As(III)]가, 산화된 공기 중에서는 5가 As [arsenate; As(V)]가 안정된 형태임
- 3가 As가 5가 As에 비해 용해도 및 이동도가 높다고 알려져 있으며, 5가 비소의 이동도가 낮은 이유는 이들이 지중에 다량 존재하는 철, 망간, 알루미늄 산화물에 흡착되거나 공침됨으로써 토양이나 퇴적물 입자에 의해 상대적으로 용이하게 고정되어 있기 때문임



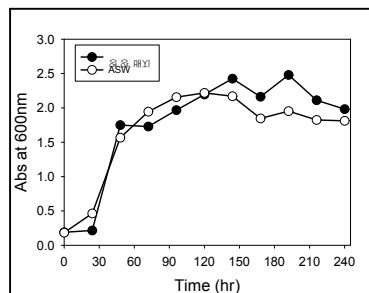
[그림 II-나-2] 산화·환원을 이용한 중금속 안정화

① 생물소재별 중금속 안정화

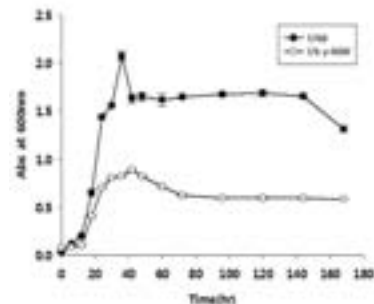
- 3종의 생물소재를 이용하여 양이온성 중금속과 비양이온성 중금속에 대한 안정화 효과를 서로 비교하였다. 이를 토대로 가장 중금속 제거효율이 우수한 생물소재를 이용하여 여러 가지 조건하에서 중금속 제거에 대한 실험을 실시하였으며, 미생물 담체를 제조하는데 사용하였음
- 본 연구에서 사용한 생물소재는 *enterobacter cloacae* (KCTC 1685)와 *enterobacter cloacae subsp. cloacae* (KCTC 2361), 그리고 *Desulfovibrio desulfuricans* (KCTC 5768)를 선정하였음
- 해양 오염 퇴적물의 환경과 비슷한 인공바닷물을 제조하여 미생물의 권장 영양배지와 인공바닷물에서의 성장곡선을 얻었으며, 이 후 중금속 안정화 실험을 진행하였음
- 상호 비교를 위하여 초기 중금속의 농도는 50ppm을 기준으로 실험을 진행하였으며, 중금속 안정화 정도는 초기 중금속 농도에서 안정화 과정을 거친 후 용액 상에 존재하는 중금속을 ICP-MS를 이용하여 분석한 후 반응 전후의 농도의 차이를 토대로 계산하였음



<Enterobacter cloacae (KCTC 1685)>



<Enterobacter cloacae subsp. cloacae (KCTC 2361)>

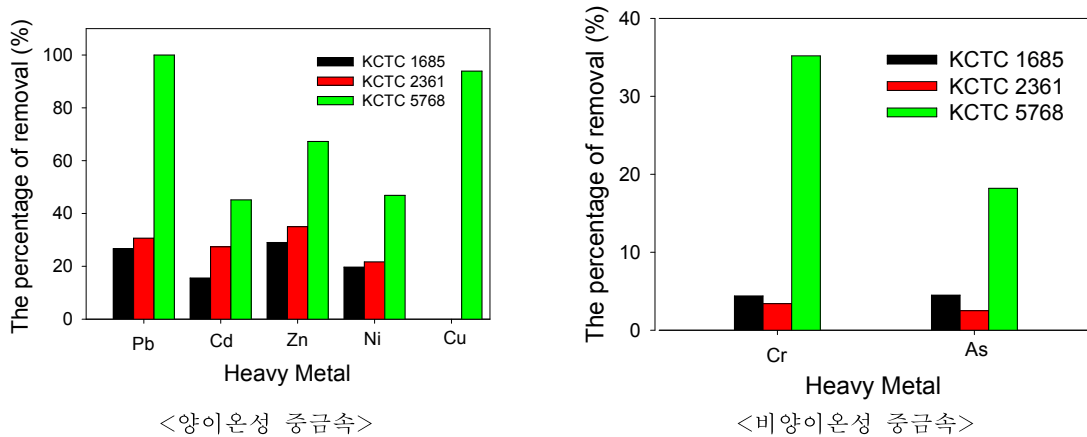


<Desulfovibrio desulfuricans (KCTC 5768)>

[그림 II-나-3] 미생물 성장곡선

- 아래의 그림 II-나-4는 본 연구에서 선정한 3종의 생물소재에 의한 양이온성 중금속인 Pb, Cd, Zn, Ni, Cu에 대한 제거효율을 비교한 그림임

- Cu의 경우 KCTC 1685와 KCTC 2361에 대해서 분석하지 못했음
- 중금속 제거를 위하여 중금속과 함께 미생물 배양시간은 4일 기준임. *Desulfovibrio desulfuricans* (KCTC 5768)의 경우 sulfate의 용액 내 함량은 0.3% w/w임
- 본 연구에서 제거대상으로 선정된 양이온성 중금속인 Pb, Cd, Zn, Ni, Cu 모두에 대해서 *Enterobacter cloacae* (KCTC 1685, KCTC 2361) 보다 *Desulfovibrio desulfuricans* (KCTC 5768)의 경우가 중금속의 종류에 따라 다르지만 약 0.5배 ~ 4배 중금속 제거효율이 높은 것으로 분석됨
- 본 연구에서 제거대상으로 선정된 양이온성 중금속인 Cr, As 모두에 대해서 *Enterobacter cloacae* (KCTC 1685, KCTC 2361) 보다 *Desulfovibrio desulfuricans* (KCTC 5768)의 경우가 Cr에 대해서는 약 10배 정도, As에 대해서는 약 4배 이상의 중금속 제거효율이 높은 것으로 분석됨



[그림 II-나-4] 생물소재에 의한 중금속 제거효율 비교

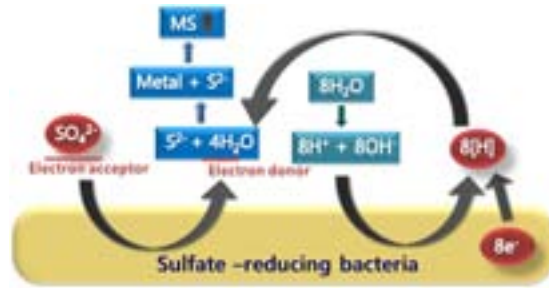
- 위의 분석결과를 토대로 해양오염 퇴적물의 생물학적 피복정화공정에 사용될 생물소재로 *Desulfovibrio desulfuricans* (KCTC 5768)을 선정하고 이를 이용한 여러 가지 실험을 진행하기로 결정함

## ② 황환원균 *Desulfovibrio desulfuricans*에 의한 중금속 안정화 메커니즘 분석

### ㉠ 생물흡착에 의한 중금속 제거

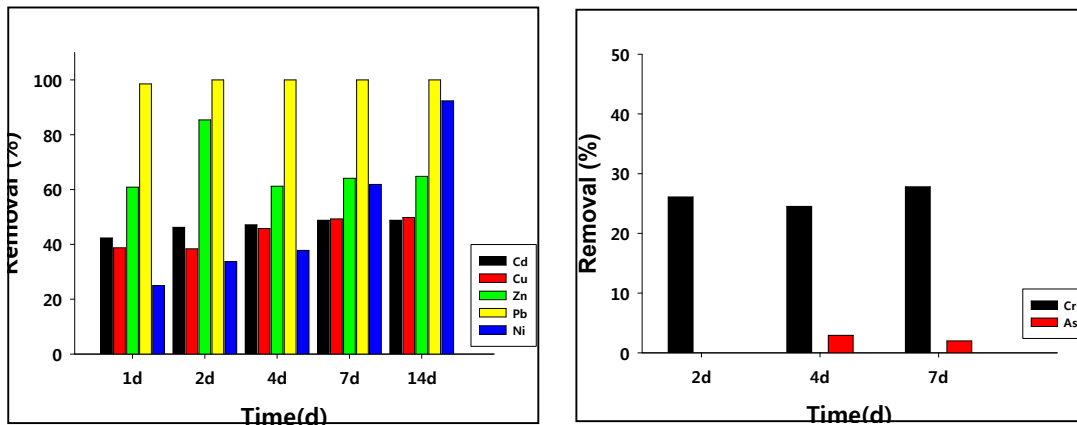
- *Desulfovibrio desulfuricans*는 황환원균 (Sulfate Reducing Bacteria, SRB)의 한 종류로 SRB에 의해서 sulfate ( $SO_4^{2-}$ )는 sulfide( $S^{2-}$ )로 환원되고 그 sulfide에 의해서 금속이 환원되어 비용해성 metal sulfide를 생성하여 침전시켜서 제거되거나 독성이 경감됨
- 이와 동시에 *Desulfovibrio desulfuricans*는 생물흡착 과정을 거쳐 용액내의 중금속 안정화시키기도 함





[그림 II-나-5] SRB(Sulfate reducing bacteria)의 중금속 안정화 메커니즘

- 일차적으로 SRB의 생물흡착 과정에 의한 용액 내 중금속 안정화 정도를 알아보기 위해서 용액 내 sulfate가 없는 상태에서 시간에 따른 중금속 제거효율을 검사하였음
- 모든 실험은 인공바닷물 환경에서 진행하였으며, 초기 농도는 50ppm임



[그림 II-나-6] *Desulfovibrio desulfuricans*의 이온성과 비양이온성 중금속의 제거량

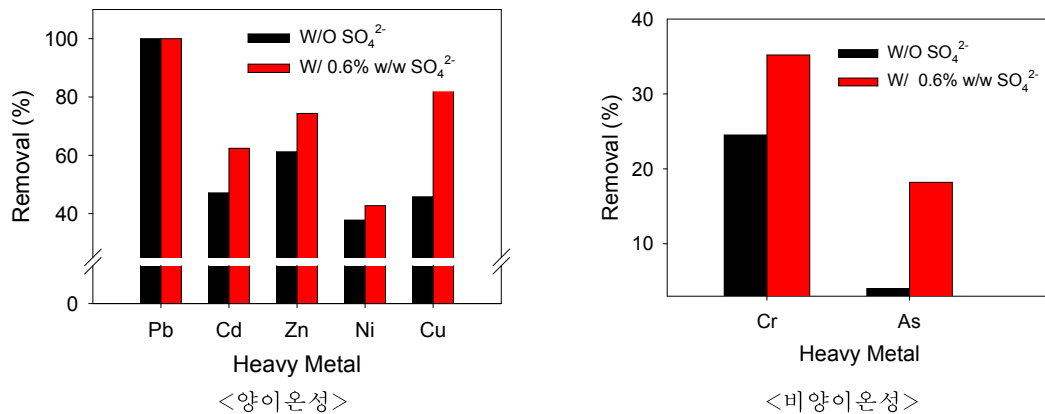
- *Desulfovibrio desulfuricans*에 의해서 양이온성 중금속 중 Cd와 Cu의 경우는 40% 정도가 생물흡착에 의해서 제거됨. Zn의 경우는 약 60% 이상이 생물흡착에 의해서 제거되며, Ni의 경우는 시간이 지남에 따라 생물흡착에 의해서 제거되는 정도가 증가하다가 14일이 지남에 따라 약 90%이상이 제거되며, Pb의 경우는 초기에 거의 100%가 제거되는 매우 우수한 중금속 제거효율을 보임
- 비양이온성 중금속인 Cr의 경우 대략 25%정도의 제거되는 효율을 보이며 As의 경우는 거의 제거되지 않는 현상을 보임. 이는 비양이온성 금속은 양이온성 금속에 비해 생물흡착이 중금속 제거의 주요 메커니즘이 아니라는 증거임

#### ㊦ 금속 환원에 의한 중금속 안정화

- $SO_4^{2-}$ 의 유무에 따른 중금속 제거효율 비교함으로써 황환원균의 생물흡착과 동시에 금속 환원에 의한 중금속 제거 메커니즘을 분석함. 모든 중금속의 초기농도는 50ppm임. 중금속 제거를 위한 시간은 4일 기준임
- Pb와 Ni의 경우 생물흡착에 의해서 대부분이 제거되는 양상을 보임. 또한 Cd와 Zn의 경우는 대부분은 생물흡착에 의해서 제거되며 다소 소량의 금속이 환원에 의해서 제거됨.

그러나 Cu의 경우는 생물흡착과 금속환원 두가지 메카니즘에 의해서 제거되는 양상을 보임

- Cr의 경우는 생물흡착과 금속 환원에 의해서 제거되는 양상을 보이고 있으나 As의 경우는 생물흡착이 아닌 대부분이 금속 환원에 의해서 제거되는 양상을 보이고 있음
- 이 중에서 Cr을 대상으로 용액 내 존재하는 금속의 이온가를 분석하여 전체 50ppm의 +6가의 Cr의 제거되는 양상을 비교 분석하여 보았음



[그림 II-나-7] *Desulfovibrio desulfuricans*의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 유무에 따른 중금속의 제거

- 결론적으로 50ppm 농도의 Cr<sup>6+</sup>은 황환원균인 *Desulfovibrio desulfuricans*에 의해서 97% 이상이 제거되며, 이 중에서 25% 정도는 생물흡착에 의해서 제거되고 11% 정도는 환원에 의한 침전으로 제거되며 마지막으로 약 60% 정도는 황환원균에 의해서 환원되어 용액 내 Cr<sup>3+</sup>로 존재하여 Cr에 대한 중금속 독성이 안정화된다고 사료됨



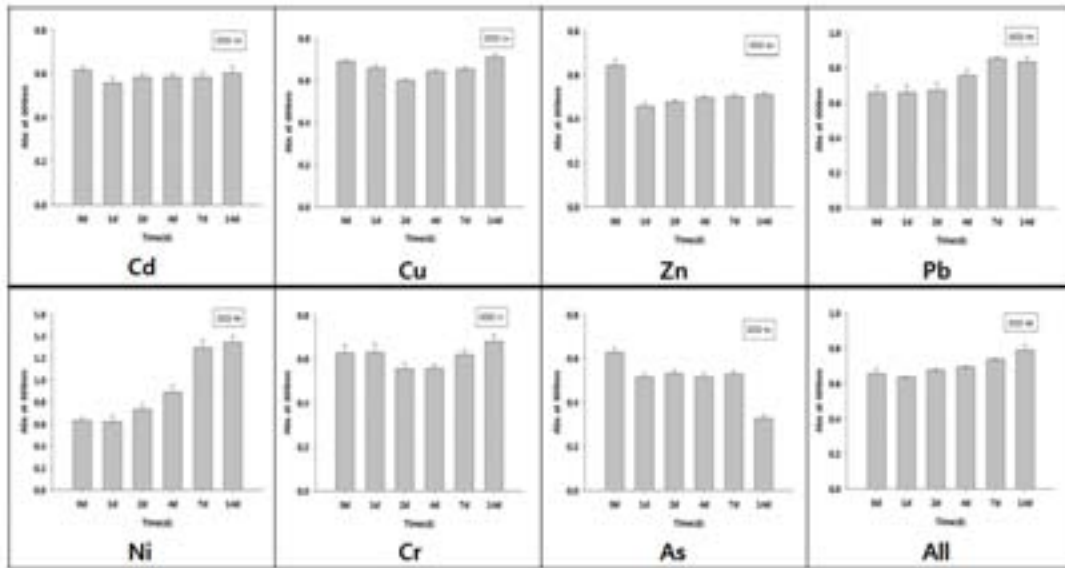
[그림 II-나-8] 황환원균에 의한 Cr<sup>6+</sup>의 제거 양상

### ③ 황환원균 *Desulfovibrio desulfuricans*의 중금속 안정화 특성 분석

#### ㉞ *Desulfovibrio desulfuricans*의 중금속에 대한 내성 평가

- 중금속에 대한 미생물의 내성을 알아보기 위해 50ppm의 중금속 농도에서 배양하여 UV-spectrometer를 이용하여 600nm에서 측정함
- 대부분의 중금속에 대하여 OD값이 초기와 비슷하게 유지되는 것으로 보아 내성이 있는

것으로 사료되며 이는 향후 해양오염 퇴적물 내 중금속 처리를 위한 균주로 사용가능함으로 나타냄



[그림 II-나-9] *Desulfovibrio desulfuricans* 의 중금속에 대한 내성

㉔ 중금속 농도에 따른 제거율

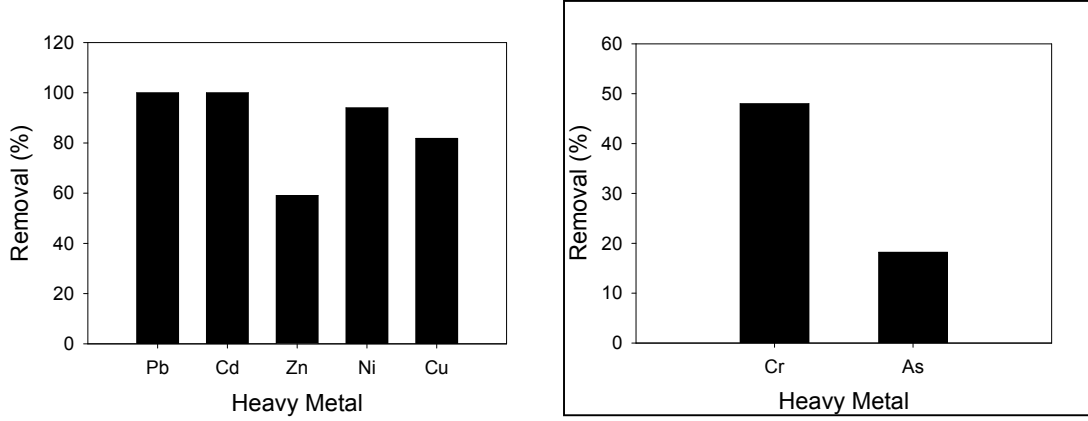
- 본 연구와 관련하여 오염 퇴적물의 허용 범위 기준을 알아보고 이에 따라 실제 해안 연안의 기준 중금속 농도를 토대로 실험을 실시함

[표 II-나-1] 해양퇴적물 중금속 허용 범위

중금속	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As
기준 (ppm)	23-52	24-108	200-410	0.68-4.21	50-220	80-370	9-41.6

- Pb의 경우 중금속 허용범위의 상한선인 200ppm에 대해서 약 100%에 가까운 처리효율을 보이고 있음. Cd의 경우 중금속 허용범위의 상한선인 5ppm에 대해서 약 100%에 가까운 처리효율을 보이고 있으며, 그 10배에 해당하는 50ppm에 대해서는 약 60%정도의 처리효율을 보이고 있음. Zn의 경우 중금속 허용범위의 상한선인 400ppm에 대해서 약 60%정도의 처리효율을 보이고 있음. 또한 Ni의 경우 중금속 허용범위의 상한선인 50ppm에 대해서 약 90%이상의 처리효율을 보이고 있음. 그러나 Ni의 경우는 중금속 처리시간이 점차적으로 증가됨에 따라 이러한 현상이 나타나며 초기 4일에는 40%정도, 1주일에는 60%정도 그리고 14일에 약 90%를 훨씬 상회하는 처리효율을 나타냄. Cu의 경우는 중금속 허용범위의 상한선인 100ppm에 대해서 약 80% 정도의 처리효율을 보이고 있음
- Cr의 경우 중금속 허용범위의 상한선인 400ppm에 대해서 약 50%에 가까운 처리효율을 보이고 있음. 이는 생물흡착과 금속환원에 의한 침전에 따른 결과임. 다량의 환원된 Cr이온은 +3가의 형태로 용액 내에 존재하고 있음. 이를 모두 포함하여 약 90%이상의 처리효

율을 보일 것으로 예상됨. As의 경우 중금속 허용범위의 상한선인 50ppm에 대해서 약 20%에 가까운 처리효율을 보이고 있으며, 이는 생물흡착 과정이 아니라 금속환원의 과정에 따른 침전을 통해 제거되는 형태임



<양이온성>

<비양이온성>

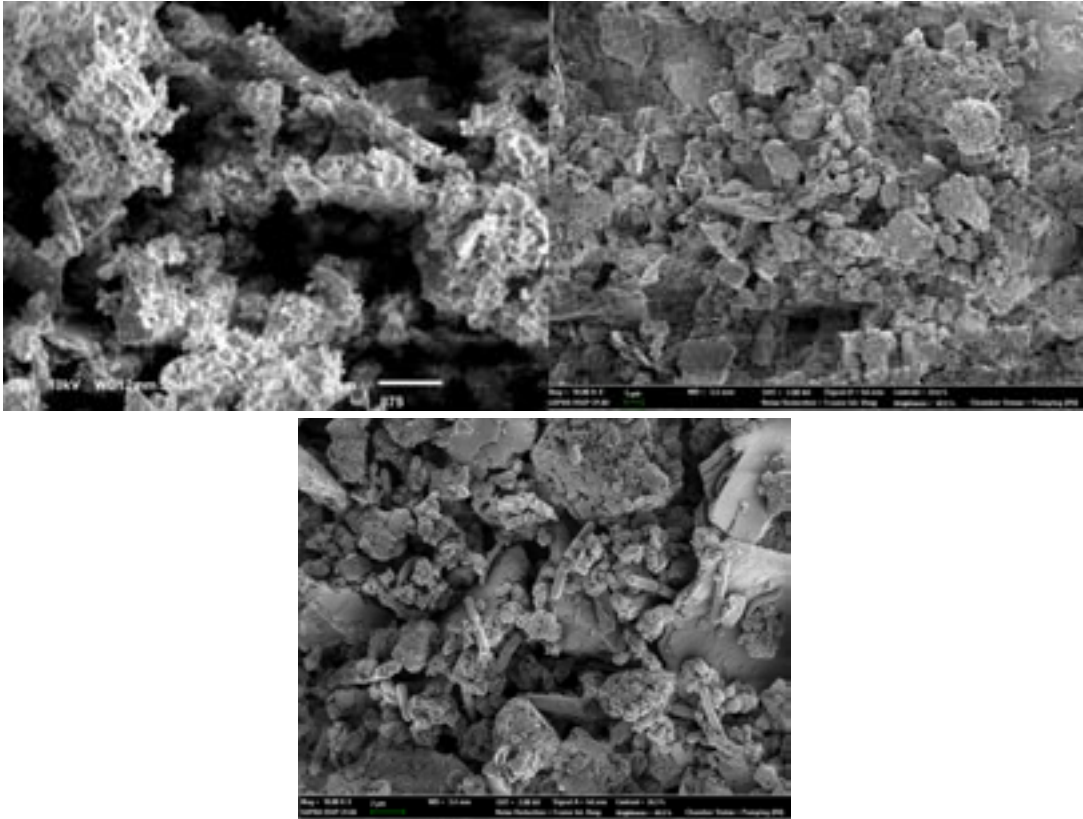
Pb: 200ppm, Cd: 5ppm, Zn: 400ppm, N : 50ppm, Cu: 100ppm, Cr: 400ppm, As: 50ppm

[그림 II-나-10] 다양한 중금속 허용 범위 기준 농도에서의 제거율

## (2) 해양오염 퇴적물 생물학적 정화를 위한 미생물 담체 확보

### (가) 미생물 담체 확보 및 제작

- 해양미생물만을 이용하여 해양 오염퇴적물에 존재하는 중금속을 제거하기에는 현장 적용 시 여러 가지 어려움이 있음
- 해양 미생물을 현장에 직접 투입하기 어려운 점을 해결하기 위하여 미생물을 담체에 고정화시켜 현장에 적용할 수 있는 방법을 모색함
- 해양오염 퇴적물의 생물학적 정화를 위한 미생물 담체로서 천연 광물과 산업부산물 중 중금속 제거 효능이 있는 산업부산물인 순환골재를 확보함
- 이는 주관기관인 환경대학교 실험결과를 토대로 선정된 것임
- 순환골재의 경우 건설 폐기물이나 주변에 흔히 존재하는 물질이며 많은 비용이 들지 않고 폐기물을 재활용할 수 있다는 점에서 많은 장점이 있는 물질임
- 여러 가지 중금속 제거에 좋은 효율을 보이고 있는 것으로 나타나는 순환 골재를 담체로 이용하여 해양미생물을 고정화 시킨 후 현장에 적용할 경우 중금속 제거에 더 큰 시너지 효과를 나타낼 것이라고 생각됨
- 미생물 담체의 중금속 제거능을 알아보기 위하여 담체와 미생물을 24시간 같이 배양하여 사용함



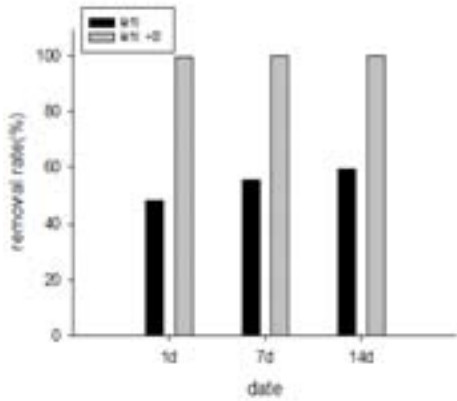
[그림 II-나-11] 순환골재의 표면 및 미생물이 고정화된 순환골재 표면 SEM 이미지

① 미생물 담체를 이용한 중금속 안정화

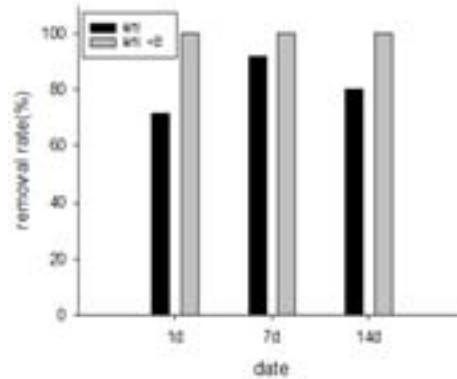
- 미생물 담체를 이용한 중금속 안정화 평가에는 위에서 평가한 양이온성 중금속 5종과 비양이온성 중금속 2종을 대상으로 실시하였음
- 중금속으로 농도는 50ppm으로 하였음
- 담체만을 이용한 경우와 미생물이 고정화된 미생물 담체를 이용한 경우를 반응시간에 따라 비교하여 평가하였음
- Cd의 경우 담체만 이용한 경우와 미생물 담체를 이용한 경우 중금속 제거율은 미생물 담체를 이용한 경우 100%의 Cd이 제거되는 반면 담체만 들어간 배지에서는 14일이 지난 후에 약 60%가량의 Cd가 제거되는 양상을 보임. 이는 담체에 의한 물리적인 흡착과 생물소재에 의한 생물흡착 및 금속환원에 의한 시너지 효과로 보임
- Cu의 경우 담체만 이용한 경우와 미생물 담체를 이용한 경우 중금속 제거율은 미생물 담체를 이용한 경우 100%의 Cu가 제거되고 담체만 들어갔을 경우는 약 80%의 Cu가 제거되었으며 이는 위의 Cd과 같은 원리로 사료됨
- Zn의 경우 담체만 이용한 경우와 미생물 담체를 이용한 경우 중금속 제거율은 미생물 담체를 이용한 경우 100%에 가깝게 Zn가 제거되고 담체만 들어갔을 경우는 약 50%의 Zn가 제거되었으며 이는 위의 Cd와 같은 원리로 사료됨
- Pb의 경우 담체만 이용한 경우와 미생물 담체를 이용한 경우 중금속 제거율은 미생물 담체를 이용한 경우 100%에 가깝게 Pb가 제거되고 담체만 들어갔을 경우에도 미생물 담체의 경우에 비해 다소 부족하지만 역시 거의 100%에 가깝게 Pb가 제거되었음. Pb의 경우

에는 50ppm의 농도의 경우 담체만의 물리적 흡착에 의해서 중금속이 충분히 제거될 수 있음을 나타냄

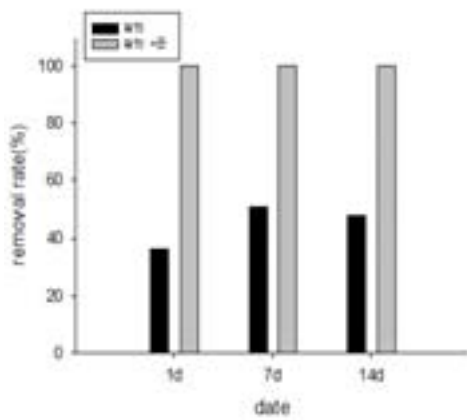
- Ni의 경우 담체만 이용한 경우와 미생물 담체를 이용한 경우 중금속 제거율은 미생물 담체를 이용한 경우 90%를 훨씬 상회하는 제거율을 보였으며, 담체만 들어갔을 경우는 약 20%의 Ni가 제거되었으며 이는 담체의 물리적 흡착과 미생물의 생물학적 처리의 시너지 효과가 매우 극명하게 나타난 결과로 사료됨



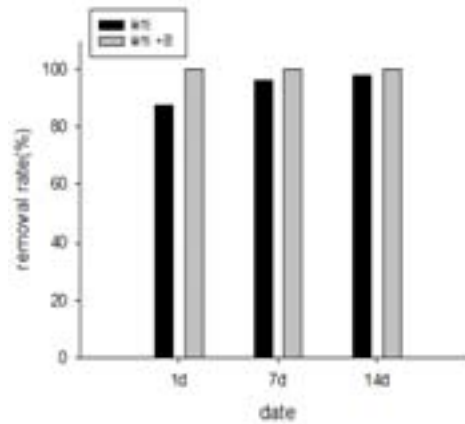
<Cd>



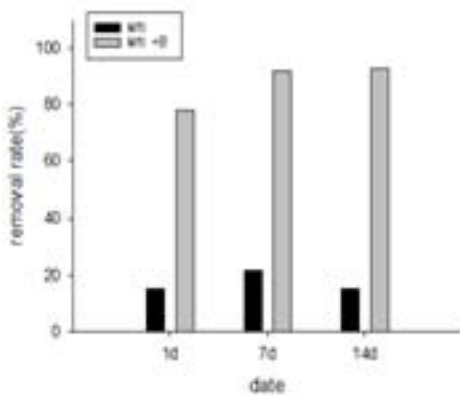
<Cu>



<Zn>



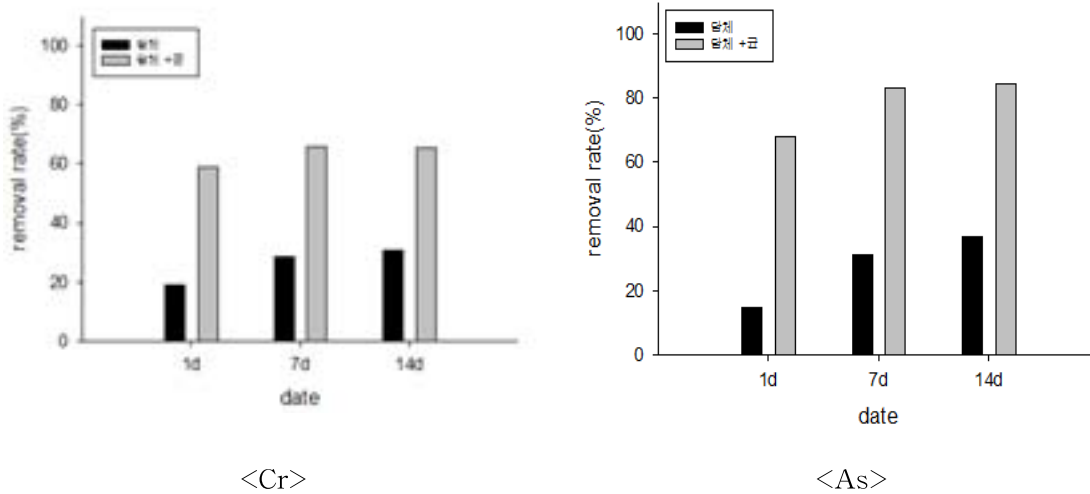
<Pb>



<Ni>

[그림 II-나-12. 담체와 미생물 담체를 이용한 양이온성 제거율 비교]

- 비양이온성 금속인 Cr의 경우 담체만 이용한 경우와 미생물 담체를 이용한 경우에서의 중금속 제거율은 미생물 담체를 이용한 경우 약 60%를 상회하는 제거율을 보였으며, 담체만을 이용한 경우 대략 30%정도의 제거율을 보였음. 이는 담체의 물리적 흡착과 생물 흡착에 의해서 +6가의 Cr이 제거되고 이와 동시에 황환원균의 금속환원에 의해서 +6가의 Cr이 +3가의 Cr으로 환원되어 침전됨으로 제거되었을 것으로 분석됨. 여기에는 용액 내의 +3가의 형태로 존재하는 Cr의 양은 포함시키지 않은 결과임. 만약에 이를 포함시킨다면 거의 100%에 가까운 +6가의 Cr 제거율을 보일 것으로 사료되며 이에 대한 연구를 진행할 것임
- 비양이온성 금속인 As의 경우 담체만 이용한 경우와 미생물 담체를 이용한 경우에서의 중금속 제거율은 미생물 담체를 이용한 경우 약 85%가량의 As가 제거되고 담체만 이용한 경우 약 40%에 다소 못 미치는 제거율을 보였음. 이는 물리적 방식과 생물학적 방식을 혼합하여 사용하였을 때 나타나는 시너지효과를 가장 극명하게 보여주는 결과로 사료됨



[그림 II-나-13] 담체와 미생물 담체를 이용한 비양이온성 제거율 비교

### (3) 연안저질에 존재하는 자생미생물(황산염환원균 등)의 활성 연구

#### (가) 해양저질 조사 및 오염물질 특성평가

- 해양저질 샘플링은 J항(35°01.442N, 128°39.622E), S항(매립지) 및 B항 등 3곳에서 채취하였으며, 채취한 해양저질 샘플은 실험실로 이동 후 건조하여 물리화학적 특성을 분석
- 모든 분석항목은 3회 반복 실험하여 평균값을 이용하였음.

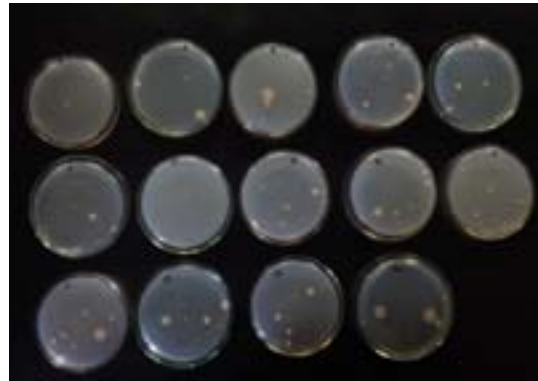


[그림 II-나-14] 해양저질조사를 위한 샘플링

- 입도분석은 건식 체질법으로 분석하였으며, 미생물 균집분석은 희석평판계수법을 이용하여 개체수를 계상함(CFU/g of sediment)



[그림 II-나-15] 해양저질 샘플의 입도분석



[그림 II-나-16] 해양저질 샘플의 미생물 균집분석

- 해양저질 샘플의 함수율과 유기물 함량은 Standard Methods(APHA)에 따라 분석하였고, COD는 해양환경공정시험기준에 따라 분석 함



[그림 II-나-17] 해양저질 샘플의 COD 분석

- 총질소(TN), 총인(TP), 질산염, 인산염, 황산염 및 pH는 Standard methods에 의해 분석 함
- Cd, Cu, Cr, Pb, Zn 등의 중금속은 Standard methods에 의해 총량분석방법(nitric acid & perchloric acid digestion)과 단계추출법으로 전처리한 후 ICP를 이용하여 분석함

**(나) 희분식 실험을 통한 자생미생물의 활성화에 미치는 영향인자(온도, 유기물 등) 연구**

- 해양저질 샘플의 자생미생물의 활성도를 평가하기 위하여 J항 저질을 이용하여 질산염, 황산염, 아세테이트를 주입하여 겨울철 온도조건인 5°C와 여름철 온도조건인 15°C에서 적응 시킴
- 각 조건에 따라 준비 된 실험대상 해양저질은 각각 5°C와 15°C에서 30일 동안 150rpm에서 진탕 배양하였으며, 7일, 15일, 22일, 30일 마다 샘플링 한 후 미생물 균집변화와 유기물 함량을 분석 함



(다) 자생미생물의 활성화에 대한 전자수용체 및 영양염(황산염, 질산염, 아세테이트 등)등의 영향 연구

- 아세테이트는 쉽게 이용 가능한 탄소원으로써 전자공여체로서 이용하였고, 질산염 및 황산염은 전자수용체로서 이용하였음
- 아래 표와 같이 해양저질 100g에 아세테이트(0,5mM), 황산염(0,5,10mM), 질산염(0,5, 10mM)와 해수 100 ml를 첨가한 후 N<sub>2</sub>가스로 폭기 시켜 혐기성조건을 형성하여 실험

[표 II-나-2] 해양저질샘플의 자생미생물 활성화도 실험 조건

Treatments	Treatment description	Amendment concentration (mM)
Control (c)	Unamended control	-
Acetate (A)	Acetate only	5
5S	Sulfate only	5
5S+A	Sulfate+acetate	5+5
10S	Sulfate only	10
10S+A	Sulfate+acetate	10+5
5N	Nitrate only	5
5N+A	Nitrate+acetate	5+5
10N	Nitrate only	10
10N+A	Nitrate+acetate	10+5
5S+5N	Sulfate+Nitrate	5+5
5S+5N+A	Sulfate+Nitrate+acetate	5+5+5
10S+5N+A	Sulfate+Nitrate+acetate	10+5+5
5S+10N+A	Sulfate+Nitrate+acetate	5+10+5

- 각 조건에 따라 준비 된 실험대상 해양저질은 각각 5°C와 15°C에서 30일 동안 150rpm에서 진탕배양 하여 7, 15, 22, 30일 마다 샘플링 한 후 미생물 군집변화와 유기물 함량을 분석 함
- 모든 실험은 3회 반복 실험하였으며, 아세테이트, 황산염, 질산염을 제외한 대조군 실험도 수행 함



[그림 II-나-18] 해양저질샘플의 자생미생물의 활성화 실험

(4) 생물활성촉진제의 조성 및 제법연구

(가) 해양저질을 이용한 생물활성촉진제(셀룰로스 아세테이트 코팅 생물활성촉

**진분: CA, 폴리설펜 코팅 생물활성촉진분: PS)**

- 회분식 실험 결과에 따라 자생미생물의 활성을 향상시키기 위한 생물활성촉진 물질은 황산염 0.5M, 질산염 1M, 아세테이트 0.5M을 첨가함
- 생물활성촉진제제를 제작하기 위하여 오염물질이 제거 된 해양저질 1kg에 생물활성촉진 물질(황산염 0.5M , 질산염 1M, 아세테이트 0.5M) 완전히 섞은 후 실온에서 48h 건조 후 불형태로 성형하였고, 성형된 생물활성촉진분의 무게는 약 1g 이며, 직경은 1 - 1.5 cm임
- 불형태로 제작한 생물활성촉진제제는 60°C에서 48 h 동안 건조 후 I)셀룰로스 아세테이트(15wt%)와 아세톤(85wt%), II)폴리설펜(10wt%)과 N,N dimethyl acetamide(90wt%) 이상 2가지 폴리머로 코팅 함
- 생물활성촉진제제의 폴리머 코팅은 두배 코팅하여 준비 하였으며, 코팅 후 50°C 건조 후 저장



<코팅X>



<폴리설펜(PS) 코팅>



<셀룰로스 아세테이트(CA) 코팅>

[그림 II-나-19] 불형태로 제작한 생물활성촉진제

**(나) 입상 활성탄을 이용한 생물활성촉진제제(생물활성촉진물질을 담지한 활성탄: GAC)**

- 상업적으로 이용가능한 입상활성탄을 1mm 체에 걸러서 1mm이상 되는 입경의 활성탄을 이용 함
- 체거름한 입상활성탄에 생물활성촉진제(0.5M sulfate, 1M nitrate, 0.5M acetate)를 섞어 혐기성상태에서 회전농축기를 이용하여 100°C에서 24h 반응시킴
- 생물활성촉진제와 반응시킨 입상활성탄은 60°C에서 48 h동안 건조시켜 준비 함



[그림 II-나-20] 생물활성촉진물질을 담지한 활성탄; GAC

#### (다) 생물활성촉진제의 형태 연구(SEM Analysis)

- 폴리머 코팅이 된 CA(셀룰로스 아세테이트 코팅 생물활성촉진분)와 PS(폴리설펜 코팅 생물활성촉진분) 및 GAC(생물활성물질을 담지한 활성탄)의 형태적 특성을 평가하기 위하여 SEM(scanning electron microscope) 분석
- SEM 이미지를 통해 폴리머 코팅표면, 코팅 층의 두께 및 공극 등의 물리적 특성과 GAC의 생물활성촉진물질 처리 전과 처리 후의 형태적 특성과 생물활성촉진물질의 담지 여부 분석

#### (라) 생물활성촉진제의 용출특성에 대한 회분식 실험

- 생물활성촉진제제의 황산염과 질산염의 용출특성을 평가하기 위하여 실온에서 교반 및 무교반조건 2가지 조건에서 용출실험 함
- 생물활성촉진분과 생물활성물질을 담지한 활성탄의 용출실험을 각각 증류수와 해수조건에서 수행 함
- 무교반 조건실험은 생물활성촉진분 3g 또는 생물활성물질을 담지한 활성탄 1g과 증류수 또는 해수 100mL를 각각 첨가하여 실온에서 생물활성촉진물질의 용출특성 평가
- 교반 조건실험은 무교반 조건실험과 같은 방법으로 준비하여 물리적 교반을 150rpm 으로 5일간 수행 함
- 용출실험동안 각각의 실험조건들의 샘플을 24 h 마다 채취하여 질산염 및 황산염을 분석 함
- 모든 실험은 혐기성 조건에서 수행하였으며, 수중의 생물활성촉진물질의 실험전과 후의 농도를 측정하여 용출정도를 평가 함

#### (5) 생물활성촉진제의 효능검증 (유기물분해, 중금속 고정 등)

##### (가) 실험실 규모의 칼럼 실험

- 생물활성촉진분의 용출특성을 평가하기 위하여 직경 10cm, 높이 1m의 아크릴 재질로 준비한 실린더형 칼럼을 이용하여 실험

- 칼럼 바닥에는 15cm의 해양오염저질을 채우고, 생물활성촉진불을 첨가하지 않은 칼럼과 3가지의 생물활성촉진불(셀룰로스 아세테이트 코팅, polysulfone 코팅, 노코팅) 30g을 오염저질에 첨가한 칼럼을 각각 준비 함
- 준비한 4가지의 칼럼에 2 L의 해수를 첨가하고, 난류를 발생시키기 위하여 에어브로어로 5ml/min 의 유속으로 불어 줌
- 해수 시료샘플은 24 h 마다 채취하였으며, 해양오염저질은 15일 마다 채취하여 질산염 및 황산염을 분석 하여 용출특성을 평가 함
- 모든 칼럼실험은 실온에서 평가 함



[그림 II-나-21] 실험실 규모의 컬럼 실험

(나) 생물활성촉진불을 이용한 현장 실험

- 현장 칼럼실험을 위한 실험조건은 상기한 실험실 규모의 칼럼실험과 동일하며, ①바탕시험(오염저질)②③④⑤오염저질에 polysulfone 코팅 생물활성촉진불(30g), ⑥⑦⑧⑨오염저질에 셀룰로스 아세테이트 코팅 생물활성촉진불(30g)을 각각 첨가하여 15cm 의 오염저질 층이 담긴 총 9개의 칼럼을 준비 함



① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨



[그림 II-나-22] 생물활성촉진불을 이용한 현장칼럼실험

- 준비된 9개의 칼럼을 스테인레스 트레이에 고정하여 인근 해안에 침지시켰으며, 2개월동안 실험을 수행하였고, 15일마다 칼럼을 꺼내어 오염저질의 N, P, S, 유기물 함량 및 분포, 중금속 함량 및 분포, 미생물군집 등을 분석하여 생물활성촉진분의 기능을 평가 함.

① 실험결과

㉞ 해양저질 조사 및 오염물질 특성평가

- 해양저질 샘플의 입도분포는 대부분 실트질과 점토질(J항: 85%, N항: 88%)로 구성 됨
- 유기물함량은 J항이 약 4.32 %, N항의 경우 약 3.67 %로 비슷하였으며, pH는 약 7.96 및 8.01으로 평가 됨
- 총질소와 총인은 S항이 J항에 비해 다소 높음
- COD는 J항이 약 15.6g/kg로 S항의 약 11.6g/kg보다 다소 높음
- 중금속 함량(Cu, Cr, Zn, Pb, Cd, Fe)은 총량분석방법으로 분석 하였을 때, 미국해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA) 기준과 비교 시 오염기준치 이하로 평가 됨.
- Cu, Cr, Pb 및 Fe은 J항이 N항에 비해 다소 높음
- 중금속 함량(Cu, Cr, Zn, Pb, Cd)을 단계추출법으로 분석하였을 때에는 모든 중금속 항목에 있어서 검출되지 않았음

[표 II-나-3] 해양저질샘플의 물리화학적 특성

Parameters	J port	N Port
Sand (%)	14.8	12.1
Silt & clay(%)	85.2	87.9
pH (at 25°C)	7.96	8.01
COD <sub>Mn</sub> g/kg	15.6	11.6
TKN g/kg	1.367	1.59
Available N g/kg	0.15	0.12
TP g/kg	0.94	1.08
Available P g/kg	0.03	0.08
Organic matter (%)	4.32	3.67
Water content (%)	51	42
Heavy metals (mg/kg)		
Cd	ND	ND
Cu	10.296	7.029
Cr	11.176	2.37
Pb	15.42	10.51
Zn	48.52	61.83
Fe	22763	20882
Microbial population colony forming Units (CFU)/ g	19±11 X10 <sup>4</sup>	22±14 X10 <sup>3</sup>

- ㉟ 회분식 실험을 통한 자생미생물의 활성화에 미치는 영향인자(온도, 유기물, 전자수용체 및 영양염 등) 연구

---

## ■ 미생물군집변화 평가

- 실험 초기 미생물의 군집은 약  $19.00 \pm 11 \times 10^4$  CFU/g 로 평가 됨
- 실험시작 30일 후, 15°C에서 시험 한 아세테이트만을 첨가한 실험군에서는 미생물 군집이 약  $4.67 \pm 2.25 \times 10^6$  CFU/g 로 나타났고, 바탕시험에서의 약  $7.67 \pm 4.7 \times 10^5$ CFU/g에 비해 미생물군집이 다소 높게 평가 됨
- 실험 조건 중 최상의 생물활성촉진물질의 농도는 5mM 아세테이트, 5mM 황산염과 10mM 질산염을 첨가하였을 때였으며, 실험시작 30일 후 15°C에서 미생물군집은 약  $14.5 \pm 5.7 \times 10^6$ CFU/g로 크게 증가 함
- 실험 온도 5°C에서의 미생물 군집변화는 15°C에서의 미생물 군집변화와 비슷하였으며, 실험시작 30일 후 바탕시험에서의 약  $8.33 \pm 3.5 \times 10^5$ CFU/g에 비해 생물활성촉진물질의 농도가 5mM 아세테이트, 5mM 황산염과 10mM 질산염을 첨가하였을 때 약  $8.67 \pm 2.5 \times 10^6$ CFU/g로 크게 증가 함
- 실험시작 후 7일, 15일, 22일 및 30일에서, 생물활성촉진물질을 한 가지 이상 첨가 하였을 때 첨가하지 않았을 때에 비해 미생물활성도가 모두 증가되었으며, 생물활성촉진물질을 3가지(아세테이트, 질산염, 황산염)모두를 첨가하였을 때 생물활성도가 가장 높게 평가 됨
- 질산염과 황산염을 첨가한 실험에서(15°C), 미생물 군집변화는 실험시작 7일 후를 제외한 15일, 22일, 30일에서 질산염을 첨가하였을 때 황산염을 첨가한 실험에 비해 다소 증가하였음. 그러나, 실험온도 5°C에서는 실험시작 7일과 15일에서 황산염을 첨가하였을 때 미생물 군집이 다소 높게 평가되었음
- 실험 온도 15°C와 5°C에서 생물활성물질을 5mM 황산염+10mM 질산염 +5mM 아세테이트를 첨가하였을 때 최대미생물군집이 각각  $14.5 \pm 5.7 \times 10^6$ CFU/g 과  $8.67 \pm 2.5 \times 10^6$ CFU/g 로 평가 됨
- 황산염과 질산염의 농도를 5mM에서 10mM로 증가하였을 때 미생물군집변화는 미비하였음
- 생물활성물질을 첨가하였을 때(5°C, 15°C) 미생물군집변화는 실험시작 22일, 30일후에서 바탕시험에 비해 약 2배에서 10배 증가 함
- 실험시작 22일 후에는 미생물군집변화율이 다소 낮음. 이는 생물활성물질이 충분치 못하거나 생물활성촉진물로부터 영양물질이 공급되지 못하였기 때문으로 사료 됨
- 전자공여체와 전자수용체는 해양저질내의 미생물 활성화에 있어서 중요한 인자로 평가 됨.
- 더욱이, 황산염을 첨가하였을 때 미생물군집(황산염환원박테리아; SRB)이 증가하였으며, 이는 SRB에 의해 환원된 황화물이 중금속과 결합하여 중금속 고정화를 향상시키는 결과를 가져올 수 있음
- 미생물활성에 있어서 온도는 매우 중요한 조건이지만 본 실험에서 5°C 및 15°C 온도변화에 따른 미생물활성은 다소 미비하였음

[표 II-나-4] 생물활성촉진물질 주입에 따른 자생미생물의 군집변화, 15℃

Treatments	Microbial population (CFU/g of sediment)			
	7 <sup>th</sup> day 1x10 <sup>4</sup>	15 <sup>th</sup> day 1x10 <sup>5</sup>	22 <sup>nd</sup> day 1x10 <sup>5</sup>	30 <sup>th</sup> day 1x10 <sup>6</sup>
Control	25.17 ± 4.3	3.50 ±1.3	21.67±7.6	7.67 ± 4.7 x 10 <sup>3</sup>
Acetate	30.33 ± 7.0	7.17 ±1	43.33 ± 30.1	4.67 ±2.25
5mM S	41.17 ± 5.8	11.67 ±3.6	33.33 ± 31.8	5.67 ± 1.5
5mM S +A	41.50 ±16.2	13.50 ±2.8	33.33 ± 22.5	6.67 ± 1.9
10mM S	41.67 ±4.7	8.83 ±4.5	45.00 ± 22.9	7.33 ± 3.8
10mM S +A	49.83 ±20.3	14.33 ±2.8	50.00 ± 18	7.17 ± 2.5
5mM N	36.67 ±4.8	15.17 ±6.4	45.00 ± 21.8	5.83 ± 2.4
5mM N+A	41.67 ±3.7	13.17 ± 3.3	35.00 ± 15	4.83 ± 4.8
10mM N	35.67 ±10.2	11.17 ±5.3	55.00 ± 49.2	8.17 ± 4.3
10mM N +A	37.33 ±10.3	14.67 ±6.2	55.00 ±31.2	8.67 ± 4.9
5mM S+ 5mM N	41.83 ±6.4	16.50 ±6.1	58.33 ± 23.6	9.50 ±4.3
5mM S+ 5mM N +A	52.50 ±20.5	17.83 ±11.7	61.67 ± 18.9	10.83 ± 4.6
10mMS +5mM N +A	61.83 ±25.8	17.17 ±6.2	63.33 ± 25.7	12.50 ± 4.7
5 mM S+10mM N+A	67.50 ± 6.6	19.00 ±6.4	73.33 ±24.6	14.50 ± 5.7

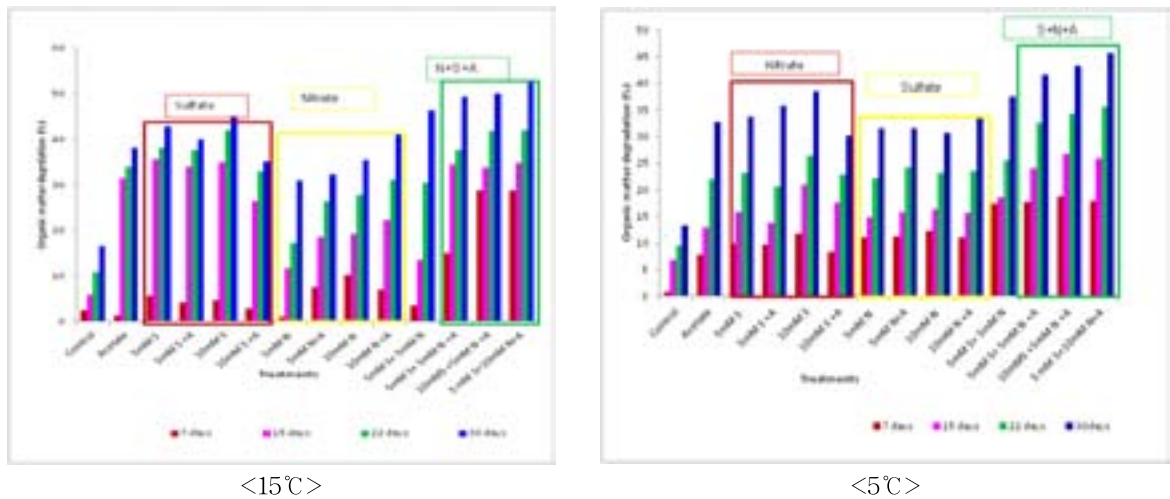
[표 II-나-5] 생물활성촉진물질 주입에 따른 자생미생물의 군집변화, 5℃

Treatments	Microbial population (CFU/g of sediment)			
	7 <sup>th</sup> day 1x10 <sup>4</sup>	15 <sup>th</sup> day 1x10 <sup>5</sup>	22 <sup>nd</sup> day 1x10 <sup>5</sup>	30 <sup>th</sup> day 1x10 <sup>6</sup>
Control	20.17 ± 4.1	41.00± 8.2 x10 <sup>4</sup>	6.67±4.5	8.33 ± 3.5x10 <sup>5</sup>
Acetate	25.83± 8.9	4.33± 2.5	14.00 ± 9.78	3.33 ± 1.32
5mM S	38.67±10.8	7.17±4.5	23.33 ± 13.16	3.67 ± 1.5
5mM S +A	43.00±5.6	8.83±1.7	23.67 ± 12.5	4.33 ± 1.5
10mM S	42.17± 8.5	9.83±2.0	25.00 ± 9.56	3.67 ± 3.8
10mM S +A	42.83± 11.4	11.33±2.4	30.33 ± 11.16	4.00 ± 1.5
5mM N	41.00± 15.1	5.67±1.3	25.67 ± 7.82	3.33 ± 1.3
5mM N+A	42.83± 10.8	8.83±2.3	25.00 ± 10.24	3.67 ± 2.6
10mM N	34.00± 11.3	6.17±3.2	20.33 ± 8.32	2.67 ± 2.0
10mM N +A	33.50± 8.3	9.50±2.5	30.67 ±11.2	4.67 ± 1.5
5mM S+ 5mM N	39.50±6.8	12.67±3.5	35.00 ± 17.2	6.33 ±2.6
5mM S+ 5mM N +A	47.67±4.1	14.50±4.9	41.67 ± 10.6	5.67 ± 1.4
10mMS +5mM N +A	49.83±8.8	14.33±3.3	45.33 ± 15.6	6.33 ± 2.3
5 mM S+10mM N+A	57.83±8.6	15.83±6.8	51.67 ± 21.25	8.67 ± 2.5

■ 유기물질 분해율 평가

- 유기물질은 해양저질 내 자생하는 미생물들에 대해 전자공여체로 작용 함. 유기물질의 종류는 다양하며, 복잡한 구조의 유기물질은 미생물이 쉽게 이용하지 못함
- 따라서, 쉽게 이용 가능한 탄소원(전자공여체)으로 아세트이트 5mM을 첨가하고, 황산염 및 질산염을 전자수용체로서 첨가하였음

- 유기물질 분해율은 온도변화 5℃에서 보다 15℃에서 크게 증가하였으며, 아세테이트, 황산염 및 질산염을 첨가하였을때 크게 증가하였음
- 실험 시작 후 시간이 증가할수록 유기물질 분해율은 점차적으로 증가 함
- 유기물질 분해율은 생물활성물질 아세테이트+질산염+황산염을 모두 첨가하였을 때 5℃ 및 15℃에서 바탕시험에 비해 크게 증가하였음
- 실험시작 30일 후 바탕시험에서 유기물분해율은 약 16% 였음
- 최대 유기물분해율은 실험시작 30일 후 배양온도 15℃, 배양조건 5S+10N+A, 10S+5N+A, 5S+5N+A에서 각각 약 52%, 50% 및 48%로 평가되었음
- 배양온도 5℃에서, 최대 유기물분해율은 실험시작 30일 후 배양조건 5S+10N +A; 10S+5N+A, 5S+5N+A에서 각각 약 46%, 43%, 42%로 평가 됨
- 이는 첨가한 아세테이트, 황산염 및 질산염이 미생물활성을 촉진시키는 물질로 작용하여 미생물군집을 증가시켰고, 증가된 미생물군집이 그들의 기질로 유기물을 이용하였기 때문으로 사료됨
- 유기물 분해율에 대한 온도변화는 매우 중요한 환경인자로 평가 됨
- 온도변화 5℃에서 유기물분해율은 15℃와 비교하였을 때 약 10%~20% 감소 함
- 해양저질의 자생미생물의 활성을 위하여 탄소원과 전자수용체를 공급하였을 때 미생물활성도가 현저하게 증가 하였고, 이는 유기물 분해율을 증가시킴. 또한, 온도변화는 미생물군집변화에는 다소 영향이 적었으나, 유기물 분해율에서는 크게 영향을 줌. 따라서, 탄소원과 전자수용체는 해양저질 자생미생물의 중요한 성장인자로서 오염저질의 생물학적 처리효율을 결정하는 주요인자임



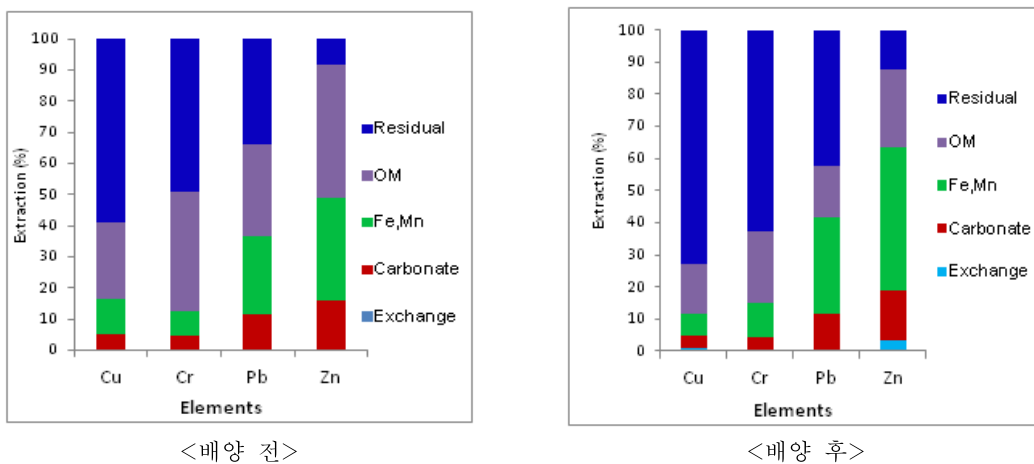
[그림 II-나-23] 배양온도에 따른 유기물 분해율

### ■ 중금속 분포

- 중금속 분포도 평가는 생물활성촉진물질 아세테이트, 황산염, 질산염을 모두 주입하였을 때 미생물군집 및 유기물분해율 면에서 높은 효율을 보였으므로 3가지 활성촉진물질을 첨가한 해양저질의 중금속 분포도를 평가하였음



- 중금속 분포도 분석은 단계추출법을 이용하여 전처리한 후 이용가능한 중금속 종류 및 농도를 평가 함
- 그림 II-나-24은 생물활성촉진물질(5mM S + 10mM N + 5mM)을 주입하여 해양저질을 배양하였을 때 배양전과 후의 중금속 분포도를 보여 줌
- 배양 전 해양저질에 분포된 중금속형태들은 Cu, Cr, Pb의 경우, Residual fraction > organic matter fraction > Fe, Mn oxides fraction > carbonate fraction 순으로 평가 됨. Zn의 경우, organic matter fraction > Fe, Mn oxides fraction > carbonate fraction > residual fraction 순으로 나타남
- 생물활성촉진물질(5mM S + 10mM N + 5mM)을 주입하여 배양 30일 후, Cu, Cr, Pb의 중금속 형태들은 residual fraction이 현저하게 증가하였음
- Zn의 경우는 배양 후의 residual fraction이 다소 낮게 증가하였지만, 모든 중금속의 형태들이 배양 후 residual fraction이 증가하는 것으로 평가됨
- 또한, 배양 30일 후 organic matter fraction과 carbonate fraction이 현저하게 감소하였으며, Fe, Mn fraction과 residual fraction은 증가하였음
- Zn와 Cu의 경우, 배양 30일 후 exchange fraction이 발생됨. 이는 Cu와 Zn이 유기물과 결합된 것들이 결합이 깨지면서 용출된 것으로 사료됨
- 배양 30일후에서 Residual fraction과 Fe, Mn oxides fraction이 증가한 것은 주입된 황산염이 황산염환원균(SRB)의 활성을 증가시켜 SRB에 의해 중금속이 metal sulfide로 전환시킨 것으로 사료됨



[그림 II-나-24] 생물활성촉진물질로 배양한 해양저질의 중금속분포도

#### ㊤ 생물활성촉진제의 조성 및 제조기법 및 코팅 연구

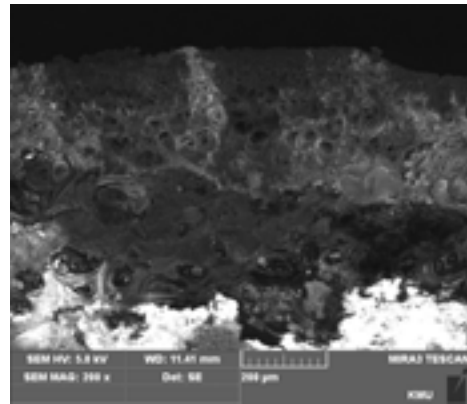
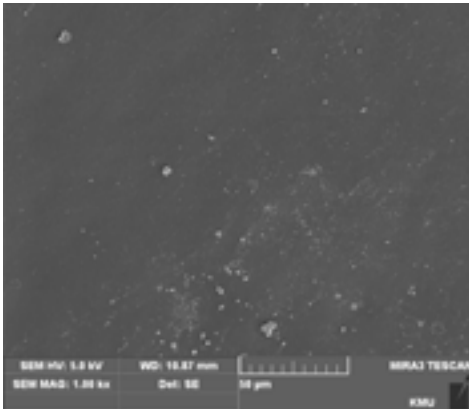
##### ■ 생물활성촉진제의 형태 연구(SEM Analysis)

- 생물활성촉진제의 형태적 특성을 살펴 보기위해 SEM 분석을 한 결과, 폴리실런 코팅 및 셀룰로스 아세테이트 코팅에서 코팅두께는 약 1-3um 이하로 얇게 형성된 것으로 나타남
- 셀룰로스 아세테이트 코팅제의 경우, 내부 코팅층(첫번째 코팅층)은 드물게 다소 큰 공극

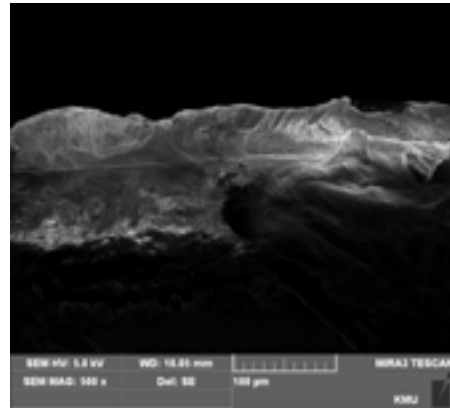
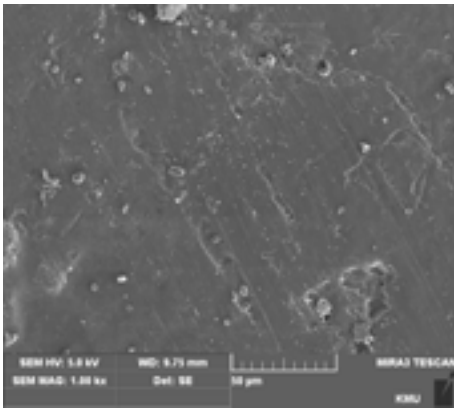
이 보였으며, 외부 코팅층(두번째 코팅층)은 균일하고 촘촘한 벌집모양의 공극이 분포되어 있는 것으로 나타남

- 폴리설펜 코팅볼의 경우, 내부 코팅층과 외부 코팅층의 모양이 동일하였으며, 무공극층이 형성된 것으로 나타남
- 코팅층에 형성된 공극의 구조와 형태들은 생물활성촉진볼에 포함된 생물활성물질의 용출율에 크게 영향을 미침
- 폴리머코팅된 생물활성촉진볼의 생물활성물질의 용출기작은 (1) 해수가 생물활성촉진볼에 유입되어 생물활성물질을 용해시킴 (2) 용존된 생물활성물질(N,S,A)은 코팅층 외부와 내부의 해수교환 및 농도차에 의해 서서히 확산됨 (3) 코팅층의 공극율 및 구조에 따라 생물활성물질의 교환율이 달라질수 있음

<셀룰로스 아세테이트 코팅>

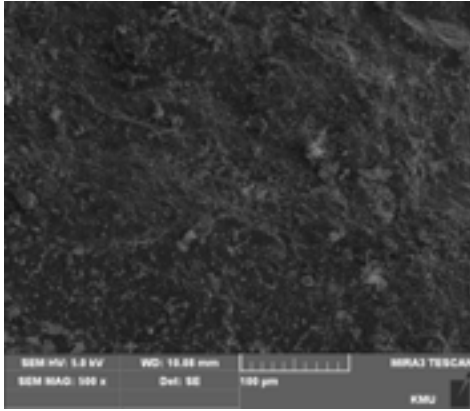


<폴리설펜 코팅>

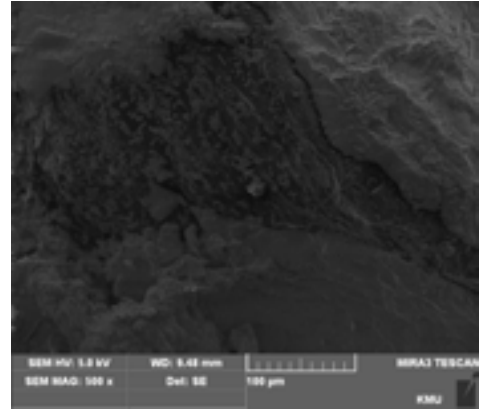


[그림 II-나-25] 셀룰로스 아세테이트 코팅 생물활성촉진볼 SEM이미지

- 활성물질을 처리하지 않은 입상활성탄과 생물활성촉진물질을 담지한 활성탄의 SEM이미지는 그림 II-나-26에 보여지며, 생물활성촉진물질을 담지한 활성탄의 SEM이미지에서 생물활성물질이 입상활성탄에 덮여져 있는 것으로 나타남



생물활성물질을 처리하지 않은 입상활성탄



생물활성물질을 담지한 입상활성탄

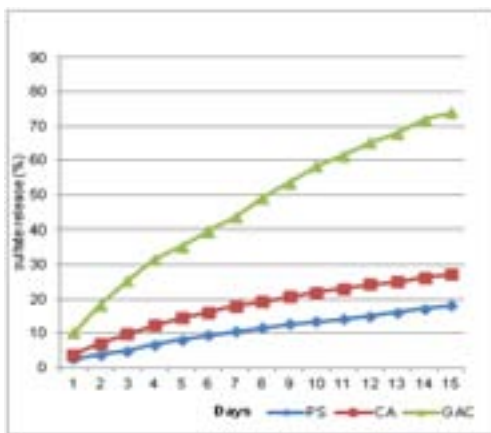
[그림 II-나-26] 생물활성물질을 담지한 입상 활성탄의 SEM이미지

■ 생물활성촉진제의 용출특성에 대한 회분식 실험

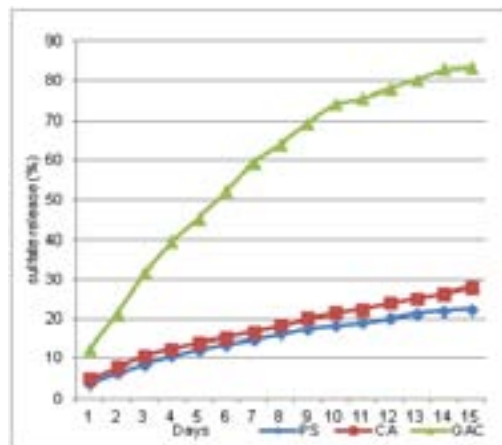
- 3가지의 생물활성촉진제(셀룰로스 아세테이트 코팅 생물활성촉진분; CA, 폴리설펜 코팅 생물활성촉진분; PS, 생물활성물질을 담지한 활성탄; GAC)의 생물활성물질의 용출특성을 평가하기 위하여 증류수조건과 해수조건에서 각각 난류를 발생시켰을 때와 난류를 발생시키지 않았을 때의 용출정도를 평가하였음

□ 정체조건에서의 용출실험

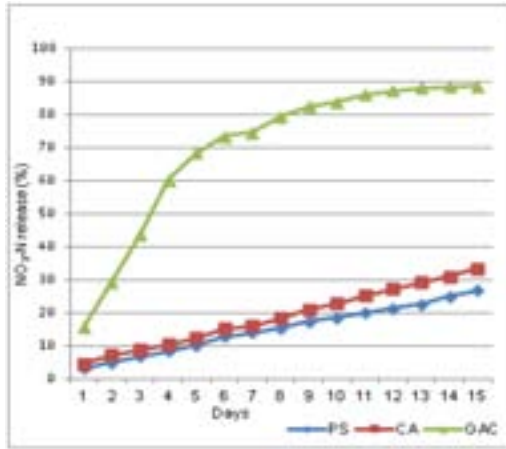
- 생물활성물질의 용출율을 평가하기 위하여 수중의 질산염과 황산염의 농도를 분석하였으며, 셀룰로스 아세테이트 코팅 생물활성촉진분의 질산염과 황산염의 용출율은 증류수에서 각각 33.5% 및 27.2% 였고(15일), 해수에서는 각각 36.4% 과 28% 로 용출되어 증류수에서보다 해수에서의 용출율이 높은 것으로 나타남
- 질산염의 용출은 황산염에 비해 증류수조건과 해수조건에서 다소 빨리 용출되는 것으로 나타남
- 폴리설펜 코팅 생물활성촉진분의 황산염과 질산염 용출율은 증류수조건에서 각각 18.1%, 26.9% 였고, 해수조건에서 황산염과 질산염이 각각 22.5%, 32.5% 로 용출된 것으로 평가 됨



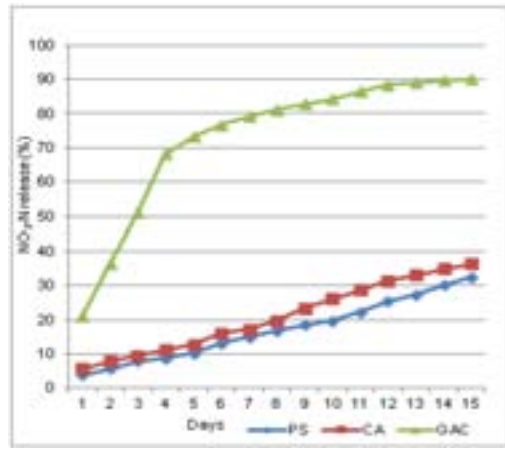
(가) 증류수조건(황산염)



(나) 해수조건(황산염)



(가) 증류수조건(질산염)



(라) 해수조건(질산염)

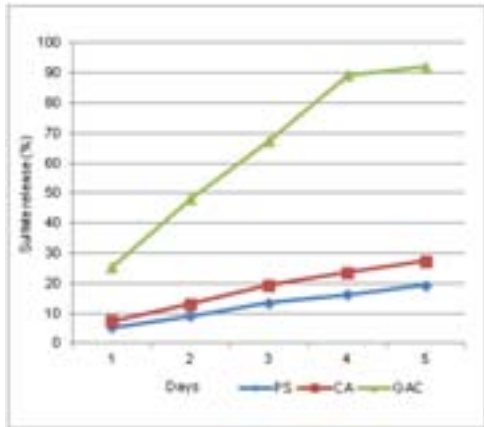
[그림 II-나-27] 정체조건에서의 생물활성촉진물질의 용출.

- 난류가 없는 상황에서의 생물활성촉진볼로부터 생물활성물질의 용출율은 증류수조건에 비해 해수조건에서 높게 나타남. 이는 해수의 pH가 높기 때문에 이온화도가 증가한 것에 기인된 것으로 사료됨. 또한, 생물활성물질 중 질산염이 황산염에 비해 좀더 빨리 용출되는 것으로 나타남
- 셀룰로스 아세테이트코팅은 폴리설펜 코팅에 비해 질산염 및 황산염의 용출이 약 10-25% 높은 것으로 평가 됨
- 폴리설펜 코팅 생물활성촉진볼은 온도와 pH변화에 안정적이며, 셀룰로스 아세테이트코팅은 생분해도가 높고 pH에 민감한 것으로 평가됨
- SEM 이미지에서 보는바와 같이, 폴리설펜 코팅층은 셀룰로스 아세테이트코팅층과 비교할 때 공극없이 밀도가 높은 구조로 보여짐. 이는 생물활성촉진볼내에 함유된 생물활성물질의 용출을 차단하고 물질확산을 매우 더디게 만듦
- 생물활성물질을 담지한 입상활성탄의 용출특성을 평가하기 위하여 시간에 따라 수중의 질산염 및 황산염의 농도를 평가하였음
- 해수 조건에서 입상활성탄으로부터 용출되는 질산염과 황산염의 농도는 증류수 조건에 비해 다소 높았음
- 해수조건에서의 입상활성탄의 최대 용출율은 실험시작 15일 후 질산염과 황산염이 각각 90.1 % 및 83.4% 로 평가 됨
- 생물활성물질을 담지한 활성탄의 용출율은 폴리머코팅 생물활성촉진볼에 비해 지속적으로 빠르게 증가하는 것으로 나타났고, 생물활성물질의 약 90% 가 용출되는 시간이 폴리머코팅에 비해 약 70% 가 빨랐음

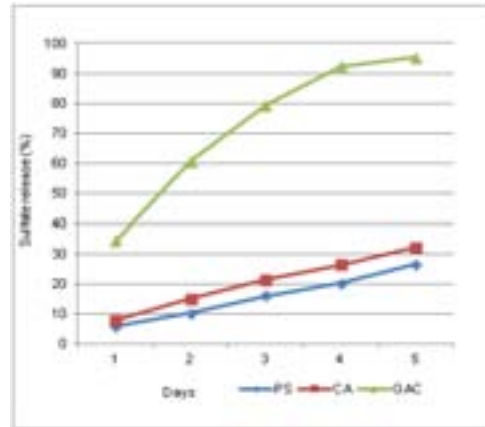
■ 난류조건에서의 용출실험

- 난류조건에서의 용출실험은 150rpm 의 진탕배양기에서 수행하였으며, CA의 경우, 황산염 용출율이 증류수조건과 해수조건에서 각각 약 27.3% 및 32.1%로 나타났고, PA의 경우, 각각 약 19.5% 및 26.5% 로 나타남(실험시작 5일 후)

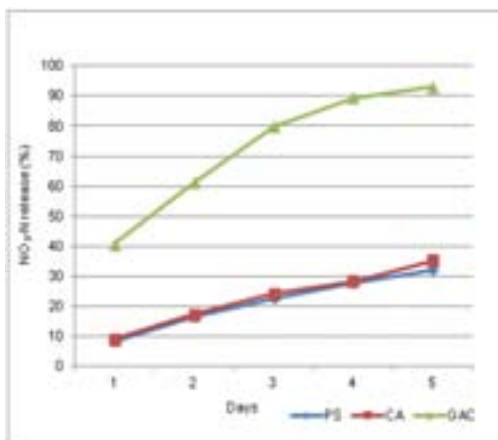
- 질산염 용출율은 CA의 경우, 증류수조건과 해수조건에서 각각 약 35.2% 및 42.6% 로 나타났고, PA의 경우, 각각 약 32.1% 및 33.4% 로 나타남(실험시작 5일 후)
- GAC의 경우, 질산염 및 황산염의 용출율은 증류수조건과 해수조건에서 실험시작 4일 후 약 90% 가 용출됨
- PA와 CA의 경우, 질산염과 황산염의 용출정도는 정체조건에 비해 난류조건에서 약 50% 이상 높았음



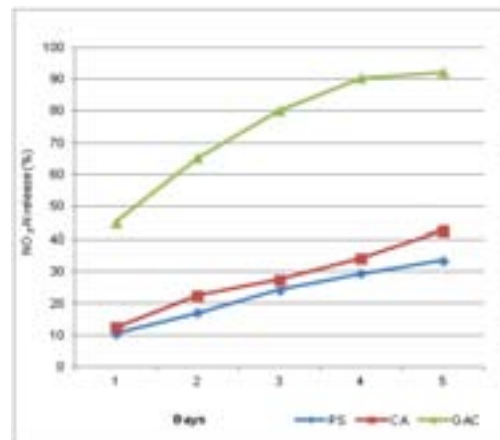
(가) 증류수조건(황산염)



(나) 해수조건(황산염)



(다) 증류수조건(질산염)



(라) 해수조건(질산염)

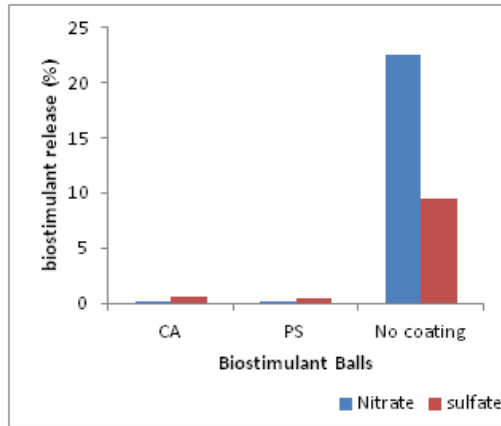
[그림 II-나-28] 난류조건에서의 생물활성촉진물질의 용출.

### ㉔ 생물활성촉진분을 이용한 칼럼실험

#### ■ 실험실 규모의 칼럼 실험

- 생물활성촉진분을 실제 해양오염저질에 적용하였을 때 생물활성물질의 용출특성을 평가하기 위하여 실험실 규모의 칼럼실험을 수행 함
- PS 및 CA를 적용한 칼럼에서 질산염과 황산염의 용출율은 실험시작 5일후에서는 정도가 매우 미비하였음
- 이는 폴리머 코팅 생물활성촉진분의 생물활성물질의 용출이 느리고, 적은양이며, 용출된 생물활성물질은 미생물이 이용하였거나 해양저질에 함유된 유기물과 결합하였기 때문으로 사료 됨

- 폴리머 코팅을 하지 않은 생물활성촉진볼의 경우, 황산염과 질산염의 용출율이 각각 약 9.5% 및 22% 였음
- 칼럼실험은 현재 진행 중이며, 향후 1개월 또는 2개월 이상 계속 진행되어야 하며, 실험 종료 후 해양오염 저질층과 생물활성촉진볼의 미생물군집, 유기물, 중금속, 질산염 및 황산염 등의 특성 분석이 필요



[그림 II-나-29] 폴리머 코팅 생물활성촉진볼을 이용한 칼럼실험

### ■ 생물활성촉진볼을 이용한 현장 실험

- 실제 해상에서 생물활성촉진볼의 용출특성을 평가하기 위한 현장실험은 현재 진행 중이며, 향후 2개월 이상 계속 진행되어야 하며, 실험종료 후 해양오염 저질층과 생물활성촉진볼의 미생물군집, 유기물, 중금속, 질산염 및 황산염 등의 특성 분석이 필요. 실험시작 15일 후 실험대상 샘플을 채취하여 미생물군집변화, 황산염과 질산염의 용출 및 유기물 및 중금속 분포도 및 특성 분석 중

#### 다. 피복공법 적용을위한 설계·시공기술 개발

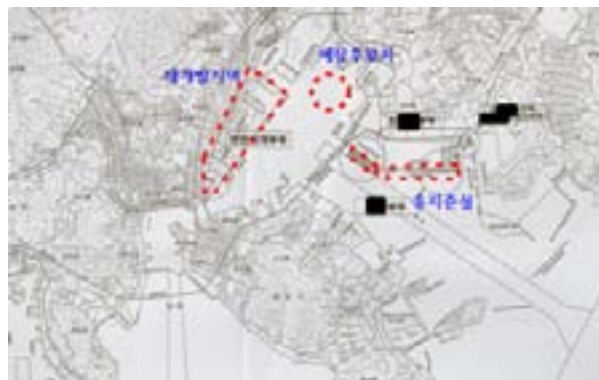
##### (1) 유력후보지 현장조건

- 본 연구사업에서 예상후보지는 남해 인근으로 설정하였으며, B항은 편의를 위해 크게 N항, K항, P항으로 분류되어 있음
- N항의 경우, 일반적으로 준설에 필요한 15m 수심을 선박 대형화에 따른 17m로 중심준설(B지방해양항만청 관리업무)을 수행하고 있음
- 2015년까지 준설계획이 수립되어 실시설계를 수행하고 있으며 2016년부터 2020년까지 기본계획을 수립하여 지속적인 준설을 수행할 예정으로 피복공법 적용이 불가능함
- 런던협약에 따른 해양투기가 금지되어 있어 준설된 퇴적물을 인근 인공 매립지를 조성하여 매립하고 있음. 준설된 토사는 대부분 점토와 실트로 구성되어 있으며 피복재로 활용할 경우 오탉에 대한 철저한 대비가 필요함. 실제 N항 매립의 경우에도 인근주변을 2-3층의 오탉방지막을 설치하여 준설 토사 매립을 수행하고 있음



[그림 II-다-1] B항 분류 체계도와 신항인근 인공매립지

- P항은 이미 계획된 준설을 완료하여 유지준설(B항만공사 관리업무)을 수행하고 있으며, 유지준설은 선박회사의 요청에 따라 수시 수행되고 있음
- 예상후보지로 거론되고 있는 K항은 8번과 9번 부두와 인접해 있음. 8번과 9번 부두는 중심 12 m로 얕고 비교적 소규모 선박이 이용하고 있어 특별한 준설이 필요 없는 것으로 확인됨
- 1,2,3,4부두는 재개발에 따른 크루즈부두 조성이 계획되어 있어 중심준설이 필요할 것으로 예상되며 현재 예비타당성 조사를 수행하고 있음. 중심준설이 수행된다면 피복공법 적용 예상 후보지와 원거리에 위치하여 영향이 없을 것으로 판단됨



[그림 II-다-2] 피복공법 예상후보지 및 준설현황 (K항)

- 대상후보지 인근 준설선으로는 펌프/호퍼 준설선, 그레브 준설선, 그리고 디퍼 준설선이 일반적으로 사용되고 있음
- 펌프/호퍼 준설선의 경우, 대용량으로 피복재를 현장에 이동(6400m<sup>3</sup>)하여 포설할 수 있으며 한 번 피복재 투하를 통해 대규모 피복형상(두께와 확장범위)을 획득할 수 있음. 그러나 세립토(실트와 점토)의 함량이 높을 경우 (전체 중량의 10%이상), 주변 오탉발생으로 인한 민원발생이 높을 것으로 예상됨
- 그레브 준설선의 경우, 포설량은 펌프/호퍼 준설선에 비해 작지만 (20m<sup>3</sup>) 해저 지반에 가깝게 피복재를 포설하여 세립질 함유량에 영향을 받지 않을 것으로 예상됨
- 디퍼의 경우, 버킷타입의 팔을 이용하여 투하하는 방식으로 피복투하량이 미미하여 (6m<sup>3</sup>) 시공일정이 길어져 시공성과 경제성 측면에서 어려울 것으로 예상됨

## (2) 유력후보지 환경외력 분석

- 대상후보지의 파랑조건을 검토하기 위해 “전해역 심해설계과 추정보고서Ⅱ”(한국해양연구원, 2005)의 50년빈도와 10년빈도 심해설계파랑에서 K항에 주 영향을 미칠 것으로 사료

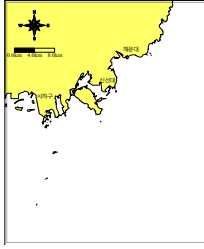
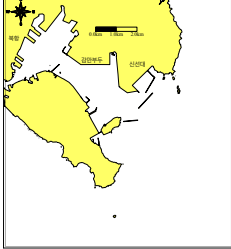
되는 5개 파랑(E, ESE, SE, SSE, S)을 선정하였음



[그림 II-다-3] 피복공법 적용이 가능한 준설선 현황

- 상세역 파랑변형해석 결과 K항 내의 전면해역에서 SE파랑이 50년빈도 1.00m, 10년빈도 0.65m로 가장 크게 전파되는 것으로 나타났음
- 대상후보지인 컨테이너터미널 전면해상에서 창, 낙조류 모두 약 10.3cm/sec(0.2 knot)의 유속이 분포하는 것으로 나타났음

[표 II-다-1] 파랑변형해석의 개요

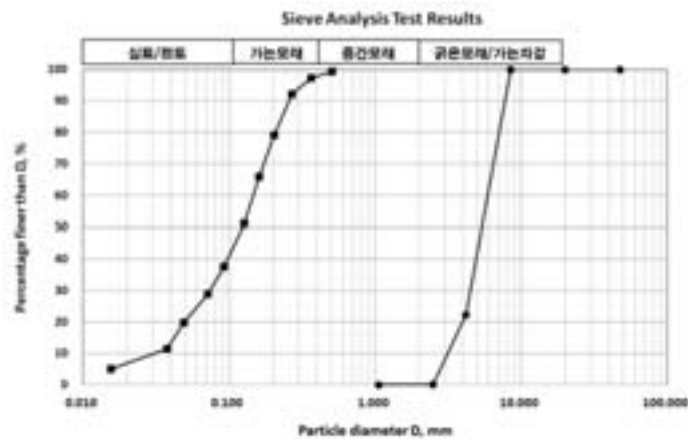
구 분	파랑변형해석					
	광역			상세역		
사용모형	SWAN			SWAN		
실험영역	40.0km×50.0km			11.25km×12.25km		
						
격자간격	200m 등간격			50m 등간격		
격자수	200개×250개			225개×245개		
파랑제원	50년 빈도		10년 빈도		광역실험 결과이용 (Spectrum에너지를 각 격자별로 보간)	
	E	8.88m	12.10s	5.13m		9.20s
	ESE	9.88m	12.66s	5.93m		9.81s
	SE	11.29m	14.64s	6.62m		11.21s
	SSE	13.66m	16.43s	8.01m		12.58s
S	13.55m	17.22s	7.84m	13.10s		
실험안	• 현재상태					
수심보정	• 삭망평균만조위 D.L(+) 2.04m					



### (3) 피복재 침강 및 침식 해석

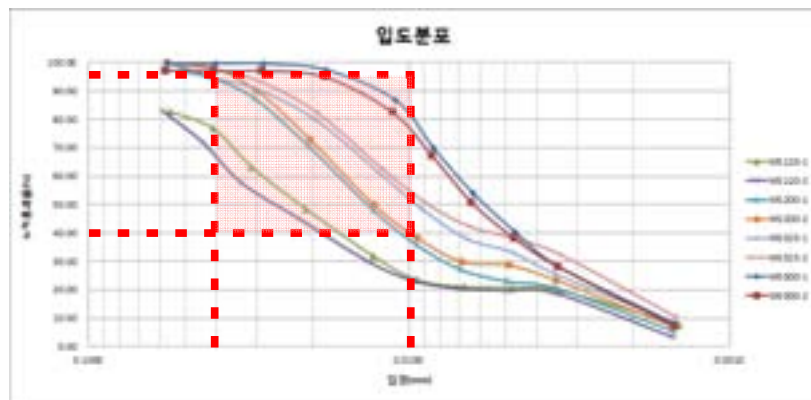
#### (가) 피복재 선정

- 한국건설기술연구원에서는 피복공법 현장 적용성을 분석하기 위해 1:10 축소모형 실험용 실내실험을 수행하였음
- 일반적으로 피복공법에서는 가는모래와 중간모래(입경 0.1~0.4mm)를 사용하고 있음. 주구성광물은 석영(quartz)으로 시료가 물로 포화되어도 점착력이 없어야 하며 1:10 축소를 고려하여 직경이 0.01~0.04mm범위 내에 50%이상 차지하는 시료를 실내실험에서 사용하고자 함. 또한 피복재 보호층으로 사용되는 굵은모래와 가는자갈을 대상으로 추가적인 실험을 진행하였음



[그림 II-다-4] 피복재 입도분포

- 총 4개의 실리카 분말(석영 100%)을 지반공학에서 일반적으로 사용되는 Hydrometer를 활용한 직경분석을 실시함. 각각의 시료에 대해 재현성과 신뢰성을 확보하기 위해 2번에 걸쳐 수행하였음



[그림 II-다-5] 실내실험 후보시료별 입도분포

- MS120 실리카의 경우, 실험요구 직경 범위에 약 50%가 차지하고 있으며 최대직경은 0.075mm이상으로 다소 직경이 큰 경향을 띄고 있음. 반면에 MS325는 실험요구 직경 범위에 약 45%가 차지하고 있고 0.01mm이하의 직경이 50%이상 차지하고 있어 다소 직경이 작은 경향을 띄고 있음. MS500은 0.01mm이하 직경이 80%이상 세립질로 구성되어 있어 실험에 적합하지 않다고 판단됨

- MS200의 경우 실험요구 직경 범위에 약 55%가 차지하고 있으며 점토 성분(0.002mm이하)이 15%로 피복재 현장적용 시 가장 적합한 재료라고 판단되어 실내실험 시료로 선정함

**(나) 침강 및 침식 실내실험**

- 현장조건을 반영한 피복재의 침강 및 침식에 대한 연구를 수행하기 위해 한국건설기술연구원이 보유하고 있는 대형파랑전파시험기를 이용하여 대상후보지 환경외력을 재현하였음. 또한 그레브 준설선의 용량과 작동 메커니즘을 반영한 윈터치개폐장치를 이용하여 피복재 포설 시뮬레이션을 수행함
- 1차적으로 일반적으로 사용되는 피복재인 가는모래와 중간모래를 대상으로 상사법칙을 적용하여 직경이 1/10인 실리카 분말을 활용한 피복재 포설 시뮬레이션을 수행함



(a) 파랑전파시험기

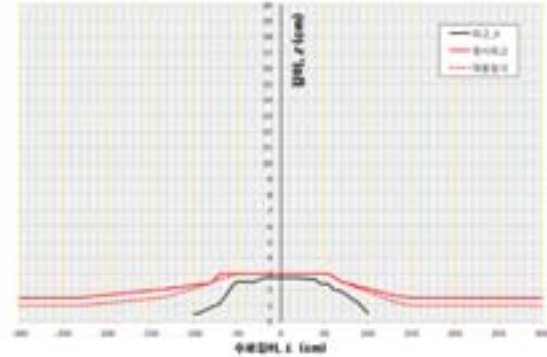


(b) 윈터치 개폐장치



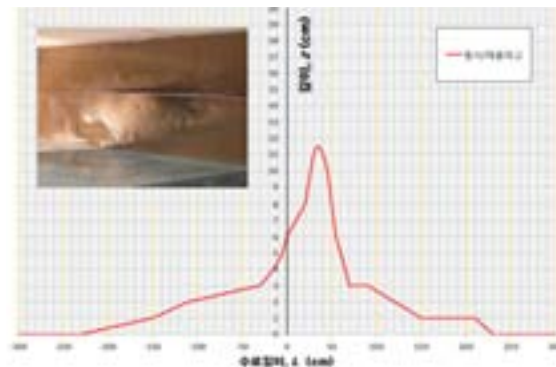
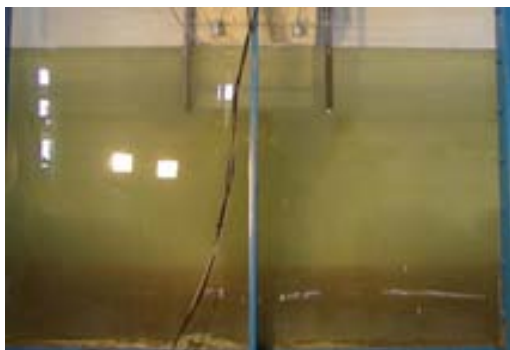
**[그림 II-다-6] 피복재 포설 실내실험 장비**

- 피복재 포설은 10년 공사한계파고(5.5cm, 실파고 55cm)조건으로 수면에서 피복재를 투하하는 방식을 고려함
- 피복재 투하에 따른 오탁수 발생이 확인되었으며, 현장시공에서 세립질의 함유량이 오탁수 발생에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단되므로 피복재 선정에 유의할 필요가 있음.
- 총 150kg을 투하하였으며, 피복재 포설 형상을 관찰한 결과 최대 높이 약 3.0cm, 최대높이 영향범위는 좌·우로 약 50cm씩 총 1m로 확인됨
- 파고가 없는 경우, 75kg 투하 시 약 2.8cm 높이, 영향범위 75cm로 확인됨. 따라서 파도로 인한 포설범위가 넓어짐을 확인할 수 있었으며, 파랑의 주기가 피복재 포설형상에 미치는 영향에 대한 연구가 필요함
- 10년 공사한계파고에서 포설 완료 후 50년 빈도 태풍파고(9.5cm, 실파고 95cm) 로 2시간 침식을 확인하였음. 포설두께가 비교적 얇은 지점에서 침식이 나타났으며, 이는 최종적으로 침강하는 세립질이 재부유하여 주변으로 흩어진 것으로 판단됨



[그림 II-다-7] 실리카 분말을 활용한 피복재 침강 및 침식 실내실험 결과

- 피복재 포설 후 침식이 발생할 경우에는 일반적으로 피복보호층을 반영하고 있으며, 사용되는 보호층 재료로는 굵은모래에서 가는자갈을 활용하고 있음. 상사법칙 적용에 따른 자갈 직경의 1/10인 가는모래를 활용하여 보호층 포설 시뮬레이션을 수행함
- 보호층 포설은 피복재 포설조건과 동일하게 10년 공사한계과고(5.5cm, 실과고 55cm)조건에서 수면에서 모래를 투하하는 방식으로 진행하였으며, 실리카 분말 실험과는 달리 오타수 발생이 미미함
- 보호층 시뮬레이션에 사용된 모래의 경우, 점토함유량이 미미하여 오타수가 발생하지 않는 것으로 판단됨. 따라서, 현장에서도 피복재 또는 보호층 포설재료에 포함된 점토함유량에 따른 오타수 발생과 영향범위를 고려하여 작업을 수행해야 할 것으로 판단됨
- 총 75kg을 투하하였으며, 피복재 포설 형상을 관찰한 결과 최대 높이 약 11.5cm, 영향범위 높이 3cm 이상이 좌·우로 약 50cm까지, 높이 3cm이하 2cm 이상이 좌·우로 약 1m까지 확인됨
- 특이사항으로는 모래 포설에 따른 형상을 확인한 결과, 파랑전파시험기의 폭(60cm)이 좁아 형상결정과정에서 경계조건이 미치는 영향이 크다고 판단되며 실험역의 포설과는 차이가 있을 것으로 관찰됨



[그림 II-다-8] 가는 모래를 활용한 피복재 침강 및 침식 실내실험 결과

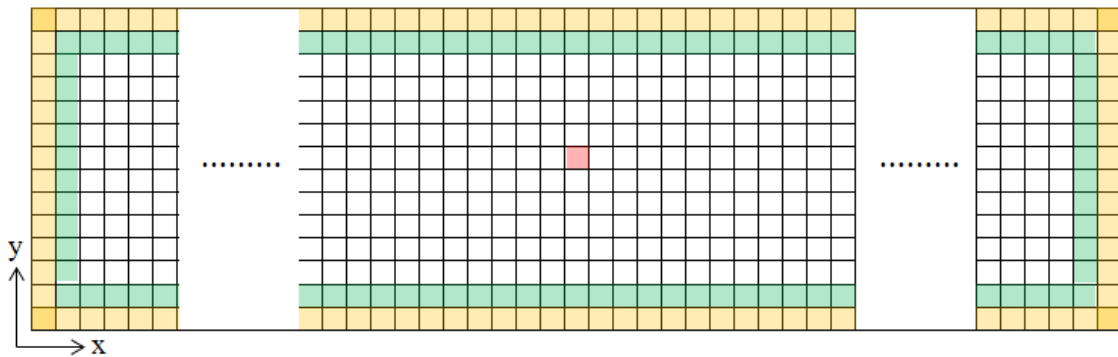
- 실리카 분말과 비교하여 가는모래는 절반의 포설량으로도 충분히 목표높이(5cm)와 영향범위(좌우50cm, 총 1m폭)를 확보할 수 있으며, 오타수의 영향도 미미한 것으로 확인됨
- 따라서, 물리적 격리만을 고려할 경우에는 자갈이 시공성이나 환경적 측면에서 우수하다고 판단되지만 오염퇴적층이 존재하는 해저지반에 자갈을 포설할 경우에는 자갈의 자유낙하에 따른 충격으로 오염퇴적층을 교란하여 시공 중에 환경문제가 야기될 것으로 판단됨

(다) 수치해석

- 본 연구에서 사용한 수치해석 모델은 미국 육군공병단(U.S. Army of Corp. Engineer)에 의해 개발된 준설물 배치 시의 오염물질, 부유사 확산, 그리고 마운드의 높이를 평가하는데 주로 사용되는 프로그램임
- STFATE(Short Term FATE)와 MDFATE(Multiple Dump FATE) 모델은 미국 Massachusetts주의 Buzzards 만 등 수많은 프로젝트에서 성공적으로 사용된 공인된 모델이며, 본 연구에서는 STFATE를 이용하여 배치 시, 그리고 배치 후 시간에 따른 마운드의 높이 분포 및 변화를 예측하고 실내실험 결과와 비교 분석을 통해 신뢰성을 확인하고자 함
- STFATE 모델을 이용한 투기 시 영향을 살펴보기 위해 예상후보지의 지형적 특성을 고려한 평균 수심 12 m를 기준으로 단기거동동모델 해석을 수행하였음

[표 II-다-2] STFATE 모델 격자 구성

구분	격자 갯수 (x방향 × y방향)	평균수심 (m)	비고
수치 실험	91×14 총 1,274개 격자	12	모델영역 : 82 m × 6 m



■ : Dump Location, ■ : Open Boundary, ■ : Dummy Point

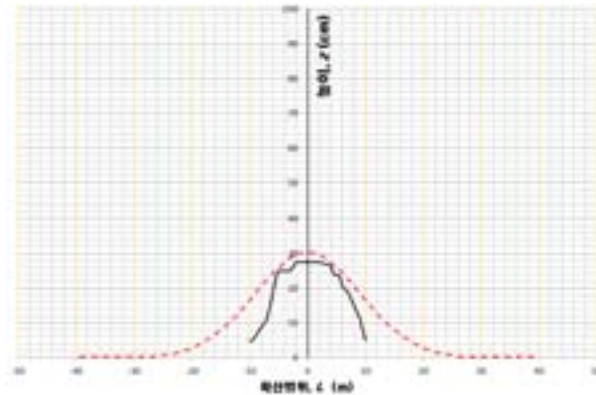
[그림 II-다-9] STFATE 기본 격자망도

- 처분장비는 그레브 준설선을 사용하여 처분하는 것으로 하였으며, 그레브의 체적은 1회에 16.5 yd<sup>3</sup>씩 총 3회 처리하는 것으로 하였고, 그레브의 길이는 16.4 FT, 폭은 6.6 FT, 처분 전 바지의 흘수 (draft)는 4.0 FT, 처분 후 바지의 흘수는 2.0 FT, 1회 배출 시 필요한 시간은 2 sec, 그리고 처분하는 동안 선박의 속도는 0으로 입력하였음. 즉 처분장에서 고정된 위치에서 배치 준설물을 투하하는 조건으로 모델을 수행하였음



[그림 II-다-10] 처분 시 사용되는 그레브 준설선

- 한국건설기술연구원에서 수행한 실험과 비교한 결과, 최대 높이는 실험결과와 아주 유사하며 확산범위도 예측결과와 상당히 유사함. 따라서 STFATE를 이용한 파랑이 없는 조건에서의 예측은 비교적 정확하다고 판단됨



[그림 II-다-11] 실내실험과 수치해석 결과 비교

#### 라. 개발기술 적용 예정해역 사전 조사

##### (1) 현장모사를 위한 컬럼 및 수조 실험에 필요한 오염해역 해양퇴적물 채취

##### (가) K항

- 오염퇴적물은 K항의 오염퇴적물을 채취하였으며, 습시료는 풍건후 체를 이용하여 이물을 분리하여 3회 반복하여 실험 및 분석하였음
- 오염퇴적물의 연속추출방법은 A. Tessier(1979)의 방법을 사용하였고, 연속추출단계는 1단계(Exchangeable), 2단계(Carbonate), 3단계(Oxide), 4단계(Organic), 5단계(Residual)로 나누어 평가를 수행하였으며, 일반적으로 1단계에서 5단계로 갈수록 안정화된 상태를 나타냄

##### ① 해양오염퇴적물 내 중금속 존재형태별 오염 현황

- K항 해양오염퇴적물의 물리화학적 특성을 분석함.
- K항의 오염퇴적물은 미립질 약산성의 특징을 나타내고 있음
- Ni, Cu, Zn, As, Cd는 기준1을 초과하고 있음을 알 수 있음



[그림 II-라-1] 중금속 안정화 실험용 오염퇴적물 샘플링(K항)

- tPCBs와 tPAHs는 기준에 미달하는 값을 보이고 있으나 TBT는 기준1을 초과함
- 이에 K항의 퇴적물은 중금속과 유기오염물질 등의 오염현상을 있음을 나타냄

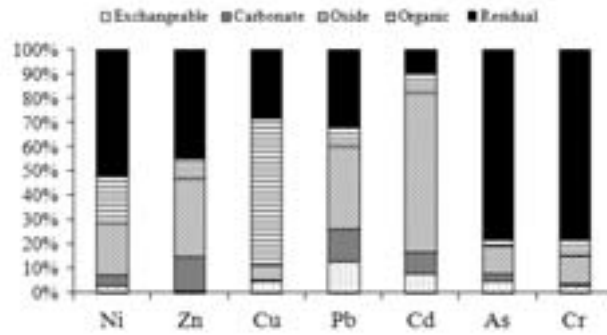
[표 II-라-1] K항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	Values
pH	8.3
silt-clay (%)	90
water contents (%)	55

[표 II-라-2] K항 오염퇴적물의 중금속 및 유기오염물질 오염 특성

Sediment	Values	기준(기준1-기준2)
Cr (mg/kg)	65.7	80-370
Ni (mg/kg)	37.9	23-52
Cu (mg/kg)	67.3	24-108
Zn (mg/kg)	203.7	200-410
As (mg/kg)	30.8	9-41.6
Cd (mg/kg)	0.94	0.68-4.21
Pb (mg/kg)	42.4	50-220
tPCBs (ug/kg)	11.6	21.6-189
tPAHs (ug/kg)	1803.6	4000-45000
TBT (ug/kg)	12.0	5.0-105

- 그림 II-라-2는 K항의 해양오염퇴적물내의 중금속 존재 형태 비율을 나타내고 있음
- 기존 참고문헌을 보면, 자연환경에서 용출되기 쉬운 형태는 Exchangeable, Carbonate, Oxide 형태로 알려지고 있음
- 이러한 사실로 볼 때 K항 해양퇴적물 내에서 용출되기 쉬운 중금속은 Pb, Cd > Zn, Ni > As, Cr > Cu 일 가능성이 높음



[그림 II-라-2] K항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 비율

(나) I항

- I항 오염퇴적물 시료는 표층 약 10-30cm 깊이의 토양을 채취하였으며, 습시료는 원소분석을 실시하고 건시료는 상온에서 풍건 후 체를 사용하여 이물을 분리하여 3회 반복하여 실험 및 분석하였음
- I항 퇴적물의 물리화학적 특성은 다음과 같음



[그림 II-라-3] I항의 시료 채취지점

① 해양오염퇴적물 내 중금속 존재형태별 오염 현황

- I항의 해양오염퇴적물의 물리화학적 특성을 보면 약 알칼리성의 실트 및 점토 성분이 많이 포함된 미립질 퇴적물 특성을 보임
- Cu, Pb, As, Cd는 기준1을 초과하고 있음을 알 수 있음
- 이에 I항의 퇴적물은 다양한 종류의 중금속 오염현상이 있음을 알 수 있음

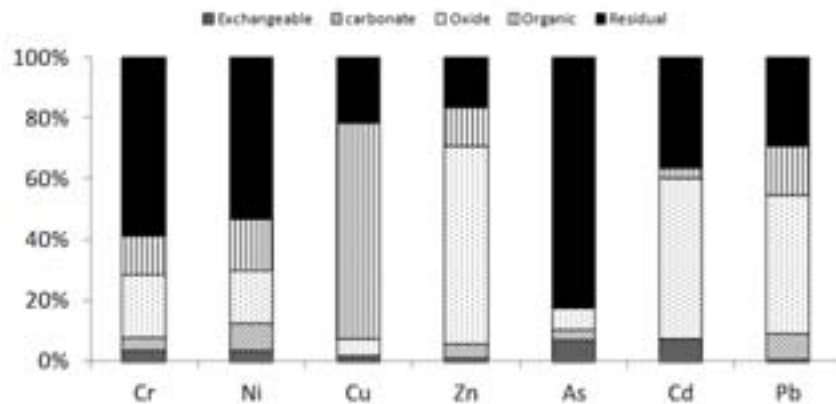
[표 II-라-3] I항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	Values
pH	8.04
Sand(%)	15.0
Silt(%)	77.5
Clay(%)	7.5
C(%)	1.54
N(%)	0.17

[표 II-라-4] I항 오염퇴적물의 중금속 및 유기오염물질 오염 특성

Sediment	Values	기준(기준1-기준2)
Cr (mg/kg)	33.2	80-370
Ni (mg/kg)	15.5	23-52
Cu (mg/kg)	85.2	24-108
Zn (mg/kg)	149.8	200-410
As (mg/kg)	37.8	9-41.6
Cd (mg/kg)	0.7	0.68-4.21
Pb (mg/kg)	50.4	50-220

- 그림 II-라-4은 I항의 해양오염퇴적물내의 중금속 존재 형태 비율을 나타내고 있음
- 각각의 중금속 중에서 자연환경에서 용출되기 쉬운 형태인 Exchangeable, Carbonate, Oxide 형태는 Zn(약 70%), Pb(약 50%), Cd(약 60%)에서 비교적 높게 나타남
- 이러한 사실로 볼 때 I항 해양퇴적물 내에서 용출되기 쉬운 중금속은 Zn, Pb, Cd > Cr, Ni > Cu, As 일 가능성이 높음



[그림 II-라-4] I항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 비율

(다) J, S, B항

- 해양저질 샘플링은 J항(35°01.442N, 128°39.622E), S항(매립지) 및 B항 등 3곳에서 채취하였으며, 채취한 해양저질 샘플은 실험실로 이동 후 건조하여 물리화학적 특성 분석







[그림 II-라-5] 해양저질조사를 위한 샘플링




(2) 처리기술 시험을 위한 대상 해역 기초 조사 및 퇴적물 시료 채취  
(가) 시험대상 해역 퇴적물의 특성 평가

① 대상해역의 개요

㉠ 조사해역

- 1차년도 연구결과 중앙정부(해양수산부)에서 '04년부터 '11년까지 조사한 국내 오염 우려 해역 중 피복 및 현장처리기술 시험 대상 해역으로 3개 해역(M, N, R)을 선정하였음. 기 선정된 3개 해역에서 주로 부영양물질에 의해 오염된 퇴적물의 처리 기작을 개발하기 위하여 조사 및 퇴적물 시료를 각각 약 40 kg 채취함. 3개 해역의 개요를 표 II-라-5에 정리함

[표 II-라-5] 조사해역 개요

대상 해역	M 해역	N 해역	R 해역
조사 기간	2012. 11. 6 ~ 11. 8	2013. 1. 21 ~ 1. 22	2013. 1. 23 ~ 1. 24
조사 정점	35°07.2325'N, 129°03.8207'E.	35°12.4809'N, 128 35.1712'E. 35°12.4993'N, 128°35.2069'E. 35°12.4832'N, 128°35.2501'E.	37°29.5818'N, 126°37.6277'E. 37°29.5905'N, 126° 37.6051'E. 37°29.5841'N, 126°37.6304'E.
조사 사진			
주요 오염물질	유기물, 중금속 오염	유기물, 중금속 오염	유기물, 중금속 오염
시료 특성	실트질 우세	실트질 우세	실트질 우세

#### ㉠ 조사방법

- 조사지역 표층퇴적물의 퇴적물 특성 및 부영양화물질 제거기작 실험을 위하여 그랩 퇴적물 채취기(grab sampler)를 이용하여 시료를 채취

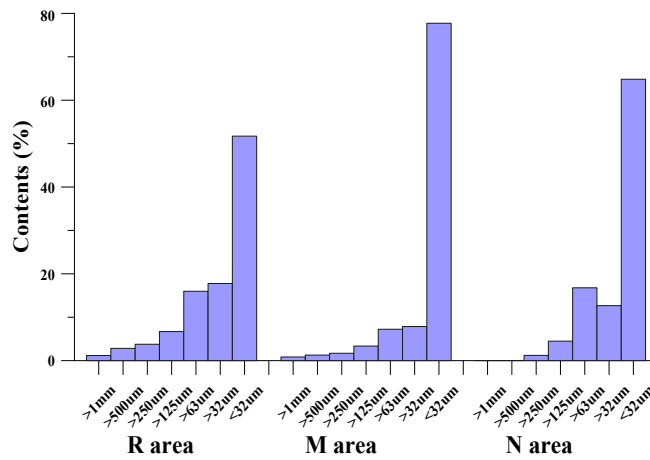
#### ㉡ 분석항목 및 분석방법

- 분석항목
  - 일반항목: 함수율, 입도, 총 유기탄소(TOC), 총 질소(TN)
  - 부영양화 정화지수(CIET) 관련: 화학적 산소요구량(COD), 산 휘발성황화물(AVS), 강열감량(IL)
  - 유해화학물질 정화지수(CIHC) 관련: 알루미늄(Al), 철(Fe), 망간(Mn), 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 비소(As), 수은(Hg), PCB, PAH
- 분석방법 : 해양환경공정시험기준

(나) 대상 해역 퇴적물의 입도분포

① 입도분석 결과

- 입도분석 결과를 그림 II-라-6와, 표 II-라-6에 나타내었음
- 각 해역의 퇴적물의 평균입도: 모래실트질(sZ)인 5.25 - 6.14Φ 범위
- 각 퇴적물의 분급도: 2.01 - 2.30Φ였으며 왜도는 -0.04 - 0.06의 범위
- R 해역: >63μm이하 퇴적물이 80% 이상, <32μm 퇴적물이 50%이상
- M 해역: >63μm이하 퇴적물이 80% 이상, <32μm 퇴적물이 70%이상
- N 해역: >63μm이하 퇴적물이 80% 이상, <32μm 퇴적물이 60%이상  
⇒ 육상 토양에 비해 63μm이하의 세립한 입자의 비율이 우세함
- 기존 오염 우려 해역 조사결과 10개 해역에서 평균 Silt는 40.1%, Clay는 38.0%로 미세입자가 78.1%임(해양수산부, 2007)



[그림 II-라-6] 각해역의 입자별 함량

[표 II-라-6] 각해역의 함수율 및 입도분석 결과

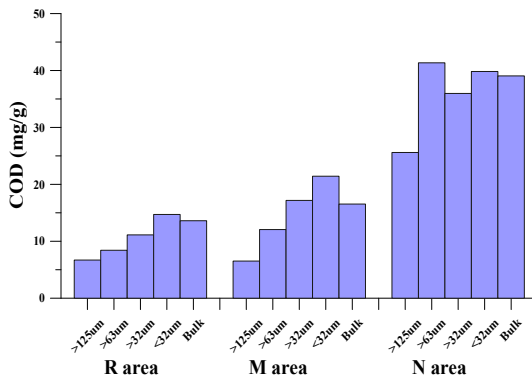
St	WC	Gravel	Sand	Silt	Clay	Mz	Sort	Skew	Kurt	Sediment type (Folk, 1968)
	%	%	%	%	%	Φ				
R	54.2	0	30.5	58.2	11.3	5.25	2.30	0.06	1.03	sZ
M	48.6	0	14.4	71.6	14.0	6.14	2.01	-0.13	1.31	sZ
N	51.2	0	22.5	63.6	13.9	5.83	2.07	-0.04	0.87	sZ

(다) 대상 해역 퇴적물에 대한 해양오염퇴적물의 오염특성 파악

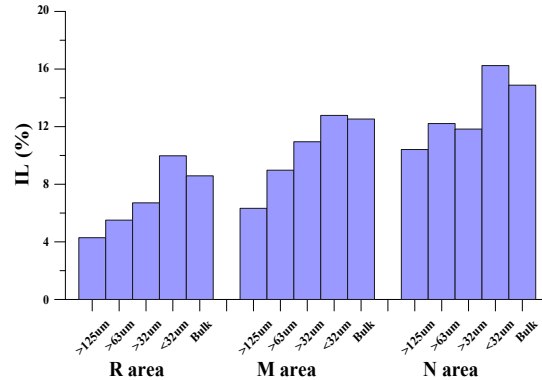
① 부영양화 정화지수 관련 오염물질의 입자별 농도(국토해양부, 2011)

- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 화학적 산소요구량(COD)의 농도 분포는 R해역에서 6.7-14.7 mg/g, M해역에서 6.5-21.4 mg/g, N해역에서 25.6-39.8 mg/g의 범위를 나타냄
- 입자가 세립 할수록 COD 값이 증가
- N해역에서 가장 높은 농도를 보임
- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 강열감량(IL)의 농도 분포는 R해역에서 4.3-10.0%, M해역에서 6.3-12.8 %, N해역에서 10.4-16.2 %의 범위로 나타남

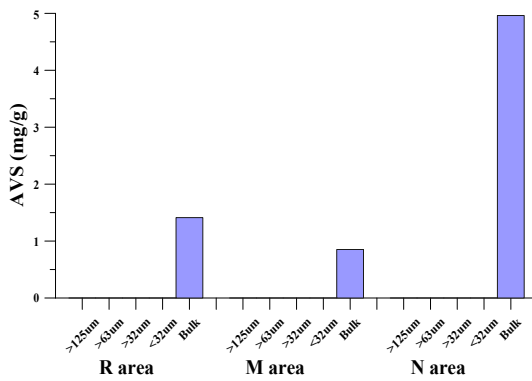
- 입자가 세립 할수록 강열감량 값이 증가하는 경향을 보임
- N해역에서 가장 높은 농도로 나타남
- 각 해역의 전체 퇴적물의 산 휘발성황화물(AVS)의 농도 분포는 R해역에서 1.41 mg/g, M해역에서 0.85 mg/g, N해역에서 4.96 mg/g의 범위로 나타남
- 입자분리 후 산 휘발성황화물(AVS)농도를 측정하기가 불가능하여 전체퇴적물에만 분석하였음
- N해역에서 가장 높은 농도로 나타남
- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 총 유기탄소(TOC)의 농도 분포는 R해역에서 0.57-1.20 %, M해역에서 0.59-1.61 %, N해역에서 2.33-3.14 %의 범위로 나타남
- 입자가 세립 할수록 강열감량 값이 증가
- N해역에서 가장 높은 농도로 나타남
- >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m의 퇴적물에서 부영양화 정화지수 평가 결과 8-12 값으로 정화·복원이 필요(CIET $\geq$ 6)할 정도로 오염이 심각함을 나타내며, 총 유기탄소의 농도값과 대응됨



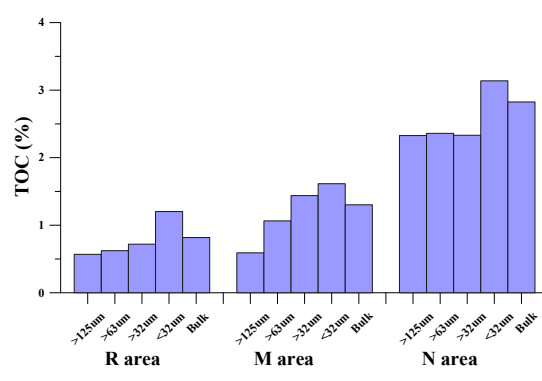
[그림 II-라-7] 각해역의 입자별 화학적 산소요구량(COD) 농도



[그림 II-라-8] 각해역의 입자별 강열감량(IL) 농도



[그림 II-라-9] 각해역의 입자별 산 휘발성황화물(AVS) 농도



[그림 II-라-10] 각해역의 입자별 총 유기탄소(TOC) 농도

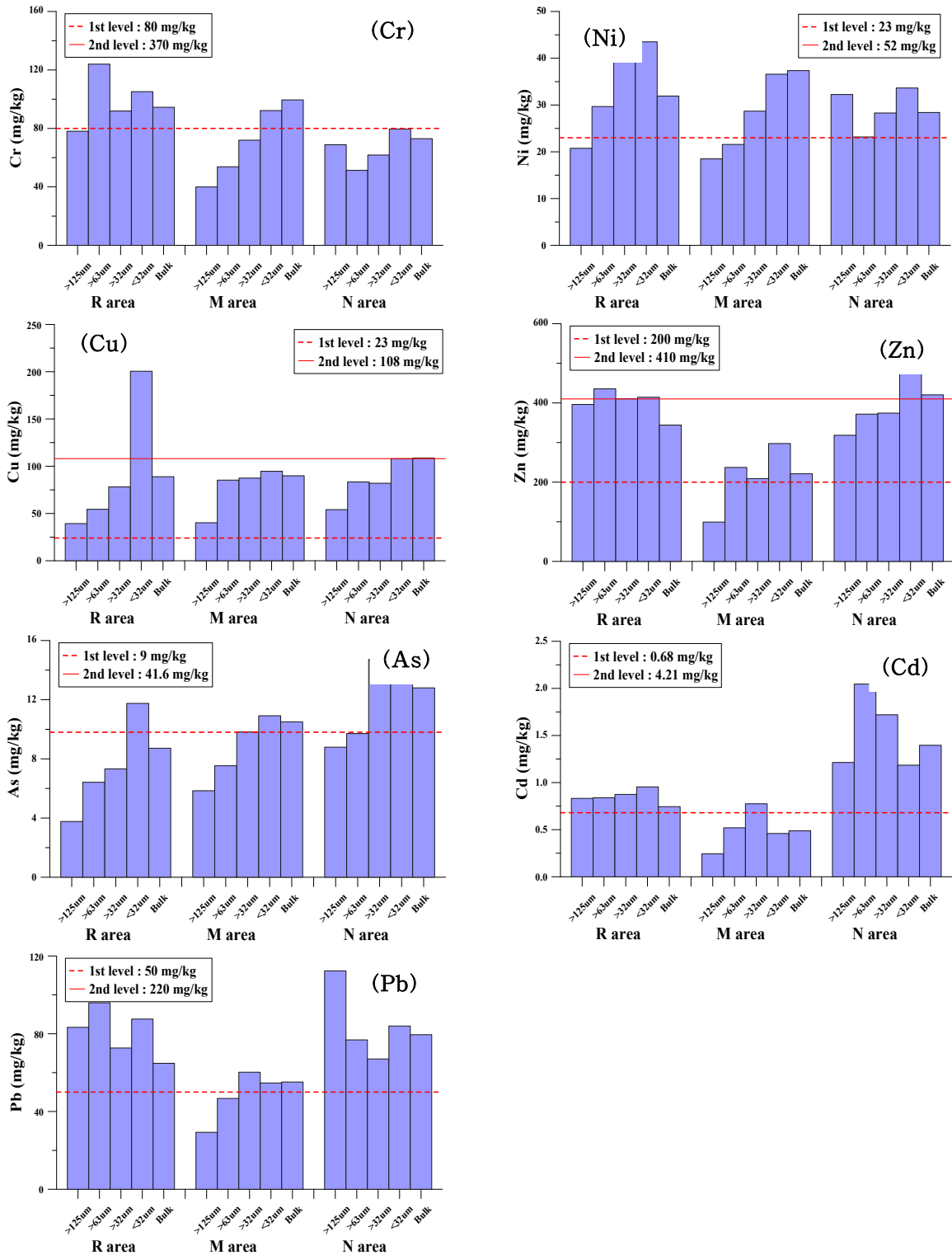
② 유해화학물질 정화지수 관련 오염물질의 입자별 농도분포(국토해양부, 2011)

- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 크롬(Cr)의 농도 분포는 R해역에서 78.1 - 105.2 mg/kg, M해역에서 40.0 - 92.2 mg/kg, N해역에서 68.8-79.6 mg/kg의 범위로 나타남
- R해역의 >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m, M해역의 <32 $\mu$ m,에서 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기

---

준 1농도를 초과함

- 입자가 세립 할수록 Cr 값이 증가
- R해역에서 가장 높은 농도로 나타남
- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 니켈(Ni)의 농도 분포는 R해역에서 20.7-43.5 mg/kg, M해역에서 18.5 - 36.6 mg/kg, N해역에서 23.2 - 33.6 mg/kg의 범위로 나타남
- R해역의 >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m, M해역의 >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m, N해역의 >125 $\mu$ m, >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m 에서 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1농도를 초과함
- 입자가 세립 할수록 Ni 값이 증가
- R해역에서 가장 높은 농도로 나타남
- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 구리(Cu)의 농도 분포는 R해역에서 39.3 - 200.5 mg/kg, M해역에서 40.2 - 94.7 mg/kg, N해역에서 54.1-107.9 mg/kg의 범위로 나타남
- 모든 해역에서 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1농도를 초과하였으며, R해역의 <32 $\mu$ m에서는 기준 2농도를 초과함
- 입자가 세립 할수록 Cu 값이 증가하며, R해역에서 가장 높은 농도로 나타남
- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 아연(Zn)의 농도 분포는 R해역에서 396 - 414 mg/kg, M해역에서 99 - 297 mg/kg, N해역에서 318-512 mg/kg의 범위로 나타남
- M해역의 >125 $\mu$ m를 제외한 모든 해역에서 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1농도를 초과하였으며, R해역의 >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m, N해역의 <32 $\mu$ m,에서는 기준 2농도를 초과함
- 대체로 입자가 세립 할수록 Zn 값이 증가
- N해역에서 가장 높은 농도로 나타남
- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 비소(As)의 농도 분포는 R해역에서 3.8 - 11.8 mg/kg, M해역에서 5.8 - 10.9 mg/kg, N해역에서 8.8 - 14.7 mg/kg의 범위로 나타남
- R해역의 <32 $\mu$ m, M해역의 <32 $\mu$ m, N해역의 >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m 에서 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1농도를 초과함
- 대체로 입자가 세립 할수록 As 값이 증가하며, N해역에서 가장 높은 농도로 나타남
- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 카드뮴(Cd)의 농도 분포는 R해역에서 0.83 - 0.95 mg/kg, M해역에서 0.24-0.78 mg/kg, N해역에서 1.18 - 2.05 mg/kg의 범위로 나타남
- R해역의 >125 $\mu$ m, >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m, M해역의 >32 $\mu$ m, N해역의 >125 $\mu$ m, >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m 에서 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1농도를 초과함
- R해역과 M해역에서는 대체로 입자가 세립 할수록 Cd 값이 증가
- N해역에서는 입자의 크기와 상관성이 없는 경향이 나타남
- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 납(Pb)의 농도 분포는 R해역에서 72.7 - 95.9 mg/kg, M해역에서 29.3 - 60.2 mg/kg, N해역에서 67.0-112.4 mg/kg의 범위로 나타남
- R해역의 >125 $\mu$ m, >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m, M해역의 >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m, N해역의 >125 $\mu$ m, >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m 에서 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1농도를 초과함
- 입자의 크기와 상관성이 없는 경향
- N해역에서 가장 높은 농도로 나타남



[그림 II-라-11] 각해역의 입자별 중금속 농도

마. 부영양물질 오염퇴적물 처리 기작 규명 및 기술개발

(1) 부영양물질 오염퇴적물 처리 기작 규명 및 기술 개발





(가) 선행 연구 및 국내·국외 동향

- 현재 국내 상용 처리기술 중 해양오염퇴적물 처리에 적용할 수 있는 처리기술은 입자분리 및 세척에 기초한 매우 제한된 기술임을 고려하여 본 연구에서 해양오염퇴적물의 정화처리를 위한 공정 및 필요기술을 아래와 같이 정리함

- 입자분리: 물리적 분리방법
- 세척 및 오염저감: 화학적 처리

① 물리적 분리 기술(Physical separation technologies)

- 처리할 대상 물질(오염물질 등)을 선택적으로 분리하는 기술
- 입경(Particle size), 밀도(Density), 자성(Magnetism), 소수성(Hydrophobic surface properties) 등 물리적 특성을 이용하여 분리
- 입자형태 또는 표면 흡착 형태의 오염물질(중금속 등)은 비교적 쉽게 분리 가능함
- 물리적 분리방법의 원리에 따른 종류 및 설명
  - 건식 분리: 대상물질의 입경분포 차이가 작을 때 주로 사용  
: 처리용량이 습식에 비하여 작음
  - 습식 분리: 일반적으로 실제 정화 현장에서 주로 사용됨  
: 건식 분리에 비하여 비교적 처리용량이 큼  
: 분리 시 용매(용수 또는 화학적 첨가제 등, 처리물:용매=1:2~3)를 사용  
: 처리과정에서 발생하는 폐액에 대한 별도의 수처리가 필요함  
: 육상의 오염토양 정화에서는 공정 발생 폐수를 별도의 수처리 공정으로 처리 후 공정수로 재활용함
- 오염물질과 퇴적물(또는 토양)의 결합형태 종류 (그림 II-마-1)
  - 오염물질이 퇴적물 입자와 독립적으로 존재
  - 퇴적물 표면에 약하게 결합, 퇴적물의 일부로 결합
  - 퇴적물 내부에 포함되어 강하게 결합

<p>(a)</p> 	<p><b>Metal phase included in volume</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Liberation degree is very low</li> <li>• Density depends primarily to minerals of carrying phase</li> <li>• Surface properties are constant but depend to carrying phase</li> <li>• Physical separation is very difficult or impossible</li> <li>• Crushing is required</li> </ul>
<p>(b)</p> 	<p><b>Metal phase associated</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Liberation degree is medium</li> <li>• Density depends to minerals of metal phase and carrying phase</li> <li>• Surface properties are not constant</li> <li>• Physical separation can be applicable (gravity concentration)</li> </ul>
<p>(c)</p> 	<p><b>Metal phase weakly bounded on surface</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Liberation degree is medium</li> <li>• Physical separation can be applicable if metal phase particles are liberated by e.g., attrition scrubbing</li> </ul>
<p>(d)</p> 	<p><b>Metal phase liberated or free</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Liberation degree is very high</li> <li>• Density depends only to minerals of metal phase</li> <li>• Surface properties are constant</li> <li>• Physical separation is applicable (e.g., gravity concentration, froth flotation)</li> </ul>

[그림 II-마-1] 퇴적물 내 오염물질의 존재 형태

- 물리적 분리 시 영향 인자(Factor)

- 
- 입경 분포(Particle size distribution)
  - 입자형태
  - 점토질/수분/Humic 성분 함량
  - 비중
  - 중금속 오염도 및 함량
  - 자성 특성
  - 입자표면의 소수성
  - 여러 가지 영향 인자 중 입경 분포가 물리적 분리에 가장 중요한 요소
- 물리적 분리 제한요소
    - 오염물질(중금속)이 퇴적물 입자에 강하게 결합(결합상태: 잔류상태 등)
    - 오염된 부분(중금속)이 매질(퇴적물)과 비중 차이가 작을 경우
    - 중금속의 화학적 결합 형태가 다양할 경우
    - 모든 입경분포에 중금속이 존재할 경우
    - Silt, clay 함량이 30~50% 이상일 경우
    - 퇴적물에 Humic 성분 함량이 많을 경우
    - 퇴적물에 점성이 큰 유기화합물 함량이 많을 경우
  - 물리적 분리에 주로 사용되는 장치
    - 스크린(Screening)
    - 중력 침강(Gravity concentration)
    - 수력 싸이클론(Hydrocyclone)
    - 부상분리(Forth flotation)
    - 자력 분리(Magnetic separation)
    - 전기 분리(Electrostatic separation) 등
  - 오염 토양 또는 퇴적물 정화 시 물리적인 분리 흐름(5단계)
    - 1차: 스크린을 사용하여 협잡물, 자갈(Oversized materials) 등을 선별
    - 2차: 수력 분리(hydroclassification)로 목표하는 처리 대상별 입경(sand, silt, clay)별로 분리
    - 3차: 중력 농축(gravity concentration)으로 1차, 2차 분리 후 사질(sand) 분리, 선별
    - 4차: 처리 대상의 미세 입자(silt, clay) 분리
    - 5차: 분리 후 잔재물(residuals) 선별
  - 물리적 분리 기술의 장점은
    - 유기 오염물질과 중금속을 동시에 처리가 가능
    - 후단 처리 대상 오염물질의 부피를 감량 가능
    - 낮은 단가로 처리 후 유효활용이 가능
    - 분리된 중금속을 별도로 처리 가능
    - 쉽게 모듈화(Module)로 오염 현장에서 설치가 가능
    - 비교적 검증되어 정착된 기술
  - 물리적 분리 기술의 단점은
    - 처리 기술 구현에 많은 장비와 설치 공간이 필요하며,
    - 처리 물량이 증가할수록 처리비용이 증가하며,
    - 처리 과정에서 발생하는 폐액과 잔류 고형물을 처리해야함

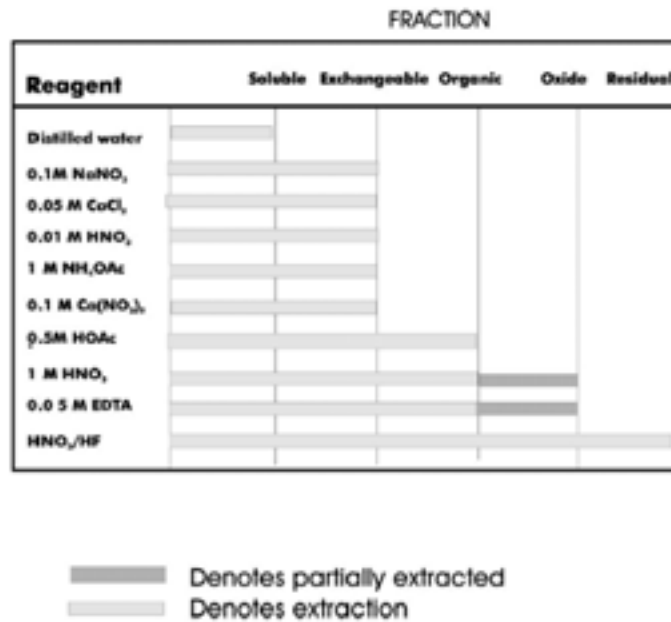
## ② 화학적 세척 처리 기술(Washing / Chemical extraction technologies)

- 화학 첨가제(산/염기, 계면활성제, 킬레이트제, 염, 산화/환원제 등)를 사용하여 오염물질
-



(유기물, 중금속 등)을 매질(퇴적물/토양)로부터 수용액 중으로 용출시켜 분리하여 제거하는 기술

- 화학적 세척처리에 주로 사용되는 화학첨가제
  - 산화제, 환원제: 오염물질 특히 금속을 쉽게 용출시킬 수 있음
  - 계면활성제(Surfactant): 극성을 띠거나, 유기오염물질 처리에 효과적
  - 산 용출(Acid extraction): 일반적으로 낮은 pH 조건(pH<2)에서 수소 이온(H<sup>+</sup>) 첨가 시 금속 양이온 탈착(금속 석출)이 쉬운 점을 이용하는 처리 방법으로 pH 조정이 처리에 중요한 요소임
  - 화학적 세척 처리에서 첨가제는 오염물질의 성질과 상태에 따라 제한적으로 사용해야 함(그림 II-마-2)
- 사질(sand) 함량에 첨가제(reagent/ complex reagent)의 처리 효율이 영향을 받을 수 있음
- 공정수로 물(tap water)을 사용할 경우 대상 오염물질별로 처리에 제한(한계)될 경우가 있음
- 화학적 세척 처리에 앞선 전처리 시 협잡물(debris)의 탈수는 스크린(screening), 탈수기 등을 사용함
- 일반적으로 우리나라의 해양오염퇴적물 정화사업 현장에서 수거되는 퇴적물은 펌프식 설비로 수거되고, 응집침전 후 분리된 고형물(함수율 약 50% 이상)에 대하여 오염도 저감을 위한 중간처리(세척 등)를 위해서는 추가적인 탈수 처리(약 40% 미만)가 필요함



[그림 II-마-2] 오염물질의 결합 형태에 따른 첨가제의 처리 가능성

- 해양오염퇴적물은 입경 분포가 매우 다양하며, 입경에 따라 밀도, 함수량, 유기물 함량 등 특성이 달라짐. 해양오염퇴적물 처리 시 처리 대상 물질을 오염도 및 입경 분포 등 특성별로 분리한 다음 적합한 방법으로 처리할 필요가 있음
- 화학적 세척 처리의 장점
  - 흡착 형태 오염물질(금속 등) 처리에 용이
  - 금속 화합물을 불용성 형태로 석출시킬 수 있음

- 미세 입자 처리 가능,
- 추출된 금속을 다양한 방법으로 회수 가능

○ 화학적 세척 처리의 단점

- 화학 첨가제 사용으로 단위 물량 당 처리 비용 높아질 수 있음
- 처리 산물의 유효활용 시 생물 영향을 검토할 필요가 있을 경우, 적용에 제한될 수 있음
- 미세입자 또는 잔류 슬러지에 독성 화학물질이 잔류 시 유효활용 제한(최종 처리 필요)됨
- 특정 화학물질을 포함하여 발생 폐액의 처리 및 유효활용 등에 제한 될 수 있음
- 금속 또는 특정 오염물질이 농축된 슬러지의 처리가 곤란함

(나) 관련 처리 기술 국내 동향

- 현재 우리나라의 해양오염퇴적물 처리와 관련된 기술 동향을 표 II-마-1에 정리함

[표 II-마-1] 우리나라의 해양오염퇴적물 처리 관련 기술 동향 (최근 10년 기준)

번호	특허권자	발명자	출원일/ 등록일	기술 명칭	요약
1	(주)에바라제작소	가 타 오 카 나 오 아 키 외 4명	1999.8.5 / 2005.3.10	할로겐화 유기화합물에 의한 오염물을 정화하는 방법	환원제 및 중속영양형 혐기성 미생물의 영양원을 오염물에 첨가하는 공정을 가지는 할로겐화 유기화합물에 의한 오염물을 정화하는 방법 (간접 관련)
2	(주)서해건설	정 연 규 외 3명	2002.3.5 / 2004.9.7	퇴적 준설물의 경량화에 의한 난분해성 물질의 처리시스템 및 방법	하천, 해안 및 폐쇄성 수역의 오염 퇴적 준설물의 처리 장치, 하이드로사이클론, 부상탑, 제 1 슬러리 생물반응기, 제 2 슬러리 생물반응기로 구성되며, 이를 다시 컨테이너 박스 2개를 사용하여 조립, 통합함으로써 이동식 장치로 제작 개발 (간접 관련)
3	(주)토다공업	가 와 노 주 니 쨌 외 6명	2002.12.2 / 2009.10.5	토양지하수의 정화 처리용 철 입자 그의 제조법 해당철 입자를 포함하는 정화제 그의 제조법 및 토양지하수의 정화 처리 방법	토양, 지하수 정화에 사용될 수 있는 철 입자를 포함하는 정화제 및 처리방법 (간접 관련)
4	(주)후지기소코리아, (주)후지기소공업	엔도 가 즈 히 사 외 1명	2004.3.12 / 2004.7.8	오염토양 개량방법	진공탱크 내에서 에어 버블링을 행하는 경우에, 바깥 기온이 낮은 동절기에도 효율적으로 휘발성 화학물질을 분리시키고 처리시간을 대폭적으로 단축시킬 수 있는 오염토양 개량방법을 제공 (간접 관련)
5	(주)호동전자	김 현 호 외 4명	2004.11.24 /	고농도 오존수를 이용한 난분해성 오염토양 복원방법 및 그 장치	고농도 오존수를 이용한 난분해성(難分解性) 오염토양 복원방법/오염토양, 수질, 폐기물의 유기오염물질 정화가능 (간접 관련)
6	한국지질자원연구원	김 재 곤 외 2명	2007.5.16 / 2009.1.29	오염토양 차단층 및 이를 이용한 기능성 다층객토 복원공법	중금속 상승 차단층, 수분 상승 차단층, 토사유입 차단층으로 이루어지는 오염토양 차단층을 중단에 설치/비소, 6가 크롬등 중금속 용출과 오염악화를 차단 (간접 관련)
7	(주)원텍에이티에스	송현도	2008.3.27 / 2008.9.25	토양 세척장치	오염토양을 파쇄 공극 넓힘, 계면활성제 주입 스크류 이용하여 세척하여 처리 효율을 높임 (간접 관련)
8	(주)대일이앤씨	김주엽	2009.3.20 /	예비 건조기능을 구비한 오염토	폐열을 이용하여 예비 건조기능을 구비한 오염

번호	특허권자	발명자	출원일/ 등록일	기술 명칭	요약
			2012.1.3	양 정화용 열탈착 장치	토양 정화용 열탈착 장치 (간접 관련)
9	(주)큐엔솔루션	김 수 권 외 1명	2009.6.15 / 2010.4.6	미세토양 세척장치 및 방법	1mm 미만 미세토양을 세척, 선별하고, 선별된 미세토양에 함유된 유류, 중금속 제거 효율을 향상시키는 처리방법 (간접 관련)
10	아주대학교산학협력단	오 수 기 외 1명	2009.8.27 / 2012.1.26	마이크로웨이브를 이용하는 오염토양 정화장치	마이크로웨이브를 이용하여 오염토양을 가열 및 에너지를 공급하여 처리효율을 높이는 장치 (간접 관련)
11	(주)대일이앤씨, (주)한라건설	권 영 호 외 1명	2010.2.19 / 2010.5.7	오염 준설토 처리장치 및 그 처리방법	오염된 하천의 미세 준설토를 선별, 정화하여 중금속 처리 효율을 높이는 처리방법 (간접 관련)
12	(주)지오엔지니어링, 어영식	이 흥 규 외 1명	2010.4.27 / 2010.12.1	원위치 토양의 오염정화방법	시추천공기를 이용 천공 후 정화제가 혼합된 물을 가압하여 공기와 함께 분사시켜 오염토양을 정화하는 방법 (간접 관련)
13	(주)삼우이엔지, (주)케이에스티	백용기	2010.5.3 / 2010.10.13	오염토양 세척 선별장치	유류, 중금속 등 복합 오염토양을 고압으로 세척 및 물리적 충격을 유발시켜 처리하며, 세척수를 처리 후 재사용하는 장치 (간접 관련)
14	(주)금호기술검사	김 영 채 외 1명	2010.5.25 / 2010.8.23	이동 설치가 가능한 오염토양 고층야적식 정화장치	유류 및 화학물질에 의해 오염된 토양을 처리하기 위한 이동 설치가 가능한 고층야적식 정화장치 (간접 관련)
15	아주대학교산학협력단	오 수 기 외 1명	2010.11.26 /	열 탈착에 의한 유류오염 토양 정화장치	유류 오염토양을 가열하여 오염물질을 증발시킨 후 이를 냉각시켜 배출시키는 처리장치 (간접관련)
16	정석권	정 석 권 외 1명	2011.1.12 /	수중 오염 퇴적토 현장 정화장치	수중 오염 퇴적토를 원위치에서 처리제를 투입하여 고형화, 안정화 시키는 처리장치 (간접 관련)
17	(주)신강하이텍	조 성 주 외 1명	2011.2.7 /	오염토양 정화방법	오염토양을 입경별로 선별한 다음 고온 증기를 주입하여 정화시키는 방법 (간접 관련)
18	(주)코오롱건설	이 승 철 외 1명	2009.5.15 / 2011.7.7	오염토양 오염물질 분리 및 정화장치	오염토양에 공기 또는 세척수를 분사하는 복수의 분리 매체 분사노즐을 포함하는 분리 및 정화장치 (간접 관련)
19	(주)코오롱글로벌, (주)코오롱위터엔에너지, (주)동명엔터프라이즈	배 종 현 외 1명	2011.3.31 /	오염토양 처리방법 및 시스템, 오염토양 선별 트로멜	사격장 오염토양에서 입자 크기별로 오염물질을 효율적으로 선별하기 위한 장치 및 방법 (간접 관련)
20	김종윤	김종윤	2011.9.14 / 2011.10.14	입자분리 플랜트와 토양개량 플랜트를 이용한 준설토의 재활용 처리장치 및 이를 활용한 재활용 처리 방법	하천 준설토를 매립, 투기 등으로 재활용 하기 위한 처리장치 및 방법 (간접 관련)
21	(주)한라건설, (주)큐엔솔루션, 서울대학교산학협력단	권 영 호 외 1명	2010.9.1 / 2011.4.27	준설토 재활용 확대를 위한 오염 퇴적토 처리 방법 및 처리 시스템	유기물 및 중금속 등으로 오염된 준설토를 처리하여 최종 처리 량을 감축하고 재활용을 극대화시키는 처리 방법 및 장치 (간접 관련: 오염도가 높은 세립질의 경우 함유된 오염물질의 고도 처리에는 제한됨)
22	(주)브릭필드	정 은 용 외 1명	2010.7.13 / 2010.12.13	준설토 및 슬러지를 재활용한 친환경 점토 벽돌 및 이의 제조방법	준설토를 재활용한 점토 벽돌 및 제조방법 (간접 관련)
23	(주)한국하이테크	강수호	2010.2.23 / 2012.7.12	강하류 퇴적토의 처리방법	하천 준설토물질을 폐기물과 유기물 등으로 분류하여 폐기물은 열분해시켜 탄화물을 생성하고, 준설토에 함유된 오염물질을 처리하는 방법

번호	특허권자	발명자	출원일/ 등록일	기술 명칭	요약
					(간접 관련)
24	김중윤	김중윤	2011.9.14 / 2011.10.14	입자분리 플랜트와 토양개량 플랜트를 이용한 준설토의 재활용 처리장치 및 이를 활용한 재활용 처리 방법	하천 준설토를 입도별로 선별하고 토양개량하여 재활용하기 위한 처리장치 및 방법 (간접 관련)
25	(주)시원해양	남찬열	2010.10.11 / 2011.6.8	오염된 토양 및 수환경 퇴적물 정화용 생물복합제	미생물에 필요한 영양제, 산소 발생제 및 다공성 담체를 혼합하여 제조하는 퇴적물 정화용 생물복합제 (간접 관련)
26	(주)미래지앤씨	최 돈 혁 외 1명	2010.12.6 / 2011.6.1	복합소재 매트리를 이용한 해양오염퇴적물의 현장 캐핑 처리장치	오염된 퇴적층 위해 처리소재를 충진한 매트를 배치하여 퇴적물로부터 인 용출을 억제하고 퇴적물을 안정화시키는 처리장치 (간접 관련)
27	(주)포스코	박 광 석 외 1명	2001.12.22 / 2008.3.17	준설토 퇴적물의 처리 방법	준설토를 인접 해역에 투기한 다음 그 위에 제강 슬래그 및 고로 수재 슬래그를 복토하여 오염물질 용출을 억제하는 처리방법 (간접 관련)
28	(주)선양, 주영호	주영호	2006.8.16 / 2007.11.20	전기분해장치가 구비된 해양 오니 준설토 후처리 선 및 해양 오니로부터 발생된 해수 처리 방법	어항, 양식장 등 해역 퇴적물을 수거하여 처리하는 후처리 선박 및 처리공정 발생 폐수를 처리하는 방법 (간접 관련: 오염도가 높은 준설토의 경우 처리에 제한됨)
29	(주)에이치엔지엔이, (주)해양연구개발	강 장 원 외 1명	2010.5.25 / 2010.8.5	어장정화, 항로준설토 및 다양한 준설토사업 중 발생하는 준설토 퇴적물을 선별, 침전, 탈수, 여과기를 사용하여 정화시키는 방법	하천, 호수 수저 준설토를 선별, 침전, 탈수, 여과를 사용하여 정화하는 방법 (간접 관련: 오염도가 높은 세립질의 경우 처리에 제한됨)
30	(주)큐엔솔루션, (주)한라건설	김수곤	2009.8.7 / 2010.8.17	자기장을 이용한 중금속 오염 미세토양 슬러리 정화 방법	미세토양 슬러리에 분산제를 투입 분산시킨 다음 자기장을 이용 중금속 함유 광물입자를 분리하는 정화 방법 (간접 관련: 오염물질의 자성 특성에 따라 분리될 수 있음)
31	한국해양연구원	김 상 진 외 4명	2003.4.22 / 2005.11.10	전자수용체 처리를 통한 퇴적토의 생물학적 정화방법	퇴적물은 원위치에서 혐기성 상태이므로 이를 이용 전자수용체 처리를 통한 생물학적 정화방법 (간접 관련)
32	(주)포스코, (재)포항산업과학연구원	이충일	1999.8.10 / 2004.3.5	제강 슬래그를 이용한 수저 퇴적토양 오염물질 정제방법	수저 퇴적물 위에 제강 슬래그를 살포하여 오염물질의 용출을 억제하고, 적조 발생 휴면포자의 발아를 억제하는 정제방법 (간접 관련)
33	(주)코스코, 최종규, 장순옥	장 순 옥 외 1명	2010.1.6 / 2013.3.18	친환경 이동식 준설토 퇴적토의 고화처리장치 및 방법	수저 퇴적물을 흡입펌프로 흡입한 후 정화한 다음 발생하는 합수율 50-60% 케익을 고화제 등을 첨가, 성형하여 블록, 경량토, 벽돌, 인공어초 등을 재활용하는 방법 (간접 관련)

## (2) 입자분리 기반 처리기술 검토 및 단위 공정 개발

### (가) 입자분리 기반 처리기술

#### ① 개요

- 오염토양 정화 기술의 적용 시 고려해야 할 매질(퇴적물, 토양)의 물리적 특성
  - 입자크기
  - 총 밀도
  - 입자 밀도

- 수분함량
- 투수성
- 토양 복원 처리 기술의 선정에 있어서 입자의 크기는 가장 우선시 고려해야할 특성중의 하나
  - 해양오염퇴적물의 정화기술 선정 시에도 역시 입자의 크기가 중요한 부분
  - 공정설계 시 입자분리에 대한 고려가 필수적임

[표 II-마-2] 토양의 복원기술 선정 시 고려하여야 할 토양의 특성 중 물리적 특성 (환경부, 2002)

특성	처리기술				
	물리적 처리	화학적 처리	생물학적 처리	열처리	고형화/안정화
입자크기	●	○	○	●	●
총 밀도	○			●	
입자 밀도	●				
수분함량	○		●	◐	◐
투수성	●		●		

●:기술 선정에 최 우선순위, ◐:두 번째 우선순위, ○:기술에 따라 효력이 다름, 기호 없음: 큰 영향 없음

(나) 상용 처리기술 및 장치의 한계

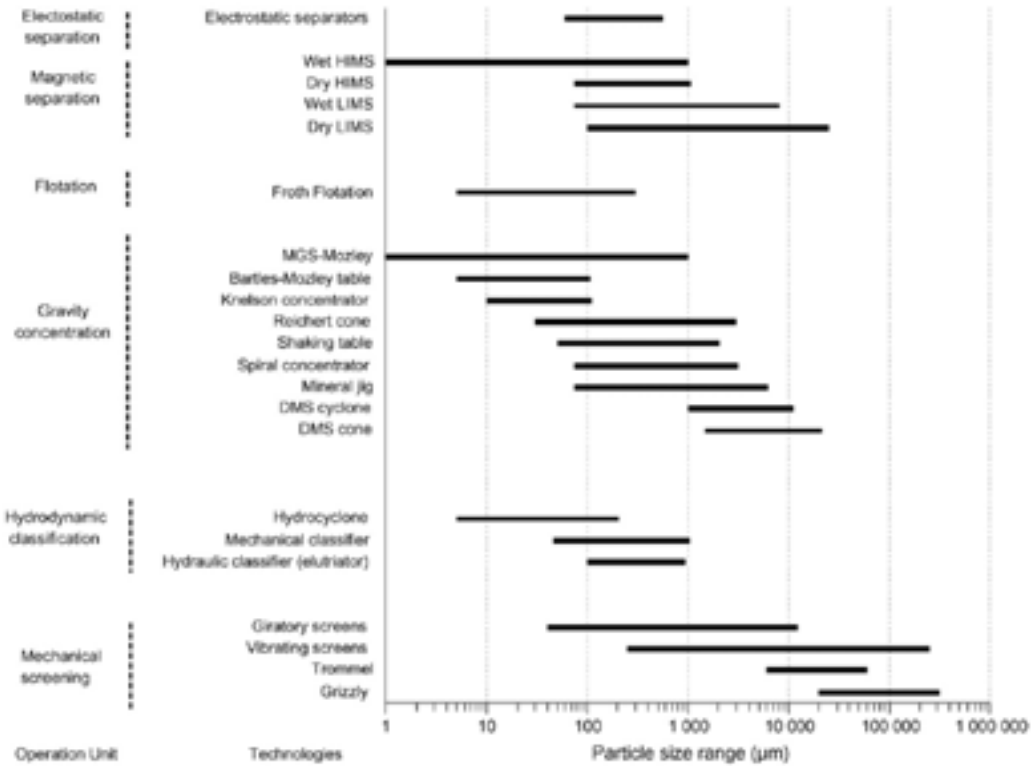
① 상용 처리기술

- 입자 분리를 위한 기술은 현재 많은 방법이 연구되거나 개발되어 있음
- 입자의 크기 뿐 아니라 각 입자들의 성질의 차이점을 이용하여 정화대상을 분리하는 방법들이 상용중임
- 상용 처리기술은 분리 원리에 따라 크게 나누면 mechanical screening, hydrodynamic classification, gravity concentration, froth flotation, magnetic separation, electrostatic separation, and attrition scrubbing이 있으며, 이에 대한 요약은 표 II-마-3에 나타내었음
- 입자 분리 시 각 공정별 분리 가능 범위가 다르므로 공정 적용 시 고려해야함

[표 II-마-3] 상용 입자분리 기술의 분리 원리에 따른 분류 및 주요 내용

Operation unit	Basic principle	Description and main objectives	Comments	Typical technologies implemented
Mechanical screening	Separation based on particle size	Mechanical screening uses size exclusion through a physical barrier to provide suitable dimensions for treatment	Widely used. Fine screens are fragile	Vibrating grizzly; barrel trommel; vibrating or gyratory screens

Hydrodynamic classification	Separation based on settling velocity	Hydrodynamic classification separates the particles by difference of settling velocity or by centrifugal force into a water flow. These methods are often used for size separation	Widely used. Difficult when clay and humic soils are present	Hydrocyclones, elutriators, mechanical classifiers (screw classifier)
Gravity concentration	Separation based on density of particles	The gravity concentration technologies separate high density from low density minerals or particles in a slurry of water and soil (relatively high solid content)	Widely used. Difficult when clay and humic soils are present	Spiral concentrator, shaking table, jig, MGS-Mozley, dense media separation (DMS)
Froth flotation	Separation based on hydrophobic properties of the surface of particles	The differences in hydrophobic properties of particle surfaces are exploited to separate certain minerals from soil by attachment to air bubbles injected in a pulp (low solid content)	Widely used. Chemical additives are required	Flotation in cell or in column (agitation or nonagitation system)
Magnetic separation	Separation based on magnetic properties of particles	Mineral particles are separated according to their different magnetic susceptibilities	Moderately used. High capital and operating costs	Dry or wet separators using high intensity (HIMS) or low intensity (LIMS)
Electrostatic separation	Separation based on electrical conductivity properties of particles	The separation is based on the difference in the surface electrical conductivity of the particles to be separated	Rarely used. Materials must be completely dry	Electrostatic and electrodynamic separators
Attrition scrubbing	Mechanical particle-to-particle scrubbing	Attrition scrubbing uses high energy agitation of soil slurry (high solid content) to remove coating of particle surface and to disperse soil aggregates	Widely used. Pre-treatment that improves separation process	Various types of scrubbers



DMS= Dense media separation; HMS= High intensity magnetic separation; LIMS= Low intensity magnetic separation; MGS= Multi gravity separator

[그림 II-마-3] 다양한 장치에 따른 분리 가능 범위

## ② 상용기술과 장치의 한계 및 입자분리 기반 처리기술 개발의 필요성

- 상기의 상용 공정 기술들은 대부분 해양오염퇴적물이 아닌 육상의 토양을 주 대상으로 개발되어 있음
- 해양퇴적물은 토양이나 하천 퇴적물에 비해 입자가 작은 니질(silt, 4-63 µm) 과 점토질 (clay, <4 µm)의 비율이 높음
  - 기존 오염 우려 해역 조사결과 10개 해역에서 Silt는 40.1%, Clay는 38.0%(해양수산부, 2007)
- 육상 오염토양 정화에서는 미세입자(<75µm)를 분리하여 일반적으로 폐기물 매립장에서 처분하므로, 미세입자(<75µm)의 함유량이 많은 해양오염퇴적물의 정화에 그대로 적용하는 데는 한계가 있음
- 국내에서 해양오염퇴적물 정화사업에 이런 상기의 기술들을 사용한 사례가 없음
- 해양오염퇴적물 정화공정에 적합한 입자분리 기술에 대한 선별, 개선 혹은 개발이 필수적 임

## (다) 입자분리 기반 처리기술 개발에 대한 메커니즘 개발

### ① 개요

- 연구목적
  - 해양오염퇴적물 현장처리를 위하여 실제 공정 적용 시 가능한 입자의 분리 범위를 파악

- 
- 대상해역의 입경범위별 오염특성에 적합한 적용 공정 선별·개발하고자 함

### ② 연구개발의 중요성 및 고려사항

- 토양 복원 처리 기술의 선정에 있어서 입자의 크기는 가장 우선시 고려해야할 특성중의 하나임
- 오염 토양이나 오염 퇴적물의 입자의 크기에 따라 오염물질의 분포의 특성에 큰 차이를 보임
  - 미세 입자는 상호간 흡착하려는 경향이 있음
  - 입경이 작아질수록 표면적이 증가하므로 오염물질들이 흡착 또는 결합하기가 용이함
  - 퇴적물의 입경이 작아질수록 오염도는 상대적으로 증가하게 됨
- 각 입자크기의 부분마다 알맞은 정화공정을 적용하는 것이 효과적인 결과를 기대할 수 있음
- 수거 예정 해양오염퇴적물의 정화공정 설계 시 입자를 크기별로 분리하는 입자분리에 대한 고려가 필수적임
- 입자분리 공정방법의 선정 시 고려사항
  - 적용할 퇴적물의 분량
  - 적용할 퇴적물의 성분특성
  - 처리 산물의 회수 방법
  - 공정 적용시설 설치 장소

### ③ 실험방법

#### ㉠ 대상해역 선정 및 대상해역의 오염퇴적물의 입자 분리 실험

- 대상해역에서 채취된 오염퇴적물 균질화
  - 균질화된 오염퇴적물 동결건조기를 이용하여 건조
  - 건조된 오염퇴적물의 재 균질화
  - 자동 체질기(Vibratory Sieve Shaker, Fritsch, Germany)를 이용하여 시료의 입자 분리 (그림 II-마-4)
  - 해양퇴적물에 우세하는 사질 이하 크기의 미세토를 입자 크기별로 분리하기 위해 >1 mm, >500  $\mu\text{m}$ , >250  $\mu\text{m}$ , >125 $\mu\text{m}$ , >63  $\mu\text{m}$ , >32  $\mu\text{m}$ , <32  $\mu\text{m}$ 로 입경범위별로 분리
  - 각 입도범위 별로 오염도 및 오염물질 (화학적산소요구량(COD), 산화발성황화물(AVS), 강열감량(IL), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN), 알루미늄(Al), 철(Fe), 망간(Mn), 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 비소(As), 수은(Hg))을 분석함
-





[그림 II-마-4] Vibratory Sieve Shaker, Fritsch, Germany

㉔ 대상오염퇴적물의 분리된 입자의 입경별 오염도 평가

■ 입자의 입경별 부영양화 관련물질의 오염도 평가

- 퇴적물의 화학적산소요구량(COD), 강열감량(IL), 산취발성황화물(AVS)이며, 유기물의 총량을 총유기탄소(TOC) 함량으로 오염도 평가
- 항목별 오염도에 따라 평가한 점수에 따라 부영양화 정화지수(CIET)를 산정(국토해양부, 2011)
- 부영양화관련물질의 오염도 평가 항목 및 총유기탄소 함량은 입자별로 >125 $\mu\text{m}$ , >63 $\mu\text{m}$ , >32 $\mu\text{m}$ , <32 $\mu\text{m}$  으로 구분하여 분석하였으며 입자분리전의 전체 퇴적물(bulk sediment)에서도 분석하였음

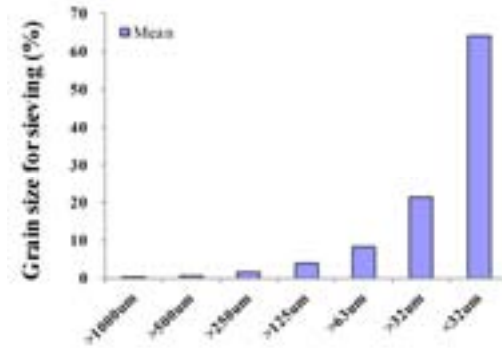
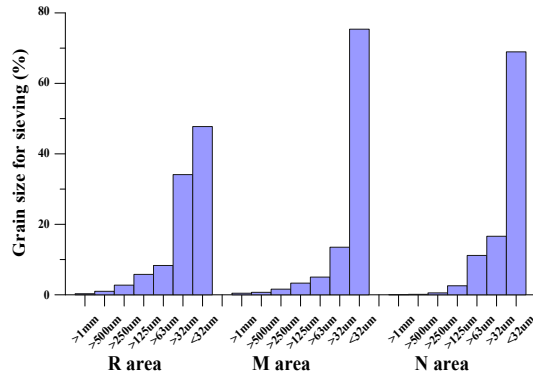
■ 입자의 입경별 유해화학물질의 오염도 평가

- 퇴적물의 크롬(Cr), 니켈(Ni), 구리(Cu), 아연(Zn), 비소(As), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 수은(Hg), 다환방향족탄화수소(PAHs), 폴리클로리네이티드비페닐(PCBs)함량으로 오염도 평가
- 유해화학물질 관련 물질의 오염도 평가 항목 및 총유기탄소 함량은 입자별로 >125 $\mu\text{m}$ , >63 $\mu\text{m}$ , >32 $\mu\text{m}$ , <32 $\mu\text{m}$  으로 구분하여 분석하였으며 입자분리전의 전체 퇴적물(bulk sediment)에서도 분석하였음
- 유해화학물질 관련 물질은 항목별 오염도에 따라 평가한 점수에 따라 유해화학물질 정화지수(CIHC)를 산정(국토해양부, 2011)

(라) 실험결과 및 고찰

① 입자분리 실험 결과

- 대상해역의 입도별 분리 결과를 표 II-마-4과 그림 II-마-5에 나타내었음
- 해역“R” : 125  $\mu\text{m}$  이상의 퇴적물 9.8%, 63  $\mu\text{m}$ 이상 8.3%, 32  $\mu\text{m}$ 이상 34.1%, 32  $\mu\text{m}$ 이하 47.8%
- 해역“M” : 125  $\mu\text{m}$  이상의 퇴적물 6.1%, 63  $\mu\text{m}$ 이상 5.0%, 32  $\mu\text{m}$ 이상 13.5%, 32  $\mu\text{m}$ 이하 75.4%



<각 해역별 입도 분포>

<입도 분포 평균>

[그림 II-마-5] 대상 해역의 입자 분리 결과 입도 분포 및 평균

- 해역“N” : 125 µm 이상의 퇴적물 3.3%, 63 µm이상 11.2%, 32 µm이상 16.6%, 32 µm이하 68.9%
- ⇒ 대상해역 평균 63 µm이상의 퇴적물 14.6%, 32 µm이상 21.4% 32 µm이하 64.0%

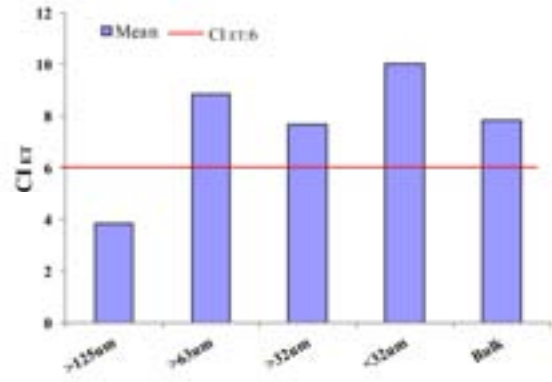
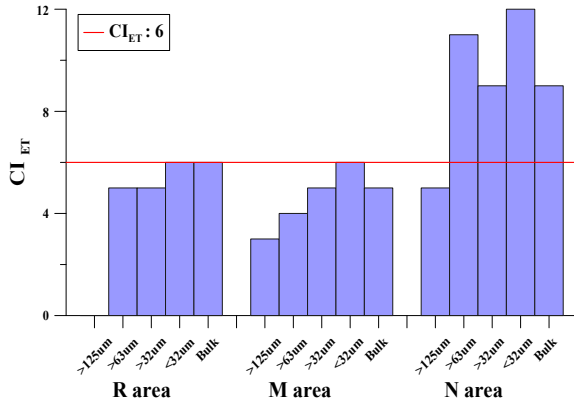
[표 II-마-4] 대상해역의 입도별 분리 결과

Size	R	M	N	Mean
	%	%	%	%
>1mm	0.3	0.4	0.1	0.3
>500µm	1.0	0.7	0.1	0.6
>250µm	2.7	1.6	0.5	1.6
>125µm	5.8	3.3	2.6	3.9
>63µm	8.3	5.0	11.2	8.2
>32µm	34.1	13.5	16.6	21.4
<32µm	47.8	75.4	68.9	64.0

② 대상오염퇴적물의 분리된 입자의 입경별 오염도 평가

㉞ 대상오염퇴적물의 분리된 입자의 입경별 부영양화 오염도 평가

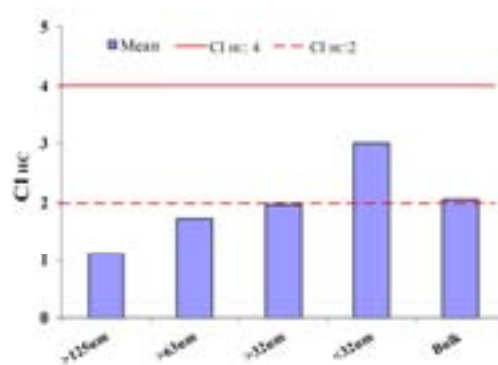
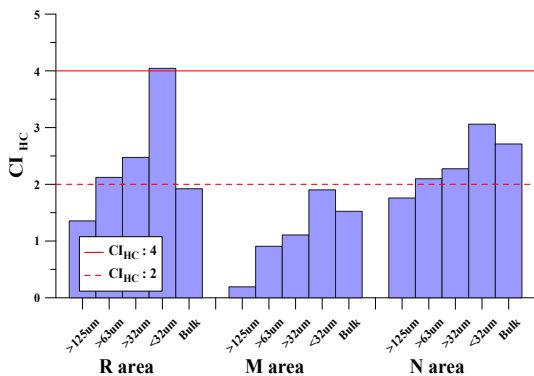
- 대상해역의 부영양화 정화지수(CIET)를 이용하여 오염도 평가(그림 II-마-6)
- 각 해역의 입자크기별 퇴적물의 부영양화 정화지수(CIET)의 분포는 R해역에서 0-6, M해역에서 3-6, N해역에서 5-12의 범위로 나타남
- 대상해역 모두 입자가 세립 할수록 부영양화 정화지수(CIET)가 증가하는 경향을 보이고 있으며, N해역에서 가장 높은 값을 나타냈음
- 모든 해역의 <32µm이하 퇴적물에서 부영양화 정화지수(CIET)가 정화·복원 기준농도인 6 이상의 값을 나타내었으며, N해역의 경우 >63µm, >32µm, <32µm의 퇴적물의 부영양화 정화지수(CIET)가 정화·복원 기준농도인 6이상의 값을 보였음
- 입자별 오염도 평가 결과 >63µm, >32µm, <32µm의 부영양화 정화지수(CIET)의 평균이 정화·복원대상인 부영양화 관련 정화·복원 기준농도 6이상의 값을 보였음
- ⇒ 오염퇴적물의 >63µm, >32µm, <32µm의 입도범위에 부영양화 관련물질의 정화처리가 필요한 것으로 판단됨



<각 해역별 부영양화 정화지수> <입자별 부영양화 정화지수 평균>  
**[그림 II-마-6] 각 해역의 입자별 부영양화 정화지수(CIET) 및 평균**

㊤ 대상오염퇴적물의 분리된 입자의 입경별 유해화학물질 오염도 평가

- 대상해역의 입도별 유해화학물질 정화지수(CIHC)를 이용하여 오염평가 (그림 II-마-7)
- 각 해역의 입자크기별 유해화학물질 정화지수(CIHC) 분포는 R해역에서 0-6, M해역에서 3-6, N해역에서 5-12의 범위를 나타내었음
- 대상해역 모두에서 입자가 세립 할수록 유해화학물질 정화지수(CIHC)가 증가하는 경향을 보이고 있으며, N해역에서 가장 높은 값을 나타냈음
- 모든 해역의 <32µm이하 퇴적물에서 유해화학물질 정화지수(CIHC)가 정화·복원 기준농도1인 2이상의 값을 나타내고 있으며, N해역의 경우 >63µm, >32µm, <32µm의 퇴적물에서 유해화학물질 정화지수(CIHC)가 정화·복원기준농도2인 4이상의 값을 보였음
- 입자별 오염도 평가 결과 >32µm, <32µm의 유해화학물질 정화지수(CIET)가 평균이 퇴적물에서 정화·복원 기준농도1인 2이상의 값을 보였음
- 입자가 세립 할수록 유해화학물질 정화지수(CIHC)가 증가하는 경향을 보임  
 ⇨ 오염퇴적물의 >32µm, <32µm의 입도범위가 유해화학물질의 정화처리 필요 범위인 것으로 나타남

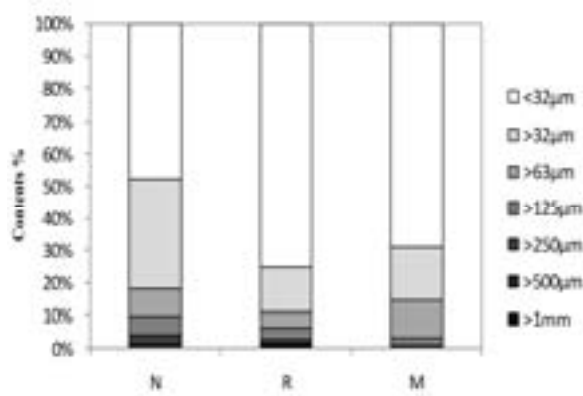


<각 해역의 유해화학물질 정화지수> <입자별 유해화학물질 정화지수 평균>  
**[그림 II-마-7] 각 해역의 입자별 유해화학물질 정화지수(CIHC) 및 평균**

(마) 입자분리 공정 메커니즘 개발

### ① 입자분리의 범위 선정

- 일반적으로 국내의 연안 및 해양퇴적물은 사질, 니질(silt, clay)이 우세하게 분포 하고 있으며, 지형적인 특성에 따라 서해안 연안은 사질이 90%이상, 대륙붕 및 황해 중앙수역으로 갈수록 실트와 점토 함량이 90%이상, 동해안은 연안지역에 사질이 우세하며 외해 쪽으로 갈수록 실트질의 비율이 증가하며 세립해지는 경향을 보임

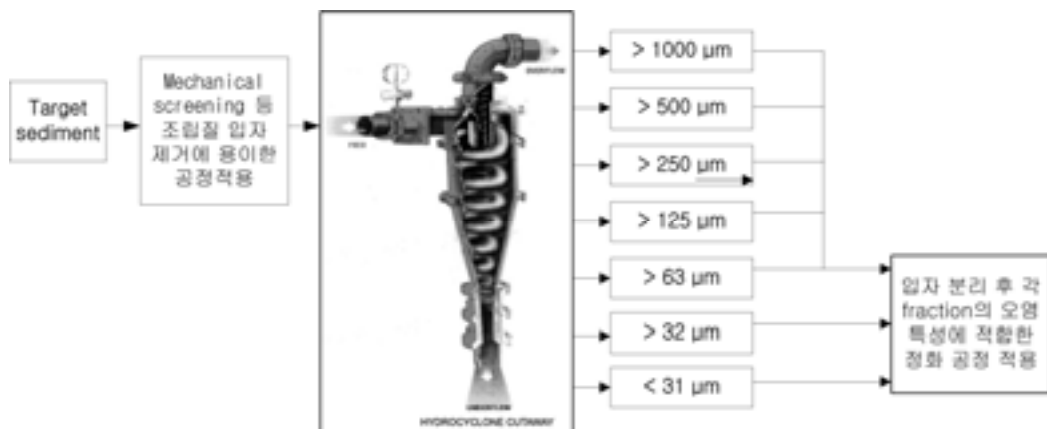


[그림 II-마-8] 대상해역 퇴적물의 입경별 상대적인 분포

- 토양의 정화복원에 고려되는 입도분포와는 다른 해양 오염퇴적물에 우세한 입도인 세립사질(very fine sand) 및 니질(silt, clay)에 대한 고려가 매우 중요함
- 대상해역의 125µm 이상의 퇴적물의 비율을 평균 20%이하, <125µm의 퇴적물이 80%이상으로 우세하였으며, <32µm 40%이상을 차지하였음 (그림 II-마-9)
- 공정상 물리적으로 분리 가능한 입자크기는 < 20 µm임
- 63 µm 이하의 sediment 중 <31, 31-63, >63 µm fraction의 PCBs, PBDE의 오염물질 분포도도 높은 것으로 나타남
- 4 µm 이하(clay의 분리)의 입자분리는 콜로이드 입자와 유사하여 분리 및 처리가 매우 어려우므로 공정상 의미가 없음
- 입자분리공정은 공정이 많을수록 처리비용 및 현장처리 공간 증가
- 기존 오염 우려 해역 조사결과 10개 해역에서 평균 Silt는 40.1%, Clay는 38.0%로 미세입자가 78.1%임
- 대상 해역 퇴적물 중 32 µm 이하 입자의 양은 평균 64.0%이며, 32 µm 이상은 21.4%이며, 각각의 오염도(COD 농도)는 16.9 mg/g, 4.0 mg/g임. 주요 처리 대상이 되는 미세입자를 기준(100%)으로 입경별 양과 오염도를 함께 고려할 경우 각각의 비율은 78.2%, 21.8%임
- 대상 해역에서 처리대상 미세입자의 범위를 32 µm 이상으로 할 경우, 처리 대상 미세입자 중 평균 21.8% 저감 가능
  - ⇒ 실질적으로 63µm 이상, 32 µm 이상, 32 µm 이하의 범위로 입자분리를 하는 것이 용이할 것
  - ⇒ 그러므로 입경별 부영양물질 분포 및 공정의 용이성, 비용의 절감을 위하여 입자분리의 범위를 63µm 이상, 32 µm 이상, 32 µm 이하의 범위로 선정하는 것이 가장 효율적이라고 판단됨
  - ⇒ 국내 상용 정화기술을 사용할 경우, 미세입자에 대한 처리가 불가능하므로 대비본 연구에서 개발될 기술은 상용 기술 대비 21.8% 이상 해양퇴적물 처리 효율 확보

## ② 입자분리 처리기술 공정방법 선정 및 메커니즘 개발

- 해양오염퇴적물의 입도분포를 고려할 때 125 $\mu\text{m}$ -32 $\mu\text{m}$  이하의 입자분리에 용이해야함
- 정화를 위해 수거된 해양오염퇴적물의 현장처리과정상 함수유과 함니율을 고려하여 적용할 수 있어야 함
- 미세입자 처리 시 건·습식 모두 적용 가능한 공정이 용이
- 이론적으로 하이드로 싸이클론을 이용한 입자분리의 입자분리 시 가능범위는 한계분리입경(d50)이 10  $\mu\text{m}$  정도
- 미세입자 분리의 경우, 수력 싸이클론/중력 농축기(Gravity concentrators) 사용 시 약 63 ~ 2,000  $\mu\text{m}$  까지 분리 가능
  - ⇒ 퇴적물을 입자분리 시 험잡물(Debris) 및 자갈 등(Over sized gravel etc.)을 상용 장치로 분리한 다음 실제 처리할 입경별로의 분리는 몇 단계로 입경별 분리가 가능한 다단 하이드로 싸이클론으로 분리하는 것이 적합함
  - ⇒ 입자분리 공법 중 하이드로 싸이클론방식이 가장 입도한계범위가 유동적이며 비교적 입자가 작은 범위까지 분리하기가 가장 용이하므로 해양오염퇴적물의 미세 입자 분리에 가장 적합한 것으로 보임
  - ⇒ 수거된 정화대상 해양오염퇴적물의 입자분리를 위해 개발한 공정 매커니즘은 그림 II-마-9와 같음



[그림 II-마-9] 하이드로 싸이클론을 이용한 입자 분리 메커니즘

## (3) 세척 기반 처리기술 조사, 검토 및 단위 공정 개발

### (가) 세척 기반 처리기술 조사·검토

#### ① 개요

- 세척기반 기술(Soil washing)은 토양 정화공법으로 널리 이용되고 있음
- 세척기반 기술을 이용한 오염물질의 감소 및 제거를 통해 오염지역에 대한 빠른 정화 효과를 기대할 수 있음
- 세척기반 기술은 특정 기준(specific criteria)을 충족시키는데 유용한 장점이 있으며, 장기적인 오염위험을 감소시킬 수 있음
- 세척기반 기술은 비용적면에서 효과적인 측면이 있으며, 처리 공정에서 재활용이 가능한 물질을 만들어 낼 수 있음
- 세척기반 기술에 사용되고 있는 대표적인 기술로는 물리적 분리(physical separation), 화학적 처리(chemical extraction)와 두 기술을 조합한 복합 처리(combination of both) 기

---

술이 있음

- 물리적 분리는 오염물질의 입자와 퇴적물의 입자 사이의 크기, 밀도, 소수성, 표면특성 등의 차이를 이용하여 오염물질을 분리하는 방법임
- 화학적 처리는 오염물질의 지화화학적 특성에 따라 산화, 추출, 흡착 등의 화학적인 기작을 통해 퇴적물에서 오염물질을 제거하는 방법임

## ② 화학적 처리 기술

### ㉠ 계면활성제

#### ■ 계면활성제의 특징

- 두 액체, 또는 액체와 고체 사이의 표면 장력이나 액체의 표면 장력을 낮춰 쉽게 퍼지게 함
- 응집제, 습윤제 발포제, 세제, 분산제, 유화제거제 등으로 널리 이용되고 있음
- 가용성향상, 표면장력감소, 임계미셀농도(CMC), 친수성, 거품형성력 등이 제거효율을 좌우함
- 계면활성제는 양이온계면활성제, 음이온계면활성제, 중성 계면활성제로 구분할 수 있음
- 천연 계면 활성제(bio-surfactant)는 효모나 박테리아를 이용해 설탕, 기름, 알칸 및 폐기물 등 다양한 물질에서 생물학적으로 생산 가능함
- 합성 계면 활성제와 천연 계면 활성제가 모두 유기 오염 물질의 용해도와 이동성을 크게 함
- 계면활성제는 유기 화합물로 오염된 토양의 정화 공정에서 널리 사용되고 있음
- 토양 정화를 위한 바람직한 계면 활성제의 특성은 생분해성을 포함하여, 낮은 독성, 낮은 온도에서의 용해도, 토양입자에 대한 낮은 흡착성, 3% 농도이하에서의 제거효율, 낮은 표면장력과 낮은 임계미셀농도(CMC)등이 있음
- 음이온 및 중성 계면활성제는 토양 입자 표면에 흡착 될 가능성이 적지만 음이온 계면활성제는 침전 될 수 있음
- 오염된 토양에는 임계미셀농도(CMC)값이 상대적으로 낮은 중성 계면활성제 사용이 권장되고 있음

#### ■ 계면활성제 선정 시 고려 사항

- 오염 정화의 효율성과 계면 활성제의 효과
- 계면 활성제 및 분해 산물의 생분해능력
- 인간, 동물, 식물, 생태계에 대한 계면 활성제의 분해 산물의 독성
- 재활용 및 재사용 능력
- 대중의 인식 및 규제 제한
- pH의 변화에 대한 계면 활성제의 기능
- 계면 활성제에 의해 운반되는 전하
- 비용

### ㉡ 산화제

#### ■ 산화제의 특징

- 현장에서 화학 및 미생물학적으로 조작하는 오염 물질의 추출을 향상시켜 독성을 저감시키는 역할을 함
- 산화제의 종류로는 공기, 산소를 포함하여 화학적 산화제로 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 과망간산칼륨(KMnO<sub>4</sub>), 과망간산나트륨(NaMnO<sub>4</sub>), 오존, 염소 등이 있음
- 무기, 유기 및 혼합 오염 물질에 대해 광범위하게 적용되고 있음
- 화학적 산화는 생물학적 정화와 함께 적용 가능하며, 생물학적 분해(biodegradation)를 촉진시키기 위한 초기 처리공정(chemical pre-oxidation)으로 활용되기도 함

### ■ 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

- 일반적으로 3~35 %까지의 농도에서 널리 사용되고 있음
- 매우 강한 비선택적 산화제 (hydroxyl radicals)로 알칸 및 방향족 화합물과 모두 반응함
- 과산화수소가 분해되기 전에 유기 오염 물질의 대부분을 저감할 수 있는지 역학적인 고려가 요구됨
- 과산화수소의 주요 장점으로는 무해하거나 생분해성이며 다양한 유기 오염 물질 분해가 가능하고 상대적으로 저렴한 비용이 들며, 처리가 안전하고 환경 친화적인 산화제임

### ■ 과망간산염

- 과망간산 (MnO<sub>4</sub>)는 약1.7V 표준 산화 전위를 갖는 산화제임
- 과망간산염은 석유계 탄화수소의 정화에 효과적인 것으로 보고되고 있고 현장처리와 공정처리에 널리 적용되고 있음
- 수성 시스템(aqueous system)에서 과망간산염이 분해 반응을 거쳐 과망간산 이온(MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>) 생성되고 과망간산이온이 산화제로 반응함
- 과망간산칼륨 (KMnO<sub>4</sub>) 및 나트륨 과망간산 (NaMnO<sub>4</sub>) 모두 유사한 결과를 나타냄
- 상대적으로 낮은 표준 산화 전위에도 불구하고, 과망간산염은 강력한 산화제로 작용하여 탄소 결합, 이중 탄소 결합, 알데하이드 그룹 또는 수산기를 포함하는 유기물 분자를 분해 할 수 있음
- 과망간산 산화 메커니즘은 오염된 지역에서 매우 복잡한데, 원자가 상태 및 광물 형태에 따라 망간이 관여하는 반응이 많기 때문임

## (나) 세척 기반 처리기술 개발에 대한 메커니즘 개발

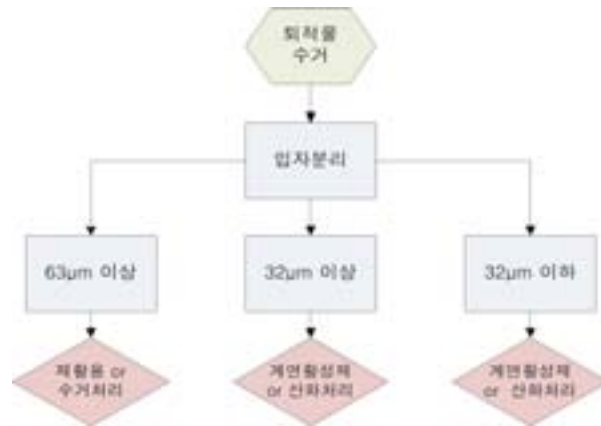
### ① 연구목적

- 해양오염퇴적물 현장처리를 위하여 실제 공정 적용 시 가능한 세척기반 처리기술 파악
- 대상해역의 입경범위별 오염특성에 적합한 세척 공정 선별 및 개발에 목적이 있음

### ② 세척 기반 처리기술 개발

- 오염퇴적물내의 조립입자 및 미세입자는 크기 및 오염물질 분포의 특성에 큰 차이를 보임
- 실험대상 해역의 퇴적물은 육상토양과 달리 실트질이 우세한 세립질 퇴적물로 이루어져 있음
- 퇴적물 입자가 작아질수록 표면적이 증가하고 오염물질들이 흡착 또는 결합하기 용이함

- 실제로 대상해역의 퇴적물에서도 세립질일수록 부영양화 관련 오염물질이 농도가 증가하는 경향을 나타냄
- 작은 미세 입자는 상호간 흡착하려는 경향이 있으므로 계면활성제를 이용하여 부영양화 관련 오염물질을 처리하는 것이 효과적으로 판단됨
- 화학적 산화는 생물학적 정화와 함께 적용 가능하며, 무기, 유기 및 혼합 오염 물질에 대해 광범위하게 적용되고 있으므로 산화제를 이용한 부영양화 관련 오염물질의 처리가 효과적으로 판단됨
- 세척처리 공정방법의 선정 시 고려사항으로는 적용할 퇴적물의 분량, 화학적 처리제 및 분해 산물의 생분해능력 및 독성, 재활용 및 재사용 능력, 비용 등이 있음



[그림 II-마-10] 세척기반 처리기술 공정 흐름도

#### (4) 분리 및 세척 처리기술 통합방안 기초 개발

##### (가) 개요

- 해양오염퇴적물의 입도분포를 고려할 때 125µm-32µm 이하의 입자분리에 용이해야함
- 입자분리 공법 중 하이드로 사이클론방식이 가장 입도한계범위가 유동적이며 비교적 입자가 작은 범위까지 분리하기가 용이: 해양오염퇴적물의 미세 입자 분리에 가장 적합한 것으로 보임
- 입자분리공정은 공정이 많을수록 처리비용 및 현장처리 공간 증가
- 그러므로 입경별 부영양 오염물질 분포 및 공정의 용이성, 비용의 절감을 위하여 입자분리의 범위를 63µm 이상, 32 µm 이상, 32 µm 이하의 범위로 선정하는 것이 가장 효율적이라고 판단됨
- 작은 미세 입자는 상호간 흡착하려는 경향이 있으므로 계면활성제를 이용하여 부영양화 관련 오염물질을 처리하는 것이 효과적으로 판단됨
- 화학적 산화는 무기, 유기 및 혼합 오염 물질에 대해 광범위하게 적용되고 있으므로 산화제를 이용한 부영양화 관련 오염물질의 처리가 효과적으로 판단됨
- 따라서 물리적 입자분리를 통해 63µm 이상, 32 µm 이상, 32 µm 이하의 범위로 퇴적물을 분리한 후 계면활성제와 산화제를 이용한 부영양화 관련 오염물질의 처리 공정의 통합이 적절함

##### (나) 부영양화 관련 오염물질처리를 위한 기초 실험

###### ① 기초 실험 방법

- 대상시료 :R, M, N 해역의 퇴적물 시료



- 실험목적 : 부영양화 관련 오염물질의 입자별 산화 및 분해 가능성 평가 및 적용가능 처리제 선별
- 퇴적물의 입자는 >125 $\mu$ m, >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m 으로 분리
- 퇴적물의 세척기반 기술의 화학적 처리는 계면활성제와 산화제를 이용
- 반응시간은 현장처리 시 적용이 가능한 시간으로 제한
- 산화제 기초 실험
  - 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
  - 1M KMnO<sub>4</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
  - 반응시간: 1h
- 계면활성제 기초 실험
  - 0.5% Triton X-100 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
  - 반응시간: 1h
- 제거효율은 총유기탄소량(TOC), 화학적산소요구량(COD), 강열감량(IL)으로 계산
- 부영양화관련물질 정화·복원지수(Cleanup Index, Eutrophication: CIET) 평가

## ② 기초 실험결과

### ㉠ 총 유기탄소(Total organic carbon, TOC) 제거율

#### ■ 0.5% Triton X-100 처리

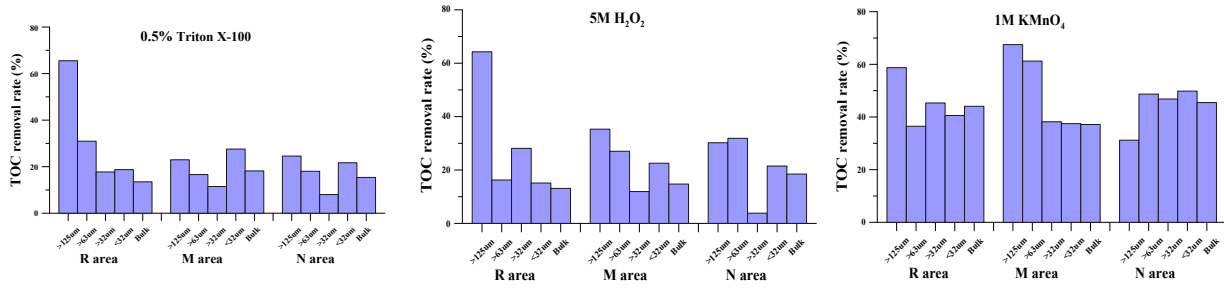
- Triton X-100는 각 대상해역의 벌크 퇴적물에서 13.5 - 18.2%의 TOC 제거율을 보임
- 전 해역의 모든 입경범위별로는 8.0 - 65.5%의 TOC 제거율을 보임
- M 해역 오염퇴적물을 제외한 나머지 해역에서는 >125 $\mu$ m에서 가장 큰 TOC 제거율을 보였으며, >32 $\mu$ m에서 가장 낮은 TOC 제거율을 보임.
- 모든 해역에의 오염퇴적물을 중 <32 $\mu$ m에서 비교적 높은 TOC 제거율을 보임

#### ■ 5M 과산화수소수(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 처리

- 과산화수소수는 각 대상해역의 벌크 퇴적물에서 13.1 - 14.7%의 TOC 제거율을 보임
- 전 해역의 모든 입경범위별로는 3.8 - 64.3%의 TOC 제거율을 보임
- N해역 오염퇴적물을 제외한 나머지 해역에서는 >125 $\mu$ m에서 가장 큰 TOC 제거율을 보였으며, >32 $\mu$ m에서 가장 낮은 TOC 제거율 보임.
- M, R 해역의 오염퇴적물에서 <32 $\mu$ m에서 비교적 높은 TOC 제거효율을 보임

#### ■ 1M 과망간산칼륨(KMnO<sub>4</sub>) 처리

- 과망간산칼륨은 각 대상해역의 벌크 퇴적물에서 37.1-45.5%의 TOC 제거율을 보임
- 전 해역의 모든 입경범위별로는 31.2-67.5%의 TOC 제거효율을 보임
- N해역 오염퇴적물을 제외한 나머지 해역에서는 >125 $\mu$ m에서 가장 큰 TOC 제거율을 보였으며,
- 모든 해역의 오염퇴적물에서 63 $\mu$ m이하의 세립한 입경의 퇴적물에서도 높은 TOC 제거율을 보임
- 과망간산칼륨은 Triton X-100, 과산화수소의 세 가지 중 가장 우수한 TOC 제거효율을



[그림 II-마-11] 각 해역 퇴적물의 입자별 TOC 제거율

㉔ 화학적 산소 요구량(COD) 감소율

■ 0.5% Triton X-100 처리

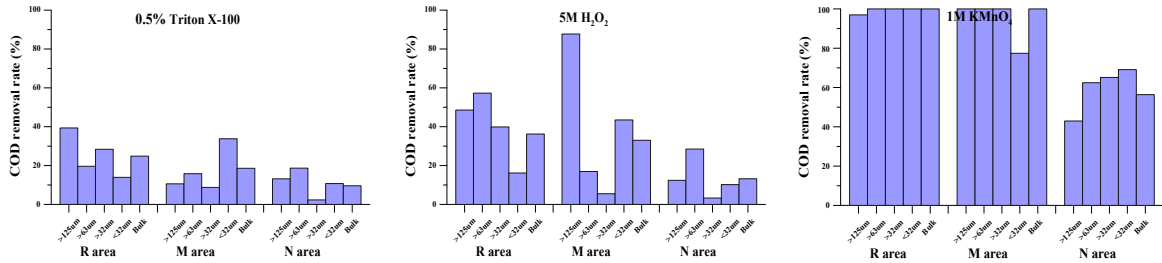
- Triton X-100은 각 대상해역의 벌크 퇴적물에서 9.6 - 24.9%의 COD 감소율을 보임
- 전 해역의 모든 입경범위별로는 2.3 - 39.4%의 COD 감소율을 보임
- 모든 해역의 오염퇴적물에서 입경크기에 따른 COD 감소율의 연관성은 나타나지 않음
- 처리 전 COD 값이 적을수록 높은 처리 효율을 보임

■ 5M 과산화수소수(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

- 과산화수소는 각 대상해역의 벌크 퇴적물에서 13.2 - 36.2%의 COD 감소율을 보였으며, N해역의 제거효율이 가장 낮았음
- 전 해역의 모든 입경범위별로는 3.3 - 87.7%의 COD 감소율을 보임
- R 해역의 오염퇴적물에서 <32 µm의 입경범위에서 가장 낮은 COD 감소율을 보였으며, M, N해역에서는 >32µm에서 가장 낮은 효율을 보임
- 전 해역에서 비교적 입경의 크기가 클수록 높은 제거효율을 보였으며, M해역의 오염퇴적물에서는 <32µm에서도 높은 COD 감소율을 보임

■ 1M 과망간산칼륨(KMnO<sub>4</sub>)

- 과망간산칼륨은 각 대상해역의 벌크 퇴적물에서 56.4 - 100.0%의 높은 COD 감소율을 보였으며, N해역의 제거효율이 가장 낮았음
- 전 해역의 모든 입경범위별로는 43.0 - 100.0%의 COD 감소율을 보임
- R, N 해역의 오염퇴적물에서는 >125µm에서 가장 낮은 효율을 보였으며, M 해역의 오염퇴적물에서 <32 µm의 입경범위에서 가장 낮은 COD 감소율을 보였음
- 과망간산칼륨은 Triton X-100, 과산화수소의 세 가지 중 가장 우수한 COD제거효율을 나타냄



[그림 II-마-12] 각 해역 퇴적물의 입자별 COD 제거율

### ㉔ 강열감량(IL) 감소율

#### ■ 0.5% Triton X-100

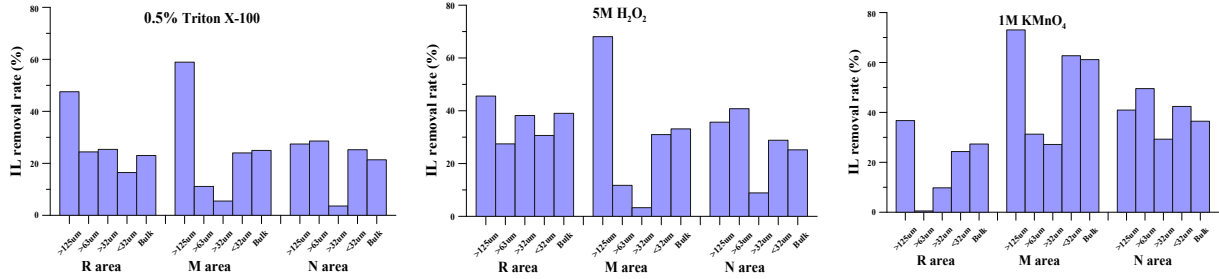
- Triton X-100은 각 대상해역의 벌크 퇴적물에서 21.4 - 25.0%의 IL감소율을 보임
- 전 해역의 모든 입경범위별로는 3.6 - 58.9%의 IL감소율을 보임
- 모든 해역의 오염퇴적물에서 입경크기에 따른 IL감소율의 연관성은 나타나지 않음
- M, N 해역의 오염퇴적물에서 >32µm의 입경범위에서 IL감소율이 가장 낮았으며, R 해역의 오염퇴적물에서는 <32µm의 입경범위에서 IL감소율이 가장 낮았음

#### ■ 5M 과산화수소수(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

- 과산화수소수는 각 대상해역의 벌크 퇴적물에서 33.1 - 39.0%를 보였으며, 벌크시료에서 N해역의 IL감소율이 가장 낮았음
- 모든 해역의 오염퇴적물에서 입경크기에 따른 IL감소율의 연관성은 나타나지 않음
- M, R 해역의 오염퇴적물에서 >125µm의 IL제거효율이 가장 높았으며, M, N 해역의 오염퇴적물에서는 >32µm의 입경범위에서 IL감소율이 가장 낮았음
- 모든 대상해역의 시료에서 <32µm역시 비교적 IL감소율이 높았음

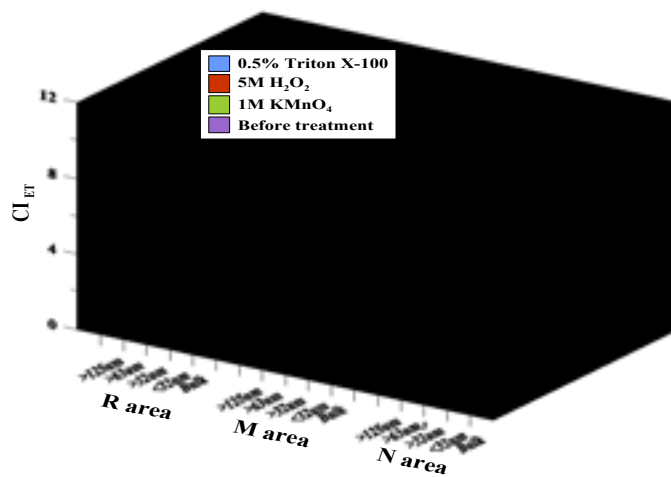
#### ■ 1M 과망간산칼륨 (KMnO<sub>4</sub>)

- 과망간산칼륨은 각 대상해역의 벌크 퇴적물에서 27.3 - 61.2%를 보였으며, 벌크시료에서 R 해역의 IL감소율이 가장 낮았음
- 모든 해역의 오염퇴적물에서 입경크기에 따른 IL감소율의 연관성은 나타나지 않음
- R,M 오염퇴적물에서 >125µm의 IL제거효율이 가장 높았으며, >32µm로 갈수록 IL감소율이 낮아지다가, 모든 대상 해역의 오염퇴적물에서는 >32µm의 입경범위에서 IL감소율이 비교적 매우 높았음
- 전체퇴적물에서는 과망간산칼륨 처리가 가장 우수한 IL감소율을 나타냄



[그림 II-마-13] 각 해역 퇴적물의 입자별 IL 제거율

㉔ 기초실험 후 부영양화 정화지수 비교



[그림 II-마-14] 기초실험 전·후 각 해역 퇴적물의 입자별 부영양화 정화지수

- 정화처리 실험 전의 대상해역의 퇴적물의 부영양화 정화지수에 비해 정화처리 후 모든 해역에서 거의 모든 입경범위의 부영양화 정화지수가 감소한 것으로 나타남
- R, M해역의 시료 중 처리 후 부영양화 정화기준을 초과하는 것은 없었음
- N해역의 과산화수소 및 Triton X-100처리 후 시료는 >63 µm이하의 범위에서 부영양화 정화기준을 초과 하였으며, 과망간산칼륨 처리 후의 모든 시료는 부영양화 정화기준을 초과하는 것은 없었음
- 세 해역 중 N해역의 정화지수 감소율이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 이는 오염형태 즉, 부영양화 관련 유기물질의 존재 형태가 다른 해역과 다른 것으로 추정됨
- 연구에 사용 된 화학처리제 중 과망간산칼륨의 처리 후 대상 시료의 부영양화 정화지수의 감소율이 가장 큰 것으로 나타나, 과망간산칼륨의 정화 효과가 가장 큰 것으로 나타남

③ 기초 실험에 대한 결과 평가

- 부영양화 관련 오염물질 제거효율은 1M 과망간산칼륨이 가장 우수하였음

- 부영양화 관련 오염물질 제거효율은 5M 과산화수소와 계면활성제인 0.5% Triton X-100 는 비슷한 효율을 나타냈음
- 현장처리공정 적용 시 2차 오염, 환경적인 안정성, 공정단가를 고려하면 과산화수소와 계면활성제가 화학적 처리제로 적합한 것으로 판단됨
- 과산화수소와 계면활성제 제거효율을 증가시키기 위해 물리적 처리기술을 고려할 필요가 있으며, 적용가능 한 계면활성제의 종류를 다양화하고 산화제인 과산화수소 농도를 변화 시켜 처리비용을 저감할 수 있는 공정에 대한 기초 실험 필요한 것으로 판단됨(표 II-마-5)

[표 II-마-5] 기초실험을 근거로 계산된 처리비용

처리제	처리제 단가(원)	처리제 소모량	처리 비용(원)	비고
과망간산칼륨(KMnO <sub>4</sub> )	6,000/kg	5.267 kg/ton	31,602	공업용
과산화수소(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	1,900/kg	14.267 kg/ton	27,107	공업용
Triton X-100	35,360/L	0.166 L/ton	5,869	일반시약
Tween®60	37,362/L	0.166 L/ton	6,202	일반시약
Tween®80	41,200/L	0.166 L/ton	6,839	일반시약

(다) 부영양화 관련 오염물질처리를 위한 심화 실험

① 심화 실험방법

- 대상시료 : 부영양화 관련 오염물질의 농도가 높은 N 해역의 퇴적물 시료
- 실험목적 : 부영양화 관련 오염물질의 제거효율 증가 및 최적화 처리공정 도출
- 퇴적물의 입자는 >125 $\mu$ m, >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m 으로 분리
- 적용 가능한 세 가지 종류의 계면활성제와 산화제인 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)의 농도를 변수로 함
- 전처리(pre-oxidation) 및 반응성 향상을 위한 미세기포(micro bubble: 100 $\mu$ m 이하)공정 추가
- 1차 기초실험과 같이 반응시약 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
- 반응시간은 현장처리 시 적용이 가능한 시간으로 제한
- 계면 활성제 종류
  - 0.5% Triton X-100, 0.5% Tween 60, 0.5% Tween 80
- 과산화수소 농도
  - 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
- 미세기포 + 계면활성제
  - 0.5% Triton X-100 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
  - 0.5% Tween 60 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
  - 0.5% Tween 80 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
- 미세기포 + 1% 과산화수소 + 계면활성제

- 0.5% Triton X-100 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
- 0.5% Tween 60 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
- 0.5% Tween 80 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
- 1% 과산화수소 + 계면활성제
  - 0.5% Triton X-100 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
  - 0.5% Tween 60 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
  - 0.5% Tween 80 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
- 5 M 과산화수소 + 계면활성제
  - 0.5% Triton X-100 + 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
  - 0.5% Tween 60 + 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)
  - 0.5% Tween 80 + 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 100mL + 각 해역 퇴적물 30 g (건중량)

## ② 심화 실험 결과

### ㉞ 총 유기탄소(Total organic carbon, TOC) 제거율

#### ■ 미세기포와 0.5% 계면활성제로 처리

- 미세기포와 + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 3.9 ~26.4 %의 TOC제거율을 보였음
- 미세기포 + 0.5% Triton X-100의 경우 입경이 클수록 TOC제거율이 높았음
- 미세기포 + 0.5% Tween 60처리의 경우 >63μm의 TOC제거율이 가장 높았음
- 미세기포 + 0.5% Tween 80처리의 경우 >63μm의 TOC제거율이 가장 높았으며, <32μm의 TOC제거율도 비교적 높았음

#### ■ 미세기포와 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제로 처리

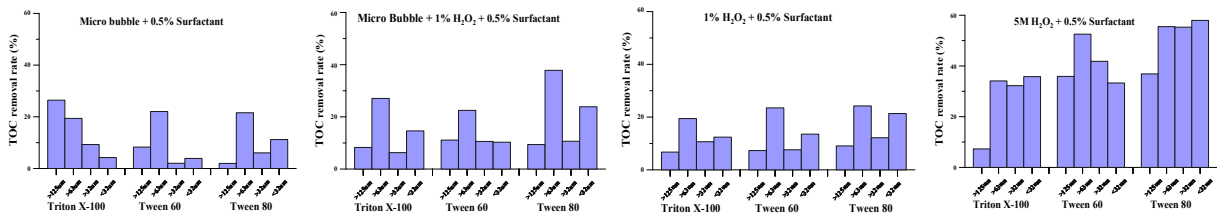
- 미세기포와 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 6.3 ~37.8%의 TOC제거율을 보였음
- 미세기포와 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Triton X-100의 경우 >63, <32μm에서 TOC제거율이 가장 높았음
- 미세기포와 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60처리의 경우 >63μm의 TOC제거율이 가장 높았음
- 미세기포와 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80처리의 경우 >63μm, <32μm에서 TOC제거율이 가장 높았음

#### ■ 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제로 처리

- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 6.7 ~ 24.2%의 TOC제거율을 보였음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Triton X-100의 경우 >63, <32μm에서 TOC제거율이 가장 높았음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60처리의 경우도 >63, <32μm에서 TOC제거율이 가장 높았음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80처리의 경우 역시 >63μm, <32μm에서 TOC제거율이 가장 높았음
- 세가지 계면활성제 중에 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80의 처리가 TOC제거율이 가장 높았음

■ 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제로 처리

- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 7.3 ~ 58.0%의 TOC제거율을 보였음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Triton X-100의 경우 >63, <32μm에서 TOC제거율이 가장 높았음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60처리의 경우 >63μm에서 TOC제거율이 가장 높았음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80처리의 경우 역시 >63μm, <32μm에서 TOC제거율이 가장 높았음
- 세 가지 계면활성제 중에서는 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80의 처리가 TOC제거율이 가장 높았으며, 미세입자의 TOC제거율도 가장 높았음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% + 계면활성제 처리가 모든 처리 중 TOC제거율이 가장 높았음



[그림 II-마-15] 계면활성제로 처리한 퇴적물의 입자별 TOC 제거효율

㉔ 화학적 산소요구량 (Chemical oxygen demand, COD) 감소율

■ 미세기포 + 0.5% 계면활성제로 처리

- 미세기포와 + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 6.8 ~ 20.3 %의 COD감소율을 보였음
- 미세기포 + 0.5% Triton X-100처리의 경우 >63, >32 μm입경에서 COD감소율 높았음
- 미세기포 + 0.5% Tween 60처리의 경우 >63, >32 μm입경에서 COD감소율 높았음
- 미세기포 + 0.5% Tween 80처리의 경우도 >63, >32 μm입경에서 COD감소율 높았음
- 계면활성제에 따른 COD감소율의 차이는 나타나지 않았음

■ 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제로 처리

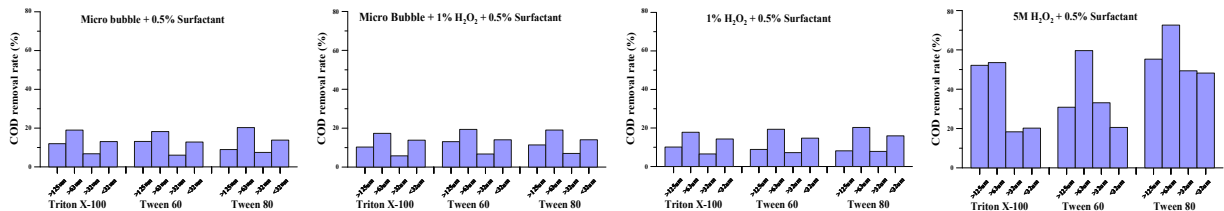
- 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 5.8 ~ 19.4%의 TOC제거율을 보임
- 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Triton X-100의 경우 >63, <32μm에서 COD감소율이 가장 높았음
- 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60처리의 경우 >63, <32μm에서의 COD감소율이 가장 높았음
- 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80처리의 경우 >63μm, <32μm에서 COD감소율이 가장 높았음
- 계면활성제에 따른 COD감소율의 차이는 나타나지 않았음

■ 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제로 처리

- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 5.8 ~19.4%의 COD감소율을 보였음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Triton X-100의 경우 >63, <32μm에서 COD감소율이 가장 높았음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60처리의 경우도 >63, <32μm에서 COD감소율이 가장 높았음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80처리의 경우 역시 >63μm, <32μm에서 COD감소율이 가장 높았음
- 세 가지 계면활성제 중에서는 >63, <32μm에서 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80의 처리가 비교적 COD감소율 가장 높았음

■ 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제로 처리

- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 18.3 ~ 72.6%의 COD감소율을 보였음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Triton X-100의 경우 >125, >63μm에서 COD감소율이 가장 높았음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60처리의 경우 >63μm에서 COD감소율이 가장 높았음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80처리의 경우 역시 >63μm COD감소율이 가장 높았음
- 세 가지 계면활성제 중에서는 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80의 처리가 COD감소율이 가장 높았으며, 미세입자의 COD감소율도 가장 높았음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% + 계면활성제 처리가 모든 처리 중 COD감소율이 가장 높았음



[그림 II-마-16] 계면활성제로 처리한 퇴적물의 입자별 COD 제거효율

㉔ 강열감량(Ignition loss, IL) 감소율

■ 미세기포 + 0.5% 계면활성제로 처리

- 미세기포와 + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 21.4 ~39.6%의 IL감소율을 보였음
- 미세기포 + 0.5% Triton X-100처리의 경우 >63, <32 μm입경에서 IL감소율이 높았음
- 미세기포 + 0.5% Tween 60처리의 경우 >125, <32 μm입경에서 IL감소율이 높았음
- 미세기포 + 0.5% Tween 80처리의 경우 >63, >32 μm입경에서 IL감소율이 높았음
- 계면활성제에 따라 효과적인 입경범위의 차이가 보였음

■ 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제로 처리



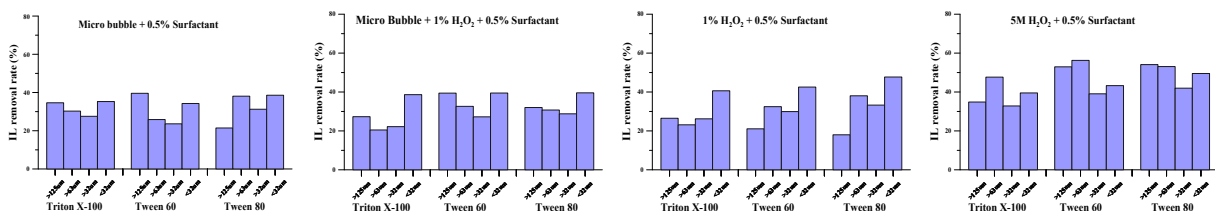
- 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 22.2 ~ 39.6%의 IL감소율을 보였음
- 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Triton X-100의 경우 >125, <32μm에서 IL감소율이 가장 높았음
- 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60처리의 경우 >125, <32μm에서의 IL감소율이 가장 높았음
- 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80처리의 경우 <32μm에서 IL감소율이 가장 높았음
- 세가지 계면활성제처리 중 전체 입경별 IL감소율은 Tween 60, 80이 가장 높았으며, <32μm에서의 IL감소율은 세 가지 모두 비슷하였음

### ■ 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제로 처리

- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 18.0 ~ 47.7%의 IL감소율을 보였음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Triton X-100의 경우 <32μm에서 IL감소율이 가장 높았음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60처리의 경우도 >63, <32μm에서 IL감소율이 가장 높았음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80처리의 경우 역시 >63μm, <32μm에서 IL감소율이 가장 높았음
- 세 가지 계면활성제 중에서는 >63 이하의 범위에서 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80의 처리가 비교적 IL감소율이 가장 높았음

### ■ 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제로 처리

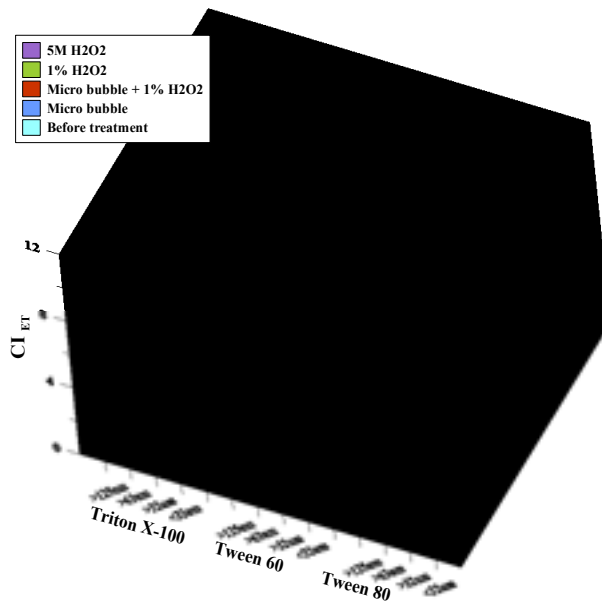
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% 계면활성제 처리는 대상해역의 벌크 퇴적물에서 입경크기범위별로 32.8 ~ 56.3%의 IL감소율을 보였음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Triton X-100의 경우 >63μm에서 IL감소율이 가장 높았음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60처리의 경우 >125, >63μm에서 IL감소율이 가장 높았음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 80처리의 경우 역시 >125, >63μm IL감소율이 가장 높았음
- 세 가지 계면활성제 중에서는 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% Tween 60과 80의 처리가 IL감소율이 가장 높았으며, 비교적 큰 입자의 IL감소율이 가장 높았음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.5% + 계면활성제 처리가 모든 처리 중 IL감소율이 가장 높았음



[그림 II-마-17] 계면활성제로 처리한 퇴적물의 입자별 IL 제거효율

### ㉔ 2차 처리 후 부영양화 정확지수 비교

- 2차실험결과 전 해역의 오염퇴적물 시료의 >63 $\mu\text{m}$ 이하의 입경범위에서는 2차 처리 후 부영양화 정화지수가 모두 감소한 것으로 나타났음
- 12가지 종류의 모든 처리 중 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 계면활성제의 처리효율이 가장 높은 것으로 나타남
- 그 중 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80의 경우 >125, >63, >32, <32  $\mu\text{m}$ 의 범위의 정화처리 후 부영양화 정화지수가 각각 0, 3, 4, 5로 가장 큰 감소율을 보였으며, 부영양화 정화기준을 초과하지 않았음



[그림 II-마-18] 심화 실험 전·후 각 해역 퇴적물의 입자별 부영양화 정화지수

### ③ 심화 실험 결과 평가

- 계면활성제 중 Tween 80이 다른 계면활성제보다 좋은 제거 효율을 나타냄
- 미세기포 + 계면활성제 처리실험에서의 부영양화관련 오염물질의 제거효율 : >63 $\mu\text{m}$  입자에서는 증가 >32 $\mu\text{m}$ , <32 $\mu\text{m}$  입자에서는 제거효율이 향상되지 않음
- 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 계면활성제 처리실험에서 >32 $\mu\text{m}$ , <32 $\mu\text{m}$  입자에서의 부영양화관련 오염물질의 제거효율: 미세기포 + 계면활성제 처리실험의 제거효율 보다 높음
- 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 계면활성제 처리실험에서 부영양화관련 오염물질의 제거효율은 미세기포 + 1% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 계면활성제 처리실험보다 대체로 좋은 제거효율을 보임
- 이는 미세기포 처리를 화학적 처리제와 동시에 하는 것보다 전처리(pre-oxidation)과정으로 적용하는 것이 적합한 것으로 판단됨
- 5 M 과산화수소 + 계면활성제 처리실험이 가장 우수한 부영양화관련 오염물질의 제거효율을 나타내고 있으며, 계면활성제 중 Tween 80을 사용하였을 때 >32 $\mu\text{m}$ , <32 $\mu\text{m}$  입자에서의 제거효율이 가장 높았음
- 위의 결과를 바탕으로 실트질이 우세한 해양오염퇴적물에서의 부영양화관련 오염물질 저감을 위한 화학적 처리제로는 5 M 과산화수소 + 계면활성제 Tween 80을 이용한 처리가 적절한 것으로 판단됨

(라) 부영양화 관련 오염물질처리 과정에 따른 중금속 제거

- 해양오염퇴적물의 경우 오염물질이 한가지인 경우는 극히 드물고 복합적인 오염물질이 원인 경우가 일반적임
- 국내에서 조사된 해양오염퇴적물의 경우 부영양화관련 오염물질 뿐만 아니라 유해화학물질 중 중금속으로 오염된 예가 많이 보고되어 있음
- 실험 대상해역인 R, M, N 해역에서도 부영양화관련 오염물질과 유해화학물질 중 중금속 오염이 복합적으로 진행되어 있음
- 계면활성제와 산화제를 이용하여 중금속오염을 저감할 수 있는 예가 있음
- 중금속오염제거 공정 전에 부영양화관련 오염물질 제거공정에서 일부 중금속의 오염도를 저감시킬 수 있다면, 공정의 시간적, 공간적 효율향상에 큰 도움이 될 수 있음  
 ⇒ 심화 실험 과정에서 저감될 수 있는 중금속 제거 효율을 살펴 볼 필요가 있음
- 본 연구의 심화실험 과정에서 저감된 대상해역의 오염퇴적물 중 중금속 농도는 토양오염 우려기준 중 3지역 기준 농도를 초과하지 않음
- 대상 해역의 오염퇴적물을 본 연구에서 제안한 정화·복원처리 후 중금속 농도는 육상의 준설토 처리장으로 폐기처리가 가능함
- >63 $\mu$ m의 사질토를 재활용 목적으로 사용 시, 본 연구의 심화실험과정에서 정화처리 된 오염퇴적물의 >63 $\mu$ m의 퇴적물의 중금속 농도는 “수저준설토사 유효활용기준”의 오염기준치 이하이므로, 양빈 등으로 유효활용 될 수 있음

[표 II-마-6] 3지역의 토양오염 우려기준(환경부, 2011)

구 분	지역	카드뮴	구리	비소	수은	납	6가크롬	아연	니켈
토양오염 우려기준	3지역	60	2,000	200	20	700	40	2,000	500

단위: mg/kg(건중량)

[표 II-마-7] 수저준설토사 유효활용기준 및 활용가능 용도(국토해양부, 2012)

구 분	기 준 단위: mg/kg(건중량)	유효활용준설토사 활용가능 용도
크롬 또는 그 화합물	80	1. 해수욕장의 양빈 2. 습지 등 해안의 복원 3. 인공섬의 조성 4. 어장개선사업 5. 항만시설 또는 어항시설의 개발시 공사용 재료 6. 그 밖에 국토해양부장관이 해양환경의 보전을 위해 필요하다고 인정하여 수저준설토사를 활용하는 경우
아연 또는 그 화합물	180	
구리 또는 그 화합물	60	
카드뮴 또는 그 화합물	1.5	
수은 또는 그 화합물	0.25	
비소 또는 그 화합물	18	
납 또는 그 화합물	45	
니켈 또는 그 화합물	35	
총 폴리염화비페닐	0.023	
총 다환방향족탄화수소	2.64	
총질소	1,500	
총인	500	

- 퇴적물에서 중금속의 존재형태 종류
  - 광물격자에 갇혀 존재(residual fraction)하는 형태
    - : 생물 이용성이 낮은 부분, 생태계 영향도가 낮음
  - 생물이용성(bio-availability)이 높은 부분으로 존재하는 경우
    - : 환경의 변화에 따라 주변 생태계에 영향을 줄 수 있으며 인위적인 오염을 설명하는데 유용함
- 중금속으로 오염된 토양 및 퇴적물의 저감처리 중 대부분은 생물이용성(bio-availability)이 높은 부분의 중금속을 제거하는데 중점을 두고 있음
  - ⇒ 심화 실험 과정에서 생물이용성(bio-availability)이 높은 부분의 중금속제거 효율을 계산하였음

① 생물이용성(bio-availability)이 높은 중금속 형태 부분에 대한 분석방법

- 생물이용성(bio-availability)이 높은 중금속 형태 부분에 대한 분석방법의 종류
  - 단일시약 추출법
  - 연속추출법
- 단일 시약 추출법
  - : 연속추출법에 비해 간단하고 시간이 적게 소요되는 방법으로 금속원소의 생물이용도와 인위적인 오염을 평가할 수 있으며, 오염원을 구별할 수 있는 방법으로 알려져 있음
- 1M 염산(HCl) 추출법
  - : 해양 퇴적물에서 1M 염산을 이용한 추출법이 생물학적인 자료와의 상관관계가 좋고 인위적인 오염에 의한 퇴적물 오염을 명백하게 밝혀냈으며, 비 오염지역과 오염이 심하지 않은(moderately) 지역을 구분하는데도 좋은 민감도(sensitivity)를 갖는 결과가 보고되어

있음

⇒ 본 연구에서는 1M 염산을 이용한 단일 시약 추출법으로 잠재적인 생물학적 이용 가능성이 큰 부분의 중금속을 추출하여 중금속제거 효율을 계산하였음

### ② N해역의 퇴적물 내 생물이용성이 큰 중금속 분석결과

○ 단일시약 (1M 염산)을 이용하여 생물이용성이 큰 중금속 분석결과

: N해역에서 추출된 각 중금속의 양은 Cr이 15.3-17.9%, Ni이 20.2-24.3%, Cu가 50.5-60.6%, Zn이 59.8-61.4%, As은 11.5-21.0%, Cd은 75.8-80.8%, Pb은 63.6-80.2% 이었음 (표 II-마-8)

[표 II-마-8] N해역 퇴적물 내 1M 염산추출부분

	입자 크기	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
		%	%	%	%	%	%	%
N해역	>63 $\mu$ m	17.9	24.3	50.5	60.9	14.0	76.3	63.6
	>32 $\mu$ m	16.3	20.9	58.3	61.4	11.5	80.8	71.9
	<32 $\mu$ m	15.3	20.2	60.6	59.8	21.0	75.8	80.2

### ③ 결과 및 고찰

○ 부영양화 관련 오염물질 처리과정에서 제거 된 N해역의 퇴적물 내 생물이용성이 큰 중금속 결과요약을 표 II-마-8에 나타냄

- 미세기포 + 계면활성제 처리실험에서 1M 염산추출부분 중금속 제거 효율

: >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m 입자에서 Cd이 12.7-46.2% 를 나타냈으며, <32 $\mu$ m 입자에서 As가 20%의 제거 효율을 보임

- 미세기포 + 1% 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) + 계면활성제 처리실험에서 1M 염산추출부분 중금속 제거 효율

: >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m 입자에서 Cd이 13.7-46.2% 로 나타남

- 1% 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) + 계면활성제 처리실험에서는 1M 염산추출부분 중금속 제거 효율

: >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m 입자에서 Cd이 3.3-36.6% 로 나타남

- 5 M 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) + 계면활성제 처리실험에서 1M 염산추출부분 중금속 제거 효율

: >63 $\mu$ m, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m 입자에서 Cr이 0.6-25.3%, Ni이 21.8-43.4%, Cu가 16.2-38.4%, Zn이 41.8-56.5%, Cd가 55.5-86.3%를 나타냈으며, Pb은 >63 $\mu$ m 입자에서 4.2-21.7%의 제거효율을 보였으며, >32 $\mu$ m, <32 $\mu$ m 입자에서는 제거되지 않았음

- 본 연구에서 실험된 부영양화 관련 오염물질처리 과정에서 As는 저감되지 않는 것으로 나타남

⇒ 5 M 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) + 계면활성제 처리실험에서의 결과로 볼 때 부영양화 관련 오염물질처리 과정에서 Ni, Cu, Zn, Cd, Pb은 생물이용성(bio-availability)이 높은 부분의 중금속제거 역시 가능함

### (마) 통합방안 제안

○ 입자분리

- 해양퇴적물의 입도분포 특성 고려, 입경별 부영양 오염물질 분포 및 공정의 용이성, 타

---

당성, 비용의 절감, 을 위하여 선정  
- 63 $\mu$ m 이상, 32 $\mu$ m 이상, 32 $\mu$ m 이하

○ 세척 및 화학적 처리

- 작은 미세 입자처리: 계면활성제를 이용하여 부영양화 관련 오염물질을 처리하는 것이 효과적
- 화학적 산화: 산화제를 이용한 부영양화 관련 오염물질의 처리가 효과적으로 판단 됨, 부영양화 관련 오염물질 및 중금속의 제거효율 동반된 화학처리 적용

○ 처리공정

- 대상 해역 퇴적물 중 63 $\mu$ m 이상은 전체 퇴적물 대비 평균 14.6%이며, 입경별 오염도를 함께 고려하면 전체 처리 대상 중 9.4%에 해당함
  - 해양퇴적물을 처리공정에 도입하는 단계에서 협잡물(Debris) 및 자갈 등(Over size gravel etc.)을 기존 상용 장치로 분리, 제거가 필요함
  - 주요 처리 대상 입자의 분리는 먼저 조립질(Sand)과 미세입자를 효율적으로 분리한 다음, 분리된 미세입자를 실제 처리 대상이 되는 입경별로 분리가 필요함
  - 조립질은 전체 처리대상 오염물질 대비 9.4%이므로 상용 오염토양 정화기술에서 주로 적용하는 용수에 의한 세척과 유기물 산화로 충분히 제어가 가능함
  - 처리 대상 미세입자는 단순한 유기물 산화로는 제어하기 곤란하므로, 함유된 오염물질에 대한 고도처리가 필요함
- ⇒ 따라서 본 연구결과를 통해 하이드로 사이클론을 이용한 1mm이하의 해양오염퇴적물의 물리적 입자분리를 통해 63 $\mu$ m 이상, 32 $\mu$ m 이상, 32  $\mu$ m 이하의 범위로 퇴적물을 분리한 후 계면활성제(tween 80)와 산화제(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)를 이용한 부영양화 관련 오염물질의 처리 공정의 통합방안을 제안함 (그림 II-마-19)



[그림 II-마-19] 분리 및 세척 처리기술 통합 공정 제안

[표 II-마-9] 부영양화 관련 오염물질처리 실험 후  
1M 염산추출부분 중금속 제거 효율 및 CIHC 변화

처리공정	계면활성제	입자 크기	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	CIHC	
			%	%	%	%	%	%	%	처리전	처리후
미세기포	Triton x-100	>63 $\mu$ m	11.2	8.8				44.2	8.1	2.10	1.87
		>32 $\mu$ m					5.7	24.2		2.27	2.18
		<32 $\mu$ m					20.5			3.06	3.04
	Tween 60	>63 $\mu$ m		0.5			1.9	46.1	9.0	2.10	1.87
		>32 $\mu$ m						12.7		2.27	2.22
		<32 $\mu$ m					11.6			3.06	3.05
	Tween 80	>63 $\mu$ m						43.6	6.5	2.10	1.89
		>32 $\mu$ m						15.1		2.27	2.21
		<32 $\mu$ m					7.4			3.06	3.05
미세기포+ 1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Triton x-100	>63 $\mu$ m						37.4		2.10	1.93
		>32 $\mu$ m						13.7		2.27	2.22
		<32 $\mu$ m								3.06	3.06
	Tween 60	>63 $\mu$ m	2.2	0.1				43.6	7.8	2.10	1.88
		>32 $\mu$ m						16.3		2.27	2.21
		<32 $\mu$ m								3.06	3.06
	Tween 80	>63 $\mu$ m						42.1		2.10	1.91
		>32 $\mu$ m						15.8		2.27	2.21
		<32 $\mu$ m								3.06	3.06
1% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Triton x-100	>63 $\mu$ m						33.6		2.10	1.95
		>32 $\mu$ m						3.3		2.27	2.26
		<32 $\mu$ m								3.06	3.06
	Tween 60	>63 $\mu$ m						35.4		2.10	1.94
		>32 $\mu$ m						16.7		2.27	2.21
		<32 $\mu$ m								3.06	3.06
	Tween 80	>63 $\mu$ m						36.6		2.10	1.94
		>32 $\mu$ m						15.4		2.27	2.21
		<32 $\mu$ m								3.06	3.06
5M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Triton x-100	>63 $\mu$ m	12.4	35.3	16.2	54.7		81.8	14.8	2.10	1.02
		>32 $\mu$ m		28.0	20.8	41.8		74.4		2.27	1.35
		<32 $\mu$ m	11.4	38.7	31.3	48.1		55.5		3.06	2.11
	Tween 60	>63 $\mu$ m	24.1	40.2	32.9	56.5		84.5	21.7	2.10	0.88
		>32 $\mu$ m	25.3	37.0	38.4	55.0		80.9	17.1	2.27	1.03
		<32 $\mu$ m	0.6	34.9	24.1	45.6		60.5		3.06	2.21
	Tween 80	>63 $\mu$ m	17.9	43.4	30.3	53.8		86.3	4.2	2.10	0.97
		>32 $\mu$ m		21.8	26.9	47.2		82.0		2.27	1.26
		<32 $\mu$ m	16.3	35.7	34.5	52.2		70.3		3.06	2.03

## 바. 현장 처리기술 공정 설계

### (1) 해양오염퇴적물 국내외 기술개발 현황

#### (가) 기술 개요

- 해양퇴적물 오염에 영향을 주는 가장 일반적인 오염물질은 중금속, 기름관련 제품, PAH 및 PCB 계통이며 중금속의 경우 Pb, Cr, As, Cd, Zn 등이 오염 지역에서 가장 많이 발견되고 있으며, 유해물질의 경우는 Trichloroethylene, PCB, Tetrochloro-ethylene, Benzene 및 Trichloroethane 등이 주종을 이루고 있음. 이러한 오염물질에 의해 오염이 발생한 해양퇴적물의 처리는 In-Situ, 또는 Ex-Situ 할 수 있으나 경우마다 경제적인 요인이 중요한 현안 문제임
- 퇴적오니가 문제를 야기하는 것은 다음의 3가지 유형으로 구분됨.(U.S.EPA, 1991). 첫째,



---

인간의 과도한 토목공사 및 농경활동으로 발생한 토사 침전물이 하천 저부를 뒤덮어 저부의 동·식물 등 생태계의 교란이 일어남. 둘째, 퇴적물의 침강으로 인하여 저수지 및 댐 등의 저수용량이 감소하며 하천이나 운하에서 퇴적물의 침강은 관광선, 수송선의 운항 등 정상적인 상업 활동을 방해함. 마지막으로 인간 활동에 의하여 유출된 독성 오염물질들과 질소, 인 및 중금속 등의 무기물들이 과도하게 침적되어 수생태계 및 인간의 건강에 악영향을 미침

- 이 경우, 대부분의 오염물질들의 침적이 장기간에 걸쳐 발생하고 퇴적오니 내 점토의 흡착특성에 의하여 고농도로 존재하여 오염원이 되기 때문에, 수처리를 통하여 수계로 배출되는 오염물질들을 제거하여도 저부에 침적된 오염물질들이 수계로 용출됨
- 따라서, 수계 내로 오염물질의 배출을 차단하는 것도 매우 중요하지만 장기적인 안목에서 볼 때 오염원이 되는 퇴적오니를 직접적으로 처리하는 기술이 필요함
- 최근 이러한 오염문제가 제기됨에 따라서 오염해양퇴적물의 정화를 위한 기술의 필요성이 새로이 요구되고 있으며, 선진 외국에서는 이러한 기술들이 빠르게 개발·발전되고 있지만 국내에서는 아직 미흡한 수준임. 이에 따라 퇴적물의 물리적 특성 및 오염물의 종류 및 농도수준 등을 고려한 종합적인 처리기술의 개발이 필요한 실정임

#### (나) 분석 배경 및 목적

##### ① 분석 배경

- 본 분석에서는 상술한 기술 개요에서와 같은 문제점들을 해결할 수 있도록 일반적인 오염 퇴적물의 처리를 위한 방법들에 대한 종합적인 고찰 및 준설했던 오염퇴적물의 정화 및 처리에 대한 개발을 하는 기술과제, 산업계의 동향과 우리나라 기술수준에 대한 국내외 특허 분석을 통하여 향후 해양 퇴적물의 정화 및 처리 기술 분야의 산업시장에서 방향을 점검하고, 동시에 전략적이고 내실 있는 연구기획에 활용할 수 있도록 제공함

##### ② 분석 목적

- 본 분석에서는 하상 또는 해양 퇴적토 정화 및 처리 기술을 개발함에 있어, 오염된 퇴적물의 정화/처리 공법 기술, 준설풀기 기술 그리고, 정화/처리를 위한 다양한 소재 기술 등에 대하여 특허동향 분석을 실시함
- 이를 통하여 국제 특허현황 및 국가별 기술경쟁력 등의 분석을 실시하고, 최근 부상기술 등을 예상하여, 전략적인 연구개발 계획 수립에 활용할 수 있도록 함으로써, 중복연구를 방지하고 하상 또는 해양 퇴적물 정화 및 처리 기술에 대한 연구개발과제 수행 시 그 타당성의 객관적인 특허정보를 제공하기 위함임

#### (다) 국내 연구 사례

- 국내의 경우 호수, 하천 해안의 퇴적물에 대한 오염도 평가자료가 미비하고, 현재 오염퇴적물의 준설했에 관한 여부를 결정할 단계에 와 있으나, 이에 대한 환경부의 기준이 없으며, 심지어는 퇴적 준설했물을 환경학적으로 분류할 때, 수질오염관리부서와 해양퇴적물환경관리부서 중 어느 곳에서 책임을 져야 하는지의 문제부터 논의를 시작해야하는 상황으로 판단됨
- 다만, 산발적으로 하천, 호수, 해안의 오염이 심하다고 논란이 되는 지역(한강하류, 인천시 동구청 인천제철공장 옆 유수지, 속초의 청초호, 진해만, 마산만 등지)에 대해 준설했 후 응집 침전처리방법을 적용하여 모든 고히입자를 무차별 강제 침전 시킨 후 탈수 후 매립처분하고 있는 실정임

- 최근에는 팔당호, 대청호의 수질이 악화되면서 상수원으로써의 문제가 되자 상수원의 더욱 확실한 보호를 위해 오염이 심한 지역에 대한 준설의 필요성에 제기되고 있음
- 상수원 보호구역 내의 오염퇴적물 준설에 의한 효과에 대해 논쟁의 여지가 남아있기는 하나, 이미 국내 여러 기업에서 2차오염을 발생시키지 않는 상태에서 또는 2차오염을 최소화한 상태에서의 준설기술을 보유하고 있는 것으로 인정되고 있음
- 그러나, 현재 준설 후 사용하는 응집침전, 탈수, 매립처분으로는 한정된 국내매립지를 지나치게 남용하고 있다는 비난을 면할 수 없으며, 실제 매립처분 비용의 상승으로 경제적으로도 비효과적일 수 밖에 없음. 따라서, 오염퇴적물의 준설 후 처리처분시스템의 개발이 절실히 필요한 과제이나, 국내에서는 이러한 측면에서 개발된 기술은 거의 전무한 실정임

### (라) 해외 연구 사례

- 외국의 경우 하천이나 호수, 해안의 저질토에 대한 전체 오염도의 비중이 커짐에 따라 수질관리를 위해 준설이 이루어지고 있으며, 이에 따른 재활용 시스템이 개발되고 있음
- 먼저 가까운 일본의 예를 들면 일본에서 제2의 호수면적을 자랑하는 가스미가우라호의 경우, 오염퇴적물로부터의 영양염류 용출에 따른 호소의 부영양화가 가속됨에 따라 오염퇴적물의 준설이 진행되고 있으며, 준설된 오염퇴적물을 일부 매립하거나 혹은 초고압탈수기를 이용하여 탈리액은 수처리 시스템에서 처리하고 탈수된 케익은 시멘트와 혼합하여 고화 시켜 재활용(노반재로 이용)하는 시스템을 보유하고 있음
- 미국의 경우 U.S. EPA에서 오염퇴적물의 처리방법을 선정할 때 고려하여야 할 여러가지 변수들을 설정해 놓았고(U.S. EPA, 1993), 준설이 필요하다고 결정이 될 경우, 해양퇴적물 세척의 개념을 도입하여 오염퇴적물 준설물 처리시스템(처리용량 5.4 ton/day)을 개발하여 시험가동 하였고(U.S. EPA, 1992), 이미 현장에서 사용 중임
- 이러한 물리 화학적 퇴적준설물 처리시스템은 복합 해양퇴적물성분의 유입시스템, 혼합기, 진동스크린, 부상조, 마찰기계, 하이드로싸이클론, 나선형 분류기, 탈수장비, 생물학적 슬러리 반응조, 수처리공정 등으로 구성되어 있으며, 종합적인 혼합/마찰/분류 장비에 물과 함께 오염된 미세 해양퇴적물입자를 분리해내는 시스템임
- 퇴적물을 준설하지 않을 경우에는 현장에서 퇴적토층 위에 복토층을 살포함으로써 오염물이 수계로 누출되는 것을 최소화하는 방법을 적용하고 있음. 또한 각 주별로 필요에 따라 오염퇴적물에 대한 환경기준을 정하고 있으나, 현재 오염퇴적물에 대해 미국전역에 적용할 일반적인 연방환경기준 제정을 추진 중임
- 네란드의 경우 오염 퇴적물 처리를 위한 국가적인 개발 프로그램인 POSW를 수립하여 대규모 시험을 진행 중임. 6400여 톤의 오염준설물을 하이드로싸이클론과 부상 분리공정 등으로 구성된 물리적 처리시스템으로 처리하여 잔류 PSHs와 유분농도가 허용농도 이하인 건설자재로 재활용할 수 있을 정도의 해양퇴적물을 구분해내었음. 또한 생물학적 처리를 통해 유기화합물과 중금속을 상당히 제거해 냈었으나, 잔류오염농도 때문에 재활용을 못하고 매립하기로 결정한 바 있음
- 독일의 경우, Hamburg지역에서 매년 약 200만 m<sup>3</sup>의 오염퇴적물을 준설하고 있는 실정이며, 대형 META(Mechanical Treatment of Harbor Sediments)시스템을 개발하여 사용하지 약 4년 정도가 경과하였음. 이 시스템의 주된 구성요소는 하이드로싸이클론, 나선형 분류기, 진공식 벨트필터로서 주로 물리적인 입자분류를 통해 오염입자와 비오염입자를 구분해 매립처분 또는 재활용하고 있음

### (마) 국내, 외 기술수준 비교

- 미국이나 유럽에서는 현재 오염퇴적물의 위해성을 인식하고 이에 대한 처리처분시스템을 개발 중이거나 개발 후 시험단계에 있으며, 국내에서도 준설기술 분야에서는 외국에 비해 준설장비와 기술이 뒤떨어지지 않는다고 판단됨
- 특히, 준설중에 퇴적물의 재부유(resuspension)와 이동에 의해 발생하는 2차 오염을 최소화하며 준설하는 기술은 이미 2개 회사에서 건교부 인정 신기술을 보유하고 있으며, 외국에서 최근 도입해온 2차 오염방지 준설선을 보유한 업체도 있음. 오염퇴적물 처리기술의 경우 현재 국내에서 신기술로 인정받고 있는 것은 양이온, 음이온, 고분자 응집제를 이용한 응집침전기술이지만, 이러한 기술은 오염해양퇴적물과 비오염해양퇴적물의 무차별처분으로 인해 매립지 남용, 매립 처분량의 과다로 인한 비경제적인 측면, 그리고 오염물질의 특성에 따라 응집이 효과적으로 일어날 수 없는 경우도 있을 수 있다는 것을 감안할 때, 이에 대한 대체기술 개발이 절실하다고 판단됨
- 외국에서 개발 중이거나 이미 개발하여 시험 중인 오염된 퇴적준설물의 처리처분시스템이 국내에서 보유하지 않은 시스템이긴 하나, 각 구성요소로 사용되는 하이드로싸이클론, 부상조 생물학적 슬러리반응조 등은 국내에서도 충분히 연구개발 가능성이 있는 것으로 사료됨. 단지, 각각의 구성요소에 대한 설계방법론 제시와 시제품(시스템)의 제작 및 예비시험 등의 절차가 수행되어야 할 것으로 판단됨
- 결과적으로 오염된 퇴적토의 처리에 있어서 퇴적토의 특성, 오염물의 종류 및 농도, 주변 생태계에의 영향 정도, 경제적 조건 등을 종합적으로 고려하여 오염물의 처리방법을 선정 후 적용하여야 할 것으로 판단됨

### (바) 정량분석 결과

- 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술에 있어서 유효특허 745건의 특허를 대상으로 하여 정량 분석을 실시하였음. 유효특허 중 미국특허 건수가 279건으로 38%에 해당되어 점유율에 있어 가장 비중이 있게 나타남
- 전체 출원동향에 있어 시계열적인 흐름은 증가세와 감소세를 반복하고 있으며, 최근에는 출원이 감소하고 있는 추세임. 전 세계적인 출원 경향은 미국과 일본의 출원 경향과 유사하며 최근의 성장 둔화는 국제적 금융위기에 따른 각국의 연구 개발이 용이하지 않은 요인인 것으로 파악됨
- 국제특허분류를 통한 기술 분류를 살펴보면 CO2F(물, 폐수, 하수 또는 오니(슬러지)의 처리)에 대한 출원 건수가 총 25%로 가장 큰 비중을 차지하고 있어, 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술에 있어 물리적인 기구나 장치에 관한 기술보다는 화학적인 정화 또는 처리공법 위주의 연구개발이 주를 이루는 것으로 분석됨
- 한국 특허의 기술 분류에 있어서도 전체적인 동향과 유사하게 화학적인 정화 또는 처리공법이 주를 이루고 있으나, 장치 또는 기구 등을 이용한 물리적 정화 및 처리공법 즉 B01D(물리적 분리)와 B09B(고체 폐기물의 처리)로 분류되는 기술에 있어서는 각각 10%와 6%를 차지하는 것으로 조사되는 바, 전체적인 동향과 대비시 한국 특허의 경우 장치 또는 기구 등을 이용한 물리적 정화 및 처리공법에 대한 연구가 미흡한 것으로 분석됨 즉 이러한 기술에 대해서 미국, 일본 등 선도국가의 기 연구된 특허를 통해 연구, 개발의 필요성이 요구됨
- 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 주요 출원인으로는 일본 기업이 전체 특허 중 상당부분을 차지하고 있음. 특히 일본의 경우 대기기업의 출원 비중이 높은 것으로 나타나 대기기업 위주의 연구 개발이 이루어짐에 반하여 한국의 경우 대기기업과 관/공기업의 연구개발이 저조한 것으로 분석됨. 단, 한국의 경우 4대강 사업 등 국책사업과 맞물려 2008년 후반부

터 출원의 급증세가 보이며, 아직 미공개인 특허 등을 감안하면 대기업, 관/공기업의 연구개발이 증가추세일 것으로 예측됨

## (2) 해양오염퇴적물 국내외 기술개발 현황 분석 결과

### (가) 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 조사결과

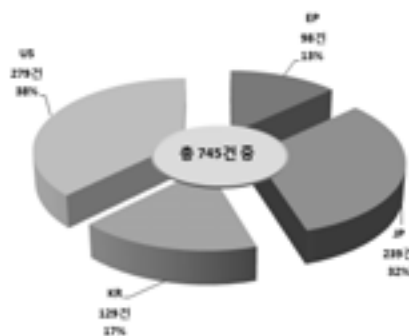
- 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술에 대한 특허를 검색한 결과, 최초 모집단의 특허 건수는 6,330건으로 나타났으며, 이에 대한 중복특허의 제거와 국제특허분류 등을 포함한 필터링을 수행하여 최종적으로 745건의 유효특허 데이터를 추출하였음.
- 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술에 대한 국/내외 특허 검색 결과는 아래 표 II-바-1를 통하여 확인할 수 있음.

[표 II-바-1] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 특허 검색 결과

RAW DATA					유효 데이터				
KR	JP	US	EP	합계	KR	JP	US	EP	합계
869	975	3517	969	6330	129	239	279	98	745

#### ① 국가별 점유율

- 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 분야의 유효특허 총 745건 중, 미국특허 건수가 279건으로 38%에 달하여 가장 비중 있게 나타났음.
  - 하기 그림 II-바-20는 국가별 점유율을 나타낸 것으로, 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 분야 유효특허 총 745건 중, 미국특허 건수가 총 279건으로 38%에 달하여 가장 비중 있게 나타났으며, 다음으로 일본특허가 239건으로 32%, 이어서 한국특허가 129건으로 17%, 마지막으로 유럽특허가 98건으로 13%를 나타내고 있음.
  - 이는 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술에 있어 미국의 기업이 연구개발을 주도하고, 동시에 미국이 가장 큰 시장을 형성하고 있기 때문인 것으로 보임. 미국에 이어 일본도 HITACHI LTD., MITSUBISHI HEAVY IND. LTD.와 같은 대기업을 중심으로 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있음을 나타냄.

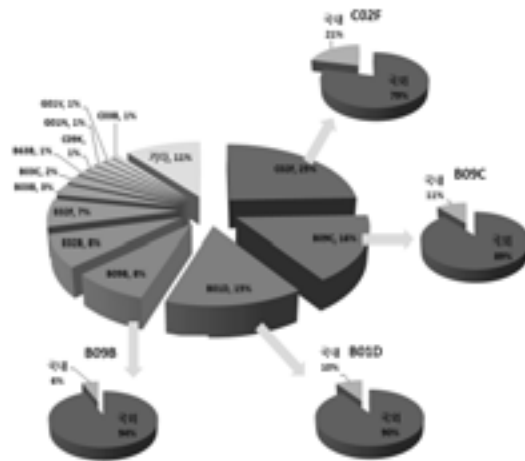


[그림 II-바-1] 전 세계 국가별 특허 점유율 현황

#### ② 기술 분류별 점유율

- 하기 그림 II-바-2은 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 분야 유효특허 총 745건에 대한 국제특허분류(IPC) 점유율을 나타내는 것으로, C02F에 대한 출원 건수가 총 25%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 그 다음 순으로 B09C 16%, B01D 15%를 차지하고 있는 것으로 나타남.

- 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술은 하기 표 II-바-2에 나타난 바와 같이 C02F(물, 폐수, 하수 또는 오니(슬러지)의 처리) 공법 기술이 가장 높은 비중을 차지하여 이에 대한 연구 개발이 가장 활발하다는 것을 알 수 있으며, 그 밖에도 오염된 해양퇴적물의 재생과 분리 및 고체 폐기물의 처리 등의 순으로 차지하고 있어, 기구나 장치 등을 이용한 물리적 처리보다는 대부분 화학적 메커니즘을 이용한 정화 및 처리 공법이 주를 이루는 것을 확인할 수 있음.
- 기술 분류별 한국의 점유율을 살펴보면, C02F(물, 폐수, 하수 또는 오니(슬러지)의 처리) 기술의 경우 전체 대비 21% 차지하여 비교적 평균치에 가깝지만, B01D(물리적 분리) 기술과 B09B(고체 폐기물의 처리) 기술이 각각 10%와 6%를 차지하는 바, 상대적으로 그 점유율이 낮아 해당 기술 분야에 대한 향후 연구개발을 통해 국내 시장의 경쟁력을 확보할 수 있을 것이라 판단됨.



[그림 II-바-2] 기술 분류별 점유율 현황

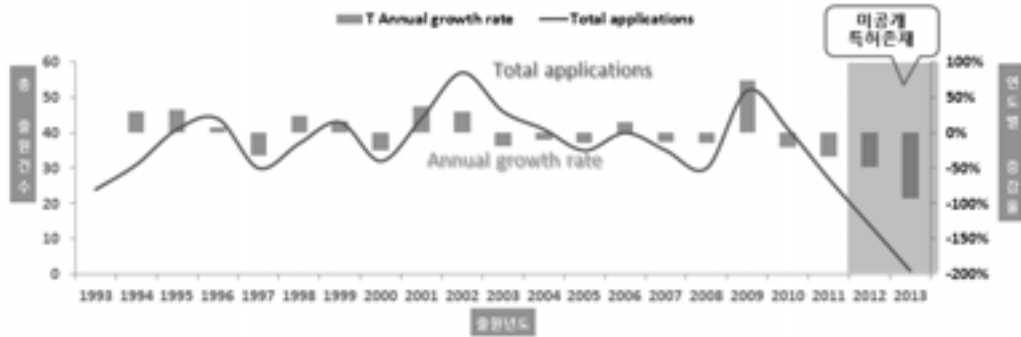
[표 II-바-2] 국제특허분류(IPC)의 출원건수 및 설명

IPC 코드	건수	기술의 설명
C02F	182	• 물, 폐수, 하수 또는 오니(슬러지)의 처리(물질에서 화학적인 변화에 영향을 줌으로써 무해하거나 덜 유해한 해로운 화학물질을 만들기 위한 처리 A62D 3/00; 분리, 정화 탱크 또는 필터 장치 B01D; 물, 폐수 또는 하수를 처리하는 수송선박의 세부장치 예 담수생산 B63J; 부식방지 물질의 첨가 C23F; 방사성 오염액의 처리 G21F 9/04)
B09C	119	• 오염된 해양퇴적물의 재생(해양퇴적물에서 돌 또는 유사 물질을 제거하는 기계 A01B 43/00; 증기에 의한 해양퇴적물살균 A01G 11/00; 분리일반 B01D; 해안의 청소 E01H 12/00; 지면으로부터 바람직하지 않은 물질, 예를 들면 쓰레기 등의 제거 E01H 15/00)
B01D	110	• 분리(습식법에 의한 고체와 고체의 분리 B03B, B03D; 풍력테이블 또는 풍력선풍기에 의한 것 B03B; 다른 건식법에 의한 것 B07; 자기 또는 정전기에 의한 고체 또는 유체로부터의 고체의 분리, 고압전기장에 의한 분리 B03C; 원심분리기 과류장치 B04; 액체 함유물로부터 유체를 짜내는데 쓰이는 프레스 그 자체 B30B9/02; 예. 이온교환에 의한 연화 1/42; 냉방장치, 가습기 또는 통풍장치에서 여과기의 설치 또는 부착 F24F13/28)
B09B	61	• 고체 폐기물의 처리
E02B	58	• 수공(水工)(선박의 리프트(Lift) E02C; 준설(浚渫) E02F)
E02F	51	• 굴착(掘鑿) : 토사(土砂)의 이송(이탄(泥炭)의 채굴(採掘) E21C 49/00)
B03B	21	• 액체에 의한 또는 풍력테이블 또는 지그에 의한 고체물질의 분리(자기 또는 정전기에

IPC 코드	건수	기술의 설명
		의한 유체 또는 고체물질로부터 고체물질의 분리, 고전압 전기장에 의한 분리 B03C; 부유선별 또는 차별 침강 B03D; 고체에서 액체의 제거 B01D; 건식에 의한 분리 B07; 체를 사용하는 분리, B07B; 골라내는 것 B07C; 특별한 물질의 특별한 분리에 있어서 타의 단일 클래스에 적용되는 것은 관련 클래스를 참조)
B03C	16	<ul style="list-style-type: none"> <li>고체물질 또는 유체로부터 고체물질의 자기 또는 정전기에 의한 분리; 고압 전계에 의한 분리(전기 또는 자기를 이용한 여과기 B01D 35/06; 동위원소의 분리 B01D 59/00 : 자기분리 또는 정전분리와 타의 방법에 의한 고체의 분리와의 조합 B03B, B07B : 파일(Piles)로부터 시이트의 분리 B65H 3/00; 자석 또는 자석코일 그 자체 H01F)</li> </ul>
B63B	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>선박 또는 그 밖의 물에 뜨는 구조물 : 선적을 위한 장치(선박의 환기장치, 난방장치, 냉방장치 또는 공기조화 장치 B63J 2/00 : 준설선 또는 해양퇴적물 이동 기계의 지지로서 부유성 하부구조 E02F 9/06)</li> </ul>
C09K	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>그 밖에 분류되지 않는 응용되는 물질 : 그 밖에 분류되지 않는 물질의 응용</li> </ul>
G01N	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>재료의 화학적 또는 물리적 성질의 검출에 의한 재료의 조사 또는 분석 (면역분석 이외의 효소 또는 미생물을 포함하는 측정 또는 시험 방법 C12M, C12Q)</li> </ul>
G01V	9	<ul style="list-style-type: none"> <li>지구물리 : 중력측정 : 질량 또는 대상물의 검출 : 태그스(TAGS)(진단, 수술 또는 개인식별을 위하여 이물을 검출 또는 탐지하기 위한 것 A61B : 돌발적으로 매몰된, 예. 눈(雪)에 매몰된, 사람의 위치를 지시하는 수단 A63B 29/02 : 화학적 또는 물리적 성질의 결정에 의한 지구조성물의 조사 또는 분석 G01N : 지구의 장의 방향 또는 크기 이외의 전기적 또는 자기적 변량의 측정 일반 G01R : 자기 공명 장치 일반 G01R 33/20)</li> </ul>
C03B	8	<ul style="list-style-type: none"> <li>유리 : 광물 또는 슬래그울(Slag Wool)의 제조, 성형 또는 보조공정</li> </ul>
기타	80	

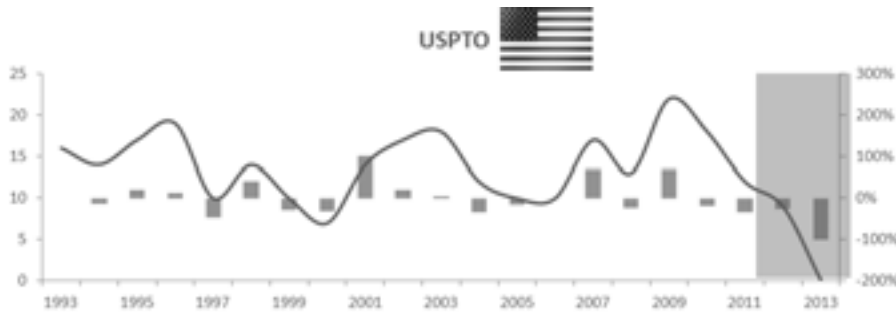
### ③ 국가별 연도별 특허동향

- 본 분석에서는 우리나라(KIPO)를 비롯한 주요국의 특허청의 출원건(미국은 등록건)을 기준으로 연도별 추이를 살펴봄으로써 특허출원 Trend 를 알아보하고자 함.
- [Total] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 분야의 연도별 전체 특허동향을 살펴보면, 거시적인 관점에서 분석 초기구간인 1995년부터 증가세와 감소세를 보이고 있으며, 2002년을 최고점으로 최근 유효기간인 2011년과 이후에는 감소세를 보이고 있는 것으로 나타남.
- 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 전체적인 1995년부터의 전 세계 동향은 미국과 일본의 시계열적 흐름의 형태와 비슷하며, 이는 미국 및 일본의 출원 건수가 상당 부분을 차지하고 시장의 기술이 성장세의 초기인 2000년대 초반에 미국과 일본이 퇴적토 정화 및 처리 기술의 시장을 주도하고 있었다는 것을 확인할 수 있음.
- 근래 들어 감소세에 대해서는 2008년경에 발발한 국제 금융위기가 주요한 원인으로 추측되며, 또한, 2000년대 후반을 기점으로 하여 국외의 퇴적토 정화 분야 주요 출원인들이 출원건수보다는 특허의 질에 치중하기 시작한 흐름도 이러한 흐름에 영향을 미친 것으로 보임.
- 2007 - 2008년 부근에서 나타나는 일시적인 성장둔화는 전 세계적 금융 위기에 따라 각국에서 관련 기술의 연구 개발 투자가 용이하지 않았던 요인인 것으로 판단됨.



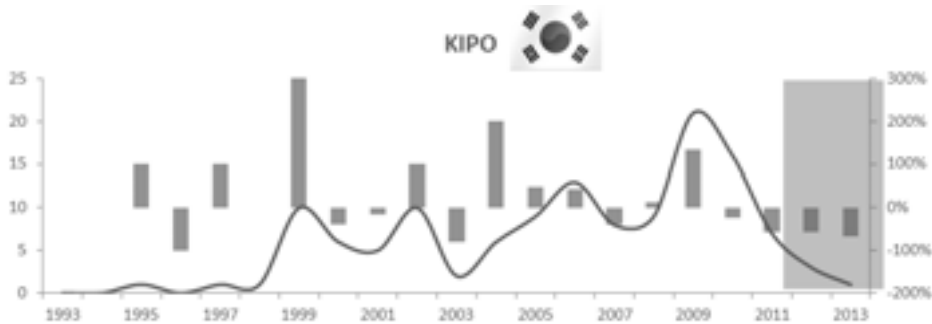
[그림 II-바-3] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 전체 특허출원현황

- [USPTO] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 분야에서 가장 많은 출원을 보여 글로벌 출원 동향과 유사하며, 한국 보다 이른 시점인 1990년대 중반부터 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 분야에 대한 높은 출원 추이를 나타내어 해당 시기에 가장 활발한 연구 활동과 더불어 세계적으로도 기술 시장을 주도하였음을 알 수 있음.



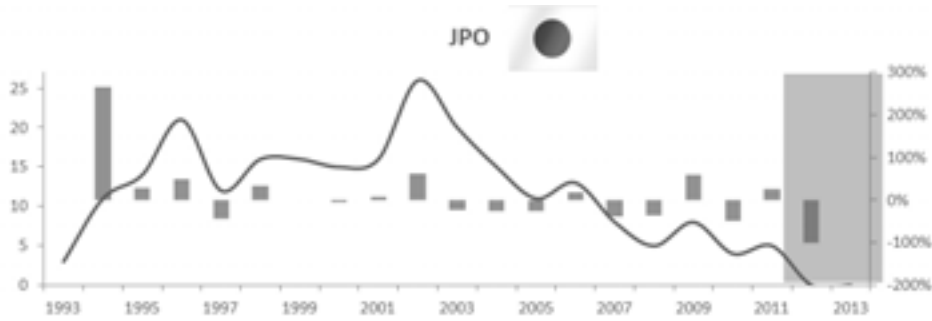
[그림 II-바-4] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 미국 특허출원현황

- [KIPO] 한국의 경우 특허 출원 건수는 미국과 일본에 비하여 저조한 실정이지만 1990년 후반에 들어 연구 과제로 관심을 받기 시작하여 가장 큰 증가율과 이후로도 꾸준한 연구 활동과 특허 출원 활동을 한 것으로 나타나며, 최근 2009년 시점에서 가장 많은 특허 출원이 있었던 것으로 파악됨 이는 4대강 사업과 맞물려 특허 출원건수가 급증한 것으로 판단됨.



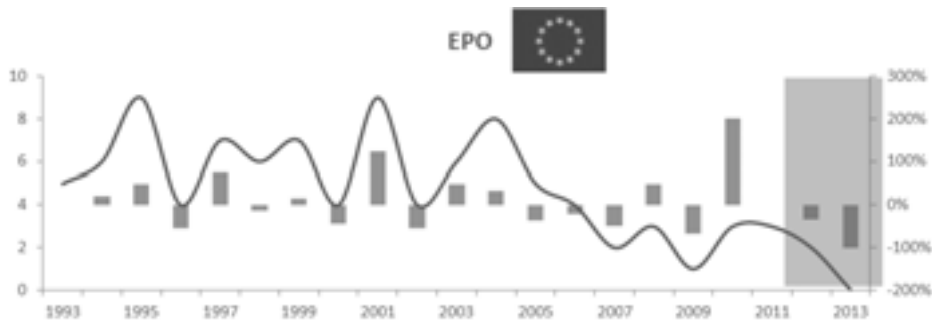
[그림 II-바-5] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 한국 특허출원현황

- [JPO] 1990년 중반부터 꾸준한 특허 출원 추세가 있었지만 2002-2003년에 최고점을 기해 이후로는 점차 특허 출원 건수가 감소되는 것으로 나타나며, HITACHI LTD., MITSUBISHI HEAVY IND. LTD. 등의 출원이 많은 비중으로 차지하여 대기업 중심의 연구 개발이 이루어지는 것으로 분석됨.



[그림 II-바-6] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 일본 특허출원현황

- [EPO] 기술 수준과 시장 규모는 한국보다 크지만 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 분야에 있어서는 특허 출원 건수가 한국보다 저조한 실정(검색구조에 한계가 반영됨)이고 2004년부터는 특허 출원 건수가 점차 감소하는 추세를 보이고 있으며, 전체적으로도 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술 분야에서 가장 낮은 특허 점유율을 보이고 있음.



[그림 II-바-7] 하상 퇴적토 정화 및 처리 기술의 연도별 유럽 특허출원현황

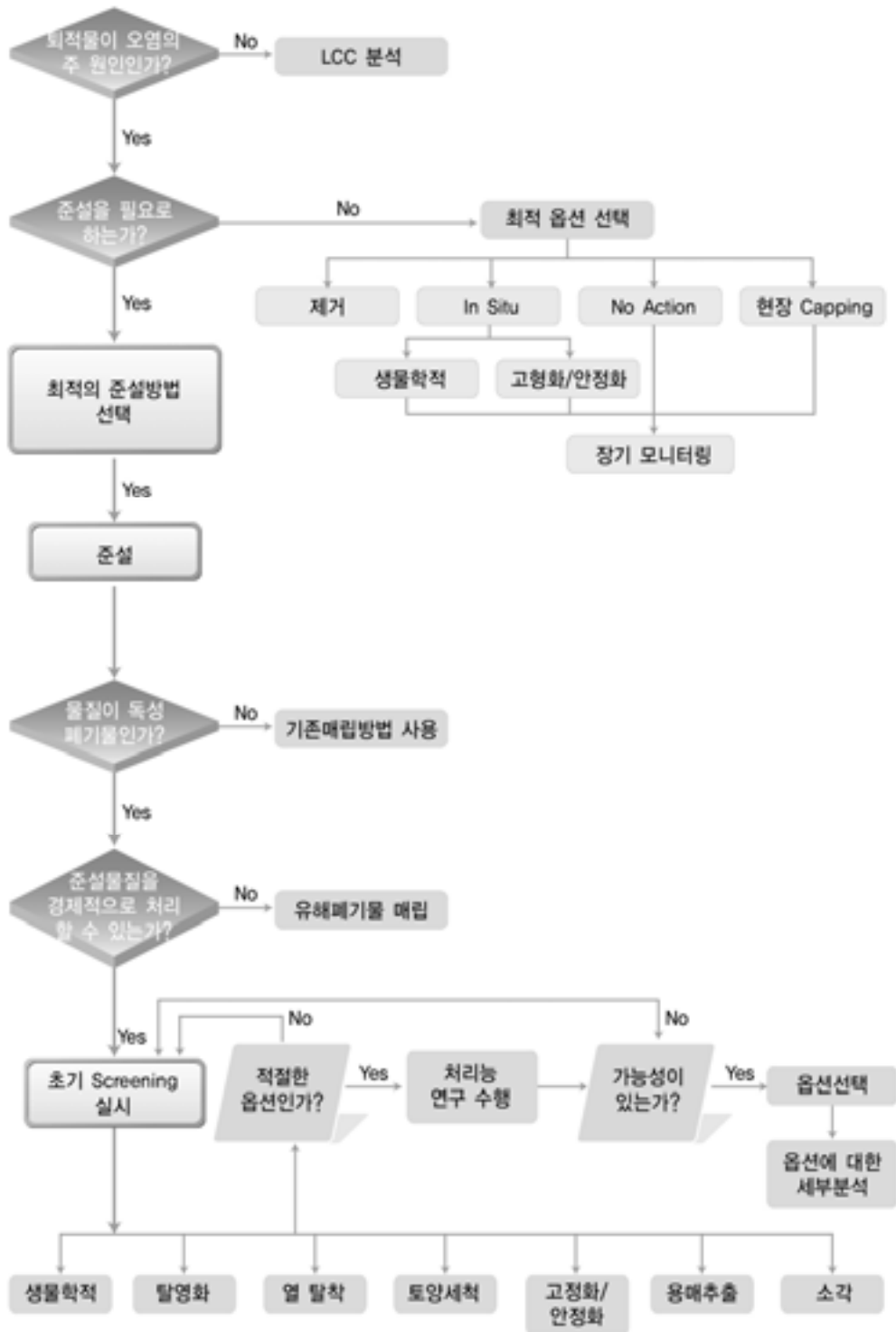
## (2) 해양오염퇴적물 정화기술 기초개발

### (가) 해양퇴적물 정화공법의 선정

- 복원기술 선택에 있어서의 첫 단계는 적용현장 및 퇴적물의 특성을 규명해야하는 것이며, 이러한 자료를 근거로 퇴적물의 오염여부 및 인체 또는 환경에 미치는 영향에 대한 잠재성에 대해 기술자가 판단할 수 있도록 해야 함
- 앞의 내용에서는 퇴적물의 오염여부를 판단할 수 있는데 도움을 주는 몇 가지의 퇴적물 특성기준을 제공함. 그림 II-바-8은 오염퇴적물처리에 적용할 수 있는 기존의 기술과 새로운 기술에 대한 적용성을 나타낸 것임
- 표 II-바-3과 표 II-바-4는 복원기술자에게 적절하지 못한 복원방법을 걸러내는데(선정) 도움을 주는데, 이렇게 걸러내고 남은 기술을 이용하여 구체적으로 실행하도록 함. 그러나 현재는 표 II-바-4에서 나타낸 바와 같이 각 변수들의 농도 범위에 대해서는 수치적으로 나타내기가 어려움
- 표 II-바-5에서는 처리방법이 각 변수들이 미치는 영향을 나타내었음
- 복원기술자는 그림 II-바-8를 가지고 기존의 옵션, 새로운 기술 또는 두 가지를 복합하는 것 중 어느 방법이 현장에 적절한지를 결정할 수 있음
- 작성이 완료된 작업계획서는 아래 네가지의 일반적인 상태를 나타낼 것임
  - 기술의 선택 : 적용될 현장의 상황에 선택한 기술이 적절한지를 지시함
  - 명쾌한 선택 : 어떤 변수 또는 특성이 현장의 상황에 맞는 기술에 맞춰져야하는지를 나타냄.



- 
- 배열 : 현장상태에 따라 상황이 많이 다르기 때문에 현장을 복원하기 위해서는 몇 가지의 기술을  
사용해야 한다는 것을 나타냄
  - 선택의 부재 : 나열된 기술 중 현장에 적합한 것이 없음을 나타냄
  - 작업계획이 완료되면 복원기술자는 기술선택단계로 넘어갈 수 있다. 기술선택단계는 다음과 같음
    - 퇴적물의 오염여부를 오염퇴적물 규정을 통해 확인 함
    - 처리옵션을 그림 II-바-8를 통해 선별함
    - 기술의 성능에 영향을 주는 중요한 요소를 통해 확인 함
    - 표 II-바-3과 표 II-바-4에서 적절하지 않은 기술을 선별함
    - 최적의 처리시스템을 결정함
  - 최종적으로 선택된 처리시스템의 현장 적용 시 다음과 같은 선택과정을 거쳐 시스템의 위치선정을 고려하여야 함
    - 해양오염 퇴적물의 준설 후 처리를 위한 운송의 문제점 해결
      - : 수분함량이 높은 준설 퇴적물의 육상으로의 이송문제, 준설퇴적물의 보관할 수 있는 공간이 부재
    - 처리시스템의 On-site 설치 시 안정성 여부 확인
      - : 안정적인 유틸리티(용수, 전기 등) 공급 필요
    - 처리를 위해 사용되는 약품(산화제, 산, 알카리 등)의 해상에서 취급가능 여부
    - 처리시스템에서 배출된 처리완료 퇴적물의 이송
  - 우리나라 해역의 퇴적토 특성 및 오염물질, 해안의 특성을 고려할 때 주처리 공법을 토양 세척공법을 적용함
    - 토양세척 전 입자분리공정을 거쳐 오염농도가 낮은 조대토사를 분리함
    - 오염농도가 대부분 분포하는 모래 - 실트 입자는 세척세를 활용하여 정화함
    - 마지막으로 오염물질의 흡착능이 높아 제거가 어려운 실트 - 점토 입자는 고형화/안정화 처리공정을 거쳐 재활용 할 수 있도록 함
-



[그림 II-바-8] 해양오염 퇴적물의 적용 가능한 처리기술 선정절차

[표 II-바-3] 오염원(그룹)에 따른 공정의 초기 선정(Screening)

오염원	생물학적 처리	탈염화	토양세척	용매추출	고형화/ 안정화	소각	열탈착
유기물							
Halogenated volatile	○	○	+	○	×	+	○
Nonhalogenated volatile	○	×	+	○	×	+	○
Halogenated semivolatiles	+	+	○	○	×	+	○
Nonhalogenated semivolatiles	+	×	○	○	×	+	○
PCBs	○	+	○	+	○	+	+
농약	○	○	○	○	○	○	○
다이옥신/Furan	×	+	○	○	×	+	○
유기 부식물	×	×	○	○	+	○	×
유기 시안화물	+	×	○	○	○	○	○
무기물							
비휘발성 금속	×	×	○	×	+	×	×
무기 부식물	×	×	○	×	+	×	×
무기 시안화물	○	×	○	×	+	○	×

※ 자료: USEPA, 1988b, 1990c, d h, I, j k, l, m

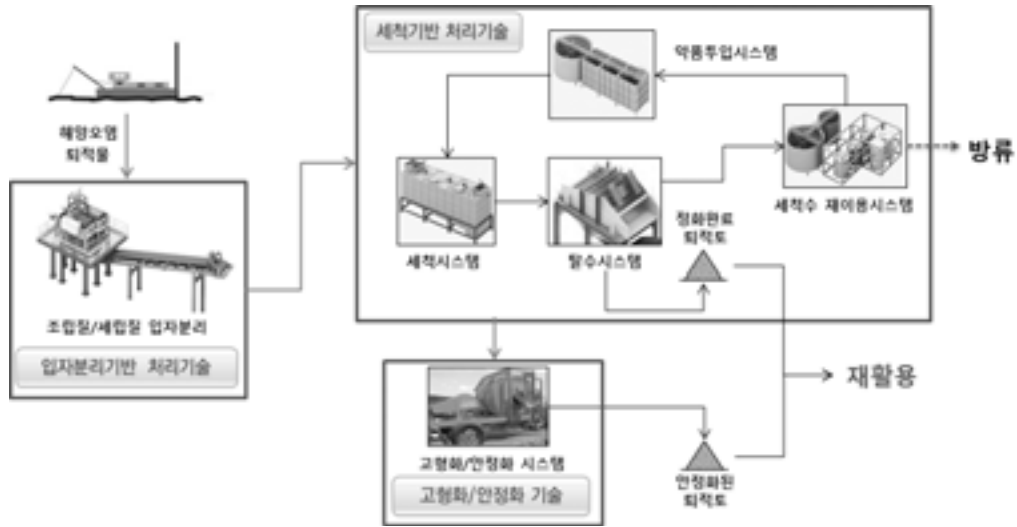
[표 II-바-4] 일반적인 영향인자를 이용한 공정의 초기선정

변 수	생물학적 처리	탈염화	토양 세척	용매 추출	고형화/안정화	소각	열탈착
집도함량							
Low	+	+	+	+	+	+	+
Medium	○	○	○	○	+	○	○
High	○	×	×	×	○	×	×
휴믹물질 함량							
Low	+	+	+	+	+	+	+
Medium	+	○	○	○	+	+	+
High	+	○	○	○	+	+	+
중금속 함량							
Low	×	×	+	×	+	+	+
Medium	×	×	○	×	+	○	○
High	×	×	×	×	+	×	×
입자크기							
Small	+	○	×	○	×	○	○
Medium	+	+	○	+	+	+	+
Large	○	×	+	+	○	○	○
pH							
Low	×	×	○	○	+	○	○
Medium	+	+	+	+	+	+	+
High	×	+	○	○	○	+	+
염도	U	+	○	○	○	+	+
실트함량							
Low	+	+	+	+	+	+	+
Medium	+	+	○	+	+	○	○
High	+	○	○	×	+	×	×
고형물 함량							
Low	+	○	○	○	○	○	×
Medium	+	+	+	+	+	+	○
High	+	+	+	+	+	+	+
폐기물 구성							
균등(Homogeneous)	+	+	+	+	+	+	+
불균등(Heterogeneous)	○	+	○		+	+	+
수분함량							
Low	○	+	+	○	+	+	+
Medium	+	○	+	×	+	○	○
High	○	×	○	×	○	×	×

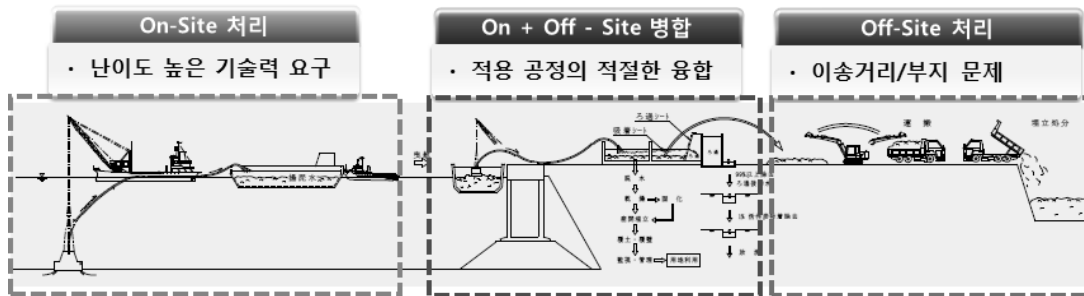
[표 II-바-5] 영향인자 효과

변 수	생물학적 처리	탈염화	토양세척	용매추출	고형화/안정화	소간	열탈착
점 토 함 량	알려진 영향 없음	반응시간 증가	오염물 제거를 방해함	효율 및 용매의 사용에 영향을 줌	알려진 영향 없음	알려진 영향 없음	처리효율에 영향을 줄 수 있음
휴 믹 물 질 함 량	알려진 영향 없음	반응시간 증가	오염물 제거를 방해함	분명한 영향 없음	45%(wt) 이상이면 결합에 영향을 줌	영향 없음	알려진 영향 없음
중 금속 함 량	미생물에 독성 일 수 있음	시약사용량 증가	불용성 금속은 제거불가	불용성 금속은 제거가능	침출되는 금속은 제거불가	휘발성 금속은 기화될 수 있음	휘발성 금속은 기화될 수 있음
입 자 크 기	일정하지 않으면 활동에(activity) 영향을 미칠 수 있음	분명한 영향 없음	세립물질의 제거는 힘들	1/4" 미만 이어야 함	200 mesh 미만 또는 1/4" 이상 이면 결합에 영향	세립자는 공정을 통과될 수 있음	세립자는 공정을 통과하여 운반될 수 있다
pH	4.5-8.5가 가장 효과적임	2 미만에서만 가능	시약선택에 영향을 줌	용매의 선택에 영향을 줌	pH는 자동으로 조정됨	낮은 pH에서는 산의 영향을 받을 수 있다	5-11 범위에 들지 않으면 부식이 생길 수 있다
염 도	미생물은 높은 염도에 적응해야함	시약의 사용에 영향을 줌	분명한 영향 없음	알려진 영향 없음	결합에 영향을 줄 수 있음	알려진 영향 없음	알려진 영향 없음
실 트 함 량	분명한 영향 없음	알려진 영향 없음	효율에 영향을 줌	효율에 영향을 줌	결합에 영향을 줄 수 있음	공정을 통과할 수 있음	공정을 통과할 수 있음
고 형 물 함 량	공정의 종류에 좌우됨	시약의 사용에 영향을 줌	분명한 영향 없음	분명한 영향 없음	15% 이하라면 많은 시약이 필요함	함량이 늘어날수록 효율이 좋음	함량이 늘어날수록 효율이 좋음
폐 기 물 구 성	불균등하다면 지속적인 활동에 영향을 줌	폭발잠재성이 있는 화합물을 생산할 수 있음 (chlorinated aliphatics)	폐기물의 분해에 영향을 줌	용매선택에 영향을 줌	불균등하다면 결합에 영향을 줄 수 있다	불균등하다면 필요에너지에 영향을 줄 수 있음	불균등하다면 필요에너지에 영향을 줄 수 있음
수 분 함 량	40-80% 이상이라면 활동을 억제함	20% 이상이라면 많은 시약 필요함	영향 없음	용매선택에 영향을 줌	알려진 영향 없음	에너지 소비 및 공급공정에 영향을 줌	에너지 소비에 영향을 줌

- 상기 기본 정화개념에 대한 도식을 나타내면 아래 그림 II-바-9에 나타내었으며, 이의 적용을 위한 처리시스템의 위치에 대한 기본 개념도는 그림 II-바-10와 같음



[그림 II-바-9] 해양오염퇴적물 처리 시스템 기본 개념도



[그림 II-바-10] 해양오염퇴적물 처리시스템의 위치에 대한 기본 개념도

### (3) 입자분리기 기반 처리기술 기초 개발

#### (가) 기본원리 및 입경별 분리목표 설정

- 준설했던 퇴적물의 처리는 일반적으로 여러 가지 방법을 병행해야 한다. 즉, 퇴적물의 전처리, 분처리 및 처리과정에서 발생하는 폐수처리 및 슬러지의 처리 등을 포함하고 있다. 이중 전처리 방법은 준설했던 퇴적물에 대하여 적절한 분처리 방법을 적용하기 위하여 퇴적토에 물리적인 조건들을 조절하여 주거나 퇴적물의 부피나 중량을 조절하여 주는 것이며, 이 방법을 일반적으로 탈수 및 퇴적토 입자분리기기술을 말함
- 앞서 선정된 퇴적물의 세척처리에 있어서 가장 중요한 것이 퇴적토의 균질성이라 할 수 있음. 즉 퇴적물의 균질성 확보가 세척처리에 있어서 처리효과나 경제적인 측면에서 훨씬 효과적인 결과를 얻을 수 있으며, 세척처리 전 퇴적물을 모래질, 실트질, 점토질로 구분하여 각각에 대하여 세척처리 하는 것이 경제성과 처리효율성을 높일 수 있는 방법임
  - 일반적으로 퇴적물의 입자크기와 오염물질의 분포상태는 반비례하는 것으로 알려져 있음. 즉 오염물은 입자가 작은 퇴적물에 비교적 강하게 흡착되어 있는 것으로 나타나는데, 오염된 퇴적물을 입자별로 분리할 수 있다면 오염물도 상당부분 분리가 가능하고, 이에 따른 세척공정에서의 처리량 및 비용을 상당히 감소시킬 수 있음. 또한, 세척공정 적용 후 퇴적물에 대한 입도선별을 통해 처리가 완료된 입자와 고형화/안정화를 적용하기

---

위한 미세입자를 분리함으로써 향후 퇴적물의 재이용관점에서 적절한 입자분리 시스템을 적용할 필요가 있음

- 하지만 일반적으로 토양세척을 적용할 수 있는 한계입경인 0.075mm를 절단입경(Cut of size)로 적용할 경우 해양오염퇴적물의 40 - 70%를 차지하고 있어 많은 부분을 고형화/안정화해야 함에 따라 본 연구에서는 경제적으로 적용할 수 있는 입자분리시스템의 한계치인 0.032mm를 절단입경으로 설정하고 이에 따른 적합한 장치의 개념적 설계를 실시하였음

#### (나) 입자분리의 원리에 따른 종류

- 입자의 분류는 퇴적물 입자의 크기, 밀도, 질량 자기특성 등의 물리적 특성을 고려하여 이루어짐. 미립자의 크기에 의한 분류는 오염물이 점토 또는 유기물과 같은 미립자 퇴적물에 흡착되거나 부착되었을 때 오염준설물질의 관리에 있어서 중요한 역할을 함. 아주 작은 clay나 유기물질의 미세입자는 상화 간에 흡착하는 경향이 있기 때문에 다량의 오염물질을 함유하고 있어 이들의 효과적인 제거를 위해서는 입자의 분리가 필요함
- 입자분리기술 선정은 오염된 퇴적물의 부피, 퇴적물의 구성성분, 준설의 형태, 설치장소 등에 의해 결정되며, 입자분리를 위한 기술로는 Impoundment Basin, Hydraulic Classifier, Hydrocyclone, Screen, Grizzlies 등이 있음

##### ① Impoundment basin

- Impoundment basin은 부유물질을 중력에 의해 침전제거하는 것으로 준설된 퇴적물이 수로를 지나면서 중력에 의해 침강시키는 방법으로, 유입부에는 조대입자가 침강되어지고 뒷부분으로 갈수록 미세입자가 침강하게 됨. 이 기술은 넓은 부지가 허용되는 곳에서 설치 가능하며 제거목적에 따라 규격이 결정됨

##### ② Hydraulic Classifier

- Hydraulic Classifier는 물리적 분리장치로 모래나 자갈 등을 준설된 퇴적물로부터 제거하며 3/8 inch로부터 약 105-74 $\mu$ m까지 분리할 수 있음
- Impoundment basin과 비슷한 기능을 가진 직사각형 탱크로 탱크의 길이에 따라 다양한 입자크기의 침전물을 제거하는 각각의 호퍼가 있다. clay나 실트와 같은 미립자의 제거를 위해서 Hydraulic Classifier와 함께 직렬로 사용되기도 함

##### ③ Hydrocyclone

- Hydrocyclone은 준설된 퇴적물을 원심력에 의해 분리하는 기술로 유체가 접선 방향으로 투입되는 cylinder 부분과 입자가 분리되어 배출되는 콘 형태의 모양의 conical 부분으로 구성됨. 입자가 크거나 무거운 것은 conical 부분으로 모아져 apex를 통해 농축수로 배출되어지고 미세입자를 포함한 월류수는 vortex finder라는 곳으로 배출되며, 은 요구되는 입자분리에 따라 형태가 결정되게 됨
- Cyclone은 기술적으로 가스 정화, 연소, 분무, 분말 분류 등에 이용되며 고액분리에 또한 이용됨.(Svarovsky, 1979) Cyclone은 액상을 처리하기 위해 특별히 고안되었는데 이를 수력학적 cyclone이나 Hydrocyclone이라 명명함. 사이클론의 기본적인 분리 원리는 원심력 침전으로, 부유입자들은 유체로부터 그 입자들을 분리시키게 하는 원심가속도의 영향을 받음. 원심분리기와 다른 점은 cyclone에는 움직이는 부분이 없고, 유체 자체의 힘에 의해서 필요한 선회운동(vortex motion)이 이루어짐.(Svarovsky, 1990; 강주명, 1986)

- Hydrocyclone의 분리효율은 확률적인 특성을 지니며, 이것은 cyclone으로 주입되는 서로 다른 입자가 위치하는 확률과 경계면 흐름(boundary layer flow)으로 분리되는 경우들과 난류의 일반적인 확률적 특성과 관계가 있음
- 조립자는 항상 미립자에 비해 더 잘 분리되는 경향이 있음
- Hydrocyclone에 feed가 유입되면 상향류와 하향류 두가지 흐름으로 나뉘게 되며, 유입 고형물은 cyclone으로 들어가서 2가지 분리물이 나오는데, 조립자 생성물 (course product, 즉 하부 고형물)과 미립자 생성물(fine product, 즉 상부 고형물)로 '조립자 생성물'로 나가는 고형물의 양만큼 회수하기 위해 가능한 한 절단입경을 낮게하여 분리기로써 hydrocyclone을 이용함(Svarovsky, 1990)

#### ④ Grizzlies

- Grizzlies는 바위나 자갈과 같은 아주 큰 입자를 제거하는데 합당한 진동설비이며, 이 장치는 크기가 큰 물질을 제거하여 다음의 연속된 공정을 위해 슬러리의 속도를 감소시키는 것으로 후속의 고체분리기술의 효율을 높여주는 역할을 함
- 후속 처리공정으로 유입되는 마모성 퇴적물의 양을 줄여주기 때문에 전체적인 유지비를 줄일 수 있게 하며 비교적 적은 공간을 차지하는 장점을 가지고 있으며, 골재의 준설 시에 이용되는 것으로 미립자의 제거는 불가능함

#### ⑤ Screen

- Screen은 선택적으로 입자를 분리하는 것으로 고정되어 있거나 진동하는 종류가 있으며, 물과 미립자는 스크린 사이로 통과하고 큰 입자는 스크린에 걸려 한쪽으로 모이게 됨. 이 기술 또한 실트나 clay 같은 미립자의 제거는 불가능함

#### ⑥ 부상분리

- 부상분리(floatation) 공정은 용액 중에 있는 물질들 계면에 존재하는 계면활성의 차를 이용한 기술로서 용액내부에 존재하는 제거대상 물질은 계면에 계면활성제 등으로 계면활성을 부여한 다음 칼럼 내부를 부상하는 기포에 이를 흡착시켜 제거하는 기술임
- 부상분리 공정을 이용한 여러 가지 입자의 분리 효과는 그 입자들의 표면 특성의 차이에서 기인하며, 일반적으로 무기물은 친수성(Hydrophilicity)을 띄는 경향이 있고, 유기물은 무기물에 비해 상대적으로 소수성(Hydrophobicity)을 띄는 경향이 있음. 이 때, 소량의 포집제가 첨가되면 유기물 입자는 포집제와 부착되어 소수성을 띄게 되고, 공기방울 표면에 부착하여 부상탑 상부로 배출됨

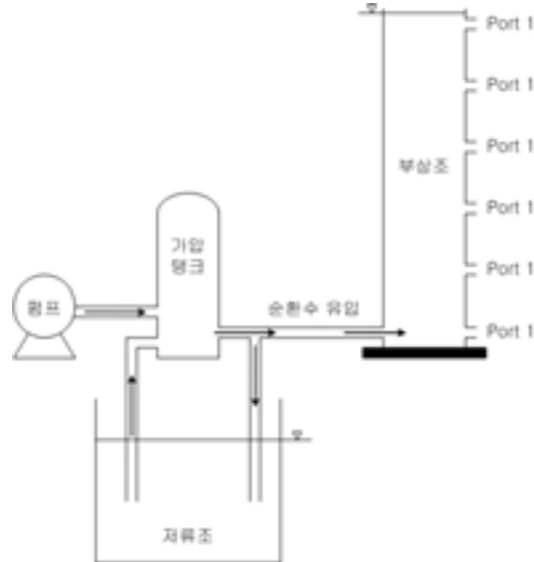
##### (다) 미세토 분리를 위한 가압부상공정 연구 결과

- 해양퇴적물 세척 시 배출되는 세척수내에는 오염물질이 농축 오염된 미세토양이 다량 함유되어 있으며 배출 세척수 처리를 위하여 침전법, 원심분리법, 부상법 등이 사용된다. 미세토양의 입자 크기가 충분한 침전성을 갖는 경우 침전법이나 원심분리법이 사용되고, 입자 크기가 작은 경우는 부상법을 사용하는 것이 유리
- 부상법의 경우 기포의 형성 방법에 따라 분산법, 전해법, 가압법 등이 있다. 분산법은 외부의 기체를 회전하는 임펠러나 산기기로 통과시켜 작은 기포를 생성하는 방법이다. 1mm 이상의 비교적 큰 기포가 생성되어 부상시 급격한 난류가 발생하여 응집 후 형성된 플록이 깨지는 등의 문제가 있다. 주로 광물 선별에 쓰인다. 전해법은 전기적 분해를 통해 전극판에서 수소와 산소 미세기포를 생성하는 방법으로 기포 사이즈가 아주 미세한



것이 특징이다. 전극관 오염으로 인한 효율 저하가 문제시 되어 오염이 심한 경우나 대규모 시설에는 적합하지 않다. 가압법은 세척수에 가압하여 공기를 포화시킨 가압수를 사용하여 약 40 $\mu\text{m}$ 의 미세기포를 생성하는 방법

- 본 연구는 해양퇴적물 세척공정에서 발생하는 폐수에 포함된 고형물의 분리에 가압부상법을 적용하기 위한 기초실험으로 분리되거나 침전되는 고형물의 특성을 파악하여 가압부상의 적용가능성을 평가하고 기초설계인자를 도출하는데 목적이 있음



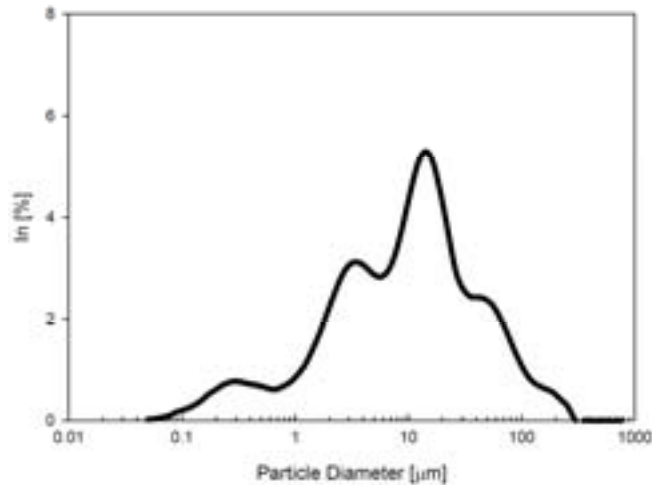
[그림 II-바-11] 미세토 분리를 위한 가압부상공정 실험 장치

① 퇴적토양 희석수의 입자분포

- 퇴적토양 희석수의 TSS 분석결과 46,800mg/L이며, PSA 분석 결과를 <그림 II-바-12>에 나타내었으며, 입자별 누적비율 자료를 살펴보면 미세 토양의 size 분포는 점토질 입자인 2.0 $\mu\text{m}$  이하가 약 19.5%, 실트질 입자인 2~50  $\mu\text{m}$ 가 약 68.5%, 사질 입자인 50  $\mu\text{m}$  이상이 약 12% 수준으로 나타남

[표 II-바-6] 퇴적토 원수의 고형물 입도에 따른 구성

토양 분류(크기)	구성비(%)
Sand (50 $\mu\text{m}$ 이상)	12
Silt (2 ~ 50 $\mu\text{m}$ )	68.5
Clay (2.0 $\mu\text{m}$ 이하)	19.5



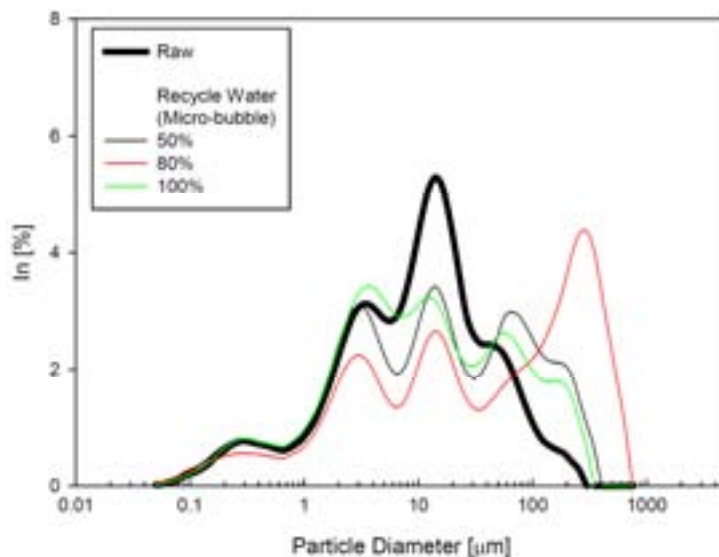
[그림 II-바-12] 퇴적토양 회석수의 입자 크기 분포

㉔ 부상에 의한 퇴적토의 미세입자 분리 특성

- 퇴적토양 회석수를 이용한 2차 실험에서는 미세기포 순환수량을 50, 80, 100%로 고정하여 부상실험을 수행하여 부상슬러지와 중심부, 침전슬러지의 PSA 분석 및 TSS 분석을 수행하였다. 침강되지 않는 현탁 고형물의 부상특성을 알아보기 위해 30분간 중력식 침전 후 상등액을 이용한 부상실험을 수행함

㉕ 부상 고형물의 입자 크기 분포

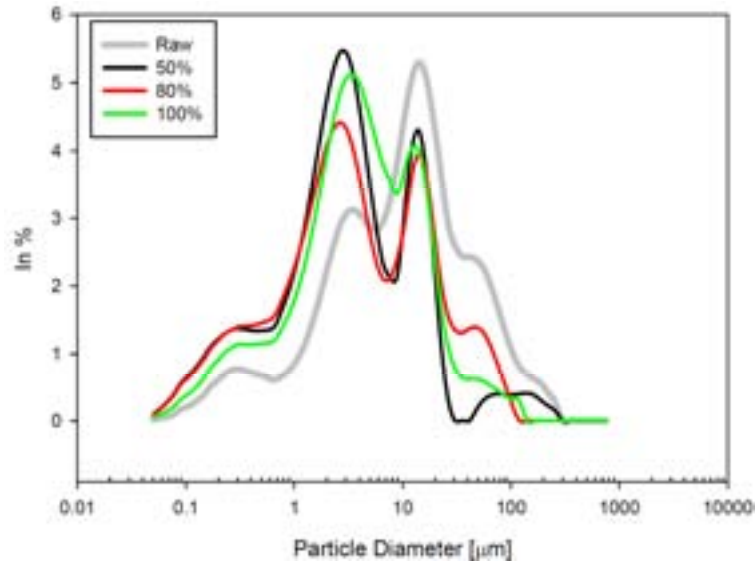
- 미세기포에 의한 부상을 통해 상부에 고형물의 입자크기분포는 원수에 비해 비교적 크게 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 원수와 비교해 볼 때 40 $\mu\text{m}$ 이상의 입자비율이 증가하였고 2~40 $\mu\text{m}$ 는 상대적으로 감소하는 것으로 나타남.
- 이러한 결과는 미세기포에 의한 부상에 있어 입자의 크기가 40 $\mu\text{m}$ 이상에서 부상이 쉽게 이루어지며 2~40 $\mu\text{m}$ 에서는 입자의 표면전하 등에 의해 미세기포와 입자간에 반발력이 발생하여 부상되지 못하고 현탁되어 발생한 현상으로 판단



[그림 II-바-13] 퇴적토 회석수의 미세기포에 의한 부상을 통한 상부 고형물의 입자크기 분포

#### ㉔ 부유 고형물의 입자 크기 분포

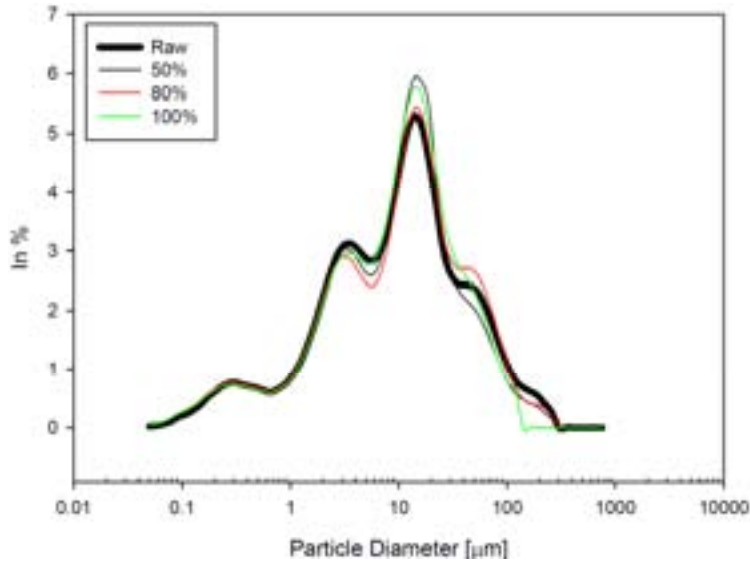
- 미세기포에 의한 부상실험을 통해 부상과 침전이 동시에 진행되고 30분 이후에 중간층에서 시료를 채취하여 입자크기분포를 측정해본 결과  $10\mu\text{m}$ 이하의 크기의 분포가 증가하는 것으로 나타남
- 원수의 입자 분포와 비교해 볼 때  $100\mu\text{m}$ 이상의 고형물은 부상이나 침전에 의해 쉽게 제거되는 것으로 나타나는 반면  $10\mu\text{m}$ 이하의 입자의 비율이 높게 나타나고 있어 부상에 의해 제거되지 못하는 입자가 현탁되어 있어 발생하는 현상으로 판단



[그림 II-바-14] 퇴적토 회석수의 미세기포 부상에 의한 중간부 고형물의 입자 크기 분포

#### ㉕ 침전 고형물의 입자 크기 분포

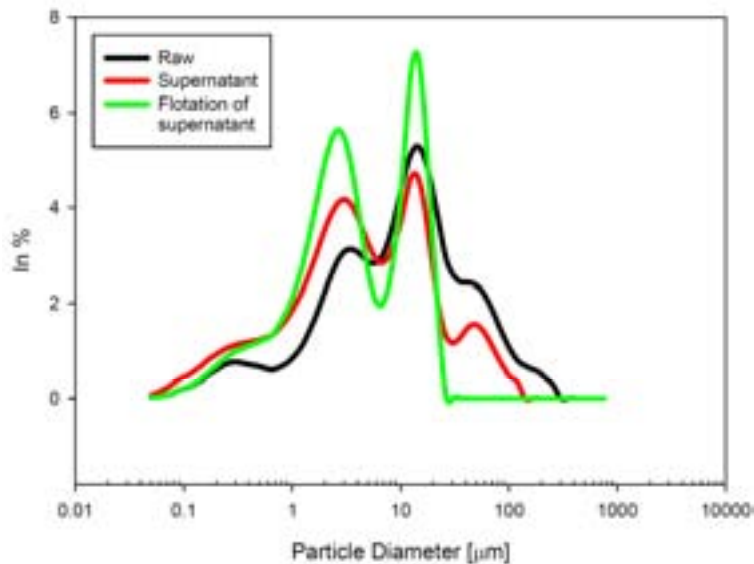
- 이러한 결과는 주입되어진 미세기포가 작은 입자와 결합되지 못하고 일정크기의 이상의 입자에 부상효과가 있음을 나타내는 결과로 미세기포의 평균입자크기보다 작은 크기의 입자의 부상을 위해서는 입자의 표면전하를 중화시킬 수 있는 약품의 주입 등의 처리가 필요할 것으로 판단



[그림 II-바-15] 퇴적토 회석수의 침전 고형물의 입자크기 분포

### ㉔ 침전 상등액의 부상분리

- 현탁상태로 존재하는 고형물의 부상가능성을 평가하기 위해 퇴적토양을 회석하여 인위적으로 조성된 회석수를 30분간 침전한 후 상등액을 분리하여 미세기포 주입량을 100%로 고정하여 부상분리 후 입자크기를 측정
- 침전 상등액의 경우 원수의 입자크기에 비해 10 $\mu$ m이하의 입자가 현탁상태로 존재하여 입자비율이 상승하는 것으로 나타남
- 침전 상등액을 부상시킨 경우 기존 상등액에 비해 입자크기 분포의 변화를 살펴보면, 20~40 $\mu$ m의 입자는 감소하였으며 상대적으로 20 $\mu$ m이하의 입자는 증가하는 것으로 나타나 일정 크기 이상의 입자는 부상에 의한 제거 가능한 것으로 판단



[그림 II-바-16] 퇴적토 침전 상등액의 입자 분포

### ③ 기초실험 고찰

- 토양세척수 내 미세입자 분리를 위한 부상분리공법의 적용을 위한 기초실험 결과 방법의

약 20~40 $\mu$ m 범위의 입자가 분리되나, 그리 큰 효율을 나타내지는 않았다. 하지만, 세척수 내의 미세입자의 분리범위를 결정하고 이에 대한 적정 분리인자를 찾는다면 현재 범용되고 있는 하이드로사이클론의 단점인 50% 절단입경을 보완할 수 있는 대안이 될 것으로 판단

#### (4) 세척기반 처리기술 기초개발

##### (가) 세척기반 처리기술 개요

- 물리학적 방법을 병행한 해양오염퇴적물의 세척기반 처리기술은 1980년대 초부터 유럽 국가, 즉 독일, 네덜란드, 벨기에 등에서 본격적으로 연구 개발되어 현재 미국·캐나다 등 북미지역에서도 범용적으로 이용되고 있는 기술로서, 이미 경제성과 처리 성능이 입증된 오염물 처리기술임
- 원래 고전적인 채광공정과 폐수처리 공정의 기본토대에 바탕을 둔 세척기술은 다른 정화 기술과는 달리 이미 기술적으로 잘 알려진 공정이라고 할 수 있으며, 이 기술은 강이나 호수, 그리고 수로나 해안 등의 침전퇴적물의 세척정화 뿐만 아니라 토양오염의 복원에도 효과적으로 적용되고 있어 다양한 적용범위를 가지고 있음
- 세척기반 처리기술은 현재 미국, 및 유럽 등지에서 활용도가 높은 기술로서 생물학적 분해가 어려운 유해화학물질이나 중금속을 빠른 시간안에 처리할 수 있는 장점을 가짐.
- 토양세척 장치의 배출수에는 오염 미세토양과 오염물질 자체가 분산상태 또는 유화된 상태, 또는 용해된 상태로 함유되어 있고, 이 고형물은 세척수와 분리되어 세척공정에 재순환됨
- 사용하는 세척제의 종류에 따라 광범위한 유기 및 무기오염물질 제거가 모두 가능함.
- 탈수케익은 매립되거나 생물학적, 화학적, 열적 처리방법에 의하여 후처리된 후 재사용
- 탈수케익을 매립하기 위하여는 양을 줄이거나 유해물질의 확산을 막기 위하여 건조 또는 고형화할 필요가 있으며 특히 탈수케익에 함유된 유해물질이 용출될 우려가 있을 경우에는 유리화도 고려되어야 함
- 그림 II-바-17은 일반적인 토양세척공정을 나타낸 것임

##### ① 기본 원리

- 해양오염퇴적물 토양세척의 원리는 퇴적토양 내의 오염물을 세척수(주로 물)와 기계적 마찰력을 이용하여 미세토양과 액상으로 이동·분리시켜 해양오염퇴적물의 오염부피를 크게 감소시키는 것임
- 세척공정은 초기에 적용 시 우선적으로 최종처리공정으로 이용되기보다는 1단계로서 해양오염퇴적물 전체 부피중 모래입경 이상 퇴적물을 경제적으로 처리·분리함으로써 오염퇴적물의 양을 단기간에 현저히 줄이고자 이용되는 공정
- 보통 오염퇴적물의 70-90% 정도가 토양세척에 의해서 처리되면 성공적인 효과를 얻을 것으로 판단함
- 일반적으로 세척공정에서 배출되는 해양퇴적물 중 모래 및 자갈류(> 230mesh, > 63 $\mu$ m)는 보통 깨끗이 처리되어 바로 되메우기가 가능하고, 약 4~40%의 부피를 차지하는 미세토양(<230mesh, <63 $\mu$ m)은 여전히 오염농도가 높아 보통 다른 공정으로 처리
- 오염된 처리수는 폐수처리시설에서 정화된 후 재순환되는 것이 일반적임. 그래서 세척 후 발생하는 오염 미세토양 및 처리수에 대한 후처리 문제도 세척공정에서 아울러 고려해야 할 중요한 사항임

- 오염물질이 토양입자로부터 세척액으로 이전되는 과정은 크게 다음의 세단계로 구분됨
  - 오염물질의 분리 또는 농축
  - 오염물질의 탈착 또는 세척
  - 오염물질의 용해 또는 추출



[그림 II-바-17] 일반적인 토양세척공정

### ㉓ 오염물질의 분리 또는 농축

- 토양입자에 대한 오염물질의 분포가 극심하게 다를 경우에 큰 의미가 있음. 예로써 오염물질의 대부분이 미세토양에 함유되어 있을 때 입도와 비중차에 의하여 미세토양을 분리 및 제거하는 것이 이 경우에 해당됨

### ㉔ 오염물질의 탈착 또는 세척

- 오염물질과 토양입자 사이에 적절한 상대속도가 유지되어야 하므로 반드시 이에 상응하는 에너지 투입을 필요로 함. 이 때 탈착효과는 상대속도가 클수록 더 크나 계면활성제를 투입하면 오염물질의 결합력을 줄여 탈착을 용이하게 할 수 있으며 토양입자끼리의 직접적인 마찰도 탈착효과를 높일 수 있는 방법임

---

## ㉔ 오염물질의 용해 또는 추출

- 용매에 오염물질이 평형농도에 도달할 때까지 계속 추출됨. 이 과정은 순수한 분자운동에 의하므로 이를 보장하기 위해서는 적절한 강도의 교반(Turbulence)이 반드시 필요함. 오염물질의 추출은 일반적으로 시간의 함수이므로 입자의 크기에 좌우되지는 않음. 그러나 입자의 크기는 후속공정인 분리과정에서 구속요건이 될 수 있음. 추출용매의 선택에 있어서 유의할 것은 토양 중의 유기물질이 화학적으로 손상되지 않는 것과 용매에 의하여 2차오염이 발생되지 않도록 선정하는 것임
  - 세척공정 적용의 한계
    - 일반적으로 오염토양의 효과적인 세척을 위하여는 오염물질의 분리공정을 선두로 하여 여러 가지 작동원리로 운전되는 장치에 몇 단계에 걸쳐 수행하는 것이 바람직하다고 판단됨.
    - 세척공정은 미세토양과 유기물함량에 따라 세척공정의 처리효율과 경제성이 달라지기 때문에 토양의 입도분포, 점토함량 및 유기물 함량은 세척공정 적용 가능성을 검토 하는데 가장 중요한 영향 인자임
    - 일반적으로 미세토 함량이 30% 이상일 경우 세척공정의 적용성 한계로 판단됨.
    - 해양오염퇴적물은 육상오염토양과 비교할 경우, 미세토 함량이 육상토양에 비해 훨씬 많기 때문에 효율적인 Cut-off size를 결정하는 것이 중요하며, 경제성을 고려하여 세척공정의 후속 연계공정도 함께 고려해야 함
  - 그림 II-바-18는 세척공정시 오염물질의 제거기작을 나타낸 것임
  - 세척공정의 이해를 위하여 토양세척공정과 추출공정을 명확히 구분할 필요가 있으며 이 두가지 공정 모두 물리화학적 처리공정이라는 총괄개념 하에 있는 것임
  - 토양세척공정과 추출공정의 차이는 처리하고자 하는 오염물질의 이동방법차이에 의하여 나타남. 토양세척에서는 입상의 오염물질이 세척액으로 이동된 후 그곳에 현탁 또는 유화됨
    - 현탁 : 토양입자가 매체(세척액)에 혼입, 분산되는 것
    - 유화 : 액체가 그 액체와 혼합될 수 없는 분산매체(세척액)에 분산되는 것을 뜻함
  - 이에 비하여 추출공정에서는 오염물질이 추출용매에 용해된 상태(분자 또는 이온상태)로 존재
  - 세척공정은 물리적인 처리로서 오염물질을 없애거나 생태학적으로 안전한 물질로 변환시키지는 못하지만, 세척공정에서도 화학적 변화가 동반되는 오염물질의 용해가 부분적으로는 함께 진행되나 세척공정 전체과정에서 용해가 가지는 의미는 매우 적음
  - 표 II-바-7은 세척공정과 추출공정의 차이점을 나타낸 것임
-



[그림 II-바-18] 세척공정시 오염물질의 제거기작

[표 II-바-7] 세척공정과 추출공정의 차이점

공정	원리	사용물질
세척	<ul style="list-style-type: none"> <li>오염물질을 기계적 에너지에 의해 제거</li> <li>오염물질을 현탁물 또는 유화물 상태로 세척액에 이전</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>물</li> <li>물 + 계면활성제</li> </ul>
추출	<ul style="list-style-type: none"> <li>오염물질을 분자상태로 용해</li> <li>오염물질이 추출용매로 이전</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>산, 알칼리의 수용액</li> <li>복합제, 유기용매</li> </ul>

② 세척공정 주요 영향인자

- 세척공정은 물리적, 물리화학적 그리고 화학적 과정이 복합적으로 얽힌 공정이므로 세척공정을 선택할 때는 다음의 영향인자를 고려해야 함

㉠ 해양오염퇴적물 특성 (Sediment characteristics)

- 입도분포 및 미세토함량
- 유기물 함량
- 완충능력
- 양이온 교환능력
- pH

㉡ 오염물질 특성 (Contaminant characteristics)

- 농도 (입도별 농도분포)



- 용해도
- 흡착성 (분배계수)
- 양이온 교환능력
- 증기압 및 점도

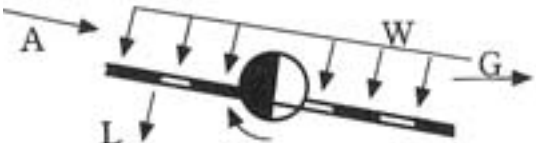
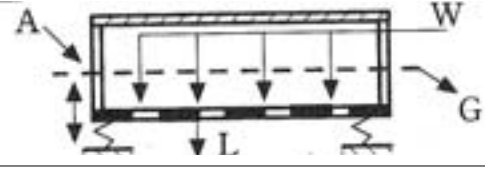
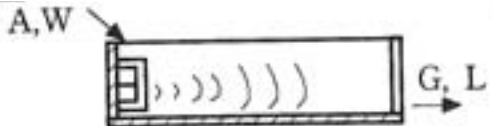
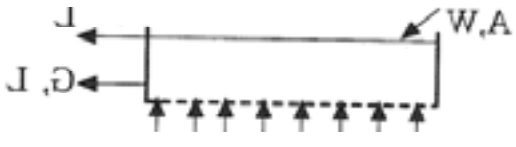
㊦ 세척첨가제 특성 (Additives characteristics)

- 종류
- 농도
- 생분해성
- 독성

③ 세척장치의 종류

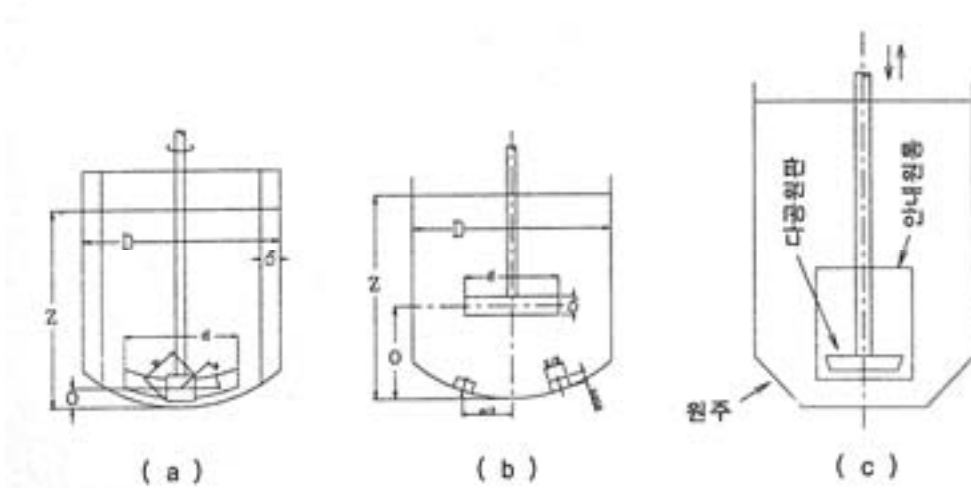
- 세척공정의 원리는 선광의 원리와 같음.
- 세척장치들을 기능별 분류하면 다음과 같음 (그림 II-바-19)
  - 회전형
  - 교반형
  - 진동형
  - 유동상형

에너지투입원리	장치의 기본형	개 념 도
공 정 공 간 회 전	회전드럼(일반형)	
	회전드럼(특수형)	
교 반 반	스크류형	
	교반기형	
	경사축형	

진 동	진동 Sieve	
	진동세척기	
	초음파 세척기	
유 동	유동상 세척기	

※ A : 오염토양, G : 정화토양, L : 폐수, W : 물

[그림 II-바-19] 토양세척장치의 종류



[그림 II-바-20] 일반 교반조

- 해양퇴적물로부터 오염물을 세척액이나 미세해양퇴적물로 분리/축적시키는 단계는 두가지 경로로 구별됨
  - 오염된 것 뿐만 아니라 오염되지 않은 퇴적물덩어리까지 잘게 분쇄하여 접촉면적을 늘리고 액상 중에 분산시킨 후 강한 shearing force를 이용한 분리인데 고압분사노즐이나 진동장치, pumping 장치, 또는 교반 등을 사용
  - 보다 나은 효율을 위하여 NaOH나 여러 종류의 세제 또는 계면활성제 등을 첨가하기도 함
- 다음 경로는 세척액 내의 용해과정임. 이 과정은 중금속오염물인 경우 더욱 중요하며 유류의 경우 화학첨가제를 사용하였을 경우 포함되는 과정임
  - 세척공정은 일종의 고·액추출 과정과 유사함. 고액추출은 오래전부터 각종공업에서 사용됨

- 고·액계의 교반은 고체입자의 액상중의 균일한 분산과 고체입자 주변의 액상확산저항의 감소를 목적으로 함
- 고액계 교반조에서 고체입자를 균일하게 분산하려면 조벽에 baffle을 설치해야 함. 조내의 균일분산보다도 입자의 부유에 교반력을 집중시키려면 baffle을 교반조 하부에 설치하여 사용하면 효과가 좋아짐
- 바닥에서 비교적 큰 입경의 입자들을 효과적으로 쌓이지 않고 상향 분산이 되도록 교반조는 내부에 작은 원통을 설치한 후 그 안에 날을 설치하여 입자의 부유 및 분산을 원활하게 함
- 그림 II-바-20에서 교반조에서 터빈이나 패들날개를 사용할 때, 고액분산에 효과적인 교반조 조건은 다음과 같음

$$d = 0.35D - 0.5D$$

$$b = 0.1D - 0.2D$$

$$C = Z/6 - Z/3$$

$$B = 0.1D$$

단, 액의 점도가 수십-수천 Pa·s 정도로 커졌을 경우는  $d=0.6D$  정도로 날개의 치수비를 크게 하였을 때가 좋다.

- 교반조작에 있어서 가장 중요한 특성은 유동조건이며 일반적으로 교반조 전체에 미치는 순환류와 국소적인 선회류인 난류에서는 그 역할이 다르게 이해됨
- 이러한 유동특성은 교반 레이놀즈수에 의하여 일반화되며 교반소요동력 전열특성 등의 모든 특성과 상관이 있음
- 교반조의 크기는 예를 들어 반응속도와 같은 단위체적당의 처리속도와 처리능력으로 결정
- 그에 따라서 임펠라의 크기, 교반회전 속도 등의 조건을 조작목적에 부합되도록 결정해야 함

#### ④ 세척첨가제

- 세척첨가제의 경우, 효율을 높이기 위하여 여러가지 첨가물이 물과 함께 쓰여지는데 Jar Test 등을 이용한 처리능시험을 통하여 오염특성에 맞는 선택을 하여야 함
- 일반적으로 자주 쓰이는 첨가제로는 pH조절제, 세제, 계면활성제, 착화제, 산화제, 그리고 응집제 등이 있음
- 해양퇴적물세척용으로 쓰이는 첨가제는 계면활성제를 주로 사용함. 이는 표면에 흡착되어 계면의 활성을 크게 하고 표면장력을 현저히 떨어뜨리는 효과를 이용하는 것임. 효율적인 해양퇴적물세척용 계면활성제는 활성제 자체의 용해도, 대상 오염물에 대한 용해도, 흡착성, 생분해성 및 생물학적 독성 등의 성질과 비용 등의 여러면에서 선택되어야 함. 해양퇴적물세척에는 표면장력이 작은 계면활성제를 선택하는 것이 바람직한데 해양퇴적물과 계면활성제 용액의 혼합물에서 중력에 의한 고·액분리가 용이하기 때문임

#### (5) 입자분리 및 세척처리기술 통합방안 기초개발

##### (가) 개념설계 개요

- 본 연구에서 개발하고자 하는 입자분리·세척기반의 융합공정 개발은 대상 조사 해역의 특성과 해양오염퇴적물 정화의 기술적 목표, 그리고 경제적·사회적 영향을 종합적으로 고려하였음
- 특히 해양퇴적물 세척기술의 가장 큰 장점은 복합오염물질 처리가 세척제의 선택적 적용

---

으로 처리효율을 극대화할 수 있고 입자크기별로 선별 처리된 퇴적물은 다양한 용도로 재활용이 가능하다는 점과 신속한 처리 및 현장여건을 고려한 장치의 구성이 가능하다는 점이라고 판단됨

- 따라서 본 연구에서 개발하고자 하는 것이 해양퇴적물의 입경크기에 제한점이나 입경분포의 제한점을 최소화 혹은 제로화 하여 모든 영역의 퇴적물을 친환경적으로 처리하고 처리된 퇴적물은 모두 자원으로써 재활용이 가능하도록 하는 것이 기술개발의 주요 착안점이라고 할 수 있음. 이를 위해서는 입자분리·세척기반의 세척공정과 고형화/안정화 공정의 융·복합을 통해서 모든 영역대의 퇴적물을 처리하고자 함

#### (나) 입자분리가반 개념설계

- 이러한 장점들 이외에 세척공법이 가지고 있는 영향인자 중 가장 중요한 것은 입도분포임. 앞장에서 설명과 같이 오염토양의 세척은 입자의 분포범위에 따라 Range 1 영역과 같은 입자분리가반으로 경제적인 처리가 가능한 부분이 있으며 이는 대부분 자갈과 일부 굵은 모래입경 정도 범위가 이에 해당됨
- Range II 영역은 해양퇴적물 오염물질의 종류 및 존재형태에 따라 선택적으로 사용하는 세척제를 이용하여 처리하는 세척기반의 토양세척 부분임. 이는 자갈 입경부터 미세한 실트 입경까지 처리 가능한 영역이 매우 광범위한 장점이 있음. 그러나 처리 가능한 입경 크기보다 PSD (Particle Size Distribution) 즉 입경분포의 개념이 매우 중요함. 눈금 체 (sieve)를 통과한 특정 입경의 무게비를 측정하여 판단하는데 이상적인 Range II 영역에서는 본 연구에서 목표로 하는 처리 한계입경 즉 0.032 mm 의 입경분포 무게비가 35% 이하일 경우 세척제 적용을 통한 해양퇴적물 세척이 가능한 영역의 한계치로 판단됨
- 나머지 Range III는 모래입경부터 실트 및 점토 입경까지가 해당이 되며 세척기반 기술로는 적용이 어려운 영역이라고 일반적으로 알려져 있음. 0.032mm 입경 기준으로 볼 때는 35% 이상 함유된 입경분포를 가진 퇴적토가 해당됨. 본 연구의 조사 해역 3군데 모두 0.032 mm 입경의 무게비가 35% 이상으로 35% 이상 만큼 세척공법이 적용하기가 어렵다는 결론에 도달할 수 있음
- 이에 세척공정에서 처리가능한 영역은 극대화하고 고형화/안정화 공정의 처리가능 영역은 최소화해야 함
- 세척공정의 처리가능 영역을 극대화하기 위해서는 Range II의 적용범위를 본 연구의 조사 해역의 특성에 맞게 0.032 mm 의 입경분포 범위인 50-70% 까지 확장시켜야 함
- 이를 위한 입자분리가반의 개념설계도(PFD)는 다음과 같음



[그림 II-바-21] 입자분리기반 개념설계도(PFD)

(다) 세척기반 개념설계

- 해양오염퇴적물을 세척공법 적용범위를 확장하기 위해서 오염물질의 종류 및 존재형태를 충분히 연구하여 처리 가능한 세척제의 조합 및 조건을 최적화하여야 함
- 적용하는 기계장치의 종류도 반응시간 단축 및 처리효율 극대화를 위해서 매우 중요한 항목이라고 판단됨
- 세척제를 적용해야하는 입경범위는 세척제와 반응할 수 있는 교반기를 통해서 처리하고 이와 같은 시스템으로 처리가 어려운 실트이하의 미세입경은 공동현상 즉 캐비테이션을 활용한 고도처리 공정을 추가하여 연속적으로 처리할 수 있도록 개념설계하였음. 이를 바탕으로 구성된 세척기반의 개념설계도(PFD)는 다음과 같음



[그림 II-바-22] 세척기반 개념설계도(PFD)

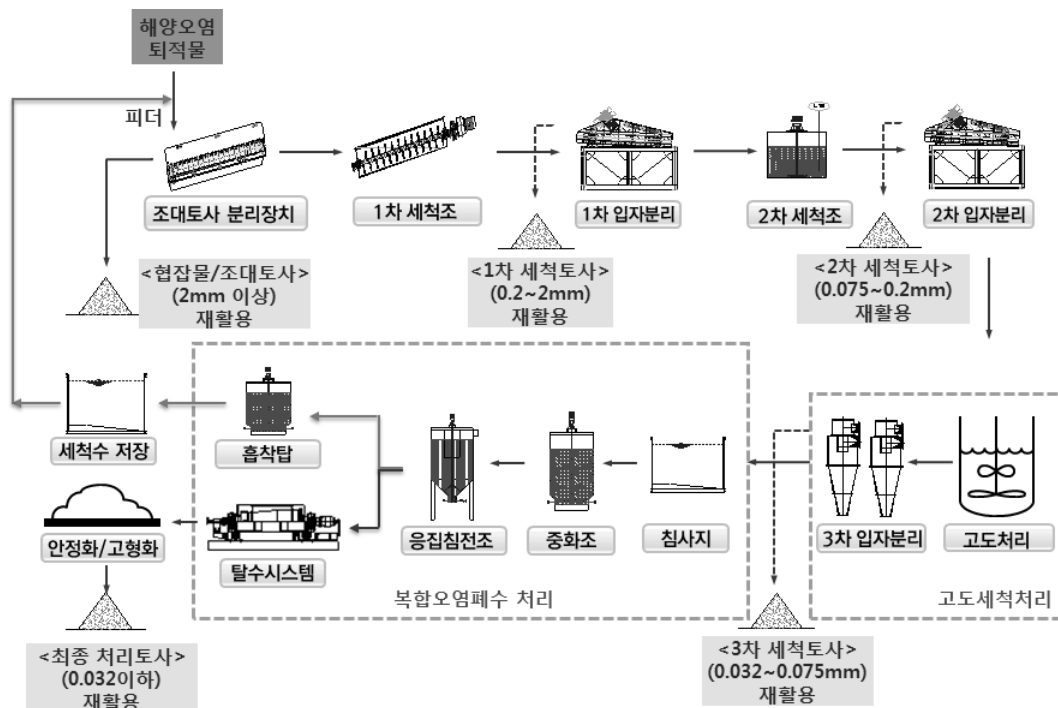
---

### (라) 세척 및 입자분리 통합 처리기술 공정별 개념설계

- 본 연구의 해양오염퇴적물 처리기술 개발은 크게 2가지로써 조사 해역의 특성을 고려한 것과 세척공정의 기술적 특성을 고려하여 개발하였음
  - 통합 처리기술 개념설계의 주요 특징
    - 해양오염퇴적물은 지구생태계의 모든 오염물질의 최종 침적지이기 때문에 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산취발성황화합물(AVS) 등 부영양화관련 오염물질 뿐만 아니라 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 수은, 니켈, 납, 아연, PCBs, PAHs 등 중금속과 유기화합물 처리도 가능한 복합오염물질 처리가 가능하도록 설계
    - 오염물질 농도가 집중된 실트 이하의 미세토 함량이 높은 해양오염퇴적물의 처리가능한 입경분포를 확대할 수 있도록 고도세척처리공정 포함
    - 해양오염퇴적물을 처리 및 정화하는데 폐기물 발생을 최대한 억제하기 위한 미세처리 퇴적물의 고형화/안정화처리하여 유용자원으로 재활용
  - 조사 해역의 지역적 특성으로는 처리장 부지의 확보가 매우 어렵고 수거 후에 부적절한 방치로 악취 및 해충 등이 발생할 우려가 있어 지역의 민원 발생 가능성이 매우 높은 것이 특징임
  - 해양오염퇴적물 처리 및 정화를 위한 주요 기술적 고려사항
    - 경제적으로 오염퇴적물을 입자크기별로 재활용이 가능한 단순 입자분리 기반의 처리기술 개발
    - 다양한 복합오염물질의 처리가 가능한 세척제 및 공동화현상(Cavitation Mechanism)을 활용한 세척기반 처리 기술 개발
    - 세척공정으로 처리가 어려운 영역의 해양퇴적물은 고형화/안정화 공정과의 융합을 통해서 처리 후 재활용
    - 위의 공정에서 발생하는 공정폐수 즉, 복합오염 세척폐수를 처리하는 공정시스템을 개발
  - 이와 같은 각종 특성을 고려하여 본 연구에서는 입자분리 및 세척 기반의 통합형 현장처리기술을 개발하는 것이 최종적인 목표임
  - 선진국형 해양퇴적물 기술을 국내 해역 여건을 고려하면 개발한 세척기반 처리시스템의 설치 위치를 충분히 고려하여 모듈화가 가능한 시스템을 구현하여야 함
  - 처리 해역의 특성에 따라 다르지만 기본적으로 수거 후 중간처리하고 육상으로 이송하여 처리하는 off-site treatment는 비용적인 문제, 이송상의 침출수 발생 등의 2차 오염문제, 악취 문제 등 많은 민원의 소지가 많아 권장하지 않음
  - 따라서 본 연구에서는 해양에서 모든 처리가 가능한 현장 내 처리 기술 즉 on-site treatment 시스템이 가능하도록 개념설계를 하였음. 이를 위해서 세척시스템의 모든 단위장치가 모듈화하여 바지선 위에 플랜트를 설치할 수 있도록 하고 각 단위장치의 크기를 최소화하여야 함
  - 특히 입자분리 및 세척기반 공정의 단위장치의 크기에 따른 소요면적 부하는 해양 내에서 배치하는 큰 어려움을 없을 것으로 판단되지만, 세척폐수 처리공정의 일반적인 단위장치는 설치 소요면적이 매우 큰 단점이 있음
  - 따라서 일반적인 육상에서 이루어지는 토양세척공정의 수처리 시스템과는 차별화되고 컴팩트화된 수처리 시스템을 개발하여야 함
  - 해양에서 처리하는 on-site treatment는 수거한 해양오염퇴적물을 별도의 이송 없이 처리 가능한 장점이 있으나 해양에서 직접처리하기 때문에 시스템 설치면적의 한계로 인해서
-

처리용량이 제한적인 단점이 있음

- 육상처리는 별도의 이송과 처리 부지의 확보가 필요하며 이송거리를 최소화 하고 처리부지 확보를 최소화하기 위해서는 on-site 처리와 off-site 처리를 융합하는 시스템 구성이 on-site와 off-site의 장점을 극대화하는 방법임
- On-site는 해양에서 처리하는 부분은 입자분리 및 세척기반 시스템까지 처리하고 세척폐수 시스템은 off-site인 연안에서 가까운 육상에 처리부지를 확보하여 처리하는 것 방안임
- 육상에서 널리 적용하고 있는 토양세척공법의 일반적인 문제점들은 다음과 같음
  - 오염물질 반응공정을 일반적으로 비용이 비싸고 오염물질 탈착/추출에 최소 30분 이상의 장시간이 소요되므로 연속공정 운영한계로 회분식 공정으로 운영을 함
  - 입경분리는 하이드로싸이클론을 활용하여 분리하는데 일반적인 분리입경이 0.075 mm 로써 이를 해양퇴적토에 적용할 시에는 응집슬러지양이 너무 과도하게 발생하는 문제가 발생하여 세척공정의 경제성 확보에 문제가 발생할 수 있음
- 따라서 본 연구에서는 반응공정의 반응시간과 처리효율 개선을 위해서 캐비테이션과 같은 촉매 작용하는 고도처리와 세척제 최적화를 통해서 연속적 처리가 가능하도록 개념 설계하였음
- 그리고 미세토 입경분리의 고도분리를 위해서는 다단 미세하이드로 싸이클론(multi-micro hydrocyclone)을 선정하여 분리입경을 최소 0.032mm는 분리가 가능하도록 하였음
- 상기내용을 바탕으로 구성된 세척/입자분리기반 통합 처리 시스템의 개념설계도를 그림 II-바-23에 나타내었음
- 개념설계도 상의 단위장치에 대한 내용 및 기본사양은 다음과 같음



[그림 II-바-23] 세척 및 입자분리 통합 처리기술 공정별 개념설계도

### ① 호퍼 및 피더

- 세척시스템으로 해양오염퇴적물을 공급하는 장치로 준설된 해양퇴적물의 함수율에 따라

---

스크류형 및 벨트형 등을 활용할 수 있으며, 정량공급을 위한 호퍼를 설치할 수 있음

- 준설된 해양퇴적물의 함수율이 높을 경우 별도의 전처리 장치를 설치하여야 함에 따라 퇴적물 준설 시 높은 함수율이 유지 될 수 있도록 해야 세척시스템의 운영부하를 일정하게 유지할 수 있음

### ② 조대토사 분리장치

- 조대토사 분리를 위한 습식진동 선별기는 1단 스크린 10mm, 2단 스크린 2.0mm 를 선별 분리하는 장치로서 준설된 해양퇴적토에 세척수를 고압 분사하여 오염물질을 탈착하며 1 단 스크린에서 10mm 이상의 자갈을 선별하고 2단 스크린에서 2.0mm이상의 토사를 선별 하게 됨
- 선별된 2.0mm 이상의 청정자갈은 배출 콘베어에 의해 배출됨. 구성장치는 습식진동 선별기, 세척청정자갈 배출 콘베어로 구성되는데, 선별을 위하여 사용되어지는 망목의 재질은 내구성을 고려하여 우레탄 망목을 사용함

### ③ 1차 세척조

- 1차 세척조는 조대토사 분리장치에서 분리된 2mm 이하의 퇴적물에 물리적으로 흡착된 오염물질을 탈착하는 장치로서 세척수와 오염토사 상호간의 마찰을 유발하여 오염물질을 탈착하게 됨
- 이러한 과정을 거쳐 오염물질 탈착이 완료되면 세척토사와 세척수는 세척청정모래 탈수 장치로 이송되며, 1차 세척조의 구성장치는 모래이송펌프, 세척조(로그워셔형 또는 교반기형)로 구성됨

### ④ 1차 입자분리 장치

- 1차 세척조에서 세척된 2mm 이하의 세척청정토사는 습식진동선별기에 의해서 0.2mm를 분급하며, 분급시에 세척청정모래를 탈수 배출함
- 탈수 시 상부에서 린싱수를 살수하고 진동 탈수된 세척청정모래는 배출콘베어를 이용하여 배출되며, 분급된 0.2mm 이하의 토사를 함유한 세척수는 2차 세척조로 이송됨
- 장치는 세척청정모래 탈수장치와 세척청정모래 배출 콘베어로 구성됨

### ⑤ 2차 세척조

- 2차 세척조는 1차 입자분리장치에서 분리된 0.2mm - 0.075mm의 퇴적물에 흡착된 유기 오염 오염물질을 약품을 주입하여 산화, 제거 시키는 장치로서 퇴적도 표면에 흡착되어있는 오염물질과 산화제의 화학적 산화반응을 유도하여 오염물질을 제거하게 됨
- 이러한 과정을 거쳐 오염물질의 제거가 완료되면 2차 세척토사와 세척수는 2차 입자분리 장치로 이송되어 분리됨
- 2차 세척조의 구성장치는 모래이송펌프, 세척조(교반기형)로 구성되며, 산화제가 적용됨에 따라 세척조의 내부는 PE코팅을 적용하면 내구성을 향상 시킬 수 있음

### ⑥ 2차 입자분리 장치

- 2차 세척조에서 세척된 0.2mm 이하의 세척청정토사는 하이드로싸이클론에 의해 0.075mm 로 분급하고, 분급된 세척청정토사를 탈수 배출하는 장치로서 2차 세척조에서 분급된 0.075mm 이상의 세척청정모래를 진동탈수 장치에 의해 탈수 후 배출콘베어를 이용하여



배출됨

- 분급된 0.075mm이하의 미세토사를 함유한 세척수는 고도세척처리장치로 이송되며 장치는 하이드로사이클론, 세척청정모래 탈수장치와 세척청정모래 배출 콘베어로 구성됨

### ⑦ 고도세척처리 시스템

- 2차 입자분리 장치로부터 이송된 0.075mm 이하의 미세토사에 흡착된 오염물질을 최종처리하는 장치임
- 0.075mm 이하의 미세입자의 경우 일반적인 세척공법으로 정화가 잘 되지 않기 때문에 세척제와 세척제의 효율을 극대화 시킬 수 있는 보조장치가 필요함
- 고도세척처리 시스템은 0.075mm 이하의 미세토사의 오염물질 처리를 위하여 초음파 발생장치가 부착된 세척조(교반기형)와 세척완료 된 미세토사의 0.032mm 분급을 위한 멀티 하이드로사이클론 장치, 하이드로사이클론으로 배출된 청정미세토사의 탈수장치 등으로 구성됨

### ⑧ 복합오염폐수처리 시스템

- 고도세척처리 시스템에서 배출되는 0.032mm 미세입자가 포함된 세척수는 침사지, 중화조, 응집침전조, 흡착탑 등을 거쳐 세척수로 재활용되며, 응집침전된 0.032mm 미세입자는 탈수시스템(필터프레스 또는 데칸터)를 거쳐 최종 고형화/안정화 장치를 거쳐 재활용할 수 있는 형태로 배출됨

## 사. 해양오염퇴적물 정화·복원 관련 법령 개정안 개발

### (1) 해양오염퇴적물 정화·복원 현황 및 사례

- 폐쇄성 및 반 폐쇄성 해역으로서 해수교환율이 낮아 육상으로부터 유입되는 각종 오염물질이 해저에 많이 퇴적되어 있는 내만 등에서는 축적된 오염퇴적물로부터 오염물질이 용출되는 등 재순환으로 인하여 환경기초시설의 증설에도 불구하고 해역의 수질오염이 가중되고 있는 실정임. 이에 따라 해수 수질개선 및 해양생태계 회복이 어려운 해역을 대상으로 오염해역의 정화복원을 위한 준설사업을 실시하고 있음(환경부, 2007)
- 또한 부산해양항만청은 2009년부터 2013년까지 5년간 오니전용선을 이용, 부산 남항 일대 오염해역인 38만<sup>m</sup>에서 26만4,000 <sup>m</sup>의 오염물질을 걷어내는 사업을 실시하고 있음. 그동안 남항은 정박 어선과 조선소, 인근 상가 등에서 각종 오염수가 유입되는 데다 해수 흐름이 원활하지 못해 오염물질이 바닥에 퇴적되는 바람에 해양오염과 악취가 심각한 수준이었음. 이 때문에 고통을 겪던 인근 상인과 수산업 종사자들은 남항의 해저 폐기물 수거와 퇴적물 준설사업의 필요성을 줄기차게 제기해 왔으며, 부산시도 정부 측에 오염퇴적물 준설을 강력하게 요청해 왔음
- 정화복원을 위한 준설사업의 필요성이 강함에도 불구하고 이를 뒷받침하는 법규는 미비한 상태임. 그 결과 준설사업의 개시시점, 범위, 방법, 오염퇴적물의 수거기준·방법, 오염퇴적물 수거업자의 선정, 수거된 준설물질의 처리기준 및 방법 등에 대해 논란이 예상됨
- 국토해양부는 2004년부터 해양오염퇴적물 분포현황을 조사하였고, 현재 부산 남항 등의 해역에서 정화·복원사업을 시행 중임(표Ⅱ-사-1 참조). 한편, 특별관리해역의 일부인 인천 연안부두 일원 등 4곳에 대한 대한민국해양부의 2011년도 해양오염퇴적물 분포현황조사(부영양화 관련 3개, 유해화학물질 관련 14개 항목)에 따르면 인천 북항의 수로구역 일부, 광양만 여수산단 및 부산 다대포항 일부지역에서 오염도가 기준을 초과하여 정화·복

원사업이 필요한 것으로 평가됨. 이에 따라 국토해양부는 2004년 이후 조사한 해역 중 오염기준을 초과하는 16개 해역에 대해 향후 준설토 처리장 확보, 육상기인 오염원 차단 방안, 주민 의견 등을 종합 검토한 후 정화·복원사업 시행 여부와 시기를 결정하고, 오염 퇴적물 정화사업을 통하여 수질 및 생물독성이 개선되고 수질이 향상되어 어획량 증대 및 관광산업 활성화에 기여하도록 할 계획을 밝힌 바 있음

[표 II-사-1] 해양오염퇴적물 정화·복원사업 현황(2011. 12. 현재)

사업 지역	사업기간	사업비 (백만원)		복원량 (천㎡)	
		총액	투입	계획	실적
계		61,239	23,895	656	206
부산 남항	'08~계속	28,500	6,695	255	57
부산 용호만	'09~'11	9,739	10,200	70	64
여수 신항	'11	10,500	6,300	128	85
울산 방어진항	'11~계속	12,500	700	203	-

- 해양오염퇴적물 정화·복원 사업으로 부산 남항의 경우 3등급이었던 바다 저층 수질은 2등급이 되었고, 2등급이었던 표층 수질도 1등급으로 개선됨
- 부산 용호만 일원은 1962년 매립공사 이후 해수 흐름이 정체된 공유수면에 오랜 세월 쌓인 쓰레기와 퇴적물이 부패하면서 심각한 수질 오염으로 몸살을 앓아왔고, 악취 때문에 극심한 생활 불편을 호소하는 주민 민원도 끊이지 않았음
- 부산 용호만 오염퇴적물 정화사업 결과 대연천과 용호천 등의 하천 수질이 상당 수준 개선된 것으로 나타남. 부영양화를 유발시켜 수질오염을 초래하는 오염물질인 질소와 인의 경우, 질소는 평균 농도가 2.076-4.897mg/L로 준설 전과 비교해 82-91% 감소했으며, 준설 전 0.997-4.084mg/L로 심각한 수준이었던 인 농도 역시 준설 후 0.17-0.454mg/L로 최고 92% 저감되는 효과를 거둠
- 그러나 용호항은 질소와 인 농도는 비교적 감소했으나, 용존 산소량(6.85mg/L→6.7mg/L), 화학적 산소요구량(3.6mg/L→3.2mg/L) 등의 항목에서 별반 개선 효과를 나타내지 못한 채 여전히 최저 등급 기준에 머물러 있는 것으로 조사됨. 육상에서 끊임없이 오염된 생활 하수와 퇴적물이 흘러들면서 준설 이후에도 다시 해저에 오염물이 쌓이는 악순환이 계속되고, 해저에 쌓인 오염물이 축적되는 지형 특성 탓에 용호만 연안은 정화사업 이후에도 수질 개선 효과가 미미하고, 재오염이 진행되고 있는 것으로 드러남

## (2) 우리나라 및 외국 법제

### (가) 국내 법제

#### ① 개관

- 해양오염퇴적물은 수질 환경에 많은 영향을 주며, 주로 육지에 인접한 만 또는 석호 등을 중심으로 분포하기 때문에 연안 생태계 및 인간의 생활에 중대한 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고 우리나라는 현행법상 해양오염퇴적물을 규제하는 별도의 법체계를 가지고 있지 않음. 특히 해양환경 관리의 근거를 제공하는 「환경정책기본법」, 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」, 「해양환경관리법」 등에 해양퇴적물의 오염방지 및 관리·처분을 위한 직접적 규정이 없어 이에 대한 법적 근거의 마련이 시급히 요청되고 있음(이대영, 2001)
- 다만 종래의 「해양환경관리법」은 육지에서 처리하기 어려운 폐기물의 해양투기를 법적으로 허용하였으며, 해양오염퇴적물 역시 해양투기의 대상으로 처리함. 그러나 2008년 8

월 22일 이후 준설품질의 해양투기가 금지되면서 준설품질의 육상 내 처리가 불가피해짐. 현재 해양투기대상 준설품질이 육상에서 처리될 경우에는 일반적으로 환경부 관할의 「폐기물관리법」을 준수해야 하고, 해상에서 처리될 때에는 해양수산부 관할의 「해양환경관리법」을 준수하여야 함. 「폐기물관리법」 이외에 준설품질의 해양투기와 관련된 법률은 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」, 「토양환경보전법」, 「건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률」, 「자원의 재활용 촉진에 관한 법률」, 「골재채취법」, 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 등이 있음

**② 해양환경관리법**

- 현행 「해양환경관리법」에서는 해양오염퇴적물에 대해서 단편적·간접적으로 규제·관리하고 있을 뿐임. 오염퇴적물로 인한 해양환경개선조치(제18조)가 대표적임. 이와 더불어 해양환경기준의 설정(제8조), 오염물질의 배출금지(제22조), 해양환경관리업(제70조) 등에서 오염퇴적물 또는 준설토사의 해양투기 및 처리와 관련한 규정을 두고 있음. 특히 오염퇴적물과 준설토사의 처리와 관련해서는 해양배출(제22조), 수거(제18조) 이외의 호안매립, 재활용, 수중고립처분 등에 대한 고려가 없음. 그러나 근본적으로 비오염퇴적물과 오염퇴적물을 별도로 관리하지 않고 있으며, 오염퇴적물과 준설토사의 개념을 명확히 정립하고 있지 않음. 더욱이 오염퇴적물 또는 준설토사의 “운반·처리·처분” 등을 타 법률의 규정을 준용토록 함으로써 오염퇴적물의 체계적인 관리·처분 제도를 두지 못하였다는 한계를 지니고 있음

**㉠ 해양환경기준의 설정**

- 「해양환경관리법」 제8조는 해양수산부장관에게 「환경정책기본법」 제11조의 규정에 따른 환경기준을 고려하고 「해양수산발전기본법」 제13조의 규정에 따른 해양환경의 보전을 위한 시책에 필요한 해양환경의 기준을 해역별·용도별로 정하여 고시하여야 한다고 규정하고 있음. 해양환경관리법에 따른 해양환경기준에는 ‘해저퇴적물’ 항목에서 비소(As) 등 6개 오염물질에 대하여 ‘주의기준’과 ‘관리기준’으로 구분하여 오염퇴적물에 관한 기준을 설정하고 있고(표 II-사-2 참조), ‘해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정(국토해양부 고시 제2011-700호, 2011. 11. 30. 제정)’에서 유해화학물질과 부영양화에 관한 정화지수를 설정하여 정화·복원 범위를 규정하고 있음(제8조, 제9조, 별표 2 및 별표3)

**[표 II-사-2] 해양환경관리법에 따른 해양환경기준  
(국토해양부고시 제2011-972호, 2011.12.30., 제정)**

□ 해저퇴적물

단위:ppm						
해양환경기준	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn
주의기준	14.6	0.75	50.5	0.11	44.0	179
관리기준	75.5	2.72	126	0.62	119	421

(1) 주의기준(Threshold Effects Level, TEL) 이하: 부정적인 영향이 거의 없을 것으로 예측되는 범위  
 (2) 주의기준과 관리기준 사이 : 부정적인 생태영향이 발현될 가능성이 있는 범위  
 (3) 관리기준(Probable Effects Level, PEL) 이상: 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 높은 범위  
 (4) 적용방법(생략)

### ㉔ 해양환경개선조치

- 「해양환경관리법」은 오염퇴적물을 해양환경개선조치(제18조)의 관리대상으로 규정하고 있음. 해역관리청은 오염물질의 유입 또는 퇴적 등으로 인한 해양오염을 방지하고 해양환경을 개선하기 위하여 필요하다고 인정되는 때에는 해양환경개선조치의 일환으로서 오염물질 유입방지시설의 설치, 오염물질의 수거 및 처리, 오염된 퇴적물의 수거, 그 밖에 해양환경개선과 관련하여 필요한 사업으로서 해양수산부령이 정하는 조치를 취할 수 있도록 하고 있음(동조 제1항). 동법은 해양환경개선조치의 발동근거로 “필요하다고 인정되는 때”를 들고 있는데 막상 구체적인 기준, 발동 시점 등이 규정되어 있지 않음. 한편, 오염물질의 경우에는 수거와 함께 처리까지 언급하고 있는데 오염된 퇴적물의 경우에는 수거만을 언급하고 있음

### ㉕ 해양배출 금지 및 예외적인 배출허용기준

- 「해양환경관리법」은 선박으로부터 오염물질을 해양에 배출할 수 없다고 규정하면서(제22조 제1항) 다만, 해양수산부령이 정하는 폐기물을 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제28조 및 제35조의 규정에 따라 매립하고자 하는 장소에 배출하고자 하는 경우에는 해양수산부령이 정하는 처리기준 및 방법에 따라 배출하도록 하고 있음(제22조 제1항 나목). 동법에 따르면 수저준설토사는 선박으로부터 공유수면을 매립하려는 장소에 배출할 수 있는 폐기물에 해당됨(시행규칙 제11조 제1항 관련 별표 3). 그리고 동법은 폐기물의 배출허용기준에 관하여 ‘수저준설토사’는 호안시설을 설치하여 해역과 차단하도록 하고 다만, 선박에 의하여 호안의 안쪽에 배출하는 경우에는 배출을 종료할 때까지 선박의 항해구간에 한하여 호안시설 대신에 오탐방지막을 설치할 수 있다고 규정하고 있음. 그리고 상등수를 해양으로 배출하는 경우 부유물질이 흘러 나가지 못하도록 하는 시설 또는 설비를 갖추는 것을 요함(시행규칙 제11조 제1항 및 별표 3)
- 또한 동법 제23조 제1항에서 육상에서 발생한 폐기물의 해양배출금지를 규정하면서, 해양수산부장관에게 해양환경의 보전·관리에 영향을 미치지 아니하는 범위 안에서 육상에서 처리가 곤란한 폐기물에 대하여 배출하게 할 수 있는 권한을 부여하고 있음. 이에 따라 동법 시행규칙 제12조는 해양에 배출할 수 있는 폐기물 및 그 배출해역과 처리방법을 규정하고 있음(별표 6과 별표 7). 또한, 해양배출이 가능한 폐기물인지 여부를 검사할 때에는 적합한지 여부를 검사하여야 한다고 규정하고 있음

### ㉖ 해양환경관리업

- 「해양환경관리법」은 해양환경관리업(제70조)을 등록제로 규정하고 퇴적오염물질수거업(동조 제1항 제5호)은 여기에 포함됨. 이에 따라 ‘해양환경관리업’을 영위하려는 자는 대통령령이 정하는 바에 따라 해양수산부장관 또는 해양경찰청장에게 등록하여야 함(동조 제1항). 해양환경관리업에는 폐기물해양배출업, 해양오염방제업, 유창청소업, 폐기물해양수거 및 퇴적오염물질수거업이 포함됨. 이 중 오염퇴적물의 수거·준설과 관련된 ‘퇴적오염물질수거업’이란 “퇴적된 오염물질의 준설·수거에 필요한 선박·장비 및 설비를 갖추고 퇴적된 오염물질을 준설 또는 수거하는 사업”을 말함(동조 제1항 제5호)

### ③ 폐기물관리법

- 해양에서 수거된 폐기물 또는 오염된 퇴적물을 육상에서 처리하고자 하는 경우, 수거된 폐기물은 「해양환경관리법」 상에 별도의 규정이 없는 한 「폐기물관리법」의 적용대상이 될 가능성이 많으며, 오염된 퇴적물의 경우에는 이를 폐기물로 볼 것인가에 따라 그 적용이 달라질 것임. 실제로 지정폐기물이면서 사업장에서 배출되는 오니(하수처리 또는

---

정수(淨水)과정에서 생긴 침전물로서 수분함량이 95% 미만이거나 고형물 함량이 5%이상)와 달리 이와 형질이 유사한 준설토사는 「폐기물관리법」에 규정되어 있는 사업장일 반폐기물의 수집·운반·보관·처리기준 및 방법에 따라 유해물질을 포함하고 있는 경우에도 흔히 이를 제거함 없이 해양투기하거나 육상 매립장에 처분됨

#### ④ 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률

- 수질오염물질을 함유한 오염퇴적물을 수거·준설함으로써 발생하는 부유물질 등에 관해서는 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」의 적용을 받을 여지가 있고, 오염퇴적물의 환경기준의 설정 및 위해성평가 등을 규정함에 있어 수질오염의 측면에서 이를 고려해볼 수 있음. 이밖에 동법은 배출허용기준(제8조), 투기 등의 행위 금지(제28조) 등을 규정하면서 특히, 공공수역의 점용 및 매립 등에 의한 수질오염방지를 위하여 공공수역에 대한 점용 또는 매립을 허가 또는 인가하고자 하는 행정기관은 수질오염 방지를 위한 조건을 붙일 수 있도록 하여(제18조 및 동법 시행령 제22조) 오염퇴적물 또는 준설토사의 투기 또는 매립을 규제하고 있음

#### ⑤ 토양환경보전법

- 「토양환경보전법」은 토양오염의 규제를 위해 개별 환경법에서는 유일하게 토양오염피해를 유발한 오염원인자에 대해 무과실책임을 인정하고 토양오염의 “우려기준” 및 “대책기준”을 수립하여 토양오염에 노출된 사람의 건강·재산 및 동·식물의 생육 등에 피해를 방지하고 오염된 토양의 정화(제15조의3) 등의 조치를 취할 수 있는 근거를 마련하고 있음. 한편 퇴적물에 관해서는 별도의 오염기준과 정화기준이 설정되어 있지 않음. 이에 따르면 오염된 준설토사를 육상 내 매립하거나 매립토 등으로 이용하는 경우에는 토양오염의 우려기준 및 대책기준 이하일 것이 요구됨
- 이와 함께 「토양환경보전법」은 오염토양을 버리는 행위와 보관·운반 및 정화 등의 과정에서 오염토양을 누출·유출하는 행위 등 오염된 토양의 투기·누출·유출 등을 규제하고 있는데(제15조의4), 이와 관련하여 준설했 오염퇴적물의 이동 또는 보관상의 누출·유출이나 육상 내 불법투기 등을 규제함에 있어서는 동법의 적용을 받을 여지가 있음
  - 이 밖에 동법은 토양환경검사(제13조), 토양환경의 평가(제10조의 2) 및 위해성평가(제15조의 5) 등의 규정을 두고 있음. 토양환경의 검사 및 평가, 위해성평가 등의 규정은 토양에 한하는 것이지만 준설했 오염퇴적물의 경우에도 이와 같은 규정이 적용될 수 있음. 물론 본질적으로 토양이 아닌 오염퇴적물의 경우에 이러한 규정들이 반드시 적용된다고 보기는 어려우며, 오염퇴적물에 관해서는 「토양환경보전법」상의 기준들과 규정들이 보완되어야 할 것임

#### ⑥ 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률

- 「건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률」은 건설공사 등으로 인해 건설폐기물이 발생하는 경우에 건설공사의 발주자(제5조), 건설업자 및 배출자(제6조) 그리고 건설폐기물처리업자 등(제7조)에게 적정처리 및 재활용 촉진을 위한 의무를 규정하고 있음. 또한 “순환골재”의 활용을 위하여 건설폐기물의 재활용을 촉진하기 위하여 순환골재의 용도별 품질기준 및 설계·시공지침 등에 관하여 필요한 기준을 정하도록 하고 있음(제35조). 예를 들어 준설토사를 골재로 활용하고자 하는 경우에는 순환골재의 품질기준 등을 적용할 수 있을 것임

#### ⑦ 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률

- 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」은 재활용가능자원에는 “사용되었거나 사용되지 아니하고 버려진 후 수거(收去)된 물건과 부산물 중 재사용·재생이용할 수 있는 것”과 “회수할 수 있는 에너지 및 폐열”을 포함한다고 규정하고, 부산물 중 그 전부 또는 일부를 재활용하는 것이 그 자원을 효율적으로 이용하는 데 특히 필요한 것은 “지정부산물”로 지정하고 지정폐기물에 대해서는 지정폐기물 배출 사업자에게 일정한 의무를 부여하고 있음(제23조). 현행 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」은 철강슬래그 및 석탄재 외에 토사 등의 경우에는 2007년 개정으로 지정부산물에서 제외함(시행령 제3조). 동법은 이밖에도 제조업자 등에게 재활용의무(제16조) 및 의무율(제17조)을 부여하고, 재활용의무이행계획서의 제출(18조) 및 재활용부과금의 징수(제19조) 등을 규정하고 있음
  - 오염퇴적물 또는 준설토사는 많은 경우 사업장일반폐기물과 같이 취급될 수 있으므로 수거된 오염퇴적물을 유용하게 이용하기 위해서는 재활용에 관한 동법의 규정들이 적용될 여지가 있음

### ⑧ 골재채취법

- 「골재채취법」 상의 “골재”는 하천·산림·공유수면 기타 지상·지하등에 부존되어 있는 암석(쇄석용에 한함)·모래 또는 자갈로서 건설공사의 기초재료로 쓰이는 것을 말하는데(제2조 제1호) 골재 퇴적물은 골재에 해당하여 동법이 적용됨
  - 준설했던 골재의 세척·탈수 등의 과정에서 발생하는 폐기물은 사업장일반폐기물로 관리하고 있으므로 준설토사를 골재 등으로 재활용하는 시설에서 발생하는 폐기물 역시 사업장일반폐기물로 관리될 수 있을 것임

### ⑨ 환경정책기본법

- 「환경정책기본법」은 환경오염을 “사업활동 기타 사람의 활동에 따라 발생하는 대기오염, 수질오염, 토양오염, 해양오염, 방사능오염, 소음·진동, 악취, 일조방해 등으로서 사람의 건강이나 환경에 피해를 주는 상태”라고 정의함(제3조 제4호). 그리고 이러한 환경오염을 사전에 예방할 의무를 국가 및 지방단체에 부여하는(제7조의2 제1항) 한편, 자원의 절약 및 순환적 사용을 촉진하도록 하고 있음(7조의4). 또한, 동법은 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 환경을 조성하기 위하여 환경기준을 설정하여야 하며(제10조) 대기, 소음, 수질 및 수생태계에 대한 환경기준을 정하고 있음. 이에 따라 수질 및 수생태계에 대해서는 하천, 호소, 지하수 및 해역에 대해 사람의 건강보호 기준 및 생활환경 기준을 정하고 있으나(동법 시행령 제2조 및 별표 1), 퇴적물에 대해서는 별도의 환경기준을 설정하고 있지 않음. 따라서 「환경정책기본법」 상에 하천 및 해양의 퇴적물에 대한 별도의 환경기준을 설정할 필요성이 있음

### ⑩ 공유수면 관리 및 매립에 관한 법률

- 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」은 공유수면을 준설하거나 굴착하는 경우, 공유수면에서 흙이나 모래 또는 돌을 채취하는 경우, 또는 공유수면에 흙이나 돌을 버림으로써 공유수면의 수심에 영향을 미치는 경우 등에 해양수산부장관 또는 특별자치도지사·시장·군수·구청장(공유수면관리청)으로부터 점용 또는 사용의 ‘허가’를 받도록 하고 있음(제8조 제1항). 그 결과 바다·바닷가에서 퇴적물을 준설하거나 토사를 채취하는 경우에는 관리청의 점·사용의 허가를 받지 아니 하고는 이를 할 수 없게 됨

## (나) 외국의 법제

### ① 미국

---

### ㉓ 오염퇴적물 관리기준 관련 법·제도

- EPA의 오염퇴적물 준거기준은 청정수질법(Clean Water Act, 이하 'CWA') 제304조와 제 118조에 법적 근거를 가지고 있으며, 이에 따라 인간의 건강, 수중생물, 야생생물을 보호할 수 있는 오염퇴적물 준거기준이 제시됨. 이 기준은 저서생물과 공공보건을 보호하기 위한 목적으로 정한 것으로, 규제나 처벌을 위한 기준이 아니라 퇴적물 표준개발의 근거 자료로만 이용됨
- 연방정부 차원에서 제시된 또 다른 오염퇴적물 기준은 퇴적물 권고기준으로 이는 법적 요구에 의하여 수립된 것이 아니라, 1990년 NOAA가 실시한 '전국 현황 및 추이 프로그램(National Status and Trends Program)'에 따라, 퇴적물 및 저서생물에 축적된 오염물질에 관하여 실시된 오염물질 현황조사에 대하여 그 농도를 해석하여 독성학적 중요성이나 위험도를 판단하기 위하여 자체적으로 사용하기 위하여 개발한 것임. 따라서 NOAA가 조사한 오염퇴적물 자료를 해석하기 위한 기준의 성격을 가질 뿐 오염을 규제하고 준설 등을 판단하는 기준으로 사용할 수 없음
- 미국 내에서 체계적으로 퇴적물 기준을 개발한 워싱턴주는 일정한 기준 이상의 오염퇴적물을 관리하기 위하여 주정부규정(Washington Administrative Code as of October 20, 2004) 제173조에 따라 퇴적물 정화기준(Sediment Cleanup Level)을 제시하고 있음. 워싱턴주는 퇴적물 오염에 대한 두 가지 종류의 환경기준을 가지고 있는데, 일종의 환경목표로 환경에 영향이 없다고 판단되는 오염물질 농도를 제시하고 있는 '퇴적물기준(Sediment Quality Standards)'과 오염퇴적물 정화를 위해 사용되고 환경에 최초의 악영향이 나타나는 값을 기준으로 하는 '정화기준'임

### ㉔ 오염퇴적물 정화·복원 관련 법·제도

- 오염퇴적물에 대한 정화는 다양한 법적 근거에 의해 수행되고 있는데, 종합환경배상책임법(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA), 자원보전및복원법(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA), 청정수질법(CWA), 하천및항구법(Rivers and Harbors Act, RHA), 독성물질관리법(Toxic Substances Control Act, TSCA), 유류오염법(Oil Pollution Act, OPA) 등임
- 일명 Superfund법이라고 불리는 CERCLA는 유해물질로 오염된 지역을 확인·조사 및 복구하는 내용을 포괄하는 법률로 정화작업도 이 법에 따라 시행됨. 이 법은 퇴적물만을 대상으로 한 것은 아니며, 오염물질로 인해 발생하는 위해의 평가와 복원, 이에 소요되는 비용 등을 포괄적으로 규정하고 있음. CERCLA에 따라 EPA는 유독폐기물의 처리, 저장, 배출시설로부터 침출된 오염물질이 퇴적물 오염의 원인인지를 평가할 권한을 가지며, 평가결과 오염이 심각하다고 판단되면 정화를 포함한 종합적인 복원 및 관리조치를 취할 수 있음. 이 법에 의해 PCBs 등 유해물질에 의해 오염된 퇴적물의 정화·복원 사업을 추진하고 있고, 정화복원 사업의 비용 마련을 위하여 정부차원에서 슈퍼펀드(Superfund)를 조성함
- RCRA 제3004조에 따라 EPA는 오염이 발견될 경우 유해물질처리·저장·처분시설로 인해 퇴적물을 오염시켰는지에 대해 평가할 수 있는 권한을 가지고 있음. 이에 따라 EPA는 환경시설로부터 유출된 유해물질로 오염된 퇴적물의 환경복원을 위한 환경기준을 수립할 수 있고, 특히 동법 제7003조는 유해물질 누출로 인해 인간건강이나 환경에 위해를 입혔다고 판단되는 시설의 운영자 등 오염원인자를 상대로 소송을 제기할 수 있도록 규정하고 있음
- CWA 제115조는 EPA에게 항만과 항해구역의 독성오염물질에 대한 현장조사를 통해 오염상태를 확인할 수 있는 법적 권한을 부여하였고, 배출허용량을 초과하는 배출행위에 대

---

해 민사소송의 당사자로서 소송을 통해 위법행위를 규제할 수 있도록 함. 또한 오염퇴적물로 인하여 인간의 건강 등에 직접적인 영향을 미쳤음이 증명되는 경우, 제504조에 따라 책임주체가 오염퇴적물을 정화하도록 하고 있고, 특히 그 원인자가 오염물질의 배출과 관련하여 배출허용량을 준수하였다 하더라도 해역 정화책임을 부담하도록 하고 있음

- 기타 법률로서 RHA는 항계나 항로의 기능을 저해하는 장애물과 혐오물질 등의 투기행위에 대하여 형사상 조치나 행정조치를 취할 수 있는 법적 근거를 제공하고 있으며, CWA에서 다루지 못하는 물질을 관리하는데 주로 이용됨. TSCA는 주로 PCBs 등 잔류성 유기오염물질을 관리하기 위한 법률로, PCBs를 제외하고는 본 법률에서 정한 유효기간 이전에 배출한 경우에 대해서는 오염원인자에게 정화를 하도록 강제하지 못함. 다만, 오염퇴적물 정화사업을 수행할 경우, TSCA에서 정한 오염물질 관리 규칙을 따르도록 하고 있음. OPA는 유류의 우발적인 유출과 해역배출로 인해 퇴적물이 오염되었을 경우 EPA가 오염원인자에게 이를 복구하도록 명령할 수 있는 권한을 부여하고 있음

### ㉔ 준설물질 처리에 관한 법제도

- 준설물질의 처리와 관련한 미국의 주요 법제는 해양보호연구및보호구역법(Marine Protection, Research, and Sanctuaries Act, MPRSA)과 청정수질법(Clean Water Act, CWA)임. 해양보호연구및보호구역법은 주로 준설물질의 운송을 비롯한 해양 투기와 해양 연구 및 해양보호구역의 수립을 목적으로 하는 연방 환경법임(Lawrence Juda, 2004). 그리고 청정수질법은 제404조에서 미육군공병대(U.S. Army Corps of Engineers, 이하 'US ACE')에게 준설물질의 배출에 관해 허가권한을 부여하여 '미국의 수역(Navigable Waters)' 내의 준설 또는 매립물질의 배출을 규율함. 또한 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency, 이하 'EPA')은 청정수질법 제404조의 규정에 따라 환경 가이드라인을 수립하고 이를 충족하지 못하는 US ACE의 준설 또는 매립물질(Dredged and Fill Material) 배출허가에 관해 심사권 및 거부권을 가짐(Robert S. Meinick, 2008).

### ② 독일

- 독일에서는 연간 평균 약 500백만 $m^3$ 의 준설물질이 발생하고 있으며, 네덜란드와 달리 법규에서 오염퇴적물을 별도로 규정하고 있지 않음. 오염퇴적물 처리·처분을 위하여 항구 주변의 소규모 처리·처분시설을 주로 사용하고 있음. 그러나 처리한 퇴적물을 육상에서 재이용하는 경우만 법에서 규정하고 있으며, 육상의 수질기준 등에도 포함되어 있지 않아서 현재 법·제도 개선 중임
  - 연방 토양보호 및 오염지역법(The Federal Soil Protection and Contaminated Site Act)은 퇴적물의 육상 처분에 관하여 규정하고 있음. 독일은 작은 수계에서 오염퇴적물의 처분 또는 대규모 고립 처분을 위한 국가적인 지침은 없음. 그러나 독일의 매립지침(German Landfill Ordinance)에 따르면 관련당국은 적절한 방법으로 오염퇴적물을 육상 처분장에서 처분할 경우 이를 허가할 수 있다고 규정하고 있음(해양수산부, 2010)

### ③ 네덜란드

- 네덜란드는 오염퇴적물을 포함하여 연간 약35백만 $m^3$ 의 퇴적물을 준설하고 있고, 2015년까지 약 900백만 $m^3$ 의 해저퇴적물을 제거할 계획임. 이 중 항로유지를 위해서 준설될 퇴적물은 약 800백만 $m^3$ 이며, 국내 총 오염퇴적물 약 200백만 $m^3$  중에서 약 100백만 $m^3$ 가 환경적인 정화·복원을 위해서 제거될 예정임(해양수산부, 2010)
  - 「제3차 물관리 국가정책법」(1989년)에서는 1995년까지 일부 오염지역을 정화·복원하



며, 궁극적으로 인간건강, 환경 및 생태계에 위협한 모든 퇴적물을 정화·복원하는 것을 국가의 정책목표로 하고 있음. 「오염퇴적물 관리에 관한 정책 지침(Guideline)」(1993년)에서는 오염퇴적물 관리체계와 처분장 건설에 대한 규범으로 구성되어 있는데, 오염퇴적물 관리체계의 핵심은 오염퇴적물 생성을 방지하고, 오염도가 낮은 퇴적물의 유효활용을 장려하며, 2000년까지 총 오염퇴적물 중 20%까지 처리되도록 하며, 대규모 고립처분장을 건설하고, 오염퇴적물의 확산을 저감하는 것임.

- 1998년에는 「제4차 물관리 국가정책법」이 제정되었고, 동법은 충분한 고립처분장 조성, 단순 처리기술 사용, 오염퇴적물 평가기준 개정, 고립처분장 건설규범 개정, 모든 오염퇴적물 정화·복원을 위한 기초계획의 실현 등을 주된 목표로 하고 있음
- 네덜란드는 「토양보호법」에 준설토사를 포함하고 있고, 폐기물 관련법에는 토양과 준설토 물질이 충분히 포함되지 않았고, 폐기물로서 준설토 물질의 처리, 수송 및 처분에 관하여 미흡하기 때문에 개정을 통해 보다 강화할 예정임
- 네덜란드에서는 퇴적물을 폐기물로 간주하고, 오염도가 낮은 준설토 물질은 「환경관리법」에 따라 폐기물 관련법의 예외로서 수중고립처분이 가능함. 오염퇴적물 처리·처분 대안의 결정과 처리 후 유효활용의 수요는 관련법에 큰 영향을 받기 때문에, 최근 고립처분되는 양을 감축하고 재활용을 촉진하기 위하여 「환경세법」을 제정하는 등 관련 법규를 정비하고 있음
- 기타 「표층수 및 해수 오염법」에서는 모든 폐기물과 폐수로부터 표층수와 해수의 오염을 방지하는 것을 규정하고, 「건축재료령」에서는 육상과 해상에서 준설토 물질을 포함한 2차 건축재의 사용을 규제하는데, 대상물질로부터 용출되는 오염물질의 양과 오염물질의 총량에 따라 용도를 세 가지로 구분하고 있음

#### ④ 일본

- 일본에서는 공용 수역에서의 수질오염, 어패류 오염 등의 원인이 되는 오염된 퇴적물(底質)의 제거에 관한 사항은 “퇴적물의 잠정 제거 기준에 관하여(1975. 10. 28, 환수관119호)”라는 통보(通達)로 법제화되었으며, 수은과 PCB를 함유하는 퇴적물의 제거기준이 설정됨(해양수산부, 2010)
- 제거기준에 해당되는 퇴적물에 대하여 준설토 등 대책을 취할 경우, “퇴적물의 처리, 처분 등에 관한 판정지침(1974. 5. 30, 환수관113호)”에 따라 2차 오염이 발생하지 않도록 처리·처분하도록 규정하고 있음. 또한 다이옥신류 대책 특별조치법(1999년 법률제105호) 제7조의 규정에 의해 다이옥신류에 의한 수저퇴적물에 관한 환경기준이 정해졌고, 그 후 이를 반영하기 위하여 “퇴적물의 처리, 처분 등에 관한 판정지침”은 폐지됨과 동시에, 수은, PCB에 추가하여 다이옥신류에 대한 규정을 포함하는 “퇴적물의 처리, 처분 등에 관한 지침에 대하여(2002. 8. 30, 환수관211호)”로 대체됨. 대책 대상 퇴적물의 다이옥신류에 대한 규정은 “다이옥신류에 의한 대기, 수질 및 토양오염에 관한 환경기준(2002. 7. 22, 환경청고시46호)에 의해 기준 값(150pg-TEQ/g이하)이 규정되어 있음. 한편, 퇴적물의 조사는 “퇴적물 조사 방법(1975. 10. 28, 환수관120호)에 따름
- 준설토공사 등으로부터 제거된 퇴적물을 해양에 투기하여 처분할 경우, “해양오염 및 해상재해의 방지에 관한 법률”에 의한 판정기준에 적합하며 당국의 허가를 얻을 경우에 한하여 폐기물 투기해역에서 처분되고 있음. 퇴적물의 효율적인 관리를 위하여 “준설토사의 해양투기 및 유효활용에 관한 기술지침(2006. 6, 국토교통성 향만국)을 제정함
- 오염퇴적물 정화사업은 해당 지방자치단체와 지역주민 대표를 포함하여 관련기관(산업계, 연구기관 등)이 함께 오염퇴적물 관리위원회를 구성하여 각 지역별로 추진됨

- 한편, 오염퇴적물 정화·복원에는 고액의 비용이 필요하므로, 최근 시마네현의 마카타 공업 단지 인근 폐기물 처리업자 등이 정화복원 비용을 부담하는 등 「공해방지사업비사업자 부담법(公害防止事業費事業者負担法)」에 의해 오염원인자가 그 비용을 부담하는 사례가 증가하고 있음. 동법은 “공해 방지 사업”을 다음에 열거하는 사업에 있어서 사업자의 사업 활동에 의한 오염을 방지하기 위해 사업자에게 그 비용의 전부 또는 일부를 부담시키는 것으로서 국가 또는 지방 공공 단체가 실시하는 것으로 정의하고(제2조 제2항), 오염되어 그 오염의 원인이 되는 물질이 퇴적되거나 수질이 오염되고 있는 강, 호수, 항만 기타 공공용으로 제공되는 수역에서 실시된 준설사업, 도수(導水)사업 기타 정령으로 정하는 사업 등을 열거하고 있음(제2조 제2항 제2호)

(다) 개선방안 : 가칭 「해양오염퇴적물관리법」의 제정

- 해양오염퇴적물의 수거, 처리(자연정화, 현장처리, 표면피복, 재활용, 매립, 고립처분 등) 수요는 증가하고 있으나 현행 법제는 이를 위한 근거 규정을 제대로 갖추고 있지 못해 그 수요에 부응하지 못하고 있음. 즉 현행 법제하에서는 해저퇴적물·해양오염퇴적물, 준설물질 등에 대한 기본 개념조차 정립되어 있지 않으며, 해양오염퇴적물의 수거·처리의 기준 및 방법 등에 대한 법적 근거가 없어, 해양오염퇴적물의 처리 등 적절한 관리가 곤란한 상황임(윤길립, 2002). 또한 기존 「해양환경관리법」을 비롯하여 「폐기물관리법」, 「토양환경보전법」, 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 등 여타의 법률에서는 오염퇴적물의 수거 및 처리 등에 관한 기본적인 방안을 제시하지 못하고 있음. 다만 개별 규정을 통해 오염퇴적물에 대하여 적용될 수 있으나, 여러 법률에 산재되어 있어 적용상 혼란이 있고, 단편적인 규정에 그쳐 유효 적절히 대응하지 못하고 있는 현실임(이창희, 1998)
- 이에 수거, 처리라는 일련의 과정에서 해양오염퇴적물을 포괄적, 체계적, 통일적으로 관리하기 위해서 그 법적 근거를 마련해야 할 필요성이 높음. 그 방식으로 기존의 관련 법률을 개정할 것인가 아니면 새로운 별개의 단일법을 제정할 것인가가 문제되는데, 개별 법률에 산재된 규정을 개정하는 방식으로 정비하기 보다는 별도의 단일법(가칭 「해양오염퇴적물관리법」)을 제정하는 것을 적극 검토하여야 할 것임. 기존 해양환경관리법의 개정은 본질적인 문제해결 방법이 될 수 없고, 개정내용에 포함하여야 할 양이 많아 입법기술상 어려운 점이 있으며, 그렇지 않아도 기존 「해양환경관리법」이 다루는 내용과 범위가 방대하여 분법화할 필요성이 크다는 점 등을 고려할 때, 개정은 효율적인 방안이라고 할 수 없음
- 별도의 법을 제정하는 것은 모든 관련법들을 개정해야 하는 큰 수고를 줄이면서도 효율적으로 오염퇴적물 관리체계를 정립할 것으로 보임. 「폐기물관리법」, 「토양환경보전법」, 「해양환경관리법」 등 관련법의 일부 개정으로는 미봉책에 그칠 가능성이 많고, 이들 법의 목적과 취지 등에 비추어 오염퇴적물의 처리와 처분 전 과정을 규율하는 데에는 한계가 있을 수밖에 없기 때문임. 또한 법률들 사이에서의 상충 문제도 무시할 수 없음. 새로운 법에서는 오염퇴적물의 수거(준설), 운반, 보관, 처리·처분, 재활용 등 전 과정에 걸쳐 단계별로 가능한 한 자세한 규정을 두어야 함. 여기에는 오염퇴적물의 개념, 오염퇴적물의 수거·처리의 근거가 되는 환경기준, 수거·운반·보관·처리의 과정에서 수질에 대한 영향 최소화, 수질오염 억제, 악취방지, 오염퇴적물의 재활용, 매립 또는 해저 고립처분, 해양배출을 위한 처리방법·기준 등이 포함됨
- 오염퇴적물의 수거·처리과정에서 나오는 준설토사 등은 버려지는 폐기물이 아님. 한정된 자원을 보유한 국내의 실정상 자원순환의 차원에서 준설토사의 경우에는 재활용·재사용의 대상으로 이해할 필요가 있음. 준설토사를 일률적으로 폐기물로 보아 「폐기물관리법」 등에 의한 규제대상으로 보는 것에 대하여는 전향적인 검토가 요망됨. 이에 준설토

사 등을 폐기물로 규정하지 않거나 준설 전 또는 중간처리 후 위해성평가(risk assessment) 또는 오염도 평가를 통해 오염정도에 따라 폐기물과 폐기물이 아닌 재활용 가능한 자원으로 구분할 필요가 있음. 이를 통해 해양오염퇴적물을 골재, 매립토 등으로 이용할 수 있는 방안을 강구하고, 불필요한 규제 규정의 적용을 배제함으로써 유인을 제공할 필요가 있음

- 오염퇴적물을 인근지역에 매립하는 경우 매립지 확보의 어려움과 막대한 매립지 건설비 및 관리비 소요, 운송비 증가 등의 문제점이 발생할 수 있음. 따라서 오염퇴적물을 일률적으로 폐기물로 관리할 것이 아니라 「자원의 절약 및 재활용촉진에 관한 법률」, 「건축폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」 등 자원의 순환 및 재활용을 활성화하고자 하는 최근의 입법의 동향에 비추어 오염퇴적물을 재활용하는 방안을 마련해야 할 것임. 즉, 수거된 해양오염퇴적물의 법적지위를 곧바로 ‘재활용이 가능한 물질’ 또는 ‘폐기물’로 단정하지 않고, 처리 및 오염도 평가 등을 통하여 구체적으로 판단할 수 있도록 규정할 필요가 있음

### (3) 가칭 「해양오염퇴적물관리법」의 제정방안

#### (가) 해양오염퇴적물 등에 대한 개념 정립

##### ① 오염퇴적물이란?

- 「해양환경관리법」은 해양오염 또는 오염물질에 대해서만 정의하고 있고 오염퇴적물(汚染堆積物)에 대해서는 별도로 규정하고 있지 못함. 다만 고시에서 “해저퇴적물”에 대하여 “암석의 풍화와 침식으로 분리된 암석기원 물질이나 생물활동에 의하여 유래된 물질 또는 화학적으로 형성된 고체물질 등이 이동되어 해저에 쌓인 불용성 물질”로, “해양오염퇴적물”에 대하여 “일정 기준 이상의 화학물질을 포함하거나, 인체의 건강 또는 해양생태계에 위해를 가하는 것으로 간주되는 해저퇴적물”로 정의하고 있을 뿐임

##### ② 준설물질 또는 준설토사란?

- ‘준설’이라 함은 법률상 따로 정의되어 있지 않으나, 준설토사를 “해양이나 하구 등에서 해양환경의 개선, 항만(항만시설 포함)의 건설·정비 또는 항로유지 등을 목적으로 준설하는 퇴적물질 중 점토·실트·모래·자갈 및 암석을 말함”고 정의한 바 있음(해양수산부, 2007)
- 퇴적물은 오물 또는 오염원이라는 인식 하에 준설토사가 오염도에 상관없이 폐기물로 규정되어, 해양에 투기되어 움(시행규칙 제11조 제1항 관련 별표 3 제1호, 제12조 제1항 별표 6 제3호 나목, 별표 7, 제12조 2항, 별표 8 제3호). 다만, 해양환경개선조치의 일환으로 “준설토사 등 수저퇴적물의 사용 등에 관하여 해양수산부장관이 정하는 조치”를 거론함으로써 준설토사의 ‘사용’을 염두에 두고 있고(시행규칙 제9조 제1항 제2호), 2010년도에 국토해양부 고시로 ‘수저준설토사 유효활용 등 규정’을 제정한 바 있음
  - 일반적으로 우리나라 준설토사 대부분은 위해성 문제가 대두될 정도로 오염되지 않았기 때문에 어떠한 오염물질의 심사기준 없이 무조건 폐기물로 규정해서는 안 될 것임. 특히, 자연자원이 부족하여 상당수 골재를 수입하고 있는 우리나라 실정상, 준설토사는 적절한 처리 후에 재활용할 수 있어야 할 것임(해양수산부, 2002)

##### ③ 개념 정의의 필요성

- 「해양환경관리법」을 비롯한 현행 법률은 퇴적물, 오염퇴적물, 준설토사에 대하여 개념을 정의하고 있지 않을 뿐만 아니라 명확히 구분하고 있지 않으며, 오히려 혼동해서 사용하고 있음. 그리고 “오염된 퇴적물(「해양환경관리법」 제18조)”, “수거된 오염퇴적물(동

---

법 시행규칙 제9조 제3호)”, “수거 퇴적물(동법 시행규칙 제9조 제2호)”, “준설토사(동법 시행규칙 제9조 제2호)”, “준설토(동법 시행규칙 제13조 제1항 제2호) 등 일관되지 않게 사용되고 있어 오염퇴적물이나 준설토사를 관리·규제하는 데 어려움이 예상된다

- 일반적으로 퇴적물이 정적인 개념이라면 준설품질은 동적인 개념이라고 할 수 있음. 즉, 준설품질은 해양 또는 수계로부터 준설품질을 말하지만 퇴적물이란 준설품질 이전에 수계에 있는 물질을 말함. 퇴적물이라 함은 일반적 상식으로 이해되는 해양환경의 구성 요소에 해당되어, 법에 별도의 정의를 둘 필요성은 많지 않아 보임. 다만 ‘일반적인 퇴적물’과 ‘해양에서의 퇴적물’을 구분하기 위하여, 또한 오염퇴적물 개념의 전제로서 오염된 퇴적물인지를 판단하기 이전 단계에서 오염도 조사 등의 규율을 위하여, 오염된 퇴적물과 오염되지 않은 퇴적물을 포괄하는 개념으로서의 “해저퇴적물” 개념은 필요하다고 볼 것임. 따라서 “해저퇴적물”에 관하여 “암석의 풍화와 침식으로 분리된 암석기원 물질이나 생물활동에 의하여 유래된 물질 또는 화학적으로 형성된 고체물질 등이 이동되어 해양이나 하구 등 수역의 바닥에 존재하거나 쌓인 물질”과 같은 정의가 이루어져야 함
- 한편 ‘오염퇴적물’이란 개념은 오염퇴적물 관리·규제의 출발점이 되기 때문에 개념 정의가 필수적임. 퇴적물은 산업폐수, 생활오수, 폐기물처리장의 침출수, 도시 및 농촌의 강우 유출수 및 하천으로부터 유입된 유기물 영양염류, 유해화학물질 등 오염물질을 함유하고 있기 때문에 이러한 점에 착안하여 ‘오염퇴적물’을 단순히 이러한 오염물질을 함유하고 있는 퇴적물이라고 정의할 수 있을 것임. 그러나 이와 같이 정의할 경우에는 호소, 하천 및 연안에 쌓인 대부분의 퇴적물들이 모두 오염퇴적물에 포함되어 규제·관리의 대상이 되는 불합리한 결과를 초래할 수 있음. 즉, 이러한 정의에 따르면 퇴적물이 어느 정도의 오염물질을 함유하고 있는 경우에 오염퇴적물로 관리·규율할 수 있는지 명확하지 않음. 어느 경우에 “오염”퇴적물이 될 것인가에 대한 기준이 필요하고, 그 기준이 바로 오염퇴적물 “수거 및 처리”의 시발점이 될 것임
- 「해양환경관리법」 제8조는 해양수산부장관에게 해양환경기준을 설정하도록 규정하고 있음. 따라서 오염퇴적물을 환경기준을 초과하는 오염물질을 포함하는 퇴적물로 정의할 경우에는 해저퇴적물에 대한 해양환경기준이 그 기준이 되어야 할 것임. 그러므로 “해양 오염퇴적물”이란 “「해양환경관리법」 제8조에 따른 해양환경기준의 해저퇴적물기준을 초과하는 물질을 포함하거나 사람의 건강, 재산이나 환경에 피해를 주는 해저퇴적물”로 정의하는 것이 바람직할 것임. 한편 현행 해양환경기준에서는 해저퇴적물에 대하여 ‘부정적인 영향이 거의 없을 것으로 예측되는 범위’인 “주의기준”과 ‘부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 범위’에 해당하는 “관리기준”으로 구분하여 기준을 설정하고 있는 바, “관리기준”이 오염퇴적물 수거·처리의 시발점으로서의 기준이 될 수 있을 것임
- 현행 오염퇴적물 관리·규제는 퇴적물 자체는 폐기물로 보지 않으면서 준설품질의 경우에는 폐기물로 파악하고 있음. 「해양환경관리법」은 준설품질 이외에도 수저준설품질, 준설품질 등의 표현을 사용하고 있음(제85조 제1항 제1호). 준설품질이나 준설품질 등과 같은 표현은 준설품질의 일부를 구성할 뿐이기 때문에 부정확한 표현이라고 할 수 있음. 이에 준설품질에서 토사를 따로 분리하기 어렵다는 점에서 준설품질, 준설품질, 수저준설품질, 수거된 퇴적물, 수거된 오염퇴적물 등의 용어는 “준설품질”로 표현을 통일하여 관리하는 것이 바람직함. 한편, 준설품질의 경우 오염도가 낮거나, 비록 유해중금속 및 유기물이 함유된 준설품질이라 하더라도 적절한 처리과정을 거친다면 재활용이 가능하므로 일도양단식으로 폐기물이라 할 것이 아니라 별도로 취급할 필요가 강함(해양수산부, 2000). 이에 준설품질을 폐기물 개념에서 제외하거나 폐기물과 달리 취급하는 것을 적극 검토할 필요가 있음
- 한편, 현행 준설품질에 대한 근거 규정을 법률이 아닌 시행규칙에서 정하고 있는데, 이는 법률유보의 원칙 또는 포괄위임금지의 원칙에 맞지 않음. 이러한 관점에서 시행령 이상

에서 이에 대한 기본적인 규정을 두고, 세부적인 사항을 시행규칙 등에서 정하는 것이 바람직함. 또한 오염퇴적물·준설물질 등을 법령에 규정하는 경우에는 개념 정의에 관한 조항에서 먼저 규정하여야 할 것이며, 가급적 용어의 뜻을 명확하게 하면서도 이해하기 쉽게 규정하여야 할 것임

## (나) 오염퇴적물의 수거·처리·처분 등 개념의 정립

### ① 필요성

- 오염퇴적물의 관리·규제 방안을 마련하기 위해서는 오염퇴적물의 수거기준과 방법, 수거된 오염퇴적물의 처리·처분 방법을 마련하여야 함. 이를 위해서는 오염퇴적물의 수거, 처리 및 처분 등에 대한 용어 및 개념의 정립이 선행되어야 함. 현행 「해양환경관리법」에서는 해양환경개선조치로서 ‘오염된 퇴적물의 수거’에 대해서만 규정하고 있을 뿐, ‘수거’의 개념정의를 이루어지지 않고 있으며, 수거 이후의 처리 및 처분에 대해서는 언급조차 없고, 다른 관련 법률에 의하더라도 적용될 수 있는 조항을 찾기 어려운 실정임. 그 결과 오염퇴적물의 처리 또는 처분에 대한 법적 근거가 없게 되어, 오염퇴적물에 대한 자연정화, 현장처리, 표면피복 등의 정화·복원은 그 필요성 및 기술적 효율성에도 불구하고 법적 근거의 미비로 인하여 이루어질 수 없는 문제점이 발생하고 있음

### ② 현행법 체계에서의 관련 용어 및 개념

#### ㉠ 해양환경관리법

- 오염퇴적물은 수거(제거), 운반(이동), 저장(보관, 배치), 처리(treatment), 처분(disposal), 사용 등의 단계를 거쳐 이루어짐. 이러한 일련의 과정을 이루는 개념에 대한 정확한 이해가 중요함
- 현행 「해양환경관리법」은 해양오염퇴적물의 “수거”에 대해서만 언급하고 있고(제18조 제3호), 운반이나 저장에 대해서는 규정하고 있지 않음. 그리고 수거 및 처리·처분의 개념과 방법에 대해서 아무런 언급도 하고 있지 않아 수거와 처리, 처분 간의 구분이 모호함. 다만, 「해양환경관리법」 시행규칙에서 “해양수산부령이 정하는 조치”의 하나로 “수거된 오염퇴적물의 안전한 처리 및 처분”을 들고 있어(제9조 제3호) 수거와 처리·처분을 구분하고 있는 것으로 보이며 수거를 처리·처분의 전단계로 보고 있는 것으로 이해됨
- 수거가 준설을 포함하는 개념인지 또는 병존하는 개념인지도 혼란스러움. 사전적 의미로 수거는 “거두어 가는 것”을 의미하는 것으로 동법 상 ‘수거(收去)’는 “폐기물 또는 오염퇴적물등을 수거에서 수집·제거하는 것”이라 할 수 있음. 근본적으로 수거에서 오염퇴적물 제거한다는 점에서 수거의 방법으로서 준설이 가장 일반적인 방법일 것임. 그러나 동법은 ‘퇴적오염물질수거업’을 “퇴적된 오염물질의 준설·수거에 필요한 선박·장비 및 설비를 갖추고 퇴적된 오염물질을 준설 또는 수거하는 사업”이라고 규정하고(법 제70조 제1항 제5호), 수거업자의 의무로 “준설·수거 등에 관한 처리실적서를 작성”하도록 규정함으로써(제72조 제1항), 준설과 수거를 구분하고 있음
- 한편, 해양환경개선조치와 관련하여 오염물질의 경우에는 수거와 함께 처리를 규정하고 있는데 오염퇴적물의 경우에는 수거만을 규정하고 있음. 수거의 범위에 처리가 포함되는지 여부가 「해양환경관리법」상 불분명하지만, 처리를 배제하고 수거만으로 그쳐서는 개선조치의 의미가 반감된다는 점 그리고 오염물질과 구별하여 수거만을 규정할 필요가 없다는 점에서 “처리”도 함께 규정할 필요가 있다고 본다. 그리고 동법 상 ‘수거’의 개념에는 퇴적오염물의 ‘준설’ 역시 포함되는 것으로 보아야 할 것임

#### ㉡ 폐기물관리법

- 「폐기물관리법」에서는 ‘수거’를 음식물류 폐기물(농·수·축산물류 폐기물)을 포함하되, 생활폐기물 및 제16조에 따른 자가 배출하는 폐기물만 해당함) 관련 조문(시행령 제8조제6호, 시행규칙 제10조 제4호) 및 시행규칙 부칙 제6조 폐기물처리업자 경과조치와 관련하여 적출물처리업자중 적출물수거·운반업자 및 적출물중간처리업자 중 적출물수거·처리업자에 관한 규정에서만 언급하고 있음. 또한 동법에서는 ‘수거’와 ‘운반’을 별도로 구분하여 규정하고 있음을 알 수 있음. 그리고 폐기물관리법에 관한 규정에서 수거와 유사한 용어로 ‘수집’이라는 용어를 사용하고 있음(법 제25조)
- ‘처리’와 관련해서 동법은 ‘폐기물의 수집, 운반, 보관, 재활용, 처분’으로(폐기물관리법 제2조 제5의2호), ‘처분’과 관련해서 폐기물의 소각(燒却)·중화(中和)·과쇄(破碎)·고형화(固形化) 등의 ‘중간처분’과 매립하거나 해역으로 배출하는 등의 ‘최종처분’을 말한다고 규정하고 있음(동법 제2조 제6호). 해양오염퇴적물은 물리적 또는 화학적 특성상 다량의 수분을 포함하고 있기 때문에 수거 후 즉각적인 운반이 곤란하고 육상에 매립하기 위해서 사전에 오염의 중화, 부피의 감소, 고형화 등의 과정을 거쳐야 함. 일반적으로 오염퇴적물에 포함되어 있는 오염물질의 농도가 유해폐기물 투기지역의 토양에 함유되어 있는 오염물질의 농도에 비해 상대적으로 매우 낮은 것으로 나타나기 때문에 1차적으로 오염물질 추출기술을 적용하여 처리해야 할 퇴적물의 부피를 줄인 후, 2차적으로 비용이 많이 드는 처리방법을 적용함으로써 처리비용을 절감할 수 있음. 이렇듯 1차적으로 오염물질을 추출 또는 퇴적물의 부피를 줄이는 처리방법을 일반적으로 전처리(Pretreatment)라고 하는데, 이는 「폐기물관리법」의 중간처분과 유사해 보임
- 그리고 「폐기물관리법」에서는 ‘준설·준설토사’를 따로 규정하고 있지 않지만, 준설은 처리에 포함되는 ‘수집·운반’의 일종으로 볼 수 있음. 이에 반해 해양투기는 「폐기물관리법」상의 처분에 해당하고 이 밖에 매립 역시 동법상의 처리에 해당함. 한편, 동법은 처리와 처분을 구분하고, 처리는 처분을 포함하는 개념으로 파악하고 있음

#### ㉔ 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률

- 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」은 재활용 가능한 자원을 “사용되었거나 사용되지 아니하고 버려진 후 수거된 물건과 부산물 중 재사용·재생이용할 수 있는 것”이라고 정의하면서(법 제2조 제2호) 「폐기물관리법」의 ‘수집·운반’이라는 용어가 아닌 ‘수거’라는 용어를 사용하고 있음

#### ③ 소결

- 오염퇴적물의 유효한 관리방안을 수립하기 위해서 가칭 「해양오염퇴적물관리법」에서 ‘수거’의 개념을 구체적으로 정립할 필요가 있음. 즉 “수거”란 해양이나 “하구 등 해역에서 환경의 개선 등을 목적으로 해저퇴적물을 제거하는 행위”로 정의하면 될 것으로 보임. 그런데, 오염퇴적물의 ‘수거’가 해상의 선박 또는 장비에 의해 이루어지고 일단 수거된 오염퇴적물은 육상으로 옮겨야 한다는 점 등을 고려한다면 동법 상 ‘수거’의 개념에는 일반적으로 해상에서의 ‘운반’ 개념까지 포함하는 것으로 보아야 하며, 퇴적오염물의 ‘준설’도 ‘수거’의 개념에 포함되는 것으로 보아야 할 것임
- 한편, 오염퇴적물의 수거만으로는 그 의미가 반감되므로, 수거에서 나아가 ‘처리·처분’에 관한 규정 역시 신설해야 함. 오염퇴적물의 관리·규제와 관련하여 중요한 개념을 이루는 ‘처리’에 대해서는 「폐기물관리법」상의 개념을 참고하는 것이 무난함. 「폐기물관리법」에서 ‘처리’는 폐기물의 수집, 운반, 보관, 재활용, 처분을 말하고(제2조 제5의2호), ‘처분’은 폐기물의 소각(燒却)·중화(中和)·과쇄(破碎)·고형화(固形化) 등의 중간처분과 매립하거나 해역(海域)으로 배출하는 등의 최종처분을 말한다고 규정하고 있음. 따라서 가칭

---

「해양오염퇴적물관리법」에서는 “처리”란 “해양오염퇴적물의 운반, 보관, 정화, 재활용, 처분”으로, “정화”란 “물리적·화학적 또는 생물학적 등의 방법으로 해저퇴적물 중의 유해물질을 감소·제거하거나 해양오염퇴적물로 인한 위해를 완화하는 것”으로, “처분”이란 “해양오염퇴적물을 매립 또는 해양투기하는 등 환경에 노출시키는 행위”로 정의하는 것이 바람직함

#### (다) 법률의 적용범위

- 해양오염퇴적물에 관한 별도의 법률을 제정할 경우, 적용 범위를 명확히 할 필요성이 있음. 앞에서 본 바와 같이 해양오염퇴적물에는 「해양환경관리법」, 「폐기물관리법」, 「토양환경보전법」 등 다양한 법률이 적용될 가능성이 있기 때문임. 따라서 해양오염퇴적물의 수거 및 처리에 관한 사항에 대하여 다른 법률에 우선하여 적용하는 특별법적 지위를 부여하고, 규정되지 아니한 사항에 대하여 관계 법률의 규정을 적용함을 명문화하여야 함. 또한 준설은 수로를 유지하거나 항만을 개발하는 등 해양오염퇴적물의 수거와는 다른 목적으로 행해지는 경우가 많음. 따라서 수로를 유지하거나 항만을 개발하기 위한 목적으로 이루어지는 준설에 대하여는 본 법의 적용대상에서 제외하여야 할 것임. 다만, 그러한 목적의 준설이라 할지라도 수거된 해저암반 또는 해저퇴적물이 본 법의 수거 및 처리기준에 부합하는 정도의 오염퇴적물에 해당하는 경우에는 별도의 법이 제정되지 않는 한 본 법에 따라 규제할 필요성이 있음

#### (라) 해양오염퇴적물 관리의 기본원칙 및 기본계획

- 해양오염퇴적물의 관리에 대한 기본원칙이 설정되어야 함. 지금까지 기본원칙이 없었기 때문에, 효율적이고 일관적이지 못한 관리가 이루어졌던 점이 없지 않음. 해양오염퇴적물의 기본원칙으로는 다음 사항을 들 수 있음
- 해양오염퇴적물의 발생과 그로 인한 해양오염을 최대한 방지하여야 하고, 수거·정화하는 등 적절하게 관리하여야 하며, 가능한 한 재활용하여야 하고, 해양오염퇴적물로 인해 생태계가 파괴·훼손된 경우에는 최대한 복원, 복구되도록 하여야 함
- 한편 해양오염퇴적물 관리에는 막대한 비용과 시간이 소요되기 때문에, 즉흥적이고 임기응변식의 대처로는 그 관리가 어려움. 따라서 장기적인 계획에 따라 이루어져야 하고, 국가로 하여금 이러한 계획을 수립할 의무를 법률을 통해 부과할 필요가 있음. 따라서 해양수산부장관으로 하여금 해양오염퇴적물을 적절하게 관리하기 위하여 일정한 주기마다 해양오염퇴적물 관리에 관한 기본계획을 수립·시행하도록 할 필요가 있음. 「해양환경관리법」상 해양환경종합계획과의 조화를 이룸으로써 해양환경에 관한 정책 전반의 일관성을 유지하고, 해양오염퇴적물의 관리를 위한 사전조사와 수거 및 처리와 그에 대한 사후검증 등 일련의 과정에 소요되는 기간을 충분히 고려할 수 있도록 하기 위하여, 그 주기는 「해양환경관리법」과 같이 10년으로 하는 것이 타당할 것임. 해양오염퇴적물 관리 기본계획에는 해양오염퇴적물 관리에 관한 시책방향 등의 사항이 포함되어야 함

#### (마) 해저퇴적물에 대한 조사

- 해저퇴적물이 오염되어 있는지 아닌지, 오염되어 있다면 어떤 해역에서 어느 정도로 오염되어 있는지, 그리고 오염된 해역의 퇴적물에 대하여 수거 및 처리와 같은 조치가 필요한지 여부 등을 결정하기 위한 객관적 자료의 수집을 위해서는 우선적으로 해저퇴적물에 대한 조사가 필요함. 해양오염퇴적물에 관한 법률을 제정하는 경우, 관계 행정청으로 하여금 이러한 조사를 실시하도록 권한과 의무를 부여하여야 할 것임
- 해저퇴적물에 대한 조사는 ‘상시조사’, ‘오염실태조사’ 및 ‘정밀조사’등으로 구분할 수 있

## (바) 해양오염퇴적물의 수거

### ① 일반

- 하천이나 호소 및 항만과 해안의 오염퇴적물을 수거하는 가장 일반적인 수단은 굴착(excavation)과 준설(dredging)임. 준설은 다시 그 목적에 따라 수로유지준설(Dredging for the maintenance of navigation channels)과 환경준설(Environmental Dredging) 두 가지로 구분할 수 있음
- 환경준설은 특히 관리대상 오염물질의 영향이 해양생태계나 주변지역에 미치는 영향이 크고 단기간 내에 정화복원이 필요한 경우 시행됨. 오염퇴적물의 준설에 있어 특별히 고려해야 할 점은 오염퇴적물의 재부유와 수반된 오염물질 누출의 최소화 및 제거작업의 정확성이 요구된다는 사실임. 특히 오염퇴적물의 준설은 오염된 퇴적물질을 해양환경에서 제거하여 대상해역의 오염도를 저감시키고 준설된 오염물질을 수분제거부터 시작된 처리 과정을 거쳐 후처리하는 것이 매우 중요함
- 현행 「해양환경관리법」은 어떠한 경우에 오염퇴적물을 수거하여야 하는지, 어느 정도의 범위를 오염된 퇴적물로 볼 것인지, 즉 오염퇴적물의 수거기준 및 방법이 마련되어 있지 않음

### ㉞ 수거기준

- 유지준설이 아닌 정화·복원을 위한 환경준설의 경우에는 퇴적물이 오염되었는지의 판단이 선행되어야 함. 일반적으로 대기, 수질 또는 토양과 같은 환경이 오염되었는지를 평가하기 위해서 화학적 특성이나 수치적으로 근거가 되는 기준에 의존함. 이러한 접근이 보편성을 띄는 이유는 규제 측면에서 그것이 쉽고 단순하기 때문임(G. Allen Burton, 2002). 이와 같이 오염퇴적물을 수거하고자 하는 경우에는 먼저 퇴적물이 오염되었는지의 여부를 판별할 수 있는 기준이 마련되어야 함
- 「환경정책기본법」 제10조 제1항은 “정부는 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 환경을 조성하기 위하여 환경기준을 설정하여야 하며 환경여건의 변화에 따라 그 적정성이 유지되도록 하여야 한다”고 규정하면서 동법 시행령 제2조 및 별표 1에서 대기, 소음, 수질에 대하여 생활환경 및 사람의 건강보호에 관한 기준을 설정하고 있음. 그리고 「해양환경관리법」은 「환경정책기본법」상의 환경기준을 고려하고 해양환경의 보전을 위한 시책에 필요한 해양환경의 기준을 해역별·용도별로 정하여 고시하도록 하고 있으며(제8조 제1항), 동법 시행규칙 제4조는 해수수질, 해저퇴적물, 해양생물에 관한 사항에 따라서 구분하여 정하도록 하고 있음. 「해양환경관리법」상의 해양환경기준에 있어서도 오염퇴적물에 관한 환경기준은 “해저퇴적물” 항목에서 수립되어 있음. 또한 「해양환경관리법」 제18조의 해양환경개선조치의 일환으로서 오염된 퇴적물의 수거를 규정하고 있는데 그 개선조치의 시행근거가 되는 ‘필요하다고 인정되는 때’에 대한 구체적인 기준이 위 해양환경기준 중 해저퇴적물 기준이 될 수 있을 것임
- 외국의 경우, 퇴적물의 수거 및 관리에는 다양한 판단기준이 적용되고 있음. 이러한 다양한 기준의 설정은 퇴적물이 환경에 미치는 악영향을 사전에 예방하거나 이미 악영향이 있다고 판단되는 퇴적물에 대해서는 정화 또는 복구 등의 적절한 조치를 취하도록 하는 등의 관리기준을 제시하는데 목적이 있음. 특히, 퇴적물 제거기준의 경우에는 퇴적물이 환경에 미치는 오염정도를 나타내는 정량적인 오염물질 농도 또는 척도를 나타내며, 준설을 통한 퇴적물의 제거 및 처리여부를 결정하는 기준으로서 해당수계의 퇴적물 준설사업 계획 시 우선적으로 고려되어야 함. 따라서 오염된 퇴적물 수거기준이 되는 퇴적물의 수



---

거기준을 조속히 마련하여야 할 것임

#### ㉠ 수거의 방법

- 오염퇴적물 관리를 위한 기존의 국내에서 시행하고 있는 방안으로는 수거(준설)에 의한 방법이 유일하다고 볼 수 있음. 퇴적물의 수거·준설 방법에 있어서는 대부분 전통적인 준설방법인 기계식이나 유압식으로 실시됨. 준설은 많은 예산이 소요되는 대규모 사업으로서 동일한 수역에서 장기간 준설이 시행될 경우 퇴적물이 다시 쌓이는 문제가 나타나고, 유해물질 및 독성물질의 잠재적 유출, 조류의 일시적 번식에 따른 생태계의 영향, 저서생물의 먹이인 유기물의 감소, 작업에 따른 큰 소음발생 그리고 준설물질 처리에 따른 문제점이 발생함. 따라서 준설방법의 선택은 하상 퇴적물의 종류, 퇴적량 등을 고려하여 환경에 영향이 적은 설비 또는 장비를 적용하여야 함
- 「해양환경관리법」은 “퇴적오염물질의 수거작업 시에는 부유물질의 발생으로 인한 환경피해를 최소화할 수 있는 진공흡입식 펌프 또는 이와 동등한 성능을 가진 펌프를 장착한 선박”만을 퇴적오염물질 전용수거선으로 등록할 수 있도록 규정함으로써(시행규칙 제36조 제3항, 별표 제14 제5호 비고 1) 준설방법을 ‘진공흡입식 펌프’를 이용하도록 제한하고 있음. 그러나 이와 같이 준설방법을 특정기술 또는 장비에 한정하는 것은 기술적으로 보다 우월하거나 보다 친환경적인 기술을 적용한 장비의 사용마저도 제한하는 결과를 초래하고 해역과 오염특성에 적합한 장비 또는 공법을 사용할 수 있는 가능성을 차단하여 불합리하고 비효율적인 결과를 낳게 되는 문제점이 있음

#### ㉡ 구체적인 입법방안

##### ㉢ 수거의 책임자

- 해양오염퇴적물의 수거 및 처리에는 오염원인자 책임의 원칙이 적용되어야 할 것임
- 그런데, 해저퇴적물은 인간이 생산하여 사용하고 폐기하는 다양한 물질에 의하여 오염이 됨. 그러한 물질의 제조자와 사용자 등은 어떤 경로를 통해서든 오염에 일조를 하게 되는데, 해양오염퇴적물은 특히 과거의 오랜 기간 동안 누적적으로 오염됨으로 인해 그 원인을 찾기 어려운 다양한 경로를 통해 여러 물질에 의하여 오염되는 특성이 있음
- 따라서 퇴적물의 오염이 오랜 시간에 걸쳐 누적적으로 진행된다는 점, 그 오염원인자를 규명하기가 매우 어려운 점, 오염원인자가 다수이기 때문에 책임의 배분이 어렵고 배분이 이루어진다 하더라도 수거 및 처리에 필요한 자력이 없을 수가 있는 점 등 해양오염퇴적물의 특성상 오염원인자 책임의 원칙에만 의존할 경우 수거 및 처리가 신속하게 이루어져야 하는 경우에 있어서도 그 수거 및 처리가 즉시 이루어지기 어려운 경우가 발생할 수 있음. 따라서 오염원인자 책임의 원칙에 의한 수거 및 처리가 불가능한 경우에 국가로 하여금 그 처리책임을 부담하게 할 수 있는 법적 근거가 필요함. 이는 “국가와 국민은 환경보전을 위하여 노력하여야 한다”고 하여 국가의 환경보전의무를 명시한 헌법 제35조에서 도출하여 해양오염퇴적물에 관한 법률에서 구체화하는 것이 바람직할 것임

##### ㉣ 수거기준 및 방법

- 해양오염퇴적물에 대한 수거기준과 방법은 기술적인 사항이 될 것이므로 대통령령으로 정하는 것이 바람직함. 다만, 오염원인자 또는 해양수산부장관에게 수거의 책임이 있다고 하더라도, 그 수거를 누가 할 것인가에 관하여는, 수거에 관한 과학기술적 전문성과 시설 및 장비 등을 갖추고 있는 해양오염퇴적물수거업자에게 위탁하여 수거하도록 할 필요가 있음. 수거기준은 가능한 한 객관적으로 수치화하여 불필요한 분쟁을 막아야 하고, 수거방

---

법은 가능한 한 구체화하고 이를 위반한 경우 벌칙이 부과되도록 하여 실효성을 확보하여야 함

### ㊤ 검증 및 사후관리

- 해양오염퇴적물을 수거하는 경우, 그 수거가 제대로 이루어졌는지에 대한 검증이 필수적임. 한편 수거를 한 당해 해양오염퇴적물수거업자가 검증까지 하는 경우, 수거가 미흡하거나 부적절함에도 불구하고 그 사실을 은닉하거나 기망하는 등의 방법으로 적절하게 수거되었다고 하는 등 정확한 검증이 어려울 가능성이 있음. 따라서 수거의 검증은 제3자가 하도록 할 필요가 있음. 따라서 제3의 검증기관으로 하여금 그 수거과정 및 수거완료에 대한 검증을 하게 하여야 함. 검증결과 그 수거가 미흡하거나 부적절한 경우, 해양수산부장관으로 하여금 수거의 정지나 수거방법의 변경 등 필요한 조치를 할 수 있도록 할 필요가 있음. 그리고 검증 비용에 관하여도 정하여야 하는데, 그 비용은 수거하려는 자로부터 받을 수 있도록 하는 것이 타당할 것임
- 해양오염퇴적물을 수거하였다고 하더라도, 오염원으로부터 오염물질이 계속 유입이 되는 등으로 인하여 일정한 시간 후에 수거를 다시하거나 오염원 자체에 대한 대책을 수립하는 등의 사후관리가 필요함. 따라서 해양수산부장관은 수거가 완료한 후에 수거의 효과를 검증하고, 지속적으로 관리하여야 하고, 이를 위하여 해양환경의 변화 유무를 수시로 조사하고, 조사결과에 따라 필요한 조치를 하여야 함

### (사) 해양오염퇴적물의 처리

#### ① 일반

- 수거된 오염퇴적물은 흔히 운반, 보관(저장), 정화 등을 거쳐 처분되는데, 적절한 처리방안의 선택은 특정 오염물질의 존재 및 유해성, 정화 기간 중 해역의 이용 문제, 영향을 받는 지역의 면적, 복구 방안의 실용가능성, 해당 지역의 수리특성, 정화에 소요되는 시간, 정화와 관련된 책임 소재 및 지역의 사회·경제적 요소 등의 많은 요인에 의하여 좌우됨
- 「해양환경관리법」은 수거·준설된 오염퇴적물의 처리·처분에 관해서는 그동안 해양투기 이외에 육상에서 처리하는 경우에는 「폐기물관리법」을 준용함. 「폐기물관리법」상 "처리"란 폐기물의 수집, 운반, 보관, 재활용, 처분을 말하고(법 제2조 제5의2호), "처분"이란 폐기물의 소각(燒却)·중화(中和)·파쇄(破碎)·고형화(固化) 등의 중간처분과 매립하거나 해역(海域)으로 배출하는 등의 최종처분을 말하며(법 제2조 제6호), 한편 "재활용"에 관해서는 폐기물을 재사용·재생 이용할 수 있는 상태로 만드는 활동 또는 폐기물로부터 에너지를 회수하거나 회수할 수 있는 상태로 만들거나 폐기물을 연료로 사용하는 활동(법 제2조 제7호)이라 하여 처리의 한 유형으로 보고 있음. 따라서 오염퇴적물의 육상 내 처리·처분을 「폐기물관리법」의 규정에 따라 구분하고 이를 준용할 것인지, 오염퇴적물에 대해서 「해양환경관리법」 등에 별도의 규정을 신설할 것인지 문제가 될 수 있음. 특기할 점은 새로운 법률을 제정하는 경우, 수거에서부터 처리·처분에 이르기까지 단계별로 규정을 두어 체계적으로 관리할 필요가 있다는 것임
- 따라서 해양오염퇴적물 관리를 위하여 새로 제정되는 법률에서는 이러한 검토를 바탕으로 수거(준설), 운반(이동), 저장, 처리, 재활용, 매립, 해저고립처분, 해양배출 등 전 과정에 걸쳐 순서에 따라 단계별로 가능한 한 자세한 규정을 두어야 할 것임. 특히 기존에 규정이 미비했던 것을 개선하기 위해 해양오염퇴적물 처리 기준 및 방법, 해양오염퇴적물의 재활용, 재활용을 위한 중간처리시설의 설치 및 운영에 관한 사항, 처리 과정에서 수질에 대한 영향 최소화, 방류수에 의한 수질오염 억제, 악취방지, 적정보관 및 처리 등에

---

관하여 규정도 마련하여야 할 것임

### ㉑ 운반

- 오염퇴적물을 수거한 후에는 보관, 처리 또는 처분하기 위한 장소로 운송하여야 함. 운송 방법의 선택에 있어서는 어떠한 준설방법을 선택했는가에 따라 각기 다른 방법이 적용될 수 있음. 일반적으로 제거된 오염퇴적물의 운송은 수상 운송방법과 육상 운송방법으로 크게 구분할 수 있는데 하나 또는 그 이상의 방법들이 복합적으로 이용됨
- 이렇듯 다양한 운송방법이 이용되는 것은 오염퇴적물이 독특한 물리적·화학적 특성을 가지고 있기 때문임. 대부분의 경우에 수거된 오염퇴적물은 바지선 등을 이용한 운송방법이 주로 이용되지만, 준설방법에 따라서는 파이프라인을 이용하여 운송되는 경우도 있음. 또한, 준설하고자 하는 범위는 실행가능성(feasibility), 운송비용, 추가적인 장비의 수요 등에 영향을 미침(SSC San Diego, 2003)

### ㉒ 보관

- 준설 후 운반된 오염퇴적물은 처리·처분장으로 바로 운반되기도 하지만 처리·처분장이 떨어져 있는 경우 선별·탈수·세척 등의 전처리 과정을 거치기 위해 육상 일정 지역에 보관해야 됨. 그러나 「해양환경관리법」은 수거된 오염퇴적물 또는 준설토사의 보관에 대해서는 어떠한 규정도 두고 있지 않음. 따라서 준설토사의 보관은 「폐기물관리법」의 규정을 준용할 수밖에 없다. 이 경우 탈수과정에서 배출되는 침출수 등에 관해서는 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」의 규정이 적용될 수 있고, 주변 토양오염에 대해서는 「토양환경보전법」의 적용을 받을 수 있음

### ㉓ 전처리

- 수거·준설을 통해 육상으로 운반된 준설물질은 전처리 과정을 거쳐 처리·처분됨. 전처리(Pretreatment)는 오염된 준설퇴적물을 탈수, 입자분류 및 슬러리 주입 등을 거쳐 생물학적·화학적 추출, 소각, 안정화법 등에 의하여 오염준설토를 처리한 후 유출수의 부유물 제거 및 중금속 처리를 위한 후속처리공정을 수행하는 과정을 말함
- 오염퇴적물의 전처리 과정은 현행 「폐기물관리법」상 중간처분 규정을 준용할 수 있을 것임. 다만, 일반적으로 폐기물에 대해 적용하는 「폐기물관리법」상의 중간처분 규정과 구별하기 위해 가칭 「해양오염퇴적물관리법」에 별도의 에 관한 규정을 신설함이 타당하다고 여겨짐
- 또한 전처리와 관련하여 오염퇴적물의 특성상 운반의 어려움, 과도한 비용부담 등을 고려하여 준설지 인근에서 이를 중간처리하고 부득이한 경우에 한해서 원격지의 매립장이나 투기장을 조성·이용할 수 있도록 해야 할 것임. 그리고 탈수 등 중간처리 과정에서 침출수·배출수 등이 발생하는 경우에는 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」상 배출허용기준의 규제를 받으며, 주변 토양을 오염시킬 우려가 있는 경우에는 「토양환경보전법」상 토양오염우려기준 이내로 유지토록 조치를 취하여야 함. 이와 관련하여 가칭 「해양오염퇴적물관리법」에 관련 규정을 두고 처리과정에서의 침출수 규제 또는 토양오염 관련 규제를 위한 세부 기준에 대해서는 관련 법률을 준용함이 타당함

### ㉔ 재활용

- 준설한 오염퇴적물을 재활용 방법은 일반적인 국내의 준설토 처리방법 이외에 환경 친화

---

적인 인공습지의 조성 등에 활용할 수 있을 것임. 이밖에 해변조성(beach nourishment), 서식지 조성, 매립, 매립지 복토, 농업, 수중고립처분장 복토(capping open water disposal sites)로 이용될 수 있음

- 재활용과 관련해서 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」에서는 재활용, 재사용 그리고 재생이용이라는 용어를 각기 정의하고 있음. 동법상 재활용이란 「폐기물관리법」의 규정을 준용하여 폐기물을 재사용·재생이용하거나 재사용·재생 이용할 수 있는 상태로 만드는 활동 또는 환경부령으로 정하는 기준에 따라 폐기물로부터 「에너지기본법」 제2조 제1호에 따른 에너지를 회수하는 활동을 말함(「폐기물관리법」 제2조 제7호)

### ㉞ 처분

- 준설된 오염퇴적물은 전처리(중간처리) 과정을 거쳐 오염물질을 제거하고, 개방수계에 투기한다거나, 폐쇄처분장(Confined Disposal Facility, CDF) 이용, 수중고립처분장(Confined Aquatic Disposal, CAD) 이용, 육상매립장 또는 폐기물매립장에 매립하는 등 크게 5가지 방법으로 처분될 수 있을 것임. 그동안 준설한 오염퇴적물은 해양투기를 비롯해 매립, 소각, 고형화, 골재 등의 방법으로 이용됨. 그러나 이 중 대부분의 오염퇴적물은 외해에 투기되거나 매립되었으며, 지금까지도 하천정비 차원에서 수행된 준설사업의 결과로 얻어진 준설퇴적물은 고수부지 유흥토 또는 호안매립토 등으로 재이용되고 있을 뿐임. 준설물질의 경우 대부분 해양투기가 이루어졌으나, 해양투기가 금지됨에 따라 육상 내 매립장을 이용하거나 폐쇄처분장 또는 수중고립처분장의 조성 등을 적극 고려하여야 할 것임

### ■ 매립

- 매립은 오염이 심각한 퇴적물 또는 처리과정 후 발생한 잔여물을 처분할 때 고려될 수 있음. 준설된 오염퇴적물의 매립은 일반적으로 다량의 수분을 감소시키기 위한 탈수 등의 전처리 과정과 처분량의 감소를 위한 오염물질의 처리과정 등이 요구되기에 많은 비용이 소요됨. 또한, 지가상승과 민원발생으로 매립지의 확보가 점점 어려워지고 있으며, 침출수에 의한 수질 및 토양오염을 방지해야 하는 문제점이 있음
- 「해양환경관리법」 제22조는 ‘선박으로부터’의 오염물질의 해양배출을 규제하고 있음. 그런데 동조 제1항 제1호 나목은 준설물질을 공유수면 등에 매립하고자 하는 규정이므로 이를 동 규정에 포함시키는 것은 타당하지 않음. 더욱이 동법 제22조에 “퇴적물 또는 준설물질”을 포함할 경우에는 오염물질 개념 정의에서 “퇴적물 또는 준설물질”을 새로이 포함시켜야 하는 문제가 있음. 따라서 준설물질을 폐기물의 범주에서 제외한다는 차원에서 수저준설토사의 배출에 관한 동법 시행규칙 별표 3의 가목과 나목의 배출방법(매립)은 삭제하고, 동법 제22조 제1항 제1호 나목 및 별표 3의 가목과 나목의 배출방법은 오염퇴적물의 매립과 관련하여 별도의 규정에 포함시켜야 할 것임

### ■ 고립처분

- 해양에서 수거한 오염퇴적물을 육상 내 매립장 등을 이용하는데 있어서는 투기장의 환경문제, 집단민원, 매립장 조성비용 등 일정한 한계가 있음. 이에 해양오염퇴적물의 처분의 한 방법으로 해저면 하에 매립 처분하는 수중고립처분도 적극 검토하여야 할 것임
- 고립처분은 다음과 같은 방식으로 이루어질 수 있음
  - 자연적, 인공적으로 만들어진 해저면의 함몰지에 해양오염퇴적물을 넣고 그 위에 오염되지 아니한 물질을 덮는 경우
  - 연안 또는 해양에 구조물을 설치하여 처분하거나 육상에 매립하는 경우

---

- 육상의 폐기물처리시설에서 해양오염퇴적물을 처분하는 경우

### ■ 해양투기

- 일관성과 체계성을 위해서는 해양오염퇴적물의 해양배출에 대해서도 규정을 두어야 할 것임
- “해양오염퇴적물의 해양배출금지”를 별도의 조항으로 신설하고, 기존 「해양환경관리법시행규칙」 제12조 제1항 별표 6 등을 삭제하는 것임

### ■ 자연정화

- 자연정화방법은 퇴적물의 오염물질의 독성 등을 자연의 생화학적 반응을 통하여 자연스럽게 분해되고 정화되는 과정에 근간하고 있음. 그러나 단순히 자연분해에 의지하여 정화되는 것을 기대하는 것이 아니라 장기적인 모니터링과 오염원 차단에 집중적인 시간과 예산을 투자하여야 성공적인 자연정화방법이 효과를 거둘 수 있음. 이를 위하여 오염물질의 종류와 거동특성, 정화기간 중 해역의 이용 계획 및 해역의 생지화학적 특성 등을 정확히 파악하고 모니터링하는 것이 중요함. 퇴적물의 자연정화방법은 물리적, 생물학적 그리고 화학적 기작을 통하여 이루어지는데, 성공적인 자연정화방법을 위해서는 이러한 메커니즘에 대한 이해와 평가가 중요함. 이를 위해 오염퇴적물의 현장과 주변해역에서 지속적으로 모니터링이 이루어지고 그 자료를 바탕으로 위험도 조사, 환경영향평가 등이 수행되어야 함

### ■ 표면피복

- 자연정화가 불가능한 경우, 선택할 수 있는 처리공법으로는 오염퇴적물을 제거하지 않고 현장에서 직접 처리하는 방법(고정화/안정화, 표면피복, 주위와 차단 또는 봉입)과 제거 후 처리하는 방법으로 크게 구분됨. 표면피복은 수저의 오염된 지역만 정밀하게 피복하여 피복물질을 수저에 잔류시키는 방법과 피복물질이 수상으로 노출될 만큼 다량의 피복물질을 투입하는 방법이 있음
- 표면피복방법은 오염된 퇴적물을 수계에서 고립화시키는 목적으로 사용되는데, 퇴적물의 종류, 오염도 및 주변환경에 따라 다양한 피복물질을 사용함. 자연정화, 현장처리 및 표면피복 등의 장·단점은 <표 II-사-3>과 같음

[표 II-사-3] 해양오염퇴적물 정화·복원 방법(김경련, 2012)

정화·복원 방법	내용	장점	단점
자연정화	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 자연적인 분해, 퇴적</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 인위적인 복구에 따른 2차 오염 방지</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 장시간 기간 필요</li> <li>▪ 정화추이에 따른 장기 모니터링 필요</li> </ul>
현장처리 표면피복	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 생물적, 화학적 고정 및 안정화</li> <li>▪ 오염지역 피복 (모래, 자갈, 지오그리드 등)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 환경친화적인 기술</li> <li>▪ 상대적으로 저비용</li> <li>▪ 효과적인 오염물질 봉쇄</li> <li>▪ 2차 오염 영향 적음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 해수유동 특성 등에 따라 효과미비 가능</li> <li>▪ 피복물질의 침식 가능</li> <li>▪ 피복물질의 변화 및 장기 모니터링 필요</li> </ul>

## ② 구체적인 입법방안

### ㉞ 처리기준과 방법

- 시행령에서 해양오염퇴적물의 처리기준과 방법을 정하고, 해양오염퇴적물을 처리하려는 자로 하여금 그 기준과 방법을 따르도록 하여야 함. 또한 해양오염퇴적물의 처리에 있어서도 수거와 마찬가지로 전문 기술과 장비 등이 필수적이므로, 해양오염퇴적물처리업자에게 위탁하여 처리하도록 하여야 함
- 해양오염퇴적물을 처리하는 때에는 다음과 같은 사항을 준수하도록 하여야 함
  - 해양오염퇴적물을 운반, 보관하는 과정에서 오염물질, 악취 또는 해충이 발생, 누출, 유출 또는 흩날리지 아니하도록 하여야 함
  - 해양오염퇴적물을 처리하는 과정에서 발생될 수 있는 방류수는 그 방류수를 배출하는 해역의 수질을 저해하지 아니하도록 하여야 함
  - 해양오염퇴적물을 처리하는 과정에서 주민의 생활환경을 저해하지 않도록 악취의 발생을 방지하도록 하여야 함
  - 해양오염퇴적물을 적정하게 처리할 수 있는 장소 외의 장소로 운반하여서는 아니 되고, 해양오염퇴적물을 처리하는 과정에서 누출되거나 흩날리지 아니하도록 적정하게 관리하여야 함
  - 감량화시설의 설치, 기술개발 및 재활용 등의 방법으로 처분량을 최대한으로 감축하여야 하며, 해양오염퇴적물을 처리하는 과정에서 발생하는 폐기물을 적정하게 처리하여야 함. 또한 대통령령에는 분리, 세척, 열처리, 고형화, 안정화 등에 대한 구체적인 기준과 방법이 규정되어야 할 것임

### ㉟ 해양오염퇴적물의 재활용

- “재활용”이란 “해양오염퇴적물을 재사용·재생이용하거나 재사용·재생이용할 수 있는 상태로 만드는 행위”를 말함. 해양오염퇴적물의 관리에 관한 법률을 제정하는 경우, 해양오염퇴적물의 재활용을 장려하기 위한 규정을 두어야 함. 우선, 재활용을 하는 경우에 있어서 그 용도 및 방법을 정할 필요가 있음. 이를 위해 기존의 「수거준설토사 유효활용기준」(국토해양부고시 제2012-338호, 2012. 6. 19. 제정)에 규정된 용도인 ‘해수욕장의 양빈, 습지 조성 및 복원, 인공섬의 조성, 어장개선, 항만시설 또는 어항시설의 공사용 재료’로 재활용하거나, 그 외에도 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」 제2조제9호에 따른 재

---

활용제품 중 환경부령으로 정하는 제품의 제조, 「산업표준화법」 제15조제1항에 따른 인증을 받은 제품의 제조 등의 용도로 재활용될 수 있을 것임

- 한편, 해양오염퇴적물을 처리하려는 자가 재활용이 가능한 자원을 회수하기 위한 처리시설을 설치·운영할 수 있도록 하는 근거규정을 마련할 필요가 있고, 재활용에 대한 관리를 위하여 해양오염퇴적물을 처리하려는 자로 하여금 처리하는 해양오염퇴적물의 양과 발생하는 폐기물의 종류, 발생량 및 재활용하는 양 등을 해양관리청에게 신고하도록 하여야 함

#### ㉔ 해양오염퇴적물의 해양투기

- 「해양환경관리법」 제23조 제1항은 “누구든지 육상에서 발생한 폐기물을 해양에 배출할 수 없다. 다만, 해양수산부장관은 해양환경의 보전·관리에 영향을 미치지 아니하는 범위 안에서 육상에서 처리가 곤란한 폐기물로서 해양수산부령이 정하는 폐기물에 한하여 해양수산부령이 정하는 해역에서 해양수산부령이 정하는 처리기준 및 방법에 따라 배출하게 할 수 있다”고 규정하여 폐기물의 해양투기를 원칙적으로 금지하고, 예외적으로 허용하고 있음
- 그런데, 「해양환경관리법」 제23조는 “육상에서 발생한 폐기물”의 해양투기에 관한 규정임. 그러나 해양오염퇴적물은 육상에서 발생한 것이 아니라는 점, 그리고 폐기물로 취급하는 것이 바람직하지 않다는 점에서 「해양환경관리법」으로 규율하는 것은 문제라는 지적이 제기됨. 따라서 해양오염퇴적물에 관한 별도의 법률을 제정하는 경우, 그 해양투기에 관하여도 「해양환경관리법」이 아니라 새로 제정하는 법률에서 일괄적으로 규율하는 것이 해양오염퇴적물의 통일적이고 일관성 있는 관리의 측면에서 바람직할 것임
  - 따라서 해양오염퇴적물 관리를 위한 새로운 법률에서는 원칙적으로 해양오염퇴적물을 해양에 투기할 수 없도록 하고, 해양환경의 보전·관리에 영향을 미치지 아니하는 범위 안에서 해양수산부장관이 정하는 투기가능한 해양오염퇴적물의 종류와 투기해역, 그 처리기준과 방법에 따라 투기하게 할 수 있도록 규정할 필요가 있음

#### ㉕ 매립

- 「해양환경관리법」 제22조는 선박으로부터 오염물질을 해양에 배출하는 행위를 금지하고, 예외적으로 해양수산부령이 정하는 폐기물을 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제28조 및 같은 법 제35조에 따라 매립하고자 하는 장소에 배출하고자 하는 경우에는 해양수산부령이 정하는 처리기준 및 방법에 따라 배출할 수 있도록 하고 있음. 이에 따라 동법 시행규칙 제11조 및 별표3에서는 수저준설토사(해양수산부장관이 고시하는 유효활용기준을 충족하는 경우는 제외)를 배출 가능한 폐기물에 포함시키고, 그 배출방법을 정하고 있음
- 그런데, 해양오염퇴적물을 “오염물질”로 단정할 수 없고, 「해양환경관리법」에 따라 매립하는 경우, 오염도 저감 등의 다른 처리가 이루어지지 않아 매립지에 2차적인 환경오염을 유발할 수 있는 점, 그리고 해양오염퇴적물에 대하여 별도의 법률에서 통일적으로 규율할 필요가 있는 점 등을 고려하여, 「해양환경관리법」에 따른 규제를 분리하여 새로 제정하는 별도의 법률에 규정하여야 할 것임. 즉, 해양오염퇴적물을 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제28조 및 같은 법 제35조에 따라 공유수면에 매립하려는 경우에는 해양수산부령으로 정하는 매립기준과 방법에 따르도록 하고, 호안시설을 설치하여 해역과 차단하도록 하고, 상등수를 해양으로 배출하는 경우 부유물질이 흘러 나가지 못하도록 하는 시설 또는 설비를 갖추도록 규정하는 것임

---

### ㉮ 고립처분

- “고립처분”이란 “해양오염퇴적물의 위치를 이동시킨 후 피복, 봉쇄 등의 방법으로 오염물질의 잠재적 영향을 차단, 격리하는 것”을 말함. 기존의 관련 법률에 의하면, 해양오염퇴적물의 처분 방법 중 하나로 고립처분을 선택할 법적 근거를 찾기 어려움. 따라서 다음과 같은 방법으로 고립처분을 할 수 있도록 그 법적 근거를 마련할 필요성이 있음
  - 자연적, 인공적으로 만들어진 해저면의 함몰지에 해양오염퇴적물을 넣고 그 위에 오염되지 아니한 물질을 덮는 경우
  - 연안 또는 해양에 구조물을 설치하여 처분하거나 육상에 매립하는 경우
  - 육상의 폐기물처리시설에서 해양오염퇴적물을 처분하는 경우
- 고립처분을 하려는 자는 대상지역이 처분방법에 적합한지 여부를 조사하여야 함. 한편, 해양수산부장관은 처분이 완료된 후에 처분의 효과를 검증하고, 지속적으로 관리하여야 하며, 이를 위하여 해양환경의 변화 유무를 수시로 조사하고, 조사결과에 따라 필요한 조치를 하여야 함. 또한 대상지역의 적합 여부 조사방법 및 비용, 설계기준, 처분과정에서 발생할 수 있는 환경영향 등의 구체적인 기준이나 방법은 하위법령으로 위임하는 근거 조항을 규정하여야 함

### ㉯ 자연정화

- “자연정화”란 “해양오염퇴적물이 자연과정(오염되지 아니한 퇴적물이 자연축적되거나 오염물질이 자연분해·소멸되어 수계생태계와 분리되는 것을 포함한다)에 의하여 정화되는 것”을 말함. 그런데, 「해양환경관리법」은 제18조에서 오염된 퇴적물에 대한 해양환경개선조치로 “수거”만을 정하고 있음. 따라서 해역의 특성이나 해양오염퇴적물의 상태 등을 고려할 때 자연정화와 같은 방법이 더욱 타당하다고 판단되는 경우에도 그 방법을 사용할 수 없는 한계가 있음. 따라서 자연정화에 대한 근거 규정을 마련할 필요가 있음. 즉, 해양수산부장관으로 하여금 오염물질 유입의 차단 등에 의하여 해양오염퇴적물이 자연정화 될 수 있다고 판단하는 경우 자연정화를 실시할 수 있도록 하고, 정화의 과정 및 완료를 확인하도록 하며, 자연정화를 실시하기 전에 오염물질 유입의 차단을 위하여 지방자치단체장에게 오염물질의 유입금지, 오염방지시설의 설치 등 필요한 조치를 요청할 수 있도록 하여야 함. 한편, 자연정화의 기준, 방법과 감시방법, 비용 등은 기술적인 사항이므로 하위법령으로 위임하는 것이 타당할 것임

### ㉺ 현장피복

- “현장피복”이란 “해양오염퇴적물로 인한 영향을 차단하거나 완화시키기 위하여 해양오염퇴적물 표면에 오염되지 아니한 퇴적물이나 오염물질의 생태계로의 노출을 차단시키는 물질로 덮는 것”을 말함
- 현장피복 역시 기존 법령에 의하면 그 법적 근거를 찾기 어려움. 따라서 그 기준과 방법 등에 대한 법적 근거를 법률에 마련할 필요성이 있음. 현장피복의 기준과 방법에 관하여 대통령령 등 하위법령으로 정하고, 현장피복하려는 자는 그 기준과 방법을 따르고, 대상지역이 현장피복방법에 적합한지 여부를 조사하여야 함. 한편, 해양수산부장관은 현장피복이 완료된 후에 현장피복의 효과를 검증하고, 지속적으로 관리하여야 하며, 효과 검증 및 사후관리를 위하여 해양환경의 변화 유무를 수시로 조사하고, 조사결과에 따라 필요한 조치를 하여야 함. 현장피복의 비용, 대상지역의 적합 여부 조사방법 또는 절차, 효과의 검증방법 및 절차 등에 관하여도 시행규칙 등 하위법령에서 규정하도록 하여야 함



## ㉠ 조치명령

- 해양오염퇴적물의 처리가 적절하게 이루어지는지를 감독하고, 적절하게 이루어지지 않는 경우 이를 강제하도록 함으로써 그 실효성을 확보하여야 함. 따라서 해양수산부장관으로 하여금 해양오염퇴적물이 처리기준과 방법, 재활용 용도 또는 방법, 매립·고립처분·현장피복의 기준과 방법에 맞지 아니하게 처리되면 해양오염퇴적물을 처리한 자에게 기간을 정하여 처리 정지, 처리방법 변경 등 필요한 조치를 명할 수 있도록 하는 것은 특별한 의미가 있음

### (아) 해양오염퇴적물수거업 및 해양오염퇴적물처리업의 신설

- 현행 「해양환경관리법」상 ‘해양환경관리업’은 폐기물해양배출업, 해양오염방제업, 유창청소업, 폐기물해양수거업 및 퇴적오염물질수거업으로 구분하고 있음. 따라서 수거업만을 규정하고 있지 처리업에 대해서는 아무런 규정을 하고 있지 않음. 그 결과 현장처리·피복정화 방식을 통한 오염퇴적물 정화를 하는 사업자에 대한 근거규정이 없는 결과가 되고, 오염퇴적물 정화사업의 관리, 감독 및 활성화에 큰 장애가 됨. 이는 수거만으로 그쳐서는 입법의 목적이 반감된다는 점에서 입법의 흠결로 여겨짐. 그러므로 폐기물해양수거업 및 퇴적오염물질수거업과 더불어 이를 처리하는 처리업도 신설하여 오염퇴적물에 대하여 현장처리, 표면피복 등 수거(준설) 이외의 처리를 업으로 하는 사업자에 대한 법적 근거를 마련할 필요가 있음. 처리까지 나아가지 않고 수거로 그치는 것이 큰 의미를 갖지 못한다는 것도 처리업의 신설 필요성을 높이는 이유임. 따라서 수거(준설)를 내용으로 하는 업종의 명칭을 기존 퇴적오염물질수거업에서 ‘해양오염퇴적물수거업’으로 변경하고, 이와 별도로 ‘해양오염퇴적물처리업’을 신설하고, 다만 등록기준 등의 구체적인 내용에 관하여는 기존 해양환경관리업과 마찬가지로 하위법령에서 규정하도록 하면 될 것임
- 준설 위주의 수거업과 표면피복 및 세척 등 물리·화학적 기술이 필요한 처리업은 그 업무의 행위태양을 달리하고, 따라서 등록요건이나 행정청의 관리·감독 내용 등 규정해야 할 사항들에 큰 차이가 있게 됨. 또한, 현실적으로 수거업과 처리업을 통합하면, 그 등록요건이 강화됨에 따라 두 업종을 모두 영위할 수 있는 자본과 기술을 가진 대기업만 등록이 가능하게 되고, 수거업만을 하고자 하거나 또는 처리업만을 하고자 하는 소규모 사업자의 시장진입을 가로막는 결과가 발생할 수 있음. 따라서 ‘해양오염퇴적물수거업’은 ‘해양오염퇴적물의 수거에 필요한 선박·장비 및 설비를 갖추고 해양오염퇴적물을 수거하는 사업’으로, ‘해양오염퇴적물처리업’은 ‘해양오염퇴적물의 처리에 필요한 장비 및 설비 또는 선박을 갖추고 해양오염퇴적물을 처리하는 사업’으로 구분할 것을 제시함

## 제3절. 3차년도 연구의 내용 및 결과

### 1. 3차년도 연구개발 목표

- 해양오염퇴적물 정화·복원사업에서 활용 가능한 대안기술로 피복정화 및 현장처리기술 실현을 위한 핵심 기술개발 및 현장 적용성 시험 수행

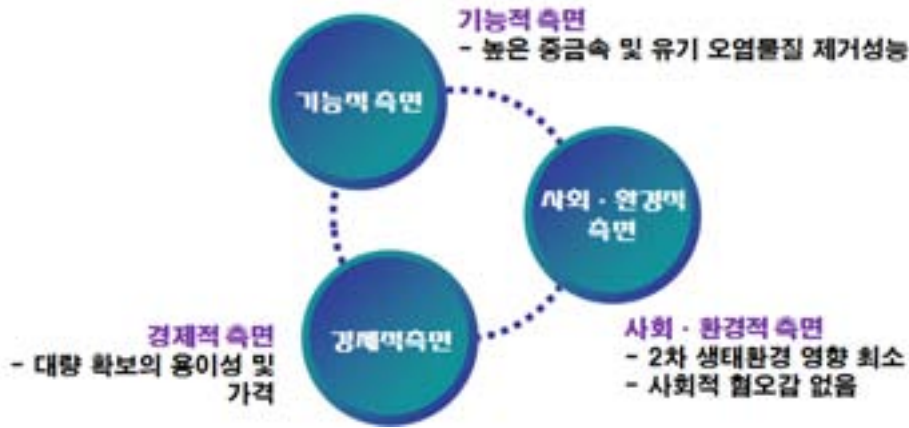
### 2. 3차년도 연구개발 내용 및 범위

#### 가. 반응성 피복소재 개발

- (1) 중금속 및 유기오염물질별 적정 피복소재 구출(순환골재, 제강슬래그, 활성탄, 벤토나이트, 제올라이트, 모래)

- (가) 중금속 및 유기오염물질 별 정화에 효과적인 피복소재의 성능 비교표 작성

① 국내해역 오염특성을 고려한 중금속 및 유기오염물질 안정화 성능을 가진 반응성 피복소재 선정 및 고려사항

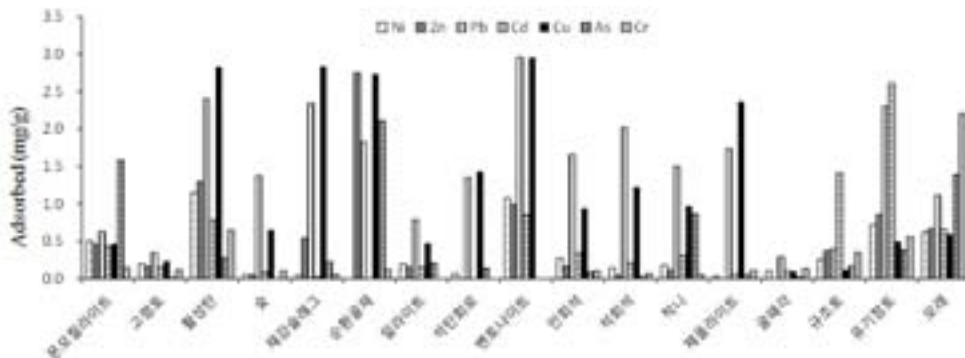


[그림 III-가-1] 피복소재 선정 주요 조건

- 현장피복에 있어서 중금속 및 유기오염물질에 안정화 및 차단 성능을 가진 반응성 피복소재 선정조건
  - 해양 저서 퇴적물에 피복을 할려면 피복소재의 수송과 많은 양이 필요하기 때문에 현장에서 구하기 쉽고 대량 확보가 용이한 피복소재 선정이 중요함 (경제적 측면)
  - 피복소재가 해양 저서 퇴적물에 유입이 되기 때문에 피복소재 자체가 2차 오염을 유발을 시키면 안되고, 또한 가급적 사회적 저항이 적은 피복소재를 선정이 필요함 (사회·환경적인 측면)
  - 오염된 퇴적물에서 중금속 및 유기오염물질 등의 용출 및 이동성을 차단하기 위한 피복소재이기 때문에 오염물질의 안정화 및 차단능력 뛰어난 소재 선택이 중요함 (기능적 측면)

② 혼합 중금속 흡착에 있어서 다양한 피복소재간의 흡착 특성 비교

- 혼합 중금속 흡착을 위한 다양한 피복소재(18종)의 중금속 흡착특성을 비교하였음
- 중금속 흡착이 좋은 소재로는 활성탄, 재강슬래그, 순환골재, 벤토나이트, 제올라이트, 모래 등이 비교적 높은 흡착특성을 보였음

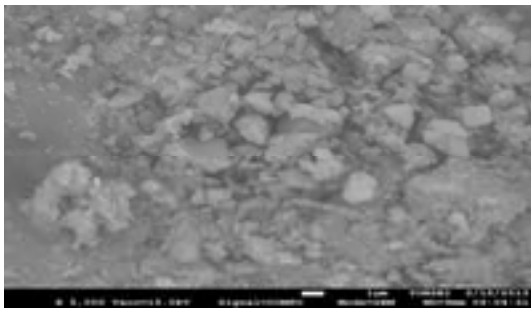


[그림 III-가-2] 혼합 중금속 흡착에 있어서 다양한 피복소재간의 흡착 특성 비교

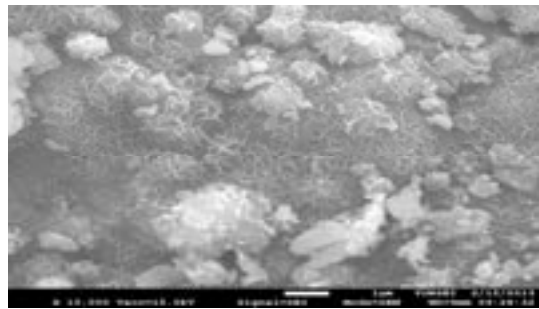
③ 중금속 및 유기오염물질별 정화에 효과적인 반응성 피복소재 선정

㉔ 반응성 피복 소재의 물리·화학적 특성 (SEM, 구성성분, 관능기(FTIR))

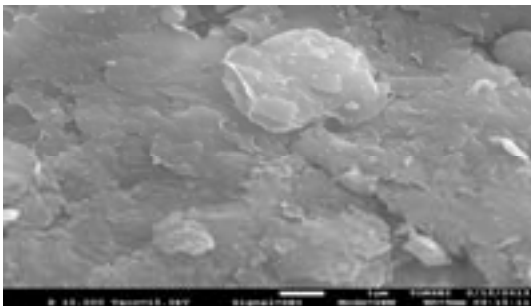
- 선정된 피복소재들에 있어서 물리·화학적 특징들을 살펴본 결과를 나타냄
- 전자현미경(SEM)을 이용해 각각의 반응성 피복소재들의 표면 특성을 관찰한 결과를 나타냄
- 활성탄은 표면이 야간 거친 모습을 나타내고 있으면 표면에 기공이 발달한 특징을 보이고 있음



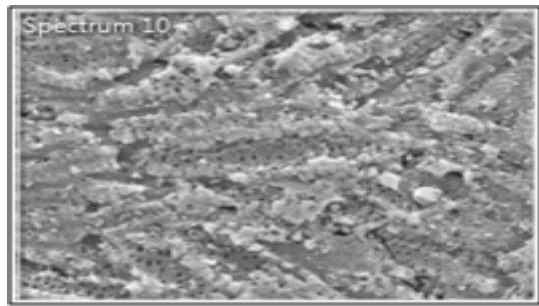
순환골재(Recycled aggregate)



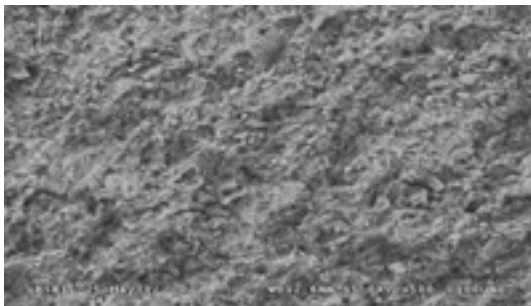
제강슬래그(Steel slag)



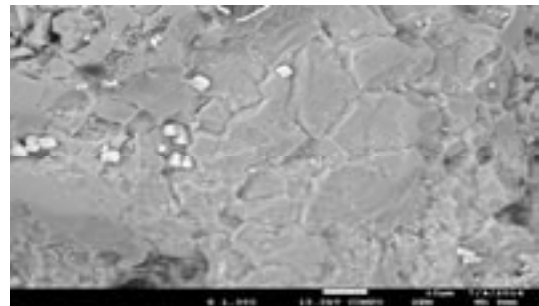
벤토나이트(Bentonite)



활성탄(Activated carbon)



제올라이트(Zeolite)



모래(Sand)

[그림 III-가-3] 반응성 피복소재들 SEM 이미지

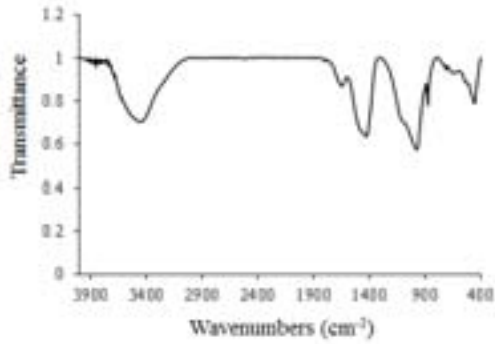
- 다른 반응성 피복소재인 순환골재, 제올라이트 및 모래는 표면이 거친 특징을 갖고 있는 반면 제강슬래그 와 벤토나이트는 비교적 매끄러운 표면 구조를 가짐
- 반응성 피복소재의 화학적 구성성분 분석결과를 표 I-가-1에 나타내었음
- 반응성 피복소재들의 구성 성분들을 살펴보면  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO$  등의 무기성분들이 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있음.

- 이러한 구성성분들은 기존문헌에 따르면 중금속 중금속 흡착에 적합한 흡착재로 그 가능성을 나타내고 있음
- 활성탄을 제외한 대부분이 광물이기 때문에 반응성 피복소재의 비표면적은 매우 적은 특성을 보이고 있으며, 비표면적은 활성탄 > 제올라이트 > 벤토나이트 > 순환골재 > 모래 > 제강슬래그 순으로 나타남

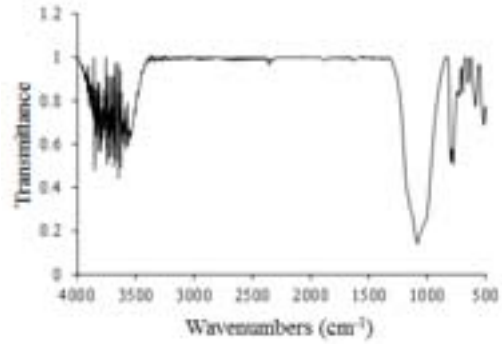
[표 III-가-1] 피복소재들의 물리화학적 특성

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Surface areas (m <sup>2</sup> /g)
순환골재	9.9	6.0	38.4	1.5	0.4	36.2	-	-	0.1	5.981
제강슬래그	-	40.6	16.3	-	-	30.0	-	-	2.1	0.188
벤토나이트	16.5	3.3	72.8	2.4	0.2	1.6	0.4	0.01	-	16.245
활성탄	0.02	0.02	0.3	-	0.01	0.02	0.1	-	0.01	1130.466
모래	7.7	1.4	80.6	1.5	0.1	2.44	0.01	0.01	0.07	1.738
제올라이트	12.0	1.7	76.5	2.5	0.3	1.9	0.1	-	0.1	40.378

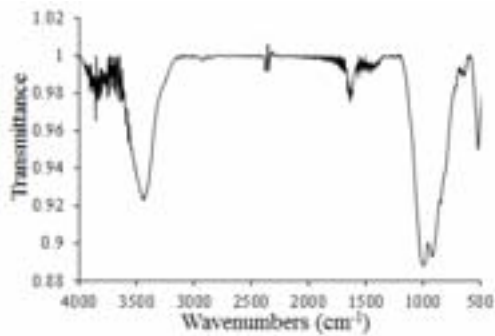
- 반응성 피복소재 표면에 형성된 관능기를 FTIR(Fourier transform infrared spectroscopy)를 이용해서 분석한 결과를 나타내었음 (그림 III-가-4)
- 순환골재인 경우, 중금속 흡착 후 3300~3400 cm<sup>-1</sup>에서 강한 밴드를 나타내고 있지만 이러한 피크의 대부분은 물에 의한 영향 때문이라고 사료됨. 게다가 1410~1470 cm<sup>-1</sup> 범위에서 보이는 피크는 탄산염 밴드(C=O)와 관련이 크고, 강한 피크를 보이고 있는 1000 cm<sup>-1</sup>와 450 cm<sup>-1</sup> 피크는 각각 비대칭의 Si-O-Al의 결합과 SiO<sub>4</sub> 사면체에 있어서 평면 Si-O 결합과 관련이 있음
- 활성탄은 1040 cm<sup>-1</sup> 부근에서 가장 강한 피크를 보이고 있는 carboxy group의 O-H 피크를 볼 수 있음
- 제강슬래그인 경우, 주요 피크 밴드는 3400 cm<sup>-1</sup>, 1630 cm<sup>-1</sup>, 920~1000 cm<sup>-1</sup>, 520 cm<sup>-1</sup>범위에서 나타나고 있다. 먼저 3400 cm<sup>-1</sup>와 1630 cm<sup>-1</sup>는 주로 H-O 밴드를 나타내고 있음. 그리고 가장 강한 피크를 보이고 있는 920~1000 cm<sup>-1</sup>는 Si-O-Si와 O-Si-O 결합과 관련이 있음. 또한 520 cm<sup>-1</sup> 피크는 각각 비대칭의 O-Si-O 및 Ca-O의 결합과 관련이 있음.
- 제올라이트는 제강슬래그와 비슷한 920~1000 cm<sup>-1</sup> 의 가장 강한 밴드를 나타내고 있음. 이러한 밴드는 Si-O-Si와 O-Si-O 결합과 관련이 있음.
- 벤토나이트의 FT-IR 스펙트라는 400~4000 cm<sup>-1</sup> 범위에서 평가 되었음. 3400~3600 cm<sup>-1</sup>와 1670 cm<sup>-1</sup> 범위는 주로 H-O 밴드를 나타내고 있음. 또한, 1070 cm<sup>-1</sup>은 Si-O 결합과 관련이 있고, 450 및 540 cm<sup>-1</sup> 피크는 각각 비대칭의 Si-O-Si 및 Al-O-Si의 결합과 관련이 있음.
- 모래는 다른 피복소재들과 달리 특별한 밴드는 나타나고 있지 않음
- 이처럼 중금속 흡착에 있어서 Si, Al, Ca와 같은 구성성분들로 이루어진 밴드의 높은 기여는 앞서 지적한 중금속 흡착제로서의 사용 가능성을 보여주고 있음을 알 수 있음.



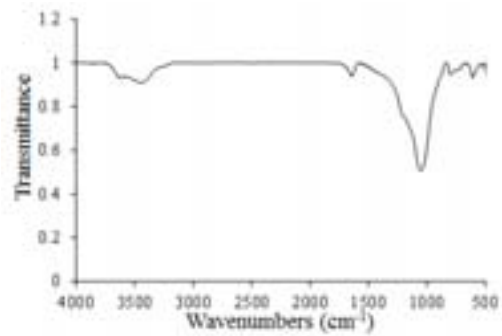
<순환골재 FTIR>



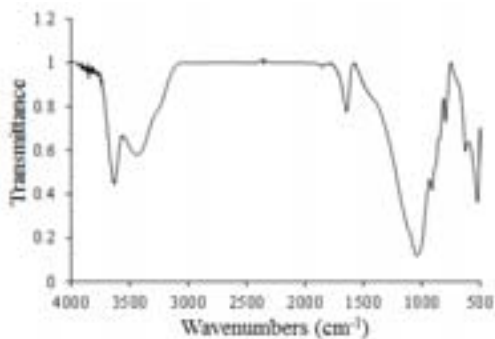
<활성탄 FTIR>



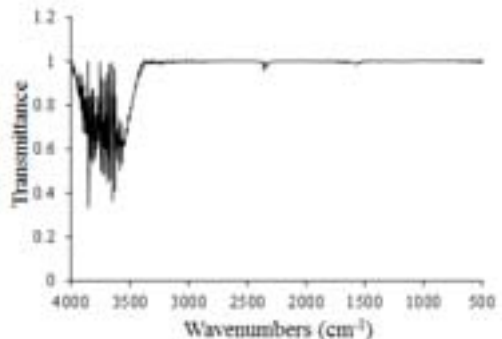
<제강슬래그 FTIR>



<제올라이트 FTIR>



<벤토나이트 FTIR>



<모래 FTIR>

[그림 III-가-4] 반응성 피복소재들의 FTIR 특성

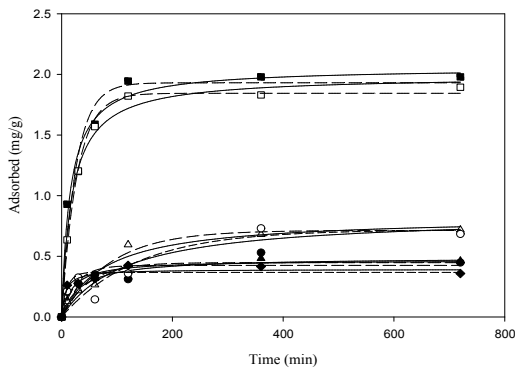
#### ④ 중금속 정화에 효과적인 반응성 피복소재 성능평가

##### ㉞ 혼합 중금속 흡착 성능평가

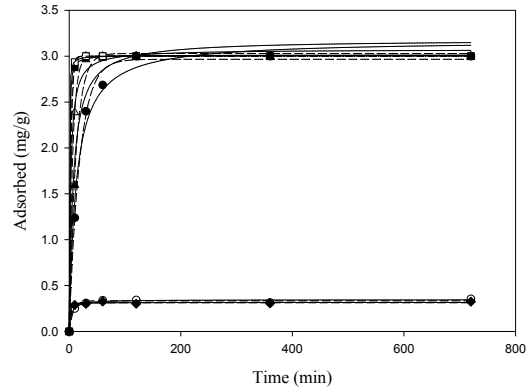
##### ■ 피복소재들의 동적흡착 특성

- 반응성 피복소재의 흡착능을 비교하기 위하여 동일한 양의 혼합 중금속용액(50 mg/L)과 피복소재를 50 mL 튜브(0.5g, 30 mL)에 투입한 후 25℃, 100rpm 조건에서 10, 30, 60, 120, 360, 720분 교반 후 시료 채취하여 잔류 중금속 농도를 ICP-MS (Agilent 7500 Series, USA)로 측정하여 흡착특성을 분석함 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)
- 반응성 피복소재 및 혼합 중금속 종류에 따라 중금속 동역학적 흡착 특성의 차이를 보였음

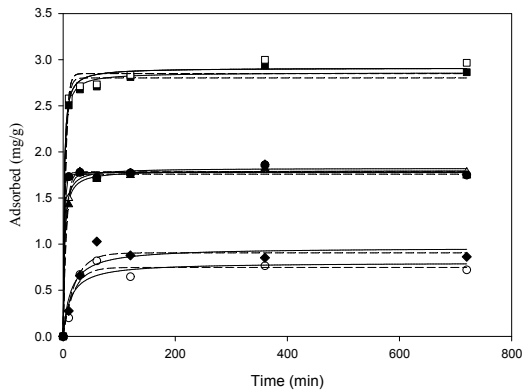
- 제올라이트와 모래가 가장 빠른 60분 정도에 흡착 평형에 도착하였고, 활성탄, 제강슬래그, 벤토나이트는 120분 정도에 흡착 평형에 도착하였음. 그리고 마지막으로 순환골재가 360분으로 가장 느리게 평형 흡착에 도달하는 것으로 나타났음
- 혼합중금속 중 Cu, Pb가 일반적으로 높은 흡착경향을 나타냄



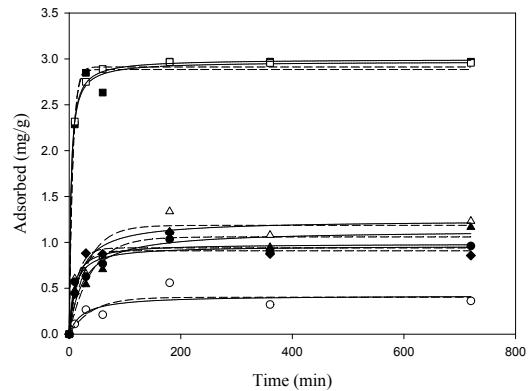
<순환골재(Recycled aggregate)>



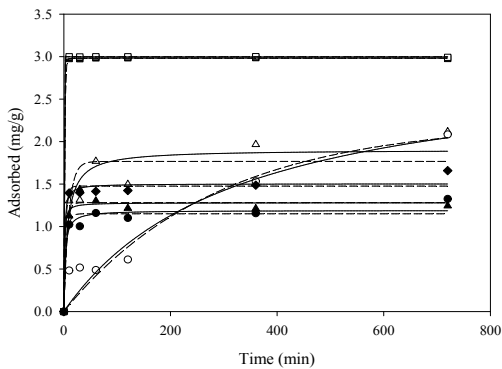
<제강슬래그(Steel slag)>



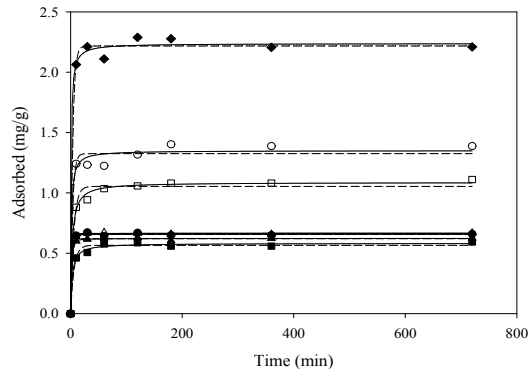
<벤토나이트(Bentonite)>



<활성탄(Activated carbon)>



<제올라이트(Zeolite)>



<모래(Sand)>

[그림 III-가-5] 반응성 피복소재들의 Kinetic 특성 비교

Symbols: (▲) Ni, (△) Zn, (■) Cu, (□) Pb, (●) Cd, (○) As, and (◆) Cd.

점선: Pseudo-first-order model(유사1모델), 실선: Pseudo-second-order model(유사2차모델)

- 순환골재인 경우, 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 경우  $Cu^{2+} \cong Pb^{2+} > As^{3+} \cong Zn^{2+} > Ni^{2+} \cong Cd^{2+} > Cr^{6+}$  순으로 평형 흡착량을 나타냈으며, 유사 1, 2차 모델의 반응속도는

- 
- $\text{Cr}^{6+} > \text{Cu}^{2+} \cong \text{Cd}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{As}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{6+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} > \text{As}^{3+}$ 의 순서로 반응속도가 빠르게 나타남. 순환골재의 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 상관계수(R<sup>2</sup>)는 비교적 잘 부합하고 있음을 알 수 있었음 (표 III-가-2).
- 제강슬래그인 경우, 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 경우  $\text{Zn}^{2+} \cong \text{Ni}^{2+} \cong \text{Cu}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Ni}^{2+} \cong \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+}$  순으로 각각 평형 흡착량을 나타냈으며, 유사 1, 2차 모델의 반응속도는  $\text{Cu}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Zn}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{6+} > \text{Pb}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$ 의 순서로 반응속도가 빠르게 나타남. 제강슬래그의 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 상관계수(R<sup>2</sup>)는 잘 부합하고 있음을 알 수 있었음 (표 III-가-2).
  - بنتونا이트인 경우, 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 경우 모두  $\text{Cu}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} \cong \text{Ni}^{2+} \cong \text{Cd}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{As}^{3+}$  순으로 평형 흡착량을 나타냈으나, 유사 1, 2차 모델의 반응속도는 각각  $\text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cr}^{6+} \cong \text{As}^{3+}$  및  $\text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cr}^{6+} \cong \text{As}^{3+}$ 의 순서로 반응속도가 빠르게 나타났음.
  - 활성탄인 경우, 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 경우  $\text{Cu}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} \cong \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{As}^{3+}$  순으로 평형 흡착량을 나타냈으며, 유사 1, 2차 모델의 반응속도는  $\text{Cu}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cr}^{6+} > \text{Cu}^{2+} \cong \text{Pb}^{2+} \cong \text{Cd}^{2+} \cong \text{As}^{3+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ 의 순서로 반응속도가 빠르게 나타남.
  - 제올라이트인 경우, 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 경우  $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Cd}^{2+}$  순으로 평형 흡착량을 나타냈으며, 유사 1, 2차 모델의 반응속도는  $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Ni}^{2+} \cong \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{As}^{3+}$ ,  $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{As}^{3+}$ 의 순서로 반응속도가 빠르게 나타남. 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 상관계수(R<sup>2</sup>)는 잘 부합하고 있음을 알 수 있었음 (표 III-가-2).
  - 모래인 경우, 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 경우  $\text{Cr}^{6+} > \text{As}^{3+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$  순으로 평형 흡착량을 나타냈으며, 유사 1, 2차 모델의 반응속도는  $\text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+} \cong \text{Zn}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Pb}^{2+}$ 의 순서로 반응속도가 빠르게 나타남. 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 상관계수(R<sup>2</sup>)는 잘 부합하고 있음을 알 수 있었음 (표 III-가-2).
-

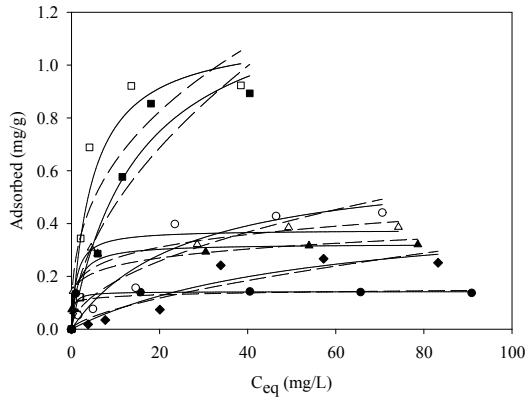
[표 III-가-2] 피복소재들의 동적흡착 모델 매개변수 값

		Pseudo-first-order model			Pseudo-second-order model		
		q <sub>e</sub> (mg/g)	K <sub>1</sub> (L/min)	R <sup>2</sup>	Q <sub>e</sub> (mg/g)	K <sub>2</sub> (g/mg/min)	R <sup>2</sup>
순환골재	Ni <sup>2+</sup>	0.448	0.021	0.943	0.490	0.060	0.977
	Zn <sup>2+</sup>	0.714	0.011	0.970	0.824	0.016	0.960
	Cu <sup>2+</sup>	1.931	0.039	0.956	2.056	0.031	0.982
	Pb <sup>2+</sup>	1.844	0.036	0.996	1.987	0.027	0.993
	Cd <sup>2+</sup>	0.425	0.038	0.829	0.468	0.111	0.897
	As <sup>3+</sup>	0.718	0.007	0.817	0.839	0.010	0.819
	Cr <sup>6+</sup>	0.367	0.098	0.884	0.392	0.374	0.929
제강슬래그	Ni <sup>2+</sup>	3.029	0.082	0.994	3.179	0.045	0.966
	Zn <sup>2+</sup>	3.003	0.159	0.999	3.073	0.131	0.994
	Cu <sup>2+</sup>	3.000	0.321	1.000	3.014	0.776	0.999
	Pb <sup>2+</sup>	3.000	0.384	1.000	3.007	1.479	1.000
	Cd <sup>2+</sup>	2.966	0.053	0.996	3.172	0.026	0.988
	As <sup>3+</sup>	0.334	0.133	0.987	0.346	0.800	0.989
	Cr <sup>6+</sup>	0.312	0.253	0.993	0.316	3.211	0.993
벤토나이트	Ni <sup>2+</sup>	1.756	0.168	0.997	1.799	0.243	0.994
	Zn <sup>2+</sup>	1.785	0.183	0.996	1.824	0.273	0.995
	Cu <sup>2+</sup>	2.802	0.223	0.993	2.860	0.224	0.997
	Pb <sup>2+</sup>	2.850	0.234	0.990	2.910	0.231	0.995
	Cd <sup>2+</sup>	1.776	0.360	0.996	1.784	1.748	0.996
	As <sup>3+</sup>	0.747	0.054	0.935	0.800	0.098	0.882
	Cr <sup>6+</sup>	0.905	0.047	0.951	0.961	0.077	0.894
활성탄	Ni <sup>2+</sup>	1.060	0.026	0.900	1.133	0.035	0.931
	Zn <sup>2+</sup>	1.186	0.031	0.882	1.242	0.046	0.916
	Cu <sup>2+</sup>	2.884	0.157	0.988	2.970	0.117	0.991
	Pb <sup>2+</sup>	2.912	0.156	0.996	2.997	0.117	0.999
	Cd <sup>2+</sup>	0.909	0.061	0.898	0.961	0.107	0.949
	As <sup>3+</sup>	0.402	0.025	0.757	0.422	0.100	0.737
	Cr <sup>6+</sup>	0.940	0.07	0.945	0.985	0.121	0.916
제올라이트	Ni <sup>2+</sup>	1.282	0.215	0.975	1.280	1.065	0.965
	Zn <sup>2+</sup>	1.766	0.109	0.864	1.904	0.076	0.917
	Cu <sup>2+</sup>	2.982	0.638	1.000	2.983	13.249	1.000
	Pb <sup>2+</sup>	2.997	3.924	1.000	2.997	60.667	1.000
	Cd <sup>2+</sup>	1.150	0.215	0.953	1.190	0.380	0.967
	As <sup>3+</sup>	2.229	0.004	0.909	2.971	0.001	0.916
	Cr <sup>6+</sup>	1.477	0.289	0.976	1.504	0.619	0.980
모래	Ni <sup>2+</sup>	0.621	0.349	0.999	0.623	4.926	0.998
	Zn <sup>2+</sup>	0.665	0.325	0.999	0.667	3.947	0.999
	Cu <sup>2+</sup>	0.565	0.164	0.984	0.582	0.615	0.992
	Pb <sup>2+</sup>	1.054	0.175	0.983	1.087	0.341	0.995
	Cd <sup>2+</sup>	0.658	0.414	0.998	0.658	15.440	0.998
	As <sup>3+</sup>	1.325	0.274	0.979	1.350	0.591	0.985
	Cr <sup>6+</sup>	2.217	0.267	0.995	2.238	0.538	0.996

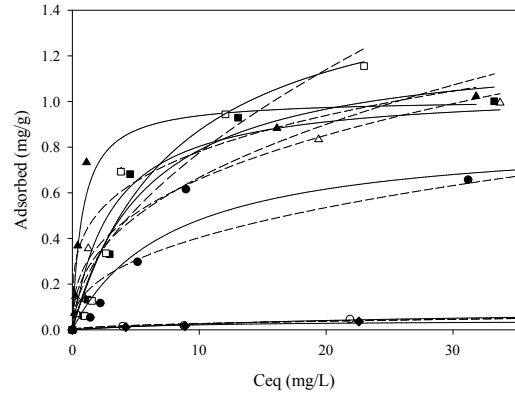
■ 피복소재들의 평형흡착 특성

- 피복소재의 중금속 흡착능을 비교하기 위하여 다양한 농도의 혼합 중금속용액과 피복소재를 50 mL 튜브(0.5g, 30 mL)에 투입한 후 25°C, 100rpm에서 정해진 농도로 평형이 되는 충분한 시간만큼 반응시켜 잔류 중금속 농도를 측정함 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)

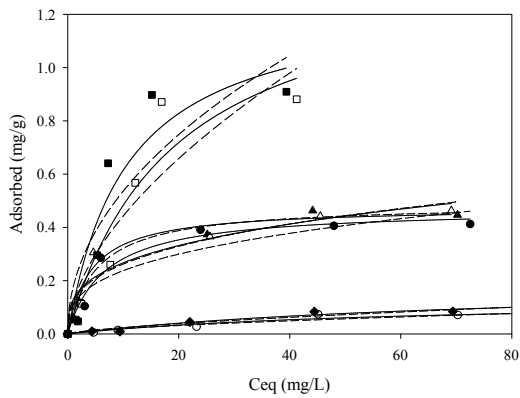




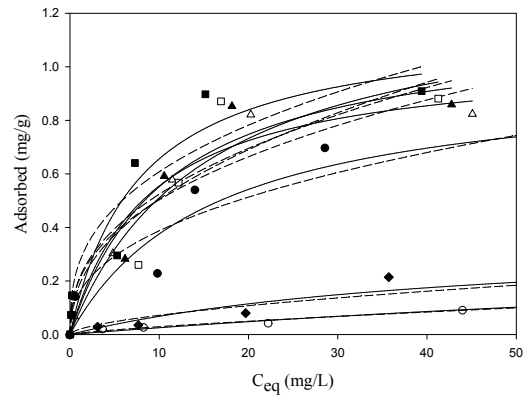
<순환골재(Recycled aggregate)>



<제강슬래그(Steel slag)>

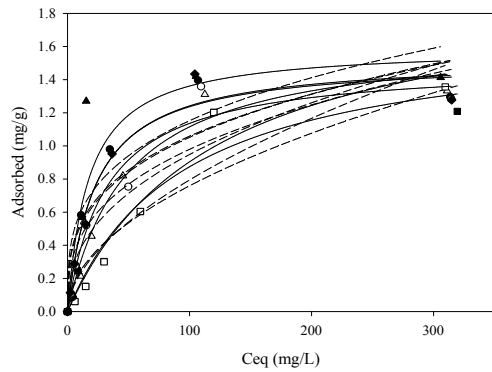


<벤토나이트(Bentonite)>

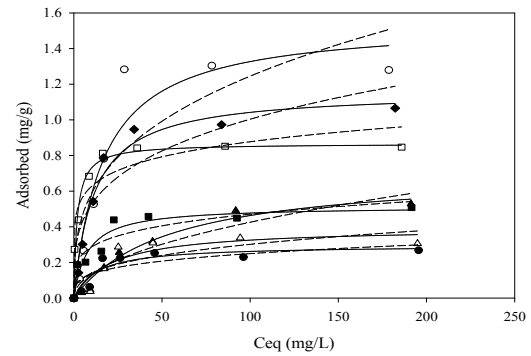


<활성탄(Activated carbon)>

2D Graph 5



<제올라이트(Zeolite)>



<모래(Sand)>

[그림 III-가-6] 피복소재들의 Freundlich model과 Langmuir model 비교

Symbols: (▲) Ni, (△) Zn, (■) Cu, (□) Pb, (●) Cd, (○) As, and (◆) Cr.

점선: Freundlich model, 실선: Langmuir model

- 순환골재인 경우, 표 III-가-3에서와 같이 Freundlich 모델에서 순환골재의 분배계수(K)는  $\text{Ni}^{2+}$  (0.161 L/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (0.167 L/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (0.138 L/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (0.267 L/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (0.102 L/g),  $\text{As}^{3+}$  (0.056 L/g),  $\text{Cr}^{6+}$  (0.017 L/g)로  $\text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} \cong \text{Ni}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+}$  순이며, Langmuir 모델의 적용에서는 최대흡착량(Qm)이  $\text{Cu}^{2+}$  (15.381 mg/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (4.764 mg/g),  $\text{Ni}^{2+}$  (1.379 mg/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (1.129 L/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (0.415 m/g),  $\text{As}^{3+}$  (25.685 m/g),  $\text{Cr}^{6+}$  (54.740 m/g)로  $\text{Cr}^{6+} > \text{As}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} \cong \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$  순으로 높음.

- 
- 제강슬래그인 경우, 표 III-가-3에서와 같이 Freundlich 모델에서 순환골재의 분배계수(K)는  $\text{Ni}^{2+}$  (0.423 L/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (0.281 L/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (0.247 L/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (0.216 L/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (0.158 L/g),  $\text{As}^{3+}$  (0.009 L/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (0.009 L/g)로  $\text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+}$ 순이며, Langmuir 모델의 적용에서는 최대흡착량(Qm)이  $\text{Ni}^{2+}$  (0.791 m/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (3.099 m/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (5.928 m/g),  $\text{Pb}^{2+}$ (8.299 m/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (7.803 m/g),  $\text{As}^{3+}$  (28.271 m/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (8.899 m/g)로  $\text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ 순으로 높음.
  - 벤토나이트인 경우, 표 III-가-3에서와 같이 Freundlich 모델에서 순환골재의 분배계수(K)는  $\text{Ni}^{2+}$  (0.123 L/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (0.130 L/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (0.1767 L/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (0.118 L/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (0.110 L/g),  $\text{As}^{3+}$  (0.050 L/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (0.005 L/g)로  $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+}$ 순이며, Langmuir 모델의 적용에서는 최대흡착량(Qm)이  $\text{Ni}^{2+}$  (5.224 m/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (4.185 m/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (10.643 m/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (19.076 m/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (6.700 m/g),  $\text{As}^{3+}$  (62.064 m/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (76.973 m/g)로  $\text{Cr}^{6+} > \text{As}^{3+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ 순으로 높음.
  - 활성탄인 경우, 표 III-가-3에서와 같이 Freundlich 모델에서 순환골재의 분배계수(K)는  $\text{Ni}^{2+}$  (0.205 L/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (0.200 L/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (0.263 L/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (0.180 L/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (0.152 L/g),  $\text{As}^{3+}$  (0.005 L/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (0.019 L/g)로  $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{As}^{3+}$ 순이며, Langmuir 모델의 적용에서는 최대흡착량(Qm)이  $\text{Ni}^{2+}$  (10.959 m/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (8.795 m/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (7.743 m/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (15.337 m/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (15.911 m/g),  $\text{As}^{3+}$  (154.256 m/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (44.071 m/g)로  $\text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$ 순으로 높음.
  - 제올라이트인 경우, 표 III-가-3에서와 같이 Freundlich 모델에서 순환골재의 분배계수(K)는  $\text{Ni}^{2+}$  (0.299 L/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (0.143 L/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (0.074 L/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (0.062 L/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (0.240 L/g),  $\text{As}^{3+}$  (0.196 L/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (0.254 L/g)로  $\text{Ni}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Cd}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$ 순이며, Langmuir 모델의 적용에서는 최대흡착량(Qm)이  $\text{Ni}^{2+}$  (17.429 m/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (48.389 m/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (95.051m/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (120.617 m/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (23.388 m/g),  $\text{As}^{3+}$  (31.856 m/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (22.765 m/g)로  $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Ni}^{2+}$ 순으로 높음.
  - 모래인 경우, 표 III-가-3에서와 같이 Freundlich 모델에서 순환골재의 분배계수(K)는  $\text{Ni}^{2+}$  (0.043 L/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (0.065 L/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (0.174 L/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (0.447 L/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (0.073 L/g),  $\text{As}^{3+}$  (0.275 L/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (0.274 L/g)로  $\text{Pb}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ 순이며, Langmuir 모델의 적용에서는 최대흡착량(Qm)이  $\text{Ni}^{2+}$  (53.304 m/g),  $\text{Zn}^{2+}$  (21.489 m/g),  $\text{Cu}^{2+}$  (7.822 m/g),  $\text{Pb}^{2+}$  (1.890 m/g),  $\text{Cd}^{2+}$  (13.039 m/g),  $\text{As}^{3+}$  (16.731 m/g),  $\text{Cr}^{6+}$ (11.339 m/g)로  $\text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{As}^{3+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cr}^{6+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$ 순으로 높음.
  - 모든 피복소재에서 흡착 실험 결과는 다층흡착을 가정한 Freundlich 모델보다 단층흡착을 가정한 Langmuir 모델이 더 잘 부합되는 것으로 나타남.
  - 평형흡착 실험결과 피복소재에 의한 중금속 흡착경향은 다층흡착이 아닌 단층흡착의 경향을 나타내고 있으며, 피복소재와 중금속간의 흡착강도가 높은 것으로 나타남
-

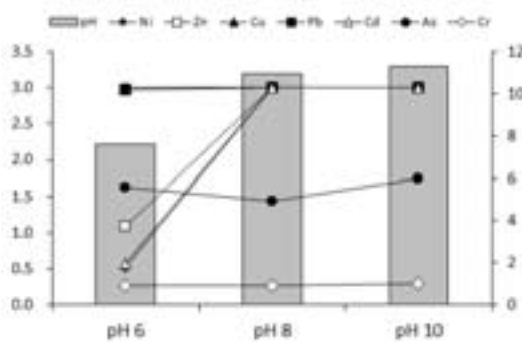
[표 III-가-3] 피복소재들의 평형흡착 모델 값

		Freundlich model			Langmuir model		
		K (L/g)	1/n	R <sup>2</sup>	Q <sub>m</sub> (mg/g)	K (L/mg)	R <sup>2</sup>
순환골재	Ni <sup>2+</sup>	0.161	0.171	0.937	1.379	0.323	0.948
	Zn <sup>2+</sup>	0.167	0.208	0.913	1.130	0.376	0.955
	Cu <sup>2+</sup>	0.137	0.538	0.907	15.381	1.324	0.960
	Pb <sup>2+</sup>	0.267	0.376	0.802	4.764	1.130	0.910
	Cd <sup>2+</sup>	0.103	0.079	0.845	0.415	0.142	0.871
	As <sup>3+</sup>	0.056	0.513	0.984	25.685	0.643	0.92
제강슬래그	Ni <sup>2+</sup>	0.423	0.266	0.856	0.791	1.012	0.952
	Zn <sup>2+</sup>	0.281	0.370	0.896	3.099	1.052	0.956
	Cu <sup>2+</sup>	0.247	0.432	0.867	5.928	1.253	0.953
	Pb <sup>2+</sup>	0.216	0.556	0.909	8.299	1.598	0.948
	Cd <sup>2+</sup>	0.158	0.407	0.854	7.803	0.857	0.932
	As <sup>3+</sup>	0.009	0.480	0.976	28.271	0.099	0.989
벤토나이트	Ni <sup>2+</sup>	0.123	0.327	0.925	5.224	0.489	0.978
	Zn <sup>2+</sup>	0.130	0.314	0.921	4.185	0.475	0.965
	Cu <sup>2+</sup>	0.176	0.482	0.826	10.643	1.268	0.912
	Pb <sup>2+</sup>	0.118	0.573	0.851	19.076	1.404	0.908
	Cd <sup>2+</sup>	0.110	0.335	0.870	6.700	0.471	0.952
	As <sup>3+</sup>	0.050	0.642	0.913	62.064	0.136	0.941
활성탄	Ni <sup>2+</sup>	0.205	0.408	0.913	10.959	1.157	0.934
	Zn <sup>2+</sup>	0.200	0.400	0.935	8.795	1.043	0.965
	Cu <sup>2+</sup>	0.263	0.364	0.899	7.743	1.164	0.919
	Pb <sup>2+</sup>	0.180	0.449	0.886	15.337	1.294	0.899
	Cd <sup>2+</sup>	0.152	0.406	0.910	15.911	0.973	0.908
	As <sup>3+</sup>	0.005	0.762	0.981	154.256	0.413	0.981
제올라이트	Ni <sup>2+</sup>	0.299	0.293	0.705	17.429	1.599	0.817
	Zn <sup>2+</sup>	0.143	0.411	0.883	48.389	1.655	0.974
	Cu <sup>2+</sup>	0.074	0.504	0.871	95.051	1.705	0.940
	Pb <sup>2+</sup>	0.062	0.554	0.913	120.617	1.994	0.963
	Cd <sup>2+</sup>	0.240	0.320	0.827	23.388	1.532	0.954
	As <sup>3+</sup>	0.196	0.350	0.891	31.856	1.498	0.959
모래	Ni <sup>2+</sup>	0.254	0.310	0.852	22.765	1.518	0.969
	Ni <sup>2+</sup>	0.043	0.496	0.922	53.301	0.710	0.977
	Zn <sup>2+</sup>	0.065	0.334	0.736	21.489	0.395	0.873
	Cu <sup>2+</sup>	0.174	0.216	0.902	7.822	0.514	0.911
	Pb <sup>2+</sup>	0.447	0.146	0.909	1.890	0.867	0.974
	Cd <sup>2+</sup>	0.073	0.267	0.753	13.039	0.296	0.876
	As <sup>3+</sup>	0.275	0.328	0.795	16.731	1.549	0.926
	Cr <sup>6+</sup>	0.274	0.282	0.869	11.339	1.160	0.977

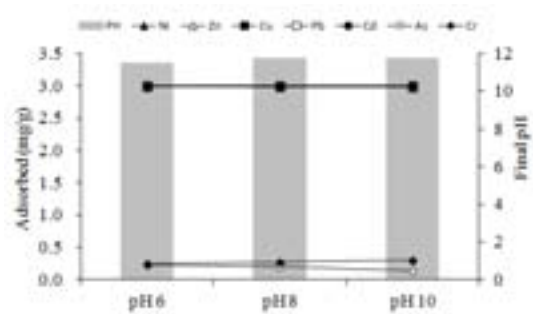
■ pH 변화에 따른 흡착 특성 변화

- pH에 의한 중금속 흡착 특성을 살펴보기 위해서 50 mg/L의 혼합 중금속 용액을 1 M HNO<sub>3</sub>와 1 M NaOH로 pH를 6, 8, 10로 조절하였고, 25℃, 100rpm 조건에서 24시간 교반 후 시료 채취하여 잔류 중금속 농도를 ICP-MS (Agilent 7500 Series, USA)로 측정함 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)
- 순환골재인 경우, pH 6에서 Cu<sup>2+</sup>와 Pb<sup>2+</sup>의 흡착량은 각각 2.997 mg/g, 2.978 mg/g으로 흡착량이 높게 나타난 반면, Ni<sup>2+</sup>과 Cr<sup>6+</sup>은 각각 0.516 mg/g, 0.271 mg/g으로 가장 낮은 흡착량을 보였음. 한편, pH가 8, 10으로 증가함에 따라 As<sup>3+</sup>와 Cr<sup>6+</sup>을 제외한 모든 중금속들은 흡착량이 2.9 mg/g의 흡착 특성을 보였음.

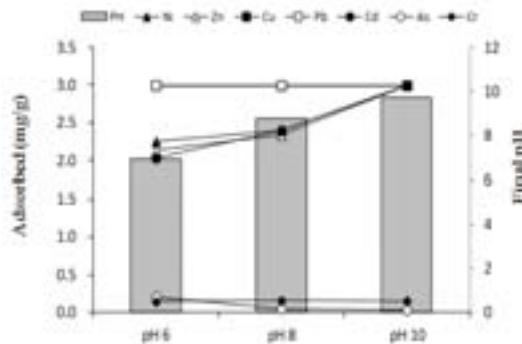
- 제강슬래그인 경우, pH 6에서부터 10 사이에서  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Pb}^{2+}$ 의,  $\text{Cd}^{2+}$ 의 흡착량은 대부분 2.9 mg/g 이상의 흡착량을 보임. 한편,  $\text{As}^{3+}$ 와  $\text{Cr}^{6+}$ 은 pH가 8, 10으로 증가함에 따라 별차이를 보이지 않음.
- 벤토나이트인 경우, pH 6에서  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Pb}^{2+}$ 의 흡착량은 각각 2.99 mg/g 이상의 흡착량을 나타냈지만  $\text{As}^{3+}$ 과  $\text{Cr}^{6+}$ 은 각각 0.206 mg/g, 0.143 mg/g으로 가장 낮은 흡착량을 보였음. 한편, pH가 8, 10으로 증가함에 따라  $\text{As}^{3+}$ 와  $\text{Cr}^{6+}$ 을 제외한 모든 중금속들은 흡착량이 2.3 mg/g 이상의 흡착 특성을 보였음.  $\text{As}^{3+}$ 과  $\text{Cr}^{6+}$ 은 감소하는 경향을 보임.
  - 활성탄인 경우,  $\text{As}^{3+}$ 와  $\text{Cr}^{6+}$ 을 제외한 pH 6에서 다른 중금속들은 높은 흡착량을 보이고 있음. pH가 8, 10으로 증가함에 따라  $\text{As}^{3+}$ 와  $\text{Cr}^{6+}$ 을 제외한 모든 중금속들은 흡착량이 2.8 mg/g 이상의 흡착 특성을 보였음.
- 제올라이트인 경우, pH 6에서  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Pb}^{2+}$ 의 흡착량은 각각 2.77 mg/g, 2.99 mg/g으로 흡착량이 높게 나타난 반면,  $\text{Ni}^{2+}$ 과  $\text{As}^{3+}$ 은 각각 0.975 mg/g, 0.440 mg/g으로 가장 낮은 흡착량을 보였음. 한편, pH가 8, 10으로 증가함에 따라 모든 중금속들은 흡착량이 증가하는 경향을 보임.
- 모래인 경우, pH 6에서  $\text{Cr}^{6+}$ 을 제외한 다른 중금속 들은 0.8 mg/g 이하의 흡착량을 보이고 있음. 하지만 pH가 증가할수록 흡착량도 증가하는 경향을 보임.
- 분석된 대부분의 중금속들은 수용액 내 pH 상승으로 인한 중금속의 활동도 감소 및 다양한 수화물에 의한 침전물의 형성 유도에 의한 것으로 사료됨.
- 이와 반대로 음이온 특징을 보이는 As, Cr은 비교적 낮은 흡착량을 나타냄



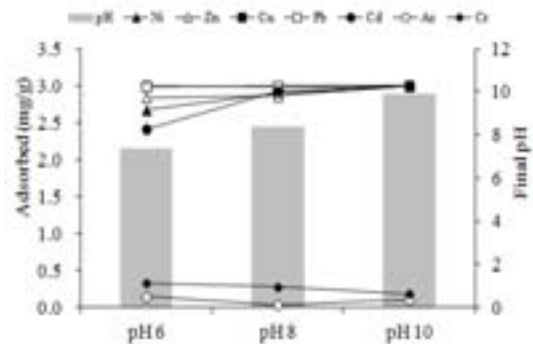
순환골재(Recycled aggregate)



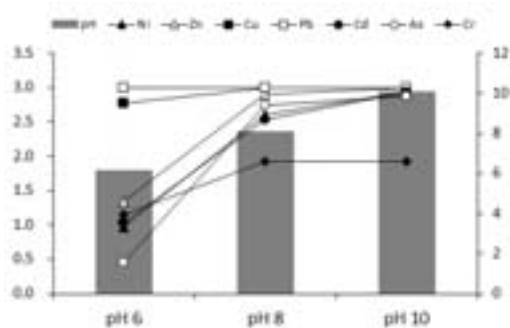
제강슬래그(Steel Slag)



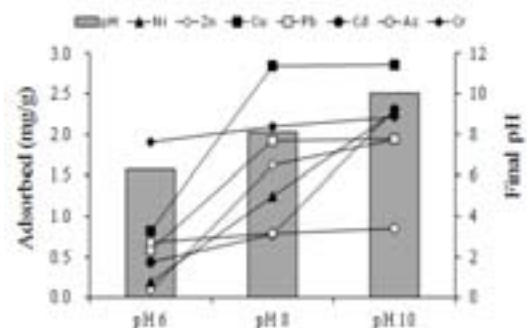
벤토나이트(Bentonite)



활성탄(Activated Carbon)



제올라이트(Zeolite)

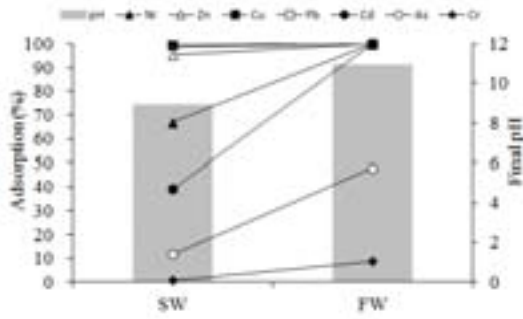


모래(Sand)

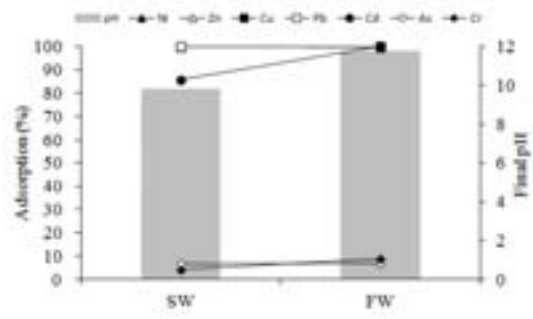
[그림 III-가-7] 피복소재들의 pH 변화에 따른 흡착 특성 비교

### ■ 해수 및 담수에서의 흡착 특성

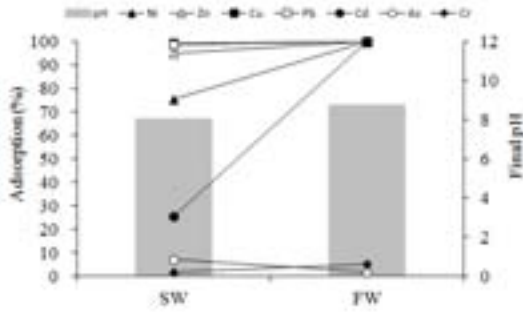
- 해수와 담수에서 피복소재들에 의한 중금속 흡착 특성을 검토하기 위해 여지(Advantes No. 6, Japan)를 이용해 여과한 해수와 담수(증류수) 사용한 흡착실험을 수행하였음. 50 mg/L의 혼합 중금속 용액을 1 M HNO<sup>3</sup>와 1 M NaOH로 pH를 조절하였고, 25°C, 100rpm 조건에서 24시간 교반 후 시료 채취하여 잔류 중금속 분석은 ICP-MS (Agilent 7500 Series, USA)로 수행함. (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)
- 순환골재인 경우, 모든 중금속에서 해수보다 담수에서 높은 흡착 제거율을 보였음. 특히 Ni<sup>2+</sup>과 Cd<sup>2+</sup>에서 큰 차이를 보임.
  - 제강슬래그인 경우, Ni<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> 중금속은 해수와 담수에서 80% 이상의 높은 제거율을 나타내고 있지만 As<sup>3+</sup>와 Cr<sup>6+</sup> 중금속은 10% 미만의 매우 낮은 제거율을 나타냄.
- 벤토나이트인 경우, 벤토나이트는 담수와 해수에서의 Pb<sup>2+</sup> 제거율은 각각 99%와 98%로, Cu<sup>2+</sup>의 경우는 99%, Zn<sup>2+</sup>은 99%와 95%, Ni<sup>2+</sup>은 99%와 75%로, Cd<sup>2+</sup>은 각각 99%와 25%로 나타내어 해수에서 Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>의 제거율은 담수와 비교하여 감소하였음. 또한 As<sup>3+</sup>와 Cr<sup>6+</sup> 중금속은 10% 미만의 매우 낮은 제거율을 나타냄.
- 활성탄인 경우, Ni<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> 중금속은 해수와 담수에서 90% 이상의 높은 제거율을 나타내고 있지만 Cd<sup>2+</sup>, As<sup>3+</sup>와 Cr<sup>6+</sup> 중금속은 37~58% 미만의 낮은 제거율을 나타냄.
- 제올라이트인 경우, 모든 중금속에서 해수보다 담수에서 높은 흡착 제거율을 보였음. 특히 Cu<sup>2+</sup>과 Pb<sup>2+</sup>이 높은 제거율을 보임.
- 모래인 경우, 모든 중금속에서 담수보다 해수에서 높은 흡착을 특성을 보였음
- 이러한 결과는 수용액상의 pH의 변화 영향과 더불어 해수 내 존재하는 다양한 미량성분 (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 등) 원소들에 의한 이온교환, 산화환원, 용해 등의 영향을 주어 흡착제의 구성 물질과 반응 및 변환되어 중금속 제거에 영향을 미치는 것으로 판단됨.
- 이러한 결과들로부터 담수뿐만 아니라 해수에서도 피복소재들의 유효한 흡착능을 나타내고 있는 것으로 판단됨



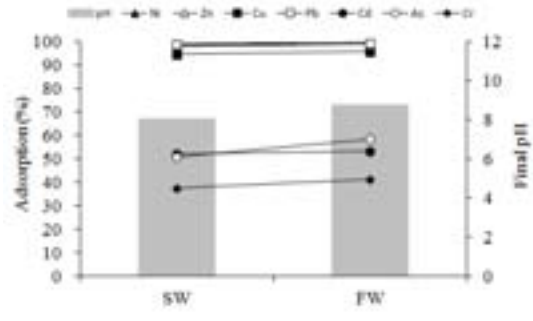
<순환골재(Recycled aggregate)>



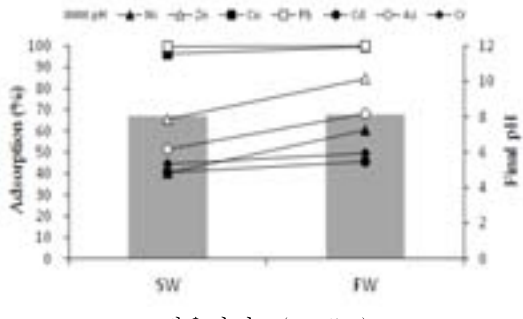
<제강슬래그(Steel Slag)>



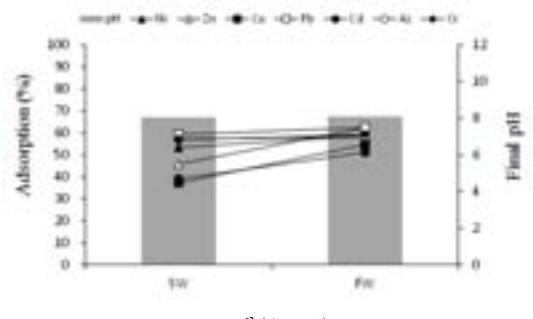
<벤토나이트(Bentonite)>



<활성탄(Activated Carbon)>



<제올라이트(Zeolite)>



<모래(Sand)>

[그림 III-가-8] 해수와 담수에서의 혼합중금속 제거 특성 비교(SW:해수, FW:담수)

■ 해수환경에 있어서 피복소재들의 혼합 중금속 흡착성능 비교

- 수용액(해수)에 있어서 각 피복소재의 혼합 중금속 흡착을 비교하였음
- 순환골재, 제강슬래그, 벤토나이트는 양이온(Ni, Zn, Cu, Pb, Cd)에서 좋은 흡착 특성을 보였지만 음이온(As, Cr)등에서는 낮은 흡착 특성을 보였음
- 반면, 7종의 중금속에서 전체적으로 좋은 중금속 흡착 특성을 보인 피복소재로는 활성탄, 제올라이트, 모래 등이 있었음.

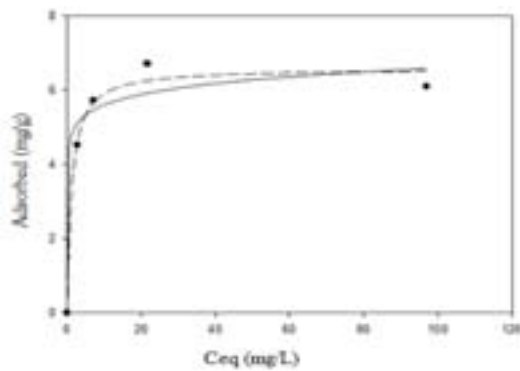
[표 III-가-4] 피복소재들의 혼합 중금속 흡착성능 비교

mg/g	Ni <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	As <sup>3+</sup>	Cr <sup>6+</sup>
순환골재	2.003	2.862	2.985	2.963	1.178	0.352	0.022
제강슬래그	2.994	3.000	2.996	3.000	2.568	0.204	0.123
벤토나이트	2.263	2.854	2.981	2.961	0.767	0.213	0.053
제올라이트	1.207	1.968	2.891	2.991	1.218	1.544	1.336
활성탄	2.972	2.940	2.838	2.966	1.562	1.527	1.125
모래	1.601	1.373	1.116	1.779	1.174	1.710	1.706

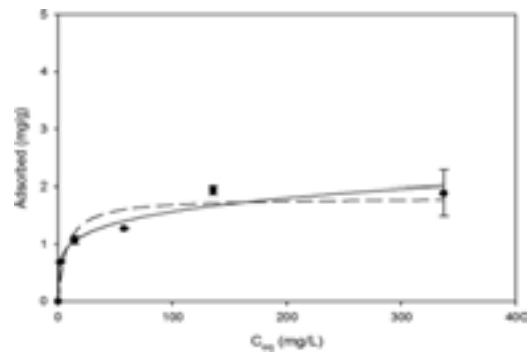
■ 음이온 Cr 흡착 향상을 위한 피복소재 (적니, 활성탄) 표면 개질

- 흡착평형특성

- 피복소재의 중금속 흡착능을 비교하기 위해 다양한 농도의 Cr 중금속 용액과 표면개질한 적니, 활성탄을 가지고 실험에 이용하였음
- 표면 개질한 적니와 활성탄의 흡착 평형 특성을 비교하였음
- 표면 개질한 활성탄은 Langmuir model에 더 적합한 특성이 있는 반면 표면 개질한 적니는 Freundlich model에 더 적합한 특성을 보였음
- 표면 개질한 활성탄이 적니보다 높은 흡착량 특성을 보이고 있음. 이런 이유로는 활성탄의 큰 비표면적 특성과 표면 관능기들의 영향이 큰 것으로 판단됨.



<활성탄 표면개질>



<적니 표면개질>

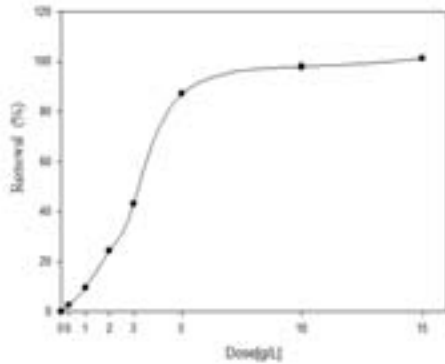
[그림 III-가-9] 피복소재들의 Freundlich model과 Langmuir model 비교

Symbols: (●) Cr, 점선: Langmuir model, 실선: Freundlich model

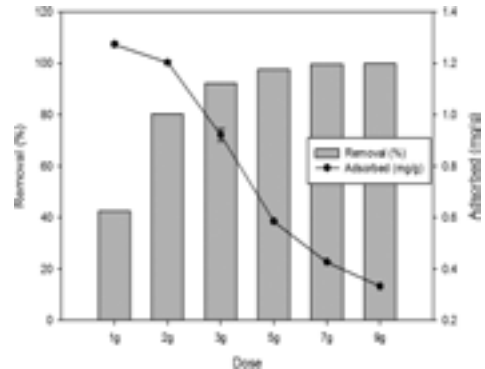
[표 III-가-5] 표면개질한 적니와 활성탄의 평형흡착 모델 값

		Freundlich model			Langmuir model		
		K (L/g)	1/n	R <sup>2</sup>	Q <sub>m</sub> (mg/g)	K (L/mg)	R <sup>2</sup>
Cr <sup>6+</sup>	활성탄	4.758	0.071	0.956	6.590	1.156	0.987
	적니	0.620	0.202	0.962	1.810	7.244	0.898

- 흡착제량 변화에 따른 흡착 특성
- 흡착제 주입량에 의한 Cr6+의 흡착 특성 결과를 나타냄
- 개질한 활성탄과 적니 모두 흡착제 주입량이 증가함에 따라 제거율이 높아지고 있음
- 표면개질한 활성탄인 경우 약 10g/L인 경우부터 수용액 중 크롬을 100% 제거하는 경향을 보였고, 적니인 경우는 5g/L인 경우에 약 100%의 제거 경향을 나타냄



<활성탄 표면개질>



<적니 표면개질>

[그림 III-가-10] 흡착제 양에 따른 Cr6+의 흡착 특성 변화

⑤ 중금속 안정화 및 고정화 성능 평가

㉞ 선정된 반응성 피복소재들의 중금속 안정화 및 고정화 성능 평가

■ 오염퇴적물의 기본 특성 및 중금속 존재형태 분석 방법

- 오염퇴적물의 기본 특성

- 실험실 규모의 반응성 피복소재의 현장적용성 평가를 위하여 피복 유력 후보지 K항과 I항 두 곳의 오염퇴적물을 채취 안정화 실험에 이용 하였음
- K항과 I항의 오염퇴적물은 미립질 약산성의 특징을 나타내고 있고, M항은 중성의 미립자 퇴적물 특징을 나타내고 있음
- K항에서는 Ni, Cu, Zn, As, Cd는 기준1을 초과하고 있지만 I항에서는 Cu와 As가 기준1을 초과하고 있음. 게다가 M항에서는 Cu, Zn, As, Cd이 기준 1을 초과하고 있는 것을 알 수 있음.
- 이러한 값으로부터 K항의 퇴적물은 중금속과 유기물 등의 복합적인 오염현상을 나타내고 있는 것으로 평가



[표 III-가-6] K항, M항 및 I항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	Values (K항)	Values (I항)	Values (M항)	기준(기준1-기준2)
pH	8.3	8.04	7.3	-
silt-clay (%)	90	92.5	78	-
water contents (%)	55	52	59	-
Cr (mg/kg)	65.7	33.2	17.3	80-370
Ni (mg/kg)	37.9	15.5	14.2	23-52
Cu (mg/kg)	67.3	85.2	37.3	24-108
Zn (mg/kg)	203.7	149.8	244.6	200-410
As (mg/kg)	30.8	37.8	22.0	9-41.6
Cd (mg/kg)	0.94	0.7	0.91	0.68-4.21
Pb (mg/kg)	42.4	50.4	33.2	50-220

- 중금속 존재형태 분석 방법

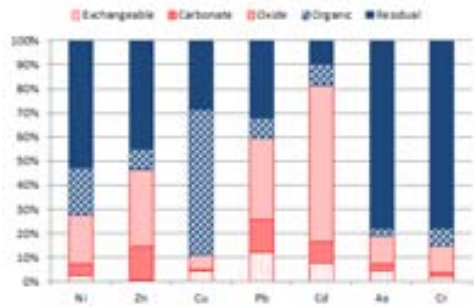
- 습시료는 풍건후 체를 이용하여 이물질을 분리하여 실험 및 분석에 사용하였음
- 실험에 사용된 오염퇴적물의 연속추출방법은 1979년 A. Tessier에 의해서 Anal. Chem.에 발표된 “Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals”에 근거하여 진행함
- 연속추출단계는 1단계(Exchangeable), 2단계(Carbonate), 3단계(Oxide), 4단계(Organic), 5단계(Residual)로 나누어 평가를 수행하였으며, 1단계에서 5단계로 갈수록 안정화된 상태를 나타내며, 1-3단계는 외부환경변화 및 환경외력에 의해 수계로 용출되기 쉬운 형태로 분석함

■ 대조군(오염퇴적물)에 함유된 중금속의 존재형태별 농도와 비율

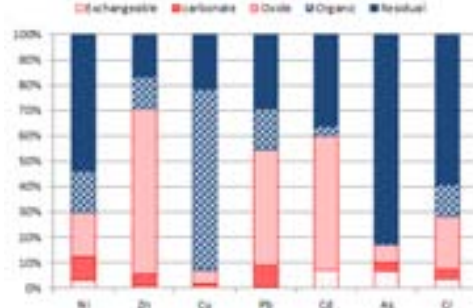
- 기존 연구결과를 보면, 자연환경에서 용출되기 쉬운 형태는 Exchangeable, Carbonate, Oxide 형태로 알려지고 있음
- 이러한 사실로 볼 때 K항 해양퇴적물 내에서 용출되기 쉬운 중금속은 Pb, Cd > Zn, Ni > As, Cr > Cu 일 가능성이 높음
- I항 해양퇴적물 내에서 용출되기 쉬운 중금속은 Zn, Pb, Cd > Ni, Cr > As, Cu 일 가능성이 높음
- M항 해양퇴적물 내에서 용출되기 쉬운 중금속은 Zn, Cd, Cr > Ni, Pb > As, Cu 일 가능성이 높음

[표 III-가-7] 대조군(오염퇴적물)에 함유된 중금속의 존재형태별 농도

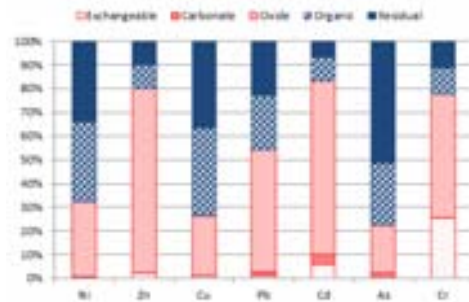
		Exchangeable	Carbonate	Oxide	Organic	Residual	Total
K 항	Ni	0.99	1.71	7.80	7.41	20.03	37.9
	Zn	1.01	28.51	64.86	17.23	92.14	203.7
	Cu	3.01	0.20	4.05	40.75	19.28	67.3
	Pb	5.18	5.74	14.32	3.59	13.55	42.4
	Cd	0.07	0.08	0.61	0.08	0.09	0.9
	As	1.39	0.81	3.58	0.98	24.02	30.8
	Cr	1.49	0.88	7.41	4.71	51.20	65.7
I 항	Ni	0.50	1.43	2.65	2.61	8.34	15.5
	Zn	1.54	6.63	97.86	18.59	25.17	149.8
	Cu	0.83	0.65	4.49	60.67	18.60	85.2
	Pb	0.32	4.21	22.9	8.09	14.86	50.4
	Cd	0.05	0.001	0.39	0.03	0.27	0.7
	As	2.56	1.29	2.64	0.19	31.09	37.8
	Cr	1.17	1.31	6.93	4.20	19.59	33.2
M 항	Ni	0.04	0.04	4.52	4.81	4.81	14.22
	Zn	4.66	0.64	190.46	24.54	24.26	244.56
	Cu	0.27	0.04	9.47	13.94	13.54	37.26
	Pb	0.36	0.45	17.24	7.53	7.59	33.15
	Cd	0.05	0.04	0.67	0.09	0.06	0.91
	As	0.04	0.40	4.49	5.85	11.25	22.03
	Cr	4.38	0.04	9.01	1.94	1.94	17.32



<K항>



<I항>



<M항>

[그림 III-가-11] 대조군(오염퇴적물)에 함유된 중금속의 존재형태별 비율

■ 각 피복소재에 의한 해양오염퇴적물 내 중금속 안정화 평가

- 순환골재

- 전체적으로 organic과 residual 형태가 늘어난 경향을 보여 퇴적물 내 중금속이 안정화 및 고정화 향상을 나타냄
- 특히 Pb과 Cd이 크게 안정화가 향상되었음을 알 수 있음. 한편 Zn과 Cu는 낮은 안정화 경향을 나타냄.

- 제강슬래그

- 전체적으로 organic과 residual 형태가 늘어난 경향을 보여 퇴적물 내 중금속이 안정화 및 고정화 향상을 나타냄
- 특히 Pb과 Cd이 크게 안정화가 향상되었음을 알 수 있음. 한편 As과 Cr는 낮은 안정화 경향을 나타냄.

- 활성탄

- Ni, Pb, Cd, As 중금속은 organic과 residual 형태가 늘어난 경향을 보여 퇴적물 내 중금속이 안정화 및 고정화 향상을 나타냄
- 하지만 Zn, Cr는 불안정화가 일어나고 있음을 알 수 있음.

- 벤토나이트

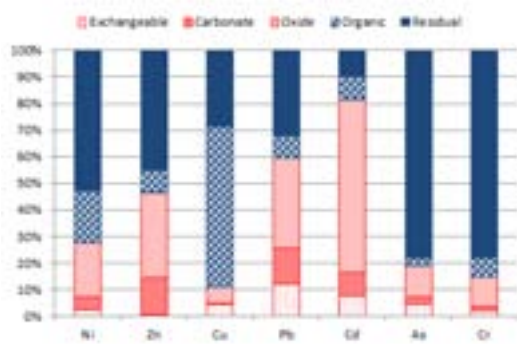
- 전체적으로 organic과 residual 형태가 늘어난 경향을 보이거나 Ni, Cd은 거의 변화가 없음
- 특히 Pb과 Zn이 크게 안정화가 향상되었음을 알 수 있음.

- 제올라이트

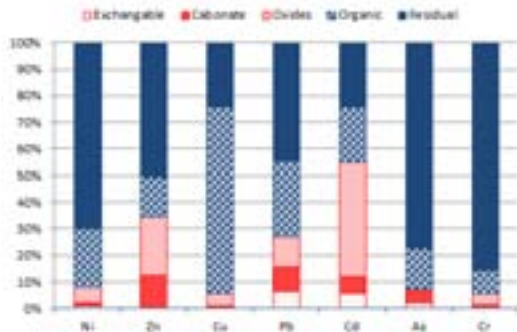
- Zn, Cu, Pb, Cd은 organic과 residual 형태가 늘어난 안정화 경향을 나타내고 있지만, Cr은 별차이를 나타내고 있지 않음
- 한편 Ni과 As는 오히려 불안정한 부분(Exchangeable, Carbonate, Oxide)이 늘어난 결과를 나타냄.

- 모래

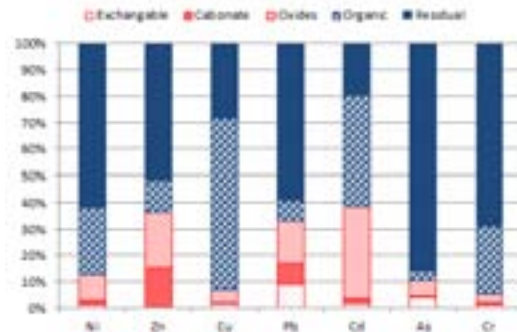
- Ni, Cd, As 은 organic과 residual 형태가 늘어난 안정화 경향을 나타내고 있음
- 한편 Cu는 오히려 불안정한 부분(Exchangeable, Carbonate, Oxide)이 늘어난 결과를 나타냄.



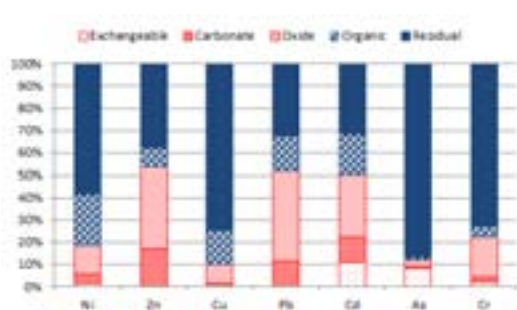
<미처리 오염퇴적물(대조군)>



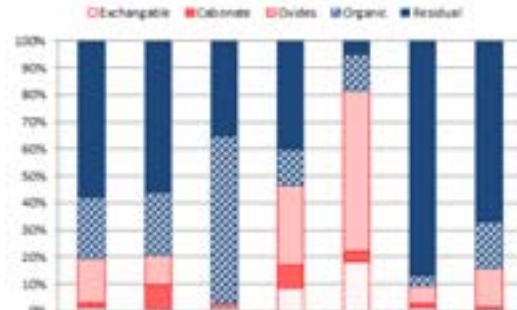
<순환골재 첨가 반응 후 퇴적물>



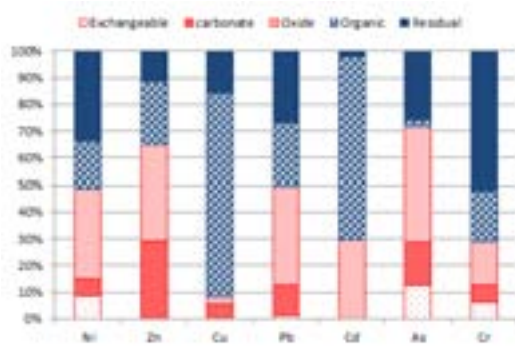
<재강슬래그 첨가 반응 후 퇴적물>



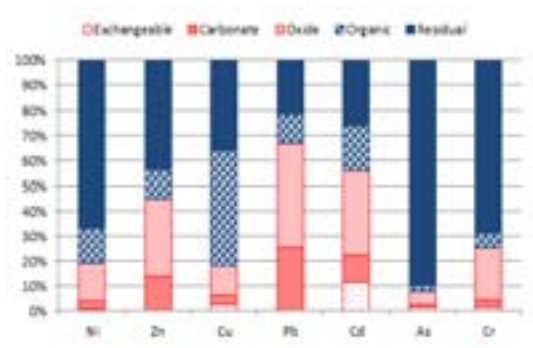
<활성탄 첨가 반응 후 퇴적물>



<벤토나이트 첨가 반응 후 퇴적물>



<제올라이트 첨가 반응 후 퇴적물>



<모래 첨가 반응 후 퇴적물>

[그림 III-가-12] 피복재 첨가에 의한 오염퇴적물 내 중금속 안정화 변화

■ 피복소재별 오염퇴적물 내 중금속 안정화 성능 비교

- 대조군(오염퇴적물)과 피복소재별 안정화 실험 결과를 바탕으로 중금속 안정화 성능을 종합적으로 비교 평가함
- 대조군에 있어서 이온교환(Exchangeable), 탄산염(Carbonate), 수화물(Oxide) 형태는 외부 환경 변화 및 환경외력에 의해 용출되기 쉬운 중금속 존재형태가 피복소재에 의해 얼마나 감소되었는가로 안정화 성능을 평가함
- 중금속 안정화 성능이 대체적으로 낮은 결과를 보이는 이유는 실험에 이용된 오염퇴적물 내 오염물질이 장시간에 걸쳐 안정화되어 있는 상태이므로 피복소재에 의한 추가적인 안정화의 속도가 느리게 나타난 것으로 판단됨.

[표 III-가-8] 피복소재별 중금속의 안정화 성능 비교

	Ni <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>	As <sup>3+</sup>	Cr <sup>6+</sup>
순환골재	○	×	△	△	×	×	△
제강슬래그	×	×	×	×	△	×	×
벤토나이트	×	△	△	×	×	×	×
제올라이트	×	×	×	×	×	×	×
활성탄	×	×	×	×	×	×	×
모래	△	×	×	×	○	△	×

◎: 매우우수(90-100%) ○: 우수(70-90%) △: 보통(50-70%) ×: 미흡(50% 미만)

⑥ 유기오염물질 정화율 위한 반응성 피복소재 성능 평가

㉞ 유기물질(PAH, PCB) 고정화 성능 평가

- PAH(나프탈렌, 피렌)와 PCB(2,4-디클로로비페닐)의 고정화 성능 결과를 종합해서 평가함.

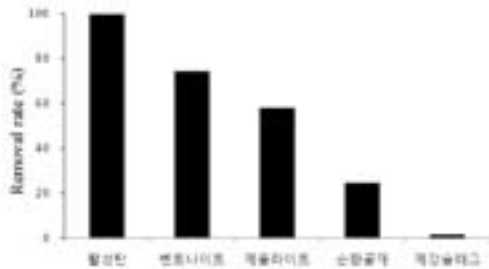
■ PAH(나프탈렌) 고정화 특성

- 유기오염물질(PAH) 수용액에 반응성 피복소재들을 넣고 24시간 교반후, 잔류 유기오염물질을 측정 한 후 유기오염물질의 흡착제거율을 계산하였음 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)
- 유기오염물질의 흡착 제거율은 활성탄 > 벤토나이트 > 제올라이트 > 순환골재 > 제강슬래그 순으로 제거율이 높았음

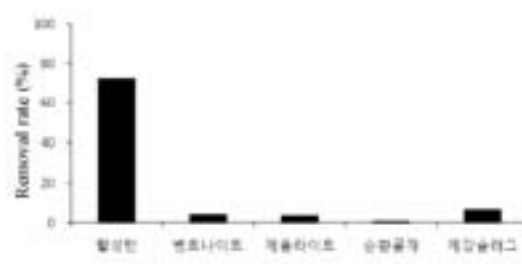
■ PCB(2,4-디클로로비페닐) 고정화 특성

- 유기오염물질(PCB) 수용액에 반응성 피복소재들을 넣고 24시간 교반후, 잔류 유기오염물질을 측정 한 후 유기오염물질의 흡착제거율을 계산하였음
- 유기오염물질의 흡착 제거율은 활성탄 > 제강슬래그 > 벤토나이트 > 제올라이트 > 순환골재 순으로 제거율이 높았음.

<PAH(나프탈렌)>



<PCB(디클로로비페닐)>



[그림 III-가-13] 각 피복소재별 PAH 및 PCB 고정화 성능 평가 비교

[표 III-가-9] 피복소재별 유기오염물질 흡착능 비교

	PAH	PCB
순환골재	×	×
제강슬래그	×	×
벤토나이트	○	×
제올라이트	△	×
활성탄	◎	○

◎: 매우우수(90-100%) ○: 우수(70-90%) △: 보통(50-70%) ×: 미흡(50% 미만)

■ 다양한 피복소재들에 있어서 유기오염물질(PAH, PCB) 흡착성능 평가 비교

- 유기오염물질(나프탈렌, 2,4-디클로로비페닐)의 흡착 특성을 나타냄.
- 활성탄은 PAH, PCB에 높은 흡착 성능을 나타내고 있으며, 그 다음으로는 벤토나이트 및 제올라이트가 좋은 흡착 특성을 나타내고 있음.
- 제강슬래그와 순환골재는 PAH, PCB에서 50% 미만의 흡착 특성을 나타내고 있음

⑦ 현장 적용시 환경 영향 파악을 위한 잠재적 위험성 피복소재(순환골재, 제강

슬래그)의 안정성 검증 시험

㉞ 생태독성시험

■ 순환골재

- 건설폐기물인 순환골재를 이용한 피복소재로의 활용 가능성을 검증하기 위하여 해양미생물 생태독성 평가를 수행함
- 발광박테리아를 이용한 상대발광저해율이 0%(기준: <30%이하)가 나와 “독성 없음”으로 판명됨
- 미세조류의 경우 96시간동안 배양후 EC50 평가 후 “독성 없음”으로 판명됨

[표 III-가-10] 순환골재의 생태독성 평가

시험 생물종	발광박테리아 ( <i>Vibrio fischeri</i> )	미세조류 ( <i>Dunaliella tertiolecta</i> )
평가기준 (표준시험법)	상대발광저해율 30% 이하일 경우에는 “독성 없음”으로 판정	96 hr EC <sub>50</sub>
순환골재 용출 원액의 독성유무 (<2 mm)	0%(독성 없음)	EC <sub>50</sub> : > 100 %(독성 없음)

■ 제강슬래그

- 환경안전성 평가 (해양생물 영양단계별 독성평가) 결과 독성 영향 없음 : 박테리아, 식물플랑크톤, 해조류, 로티퍼, 어류 등
- 생태환경 안정성 평가
  - 유해물질 용출 등 환경안전성 영향 없음
  - 해양생물 영양단계별 독성평가 결과 독성 영향 없음

[표 III-가-11] 제강슬래그의 환경안전성 평가 및 생태독성 평가

기준 및 항목 구분	Hg	B	Cu	Zn	As	Se	Cd	Pb	Cr <sup>+6</sup>	CN
폐기물 용출 기준 (환경부)	0.005	-	3	-	1.5	-	0.3	3	1.5	1
해역 수질 기준 (국토해양부)	0.0005	-	0.02	0.1	0.05	-	0.01	0.05	0.05	0.01
적조구제물질용출기준 (농수식품부)	0.0005	-	0.02	0.1	0.05	0.01	0.01	0.05	0.05	0.01
제강슬래그 용출시험 결과	<0.0001	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.0002	<0.0002	<0.01	<0.005

시험 생물종	박테리아 <i>Vibrio fischeri</i>	식물플랑크톤 <i>Iso. galbana</i>	해조류 <i>Ulva pertusa</i>	로티퍼 <i>B. plicatilis</i>	어류 <i>C. variegatus</i>	단각류 <i>M. acherusicum</i>	다모류 <i>P. aibuhitensis</i>
평가 기준 (표준시험법)	30min EC <sub>50</sub>	72h EC <sub>50</sub>	24h EC <sub>50</sub>	24h LC <sub>50</sub>	96h LC <sub>50</sub>	10d LC <sub>50</sub>	96h LC <sub>50</sub>
제강슬래그 용출 원액의 독성유무 (<2 mm)	X	X	X	X	X	X	X

㉟ 피복소재 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 용출실험

- 각 피복소재의 중금속 용출 농도를 평가하기 위해서 TCLP (US EPA)을 실시함.
- 순환골재에서는 Zn, Cu 및 Cr이 일부 용출되었지만 그 양은 기준에 미달하는 미미한 양을 보였음

- 제강슬래그에서는 Cr만이 기준보다 매우 적은 양이 일부 용출이 되었고, 나머지 항목에서는 중금속이 검출되지 않았음

[표 III-가-12] 폐복소재 TCLP 용출실험 결과 비교

(단위: mg/L)

	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Cr
순환골재	ND	0.83	0.26	ND	ND	ND	0.15
제강슬래그	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.13
TCLP 기준	7.0	-	-	5.0	1.0	5.0	5.0

※ ND: Not Detected

### ⑧ 선정 폐복소재들의 확보의 용이성

#### ㉓ 순환골재

- 순환골재는 건설공사 등으로 인하여 발생한 건설폐기물을 친환경적으로 적정처리하고 재활용을 촉진하여 국가자원의 효율적 이용은 물론 국민경제발전과 공공복리증진에 기여하기 위해 ‘건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률’이 제정되었고, 이에 따라 건설폐기물을 재활용하여 탄생한 일정 품질기준 이상의 골재를 ‘순환골재’라고 함.
- 순환골재는 주로 도로보조기층용, 아스팔트콘크리트용, 콘크리트제품 제조용, 되메우기용, 수평배수층용 등으로 이용되고 있음.
- 순환골재 생산업체는 전국적으로 산재해 있고 가격은 각 지역마다 차이를 보이며, 평균 가격은 톤당 2660원임(2008년 기준).
- 순환골재의 생산량에 대한 정확한 통계는 나와 있지 않지만 전국 폐콘크리트 발생량(3,691만톤, 2010년기준)의 30-40%가 순환골재로 생산되고 있는 것으로 추정됨.
- 폐콘크리트의 유효활용을 위한 환경특성 평가에서 폐기물공정시험법과 TCLP(Toxicity characteristic leaching procedure)법에 의한 용출시험에서 법적기준에 모두 만족하는 것으로 나타남(이용수, 2001). 또한 2차년도 연구개발에서 생태독성실험을 한 결과에서도 독성이 없는 것으로 검증됨.





[그림 Ⅲ-가-14] 2008년도 지역별 순환골재 가격동향

㉔ 제강슬래그

- 국내 슬래그 총 발생량(2010년 기준)은 2,030만톤/년이고, 이중 고로슬래그는 1,100만톤/년, 제강슬래그는 930만톤/년의 발생량을 보임.
- 제강슬래그는 주로 도로노반재, 토목용재료, 항만공사용재료 등의 토목건설에 사용되고 있음.
- 제강슬래그의 가격은 10,000~ 60,000원/톤이며, 제철산업에서 부산물로 생산됨.
- 본 사업 1차년도 연차 실적 보고서(p. 164)에 따르면 환경안전성 평가(해양생물 영양단계별 독성평가) 결과 독성 영향 없음으로 판명됨.



[그림 III-가-15] 철강슬래그의 종류 및 재활용 용도(최상원, 2007)

#### ㉔ 활성화탄

- 활성화탄은 야자각, 목재류, 갈탄, 무연탄, 유연탄 등의 탄소질을 원료로 제조되는 미세세공이 잘 발달된 무정형 탄소의 집합체로서 활성화 과정을 통해 분자 정도의 미세세공이 형성되어 큰 내부표면적을 갖는 흡착제임.
- 활성화탄은 원재료 및 흡착능에 따라 가격이 250,000 ~ 3,500,000원/톤을 형성하고 있음.

#### ㉕ 벤토나이트

- 국내 벤토나이트는 천연 광물로 경북지역에 집중되어 부존되어 있으며, 강원도에도 소량 분포되어 있음.
- 2009년 기준 국내 벤토나이트 생산량은 약 84,963톤이며, 매년 증가추세를 보이고 있음.
- 벤토나이트의 가격은 50,000원/톤에서 350,000원/톤을 형성하고 있음.



[그림 III-가-16] 벤토나이트와 산성백토의 광산 분포도

[표 III-가-13] 벤토나이트 지역별 매장량(대한광업진흥공사, 2009)

구분	광 산 명	소재지	매장량(천톤)			가채광량(천톤)
			확정	추정	계	
벤토 나이 트	효동(오성)	경북 경주 양남		336.3	336.3	269.0
	두산	경북 경주 양남		160.5	160.5	128.4
	나아	경북 경주 양남		145.1	145.1	116.1
	제일벤토나이트	경북 경주 양남		31.1	31.1	21.8
	태광화학-대령	경북 경주 양남		172.8	172.8	134.8
	진명	경북 경주 양남		435.1	435.1	304.6
	수드케미(대한)	경북 경주 양북		360.0	360.0	288.0
	송전	경북 경주 양북		52.0	52.0	41.0
	한림	경북 경주 양북		172.9	172.9	138.3
	연일 13	경북 포항 동해	27.0		27.0	24.3
	동해(삼강)	경북 포항 동해		1,998.9	1,998.9	1,399.3

마현	경북 포항 동해	916.0		916.0	824.4
경주-양남지구	경북 경주 양남		32.0	32.0	24.0
계	12	943.0	3,959.2	4,902.2	3,744.3

[표 III-가-14] 벤토나이트 생산현황(지식경제부, 2010)

(단위: 톤)

광 산 명	소재지	2005	2006	2007	2008	2009
옥산벤토나이트	경주 양북	50,607	29,820	29,577	33,077	42,835
나아	경주 양남	-	-	-	13,500	21,000
수드케미	경주 양남	-	-	-	-	10,640
대성벤토나이트	경주 양남	1,555	-	-	5,750	3,247
한림	경주 양북	11,300	9,147	8,000	1,633	2,831
노당	경주 안강	5,500	-	2,500	-	2,800
두산	경주 양북	885	1,440	9,202	3,272	960
옥천	경주 양남	630	730	500	620	420
대맥	영덕 남정	-	-	150	200	230
동양송전	경주 양북	1,200	-	-	-	-
기타		13,500	20,000	6,500	13,000	-
합계		85,177	61,137	56,429	71,052	84,963

#### ㊦ 천연 제올라이트

- 대부분 경북 지역에 보존되어 있으며, 경북 외 지역에는 광산이 거의 존재하지 않음.
- 제올라이트는 토양 개량제, 사료용 및 강한 흡착성을 이용해 공해방지용으로 사용되고 있으나 천연산은 인공품에 비해 품질면에서 떨어져 용도에 제약을 받음.
- 국내 광산에서 판매하는 미정제 원석의 가격은 CEC(Cation Exchange Capacity: meq/100g)치에 따라 다른 값을 보이고 있음.
- 2010년 국내 기준단가는 12,329원/톤임 (표 III-가-16).
- 표 III-가-16에서 나온 12,329원/톤은 광산에서 채취한 순수 광석(광물)의 값을 나타내고 있음
- 그러나 시중에서 판매되고 있는 천연제올라이트는 \$50-100/톤으로 일부 가공을 거치면서 단가가 상승함.
- 시중에서 판매되고 있는 천연 제올라이트는 합성 제올라이트(\$500-600/톤)에 비해서 불순물을 함유하고 효능면에서 뒤떨어지지만 가격이 저렴함.
- 합성 제올라이트가 천연 제올라이트에 비해 약 5배의 차이를 보임
- 천연제올라이트는 중국(2,000천톤)에 이어 우리나라 (210천톤)가 2대 생산 국가임(USGS, 2011)

[표 III-가-15] 천연 제올라이트 주요 광산 생산 추이(MICI, 2013)

(단위: 톤)

광 산 명	위 치	2007	2008	2009	2010
동신제요	경북 경주 양북	-	16,020	115,215	138,705
구룡백토	경북 포항 구룡포	44,200	49,000	35,950	28,500
대현	경북 경주 양북	7,000	32,000	34,000	24,600
달신	경북 포항 동해	15,309	25,794	19,911	13,245
서영	경북 경주 양북	12,530	8,988	12,800	11,280
제올라이트 코리아-구룡포	경북 포항 구룡포	-	-	13,000	9,060
한두월성	경북 경주 양북	19,500	12,000	2,000	8,500
우일불석	경북 포항 장기	-	-	-	6,600
동신장기	경북 포항 장기	5,676	2,793	720	875
한농	경북 포항 동해	1,350	900	-	810
삼라불석	경북 경주 양남	-	-	-	15
합계		157,408	217,691	235,226	242,190

[표 III-가-16] 연도별 천연제올라이트 국내 가격 추이(MICI, 2013)

년도	2006	2007	2008	2009	2010
기준단가(원/톤)	12,848	12,878	12,690	12,337	12,329

### ㉞ 모래

- 시도별 공급량 구성비를 보면 모래가 43.2%, 자갈이 56.8%을 보임.
- 모래수요의 34.4%를 바다모래(연안+EEZ), 30.9%를 선별파쇄모래, 13.9%를 산림모래, 13.1%를 하천모래(준설토 포함)로 공급하는 것으로 계획
- 계획기간 중 연평균 연안 11,836천m<sup>3</sup>, EEZ 20,000천m<sup>3</sup>을 허가 공급
- 자체공급이 어려운 수도권(서울, 인천, 경기), 충청권(대전, 충남), 경남권(부산, 울산, 경남), 등은 바다모래의 공급으로 수급조절하고 있으나 공급여건이 악화되고 있어 그에 대한 대책이 필요
- 골재원이 없어 자체공급이 어려운 지역 수도권(서울, 인천, 경기), 충청권(대전, 충남), 경남권(부산, 울산, 경남) 등은 바다모래의 공급으로 수급조절이 필수
- 바다모래에 의존하는 수도권 서부지역(웅진군 700만m<sup>3</sup>, 태안군 750만m<sup>3</sup>, 안산시 742만m<sup>3</sup>)의 골재채취허가 협의절차가 지연되고 있어 '14년부터 골재수급 어려움이 예상됨
- 레미콘 업체를 대상으로 공장 도착도 가격을 기준으로 골재 유통 가격을 조사한 결과, 하천모래는 평균 15,118원/m<sup>3</sup>(도착도, 부가세 별도)으로 나타났으며, 쇄사는 13,483원/m<sup>3</sup>, 바다모래는 16,621원/m<sup>3</sup>, 육지모래 14,349원/m<sup>3</sup>으로 나타남.
- 한국골재협회 자료를 기준하여 골재 생산지의 판매 단가와 비교하여 볼 때, 공급 부족과 원거리 반입 등으로 인하여 골재 구매단가가 상당히 높게 나타나고 있음.

- 연도별 골재 생산지 판매 단가를 보면 약 10년간 잔골재 중 하천골재, 바다골재, 육상골재는 각각 1,486원/m<sup>3</sup>, 5,764원/m<sup>3</sup>, 2,401원/m<sup>3</sup> 증가 하였음.
- 반면 굵은골재 중 하천골재, 바다골재는 각각 3,138원/m<sup>3</sup>, 1,539원/m<sup>3</sup> 증가하였지만 육상골재는 100원/m<sup>3</sup> 이 감소 하였음.
- 특히 지역별로는 전국 평균 생산지 판매 단가와 구매 단가 등을 고려하여 볼 때, 잔골재는 전남과 경남지역이, 굵은골재는 수도권, 충북, 경남지역이 높게 나타나고 있다.
- 반면, 강원, 충남, 경북지역은 골재 가격이 안정적이며, 제주 지역도 원거리 반입 비용을 고려할 때 골재의 가격 안정성이 양호한 것으로 나타나고 있다.
- 전반적으로 각 지역의 주요 골재원별 평균 단가가 전국 평균 단가를 상회하는 경우, 보다 면밀한 골재 수급 관리가 필요할 것으로 판단된다.

[표 III-가-17] 시도별 공급계획 총괄표(국토교통부, 2014)

단위 : 천m<sup>3</sup>

구분	2014	2015	2016	2017	2018	연평균	구성비	
합계	214,584	216,121	218,355	218,595	224,345	218,400	100.0%	
모래	91,856	93,237	94,210	94,010	98,266	94,316	43.2%	
자갈	122,728	122,884	124,145	124,585	126,079	124,084	56.8%	
수도권	계	61,249	60,513	61,065	61,373	64,904	61,820	28.30%
	서울	504	516	521	523	530	519	
	인천	11,730	9,796	9,825	9,834	12,869	10,810	
	경기	49,015	50,201	50,719	51,016	51,505	50,491	
강원	계	11,466	11,743	11,864	11,906	11,549	11,705	5.36%
충북	계	9,283	9,417	9,606	9,639	9,755	9,540	4.37%
대전 충남 세종	계	28,625	28,970	29,465	29,013	28,324	28,879	
	대전	31	32	33	32	33	32	
	충남	24,151	24,387	24,835	24,367	23,623	24,272	
	세종	4,443	4,551	4,597	4,614	4,668	4,575	
전북	계	12,293	12,078	12,202	12,246	12,392	12,242	5.60%
광주 전남	계	12,948	13,262	13,397	13,445	13,105	13,232	6.06%
	광주	160	164	166	166	168	165	
	전남	12,788	13,098	13,231	13,279	12,937	13,067	
대구 경북	계	21,417	21,934	22,159	22,239	22,006	21,950	10.05%
	대구	612	626	633	636	643	629	
	경북	20,805	21,308	21,526	21,603	21,363	21,321	
부산 울산 경남	계	34,439	35,271	35,634	35,760	36,190	35,458	16.23%
	부산	2,120	2,171	2,194	2,201	2,228	2,183	
	울산	8,079	8,275	8,359	8,389	8,490	8,317	
	경남	24,240	24,825	25,081	25,170	25,472	24,958	
제주	계	2,864	2,933	2,963	2,974	3,010	2,948	1.35%
EEZ	계	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	9.16%
	서해	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	
	남해	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	

[표 III-가-18] 제5차 계획기간의 공제 공급 계획(안) 모래(국토교통부, 2014)

단위 : 천m<sup>3</sup>

구 분		2014	2015	2016	2017	2018	계	구성비
수 요		87,417	88,297	89,153	89,469	90,539	444,875	
공 급		91,856	90,783	91,513	91,238	96,687	462,077	100%
허가	계	56,234	54,839	55,093	54,638	60,138	280,942	60.8%
	하천골재	4,371	4,454	4,490	4,502	4,549	22,366	4.8%
	바다(연안)	12,430	10,430	10,430	9,890	16,000	59,180	12.8%
	바다(EEZ)	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	100,000	21.6%
	산림골재	12,412	12,770	12,913	12,960	13,045	64,100	13.9%
	육상골재	7,021	7,185	7,260	7,286	6,544	35,296	7.7%
신고	계	35,622	35,944	36,420	36,600	36,549	181,135	39.2%
	선별·파쇄 등	24,892	29,385	29,420	29,600	29,549	142,846	30.9%
	준설토	10,730	6,559	7,000	7,000	7,000	38,289	8.3%
반입		38,970	38,899	39,438	39,577	40,174	197,058	42.6%
반출		38,970	38,899	39,438	39,577	40,174	197,058	

[표 III-가-19] 제5차 계획기간의 바다모래 채취 계획(국토교통부, 2014)

단위 : 천m<sup>3</sup>

구 분		2014년	2015년	2016년	2017년	2018년	계
총 계		32,430	30,430	30,430	29,890	36,000	159,180
연안모래 (천m <sup>3</sup> )	인천지역	9,000	7,000	7,000	7,000	10,000	40,000
	충남지역	3,430	3,430	3,430	2,890	6,000	19,180
	계	12,430	10,430	10,430	9,890	16,000	59,180
EEZ모래 (천m <sup>3</sup> )	남해	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	50,000
	서해	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	50,000
	계	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	100,000

[표 III-가-20] 골재 구매 단가(국토교통부, 2008)

(단위 : 원/m<sup>3</sup>, 도착도, 부가세별도)

구매단가	잔골재								굵은골재					
	하천 모래	쇄사	바다 모래 (수입)	바다 모래 (국산)	육상 모래 (개답사)	순환 모래	마사	소계	쇄석 (석산)	크러셔 파쇄	하천 자갈	육자갈	소계	
전국	평균	15,118	13,483	14,268	16,621	14,349	12,100	15,667	14,617	12,042	12,534	10,763	8,500	12,103
	최대	25,500	21,700	15,600	24,000	18,000	-	21,500	-	19,000	16,000	15,000	-	-
	최소	5,400	8,000	12,350	12,500	9,000	-	11,000	-	7,000	8,700	8,000	-	-
수도권	18,000	12,626	14,145	14,529	13,833	-	13,000	14,576	13,256	13,550	-	-	-	13,411
강원	15,028	11,865	-	-	14,286	-	-	13,155	10,746	11,625	10,600	-	-	10,877
충북	14,000	13,800	-	-	14,558	-	14,000	14,268	13,290	14,000	11,000	8,500	-	13,219
충남	15,000	11,700	-	15,700	-	-	-	14,660	10,500	9,000	-	-	-	10,182
전북	-	14,311	15,500	15,200	14,000	-	-	14,630	12,043	-	-	-	-	11,806
전남	-	14,417	-	18,770	14,933	-	-	18,084	10,111	10,686	-	-	-	10,251
경북	11,579	12,275	-	17,200	11,000	-	11,000	11,866	12,145	12,200	15,000	-	-	11,907
경남	19,344	16,231	-	18,500	14,767	12,100	18,667	17,778	12,279	11,610	8,650	-	-	12,204
제주	-	12,500	-	18,500	-	-	-	16,100	12,000	-	-	-	-	12,000

주: 레미콘업체를 대상으로 조사한 것임 (2008년 3월 기준)

[표 III-가-21] 연도별 골재 생산지 판매 단가(국토교통부, 2008)

(단위 : 원/m<sup>3</sup>, 상차도, 부가세별도)

구분	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008.8	
잔골재	하천골재	7,500	7,600	8,200	8,200	8,600	9,400	9,200	9,600	9,100	9,100	8,986
	바다골재	8,400	8,400	8,200	9,500	10,700	12,300	13,800	13,300	13,900	13,600	14,164
	육상골재	8,300	8,200	9,400	9,400	9,800	9,800	10,700	9,200	9,400	9,300	10,701
	산림골재	-	-	-	-	-	-	-	10,800	10,700	10,300	10,412
굵은골재	하천골재	6,000	6,000	6,600	6,400	6,800	7,700	8,100	6,900	7,100	7,100	9,138
	산림골재	7,400	7,500	7,200	7,200	7,400	7,600	8,000	8,000	8,300	8,400	8,939
	육상골재	7,300	7,700	7,700	7,700	6,700	6,700	7,700	7,500	6,500	7,200	7,200

주 : 레미콘용 골재를 기준으로 조사하였으며, 2008년은 8월말 기준 가격임.

자료 : 한국골재협회

[표 III-가-22] 3차 계획기간 중 지역별 골재 판매 단가(국토교통부, 2008)

(단위 : 원/m<sup>3</sup>, 상차도, 부가세별도)

구분	생산지 판매단가(원/m <sup>3</sup> , 상차도)						전년대비증가				년평균 증가율	
	2004	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008			
전국	잔골재	하천골재	9,200	9,600	9,100	9,100	8,986	4.3	-5.2	0.0	-1.3	-0.59
		바다골재	13,800	13,300	13,900	13,600	14,164	-3.6	4.5	-2.2	4.1	0.65
		육상골재	10,700	9,200	9,400	9,300	10,701	-14.0	2.2	-1.1	15.1	0.00
		산림골재	-	10,800	10,700	10,300	10,412	-	-0.9	-3.7	1.1	-0.91
	굵은골재	하천골재	8,100	6,900	7,100	7,100	9,138	-14.8	2.9	0.0	28.7	3.06
		육상골재	7,700	7,500	6,500	7,200	7,200	-2.6	-13.3	10.8	0.0	-1.66
수도권	잔골재	하천골재	12,300	11,000	10,500	10,500	10,500	-10.6	-4.5	0.0	0.0	-3.88
		바다골재	14,000	11,000	10,800	10,800	10,786	-21.4	-1.8	0.0	-0.1	-6.31
		육상골재	11,000	8,000	7,800	7,800	8,357	-27.3	-2.5	0.0	7.1	-6.64
		산림골재	-	8,000	7,800	7,800	8,060	-	-2.5	0.0	3.3	0.19
	굵은골재	하천골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		육상골재	8,400	7,700	7,800	7,800	9,550	-8.3	1.3	0.0	22.4	3.26
강원	잔골재	하천골재	9,700	13,700	10,051	-	-	41.2	-26.6	-100.0	-	0.89
		바다골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		육상골재	10,500	10,800	10,200	10,800	11,738	2.9	-5.6	5.9	8.7	2.83



	좁은 골재	산림골재	-	9,500	8,700	9,300	9,548	-	-8.4	6.9	2.7	0.13
		하천골재	10,300	-	-	-	-	-100.0	-	-	-	-
		산림골재	8,000	8,500	8,100	8,500	8,690	6.3	-4.7	4.9	2.2	2.09
충북	잔골재	육상골재	8,300	7,500	6,500	7,200	7,200	-9.6	-13.3	10.8	0.0	-3.49
		하천골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		바다골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	좁은 골재	육상골재	12,000	9,000	9,100	9,100	10,232	-25.0	1.1	0.0	12.4	-3.91
		산림골재	-	10,200	10,200	10,200	10,276	-	0.0	0.0	0.7	0.19
		하천골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
대전충남	잔골재	산림골재	7,500	7,900	8,100	8,100	9,482	5.3	2.5	0.0	17.1	6.04
		육상골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		하천골재	10,300	10,300	10,300	10,300	10,333	0.0	0.0	0.0	0.3	0.08
	좁은 골재	바다골재	11,000	12,000	12,000	12,000	12,000	9.1	0.0	0.0	0.0	2.20
		육상골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		산림골재	-	10,300	10,800	10,300	10,250	-	4.9	-4.6	-0.5	-0.12
전북	잔골재	하천골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		산림골재	8,300	8,300	8,300	8,300	8,333	0.0	0.0	0.0	0.4	0.10
		육상골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	좁은 골재	하천골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		바다골재	14,000	14,000	13,000	13,000	13,000	0.0	-7.1	0.0	0.0	-1.84
		육상골재	10,000	9,500	9,500	9,500	9,000	-5.0	0.0	0.0	-5.3	-2.60
광주전남	잔골재	산림골재	-	9,100	9,000	9,000	9,875	-	-1.1	0.0	9.7	2.06
		육상골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		하천골재	8,000	7,600	7,600	7,600	8,000	-5.0	0.0	0.0	5.3	0.00
	좁은 골재	하천골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		바다골재	12,000	10,800	11,300	12,000	-	-10.0	4.6	6.2	-100.0	0.00
		육상골재	10,300	8,500	10,300	9,500	10,524	-17.5	21.2	-7.8	10.8	0.54
대구경북	잔골재	산림골재	-	-	-	6,500	-	-	-	-	-100.0	-
		하천골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		산림골재	6,300	6,400	8,100	8,100	8,071	1.6	26.6	0.0	-0.4	6.39
	좁은 골재	육상골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		하천골재	7,000	6,900	6,900	6,900	7,178	-1.4	0.0	0.0	4.0	0.63
		바다골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
부산울산경남	잔골재	육상골재	-	9,000	9,000	9,000	9,000	-	0.0	0.0	0.0	0.00
		하천골재	7,000	6,900	7,100	7,100	7,394	-1.4	2.9	0.0	4.1	1.38
		산림골재	7,100	7,000	7,100	7,100	8,369	-1.4	1.4	0.0	17.9	4.20
	좁은 골재	육상골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		하천골재	6,900	6,600	6,800	7,000	9,500	-4.3	3.0	2.9	35.7	8.32
		바다골재	13,000	15,000	18,000	15,500	15,548	15.4	20.0	-13.9	0.3	4.58
제주	잔골재	육상골재	10,500	-	-	-	-	-100.0	-	-	-	-
		산림골재	-	13,400	13,500	14,000	13,400	-	0.7	3.7	-4.3	0.00
		하천골재	7,000	-	-	-	13,500	-100.0	-	-	-	17.84
	좁은 골재	산림골재	7,200	7,900	8,800	8,700	9,558	9.7	11.4	-1.1	9.9	7.34
		육상골재	7,000	-	-	-	-	-100.0	-	-	-	-
		하천골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
제주	잔골재	바다골재	19,000	17,000	18,000	18,000	18,095	-10.5	5.9	0.0	0.5	-1.21
		육상골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		산림골재	-	17,000	16,500	16,500	16,500	-	-2.9	0.0	0.0	-0.74
	좁은 골재	하천골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		산림골재	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
		육상골재	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

자료 : 한국골재협회

#### ㉔ 피복소재들의 공급 및 확보의 용이성 비교

- 산업부산물인 순환골재와 제강슬래그는 다른 피복소재들보다 비교적 낮은 가격대를 형성하고 있는 것을 알 수 있음. 반면 활성탄은 가장 비싼 가격을 나타내고 있음
- 활성탄을 제외한 모든 피복소재의 높은 생산량을 보여 공급에는 차질이 없을 것으로 판단됨
- 일부 피복소재(벤토나이트, 제올라이트)를 제외한 피복소재들의 생산지 또한 전국에 자리 잡고 있어 수송에 있어 문제점이 적을 것으로 판단됨
- 산업부산물인 순환골재와 제강슬래그의 생태독성 및 용출시험에서 모두 기준에 만족하고 있으며 다른 천연 광물(벤토나이트, 제올라이트, 모래) 또는 활성탄은 모두 2차적인 환경오염이 적을 것으로 판단됨

[표 III-가-23. 경제적, 사회환경적 측면을 고려한 피복소재들의 공급 및 확보의 용이성 비교]

	가격(원/톤)	생산량(ton/년)	생산지	2차오염	비고
순환골재	2,660	폐콘크리트 발생량: 36,910,000톤 이중 30~40% 순환골재 생산	전국 (생산업체)	없음 (2차년 연구)	시제품
제강슬래그	10,000~60,000	93,000 (2010년)	전국 (철강 산업체)	없음 (1차년 연구)	POSCO 등
벤토나이트	50,000~350,000	84,963 (2009년)	경주, 울진, 영덕, 포항	없음	시제품
제올라이트	60,000~100,000	210 천톤	경주, 포항	없음	시제품
활성탄	250,000~3,500,000	-	전국 (생산업체)	없음	시제품
모래	12,000~20,000	214,584천톤	전국 (생산업체)	없음	시제품

(나) 중금속 및 유기오염물지에 대한 현장모사조건에서 안정화 성능 평가 완료 (2해역)

① K항 오염퇴적물을 이용한 용출차단 실험

- 유효 용량 1 m<sup>3</sup>의 수조에 오염퇴적물(대조군)과 오염퇴적물을 순환골재, 제올라이트로 피복한 상태에서 60일 후, 수질 및 오염퇴적물의 변화를 비교 분석함



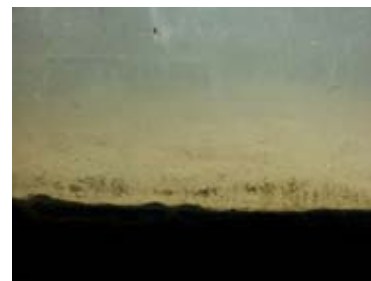
<현장모사 실험 전경>



<순환골재 피복>



<제올라이트 피복>



<대조군(오염퇴적물)>

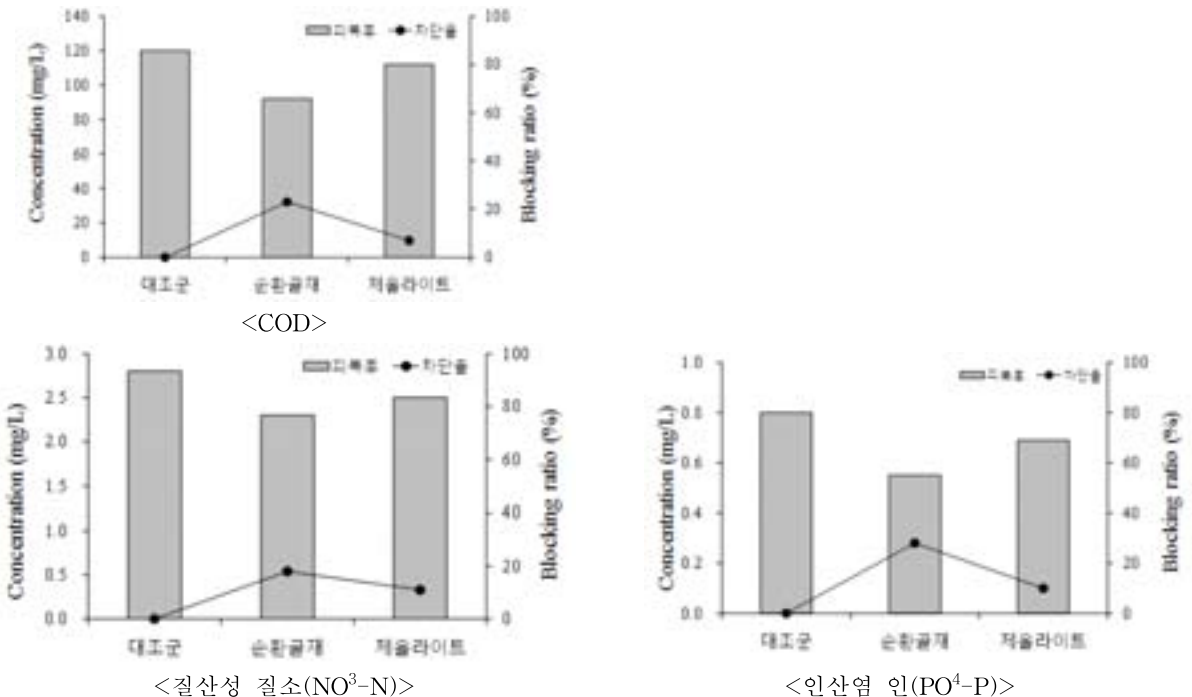
[그림 III-가-17] 1m<sup>3</sup> 규모 현장모사 수조 전경 및 피복소재들의 피복 후 전경

㉞ 피복소재에 의한 COD 저감 효과

- 피복소재인 순환골재, 제올라이트, 대조군(퇴적물)을 60일 동안 배양한 후 수중의 COD 값을 측정 후, 대조군과 피복소재들간의 차단율을 비교함.
- 대조군의 유기물 감소비를 고려한 COD 저감 효과에서는 순환골재(23%)가 제올라이트(7%)를 사용할 경우 보다 더 높은 차단 효과를 보이고 있음

㉔ 피복소재에 의한 영양염류(N,P) 저감 효과

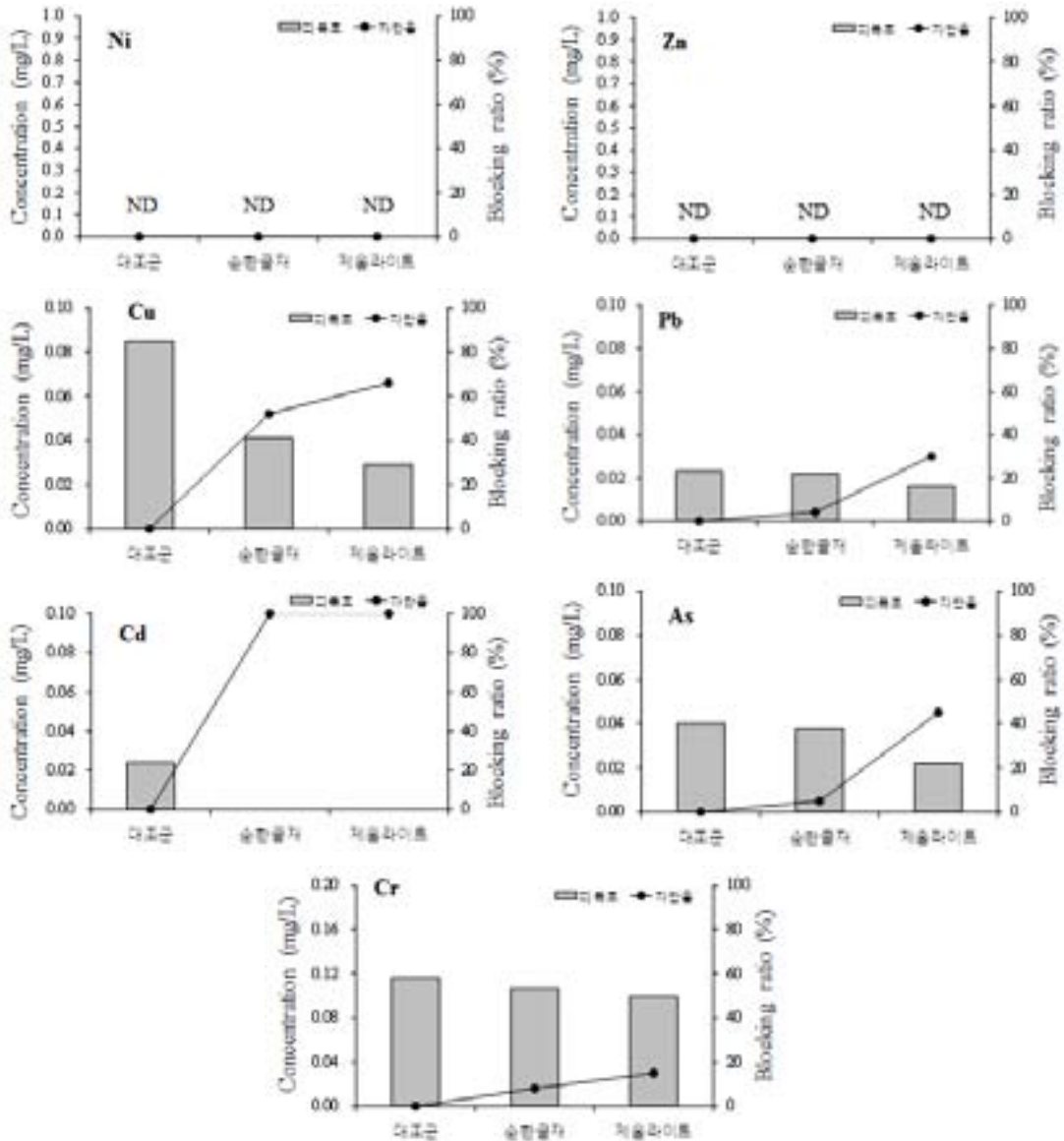
- 피복소재인 순환골재, 제올라이트, 대조군(퇴적물)을 60일 동안 배양한 후 수중의 질산성 질소와 인산염 인의 값을 측정 후, 대조군과 피복소재들간 차단율을 비교함.
- 대조군과 비교해서 순환골재와 제올라이트에서 각각 질산성 질소는 순환골재(18%)가 제올라이트(11%)를 사용할 경우 보다 더 높은 차단 효과를 보이고 있음.
- 대조군과 비교해서 순환골재와 제올라이트에서 각각 인산염 인은 순환골재(28%)가 제올라이트(10%)를 사용할 경우 보다 더 높은 차단 효과를 보이고 있음.
- 피복소재인 순환골재와 제올라이트를 사용할 경우 영양염류인 질산성질소와 인산염인의 10-30%의 차단효과를 나타내고 있음



[그림 III-가-18] 피복소재에 의한 COD 및 영양염류의 저감 효과

㉕ 피복소재에 의한 중금속 용출 저감 효과

- 피복소재인 순환골재, 제올라이트, 대조군(퇴적물)을 60일 동안 배양한 후 수중의 중금속 양을 측정 후, 대조군과 피복소재들간 차단율을 비교함.
- 실험기간중 Cu 성분이 쉽게 용출되는 특성을 나타냈고, Ni, Zn 등은 거의 용출되지 않았음
- 피복소재와 관계해서 차단율은 전체적으로 보면 제올라이트보다 순환골재에서 우수한 성능을 나타내고 있음



[그림 III-가-19] 피복소재에 의한 중금속 용출 저감 효율 비교

② M항 오염퇴적물을 이용한 용출차단 실험

- 유효 용량 1 m<sup>3</sup>의 수조에 오염퇴적물(대조군)과 오염퇴적물을 순환골재, 제올라이트로 피복한 상태에서 60일 후, 수질 및 오염퇴적물의 변화를 비교 분석함

㉞ 피복소재에 의한 COD 저감 효과

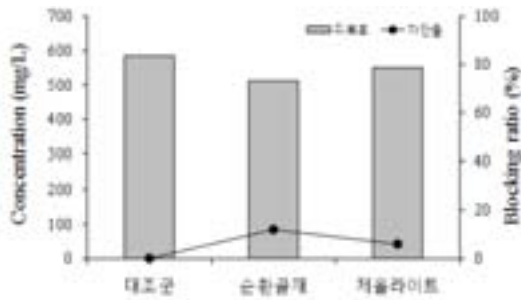
- 피복소재인 순환골재, 제올라이트, 대조군(퇴적물)을 60일 동안 배양한 후 수중의 COD 값을 측정 후, 대조군과 피복소재들간의 차단율을 비교함.
- 대조군의 유기물 감소비를 고려한 COD 저감 효과에서는 순환골재(12%)가 제올라이트(6%)를 사용할 경우 보다 더 높은 차단 효과를 보이고 있음

㉟ 피복소재에 의한 영양염류(N,P) 저감 효과

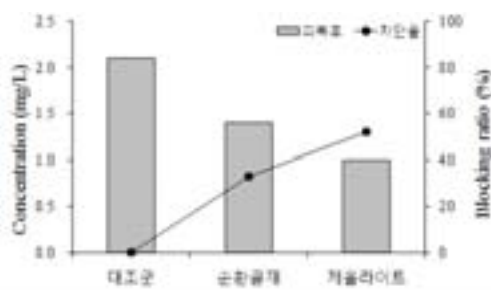
- 피복소재인 순환골재, 제올라이트, 대조군(퇴적물)을 60일 동안 배양한 후 수중의 질산성

질소 와 인산염 인의 값을 측정한 후, 대조군과 피복소재들간 차단율을 비교함.

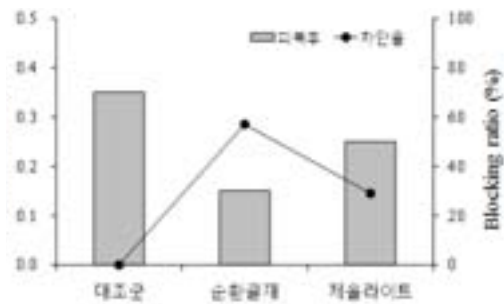
- 대조군과 비교해서 순환골재와 제올라이트에서 각각 질산성 질소는 순환골재(33%)가 제올라이트(52%) 보다 더 낮은 차단 효과를 보이고 있음.
- 대조군과 비교해서 순환골재와 제올라이트에서 각각 인산염 인은 순환골재(57%)가 제올라이트(29%)를 사용할 경우 보다 더 높은 차단 효과를 보이고 있음.
- 피복소재인 순환골재와 제올라이트를 사용할 경우 영양염류인 질산성질소와 인산염인의 30-60%의 차단효과를 나타내고 있음



<COD>



<질산성 질소(NO<sup>3</sup>-N)>

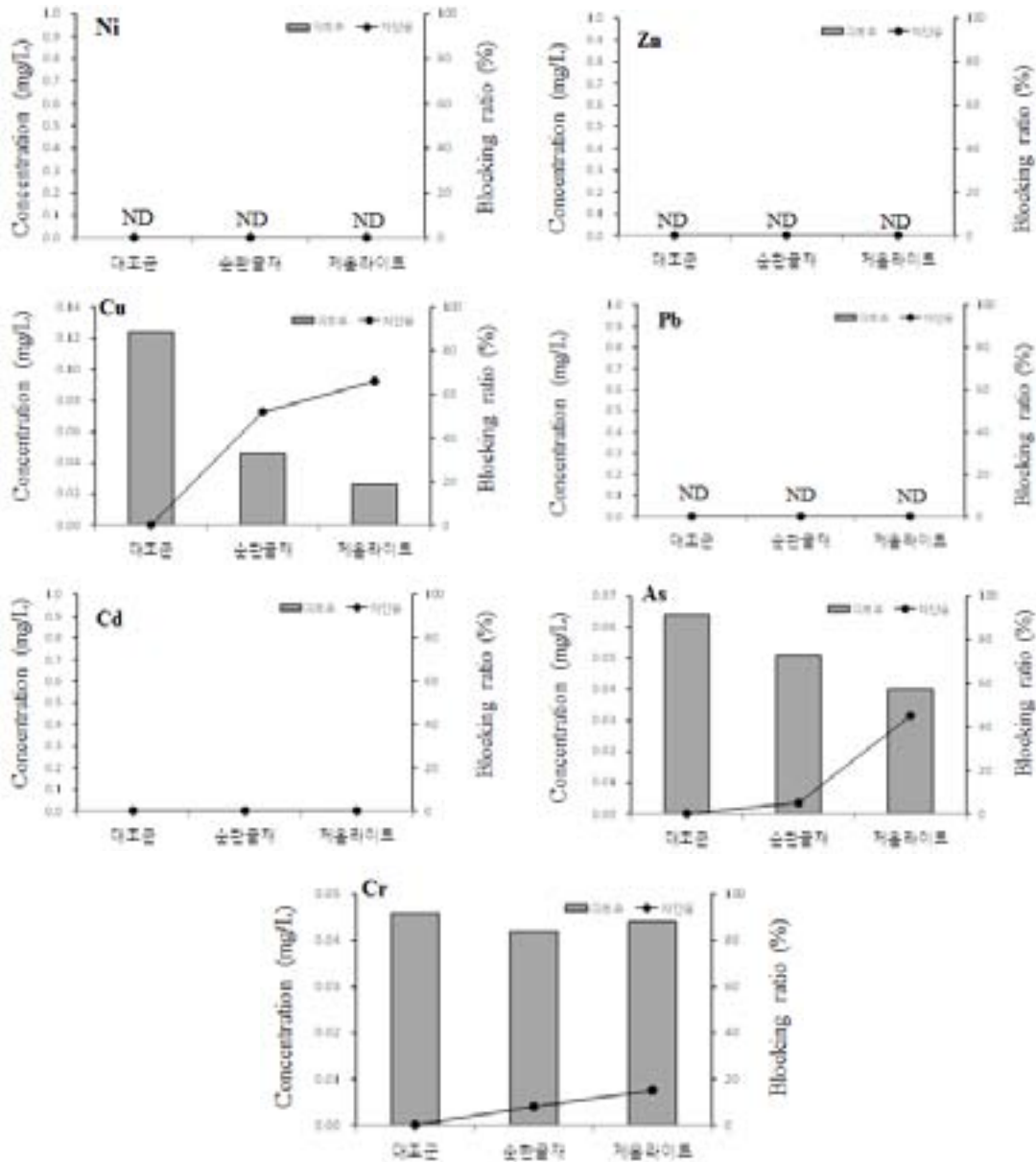


<인산염 인(PO<sup>4</sup>-P)>

[그림 III-가-20] 피복소재에 의한 COD 및 영양염류의 저감 효과

### ㊤ 피복소재에 의한 중금속 용출 저감 효과

- 피복소재인 순환골재, 제올라이트, 대조군(퇴적물)을 60일 동안 배양한 후 수중의 중금속 양을 측정한 후, 대조군과 피복소재들간 차단율을 비교함.
- 실험기간중 Cu 성분이 쉽게 용출되는 특성을 나타냈고, Ni, Zn, Pb, Cd 등은 거의 용출되지 않았음
- 피복소재와 관계해서 차단율은 전체적으로 보면 제올라이트보다 순환골재에서 우수한 성능을 나타내고 있음.



[그림 III-가-21] 피복소재에 의한 중금속 용출 저감 효율 비교

(2) 유력 대상해역 오염특성 조사 및 분석

(가) 피복공법 적용 가능 정점별 해양오염 퇴적물의 물리화학적 특성 조사 및 분석

① 대상해역의 개요

㉠ 조사해역

- 유력대상 해역은 남해 두 곳(K항, M항)과 서해 한 곳(I항)의 퇴적물 채취 및 오염정도를 검토하기 위해 기초적인 물리·화학적인 특성들을 분석하였음
- 샘플링 기간은 각각 장소에 따라 차이가 있었고, 샘플링 방법 또한 차이가 있었음. 즉, K항과 M항은 샘플링 방법에 있어서 잠수부를 이용하였는데 그 이유는 현장모사수조시험(1m<sup>3</sup>)을 하기 위해 많은 양의 퇴적물이 필요하였기 때문에 잠수부를 이용하여 샘플링을 하였음.

[표 III-가-24] 조사해역 개요

대상 해역	K항	M항	I항
조사 기간	2013년 11월	2014년 3월	2014년 5월
조사 정점	35°07' 10.2" N, 129°0' 49.98" E.	35°12' 29.9" N, 128°35' 12.41" E.	37°29' 26.29" N, 126°37' 19.46" E.
조사 사진	 	 	 
조사 방법	잠수부 이용	잠수부 이용	그랩 샘플러 이용
주요 오염물질	유기물, 중금속 오염	유기물, 중금속 오염	유기물, 중금속 오염
시료 특성	약 알칼리성의 실트질 우세	중성의 실트질 우세	약 알칼리성의 실트질 우세

㉠ 대상해역들의 오염특성

- 유력 대상 해역(K항, M항, I항)의 퇴적물은 약 알칼리성의 펄의 특징을 나타내고 있었으며, 특히 유기물과 영양염류(N,P) 또한 높은 값을 나타내고 있었음.
- 중금속과 유기오염물질 또한 기준에 비해 일부 성분들은 기준보다 높게 나타내고 있음.
- 전체적인 내용을 종합해 보면 유력 대상해역의 저서 퇴적물들은 다양한 형태로 오염되고 있음을 알 수 있었음.

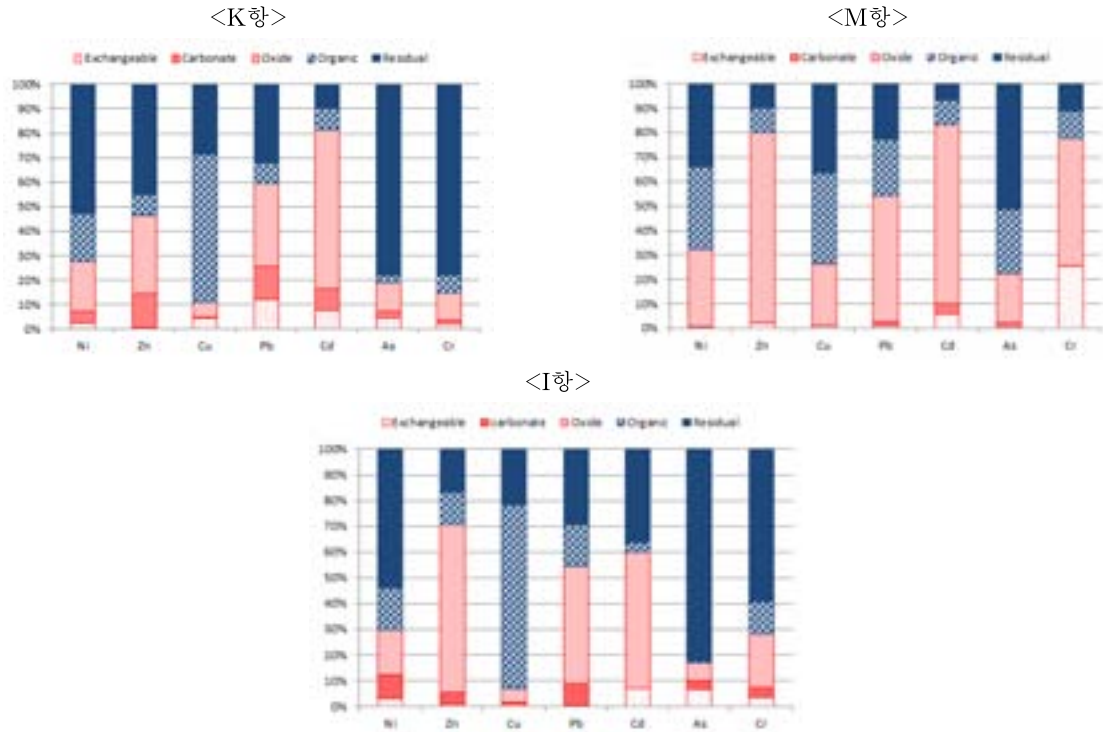
[표 III-가-25] K항 및 I항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	K항	M항	I항
pH	8.3	7.3	8.04
silt-clay (%)	85	78	88
water contents (%)	55	59	51.8
IL(%)	8.2	10.5	4.9
COD(g/kg)	17.2	29.1	10.3
OC(%)	1.6	1.5	1.7
T-N(%)	0.14	0.03	0.3
T-P(g/kg)	0.49	0.64	0.81
Cr (mg/kg)	65.7	17.3	33.2
Ni (mg/kg)	37.9	14.2	15.5
Cu (mg/kg)	67.3	37.3	85.2
Zn (mg/kg)	203.7	244.6	149.8
As (mg/kg)	30.8	22.0	37.8
Cd (mg/kg)	0.94	0.9	0.7
Pb (mg/kg)	42.4	33.1	50.4

㉔ 오염퇴적물 내 중금속 존재형태별 오염 현황

- 기존 연구결과를 보면, 자연환경에서 용출되기 쉬운 형태는 Exchangeable, Carbonate, Oxide 형태로 알려지고 있음
- 이러한 사실로 볼 때 K항 해양퇴적물 내에서 용출되기 쉬운 중금속은 Pb, Cd > Zn, Ni > As, Cr > Cu 일 가능성이 높음
- I항 해양퇴적물 내에서 용출되기 쉬운 중금속은 Zn, Pb, Cd > Ni, Cr > As, Cu 일 가능성이 높음
- M항 해양퇴적물 내에서 용출되기 쉬운 중금속은 Zn, Cd, Cr > Ni, Pb > As, Cu 일 가능성이 높음





[그림 III-가-22] 유력대상 해역 오염퇴적물 내 중금속 존재형태별 오염 현황

㉔ 유력 대상 해역 피복시공에 있어서 환경 분석

- 피복 시공에 있어서 주변 환경적인 요인을 조사, 분석함
- K항인 경우, 유속과 해류 등은 내만에 위치해 있어 안정적인 특징을 보이고 있는 것으로 보이지만 대형 선박들의 이동이 잦아 피복 시공하는데 어려움이 있을 것으로 보임
- M항인 경우 내만에 위치하고 있고 어선들도 왕래가 적은 편이나 수심이 낮아 재부유같은 현상이 일어날 가능성이 있음
- I항인 경우 서해안에 위치해 있어 조석 차가 커 피복 시공시 이러한 부분을 충분히 고려할 필요성이 있음



[그림 III-가-23. 유력대상 해역 피복시공 환경 분석]

(3) 유력 대상 해역 오염특성별 피복효율평가에 기반한 피복소재 적용안 도출

(가) 유력대상 2개해역의 중금속, 유기오염물질 용출 저감 및 안정화를 현장시료를 이용한 피복소재 성능 평가를 통해 최적 피복소재 적용(안) 도출(현장모사 소형 수조 및 1m<sup>3</sup> 규모 수조 활용)

① 피복소재의 선정

- 인(Phosphorus) 용출 차단 컬럼실험을 위한 피복소재로는 회분식 실험에서 반응성 피복소재로 선정된 제강슬래그(Steel Slag)를 사용하여 수행
- 불소(Fluoride) 용출 차단 컬럼실험을 위한 피복소재로는 산으로 처리된 적니를 반응성 피복소재로 선정하여 실험을 수행
- 중금속(Cr, Cu, Cd, Ni, As, Zn, Pb)의 용출 차단 현장모사형 파랑 수조실험을 위한 피복소재로는 1, 2차년도 실험에서 제안된 제올라이트(Zeolite), 순환골재(Recycled Aggregate), 제강슬래그(Steel Slag), 몬모릴로나이트(Montmorillonite)를 사용하여 수행

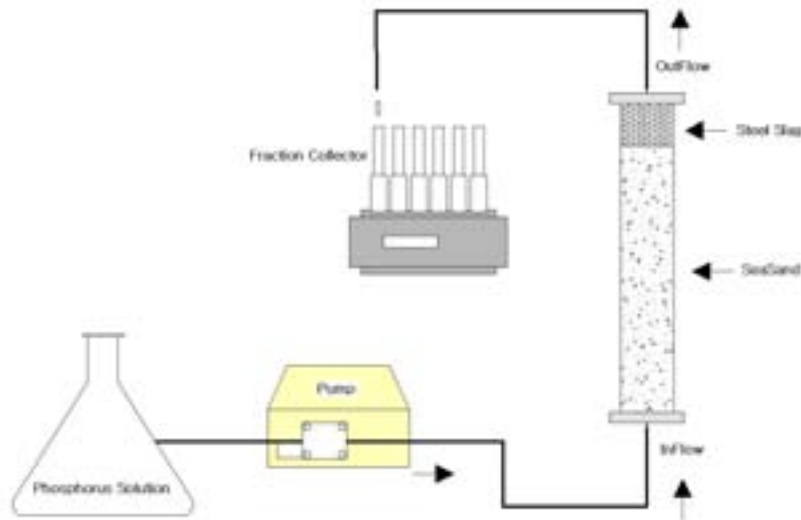
② 용출차단 컬럼장치의 구성 및 실험 조건

㉠ 용출차단 컬럼장치 및 현장모사형 파랑수조장치의 구성

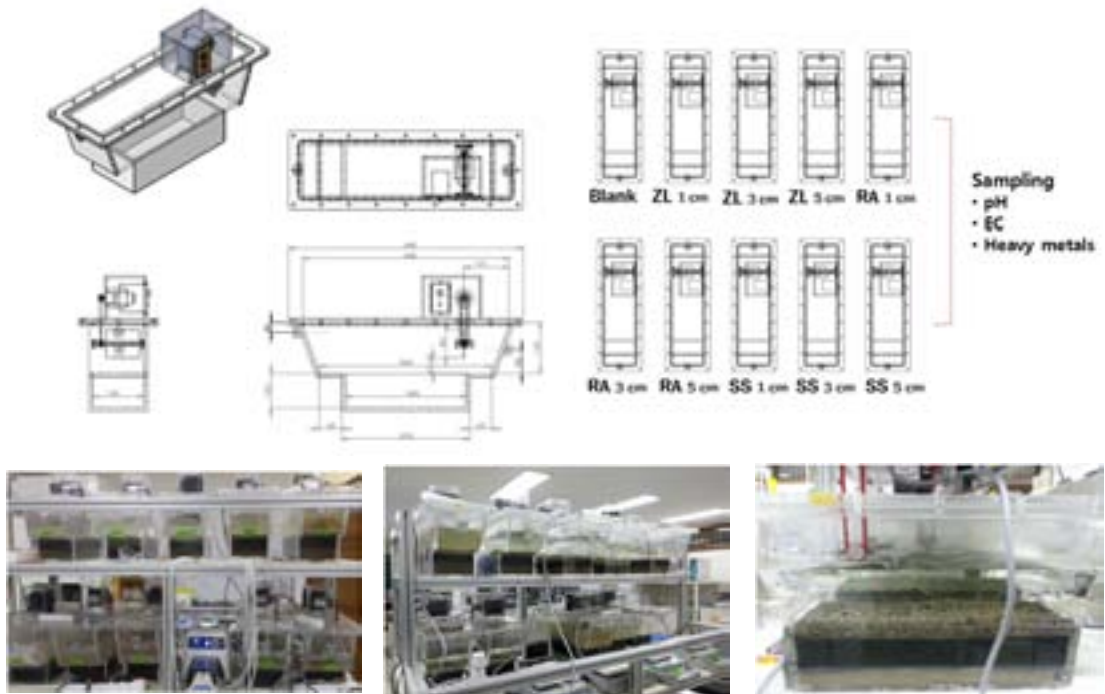
- 해양오염 퇴적물 내 부영양화 물질인 인용출 차단을 위하여 제강슬래그의 피복두께(1, 3, 5 cm), 인의 농도(10, 20, 40 mg-P/L), 유속(1, 2, 3 ml/min)을 달리하여 실험을 수행
- 제강슬래그 및 해사로 충전된 칼럼을 통과한 유출수를 일정 시간 간격으로 분취하여 파과곡선(Breakthrough curve)을 획득하였으며, 단위질량당 인 흡착량, 인 차단율, 흡착계수와 흡착 변수를 정량화 하였음
- 해양오염 퇴적물 내 불소용출 차단을 위하여 산처리 적니의 피복두께(3, 5 cm)를 달리하고 불소의 농도(10 mg-F/L)와 유속(0.5 ml/min)을 고정하여 실험을 수행
- 산업부산물(제강슬래그, 산처리 적니) 및 해사로 충전된 칼럼을 통과한 유출수를 일정 시간 간격으로 분취하여 파과곡선(Breakthrough curve)을 획득하였으며, 단위질량당 흡착량, 인 및 불소의 차단율, 흡착계수와 흡착 변수를 정량화 하였음
- 칼럼은 아크릴 재질로 내경은 50 mm, 높이는 300 mm로 그림 III-가-24과 같음
- 퇴적물 내 중금속 용출차단 현장모사형 파랑수조실험장치는 길이 350 mm, 폭 150 mm, 높이 100 mm의 직사각형 형태로 수조 상부에 임펠러(Impeller)가 부착되어 지속적인 파랑을 형성하는 수조본체와 유입 및 유출수 반응조, 정량펌프로 구성되었으며, 반응조의 해수가 수조본체에 유입되고 다시 유출되는 순환식구조로 구성되었음
- 피복소재에 의한 용출차단 효율을 파악하기 위하여 퇴적물 내 중금속의 용출이 쉽게 일어날 수 있도록 2 M HCl로 인위적으로 반응 시켜 실험을 수행하였음

㉡ 용출차단 컬럼장치 및 현장모사형 파랑수조 실험 조건

- 컬럼 실험에서는 퇴적물 내 존재하는 영양염류의 용출차단 효율을 평가하고자 W항에서 채수한 해수에 인(Phosphorus)이 10, 20, 40 mg-P/L의 농도가 되도록 인위적으로 오염시켜 실험을 진행하였음



[그림 III-가-24] 인, 불소 용출차단 컬럼 실험 모식도



[그림 III-가-25] 현장모사형 파랑수조 실험장치 제원 및 모식도

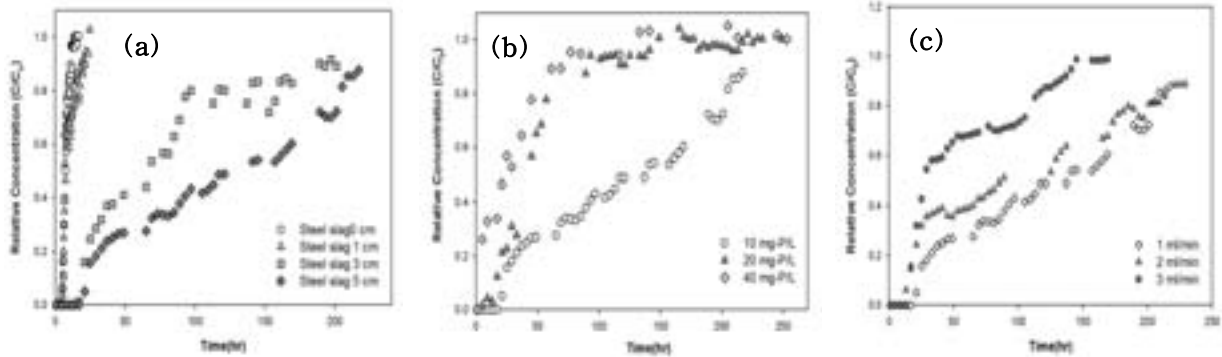
- 반응성 피복소재로는 제강슬래그(Steel Slag)를 사용하였고, 반응성 피복소재의 두께, 유량(유속), 오염물질(Phosphorus) 농도를 달리하여 실험을 진행하였음
- 시료는 잔류된 인(Phosphorus)의 농도를 알아보려고 아스크로빈산 환원법으로 발색하여 분광광도계로 잔류농도를 분석하였음
- 불소의 용출차단 효율을 평가하고자 증류수에 불소(Fluoride) 10 mg-F/L의 농도가 되도록 인위적으로 오염시켜 실험을 진행하였음
- 반응성 피복소재로는 산처리된 적니를 사용하였고, 반응성 피복소재의 두께를 달리하여 실험을 진행하였음

- 시료는 잔류된 불소의 농도를 알아보기 위하여 Ion Chromatography로 잔류농도를 분석하였음
- 파랑모형수조 실험에서는 퇴적물내 존재하는 중금속의 용출차단 효율을 평가하고자 K항과 M항에서 채취한 퇴적물을 산으로 인위적으로 처리하여 중금속(Cr, Cu, Cd, Ni, As, Zn, Pb)을 용출차단 실험을 진행하였음
- 모형수조 퇴적층 수조에 오염퇴적물을 5 cm 높이로 채우고 각각의 피복소재를 약 1, 3, 5 cm 두께로 충전하였으며, P항에서 채취한 해수를 여과, 멸균하여 유량(유속) 10 ml/min의 조건으로 수평흐름과 임펠러(Impeller)로 60 rpm의 파랑을 주어 실험을 수행하였음
- 파랑모형수조 실험은 56일간 수행하였고 반응조에 유입된 오염해수는 주 1회 샘플링하여 pH, EC를 측정하였으며, 중금속의 용출정도를 알아보기 위하여 ICP 분석을 실시하였음
- M항의 파랑모형수조 실험 후 퇴적물과 흡착소재간 반응에 의한 퇴적물 내 중금속 안정화/고정화 효율을 평가하기 위하여 Tessier(1979)가 제안한 단계별 추출법(Sequential Extraction Method)을 적용하여 실험을 진행하였음
- 각 모형수조의 퇴적물 표층(Surface)과 표층 1 cm 깊이(Subsurface) 지점에서 시료를 채취하여 퇴적물 내 존재하는 중금속을 1단계(Exchangeable Fraction), 2단계(Bound onto carbonate Specially Adsorbed Fraction), 3단계(Bound onto Fe-Mn Oxide Fraction), 4단계(Bound onto Organic and Sulphide Fraction), 5단계(Residual Fraction)로 구분하여 안정화/고정화 효율을 평가하였음

### ③ K항, M항 오염퇴적물 내 오염물질 용출저감 및 안정화를 위한 피복소재 성능 평가 및 적용(안) 도출

#### ㉠ 제강슬래그(Steel Slag)의 인(Phosphorus) 용출차단

- 제강슬래그를 피복하지 않은 조건에서는 인의 상대농도가 0.5에 도달하는데 5시간이 소요되며, 제강슬래그의 피복두께가 1, 3, 5 cm로 증가함에 따라서 0.5 C/C0에 도달하는데 5, 69, 141 시간이 소요됨
- 0, 1, 3, 5 cm로 각각 피복 두께를 설정하였을 때 완전히 파과되는데 걸리는 시간은 14, 24, 201, 207 시간이 소요됨(그림 III-가-26[a])
- 유입수 농도에 따른 영향을 알아보기 위하여 10, 20, 40 mg-P/L로 달리하고, 제강슬래그의 피복두께는 5 cm로 유량은 1 ml/min으로 수행하였을때 10 mg-P/L는 상대농도(Relative concentration) 0.5에 도달하는데 141 시간이 소요되었고, 20 mg-P/L는 45 시간, 40 mg-P/L는 25 시간이 소요되었음
- 파과에 도달하는데 걸리는 시간은 217 시간(10 mg-P/L), 125 시간(20 mg-P/L), 117 시간(40 mg-P/L)가 소요됨(그림 III-가-26[b])
- 유입수의 유량을 1, 2, 3 ml/min, 인의 농도는 10 mg-P/L, 제강슬래그의 피복두께는 5 cm로 설정하고 실험을 수행한 결과 0.5 C/C0 도달시간이 각 141, 89, 29시간으로 나타남
- 파과에 도달하는 시간은 각 217, 221, 169 시간으로 나타남(그림 III-가-26[c])



(a: 두께, b: 농도, c: 유량)

[그림 III-가-26] 제강슬래그의 피복두께, 농도, 유량에 따른 인 용출차단 효율

- 컬럼실험 조건에 따른 파과곡선 분석 결과, 제강슬래그의 두께가 증가함에 따라서 컬럼에서 인의 제거량( $q_{total}$ )은 증가하였고, 제거율은 제강슬래그의 두께가 5 cm인 경우, 다른 실험조건과 뚜렷한 차이를 나타냄
- 파과곡선과 파과곡선 분석 결과를 통해 제강슬래그의 효율적인 인 용출차단은 3 cm 이상이어야 하며, 효율적인 인 용출차단을 위해서는 5 cm 이상의 피복두께가 필요함
- 인 유입농도에 따른 파과곡선 분석결과 유입농도가 증가함에 따라서 제거율은 감소함,
- 인 유입유량에 따른 컬럼실험 결과 제거율은 주입 유량의 증가에 따라서 제거율이 감소하는 것으로 나타남

[표 III-가-26] 제강슬래그의 두께, 농도, 유량에 따른 인 용출차단 효율

Exp	Steel Slag depth(cm)	Influent concentration (mg/L)	Flow rate (ml/min)	$M_{total}$ (mg)	$q_{total}$ (mg)	Removal (%)
1	0	10	1	9.9	4.6	46.7
2	1	10	1	14.7	6.0	40.6
3	3	10	1	120.6	48.1	39.6
4	5	10	1	130.2	76.9	59.1
5	5	20	1	298.8	58.9	19.7
6	5	40	1	607.2	64.5	10.6
7	5	10	2	274.8	125.4	45.7
8	5	10	3	304.2	97.9	32.2

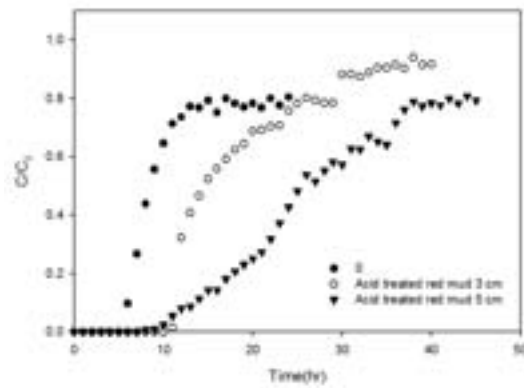
#### ㉔ 산처리 적니(Acid treated red mud)의 불소(Fluoride) 용출차단

- 산처리 적니를 피복하지 않은 조건에서는 불소의 상대농도가 0.5에 도달하는데 8시간이 소요되며, 산처리 적니의 피복두께가 3, 5 cm로 증가함에 따라서 0.5  $C/C_0$ 에 도달하는데 14, 25 시간이 소요됨
- 0, 3, 5 cm로 각각 피복 두께를 설정하였을 때 완전히 파과되는데 걸리는 시간은 15, 34, 42 시간이 소요됨(그림 III-가-27)
- 컬럼실험 조건에 따른 파과곡선 분석 결과, 산처리 적니를 피복하지 않은 컬럼과 3 cm 두께로 피복한 컬럼의 제거율은 차이가 없었고, 산처리 적니를 5 cm두께로 피복한 컬럼의 불소 제거량( $q_{total}$ )은 증가하였음, 이에 효율적인 불소 용출차단을 위해서는 5 cm 이상

의 피복두께가 필요함

[표 III-가-27] 산처리 적니의 두께에 따른 불소 용출차단 효율

Exp	Acid treated red mud depth(cm)	Influent concentration (mg/L)	Flow rate (ml/min)	$M_{total}$ (mg)	$Q_{total}$ (mg)	Removal (%)
1	0	10	0.5	1.200E-02	5.393E-03	44.9
2	3	10	0.5	1.2	0.5	44.9
3	5	10	0.5	1.8	1.1	61.0

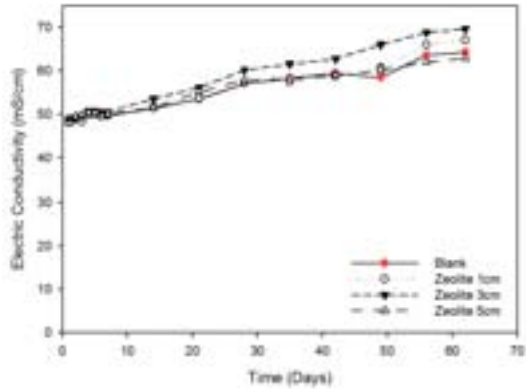


[그림 III-가-27] 산처리 적니의 두께에 따른 불소 용출차단

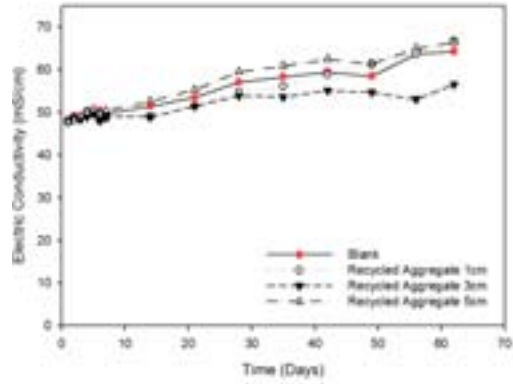
Ⓢ 유력 대상 해역 오염특성별 피복효율평가를 위한 파랑모형수조 실험

■ K항 오염퇴적물 피복효율 평가

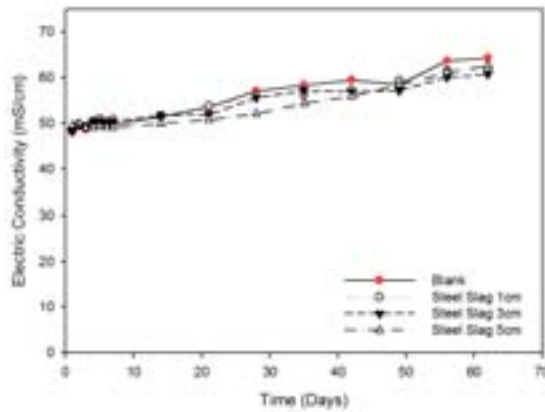
- 전기전도도의 변화



제올라이트



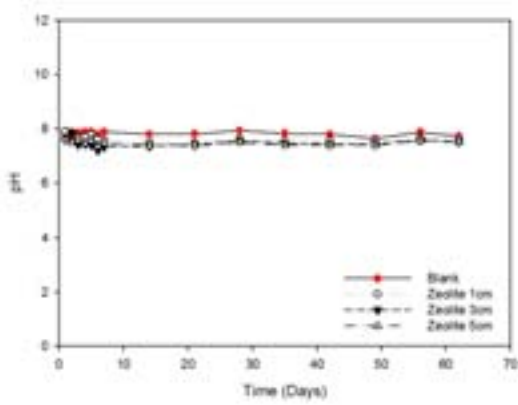
순환골재



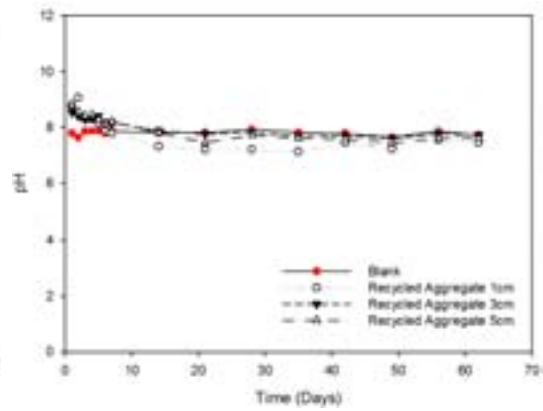
제강슬래그

[그림 III-가-28] 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그 피복에 따른 EC 변화

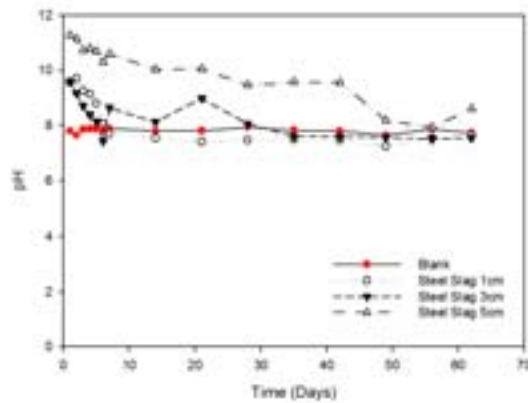
- K항 오염퇴적물의 오염물질 용출차단을 위하여 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그를 피복하고 실험기간동안 EC(전기전도도)를 측정하였음
- 측정결과 대조군과 큰 차이가 없는 것으로 나타나 피복에 따른 환경변화가 미미한 것으로 판단됨
  - 수소이온농도의 변화
- K항 오염퇴적물의 오염물질 용출차단을 위하여 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그를 피복한 후 피복에 따른 pH 경향을 살펴본 결과 제올라이트와 순환골재는 대조군과 큰 차이가 없었음
- 제강슬래그의 경우 pH가 높아지는 경향을 보이고 있으나, 피복 1 cm는 10일 전, 피복 3 cm의 경우 약 30일 전, 5 cm는 50일 경에 안정화가 되었음



제올라이트



순환골재



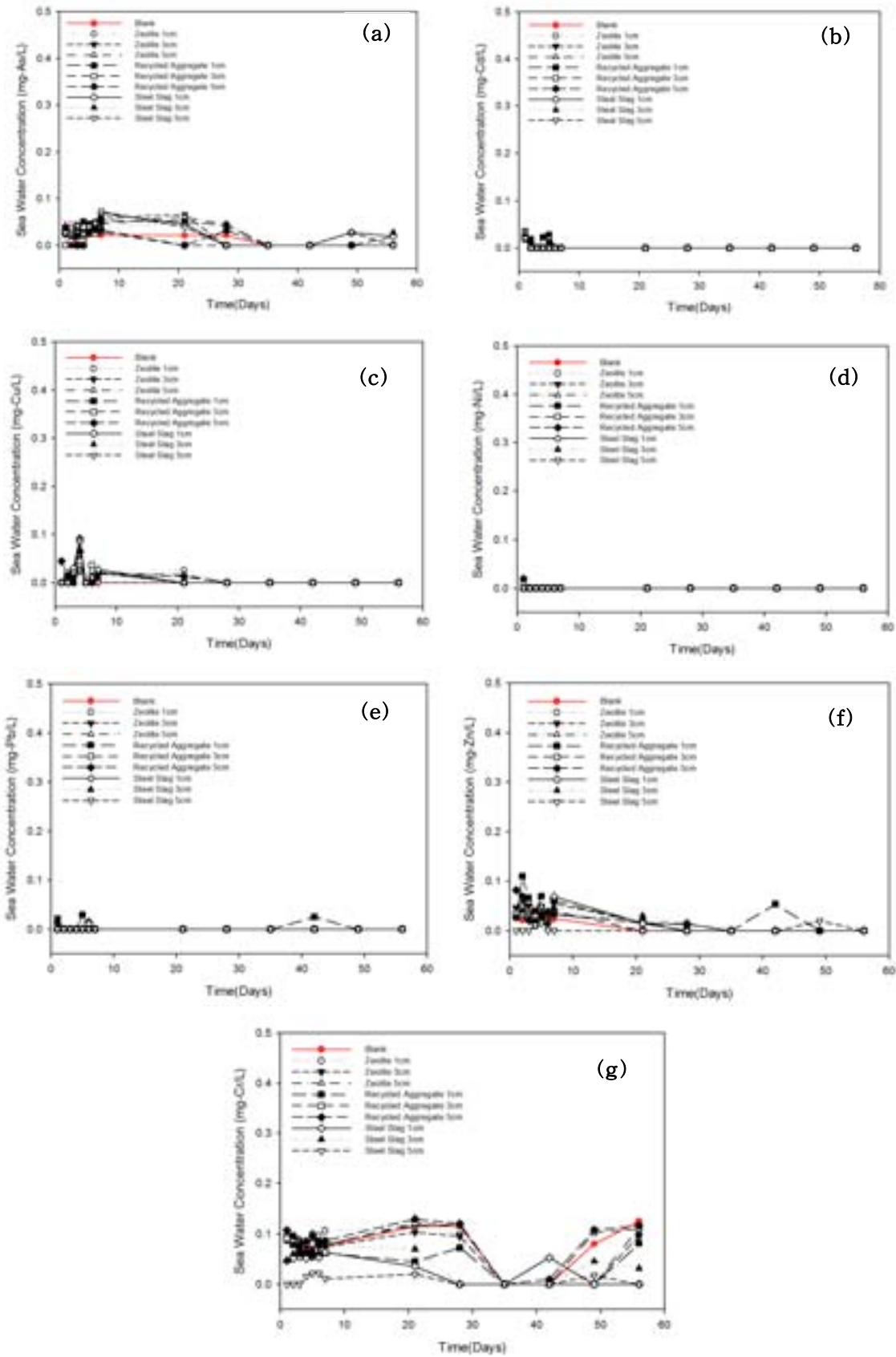
제강슬래그

[그림 III-가-29] 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그 피복에 따른 pH 변화

- 중금속 용출차단 효율

- K항의 오염퇴적물을 수조 내 충전 후 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그를 각 1, 3, 5 cm 피복하여 오염물질의 용출차단 효율을 평가하였음
- 그 결과 As, Cd, Cu, Pb, Ni, Zn와 같은 중금속류는 용출농도가 미미하거나 용출이 일어나지 않았음 이에 따른 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그의 용출차단 효율의 평가가 어려움
- Cr의 경우 실험 초기부터 미미하게나마 지속적으로 용출이 일어나는 현상이 나타났으며 이에 따른 제올라이트, 순환골재의 용출차단 효율은 매우 낮은 것으로 판단됨, 반면 제강슬래그의 경우 1, 3, 5 cm 피복 시 Cr의 용출차단에 효과적인 것으로 나타남





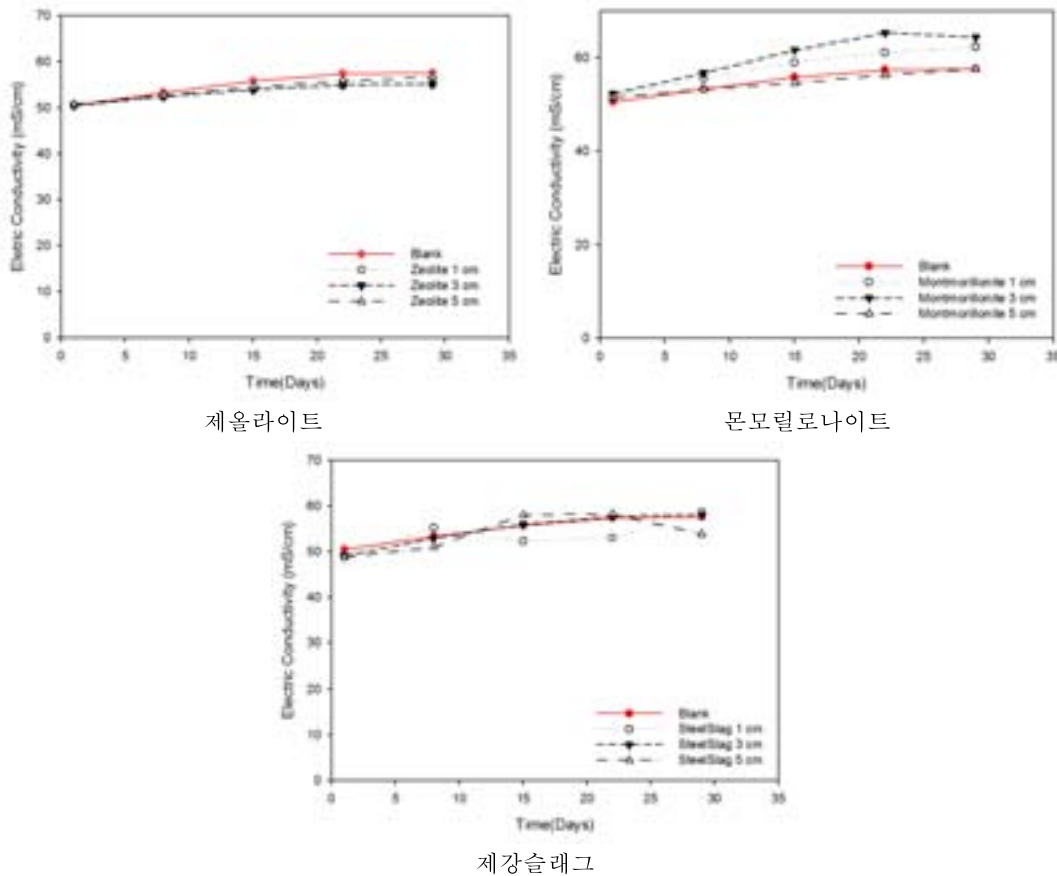
(a: As, b: Cd, c: Cu, d: Ni, e: Pb, f: Zn, g: Cr)

[그림 III-가-30] 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그 피복두께에 따른 K항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단

## ■ M항 오염퇴적물 피복효율 평가

- 전기전도도의 변화

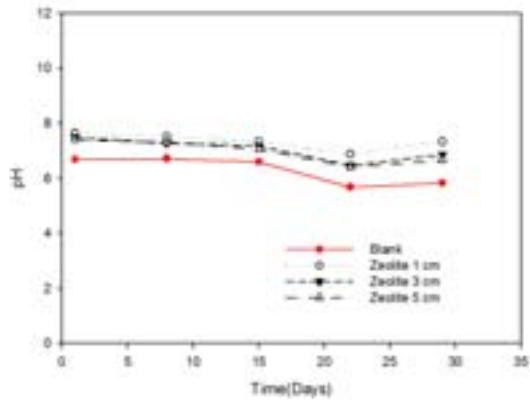
- M항 오염퇴적물의 오염물질 용출차단을 위하여 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그를 피복하고 실험기간동안 EC(전기전도도)를 측정하였음
- 측정결과 몬모릴로나이트 1, 3 cm 피복 시 EC가 실험 22일까지 상승하는 경향을 보였지만 다시 안정화 되는 추세임, 반면 제올라이트, 제강슬래그는 대조군과 큰 차이가 없는 것으로 나타나 피복에 따른 환경변화가 미미한 것으로 판단됨



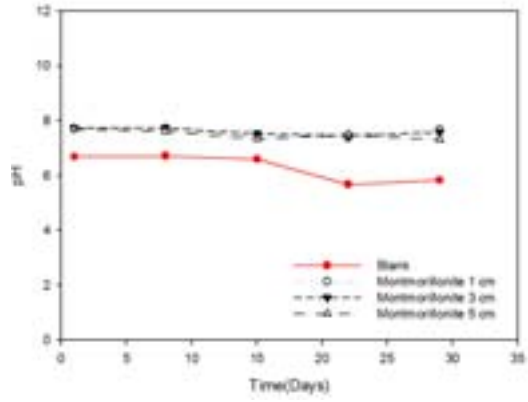
[그림 III-가-31] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복에 따른 EC 변화

- 수소이온농도의 변화

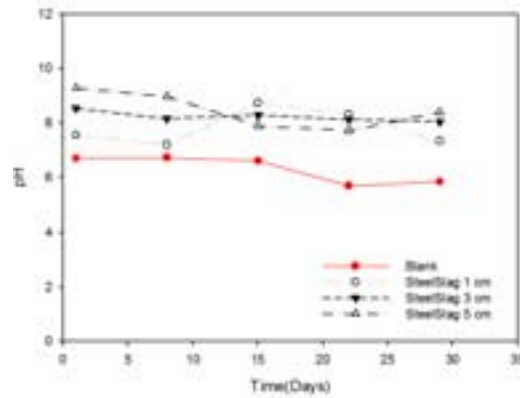
- M항 오염퇴적물의 오염물질 용출차단을 위하여 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그를 피복한 후 피복에 따른 pH 경향을 살펴본 결과 실험 초반 제올라이트, 몬모릴로나이트가 대조군 보다 높은 pH를 나타내었지만 일반적인 해수 환경이라 할 수 있는 pH 8이하이며, 제강슬래그의 경우 3, 5 cm 피복시 pH 8을 초과하였지만 선행 연구의 결과로 판단하면 시간이 지남에 따라 안정화 될 것으로 사료됨



제올라이트



몬모릴로나이트

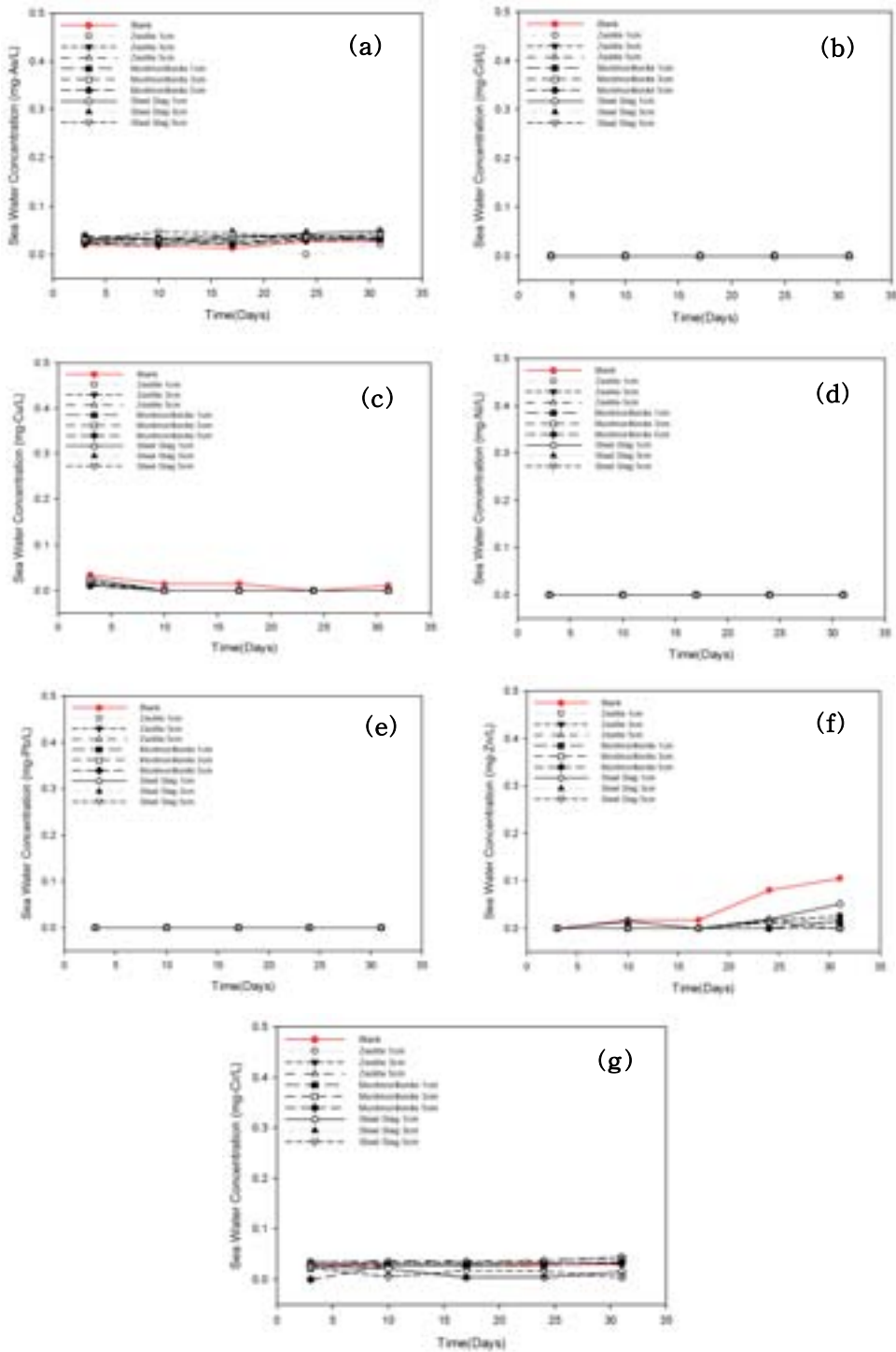


제강슬래그

[그림 III-가-32] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복에 따른 pH 변화

- 중금속 용출차단 효율

- M 항의 오염퇴적물을 수조 내 충전 후 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그를 각 1, 3, 5 cm 피복하여 오염물질의 용출차단 효율을 평가하였음
- 그 결과 Pb, Ni, Cd와 같은 중금속은 피복을 하지 않은 대조군에서도 용출이 일어나지 않았으며, Cu, Cr, As는 용출농도가 미미하였음, 반면 Zn의 경우 실험기간동안 용출이 지속되는 결과를 나타냄
- M 항에서 용출되는 중금속 중 As는 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복에 따른 용출차단효율이 없는 것으로 나타났고, Zn, Cu는 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 모두 피복에 따른 용출차단 효율이 높은 것으로 나타남
- 반면 Cr의 경우 제강슬래그의 피복에 따른 용출차단이 효과적인 것으로 판단됨



(a: As, b: Cd, c: Cu, d: Ni, e: Pb, f: Zn, g: Cr)

[그림 III-가-33] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복두께에 따른 M항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단

④ K항, M항 해역별 피복층 두께 결정(안) 도출

㉞ K항 오염퇴적물의 피복두께에 따른 중금속 용출차단효율

○ 실험기간 중 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그의 피복두께에 따른 용출차단효율을 표 III-가-28과 같이 나타내었으며, 상대적으로 용출이 활발한 Cr의 차단에는 제강슬래그 5

cm 피복이 74.53%로 높았음

- 이에 결론적으로 K항은 Cr의 용출이 상대적으로 쉬울 것으로 판단되며, K항의 오염퇴적물 내 Cr 용출차단을 위해서는 제강슬래그 5 cm피복이 효과적일 것으로 사료됨

[표 III-가-28. 제올라이트] 순환골재, 제강슬래그 피복두께에 따른 K항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단 효율

%	Zeolite 1 cm	Zeolite 3 cm	Zeolite 5cm	Recycled Aggregate 1 cm	Recycled Aggregate 3 cm	Recycled Aggregate 5 cm	Steel Slag 1 cm	Steel Slag 3 cm	Steel Slag 5 cm
As	8.38	7.69	0.00	0.63	24.67	15.38	7.69	7.69	7.69
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	2.10	2.90	1.67
Cu	14.71	20.76	20.83	18.84	6.06	12.53	0.00	0.48	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	5.00	3.60	6.37	1.98	9.37	7.66	11.30	9.69	45.00
Cr	<b>10.53</b>	<b>13.05</b>	<b>8.77</b>	<b>26.49</b>	<b>1.39</b>	<b>1.24</b>	<b>46.21</b>	<b>33.40</b>	<b>74.53</b>

Ⓢ M항 오염퇴적물의 피복두께에 따른 중금속 용출차단효율

- 실험기간 중 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그의 피복두께에 따른 용출차단효율을 표 III-가-29와 같이 나타내었음
- Cd, Ni, Pb는 피복을 하지 않은 실험 대조군에서조차 용출이 발생하지 않았음
- As에 대한 용출차단은 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 모두 매우 낮은 것으로 나타남
- 반면 Cu, Zn은 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 모두 피복 두께와는 뚜렷한 차이가 없이 모두 효과적인 것으로 나타남
- Cr은 제강슬래그의 피복에 따른 용출차단 효율이 상대적으로 높게 나타남
- 이에 결론적으로 M 항은 Cu, Zn, Cr의 용출이 상대적으로 쉬울 것으로 판단되며, M 항의 오염퇴적물 내 Cu, Zn, Cr의 복합적인 용출차단을 위해서는 제강슬래그 5 cm피복이 효과적일 것으로 사료됨

[표 III-가-29] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복두께에 따른 M 항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단 효율

%	Zeolite 1 cm	Zeolite 3 cm	Zeolite 5cm	Montmorill onite 1 cm	Montmorill onite 3 cm	Montmorill onite 5 cm	Steel Slag 1 cm	Steel Slag 3 cm	Steel Slag 5 cm
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	86.41	89.10	90.41	90.26	91.57	91.79	80.52	86.92	85.10
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	68.70	88.57	92.66	96.09	100.00	100.00	58.92	75.93	95.91
Cr	0.00	0.00	0.00	0.03	22.18	4.60	52.15	69.77	55.32

(다) 현장모사 조건에서의 수조실험에서 용출 차단 및 안정화 성능 평가결과로부터 최소 피복두께(5cm) 결정(K항, M항)

① K항 오염퇴적물의 피복두께에 따른 중금속 용출차단효율

- 실험기간 중 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그의 피복두께에 따른 용출차단효율을 표 III-가-30과 같이 나타내었으며, 상대적으로 용출이 활발한 Cr의 차단에는 제강슬래그 5 cm 피복이 74.53%로 높았음.
- 이에 결론적으로 K항은 Cr의 용출이 상대적으로 쉬울 것으로 판단되며, K항의 오염퇴적물 내 Cr 용출차단을 위해서는 제강슬래그 5 cm피복이 효과적일 것으로 사료됨.

[표 III-가-30] 제올라이트, 순환골재, 제강슬래그 피복두께에 따른 K항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단 효율

%	Zeolite 1 cm	Zeolite 3 cm	Zeolite 5cm	Recycled Aggregate 1 cm	Recycled Aggregate 3 cm	Recycled Aggregate 5 cm	Steel Slag 1 cm	Steel Slag 3 cm	Steel Slag 5 cm
As	8.38	7.69	0.00	0.63	24.67	15.38	7.69	7.69	7.69
Cd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	2.10	2.90	1.67
Cu	14.71	20.76	20.83	18.84	6.06	12.53	0.00	0.48	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	5.00	3.60	6.37	1.98	9.37	7.66	11.30	9.69	45.00
Cr	10.53	13.05	8.77	26.49	1.39	1.24	46.21	33.40	74.53

② M항 오염퇴적물의 피복두께에 따른 중금속 용출차단효율

- 실험기간 중 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그의 피복두께에 따른 용출차단효율을 표 III-가-31과 같이 나타내었음.
- Cd, Ni, Pb는 피복을 하지 않은 실험 대조군에서조차 용출이 발생하지 않았음.
- As에 대한 용출차단은 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 모두 매우 낮은 것으로 나타남.
- 반면 Cu, Zn은 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 모두 피복 두께와는 뚜렷한 차이가 없이 모두 효과적인 것으로 나타남.
- Cr은 제강슬래그의 피복에 따른 용출차단 효율이 상대적으로 높게 나타남.
- 이에 결론적으로 M 항은 Cu, Zn, Cr의 용출이 상대적으로 쉬울 것으로 판단되며, M항의 오염퇴적물 내 Cu, Zn, Cr의 복합적인 용출차단을 위해서는 제강슬래그 5 cm피복이 효과적일 것으로 사료됨.

[표 III-가-31] 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬래그 피복두께에 따른 M 항 오염퇴적물 내 중금속 용출차단 효율

%	Zeolite 1 cm	Zeolite 3 cm	Zeolite 5cm	Montmorillonite 1 cm	Montmorillonite 3 cm	Montmorillonite 5 cm	Steel Slag 1 cm	Steel Slag 3 cm	Steel Slag 5 cm
As	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cd	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	86.41	89.10	90.41	90.26	91.57	91.79	80.52	86.92	85.10
Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	68.70	88.57	92.66	96.09	100.00	100.00	58.92	75.93	95.91
Cr	0.00	0.00	0.00	0.03	22.18	4.60	52.15	69.77	55.32

(4) 피복공법의 환경 안정성 검토

(가) 피복에 따른 중·장기 환경안정성에 관련된 국내·외 사례분석을 통한 피복 장기 안정성 검토 및 환경안정성 평가안 제시

① 피복소재의 생태계 영향 평가(J. Näslund, 2012)

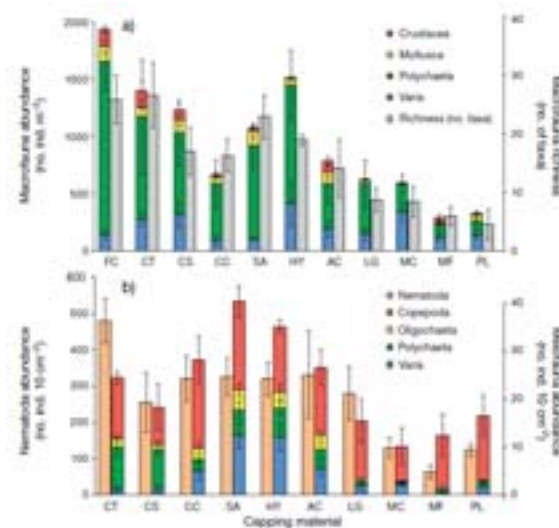
- 연구기관 : Stockholm University, Department of Systems Ecology and Department of Applied Environmental Science, AquaBiota Water Research(스웨덴), Norwegian Institute for Water Research, Norwegian Geotechnical Institute, University of Life Sciences, Department of Plant and Environmental Sciences(노르웨이)
- 저서 생물군이 보존된 box-core 퇴적물 시료를 이용하여 피복소재의 구조적(미생물, 매크로 및 미소저서생물군), 기능적(퇴적물-수계 영양염류 흐름, 산소투과, 미생물 생성) 관점에서 영향을 평가함.
- 활성탄, Kraft-lignin, 모래, 점토, 3가지 산업부산물(Kraft-lignin, 굵은 석회, 가는 석회)을 사용(피복실험 조건은 아래 표 III-가-32와 같음)

[표 III-가-32] 피복실험 조건

Treatment	Definition	Material added	Approx. layer thickness (mm)	Grain size distribution (% sand/% silt/% clay)	TOC (% dry wt $\pm$ SD)
FC	Field control	-	-	7:48:45	2.7 $\pm$ 0.3
CT	Control	No addition	-	7:48:45	2.7 $\pm$ 0.3
CS	Clay, suspended	Suspension of pre-glacial clay collected from the Oslo fjord	20	2:50:48	0.8 $\pm$ 0.0
CC	Clay, cut	Lumps, ca. 1 cm <sup>3</sup> pre-glacial clay (same as CS)	20	2:50:48	0.8 $\pm$ 0.0
SA	Sand	Natural sand (moraine deposits)	20	100:0:0	0.2 $\pm$ 0.1
HY	Hyperite	Machine-processed hyperite stone (Gabbro) from Hodmark, Norway	20	87:11:2	0.3 $\pm$ 0.1
AC	Activated carbon	Powdered (1 kg m <sup>-2</sup> ) in saturated NaCl solution	1-2	>90%: <180 $\mu$ m 80%: <40 $\mu$ m	84.0 $\pm$ 2.0
LG	Kraft-lignin	Processed lignin suspended with clay in seawater (50/50 clay/lignin) (2 kg lignin m <sup>-2</sup> )	10	43%: 40-100 $\mu$ m 57%: <40 $\mu$ m (same clay as CS)	63.0 $\pm$ 1.0
MC	Marble, coarse	CaCO <sub>3</sub> residues from paper production, regularly discharged in suspension to the fjord recipient	20	88:12:0	0.3 $\pm$ 0.0
MF	Marble, fine	As MC, but a finer fraction	20	12:60:28	0.0 $\pm$ 0.0
PL	Plaster	Gypsum plaster, CaSO <sub>4</sub> , produced from H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> and CaCO <sub>3</sub> as an industrial waste product	20	14:69:17	0.5 $\pm$ 0.1

- 준설은 막대한 양의 오염퇴적물 재부유로 해양 생물상에 악영향을 끼치며, 대안으로 제시 되는 피복기술의 생태학적 영향을 평가
- 연구에 사용된 비교란 box-core 시료는 노르웨이의 Langangsfjorden와 Grenland fjords 에서 채취하여 사용(광범위한 dioxin 오염해역)
- 모든 피복소재에서 대조군에 비해 최소 하나 이상의 관점에서 변화가 분석
- 일반적으로 점토, 모래 등은 영향이 크지 않으나, 산업부산물의 경우 좀 더 영향을 미치 며, 특히 생물종 다양성에 대한 영향이 관찰됨.
- 생물군 다양성 미치는 영향 분석 결과. (a) Macrofauna communities (coloured bars: abundance; grey bars: richness) and (b) meiofauna abundances in the different capping material treatments at the end of the experiment. Note the different scale used for Nematoda in (b). Data: mean  $\pm$  SE. FC: field control, CT: control, CS: suspended clay, CC: cut clay, SA: sand, HY: hyperite, AC: activated carbon, LG: Kraft-lignin, MC: coarse marble, MF: fine marble, PL: plaster





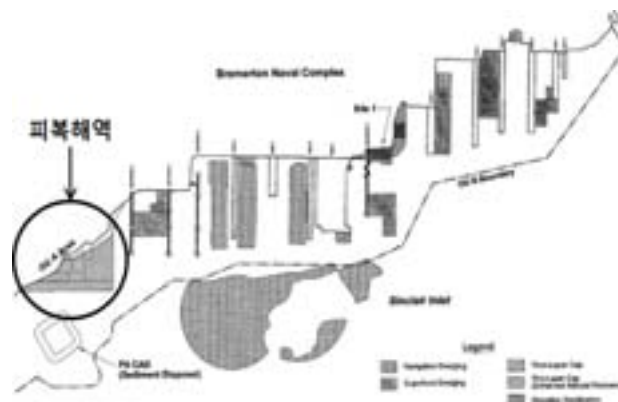
FC: field control, CT: control, CS: suspended clay, CC: cut clay, SA: sand, HY: hyperite, AC: activated carbon, LG: Kraft-lignin, MC: coarse marble, MF: fine marble, PL: plaster

[그림 III-가-34] (a) Macrofauna communities (coloured bars: abundance; grey bars: richness) and (b) meiofauna abundances in the different capping material treatments at the end of the experiment

- Functional endpoints: (a) bacterial production at the end of the experiment, (b) phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) flux, (c) silicate ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) flux, (d) ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) flux, (e) nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) flux, and (f) oxygen ( $\text{O}_2$ ) flux. Data: mean  $\pm$  SD

## ② 국외 피복 정화 적용 및 모니터링 사례(Puget Sound Naval Shipyard(미국, 워싱턴주, Bremerton)) 분석

- 현장 특성 : Puget Sound Naval Shipyard(미국, 워싱턴주, Bremerton). 1350 acre의 미해군항
- 오염문제
  - PCBs와 수은에 의한 오염. 어류 조직 내, 퇴적물 내 오염물 농도 과다
- 사용된 정화방법
  - 준설, 피복, 자연정화를 위치 특성에 맞춰 적용
  - 정화공법 현장 적용도



- 피복 면적 : 13 acre
- Thin layer cap(최소두께 20 cm)
- Thin layer cap(3 ft): 퇴적층 격리, 침식 방지, 청정 생태 서식지 유지 목적

○ 피복 시공 모니터링 기법 중 해당 현장 적용 예

Potential Needs	Monitoring Metrics Output Need Description	Tools	Site Monitoring Plan	Critical Issues Identified in Metrics	Site Monitoring Program Notes
Bioturbation	Assessment of bioturbation potential to perturb and possibly remove from sediment repository during remedial activity.	Bioturbation testing	Not used		The minimal amount of capping was assumed to result in no significant displacement of impacted sediments and would not lead to bioaccumulation of PCBs in biota in surrounding areas.
		Caprol ingersions	Not used		
		Positive sampling devices	Not used		
		Sediment sample (benthic) analysis: bioavailability, extraction	Not used		
Capping design specifications	Assess lateral extent, thickness, and/or uniformity of cap.	Sediment and water sample chemical analysis	Not used		Several tools were used to confirm the ROD requirement that the cap meets the minimum specifications of a 3-foot thickness and to verify complete coverage of target areas.  Subbottom profiling was conducted during and after placement of the cap to map surface features of the cap and estimate thickness of the cap. Sampling followed same sampling pattern as earlier bathymetric surveys.  Bathymetric survey conducted before, during, and after placement of the cap to understand site and map surface features of the cap and estimate thickness of the cap. Site managers recommended that both pre-remedial and post-remedial bathymetry be conducted using the same methods and equipment.  Four shallow (non-penetrating) cores collected and inspected visually to confirm presence and thickness of cap.  Surface photography (underwater video) was conducted to supplement acoustic sub-bottom profiling and bathymetry. Conducted before and after construction to understand site and map surface features of the cap.
		Acoustic sub-bottom profiling	Used	Used primarily to detect detecting extent, thickness, and uniformity of cap. One of the tools with highest levels of certainty in addressing monitoring need.	
		Bathymetric survey	Used	Other acoustic survey methods (e.g., side scan sonar, acoustic sub-bottom profiling) may be more accurate, widely available, inexpensive, and easily interpreted.	
		Sediment coring	Used	May serve best as validation tool for continuous methods such as acoustic sub-bottom profiling. Coring may damage cap.	
		Sediment profile photography	Not used		
Sediment surface photography	Used	Linked to sediment surface and linked by site conditions (suitably). Easily interpreted visual method.			

Potential Needs	Monitoring Metrics Output Need Description	Tools	Site Monitoring Plan	Critical Issues Identified in Metrics	Site Monitoring Program Notes
Downstream deposition	Assessment of downstream deposition to surface sediments.	Sediment sample chemical analysis	Used	Reused sample tool. May be difficult to separate contamination associated with remedial activity from background contamination and requires collection of pre-remedial samples from fringe/pollut locations prior to remedial activity.	Downstream deposition of cap material and chemically impacted sediment was hypothesized to occur near the fringe (0-20 ft) of the cap. Monitoring results demonstrated deposition up to 500 ft from fringe of the cap.  Chemical analysis of sediment samples collected near fringe (0-20 ft) of some caps following cap placement. Samples were analyzed for physical parameters and CECs. Data were compared to samples collected before cap placement. Site managers recommended that surface and deep samples be collected.  Sediment traps were used to indicate sediment deposition as far as 1500 ft from the fringe of the cap.
		Sediment profile photography	Used	Traps are point based. Allow visual inspection. May be difficult to visually distinguish freshly deposited layers or verify cap material at contaminated sediments nearby.	
		Sediment traps	Not used		
		Current velocity measurement	Not used		
Ecological suitability of cap material	Assessment of cap material for use as a clean substrate capable of supporting ecological recovery.	Transect survey	Not used		Sediment used for cap was characterized prior to use to ensure suitability for ecological recovery.  Chemical analysis was likely used to address the suitability of cap sediment, with results compared to ecological screening criteria to ensure that chemicals in cap material were not high.
		Bioturbation testing	Not used		
		Cap sample chemical analysis	Likely used	Simple test, although single chemical analysis may underestimate toxicological and bioaccumulation risks.	
		Cap sample physical analysis			
Physical suitability of cap material	Assessment of cap material for engineering purposes.	Macrobenthic community census			Sediment used for cap was characterized prior to use to ensure engineering purposes.  Among standard analyses to evaluate long-term physical stability of cap material as surface sediment, physical analysis were conducted to evaluate the potential for cap material to liquefaction during seismic events, as the site is located in an area that has a relatively high incidence of earthquakes.
		Cap sample physical analysis	Used	Highly relevant tool for assessing physical characteristics of capping material.	

Potential Needs	Monitoring Metrics Output Need Description	Tools	Site Monitoring Plan	Critical Issues Identified in Metrics	Site Monitoring Program Notes
Sediment resuspension	Assess physical water quality impairment due to sediment resuspension during remedial activity.	Continuous suspended sediment monitoring	Used	Can provide continuous, real-time information on suspended sediments.	Water column monitoring conducted to ensure that water quality criteria were not exceeded outside the designated dilution zones and that a turbidity were did not form, indicating suspension of cap material or chemically impacted sediments.  Continuous monitoring probes were deployed in water column to measure endpoints (e.g., turbidity) associated with suspended sediment.
		Discrete suspended sediment monitoring	Not used		
		Real-time monitoring	Not used		
Ecotoxicological risks	Assessment of toxicity to plants and possibly benthic species due to chemicals released due to sediment resuspension during remedial activity.	Toxicity testing	Recommended later	Real-time monitoring tool. Monitoring data may be affected by conditions independent of remedial activity or contamination.	Site managers recommended assessing toxicity in the water column and sediments potentially affected by downstream deposition during cap placement due to the potential to disturb contaminated sediment during remedial activity. Assessment focused on the water column, although in-repository, site managers recommended sediment toxicity monitoring.  In-repository, site managers recommended that the monitoring tool would have been useful in evaluating toxicity in sediments potentially affected by downstream deposition during cap placement. Monitoring sediments in the buffer zone around the cap both before and after placement may have been useful.  Only water column was monitored. Chemical oxygen and demand water quality parameters monitored continuously with the use of probes. Toxicity samples were obtained for COCs and compared to water quality guidelines.
		Dyeed systems	Not used		
		Passive sampling devices	Not used		
		Sediment sample chemical analysis (bioavailability extraction)	Not used		
		Real-time monitoring	Not used		
		Sediment and water sample chemical analysis	Used	Accessible and simple. Can be compared to established criteria; however, simple chemical analysis usually overestimates toxicological risks.	

○ 피복성능 모니터링 기법 중 해당 현장 적용예

Potential Needs	Monitoring Metrics Output Need Description	Tools	Site Monitoring Plan	Critical Issues Identified in Metrics	Site Monitoring Program Notes
Chemical flux from sediment	Assessment of chemical flux from sediment surface to water column.	Passive sampling devices	Not used		Not specifically addressed due to the stability of most areas of the site.
		Seepage meter/Flux sampler	Not used		
		Toilet Probe	Not used		
Chemical natural recovery processes	Assess the progress of or potential for degradation, detoxification, or chemical sequestration of chemicals.	Surface sediment pore water	Not used	High confidence is needed to describe permanent degradation and transformation. No ability to provide information on chemical sequestration of contaminants.	The natural attenuation of chemicals in sediment (generally PCBs) was assumed to be the primary remedial strategy for most of the site. Addressing this need simultaneously addressed several remedial goals addressing the reduction of bioaccumulation risks and human health risks over time.  PCB concentrations in sediment were measured over time, with natural recovery modeling to address chemical natural recovery rates. This tool would not be able to identify reductions in PCB bioavailability (chemical sequestration) that may occur as a result of natural attenuation.
		Sediment sample chemical analysis	Used		
		Passive sampling devices	Not used		
		Sediment sample chemical analysis (bioavailability extraction)	Not used		
		Surface sediment pore water laboratory biodegradation experiments	Not used		
		Sediment redox potential	Not used		
Physical natural recovery processes	Assess stability of sediment during recovery and/or isolation of impacted sediment over time.	Acoustic sub-bottom profiling	Not used	Not addressed, as it was assumed the primary means of attenuation would be via chemical transformation of PCBs rather than natural physical isolation of sediment.	
		Hydrodynamic surveys	Not used		
		Sediment surface photography	Not used		
		Side scan sonar	Not used		
		Instrumented corers	Not used		
		Sediment sample physical analysis	Not used		
		Sediment analysis	Not used		

Potential Needs	Monitoring Metrics Output Need Description	Tools	Site Monitoring Plan	Critical Issues Identified in Metrics	Site Monitoring Program Notes
Cap stability	Assess settlement and stability of cap over time.	Acoustic sub-bottom profiling	Likely used	Used primarily to detect changing sediment thickness and uniformity of cap. One of the tools with highest levels of confidence in assessing metrics (e.g., see next table). Other acoustic survey methods (e.g., side scan sonar, acoustic sub-bottom profiling) may be more accurate. Works quickly and easily interpreted.	Monitoring conducted to identify erosion of the cap, sediment movement, or mixing of cap with underlying sediment. For all tools, Site managers recommended that the same equipment and methods used to assess cap design construction be used for the monitoring need.  Acoustic sub-bottom profiling was used to verify capping design specifications during and immediately after placement of the cap; however, it was unclear if it was used to assess cap performance years after cap construction.  Bathymetric survey was conducted along same sampling points as prior surveys. Thickness of the cap (in fit) not a limiting factor in the use of bathymetry for measuring the stability of the cap.  Shallow (non-penetrating) cores collected and inspected visually to confirm presence and thickness of cap.  Sediment profile photography was used to visually inspect cap profile.
		Bathymetric survey	Used		
		Sediment coring	Used		
		Sediment profile photography	Used		
		Sediment surface photography	Not used		
		Sediment cores	Not used		
		Side scan sonar	Not used		
Chemical flux through cap	Assessment of chemical flux through the cap.	Passive sampling devices	Not used	Chemistry of subsurface profile easily interpreted to address contaminant migration through cap, although potential to disrupt cap.	Monitoring focused on the transport of PCBs from underlying sediment.  Samples of cap analyzed chemically for PCBs. Cap samples collected via shallow coring in and penetrating cap, and vertical profile of PCBs in core used to assess vertical migration of PCBs towards cap surface.
		Sediment sample chemical analysis	Used		
		Seepage meter/Flux sampler	Not used		
		Toilet Probe	Not used		
Impacts on hydrodynamics and sediment transport	Impacts on hydrodynamics and sediment transport.	Hydrodynamic analysis	Not used	Local hydrodynamics were not assumed to be affected by the size and thickness of the cap relative to size and depth of the basin.	

③ 피복공법 선정을 위한 현장 필수 여건(US EPA 기준)

○ 적절한 피복소재의 확보가 용이할 것

- 피복에 적합한 기반시설 현황(부두, 파일, 매립 케이블 등)
  - 항해 등 예상되는 사용 용도를 위한 수심 확보여부
- 대형선박 정박 등 피복 손실을 유도할 수 있는 활동이 적거나 억제 가능한 경우
- 장기 위해성 저감이 저서 생태 교란보다 중요하거나, 피복에 의한 생태계 개선효과가 기대되는 경우
- 피복에 적합한 수력학적 조건
- 지하수 유속이 한계이상의 오염물 용출을 유도하지 않을 정도로 느린 경우
- 퇴적물이 피복을 견딜 수 있는 강도를 가질 것
- 피복층을 통한 오염물 이동이 낮을 것
- 오염이 확인된 제한된 영역을 가질 것

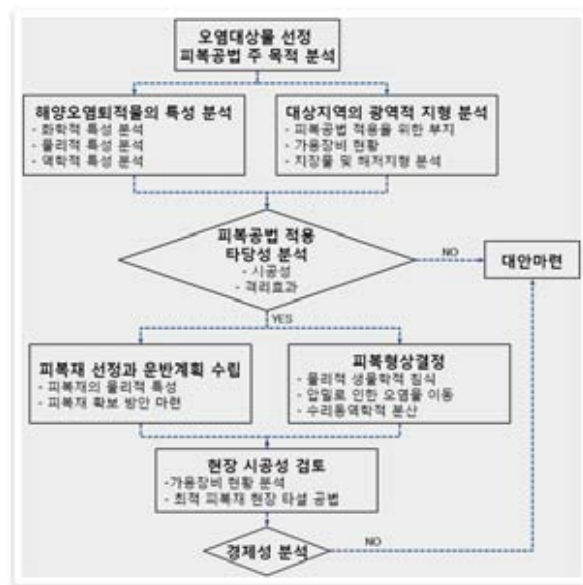
#### ④ 현장피복공법 적용을 위한 선정 조건(본 연구팀 제시안)

- 유해화학물질 오염도(CIHC>2인 구역의 정화지수(CIHC) 평균값 × 정점분포율)가 유기물 오염도(CIET>6인 구역의 정화지수(CIET) 평균값 × 정점분포율) 보다 낮은 경우
- 현장피복 조치 후 선박의 통항 등 최소한의 수심 확보가 가능한 경우
- 대상 지역에서 피복 형상 장기간 유지가 가능한 경우(예: 해황(30년 평균)을 고려하여 피복이 가능하고, 선박의 투묘, 양묘 등 악영향이 예상되는 행위가 없는 해역)
- 지형 특성으로 시공이 곤란하지 않은 경우(예: 경사면 또는 피복에 의한 퇴적층 붕괴 등은 시공이 곤란한 지역)

#### ⑤ 국외 현장 피복공법의 적용 단계(US EPA, 2005)

- 오염퇴적물 처리 후 최종 목표 농도
- 오염퇴적물이 위치한 지역의 지리적 특성
  - 지리적 측면: 수심, 조류, 저면 경사, 파동에너지
  - 사용적 측면: 항해, 해저스포츠, 상수원, 폐수 방류
  - 공학적 측면: 오염퇴적물 하부 지층구조와 물리적 특성, 기반암의 깊이, 지수흐름
- 오염퇴적물의 특성
  - 물리적, 화학적, 생물학적 특성
  - 심도별 특성과 확장 영역
  - 오염퇴적물 처리 후 최종 목표 농도를 고려한 피복재 포설 면적 선정
- 현장 피복공법의 1차 적용성 검토
  - 1에서 3까지의 데이터를 토대로 현장 피복공법의 1차 적용성 검토
- 피복재 선정
  - 운송과 하역을 고려한 피복재 활용지 선정
- 피복재의 형상 결정
  - 피복 두께와 필요시 반응성 물질을 고려한 다층형 피복 적용
  - 반드시 장기적 측면에서 접근: 화학적 격리와 생물학적 교란, 압밀, 침식을 고려
  - 일반적으로 사용되는 깨끗한 사질토가 대상지역에서 침식에 민감한 경우, 굵은 자갈을 이용한 보호층 형성: 필요시 부직포를 이용한 사질토와 자갈의 경계면 분리

- 장비와 최적 피복시공법 선정
- 설계된 피복공법으로 최종 목표 농도 확보 가능성 평가
- 모니터링과 유지관리 시스템 구축
  - 시공 모니터링: 피복재 시공에서 발생하는 오염퇴적물 교란 정도 확인
  - 장기 모니터링: 피복공법의 성능평가 및 필요시 추가 피복 시공
- 경제성 분석
- 아래 그림 III-가-35는 현장 피복공법 적용 10단계를 도식화하여 보여주고 있음. 10단계의 과정에서 가장 공학적 접근이 필요한 피복형상결정과 피복재 포설.



[그림 III-가-35] 현장 피복공법 적용 10단계

### ⑥ 현장 피복 설계, 시공을 위한 6대 요소(본 연구팀 제안)

- 피복재 선정(Capping Materials)
  - 피복재 선정에서 피복재 시공방법은 우선적으로 고려되어야 함. 일반적으로 사용되는 시공방법으로는 수면에서나 일정수심에서 피복재를 투하하여 자중에 의한 침강으로 오염퇴적도 위에 포설함.
  - 만약 피복재의 자중이 적고 입자크기가 적은 경우에는 수중에서 부유하며 주변 수질을 악화 시킬뿐만 아니라 조류의 흐름에 영향을 받아 피복재가 목표지점에 도달(오염퇴적물 상부)하기 어려움.
- 피복형상(Cap Dimension)
 

피복형상은 피복보호층(Armor layer), 피복재 두께(Thickness), 피복범위(Area)를 포함. 피복재의 두께는 오염퇴적물과 피복재의 물리적 화학적 특성, 조류와 파동에너지, 저서생물의 교란, 피복재의 자중에 따른 오염퇴적물의 압밀, 그리고 시공방법을 고려하여 결정함.

  - 따라서 저서생물의 특성, 압밀, 침식, 시공공법, 그리고 장기적 오염물 이동(이류와 확산)을 고려하여 최종 두께를 선정함.
  - 선행연구 결과에 따르면 피복재의 두께가 50cm인 경우 저서생물의 교란에 따른 피해는 미미하다고 밝혀졌음(Brannon et al., 1985).

- 피복재 두께를 결정하는 순서를 정리하면 다음과 같다.
  - 태풍을 포함한 파동에너지에 따른 침식 검토
  - 지진에 의한 교란 검토
  - 저서생물에 의한 교란 검토
  - 피복재와 오염퇴적물의 압밀 검토
  - 시공방법 검토
  - 이류(advection)와 확산(dispersion)을 고려한 오염물 이동 검토

○ 침식(Erosion)

- 파동에너지에 따른 침식의 영향을 고려하기 위해서는 외적 환경요인을 분하는 것이 가장 중요함.
- 또한 피복재의 생애주기를 설정하고 생애주기 내에서 발생 가능한 최악의 기상조건을 반영하여 설계하는 것이 바람직함.
- 미공병단에서는 수치해석 모델(USACE Long Term FATE, LTFATE)을 이용하여 가상의 태풍조건을 고려한 피복재의 입자크기에 따른 침식영향 두께를 산정하였음 (Palermo et al., 1999).
- 이밖에도 지진에 따른 교란과 오염퇴적물의 액상화에 따른 피복재의 함몰 파괴를 고려할 필요가 있음. 또한 오염퇴적물이 위치한 저면의 지질학적 형상, 특히 저면 경사로 지진에 따른 오염퇴적물과 피복재의 자중으로 인한 흐름을 고려해야 함.

○ 저서생물 교란(Bioturbation)

- 생물교란이란 저서동물들의 섭이 또는 서식처 형성과정에서 야기되는 저서 환경의 물리화학적 교란현상을 의미함.
- 퇴적물 및 표층수의 교란을 야기하는 저서동물의 모든 행동은 크게 굴진, 잠행, 포복 등의 운동과 서식을 위한 굴착 활동 그리고 먹이 섭취와 배설 활동 등으로 구분할 수 있으며, 이에 따라 굴착, 관개, 퇴적입자의 섭취 및 정화 등이 생물교란에 포함됨.
- 생물교란 활동상의 수직분포의 이해는 효과적인 피복 디자인을 위하여 도움이 되며, 이에 따라 저서생물군들의 생물학적 활동성의 이해가 가장 중요함. 또한 생물교란이 발생하는 깊이는 미생물의 활동이나 기질의 특성(결정입도, 유기물함량, 공극수 등)에 영향을 받으며, 일반적인 생물교란은 깊이에 따라 3개의 구역으로 나눌 수 있음.
- 과거의 경험을 비추어 볼 때, 생물교란은 주로 대형 저서동물의 지속적인 퇴적물 내지화학적 반응과 물질 플럭스를 바꾸는 역할을 하고 있지만 얼마나, 어떻게 이들 과정을 통제하는가에 관한 내용은 아직 풀리지 않고 있어 생물교란에 관한 정량적, 역학적인 연구는 미비함.

○ 압밀효과(Consolidation)

- 피복재의 자중에 따른 피복재와 오염퇴적물에 압밀이 발생함. 오염퇴적물의 초기 높은 함수율로 인해 비교적 작은 상재하중에서 압밀이 발생함.
- 압밀로 인해 발생하는 오염퇴적물의 침하량과 압밀속도의 정확한 예측을 위해서는 불교란 시료를 이용한 실내실험이 필수적임.

○ 반응성 피복재(Reactive Capping Materials)

- 최근에는 현장 피복의 여러 방법 중 반응성물질을 사용하여 오염된 퇴적토를 물리적으로 분리하거나, 보다 적극적으로 오염물질을 흡착하거나 분해할 수 있는 반응성 피복재(Active/Reactive caps)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있음.
- 반응성 피복재는 흡착(sorption), 반응(reaction), fixation, 또는 투수성을 감소시키는 방

---

법을 통하여 기존의 방법보다 적극적으로 오염물의 이동을 제어하는 방법으로 기존의 Permeable Reactive Barrier(PRB)와 반응면에서 거의 유사하여 수평형(Horizontal) PRB라는 이름으로 불리기도 함

(나) 피복정화 후 모니터링을 위한 평가지표 개발

① 정화시공 및 장기 모니터링 방안 사례(US EPA, 2005)

○ 정화전후 모니터링은 다음의 기본적 요건을 충족해야 함.

- |                               |
|-------------------------------|
| 1. 설계와 성능기준 만족                |
| 2. 정화요구 기준에 부합하는 단기 정화성능 및 효율 |
| 3. 최종 정화목표에 부합하는 장기 정화 효율     |

○ 정화효율 평가 항목

- |  |
|--|
| 1. 중간 분석   |
| - 단기 정화 성능 : 피복형상, 단기 정화기준 충족                              |
| - 장기 정화 성능 : 최소 5년간 정화 기준 충족 여부, 피복의 침식 여부                 |
| - 단기 위해성 저감 : 5년 후 어류 조직 내 오염물 농도, 저서 독성 저감 여부, 종 다양성, 풍부성 |
| 2. 핵심 분석   |
| - 장기 위해성 저감 : 어류 내 오염물 농도의 최종 목표 달성 여부, 생태계 복원 완료 여부       |

○ 환경모니터링 계획을 위한 핵심 요소

- |  |
|--|
| 1. 모니터링의 목적 설정                           |
| 2. 모니터링 목적과 분석한계의 적정성                    |
| 3. 현장 외 오염물질 유입 등에 의한 영향 파악              |
| 4. 모니터링 주기와 기간                           |
| 5. 측정결과에 대한 공개 범위와 접근성                   |
| 6. 모니터링 결과에 대한 분석 책임자                    |
| 7. 모니터링 데이터 해석에 적합한 방법론(통계학적 또는 정량적) 결정. |
| 8. 모니터링 결과에 따른 대응에 대한 합의                 |
| 9. 모니터링 결과의 대응에 대한 소통방법과 책임              |
-

<p>1단계. 모니터링 계획의 목적 결정</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 현장 활동 평가 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 활동 목적 정의</li> <li>- 활동 중점 정의</li> </ul> </li> <li>2. 모니터링 목적 정의</li> <li>3. 이해관계자 조언</li> </ol>
<p>2단계. 모니터링 계획 가설 개발</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 모니터링 개념모델 정립</li> <li>2. 모니터링 가설 및 과제 정립</li> </ol>
<p>3단계. 모니터링 의사결정 규칙 개발</p>
<p>4단계. 모니터링 계획 수립</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 요구 데이터 선정</li> <li>2. 모니터링 계획 경계 결정</li> <li>3. 데이터 수집 방법 결정</li> <li>4. 데이터 분석 방법 결정</li> <li>5. 의사결정방법 확립</li> <li>6. Monitoring quality assurance project plans (QAPPs) 준비</li> </ol>
<p>5단계. 모니터링 분석 및 결과 특정화 수행</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 데이터 수집 및 분석 수행</li> <li>2. 1-4단계에서 개발된 data quality objectives(DQOs) 모니터링에 따른 결과 평가(필요시 데이터 수집 및 분석 재수행)</li> <li>3. 분석결과를 의사결정방법에 따라 평가</li> </ol>
<p>6단계. 관리 의사결정 방안 수립</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 모니터링 결과가 의사결정안에 따라 현장 활동 성공 평가될 때 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 활동 및 모니터링 종료</li> </ul> </li> <li>2. 모니터링 결과가 의사결정안에 따라 현장 활동 성공으로 평가되지 않지만, 긍정적인 방향으로 진행시 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 활동 및 모니터링 계속</li> </ul> </li> <li>3. 모니터링 결과가 의사결정안에 따라 현장 활동 성공으로 평가되지 않을 때 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 원인 및 불확실성 분석 수행</li> <li>- 현장 활동 및 모니터링 계획 재검토, 시행</li> </ul> </li> </ol>

○ 6단계 site monitoring 계획 및 시행 방안

**② 피복정화 후 모니터링 평가(안)**

○ 적용 가능한 모니터링 기법



물리적 측정	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 퇴적물 지구물리학적 특성</li> <li>- 수계 물리적 측정 (탁도, TSS 등)</li> <li>- 수심측량 데이터 : 처리 전후 수심 비교</li> <li>- Side scan sonar data</li> <li>- Settlement data</li> <li>- Sediment profile camera data</li> <li>- Subbottom profiler data</li> </ul>
화학적 측정	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 표층 및 퇴적층 화학적 분석, 생분해성 평가, 공극수 오염물 분석, TOC 분석 등 수행</li> <li>- 시료의 채취 방법: Grab sampler, coring device, 직접 수계 측정, 표층수 채취</li> </ul>
생물학적 측정	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저서 생물종 분석: population size, diversity 평가</li> <li>- 독성 측정 : 생물에 대한 오염물의 급성 및 만성 독성 측정</li> <li>- 조직 시료 채취</li> <li>- Caged Fish/Invertebrate Studies</li> <li>- Sediment profile camera Studies</li> </ul>

○ 피복공법 모니터링 방안

모니터링 단계	요소	방법	분석	빈도/위치
피복 시공	피복소재 질	피복소재 시료	물성 분석	사용량의 5%
	피복 두께 및 범위	수심측량 저서 프로파일	피복 층 두께 피복 면적	기준 초기 시공 전체면적 최종 분석
		SPC  Core	피복층 두께  피복층 두께 및 물리적 특성 화학적 특성	기준 초기 시공 결정된 격자  결정된 격자
	퇴적물 재부유	Plum tracking ADCP	재부유 퇴적물 수계 화학적 분석	5% 시공
퇴적물 이동	퇴적물 시료	퇴적물 화학적 물성	피복경계 근처 퇴적층	
피복 성능	Recolonization	SPC 저서생물군 분석	피복층 두께 Recolonization, population size, diversity	결정된 격자, 재착생 속도에 따른 빈도
	물리적 격리	저서 프로파일 수심 측량	피복층 두께	연1회 (특정 지역) 매5년, 전체 조사
	화학적 격리	Core 필요시, peeper 또는 seepage meter	물성 퇴적물, 공극수 화학적 분석	매5년, 결정된 격자
특이 외력 대응	피복 보존	저서 프로파일 SPC Core		태풍 또는 지진 후

---

**(5) 실증(시범)사업 실시를 위한 참여기업 선정 및 기술이전**

**(가) 4차년도 예산이 시범사업이 가능한 범위로 확보 조건 수행**

**① 현장적용시험 공동 수행 참여기업 선정**

- 4차년도에 현장적용시험을 위한 예산 확보가 이루어지지 못하여 현장 시험을 위한 참여 기업을 확정하지 않음.
- 4차년도에는 현장 시공 전단계로 대상해역(K항)에 대한 지형 정밀조사, 피복형상 실시설 계를 실시함.
- 공동연구기관에서는 실시설계를 위한 지형정밀 조사기관 선정작업을 4차년도 개시 후 즉 시 수행함.
- 5차년도에 현장적용시험을 시행하기 위하여 오염퇴적물 정화사업에 대한 전문기술을 보 유하고 있는 (주)신대양과 공동 시행을 위한 협의 완료

**② 현장적용시험 참여기업에 대한 기술이전**

- 5차년도 현장적용시험을 공동시행하기로 결정된 기업과 4차년도 중 기술이전 실시 협의 완료됨.
- 개발된 연구성과는 공공기반기술의 성격을 가지므로 특정기업에 의한 독점이 불가능하므 로 현장적용 시행 기업에 통상실시권만 이전 추진함.

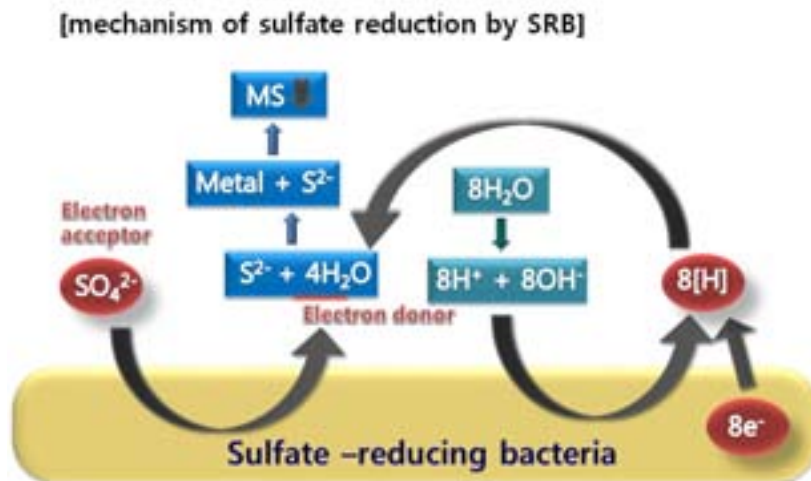
**나. 오염정화를 위한 생물소재 개발 및 평가**

**(1) 미생물 담체를 활용한 해양오염 퇴적물 내 중금속 안정화기술 확립**

**(가) 선정된 미생물소재의 해양오염 퇴적물 내 중금속 안정화에 대한 현장적용 적합성 제시**

- 중금속에 대한 생물학적 처리 중 하나는 미생물에 의해 흡착되는 성질을 이용하여 금속이 나 금속화합물이 변형되거나 고형화 또는 무독화되는 것임. 생물흡착 과정은 음이온으로 하전된 미생물의 표면 특성을 이용하여 미생물을 흡착공정의 흡착제로 사용 가능한 방법 으로서 다당류,단백질 및 지방질로 구성된 미생물 세포벽의 음전하 작용기(카르복실기, 인산기, 수산기 등)가 용해상태에서 양전하를 띠는 중금속을 흡착할 수 있음.
- Cd, Cu, Zn, Ni 은 용해상태에서 양이온인 중금속으로 미생물의 생체 흡착 및 생체 축적 에 의한 안정화가 가능함.
- As, Cr 등의 몇 가지 금속은 용해된 상태에서 산소와 결합한 음이온을 형성하여 최종적 으로 음전하를 띠거나 전하를 띠지 않으므로 정전기적 결합을 통한 제거하기 어려우며, 물리적 방법으로도 제거효율이 매우 낮은 금속임.
- Cr은 자연계에서 낮은 농도로도 생물체에 암, 돌연변이, 태아기형 등을 유발하기 때문에 대표적인 환경오염 물질로 지정됨.
- Cr은 전이금속의 형태로 -2가에서 +6가까지 다양한 형태가 있지만 그 중에서 +3가와 +6 가가 가장 안정한 형태이기 때문에 자연계에서 대부분을 차지함.
- Cr(IV)는 물에 대한 용해성이 크고, 독성을 나타내고 있으며 강력한 산화제이기 때문에 암을 특히 유발할 수 있으며, 이에 반하여 Cr(III)는 독성과 이동도가 낮고 주로 중성의 pH에서 불용성 산화물의 형태인 침전물로 존재함. 따라서 중성의 pH에서 Cr(III)는 침전 물을 형성하므로 바닷물 용액 속으로 유입이 어렵기 때문에 Cr(VI)를 Cr(III)으로 환원시 켜 제거하는 방법을 이용할 수 있음.

- 비소는 금속이 갖는 성질과 비금속이 갖는 성질을 동시에 갖고 있는 준중금속으로서, 토양, 물, 공기, 암석 등에서 널리 분포하고 있음.
- 비소는 -3, 0, +3, +5 등 4개의 원자가 상태로 존재할 수 있는데 일반적으로 환원 상태 하에서는 3가 비소[arsenite; As(III)]가, 산화된 공기 중에서는 5가 비소 [arsenate; As(V)]가 안정된 형태임.
- 3가 비소가 5가 비소에 비해 용해도 및 이동도가 높다고 알려져 있으며, 5가 비소의 이동도가 낮은 이유는 이들이 지중에 다량 존재하는 철, 망간, 알루미늄 산화물에 흡착되거나 공침됨으로써 토양이나 퇴적물 입자에 의해 상대적으로 용이하게 고정되어 있기 때문임.
- 본 연구에서는 해양오염 퇴적물 내의 중금속을 안정화시키기 위한 미생물소재로 황산염 환원균(sulfate reducing bacteria, SRB)의 일종인 *desulfovibrio desulfuricans*을 선정하였음. Kousuke Ishii의 연구에서 보면 SRB는 산소가 거의 없는 환경인 토양의 퇴적층이나 수중에 흔히 존재하는 자생미생물임을 알 수 있음. 본 과제의 공동연구팀인 해양대학교 송영채 교수 연구팀의 연구자료에 의하면 실제 우리나라 해양 퇴적물 내에 존재하는 미생물 중 약 10%를 차지하는 것으로 보고하고 있음.
- SRB는 산소가 많이 존재하지 않는 퇴적층이나 수중에 흔하게 존재하는 미생물로  $SO_4^{2-}$ 를  $H_2S$ 로 환원시키는 특징이 있는데 이 Hydrogen sulfide는 생태계에 유해한 영향을 미친다고 알려져 있음. 그러나 SRB가 생성하는 Hydrogen sulfide의 양이 환경에 미치는 영향은 적다고 판단됨.
- 홋카이도 대학의 Kazuo AOMURA팀의 연구에서 보면 hydrogen sulfide는 환경에 유해하지만 SRB에 의해 생성되는 농도는 토양의 퇴적층에 많이 존재하는 많은 metal 이온들과 결합이 가능하고 특히 해수 및 해양퇴적물 내에 높은 농도로 존재하는 ferrous ion과의 쉽게 결합하여 iron sulfide의 형태로 바뀌며 이로 인하여 soluble한 상태에서 insoluble한 형태로 안정화되어 더 많이 존재하게 됨.



[그림 III-나-1] SRB의 sulfate 환원 메커니즘

Table 3. Results of sediment grain size and contents of extracted trace metals in sediments of the Mokpo coastal area(July 2002: Summer)

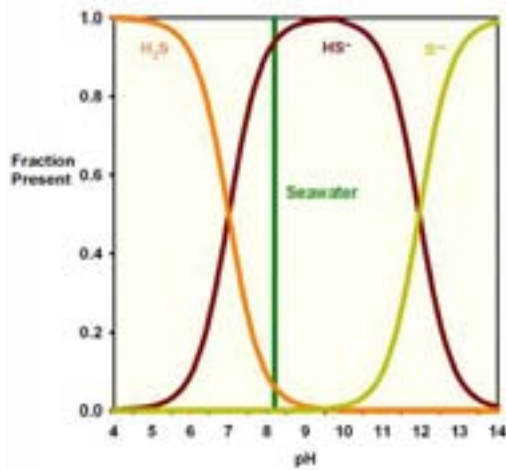
Station	63 $\mu$ m <sup>a</sup>	Fe <sup>b</sup>	Mn <sup>b</sup>	Zn <sup>b</sup>	Cu <sup>b</sup>	Pb <sup>b</sup>	Cr <sup>b</sup>	IL <sup>a</sup>	AVS <sup>c</sup>
1	52.1	5465.8	160.74	43.868	9.1357	13.365	8.6821	9.45	0.136
2	52.4	5720.9	222.71	65.382	9.5023	14.178	4.5133	8.11	0.040
3	53.0	3959.7	201.76	32.064	9.5071	10.232	5.7391	6.50	0.037
4	56.6	3355.1	274.47	23.407	9.6669	8.0244	3.4935	5.85	0.010
5	55.4	3073.2	247.18	22.745	5.3859	8.6312	5.4436	6.42	0.065
6	67.1	2454.4	327.41	82.154	3.7042	8.4846	7.9482	4.58	0.012
7	77.5	3269.5	282.55	24.212	3.6316	9.1814	4.0964	5.19	0.056
9	23.2	1465.0	238.82	27.394	1.5602	7.5367	1.8868	2.38	0.014
10	90.3	3006.9	216.68	48.240	4.4217	5.2647	8.3267	5.51	0.007
11	95.0	3265.1	236.55	19.297	5.6716	9.8298	5.1728	5.39	0.049
12	96.8	3087.1	215.19	-	-	7.5561	5.0601	5.46	0.009
13	98.0	3253.5	330.55	21.638	3.4568	5.6699	1.8840	5.96	0.040
14	98.7	3422.4	351.91	-	5.2523	9.7219	3.3115	6.43	0.052
15	70.4	2455.7	237.85	16.927	2.5950	5.6092	1.8655	-	0.015

Table 4. Results of sediment grain size and contents of extracted trace metals in sediments of the Mokpo coastal area(Nov. 2002: Fall)

Station	63 $\mu$ m <sup>a</sup>	Fe <sup>b</sup>	Mn <sup>b</sup>	Zn <sup>b</sup>	Cu <sup>b</sup>	Pb <sup>b</sup>	Cr <sup>b</sup>	IL <sup>a</sup>	AVS <sup>c</sup>
1	99.50	4797.1	92.69	55.756	25.302	37.920	1.6505	11.74	1.988
2	98.40	4384.6	169.85	37.671	17.176	31.222	0.9733	13.39	2.589
3	60.99	2883.3	367.30	18.796	13.552	25.954	ND	8.75	0.028
4	97.17	3288.1	233.81	28.797	7.405	32.677	0.9600	10.15	1.078
5	49.82	2383.8	311.13	23.225	14.512	29.437	0.4111	7.98	0.421
6	71.21	2481.0	208.13	15.858	7.269	23.124	0.4834	7.61	0.056
7	78.59	1963.3	283.12	15.249	7.217	23.612	0.6400	8.19	0.008
8	99.96	2857.5	272.35	23.137	11.564	27.702	0.3046	10.70	0.762
9	99.37	2927.7	503.14	39.269	26.126	28.454	0.8967	9.11	0.015
11	61.60	2612.6	365.40	21.430	10.226	34.412	0.7605	9.13	0.030
12	95.44	2914.2	204.18	20.086	7.466	32.092	0.7424	8.60	0.025
13	92.54	3010.2	303.82	21.759	8.996	31.675	1.0862	8.94	0.009
16	99.69	2720.8	175.76	32.077	26.590	35.428	0.9024	8.66	0.042
17	94.26	2015.2	152.46	11.606	5.848	23.972	0.3888	4.22	0.004

[그림 III-나-2] 목표 해안 주변의 퇴적물에 존재하는 여러 종류의 메탈 이온의 농도

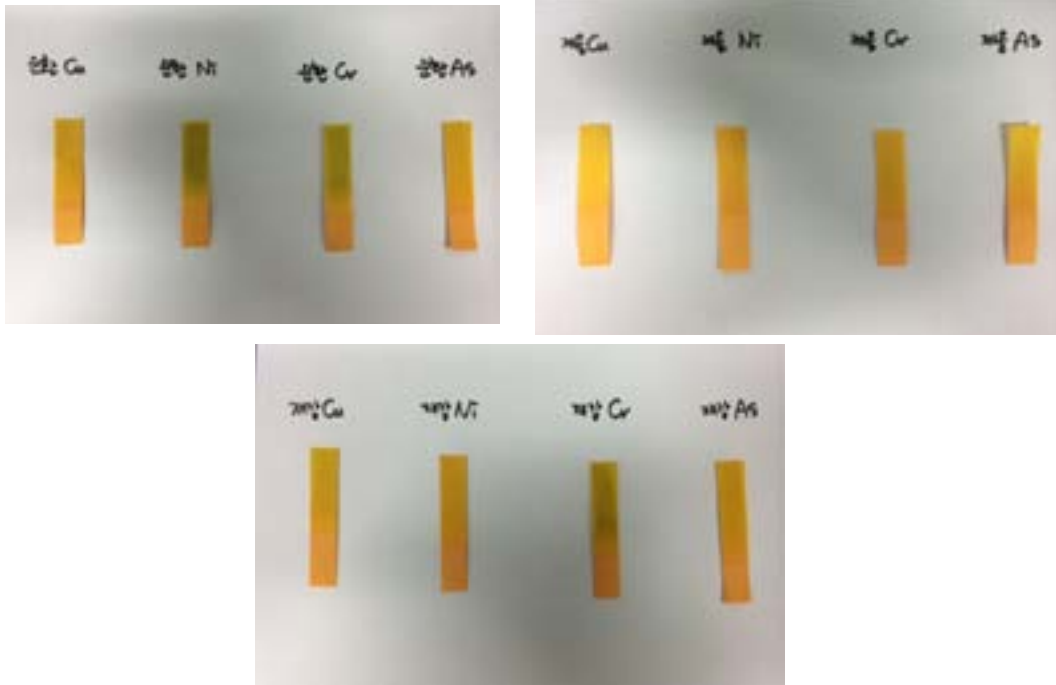
- 해양퇴적물에 존재하는 무기물들의 농도를 살펴보면 위의 표에서 나타나듯이 Fe의 농도가 계절에 따라 약간의 차이는 있으나 최소 2000ppm이상의 농도를 나타내는 것을 알 수 있음. 즉, 해양 퇴적물 내에서 Hydrogen sulfide와 결합 가능한 Fe의 농도가 높은 것을 알 수 있음.



Species	Relative concentration
H <sub>2</sub> S	0.06
HS <sup>-</sup>	0.94
S <sup>2-</sup>	0.00016

[그림 III-나-3] 해수의 pH에서 존재하는 Hydrogen sulfide의 형태 및 비율

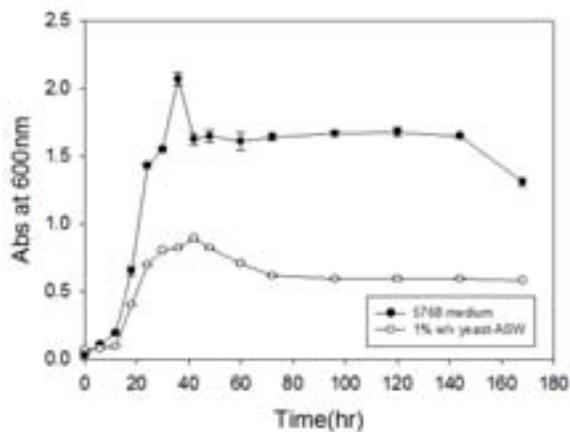
- Hydrogen sulfide는 H<sub>2</sub>S로 존재할 때 더욱 독성이 큰 것으로 알려져 있는데 위 그림 III-나-3에서의 Hydrogen sulfide의 pH에 따른 존재 형태를 보면 바닷물의 pH와 가까운 pH8에서 다른 메탈 이온들과 결합하기 쉬운 HS<sup>-</sup>의 형태로 대부분 존재하는 것을 알 수 있음.
- SRB로 인해 발생하는 Hydrogen sulfide가 중금속 안정화를 시키는 것 이외에 더 많은 양이 생성되어 해수로 용출될 경우 해수 내에도 ferrous ion과 같은 metal ion이 존재하기 때문에 이와 결합할 수 있으므로 사실상 SRB의 대사로 인해 생성 되는 Hydrogen sulfide가 생태계에 미치는 영향은 미미할 것이라 생각됨.
- Hydrogen sulfide의 농도가 높을 경우 pH가 낮아지는 경향을 보이는데 본 연구에서 미생물 담체로 실험한 인공바닷물 배지의 pH변화를 pH 페이퍼를 이용하여 측정해 보았을 때 pH가 7-8을 나타내는 것으로 보아 Hydrogen sulfide의 생성량이 많지 않은 것으로 사료됨.



[그림 III-나-4] 인공바닷물 배지의 pH 변화

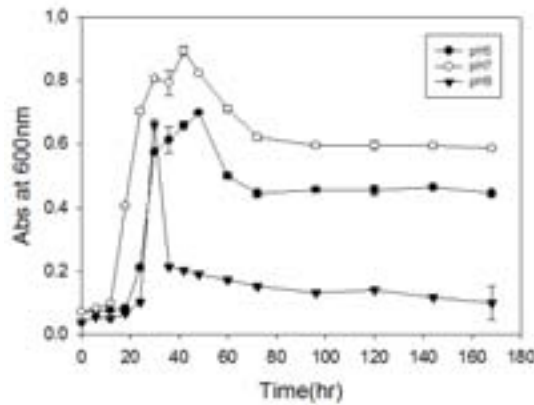
(나) 해양오염물 제거능이 우수한 최적의 균주 확보 및 미생물담체 제작을 위한 배양조건의 최적화

- 2차년도에 확보한 3종의 균주(*Enterobacter cloacae* (KCTC 1685)와 *Enterobacter cloacae subsp. cloacae* (KCTC 2361), 그리고 *Desulfovibrio desulfuricans* (KCTC 5768) 중 균의 여러 조건에 따른 성장률을 고려하여 *Desulfovibrio desulfuricans*를 최종 균주로 확보함.
- SRB의 한 종류인 *Desulfovibrio desulfuricans*를 이용해 실험한 내용을 바탕으로 담체에 효율적으로 고정화하기 위한 배양의 최적화 연구를 실시함.



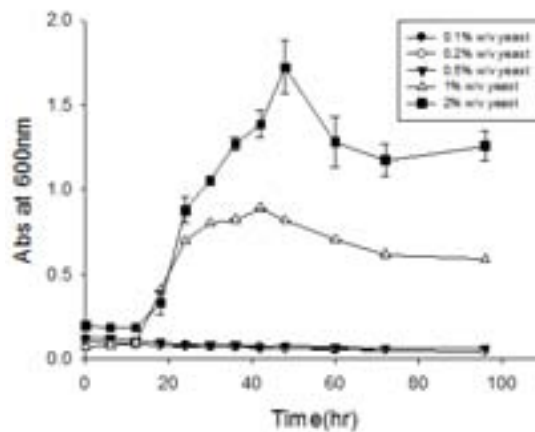
[그림 III-나-5] 영양 배지 및 인공바닷물 배지에서의 *D. desulfuricans*의 성장곡선

- 해양 오염 퇴적물의 환경과 비슷한 인공바닷물을 제조하여 미생물의 권장 영양배지와 인공바닷물에서의 성장을 알아봄. 1% w/v의 yeast를 인공바닷물 배지에 첨가하였을 때 균이 OD 600 nm에서 1에 가깝게 성장하는 것을 알 수 있으며 이는 *D. desulfuricans*에 최적화된 배지에 비해서는 약 50%에 미치는 성장률임.



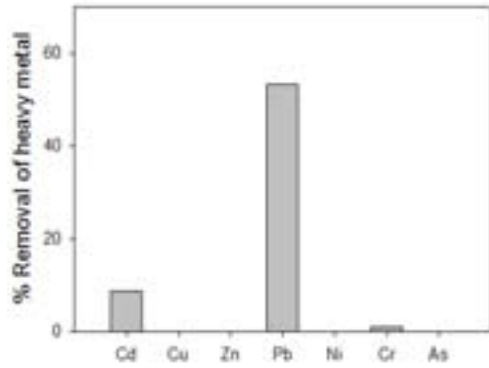
[그림 III-나-6] 배지의 pH변화에 따른 *D. desulfuricans*의 성장곡선

- *D. desulfuricans*의 성장조건을 최적화 하기위해 인공 해수에서의 pH에 의한 영향을 분석 해보았을 때 산성과 염기성에서는 *D. desulfuricans*가 잘 자라지 않는 것을 볼 수 있음. 실제 바닷물은 약염기성이기 때문에 배양조건이 최적화가 필요함.

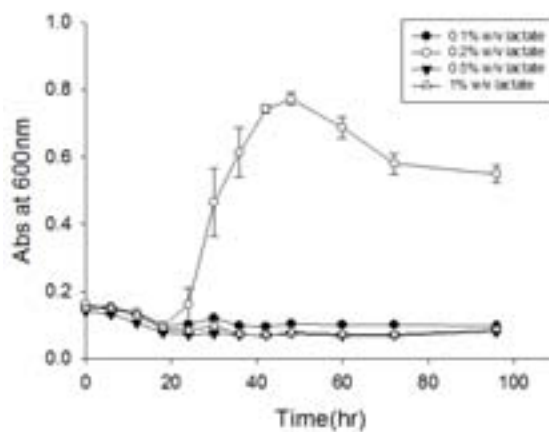


[그림 III-나-7] Yeast의 농도 변화에 따른 *D. desulfuricans*의 성장곡선

- *D. desulfuricans*는 yeast의 농도가 높을수록 잘 자라는 경향성을 보임. 그러나 yeast의 농도가 너무 높을 경우 yeast의 중금속 제거율에 영향을 미치기 때문에 yeast의 중금속에 영향을 최소화하기 위해 yeast 0.5% w/v을 사용함. 아래의 그림 III-나-8은 yeast가 중금속 침전유도에 의한 영향을 나타내는 그림이며 이 때 사용된 yeast는 1% w/v임. 그러나 0.5% w/v의 yeast의 농도에서는 납을 제외한 그 외 중금속은 영향을 미치지 않음. 그러나 위의 그림 III-나-7을 살펴보면 yeast의 농도가 1% w/v 이하에서는 균이 잘 자라지 않는 것을 볼 수 있는데 이는 ferrous ion을 추가함으로 보완하였음.

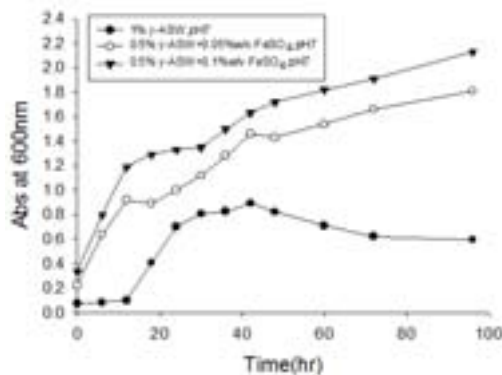


[그림 III-나-8] Yeast가 중금속 제거에 미치는 영향



[그림 III-나-9] Lactate의 농도 변화에 따른 *D. desulfuricans*의 성장곡선

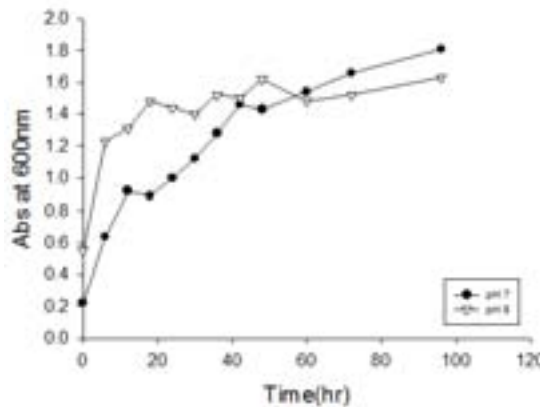
- SRB의 Electron donor로 작용하는 Lactate의 영향을 알아보기 위해 실험을 진행한 결과 Lactate가 0.2% w/v 이상의 농도일 경우 *D. desulfuricans*가 잘 자라지 않았음. 일정 농도 이상에서는 오히려 SRB의 성장이 둔화되는 것으로 나타났는데 이러한 결과는 lactate가 일정 농도 이상에서는 항균 작용이 있는 것으로 알려져 있으며 이것에 의한 영향이라고 사료됨.



[그림 III-나-10] FeSO<sub>4</sub>의 농도 변화에 따른 *D. desulfuricans*의 성장곡선



- $Fe^{2+}$ 이온에 대한 영향을 알아보기 위해 Yeast와  $FeSO_4$ 의 농도에 변화를 주며 실험을 진행하였음. Yeast 농도가 1% w/v이하에서는 미생물이 잘 자라지 않지만 Yeast의 농도가 0.5% w/v임에도 불구하고  $FeSO_4$ 가 존재할 때에는 균이 잘 성장 하는 것으로 나타남. 또한  $FeSO_4$ 의 농도가 높을수록 미생물이 더욱 잘 자라는 것으로 보아  $Fe^{2+}$ 이온이 SRB의 성장에 영향을 끼치는 것으로 보임.

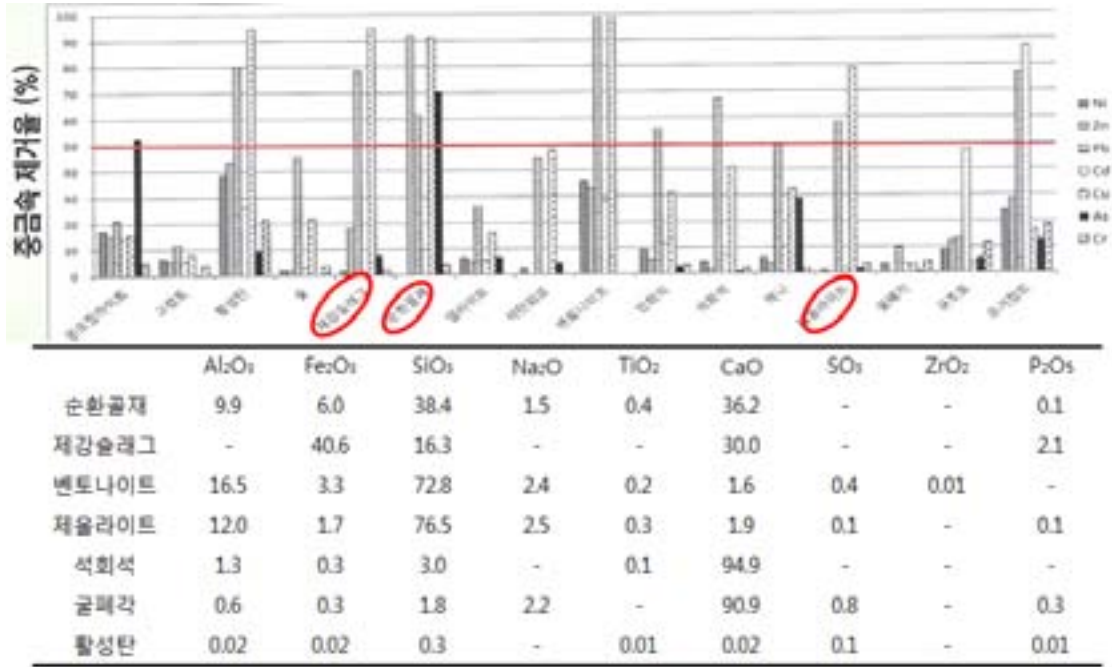


[그림 III-나-11] 0.05% w/v  $FeSO_4$  첨가 배지에서 pH 변화에 따른 *D. desulfuricans*의 성장곡선

- SRB는 pH7에서 가장 잘 자라는 것으로 알려져 있으나 0.2% w/v  $MgSO_4$ , 0.1%w/v  $Na_2SO_4$ , 0.05%w/v  $FeSO_4$ 을 넣고 pH를 조정하며 실험한 결과, 바닷물의 환경과 비슷한 pH8에서도 잘 자라는 것으로 나타남.
- 위의 실험결과 yeast는 0.5%w/v, lactate는 0.2%w/v, sulfate는 0.3% w/v. ferrous ion은 0.05% w/v, pH8의 조건을 최종적으로 최적화조건으로 도출함.

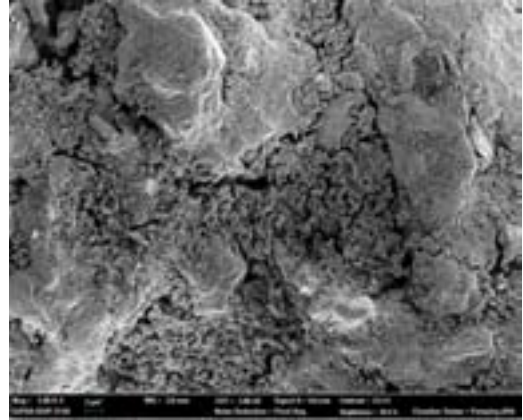
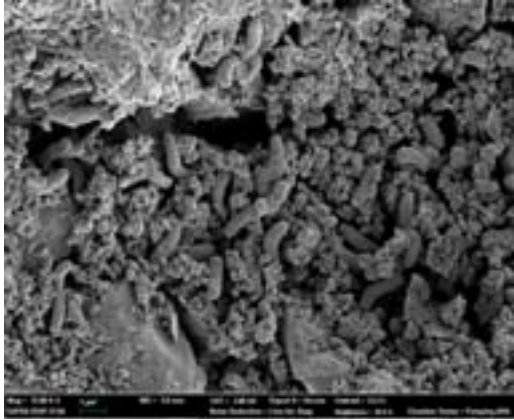
#### (다) 해양오염 퇴적물 내 중금속 안정화를 위한 미생물담체 제작

- 위의 내용에서 선별한 SRB인 *D. desulfuricans*를 이용하여 여러 가지 후보 담체군들 중 제올라이트, 제강슬래그, 순환골재를 3차년도에는 담체로 선정하여 미생물을 고정화시킴으로 미생물담체를 제작하였음.
- 제올라이트의 경우 담체관련 연구 중 가장 많은 연구가 이루어지고 있는 물질로 제올라이트 표면의 양이온 교환 능력이 뛰어나며 이로 인한 정전기적 인력 또한 높아 미생물의 고정화 능력이 뛰어나다고 알려져 있음.
- 제강슬래그의 경우 구성성분 중 다른 담체에 비하여  $Fe_2O_3$ 의 구성율이 높는데 이러한  $Fe_2O_3$ 와 같은 metal oxide가 많을수록 bacteria의 흡착도 증가된다는 연구 결과가 있음.
- 순환골재의 경우 획득이 용이하고 비용이 적게 들며 특히 다양한 중금속들에 대한 제거율이 좋게 나타남.
- 미생물을 효율적으로 담체에 고정화하기 위해서 표면개질과 같은 방법을 이용하여 고정화율을 높이기도 하나 본 연구에서는 해양 생태계에 최대한 영향을 미치지 않아야 하므로 미생물과 담체간의 물리적 작용만으로 고정화하였음.

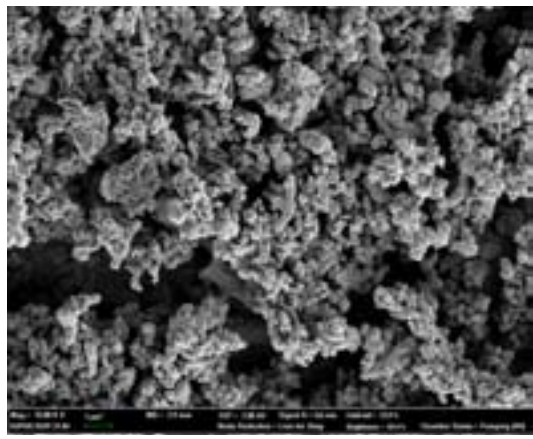
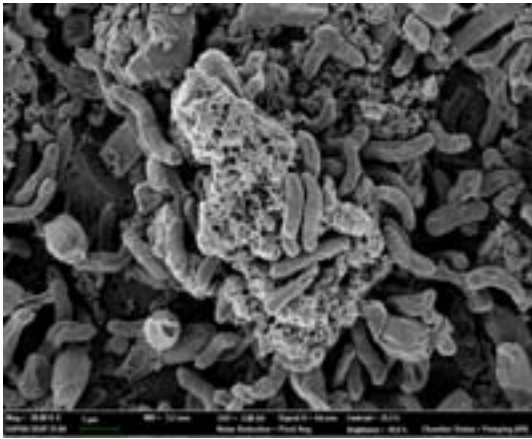


[그림 III-나-12] 각 담체 종류별 중금속 제거율 및 성분 조성

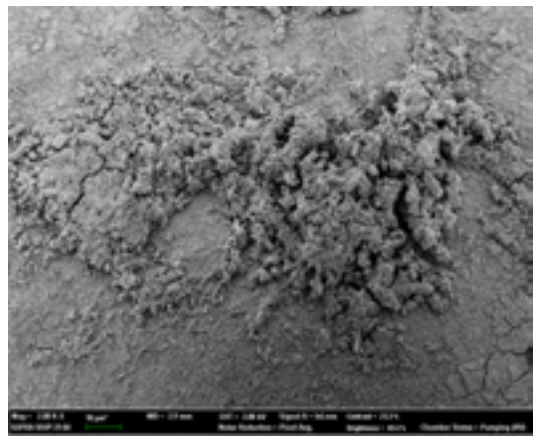
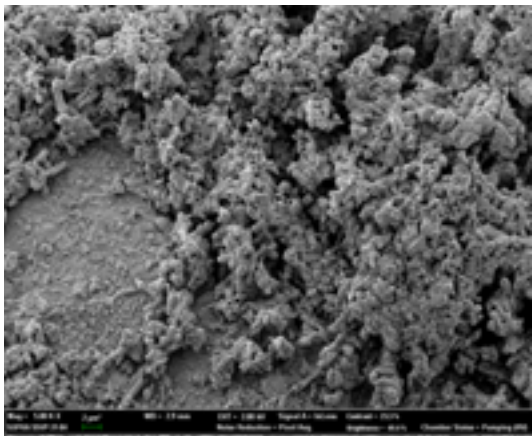
- 본 연구에서 사용한 담체의 크기는 180 $\mu$ m~500 $\mu$ m의 사이즈를 이용하였으며 가는 모래 측에 속하는 사이즈임.
- 담체의 경우는 분쇄 후 실험용 망체를 이용하여 크기를 분별하고 Deionized water로 3회 이상 세척한 후 멸균하여 사용함.
- 배양한 미생물과 멸균된 담체를 혼합하여 7일간 반응시켜 담체에 미생물이 고정화 될 수 있도록 함.
- 제올라이트의 표면은 양전하를 띄고 있는데 미생물은 음전하를 띄고 있기 때문에 정전기적 상호작용에 의해 미생물이 부착하기 쉬움. 또한 기공이 많아 미생물이 부착할 수 있는 공간이 많이 존재하기 때문에 미생물이 다량 부착된 것을 확인할 수 있음.
- 순환골재의 경우 표면적이 넓고 표면에 기공이 많아 미생물이 많이 부착될 수 있는 조건임.
- 재강슬래그의 경우 표면적이 적고 표면이 매끄러워 미생물 부착에 어려움이 있을 것으로 판단됨. 그러나 재강 슬래그는 구성 성분 중에 철 및 실리카 성분이 흡착공간을 제공하여 중금속과 결합하기 때문에 중금속을 흡착 제거할 수 있음. 또한 미생물이 철 이온과 반응하기 때문에 미생물 성장이 잘 될 수 있는 조건임. 이러한 특징들이 시너지 효과를 내기 때문에 미생물을 부착한 재강슬래그의 경우 높은 중금속 제거율을 보임.
- SEM 이미지를 통하여 미생물이 담체에 고정화 되는 것을 확인하고 이를 이용하여 중금속 제거에 대한 평가를 실시함.



<제올라이트>



<순환골재>

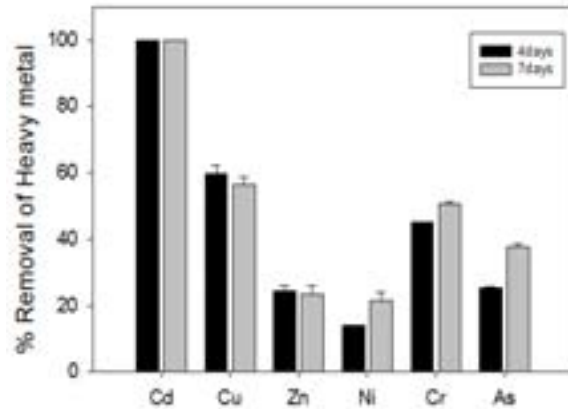


<제강슬래그>

[그림 III-나-13] 피복재를 이용한 미생물 담체의 SEM 이미지

(라) 해양미생물 담체를 활용한 중금속 안정화기술

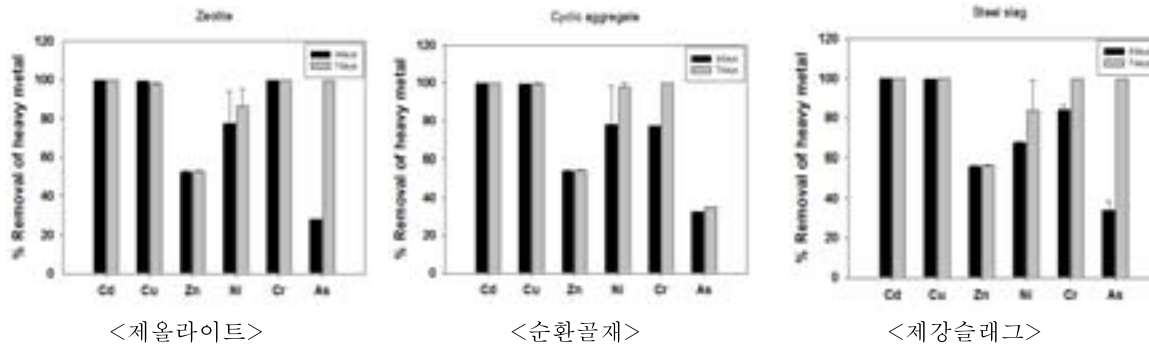
- 위에서 제작한 미생물 담체를 이용해서 실제 해수 내에서의 중금속 제거의 가능성을 알아보고자 실험을 진행하였음.
- 미생물 담체의 효율성을 비교하기 위해 *D. desulfuricans* 만을 이용한 중금속 제거율과 담체, 미생물 담체의 중금속 제거율을 비교해 보았음. 중금속의 농도는 각각 100ppm이며, pH는 8에서 실험을 진행하였음.



[그림 III-나-14] *D. desulfuricans* 를 이용한 인공해수 내의 중금속 제거율

- SRB의 중금속 제거율은 4d, 7d에 측정했으며 카드뮴의 경우 4일차와 7일차 모두 100%의 제거율을 보였고 구리의 경우 모두 약 60%가량 제거되는 것으로 보임. 아연은 25%, 니켈은 23%로 상대적으로 낮은 제거율을 나타내었고 크롬은 4일차보다 7일차에 좀 더 증가한 50%의 제거율을 비소는 7일차에 40%가 제거되었는데 4일차에 비해 약 12%가량 더 제거되어 카드뮴, 구리, 아연에 비해 니켈, 크롬, 비소의 경우는 시간이 갈수록 제거율이 높아지는 경향을 보이는 것을 알 수 있음. 제거율은 대체적으로 비슷하거나 7d가 조금 더 제거율이 높은 경향을 보임. 총 6종의 중금속 중 카드뮴>구리>크롬>비소>아연>니켈의 순으로 제거율이 좋은 것으로 나타남.
- 미생물 담체의 중금속 제거율은 4d, 7d에 측정했으며 제올라이트의 경우 미생물을 부착해서 중금속을 제거할 때 카드뮴과 구리 크롬은 4일차와 7일차 모두 제거율이 거의 100%로 나타났으며 아연의 경우 모두 52%로 나타남. 니켈의 경우 제거율이 4일차에는 77%, 7일차에는 86%로 7일차에 제거율이 약간 증가한 것으로 나타남. 비소의 경우 4일차에는 28% 7일차에는 약 100%로 무려 70%가량 제거율이 증가함. 카드뮴, 구리, 아연, 크롬은 4일차와 7일차의 제거율의 차이가 거의 없었으며 니켈과 비소는 7일차에 제거율이 증가하는 경향을 보임
- 순환골재의 경우 미생물을 부착했을 때 중금속 제거율은 카드뮴과 구리의 경우 4일차와 7일차 모두 100%의 제거율을 보였고 아연의 경우 모두 54%의 제거율을 보였으며 비소의 경우 33%가량의 제거율을 보였음. 니켈의 경우 4일차에는 77%, 7일차의 경우 97%의 제거율을 보여 7일차에 약 20%가 증가한 것으로 나타남. 크롬도 니켈과 같이 4일차에는 77%의 제거율을 보였으며 7일차에는 100%의 제거율을 보임. 카드뮴, 구리, 아연, 비소는 4일차와 7일차의 제거율의 차이가 거의 없었으며 니켈과 크롬은 7일차에 제거율이 증가하는 경향을 보임.
- 재강슬래그의 경우 미생물을 부착했을 때 중금속 제거율은 카드뮴과 구리의 경우 4일차와 7일차 모두 100%의 제거율을 보였고 아연의 경우 모두 56%의 제거율을 보임. 니켈의 경우 4일차보다 7일차가 좀 더 증가한 83%로 나타났으며, 크롬의 경우 7일차에 100% 제거가 되었으며 이는 4일차에 비해 약 15%가 증가한 것임. 비소의 경우 4일차에는 34%, 7일차에는 100% 제거가 되어 무려 65%가량의 제거율 증가를 보임. 대체적으로 7일차의 제거율이 4일차보다 높은 경향을 보임.

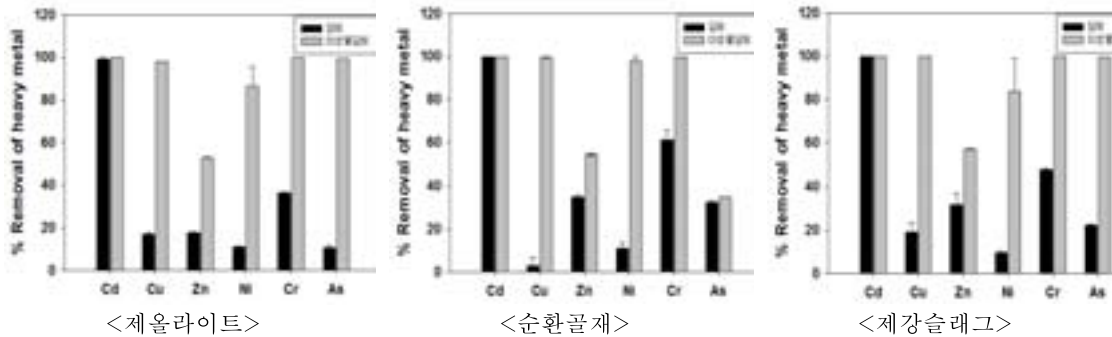
- 미생물 담체는 4일차와 7일차의 제거율이 비슷하거나 7일차의 제거율이 증가하는 경향을 보임. 카드뮴과 구리는 미생물 담체를 이용할 경우 모든 담체에서 100%의 제거율을 보임



[그림 III-나-15] 피복재를 이용한 미생물 담체의 중금속 제거율

- 제올라이트는 카드뮴의 경우 담체와 미생물 담체에서 모두 제거율이 100%로 나타남. 구리의 경우 담체만 이용했을 경우 17% 제거가 되는 반면 미생물 담체를 이용했을 경우 98%의 제거율을 보임. 아연의 경우 담체에서는 17%의 제거율을, 미생물 담체에서는 52%의 제거율을 보임. 니켈의 경우 담체만 이용했을 경우 10%의 제거율을 보이며, 미생물 담체를 이용했을 때에는 86%의 제거율을 보임. 크롬의 경우 담체에서는 36%, 미생물 담체에서는 100%의 제거율을 보였고, 비소의 경우 담체에서는 10%의 제거율을, 미생물 담체에서는 100%의 제거율을 보임. 따라서 카드뮴을 제외한 모든 중금속은 미생물 담체의 제거율이 훨씬 더 좋은 것으로 나타남
- 순환골재의 경우 카드뮴은 담체와 미생물 담체 모두에서 제거율이 100%로 나타남. 구리의 경우 담체만 이용했을 때 제거율은 2%로 거의 제거가 되지 않은 반면 미생물 담체를 이용했을 때에는 99%이상 제거됨. 아연의 경우 담체에서는 35%, 미생물 담체에서는 54%가 제거되었으며, 니켈의 경우 담체에서는 10%, 미생물 담체에서는 94%의 제거율을 보임. 크롬의 경우 담체에서는 61%의 제거율을, 미생물 담체에서는 100%의 제거율을 보였으며, 비소의 경우 담체는 32%, 미생물 담체에서는 35%의 제거율을 보임. 순환골재의 경우 카드뮴을 제외한 모든 중금속에서 제거율이 상승했으며 구리와 니켈의 제거율은 매우 큰 폭으로 상승한 것을 볼 수 있음
- 제강슬래그의 경우 카드뮴은 담체와 미생물 담체 모두 제거율이 100%로 나타났으며 구리는 담체에서는 18% 제거가 되었고 미생물 담체에서는 100% 제거가 되는 것을 볼 수 있음. 아연의 경우 담체에서는 31%의 제거율을 보이며 미생물 담체에서는 56%의 제거율을 보임. 니켈의 경우 담체에서는 9%, 미생물 담체에서는 83%의 제거율을 보이며, 크롬의 경우 담체에서는 48%, 미생물 담체에서는 100%의 제거율을 보임. 비소의 경우 담체에서는 22%의 제거율을 미생물 담체에서는 100%의 제거율을 보임. 제강슬래그의 경우 카드뮴을 제외한 모든 중금속의 제거율이 담체보다 미생물 담체가 훨씬 높은 것을 확인할 수 있음.
- 담체의 중금속 제거율과 미생물 담체의 중금속 제거율을 비교하여 보면 3종의 담체 모두에서 미생물 담체의 중금속 제거율이 훨씬 좋은 것으로 나타났으며 미생물이나 담체만을 이용하는 것보다 미생물을 담체에 고정화한 미생물담체를 이용하는 것이 더 효율적인 것을 확인하였음
- 위의 결과를 통해 실제 해양환경의 오염퇴적물을 정화하는데 미생물 담체를 이용하는 것

이 충분히 좋은 효과를 얻을 수 있을 것이라 사료됨



[그림 III-나-16] 피복재를 이용한 담체와 미생물 담체의 중금속 제거율 비교

## (2) Bench scale 시스템을 이용한 생물활성 촉진제의 효능 검증

### (가) 실험방법 및 분석

#### ① Bench scale 시스템에서 생물활성촉진제의 효능검증

- 연안저질 시료 채취
  - 유기물 및 중금속으로 상당히 오염된 것으로 알려지고 있는 부산 북항 해역에서 Van Veen Grab sampler로 오염 퇴적물 시료는 채취하여 물리화학적 특성을 분석하였음(표 III-나-1 참조).
  - 오염되지 않은 퇴적물시료는 개발준설에 해당하는 부산신항의 준설 퇴적물을 모아놓은 부적치장에서 채취하여 물리화학적 특성 분석하였음(표 III-나-1 참조).
  - 부산신항 퇴적물시료의 중금속 함량(Cu, Cr, Zn, Pb, Cd, Fe)은 미국해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)의 오염기준치 이하로 평가되었음.
- 생물활성촉진제 제조
  - 오염되지 않은 부산신항 퇴적물을 자생미생물의 활성을 향상시키기 위한 생물활성촉진제 제조에 사용하였음.
  - 생물활성촉진제는 부산신항 퇴적물 1kg에 황산염과 질산염을 각각 48g 및 62g을 첨가하여 완전 혼합한 후 실온에서 약 48시간 동안 부분 건조한 뒤 수작업으로 작은 볼의 형태로 만들었으며, 60℃에서 48hr 동안 건조시킨 후 고분자물질인 셀룰로스 아세테이트로 코팅한 미생물활성촉진제(CAB)와 폴리설펜으로 코팅하여 2종의 생물활성촉진제를 각각 제조하였음(그림 III-나-18 참조).
  - 생물활성촉진제의 제조에 사용된 코팅물질인 셀룰로스 아세테이트 용액은 셀룰로스 아세테이트(15%wt)를 아세톤(85%wt)에 용해시켜 준비하였으며, 폴리설펜 용액은 폴리설펜(10%wt)에 N,N-dimethyl acetamide(90%wt)와 혼합하여 사용하였음.
  - 완성된 볼 형태의 생물활성촉진제 1개 직경과 무게는 각각 1-1.5cm 및 약 1g 이었음.
- 생물활성촉진제의 효능검증을 위한 칼럼 제작
  - 생물활성촉진제의 오염저질 정화촉진 효능을 검증하기 위하여 실험실 규모의칼럼실험을 위한 반응조를 설계하고 제작하였음.
  - 실험을 위한 칼럼으로는 1L 용량의 PET 병을 활용하였으며, 폴리설펜 코팅생물활성촉진제를 충전하고 상부에 여과층을 설치하여 사용하였음.

진볼(PSB) 30g과 셀룰로스 아세테이트 코팅 생물활성촉진볼(CAB) 30g을 각각 오염된 적물과 고르게 혼합한 뒤 컬럼에 충전하였음.

- 시험에 사용된 컬럼은 ①바탕시험(오염된적물), ②③④⑤오염된적물에 PSB 30g, ⑥⑦⑧⑨오염된적물에 CAB 30g 첨가한 것 등으로 총 9개였음.
- 준비된 9개의 컬럼을 스테인레스 프레임에 고정하여 북항인근 해안에 침지시켰으며, 1개월후, 2개월후, 4개월후 마다 컬럼을 꺼내어 오염저질의 질소, 인, 황, 유기물 함량, 중금속 함량 및 분포, 미생물개체수 등의 변화를 분석하여 생물활성촉진제의 효능을 평가하였음.
- 오염된적물시료의 입도분포는 sieving technique으로 조사하였으며, 질소, 인의 함량과 pH는 standard methods (APHA, 1998)에 따라 분석, COD는 과망간산법으로 분석하였음.

[표 III-나-1] 해양저질샘플의 물리화학적 특성

Parameters	Busan Newport	Busan Northport
Sand (%)	12.1	17.4
Silt & clay(%)	87.9	82.6
pH (at 25°C)	8.01	8.02
CODMn(g/kg)	11.60	18.82
TN (g/kg)	2.3	12.6
TP (g/kg)	0.86	1.08
Water content (%)	42	49
Heavy metals (mg/kg)		
Cd	ND	0.94
Cu	7.029	37.3
Cr	2.37	35.7
Pb	10.51	42.4
Zn	61.83	203.7
Fe	20882	25763
Microbial population		
Colony forming Units (CFU)/ g	22 X 10 <sup>3</sup>	3.5 X 10 <sup>5</sup>

<PSB>



<CAB>



[그림 III-나-17] 폴리머 코팅한 생물활성촉진제

② 생물활성촉진제의 효능극대화를 위한 최적운영조건 연구

- 생물활성촉진제의 오염퇴적물 정화 효능을 극대화하기 위한 최적 운영조건 연구를 위하여 Bench scale의 칼럼 현장 실험 실시.

○ 반응표면 분석법(Response Surface Methodology)

- 불 형태의 생물활성촉진제를 현장에서 활용하는데 있어 최적운영 조건으로 생각되는 최적 불 직경과 배치간격을 컬럼을 이용한 현장실험을 통하여 결정하기 위하여 반응표면분석법을 이용하여 실험을 계획하였음.

- 반응표면분석법(Response Surface Methodology: 설계입력변수와 응답 출력 수 사이의 기능적 관계를 추정하는 통계 도구)을 이용하여 실험을 계획하기 위하여 Design expert version 8.0.3.1을 이용하였음.

- 반응표면분석법에서 사용한 입력 설계변수들에 대한 방정식은 아래의 2차 다항식으로 나타내었음.

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3$$

여기서, 중심합성계획법을 사용하여 실험을 계획하였으며, Y는 예상되는 응답이며, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> 와 X<sub>3</sub> 는 입력 변수이고, 입력 변수들의 낮은 레벨, 중간 레벨, 높은 레벨을 각각 -1.682, 0 그리고 1.682을 사용함(표 III-나-2 참조).

- 생물활성촉진제의 입경과 배치간격 및 시간을 입력변수로 하여 중심합성계획법에 의하여 설계된 실험은 총 20가지의 경우로서 표 III-나-3과 같음.

[표 III-나-2] 반응표면분석법을 위한 입력 설계변수와 레벨

Variables	Factors	Levels				
	X	-1.682	-1	0	+1	+1.682
Biostimulant ball size	X <sub>1</sub>	1	1.75	3	4.25	5
Biostimulant ball distance	X <sub>2</sub>	1	2.8	5.5	8.2	10
Time (month)	X <sub>3</sub>	0	1.5	3	4.5	6



[표 III-나-3] 중심합성계획법을 이용하여 설계한 실험계획

Run order	Biostimulant ball size (X <sub>1</sub> )	Biostimulant ball distance (X <sub>2</sub> )	Time(months) (X <sub>3</sub> )
1	3	5.5	3
2	4.25	2.8	1
3	1.75	2.8	1
4	4.25	8.2	3
5	3	1	2
6	3	5.5	2
7	3	10	2
8	1.75	8.2	1
9	4.25	8.2	1
10	3	5.5	2
11	3	5.5	2
12	4.25	2.8	3
13	1	5.5	2
14	3	5.5	0
15	3	5.5	4
16	3	5.5	2
17	1.75	2.8	3
18	5	5.5	2
19	3	5.5	2
20	1.75	8.2	3

○ 최적운영조건연구를 위한 생물활성촉진제의 준비

- 생물활성촉진제의 제작과 생물활성촉진제의 최적운영인자 연구에 필요한

적물 시료는 부산신항 퇴적물적치장 및 부산북항 해역에서 각각 채취하였으며, 시료의 물리화학적 특성은 표 III-나-4과 같음.

- 실험에 사용된 생물활성촉진제는 오염되지 않은 부산신항 퇴적물 1kg에 황산염 및 질산염을 각각 48g 및 62g을 첨가한 후 실온에서 48h 건조 하여 볼 형태로 제작하였음.

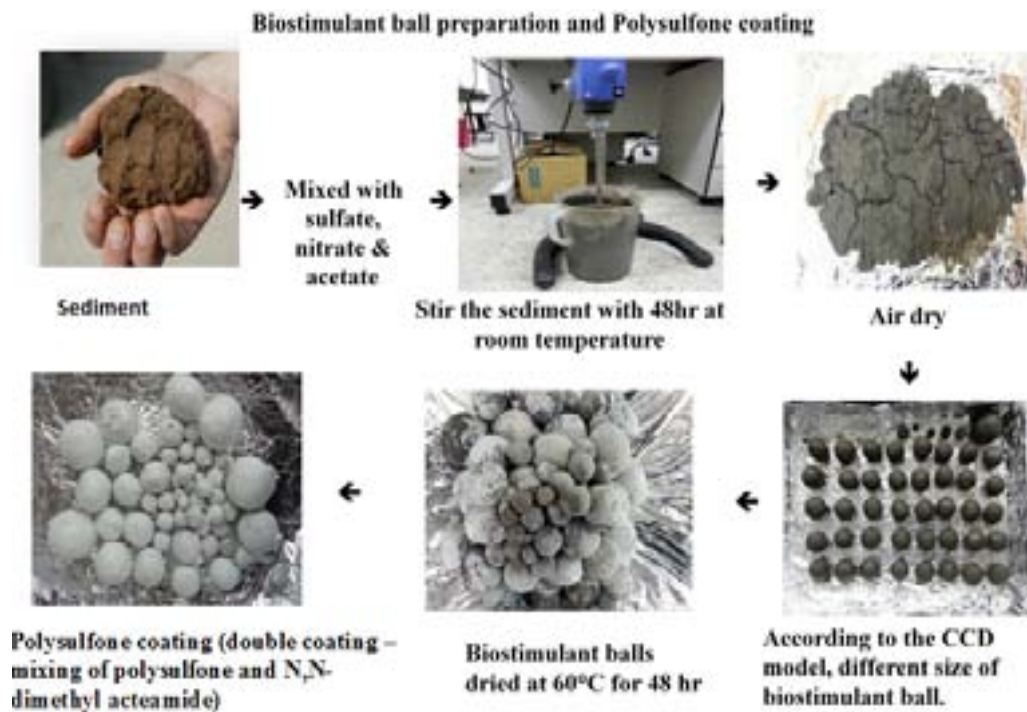
- 이때 볼의 입경은 표 III-나-3에서 중심합성계획법에 따라 설계된 결과에 따라 직경이 1, 1.75, 3, 4.25, 5cm 로 준비하였으며, 준비된 볼은 60℃에서 48 h 동안 건조 후 폴리설펜(10 wt %)과 N,N-dimethyl acetamide(90 wt %) 폴리머로 코팅하였음(그림 III-나-19 참조).

- 오염퇴적물에 주입하는 생물활성촉진제의 배치간격은 표 III-나-3의 중심합성계획법에 따라 설계된 결과에 따라 1, 2.8, 5.5, 8.2, 10cm로 결정하였음.

- 생물활성촉진제의 영향반경을 보다 정확히 평가함으로서 생물활성촉진제의 배치간격을 보다 명확하게 평가하기 위하여 부산북항의 오염퇴적물을 생물활성촉진제(1 ~ 5cm) 외면에 설계된 배치간격과 같은 두께로 감싸는 방법으로 일종의 오염퇴적물 볼을 준비하였음(그림 III-나-52).

[표 III-나-4] 최적운영조건 연구에 사용된 해양 퇴적물시료의 물리화학적 특성

Parameters	Busan Newport	Busan Northport
pH (at 25°C)	7.96	8.01
COD <sub>Mn</sub> g/kg	12.0	18.6
TS (g/kg)	6.9	7.2
VS (g/kg)	3.8	4.6
TP g/kg	1.08	1.56
Organic matter (%)	3.06	3.54
Water content (%)	57	51



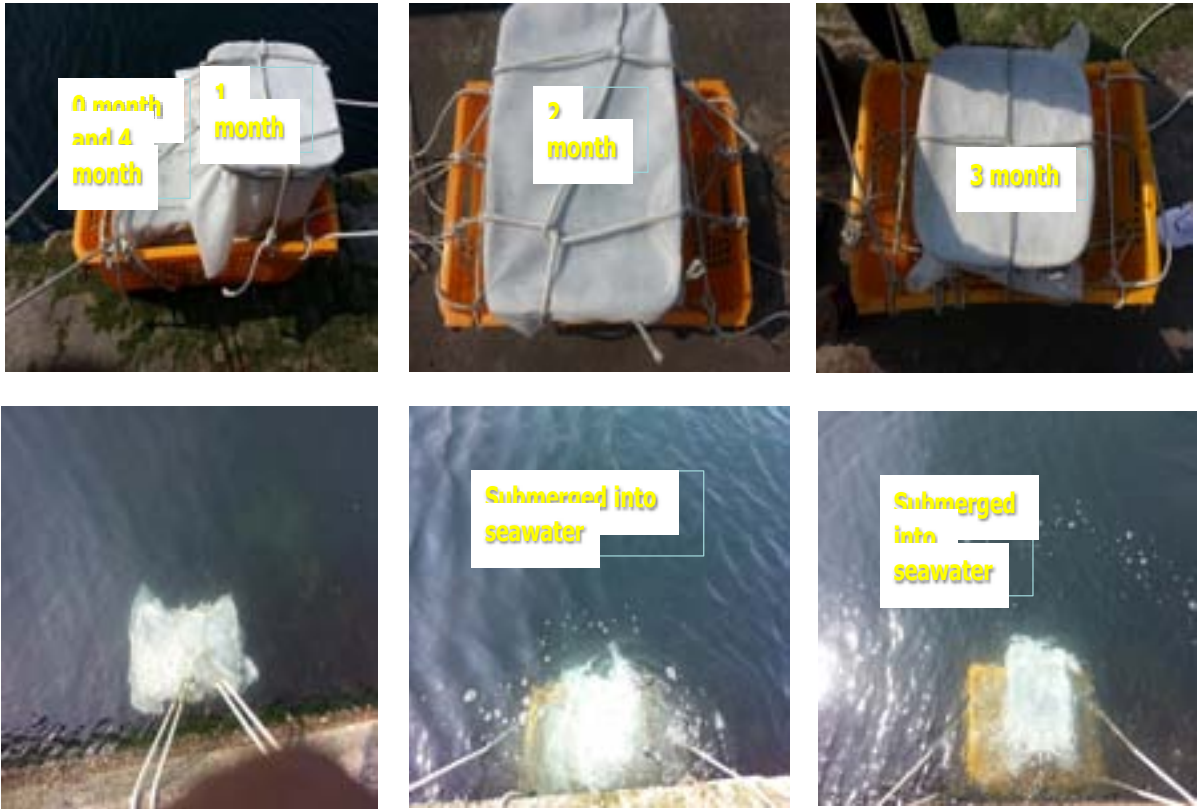
[그림 III-나-18] 최적운영인자 연구에 사용된 생물활성촉진제의 제작



[그림 III-나-19] 생물활성촉진제의 최적 배치간격연구를 위하여 제작된 오염퇴적물볼

○ Bench scale 칼럼 제작

- 생물활성촉진제의 입경과 배치간격에 따라 준비한 오염퇴적물볼을 40\*50\*90cm(W\*L\*H)의 플라스틱 칼럼에 충전하고 적당량의 모래로 빈 공간을 채운 뒤 모래가 유실되지 않도록 칼럼상부에 잔자갈로 덮고 부직포로 유입구를 봉함.
- 그림 III-나-20과 같이 Bench scale의 칼럼을 준비 한 뒤 안전한 북항인근 연안에 침수시켜 고정하였음.
- 실험하는 동안 반응표면분석법에 따라 계획된 시간간격별(0month, 1month, 2month, 3month, 4month)로 오염저질볼 시료를 취하여 물리화학적 및 생물학적 변화를 분석함.



[그림 III-나-20] 생물활성촉진제의 최적운영조건 연구를 위한 Bench scale 현장실험

○ 오염퇴적물에 자생하는 미생물의 균집분석을 위한 박테리아 DNA 분리

- 오염퇴적물에 자생하는 미생물의 DNA는 Power Soil DNA isolation kit((catalog No: 12988-10), Mo Bio Laboratories, Carlsbad, CA, USA)를 이용하여 분리하였음.
- 0.25g 퇴적물 시료를 비드 튜브에 넣고, solution C1 60uL를 첨가하여 부드럽게 여러 번 섞은 후 여러 번 볼텍스하였음.
- 10,000 rpm에서 30초 동안(실온에서) 시료를 원심 분리한 후 상등액을 2mL 튜브에 옮겼음.
- solution C2 250uL를 첨가하여 5초 동안 볼텍스한 후 4℃에서 5분 동안 숙성시켜 10,000 rpm에서 1분 원심분리하였음.
- 상등액을 2mL 튜브에 옮겨 Solution C3 200ul를 첨가 후 4℃에서 5분간 숙성하여 10,000 rpm에서 1분 원심분리하였음.

- 상등액에 Solution C4 1200uL를 첨가한 후 5초간 볼텍스하고 675uL를 스핀 필터에 첨가하여 10,000rpm에서 1분 동안 원심분리하였음.
- Solution C5 500uL를 첨가하여 10,000rpm에서 30초간 원심분리한 후 스핀필터에 조심스럽게 옮겨 Solution C6 100uL를 첨가한 후 10,000rpm에서 30초 동안 원심분리하고, 마지막으로 스핀필터를 제거하여 DNA 채취하였음.
- DNA 시료를 젤전기영동하여 DNA 밴드를 확인하고, 남은 DNA 시료는 PCR과 Pyrosequencing을 위하여 -20℃ ~ -80℃에서 보관하였음.



[그림 III-나-21] 오염퇴적물에 자생하는 미생물의 DNA 분리에 사용한 키트

#### ○ DNA 증폭을 위한 PCR

- PCR 반응은 Thermocycler(MJ Research, Reno, USA)를 이용하여 수행하였음. 간략히 절차를 설명하면 94℃에서 5분 동안 초기변성시킨 후 95℃에서 30초 동안 25cycle 변성시켰음. Annealing은 60℃에서 1분 동안 수행하고, elongation을 72℃에서 1분 20초 동안 수행하였음.
- 증폭된 16S rRNA gene은 resin spin column을 이용하여 정제하였으며, 각각의 증폭된 시료 1ug을 혼든 후 pyrosequencing 하였음.
- Pyrosequencing은 4454 Genome sequencer FLX Titanium (Roche, Basel, Swiss)를 이용하여 Chunlab, Inc (seoul, Korea)에서 수행하였음.

#### ○ 미생물군집 pyrosequencing 분석

- 미생물군집은 16S rRNA 유전자 파이리시퀀싱 기법으로 분석하였음.
- 증폭, sequencing library 배열, sequencing과 bioinformatics 분석은 454 GS FLX Junior sequencing system (Roche, Brandford, CT, USA)를 이용하여 수행하였음.
- 미생물 군집의 통계적 분석은 Mothur Program을 사용하여 ±3% 오차 범위에서, Cluster 분석은 CL community software (Chunlab, Inc. Seoul, Korea)을 이용하여 수행하였음.

### ③ 연안 오염퇴적물의 재부상에 의한 중금속의 수계용출 평가

#### ○ 연안퇴적물 시료의 물리화학적 특성 및 중금속 용출

- 부산북항 인근 해역에서 오염된 연안 퇴적물 시료를 채취기를 이용하여 채취하였으며, 채취한 북항 퇴적물의 함수율, 입도조성, COD, VS, pH, AVS(Acid volatile sulfide)와

- 같은 물리화학적 특성 조사하였음(표 III-나-5 참조).
- 부산북항 퇴적물에 함유된 중금속의 존재형태를 확인하기 위하여 연속추출법으로 전처리한 뒤에 중금속 함량을 분석하였음.
  - 모든 분석항목은 3회 반복실험하여 평균값을 이용하였음
  - 부산북항 퇴적물 시료는 실트 및 점토질의 함량이 82.6-85.7%인 미세입자들로 이루어진 것으로 평가되었으며, COD 및 VS 함량은 각각 18.82-28.4g/kg, 110.60g/kg이었음. 또한, pH는 7.56-8.02로서 약알카리였으며, AVS 함량은 246.15mg/kg
  - 연안 해역에서 발생하는 해수유동의 급격한 변화로 인하여 재부상하는 북항 퇴적물의 양(Suspended particulate matter, SPM)이 중금속의 용출 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 북항 퇴적물 입자의 농도가 50, 500, 1,000 및 5,000mg SPM/L가 되도록 부산북항 퇴적물 시료를 취하여 해수 1L에 혼합.
  - 해수는 북항해역에서 채취한 것으로 pH 8.2, 용존산소농도 8.02mg/L, 수온 17.4℃로서 일변화가 크지 않았음. 북항에서 채취한 해수의 Cr과 Pb의 농도는 각각 85.08 및 78.18ug/L이었으며, Cu, Zn 및 Cd은 약 42-48ug/L로서 상대적으로 낮았음.
  - 북항 퇴적물이 혼합된 해수 시료를 2L 비이커에 옮겼으며, 퇴적물 입자가 비이커 내의 해수 중에 충분히 부유하도록 터빈 블레이드를 설치한 Jar tester를 이용하여 3시간 동안 250rpm으로 교반하였음. Jar tester를 이용한 재부상 실험이 완료된 퇴적물 시료는 교반을 중단하여 부유 퇴적물 입자를 침전시켰으며, 상등 해수 시료의 중금속 분포 특성을 조사하였음.
  - 재부상 실험 전후에 연안 퇴적물에 함유된 중금속의 분포특성 변화를 비교하기 위하여 퇴적물 입자의 농도가 5,000mg SPM/L인 비이커의 경우 3시간 동안의 재부상 실험 후에 침전된 퇴적물 시료를 취하여 연속추출법으로 중금속의 존재형태를 조사하였음. 중금속의 용출 특성에 대한 재부상 시간의 영향을 살펴보기 위하여 퇴적물 입자의 농도가 500mg SPM/L인 비이커에서 0.5, 1, 1.5 및 3시간 교반 후에 상등수 및 침전된 퇴적물 시료를 취하여 해수 시료 및 침전물에서의 중금속 농도 및 존재형태 변화를 평가함.

[표 III-나-5] 부산북항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Parameters	Busan Northport
Sand (%)	14.3(14.30-17.4)
Silt and clay (%)	85.7(82.6-85.7)
pH (at 25°C)	7.56(7.56-8.02)
COD <sub>Mn</sub> (g/kg)	28.40(18.82-28.40)
Water content (%)	48.67(48.67-49.00)
VS (g/kg)	110.60(39.16-110.60)
AVS (mg S/kg)	246.15



[그림 III-나-22] 부산북항 오염퇴적물 시료의 채취위치 및 채취모습

○ 분석

- 부산북항 퇴적물 시료를 구성하는 물질의 입도, COD, VS 및 AVS 등의 물리화학적 특성은 해양오염공정 시험법으로 분석하였음.
- 중금속 함량과 분포형태는 Song 등(2009)가 제안한 연속추출법으로 전처리한 뒤 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy)를 이용하여 분석하였음.
- 해수의 DO, pH 및 수온은 현장에서 측정하였음.

(나) 실험결과

① Bench scale 시스템에서 생물활성촉진제의 효능검증

- 표 III-나-6은 오염되지 않은 저질(부산신항)과 오염저질(부산북항)샘플의 물리화학적 특성을 보여줌.
  - 부산신항 퇴적물은 약 88%가 실트와 점토질 성분이었으며, COD가 약 11.6g/kg, TN과 TP는 각각 2.3g/kg과 0.86g/kg로서 오염물의 함량이 높지 않아 생물활성촉진제 제조를 위한 기초재료로서 적합한 것으로 평가되었음.
  - 부산북항 퇴적물은 실트와 점토질의 함량이 약 82.6%로서 부산신항 퇴적물에 비해 낮았으며, COD 및 TN과 TP가 각각 18.82 및 12.6, 1.08g/kg으로 부산신항 퇴적물보다 유기물 및 영양염류의 함량이 높아 크게 오염된 것으로 평가되었음.

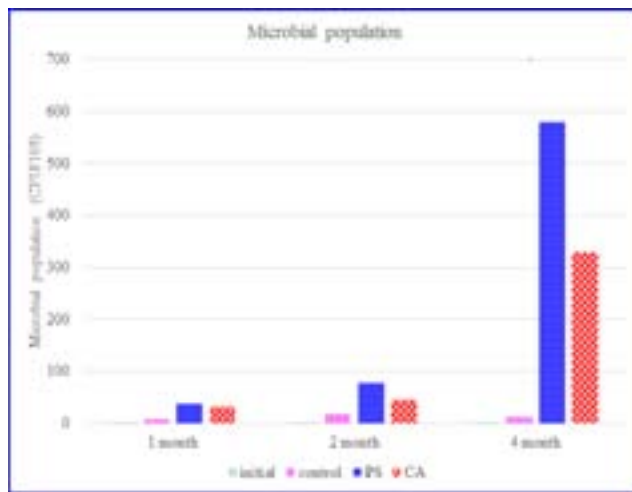
[표 III-나-6] 생물활성촉진제의 오염퇴적물 정화 효능평가에 사용된 시료의 물리화학적 특성

Parameters	Busan new Port	Busan north port
Sand (%)	12.1	17.4
Silt & clay(%)	87.9	82.6
pH (at 25°C)	8.01	8.02
COD <sub>Mn</sub> (g/kg)	11.60	18.82
TN (g/kg)	2.3	12.6
TP (g/kg)	0.86	1.08
Water content (%)	42	49
<b>Heavy metals (mg/kg)</b>		
Cd	ND	0.94
Cu	7.029	37.3
Cr	2.37	35.7
Pb	10.51	42.4
Zn	61.83	203.7
Fe	20882	25763
<b>Microbial population</b>		
Colony forming Units (CFU)/ g	22 X 10 <sup>3</sup>	3.5 X 10 <sup>5</sup>

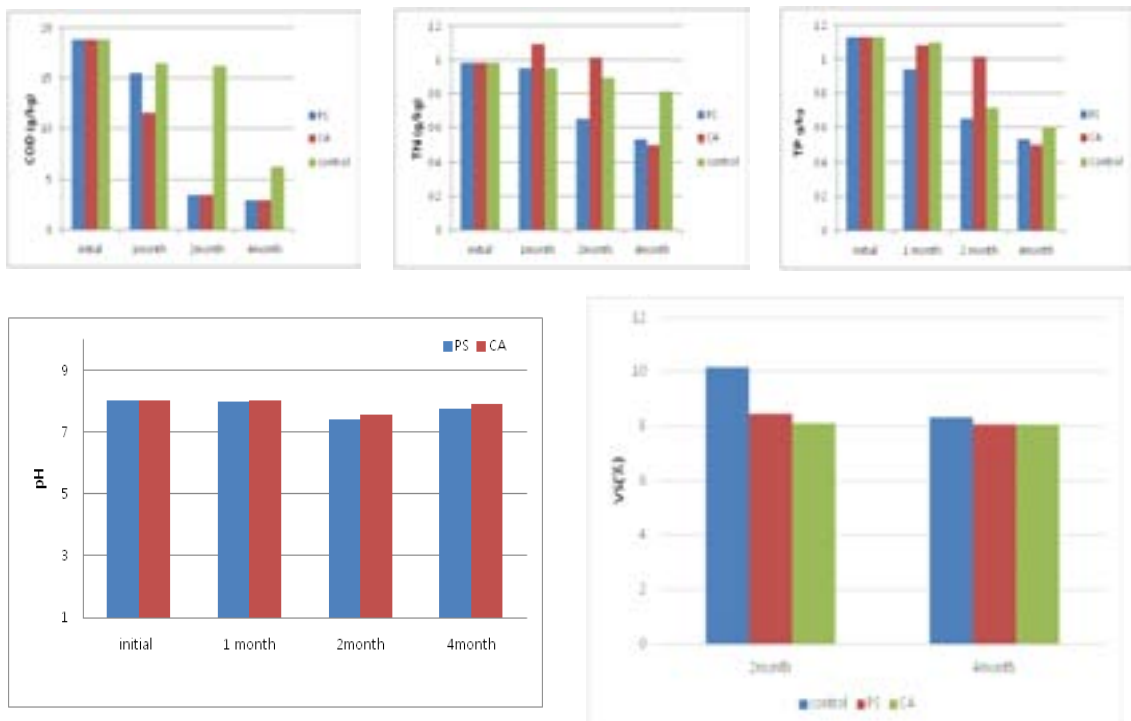
- 생물활성촉진제의 효능시험 컬럼에서 오염퇴적물 내의 미생물 개체수 변화
  - 그림 III-나-24은 초기, 바탕시험, CAB(셀룰로스아세테이트 코팅 생물활성촉진제)와 PSB(폴리설펜 코팅 생물활성촉진제)를 사용한 시험컬럼의 오염퇴적물에서 미생물의 개체수 변화를 보여줌.
  - 실험시작 1개월 및 2개월 후 CAB와 PSB를 사용한 오염퇴적물의 미생물 개체수는 바탕시험구에 비해 약간 증가하였음.
  - 실험 시작 4개월 후 미생물 개체수는 바탕시험구에 비해 급격하게 증가하였으며, PSB의 미생물개체수가 CAB보다 약 2배가량 많았음. 이는 PSB로 코팅한 생물활성촉진제의 오염물 정화효능이 우수함을 의미하는 것으로 폴리설펜 코팅이 셀룰로스아세테이트 코팅에 비해 생물활성촉진물질 주변으로 효과적으로 공급하기 때문으로 여겨짐. 폴리설펜 코팅막의 경우 염분과 온도 등의 외부 환경조건변화에 견디는 내성이 우수한 것으로 알려지고 있음.
  
- 생물활성촉진제의 효능시험 컬럼에서 오염퇴적물 물리화학적 특성(pH, COD, VS, TN, TP)변화
  - 효능시험 컬럼에서 오염퇴적물의 pH 변화는 크지 않았으며, 바탕시험과 PSB 및 CAB를 사용한 컬럼 사이에서도 유의한 차이를 발견할 수 없었음.
  - 효능시험 컬럼에서 오염퇴적물의 COD 농도 변화는 1개월 후에는 크지 않았으나, 2개월 후부터 PSB 및 CAB에서 뚜렷하였으며, 4개월 후에는 PSB 및 CAB를 사용한 경우 약 2.5g/kg 및 2.6g/kg으로 바탕시험구의 6.9g/kg에 비해 크게 감소하였으며, 이것

은 생물활성촉진제에 의해 촉진된 자생미생물의 유기물분해 활성증가에 기인한 것으로 평가됨.

- PSB와 CAB를 사용한 오염퇴적물에서의 TN의 농도는 4개월 후 바탕시험구 0.8g/kg에 비해 각각 0.5g/kg, 0.53g/kg으로 크게 감소한 것으로 평가되었음.
- TP의 농도변화도 TN 농도변화와 마찬가지로 4개월 후, 생물활성촉진제를 투여한 오염저질에서 바탕시험구보다 TN 농도가 더 낮게 평가되었음. 4개월 후 오염저질 내 TP의 농도는 바탕시험구, PSB와 CAB에서 각각 0.6, 0.53, 0.5g/kg으로 평가 됨.
- VS(%)변화는 생물활성촉진제를 투여한 오염저질에서 2개월과 4개월 후에 큰 감소는 없었으나, 바탕시험구보다 다소 낮게 평가되었음.



[그림 III-나-23] 시간에 따른 오염저질내 미생물 개체수 변화

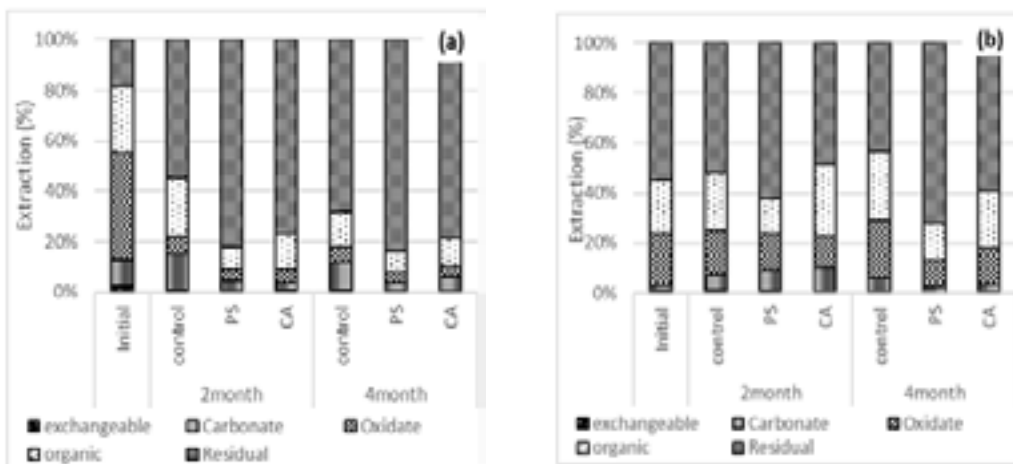


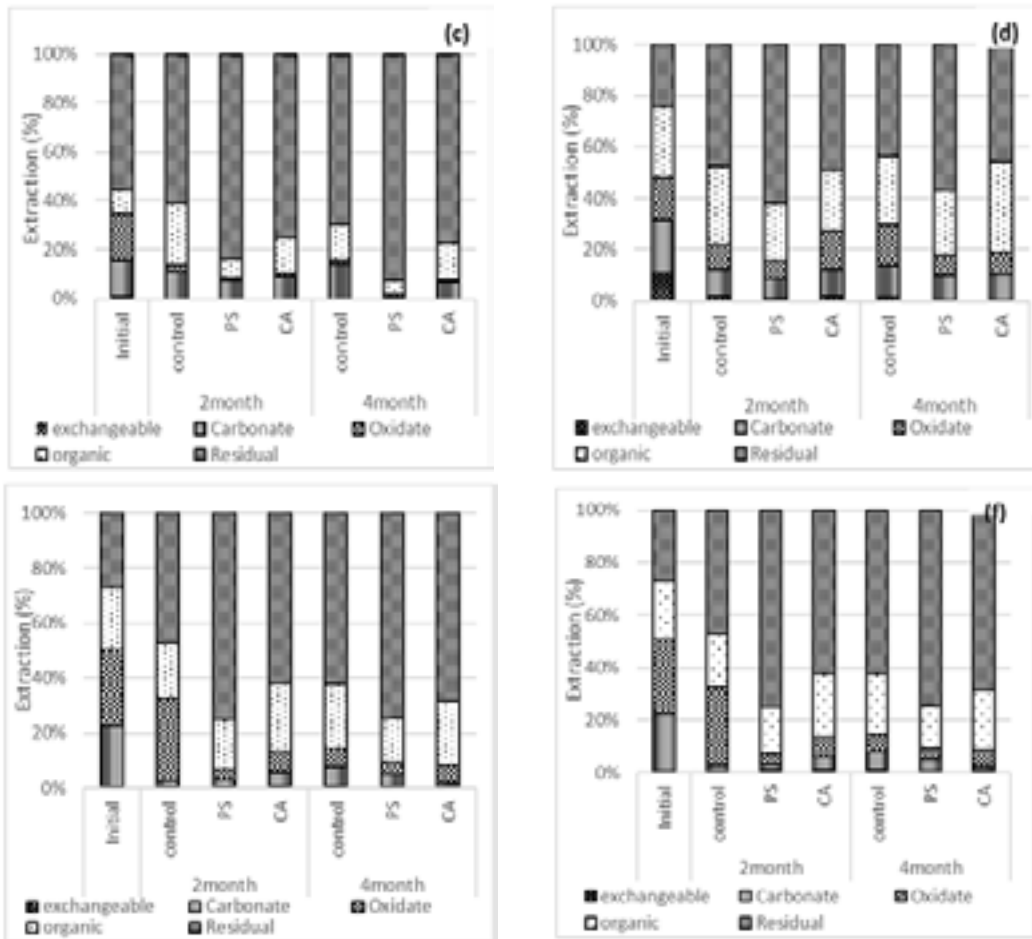
[그림 III-나-24] 시간에 따른 오염저질 내 pH(a), COD(b), TN(c), TP(d), VS(e)의 변화



○ 중금속 분포 변화

- 그림 III-나-27은 부산북항 퇴적물에 함유된 Fe, Zn, Cd, Cr, Pb, Cu 등의 중금속의 존재 형태 변화를 보여줌.
- 퇴적물내의 중금속들은 일반적으로 치환가능분율, 탄산염결합분율, 철 및 망간산화물 결합분율, 유기물 결합분율 및 광물내 잔류분율 등으로 존재하게 되는데 중금속들은 이러한 존재형태에 따라 안정성이 다르며, 생물이용성이 차이를 보이기 때문에 위해성에서도 차이를 보임. 통상적으로 유기물 결합분율과 광물내 잔류분율은 비교적 안정한 형태로서 생물에 대한 위해성이 낮은 것으로 평가하고 있음.
- 자생미생물의 활성을 촉진시킴으로서 오염된 퇴적물을 정화하기 위하여 사용하는 PSB, CAB 등의 생물활성촉진제를 오염퇴적물에 주입할 경우 중금속들의 유기물 결합분율 및 광물내 잔류분율이 증가한다면 오염퇴적물에 함유된 중금속으로 인한 위해성을 크게 감소시킬 수 있음.
- 시험에 사용된 컬럼에서 4개월 후에 Fe, Zn, Cd, Cr, Pb, Cu의 광물내 잔류분율은 CAB의 경우 79%, 60%, 78%, 44%, 68%, 69%로 바탕시험구보다 증가하였으며, PS에서는 각각 83%, 74%, 91%, 58%, 74%, 75%로 더욱 증가하였음. 이결과는 생물활성촉진제인 PSB 및 CAB는 오염퇴적물에 함유된 중금속을 안정화시키는 효능이 있음을 의미함.
- 시험컬럼에서 4개월 후에 오염퇴적물에 함유된 Fe, Zn, Cd, Cr, Pb, Cu의 철 및 망간산화물 결합분율은 CAB의 경우 4%, 22%, <5%, 8%, 6%, 7%, PS의 경우 4%, 14%, <2%, 4%, 5%, 5%로 각각 감소하였음. 이결과는 생물활성촉진제인 PSB 및 CAB를 사용할 경우 쉽게 용출될 수 있는 중금속인 철 및 망간산화물 결합분율이 감소하여 점차 안정화됨을 의미함.
- 생물활성촉진제 주입후에 유기물 결합분율도 감소하였는데 이것은 유기오염물질의 분해에 기인한 것으로 판단되었음.





[그림 III-나-25] 생물활성촉진제의 효능시험 컬럼에서 오염퇴적물의 중금속 분포 변화

(a) Fe (b) Zn (c) Cd (d) Cr (e) Pb (f) Cu]

② 생물활성촉진제의 최적운영조건연구를 위한 Bench scale의 칼럼 현장 실험

○ 오염 퇴적물에 함유된 자생미생물 균집

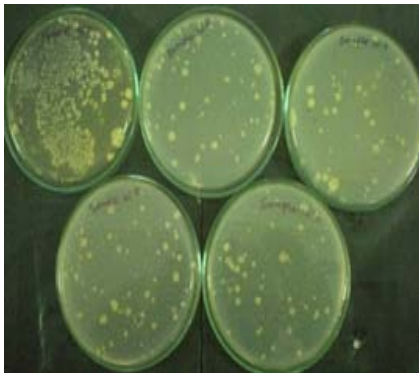
- 부산신항 퇴적물로부터 호기성 조건에서 동정한 미생물 개체수는 북항 퇴적물 시료에 비해 매우 낮았음. 혐기성 조건에서 미생물 개체는 부산신항 퇴적물시료에서 나타나지 않았으며, 부산북항 퇴적물 시료에서는 약  $12 \times 10^5$  CFU/g이었음 (표 III-나-7, 표 III-나-8, 그림 III-나-26).
- 균락(colonies)은 agar plate법으로 37°C에서 24시간동안 배양하여 PCR로 확인함.

[표 III-나-7] 호기성조건에서 동정한 해양 퇴적물에 자생하는 미생물 개체수]

Dilution Sediment	$10^2$ CFU/g of sediment	$10^3$ CFU/g of sediment	$10^4$ CFU/g of sediment	$10^5$ CFU/g of sediment	$10^6$ CFU/g of sediment
Busan Newport	16	7	No colonies	No colonies	No colonies
Busan northport	TNTC	149	65	46	29

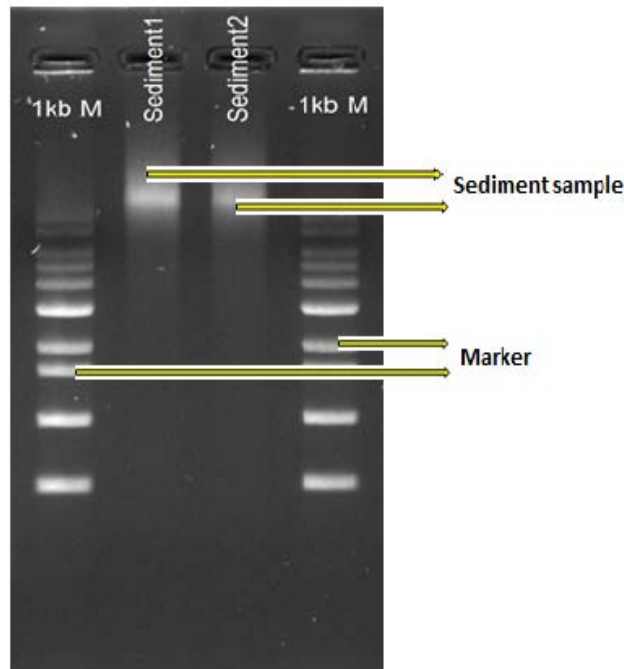
[표 III-나-8] 혐기성조건에서 동정한 해양 퇴적물에 자생하는 미생물 개체수

Dilution Sediment	10 <sup>2</sup> CFU/g of sediment	10 <sup>3</sup> CFU/g of sediment	10 <sup>4</sup> CFU/g of sediment	10 <sup>5</sup> CFU/g of sediment	10 <sup>6</sup> CFU/g of sediment
Busan Newport	No colonies	No colonies	No colonies	No colonies	No colonies
Busan northport	45	34	28	12	2



[그림 III-나-26] 혐기성 및 호기성 조건에서 배양된 해양 퇴적물 시료의 자생미생물 균락

- 그림 III-나-27은 해양 퇴적물 시료에서 자생하는 미생물 DNA band를 여쭙. Marker와 비교 시 부산북항 퇴적물 시료에서 1kb이상의 DNA band가 나타남.

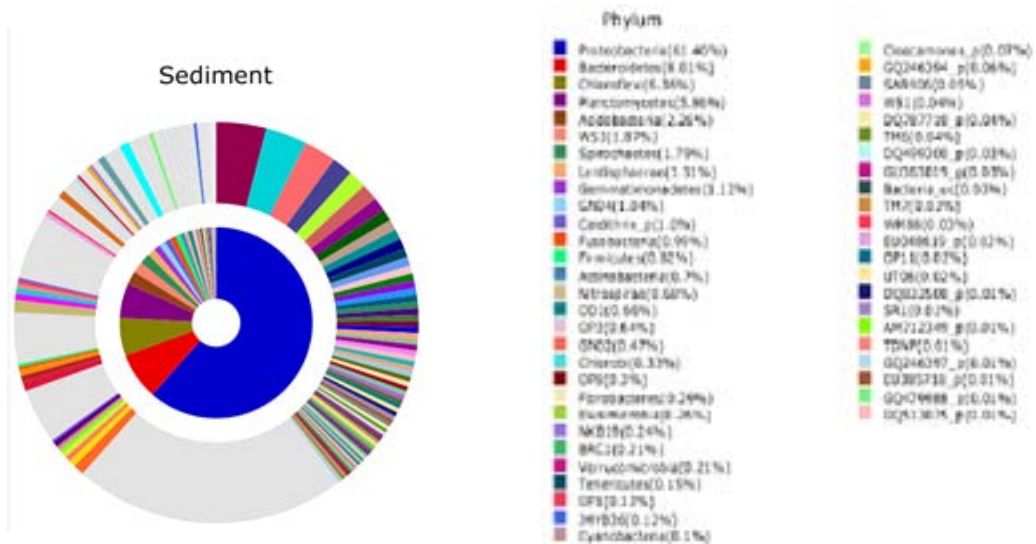


[그림 III-나-27] 해양 퇴적물 시료에서 자생하는 미생물 DNA band

- Pyrosequencing 결과 DNA농도는 약 460.512 (ug/uL)였으며, 순도율(260/280)은 1.82로

관찰되었음.

- 16S rRNA 유전자는 barcoded forward (5'-X-AC-GAGTTTGATCMTGGCTCAG-3')primer와 reverse (5'-X-AC-WTTACCGGGCTGCTGG-3'-AC) primers를 이용하여 증폭하였음.
- 증폭, sequencing library 배열, sequencing과 bioinformatics 분석은 454 GS FLX Junior sequencing system (Roche, Brandford, CT, USA)를 이용하여 수행하였음.
- 미생물 군집의 통계적 분석은 Mothur Program을 사용하여  $\pm 3\%$  오차 범위. Cluster 분석은 CL community software (Chunlab, Inc. Seoul, Korea)을 이용하여 수행하였음.
- 그림 III-나-31은 Pyrosequencing 분석을 이용한 해양오염저질샘플의 미생물 군집의 문(phylum)과 종(species)을 나타냄.
- 주요 phylum 그룹은 *Proteobacteria* (61.46%), *Bacteroidetes* (8.01%), *Chloroflexi* (6.36%), *Planctomycetes* (5.86%), *Acidobacteria* (2.26%)이었음.
- *Proteobacteria* 중에서, *Desulfobacteraceae* (4.01%), *Desulfobacter* (2.56%), *Desulfobacula* (0.72%), *Desulfobacterium* (0.5%), *Desulfobacterales* (0.48%), *Desulfosarcina* (0.27%), *Desulfovibrio* (0.43%), *Desulfomonanadaceae* (0.46%), *Thermodesulfovibrio* (0.31%) 가 나왔으며, 이들은 황환원미생물(SRB) 임. 따라서, 해양퇴적물 시료내에 SRB 가 다량 함유되어 있는 것으로 판단되었음.





[그림 III-나-28] 해양 퇴적물 시료에서 자생하는 미생물 군집의 문(phylum)과 종(species)

- 시간에 따른 생물활성촉진제의 입경(X1) 및 배치간격(X2)과 시간(X3) 변수들의 변화
  - 생물활성촉진제의 효능을 극대화할 수 있는 최적 운영조건을 도출하기 위하여 표면반응분석법의 중심합성계획법을 이용하여 Bench scale의 칼럼실험을 설계하였으며, 총 4개월간의 연구가 진행되고 있음.
  - 현재 2개월간 칼럼 현장 실험을 완료하였으며, 본 연구년차의 종료시점까지 연구하여 최적의 생물활성촉진제 입경과 배치간격을 도출할 계획임.
  - 표 III-나-9은 생물활성촉진제 입경 및 배치간격과 시간에 따른 초기(0month)와 1개월 후에 측정된 칼럼 시험 중인 오염퇴적물 시료의 물리화학적 특성을 보여 주고 있음. 칼럼 현장 실험이 진행되는 동안 칼럼 주변 해수의 pH와 염도는 큰 차이가 없었으나, 계절적 영향으로 온도와 DO가 다소 증가하는 결과를 보였음.
  - 시험 1개월 후에 오염퇴적물의 COD<sub>Mn</sub> (g/kg)는 16.8 - 22.6로서 초기 값에 비하여 다소 감소하였으나 생물활성촉진제의 입경과 배치간격에 따라 달랐음.
  - TS(%)와 VS(%)의 경우에도 실험초기에는 각각 36.3%와 7.8% 이었으나, 1개월 후에는 생물활성촉진제의 입경과 배치간격에 따라 차이를 보였음.
  - 황산염 농도는 실험초기에 53 mg/g 이었으나, 1개월 후 모든 시료에서 25.2 mg/g-39mg/g으로 감소하였으며, AVS 농도는 초기에 330 mg S/kg에서 1개월 후 최고 750 mg/kg까지 증가하였음. 이결과는 황산염환원균의 활성이 크게 증가하여 유기오염물을 전자공여체로 사용함으로써 COD<sub>Mn</sub> 값을 크게 감소시키고 있으며, 황산염환원반응에 의해서 생성된 황화물은 중금속과 결합하여 금속황화물을 형성하고 있음을 의미함.
  - 현재까지의 실험결과 만으로 최적의 생물활성촉진제 입경과 배치거리를 판단할 수는

없으나 직경 1.75cm에서 배치거리 8.2cm까지는 생물활성촉진제가 긍정적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있음.

[표 III-나-9] 생물활성촉진제의 입경 및 배치간격과 시간변수에 대한 초기(0month)와 실험 1개월 이후 해양 퇴적물 시료의 번호

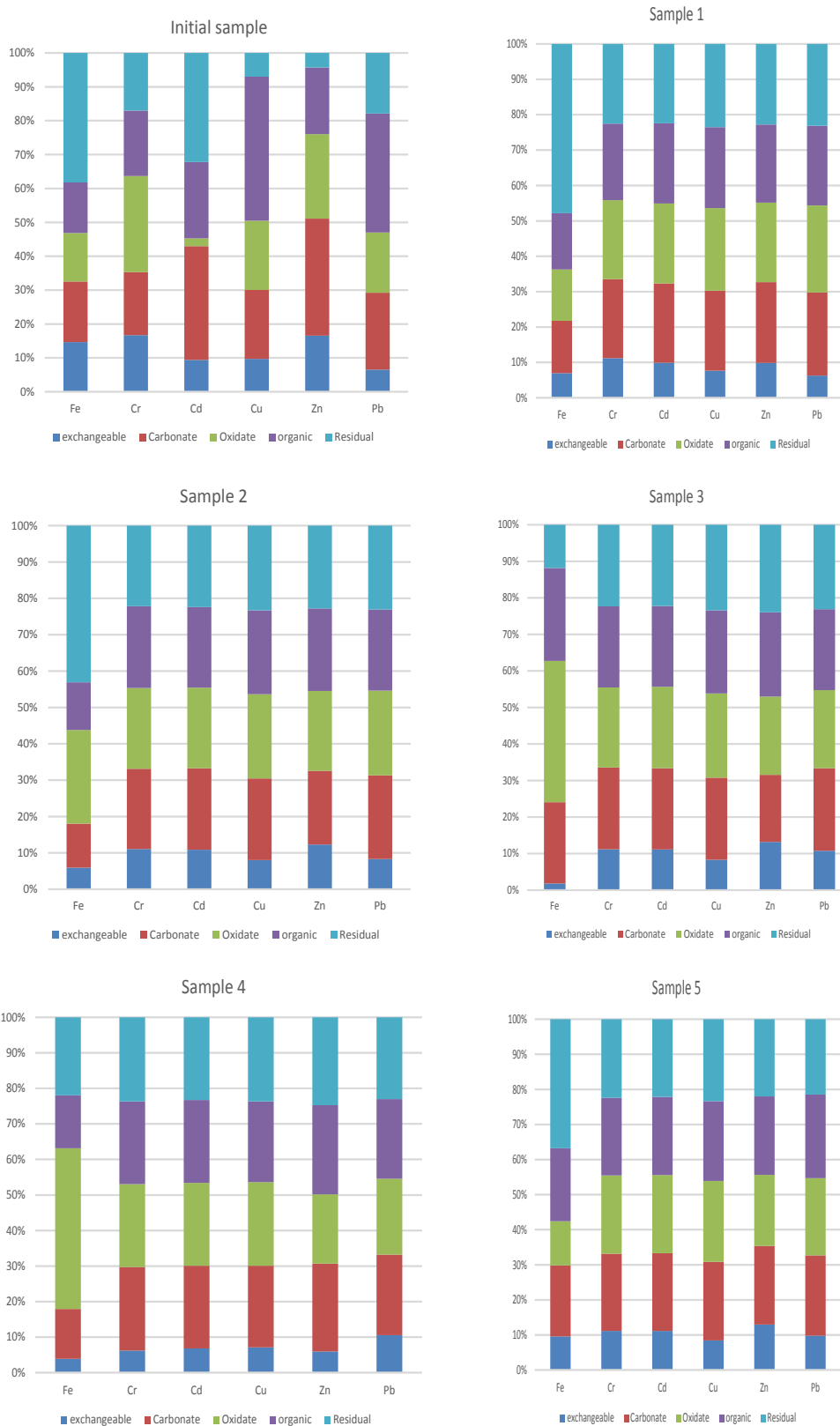
No. of sample	Ball size	Ball distance	Month
1	3	5.5	0 (15days)
2	4.25	2.8	1
3	1.75	2.8	1
4	4.25	8.2	1
5	1.75	8.2	1

[표 III-나-10] 최적운영조건 연구 컬럼에서 초기(0month) 및 실험 1개월 후 퇴적물 시료의 물리화학적 특성

Sample No.		1 (0month- 15 days)	2 (1 month)	3 (1 month)	4 (1 month)	5 (1 month)
S e a w a t e r	pH	8.2	8.04	8.04	8.04	8.04
	Temperature(°C)	17.2	19.4	19.4	19.4	19.4
	DO(mg/L)	8.02	11.6	11.6	11.6	11.6
	Salinity(‰)	31.5	31.04	31.04	31.04	31.04
Water content(%)		33.9	36.3	35.4	36.0	33.1
COD <sub>Mn</sub> (g/kg)		25.6	16.8	21.6	22.4	22.6
TS(%)		36.3	33.8	34.1	34.0	33.1
VS(%)		7.8	8.2	11.2	9.46	11.03
Sulphate(mg/g)		53	30	39	33.5	25.2
AVS(mg/kg)		330	344	308	750	681

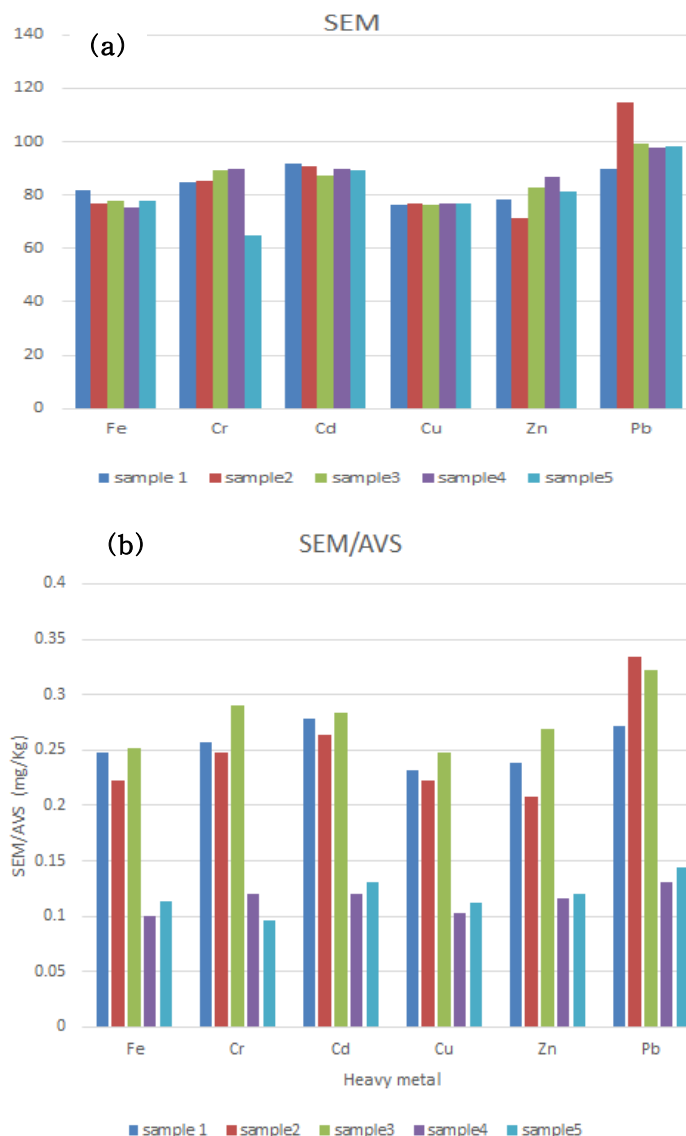
- 생물활성촉진제의 입경 및 배치간격과 시간에 따른 오염퇴적물 내 중금속 변화
  - 해양오염저질 시료 1~5번(표 III-나-10)에서 1개월 후 중금속의 분포형태는 그림 III-32에서 보는 바와 같이 치환가능분율(exchangeable form)이 실험초기에 비하여 약간 감소하였음.
  - 시료 1번의 중금속 분포는 광물내 잔류분율> 유기물 결합분율> 철 및 망간 산화물 결합분율> 탄산염 결합분율> 치환가능분율 순으로서 안정한 형태의 중금속분율일 수록 더욱 높았음.
  - 시료 2번은 Cd를 제외한 모든 중금속에서 치환가능분율은 감소하고, 보다 안정한 중금속 분율이 약간씩 증가하였음.

- 시료 3, 4, 5번의 경우에도 마찬가지로 생물활성촉진제의 입경과 배치간격에 따라 차이는 있었으나 대체적으로 실험초기에 비하여 1개월 후 치환가능분율은 감소하고, 보다 안정한 형태의 중금속 분율이 증가하는 경향을 보였음.



[그림 III-나-29] 생물활성촉진제의 입경 및 배치간격에 따른 오염토적물 내 중금속의 존재형태 변화

- 그림 III-나-30(a)는 SEM(Simultaneously extracted heavy metal) 농도를 보여줌.
- Cd은 80mg/kg 이상 이었고, Pb는 약 100mg/kg이었으나 Cd과 Pb를 제외한 SEM농도는 약 80 mg/Kg 로 평가되었음.
- 그림 III-나-30(b)은 SEM/AVS 비를 보여 줌. 시료 1, 2, 3번은 시료 4, 5번 보다 SEM/AVS 비가 다소 높았음. 이는 생물활성촉진제의 입경과 배치간격이 SEM/AVS 비에 매우 큰 영향을 줄 수 있음을 의미함.
- SEM/AVS 비는 해양 퇴적물 내에 함유된 중금속의 생물이용도 및 중금속에 의한 위해성을 나타내는 지표 중의 한가지로 SEM/AVS 비율이 <1인 경우 퇴적물내의 중금속은 대부분 AVS와 결합되어 산화환원전위가 낮은 혐기성상태에서 안정한 금속황화물 형태로 존재함으로써 위해성이 크지 않음을 의미함.



[그림 III-나-30] 생물활성촉진제의 입경 및 배치간격에 따른 시험 오염퇴적물의 SEM(Simultaneously Extraction of Heavy metal) 농도 및 SEM/AVS 비의 변화

③ 연안 오염퇴적물의 재부상에 의한 중금속의 수계용출



○ 부산북항 퇴적물의 물리화학적 특성과 중금속 존재형태

- 표 III-나-11은 부산북항에서 동계 및 춘계에 채취한 퇴적물의 물리화학적 특성을 보여줌.
- 부산북항 퇴적물은 미세입자인 점토질과 실트질 함량이 82.6~85.7%로서 높았으며, COD<sub>Mn</sub>과 강열감량이 각각 18.82~28.4g/kg 및 39.16~110.6g VS/kg로서 유기물오염물질의 함량이 대단히 높은 것으로 평가되었음.
- 부산북항 퇴적물의 AVS 함량은 246.15mg S/kg로서 높은 값을 보였음. 일반적으로 해수의 경우 황산염 농도가 평균 2,680mg/L 정도로 높기 때문에 북항 퇴적물과 같이 유기물이 풍부한 연안 퇴적물에서는 황화물을 생성하는 황산염환원반응이 활발하게 진행되어 AVS 함량이 높은 것으로 알려지고 있음.

[표 III-나-11] 부산북항 퇴적물의 물리화학적 특성

Parameters	Busan Northport
Sand (%)	14.3(14.30~17.4)
Silt and clay (%)	85.7(82.6~85.7)
pH (at 25°C)	7.56(7.56~8.02)
COD <sub>Mn</sub> (g/kg)	28.40(18.82~28.40)
Water content (%)	48.67(48.67~49.00)
VS (g/kg)	110.60(39.16~110.60)
AVS (mg S/kg)	246.15

- 표 III-나-12는 연안 퇴적물의 오염정도를 보여줌. COD와 AVS 함량을 기준으로 점수를 매긴 뒤 합산한 점수를 이용하여 오염도가 거의 없는 1등급과 오염도가 심각한 5등급으로 구분하여 평가할 수 있음.
- 퇴적물의 재부상에 의한 중금속 용출특성 평가에 사용된 부산북항 퇴적물의 오염도를 평가하면 COD<sub>Mn</sub> 점수가 41.8이며, AVS 점수가 33.3으로서 총점이 75.1이므로 오염정도는 4등급으로서 오염도가 비교적 심한 상태라 할 수 있음.
- 부산북항 퇴적물에 함유된 중금속의 경우 표 III-나-13에서 보는 바와 같이 Cr과 Cu 그리고 Pb의 함량은 96.95, 153.51 및 148.30mg/kg으로서 대단히 높았으며, Fe는 373.73mg/kg이었음. Zn과 Cd은 각각 49.8mg/kg 그리고 27.34mg/kg으로 상대적으로 낮았음.

[표 III-나-12] COD와 AVS를 이용한 연안해역 퇴적물의 오염도평가 방법

COD (mg/g)	Conc.	<5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	>30
	Score	0	8.3	16.7	25.0	33.3	41.7	50.0
AVS (mg/g)	Conc.	<0.05	0.05~0.1	0.10~0.1	0.15~0.2	0.20~0.2	0.25~0.3	>0.30
	Score	0	8.3	16.7	25.0	33.3	41.7	50.0
Level		I	II	III	IV	V		
Score		0~20	20~40	40~60	60~80	>80		
Pollution degree		Low ← → High						

[표 III-나-13] 부산북항 퇴적물의 중금속 함량과 중금속 존재형태 분포도

Content	Total metal (mg/kg)	Percentages of Heavy metals in sediment (%)				
		Exchangeable	Carbonate	Mn-Oxide	Organic	Residual
Cr	96.95	16.67	18.6	28.3	19.3	16.97
Fe	372.75	14.67	17.87	14.3	14.9	38.23
Cu	153.51	9.7	20.28	20.4	42.46	6.98
Zn	49.80	16.56	34.536	24.9	19.67	4.31
Cd	27.34	9.38	33.59	2.3	22.51	32.18
Pb	148.30	6.54	22.79	17.79	35.2	17.95

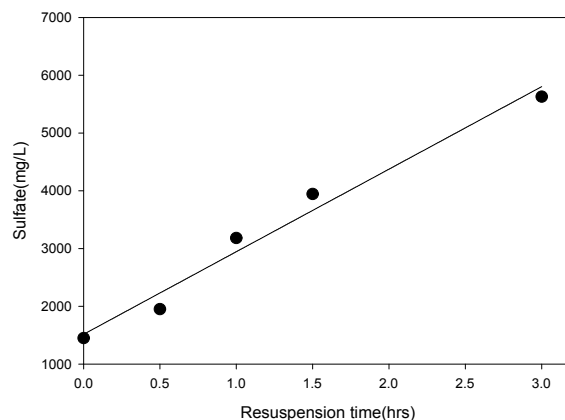
- 표 III-나-14에서 보는바와 같이 미국 환경보호청에서는 중금속에 의한 퇴적물의 위해성을 나타내기 위하여 생물에 대한 악영향이 드물게 관찰되는 최고 농도(Threshold effect level, TEL) 및 생물에 대한 악영향이 자주 관찰되는 최대농도(Probable effect level, PEL) 그리고 생물의 10%에 악영향이 나타날 수 있는 농도(Effect range low, ERL)와 생물 50%에 악영향이 나타날 수 있는 농도(Effect range median, ERM)를 사용하고 있음. TEL은 독성 시험 결과의 15번째 백분위수와 영향이 나타나지 않는 값의 중간 값(Median)의 기하평균값을 의미. PEL은 영향을 받는 독성 표본의 50번째 백분위수와 영향을 받지 않는 85번째 백분위수의 기하평균값을 의미함.
- 부산북항 퇴적물의 경우 표 III-나-14에서 보는 바와 같이 Cd과 Pb는 ERL과 ERM 사이의 중금속 분율이 각각 30.72 및 44.17%이었으며, ERM을 초과하는 중금속 분율이 각각 64.89 및 24.34%으로서 부산북항 퇴적물에서 위해성이 가장 큰 중금속으로 평가되었음.
- Cu의 경우도 77.8%가 ERL과 ERM 사이로 평가되어 생물에 위해성이 비교적 큰 물질로 평가되었으나, Cr의 경우는 46.05%가 TEL과 PEL 사이였으며, 16.45%가 ERL과 ERM 사이로 평가되어 상대적으로 위해성이 낮은 중금속으로 평가되었음.
- Zn의 중금속 함량은 27.34mg/kg으로서 TEL 이나 ERL보다 낮은 값을 보임으로서 생물에는 위해성이 거의 없는 것으로 평가되었음.

[표 III-나-14] US EPA의 중금속에 의한 퇴적물의 위해성 가이드라인(Sediment Quality Guidelines; SQGs)과 부산북항 퇴적물의 중금속 오염도

Content	SQGs(mg/kg)				Percentage of the heavy metal contents in the sediment exceeding SQGs (%)			
	TEL	PEL	ERL	ERM	TEL-PEL	>PEL	ERL-ERM	>ERM
Cr	52.3	160.4	81	370	46.05	-	16.45	-
Fe	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	18.7	108.2	34	270	58.29	29.52	77.85	-
Zn	124	271	150	410	-	-	-	-
Cd	0.68	4.2	1.2	9.6	12.87	84.64	30.72	64.89
Pb	30.2	112.2	46.7	218	55.30	24.34	44.17	24.34

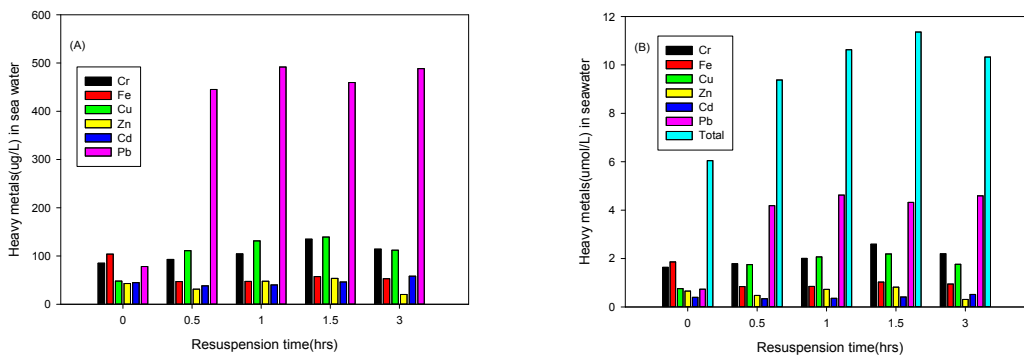
○ 퇴적물의 재부상 시간이 중금속의 용출 및 분포형태에 미치는 영향

- 연안 해역에서 단기간 동안 일어나는 퇴적물의 재부상이 중금속의 용출에 미칠 수 있는 가장 큰 환경변화는 산화환원전위와 간극수에 비하여 상대적으로 낮은 해수 중의 중금속 농도임.
- 연안 퇴적물이 재부상하는 경우 퇴적물 입자들은 해수 중의 용존산소와 접하기 때문에 산화환원전위가 크게 증가할 수 있고, 산화환원전위가 증가하게 되면 재부상한 퇴적물에 존재하는 황화물이 황산염으로 산화될 수 있음. 퇴적물에 함유된 황화물의 산화는 황화물과 결합된 형태로 존재하는 중금속들을 해리시킴으로서 퇴적물에 함유된 중금속들의 존재형태에 영향을 미치게 되며 해수 중으로 용출될 수 있음.
- 그림 III-나-31는 실온의 회분식 실험에서 평가한 퇴적물 재부상실험에서 시간에 따른 황산염의 농도변화를 보여줌.
- 재부상한 퇴적물 입자의 농도가 500mg SPM/L인 경우 퇴적물 재부상 실험초기에 해수의 황산염 농도는 1,450mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L였으나 황산염의 농도는 3시간까지 부상시간에 비례하여 증가하였음. 이는 퇴적물의 재부상에 의한 황화물의 산화반응은 황화물 농도와 관련 없이 진행되는 영차반응(반응속도상수는 1,429mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L.h)임을 의미하는 것임.



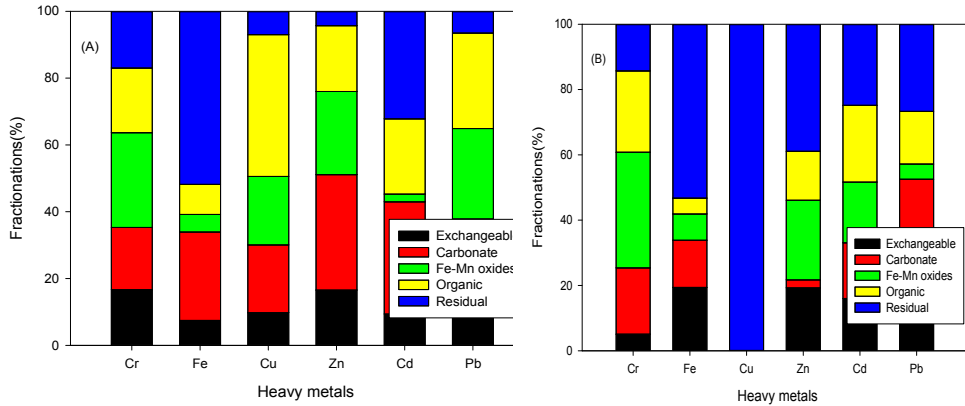
[그림 III-나-31] 퇴적물 재부상실험에서 시간에 따른 해수 내 황산염의 농도변화

- 그림 III-나-32는 퇴적물의 재부상 시간에 따른 해수 중의 중금속 농도변화를 보여줌.
- 재부상시간이 증가함에 따라 퇴적물에 함유된 중금속의 용출로 인한 해수 중의 중금속 농도들은 점차 증가하지만, 해수에서 중금속농도 증가량과 퇴적물로부터 중금속의 용출 속도는 중금속 종류별로 큰 차이를 보임.
- Pb의 경우, 해수 중의 초기농도는 78.19ug/L이었으나 해수 중으로의 용출반응이 급격히 진행되어 재부상 30분 후에 445.17ug/L로 증가하였으며, 60분 이후부터는 큰 농도의 변화가 없었음. Cr과 Cu 및 Zn 농도의 경우, 재부상 시험 초기부터 90분까지 꾸준히 증가하는 경향을 보임.
- 해수 중의 Cd 농도는 재부상 실험을 진행한 3시간 동안 꾸준히 증가하여 재부상에 의한 중금속의 용출반응이 지속적으로 일어나고 있는 것으로 평가됨. 퇴적물의 재부상에 따른 중금속의 용출 속도는  $Pb \gg Cu > Cr \gg Zn > Cd$  순이었음.
- 전체 중금속의 용출량은 그림 III-나-34(B)와 같이 해수에서 총 중금속의 몰농도 (umol/L)의 변화로부터 확인할 수 있음.
- 퇴적물의 부상실험이 시작된 이후 부상 1.5시간까지 전체 해수에서 총 중금속의 몰농도는 약 6mmol/L에서 10mmol/L로 지속적으로 증가함. 퇴적물의 부상실험에서 3시간에는 해수에서 총 중금속의 몰농도가 1.5시간에 비하여 오히려 감소하였으며, 1.0시간의 총 중금속 몰농도와 비슷하였음. 이는 퇴적물의 부상으로 인하여 중금속들이 새로운 평형에 도달하기 위한 반응이 1.5시간 이내에 급격히 진행되며, 이후에는 상대적으로 느린 반응이 이어짐을 알 수 있음.



[그림 III-나-32] 퇴적물의 재부상 시간에 따른 해수 중의 중금속 농도변화 (A) ug/L (B) umol/L

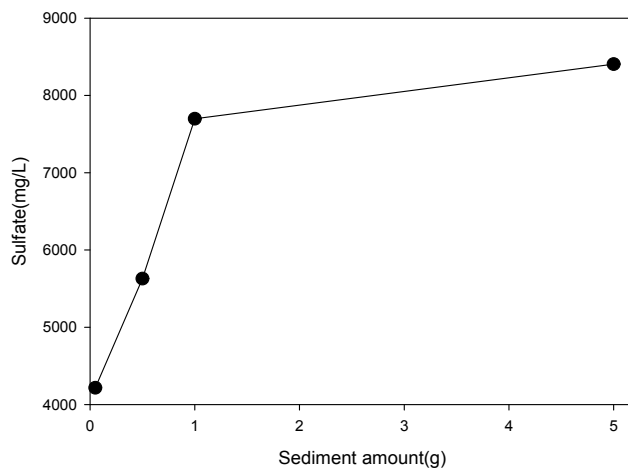
- 그림 III-나-33에서 퇴적물을 구성하는 중금속들의 광물내 잔류분율은 3시간 재부상 실험 후에 뚜렷하게 증가하였음. 이것은 잔류 중금속의 경우 용출되지 않기 때문에 함량은 변하지 않는 반면 다른 형태로 존재하는 중금속의 함량이 감소하기 때문임.
- 유기물과 결합된 중금속의 분율 감소는 황화물의 산화에 직접 비례한 것으로 평가됨. Fe-Mn 산화물, 탄산염 및 치환가능 분율의 경우는 재부상실험 전후에 중금속별로 차이를 보였는데 이는 퇴적물의 재부상에 의하여 해수로 용출되는 중금속의 용출 반응이 황화물의 산화반응과 퇴적물 입자 사이의 간극수에 비하여 상대적으로 낮은 해수의 중금속 농도에 의해서 영향을 받기 때문임.



[그림 III-나-33] 부산북항 퇴적물내 함유된 중금속 존재형태(A)와 3시간 재부상 후 중금속 존재형태(B)

○ 퇴적물 입자의 재부상 양이 중금속의 용출 및 중금속의 존재형태에 미치는 영향

- 그림 III-나-34은 3시간 동안의 재부상한 퇴적물의 양에 따른 황산염농도 변화를 보여 줌.
- 재부상한 퇴적물의 농도가 50mg SPM/L에서 1,000mg SPM/L으로 증가하였을 때 황산염의 농도는 4,216mg/L에서 7,698mg/L로 선형적으로 증가하였음.
- 재부상한 퇴적물의 농도가 5,000mg SPM/L일 때는 황산염의 농도가 8,404mg/L로서 재부상한 퇴적물의 농도가 1,000mg SPM/L인 황산염 농도보다 9.2% 증가함. 이는 재부상한 연안 퇴적물의 농도가 1,000mg SPM/L 이상일 때는 해수 중으로 용출되는 중금속의 양이 재부상한 연안 퇴적물의 양에 직접 비례하지 않는다는 것을 의미함

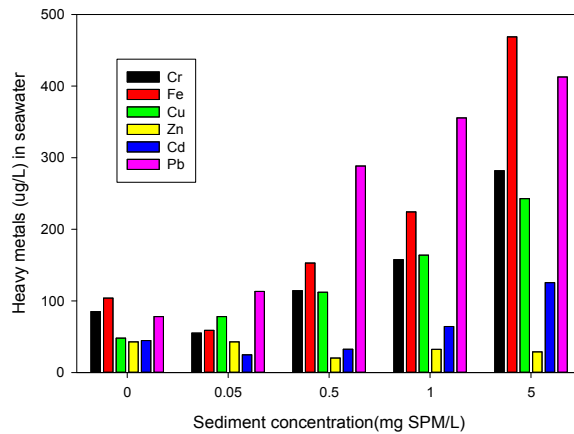


[그림 III-나-34] 3시간 동안의 재부상한 퇴적물의 양에 따른 해수 내 황산염농도 변화

- 그림 III-나-35은 3시간 동안의 재부상한 퇴적물의 양에 따른 해수에서의 중금속 농도를 보여 줌. 재부상한 퇴적물의 농도가 50mg SPM/L에서 1,000mg SPM/L까지는 증가하였을 때 해수에서의 중금속 농도는 황산염의 농도의 경우와 같이 선형적으로 증가하

였음. 재부상한 퇴적물의 농도가 5,000mg SPM/L인 경우 해수의 중금속 농도는 재부상한 퇴적물의 농도가 1,000mg SPM/L인 경우보다 높았으나 재부상한 퇴적물의 농도에 비례하여 증가하지는 않았음.

- 퇴적물의 재부상 시간이 충분히 길다고 하면 퇴적물로부터 용출되는 중금속의 양은 재부상한 퇴적물 양에 비례한다고 할 수 있으며, 이는 빈번하게 발생하는 해수 유동의 급격한 변화에 의해 상당량의 부산복합 퇴적물이 장시간 재부상할 경우 중금속이 해수로 용출되어 연안생태계에 심각한 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미함.



[그림 III-나-35] 3시간 동안 재부상한 퇴적물의 양에 따른 해수에서의 중금속 농도

#### ④ 생물활성촉진제의 현장 활용에 있어 부정적인 영향에 대한 분석

##### ○ 오염된 해양 퇴적물에서 황화물의 생성

- 해수에 함유된 황산염의 평균 농도는 약 2,680mg/L이며, 연안해역의 퇴적물 간극수에도 비슷한 농도의 황산염이 존재할 수 있음.
- 그러나, 오염된 연안 퇴적물환경에서 유기오염물과 같은 전자공여체가 존재하는 경우 황산염환원균에 의해서 황산염이 환원되어 황화물을 생성시키는 반면 퇴적물의 투수계수가 낮아 해수로부터의 황산염 공급이 상대적으로 느리기 때문에 간극수의 황산염 농도는 해수에 비해 낮은 것이 일반적임.
- 연안퇴적물에서 생성된 황화물이 황화수소 등의 형태로 배출되는 경우 악취가 발생할 수 있으며, 황화물의 독성으로 인하여 저서생태계를 교란시킬 우려가 있음.

##### ○ 오염된 해양 퇴적물에서 황산염환원반응의 순기능

- 연안퇴적물에서 황산염환원균은 황산염이 존재하는 경우 퇴적물에 함유된 유기오염물질을 전자공여체로 사용하기 때문에 유기오염물질을 안정화시키는데 대단히 중요한 역할을 수행함.
- 연안 퇴적물에서 황산염환원균의 활성화는 전자공여체로 사용하는 유기오염물질이나 전자수용체로 사용하는 황산염의 농도가 낮은 경우 황산염환원균의 활성화는 높지 않음.
- 생물활성촉진제를 통하여 황산염을 연안퇴적물에 주입하는 목적은 황산염환원균의 활성을 촉진하여 오염된 연안퇴적물에 함유된 유기오염물질의 분해속도를 증가시키기 위한 것임.
- 연안퇴적물에서 황산염환원균의 활성이 높을 경우 유기오염물질의 분해율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 황산염환원반응으로부터 생성되는 황화물은 퇴적물에 함유된 중금속과

---

결합하여 안정한 금속황화물을 형성하기 때문에 중금속으로 인한 위해성을 감소시키는  
순기능이 있음.

○ 오염된 해양 퇴적물에서 황산염환원반응의 위해성

- 본 연구에서 생물정화촉진제에 함유된 황산염은 48g/kg으로서 황산염이 생물활성촉진제 주변으로 확산하는 경우 퇴적물에서 황산염의 농도는 생물활성촉진제의 크기와 이들의 간격에 따라 달라지지만 생물활성촉진제의 직경이 1cm인 경우 황산염이 확산될 수 있는 영향반경이 3~10cm 라고 가정하면 주변 퇴적물에서 평균 황산염의 농도 증가는 5.18~139.90mg/kg(해수의 0.19~5.22%)이며, 생물활성촉진제 사용으로 인하여 퇴적물에서 추가적으로 발생할 수 있는 황화물은 최대 1.72~46.6mg/kg에 불과함. 또한, 생물활성촉진제 사용량은 m<sup>2</sup>당 29~260개의 범위 이지만 이 경우도 m<sup>2</sup> 당 최대 황화물 발생량은 많지 않음.
- 연안 퇴적물에는 다양한 종류의 중금속이 함유되어 있으며, 특히 철의 경우 20,882~25,763mg/L로서 함량이 대단히 높음. 생물활성촉진제에 의하여 주입된 황산염에 의하여 추가적으로 생성될 수 있는 황화물은 퇴적물에 함유된 Cd, Zn, Cr, Ni, Cu, Pb 등의 중금속들 중에서 쉽게 용출될 수 있는 분율(치환가능분율, 탄산염 결합분율, 철 및 망간산화물 결합분율)과 결합하여 금속황화물을 형성하는 것으로 알려지고 있음.
- 금속황화물은 비교적 안정한 형태로 알려진 유기물결합 분율로서 분류되기 때문에 중금속에 의한 퇴적물의 위해성을 오히려 감소시키는 역할을 담당할 것으로 판단됨.
- 금속황화물을 함유한 연안퇴적물이 해수 중으로 재부상하는 경우 황화물이 산화하여 중금속이 수계로 용출 될 위험성은 있음. 그러나, 본 연구에서와 같이 오염퇴적물 표면을 피복하여 수계와 퇴적물 층을 분리하는 경우 금속황화물로부터의 중금속의 용출 위험성은 없다고 판단됨.

**다. 피복공법 적용을 위한 설계·시공기술 개발**

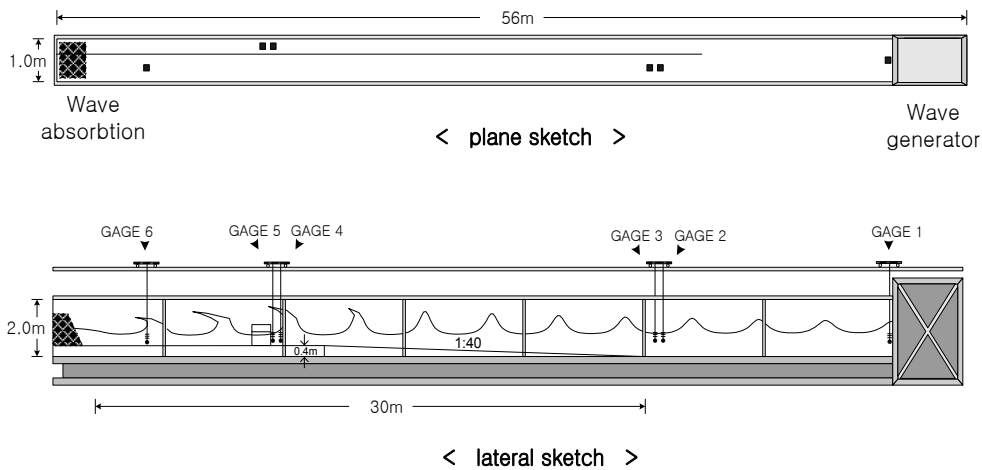
**1. 환경외력에 따른 피복재 침식 실험실형 모형실험 수행**

**(가) 침강 및 침식 실험방법**

- 본 연구에서 검토한 피복공법 적용 예상후보지(K항)는 수심이 12 m로 얇고, 비교적 소규모 선박이 이용하고 있어 특별한 준설이 필요 없는 것으로 확인됨
- 대상후보지 인근의 준설선은 펌프/호퍼 준설선, 그레브 준설선, 그리고 디퍼 준설선이 일반적으로 사용되고 있음. 본 연구에서는 피복재 포설장비로 그레브 준설선의 경우를 가정하였으며, 1회 포설량은 약 10~20 m<sup>3</sup>로 상정하였음
- 대상후보지의 파랑조건을 검토하기 위해 “전해역 심해설계과 추정정보고서Ⅱ”(KIOST, 2005)의 50년빈도와 10년빈도 심해설계파랑에서 K항에 주 영향을 미칠 것으로 사료되는 5개 파랑(E, ESE, SE, SSE, S)을 선정하였음
- 상세역 파랑변형해석 결과 연구대상 항내 수역에서 SE방향 50년 빈도 샘해 파랑 내습 시 1.00 m, 10년 빈도 파랑 내습 시 0.65 m 규모의 파고가 계산되었음. 대상후보지인 컨테이너터미널 전면해상에서 창, 낙조류 모두 약 0.10 m/sec(0.2 knot)의 유속이 분포하는 것으로 나타남
- 본 연구에서는 피복공법 현장 적용성을 분석하기 위해 실험축척 1:10의 수리모형실험을 실시하였음. 본 실험에 사용된 조파기 및 단면수로에서는 규칙파, 불규칙파 및 고립파의 조파가 가능하며, 조파수로의 제원은 길이 56 m, 폭 1 m, 깊이 2 m이며, 피스톤식 조파

기가 한쪽 끝단에 설치되어 있음.

- 최대재현파고는 0.5 m이며, 재현주기는 0.5 sec~5.0 sec임(그림 III-다-1 참조). 조파장치는 컴퓨터, 증폭기 및 A/D converter 등으로 구성되어 있으며, 실험과 제원에 따라 생성된 조파신호를 조파기로 송신하고, 파고계로부터 녹취된 자료를 주파수 스펙트럼 및 파고 등으로 분석이 가능함. 실험과 설정 및 파고계측에 사용된 파고계는 용량식 파고계이며, 길이는 0.6m 이고, 측정범위는 0~±0.3 m임

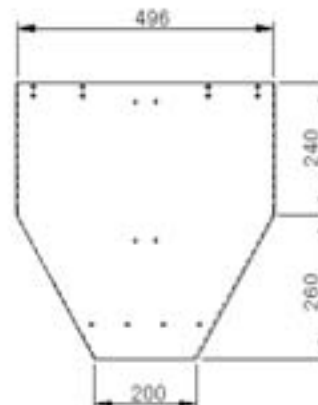


[그림 III-다-1] 해수의 pH에서 존재하는 Hydrogen sulfide의 형태 및 비율

- 피복재는 원터치 강사기를 이용하여 포설함(그림 III-다-2). 그레브 준설선의 경우와 유사하게 수중에서 포설할 수 있도록 강사기는 모터를 이용하여 상하로 움직임. 실내실험에서는 현장에서 사용되는 그레브 준설선의 1회 포설량을 고려하여 1:10의 상사율을 적용시 강사박스 내 피복재의 1회 최대 포설량을 약 0.0220 m<sup>3</sup> (30 kgf 기준, 원형상 22 m<sup>3</sup>)으로 선정함



(a) 강사기 측면도



(b) 강사기 규격(단위: mm)

[그림 III-다-2] 원터치 강사기

- 파랑에 대한 실험조건은 피복공법 적용 대상후보지의 파랑조건을 참고하고, 1:10의 축척을 적용하여 수심은 1.2 m(대상지역 수심 약 12 m), 피복재는 파랑이 없는 조건에서 포

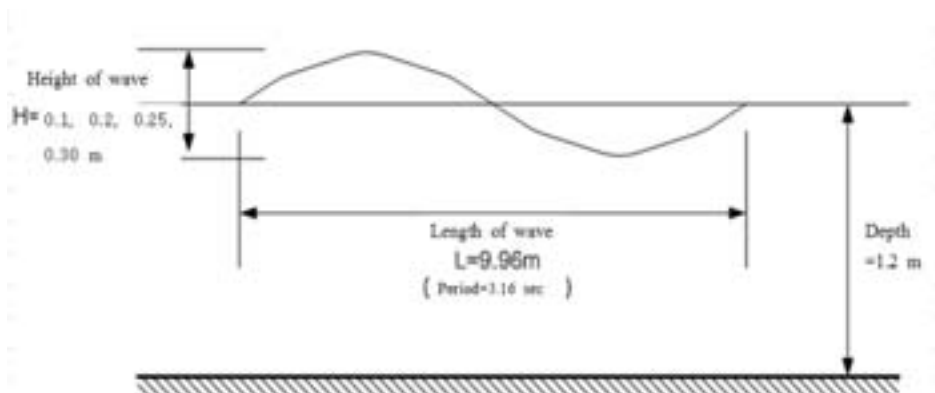


설 완료 후 2시간 동안 파랑을 적용한 후 피복재의 변형을 확인함

- 파랑의 파고조건은 50년 빈도 심해설계파 내습시 대상 해역에서 발생하는 파고(원형상 1.0 m)를 고려하여 실험시 파고 0.1 m로 예비실험을 실시함. 예비 실험 시 피복재 변형이 거의 없음을 확인하였으며, 침식의 영향을 확인하기 위하여 모형상 0.2, 0.25, 0.30 m(원형상 2, 2.5, 3 m)의 파고를 각 38분(원형상 2시간)씩 조파함. 이는 피복재의 변형을 발생시킬 수 있는 극단적인 조건으로 설정하기 위함임(그림 III-다-3)
- 실험과 주기는 대상해역에서 자주 계측되는 대표 주기인 10초(모형실험상 3.16초)를 적용함. 본 실험에서 적용한 실험조건은 표 III-다-1과 같으며, 규칙과 조건을 적용하였음

[표 III-다-1] 입사파 특성

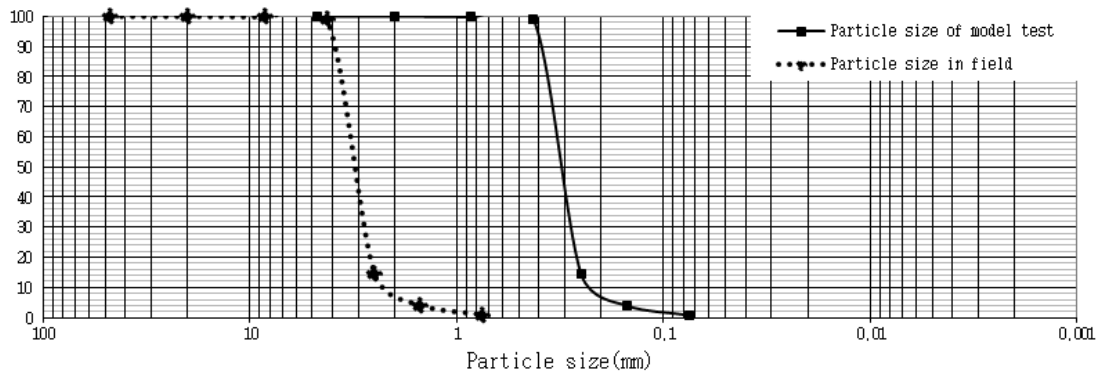
Case	현장조건		모형실험 조건	
	주기 (sec)	파고 (m)	주기 (sec)	파장 (m)
RE-T10H0	10	1.0	3.16	0.10
RE-T10H1	10	2.0	3.16	0.20
RE-T10H2	10	2.5	3.16	0.25
RE-T10H3	10	3.0	3.16	0.30



[그림 III-다-3] 입사파의 파고 및 주기

(나) 실험재료

- 피복재료로 실트나 점토와 같은 세립토와 모래와 같은 조립토를 사용하고 비교한 여러 연구결과가 있음(Brannon et al., 1985; Klapper, 1991). 세립질 재료의 경우 조립질 재료에 비하여 입자 크기가 작고 흡착능력이 커서 화학적으로 보다 안정적으로 폐기물 피복이 가능한 장점이 있음(Suszkowsk, 1983). 반면, 모래는 입자 크기가 작은 세립질 재료에 비하여 포설 후 수중에서 부유하는 시간이 짧고, 유속을 따라 이송되어 퍼지는 폭이 좁아서 시공에 유리한 장점이 있음(Palermo et al., 1998 b). 따라서 피복재료는 피복하려는 오염물질, 수역조건, 시공성 등을 고려하여 결정함
- 일반적으로 피복재 포설 시 오탃발생이 미미하고 수중에서 안정된 피복두께를 확보할 수 있는 조립질 재료를 피복재료로 많이 사용함(Palermo et al., 1998 b). 본 연구에서는 중간크기의 모래(0.425~2 mm)와 가는 모래(0.075~0.425 mm) 범위의 모래(D50=0.3 mm)를 사용하였음



[그림 III-다-4] 피복재의 입도분포

- 1회 실험 시 필요한 피복재의 두께 및 포설량은 예비실험을 통하여 수중에 포설되는 피복재의 최대 목표두께를 0.1 m(실제 1.0 m)로 선정할 경우 총360 kgf이 사용되는 것으로 확인됨.
- 1회 포설되는 피복재량에 따른 피복형상 변화를 관찰하기 위하여 10, 20, 30 kgf 씩 3가지 경우로 나누어 실험을 실시함. 1회 피복재 포설속도는 3가지 경우 모두 10초로 고정시켰다. 포설속도를 약 10초 이상으로 할 경우 1회 포설량에 관계없이 침강 후 피복재의 폭은 약 8 m로 유사하였음.
- 파고 적용 시점은 포설이 완료된 후 1시간 이상 경과하여 육안으로 피복재 형상을 확인한 이후부터임.
- 수조 안에는 높이 0.3m, 길이 6 m의 아크릴 눈금을 삽입하여 육안으로 침식깊이를 확인할 수 있게 하였음. 강사기는 수조의 3.1 ~ 3.6 m 구간에 고정하여 위치시켰음. 수조 내부에 LED 조명등을 설치하여 피복재 형상 및 눈금 확인을 용이하도록 조치하였음
- 피복재 형상변화는 Shape Metrix 3D 시스템을 이용한 사진계측으로 파악하였음. 사진계측은 사진을 찍어서 그로부터 3D 좌표 및 형상을 만들어내는 기술로서 촬영 각도를 달리한 2장 이상의 사진을 이용하면 카메라 위치와 피사체의 위치가 해석됨.

(다) 피복두께의 선정

- 선행연구자들에 의하여 제안된 최소피복두께는 표 III-다-2과 같음. 피복의 목적에 따라서 단순히 물리 화학적인 분리만 할 경우 0.15 ~ 0.3 m 이내, 유기물이나 오염물의 침투를 고려한다면 0.6 m 이내, 분리와 침투를 모두 고려하는 통상적인 경우는 약 0.75 ~ 1.2 m 이내를 제안하고 있음.
- 본 연구에서는 선행연구자들의 연구를 고려하여 피복두께를 1.0 m(실험 시 0.1 m)로 선정하였음.

[표 III-다-2] 선행연구자들에 의한 최소피복두께 제안

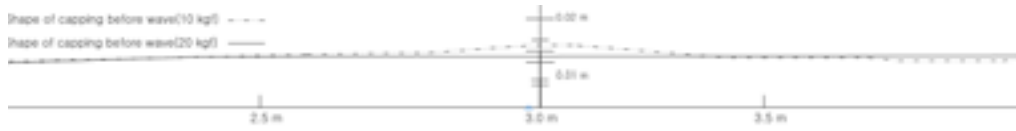
No.	References	Cap thickness(m)	Mat	Condition
1	Palermo (1991)	0.3	Sand, Silt	Chemical isolation
		0.3-0.6	Sand, Silt	Prevention of most organisms
		0.9-1.2	Sand, Silt	Centional dredging operations
2	Palermo et al.(1998 b)	0.3	Sand, gravel	Physical isolation
		0.6	Sand	Chemical isolation
3	Palermo et al.(1998 a).	0.15 - 23	Sand	Sprinkling techniques needed
		0.3 - 0.6	Sand, Silt	Prevention of most infaunal organisms
		0.75 - 1.2	Sand	Most cases
4	Fredette et al. (2002)	0.15	Sand	Thin cap
		0.60	Sand	Isolation cap

(라) 1회 포설량 변화에 따른 피복재 침강형상

- 그림 III-다-5은 침강이 완료되고 파고를 적용하기 전의 피복재 형상으로 전체 6m 구간 중 중앙부에 해당되는 2~4 m 구간임. 이를 수조 바닥면을 기준으로 피복재 두께를 연속적으로 도식화하면 그림 III-다-5와 같은 피복재 침강형상을 얻을 수 있었음.
- 침강형상은 강사기가 설치된 3.0 m 전후 구간에서 위로 볼록하였으며, 1회 포설량에 관계 없이 대체적으로 약 8 m로 퍼지는 경향을 보였음.
- 그림 III-다-6는 1회 10 및 20 kgf을 타설한 경우 피복재 형상을 비교한 것임. 10 kgf씩 포설한 경우강사기가 위치한 중앙부에서 최대 0.11 m로 20 kgf씩 포설한 경우(0.09m)에 비하여 약 0.02 m 높고, 좌측 일부구간에서 약 0.02 m 낮았으며, 우측부 일부구간에서 약 0.02 m 높았음.
- 1회 포설량을 10, 20, 30 kgf으로 변화시켜 가면서 침강형상의 차이점을 분석했으나, 전체적인 형상은 변화가 거의 없었음.



[그림 III-다-5] 침강 후 피복재 형상(중앙부 3.0~4.0 m 구간)



(a) 구간 2.0~4.0 m(중앙부)



(b) 구간 0.0~2.0 m(좌측부)



(c) 구간 4.0~6.0 m(우측부)

[그림 III-다-6] 1회 포설량에 따른 침강형상의 비교

- 표 III-다-3는 포설 전 피복재의 포설량, 횡수, 건조단위중량, 간극비를 정리하였으며, 표 III-다-4은 침강이 완료된 후(파고 적용 전) 피복재의 변형을 반영한 피복재의 단위중량, 간극비의 변화를 나타내었음. 실험결과, 피복재의 체적은 침강과정을 거치면서 증가하였고, 파고가 커지면서 점차적으로 증가하는 것으로 나타남

[표 III-다-3] 파고 적용 전 피복재 포설조건

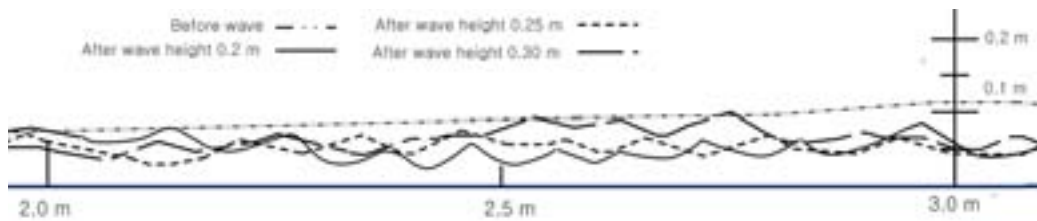
Case	1회 포설량 (kgf)	포설횟수 (회)	총 포설량 (kgf)	포설 전 1회 피복재체적 (m <sup>3</sup> )	포설 전 피복재 전체 체적 (m <sup>3</sup> )	포설 전 피복재의 건조단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	포설 전 간극비	중앙부 최대 두께(m)
1	10	36	360	0.0070	0.252	14.014	0.84	0.11
2	10	36	360	0.0070	0.252	14.014	0.84	0.11
3	10	36	360	0.0070	0.252	14.014	0.84	0.11
4	20	18	360	0.0145	0.261	13.531	0.91	0.09
5	20	18	360	0.0145	0.261	13.531	0.91	0.09
6	20	18	360	0.0145	0.261	13.531	0.91	0.09
7	30	12	360	0.0220	0.264	13.377	0.93	0.09
8	30	12	360	0.0220	0.264	13.377	0.93	0.09
9	30	12	360	0.0220	0.264	13.377	0.93	0.09

[표 III-다-4] 침강 후 피복재 단위중량, 간극비 변화

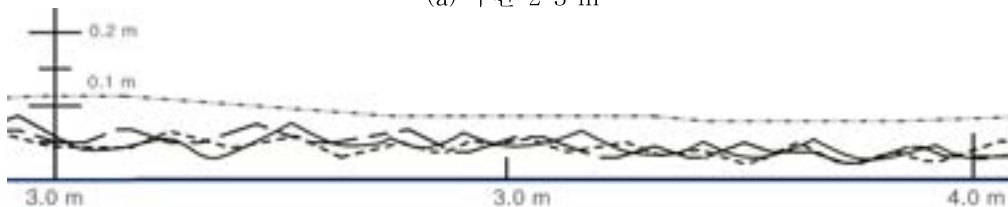
Case	1회 포설량 (kgf)	침강 후 피복재 단면적(m <sup>2</sup> )	수조 폭 (m)	침강 후 피복재 체적 (m <sup>3</sup> )	침강 후 피복재의 단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	침강 후 간극비
1	10	0.5330	0.50	0.267	13.251	0.95
2	10	0.5330	0.50	0.267	13.251	0.95
3	10	0.5330	0.50	0.267	13.251	0.95
4	20	0.5690	0.50	0.285	12.412	1.08
5	20	0.5690	0.50	0.285	12.412	1.08
6	20	0.5690	0.50	0.285	12.412	1.08
7	30	0.5714	0.50	0.286	12.360	1.09
8	30	0.5714	0.50	0.286	12.360	1.09
9	30	0.5714	0.50	0.286	12.360	1.09

(마) 파고변화에 따른 피복재의 형상변화

- 본 연구에서는 태풍과 같은 파랑이 작용한 후 피복재의 변형 및 침식 등의 거동 특성을 규명하고자 하였음. 형상변화 관측실험은 파고가 없는 조건에서 피복재 포설이 최대목표 두께에 도달 후 점진적으로 파고를 높이며 수행하였음.
- 그림 III-다-7는 1회 포설량 10 kgf를 36회 투하하여 피복두께 0.11 m를 확보하고 입사파고를 순차적으로 0.2, 0.25, 0.3 m(실제 2, 2.5, 3 m)로 증가함에 따른 피복재의 형상 변화를 보여주고 있음. 파고 0.1 m로 실험한 경우는 피복재 변형이 거의 없어 제외하였음. 파고가 높아짐에 따라 피복재의 변형은 점점 증가하는 것으로 나타났으며, 그 표면 형상은 파랑의 형상과 유사하게 나타났음.
- 중앙부가 블록한 초기 형상은 파고 증가에 따라 피복재가 좌우측부로 퍼져나가는 형상을 그림 III-다-7에서 확인할 수 있음. 결과적으로 중앙부가 가장 많이 침식되었고, 파랑에 밀려난 피복재는 좌우측로 이동하여 피복재의 전체폭도 점점 넓어지는 경향을 보였음.



(a) 구간 2-3 m

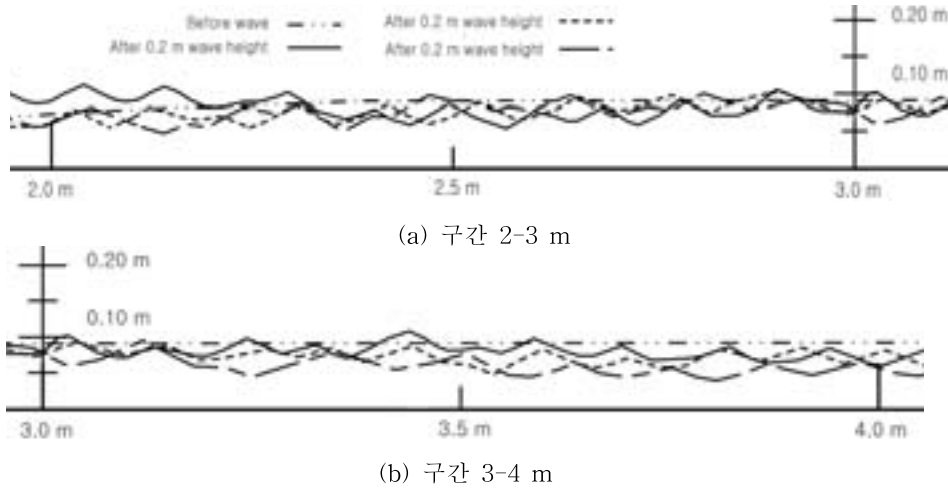


(b) 구간 3-4 m

[그림 III-다-7] 파고 적용 전 후의 피복재 형상의 변화(case 1~case 3)

- 1회 20 kgf 의 피복재를 포설한 경우의 피복재 형상은 그림 III-다-8과 같음. 1회 10 kgf 을 포설한 경우(그림 III-다-7)와 비교해 보면 그림 III-다-8의 중앙부가 그림 III-다-7 보다 최대 0.02 m 정도 블록하나 전체적인 형상은 중앙이 다소 블록하고 좌우가 완만하게

경사진다는 점에는 유사한 경향을 보인다.



[그림 III-다-8] 파고 적용 전 후의 피복재 형상의 변화(case 4~case 6)

- 파랑이 증가함에 따라 피복재의 형상은 중앙부에서 침식이 크게 발생하고 좌우측면으로 피복재가 밀려나가면서 전체적으로 피복재가 횡방향으로 퍼지는 경향을 보였음. 30 kgf의 피복재를 포설한 경우도 20 kgf의 경우와 형상이 아주 유사하여 형상변화 그래프는 생략하였음.

#### (바) 파고변화에 따른 피복재의 침식실험결과

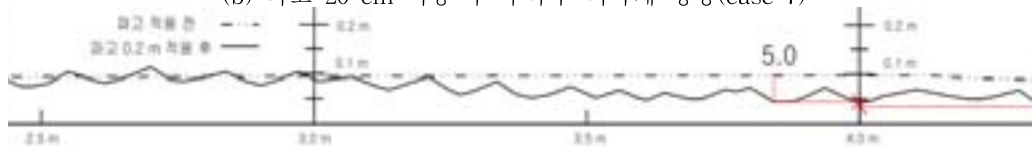
- 그림 III-다-79은 파고 적용 전 침강된 피복재형상과 파고 적용 후 형상을 비교하고, 최대 침식깊이와 위치를 정리한 것임. 파고 20 cm 적용 후 중앙부(3.5 m~4.0 m)에서 최대 5.0 cm, 파고 25 cm 적용 후 유사한 위치에서 최대 6.0 cm, 파고 30 cm 에서도 동일한 구간에서 최대 6.5 cm의 침식이 발생하였음.
- 그림 III-다-9(b)는 (a)와 동일 조건에서의 우측부 형상으로 일부 침식되기도 하지만 오히려 원래 피복형상보다 더 융기된 것을 확인할 수 있었음. 이는 중앙부 피복재가 파랑의 파형을 따라 횡방향으로 퍼지면서 끝단 피복재의 두께가 더 증가한 것으로 볼 수 있음.
- 그림 III-다-9(a), (b)에서 최대 침식량은 중앙부에서 발생하였지만, 침식을 감안하더라도 잔류 최소피복두께는 중앙부 5.0cm, 우측부 3.5cm, 좌측부 3.75cm 로 최소피복두께는 양 끝단인 것으로 나타남.

[표 III-다-5] 실험조건에 따른 피복재 최대침식량

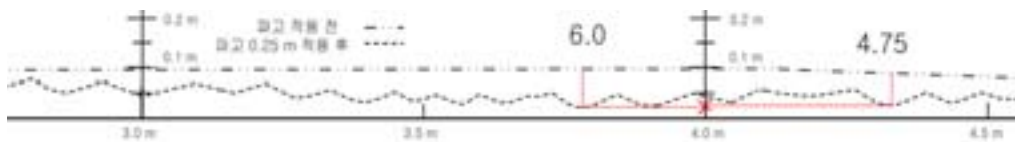
Case	파고 (m)	1회 타설량 (kgf)	피복두께 (m)	수심 (m)	최대침식량 (m)	파고적용시간 (hr)	피복재 분산폭 (m)
0	0.1	10	0.1	1.2	0.0	2	8
1	0.2	10	0.11	1.2	0.070	2	9
2	0.25	10	0.11	1.2	0.075	4	10
3	0.3	10	0.11	1.2	0.077	6	11
4	0.2	20	0.09	1.2	0.045	2	8
5	0.25	20	0.09	1.2	0.047	4	9
6	0.3	20	0.09	1.2	0.050	6	10
7	0.2	30	0.09	1.2	0.050	2	8
8	0.25	30	0.09	1.2	0.060	4	9
9	0.3	30	0.09	1.2	0.065	6	10



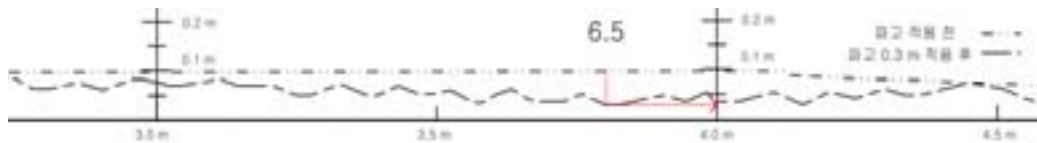
(b) 파고 20 cm 적용 후 우측부 피복재 형상(case 7)



(a) 파고 0.2 m 적용 후 2.5~4.5 m 구간(case 7)



(c) 파고 25 cm 적용 후 중앙부 피복재 형상(case 8)



(d) 파고 30 cm 적용 후 중앙부 피복재 형상(case 9)

[그림 III-다-9] 파고 적용 후 피복재 최대침식량의 산정(case 7~9)

- 표 III-다-5은 실험조건에 따른 피복재 최대침식결과를 정리한 것임. 실험조건에 따라 침식깊이는 최소 0.045 m에서 최대 0.077 m로 나타났음.
- 피복재 포설에 따른 초기 두께와 대비하여 최소 50%에서 최대 72%까지 침식되는 것으로 확인되었음.
- 본 연구의 현장대상지역의 50년 빈도 태풍파고(1.00 m)를 고려하여 파고 0.1 m로 실험한 경우(Case 1) 피복재침식은 관측되지 않을 정도로 미미하였음.

## (2) 피복재 침식해석 방안 마련

### (가) 해상세굴 개요

- 피복공법의 피복재 침식 메카니즘은 물의 흐름에 따른 피복재의 이동 및 변형으로 볼 수 있으며, 이는 세굴의 메카니즘과 동일하다고 볼 수 있음
- 세굴(Scour)은 수중의 토사가 흐르는 물의 물리, 화학적 작용에 의하여 굴착되어 운반되어지는 현상으로, 유속과 그로 인하여 토립자에 작용하는 전단응력으로 결정할 수 있음.
- 세굴은 한계속도 및 전단응력에 따라 크게 2가지 형태로 구분 가능함. 첫째는 이동상세굴(Live-bed scour)로 교량 상류부로부터 토사의 이송이 있는 경우이며, 상류부로부터 이송되는 토사의 양과 세굴되는 토사의 양이 같아질 때 평형을 이루게 됨. 둘째는 정지상세굴(Clear-water scour)로 상류부로부터 토사의 이송이 없는 경우이며, 평균 하상전단응력이 하상재료의 한계전단응력보다 작을 때 평형을 이루게 됨.
- 조석과 폭풍해일의 영향을 받는 경우의 세굴은 장기하상변동, 단면축소세굴, 국부세굴과 수로 불안정성의 조합으로 이루어짐. 수리학적 변수의 결정시 100년, 500년 빈도의 폭풍해일의 크기와 조석 유입구, 하구, 만이나 조석 흐름과 교량에 의한 흐름의 수축 효과에 대한 특성 등을 신중히 고려해야 함.
- 흐름 방향과 반대의 조석 주기는 전체적인 세굴량을 증가시킬 수 있음. 밀물과 썰물에 따라 하상 토사가 이송되면 교량 구역에서의 실질적인 이송량은 없게 되어 장기하상변동은 일어나지 않게 됨. 그러나 교각과 교대의 육지쪽과 해안쪽 양쪽에서 국부세굴이 발생할 수 있고 흐름의 한방향 또는 양방향에서 퇴적물의 이송이 발생하면, 국부세굴과 더불어 장기하상저하도 발생할 수 있음. 조석 유입구나 교량에 의해 흐름이 수축되면 폭풍해일 중 해양과 하구 또는 만과의 수면 차가 커져서 수리학적 해석은 더욱 복잡해짐.
- 밀물 동안 토사는 만이나 하구로 유입되어 쌓이지만 썰물동안 이 토사는 다시 이송되어 유입구나 하구로 유출되면서 모래톱에 쌓이거나 연안 이송으로 해안까지 하부로 이동됨. 정지상세굴과 이동상세굴은 하천 세굴에서와 같이 식 (Ⅲ-1)로 구분 지을 수 있음 (Richardson and Davis, 2001)
- 통상 하천에서 하상재료의 이동 및 세굴 여부를 판단하기 위한 기준으로 식 (Ⅲ-1)과 같이 한계속도를 계산하고, 이 한계속도와 비교하여 평균 유속이 크다면, 토사가 하류로 이송된다고 판단할 수 있음.

$$V_c = 6.19 y^{\frac{1}{6}} (D_{50})^{\frac{1}{3}} \quad (Ⅲ-1)$$

여기서,  $V_c$ 는 한계속도,  $y$ 는 평균수심(m)이며,  $D_{50}$ 는 입도분포곡선에서 흙의 중량통과백분율이 50%에 해당하는 입자의 크기(m)

### (나) 모형실험결과를 통한 세굴침식해석 검토

- 모형실험조건을 적용한 한계속도는 평균수심 1.2 m,  $D_{50}=0.3$  mm 이므로,  $V_c=0.26370$  m/s로 산정됨.
- 표 Ⅲ-다-6의 조건에 따른 수로 내 유속은 다음 식과 같이 산정할 수 있음.

$$u = \frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{L}(h+z)\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)} \right] \quad (Ⅲ-2)$$



$$\nu = \frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} \left[ \frac{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}\right)(h+z)}{\cosh\left(\frac{2\pi}{L}\right)h} \right] \quad (\text{III-3})$$

여기서 u는 수평방향 유속, v는 수직방향 유속, H는 파고, h는 전체수심, T는 주기, L은 파장, z는 측정위치에서의 수심

[표 III-다-6] 입력변수값

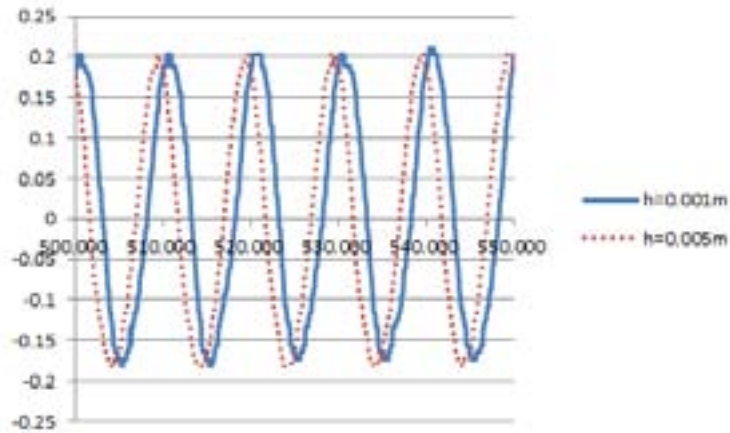
T(주기, sec)	3.16	H(파고, m)	0.2
L(파장, m)	9.96		0.25
h(수심, m)	1.2		0.3

- 파고에 따른 심도별 유속을 (식 III-2), (식 III-3)에 따라 계산하면 다음 표 III-다-7과 같음.

[표 III-다-7] 이론식에 의한 파고변화에 따른 유속

z(m)	H=0.2 m		H=0.25 m		H=0.3 m	
	u(m/s)	v(m/s)	u(m/s)	v(m/s)	u(m/s)	v(m/s)
0	0.311014	0.198835	0.388767	0.248544	0.466521	0.298252
-0.1	0.299081	0.179598	0.373851	0.224497	0.448622	0.269396
-0.2	0.288339	0.161075	0.360424	0.201344	0.432509	0.241613
-0.3	0.278745	0.143194	0.348431	0.178993	0.418118	0.214791
-0.4	0.270261	0.125883	0.337826	0.157354	0.405391	0.188825
-0.5	0.262852	0.109073	0.328565	0.136342	0.394278	0.16361
-0.6	0.25649	0.092698	0.320612	0.115872	0.384735	0.139046
-0.7	0.251149	0.076691	0.313936	0.095864	0.376723	0.115036
-0.8	0.246807	0.06099	0.308509	0.076237	0.370211	0.091484
-0.9	0.243449	0.045531	0.304311	0.056914	0.365173	0.068296
-1	0.241059	0.030254	0.301324	0.037817	0.361589	0.04538
-1.1	0.239629	0.015097	0.299536	0.018871	0.359444	0.022645
-1.2	0.239153	0	0.298941	0	0.35873	0

- 수평방향 유속계측기를 수조 내에 설치하여 실제 유속을 계측하였음. 계측범위는 피복의 침식이 발생한 범위를 고려하여 수심 1.0~1.2 m의 유속을 5분간 측정된 결과로 한정하였음. 동일 위치에서 2번 반복하여 평균 유속을 산정함
- 유속계측 결과는 그림 III-다-10과 같이 나타나는데, +와 -가 의미하는 바는 계측방향이며, 유속은 부호와 상관없이 크기가 최대인 값으로 산정함
- 이론식에 의한 유속결과는 바닥면에서는 큰 차이가 없으나, 해수면 근방에서는 유속이 급격히 증가하는 경향을 보임



[그림 III-다-10] 유속계측 사례

- 각 위치별 유속계측결과를 심도별로 정리하면 표 III-다-8와 같음. 유속계측결과는 이론식에 의한 유속과 유사하게 바닥면에서부터 해수면으로 심도가 감소할수록 유속은 점점 증가하는 경향을 보이고 있음.

[표 III-다-8] 수심 1.0~1.2 m에서의 유속계측결과

바닥면으로부터 심도	해수면으로부터 심도	H=0.2 m	H=0.25 m	H=0.30 m
z(m)	h(m)	u(m/s)	u(m/s)	u(m/s)
0.200	-1.0	0.239	0.319	0.391
0.175	-1.025	0.239	0.315	0.383
0.150	-1.050	0.215	0.293	0.362
0.125	-1.075	0.227	0.297	0.365
0.100	-1.100	0.239	0.310	0.383
0.075	-1.125	0.239	0.302	0.370
0.050	-1.150	0.215	0.276	0.353
0.025	-1.175	0.211	0.285	0.349
0.001	-1.199	0.211	0.276	0.334

- 수심 1.0~1.2 m에서의 이론값과 계측값을 비교해보면 전반적으로 유사한 것을 알 수 있음
- 한계유속과 이론 및 실측 유속값을 비교해 보면, 파고가 증가함에 따라 유속이 증가하지만, 어떤 경우라도 유속은 한계유속보다 작게 나타났음

[표 III-다-9] 수심 1.0~1.2 m에서의 이론값과 계측값의 비교

h(m)	H=0.2 m		H=0.25 m		H=0.30 m		비교 V <sub>c</sub> (%)
	계측 u(%)	이론 u(%)	계측 u(%)	이론 u(%)	계측 u(%)	이론 u(%)	
-1.0	0.239	0.2410	0.319	0.3013	0.391	0.3615	0.427
-1.1	0.239	0.2396	0.310	0.2995	0.383	0.3594	0.427
-1.2	0.211	0.2391	0.276	0.2989	0.334	0.3587	0.427

### (3) 피복공법 설계에 필요한 모델 검증

- 초기 포설된 피복재는 파랑작용에 의하여 변형이 발생하게 되며, 이를 ripple이라 함. 파랑작용에 의해 생성된 ripple의 규모에 대한 연구결과(Dingler & Inman, 1976; Nielsen, 1981; Dean & Dalrymple, 2002; Gallagher et al., 2005)를 이용하여 본 실험을 통하여 생성된 ripple의 크기를 비교하고자 함
- Dingler와 Inman(1976)는 ripple의 생성과 관련된 Mobility Number( $\Psi_m$ )를 제시하였음(식 (III-1), (III-2))

$$\Psi_m = \frac{(A\omega)^2}{gd(s-1)} \quad (III-4)$$

$$A = \frac{H}{2\sinh kh} \quad (III-5)$$

여기서  $A$ 는 미소진폭파이론에 있어 바닥에서 입사파 주기에 대한 파랑 입자의 운동궤적이며,  $d$ 는 모래입자의 직경,  $s$ 는 모래입자의 비중( $s=2.63$ ),  $\omega$ 는 각속도( $\omega = 2\pi/T$ )이다.  $H$ 는 입사파의 파고,  $k$ 는 파수(wave number,  $k = 2\pi/L$ ),  $h$ 는 수심

- Nielson(1981)은 ripple의 높이( $\eta$ )와 길이(파장,  $\lambda$ )에 대하여 아래의 식 (III-6), (III-7)를 제시하였음

$$\eta = \begin{cases} 21A\Psi_m^{-1.85} & , \Psi_m > 10 \\ 0.275 - 0.22\Psi_m^{0.5} & , \Psi_m < 10 \end{cases} \quad (III-6)$$

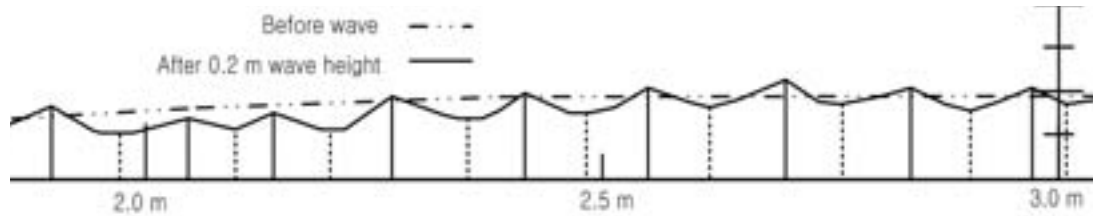
$$\lambda = A \exp\left(\frac{693 - 0.37\ln^8 \Psi_m}{1000 + 0.75\ln^8 \Psi_m}\right) \quad (III-7)$$

- 위 식에 의하면, 본 실험 조건에 의한 ripple의 높이와 길이는 아래 표 III-다-10과 같이 계산됨. 결과에 의하면 Nielson(1981)의 방법으로 ripple의 형상을 계산할 경우 입사파고( $H$ )가 증가함에 따라 ripple의 높이( $\eta$ )는 감소하나, 리플의 파장( $\lambda$ )은 증가하는 것으로 계산되었음

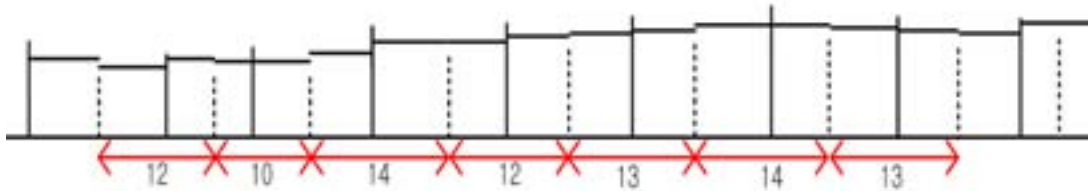
[표 III-다-10] 파고에 따른 피복재 형상(ripple)변화 계산 결과

H(m)	A	$\Psi_m$	Ripple	
			Height( $\eta$ , m)	Length( $\lambda$ , m)
0.2	0.120	17.685	0.026	0.132
0.25	0.150	27.633	0.014	0.117
0.3	0.180	39.792	0.009	0.123

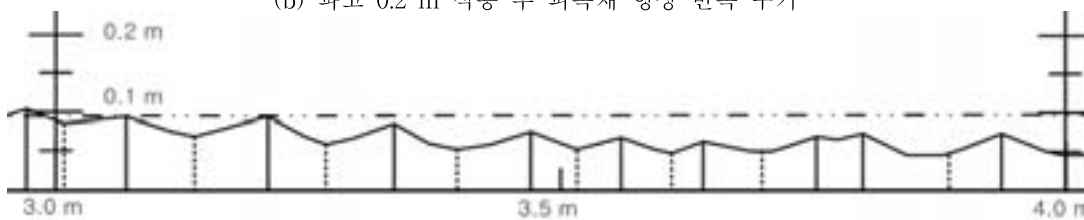
- 그림 III-다-11는 파고 적용 전과 파고 0.2 m 적용 후 중앙부 피복재 형상을 확대한 것임. 피복재 변형 형상에 일정한 주기가 있다고 가정하고, 최대점과 최저점을 연결하여 반복주기를 산정해 본 결과, 중앙부(2.0~3.0 m)에서는 반복주기가 약 0.10~0.14 m로 나타남.
- 중앙부에서 벗어난 주변부(3.0~4.0 m)에서는 약 0.09~0.13 m로 산정되었으며, 따라서 주기는 약 0.09~0.14 m로 추정됨



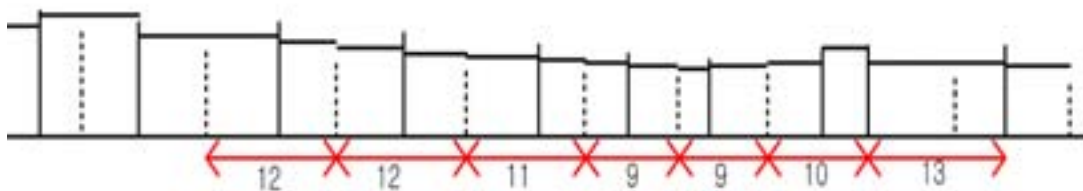
a) 파고 적용 전과 0.2 m 적용 후 2.0~3.0 m 구간



(b) 파고 0.2 m 적용 후 피복재 형상 반복 주기



(c) 파고 적용 전과 0.2 m 적용 후 3.0~4.0 m 구간



(d) 파고 0.2 m 적용 후 피복재 형상 반복 주기

[그림 III-다-11] 파고 0.2 m 적용 후 피복재 반복 주기 산정

- 표 III-다-11은 이론식과 실험을 통하여 관측된 파고에 따른 ripple 형상을 정리하고 있음.

이론식과 유사하게 파고가 높아질수록 침식형상의 주기가 증가하는 경향을 볼 수 있지만 실험실 실험에서 ripple 높이는 전체적으로 침식과 연계된 형상변화로 이론식과 직접적인 비교는 어려우나 유사한 경향을 보임을 알 수 있음.

[표 III-다-11] 이론식 및 실험결과에 의한 피복재 형상(ripple) 결과 비교

Case	Height(m)	Ripple length(m)	
		Equation	Measurement
4	0.2	0.132	0.09~0.14
5	0.25	0.117	0.12~0.15
6	0.3	0.123	0.14~0.17

## 라. 오염퇴적물 현장처리기술 개발

### (1) 현장 처리기술을 위한 시험 대상 해역(N) 시료채취 및 특성 평가

- 1차년도 연구결과 중앙정부(해양수산부)에서 '04년부터 '12년까지 국내 오염 우려 해역 총 27개 해역에서 퇴적물의 오염 현황을 평가한 결과 및 해역의 특성과 이용목적 검토하여 피복 및 현장처리기술 시험이 가능(조건 충족)한 6개 해역을 제안하였으며, 6개 해역 중 보다 적합한 우선 시험 대상 후보 해역으로 3개 해역(M, N, R)을 선정하였음. 기 선정된 3개 해역 중에서 2차년도 연구결과 부영양화 정화지수(CIET)가 가장 높은 것으로 평가된 N해역을 2, 3차년 현장처리기술 시험 대상 해역으로 정하여 시료를 채취하고 오염특성을 평가함

### (가) 시험대상 해역퇴적물의 시료채취

#### ① 대상해역 조사

- 조사해역 개요
  - 대상 해역: N 해역
  - 조사 기간: 2014. 1. 20 - 1. 21
  - 조사 정점: N35°12.4809', E128°35.1712'  
N35°12.4993', E128°35.2069'  
N35°12.4832', E128°35.2501
  - 조사 사진



[그림 III-라-1] 현장 조사 및 시료채취 사진

- 주요 오염 물질: 유기물, 중금속 오염
- 시료 특성: Silt질 우세

○ 조사 방법

- 조사지역 표층 퇴적물의 퇴적물 특성 및 현장처리기술 시험을 위하여 그랩 퇴적물 채취기(Grab sampler)를 이용하여 시료를 채취
- 125  $\mu\text{m}$  이하의 처리대상 시료준비를 위하여 wet sieve를 실시함  
(2차년 결과 참고: 125  $\mu\text{m}$  이하의 분율 94.28%, 125  $\mu\text{m}$  이상의 분율 5.72%)

② 분석항목 및 분석방법

○ 분석항목

- 일반항목: 합수율, 입도, 총 유기탄소(TOC), 총 질소(TN), 총 인(P)
- 부영양화 정화지수(CIET) 관련 항목: 화학적 산소요구량(COD), 산 휘발성황화물(AVS), 강열감량(IL)
- 유해화학물질 정화지수(CIHC) 관련 항목: 알루미늄(Al), 철(Fe), 망간(Mn), 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 비소(As), 수은(Hg), PCBs, PAHs

○ 분석방법 : 해양환경공정시험기준에 준하여 분석함

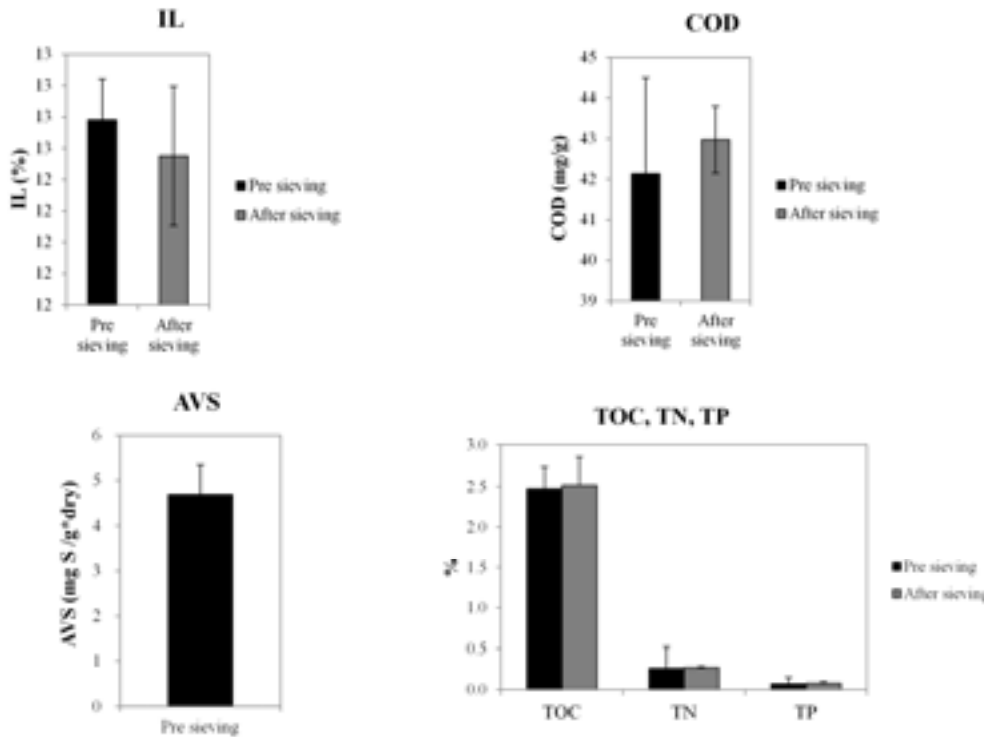
○ 조대입자(>125  $\mu\text{m}$ ) 분리 시 정화처리 효과 평가

(나) 대상해역 해역퇴적물 특성 평가 (Site characterization)

① 부영양화 정화지수 관련 오염물질의 분포특성(해양수산부, 2013)

- N 해역의 퇴적물의 강열감량(IL)의 농도 분포는 Sieve전에서 12.50 - 13.01 ( $12.8 \pm 0.3$ )%, Sieve후에서 12.11 - 13.00 ( $12.6 \pm 0.4$ )%의 범위로 나타나며, Sieve후에 강열감량 농도가 감소하는 경향을 보임.
- N 해역의 퇴적물의 화학적 산소요구량(COD)의 농도 분포는 Sieve전에서 39.5 - 43.9 ( $42.1 \pm 2.4$ ) mg/g, Sieve후에 40.8 - 44.6 ( $43.0 \pm 0.8$ ) mg/g 으로 나타남.
  - N 해역의 퇴적물의 산 휘발성황화물(AVS)의 농도 분포는 4.1 - 5.4 ( $4.7 \pm 0.7$ ) mg/g 의 범위로 나타남.
- TOC: N 해역의 퇴적물의 총 유기탄소(TOC)의 농도 분포는 Sieve전에서 2.2 - 2.7 ( $2.5 \pm 0.3$ ) %, Sieve후에서 2.1 - 2.8 ( $2.5 \pm 0.3$ ) %의 범위로 나타남.

- TN: N 해역의 퇴적물의 총 질소(TN)의 농도 분포는 Sieve전에서 0.25 - 0.26 (0.26 ± 0.26) %, Sieve후에서 0.26 - 0.28 (0.27 ± 0.01)%의 범위로 나타남.
- TP: N 해역의 위치별 퇴적물의 총 인(TP)의 농도 분포는 Sieve전에서 0.06 - 0.10 (0.07 ± 0.02)%, Sieve후에서 0.06 - 0.09(0.08 ± 0.02)%의 범위로 나타남.
- 미세입자 분리 및 세척기반 공정설계를 위한 시료전처리를 위한 Wet sieve 처리 시 질소 (TN)와 인(TP)의 경우도 큰 영향이 없는 것으로 나타남.

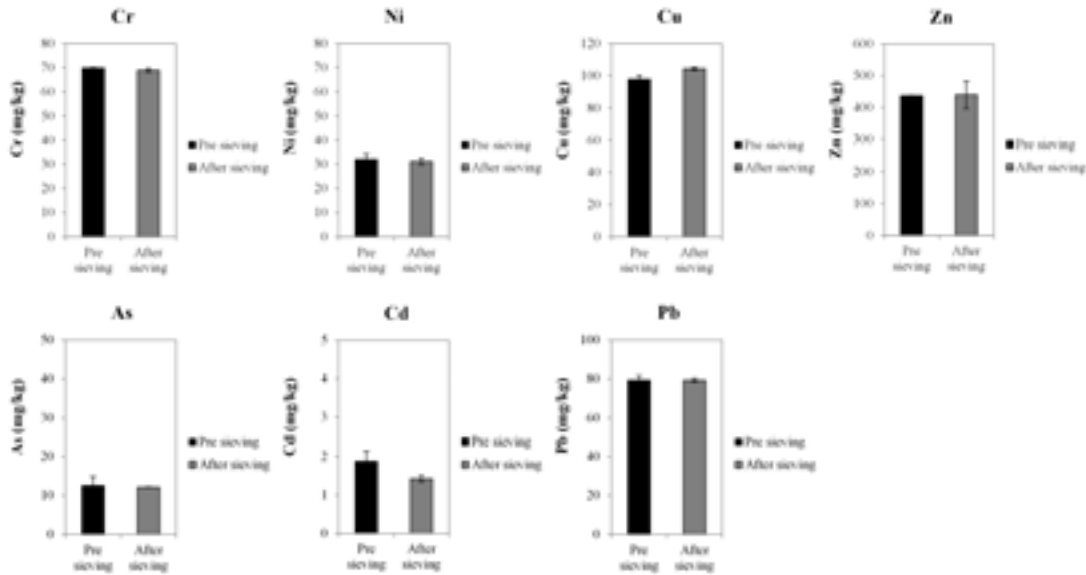


[그림 III-라-2] N 해역의 Sieve전과 Sieve후의 오염물질 농도

## ② 유해화학물질 정화지수 관련 오염물질의 입자별 농도분포

### ㉞ 중금속

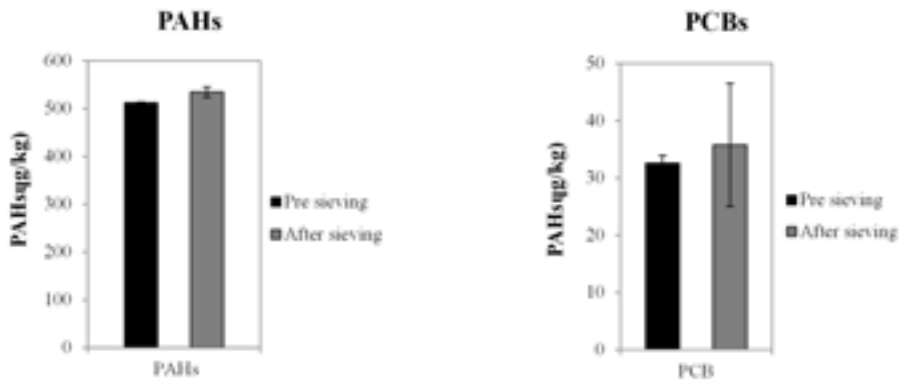
- N해역의 크롬(Cr) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(80 mg/kg)을 초과하지 않음.
- N해역의 니켈(Ni) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준 중 기준 1(23 mg/kg)을 초과하지만 기준 2(52 mg/kg) 미만으로 나타남.
- N해역의 구리(Cu) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(24 mg/kg)을 초과하고 Sieve후에는 기준 2(108 mg/kg)를 초과하는 것으로 나타남.
- N해역의 아연(Zn) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(210 mg/kg)을 초과하고 N<sup>-2</sup>, N<sup>-3</sup> 해역에서는 기준 2(410 mg/kg)를 초과함.
- N해역의 비소(As) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(9 mg/kg)을 초과함.
- N해역의 카드뮴(Cd) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(0.68 mg/kg)을 초과함.
- N해역의 카드뮴(Cd) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(50 mg/kg)을 초과함.



[그림 III-라-3. N 해역 Sieve전과 Sieve후 중금속 농도]

㉔ 다환방향족 탄화수소(PAHs) 및 폴리클로리네이티드비페닐(PCBs)

- N 해역의 퇴적물의 다환방향족 탄화수소(PAHs)의 농도 분포는 Sieve전에서 511.2 - 513.6 (512.0 ± 1.4) µg/kg, Sieve후에서 522.8 - 543.9 (534.40 ± 10.7) µg/kg으로 나타남.
- N 해역의 퇴적물의 폴리클로리네이티드비페닐(PCBs)의 농도 분포는 Sieve전에서 25.0 - 47.8 (32.6 ± 13.2) µg/kg, Sieve후에서 21.3 - 47.7 (35.8 ± 13.4) µg/kg으로 나타남.



[그림 III-라-4] N 해역 Sieve전과 Sieve후 중금속 농도

(다) 전년(2차년)도 분석 결과와 비교

- 대상해역인 N해역 시료채취 및 분석결과 Cu를 제외하고는 COD, IL, TOC, 중금속, PAHs PCBs 의 오염도는 전년도 대비 81~113%의 차이를 보여 시료의 동질성이 확보되는 것으로 평가됨



[표 III-라-1] N해역의 2013년 과 2014년 결과 비교

	N 해역 2013년도 (2차년) Bulk	N 해역 2014년도 (3차년) Bulk	비교( %)
화학적 산소요구량(COD) (mg/g)	39.05	42.14	108
강열감량 (IL) (%)	14.88	12.78	86
총 유기탄소 (TOC) (%)	2.83	2.47	87
크롬 (Cr) (mg/kg)	72.99	69.84	96
니켈 (Ni) (mg/kg)	28.41	31.97	113
구리 (Cu) (mg/kg)	180.69	97.84	54
아연 (Zn) (mg/kg)	420.40	437.03	104
비소 (As) (mg/kg)	12.80	12.54	98
카드뮴 (Cd) (mg/kg)	1.40	1.51	108
납 (Pb) (mg/kg)	79.52	79.26	100
다 방향족 탄화수소 (PAHs) (µg/kg)	632.58	512.01	81
폴리클로리네이티드비페닐 (PCBs) (µg/kg)	31.64	32.56	103

## (2) 공정 시험용 반응기 설계

### (가) 기본개념

- 기존 연구결과(2차년도) 주로 부영양물질에 의해 오염된 해양퇴적물을 산화제로 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>와 비이온성계면활성제인 0.05% Tween 80을 가하여 일정 시간(1h) 처리할 경우, 유기오염물질뿐만 아니라 중금속 등 유해화학물질까지 다양한 목적으로 유효활용 할 수준 까지 저감시킬 수 있음을 확인함.
- 기존 연구결과(2차년도) 도출된 상기 최적조건을 실제 공정에서 시험하여 처리 정도와 능력을 시험할 필요가 있음.
- 처리기술의 세부 공정 시험은 처리대상 시료(퇴적물 중 입경 125µm 이하)를 실제 조건을 가정하여 공정수로서 인공해수를 사용한 연속흐름(Continuous flow)에서 첨가제(산화제, 비이온성계면활성제)를 가하여 일정 시간동안 처리 정도와 능력을 시험함.
- 당해연도(3차년) 목적은 처리대상 시료(퇴적물 중 입경 125µm 이하)를 세척 기반 처리공정에 대한 주요 공정 시험, 평가하고 주요 요소(Factors)를 도출하는 것임.

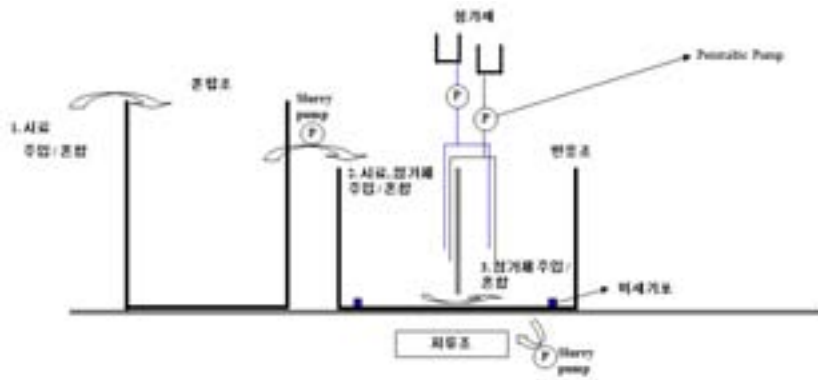
### (나) 시험 장치 특성

- 시험 장치는 실험실에서 제어 가능한 규모로 하나의 닫힌 계(Closed system)로 구성되며, 연속흐름 시험뿐만 아니라 하나의 반응기(Reactor)로서 회분 시험(Batch test)도 가능하도록 구성함.

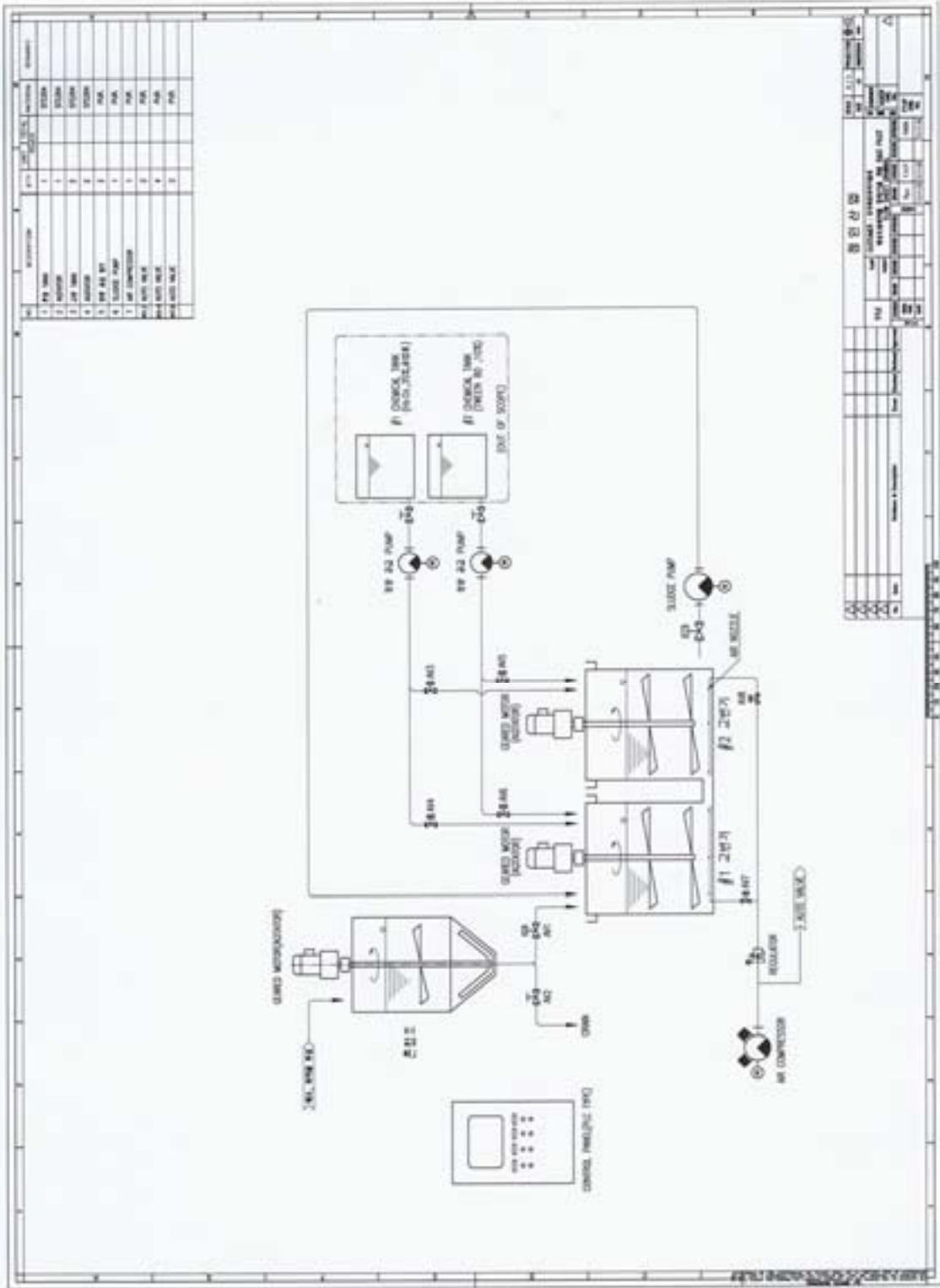
- 시험 장치는 실제 처리를 상정하여 최소 2개의 다단 반응조(처리조 및 안정화조)로 구성되며, 연속흐름을 위하여 시험용 해양퇴적물과 인공 해수의 혼합 및 초기 조건(완전 혼합 및 유동성 확보)을 제어하기 위한 초기 혼합조 및 처리 공정 이후 처리 산물을 저장하기 위한 저장조로 구성함.
- 일반적으로 처리시간이 일정하다면, 반응조가 하나일 경우 보다 다단으로 구성되면, 각 개별 반응조의 크기(용적)가 상대적으로 작아지므로 실제 해양오염퇴적물 수거 현장 또는 인근(해상, 연안)에서 바지선 1~3대 위에 설치를 상정하면 매우 중요한 요소임.
- 각 반응조 간 반응물의 이송은 정량펌프와 실리콘 재질의 튜브를 사용함.
- 첨가제 2종을 처리조로 이송은 역시 정량펌프와 실리콘 재질의 튜브를 사용함.
- 반응조의 재질은 산화제 사용으로 인한 영향을 최소화시킬 수 있어야 하며, 반응 중 반응기 내부의 상황을 관측할 수 있도록 관측창을 설치하는 등 가공성이 좋아야 함.
- 현존 상용 재료 중 문헌 검토 및 상용 반응조 재질을 검토한 결과, 상기 조건을 충족하는 재질은 Hastelloy alloy와 Stainless steel이 있음(Faisal, I.M., 2004). 이 중 실제 장치 제작을 고려하여 소재 비용이 상대적으로 저렴한 Stainless steel을 시험 장치 제작용 재료로 선정함.

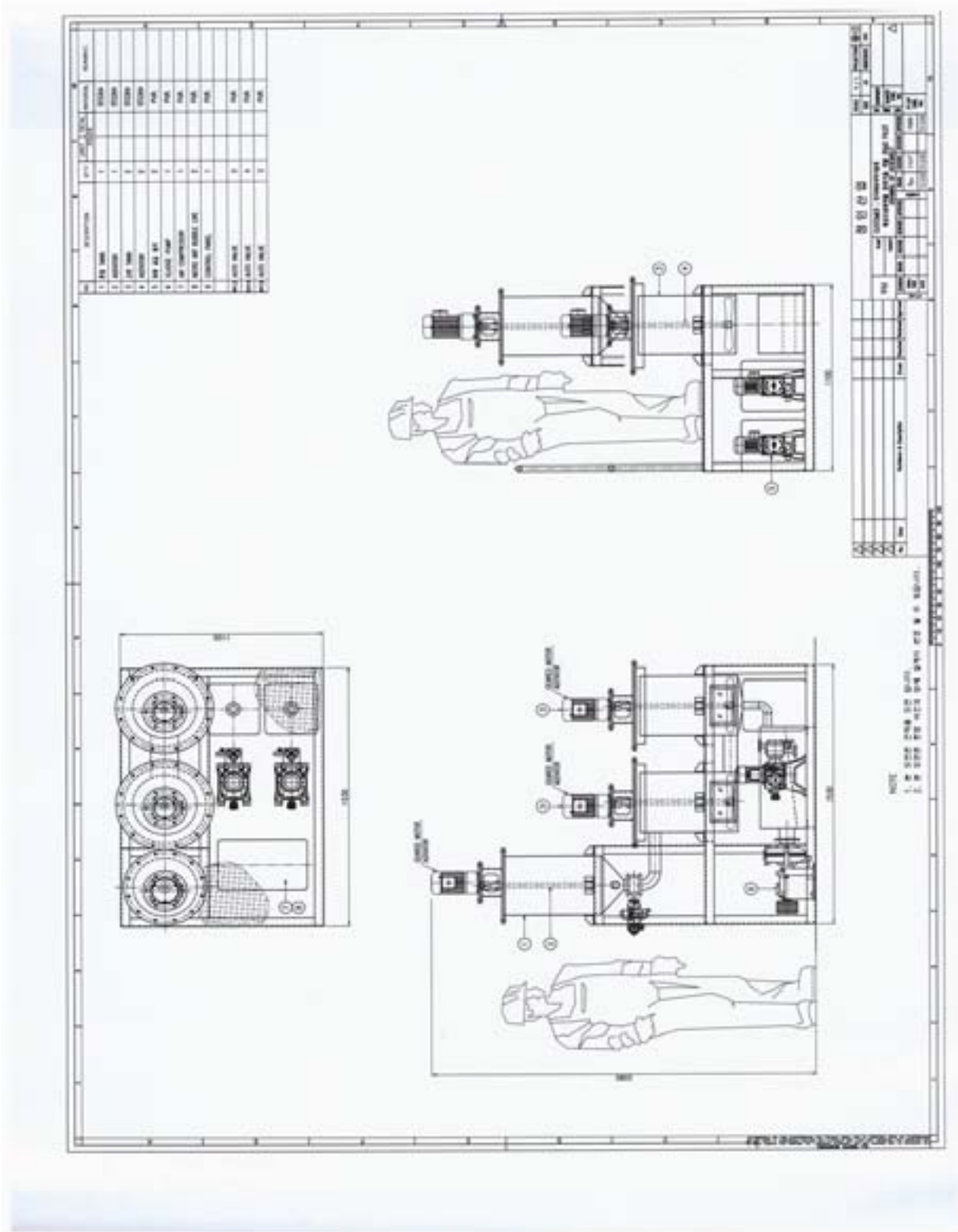
#### (다) 시험 장치 설계 및 제작

- 초기 혼합조와 저류조의 유효용적은 각 50L이며, 처리조와 안정화조는 각 18L로 설정하며, 처리조와 안정화조 사이에는 웨어(Weir)를 설치하여 일정 시간 반응 후 반응물이 일정하게 이송되도록 하며, 처리조에 첨가제 주입 시 완전혼합을 위하여 각각 격벽을 설치함.
- 다양한 첨가제 공정 시험 등을 위하여 하나의 반응조(유효용적: 18L)를 별도로 제작함.
- 모든 반응조는 반응물(퇴적물, 인공해수, 첨가제)의 완전혼합을 위하여 교반기를 설치하며, 교반속도는 저속에서 고속까지 제어 가능하도록 함.
- 반응조에는 반응이 진행되는 동안 반응조 내부에서 반응물질의 혼합상태, 침전물 생성 여부, 기포 또는 스크 발생 여부 등 현상을 쉽게 관측할 수 있도록 관측창(폴리카보네이트 재질)을 설치함.
- 모든 반응조에는 반응이 진행되는 동안 주기적으로 시료채취가 가능하도록 반응조의 중간과 아래 부분에 각각 시료채취 밸브를 설치함.
- 미세기포를 사용하는 고도처리 공정 시험을 위하여 상용 산기 장치 중 발생 기포의 크기(평균 1 mm)가 가장 작은 멤브레인 재질의 원형 산기판(직경 27 cm, 세인이앤씨(주))을 각 반응조 아래에 장착하고, 분리 및 설치가 용이하도록 함.
- 입자분리 처리 기작 중 자력 분리의 가능성과 처리능력 시험을 위하여 시험 장치를 별도로 제작함(별첨한 시험장치 2 설계도 및 그림 III-라-5 참조).



[그림 III-라-5] 현장처리기술 시험 장치의 기본 개념





[그림 Ⅲ-라-6] 시험 장치 설계도



[그림 III-라-7] 제작된 시험 장치

### (3) 현장 처리기술 구현을 위한 세부 공정 시험, 검토 및 제안

#### (가) 처리기술의 구현을 위한 세부공정 별 조건 시험

##### ① 실험방법

##### ㉞ 처리대상 퇴적물의 공정처리 시 고액비(Solid liquid ratio) 결정시험

- 실험 목적: 정화대상 준서 퇴적물의 정화공정 설계를 위하여 대상퇴적물에 대한 공정수의 물리적인 최적 고액비 조건 도출
- 대상 시료 정보
  - Silt + clay의 미세입자 함유율 98%이상
  - Wet sieve 후의 함유율: 50.5%
- 시료의 준비
  - 협잡물 및 조립질 제거를 위하여 wet sieving처리함
- 공정시험 조건
  - 대상퇴적물에 대한 공정수의 다양한 비율 중 공정설계에 적합한 물리적인 고액비 조건 도출
  - 공정수는 35 psu의 해수를 제조하여 사용함
  - 시험조건 고액비(1:2, 1:3, 1:4, 1:7)로 제조된 대상 시료를 시험에 사용할 교반기의 여러

교반속도 (50, 10, 200 rpm)를 이용하여 교반시험 실시

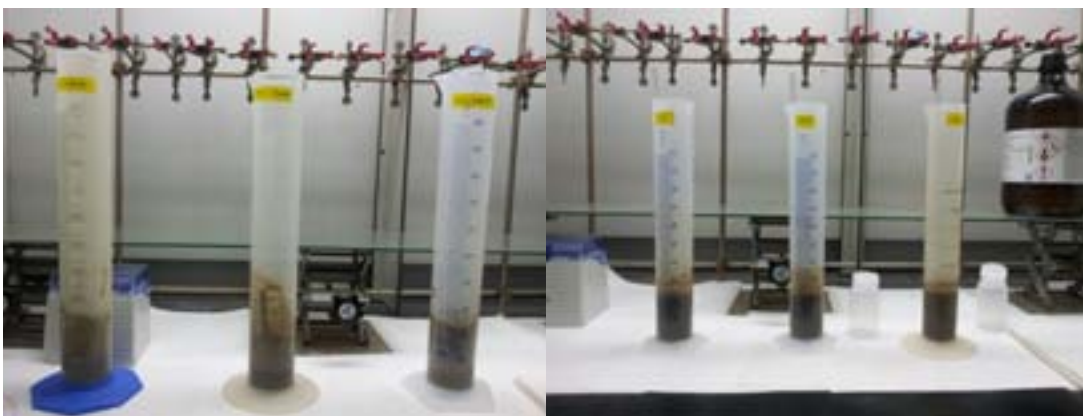
- 1차 실험으로 도출된 가장 효율적인 고액비에 대하여 50, 100, 150, 200, 250 rpm을 이용하여 교반 속도 시험 실시



[그림 III-라-8] 처리제 조건에 따른 반응 시 부피변화 측정 실험

#### ㊤ 대상퇴적물의 공청처리 시 시료의 부피팽창 실험

- 실험 목적: 공정수에 포함된 처리제의 여러 농도를 이용하여 해양오염퇴적물 정화처리시 반응으로 인한 시료의 부피 변화를 시험
- 실험 방법:
  - 폴리프로필렌(P.P) 메스실린더에 퇴적물 30g dw 과 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 0.05%, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 0.05%, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 0.05%를 각각 90 ml 넣고 1 시간 동안 유리막대로 저으면서 반응시키고 부피변화를 측정함



[그림 III-라-9] 처리제 조건에 따른 부피변화 측정 실험

#### ㊤ 상세공정설계를 위한 벤치스케일 조건 실험(bench-scale test)

실험 목적: 2차년 결과에 따른 최적 조건으로 대상해양오염물의 정화공정 처리를 위한 최적 공정조건 도출

- 실험 대상 시료의 정보: 협잡물 및 조립질 제거를 위하여 wet sieving처리되어, Silt + clay의 미세입자 함유율 98%이상, 함수율 50.5%로 준비된 오염퇴적물

○ 실험 방법

- 산화제인 hydrogen peroxide의 다양한 농도와 계면활성제인 Tween 80 0.05%를 처리제로 하여 bench-scale test를 실시함
- 공정수 제조는 hydrogen peroxide와 Tween 80, 35 psu 의 염수를 이용하였음
- bench-scale test 실시 시 시간에 따른 오염물질의 정화효율을 비교함
- 퇴적물은 10분 동안, 처리시약은 20분 동안 반응조에 주입하고 시약이 모두 주입된 후 10분 단위로 80분 까지 시료를 채취하였다
- 채취된 시료는 세척 후 오염물질(화학적산소요구량(COD), 강열감량(IL), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN),총인(TP), 알루미늄(Al), 철(Fe), 망간(Mn), 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 비소(As), 수은(Hg),다환방향족 탄화수소(Poly aromatic hydrocarbons, PAHs) 및 폴리클로리네이티드비페닐 (polychlorinated biphenyls, PCBs)을 분석함

[표 III-라-2] Bench-scale test 용 공정수 내 처리제의 농도

	Hydrogen peroxide	Tween 80
농도	1M	0.05%
	3M	0.05%
	4M	0.05%
	5M	0.05%

㉔ 연속공정 설계를 위한 벤치스케일 실험(bench-scale test)

- 실험 목적: 2-3차년 결과에 따른 최적조건으로 대상해양오염물의 연속-정화공정 처리 시 각 연속 배치(batch)와 처리시간에 따른 오염물질 제거효율을 파악하여 최적 공정조건을 도출하기 위함
- 실험 대상 시료의 정보: 헝겍물 및 조립질 제거를 위하여 wet sieving처리되어, Silt + clay의 미세입자 함유율 98%이상, 함유율 50.5%로 준비된 오염퇴적물
- 실험 방법
  - 3M과 5M의 hydrogen peroxide와 계면활성제인 Tween 80 0.05%를 처리제로 하여 연속공정 bench-scale test를 실시함
  - 공정수 제조는 hydrogen peroxide와 Tween 80, 35 psu 의 염수를 이용하였음
  - 퇴적물 7.5 kg을 연속적으로 2.5 kg/10min의 속도로 주입하여 bench-scale test 실시함
  - 공정의 원활도를 test하고 시간에 따른 각 reactor별-시간별 오염물질의 정화효율을 비교함

㉕ 추가 고도처리를 위한 미세기포 폭기 벤치스케일 실험(bench-scale test)

- 실험 목적: 2-3차년 결과에 따른 최적조건으로 대상해양오염물의 연속-정화공정 처리 시 각 미세기포 공정 추가에 따른 정화효율 확인





[그림 III-라-10] 연속공정 설계를 위한 벤치스케일 실험

- 실험 대상 시료의 정보: 협잡물 및 조립질제거를 위하여 wet sieving 처리되어, Silt + clay 의 미세입자 함유율 98%이상, 함유율 50.5%로 준비된 오염퇴적물
- 실험 방법
  - 1M의 hydrogen peroxide와 계면활성제인 Tween 80 0.05%를 처리제로 하여 미세기포 공정을 추가한 연속공정 bench-scale test를 실시함
  - 공정수 제조는 hydrogen peroxide와 Tween 80, 35 psu 의 염수를 이용하였음
  - bench-scale test 실시 시 시간에 따른 오염물질의 정화효율을 비교함



[그림 III-라-11. 미세기포 공정 추가 설계를 위한 벤치스케일 실험(bench-scale test)]

㉞ 자력분리 공정 추가 설계를 위한 벤치스케일 실험(bench-scale test)

- 대상 퇴적물의 물리적 분리가능성 평가를 위한 입도분석
- 실험방법
  - 각 입경별 자력분리가능 입자의 분율 분포 파악

- 자력분리가능 한 조대입자 내 선박기원 오염물질 및 중금속 오염물질 분포 분석
- 자력분리를 통한 조대입자 내 선박기원 오염물질 및 중금속 오염물질 제거 평가



[그림 III-라-12] 자력분리기 이용 중금속 및 선박기원 유해물질을 함유한 자성입자(MSP) 분리과정 및 분리된 자성입자(MSP)

#### ㉔ 시료의 분석

- bench scale test를 마친 퇴적물은 원심분리-증류수 세척을 3번 실시하여, 동결건조 하여 시료의 분석까지 냉동보관 함
- 분석대상 시료는 곱게 갈아 오염물질(화학적산소요구량(COD), 강열감량(IL), 총 유기탄소(TOC), 총 질소(TN), 총 인(TP), 알루미늄(Al), 철(Fe), 망간(Mn), 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 비소(As), 수은(Hg), 다환방향족 탄화수소(Poly aromatic hydrocarbons, PAHs) 및 폴리클로리네이티드비페닐 (polychlorinated biphenyls, PCBs)을 분석함
- 처리전, 처리후의 퇴적물에 대한 부영양화 관련물질의 오염도 평가
  - 목별 오염도에 따라 평가한 점수에 따라 부영양화 정화지수(CIET)를 산정(해양수산부, 2013)
- 처리전, 처리후의 퇴적물에 대한유해화학물질의 오염도 평가
  - 유해화학물질 관련 물질은 항목별 오염도에 따라 평가한 점수에 따라 유해화학물질 정화지수(CIHC)를 산정(해양수산부, 2013)

[표 III-라-3. 부영양화 관련 평가항목, 기준농도 및 평가점수 (제9조제2항 관련)]

항 목	단위	기준농도	평가점수
강열감량 (IL)	% (건중량)	5 미만	0
		15 미만	3
		15 이상	6
화학적산소요구량 (COD)	mg/g (건중량)	13 미만	0
		20 미만	1
		30 미만	2
		40 미만	4
		40 이상	6
산취발성황화물 (AVS)	mg/g (건중량)	0.6 미만	0
		1 미만	1
		5 미만	2
		10 미만	4
		10 이상	6
<p>비고</p> <p>1. 부영양화 관련 항목들에 대한 각각의 평가점수는 해저퇴적물시료에서 구한 항목들의 분석치로부터 기준농도 구간별 설정된 수치로 한다.</p>			

[표 III-라-4] 유해화학물질 관련 평가항목, 기준농도 및 산출방식 (제8조제2항 관련)

항 목	단 위	기준1	기준2	비고
비소(As)	ppm(건중량)	9.0	41.6	공통
카드뮴(Cd)	"	0.68	4.21	"
크롬(Cr)	"	80	370	"
구리(Cu)	"	24	108	"
수은(Hg)	"	0.15	1.0	"
니켈(Ni)	"	23	52	"
납(Pb)	"	50	220	"
아연(Zn)	"	200	410	"
폴리클로리네이티드비페닐(PCBs)	ppb(건중량)	21.6	189	"
다환방향족탄화수소(PAHs)	"	4,000	45,000	"
클로로데인(Chlordane)	"	0.5	6.0	선택
다이엘드린(Dieldrin)	"	0.02	8.0	"
디디티(DDT)	"	1.6	46	"
유기주석화합물(TBT)	"	5.0	105	"

비고

- 유기염소계 농약 성분에 해당되는 클로로데인(Chlordane), 다이엘드린(Dieldrin), 디디티(DDT)은 주변의 농경지 등으로부터 이들의 과다한 유입 가능성이 제기되는 해역에 한하여 포함하며, 유해방오도로 성분에 해당되는 유기주석화합물(TBT)은 선박건조 등으로 인하여 해저퇴적물에 유기주석화합물의 축적으로 인한 영향이 문제가 될 수 있는 해역에 한하여 평가항목에 포함한다.
- 유해화학물질 관련 항목들에 대한 각각의 평가점수는 해저퇴적물시료에서 구한 항목들의 분석치로부터 기준 1과 기준 2의 기준농도를 이용하여 다음과 같이 산출한다.
  - 가. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 1 이하의 농도범위를 가진 항목은 항목별 평가점수를 0으로 한다.
  - 나. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 2와 동일한 농도를 가진 항목은 항목별 평가점수를 1로 한다.
  - 다. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 1 이상이면서 기준 2 미만의 농도범위를 가진 항목에 대한 평가점수는 분석치에서 기준 1의 농도를 뺀 값을 기준 2의 농도에서 기준 1의 농도를 빼준 값을 나눈 값  $[(\text{분석치} - \text{기준 1의 농도}) \div (\text{기준 2의 농도} - \text{기준 1의 농도})]$  으로 한다
  - 라. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 2 이상인 항목들에 대한 평가점수는 분석치를 기준 2의 농도로 나눈 값(분석치 ÷ 기준 2의 농도)으로 한다.

② 실험 결과 및 고찰

㉞ 처리대상 퇴적물의 고액비 (Solid liquid ratio) 결정시법

○ 고액비의 비율과 교반기 속도에 따른 혼합결과

- 벤치스케일 실험(bench-scale test)에 사용 된 교반기에 효율적인 퇴적물과 처리제의 혼합이 가능한 적정 고액비와 교반속도는 1:3 ~ 1:7이었음
- 처리대상 시료의 최적의 고액비는 1:3인 것으로 나타남

- 교반기의 적정교반속도는 200 rpm 인 것으로 나타났음

[표 III-라-5] 고액비의 비율과 교반기 속도에 따른 혼합결과  
(혼합용이:○, 혼합불가:×)

RPM	1:1	1:2	1:3	1:4	1:7
50	×	×	×	×	×
100	×	×	×	×	×
200	×	×	○	○	○

<교반 시작 전>



<교반 후>



[그림 III-라-13. 처리제 조건에 따른 반응 시 부피변화 측정 실험]

- 1:3 고액비의 시료에 대한 교반기의 교반속도 시험결과
  - 벤치스케일 실험(bench-scale test)에 사용 된 교반기에 대한 고액비 1:3의 시료에 대한 교반 가능 속도는 150-250 rpm이었음
  - 교반기의 적정교반속도는 200 rpm인 것으로 나타남

[표 III-라-6] 고액비 1:3의 대상 시료에 대한 적정 교반속도 도출 실험  
(혼합용이:○, 혼합미흡:△, 교반속도 과잉:◎, 혼합불가:×)

RPM	1:3
50	×
100	×
150	△
200	○
250	◎

#### ㊤ 대상퇴적물의 공청처리 시 시료의 부피팽창 실험

- 처리제의 농도에 따른 '처리제+시료'의 부피변화

- 계면활성제의 사용으로 인한 과도한 부피증가가 있는지 확인 함
- 반응 시작 전 반응물은 퇴적물 30 g dw 과 90 ml 공정수를 포함하여 100 ml임
- Tween 80이 포함되지 않은 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>는 반응 후 모두 50 min에 최대 부피로 form이 생성되었으며, 최대 부피는 각각 160, 250, 390 ml 로 160, 250, 390% 팽창하였음
- 0.05%의 Tween 80이 포함된 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>는 반응 후 각각 40, 50 30 min에 최대 부피로 form이 생성되었으며 최대 부피는 각각 180, 270, 400 ml로 Tween 80 free 일 때보다 10-20%정도 더 부피가 늘어났음
- 그러나 Tween 80의 유무는 form의 생성에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 보임
- 실제 처리 공정 설계 시 반응물의 처리과정에서 발생하는 부피증가를 허용할 수 있는지 반영해야 함

[표 III-라-7] 처리제의 종류에 따른 시간당 반응물의 부피 (단위, ml)

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 농도	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
1M	120	130	130	120	140	150	<i>*160</i>	<i>*160</i>
3M	140	150	170	200	200	210	<i>*250</i>	220
5M	160	190	230	200	270	270	<i>*390</i>	320
1M + Tween 80 0.05%	150	150	155	160	170	<i>*180</i>	<i>*180</i>	170
3M + Tween 80 0.05%	170	190	200	220	240	260	<i>*270</i>	260
5M + Tween 80 0.05%	170	220	250	300	<i>*400</i>	370	340	250

\*: 최고부피 시점

### ㉔ 상세공정설계를 위한 벤치스케일 조건 실험(bench-scale test) 결과

#### ■ 각 처리제의 농도에 따른 정화처리과정 중의 상태변화

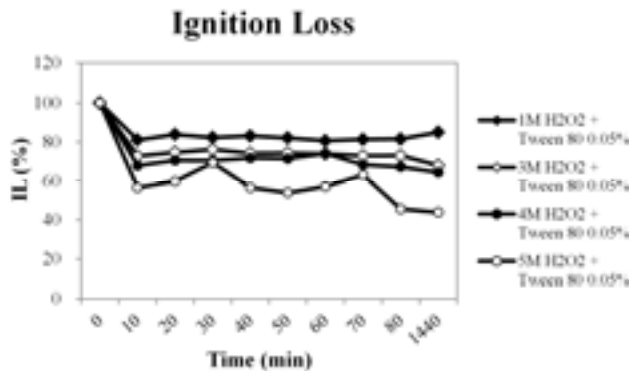
- 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 0.05%
  - 시료 가 모두 주입되면서 약간의 산화반응을 보였으며 온도는 반응 시간 동안 최대 11.5℃까지 온도 상승함
- 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 0.05%
  - 시료가 주입되면서 약간의 산화반응을 보였으며, 반응 시간동안 약한 산화반응을 보임
  - 온도변화는 10분: 17~18℃, 20~30분: 32℃, 50분: 28℃, 80분: 18℃으로 나타남
- 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 0.05%
  - 시료 가 주입되면서 강한 산화반응을 보였으며, 반응 시간(80분)동안 강한 산화반응을 보임
  - 온도변화는 10분: 17~18℃, 40분: 32℃, 50분: 35℃, 70분: 34℃으로 나타남
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 0.05%
  - 시료 가 주입되면서부터 강한 산화반응을 보였으며, 반응 시간 동안 강한 산화반응을

보임

- 반응 시간 동안 다량의 증기발생 및 발열이 발생(최고온도 60℃)

### ■ 강열감량 (Ignition loss, IL, %) 변화

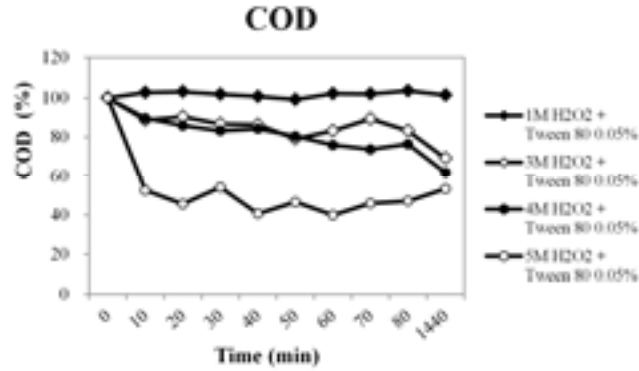
- 강열감량은 처리제의 과산화수소농도에 따라 각각 다른 감소량을 보였음
- 전 반응시간 농도에 대한 감소량은 모든 처리조건에서 10분까지의 초기감소량이 가장 높았으며, 전체 조건 중 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리한 시료가 IL 감소율이 가장 높았음
- 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 80분 이상의 반응 시 오히려 IL이 약간 증가하였으나 다른 조건에서는 모두 80분 이상 반응 시 IL이 감소하는 것으로 나타남
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리조건에서는 IL이 전 반응시간 농도대비 증감을 반복 하긴 하였으나 모든 반응시간에서 거의 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80이 IL을 감소에 효과적이었음



[그림 III-라-14] Tween 80 0.05%가 포함된 처리제의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 강열감량의 변화

### ■ 화학적 산소요구량 (COD) 변화

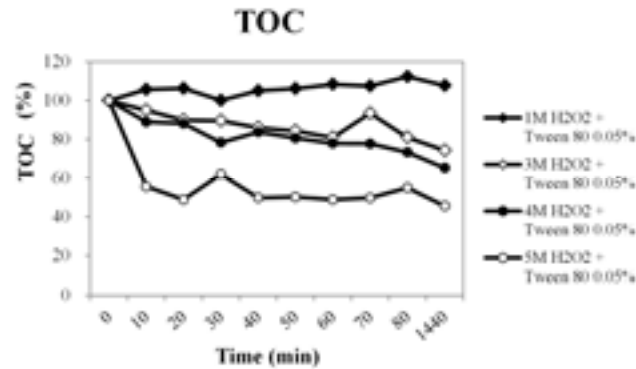
- 처리제의 과산화수소농도에 따라 각각 다른 COD감소량을 보였음
- 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 은 80분 이상의 반응 시 오히려 COD가 약간 증가하였으나 다른 조건에서는 모두 80분 이상 반응 시 COD가 감소하는 것으로 나타남
- 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 으로 처리 시 COD감소량은 나타나지 않았음
- 3M, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80으로 처리한 시료는 50분 까지 꾸준한 감소량을 보였으며, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 조건에서는 이후 약간 증가하다가 70분 이 지나면서 다시 감소하였고, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>조건에서는 70분까지 감소하다가 24시간에서 가장 큰 감소량을 보였음
- 전체 조건 중 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리한 시료가 COD감소율이 가장 높았으며 10분까지 반응시간에서 가장 큰 감소량을 보였음
- 모든 반응시간에서 거의 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80이 COD감소에 효과적이었음



[그림 III-라-15] 처리제의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 COD의 변화

### ■ 총 유기탄소 (TOC) 변화

- 처리제의 과산화수소농도에 따라 각각 다른 TOC감소량을 보였음
- 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 은 80분 이상의 반응 시 오히려 TOC가 약간 증가 (~112%) 하였음
- 3M, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80으로 처리한 시료는 50분 까지 꾸준한 감소량을 보였으며, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 조건에서는 이후 약간 증가하다가 70분 이 지나면서 다시 감소하였고, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>조건에서는 70분까지 감소하다가 24시간에서 가장 큰 감소량을 보였음
- 전체 조건 중 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리한 시료가 TOC 감소량이 가장 많았으며 10분까지 반응시간에서 가장 큰 감소율을 보였음



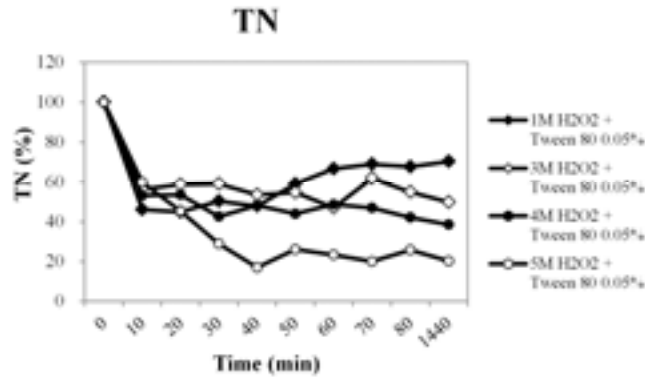
[그림 III-라-16] 처리제의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 TOC의 변화

### ■ 총 질소 (TN) 변화

- 처리제의 과산화수소농도에 따라 각각 다른 TN 감소량을 보였음
- 전 반응시간 농도에 대한 감소량은 모든 처리조건에서 10분까지의 초기감소율이 가장 높았으며, 20분 이후부터는 전체 조건 중 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리한 시료의 TN 이 가장 낮았음
- 10분 처리 후 시료의 TN농도는 5M>4M>3M>1M 이었으며, 시간대별 TN농도는 1M 은 10분, 3M은 60분, 4M은 24시간, 5M은 40분에 가장 낮았음



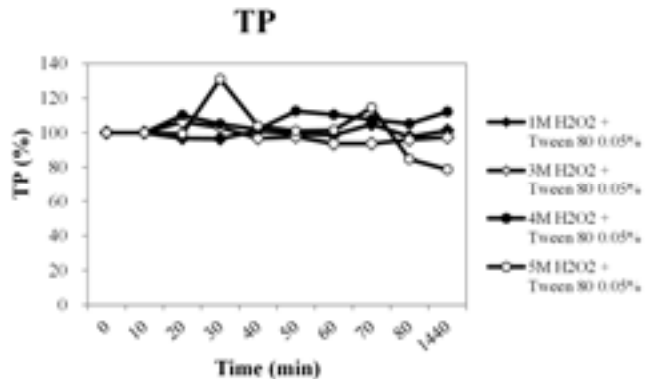
- 20분 이후의 처리시간에서 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80이 TN 감소에 가장 효과적이었음



[그림 III-라-17] 처리제의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 TN의 변화

### ■ 총 인 (TP)

- 시험된 처리제 조건 모두 70분 이하에서는 TP 감소효과를 보이지 않았으며, 오히려 증가하는 경향을 보임
- 80분 이후의 처리시간에서 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80이 TP 감소에 가장 효과적이었음



[그림 III-라-18] 처리제의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 TP의 변화

### ■ 크롬(Cr)

- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 10분 처리한 시료 이외에는, 시험된 처리제 조건 모두 Cr 감소효과를 보이지 않았으며, 오히려 증가하는 경향을 보임
- 모든 처리조건에서 80분까지 Cr 잔류 농도가 최고 150%까지 증가하다가 24시간이 되어야 어느 정도 감소하였으나 초기 크롬농도보다 많았음.
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 10분 처리한 시료의 Cr은 초기농도의 87%였음

### ■ 니켈(Ni)

- 4M, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 10분 처리한 시료는 초기 감소효과를 보였으나, 1M, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리한 모두 Ni 감소효과를 보이지 않았으며, 오

---

히려 증가하는 경향을 보임

- 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리조건에서는 20분-24시간 사이에 평균 Ni 잔류농도가 90%로 가장 낮았으며, 나머지의 처리조건에서는 처리한 시료의 Ni농도는 초기농도와 거의 비슷함
- 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 처리조건이 다른 처리조건보다는 가장 효율적인 Ni 처리효과를 보임

#### ■ 구리(Cu)

- 1M, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 퇴적물 내 Cu의 처리 효과가 나타나지 않음
- 3M, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리된 시료는 30분 까지는 시료 내 Cu의 감소효과가 나타나지 않다가 그 이후부터 감소효과를 보였음
- 3M, 4M, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리 시 모두 24시에 각각 초기 Cu농도의 83, 77, 51% 로 가장 많은 Cu 처리 능력을 보였음
- 전체 처리조건 중 5M + 0.05% Tween 80의 모든 처리시간에서 가장 Cu처리 효율이 좋은 것으로 나타남

#### ■ 아연(Zn)

- 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 퇴적물 내의 Zn의 처리 효과가 나타나지 않음
- 3M, 4M, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리된 시료는 처리시간동안 꾸준히 Zn의 잔류농도가 감소하였으며, 80분 처리 후 Zn의 잔류농도는 각각 초기의 70, 70, 45%, 24시간 처리 후 Zn의 잔류농도는 각각 초기의 60, 60, 42%로 나타남
- 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 80분-24시간 사이의 Zn감소율이 가장 높았으며, 4M, 5M + 0.05% Tween 80은 초기 10분의 Zn처리효율이 가장 높았음
- 전체 처리조건 중 5M + 0.05% Tween 80의 모든 처리시간에서 가장 Zn처리 효율이 좋은 것으로 나타남

#### ■ 비소(As)

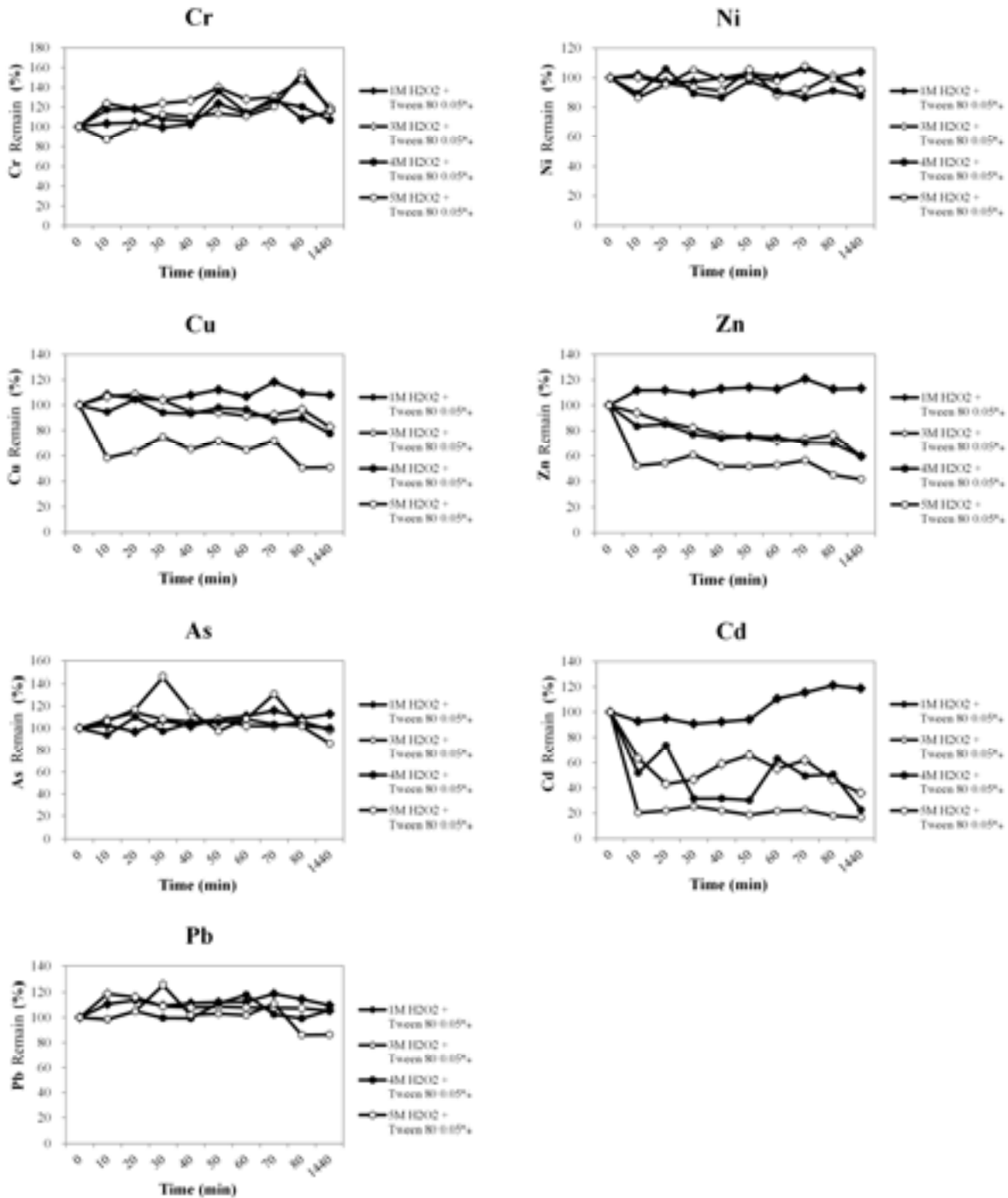
- 전체 처리조건 모두 As 처리효과를 보이지 않음
- 전체 처리조건 중 5M + 0.05% Tween 80 24시간 처리 시 약간의 As 감소가 나타남

#### ■ 카드뮴(Cd)

- 1M 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 Cd처리효과를 거의 보이지 못하고 60분 이후부터는 보이지 않음 크게 증가하였음
- 3M, 4M, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리된 시료는 처리시간동안 꾸준히 증감을 반복하면서 Cd의 잔류농도가 감소하였음.
- 3M은 20분, 4M은 10분-50분까지 감소하다가 다시 소폭 증가하였으며, 각각 50분 60분에 다시 농도가 감소하여, 80분에는 각각 초기농도대비 46, 51%, 24시간에는 36, 23%로 나타남
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 10분에 초기농도 대비 Cd의 농도가 20%까지 크게 감소하였으며 그 이후에는 큰 변화를 보이지 않았음

■ 납(Pb)

- 1M, 3M, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 Pb처리효과를 보이지 않음
- 3M, 4M, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80로 처리된 시료는 처리시간동안 꾸준히 증감을 반복하였으나 초기 농도대비 농도감소를 보이지 못하고 99~119%의 잔류농도를 보였음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 80분-24시간 사이의 Pb농도는 초기농도보다 감소한 것으로 나타났으며, 잔류농도는 초기 농도대비 86%였음



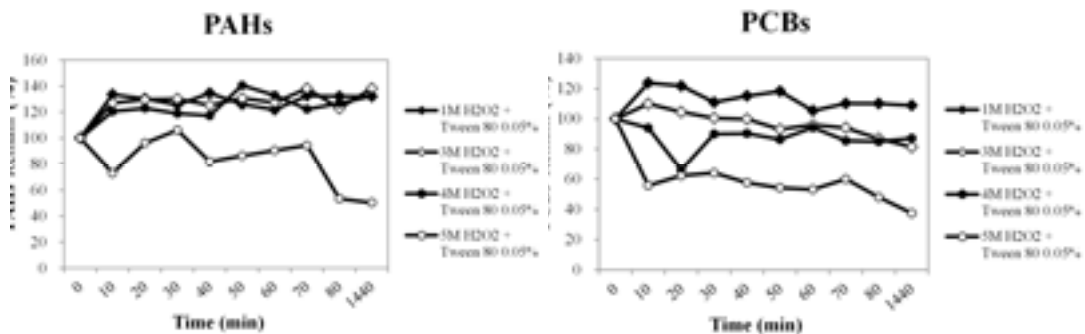
[그림 III-라-19] 처리제의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 중금속 농도의 변화

■ 다환방향족 탄화수소 (PAHs)

- 1M, 3M, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 PAHs처리효과를 보이지 않았으며 오히려 처리 시료 내 PAHs농도가 증가하는 것으로 나타남
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 처리시간 10분에 초기농도 대비 PAHs잔류농도가 73% 까지 상당량 감소하였다가 다시 증가한 후 40분에 다시 감소 후 70분에 소폭 증가하였고 80분-24시간 사이의 PAH농도는 초기농도보다 크게 감소한 것으로 나타났으며, 잔류농도는 초기 농도대비 53-50%였음

■ 폴리클로리네이티드비페닐 (PCBs)

- 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 PCBs처리효과를 보이지 않았음
- 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 처리 50분부터 PCBs농도가 초기농도 이하로 감소하였으며, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 처리 10분부터 초기농도 이하의 PCB농도를 보였음. 잔류농도는 각각 초기농도대비 93-81, 94-85%였음
- 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80은 처리시간 10분에 초기농도 대비 PCBs잔류농도가 53% 까지 상당량 감소하였다가 다시 증가한 후 60분에 다시 감소 후 70분에 소폭 증가하였고 80분-24시간 사이의 PCBs농도는 초기농도보다 크게 감소한 것으로 나타났으며, 잔류농도는 초기 농도대비 48-37%였음



[그림 III-라-20] 처리제의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 PAHs 및 PCBs 농도의 변화

㉔ 연속공정 설계를 위한 벤치스케일 실험(bench-scale test)

■ 각 처리제의 농도에 따른 정화처리과정 중의 상태변화

- 2차년도 최적조건과 벤치스케일 조건 실험 결과를 고려하여 각 반응조의 처리시간 (Reaction time)을 30분으로 설정하고, 반응 시작 후 처리시간(30분) 단위로 처리조, 안정화조 및 저류조 각각에서 시료를 채취하여 평가함
- 첨가제(산화제, 계면활성제)에 의한 산화반응과 부피팽창으로 거품이 발생하여 처리시간에 도달하기 전인 8-9분부터 거품(미세 반응물 포함)이 2차 안정화조로 월류됨
- 퇴적물 시료와 공정수(인공해수)의 혼합물과 첨가제(산화제, 계면활성제)는 전체 연속 반응시간 동안 원활한 흐름으로 특별한 문제점은 발생하지 않았음
- 계면활성제의 form에 의한 미세퇴적물의 연속 반응조 운반이 원활한 것으로 나타남



0min: 시료 및 처리제 주입시작



4 min: Form과 혼합된 반응물  
1차 반응조에 가득 참



9 min: 상부 form 부터 2차  
안정화조로 넘어가기 시작함

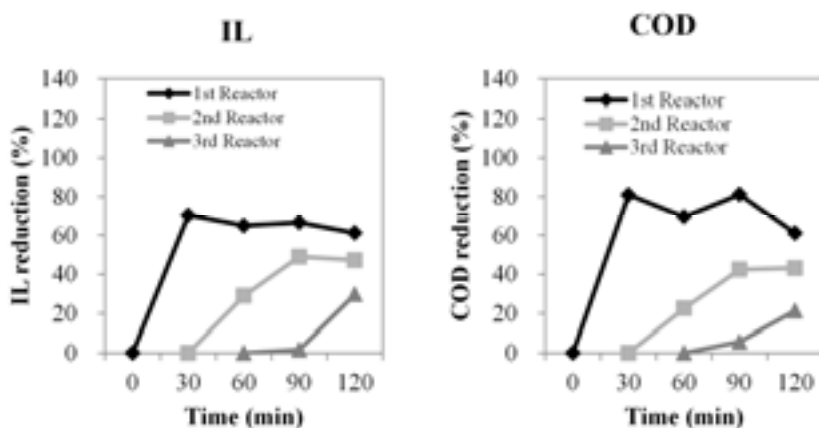
[그림 III-라-21] 연속공정 설계를 위한 벤치스케일 실험(bench-scale test)

### ■ 강열감량 (Ignition loss, IL, %) 변화

- 연속 반응조 실험 시 IL의 변화는 1차 반응조(1st reactor)에서는 반응 30분 이후부터 60% 이상의 IL감소가 120분 까지 유지되었음
- 2차 안정화조로 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후에 IL이 49%감소하였으며 90분(최초주입 후 120분)에는 47%였음
- 3차 저류조로 시료주입 후 30분(최초주입 후 90분)에는 IL감소가 거의 없었으며 60분(최초주입 후 120분)에는 30%였음

### ■ 화학적 산소요구량 (COD) 변화

- 연속 반응조 실험시 COD의 변화는 1차 반응조(1st reactor)에서는 반응 30분 이후부터 70-80%의 IL감소를 보이다 120분에는 61%였음
- 2차 안정화조로 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후에 COD이 23%감소하였으며 90분(최초주입 후 120분)에는 43%였음
- 3차 저류조로 시료주입 후 30분(최초주입 후 90분)에는 COD감소가 거의 없었으며 60분(최초주입 후 120분)에는 21%였음



[그림 III-라-22] 연속처리 시 퇴적물의 처리시간에 따른 부영양화관련 평가물질의 농도변화

### ■ 총 유기탄소(TOC) 변화

- 연속 반응조 실험 시 TOC의 변화는 1차 반응조(1st reactor)에서는 반응 30분 이후부터 70% 이상의 IL감소가 120분에는 57%였음

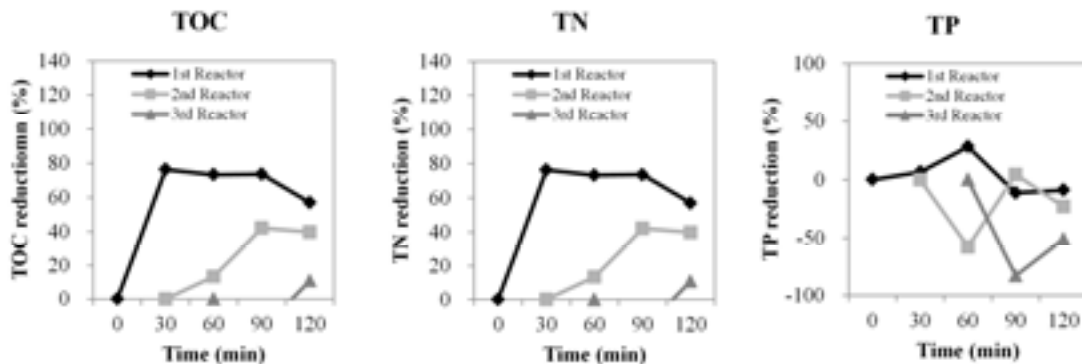
- 2차 안정화조로 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후에 TOC이 13%감소하였으며 90분(최초주입 후 120분)에는 43%였음
- 3차 저류조로 시료주입 후 30분(최초주입 후 90분)에는 TOC가 약간 증가하였고(-19%) 60분(최초주입 후 120분)에는 11%였음

■ 총 질소(TN) 변화

- 연속 반응조 실험 시 TN의 변화는 1차 반응조(1st reactor)에서는 반응 30분 이후부터 70% 이상의 IL감소가 120분에는 60%였음
- 2차 안정화조로 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후에 TN이 34%감소하였으며 90분(최초주입 후 120분)에는 43%였음
- 3차 저류조로 시료주입 후 30분(최초주입 후 90분)에는 TN감소가 거의 없었으며 60분(최초주입 후 120분)에는 33%였음

■ 총 인(TP) 변화

- 연속 반응조 실험 시 TP의 변화는 1차 반응조(1st reactor)에서는 반응 시작부터 60분 까지 28%감소되었으나 그 이후에는 다시 증가하였음
- 2차 안정화조로 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후에 TP가 증가하였으며 60분(최초주입 후 90분)에는 4%감소, 90분 후(최초 주입 후 120분)에는 다시 증가하였음
- 3차 저류조에서는 전체 반응시간동안 감소 없이 TP가 증가되었음



[그림 III-라-23] 연속처리 시 퇴적물의 처리시간에 따른 기타 유기물관련 오염물질의 농도변화

■ 크롬(Cr) 변화

- 연속 반응조 처리 시 Cr의 변화는 1차 반응조에서는 반응 30분 이후부터 120분까지 초기농도보다 30%정도 감소하였음
- 2차 안정화조로 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후에 Cr이 12%감소하였으며 90분(최초주입 후 120분)에는 다시 증가하였음
- 3차 저류조로 시료주입 후 반응 시간동안 감소 없이 계속 증가하였음

■ 니켈(Ni) 변화

- 연속 반응조 처리 시 Ni의 변화는 1차 반응조에서는 반응 30분 이후부터 120분까지 초

---

기농도보다 21-35%감소하였음

- 2차 안정화조로 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후에 Ni이 18%감소하였으며 90분(최초주입 후 120분)에는 11%감소하였음
- 3차 저류조로 시료주입 후 반응 시간동안 감소 없이 계속 증가하였음

#### ■ 구리(Cu) 변화

- 연속 반응조 처리 시 Cu의 변화는 1차 반응조에서는 반응 30분 이후부터 120분까지 초기농도보다 40-49%감소하였음
- 2차 안정화조에서는 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후부터 90분(최초주입 후 120분)동안 초기농도보다 9-24%감소하였음
- 3차 저류조로 시료주입 후 30분(최초주입 후 90분)에는 Cu가 증가하였으나, 60분(최초주입 후 120분)에는 10%감소하였음

#### ■ 아연(Zn) 변화

- 연속 반응조 처리 시 1차 반응조(1st reactor)에서는 반응 30분 이후부터 120분까지 초기농도보다 44-35%감소하였음
- 2차 안정화조에서는 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후부터 90분(최초주입 후 120분)까지 초기농도보다 17-32%감소하였음
- 3차 저류조로 시료주입 후 30분(최초주입 후 90분)에서 60분(최초주입 후 120분)까지 초기농도보다 8-23%감소하였음

#### ■ 비소(As) 변화

- 연속 반응조 처리 시 1차 반응조에서는 반응 60분에 23%, 90분에는 증가, 120분에는 다시 19%감소하였음
- 2차 안정화조에서는 거의 변화를 보이지 않았음
- 3차 저류조에서는 증가하였음

#### ■ 카드뮴(Cd) 변화

- 1차 반응조에서는 반응 30분 이후부터 120분까지 초기농도보다 78-69%감소하였음
- 2차 안정화조에서는 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후부터 90분(최초주입 후 120분)동안 초기농도보다 71-77%감소하였음
- 3차 저류조로 시료주입 후 30분(최초주입 후 90분)에서 60분(최초주입 후 120분)까지 초기농도보다 71-75%감소하였음

#### ■ 납(Pb) 변화

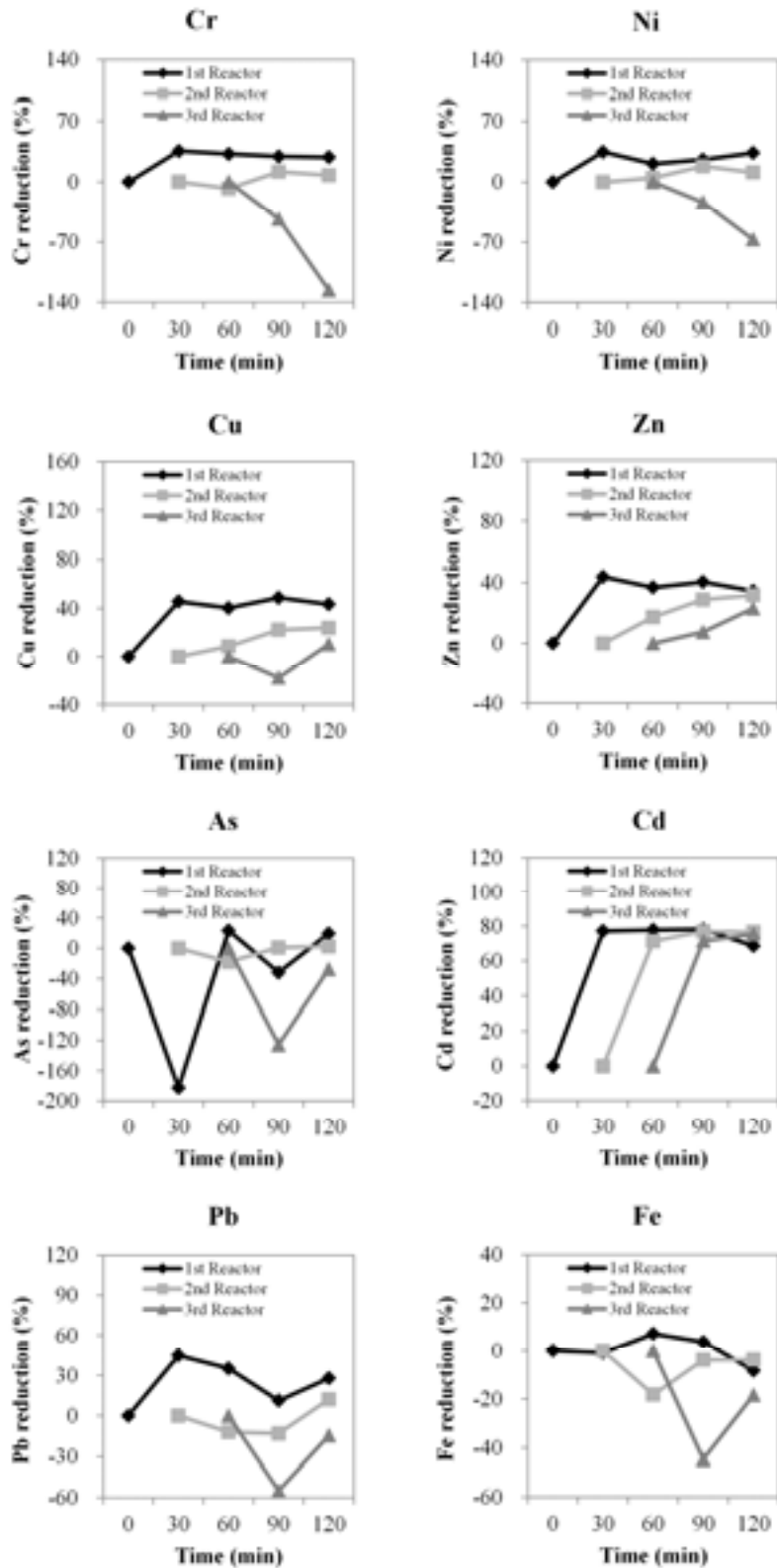
- 1차 반응조에서는 반응 30분 이후부터 120분까지 초기농도보다 45-28%감소하였음
  - 2차 안정화조로 시료주입 60분(최초주입 후 90분)후에 Pb이 3증가하였으며 90분(최초주입 후 120분)에는 12%감소하였음
  - 3차 저류조에서는 증가하였음
-

---

■ 철(Fe) 변화

- 1차 반응조에서는 반응 30분 이후부터 90분까지 초기농도보다 7-4%감소하였으나 120분에는 소폭 증가하였음
  - 2차 안정화조로 시료주입 후 90분(최초주입 후 120분)까지 증가하였음
  - 3차 저류조로 시료주입 후 60분(최초주입 후 120분)까지 증가하였음
-





[그림 III-라-24] 연속처리 시 처리제의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도와 반응시간에 따른 중금속의 변화

㊸ 고도처리를 위한 미세기포 폭기(micro-bubble aeration)공정 시험 및 평가

## ■ 각 처리제의 농도에 따른 정화처리과정 중의 상태변화

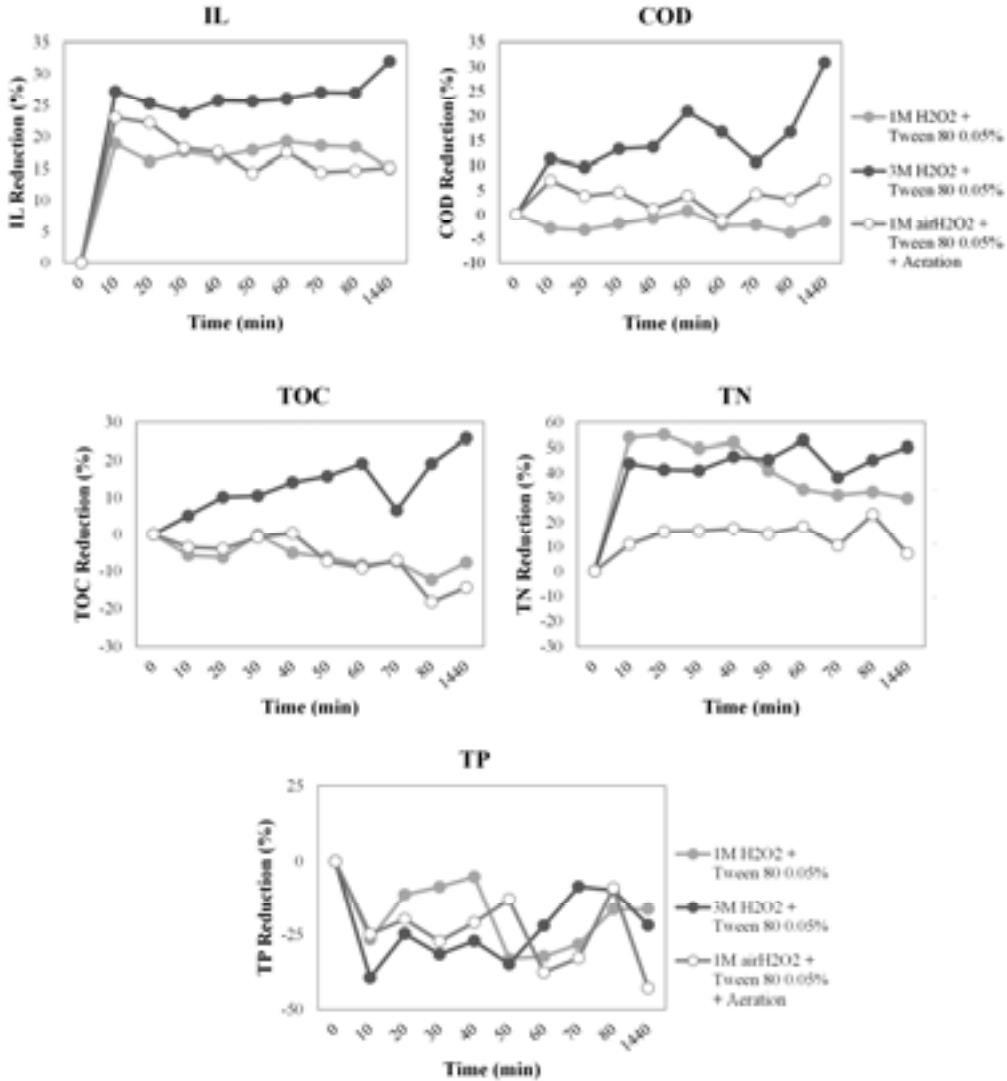
- 처리대상 퇴적물 및 처리제를 넣은 반응조에 미세기포를 발생시키면 반응조 전체에 고른 기포가 관찰되며 본 반응조 방식으로 공정상으로 퇴적물에 원활한 미세기포(aeration) 처리가 가능한 것으로 보임.



<초기> <중기>  
[그림 III-라-25. 미세기포 공정 추가 설계를 위한 벤치스케일 실험(bench-scale test)]

## ■ 부영양화관련 평가물질의 농도변화

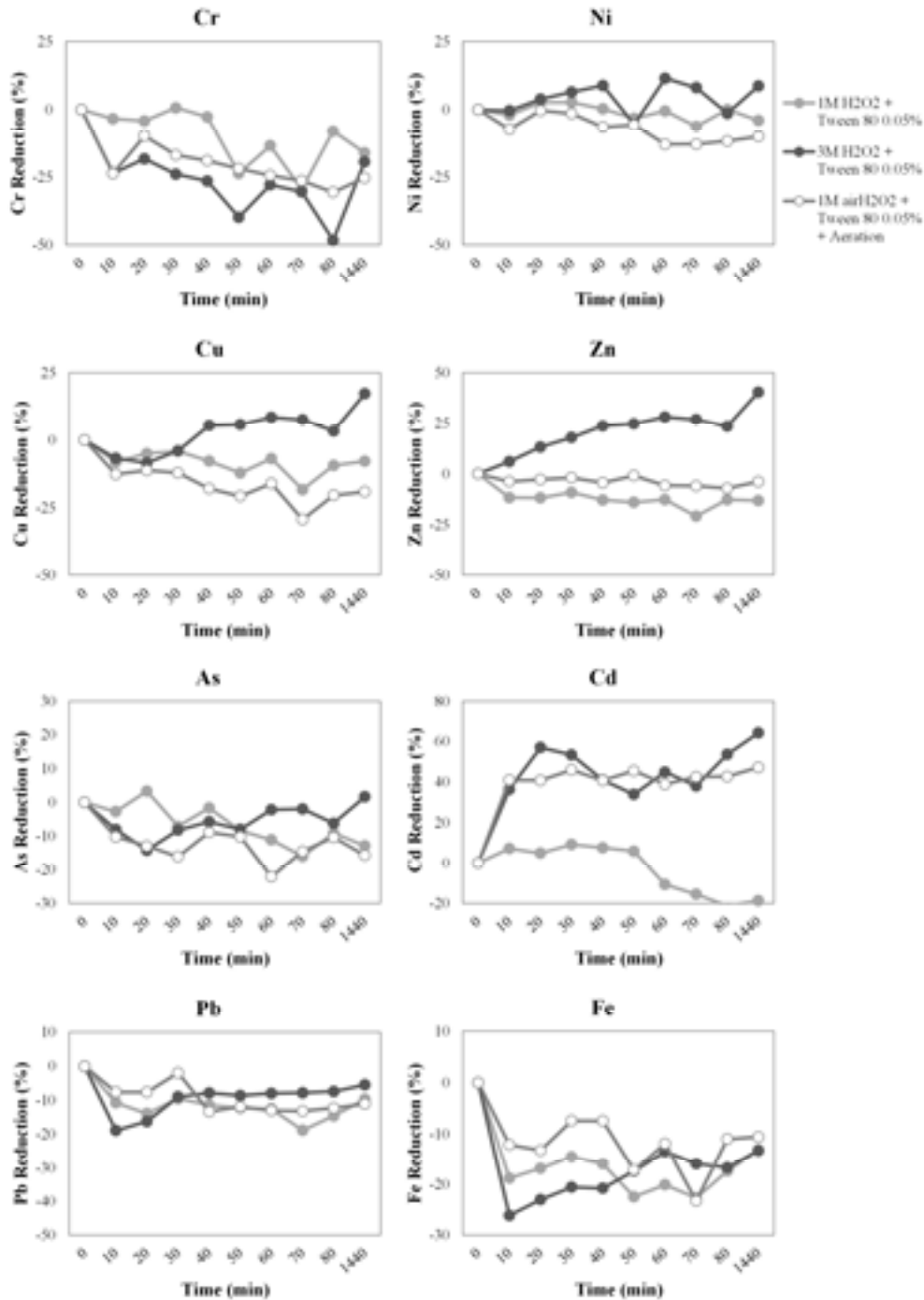
- 강열감량 (Ignition loss, IL, %) 의 경우 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리제에 미세기포 폭기결과 처리30분까지 미 폭기 시 보다 IL감소에 더 효과를 보였으나, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리제의 효과를 넘지 않았고, 40분 이후부터는 오히려 IL감소량이 더 낮았음.
- 화학적 산소요구량 (COD)의 경우 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리제에 미세기포 폭기결과 처리30분까지, 그리고 60분 이후에 미 폭기 시보다 COD감소에 더 효과를 보였으며, 60분 이후에는 감소율이 증가하였음.
- 총 유기탄소(TOC)의 경우 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리제에 미세기포 폭기 결과 처리 40분까지 미 폭기 시 보다 TOC감소에 근소하게 더 효과를 보였으나, 70분 이후는 TOC감소율이 더 낮았음.
- 총 질소(TN)의 경우 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리제에 미세기포 폭기 결과 미 폭기 시 보다 TN감소효과가 크게 낮아졌음.
- 총 인(TP)의 경우 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리제에 미세기포 폭기 결과 처리 60분까지 미 폭기 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리 시 보다 TP감소에 더 효과를 보였음, 60분 이후부터는 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 미 폭기 처리 보다 TP제거 효과가 조금 낮았으나 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 미 폭기 처리한 퇴적물보다는 높은 인 제거율을 보임.



[그림 III-라-26] 처리공정에 미세기포 폭기(micro-bubble aeration) 시 처리 시간에 따른 퇴적물의 부영양화관련 평가물질의 농도변화

■ 중금속의 농도변화

- 크롬(Cr), 비소(As), 납 (Pb)의 경우는 1M, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 및 폭기처리 모두 시료 내 Cr, As, Pb를 제거하지 못하고 오히려 처리 후 퇴적물 내 Cr농도가 증가하였음.
- 니켈(Ni), 구리(Cu), 아연(Zn)의 경우는 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미세기포 폭기결과 1M, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미 폭기에 비하여 처리 후 퇴적 물 내의 Ni 농도가 더 높았음. 세 조건 중에서 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 미폭기 조건만 퇴적물 내 Ni, Cu, Zn 농도가 감소하였음.
- 카드뮴(Cd)의 경우 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리제에 미세기포 폭기결과 24시간 까지 미 폭기 시 보다 Cd제거에 더 효과를 보였음. 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리 보다는 10분, 50분, 80분 이후에는 Cd제거 효과가 더 높았음.
- 철(Fe)의 경우 반응 50분까지는 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미세기포 폭기 처리 시 미 폭기 할 때 보다 처리한 퇴적물 내의 철 증가량이 가장 적었음.

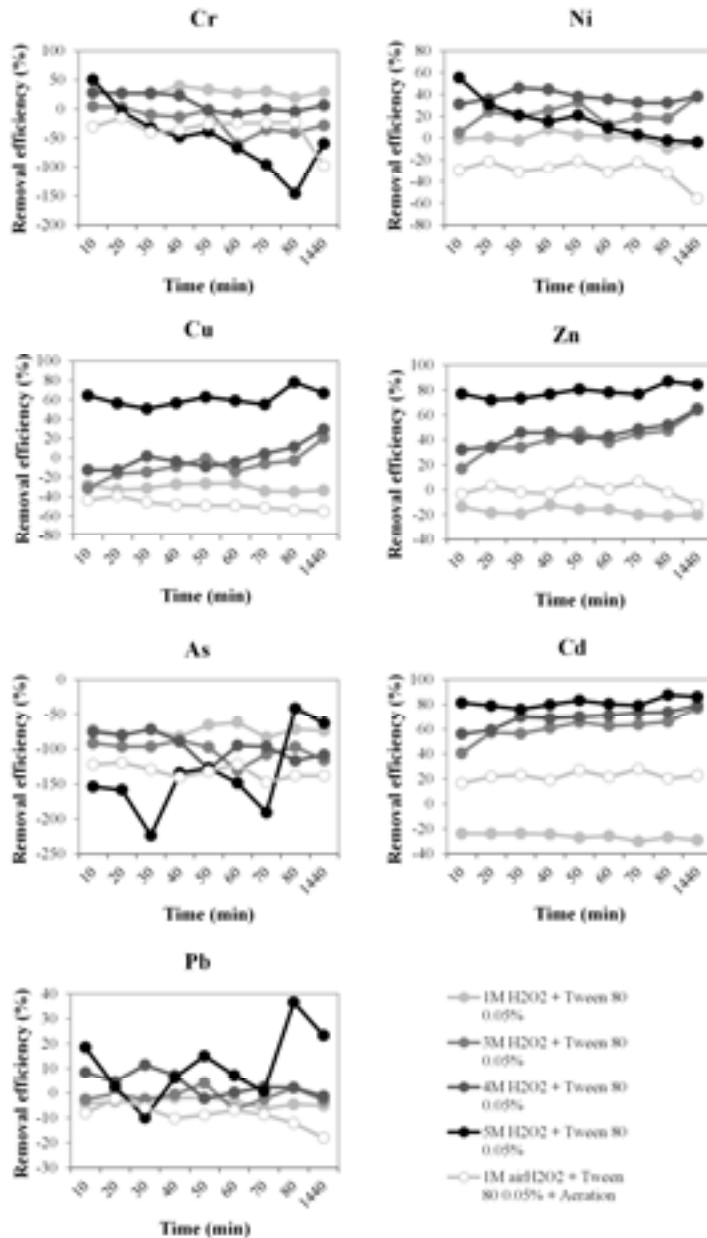


[그림 Ⅲ-라-27] 처리공정에 미세기포 폭기(micro-bubble aeration)시 처리 시간에 따른 퇴적물의 중금속 농도변화

㉔ 생물이용 가능한 중금속의 저감으로 본 생태위해도 저감 능력 평가

- 1M HCl 단일추출법으로 대상오염퇴적물의 공청처리 시 생물이용 가능한 중금속의 저감율을 도출하였으며, 이를 통해 본 처리공정이 해양오염퇴적물의 생태위해성 저감에 대한 효과를 평가하였음.
- 크롬(Cr)의 경우 1M, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리 시 제거 효과가 나타났으며 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 경우 80분 처리 시간 까지 19-41%의 제거율을 보였음.

- 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미세기포 폭기 처리는 크게 제거효과를 보이지 않았음.
- 니켈(Ni)의 경우 3M 이상의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리로 오염퇴적물에서 제거되는 효과가 나타났으며 제거율은 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 처리는 5~38%의 제거율을 보였으며, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80는 31-45%의 제거율을 보였음. 5M M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 경우는 10분처리로 55%가 제거되었으며 이후로는 처리시간이 길수록 제거율이 감소되는 것으로 나타남. 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미세기포 폭기 처리는 오히려 퇴적물 내 Ni을 증가시키는 것으로 나타남.
  - 구리(Cu)의 경우 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리만 제거효과가 있는 것으로 나타났으며 제거율은 51-78%수준으로 큰 제거율을 보였음. 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미세기포 폭기 처리는 오히려 퇴적물 내 Cu을 증가시키는 것으로 나타남.
  - 아연(Zn) 의 경우 3M 이상의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리로 오염퇴적물에서 제거되는 효과가 나타났으며 제거율은 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 처리는 17-64%의 제거율을 보였으며, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80는 32-65%의 제거율을 보였음. 5M M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 경우는 10분 처리로 77%가 제거되었으며 이후로는 처리시간이 길수록 87%의 제거율을 보였음. 효과가 있는 것으로 나타났으며 제거율은 51-78%수준으로 큰 제거율을 보였음. 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미세기포 폭기 처리는 동 농도 미폭기 처리보다 좋은 제거율을 보여 고농도에 폭기처리에도 더 큰 제거효과를 보일 수 있을 것으로 기대됨.
  - 비소(As)의 경우 모든 처리로 제거되지 않았으며 오히려 퇴적물 내 As를 증가시키는 것으로 나타남.
  - 카드뮴(Cd)의 경우 3M 이상의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리로 오염퇴적물에서 제거되는 효과가 나타났으며 제거율은 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 처리는 40-77%의 제거율을 보였으며, 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80는 56-79%의 제거율을 보였음. 5M M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 경우는 10분 처리로 81%가 제거되었으며 처리시간의 길이에 따른 큰 효과는 보이지 않았음. 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미세기포 폭기 처리는 효과가 있는 것으로 나타났으며 동 농도 미폭기 처리보다 좋은 제거율을 보여 고농도에 폭기처리에도 더 큰 제거효과를 보일 수 있을 것으로 기대 됨.
  - 납(Pb)의 경우 4M, 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리 시 제거 효과가 나타났으며 4M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 경우 30분 처리 시간 까지 11%의 제거율을 보였으며 처리시간이 길어질 경우 제거율이 낮아짐. 5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80처리 시 10분 처리로 18%가 제거되었으며 처리시간에 따라 제거율이 오르기도 하고 내리기도 하였으며 80분에서 24시간 처리 시에는 37-23%의 제거율을 보임.
  - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 처리는 As를 제외하고는 Cr, Ni, Cu, Zn Cd, Pb중 생물이용가능성이 있는 존재형태의 경우 3M-5M 사이의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도에서 상당량 제거 가능한 것으로 나타났으며 미세기포 폭기 처리는 동 농도의 미 폭기 처리 시 보다 제거율을 높일 수 있는 것으로 나타나 중금속 오염이 동반된 해양오염퇴적물의 생태위해도 또한 저감시킬 수 있는 것으로 나타남.
  - 그리고 As같이 본 공정으로 처리가 가능하지 않은 중금속 오염이 동반된 경우는 다른 추가 공정이 필요한 것으로 판단됨.
  - 그러나 퇴적물의 중금속의 형태에 따라 생물이용성이 높은 부분이 아니고 광물격자에 금속원소가 갇혀있는 경우(residual fraction) 경우 저 pH가 동반되는 산화처리 시 오히려 불안정한 존재형태로 유도되어 생태위해성을 높이는 역효과를 초래할 수 있음(김수삼, 2003). 그러므로 중금속 오염이 동반된 오염퇴적물의 정화공정 설계 시 대상 퇴적물 내 중금속의 존재형태에 대한 조사가 공정설계에 반드시 수반되어야 함.



[그림 III-라-28. 처리제의 여러 가지 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 농도의 시간에 따른 퇴적물 내 생물이용가능 중금속 농도변화]

(나) 처리기술의 구현을 위한 세부공정 디자인 및 공정 제안

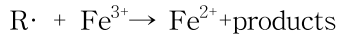
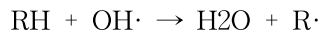
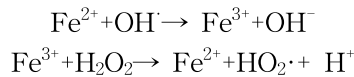
① Bench-scale 현장처리 장치 시험 결과에 대한 고찰

㉞ 해양오염퇴적물의 현장처리를 위한 화학적 처리방법에 대한 고찰

- 오염된 토양의 정화처리에는 화학적 처리방법이 널리 사용되는데, 제거하려는 오염물질에 적합한 화학제품을 사용하여 다량의 오염물질을 제거할 수 있는 장점이 있음.
- 화학적 처리제 중 산화제와 계면활성제를 사용하는 방법이 광범위하게 사용되고 있음
- Fenton 산화반응은 과산화수소를 이용하여 형성된 hydroxyl radical(OH·)의 촉매반응을 통하여 오염물질을 처리하는데 주로 사용되는 반응임으로 2가 철염의 Fenton 시약

과 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)의 혼합용액을 사용하며, 주로 유기물을 산화-처리하는 방법임 (Fenton, 1984)

- 그런데 토양이나 퇴적물에는 침철광, 적철광, 자철광같은 광물수산화물(oxyhydroxide minerals)들이 다량 포함되어 있기 때문에, 토양이나 퇴적물에 과산화수소를 주입 시에 추가적으로 철염을 주입하지 않더라도 Fenton 반응과 같은 촉매반응(유사 Fenton반응)이 일어나게 됨(Watts R.J., 1999).
- 그리고 강력한 hydroxyl radical의 과산화수소 분해는 유기화합물의 확산속도를 조절하여 비 특이성 산화반응을 하며 (Haag and Yao, 1992), 오염토양이나 퇴적물에 함유 된 유기오염물질 및 중금속을 정화할 수 있음



[그림 III-라-29] Fenton 반응의 메커니즘

- 그러나 과산화수소는 강력한 산화제이므로 산화제처리에 의한 토양환경의 물리화학적 변화와 토착생물(토양 소 동물 및 미생물 등)의 사멸로 인하여 토양의 비옥도가 감소되고 토양고유의 정화능력이 저감될 가능성이 높아, 추가적인 다른 공정이나 화학물질 처리를 융합하여 정화효과를 상승시켜 저 농도 산화제 사용이나 단시간 처리 등을 가능하게 하는 것이 정화처리가 미칠 수 있는 2차적인 환경위험을 저감시킬 수 있는 방법임
- 이러한 관점에서 소수성 오염물질의 회수율을 향상시켜주는 계면활성제는 수용액상의 소수성 물질의 용해도를 향상시키고, 입자에 흡착된 오염물질을 탈착을 용이하게 하여 산화법과 함께 병행사용 되기에 적합한 첨가제임
- 본 연구개발의 목적은 오염 퇴적물에 과산화수소를 주입하여 유도된 Fenton-like반응을 이용한 산화방법과 Tween 80같은 계면활성제를 동시에 사용하여 해양오염퇴적물 중의 유기물을 정화하는 방법을 개발하고, 동시에 수반되는 중금속 및 유기화합물에 대한 정화능력을 평가하고자 하였음
- 그리고 본 정화방법을 이용하는 Bench-scale의 해양오염퇴적물 현장처리 장치를 개발하고 평가하였음

[표 III-라-8] Fenton 산화법의 장·단점 및 대책(환경부, 2007)

Fenton 산화방법의 장점	Fenton 산화법의 단점
빠른 시간 안에 정화완료 가능	충분한 증기회수 시설이 없을 경우 건물 또는 배관 등으로 유독 증기가 유입될 수 있음
MTBE와 벤젠을 산화시킬 수 있음	오염원의 모양 및 범위를 변화시킬 수 없음
산화반응을 통하여 발생하는 열로 인하여 VOC를 포함한 배기가스가 발생되지 않음 <sup>1)</sup>	투수성이 낮은 토양의 경우 짧은 시간 안에 산화제의 원활한 유입이 어려움

호기성 생분해에 필요한 용존산소를 제공할 수 있음	지중에서 2차 부산물이 생성될 수 있음 <sup>2)</sup>
	침전물을 형성하여 대수층의 공급을 막을 수 있음

대책: <sup>1)</sup>10%이하의 고체 과산화염이 추가될 경우 열이 발생하는 것을 감소시켜 VOCs 가 배기가스에 혼합되어 배출되는 것을 피할 수 있음

<sup>2)</sup>화학적 산화법은 독성이 강하고 유동성이 높은 2차 부산물을 생성할 수 있음, 따라서 화학적 산화법의 적용 시에는 2차 부산물에 대한 분석이 항상 수반되어야 함

### ㉔ Bench-scale 처리장치에 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) + Tween 80처리제 사용 오염 퇴적물 산화-세척방법에 대한 평가

- 여러 가지 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)의 농도와 계면활성제인 Tween 80을 이용한 산화-세척처리 시험결과 IL, TN의 저감으로 본 유기물 정화효과는 저농도에서도 큰 저감효과를 보이는 것으로 나타났음. 그러나 COD와 TOC의 저감으로 본 유기물 정화효과는 1M 저농도 과산화수소보다는 고농도과산화 수소일수록 큰 효과가 있는 것으로 나타났으며, 인과 관련된 유기물의 저감에는 효과가 없는 것으로 나타남
- 여러 가지 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)의 농도와 계면활성제인 Tween 80을 이용한 산화-세척처리 시험결과 중금속 중 Zn, Cd, 경우는 과산화수소 3M 이상의 고농도시 Cu의 경우는 5M 이상농도 사용 시 상당한 저감 효과가 있었으며, 5M 과산화수소의 경우 10분정도의 단시간에도 급속한 저감효과를 보였음. 그러나 Cr, Ni, As, Pb의 경우는 효과가 전혀 없거나 오히려 처리 후 퇴적물 내 잔류농도가 증가하기도 하였음
- 그러므로 처리대상 오염퇴적물의 오염의 특성과 오염도에 따라 과산화수소같은 산화제의 농도를 조절할 필요가 있으며, 처리대상 오염퇴적물이 P, Cr, Ni, As, Pb등의 본 공정만으로는 처리할 수 없는 오염을 동반한 경우 Acetic acid, HCl같은 용해제나, Citric acid, EDTA같은 킬레이트제를 포함한 추가공정공정이 설계되어야 할 것으로 보임.

### ㉕ Bench-scale 처리장치의 연속공정 수행 평가

- 연속 반응조에서의 유기물 관련 오염물질의 처리는 TP를 제외하고는 IL, COD, TOC, TN모두 1차 반응조에서 감소 효과가 좋은 것으로 나타났으며, 1차 반응조로 시료가 계속 주입되는 경우에도 저감률이 크게 낮아지지 않았음
- 그러나 2차 반응조, 3차 반응조에서 처리된 퇴적물의 유기물관련 오염도 저감률은 1차 반응조에 비하여 낮았으며, 이는 이미 1차 반응조에서 처리된 처리산물이 2차 반응조로 원활이 운반되지 못하고, 새로 주입되는 퇴적물이 1차에서 충분히 처리되지 못하는 채로 다음 반응조로 이동되기 때문으로 보임
- 유해화학물질 중 중금속의 경우도 역시 모든 항목이 대부분 2차 안정화조, 3차 저류조에서 처리된 퇴적물의 오염도 저감률은 1차 반응조에 비하여 낮았으며, 이는 역시 1차 반응조에서 처리된 퇴적물이 각 반응조간의 흐름이 원활하지 못한 문제로 충분히 처리되지 못하는 채로 다음 반응조로 이동되기 때문으로 보임
- 그러므로, 각 반응조에서 다음공정으로 처리된 퇴적물을 수송시 정확한 체류시간 및 원활한 흐름에 대한 공정보완이 필요할 것으로 나타남
- 각 반응조에서 발생하는 반응에 의한 처리대상 퇴적물의 부피팽창 및 발생하는 가스를 완벽히 수용할 수 있도록 보완이 필요함하며 이는 4차년 연구개발시 개선시킬 계획임



㉔ Bench-scale 공정에 미세기포 공정 추가에 대한 평가

- 본 연구에서는 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80의 처리조건에 미세기포 폭기 공정을 추가하여 공정의 효용성을 평가결과 대상 퇴적물에 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미세기포 폭기처리 결과 시간에 따른 차이는 있었으나 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80만 처리할 때보다 IL, COD, TOC, TP를 저감율을 소폭 상승시켰음
- 중금속의 경우도 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 + 미세기포 폭기처리 결과 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80만 처리할 때보다 미세기포가 처리퇴적물의 Zn, Cd를 더 저감시키는데 기여한 것으로 나타남
- 그러나 나머지 중금속의 경우 1M, 3M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80으로 처리 시 오히려 처리퇴적물의 농도가 늘기도 하였으며, 미세기포 폭기 처리도 퇴적물 내 중금속 저감에 도움이 되지 않았음
- 저농도의 처리제에 미세기포 폭기 공정 추가 시 고농도 처리제를 이용한 퇴적물 정화효과를 기대하였으나, 부영양화 관련 유기물의 정화에 동 농도의 처리제에서는 미세기포 처리시보다 정화효과를 소폭 상승시킬 수 있는 것을 확인하였음. 그러나 고농도 처리효과 만큼의 정화효율을 기대하기는 어려운 것으로 나타남

㉕ 선박기원 오염물질 포함한 퇴적물 정화 시 자력입자분리 공정처리

- 조대입자(125 $\mu$ m 이상) 내 중금속 오염도 높은 입자 자력분리 가능한 입자의 경우 높은 대자율을 보여 자력 분리가 가능함

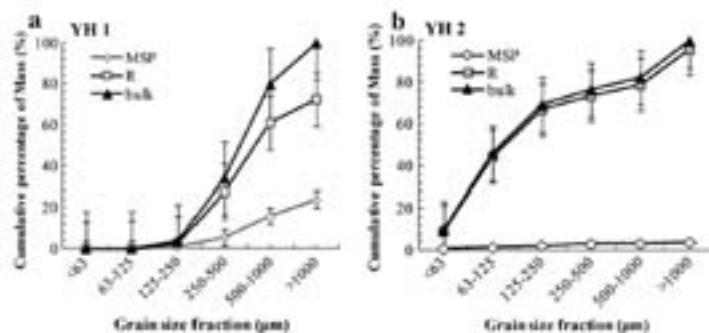


Fig. 3. Sediment grain size (diameter) distribution at YH1 (a) and YH2 (b). Values were expressed as mean  $\pm$  standard deviation.

[그림 III-라-30] 향만 인근 퇴적물의 입도분포 및 자력분리가능 입자(MSP)의 분포

[표 III-라-9] 선박 페인트 입자, 자력분리가능 입자(MSP) 및 나머지 입자(R)의 대자율

Magnetic susceptibility (unit:  $10^{-8}$  SI) of paint fragments and magnetically separated particles (MSP) and residual (R) fraction of sediments at station YH1.

	Paint fragments (n = 6)	MSP (n = 8)	R (n = 7)
Magnetic susceptibility	6.3 $\pm$ 0.1	26 $\pm$ 9.1	1.4 $\pm$ 0.4

- 향만 오염퇴적물 중 선박기원 오염물질 포함 시 조대입자 중 대자율이 높은 입자를 (MSP) 자력분리 시 TBT, Fe, Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg 제거효과 큰 것으로 나타남

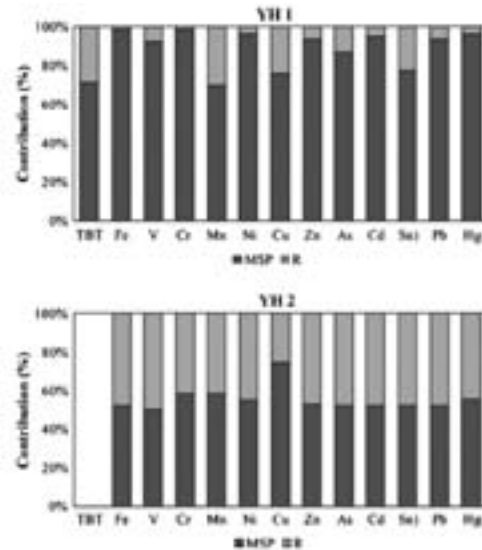


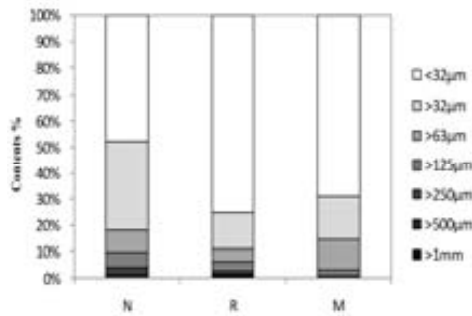
Fig. 4. The relative contribution of magnetically separated particle (MSP) and residual (R) particle fractions to total concentrations of TBT and metals in sediments at sampling stations of YH1 and YH2 in Busan, Korea (Bulk fractions are sum of MSP and R fractions).

[그림 III-라-31] 선박기원 오염물질 함유 퇴적물의 자력 분리 결과

② 2차년 연구개발 결과(입자분리 공정 매커니즘 개발)를 기초로 한 처리기술 구현을 위한 고찰

㉞ 대상 해역 및 국내 오염퇴적물의 입경분포 및 오염분포

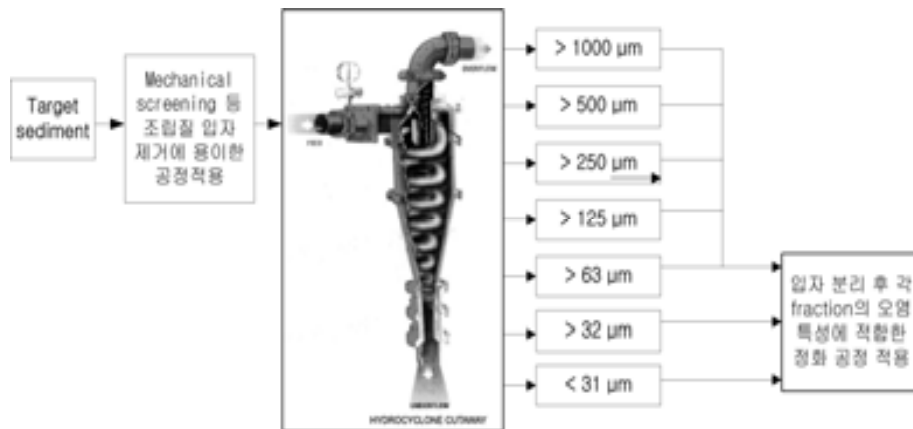
- 대상해역인 N해역의 125 $\mu$ m 이상의 퇴적물의 비율을 평균 20%이하, <125 $\mu$ m의 퇴적물이 80%이상으로 우세하였으며, <32 $\mu$ m 40%이상을 차지하였음 (그림 III-라-32.)
- 기존 오염 우려 해역 조사결과 10개 해역에서 평균 Silt는 40.1%, Clay는 38.0%로 미세입자가 78.1%임
- 대상 해역 퇴적물 중 32  $\mu$ m 이하 입자의 양은 평균 64.0%이며, 32  $\mu$ m 이상은 21.4%이며, 주요 처리 대상이 되는 미세입자를 기준(100%)으로 입경별 양과 오염도를 함께 고려할 경우 각각의 비율은 78.2%, 21.8%임
- 대상 해역에서 처리대상 미세입자의 범위를 32  $\mu$ m 이상으로 할 경우, 처리 대상 미세입자 중 평균 21.8% 저감 가능
- 그러므로 입경별 부영양물질 분포 및 공정의 용이성, 비용의 절감을 위하여 입자분리의 범위를 63 $\mu$ m 이상, 32  $\mu$ m 이상, 32  $\mu$ m 이하의 범위로 선정하는 것이 가장 효율적이라고 판단됨



[그림 III-라-32] 대상해역 퇴적물의 입경별 상대적인 분포

㉔ 입자분리 처리기술 공정 방법 선정 및 메커니즘 개발

- 퇴적물을 입자분리 시 협잡물(Debris) 및 자갈 등(Over sized gravel etc.)을 상용 장치로 분리한 다음 실제 처리할 입경별로의 분리는 몇 단계로 입경별 분리가 가능한 다단 하이드로 사이클론으로 분리하는 것이 적합함
- 입자분리 공법 중 하이드로 사이클론방식이 가장 입도한계범위가 유동적이며 비교적 입자가 작은 범위까지 분리하기가 가장 용이하므로 해양오염퇴적물의 미세 입자 분리에 가장 적합한 것으로 보임
- 수거된 정화대상 해양오염퇴적물의 입자분리를 위해 개발한 공정 메커니즘은 그림 III-라-33와 같음



[그림 III-라-33] 하이드로 사이클론을 이용한 입자 분리 메커니즘

㉕ 통합방안 제안

- 대상 해역 퇴적물 중 63µm이상은 전체 퇴적물 대비 평균 14.6%이며, 입경별 오염도를 함께 고려하면 전체 처리 대상 중 9.4%에 해당함
- 해양퇴적물을 처리공정에 도입하는 단계에서 협잡물(Debris) 및 자갈 등(Over size gravel etc.)을 기존 상용 장치로 분리, 제거가 필요함
- 주요 처리 대상 입자의 분리는 먼저 조립질(Sand)과 미세입자를 효율적으로 분리한 다음, 분리된 미세입자를 실제 처리 대상이 되는 입경별로 분리가 필요함
- 조립질은 전체 처리대상 오염물질 대비 9.4%이므로 상용 오염도양 정화기술에서 주로

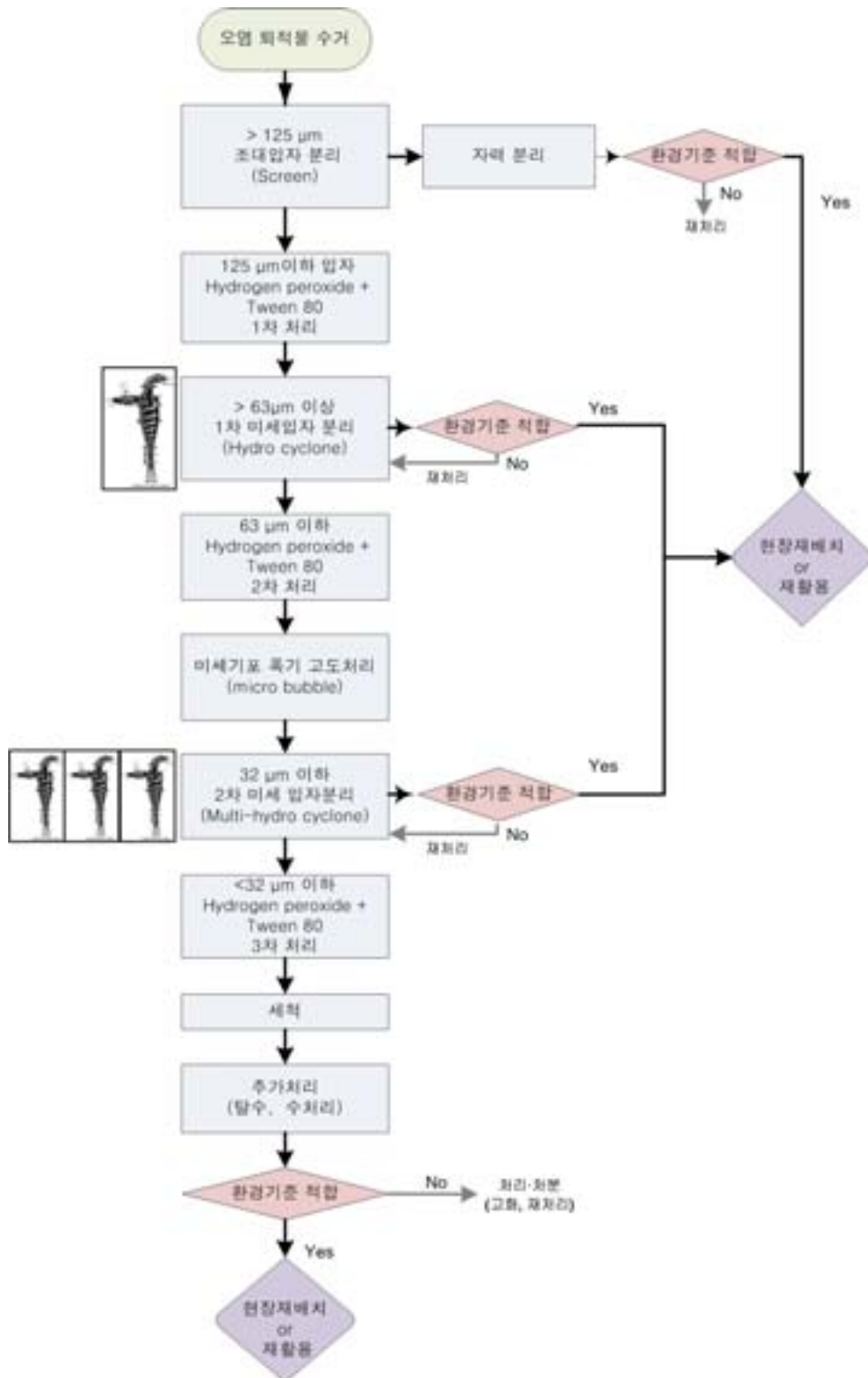
---

적용하는 용수에 의한 세척과 유기물 산화로 충분히 제어가 가능함

- 처리 대상 미세입자는 단순한 유기물 산화로는 제어하기 곤란하므로, 함유된 오염물질에 대한 고도처리가 필요함

### ③ 공정설계 및 공정과정 방안 도출 및 제안

- 본 연구개발을 통한 공정방안은 수거된 오염퇴적물을 입경별로 연속적으로 분리하여 >125  $\mu\text{m}$ 입자는 자력분리를 통한 물리적인 분리를 통하여 정화 후 처리 및 재활용, <125  $\mu\text{m}$ 이하는 하이드로 싸이클론을 이용한 >63  $\mu\text{m}$ , >32  $\mu\text{m}$ , <>32  $\mu\text{m}$ 의 분리 공정과 각 입경별 분율의 오염도 및 오염형태에 적합한  $\text{H}_2\text{O}_2$ 농도의  $\text{H}_2\text{O}_2$  + 0.05% Tween 80, 미세기포 폭기 처리공정 연속처리를 통하여 부영양화 관련 오염물질 및 제거 가능한 유해화학물질 제거한 후 현장 처리 및 재활용의 분리 및 세척을 기반으로 하는 연속공정임
  - 본 연구개발을 통한 공정평가 결과 부영양화가 심화된 항만 인근의 오염퇴적물을 처리하는데 유용할 것으로 기대됨.
-



[그림 III-라-34] 분리 및 세척 처리기술 통합 공정 제안

(4) 모듈화 공정을 위한 제안

- 2차년도 연구에서 개발된 주로 부영양물질에 의해 오염된 해양퇴적물의 처리 기작 (Mechanism)을 연속흐름의 다양한 조건(3차년도)에서 시험, 평가한 결과 충분히 구현할 수 있음을 확인함.

→ 처리 대상 퇴적물(N해역: 입경 125 $\mu$ m 이하)을 하나의 처리 흐름에서 입자분리 및 세척기반 처리기술의 각 공정별로 시험, 평가를 하고 그 결과를 기초로 모듈화 공정을 개

발할 필요가 있음.

- 개발된 처리기술을 해양오염퇴적물 정화복원 사업 현장에 적용될 것을 상정하여, 현행 처리기술 즉, 입자분리는 분리 공정만, 세척처리는 세척 공정만으로 구성하지 아니하고, 하나의 연속 처리흐름(Single treatment flow)에서 입자분리와 세척처리가 통합된 공정으로 구성되는 것이 적합함.
  - 실제 처리기술 적용 시 수거된 해양오염퇴적물에서 협잡물 및 자갈 등 거대입자를 기존 분리장치(트롬벨, 진동선별기 등)로 분리한 다음, 분리된 처리대상 퇴적물을 오염도의 특성에 따라 세척 기반 처리(1차)를 하며, 그 다음 조립질(75 또는 63 $\mu\text{m}$  이상)을 싸이클론 장치로 분리시키며, 다시 분리된 퇴적물(75 또는 63 $\mu\text{m}$  이하)은 세척 기반 처리(2차)를 거치며, 처리 산물은 다시 멀티 하이드로싸이클론 장치로 세립질(32 $\mu\text{m}$  이상)을 분리시키며, 분리된 퇴적물(32 $\mu\text{m}$  이하)은 오염된 정도에 따라 고도 처리(3차)를 함. 처리된 모든 산물들은 다양한 목적별로 유효활용(양빈재, 지반구성용 토사, 재활용 벽돌/블럭 등) 또는 현장에 재배치 할 수 있도록 관련 환경기준을 충족하는 수준까지 처리가 가능하도록 기술을 개발할 필요가 있음.
- 개발된 처리기술이 해양오염퇴적물 정화복원 사업 현장에서 원활하게 사용될 수 있도록 현장 여건을 고려하여 모듈화 기술을 개발할 필요가 있음.
  - 바지선 1-3척 정도의 공간(바지선 평균 규모: 폭 10-15m, 길이 20m)에서 하루 평균 수거하는 퇴적물 물량(약 300~400  $\text{m}^3$ )에 대응할 수 있고 필요한 모든 처리기술이 구현될 수 있는 처리기술과 설계가 필요함. 또한, 대상 해역의 특성과 퇴적물의 오염 정도에 따라 필요한 각 단위 처리 장치들이 독립적으로 분리, 재배치, 재조합이 가능하도록 관련 기술을 개발할 필요가 있음.
  - 해상 또는 연안에서는 전력 및 용수 사용이 매우 제한되며, 해수를 사용하는 경우, 다량 함유된 염소 이온에 의해 화학적 처리나 생물학적 처리가 어려울 수 있으므로, 이에 대한 해소방안이 처리기술 개발과 설계에 반영될 필요가 있음.

## 마. 현장 처리기술 공정 상세 설계

### (1) 현장처리기술 공정 상세설계 개요

#### (가) 공정 상세설계 기본방향

- 본 연구에서 개발하고자 하는 입자분리·세척기반 통합 공정 상세설계는 기 조사해역 중 해양오염퇴적물 정화기술 개발을 위한 시험가능 해역을 선정하여 대상 해역의 오염퇴적물의 물리적 특성 및 오염특성을 고려하여 현실적으로 적용가능한 단위공정을 조합하여 정화처리가 가능하도록 현장처리기술을 개발하기 위함.
- 해양퇴적물 세척기술의 가장 큰 장점은 복합오염물질 처리가 세척제의 선택적 적용으로 처리효율을 극대화할 수 있고, 입자크기별로 선별 처리된 퇴적물은 다양한 용도로 재활용이 가능하다는 점과 신속한 처리 및 현장여건을 고려한 장치의 구성이 가능하다는 점이라고 판단됨.
- 따라서 본 연구에서 개발하고자 하는 것은 해양퇴적물의 입경크기나 입경분포의 제한점을 최소화하여 모든 영역의 오염퇴적물을 친환경적으로 처리하고 처리된 퇴적물은 모두 유용자원으로 재활용이 가능하도록 고품화/안정화 공정과 연계하여 해양오염퇴적물을 적절하게 처리하는 공정 상세설계를 수행하는 것임.

#### (나) 공정설계 대상해역 선정

- 개발 예정인 해양오염퇴적물 정화기술을 시험하기 위한 해역으로는 개발될 기술이 최적

화되기 전임을 고려하여 중금속 등 유해화학물질의 오염도가 비교적 낮으며, 유기물 오염도가 높은 해역이 적합하다고 판단됨.

- 해역별 퇴적물의 오염도, 물성, 주요 오염물질, 수심 및 해역 특성을 검토한 결과를 종합하여 대상해역을 “N”해역으로 결정함
  - 대상해역 선정근거 : “지속가능 해양오염퇴적물 정화기술 개발을 위한 시험가능 해역 검토”, 2012. 1, 한국해양과학기술원
- 또한 국내 해양오염퇴적물을 세척기반 처리기술을 적용하여 적극적으로 정화한 사례가 없고, 주로 악취에 대한 민원발생이 높기 때문에 관련 처리기술을 통한 기술 접근성이 용이하고 유기물 오염도 높은 해역을 선정함.

**(다) N해역 일반현황**

**① 오염현황**

- N해역의 부영양화 정화지수(CIET: Clean-up Index, Eutrophication)는 평균 6.6으로 25개 조사해역 중 4번째로 높은 수준임.
- N해역의 유해화학물질 정화지수(CIHC:: Clean-up Index, Harmful chemicals)는 평균 3.0으로 25개 조사해역에서 14번째를 차지함.
- 이는 정화복원 대상구역 설정기준인 CIET = 6.0 이상 또는 CIHC = 2.0 이상인 해역으로 정화복원 대상 해역임.
- 조사결과 N해역의 퇴적물 오염면적은 약 2,974,000 m<sup>2</sup> 이며, 정화대상 물량은 약 1,265,819 m<sup>3</sup> 인 것으로 조사됨.

**② 주요 오염물질별 농도분포**

- 표 III-마-1과 III-마-2은 N해역의 주상퇴적물 시료를 분석한 결과로 오염물질별 농도를 나타냄.

[표 III-마-1] N해역 주상퇴적물의 부영양화물질 농도분포

구분	COD (mg/g)	AVS (mg/g)	IL (%)	TOC (%)	TN (%)	Al (%)	Fe (%)
최소	21.4	0.0	4.70	1.00	0.07	5.76	2.39
최대	75.0	4.98	10.60	4.11	0.26	11.02	3.22
평균	40.2	1.82	8.59	1.85	0.12	8.35	2.88

[표 III-마-2] N해역 주상퇴적물의 유해화학물질 농도분포

구분	Mn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)
최소	460	47	23	29	142
최대	857	114	32	134	518
평균	651	78	29	71	286

구분	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)	TBT (ug/kg)
최소	8.8	0.17	35	0.025	85
최대	16.4	2.66	110	1.362	330
평균	13.2	1.07	67	0.174	196

- 표 III-마-3와 III-마-4은 N해역의 입경별 오염물질의 농도분포를 나타낸 것임.
- 입경분석 결과, N해역 해양퇴적물은 모래질(Sand)이 22.5%, 미사질(Silt)이 12.67%, 점토질(Clay)이 64.83%로 대부분 점토질로 구성되어 있음.

[표 III-마-3] N해역 입경별 부영양화물질 농도분포

구분	입경분포 (%)	COD (mg/g)	AVS (mg/g)	IL (%)	TOC (%)	TN (%)	WC (%)
>125 $\mu$ m	5.72	25.6	-	10.4	2.33	0.114	-
>63 $\mu$ m	16.78	41.3	-	12.2	2.36	0.147	-
>32 $\mu$ m	12.67	36.0	-	11.8	2.33	0.177	-
<32 $\mu$ m	64.83	39.8	-	16.2	3.14	0.287	-
Bulk	100.0	39.0	4.96	14.9	2.83	0.238	51.2

[표 III-마-4] N해역 입경별 유해화학물질 농도분포

구분	입경분포 (%)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Hg (mg/kg)
>125 $\mu$ m	5.72	68.8	32.3	54.1	318	8.8	1.21	112	-
>63 $\mu$ m	16.78	51.3	23.2	83.4	372	9.7	2.05	76.8	-
>32 $\mu$ m	12.67	61.8	28.3	82.0	374	14.7	1.72	67.0	-
<32 $\mu$ m	64.83	79.6	33.6	108	502	13.2	1.18	84.0	-
Bulk	100.0	73.0	28.4	109	420	12.8	1.40	79.5	-
기준1		80	23	24	200	9.0	0.68	50	0.15
기준2		370	52	108	410	41.6	4.21	220	1.0

(라) 공정 상세설계시 고려사항 및 주안점

① 고려사항

- 경제적으로 오염퇴적물을 입자크기별로 재활용이 가능한 단순 입자분리 기반의 처리공정 적용
- 다양한 복합오염물질의 처리가 가능한 산화제, 용출제 등 화학적 처리가 가능한 세척기반 기술공정 적용
- 세척공정으로 처리가 어려운 영역의 해양퇴적물은 경제성 및 자원활용성을 고려한 고형화/안정화 공정과의 연계처리가 가능하도록 미세입자 처리기술 적용
- 공정으로부터 발생하는 폐수, 즉 복합오염폐수를 관련법에 적정하게 처리하는 공정시스템 개발

② 공정 상세설계시 주안점

- 오염물질의 농도가 집중된 미세퇴적물의 처리가 가능하도록 고도세척처리 공정 설계
- 다단 하이드로싸이클론의 적용으로 분리입경을 0.032mm까지 가능하도록 설계
- 해양오염퇴적물의 처리 및 정화시 발생하는 미세퇴적물을 고형화/안정화 연계처리로 유용 자원으로 재활용할 수 있도록 공정설계
- 단위장치를 모듈화하여 해양퇴적물이 수거되는 인근 해역내에서 처리가 가능하도록 설계



- 전기, 용수 등 유틸리티는 정화설비내에서 공급이 가능하도록 설계
- 용수로 사용되는 해수는 오염퇴적물을 정화처리한 후 해양에 최종방류될 수 있도록 적절한 수처리 프로세스를 설계

**(마) 공정 상세설계 절차**

- 일반적인 상세설계 수행시 절차는 사전조사, 단위공정 선정, 적용성 실험, 공정 상세설계 순으로 진행된다.
- 각 공정설계 단계별 상세 내용은 그림 III-마-1와 같음.

구분	공정설계 절차	상세설계 내용
1단계	사전조사	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 예비조사 (기존자료 검토, 현장 자료수집 등)</li> <li>• 추가 보완조사 (오염변화양상 조사, 오염량 결정 등)</li> </ul>
2단계	단위공정 선정	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설계인자 도출 (단위 처리기술 검토, 공법 선정기준 도출)</li> <li>• 대안평가 (평가 인자 도출, 개별기술 평가)</li> <li>• 효율, 적용 타당성 분석 (현장특성 고려, 오염현황 고려)</li> <li>• 최적 단위공정 선정</li> </ul>
3단계	적용성 실험	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기초조사 (기존자료 검토, 현장자료 수집)</li> <li>• 반응기 실험 (최소 설계인자 도출, 회분식/연속식 실험)</li> <li>• 기술적 타당성 분석 (적용성 분석)</li> <li>• 현장실험 (최적 설계인자 도출, 현장적용성 실험)</li> </ul>
4단계	공정설계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현장처리기술 공정설계 (처리설비 상세계획, 시설물 배치계획)</li> <li>• 공정관리 계획 (공정계획 및 운영계획, 유지관리 계획)</li> </ul>

[그림 III-마-1] 단계별 공정설계 절차

**(2) 입자분리 및 세척기반 현장처리기술 공정 상세설계**

**(가) 공정 상세설계 기본조건**

- 대상해역은 N해역으로 하되, 기 발주된 해양오염퇴적물 정화사업을 토대로 정화사업을 추진하기 위해서는 많은 예산이 소요되는 바, 발주기관의 예산확보, 당해 발주건수 등을 고려하여 연차사업으로 사업추진이 예상되어 공정 상세설계에 필요한 정화설비의 처리용량을 30m<sup>3</sup>/hr로 설정함.
- 모든 처리설비는 해상의 Barge선 상에 설치하여 정화처리됨.
- 3차년도 목표인 부영양화물질 등 유기물을 중점 처리대상으로 설계
- 본 정화처리 설비로 유입되는 오염퇴적물은 오염퇴적물 수거업체가 오염퇴적물을 준설하여 대형폐기물, 오탁물질 등 협잡물 등을 10mm 선별장치로 전처리 한 후 선별된 10mm 이하의 오염퇴적물을 처리대상으로 설정.
- 처리대상 오염퇴적물은 0.125mm이하의 모든 퇴적물을 대상으로 하되, 오염물질 및 오염농도를 고려하여 분리입경을 결정함.
- 정화 및 처리후 발생하는 0.032mm이하 미세퇴적물은 고형화/안정화 처리공정과 연계하여 유용자원으로 재활용될 수 있도록 설계
- 각 단위장치는 차년도 모듈화를 고려하여 가급적 콤팩트하게 장치설계
- 최종 처리수는 해양방류될 수 있도록 해양배출기준에 적합하게 세척폐수 처리 후 처분

(나) 해양오염퇴적물 정화설비 주요 공정구성

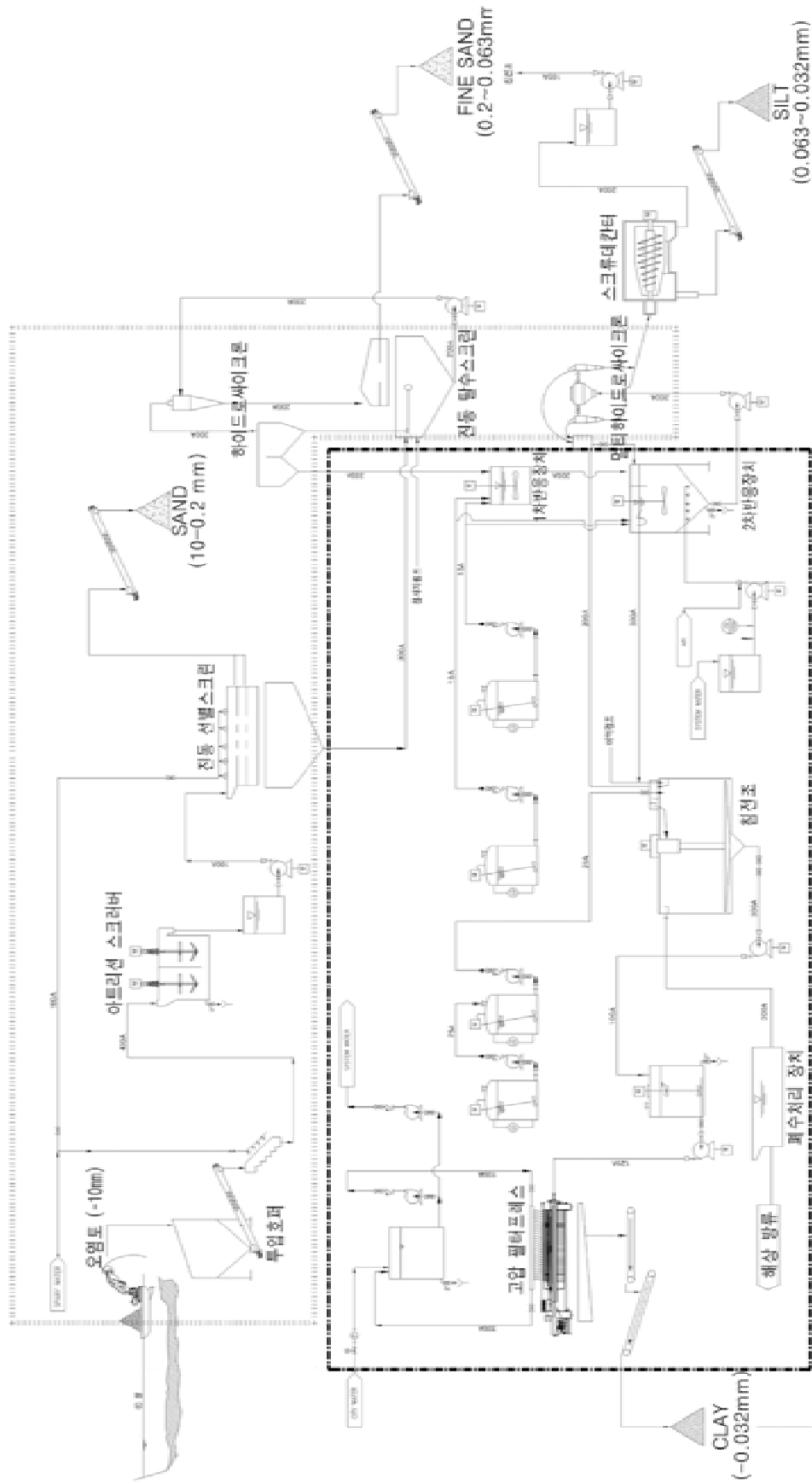
공정의 구성	공정의 내용	단위장치
1. 전처리/공급 공정	해양퇴적물의 세척공정 공급 전 협잡물의 분리 및 과세 퇴적물을 세척공정으로 정량적으로 투입하기 위한 공정	투입호퍼 아트리션스크리버
2. 입자분리공정	세척공정으로 투입하기 위한 유효입경의 분리 세척 전 / 후의 토양입자와 세척수를 분리하기 위한 공정	진동선별스크린 하이드로사이클론 진동 탈수스크린 다단 하이드로사이클론
3. 세척공정	오염물질의 정화를 위한 물리적 탈착 및 화학적 용출 공정 정화효율 증대를 위한 고도처리 공정	1차 반응탱크 2차 반응탱크 마이크로 버블 발생장치 약품저장/공급장치
4. 폐수처리 공정	세척 간 발생하는 미세입자와 탈착/용출된 오염물질의 정화 공정 정화된 세척폐수는 해양방류될 수 있도록 수처리 프로세스를 거쳐 최종 해양방류	응집침전 세척폐수 처리장치 스크류데칸터 필터프레스
5. 기타공정	단위장치간 퇴적물 이송공정 최종 처리된 미세퇴적물 고형화/안정화 처리공정 세척폐수 처리공정 유틸리티 공급공정	스크류컨베이어/벨트컨베이어 활성탄 흡착탑 에어컴프레서/발전기

[그림 III-마-2] 해양오염퇴적물 정화설비 주요 공정 구성

(다) 해양오염퇴적물 정화처리설비 상세설계

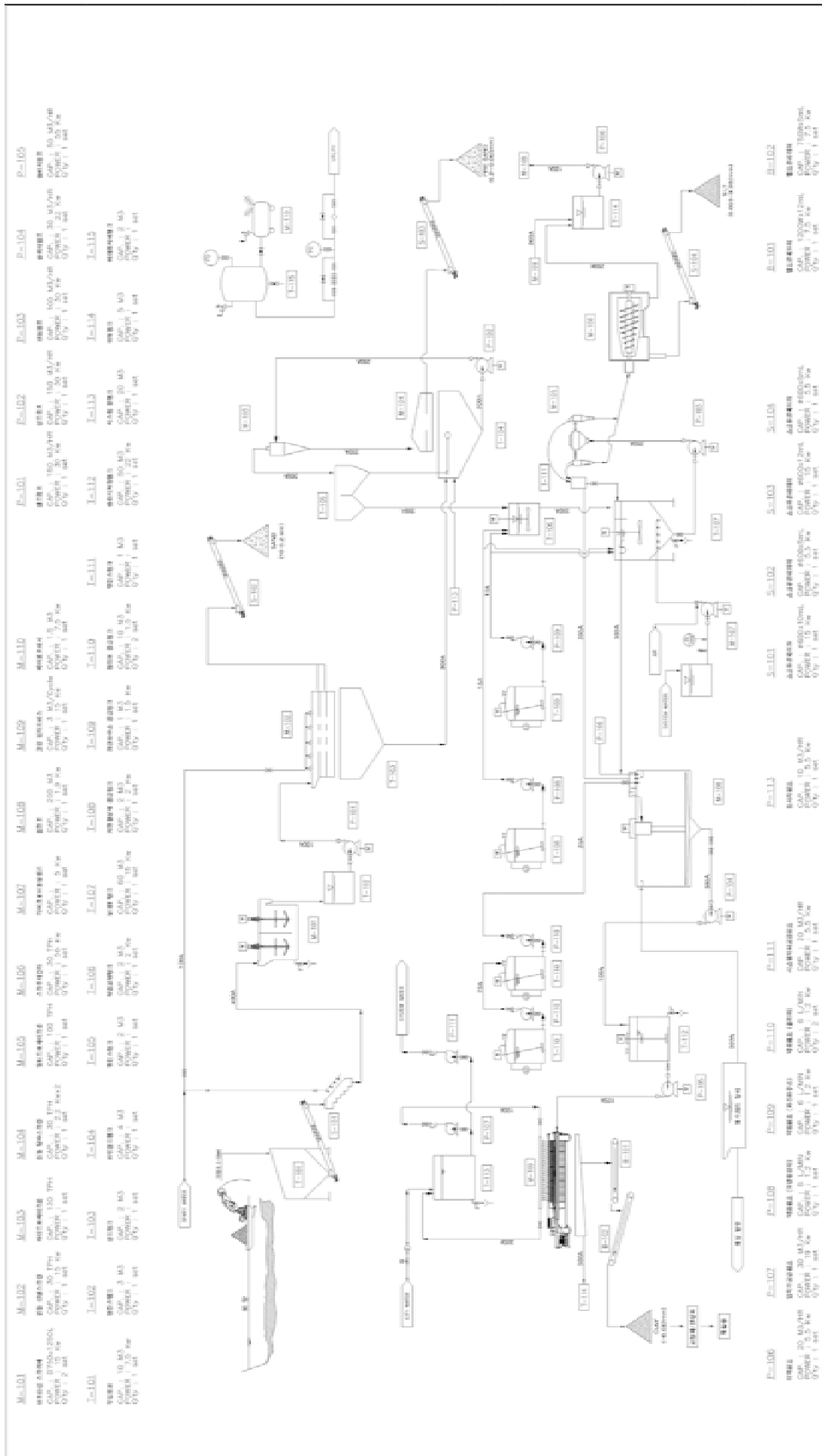
① 현장처리기술 공정 상세설계

# 입자분리기반 처리과정



# 세척처리기반 처리과정

[그림 Ⅲ-마-3] 입자분리 및 세척기반 통합 현장처리기술 상세공정 흐름도



[그림 Ⅲ-마-3] 입자분리 및 세척기반 통합 현장처리기술 상세공정 흐름도

## ② 주요 단위장치 상세사양

### 1-1 투입호퍼 (T-101)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 투입토사 투입호퍼 용량 : 10m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- 투입장비 : E/X</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : 2,500W x 4,000L x 4,500H</li> <li>- Hopper : Plate 9T 이상 (SS400)</li> <li>- Support : H - 200 x 200 이상 (SS400)</li> <li>- 보강재 : Angle 65 x 65 x 6t</li> <li>- Vibrator Motor : 0.4kw x 2set - 내압 방폭형 (hopper 양측면에 부착) 기동방법은 Timer 부착 및 수동 조작 가능케 스위치 부착</li> <li>- 재질 : SS400</li> <li>- 장비투입부분 Plate 6T로 흠막이 설치 (Hopper 部)</li> <li>- 상부에서 오염토양 투입시 호퍼에 진동이 발생하지 않도록 견고한 구조</li> </ul>

### 1-2 투입 Screw Conveyor (S-101)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : Φ600 x 10,000mmL</li> <li>- Slop : 20°</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Motor : 15kw x 440V x 60Hz x 4P (Inverter Motor) - 고효율, IP54 F EG3</li> <li>- Reducer : Cyclo type (1/130)</li> <li>- Head Bearing : SN 216</li> <li>- Tail Bearing : SN 216</li> <li>- Main Shaft : Pipe 80A x SCH 80 이상</li> <li>- Screw : 200 Pitch, Plate 9T</li> </ul>

1-3 아트리션 스크러버 (M-101)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉠ 세척 Chute                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : 500W x 2,100mmL x 2,800mmH</li> <li>- Slop : 45°</li> <li>- Type : Stair type</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> </li> <li>㉡ 아트리션 스크러버                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : Φ750mm x 1,250mmH</li> <li>- Motor : 15kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 2set</li> </ul> </li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉠ 세척 Chute                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plate 9t + SQ Bar 40 + Inside 내마모 Rubber 10t Coating</li> <li>- Spary nozzle : SGP 15A x 8ea, SGP 25A x 3ea + Ball valve Nozzle은 SGP Pipe의 끝단을 장방형(폭 약 5mm)로 길게 찌그러서 물이 부채꼴 형상으로 분사되도록 제작 설치</li> <li>- Main Pipe와 연결부분에 Butterfly Valve 설치 및 Flexible 설치</li> <li>- Spary로 물튀김이 많음으로 커버 설치</li> <li>- Chute 측면을 이용하여 투입콘베이어에 올라가는 Stair 구성</li> <li>- Chute를 계단형상으로 하여 오염토양이 물과 같이 내려오면서 세척이 되도록 계단형상으로 제작</li> </ul> </li> <li>㉡ 아트리션 스크러버                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Casing : Plate 9t</li> <li>- Impeller : 내마모 Hi-Cr강</li> <li>- Casing Liner : 내마모 Rubber</li> <li>- Seal : Mechanical seal type</li> <li>- 구동장치 : V-Belt type</li> <li>- 안전 Cover 부착</li> <li>- Drain Vale : 25A</li> </ul> </li> </ul>

1-4 밸런스 탱크 (T-102, P-101)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tank</li> <li>- 샌드 Pump</li> <li>- Motor : 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉠ Tank                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : Φ1,300 x 2,400H (3m<sup>3</sup>)</li> <li>- Body&amp;Bottom:PlateSS400 6t</li> <li>- 보강재 : Angle 65 x 65 x 6t</li> <li>- Drain : 25A, Ball Valve 1set</li> <li>- Over Flow : 50A</li> <li>- Electrode type Level Switch - 1set</li> <li>Conn' size &amp; Rating : RF 2" (PVC)</li> <li>Temperature Limit : 0 ~ 60℃</li> <li>Pressure Limit : 5 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>Body Mat'l : ABS</li> <li>Electrode Pole Mat'l : SUS 304 With PE covering</li> </ul> </li> <li>㉡ 샌드 펌프                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량 : 0m<sup>3</sup>/Hr + Water 34m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- 입, 출구 Size : Section 4", Dischrge 3"</li> <li>- Motor : 30kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> </li> </ul>

1-5 진동선별스크린 (M-102, T-103)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉑ Vib. Screen                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : 1,200W x 4,000mmL x 1,400mmH</li> <li>- Slop : 5°</li> <li>- Deck : 2 deck</li> <li>- Screen Mesh : Polyurethan Modular type</li> <li>  Openning : 1st □1.5 x 1.5mm</li> <li>  Openning : 1st □0.3 x 12mm</li> <li>- Motor : 4kw x 440V x 60Hz x 4P - 2set, 고효율, IP55 F EG3 (VIB. Motor)</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> </li> <li>㉒ Tank                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량 : 0m<sup>3</sup>/Hr + Water 34m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> </li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉑ Vib. Screen                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 진폭:8mm이상</li> <li>- 스크린이동속도:7~10m/min</li> <li>- Spary Nozzle : Flat(FP) type OripisΦ6 x 3kg/cm<sup>2</sup> x 40° -10ea</li> <li>- Vibrator : Motor Type - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 진동체로 사용되는 자재는 POSCO에서 출고되는 원자재를 사용, Millsheet 제출</li> <li>- 제작시 용접부분을 최소화 하고 Bolting 구조로 제작</li> <li>- Elego Spring 사용</li> <li>- Screen Mesh는 Modular type으로 Nockin Bar, Profile로 조립되는 구조로 하며, Side 고정부위의 Plate도 P-U망을 채용하여 탈수효과를 극대화 하여야 한다.</li> </ul> </li> <li>㉒ Tank                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plate 6t + H-beam 200 이상으로 제작</li> <li>- Manhole : 1set</li> <li>- Drain Valve : 200A Butterfly Valve</li> <li>- Over flow Nozzle : 200A</li> <li>- Walk way : 3면 x 600W - Grating Type</li> <li>- Handrail : Top 32A SGP Pipe + Mid. 25A SGP Pipe + Toe rail FB 100 x 6t + Post 32A SGP Pipe</li> <li>- Screen 배출 Chute는 9T SS400 Plate로 제작 후 내부에 S45C 12T Liner 부착</li> </ul> </li> </ul>

1-6 Sand Screw Conveyor (S-102)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : Φ600 x 5,000mmL</li> <li>- Slop : 20°</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Motor : 5.5kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP54 F EG3</li> <li>- Reducer : Cyclo type (1/130)</li> <li>- Head Bearing : SN 216</li> <li>- Tail Bearing : SN 216</li> <li>- Main Shaft : Pipe 80A x SCH 80 이상</li> <li>- Screw : 200 Pitch, Plate 9T</li> </ul>

1-7 진동탈수 스크린 (M-103, 104, T-104, 105, P-102)

<b>Specification</b>	<p>① Dewatering Screen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : 900W x 1,800mmL x 1,400mmH</li> <li>- Slop : -5°</li> <li>- Deck : 1 deck</li> <li>- Screen Mesh : Polyurethan Modular type Opening : 1st □0.3 x 12mm</li> <li>- Motor : 2.2kw x 440V x 60Hz x 4P - 2set, 고효율, IP55 F EG3 (VIB. Motor)</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> <p>② Sand Pump</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량 : 0m<sup>3</sup>/Hr + Water 34m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- 입, 출구 Size : Section 4", Dischrge 3"</li> <li>- Motor : 30kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> <p>③ Cyclone</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량(Water 포함) : 100m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- Cyclone 구경 : Φ 530</li> <li>- 입, 출구 Size: Section 4", Undersize Dischrge Φ90~100, Oversize Dischrge 5"</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> <p>④ Tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량 : 0m<sup>3</sup>/Hr + Water 34m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> <p>⑤ 밸런스 탱크</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량 : 0m<sup>3</sup>/Hr + Water 34m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<p>① Dewatering Screen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 진폭: 8mm 이상</li> <li>- 스크린이동속도: 7~10m/min</li> <li>- Spary Nozzle : Flat(FP) type Oripis Φ6 x 3kg/cm<sup>2</sup> x 40° -3ea</li> <li>- Vibrator : Motor Type - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 진동체로 사용되는 자재는 POSCO에서 출고되는 원자재를 사용, Millsheet 제출</li> <li>- 제작시 용접부분을 최소화 하고 Bolting 구조로 제작</li> <li>- Air Spring 사용</li> <li>- Screen Mesh는 Modular type으로 Nockin Bar, Profile로 조립되는 구조로 하며, Side 고정부위의 Plate도 P-U망을 채용하여 탈수효과를 극대화</li> </ul> <p>② Sand Pump</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Impeller : 내마모 Rubber</li> <li>- Casing Liner : 내마모 Rubber</li> <li>- Seal : Mechanical seal type</li> <li>- 구동장치 : V-Belt type</li> <li>- Pump 안전 Cover 부착</li> <li>- Pump 토출部는 Section Hose를 이용하여 Cyclo</li> </ul> <p>③ Cyclone</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inside 10T 내마모 Rubber coating</li> <li>- 각 부분별 조립식(BoltingType)으로하여 부품별 교체가 가능한 구조로 제작. 특히 Nozzle은 교체하는데 최단시간이 걸리도록 조치</li> <li>- Pump 토출部와는 Section Hose를 이용하여 Cyclone으로 연결</li> </ul>



<b>상세사양</b>	<p>㉔ Tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plate 6t + H-beam 200 이상으로 제작</li> <li>- Manhole : 1set</li> <li>- Drain Valve : 200A Butterfly Valve</li> <li>- Over flow Nozzle : 200A</li> <li>- Tank와 Pump 구간에는 중간에 Flexible 구조</li> <li>- Tank --&gt; Pump 구간 Pipe 내부는 내마모 Rubber Lining 5t Coating</li> <li>- Walk way : 3면 x 600W - Grating Type</li> <li>- Handrail : Top 32A SGP Pipe + Mid. 25A SGP Pipe + Toe rail FB 100 x 6t + Post 32A SGP Pipe</li> </ul> <p>㉕ 밸런스 탱크</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plate 6t + H-beam 200 이상으로 제작</li> <li>- Manhole : 1set</li> <li>- Floating Valve : 200A</li> <li>- Over flow Nozzle :300A</li> <li>- Walk way : 3면 x 600W - Grating Type</li> <li>- Handrail : Top 32A SGP Pipe + Mid. 25A SGP Pipe + Toe rail FB 100 x 6t + Post 32A SGP Pipe</li> </ul>
-------------	---

1-8 Fine Sand Screw Conveyor (S-103)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : <math>\Phi</math>600 x 12,000mmL</li> <li>- Slop : 10°</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Motor : 15kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP54 F EG3</li> <li>- Reducer : Cyclo type (1/130)</li> <li>- Head Bearing : SN 216</li> <li>- Tail Bearing : SN 216</li> <li>- Main Shaft : Pipe 80A x SCH 80 이상</li> <li>- Screw : 200 Pitch, Plate 9T</li> </ul>

1-9 약품교반 탱크 (T-106)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tank</li> <li>- 교반기</li> <li>- Motor : 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<p>㉔ Tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : <math>\Phi</math>1,000 x 2,400H (3m<sup>3</sup>)</li> <li>- Body&amp;Bottom:PlateSS400 6t</li> <li>- 보강재 : Angle 65 x 65 x 6t</li> <li>- Drain : 25A, Ball Valve 1set</li> <li>- Over Flow : 50A</li> <li>- Electrode type Level Switch - 1set</li> <li>Conn' size &amp; Rating : RF 2" (PVC)</li> <li>Temperature Limit : 0 ~ 60℃</li> <li>Pressure Limit : 5 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>Body Mat'l : ABS</li> <li>Electrode Pole Mat'l : SUS 304 With PE covering</li> </ul> <p>㉕ 교반기</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염도양 투입량 : 0m<sup>3</sup>/Hr + Water 34m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- Motor : 7.5kw x 440V x 60Hz x 4P x 1/20 - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>

1-10 Mixer 탱크(M-105, T-107, 111, P-103)

<b>Specification</b>	<p>① Mixer Tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : <math>\Phi 4,000\text{mmL} \times 5,000\text{mmH}</math></li> <li>- Body&amp;Bottom:PlateSS400 6t</li> <li>- 보강재 : Angle 65 x 65 x 6t</li> <li>- Drain : 25A, Ball Valve 1set</li> <li>- Over Flow : 50A</li> <li>- Motor : 15kw x 440V x 60Hz x 4P x 1/50 - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- Electrode type Level Switch - 1set</li> <li>Conn' size &amp; Rating : RF 2" (PVC)</li> <li>Temperature Limit : 0 ~ 60℃</li> <li>Pressure Limit : 5 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>Body Mat'l : ABS</li> <li>Electrode Pole Mat'l : SUS 304 With PE covering</li> </ul> <p>- 제작 수량 : 1set</p> <p>② Sand Pump</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량 : 0m<sup>3</sup>/Hr + Water 34m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- 입, 출구 Size : Section 4", Dischrge 3"</li> <li>- Motor : 30kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> </ul> <p>- 제작 수량 : 1set</p> <p>③ Cyclone</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량(Water 포함) : 100m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- Cyclone 구경 : <math>\Phi 150</math></li> <li>- 입,출구Size:Section2",UndersizeDischrge<math>\Phi 10\sim 20</math>,OversizeDischrge2"</li> </ul> <p>- 제작 수량 : 5set</p> <p>④ 밸런스 탱크</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량 : 0m<sup>3</sup>/Hr + Water 34m<sup>3</sup>/Hr</li> </ul> <p>- 제작 수량 : 1set</p>
<b>상세사양</b>	<p>① Mixer Tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : <math>\Phi 4,000\text{mmL} \times 5,000\text{mmH}</math></li> <li>- Body&amp;Bottom:PlateSS400 6t</li> <li>- 보강재 : Angle 65 x 65 x 6t</li> <li>- Drain : 25A, Ball Valve 1set</li> <li>- Over Flow : 50A</li> <li>- Motor : 15kw x 440V x 60Hz x 4P x 1/50 - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- Electrode type Level Switch - 1set</li> <li>Conn' size &amp; Rating : RF 2" (PVC)</li> <li>Temperature Limit : 0 ~ 60℃</li> <li>Pressure Limit : 5 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>Body Mat'l : ABS</li> <li>Electrode Pole Mat'l : SUS 304 With PE covering</li> </ul> <p>- 제작 수량 : 1set</p> <p>② Sand Pump</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Impeller : 내마모 Rubber</li> <li>- Casing Liner : 내마모 Rubber</li> <li>- Seal : Mechanical seal type</li> <li>- 구동장치 : V-Belt type</li> <li>- Pump 안전 Cover 부착</li> <li>- Pump 토출部는 Section Hose를 이용하여 Cyclone으로 연결</li> </ul> <p>③ Cyclone</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inside 10T 내마모 Rubber coating</li> <li>- 각부분별조립식(BoltingType)으로하여 부품별 교체가 가능한 구조로 제작</li> <li>특히Nozzle은 교체하는데 최단시간이 걸리도록 하여야 한다.</li> </ul>

<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pump 토출部와는 Section Hose를 이용하여 Cyclone으로 연결되도록 한다.</li> <li>㉔ 밸런스 탱크</li> <li>- Plate 6t + H-beam 200 이상으로 제작</li> <li>- Manhole : 1set</li> <li>- Drain Valve : 200A Butterfly Valve</li> <li>- Over flow Nozzle : 200A</li> <li>- Tank와 Pump 구간에는 중간에 Flexible 구조</li> <li>- Tank --&gt; Pump 구간 Pipe 내부는 내마모 Rubber Lining 5t Coating</li> <li>- Walk way : 3면 x 600W - Grating Type</li> <li>- Handrail : Top 32A SGP Pipe + Mid. 25A SGP Pipe + Toe rail FB 100 x 6t + Post 32A SGP Pipe</li> </ul>
-------------	--

1-11 Screw Decanter (M-106)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양투입량 : -0.075mm 1.25m<sup>3</sup>/Hr, Water 14m<sup>3</sup>/Hr (Nor. 20m<sup>3</sup>/Hr)</li> <li>- Size : 1,800W x 4,500mmL x 1,200mmH</li> <li>- 선액부 재질 : SUS 304</li> <li>- 운전방식 : 연속식</li> <li>- Main Motor : 45kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3 Inverter Motor</li> <li>- Screw Conveyor Motor : 11kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- RPM : max. 2,800 rpm</li> <li>- 운전방식 : Inverter 구동</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉔ Body <ul style="list-style-type: none"> <li>- 구동소음 (Noise) : max. 80dB 이내</li> <li>- 응집제 : 사용 않함</li> <li>- Main 구동방식 : Flexible joint</li> <li>- Screw Conveyor 구동방식 : V-belt</li> <li>- 원심력 : 2,100G 이상</li> </ul> </li> <li>㉕ Support <ul style="list-style-type: none"> <li>- H-beam 200 이상</li> <li>- 본체의 가진력이 2,000G 이상으로 진동이 발생하지 않도록 함</li> </ul> </li> </ul>

1-12 Silt Screw Conveyor (S-104)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : Φ600 x 5,000mmL</li> <li>- Slop : 20°</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Motor : 5.5kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP54 F EG3</li> <li>- Reducer : Cyclo type (1/130)</li> <li>- Head Bearing : SN 216</li> <li>- Tail Bearing : SN 216</li> <li>- Main Shaft : Pipe 80A x SCH 80 이상</li> <li>- Screw : 200 Pitch, Plate 9T</li> </ul>

1-13 침전조 (M-108, P-104)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양투입량 : -0.075mm 6.25m<sup>3</sup>/Hr, Water 48m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- Size : 2,500W x 9,500mmL x 5,300mmH</li> <li>- 침사지 하부 인발펌프 - 1set</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉠ Tank               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Casing : SS400 Plate 6t</li> <li>- Bottom : SS400 Plate 9t</li> <li>- Support : H-200 x 200 x 8/12t</li> <li>- Plate 보강재 : ㄷ-100 x 70 x 5/7.5t</li> <li>- Plate 용접시 양측 맞대기로 하여 용접부에서 누수가 일어나지 않도록 조치</li> </ul> </li> <li>㉡ 상부 Frame (Walk way)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : 2,000W x 7,600L</li> <li>- H-Beam 300 x 150 x 6.5/9</li> <li>- Channel ㄷ-100 x 50 x 5/7.5</li> </ul> </li> <li>㉢ 화학반응조(Flocculation Tank)               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : 900W x 2,400L x 900H</li> <li>- Met'1 : SS400</li> <li>- Inlet Nozzle 150A F.F Flange</li> <li>- 설치 위치 : 상부 Frame (Walk way)</li> </ul> </li> <li>㉣ Scraper               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Speed : 2 ~ 25 m/min</li> <li>- Cyclo Reducer : 1.5kw x 4P x 1/555 (output 3.15rpm)</li> <li>- Motor : 1.5kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- Driving : Flange Coupling</li> <li>- Shaft : SGP SCH 40</li> <li>- Scraper : S45C Plate 6T</li> </ul> </li> <li>㉤ 침전조 하부 인발펌프               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 투입량 : Water 15m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- Impeller : 내마모 Rubber</li> <li>- Casing Liner : 내마모 Rubber</li> <li>- Seal : Mechanical seal type</li> <li>- Motor : 5.5kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 구동장치 : V-Belt type</li> <li>- Pump 안전 Cover 부착</li> <li>- Pump 토출부는 Section Hose를 이용하여 Cyclone으로 연결</li> <li>- 입, 출구 Size : Section 3", Discharge 2"</li> <li>- Pump 입출구 Flexible 및 Butterfly Valve 부착 및 침사지로 Recycle배관 설치</li> <li>- 모든 배관은 Steel 배관을 기준으로 하며, 타 설비에 연결되는 부분 (Screw Decanter, Dewater Screen)에는 약 1m구간은 Section Hose로 연결</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> </li> </ul>

1-14 슬러지저장탱크 (T-112, P-105)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양투입량 : -0.05mm 5m<sup>3</sup>/Hr, Water 48m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- Size : Φ3,500mm x 5,000mmH</li> <li>- 농축조 하부 인발펌프 - 1set</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉠ Tank                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Casing : SS400 Plate 6t</li> <li>- Cone : SS400 Plate 6t</li> <li>- CenterWheel:SUS3046t Φ 1,000 x 1,400mmH</li> <li>- Support : H-200 x 200 x 8/12t</li> <li>- Plate 보강재 : ㄷ-100 x 70 x 5/7.5t</li> </ul> </li> <li>㉡ 상부 Frame (Walk way)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : 950W x 5,100L</li> <li>- Channel ㄷ-150 x 75 x 9/12.5</li> <li>- 제작시 중간부분에 처짐현상이 발생할수 있으므로 중간부분이 위로 약50mm 올라가도록 제작</li> </ul> </li> <li>㉢ 농축조 하부 인발펌프                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양 인발량 : -0.05mm 5m<sup>3</sup>/Hr, Water 48m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- Impeller : 하이크롬강 특수 열처리</li> <li>- Casing : 하이크롬강 특수 열처리</li> <li>- Seal : Mechanical seal type</li> <li>- Motor : 55kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 구동장치 : V-Belt type</li> <li>- Pump 안전 Cover 부착</li> <li>- Pump 토출部는 Filter Press로 연결</li> <li>- 입, 출구 Size : Section 4", Dischrge 3"</li> <li>- Pump입출구Flexible및ButterflyValve부착</li> <li>- 필터프레스로 이송되는 배관은 압력이 Max. 14바로 각각의 배관 자재는 16바로 사용</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul> </li> </ul>

1-15 FILTER PRESS (M-109, T-113, P-107)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염토양투입량 : -0.05mm 5m<sup>3</sup>/Hr, Water 48m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- Size : 2,590W x 10,900L x 1,850H</li> <li>- Filter Plate Q'ty : 25 C + 25M</li> <li>- Filter Area : 200 m<sup>2</sup></li> <li>- Filter Plate size : 1,500mmL x 1,500mmH x 98mmT 이상</li> <li>- Filter Volume : 106 Liter/Sh</li> <li>- Cake 함수율 30% 이내</li> <li>- 1 Cycle : 30분 이내</li> <li>- Motor : 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉠ Filter Press                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plate : 1,500mmL x 1,500mmH x 98mmT</li> <li>- Filter Volume : 106 Liter/SH</li> <li>- Cake 두께 : 50mm 이상</li> <li>- Plate Type : Chamber + Menbrain</li> </ul> </li> </ul>

<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plate Q'ty : 50</li> <li>- Pump 입출구 Flexible 및 Butterfly Valve 부착 및 침사지로 Recycle배관 설치</li> <li>- 모든 배관은 Steel 배관을 기준으로 하며, 타 설비에 연결되는 부분 (Screw Decanter, Dewater Screen)에는 약 1m구간은 Section Hose로 연결</li> <li>⑤ Tank <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : <math>\Phi 1,000 \times 2,400H</math> (3m<sup>3</sup>)</li> <li>- Body&amp;Bottom:PlateSS400 6t</li> <li>- 보강재 : Angle 65 x 65 x 6t</li> <li>- Drain : 25A, Ball Valve 1set</li> <li>- Over Flow : 50A</li> <li>- Electrode type Level Switch - 1set</li> <li>Conn' size &amp; Rating : RF 2" (PVC)</li> <li>Temperature Limit : 0 ~ 60℃</li> <li>Pressure Limit : 5 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>Body Mat'l : ABS</li> <li>Electrode Pole Mat'l : SUS 304 With PE covering</li> </ul> </li> <li>⑥ System Water 이송 펌프 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다단 볼류트 펌프 : 7.5Kw x 10Bar x 10m<sup>3</sup>/Hr x 1set</li> <li>- 펌프 입출구에 Butterfly valve, Flexible 설치</li> <li>- 펌프 토출측에 Tank로 Recycle 라인 및 Butterfly valve 설치</li> <li>- 방진 Pad 설치</li> </ul> </li> </ul>
-------------	---

1-16 필터프레스 하부 Conveyor (B-101)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : 1200W x 12,000mmL</li> <li>- Slop : 0°</li> <li>- Type : Stringer (Head Part Walkway)</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Belt : NN120 1,200W x 4P x 3.2/1.6</li> <li>- Motor : 7.5kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- Reducer : Gear Box type (1/30) - Motor 일체형</li> <li>- Head Pully : <math>\Phi 384</math> (15t Rubber Lagging) Rubber Spec. : Hardness Hs55~65, Elongation 350~450%, Tensile strength 160kg/cm<sup>2</sup>이상 Adhesion 10 kg/cm<sup>2</sup> 이상</li> <li>- Head Bearing : SN 212</li> <li>- Tail Pully : <math>\Phi 354</math></li> <li>- Tail Bearing : UCT 310</li> <li>- Take up : Storoke 350mm 이상, TM 30</li> <li>- Snub Pully : <math>\Phi 165</math> (Bearing UCP 206)</li> <li>- Impact Roller : Pitch 300 - 4set</li> <li>- Carrier Roller : Pitch 500mm</li> <li>- Return Roller : Pitch 2,000mm</li> <li>- RS Sprocket : RS #60 x 17NT, 30NT (Flange Type)</li> <li>- HeadCleaner:1set</li> <li>- Tail Cleaner : 1 set ( V-Scraper)</li> <li>- Skirt : Rubbet 10t x 1500mmL (Bolting type)</li> <li>- Walk way : head part (600W x 3000L) - Grating Type</li> <li>- Stair : 45° x 600W x 1,000mmH (C-channel + Grating)</li> <li>- Handrail : Top 32A SGP Pipe + Mid. 25A SGP Pipe + Toe rail FB 100 x 6t + Post 32A SGP Pipe</li> </ul>

1-17 Clay Conveyor (B-102)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : 750W x 5,000mmL</li> <li>- Slop : 17°</li> <li>- Type : Stringer (Head Part Walkway)</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Belt : NN120 750W x 4P x 3.2/1.6</li> <li>- Motor : 7.5kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- Reducer : Gear Box type (1/30) - Motor 일체형</li> <li>- Head Pully : Φ 384 (15t Rubber Lagging)</li> <li>Rubber Spec. : Hardness Hs55~65, Elongation 350~450%, Tensile strength 160kg/cm<sup>2</sup> 이상 Adhesion 10 kg/cm<sup>2</sup> 이상</li> <li>- Head Bearing : SN 212</li> <li>- Tail Pully : Φ 354</li> <li>- Tail Bearing : UCT 310</li> <li>- Take up : Stroke 350mm 이상, TM 30</li> <li>- Snub Pully : Φ 165 (Bearing UCP 206)</li> <li>- Impact Roller : Pitch 300 - 4set</li> <li>- Carrier Roller : Pitch 1000mm</li> <li>- Return Roller : Pitch 2,000mm</li> <li>- RS Sprocket : RS #60 x 17NT, 30NT (Flange Type)</li> <li>- HeadCleaner:1set</li> <li>- Tail Cleaner : 1 set ( V-Scraper)</li> <li>- Skirt : Rubbet 10t x 1500mmL (Bolting type)</li> <li>- Walk way : head part (600W x 3000L) - Grating Type</li> <li>- Stair : 45° x 600W x 1,000mmH (C-channel + Grating)</li> <li>- Handrail : Top 32A SGP Pipe + Mid. 25A SGP Pipe + Toe rail FB 100 x 6t + Post 32A SGP Pipe</li> </ul>

1-18 여액 탱크 (T-114, P-106)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tank</li> <li>- 여액 Pump</li> <li>- Motor : 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<p>㉠ Tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : Φ1,700 x 2,400H (5m<sup>3</sup>)</li> <li>- Body&amp;Bottom:PlateSS400 6t</li> <li>- 보강재 : Angle 65 x 65 x 6t</li> <li>- Drain : 25A, Ball Valve 1set</li> <li>- Over Flow : 50A</li> <li>- Electrode type Level Switch - 1set</li> <li>Conn' size &amp; Rating : RF 2" (PVC)</li> <li>Temperature Limit : 0 ~ 60℃</li> <li>Pressure Limit : 5 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>Body Mat'l : ABS</li> <li>Electrode Pole Mat'l : SUS 304 With PE covering</li> </ul> <p>㉡ 여액 펌프</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오염도양 투입량 : 0m<sup>3</sup>/Hr + Water 34m<sup>3</sup>/Hr</li> <li>- 입, 출구 Size : Section 4", Dischrge 3"</li> <li>- Motor : 5.5kw x 440V x 60Hz x 4P - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>

1-19 계면활성제 공급탱크 (T-108, P-108)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Storage Tank</li> <li>- Motor : 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① Auto Feedeing System                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auto Control</li> <li>- Capacity : 1,000cc/min</li> <li>- Pressure : 5 kgf/cm<sup>2</sup></li> <li>- Water Capacity : 40 L/min</li> <li>- Metering Feeder : 1,020 cc/min x 5 kgf/cm<sup>2</sup></li> <li>- Level gauge 부착</li> <li>- Flow Meter : 60 L/min</li> <li>- Solenoid Valve (Butterfly valve type) : SUS 304</li> <li>- Carryer : SUS 304</li> <li>- Joint : Quck Cupling</li> <li>- Mixer : In Line Mixer</li> </ul> </li> <li>② Storage Tank                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacity : 1m<sup>3</sup></li> <li>- Size : 1,200W x 1,200L x 1,500H</li> <li>- Fitting Flange : In/Out/Drane</li> <li>- Agitator : 0.75 kw x 60rpm</li> <li>- Shaft : 1,500L SUS 304</li> <li>- Impeller : Paddle 3B SUS 304</li> </ul> </li> </ul>

1.20 폴리머 공급탱크 (T-109, P-109)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Storage Tank</li> <li>- Motor : 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① Auto Feedeing System                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auto Control</li> <li>- Capacity : 1,000cc/min</li> <li>- Pressure : 5 kgf/cm<sup>2</sup></li> <li>- Water Capacity : 40 L/min</li> <li>- Metering Feeder : 1,020 cc/min x 5 kgf/cm<sup>2</sup></li> <li>- Level gauge 부착</li> <li>- Flow Meter : 60 L/min</li> <li>- Solenoid Valve (Butterfly valve type) : SUS 304</li> <li>- Carryer : SUS 304</li> <li>- Joint : Quck Cupling</li> <li>- Mixer : In Line Mixer</li> </ul> </li> <li>② Storage Tank                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacity : 1m<sup>3</sup></li> <li>- Size : 1,200W x 1,200L x 1,500H</li> <li>- Fitting Flange : In/Out/Drane</li> <li>- Agitator : 0.75 kw x 60rpm</li> <li>- Shaft : 1,500L SUS 304</li> <li>- Impeller : Paddle 3B SUS 304</li> </ul> </li> </ul>



### 1.21 폴리머 공급탱크 (T-111, P-111)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 폴리머 Auto Feeding</li> <li>- 폴리머 Storage Tank</li> <li>- Motor : 고효율, IP55 F EG3</li> <li>- 제작 수량 : 2set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>㉠ 폴리머 Auto Feeding System               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Auto Control</li> <li>- Capacity : 1,000cc/min</li> <li>- Pressure : 5 kgf/cm<sup>2</sup></li> <li>- Water Capacity : 40 L/min</li> <li>- Metering Feeder : 1,020 cc/min x 5 kgf/cm<sup>2</sup></li> <li>- Level gauge 부착</li> <li>- Flow Meter : 60 L/min</li> <li>- Solenoid Valve (Butterfly valve type) : SUS 304</li> <li>- Carryer : SUS 304</li> <li>- Joint : Quik Cupling</li> <li>- Mixer : In Line Mixer</li> </ul> </li> <li>㉡ 폴리머 Storage Tank               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacity : 10m<sup>3</sup></li> <li>- Size : 2,000W x 2,000L x 2,500H</li> <li>- Fitting Flange : In/Out/Drane</li> <li>- Agitator : 0.75 kw x 60rpm</li> <li>- Shaft : 1,500L SUS 304</li> <li>- Impeller : Paddle 3B SUS 304</li> </ul> </li> </ul>

### 1.22 Air Compressor & Reciver Tank (M-110, T-115)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Air compressor : 7.5Kw x 1,518 L/min</li> <li>- Air reciver tank : 2m<sup>3</sup></li> <li>- 제작 수량 : 1set</li> </ul>
<b>상세사양</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Piston Type</li> <li>- 공냉식</li> <li>- 안전변</li> <li>- Power : 7.5kw - 고효율, IP55 F EG3</li> <li>㉠ Air reciver tank               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 형식 : Cylindrical</li> <li>- 압력 (Pressure) : 9.9 kgf/cm<sup>2</sup></li> <li>- 용량 : 3m<sup>3</sup></li> <li>- Size : Φ 1,460 x 2,385mmH</li> <li>- 기타 주변장치 : 안전변, 압력게이지, 에어 유니트</li> <li>- 한국산업안전공단 검사필 제품</li> </ul> </li> </ul>

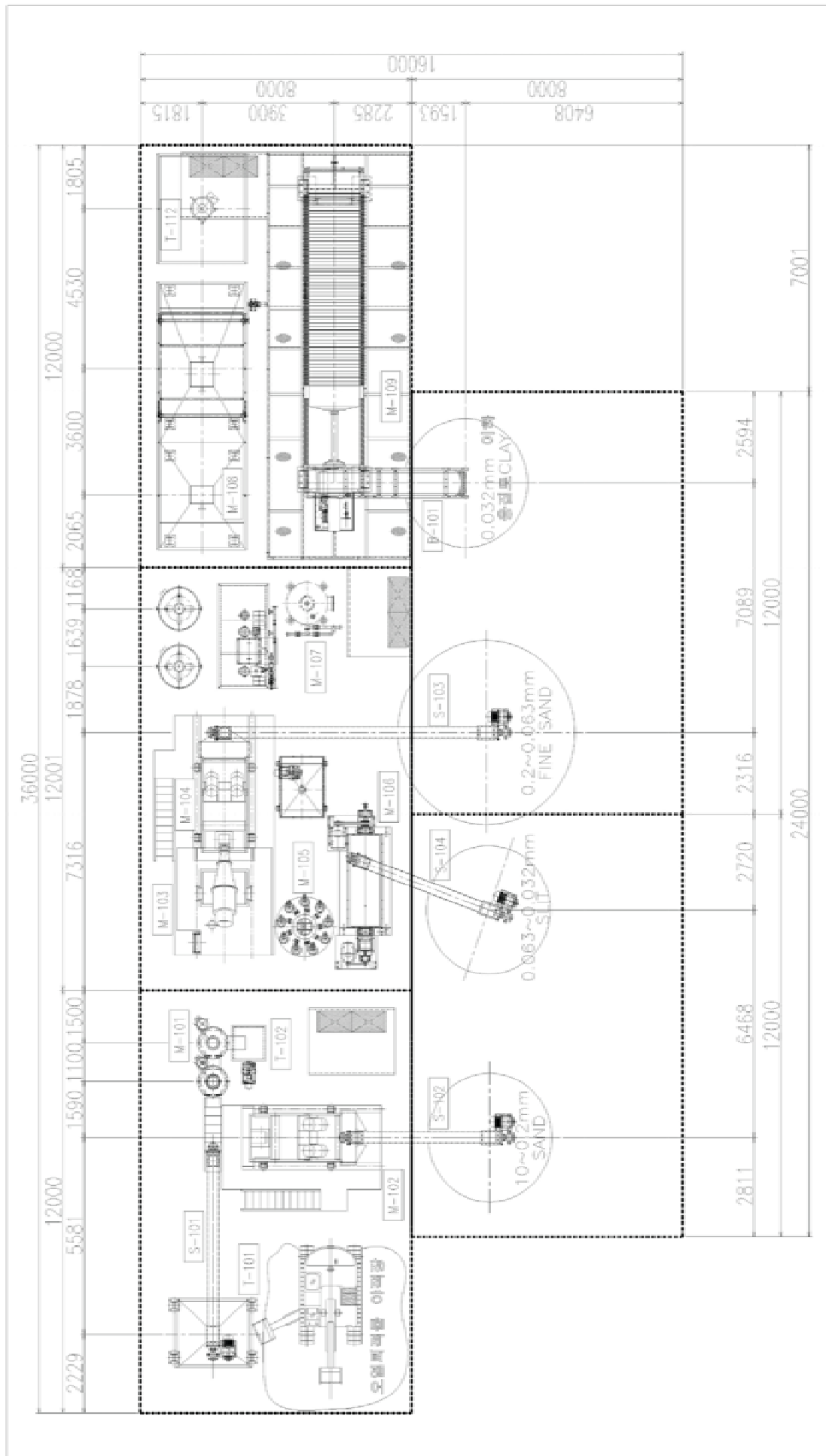
### 1.23 마이크로 버블 발생기 (M-107)

<b>Specification</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Size : W450 x L900 x H1200</li> <li>- 동력 : 7.5Kw</li> <li>- Bubble크기 : 40 - 60마이크로</li> <li>- Bubble토출량 : 8 - 12 Ton/Hr</li> <li>- 흡입구경 : 50A</li> <li>- 토출구경 : 50A</li> </ul>
----------------------	---

---

**(라) 해양오염퇴적물 정화설비 배치계획**

- 정화설비의 처리용량은 30m<sup>3</sup>/h 임.
  - 단위 Barge선의 규격은 가로 8m x 세로 12m의 범용적인 바지선 크기 기준 적용
  - 정화설비 설치 필요면적은 길이 36m x 폭 16m
    - 정화설비 설치면적 : 바지선 (8mW x 12mL) 3대 소요
    - 처리산물 야적면적 : 바지선 (8mW x 12mL) 2대 소요
  - 정화설비 운영에 필요한 용수 및 전기는 바지선상에서 공급가능
  - 차년도 모듈화 공정설계를 통해 부피를 많이 차지하는 필터프레스 공정의 Compact화 추가 검토 필요
-



[그림 Ⅲ-마-4] 해양오염퇴적물 정화설비 배치도 (Lay-out)

## 바. 해양오염퇴적물 정화·복원 관련 법령 개정안 개발

### (1) 해양오염퇴적물 정화·복원 관련 법령 제정을 위한 세부사항 개발

#### (가) 해양오염퇴적물 정화·복원 필요성 및 현황

- 폐쇄성 및 반 폐쇄성 해역으로서 해수교환율이 낮아 육상으로부터 유입되는 각종 오염물질이 해저에 많이 퇴적되어 있는 내만 등에서는 축적된 오염퇴적물로부터 오염물질이 용출되는 등 재순환으로 인하여 환경기초시설의 증설에도 불구하고 해역의 수질오염이 가중되고 있는 실정임. 이에 따라 해수 수질개선 및 해양생태계 회복이 어려운 해역을 대상으로 오염해역의 정화복원을 위한 준설사업을 실시하고 있음.
- 또한 부산해양항만청은 2009년부터 2013년까지 5년간 오니전용선을 이용, 부산 남항 일대 오염해역인 38만<sup>m</sup>에서 26만4,000<sup>m</sup>의 오염물질을 걷어내는 사업을 실시하고 있음. 그동안 남항은 정박 어선과 조선소, 인근 상가 등에서 각종 오폐수가 유입되는 데다 해수 흐름이 원활하지 못해 오염물질이 바닥에 퇴적되는 바람에 해양오염과 악취가 심각한 수준이었음. 이 때문에 고통을 겪던 인근 상인과 수산업 종사자들은 남항의 해저 폐기물 수거와 퇴적물 준설사업의 필요성을 줄기차게 제기해 왔으며, 부산시도 정부 측에 오염퇴적물 준설을 강력하게 요청해 왔음.
- 국토해양부는 2004년부터 해양오염퇴적물 분포현황을 조사하였고, 현재 부산 남항 등의 해역에서 정화·복원사업을 시행 중임. 한편, 특별관리해역의 일부인 인천 연안부두 일원 등 4곳에 대한 대한국토해양부의 2011년도 해양오염퇴적물 분포현황조사(부영양화 관련 3개, 유해화학물질 관련 14개 항목)에 따르면 인천 북항의 수로구역 일부, 광양만 여수산단 및 부산 다대포항 일부지역에서 오염도가 기준을 초과하여 정화·복원사업이 필요한 것으로 평가됨. 이에 따라 국토해양부는 2004년 이후 조사한 해역 중 오염기준을 초과하는 16개 해역에 대해 향후 준설도 처리장 확보, 육상기인 오염원 차단 방안, 주민 의견 등을 종합 검토한 후 정화·복원사업 시행 여부와 시기를 결정하고, 오염퇴적물 정화사업을 통하여 수질 및 생물독성이 개선되고 수질이 향상되어 어획량 증대 및 관광산업 활성화에 기여하도록 할 계획을 밝힌 바 있음.
- 해양오염퇴적물 정화·복원 사업으로 부산 남항의 경우 3등급이었던 바다 저층 수질은 2등급이 되었고, 2등급이었던 표층 수질도 1등급으로 개선됨.
- 부산 용호만 일원은 1962년 매립공사 이후 해수 흐름이 정체된 공유수면에 오랜 세월 쌓인 쓰레기와 퇴적물이 부패하면서 심각한 수질 오염으로 몸살을 앓아왔고, 악취 때문에 극심한 생활 불편을 호소하는 주민 민원도 끊이지 않았음.
- 부산 용호만 오염퇴적물 정화사업 결과 대연천과 용호천 등의 하천 수질이 상당 수준 개선된 것으로 나타남. 부영양화를 유발시켜 수질오염을 초래하는 오염물질인 질소와 인의 경우, 질소는 평균 농도가 2.076-4.897mg/L로 준설 전과 비교해 82-91% 감소했으며, 준설 전 0.997-4.084mg/L로 심각한 수준이었던 인 농도 역시 준설 후 0.17-0.454mg/L로 최고 92% 저감되는 효과를 거둠.
- 그러나 용호항은 질소와 인 농도는 비교적 감소됐으나, 용존 산소량(6.85mg/L→6.7mg/L), 화학적 산소요구량(3.6mg/L→3.2mg/L) 등의 항목에서 별반 개선 효과를 나타내지 못한 채 여전히 최저 등급 기준에 머물러 있는 것으로 조사됨. 육상에서 끊임없이 오염된 생활 하수와 퇴적물이 흘러들면서 준설 이후에도 다시 해저에 오염물이 쌓이는 악순환이 계속되고, 해저에 쌓인 오염물이 축적되는 지형 특성 탓에 용호만 연안은 정화사업 이후에도 수질 개선 효과가 미미하고, 재오염이 진행되고 있는 것으로 드러남.
- 정화복원을 위한 준설사업의 필요성이 강함에도 불구하고 이를 뒷받침하는 법규는 미비한 상태임. 그 결과 준설사업의 개시시점, 범위, 방법, 오염퇴적물의 수거기준·방법, 오염

---

퇴적물 수거업자의 선정, 수거된 준설품질의 처리기준 및 방법 등에 대해 논란이 예상된다.

## (2) 해양오염퇴적물 정화·복원 관련 현행 법령

### (가) 개관

- 해양오염퇴적물은 수질 환경에 많은 영향을 주며, 주로 육지에 인접한 만 또는 석호 등을 중심으로 분포하기 때문에 연안 생태계 및 인간의 생활에 중대한 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고 우리나라는 현행법상 해양오염퇴적물을 규제하는 별도의 법체계를 가지고 있지 않음. 특히 해양환경 관리의 근거를 제공하는 「환경정책기본법」, 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」, 「해양환경관리법」 등에 해양퇴적물의 오염방지 및 관리·처분을 위한 직접적 규정이 없어 이에 대한 법적 근거의 마련이 시급히 요청되고 있음
- 종래의 「해양환경관리법」은 육지에서 처리하기 어려운 폐기물의 해양투기를 법적으로 허용하였으며, 해양오염퇴적물 역시 해양투기의 대상으로 처리함. 그러나 2008년 8월 22일 이후 준설품질의 해양투기가 금지되면서 준설품질의 육상 내 처리가 불가피해짐. 현재 해양투기대상 준설품질이 육상에서 처리될 경우에는 일반적으로 환경부 관할의 「폐기물관리법」을 준수해야 하고, 해상에서 처리될 때에는 해양수산부 관할의 「해양환경관리법」을 준수하여야 함. 「폐기물관리법」 이외에 준설품질의 해양투기와 관련된 법률은 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」, 「토양환경보전법」, 「건설폐기물 재활용 촉진에 관한 법률」, 「자원의 재활용 촉진에 관한 법률」, 「골재채취법」, 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 등이 있음

### (나) 해양환경관리법

- 현행 「해양환경관리법」에서는 해양오염퇴적물에 대해서 단편적·간접적으로 규제·관리하고 있을 뿐임. 오염퇴적물로 인한 해양환경개선조치(제18조)가 대표적임. 이와 더불어 해양환경기준의 설정(제8조), 오염물질의 배출금지(제22조), 해양환경관리업(제70조) 등에서 오염퇴적물 또는 준설토사의 해양투기 및 처리와 관련한 규정을 두고 있음. 특히 오염퇴적물 및 준설토사의 처리와 관련하여 해양배출(제22조), 수거(제18조) 이외의 호안매립, 재활용, 수중고립처분 등에 대한 고려가 없음. 그러나 근본적으로 비오염퇴적물과 오염퇴적물을 별도로 관리하지 않고 있으며, 오염퇴적물과 준설토사의 개념을 명확히 정립하고 있지 않음. 더욱이 오염퇴적물 또는 준설토사의 “운반·처리·처분” 등을 타 법률의 규정을 준용토록 함으로써 오염퇴적물의 체계적인 관리·처분 제도를 두지 못하였다는 한계를 지니고 있음.

#### ① 해양환경기준의 설정

- 「해양환경관리법」 제8조는 해양수산부장관에게 「환경정책기본법」 제11조의 규정에 따른 환경기준을 고려하고 「해양수산발전기본법」 제13조의 규정에 따른 해양환경의 보전을 위한 시책에 필요한 해양환경의 기준을 해역별·용도별로 정하여 고시하여야 한다고 규정하고 있음. 해양환경관리법 제8조에 따른 해양환경기준(해양수산부고시 제2013-186호, 2013.6.28., 일부개정)에는 ‘해저퇴적물’ 항목에서 비소(As) 등 8개 오염물질에 대하여 ‘주의기준(부정적인 생태 영향이 거의 없을 것으로 예측되는 농도)’과 ‘관리기준(부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 농도)’으로 구분하여 오염퇴적물에 관한 기준을 설정하고 있고, ‘해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정(해양수산부고시 제2013-206호, 21013.8.30., 일부개정)’에서 유해화학물질과 부영양화에 관한 기준농도를 설정하고, 이를 토대로 정화지수를 산출하여 정화·복원 범위를 결정하도록 함(동 규정 제8조, 제9조, 별표 2 및 별표3)

---

## ② 해양환경개선조치

- 「해양환경관리법」은 오염퇴적물을 해양환경개선조치(제18조)의 대상으로 규정하고 있음. 해역관리청은 오염물질의 유입 또는 퇴적 등으로 인한 해양오염을 방지하고 해양환경을 개선하기 위하여 필요하다고 인정되는 때에는 해양환경개선조치의 일환으로서 오염물질 유입방지시설의 설치, 오염물질의 수거 및 처리, 오염된 퇴적물의 수거, 그 밖에 해양환경개선과 관련하여 필요한 사업으로서 해양수산부령이 정하는 조치를 취할 수 있도록 하고 있음(동조 제1항). “해양수산부령이 정하는 조치”에는 연안습지정화, 연약지반 보강 등 해양환경복원사업의 실시, 준설토사 등 수거 퇴적물의 사용 등에 관하여 해양수산부 장관이 정하는 조치, 수거된 오염퇴적물의 안전한 처리 및 처분 등이 있음(시행령 제9조 제1항)
- 오염물질 유입방지시설의 설치방법, 오염물질의 수거·처리방법 및 오염된 퇴적물의 수거방법 등에 관하여 필요한 사항을 해양수산부령으로 정하도록 하고(제18조 제5항), 이에 따라 해양수산부령에서는 1. 부유차단막 또는 오탁방지막은 부유물질의 확산을 방지할 수 있도록 하여야 하며, 기상변화 등에 대비할 수 있도록 설치하고, 2. 오염된 퇴적물의 수거 시에는 2차 오염을 감소시키는 방안을 강구하여야 하며, 3. 그 밖에 해양수산부 장관이 정하여 고시하는 방법에 따르도록 하고 있음(시행규칙 제9조 제4항)

## ③ 해양배출 금지 및 예외적인 배출허용기준

- 「해양환경관리법」은 선박으로부터 오염물질을 해양에 배출할 수 없다고 규정하면서(제22조 제1항), 해양수산부령이 정하는 폐기물을 「공유수면 관리 및 매립에 관한 법률」 제28조 및 제35조의 규정에 따라 매립하고자 하는 장소에 배출하고자 하는 경우에는 해양수산부령이 정하는 처리기준 및 방법에 따라 배출하도록 하고 있음(제22조 제1항 나목). 동법에 따르면 수거준설토사는 선박으로부터 공유수면을 매립하려는 장소에 배출할 수 있는 폐기물에 해당됨(시행규칙 제11조 제1항 관련 별표 3). 그리고 동법은 폐기물의 배출허용기준에 관하여 ‘수거준설토사’는 호안시설을 설치하여 해역과 차단하도록 하고 다만, 선박에 의하여 호안의 안쪽에 배출하는 경우에는 배출을 종료할 때까지 선박의 항해구간에 한하여 호안시설 대신에 오탁방지막을 설치할 수 있다고 규정하고 있음. 그리고 상등수를 해양으로 배출하는 경우 부유물질이 흘러 나가지 못하도록 하는 시설 또는 설비를 갖추는 것을 요함(시행규칙 제11조 제1항 및 별표 3)
- 또한 동법 제23조 제1항에서 육상에서 발생한 폐기물의 해양배출금지를 규정하면서, 해양수산부장관에게 해양환경의 보전·관리에 영향을 미치지 아니하는 범위 안에서 육상에서 처리가 곤란한 폐기물에 대하여 배출하게 할 수 있는 권한을 부여하고 있음. 이에 따라 동법 시행규칙 제12조는 해양에 배출할 수 있는 폐기물 및 그 배출해역과 처리방법을 규정하고 있고(별표 6과 별표 7), 준설토질도 이에 포함됨

## ④ 해양환경관리업

- 「해양환경관리법」은 ‘해양환경관리업’을 영위하려는 자는 대통령령이 정하는 바에 따라 해양수산부장관 또는 해양경찰청장에게 등록하도록 함(제70조 제1항). 해양환경관리업에는 폐기물해양배출업, 해양오염방제업, 유창청소업, 폐기물해양수거 및 퇴적오염물수거업이 포함됨. 이 중 오염퇴적물의 수거·준설토와 관련된 ‘퇴적오염물수거업’이란 “퇴적된 오염물질의 준설토·수거에 필요한 선박·장비 및 설비를 갖추고 퇴적된 오염물질을 준설토는 수거하는 사업”을 말함(동조 제1항 제5호)

### (3) 가치 「해양오염퇴적물관리법」 제정의 필요성

#### (가) 현행 법령에 대한 평가

- 해양오염퇴적물의 수거, 처리(자연정화, 현장처리, 표면피복, 재활용, 매립, 고립처분 등) 수요는 증가하고 있으나 현행 법제는 이를 위한 근거 규정을 제대로 갖추고 있지 못해 그 수요에 부응하지 못하고 있음. 즉 현행 법제하에서는 해저퇴적물·해양오염퇴적물, 준설물질 등에 대한 기본 개념조차 정립되어 있지 않으며, 해양오염퇴적물의 수거·처리의 기준 및 방법 등에 대한 법적 근거가 없어, 해양오염퇴적물의 처리 등 적절한 관리가 곤란한 상황임. 또한 기존 「해양환경관리법」을 비롯하여 「폐기물관리법」, 「토양환경보전법」, 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 등 여타의 법률에서는 오염퇴적물의 수거 및 처리 등에 관한 기본적인 방안을 제시하지 못하고 있음. 다만 개별 규정을 통해 오염퇴적물에 대하여 적용될 수 있으나, 여러 법률에 산재되어 있어 적용상 혼란이 있고, 단편적인 규정에 그쳐 유효 적절히 대응하지 못하고 있는 현실임.
- 동법은 해양환경개선조치의 발동근거로 “필요하다고 인정되는 때”를 들고 있는데 막상 구체적인 기준, 발동 시점 등이 규정되어 있지 않음. 한편, 오염물질의 경우에는 수거와 함께 처리까지 언급하고 있는데 오염된 퇴적물의 경우에는 수거만을 언급하고 있음.
- 이에 수거, 처리라는 일련의 과정에서 해양오염퇴적물을 포괄적, 체계적, 통일적으로 관리하기 위해서 그 법적 근거를 마련해야 할 필요성이 높음.
- 오염퇴적물의 수거·처리과정에서 나오는 준설토사 등은 버려지는 폐기물이 아님. 한정된 자원을 보유한 국내의 실정상 자원순환의 차원에서 준설토사의 경우에는 재활용·재사용의 대상으로 이해할 필요가 있음. 준설토사를 일률적으로 폐기물로 보아 「폐기물관리법」 등에 의한 규제대상으로 보는 것에 대하여는 전향적인 검토가 요망됨. 이에 준설토사 등을 폐기물로 규정하지 않거나 준설 전 또는 중간처리 후 위해성평가(risk assessment) 또는 오염도 평가를 통해 오염정도에 따라 폐기물과 폐기물이 아닌 재활용 가능한 자원으로 구분할 필요가 있음. 이를 통해 해양오염퇴적물을 골재, 매립토 등으로 이용할 수 있는 방안을 강구하고, 불필요한 규제 규정의 적용을 배제함으로써 유인을 제공할 필요가 있음.
- 오염퇴적물을 인근지역에 매립하는 경우 매립지 확보의 어려움과 막대한 매립지 건설비 및 관리비 소요, 운송비 증가 등의 문제점이 발생할 수 있음. 따라서 오염퇴적물을 일률적으로 폐기물로 관리할 것이 아니라 「자원의 절약 및 재활용촉진에 관한 법률」, 「건축폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」 등 자원의 순환 및 재활용을 활성화하고자 하는 최근의 입법의 동향에 비추어 오염퇴적물을 재활용하는 방안을 마련해야 할 것임. 즉, 수거된 해양오염퇴적물의 법적지위를 곧바로 ‘재활용이 가능한 물질’ 또는 ‘폐기물’로 단정하지 않고, 처리 및 오염도 평가 등을 통하여 구체적으로 판단할 수 있도록 규정할 필요가 있음.

#### (나) 유사 법제의 검토

##### ① 유사 법제의 검토 필요성

- 해양오염퇴적물의 적절한 관리를 위한 입법방안을 강구하는 데에 있어서, 국내·외의 다른 법령에 대한 검토가 유익할 것으로 보임. 이에 따라 국내법 중에서 토양환경보전법을 검토하고, 외국법으로는 미국의 종합환경대응배상책임법(Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act: CERCLA)을 검토하고자 함. 토양환경보전법은 ‘토양’을 대상으로 한다는 점에서 ‘해양오염퇴적물’과는 규율대상을 달리하지만, ‘정화’를 그 내용으로 한다는 점에서 유사한 점이 있으며, 미국의 CERCLA의 경우 해양오염퇴적물을 포함하여 토양오염 전반에 관한 정화 및 복원을 규율하는 광범위한 법률이라는

---

점에서 국내 입법에 있어서 참고할 점이 있을 것으로 판단됨.

## ② 토양환경보전법

- 토양환경보전법에서는 “토양오염”, “토양오염물질”, “토양정화” 및 “토양정화업” 등에 대한 정의를 하고(제2조), 환경부장관으로 하여금 토양보전기본계획을 수립하도록 하고 있으며(제4조), 사람의 건강·재산이나 동물·식물의 생육에 지장을 줄 우려가 있는 토양오염의 기준(우려기준)을 환경부령으로 정하도록 함(제4조의2).
- 환경부장관, 시·도지사 또는 시장·군수·구청장 등으로 하여금 토양오염도의 상시측정, 토양오염실태조사 및 토양정밀조사를 하도록 함(제5조). 그리고 국유재산 등에 대하여 환경부장관이 토양정화를 할 수 있도록 하고, 정화 등에 소요되는 비용을 지방자치단체에게 부담하게 할 수 있도록 함(제6조의3).
- 오염원인자의 범위를 구체적으로 정하고(제10조의4), 환경부에 토양정화자문위원회를 두도록 함(제10조의9). 또한 시·도지사 또는 시장·군수·구청장으로 하여금 상시측정, 토양오염실태조사 또는 토양정밀조사의 결과 우려기준을 넘는 경우 오염토양의 정화 등의 조치를 하도록 오염원인자에게 명할 수 있도록 하고, 오염원인자를 알 수 없거나 오염원인자에 의한 토양정화가 곤란하다고 인정하는 경우에는 시·도지사 또는 시장·군수·구청장이 오염토양의 정화를 실시할 수 있도록 함(제15조). 오염토양의 정화는 대통령령이 정하는 기준 및 방법을 따르도록 하고, 토양정화업자에게 위탁하여 정화하도록 함(제15조의3).
- 환경부장관 등은 오염물질의 종류 및 오염도, 주변 환경, 장래의 토지이용계획 등을 고려하여 해당 부지의 토양오염물질이 인체와 환경에 미치는 위해의 정도를 평가하게 한 후 그 결과를 토양정화의 범위, 시기 및 수준 등에 반영할 수 있도록 함(제15조의5).
- 오염원인자는 정화과정 및 정화완료에 대한 검증을 하도록 함(제15조의6). 한편 우려기준을 초과하여 사람의 건강 및 재산과 동물·식물의 생육에 지장을 주어서 토양오염에 대한 대책이 필요한 토양오염의 기준(대책기준)을 환경부령으로 정하고(제16조), 환경부장관은 대책기준을 넘는 지역 등에 대하여 토양보전대책지역으로 지정할 수 있도록 하고 있으며(제17조제1항), 특별자치도지사·시장·군수·구청장은 대책지역에 대하여 오염토양 개선사업 등을 포함하는 대책계획을 수립·시행하도록 함(제18조).
- 토양환경평가기관, 위해성평가기관, 토양오염조사기관 등을 토양관련전문기관으로 지정하도록 하고 있고(제23조의2), 토양정화업을 하려는 자는 시설, 장비 및 기술인력 등을 갖추어 시·도지사에게 등록하도록 함(제23조의7).

## ③ 미국 CERCLA

- 미국의 종합환경대응배상책임법(Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act: CERCLA)은 유해물질로 오염된 지역을 확인·조사 및 복구하는 내용을 포괄하는 법률로 정화작업도 이 법에 따라 시행됨. 이 법은 퇴적물만을 대상으로 한 것은 아니며, 오염물질로 인해 발생하는 위해의 평가와 복원, 이에 소요되는 비용 등을 포괄적으로 규정하고 있음. CERCLA에 따라 EPA는 유독폐기물의 처리, 저장, 배출시설로부터 침출된 오염물질이 퇴적물 오염의 원인인지를 평가할 권한을 가지며, 평가결과 오염이 심각하다고 판단되면 정화를 포함한 종합적인 복원 및 관리조치를 취할 수 있음. 이 법에 의해 PCBs 등 유해물질에 의해 오염된 퇴적물의 정화·복원 사업을 추진하고 있고, 정화복원 사업의 비용 마련을 위하여 정부차원에서 슈퍼펀드(Superfund)를 조성함.
- 이 법은 막대한 재원을 마련하여 미국 환경부(EPA)로 하여금 오염지역의 실태를 종합적으로 조사 파악하고 위험의 정도가 심각한 지역을 우선적으로 정화하도록 하고 오염지역의 정화에 소요된 비용은 그 오염의 원인자로부터 거두도록 함.



- 슈퍼펀드라고 불리는 신탁기금은 CERCLA의 정화대상지역으로 지정된 지역에서 책임당사자가 밝혀지지 않거나 경제적 능력이 없는 경우에 정화비용으로 주로 쓰이고, 정화책임 소재에 관한 소송이 계속중인 경우에 필요적 정화비용에 우선 증당하고 있음. 슈퍼펀드는 정부로부터 예산배정을 받을 뿐만 아니라 책임당사자들의 비용환급에 따른 수입으로 그 기금을 유지함.
- CERCLA는 법이 폭넓게 정하고 있는 유해물질이 자연으로 배출(release)되거나 배출될 우려가 있는 경우 대통령에게 대응조치를 취할 수 있는 권한을 부여함. 유해물질의 배출 뿐만 아니라 질병을 가져올 수 있는 오염물질(pollutant or contaminant)이 환경에 배출되거나 배출될 우려가 존재할 때에도 대통령은 대응조치를 취할 수 있음. 배출의 개념은 매우 폭넓게 규정되어 있어서 유해물질 및 오염물질이 법이 정한 안전용기 밖으로 나가는 것을 거의 모두 포함함. 배출될 우려가 있을 때, 즉 배출이 실제 일어난 경우가 아니더라도 법의 적용이 가능하므로 EPA의 법집행 가능성을 매우 넓게 인정함.
- 대통령이 취할 조치는 단기적으로 유해물질을 제거(removal)하고 장기적으로 오염지역을 복구(remedy)하는 일임. 유해물질의 제거(removal action)는 오염의 확산을 막고 급박한 위험을 방지하기 위한 단기간의 긴급조치를 의미함. 예를 들면 누출이 계속되는 금속용기를 제거하거나, 오염지역의 확산을 방지하기 위해 장막을 설치하거나 지하수오염지역에 식수를 공급하는 등의 활동을 포함함. 오염지역의 복구(remedial action)는 장기적인 정화작업을 의미함. 예를 들면, 오염토양을 파헤쳐 유해폐기물처리장으로 옮겨 적정처리를 맡긴다거나 쓰레기매립지 바닥에 점토를 매설하여 침출수의 진입을 막거나 오염된 지하수를 퍼 올려 정수하여 다시 순환시키는 활동 등과 같이 오랜 시간과 비용이 소요되는 활동들을 말함. 대통령은 이와 같은 권한을 수행하기 위해 이행명령을 발할 수 있음. 대통령은 적절하고 신속한 대응이 가능하다고 판단될 때 유해물질의 제거작업 및 오염지역의 복구작업을 제107조상의 잠재적 책임당사자에게 맡길 수도 있음.
- 대통령의 직접적 조치권한 이외에, 유해물질이 자연에 배출되거나 배출될 우려가 있어 공공의 건강과 환경에 급박하고 상당한 위험을 초래할 때에는 대통령은 그러한 위험을 저감하는데 필요한 행정명령 등 기타의 조치를 취할 수 있음. 이와 같은 명령을 충분한 이유 없이 위반하거나 이행하지 않는 경우, 1일당 25,000달러 이하의 벌금을 과할 수 있고, 원인제공자로서 정부의 오염물질 제거 또는 복구 명령을 이행하지 않을 경우 그 불이행으로 야기된 정부의 대응조치비용의 세배에 이르는 징벌적 배상책임도 물도록 함.
- 정화활동은 법이 정한 국가비상계획(National Contingency Plan, NCP)에 따라야 함. 국가비상계획은 환경부, 주, 또는 책임당사자가 오염제거사업 또는 정화사업을 수행할 때 따라야 할 세부절차를 마련하고 있음.
- EPA는 일반적으로 시민의 제보 또는 EPA의 정보수집을 통해 오염지역의 존재를 인지함. 오염지역 및 시설물의 책임자는 유해물질의 배출 사실을 보고할 의무를 짐. EPA가 정하는 유해물질의 배출보고 기준량 이상의 누출이 발생하는 경우 해당 시설 및 지역의 책임자는 국가대응센터(National Response Center)에 즉시 보고하여야 함. 이와 같은 배출보고 의무자가 즉시 보고하지 않거나 허위보고를 할 때에는 정부는 연방형법이 정한 바에 따라 처벌할 수 있음.
- 오염지역의 존재를 인지하게 되면, EPA는 우선 예비적으로 오염물질의 제거 및 정화활동을 수행할 것인가 여부를 결정함. 제거활동을 수행할 것인가의 여부는 오염물질의 배출 및 배출우려가 제거활동에 의해 해소될 수 있는가를 판단하여 결정함. 오염지역의 정화가 필요하다고 판단하면 EPA는 그 지역을 CERCLA 정보체계(CERCLA Information System, CERCLIS)에 등재함. EPA는 수집된 각종 자료를 검토하여 예비적 평가를 하고, 예비적 평가에서 추가 정보가 필요하다고 판단되면 EPA는 현장조사를 실시함(removal

---

site inspection). 공중의 건강복리 및 환경에 위해가 있다고 결정하면 EPA는 오염물질의 배출 및 배출가능성을 방지하거나 위험성을 저감하기 위한 오염제거 활동을 시행할 수 있음. 잠재적인 책임당사자가 존재하는 경우 EPA는 이들로 하여금 오염제거 활동을 수행하게 할 수 있음.

- EPA는 수많은 오염지역들을 잠재적 위험 정도, 피해가능 주민의 수, 지하수 오염의 가능성, 주민과의 직접성 등을 고려하여 점수를 매기고 각 지역의 점수에 따라 등급을 나누어 일정한 점수 이상 얻은 지역을 우선지역목록(NPL)에 등재하여, 각 지역의 위해성을 수량화하여 비교함으로써 위해성이 높은 지역을 공정하게 선정할 수 있도록 함. NPL에 오른 지역들은 CERCLA의 정화절차에 따라 정화하게 되며 신탁기금을 이용할 수 있음. 이러한 지역에 대하여 EPA는 CERCLA의 신탁자금을 이용하여 직접 정화조치를 하고 그 비용을 잠재적인 책임당사자들로부터 환수할 수 있음.
- 우선지역목록에 등재된 오염지역에 대해서는 장기적인 토양복구사업이 수행되게 됨. 이를 위해 우선 복구방법조사/타당성조사(Remedial Investigation/ Feasibility study)를 실시하게 되는데 해당지역에 대한 세부조사와 가능한 정화방법들에 대한 심사를 함. 복구방법의 선정을 위해선 복구목적 설정해야 하는데 복구목적은 식수안전법(Safe Drinking Water Act)과 수질환경보전법(Clean Water Act)이 정하는 오염물질 허용기준에 준하는 상태를 목적으로 함. 그리고 복구의 기준은 유해물질 및 오염물질에 관해 법적으로 “적용할 만한 또는 관계 있는 적절한 요건들(Applicable or relevant and appropriate requirements)”을 성취함을 목표로 함.
- EPA는 이러한 절차를 거쳐 적절하다고 판단된 정화방법을 결정하게 되면 결정기록(Record of Decision)을 작성함. 결정기록은 선택된 복구방법이 왜 효과적이고 적절한 방법인가를 설명하고 결정에 고려되었던 사항들을 설명해야 함. 정화방법을 결정하는 기관은 언제나 결정기록을 작성해야 하고 시민에 공개하여야 함. 정화방법이 선정되면 복구에 필요한 복구디자인을 수립하고 실천활동을 수행해야 함(remedial design/remedial action, RD/RA). 복구디자인 수립단계에서는 기술적인 실천계획이 마련되고 복구실천 단계에서는 복구디자인을 실행하는 건설활동을 함. 복구실천은 인체와 환경을 보호해야 하고 비용-효율적이어야 하고 영구적인 해결방법을 사용해야 하고 기술적으로 사용 가능한 자원복구기술을 사용해야 함. 오염물질을 오염지역으로부터 제거할 때에는 오염물질을 RCRA에 의해 허가되고 감독받는 적정 유해폐기물처리장으로 이동시켜야 함. EPA는 유해물질 및 오염물질을 일부 남겨두게 되는 경우, 적어도 매 5년마다 시민의 건강과 환경을 보호하기 위해 오염지역을 점검하여야 함.
- CERCLA의 법적 특징은 넓게 규정된 책임당사자에게 정화책임과 소요비용에 대한 책임을 부담시킨다는 점에 있음. CERCLA에서 정화책임을 지는 당사자는 1) 오염토지 및 시설의 현재 소유자 및 운영자; 2) 유해물질 및 오염물질의 배출당시 해당토지 및 시설을 소유하였거나 운영했던 자; 3) 유해물질을 야기한 자로서의 폐기, 처리 또는 운반을 주선한 자; 4) 유해물질의 운반을 위탁받고 유해물질을 처리장 및 폐기장소에 운반한 자 등임. 이 규정에 정해진 범위에 속하는 당사자는 잠재적인 책임당사자(potentially responsible parties, PRPs)라고 불림. 이러한 잠재적인 책임당사자는 정부에 의해 소요된 오염물질의 제거 및 복구사업비용, 타인에 의해 지출된 일체의 대응비용, 자연자원에 야기한 피해 및 손해 등에 대하여 책임이 있음.
- CERCLA상의 정화책임은 1) 법률 시행전의 행위에 소급 적용되고; 2) 책임당사자는 엄격 책임을 지고; 3) 소요된 모든 경비에 대하여 연대책임을 지는 것으로 해석됨. 잠재적 책임당사자는 엄격책임을 지므로 원고는 피고의 과실이나 위법사실을 입증할 필요가 없음. 법원은 이에 더하여, 원고는 피고가 직접적으로 원고의 소요경비 즉 손해를 유발하였음을 입증할 필요도 없다고 해석함. 법원은 이와 같은 해석의 이유로서, 의회가 인과관계 요건

---

을 삭제함으로써 원고의 입증곤란 및 누출되고 있는 화학폐기물의 추적 곤란 등의 현실적인 어려움을 감안하였다는 점을 들. 따라서 CERCLA하에서 원고가 입증해야 할 사항은 단지 1) 피고가 법이 정한 책임당사자에 해당할 것; 2) 유해물질이 자연에 배출되었거나 배출될 우려가 있을 것; 3) 유해물질 또는 오염물질의 배출 또는 그 배출위험이 원고로 하여금 당해 비용을 소요케 하였을 것; 4) 원고가 부담한 대응비용 및 정화비용이 국가비상계획에 따라 이루어졌을 것 등임.

- 한 오염지역에 다수의 피고가 존재하는 경우 손해를 각 피고의 귀책사유별로 분할할 수 없는 경우 다수 피고는 그 분할될 수 없는 손해에 대하여 연대하여 책임이 있음. 피고가 자신의 책임이 타인의 책임으로부터 분할이 가능하고 그 분할의 근거를 제시하는 경우 각각의 기여분에 따라 책임을 부담함. 다수 피고에 의해 오염된 지역을 정화하는데 소요된 비용의 분할여부와 분할근거에 대하여는 피고가 입증책임을 짐. 분할가능성은 오염물질의 일부가 당해 피고로부터 유발되었다는 사실만으로는 입증되지 않음. 손해 즉 정화비용은 단순히 피고가 기여한 오염물질의 물리적인 양에 의해 분할될 수 없기 때문임. 오염물질의 양적차이가 분할가능성의 기준이 될 수 없는 이유는 그 물질의 독성 정도, 이동성 등이 정화의 방법과 비용을 결정짓는데 중요한 역할을 하기 때문임. 따라서 분할가능성을 입증하기 위해서는 정화비용을 야기한 기술적이고 인과적인 요소를 모두 고려해야 함. 피고에게 분할의 입증책임을 있으므로 피고가 공동피고에 의해 야기된 손해가 분할가능하다는 것을 입증하여야 하나 현실적으로 이를 입증하기가 매우 어려움. 왜냐하면, 분할가능성을 입증하려면 사실상 또는 기술상의 정보를 필요로 하나 피고는 필요한 정보에 접근하기가 용이하지 않음. 이와 같은 어려움은 특히 오염이 제3자의 토지에서 발생한 경우 더욱 큼.
- 다수 당사자가 존재하는 경우, 연대책임을 부담한 당사자는 다른 잠재적인 책임자를 상대로 구상권을 행사할 수 있음. 구상권을 행사하게 될 경우 다른 당사자는 자신의 기여분에 해당하는 만큼 책임을 부담함. 정화비용에 대하여 다수당사자가 어떻게 비용분담을 할 것인가가 어려운 문제임. CERCLA는 EPA로 하여금 구속력이 없는 예비적 책임분할을 하도록 규정하고 오염물질의 양, 독성, 이동성, 증거능력, 지불능력, 소송부담, 공익적 요소, 선례로서의 가치, 형평성, 그리고 기타 다른 집적효과 등을 고려하도록 함.
- CERCLA의 집행 20년을 되돌아볼 때, 처음 10년간은 여러 기술적·제도적 장치의 미비로 오염지역의 정보수집, 복구기준과 방법의 마련에 어려움이 많아 오염지역의 복구가 더디게 진행되었으나 1990년대 들어와 CERCLA의 기술적, 제도적 체계가 정비되어 정화에 박차를 가할 수 있었음. 1990년대 CERCLA의 오염지역 정화가 활기를 띠게 된 것은 1986년 개정안에서 의회가 85억 달러의 자금지원을 했을 뿐만 아니라 EPA로 하여금 시한을 정해 놓고 CERCLA의 집행을 의무화하였기 때문임. 기업으로부터의 수많은 비판과 저항에도 불구하고 의회는 CERCLA의 입법목적과 집행을 고수하였고 환경부를 채찍질하였던 것임. 그리고, 법원은 융통성 있는 법해석을 통해 정부의 신속한 정화와 오염자부담의 원칙이라는 입법목적을 실현하는데 큰 역할을 함.
- CERCLA를 통해 전국에 방치된 심각한 오염지역에 대한 체계적인 조사가 이루어져 정보가 수집되고 인체에의 유해성에 대한 과학적 접근이 가능하게 되었고, 오염된 토양과 지하수를 복원하는 과학기술도 큰 발전을 이룸. CERCLA와 같이 적극적이고 획기적인 조치가 없었으면 이렇게 급속한 진척은 보기 어려웠을 것임.
- 그러나 한편 CERCLA의 집행 결과, 정화 및 복구에 막대한 비용이 소요되고 그에 대한 무거운 책임이 유독화학물질을 부적절하게 사용하고 처리했던 악덕기업뿐만 아니라 적법하게 유해쓰레기를 배출하고 처분했던 많은 소규모 사업자들에게도 미치자 CERCLA상의 정화책임제도로 인하여 여러 문제가 파생되기도 함. 수많은 당사자가 정화책임을 묻는 소송에 휘말리게 되어 막대한 비용이 오염지역의 정화에 사용되기보다는 소송 등 부대비

---

용에 사용되었고, 오염지역 정화의 무거운 책임을 염려하여 투자자들은 이미 개발된 후 버려진 산업지역에 재투자하기를 꺼리고 오염지역의 재개발을 꺼리게 됨. 그 결과 수많은 산업지역들이 투자되지 않고 버려진 상태로 방치되고 있고 오히려 청정지역이 산업지역으로 새로 개발되어 녹지를 파괴하는 환경문제를 야기하기도 함.

#### ④ 시사점

- 해양오염퇴적물에 관한 법령을 제정하는 경우 토양환경보전법의 체계를 참고하여 주요 용어에 대한 정의규정을 두고, 주무부처 장관으로 하여금 기본계획을 수립하도록 하며, 정화·복원의 기준을 환경부령으로 정하도록 하여야 함
- 또한 토양오염도의 상시측정, 토양오염실태조사 및 토양정밀조사 등과 같은 해양오염퇴적물에 대한 조사에 관한 규정을 둘 필요가 있음. 그리고 토양오염의 정화에서와 같이 국가가 직접 정화를 할 수 있도록 하고, 정화 등에 소요되는 비용을 공평하게 부담하게 할 수 있는 제도를 마련하여야 할 것임
- 토양환경보전법은 오염원인자의 범위를 구체적으로 정하고, 환경부에 토양정화자문위원회를 두도록 하고 있는바, 해양오염퇴적물의 경우에도 정화를 오염원인자에게 명할 수 있도록 하고, 오염원인자를 알 수 없거나 오염원인자에 의한 정화가 곤란하다고 인정하는 경우 국가 또는 지방자치단체가 직접 정화를 실시할 수 있도록 근거규정을 두어야 함. 또한 해양오염퇴적물 관련 정책의 심의, 자문 등을 위하여 토양정화자문위원회와 유사한 정책위원회 등을 설치할 필요가 있음
- 오염토양의 정화에 있어서와 같이 해양오염퇴적물의 정화 기준 및 방법을 법령에서 정하도록 하고, 정화업자에게 위탁하여 정화하도록 할 필요가 있음
- 토양오염 정화에 있어서 정화과정 및 정화완료에 대한 검증을 하도록 하고 있는데, 이는 해양오염퇴적물 정화에 있어서도 필요할 것으로 보임
- 토양관련전문기관, 토양정화업 등에 관한 규정 또한 해양오염퇴적물 정화와 관련하여 전문기관 및 정화업에 관한 규정으로 참고하여 도입할 수 있음
- 해양오염퇴적물의 정화와 관련하여서 새로 입법을 하는 경우, 토양환경보전법상의 토양정화에 관한 규정에서 많은 조항을 시사 받을 수 있을 것임. 그러나, 해양오염퇴적물은 토양과 다른 점을 많이 가지고 있음. 우선 해양오염퇴적물의 관리 또는 정화에 있어서 “해저”이라는 측면이 특별한 문제를 제기함. 즉 해저환경에서의 고립 또는 처리시설 등은 육상에서의 정화와 비교할 때 해류, 수심 및 홍수나 폭풍 같은 일시적 사건 등의 특별한 요소를 고려할 것을 필요로 함
- 다만, 퇴적물 오염에 따른 잠재적인 영향력이 정화 필요성 고려에 있어서 적절하게 고려되어야 하는 특성을 가짐. 더욱이 퇴적물의 물리적, 화학적 성질은 효과적인 관리 및 정화의 필요성을 제기하고, 도시의 고체폐기물 또는 산업폐기물 등의 다른 물질과 쉽게 비교될 수 없음. 퇴적물은 보통 물과 점토, 실트 및 모래 등의 입자로 구성되고, 높은 함수량에 더하여 해양오염퇴적물과 관련된 더욱 복잡한 화학적 작용은 염분에 기인하는데, 이는 해양오염퇴적물과 오염토양 사이의 독특한 차이를 가져옴. 또한 대부분의 오염퇴적물 지역은 복합적인 오염물질을 포함하고 있고, 한 가지 정화방법으로는 효과적이지 않음. 해저의 무산소상태에서 퇴적물을 제거하여 육상 고립처분장과 같은 유산소의 지구화학적 환경에 퇴적물을 둘 경우 특정 오염물질의 유출가능성이 커질 수 있음. 이러한 요소들 때문에, 오염퇴적물의 잠재적인 영향에 관한 결정과 정화필요성에 관한 결정은 국가적 또는 지역적으로 획일적인 기준에 근거하여 이루어지기 어려움
- 해양오염퇴적물에 관한 법령 제정에 있어서 미국의 CERCLA로부터도 참고할 내용이 많

은데, 해양오염퇴적물의 정화가 막대한 비용을 필요로 하고, 재정적인 문제로 인하여 해양오염퇴적물을 방치하여 국민의 건강을 위협하는 것을 방지할 필요가 있음을 고려할 때, 슈퍼펀드 제도를 참고하여 재정지원 등의 제도를 도입할 필요가 있음

- 미국의 CERCLA는 주무관청으로 하여금 정화에 관하여 이행명령 등 강력한 조치를 할 수 있는 권한을 부여하고 있는데, 우리나라에서의 법령 제정에 있어서 정화책임자에 대한 이행명령 등의 제도 도입 등에 참고하여야 할 것임
- 또한 정화를 할 때 따라야 할 세부절차를 마련하고 있는 국가비상계획(NCP)과 같이 세부 절차를 법령에서 규정하여야 함. 그리고 해양오염퇴적물의 정화가 필요한 지역이 다수인 경우, 어느 곳에 우선순위를 둘 것인가 등에 대한 판단을 위하여 CERCLA의 우선지역목록과 유사한 제도를 마련할 필요가 있음
- CERCLA는 책임당사자에게 정화책임과 소요비용에 대한 책임을 부담시킨다는 점에 특징이 있는바, 해양오염퇴적물의 정화에 관한 국내법령 입법에 있어서도 이러한 오염원인자 부담의 원칙을 근간으로 하여야 함
- 미국의 경우 CERCLA를 통하여 오염지역에 대한 체계적인 조사와 인체 유해성에 대한 과학적 접근이 가능하게 되었고, 관련 과학기술도 큰 발전을 이룬 것처럼, 해양오염퇴적물 정화에 관한 법령이 제정될 경우, 해양오염퇴적물의 체계적인 조사와 과학적 접근 및 관련 기술의 발전에도 큰 도움이 될 것으로 보임

[참고]

**토양환경보전법, CERCLA 및 해양오염퇴적물관리법(안) 비교표**

토양환경보전법	COMPREHENSIVE ENVIRONMENTAL RESPONSE, COMPENSATION, AND LIABILITY ACT OF 1980	해양오염퇴적물관리법(안)
<p style="text-align: center;"><b>제1장 총칙</b></p> <p>제1조(목적) 제2조(정의) 제3조(적용제외) 제4조(토양보전기본계획의 수립 등) 제4조의2(토양오염의 우려기준) 제5조(토양오염도 측정 등) 제6조(측정망설치계획의 결정·고시) 제6조의2(표토의 침식 현황 조사) 제6조의3(국유재산 등에 대한 토양정화) 제7조(토지 등의 수용 및 사용) 제8조(타인 토지에의 출입 등) 제9조(손실보상) 제10조의2(토양환경평가) 제10조의3(토양오염의 피해에 대한 무과실책임) 제10조의4(오염원인자의 범위) 제10조의5(토양정화 공제조합의 설립) 제10조의6(조합의 사업) 제10조의7(분담금) 제10조의8(「민법」의 준용)</p> <p style="text-align: center;"><b>제2장 토양오염의 규제</b></p> <p>제11조(토양오염의 신고 등) 제12조(특정토양오염관리대상시설의 신고 등) 제13조(토양오염검사) 제14조(특정토양오염관리대상시설의 설치자에 대한 명령) 제15조(토양오염방지 조치명령 등)</p>	<p style="text-align: center;"><b>TITLE I—HAZARDOUS SUBSTANCES RELEASES, LIABILITY, COMPENSATION</b> (제1장 유해화학물질 배출, 책임, 보상)</p> <p>§101.Definitions(정의) §102.Reportable quantities and additional designations(보고 물량 및 추가 지정) §103.Notices, penalties(통지, 벌칙) §104.Response authorities(책임 당국) §105.National contingency plan(국가 비상 계획) §106.Abatement action(감면조치) §107.Liability(책임) §108.Financial responsibility(재정책임) §109.Civil penalties and awards(민사 처벌 및 보상) §110.Employee protection(고용자 보호) §111.Uses of fund(재원의 사용) §112.Claims procedure(청구 절차) §113.Litigation, jurisdiction and venue (소송 관할권) §114.Relationship to other law(타법과의 관계) §115.Authority to delegate, issue regulations(권한 위임, 문체 규정) §116.Schedules.(일정) §117.Public participation(대중의 참여) §118.High priority for drinking water supplies(상수 공급 우선 순위) §119.Response action contractors(대응</p>	<p style="text-align: center;"><b>제1장 총칙</b></p> <p>제1조(목적) 제2조(정의) 제3조(다른 법률과의 관계) 제4조(적용범위) 제5조(해양오염퇴적물 관리의 기본원칙) 제6조(해저퇴적물 상시 조사 등) 제7조(상시 조사 계획의 결정·고시) 제8조(해양오염퇴적물 관리 기본계획의 수립 등)</p> <p style="text-align: center;"><b>제2장 해양오염퇴적물의 정화</b></p> <p>제9조(해양오염퇴적물의 정화기준, 범위 및 방법) 제10조(해양오염퇴적물의 정화) 제11조(유해물질 유입 차단 등 조치) 제12조(해양오염퇴적물정화의 검증) 제13조(사후관리)</p> <p style="text-align: center;"><b>제3장 해양오염퇴적물의 수거</b></p> <p>제14조(해양오염퇴적물의 수거방법)</p> <p style="text-align: center;"><b>제4장 해양오염퇴적물의 처리</b></p> <p>제15조(해양오염퇴적물의 처리방법) 제16조(해양오염퇴적물의 재활용) 제17조(재활용처리시설 등의 설치·운영) 제18조(신고 등) 제19조(해양오염퇴적물의 해양투기금지 등)</p>

<p>제15조의2(명령의 이행완료 보고) 제15조의3(오염토양의 정화) 제15조의4(오염토양의 투기 금지 등) 제15조의5(위해성평가) 제15조의6(토양정화의 검증) 제15조의7(토양관리단지의 지정 등)</p> <p><b>제3장 토양보전대책지역의 지정 및 관리</b></p> <p>제16조(토양오염대책기준) 제17조(토양보전대책지역의 지정) 제18조(대책계획의 수립·시행) 제18조의2(대책계획 시행 결과의 보고) 제19조(오염토양 개선사업) 제20조(토지이용 등의 제한) 제21조(행위제한) 제22조(대책지역의 지정해제 등)</p> <p><b>제3장의 2 토양관련전문기관 및 토양정화업</b></p> <p>제23조의2(토양관련전문기관의 종류 및 지정 등) 제23조의3(토양관련전문기관의 결격사유) 제23조의4(토양관련전문기관 지정서 등의 대여 금지) 제23조의5(겸업 금지) 제23조의6(토양관련전문기관의 지정취소 등) 제23조의7(토양정화업의 등록 등) 제23조의8(토양정화업 등록의 결격사유) 제23조의9(토양정화업자의 준수사항) 제23조의10(토양정화업의 등록취소 등) 제23조의11(등록취소 또는 영업정지된 토양정화업자의 계속공사 등) 제23조의12(권리·의무의 승계) 제23조의13(행정처분효과의 승계) 제23조의14(토양관련전문기관 등의 기술인력 교육)</p> <p><b>제4장 보칙</b></p> <p>제24조(대집행) 제25조(관계 기관의 협조) 제26조(국고보조 등) 제26조의2(보고 및 검사 등) 제26조의3(특정토양오염관리대상시설 설치현황 등의 보고) 제26조의4(행정처분의 기준) 제26조의5(청문) 제27조(권한의 위임·위탁)</p> <p><b>제5장 벌칙</b></p> <p>제28조(벌칙) 제29조(벌칙) 제30조(벌칙) 제31조(양벌규정) 제32조(과태료)</p>	<p>조치 당사자) §120.Federal facilities(연방 기구) §121.Cleanup standards(정화기준) §122.Settlements(설정) §123.Reimbursement to local governments(지방정부에 상환) §124.Methane recovery(메탄 회수) §125.Section 3001(b)(3)(A)(i) waste(폐기물) §126.Indian tribes(원주민 부족) §127.Recycling transactions(재활용 거래) §128.State response programs(주 책임 프로그램)</p> <p><b>TITLE II—HAZARDOUS SUBSTANCE RESPONSE REVENUE ACT OF 1980</b> (제2장 유해물질 응답 수익법) §201.Short title; amendment of 1954 Code Subtitle A—Imposition of Taxes on Petroleum and Certain Chemicals(석유/특정화학물질 과세) Subtitle B—[Repealed] Subtitle C—[Repealed]</p> <p><b>TITLE III—MISCELLANEOUS PROVISIONS</b> (기타 조항) §301.Reports and studies(보고 및 학습) §302.Effective dates, savings provision(유효기간, 저축) §303.Expiration, sunset provision(만료 조항) §304.Conforming amendments(조항에 부합) §305.Legislative veto(입법거부권) §306.Transportation(운송) §307.Assistant administrator for solid waste(고형 폐기물을 위한 지원 당국) §308.Separability(분리가능성) §309.Actions under State law for damages from exposure to hazardous substances(위험물질 노출에 의한 피해에 대한 주 법상의 조치) §310.Citizens suits(시민소송) §311.Research, development, and demonstration(연구, 개발, 시연) §312.Love Canal property acquisition(Love 운하 부동산 취득)</p> <p><b>TITLE IV—POLLUTION INSURANCE</b> (오염 보험) §401.Definitions §402.State laws; scope of title §403.Risk retention groups §404.Purchasing groups §405.Applicability of securities laws</p>	<p>제20조(매립) 제21조(고립처분) 제22조(현장피복) 제23조(조치명령)</p> <p><b>제5장 해저퇴적물전문기관</b></p> <p>제24조(해저퇴적물전문기관의 종류 및 지정 등) 제25조(전문기관의 결격사유) 제26조(전문기관 지정서 등의 대여 금지) 제27조(겸업 금지) 제28조(전문기관의 지정취소 등)</p> <p><b>제6장 해양오염퇴적물정화업</b></p> <p>제29조(해양오염퇴적물정화업) 제30조(결격사유) 제31조(해양오염퇴적물정화업자의 의무) 제32조(위탁해양오염퇴적물의 처리명령 등) 제33조(권리·의무의 승계) 제34조(등록취소 등) 제35조(해양오염퇴적물 인계·인수 내용 등의 전산 처리)</p> <p><b>제7장 보칙</b></p> <p>제36조(해양오염퇴적물정척위원회) 제37조(연구기관의 설치) 제38조(재정적·기술적 지원) 제39조(한국해양오염퇴적물정척협회)</p> <p><b>제8장 벌칙</b></p> <p>제40조~제42조(벌칙) 제43조(양벌규정) 제44조(외국인에 대한 벌칙적용의 특례) 제45조(과태료)</p> <p><b>부칙</b></p> <p>제1조(시행일) 제2조(해양오염퇴적물수거업 등록에 관한 경과조치) 제3조(다른 법률의 개정)</p>
---	--	--

- 해양오염퇴적물 관련 법령 정비의 방식으로 기존의 관련법들을 개정할 것인가 아니면 새로운 별개의 단일법을 제정할 것인가가 문제되는데, 개별 법률에 산재된 규정을 개정하는 방식으로 정비하기 보다는 별도의 단일법(가칭 「해양오염퇴적물관리법」)을 제정하는 것을 적극 검토하여야 할 것임. 기존 해양환경관리법의 개정은 본질적인 문제해결 방법

이 될 수 없고, 개정내용에 포함하여야 할 양이 많아 입법기술상 어려운 점이 있으며, 그렇지 않아도 기존 「해양환경관리법」이 다루는 내용과 범위가 방대하여 분법화할 필요성이 크다는 점 등을 고려할 때, 개정은 효율적인 방안이라고 할 수 없음

○ 별도의 법을 제정하는 것은 모든 관련법들을 개정해야 하는 큰 수고를 줄이면서도 효율적으로 오염퇴적물 관리체계를 정립할 것으로 보임. 「폐기물관리법」, 「토양환경보전법」, 「해양환경관리법」 등 관련법의 일부 개정으로는 미봉책에 그칠 가능성이 많고, 이들 법의 목적과 취지 등에 비추어 오염퇴적물의 처리와 처분 전 과정을 규율하는 데에는 한계가 있을 수밖에 없기 때문임. 또한 법률들 사이에서의 상충 문제도 무시할 수 없음. 새로운 법에서는 오염퇴적물의 수거(준설), 운반, 보관, 처리·처분, 재활용 등 전 과정에 걸쳐 단계별로 가능한 한 자세한 규정을 두어야 함. 여기에는 오염퇴적물의 개념, 오염퇴적물의 수거·처리의 근거가 되는 환경기준, 수거·운반·보관·처리의 과정에서 수질에 대한 영향 최소화, 수질오염 억제, 악취방지, 오염퇴적물의 재활용, 매립 또는 해저 고립 처분, 해양배출을 위한 처리방법·기준 등이 포함됨

#### (4) 가칭 「해양오염퇴적물관리법(안)」의 제정방안

##### (가) 주요 개념 정의

- 해양오염퇴적물, 정화, 수거, 처리 등 주요 개념을 정의함(법 제2조)
  - “해저퇴적물”이란 암석의 풍화와 침식으로 분리된 암석기원 물질이나 생물활동에 의하여 유래된 물질 또는 화학적으로 형성된 고체물질 등이 이동되어 해양이나 하구 등 수역의 바닥에 존재하거나 쌓인 물질을 말함.
  - “해양오염퇴적물”이란 「해양환경관리법」 제8조에 따른 해양환경기준의 해저퇴적물기준을 초과하는 물질을 포함하거나 사람의 건강, 재산이나 환경에 피해를 주는 해저퇴적물을 말함.
  - “정화”란 수거, 처리 등 물리적·화학적 또는 생물학적 등의 방법으로 해저퇴적물 중의 유해물질을 감소·제거하거나 해양오염퇴적물로 인한 위해를 완화하는 것을 말함.
  - “수거”란 해양이나 하구 등 해역에서 정화를 목적으로 해저퇴적물을 제거하는 행위를 말함.
  - “처리”란 해양오염퇴적물의 운반, 보관, 재활용, 처분을 말함.
  - “재활용”이란 해양오염퇴적물을 재사용·재생이용하거나 재사용·재생이용할 수 있는 상태로 만드는 행위를 말함.
  - “처분”이란 해양오염퇴적물을 매립 또는 해양투기하는 등 환경에 노출시키는 행위를 말함.
- 해양오염퇴적물 정화와 관련된 기타 필요한 개념을 각 개별조항에서 정의함
  - “상시 조사”란 전국적인 해저퇴적물의 오염실태를 파악하기 위하여 해양수산부장관이 해저퇴적물 오염도를 상시 조사하는 것을 말함.
  - “오염실태조사”란 특별시장·광역시장·도지사·특별자치도지사 또는 시장·군수·구청장(자치구의 구청장을 말한다)이 관할구역 중 해저퇴적물 오염이 우려되는 해당 지역에 대하여 해저퇴적물 오염 실태를 조사하는 것을 말함.
  - “정밀조사”란 해양수산부장관, 시·도지사 또는 시장·군수·구청장이 해저퇴적물보전을 위하여 필요하다고 인정하는 경우 상시 조사 또는 오염실태조사의 결과가 「해양환경관리법」 제8조에 따른 해양환경기준의 해저퇴적물기준을 초과하는 지역에 대하여 조사하는 것을 말함.

- “해양오염퇴적물 관리 기본계획”이란 해양오염퇴적물을 적정하게 관리하기 위하여 해양오염퇴적물 관리에 관한 시책방향 등 해양오염퇴적물의 관리에 필요한 사항을 내용으로 하여 해양수산부장관이 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 10년마다 수립·시행하는 기본계획을 말함.
- “자연정화”란 유해물질의 유입 차단, 오염방지시설의 설치 등에 의하여 해양오염퇴적물이 상당한 시간 내에 자연과정(오염되지 아니한 퇴적물이 자연축적되거나 유해물질이 자연분해·소멸되어 수계생태계와 분리되는 것을 포함한다)에서 정화되는 것을 말함.
- “현장피복”이란 해양오염퇴적물로 인한 영향을 차단하거나 완화시키기 위하여 해양오염퇴적물 표면에 오염되지 아니한 퇴적물이나 유해물질의 생태계로의 노출을 차단시키는 물질로 덮는 것을 말함.
- “고립처분”이란 자연적, 인공적으로 만들어진 해저면의 함몰지에 해양오염퇴적물을 넣고 그 위에 오염되지 아니한 물질을 덮거나 폐쇄된 구조물을 설치하여 연안, 해양 또는 육상에 매립하는 경우방법으로 유해물질의 잠재적 영향을 차단, 격리하는 것을 말함.
- “해양오염퇴적물정화의 검증”이란 해양오염퇴적물정화검증기관이 정화과정 및 정화완료에 대하여 해양오염퇴적물정화업자가 정화기준 및 방법에 맞게 정화하는지 여부와 정화가 주변 환경에 미치는 영향 등을 검증하는 것을 말함.
- “사후관리”란 해양수산부장관이 해양환경의 변화 유무를 수시로 조사하고, 조사결과에 따라 필요한 조치를 하는 등 정화가 완료된 후에 환경에 미치는 영향을 지속적으로 조사하고 관리하는 것을 말함.
- “조치명령”이란 해양오염퇴적물이 법률에 따른 방법에 맞지 아니하게 수거·처리된 경우 해양수산부장관이 해양오염퇴적물을 수거·처리한 자에게 기간을 정하여 수거·처리정지, 수거·처리방법 변경 등 필요한 조치를 명하는 것을 말함.
- “해저퇴적물전문기관”이란 검사시설, 장비 및 기술능력을 갖추어 해양수산부장관의 지정을 받아 오염실태조사 및 정밀조사 업무를 수행하는 오염조사기관과 해양오염퇴적물정화의 검증업무를 수행하는 검증기관을 말함.
- “해양오염퇴적물정화업”이란 해양오염퇴적물의 수거·처리에 필요한 기술능력을 보유하고 선박·장비 및 설비 등을 갖추어 해양수산부장관에게 등록하고 해양오염퇴적물을 수거하는 사업(해양오염퇴적물수거업) 또는 처리하는 사업(해양오염퇴적물처리업)을 말함.
- “해양오염퇴적물정책위원회”란 정화와 관련한 중요한 정책 결정, 해양오염퇴적물 조사 결과의 평가, 해양오염퇴적물 정화 지역·기준 및 방법·물량 등의 선정, 해양오염퇴적물정화에 대한 평가, 재정지원 여부에 관한 사항 및 기타 해양수산부장관이 자문을 요청하는 사항에 대하여 심의·자문을 수행하기 위하여 해양수산부장관이 위원장과 10명 이내의 위원으로 구성하여 설치하는 기관을 말함.
- “연구기관”이란 해양오염퇴적물의 효율적이고 적정한 정화를 위하여 해양오염퇴적물에 관한 연구·조사의 수행을 목적으로 국가가 설치하는 기관을 말함.
- “한국해양오염퇴적물정화협회”란 해양오염퇴적물 정화를 위한 해저퇴적물 오염실태 및 정화방안에 관한 조사 연구, 해양오염퇴적물정화업의 발전을 위한 지도 및 조사·연구, 해양오염퇴적물 정화와 관련한 홍보 및 교육·연수 등의 사업을 위하여 해양수산부장관의 허가를 받아 설립하는 기관을 말함.

#### (나) 적용범위 및 다른 법률과의 관계

- 해양오염퇴적물의 정화에 관한 사항은 이 법을 다른 법률에 우선하여 적용함(제3조).



- 항만 개발이나 수로 유지 등 공학적 이용을 목적으로 해저암반이나 해저퇴적물을 제거하는 행위와 그로 인해 제거된 물질에 대하여는 적용하지 아니하되, 「해양환경관리법」 제8조에 따른 해양환경기준의 해저퇴적물기준을 초과하는 물질을 포함하거나 사람의 건강, 재산이나 환경에 피해를 주는 경우에는 이 법의 해양오염퇴적물 정화에 관한 규정을 적용함(제4조).

**(다) 해양오염퇴적물 관리의 기본원칙 및 기본계획**

- 해양오염퇴적물의 정화, 재활용, 해양생태계의 복원 등 해양오염퇴적물 관리의 기본원칙을 천명함(법 제5조)
- 해양수산부장관에게 기본계획의 수립, 해저퇴적물의 오염도 조사 등의 기본 의무를 부과함(법 제6조 및 제8조)

**(라) 해저퇴적물에 대한 조사**

- 해양수산부장관은 전국적인 해저퇴적물의 오염실태를 파악하기 위하여 해저퇴적물 오염도를 상시 조사하여야 함(법 제6조 제1항)
- 특별시장·광역시장·도지사·특별자치도지사 또는 시장·군수·구청장은 관할구역 중 해저퇴적물 오염이 우려되는 해당 지역에 대하여 해저퇴적물 오염 실태를 조사(오염실태조사)하여야 함(법 제6조 제2항)
- 상시 조사 기준과 오염실태조사의 대상지역 선정기준, 조사방법 및 절차 등을 해양수산부령으로 정하도록 함(법 제6조 제3항, 시행규칙 제2조 및 제3조)
- 해양수산부장관, 시·도지사 또는 시장·군수·구청장은 해저퇴적물보전을 위하여 필요한 경우 정밀조사를 할 수 있음(법 제6조 제4항)
  - 상시 조사의 결과가 「해양환경관리법」 제8조에 따른 해양환경기준의 해저퇴적물기준을 초과하는 지역
  - 오염실태조사의 결과가 「해양환경관리법」 제8조에 따른 해양환경기준의 해저퇴적물기준을 초과하는 지역
- 해양수산부장관은 조사업무를 「한국해양과학기술원법」에 따라 설립된 한국해양과학기술원에 맡길 수 있음(법 제6조 제5항)
- 해저퇴적물 상시 조사, 오염실태조사 및 정밀조사의 결과는 공개하도록 함(법 제6조 제6항)
- 해양수산부장관은 상시 조사의 위치·구역 등을 구체적으로 밝힌 상시 조사 계획을 결정하여 고시하고, 누구든지 그 계획을 열람할 수 있게 하여야 함(법 제7조)

**(마) 해양오염퇴적물의 정화·수거·처리**

**① 정화**

- 해양오염퇴적물 정화를 위한 법적 근거를 둠(법 제9조 내지 제13조)
  - 오염퇴적물의 정화는 오염원인자가 하는 것을 원칙으로 하되 오염원인자를 알 수 없거나 오염원인자에 의한 정화가 곤란한 경우 등에는 국가가 실시할 수 있도록 함(법 제10조 제1항, 제4항, 시행규칙 제5조 내지 제7조).
  - 해양오염퇴적물의 정화기준 및 방법에 대한 법적 근거를 둠(법 제9조).
  - 해양오염퇴적물정화검증기관으로 하여금 정화과정 및 정화완료에 대한 검증을 하도록 함(법 제12조, 시행령 제2조, 시행규칙 제8조).

- 
- 정화가 완료한 후에 정화가 환경에 미치는 영향을 지속적으로 조사하고 관리하도록 함. 이를 위하여 조사 및 조사결과에 따라 필요한 조치를 하도록 함(법 제13조, 시행규칙 제9조).

## ② 수거·처리

- 해양오염퇴적물 수거와 처리를 위한 법적 근거를 둠(법 제14조 내지 제23조)
  - 해양오염퇴적물의 수거방법에 대한 법적 근거를 둠(법 제14조, 시행령 제3조).
  - 해양오염퇴적물의 처리방법에 대한 법적 근거를 둠(법 제15조, 시행령 제4조).
  - 해양오염퇴적물의 재활용을 촉진하기 위하여 재활용 근거 규정을 두어 해수욕장의 양분, 습지 조성 및 복원, 인공섬의 조성 등 일정한 재활용 용도 및 방법에 따르도록 함(법 제16조).
  - 해양오염퇴적물 재활용을 위한 처리시설을 설치·운영할 수 있도록 하고, 처리하는 해양오염퇴적물의 양과 발생하는 폐기물의 종류, 발생량 및 재활용하는 양 등을 신고하도록 함(법 제17조 및 제18조, 시행규칙 제10조).
  - 자연정화, 현장피복, 매립, 고립처분, 해양투기 등 다양한 해양오염퇴적물의 처리·처분 방법에 대한 법적 근거를 마련함(법 제11조, 제19조 내지 제22조, 시행규칙 제11조 내지 제17조)
  - 처리방법에 위반한 경우 그 처리자에게 처리정지, 처리방법 변경 등 필요한 조치를 명할 수 있도록 함(법 제23조).

## (바) 해저퇴적물전문기관

- 해저퇴적물 오염조사, 검증 등을 위한 관련 전문기관을 두고 시설, 장비 및 기술능력을 갖추어 해양수산부장관의 지정을 받도록 함(법 제24조, 시행령 제5조 및 제6조, 시행규칙 제18조 내지 제20조).

## (사) 해양오염퇴적물정화업

- 해양오염퇴적물의 전문적 관리를 위해 해양오염퇴적물정화업(해양오염퇴적물수거업, 해양오염퇴적물처리업)을 새로 창설하고 해양오염퇴적물의 수거 및 처리의 경우 이들 전문업자에 의무적으로 위탁하여 하도록 함(법 제29조, 제14조 제2항, 제15조제2항, 시행령 제7조 및 제8조, 시행규칙 제21조).

## (아) 기타

- 정화사업 시행과 관련한 중요 정책 결정 등의 사항에 대한 심의·자문을 수행하는 해양오염퇴적물정책위원회와 해양오염퇴적물에 관한 연구·조사를 행하는 전문연구기관을 설치할 수 있도록 함(법 제36조 및 제37조, 시행령 제9조 내지 제13조)
- 정화사업을 추진하는 지방자치단체나 사업자 등에게 필요한 재정적·기술적 지원을 할 수 있도록 함(법 제38조, 시행령 제14조)
- 해저퇴적물 오염실태 및 정화방안에 관한 조사 연구 등의 사업을 위하여 해양수산부장관의 허가를 받아 한국해양오염퇴적물정화협회를 설립할 수 있도록 함(법 제39조)

---

## 제4절. 4차년도 연구의 내용 및 결과

### 1. 4차년도 연구개발 목표

- 해양오염퇴적물 정화·복원사업에서 활용 가능한 대안기술로 피복정화 및 현장처리기술 실현을 위한 핵심 기술개발 및 현장 적용성 평가

### 2. 4차년도 연구개발 내용 및 범위

#### 가. 유력대상 해역 피복 적용방안 도출 및 피복기술 고도화

##### (1) 적용대상 해역 피복정화 모니터링을 위한 사전 모니터링 수행

##### (가) 국외사례조사에 기반한 오염퇴적물 정화성능 단계별, 항목별 평가 기법 개발

##### ① 피복정화 후 모니터링을 위한 평가지표 개발

##### ㉞ 정화시공 및 장기 모니터링 방안 사례

- 정화 전후 모니터링은 다음의 기본적 요건을 충족해야 함.
  - 설계와 성능기준 만족
  - 정화요구 기준에 부합하는 단기 정화 성능 및 효율
  - 최종 정화목표에 부합하는 장기 정화 효율
- 정화 효율 평가 항목 (중간분석)
  - 단기 정화 성능: 피복형상, 단기 정화기준충족
  - 장기 정화 성능: 최소 5년간 정화 기중 충족 여부, 피복의 침식 여부
  - 단기 위해성 저감: 5년 후 어류 조직내 오염물 농도, 저서 독성 저감 여부, 종 다양성, 풍부성
- 정화 효율 평가 항목(핵심분석)
  - 장기 위해성 저감: 어류 내 오염물 농도의 최종 목표 달성 여부, 생태계 복원 완료 여부
- 환경모니터링 계획을 위한 핵심 요소
  - 모니터링의 목적 설정
  - 모니터링 목적과 분석한계의 적정성
  - 현장 외 오염물질 유입 등에 의한 영향 파악
  - 모니터링 주기와 기간
  - 측정결과에 대한 공개 범위와 접근성
  - 모니터링 결과에 대한 분석 책임자
  - 모니터링 데이터 해석에 적합한 방법론(통계학적 또는 정량적) 결정
  - 모니터링 결과에 따른 대응에 대한 합의
  - 모니터링 결과의 대주에 대한 소통방법과 책임
- 6단계 사이트 모니터링 계획 및 시행 방안
- 모니터링 계획을 수립할 때, 사이트에 대한 결정기록(Record of Decision; ROD)과 서류를

검토하는 것이 중요함.

- EPA's 모니터링 가이드에서는 모니터링 계획의 시행과 개발에 있어서 권장하는 주요 6 단계를 서술하고 있음(US EPA, 2004).
- 이 지침은 모든 유해 폐기물 사이트에서 사용될 뿐만 아니라 다양한 장소 및 목적을 위해 이용되고 있음.

[표. IV-가-1] 모니터링 계획 시행 및 개발을 위한 권고 6단계 프로세스

<p><b>1단계: 모니터링 계획 목표 결정</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 현장 활동 평가           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 활동 목적 정의</li> <li>- 활동 중점 정의</li> <li>- 행동 활동 모드 정의</li> </ul> </li> <li>▶ 모니터링 목적 정의</li> <li>▶ 이해 관계자 조언</li> </ul>
<p><b>2단계: 모니터링 계획 가설 개발</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 모니터링 개념적 모델 개발</li> <li>▶ 모니터링 가설 및 과제 정립</li> </ul>
<p><b>3단계: 모니터링 의사 결정 규칙 개발</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 모니터링 결정 룰을 공식화</li> </ul>
<p><b>4단계: 모니터링 계획 수립</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 요구 데이터 선정</li> <li>▶ 모니터링 계획 경계 결정</li> <li>▶ 데이터 수집 방법 결정</li> <li>▶ 데이터 분석 방법 결정</li> <li>▶ 의사 결정 방법 확립</li> <li>▶ 품질 보증 프로젝트 계획 모니터링(QAPPs) 준비</li> </ul>
<p><b>5단계: 모니터링 분석 및 결과 특성화 수행</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 데이터 수집 및 분석 수행</li> <li>▶ 1-4단계에서 개발된 data quality objectives(DQOs) 모니터링에 따른 결과 평가(필요시 데이터 수집 및 분석 재수행)</li> <li>▶ 분석 결과를 의사 결정방법에 따라 평가</li> </ul>
<p><b>6단계: 관리 의사결정 방안 수립</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 모니터링 결과가 의사결정안에 따라 현장활동 성공 평가될 때           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 활동 및 모니터링 종료</li> </ul> </li> <li>▶ 모니터링 결과가 의사결정안에 따라 현장 호라동 성공으로 평가되지 않지만, 긍정적인 방향으로 진행 시           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 활동 및 모니터링 계속</li> </ul> </li> <li>▶ 모니터링 결과가 의사결정안에 따라 현장 활동 성공으로 평가되지 않을 때           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 원인 및 불확실성 분석 수행</li> <li>- 현장 활동 및 모니터링 계획 재검토, 시행</li> </ul> </li> </ul>

■ 1단계: 모니터링 계획 목적 설정

- 일반적으로, 효과적인 모니터링 계획의 개발에 있어서 가장 중요한 요소는 프로젝트 관리자가 명확하고 구체적 모니터링 목적을 확인 하는 것임.

- 
- 적절한 모니터링 목적을 식별하는 것은 일반적으로 활동의 의도된 결과와 사이트에서 그 결과를 달성하기 위해 사용되는 검사 방법을 포함함. 명확한 목적은 실험 설계를 집중하고 가장 유용한 정보가 수집되어 있는지 확인하는데 도움이 될 수 있음.

### ■ 2단계: 모니터링 가설 개발

- 모니터링 가설 개발 DQO(Data quality objective)처리의 문제 배합 단계(1단계)와 유사함 (US EPA, 2000).
- 또는 질문 형태로 “한 사이트 활동은 명시된 목적과 목표에 도달하였는가?” EPA의 모니터링 지침에서 설명한 바와 같은 감시 개념적 모델의 개념을 식별하고 적절한 가설을 구성하는데 도움이 될 수 있음(US EPA, 2004).

### ■ 3단계: 모니터링 의사 결정 규칙 개발

- 모니터링 목적 및 가설이 명시되면, 다음 단계는 목적이 충족되는지 여부를 평가하기 위해 사용되는 특성의 결정 룰을 개발함.
- 의사 결정 규칙의 네가지 주요 요소는 일반적으로 다음과 같음.
  - 매개 변수
  - 개선 활동의 예상되는 결과
  - 활동(행동) 수준
  - 대안 활동

### ■ 4단계: 모니터링 계획 수립

- 모니터링 계획 수립시 고려해야 할 중요 요소들
  - 사이트 활동의 예상 결과
  - 예비 모니터링 결정 규칙
  - 데이터 특성
  - 모니터링 설계 이전 사이트 조사 데이터(데이터 수집 방법)의 적용

### ■ 5단계: 모니터링 분석 및 결과 특성화 수행

- 모니터링 계획을 개발 권장 다음 단계는 분석 결과를 평가하고, 모니터링 DQOs(Data Quality Objectives)데이터 편차 어드레싱, 데이터 수집 및 분석을 포함함.
- 이 시점에서, 프로젝트 관리자는 모니터링 가설 DQOs 및 이전 단계에서 개발 모니터링 결정 규칙과 관련하여 데이터를 평가함.
- 이 단계에서, 프로젝트 관리자는 모니터링을 수정하거나 사이트에서 추가 조치를 취하기 위해 계속, 중지를 호출 할 수 있는 의사 결정 규칙을 구현해야 함.

### ■ 6단계: 관리 의사결정 방안 수립

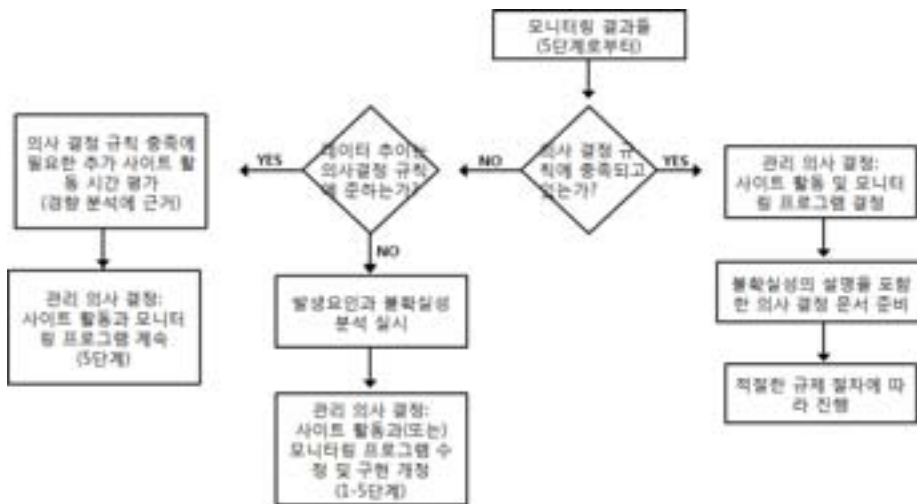
- 데이터 수집, 분석 및 모니터링 QAPP(Quality Assurance Project Plan)에 규정된 특성이 완료되면, 모니터링 결과는 모니터링 목적 및 관정 규칙에 관련된 세가지 결론(그림 IV-가-1)의 한쪽을 향하게 됨.



[그림 IV-가-1] 모니터링 구획, 데이터 수집 및 분석하는 동안 의사결정 경로

○ 그 결론은 다음과 같음

- 모니터링 결정 규칙을 충족(제시된 사이트 활동의 결과는 성공적이었음),
- 데이터는 결정규칙을 충족 함
- 모니터링 결정 규칙에 충족하지 않음(제시하는 사이트 활동 모니터링 결과는 그 목적에 부합하지 않음)



[그림 IV-가-2] 모니터링 결과 관리 의사 결정 경로

#### ④ 피복정화 모니터링 평가(안) 제안

- 현장 사이트에서 물리적 테스트는 퇴적물의 침식 및 퇴적, 지하수 이류 흐름, 입경, 유속 및 유향 등을 포함하여 측정함
- 화학적 테스트는 표층 및 퇴적층 화학적 분석, 생분해성 평가, 공극수 오염물 분석 등을 포함할 수 있음.

- 생물학적 테스트는 독성 물질 생물 축적 및 먹이사슬 효과 결정, 현장에서 생물 군집의 변화를 조사, 독성 생물 검정을 포함 할 수 있음.

[표 IV-가-2] 적용 가능한 모니터링 기법

<p><b>물리적 측정</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 퇴적물 지구물리학적 특성</li> <li>- 수계 물리적 특징 (탁도, TSS 등)</li> <li>- 수심측량 데이터: 처리 전후 수심 비교</li> <li>- Side scan sonar data</li> <li>- Settlement data</li> <li>- Sediment profile camera data</li> <li>- Subbottom profiler data</li> </ul>
<p><b>화학적 측정</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 표층 및 퇴적층 화학적 분석, 생분해성 평가, 공극수 오염물 분석, TOC 분석 등 수행</li> <li>- 시료의 채취 방법: Grab sampler, coring device, 직접 수계 측정, 표층수 채취</li> </ul>
<p><b>생물학적 측정</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 저서 생물종 분석: population size, diversity 평가</li> <li>- 독성 측정: 생물에 대한 오염물의 급성 및 만성 독성 측정</li> <li>- 조직 시료 채취</li> <li>- Caged Fish/ Invertebrate Studies</li> </ul>

[표 IV-가-3] 피복공법 모니터링 방안

모니터링 단계	요소	방법	분석	빈도/위치
피복시공	피복소재 질	피복소재 시료	물성 분석	사용량의 5%
	피복두께 및 범위	수심측량	피복층 두께	기준
		저서 프로파일	피복 면적	초기 시공 전체면적 최종분석
		SPC	피복층 두께	기준 초기 시공 결정된 격자
		Core	피복층 두께 및 물리적 특성 화학적 특성	결정된 격자
	퇴적물 재부유	Plum tracking ADCP	재부유 퇴적물 수계 화학적 분석	5% 시공
	퇴적물 이동	퇴적물시료	퇴적물 화학적 물성	피복경계 근처 퇴적층
	Recolonization	SPC 저서생물군 분석	피복층 두께 Recolonization, population size, diveristy	결정된 격자, 재착생 속도에 따른 빈도
	물리적 격리	저서 프로파일 수심측량	피복층 두께	연1회(특정지역) 매5년, 전체조사
	화학적 격리	Core 필요시, Peeper 도 는 seepage meter	물성 퇴적물, 공극수 화학적 분석	매5년, 결정된 격자
특이 외력 대응	피복 보존	저서 프로파일 SPC Core		태풍 또는 지진 후

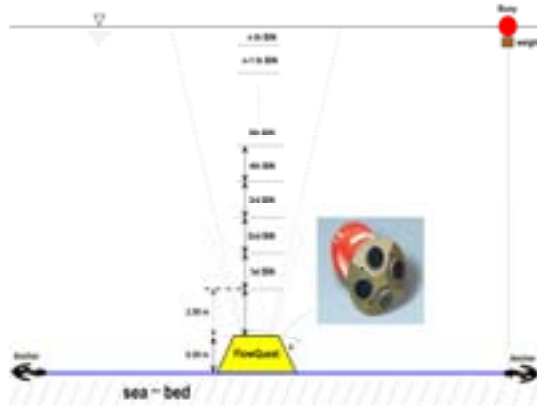
(나) 대상해역 피복효율 분석을 위한 사전 모니터링 수행

① 물리화학적 모니터링 조사

② 현장 유속 및 유향 조사 (물리학적 조사)

■ 관측개요





[그림 IV-가-3] 조류 정점도 및 설치 모식도

- 조석관측과 동일한 정점에서의 조류 특성을 파악하기 위하여 다층 도플러 유속계 (Flow-Quest 600kHz를 이용하여 25시간 연속 조류관측을 수행하였음. 관측개요를 표 IV-가-4에 제시하였으며, 관측 위치를 그림 IV-가-3에 도시하였음.

[표 IV-가-4] 연속 조류관측 개요

구분	관측위치	관측기간	수심 (m)	관측기기
PC1	35° 07' 14.5" N 129° 03' 55.9" E	2015. 3. 21~3. 22	12	FlowQuest 600kHz (LinkQuest INC., USA)

### ■ 관측 방법

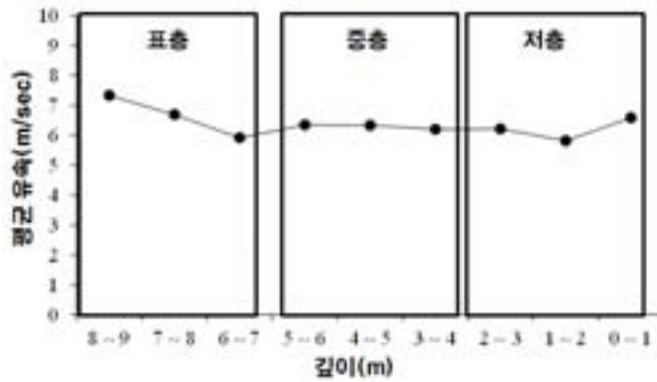
- 조류 관측은 조류의 수직적 특성을 보다 정밀하게 파악하기 위하여 수직적으로 최소 1.0m 간격으로 유향 및 유속자료를 획득할 수 있는 FlowQuest(Acoustic Current Profiler, LinkQuest INC., USA)를 사용하였음. FlowQuest는 음파의 도플러 효과를 이용하여 수립자의 이동속도를 측정하는 장비로서 저층 계류, 상층 부이 계류, 이동선박 장착 등 여러 형태의 관측이 가능함. 본 관측에서는 어로활동에 의한 기기유실을 최소화하기 위하여 기기를 프레임에 장착하여 저층계류 후 잠수부가 프레임의 안착상태를 직접 육안으로 확인하였음. 장비제원은 표 IV-가-5에 제시하였음.

[표 IV-가-5] 유속계 제원

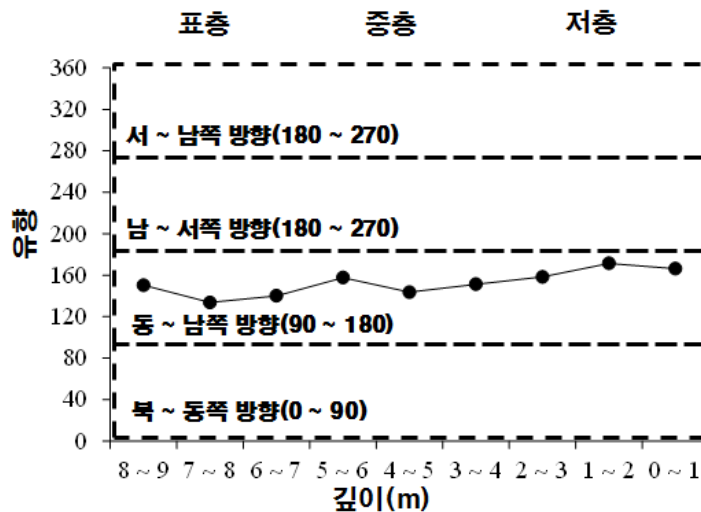
기기명	관측항목	측정범위	정확도	해상도	제조사
FlowQuest 600kHz	유속	0~500cm/s	±0.5cm/s	0.1cm/s	LinkQuest INC., USA
	유향	0~360°	±2°	0.01°	

### ■ 분석 방법 및 결과

- 연속조류 관측 결과는 분석 후 유향/유속별 출현을 및 항류와 시계열을 작성하였고, 조류 분석은 Canada 해양연구소의 M.G.G Foreman에 의해 개발된 IOS(Institute of Ocean Science) Tidal Package를 사용하여 실시하였고, 관측된 유속 및 유향을 대상으로 IOS Tidal Package manual에서 제시하고 있는 전처리과정을 거쳐 입력 자료를 생성한 후, IOS Tidal Package를 적용하였음.
- 그림 IV-가-4에 PC1 정점의 유속 을 나타내었으며, 그림 IV-가-5에 유향을 나타냄.



[그림 IV-가-4] PC1 정점의 평균 유속 (표층, 중층, 저층)



[그림 IV-가-5] PC1 정점의 유향(표층, 중층, 저층)

### ■ 통계분석

- 관측된 유동자료를 대상으로 유향에 대하여 16방위로, 유속에 대해서 평균 범위에서 유속/유향의 출현율을 계산하였음. PC1 정점의 표층, 중층 및 저층에서의 유속을 표 IV-가-6에 나타냄.
- PC1 정점 표층의 경우 평균유속은 창조시에 6.0cm/sec, 낙조시에 7.1cm/sec로 나타났고, 중층의 경우 창조시에 6.4cm/sec, 낙조시에 6.3cm/sec로 나타났으며, 저층의 경우 창조시에 7.5cm/sec, 낙조시에 7.1cm/sec로 나타났음.

[표 IV-가-6] PC1 정점 유속 통계분석 결과

(단위 : cm/sec)

정점		관측기간	조시	유속(cm/sec)
				평균
PC1	표층	2015. 3. 21~3. 22	창조	6.0
			낙조	7.1
	중층		창조	6.4
			낙조	6.3
	저층		창조	7.5
			낙조	7.1

㊤ 해수 및 퇴적물 조사(화학적 조사)

■ 과업 개요

- 지속가능 해양오염퇴적물 정화기술개발 연구대상지의 피복 전 저서 퇴적물의 오염특성 양상을 파악하여 피복 후 저서 퇴적물 변화를 파악하는 화학적 자료를 확보하고자 함.

[표 IV-가-7] 부산 감만항 해수 및 표층 퇴적물 조사지점별 위치좌표

No.	Latitude	Longitude
St.1	35° 7.169'N	129° 3.813'E
St.2	35° 7.168'N	129° 3.884'E
St.3	35° 7.169'N	129° 3.944'E
St.4	35° 7.223'N	129° 3.815'E
St.5	35° 7.223'N	129° 3.879'E
St.6	35° 7.224'N	129° 3.943'E
St.7	35° 7.277'N	129° 3.813'E
St.8	35° 7.278'N	129° 3.879'E
St.9	35° 7.277'N	129° 3.945'E
St.10(대조구)	35° 6.375'N	129° 3.594'E



<부산 K항 해수 및 표층 퇴적물 조사 지점도>



<부산 K항 깊이별 퇴적물 조사 지점도>

[그림 IV-가-6] 부산 감만항 해수 및 표층 퇴적물 조사지점도

○ 해수 및 저서 표층 퇴적물 조사

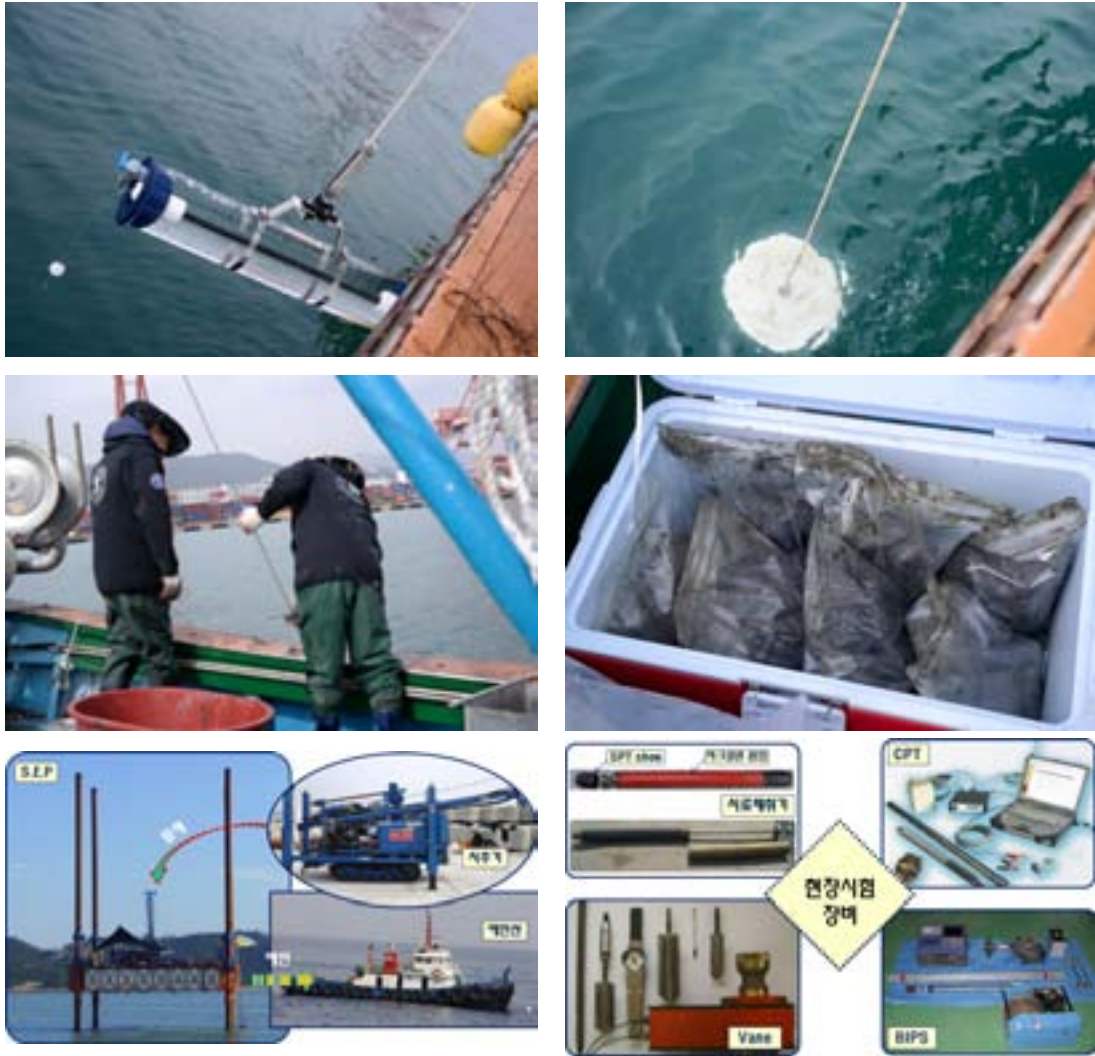
- 해수 수질 : 표층(표층으로부터 수심 50~100 cm 지점) 및 저층 채수 (퇴적물로부터 100~ 200cm 지점)
- 저서 표층 퇴적물: 그랩 샘플러를 이용 표층 퇴적물 채취
- 저서 퇴적물: 깊이별 퇴적물 채취(코어를 이용): -2 cm, -5 cm, -10 cm, -15 cm, -20 cm, -30 cm의 깊이의 퇴적물을 이용하여 분석함. 단, 지점3의 샘플은 분석 할 수 없었음.

■ 조사방법

- 2015년 2월 25일과 5월 27일 2회에 걸쳐 피복 대상지와 대조구로 구분하여 부산 K항에서 해수 및 퇴적물 현장조사를 수행하였으며, 해수 샘플링을 위해 채수기를 사용하였으며, 또한, 현장에서 그랩 샘플러(Van Veen Grab)를 이용하여 퇴적물 시료를 채취하여 실험실로 운반하였음. 그리고 깊이별 퇴적물인 경우 시추기를 이용하여 아크릴관 삽입 후 시료채취기를 이용하여 깊이 약 1m 까지 퇴적물을 채취하였음.
- 해수인 경우 표층 해수는 수면으로부터 약 50 ~100 cm 정도 깊이의 해수를 채취했고, 저층 해수인 경우는 퇴적물로부터 약 100 ~ 200 cm 위의 해수를 채취 하였음. 또한 표

층 퇴적물은 Van Veen Grab 퇴적물 채취기를 이용하여 조사 지점의 표층 퇴적물을 채취하였음. 운반된 시료들은 분석 전까지 냉장 보관하였음.

- 해수 수질 분석항목:pH, 수온, 염분, 투명도, SS, DO, COD, T-N, T-P, 중금속(Ni, Zn, Cu, Pb, Cd, As, Cr<sup>6+</sup>), PAHs, PCBs (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)
- 퇴적물 분석항목 :pH, 함수율, IL, AVS, COD, TOC, T-N, T-P, 중금속(Ni, Zn, Cu, Pb, Cd, As, Cr), PAHs, PCBs (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)

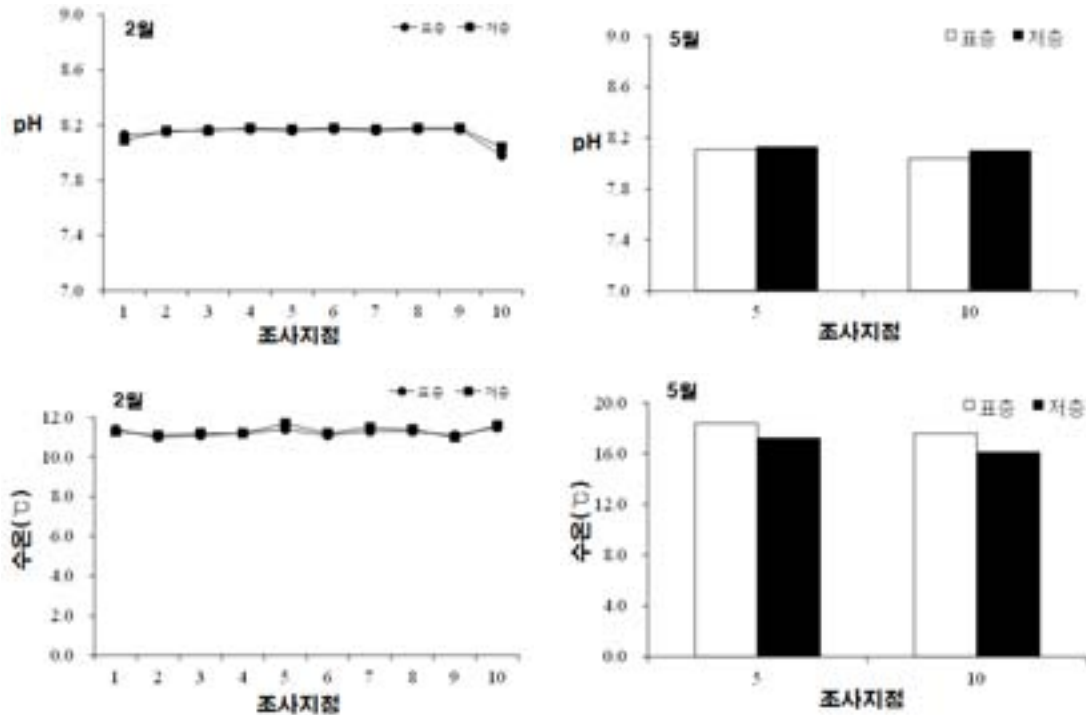


[그림 IV-가-7] 부산 피복 대상지 해수 및 퇴적물 현장조사

### ■ 피복 대상지의 해수 수질 조사(2월)

#### □ pH와 수온

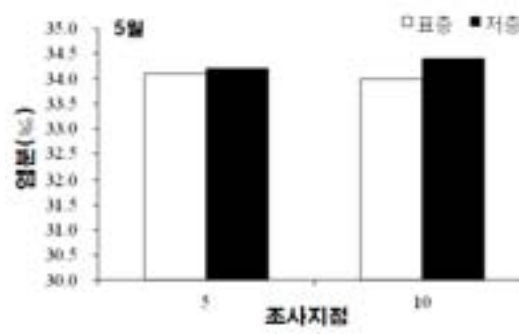
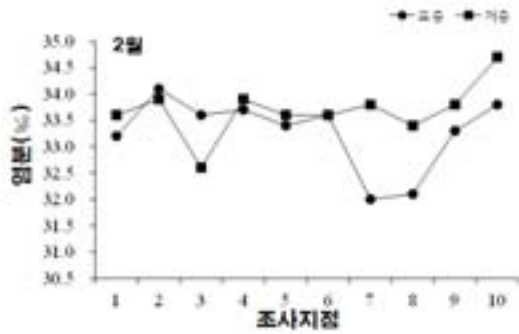
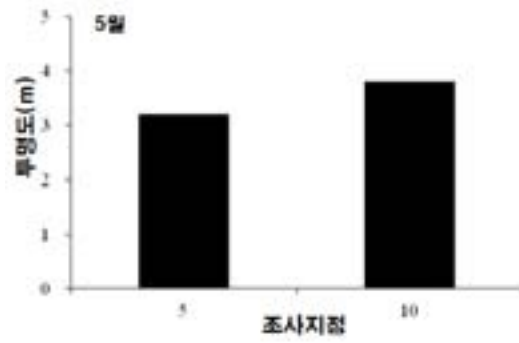
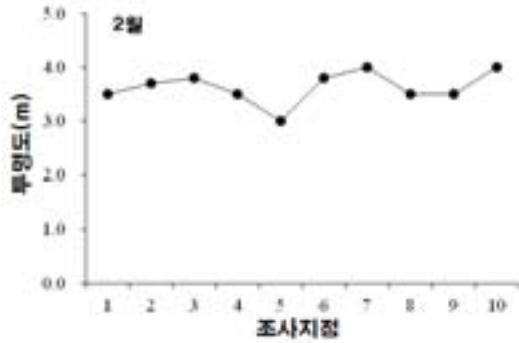
- 현장 피복 대상지 해수의 pH를 보면 모든 지역에서 약 8.0에서 8.2 사이의 pH 값을 보이고 있음. 또한, 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 측정한 결과를 봐도 큰 변화는 보이지 않음.
- 피복 전(2월)의 현장 피복 대상지 해수의 수온 변화를 보면 모든 지역에서 약 11에서 12℃ 사이의 수온 값을 보인 반면, 피복 후(5월)에 측정한 수온을 보면 16에서 18℃ 사이의 수온 형성을 보이고 있음을 알 수 있음. 이러한 수온 변화의 큰 이유는 계절적인 변화 때문이라고 판단됨.



[그림 IV-가-8] 2015년 2월(피복 전)과 5월(피복 후) 조사 지점 해수의 pH와 수온 변화

□ 투명도와 염분

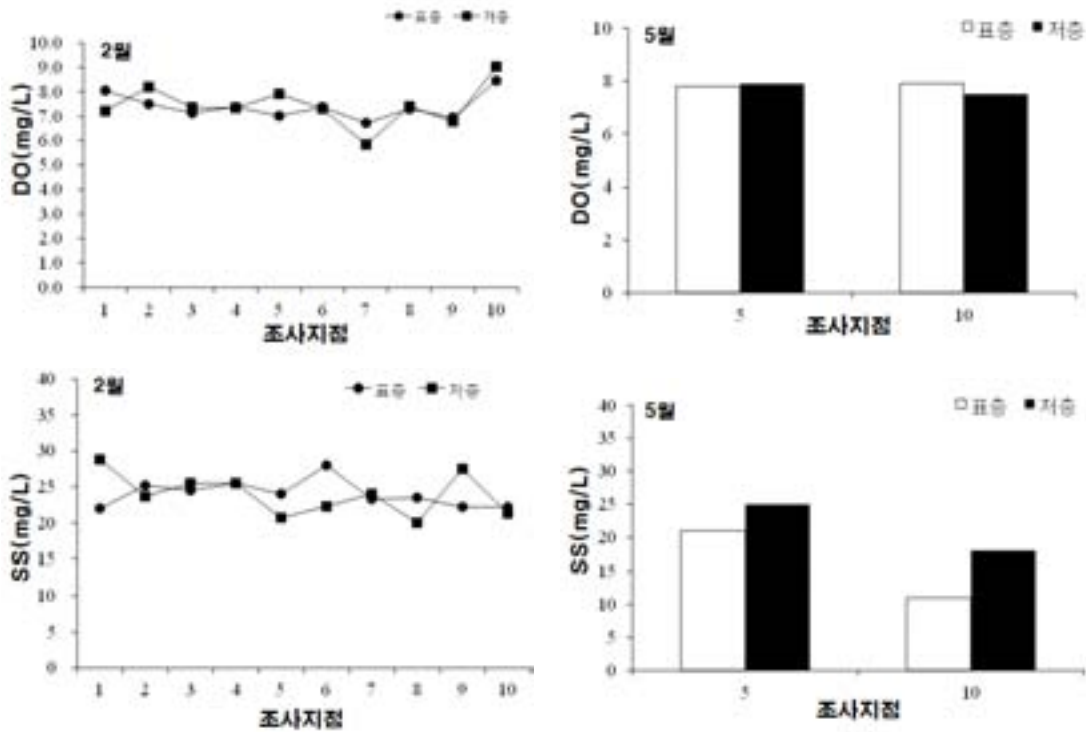
- 피복 전(2월) 현장 피복 대상지 해수의 투명도를 보면 모든 지역에서 약 3.0 ~ 4.0 m 사이의 투명도 값을 보이고 있음. 또한, 피복 후(5월) 측정된 결과를 봐도 큰 변화는 보이지 않음.
- 조사 지점에서 염분인 경우, 피복 전(2월) 피복 대상지 염분 변화를 보면 조사 지점 간 다소 차이를 보이고 있지만 대체적으로 모든 지역에서 약 32.0 ~ 35.0 ‰ 사이의 염분 값을 보임. 피복 후(5월)에 측정된 염분은 5 지점과 10 지점에서 비슷한 약 34.0 ~ 34.5 ‰ 사이의 염분 형성을 보이고 있음을 알 수 있음. 조사 지점간 다소 차이는 있지만 표층보다 저층에서 다소 높은 염분 특성을 보이고 있음.



[그림 IV-가-9] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 조사 지점 해수의 투명도와 염분 변화

□ 용존 산소(DO)와 부유고형물(SS)

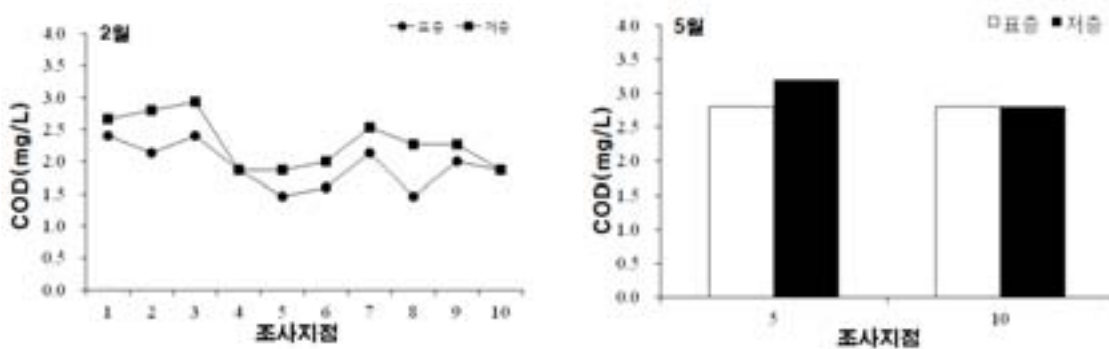
- 피복 전(2월) 피복 대상지 해수의 DO(용존산소)를 보면 모든 지역에서 약 7.0 ~ 9.0 mg/L 사이의 DO 값을 보이고 있음. 또한, 피복 후(5월) 측정된 결과를 봐도 표층과 저층에서 모두 8.0 mg/L의 값을 보이고 있어 피복 전(2월)과 비슷한 값을 보이고 있는 것을 알 수 있음.
- 조사 지점에서 SS(부유고형물)인 경우, 피복 전(2월) 피복 대상지에서는 조사 지점 간 다소 차이를 보이고 있지만 대부분 모든 지역에서 약 20.0 ~ 30.0 mg/L 사이의 SS 값을 보이고 있음. 피복 후(5월)에 측정된 SS 값을 보면 피복 지점인 5지점(20.0 ~ 25.0 mg/L)이 대조군인 10지점(10.0 ~ 20.0 mg/L)보다 다소 높은 SS 농도를 보이고 있음.



[그림 IV-가-10] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 조사 지점 해수의 DO와 SS 변화

□ 화학적 산소요구량(COD)

- 조사 지점에서 COD(화학적 산소요구량)인 경우, 피복 전(2월) 피복 대상지에서 약 1.5에서 3.0 mg/L 사이의 COD 값을 보이고 있음. 게다가 표층보다 저층에서 높은 농도의 COD 분포 경향을 보이고 있음. 피복 후(5월)에 측정된 COD 값을 보면 피복 지점(5지점)과 대조군(10지점)(2.5 ~ 3.0 mg/L)에서 서로 비슷한 값을 보이고 있음.



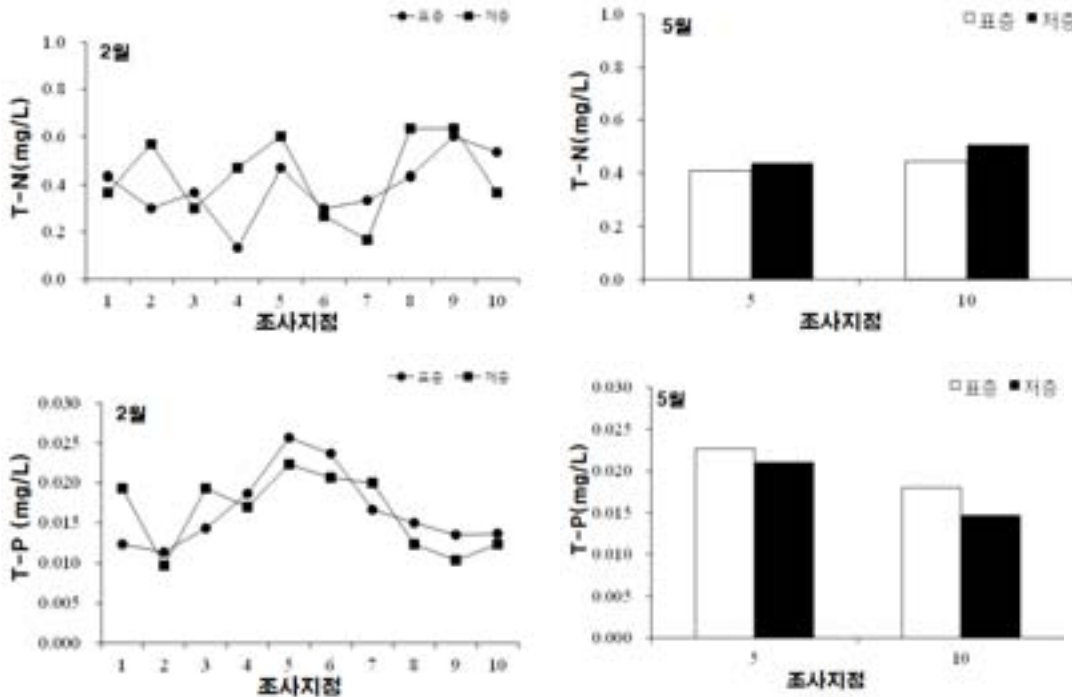
[그림 IV-가-11] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 조사 지점 해수의 COD 변화

□ 총질소(T-N)와 총인(T-P)

- 피복 전(2월) 피복 대상지 해수 T-N(총 질소)를 보면 모든 지역에서 약 0.1 ~ 0.6 mg/L 사이의 T-N 값을 보이고 있음. 또한, 피복 후(5월) 측정된 결과를 봐도 표층과 저층에서 모두 0.4 ~ 0.5 mg/L의 값을 보이고 있어 피복 전(2월)과 비슷한 값을 보이고 있는 것을 알 수 있음.



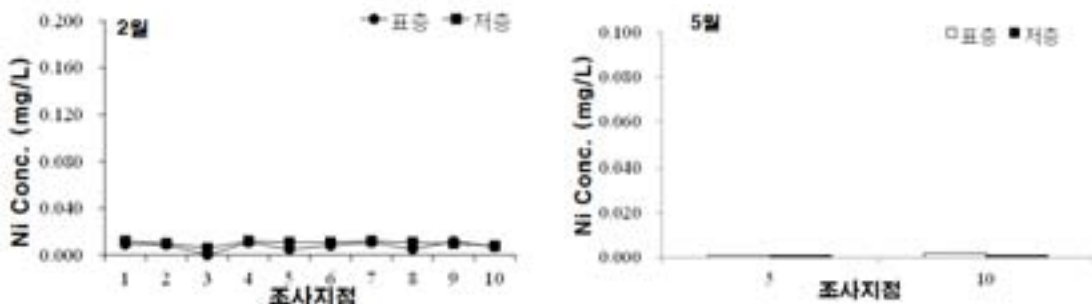
- 조사 지점에서 T-P(총 인)인 경우, 피복 전(2월) 피복 대상지에서는 조사지점 5,6에서 높은 값을 보이고 있어 조사 지점 간 차이를 보이고 있지만 대부분 모든 지역에서 약 0.01에서 0.025 mg/L 사이의 T-P 값을 보이고 있음. 피복 후(5월)에 측정된 T-P 값을 보면 피복 대상지인 5지점(0.02 ~ 0.023 mg/L)과 대조군인 10지점(0.015 ~ 0.018 mg/L)에서 다소 차이를 보이고 있음.

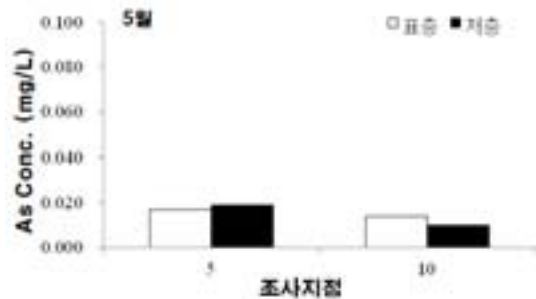
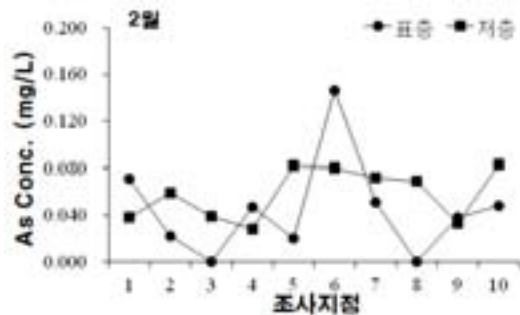
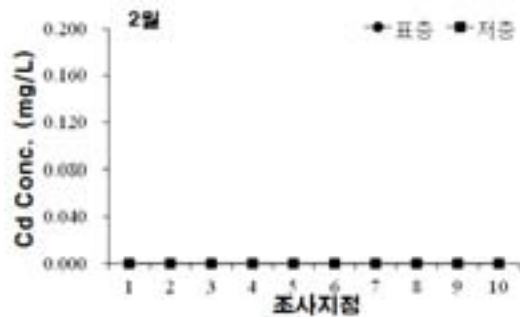
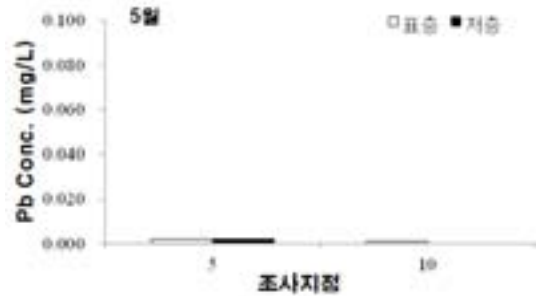
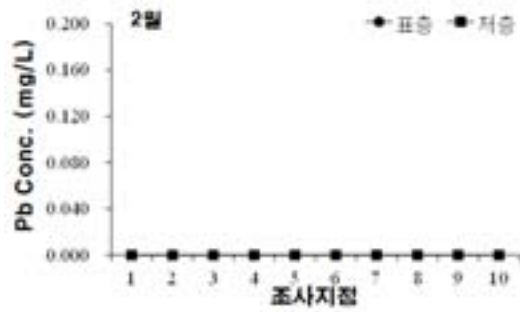
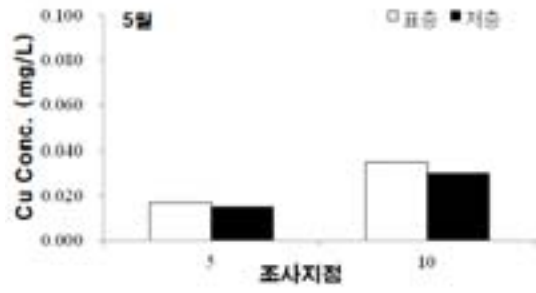
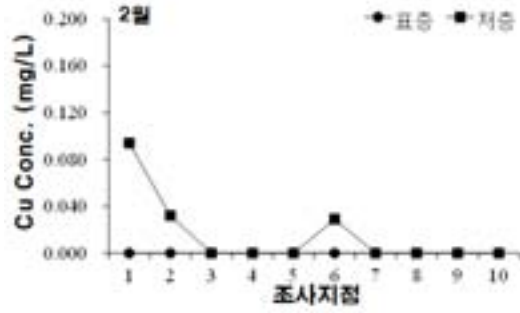
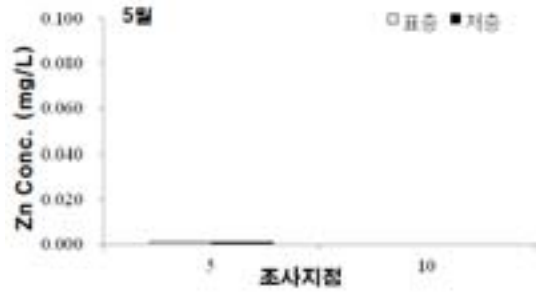
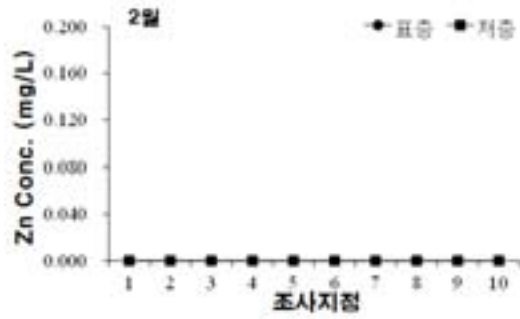


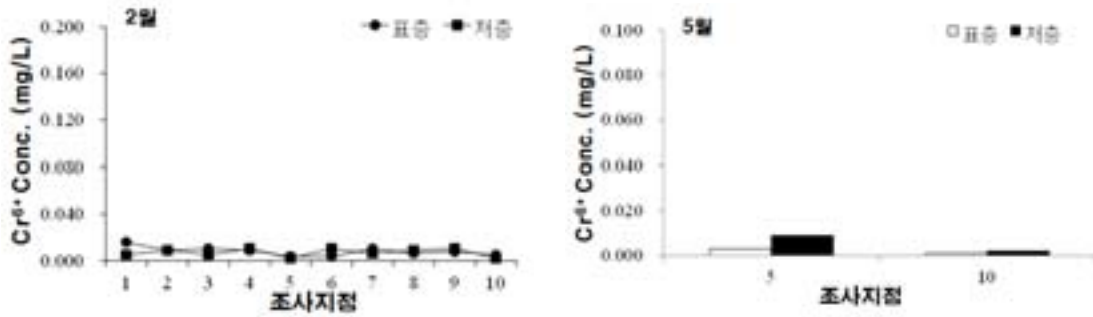
[그림 IV-가-12] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 조사 지점 해수의 T-N과 T-P 변화

□ 중금속

- 피복 전(2월) 피복 대상지 내 해수 중 중금속(Ni, Zn, Cu, Pb, Cd, As, Cr<sup>6+</sup>) 농도를 분석한 결과를 보면 Ni, Zn, Pb, Cd, Cr<sup>6+</sup> 등은 모두 아주 미량(기준치 이하)의 농도 분포를 보이고 있음.
- 반면 Cu인 경우는 지점 1, 2, 6에서 각각 0.094 mg/L, 0.032 mg/L, 0.029 mg/L의 값을 보이고 있어 해수 내 Cu 기준치 0.020 mg/L을 초과하고 있음을 알 수 있음.
- As인 경우는 연구 조사 지점 중 많은 곳에서 기준치(0.050 mg/L)보다 높게 나타나고 있는 특성을 보이고 있음. 하지만, 피복 후(5월) 조사된 피복지(5지점)와 대조군(10지점)에서 해수의 As 농도를 보면 모두 기준치 이하의 농도를 보이고 있는 것을 알 수 있음.



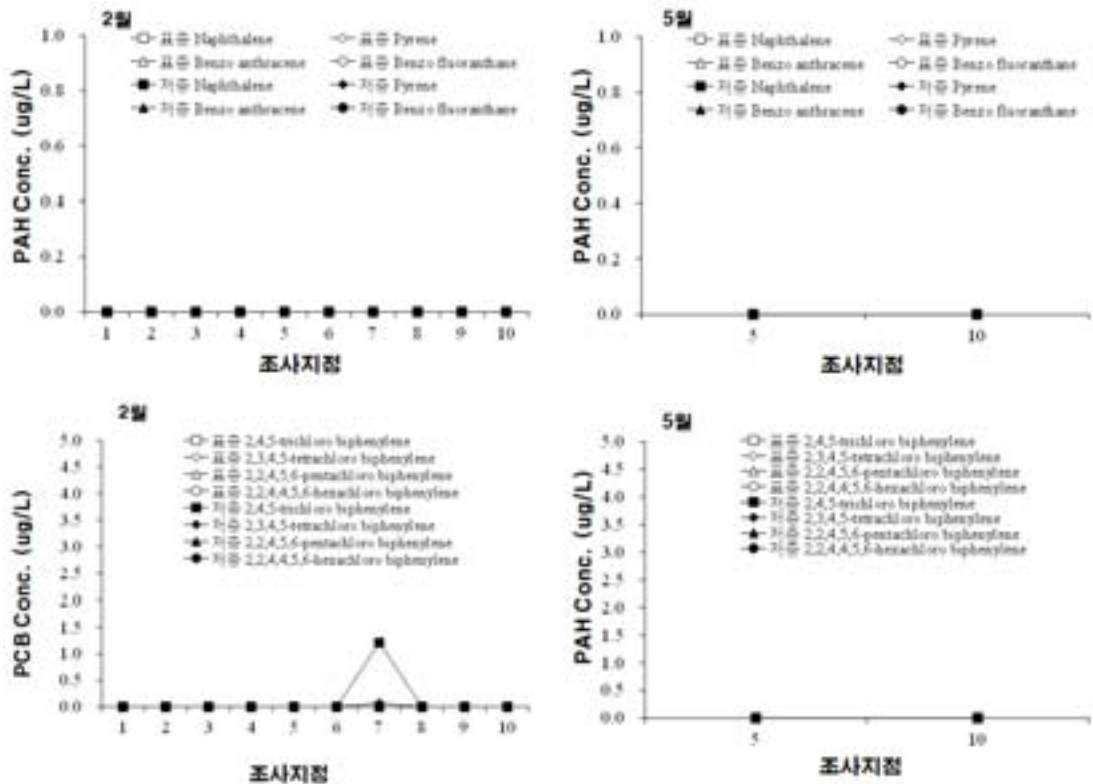




[그림 IV-가-13] 2015년 2월과 5월 현장 피복 대상 조사 지점 해수중 중금속들의 농도 변화

□ 유기오염물질(PCB, PAH)

- 피복 전(2월) 조사지점에서 분석한 PAHs를 보면 전 조사지역에서 PAHs가 검출되지 않고 있으며 피복 후(5월) 결과에서도 PAHs는 검출되지 않고 있음.
- 2월 조사지점에서 PCBs인 경우, 지점 7 저층에서 2,4,5-trichlorobiphenyl(1.21 ug/L)과 2,3,4,5-tetrachlorobiphenyl(0.07 ug/L)를 빼고서는 모든 조사지역에서 불검출을 나타내고 있음. 피복 후(5월) 피복지점(지점5) 및 대조군(10지점)에서는 PCBs는 검출되지 않았음.



[그림 IV-가-14] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 지점 해수 중 유기오염물질(PAHs, PCBs)의 농도 변화

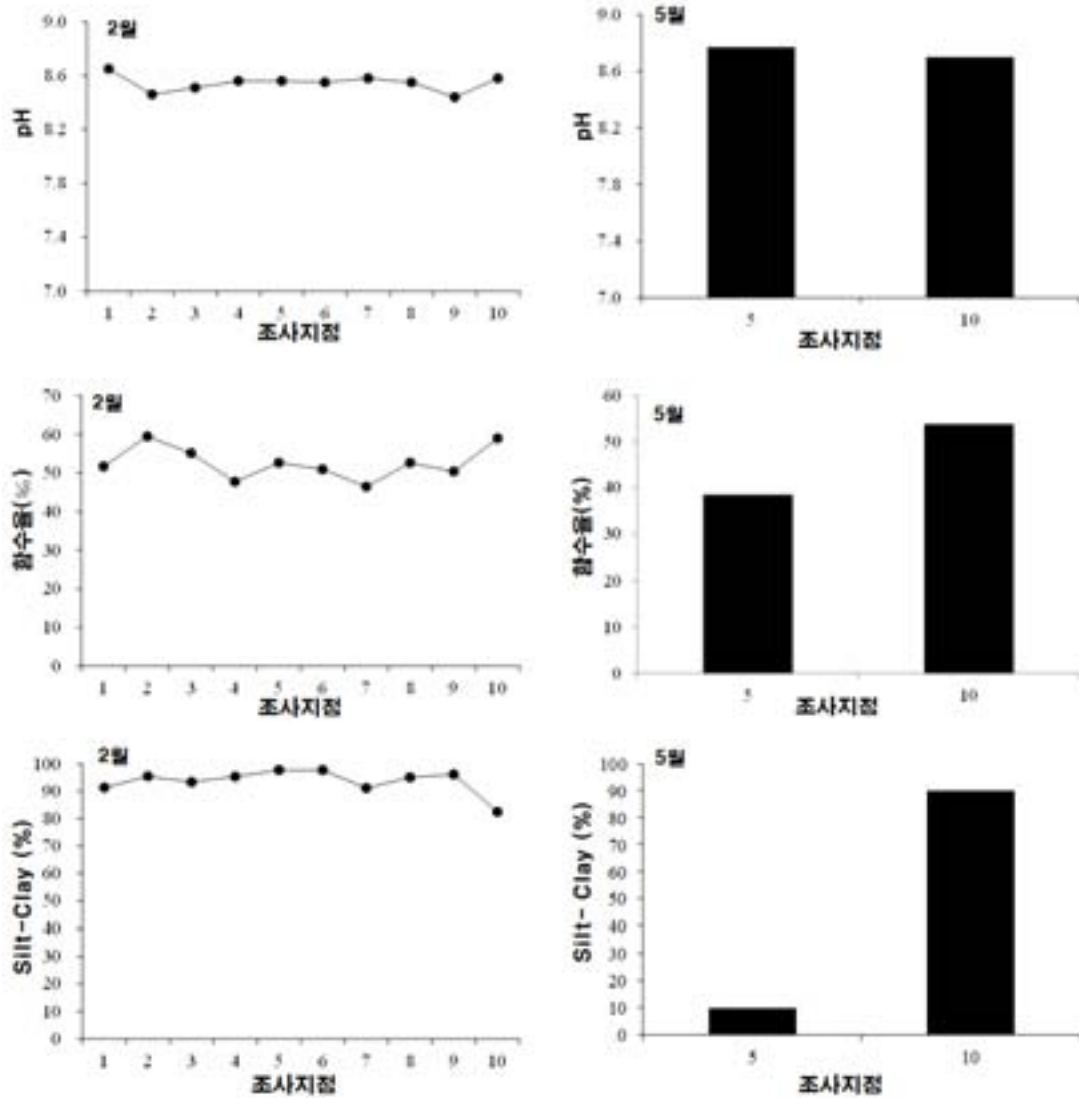
■ 피복 대상지의 표층퇴적물 조사

□ pH와 함수율 및 입도

- 현장 피복 대상지 표층 퇴적물의 pH를 보면 조사 지역에서 약 8.3 에서 8.7 사이의 약 알

칼리성의 특성을 보이고 있음. 또한, 현장피복 후(5월) 측정된 결과를 봐도 약 8.7의 값을 보이고 있어 피복 전(2월)과 비슷한 값을 보이고 있는 것을 알 수 있음.

- 조사 지점에서 함수율인 경우, 피복 전(2월) 조사지점에서는 대부분 50~60%의 값을 보이고 있음. 한편 현장 피복 후(5월) 조사한 결과를 보면, 피복지(지점 5)에서는 약 41%의 함수율을 보이고 있어 피복 전(2월)과 비교하면 함수율이 다소 낮아진 결과를 보이고 있음. 이러한 결과는 피복에 따른 함수율이 낮아진 결과로 판단됨. 그러나 대조군(10지점)에서는 피복 전(2월)과 비슷한 결과를 보이고 있음.

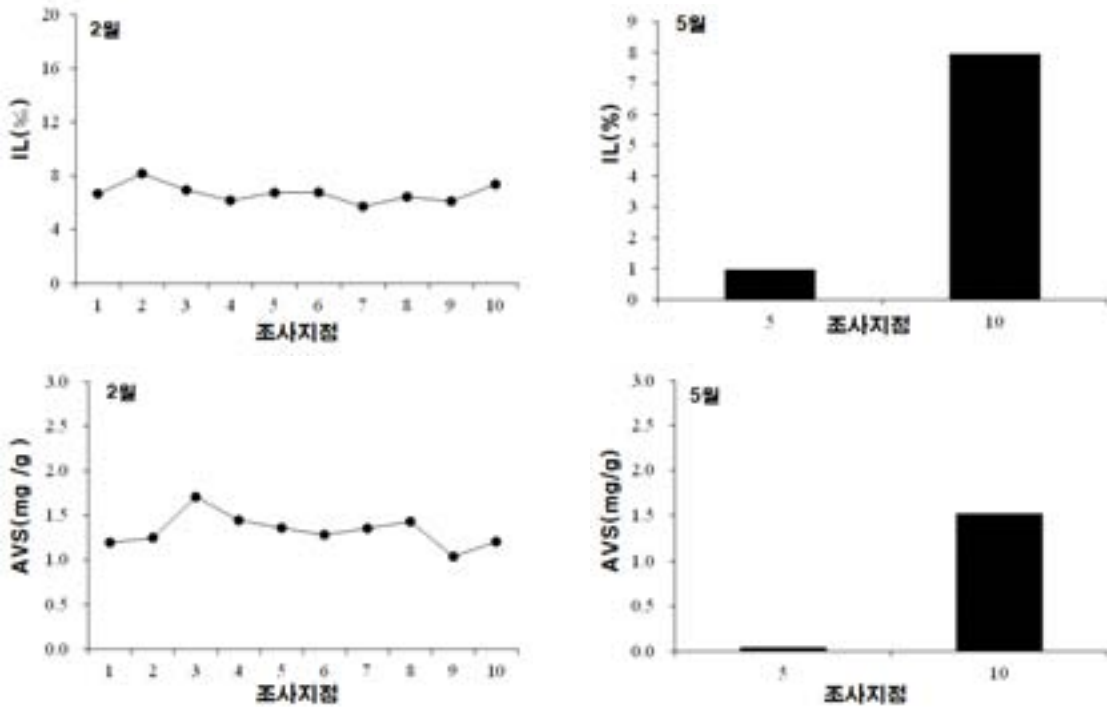


[그림 IV-가-15] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 지점 표층퇴적물의 pH와 함수율 및 입도 특성

#### □ 강열감량(IL)와 산 휘발성 황화물(AVS)

- 피복 전(2월) 피복 대상지 표층 퇴적물의 IL(강열감량)를 보면 조사 지점 간에서 약 7.0 ~ 9.0 % 사이의 특성을 보이고 있음. 한편, 현장 피복 후 (5월) 측정된 결과를 보면, 대조군인 10지점(7.9%)과 달리 피복지 5지점(0.9%)에서는 2월보다 IL 값이 낮아진 경향을 보이고 있음.
- 조사 지점에서 AVS(산 휘발성 황화물)농도인 경우, 피복 전(2월) 현장 피복 대상지에서는 대부분 1.0~1.7 mg/g의 값을 보이고 있음. 한편 피복 후(5월) 조사한 결과를 보면 피

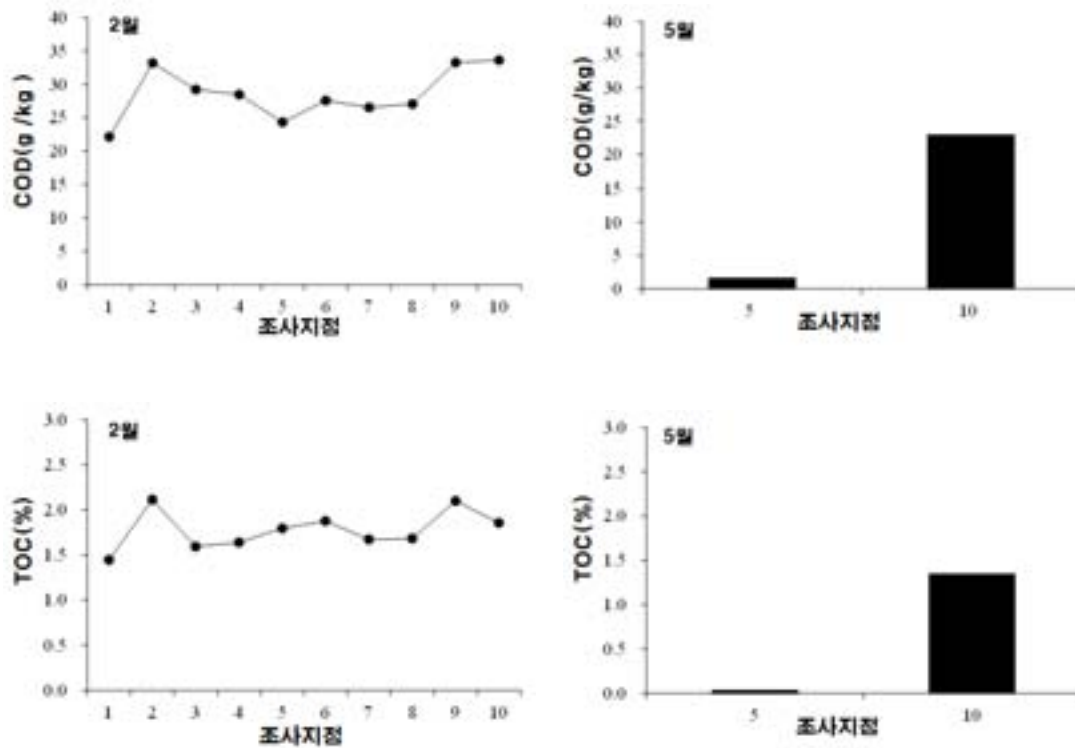
복지점(지점 5)에서는 약 0.04 mg/g의 AVS 농도를 보이고 있어 2월 달 결과 및 5월의 대조군인 지점 10(1.5 mg/g)과 비교해도 큰 차이를 보이고 있음.



[그림 IV-가-16] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 지점 표층 퇴적물의 IL와 AVS

□ 화학적산소요구량(COD)와 총 유기탄소(TOC)

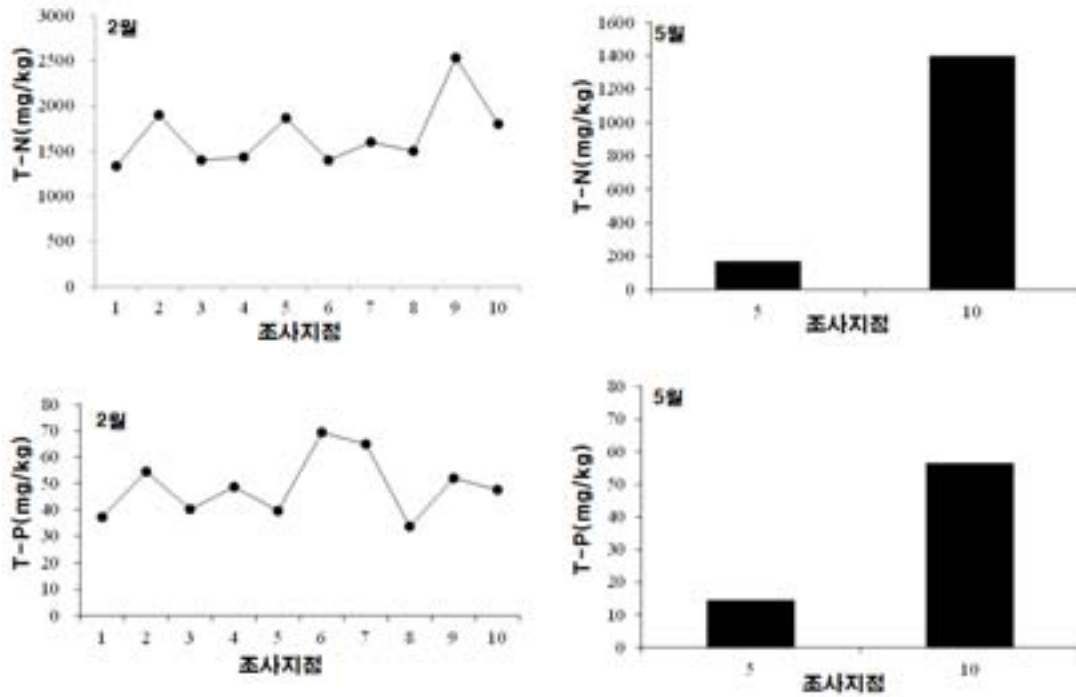
- 피복 전(2월) 표층 퇴적물의 화학적 산소요구량(COD)를 보면 조사 지점 간에서 약 20.0 ~ 35.0 g/kg 의 농도 특성을 보이고 있음. 1지점이 낮은 농도를 보인 반면 지점 2, 9, 10 지점에서 높은 농도를 보이고 있음. 한편 피복 후(5월) 측정된 결과를 보면, 10지점(23 g/kg)과 달리 피복지점(5지점)(1.7 g/kg)에서는 2월보다 COD 농도 값이 낮아진 경향을 보이고 있음.
- 피복 전(2월) 조사 지점에서 총 유기탄소(TOC)농도인 경우, 약 1.5 ~ 2.2%의 농도를 보이고 있음. 한편 피복 후(5월) 조사한 결과를 보면 피복지점(지점 5)에서는 약 0.04% 의 TOC을 보이고 있어 피복 전(2월)과 비교하면 큰 차이를 보이고 있음.



[그림 IV-가-17] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 피복 대상 지점 표층 퇴적물의 COD와 TOC 변화

□ 총질소(T-N)와 총인(T-P)

- 피복 전(2월) 표층 퇴적물 조사지점의 총 질소(T-N)을 보면 조사 지역에서 약 1300 ~ 1900 mg/kg 의 농도 특성을 보이고 있음. 특히 9지점이 가장 높은 농도를 보였음. 한편, 피복 후(5월) 측정된 결과를 보면, 대조군 지점인 10지점(1400 mg/kg)과 달리 피복지점(5 지점)(170 mg/kg)에서는 2월보다 T-N 농도 값이 매우 낮아진 경향을 보이고 있음.
- 피복 전(2월) 조사 지점에서 총 인(T-P)농도인 경우, 약 38 ~ 70 mg/kg의 값을 보이고 있음. 또한 변화특성을 보면 6, 7 지점에서 높은 농도를 보이고 있고 지점 8에서 가장 낮은 농도를 보이고 있음. 한편 현장 피복 후(5월) 조사한 결과를 보면 피복지점(지점 5)에서는 약 14.5 mg/kg의 함수율을 보이고 있어 피복 전(2월)과 비교하면 큰 차이를 보이고 있음.



[그림 IV-가-18] 2015년 2월과 5월 현장 피복 대상 지점 표층 퇴적물의 T-N과 T-P 변화

□ 중금속

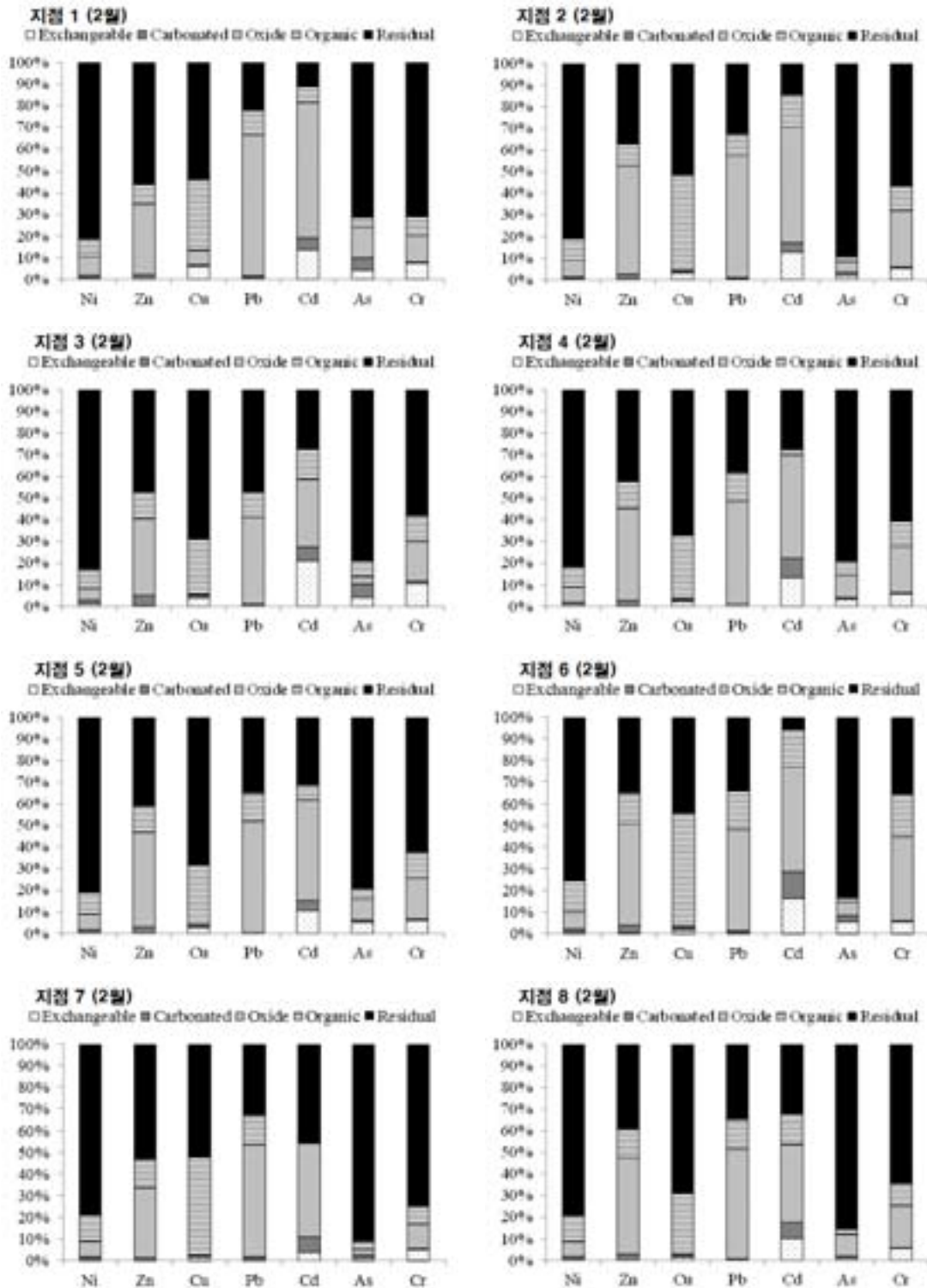
[표 IV-가-8] 2015년 2월과 5월 현장 피복 대상 지점 표층 퇴적물 중 중금속들의 총농도 변화

지점	2015년 2월 (mg/kg)							2015년 5월 (mg/kg)						
	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Cr	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Cr
1	23.4	123.6	57.3	19.7	0.4	13.5	34.0	-	-	-	-	-	-	-
2	30.5	307.5	92.0	48.5	0.7	26.8	44.8	-	-	-	-	-	-	-
3	17.5	130.3	62.1	26.5	0.4	9.7	23.7	-	-	-	-	-	-	-
4	29.3	231.5	91.6	55.5	0.6	21.6	43.2	-	-	-	-	-	-	-
5	26.5	233.1	74.8	39.7	0.4	22.7	41.3	5.0	38.1	8.7	6.1	0.2	4.4	7.4
6	28.4	300.8	89.6	95.3	0.7	19.9	49.4	-	-	-	-	-	-	-
7	34.1	182.5	76.1	30.0	0.6	13.6	49.8	-	-	-	-	-	-	-
8	28.4	242.9	80.0	42.3	0.7	21.6	48.6	-	-	-	-	-	-	-
9	30.2	265.2	86.7	124.9	1.2	29.8	88.1	-	-	-	-	-	-	-
10	28.2	211.4	88.5	42.2	0.4	23.5	48.2	30.3	199.3	93.9	32.2	0.7	24.9	39.0

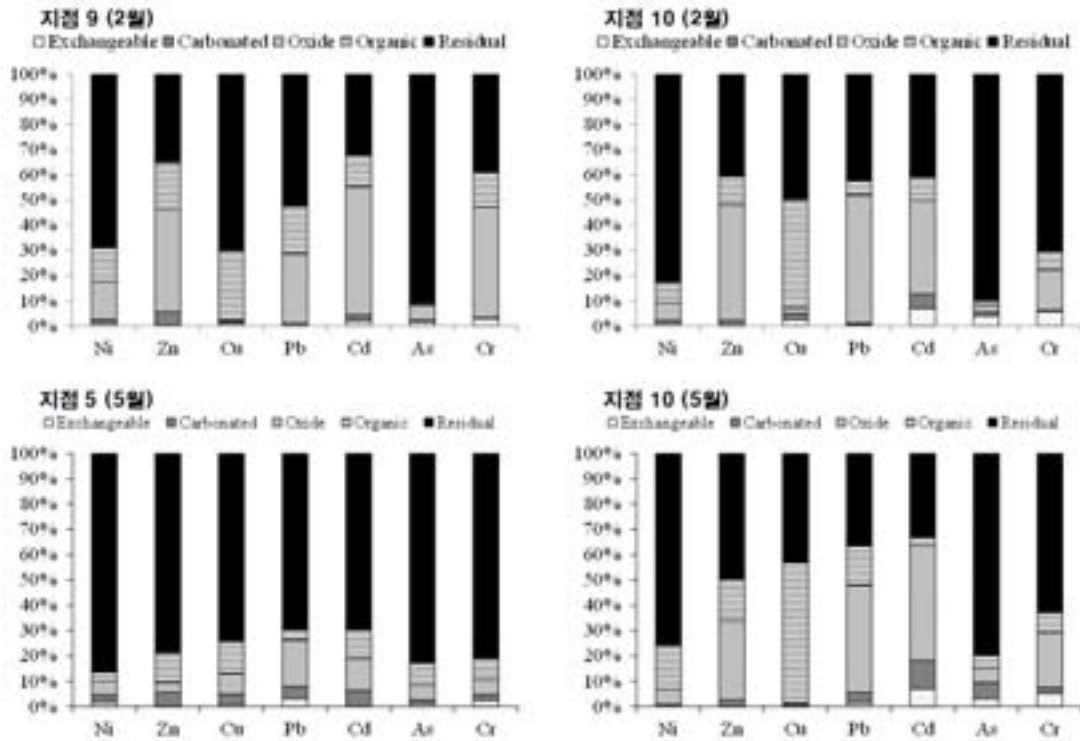
- 피복 전인 2015년 2월 조사 지점간 총 중금속량을 분석한 결과 중금속 별 기준치1을 초과하는 지점이 다수 발견되었음.
- 중금속 종류별 총량을 비교하면 아연(Zn)이 가장 높은 농도 분포를 보이고 있고, 구리(Cu), 납(Pb), 크롬(Cr), 니켈(Ni), 비소(As), 카드뮴(Cd)순으로 농도가 낮아지는 경향을

보이고 있음.

- 지점별 오염 상태를 보면 지점6과 지점9에서 다른 조사 지점보다 높은 농도로 다양한 중금속으로 오염된 것을 알 수 있었음.
- 피복 후(5월) 피복지(조사지점5)의 중금속별 농도를 보면 피복 전(2월)에 비해 낮은 농도를 나타내고 있는 것을 알 수 있음. 하지만 대조군에서는 피복 전(2월)이나 피복 후(5월)에서의 중금속 농도는 비슷한 경향을 나타내고 있음.



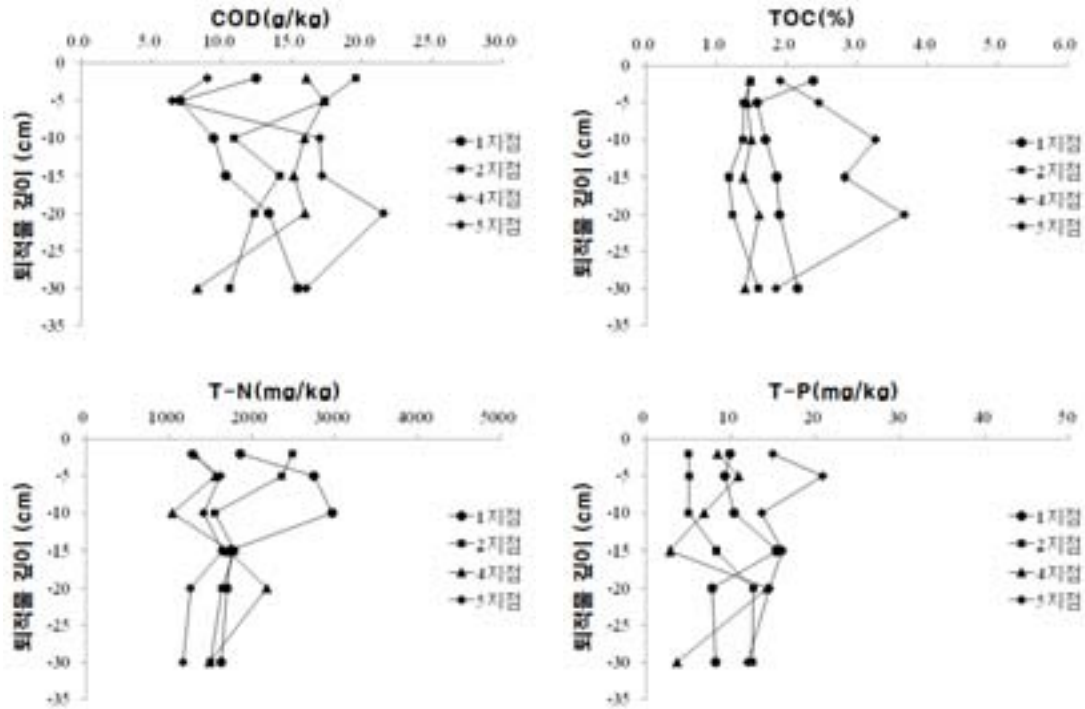




[그림 IV-가-19] 2015년 피복 전(2월)과 피복 후(5월) 퇴적물 중 중금속 존재비 변화 특성

□ 유기오염물질(PCB, PAH)

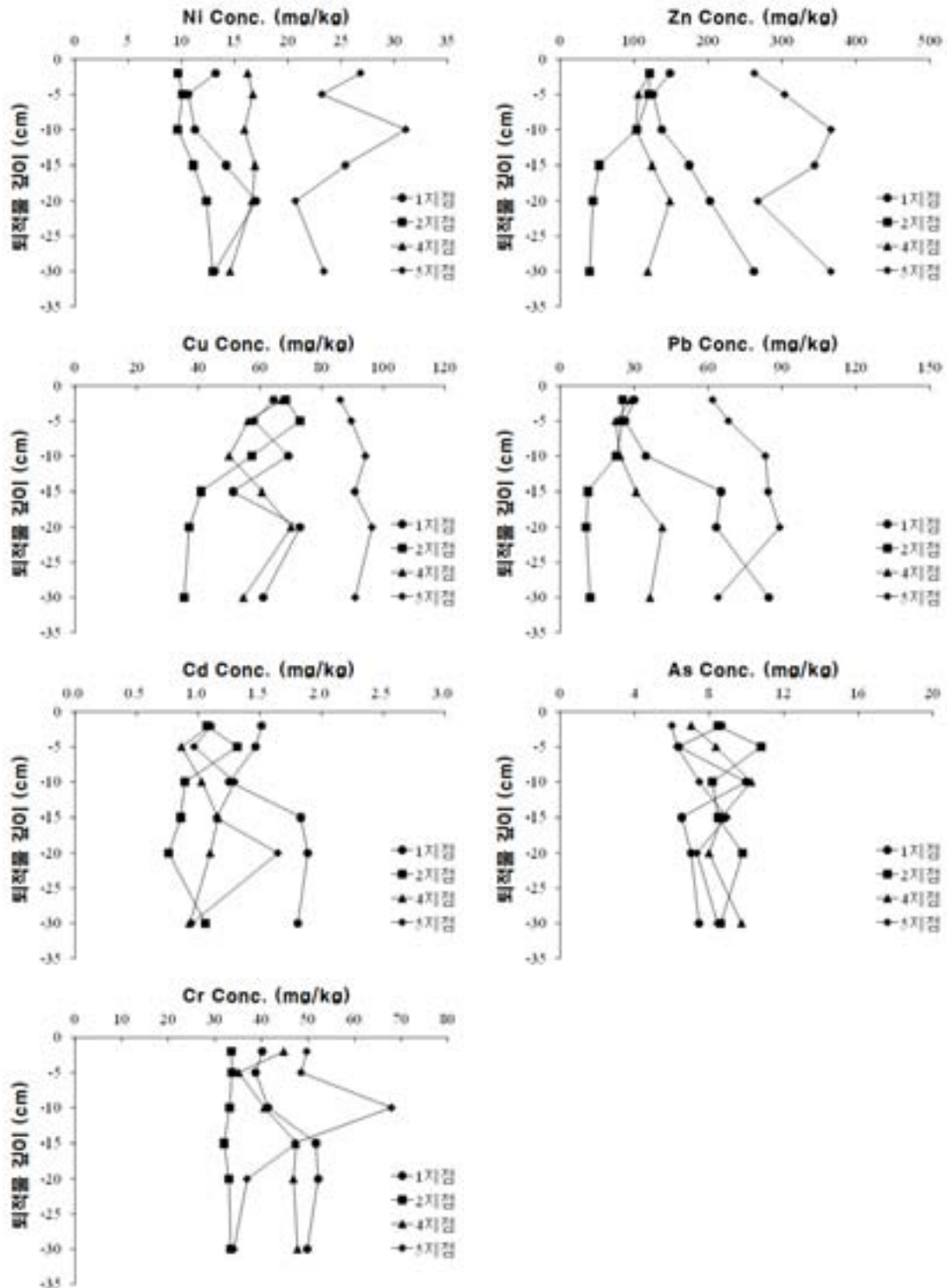
- 유기물의 지표를 나타내고 있는 COD(화학적 산소요구량) 및 TOC(총 유기탄소)의 결과에서 COD는 약 5.0 g/kg에서 약 25.0 g/kg의 넓은 범위의 농도를 보이고 있음. 게다가 TOC도 1.0%에서 4.0%의 넓은 농도 범위를 보이고 있음. 특히, 지점5에서 표층에서 약 20 cm까지 깊이가 깊어질수록 농도가 높아지는 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있음.
- 영양염류인 T-N(총 질소)와 T-P(총 인)의 변화에서 T-N은 전체적으로 1000 mg/kg에서 3000 mg/kg의 변화 경향을 보이고 있으면 깊이가 깊어질수록 감소하는 경향을 보이고 있음(1지점 제외). T-P는 전체적으로 2 mg/kg에서 20 mg/kg의 범위를 나타내고 있음. 깊이 변화에 따른 T-P 농도 변화는 조사 지점간 큰 차이를 보이고 있음.



[그림 IV-가-20] 2015년 2월(피복 전) 피복 대상지 퇴적물 깊이별 COD, TOC, T-N 및 T-P 항목들

□ 중금속

- 지점간 중금속별 농도를 살펴보면 1, 2, 4 지점보다 5지점에서 높은 농도의 중금속 분포 현상을 볼 수 있음.
- 깊이별 특성을 살펴보면, 지점간 및 중금속별 깊이에 따른 농도 분포 특성 차이를 보이고 있음을 알 수 있음.



[그림 IV-가-21] 2015년 2월(피복전) 피복 대상지 퇴적물 깊이별 중금속 농도 분포 변화 특성

- 중금속 중 구리(Cu)와 카드뮴(Cd)은 기준치 1을 상회하는 농도를 보여주고 있었으며, 그 외 니켈(Ni), 아연(Zn), 납(Pb), 비소(As), 크롬(Cr) 등은 일부 지점 또는 깊이에서 기준 1을 초과하는 농도를 나타냈음.

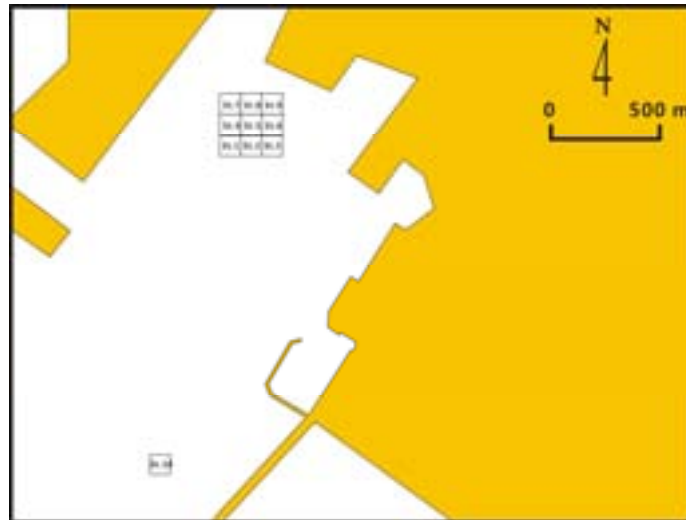
㊦ 저서 동물 모니터링 조사(생물학적 조사)

■ 과업 개요

- 지속가능 해양오염퇴적물 정화기술개발 연구대상지의 피복 전 대형저서동물의 서식양상을 파악하여 피복 후 저서생태계 변화를 파악하는 생물학적 자료를 확보하고자 한다.

[표 IV-가-9] 2015년 2월 부산 감만항 조사지점별 위치좌표

No.	Latitude	Longitude
St.1	35° 7.169'N	129° 3.813'E
St.2	35° 7.168'N	129° 3.884'E
St.3	35° 7.169'N	129° 3.944'E
St.4	35° 7.223'N	129° 3.815'E
St.5	35° 7.223'N	129° 3.879'E
St.6	35° 7.224'N	129° 3.943'E
St.7	35° 7.277'N	129° 3.813'E
St.8	35° 7.278'N	129° 3.879'E
St.9	35° 7.277'N	129° 3.945'E
St.10(대조구)	35° 6.375'N	129° 3.594'E



[그림 IV-가-22] 2015년 2월 부산 감만항 조사지점도(사업대상지)

- 서식생물상조사
- 중형저서동물 : 분류군별 출현양상
  - 대형저서동물 : 종조성 및 우점종, 생태학적제지수 산출
  - 통계학적분석 : 저서오염지수 산출, PCA분석

■ 조사방법

- 서식생물상 현장조사

- 2015년 2월 25일과 5월 27일 2회에 걸쳐 피복지와 대조구로 구분하여 부산항 제 7부두에서 현장조사를 수행하였으며, 현장에서 Van Veen Grab를 이용하여 시료를 채집하고, 현장에서 망목 1 mm인 Sieve를 이용하여 1차 Sieving 을 하여 실험실로 운반하였다. 운반된 시료는 망목 1 mm인 Sieve에 2차 Sieving하여 Sorting 작업을 통해 퇴적물과 대형저서동물을 구분하였다. 구분된 시료는 해부현미경하에서 가능한 중 수준까지 중 동정 작업을 실시하였다

□ 중형저서동물 채집 및 분석

- 2015년 2월 25일 퇴적물과 함께 채집된 중형저서동물 시료를 분석하기 위해 시료채집은 1개소에서 Van Veen Grab(입구면적 : 0.1m<sup>2</sup>)를 이용하여 채집된 시료를 3.3 cm인 원형 채집기를 활용하여 표층과 저층으로 구분하여 1회씩 채집하였다. 채집된 시료는 중형저서동물(1 mm ~ 38 μm)를 Sieving하여 남은 잔존물을 루골용액으로 단백질 염색 후 현미경하에서 분류군별 출현빈도 파악하였으며, 눈금이 그려진 패트리디쉬에서 계수하여 단위면적(10cm<sup>2</sup>)당 개체수로 변환하였다.



[그림 IV-가-23] 현장조사 사진

□ 대형저서동물 채집 및 분석

- 퇴적물과 함께 채집된 대형저서동물 시료를 분석하기 위해 시료채집은 1개소에서 Van Veen Grab(입구면적 : 0.1m<sup>2</sup>)를 이용하여 채집을 실시하였으며, 채집된 시료에 대하여는 라벨링을 부착하여 정확히 구분한 다음, 선별과정을 통해 분류군별로 구분하며, 해부현미경과 광학현미경을 이용하여 종 단위까지 동정하고, 개체수 및 생체량은 피복지와 대조구로 구분하여 단위면적당(1m<sup>2</sup>) 생물량으로 환산하고자료를 분석하였다.

- 조사지역에서 출현한 저서동물의 분류군별 출현종수, 서식밀도, 생체량을 파악하고, 각 지점별 출현종수와 서식밀도, 생체량 및 상위 5.0%의 우점종에 대해 파악하였다.
- 저서생물 군집의 특성을 설명하는 생태학적지수는 종 다양성지수(H'), 종풍부도지수(R), 종균등도지수(J), 우점도지수(D)를 조사지점별로 계산하였으며, 저서동물의 군집구조를 파악하기 위하여 사용된 각 지수의 계산식은 아래와 같다.

- 종 풍부도 지수 (Species richness index (Margalef, 1958))

$$R = \frac{S-1}{\ln(n)}$$

- 종 다양도 지수 (Species diversity index (Shannon and Wiener, 1963))

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \cdot \ln P_i$$

- 종 균등도 지수 (Species evenness index (Pielou, 1975))

$$J = \frac{H'}{H'_{\max}} = \frac{H'}{\ln S}$$

- 종 우점도 지수 (Species dominance index (Simpson, 1949))

$$D = \sum_{i=1}^S \frac{n_i(n_i-1)}{n(n-1)}$$

#### □ 저서오염지수(BPI: Benthic Pollution Index)

- 유기물 오염에 대한 반응정도는 그들의 섭식유형에 따라 다르게 나타난다는 가정하에 우점종을 중심으로 대형저서동물의 4개의 섭식유형군으로 나누고, Word(1978)가 제안한 식성지수공식(ITI)을 응용하여 이들의 섭식형 구조를 1~100 사이의 수치로 나타내었다(한국해양연구소 1995). 이 중 누적백분율이 대략 90 %이내에 속하는 종을 최소 5종 이상 선택하여, 제 1군은 여과식자 및 소형육식자, 제 2군은 표층퇴적물식자, 제 3군은 내서퇴적물식자, 제 4군은 저서오염지시종으로 구분하였으며, 아래의 산출공식을 사용하여 BPI를 통한 오염지수를 산출하였다. 산출된 지수는 한국해양연구원에서 제시한 5단계의 BPI-level을 이용하여 건강도평가를 실시하였다.

$$BPI = [1-(0N_1+1N_2+2N_3+3N_4)/3 \cdot (N_1+N_2+N_3+N_4)] \times 100$$

N<sub>1</sub> : 제 1군의 개체수

N<sub>2</sub> : 제 2군의 개체수

N<sub>3</sub> : 제 3군의 개체수

N<sub>4</sub> : 제 4군의 개체수

[표 IV-가-10] 5단계의 BPI-level

BPI level	Interval of BPI
I	61-100
II	51-60
III	41-50
IV	31-40
V	0-30

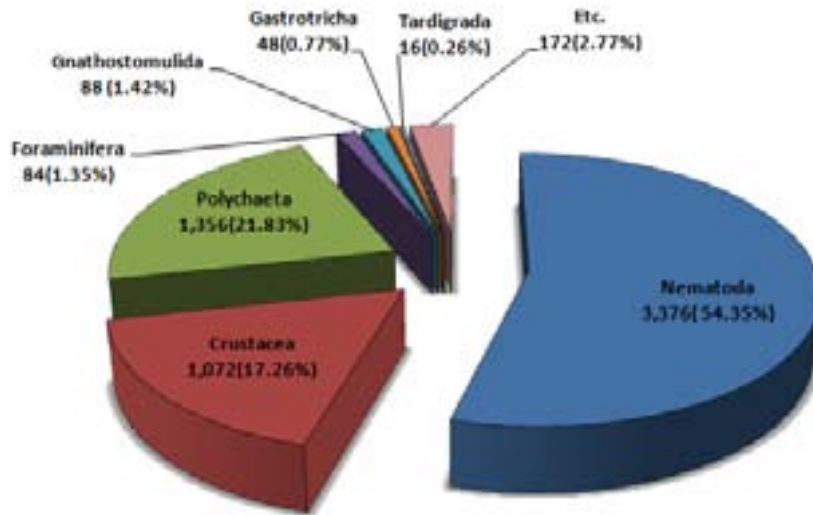
□ 주성분분석(PCA: Principal Component Analysis)

- 수질 및 표층퇴적물의 분석결과(발주처에서 제공)인 환경요인과 정점별 출현한 대형저서동물간의 관계를 파악하기 위하여 주성분분석을 실시하였다. 이때 사용한 변수는 우점종 중 상위 5종, 출현종수와 평균서식밀도, 생태학적제지수에 환경요인을 추가하여 항목간 상관계수를 산출하고 분석을 진행하였다.

■ 조사결과

□ 중형저서동물 (2015년 2월)

- 2015년 2월 출현한 중형저서동물은 평균  $621 \pm 146$ 이 출현하였으며, Nematoda (선충류)가 337.6 indiv./10cm<sup>2</sup> 출현하여 54.35%로 최우점하여 나타났으며, 다음으로 Polychaeta(다모류)가 135.6 indiv./10cm<sup>2</sup> 로 21.83%로 차우점하였다. 그 외에 Crustacea(갑각류)와 4개의 동물문이 출현하여 총 8개 동물문이 출현하였다(그림 IV-가-24).



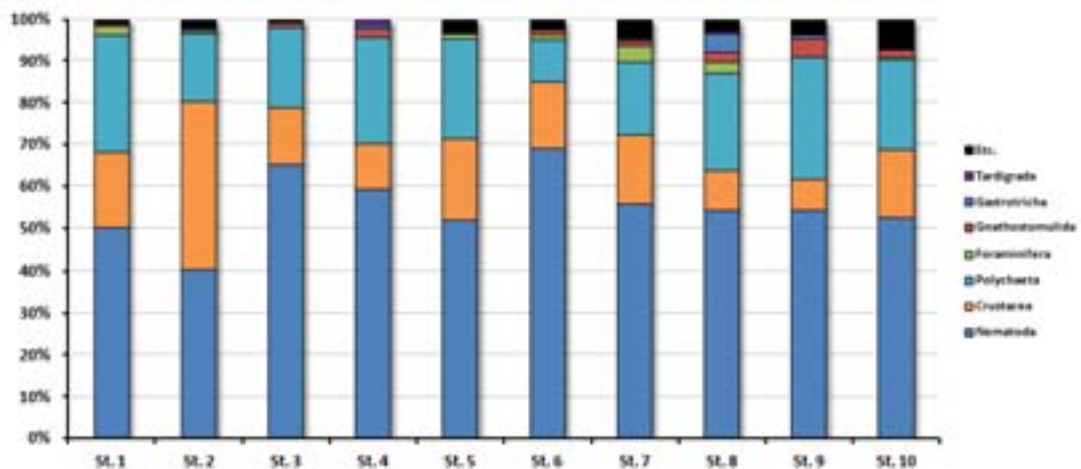
[그림 IV-가-24] 2015년 2월 부산 감만항에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현

- 2015년 2월 부산항 조사지점별 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상은 표 IV-가-11과 같으며, 지점별 분류군별 출현양상을 도시화 하면 그림 IV-가-25와 같다.
- 각 지점별로 Nematoda (선충류)가 가장 많이 출현하여 최우점하였으며, St. 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10번 지점에서는 Polychaeta(다모류)가 차우점하여 나타났으며, St. 2, 6에서는 Crustacea(갑각류)가 차우점하여 나타났다.
- 지점별로 가장 많은 분류군이 출현한 지점은 St. 8으로 8개 분류군이 모두 출현하였으며,

St. 3, 5에서 5개 분류군이 출현하여 가장 적은 분류군이 조사되었다.

[표 IV-가-11. 조사지점별 중형저서동물의 분류군별 출현양상]

분류군명 \ 조사지점		St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10	빈도	Total
Nematoda	선충류	368	288	420	344	364	224	348	452	244	324	10	3,376
Crustacea	갑각류	132	284	88	64	136	52	104	80	32	100	10	1,072
Polychaeta	다모류	204	116	124	148	168	32	108	192	132	132	10	1,356
Foraminifera	유공충	16	4			8	4	24	24		4	7	84
Gnathostomulida	악구동물	4		8	12		4	8	20	20	12	8	88
Gastrotricha	복모동물		4		4				36	4		4	48
Tardigrada	완보동물				8			4	4			3	16
Etc.	기타동물	8	16	4		24	8	28	24	16	44	9	172
분류군수		6	6	5	6	5	6	7	8	6	6	8	8
서식밀도(indiv./10cm <sup>2</sup> )		732	712	644	580	700	324	624	832	448	616	61	6,212

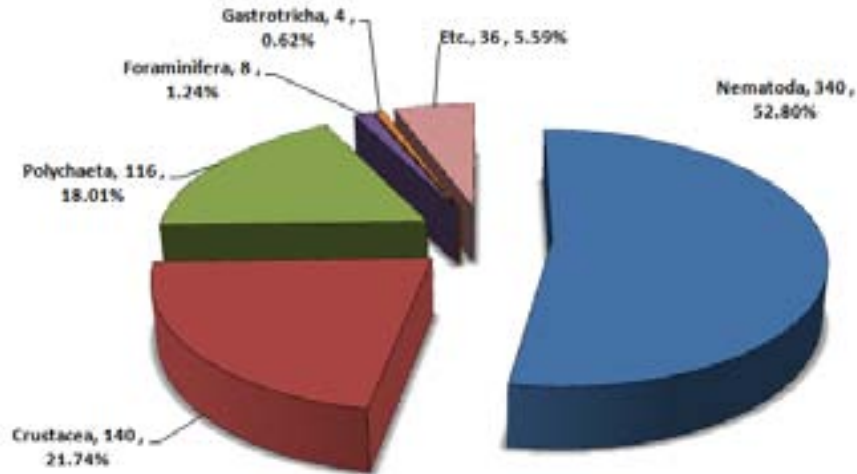


[그림 IV-가-25] 2015년 2월 부산 감만항에서 출현한 중형저서동물의 조사지점별 출현양상

□ 중형저서동물 (2015년 5월)

- 2015년 5월 출현한 중형저서동물은 평균 322±280 개체가 출현하였으며, Nematoda (선충류)가 34.0 indiv./10cm<sup>2</sup> 출현하여 52.80%로 최우점하여 나타났으며, 다음으로 Crustacea (갑각류)가 14.0 indiv./10cm<sup>2</sup> 로 21.74%로 차우점하였다. 그 외에 Polychaeta(다모류)와 3개의 동물문이 출현하여 총 6개 동물문이 출현하였다(그림 IV-가-26).

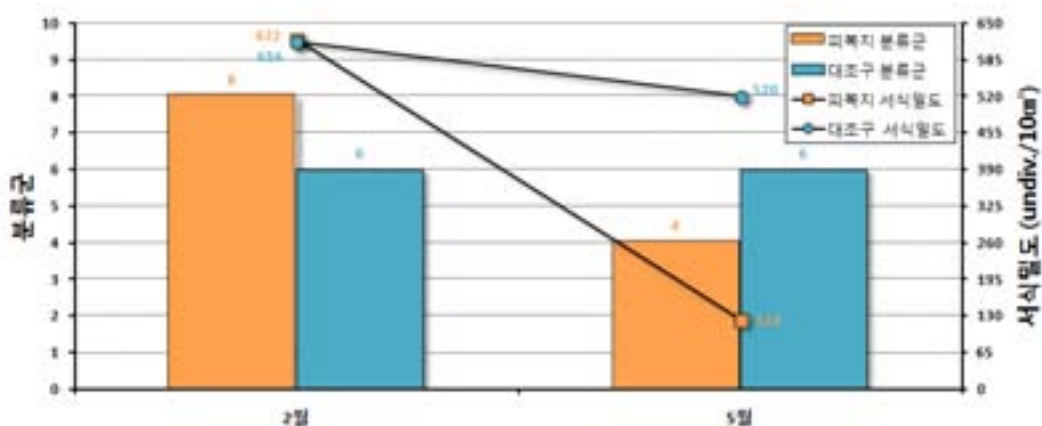




[그림 IV-가-26] 2015년 5월 부산 감만항에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현 양상

□ 월별 변화

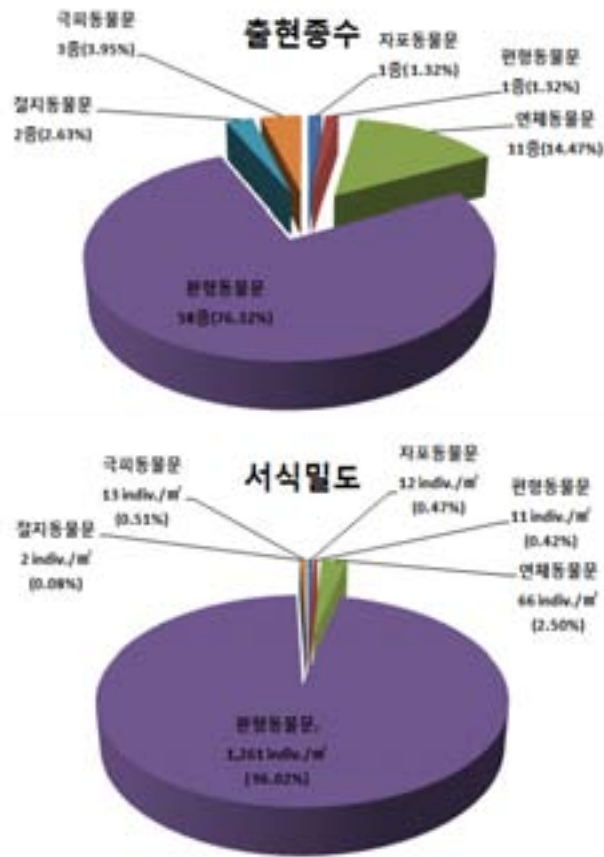
- 2월과 5월에 출현한 중형저서동물의 월별변화를 살펴보면, 피복지의 경우 분류군의 수나 개체수의 서식밀도가 현저하게 낮아진 것을 확인할 수 있었으며, 대조구는 분류군의 수는 동일하나 개체수의 서식밀도가 낮아진 경향을 보였음.



[그림 IV-가-27] 2월 및 5월 피복지와 대조구에서 출현한 중형 저서동물의 변화양상  
대형저서동물

□ 출현양상

- 2015년 2월 부산항에서 조사된 대형저서동물의 출현종수와 서식밀도를 기준으로 분류군별 출현양상은 그림 IV-가-28과 같다. 6개 동물문 76종이 출현하였으며, 환형동물문이 58종으로 76.32%로 가장 많이 출현하였다. 서식밀도를 기준으로 분류군별 출현양상은 단위면적당 1,313 indiv./m<sup>2</sup>으로 환형동물문이 1,261 indiv./m<sup>2</sup>(96.02%)로 극우점하는 양상으로 나타났다.



[그림 IV-가-28] 2월에 출현한 저서동물의 분류군별 출현비율

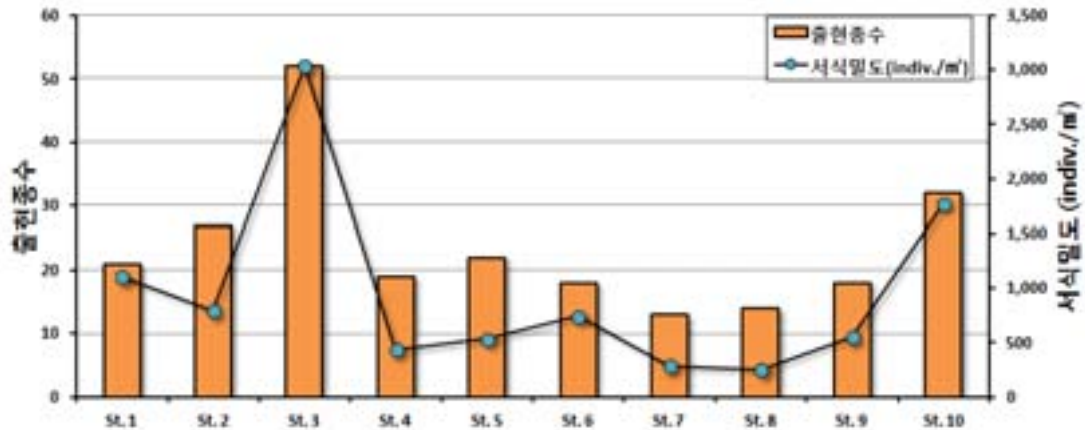
[표 IV-가-12] 2월에 지점별 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상 및 주요생물

지점	동물문	종수	서식밀도 (indiv./m <sup>2</sup> )	주요생물
피복지	자포동물문	1	12	히드라류
	편형동물문	1	11	납작벌레류
	연체동물문	11	46	왕좁쌀무늬고둥, 종뭇, 뽕뽕이짚신고둥, 띠조개류, 대양조개류 등
	환형동물문	57	771	긴자락송곳갯지렁이, 꼬리대나무갯지렁이, 등가시버들갯지렁이, 치로리미갯지렁이 등
	절지동물문	2	2	가시육질꼬리옆새우류, 바다대벌레류
	극피동물문	3	13	짧은가시거미불가사리 등
	<b>Total</b>	<b>75</b>	<b>856</b>	
대조구	연체동물문	2	20	왕좁쌀무늬고둥, 종뭇
	환형동물문	30	1,750	긴자락송곳갯지렁이, 꼬리대나무갯지렁이, 양손갯지렁이, 치로리미갯지렁이 등
	<b>Total</b>	<b>32</b>	<b>1,770</b>	

- 지점별 출현한 저서동물의 분류군별 출현비율은 표 IV-가-12와 같다. 피복예정지에서는 총 6개 동물문 75종의 생물이 출현하였으며, 856 indiv./m<sup>2</sup>의 서식밀도로 조사되었다. 대조구지역에서는 2개 동물문 32종이 출현하였으며, 1,770 indiv./m<sup>2</sup>의 서식밀도로 조사되었다.
- 두 조사지점 모두 환형동물문이 극우점하는 양상을 보였으며, 피복예정지는 57종, 대조구는 30종이 출현하였고, 서식밀도는 각각 771 indiv./m<sup>2</sup>, 1,750 indiv./m<sup>2</sup>으로 긴자락송곳갯지렁이가 가장 많이 서식하고 있는 것으로 조사되었다.
- 정점별 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상과 주요생물은 표 IV-가-13, 그림 IV-가-29와 같다.

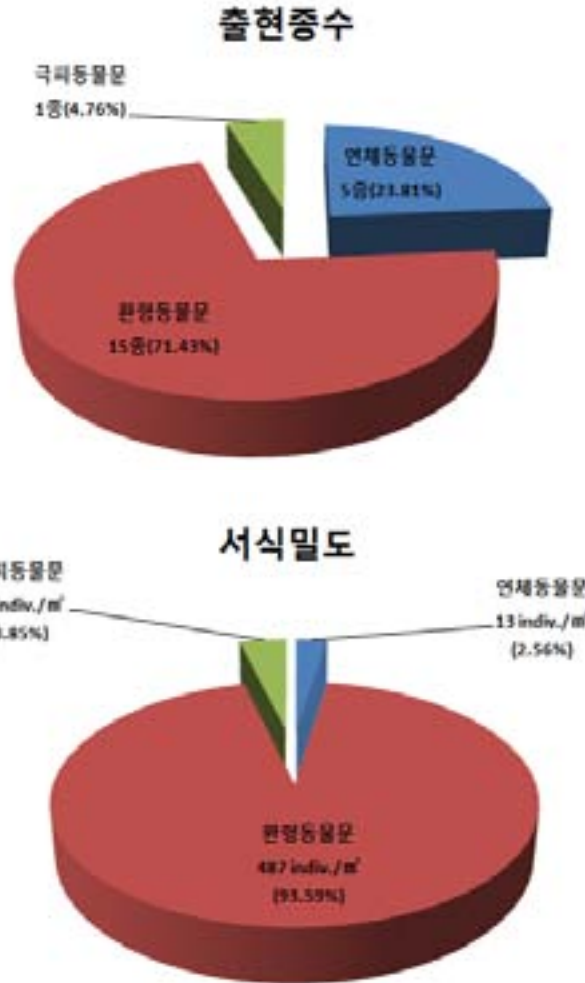
[표 IV-가-13] 2월 조사정점별 출현한 대형저서동물의 출현양상 및 서식밀도

	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10
출현종수	21	27	52	19	22	18	13	14	18	32
서식밀도 (indiv./m <sup>2</sup> )	1,100	790	3,030	430	530	740	280	250	550	1,770



[그림 IV-가-29] 2월 대형저서동물의 조사정점별 출현양상 및 서식밀도

- 출현종수는 St. 3에서 52종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, 서식밀도도 3,030 indiv./m<sup>2</sup>으로 가장 높게 나타났다. 다음으로 대조구인 St. 10에서 32종이 출현하였으며, 서식밀도도 1,770 indiv./m<sup>2</sup>으로 나타났다. 출현종수가 가장 적게 나타나는 지점은 St. 7으로 13종이 출현하였으며, 서식밀도가 가장 낮은 지점은 St. 8으로 250 indiv./m<sup>2</sup>으로 조사되었다.
- 2015년 5월 부산항에서 조사된 대형저서동물의 출현종수와 서식밀도를 기준으로 분류군별 출현양상은 그림 IV-가-30과 같다. 3개 동물문 22종이 출현하였으며, 환형동물문이 15종으로 71.43%로 가장 많이 출현하였다. 서식밀도를 기준으로 분류군별 출현양상은 단위면적당 520 indiv./m<sup>2</sup>으로 환형동물문이 487 indiv./m<sup>2</sup>(96.02%)로 극우점하는 양상으로 나타났다.



[그림 IV-가-30] 5월에 출현한 저서동물의 분류군별 출현비율

[표 IV-가-14] 5월 지점별 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상 및 주요생물

지점	동물문	종수	서식밀도 (indiv./m²)	주요생물
피복지	연체동물문	5	13	아기반투명조개, 똥똥이짚신고둥, 종뿔 등
	환형동물문	1	7	긴자락송곳갯지렁이
	Total	6	20	
대조구	환형동물문	15	540	긴자락송곳갯지렁이, 괴물유령갯지렁이, 밀집날개갯지렁이류, 양손갯지렁이 등
	척삭동물문	1	20	명게류
	Total	20	560	

- 지점별 출현한 저서동물의 분류군별 출현비율은 표 IV-가-14와 같다. 피복지에서는 총 2개 동물문 6종의 생물이 출현하였으며, 20 indiv./m²의 서식밀도로 조사되었다. 대조구지역에서는 2개 동물문 20종이 출현하였으며, 560 indiv./m²의 서식밀도로 조사되었다.
- 피복지는 피복작업 후 시료를 샘플링하고 조사를 하였기 때문에 서식하는 종과 우점하는 동물문이 모두 다르게 나타났고, 서식밀도가 대폭 감소하였다. 대조구는 우점하는 동물문의 양상은 비슷하나 출현정도가 낮게 나타났다.

□ 우점종

- 2015년 2월 부산항에서 출현한 대형저서동물의 조사정점별 상위 2.0% 이상인 우점종은 표 IV-가-15와 같다. 우점종은 총 10종으로 모두 환형동물문으로 나타났으며, *Lumbrineris longifolia* (긴자락송곳갯지렁이)가 9개 지점에서 출현하였고, 서식밀도는 222 indiv./m<sup>2</sup>, 우점률 23.44%으로 최우점하였다. 다음으로 *Praxillella affinis* (꼬리대나무갯지렁이) 9.71%, *Heteromastus filiformis* 6.12%, *Glycera chirori* (치로리미갯지렁이) 4.86%, *Capitella capitata* (등가시버들갯지렁이) 4.65%, *Nereis* sp. (원참갯지렁이류) 4.22%, *Mesochaetopterus* sp. (밀집날개갯지렁이류) 3.27%, *Magelona japonica* (양손갯지렁이) 3.06%, *Ophiodromus* sp. (뱀수염갯지렁이류) 2.64%, *Maldanidae unid.* (대나무갯지렁이류) 2.32% 순으로 나타났다.

[표 IV-가-15] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종

학명	국명	출현빈도	서식밀도 (indiv./m <sup>2</sup> )	우점률 (%)	rank
<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	9	222	23.44	1
<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	7	92	9.71	2
<i>Heteromastus filiformis</i>	-	5	58	6.12	3
<i>Glycera chirori</i>	치로리미갯지렁이	9	46	4.86	4
<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	7	44	4.65	5
<i>Nereis</i> sp.	원참갯지렁이류	8	40	4.22	6
<i>Mesochaetopterus</i> sp.	밀집날개갯지렁이류	7	31	3.27	7
<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	5	29	3.06	8
<i>Ophiodromus</i> sp.	뱀수염갯지렁이류	5	25	2.64	9
<i>Maldanidae unid.</i>	대나무갯지렁이류	4	22	2.32	10

- 피복지와 대조구로 구분하여 출현한 대형저서동물의 우점종에 대해 상위 2.0%까지 정리하면 표 IV-가-16과 같다.
- 피복지와 대조구 모두 최우점종은 *Lumbrineris longifolia* (긴자락송곳갯지렁이)로 나타났으며, 피복지에서는 19.99%, 대조구에서는 38.42%로 각각 우점하였다.

[표 IV-가-16] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 조사지점별 상위 2.0% 이상인 우점종

지점	학명	국명	서식밀도 (indiv./m <sup>2</sup> )	우점률 (%)	rank
피복지	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	171	19.99	1
	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	84	9.87	2
	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	48	5.58	3
	<i>Heteromastus filiformis</i>	-	42	4.93	4
	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갑갯지렁이	41	4.80	5
	<i>Nereis</i> sp.	원참갯지렁이류	39	4.54	6
	<i>Mesochaetopterus</i> sp.	밀집날개갯지렁이류	33	3.89	7
	<i>Ophiodromus</i> sp.	뱀수염갯지렁이류	24	2.86	8
	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	23	2.73	9
	Maldanidae unid.	대나무갯지렁이류	20	2.34	10
대조구	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	680	38.42	1
	<i>Heteromastus filiformis</i>	-	200	11.30	2
	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	160	9.04	3
	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갑갯지렁이	90	5.08	4
	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	80	4.52	5
	<i>Nereis</i> sp.	원참갯지렁이류	50	2.82	6
	Polychaeta unid.	다모류	50	2.82	7
	<i>Haploscoloplos elongatus</i>	갯모갯지렁이	50	2.82	8
	Maldanidae unid.	대나무갯지렁이류	40	2.26	9

- o 조사정점별로 출현한 대형저서동물의 우점종에 대해 상위 5.0%까지 정리하면 Table 9와 같다. 모든 조사지점의 우점종은 환형동물문이었으며, *Lumbrineris longifolia* (긴자락송곳갯지렁이)가 조사지점 중 St. 4, St. 7, St. 8을 제외한 모든 지역에서 최우점하여 나타났다. 그 외에도 *Praxillella affinis* (꼬리대나무갯지렁이), *Heteromastus filiformis*, *Glycera chirori* (치로리미갑갯지렁이), *Capitella capitata* (등가시버들갯지렁이) 등이 많은 지점에서 우점하여 나타났다.

[표 IV-가-17] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 조사지점별 상위 5.0% 이상인 우점종

지점	학명	국명	서식밀도 (indiv./m <sup>2</sup> )	우점률 (%)	rank
St. 1	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	140	12.73	1

	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	130	11.82	2
	<i>Mesochaetopterus</i> sp.	밀집날개갯지렁이류	110	10.00	3
	Maldanidae unid.	대나무갯지렁이류	100	9.09	4
	<i>Sigambra tentaculata</i>	-	70	6.36	5
	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갯지렁이	60	5.45	6
St. 2	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	200	25.32	1
	<i>Heteromastus filiformis</i>	-	70	8.86	2
	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	60	7.59	3
	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	60	7.59	4
	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	40	5.06	5
	<i>Polycladida</i> unid.	납작벌레류	40	5.06	6
	<i>Nereis</i> sp.	원참갯지렁이류	40	5.06	7
St. 3	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	500	16.50	1
	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	460	15.18	2
	<i>Heteromastus filiformis</i>	-	200	6.60	3
	<i>Nereis</i> sp.	원참갯지렁이류	190	6.27	4
St. 4	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	70	16.28	1
	<i>Ophiodromus</i> sp.	뱀수염갯지렁이류	50	11.63	2
	Hydrozoa unid.	히드라류	40	9.30	3
	<i>Diopatra sugokai</i>	털보집갯지렁이	40	9.30	4
	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	30	6.98	5
St. 5	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	90	16.98	1
	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	70	13.21	2
	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갯지렁이	50	9.43	3
	<i>Heteromastus filiformis</i>	-	40	7.55	4
	<i>Loimia medusa</i>	괴물유령갯지렁이	30	5.66	5
	<i>Neanthes</i> sp.	참갯지렁이류	30	5.66	6
St. 6	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	430	58.11	1
	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	90	12.16	2
	<i>Heteromastus filiformis</i>	-	70	9.46	3

지점	학명	국명	서식밀도 (indiv./ m <sup>2</sup> )	우점률 (%)	rank
St. 7	<i>Cirratulus cirratus</i>	가는실타래갯지렁이	70	25.00	1
	Hydrozoa unid.	히드라류	60	21.43	2
	<i>Diopatra sugokai</i>	털보집갯지렁이	30	10.71	3
	<i>Paralacydonia paradoxa</i>	은갯지렁이	20	7.14	4
	Polychaeta unid.	다모류	20	7.14	5



St. 8	<i>Tharyx</i> sp.	-	40	16.00	1
	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갑갯지렁이	30	12.00	2
	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	30	12.00	3
	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	20	8.00	4
	<i>Nereis longior</i>	길쭉참갯지렁이	20	8.00	5
	<i>Syllis</i> sp.	큰염주발갯지렁이류	20	8.00	6
	<i>Theora fragilis</i>	아기반투명조개	20	8.00	7
St. 9	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	130	23.64	1
	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	70	12.73	2
	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갑갯지렁이	60	10.91	3
	Terebellida unid.	유령갯지렁이류	50	9.09	4
	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	40	7.27	5
	<i>Nereis</i> sp.	원참갯지렁이류	30	5.45	6
	<i>Ophiodromus</i> sp.	뱀수염갯지렁이류	30	5.45	7
	<i>Goniada</i> sp.	갈고리갯지렁이류	30	5.45	8
St. 10	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	680	38.42	1
	<i>Heteromastus filiformis</i>	-	200	11.30	2
	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	160	9.04	3
	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갑갯지렁이	90	5.08	4

- 2015년 5월 부산항에서 출현한 대형저서동물의 조사정점별 상위 2.0% 이상인 우점종은 표 IV-가-18과 같다. 우점종은 총 11종으로 상위 10종은 모두 환형동물문으로 나타났으며, *Lumbrineris longifolia* (긴자락송곳갯지렁이)가 9개 지점에서 출현하였고, 서식밀도는 222 indiv./m<sup>2</sup>, 우점률 24.36%으로 최우점하였다. 다음으로 *Loimia medusa* (괴물유령갯지렁이) 19.23%으로 차우점하였으며, *Mesochaetopterus* sp. (밀집날개갯지렁이류) 7.69%, *Anaitides maculata* (네모부채발갯지렁이) 5.77% 등으로 나타났다.

[표 IV-가-18] 2015년 5월 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종

학명	국명	출현 빈도	서식밀도 (indiv./m <sup>2</sup> )	우점률 (%)	rank
<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	2	127	24.36	1
<i>Loimia medusa</i>	괴물유령갯지렁이	1	100	19.23	2
<i>Mesochaetopterus</i> sp.	밀집날개갯지렁이류	1	40	7.69	3
<i>Anaitides maculata</i>	네모부채발갯지렁이	1	30	5.77	4
<i>Eteone</i> sp.	작은부채발갯지렁이류	1	30	5.77	5
<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	1	30	5.77	6
<i>Amage auricula</i>	빨사슴갯지렁이	1	20	3.85	7
<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	1	20	3.85	8
<i>Diopatra sugokai</i>	털보집갯지렁이	1	20	3.85	9
<i>Lagis bocki</i>	앞빛갯지렁이	1	20	3.85	10
Pyuridae unid.	멍게류	1	20	3.85	11

- 피복지와 대조구로 구분하여 출현한 대형저서동물의 우점종에 대해 상위 2.0%까지 정리하면 표 IV-가-19와 같다.
- 피복지에서는 출현한 대형저서동물의 빈도가 낮아 출현종이 모두 상위 %내에 있으며 *Theora fragilis* (아기반투명조개)가 우점율 38.89%로 최 우점한 것으로 조사되었다. 대조구에서는 2월조사와 동일하게 *Lumbrineris longifolia* (긴자락송곳갯지렁이)가 24.00%로 최 우점하였다.

[표 IV-가-19] 2015년 5월 출현한 대형저서동물의 조사지점별 상위 2.0% 이상인  
우점종

지점	학명	국명	서식밀도 (indiv./m <sup>2</sup> )	우점률 (%)	rank
피복지	<i>Theora fragilis</i>	아기반투명조개	8	38.89	1
	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	7	33.33	2
	<i>Crepidula onyx</i>	똥똥이썩신고둥	2	11.11	3
	<i>Nassarius festivus</i>	왕좁쌀무늬고둥	1	5.56	4
	<i>Macoma</i> sp.	대양조개류	1	5.56	5
	<i>Musculista senhousia</i>	종뭇	1	5.56	6
대조구	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	120	24.00	1
	<i>Loimia medusa</i>	괴물유령갯지렁이	100	20.00	2
	<i>Mesochaetopterus</i> sp.	밀집날개갯지렁이류	40	8.00	3
	<i>Anaitides maculata</i>	네모부채말갯지렁이	30	6.00	4
	<i>Eteone</i> sp.	작은부채말갯지렁이류	30	6.00	5
	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	30	6.00	6
	<i>Amageauricula</i>	뿔사슴갯지렁이	20	4.00	7
	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	20	4.00	8
	<i>Diopatra sugokai</i>	털보집갯지렁이	20	4.00	9
	<i>Lagis bocki</i>	앞뿔갯지렁이	20	4.00	10
	Pyuridae Unid.	멍게류	20	4.00	11
	<i>Amphicteis</i> sp.	큰사슴갯지렁이류	10	2.00	12
	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갑갯지렁이	10	2.00	13
	<i>Heteromastus filiformis</i>		10	2.00	14
	Maldanidae unid.	대나무갯지렁이류	10	2.00	15
	<i>Nereis</i> sp.	원참갯지렁이류	10	2.00	16

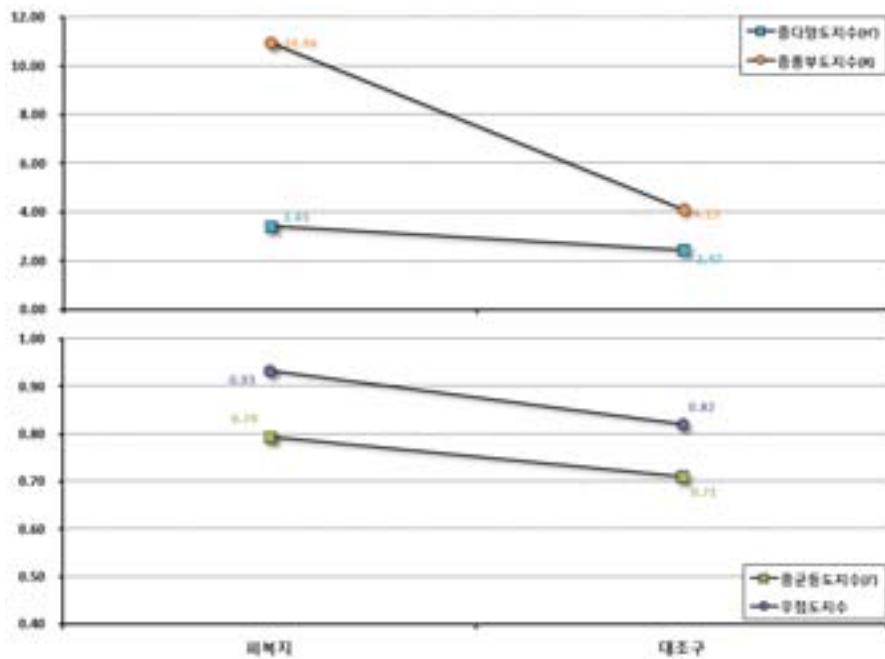
□ 생태학적제지수

- 2월 피복예정지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 서식밀도를 기준으로 생태학적제지수를 산출하였으며, 그 결과는 표 IV-가-20와 같다.
- 군집의 안정성을 나타내는 종 다양도지수는 평균 2.95±0.68의 범위를 나타내었으며, 종 풍부도지수도 평균 7.55±4.82의 범위로 나타났다. 종균등도지수는 평균 0.75±0.06의 범위로 산출되었으며, 우점도지수는 평균 0.88±0.08으로 산출되었다.
- 피복예정지의 생태학적제지수의 결과가 대조구에 비해 안정적인 군집구조 양상을 보였으며, 종다양성지수의 경우 3.43으로 대조구의 2.47에 비해 높은 다양성을 보이는 것으로 나

타났으며, 종풍부도지수는 10.96으로 대조구에 비해 월등히 높은 결과 값을 나타냈다. 종균등도지수와 우점도지수 역시 큰 차이는 아니지만 피복예정지에서 대조구에 비해 높은 결과로 나타났다.

[표 IV-가-20. 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수]

지점	S	N	종다양도지수 (H')	종풍부도지수 (R)	종균등도지수 (J')	우점도지수
피복예정지	75	856	3.43	10.96	0.79	0.93
대조구	32	1,770	2.47	4.15	0.71	0.82
평균			2.95	7.55	0.75	0.88
표준편차			0.68	4.82	0.06	0.08

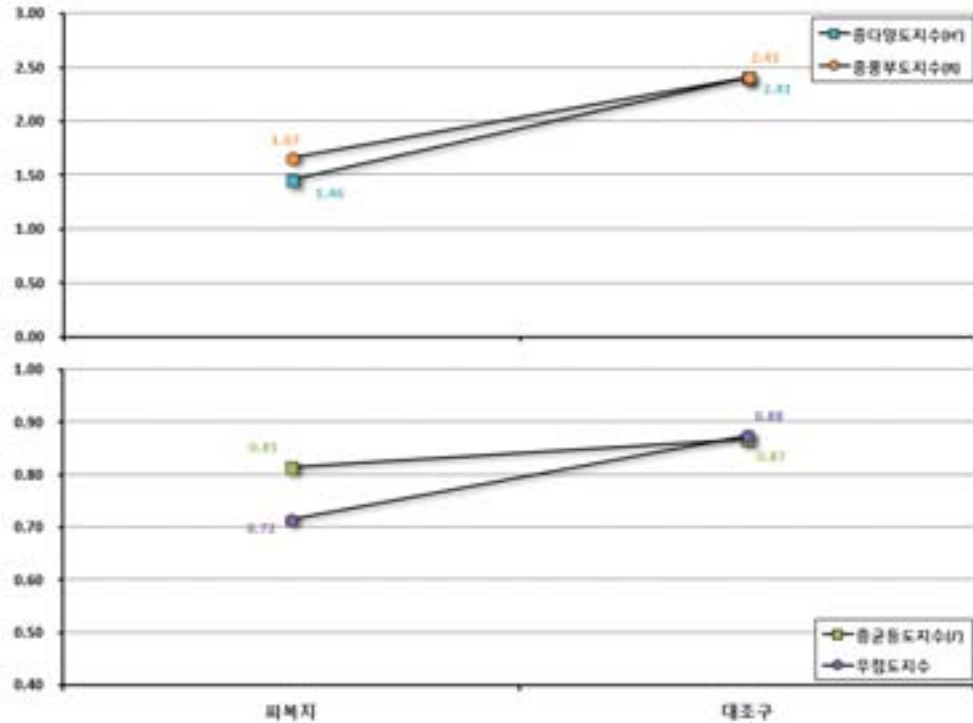


[그림 IV-가-31] 2월 피복예정지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수

- 5월 피복지와 대조구를에서 출현한 대형저서동물의 서식밀도를 기준으로 생태학적제지수를 산출하였으며, 그 결과는 표 IV-가-21과 같다.
- 군집의 안정성을 나타내는 종 다양도지수는 평균  $1.46 \pm 0.67$ 의 범위를 나타내었으며, 종 풍부도지수도 평균  $2.04 \pm 0.53$ 의 범위로 나타났다. 종균등도지수는 평균  $0.84 \pm 0.04$ 의 범위로 산출되었으며, 우점도지수는 평균  $0.80 \pm 0.11$ 으로 산출되었다.
- 피복지에 비해 대조구의 생태학적제지수의 결과가 안정적인 군집구조 양상을 보였다.

[표 IV-가-21] 2015년 5월 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수

지점	S	N	종다양도지수 (H')	종풍부도지수 (R)	종균등도지수 (J')	우점도지수
피복지	6	20	1.46	1.67	0.81	0.72
대조구	16	500	2.41	2.41	0.87	0.88
평균			1.93	2.04	0.84	0.80
표준편차			0.67	0.53	0.04	0.11



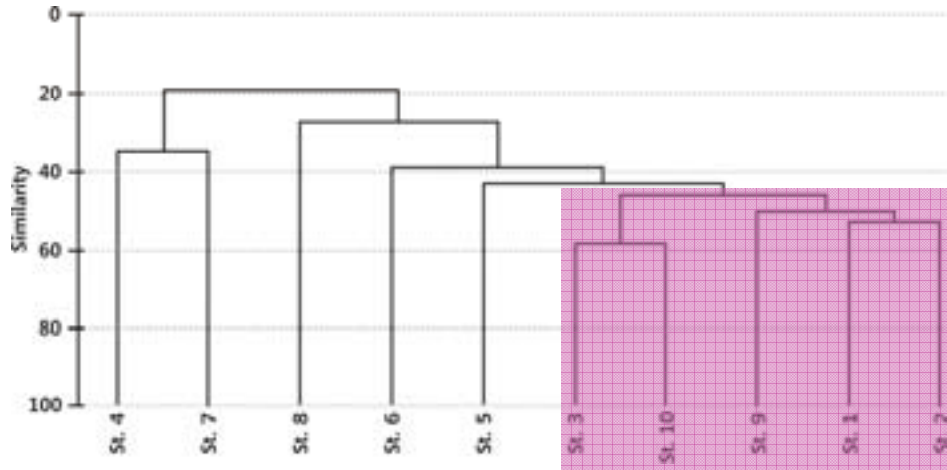
[그림 IV-가-32] 5월 피복예정지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수

□ 집괴분석

- 2015년 2월 부산항 조사해역에서 출현한 대형저서동물의 집괴분석을 위해 유사매트릭스 (similarity matrix)를 산출하기 위해 분류의 대상이 되는 OTU<sub>i</sub>와 OTU<sub>j</sub>의 상사도 S<sub>ij</sub>의 행렬이고, 수치분류법 출발점의 일종. n개의 OTU를 분류하는 경우는 n행 n열의 표에 상사도를 정리하여, S<sub>ij</sub>=1 또는 S<sub>ij</sub>=S<sub>ji</sub>인 것에서 대각선에 대해 대칭으로 나타내면 표 IV-가-22와 같다.
- 유사매트릭스에서 상사도로 정리된 결과를 기준으로 집괴분석 수치도로 나타내면 그림. IV-가-33과 같다. 1개의 그룹과 5개의 지점으로 구분되었다. St. 1, 2, 3, 9, 10 5개의 조사지점이 similarity 45에서 Group으로 묶여 유사성을 나타내었으며, St. 4와 7 지점이 similarity 35에서 작은 소그룹을 형성하였다.

[표 IV-가-22] Similarity matrix

	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10
St. 1	0.0000									
St. 2	52.812 1	0.0000								
St. 3	39.021 3	44.969 8	0.0000							
St. 4	27.521 1	26.341 7	24.107 3	0.0000						
St. 5	39.423 2	46.684 1	32.217 0	30.458 6	0.0000					
St. 6	29.418 1	48.552 9	36.768 0	10.062 4	36.066 3	0.0000				
St. 7	12.602 4	17.036 6	15.419 7	34.552 9	12.124 4	8.9168	0.0000			
St. 8	22.808 7	34.794 2	21.013 6	29.015 8	28.612 4	28.303 7	0.0000	0.0000		
St. 9	49.801 7	50.350 6	37.091 5	33.398 5	49.900 3	34.459 1	19.107 9	26.340 3	0.0000	
St. 10	43.797 3	54.653 9	58.307 2	26.073 3	47.154 6	46.591 2	16.621 9	27.202 6	57.480 0	0.0000



[그림 IV-가-33] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 조사지점별 집괴분석수치도

□ 월별변화양상

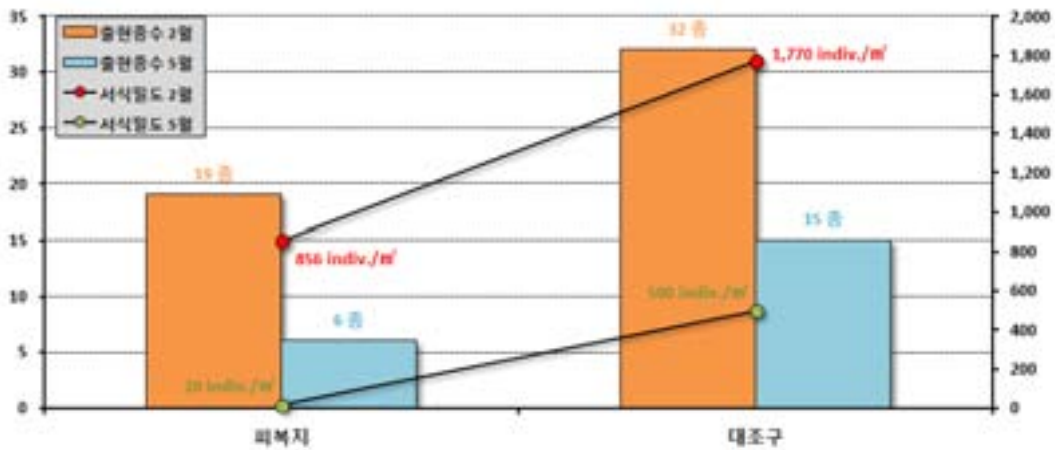
- 2월과 5월에 부산항에서 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상을 출현종수와 서식밀도를 기준으로 비교하면 표 IV-가-23와 같다.
- 출현종수를 기준으로 2월에 출현한 종이 총 76종으로 피복지에 피복사업을 실시한 후 5월에 출현한 21종에 비해 월등히 많은 종이 출현하였다. 서식밀도의 경우도 2월에 출현

한 대형저서동물의 출현양상이 상대적으로 높게 나타나고 있으며 출현한 동물문의 수도 많았다.

[표 IV-가-23] 2월과 5월에 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상의 비교

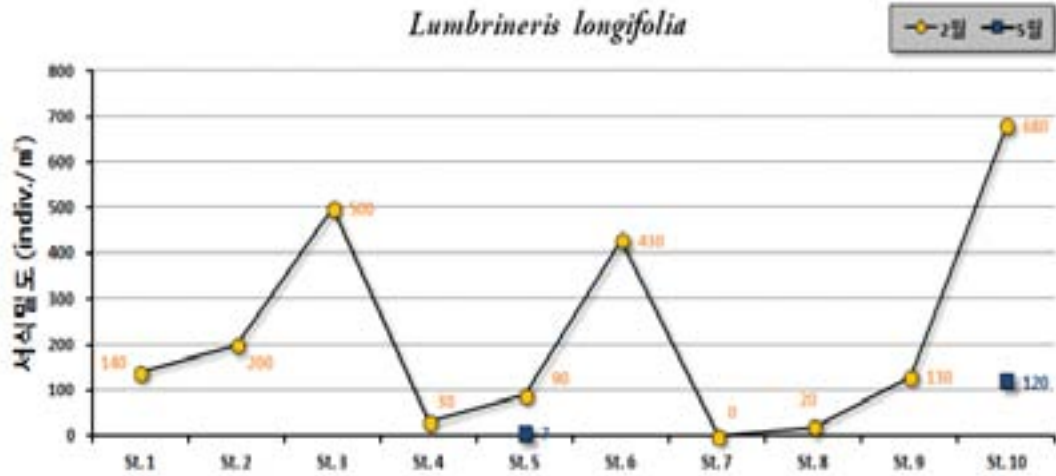
	출현종수		서식밀도	
	2월	5월	2월	5월
자포동물문	1	-	6	-
편형동물문	1	-	6	-
연체동물문	11	5	33	13
환형동물문	58	15	1,261	487
절지동물문	2	-	1	-
극피동물문	3	-	7	-
척삭동물문	-	1	-	20
<b>Total</b>	<b>76</b>	<b>21</b>	<b>1,313</b>	<b>520</b>

- 피복사업을 실시한 피복지와 비교자료인 대조구로 구분하여 2개소의 출현종수 및 서식밀도의 변화양상은 그림 IV-가-34와 같다.



[그림 IV-가-34] 2015년 피복지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 월별 종조성 변화

- 2월과 5월 조사 중 출현한 대형저서동물의 최 우점종인 *Lumbrineris longifolia* (긴자락 송곳갯지렁이)의 월별변화와 조사정점별 출현양상을 살펴보면 그림 IV-가-35와 같다. 2월 대조구인 St. 10정점에서 가장 많은 밀도로 출현하여 680 indiv./m<sup>2</sup>이 출현하였으며, St. 7정점에서는 출현하지 않았다.
- 피복작업을 3월에 실시하고 조사된 5월 조사에서는 시범 피복지점은 St. 5 지점에서 서식 밀도가 대량으로 감소하는 경향을 보였으며, 대조구에서도 감소하는 양상으로 조사되었다.



[그림 IV-가-35] 2015년 부산항에서 출현한 대형저서동물 최우점종의 월별 변화 양상

### ■ BPI(Benthic Pollution Index)

#### □ 2015년 2월

- 2015년 2월 대형저서동물의 유기물 오염에 대한 반응정도는 그들의 섭식유형에 따라 다르게 나타난다는 가정하에, 각 조사지점에서 우점하여 출현한 환형동물을 기준으로 4개의 섭식 유형군으로 나누고, Word(1978)가 제안한 식성지수공식을 응용하여 이들의 섭식형 구조를 1~100 사이의 수치로 나타낸 표 IV-가-24을 활용하였다(한국해양연구소 1995).

[표 IV-가-24] 식성지수공식을 응용한 BPI-Levels

I	61-100	Normal
II	51-60	Slightly polluted
III	41-50	Moderately polluted
IV	31-40	Highly polluted
V	0-30	Very highly polluted

- Feeding type에 따른 조사정점별 출현한 개체수에 따라 BPI를 산출하면 표 IV-가-25와 같다.
- 대부분의 조사지점이 I~II 단계의 BPI-Levels로 산출되었으나, 대조구인 St. 10은 III 단계, St. 6지점은 IV으로 BPI-Levels이 산출되었다. 지점별 산출된 BPI의 수치를 도면에 도시화하면 그림 IV-가-36과 같다.



[표 IV-가-25] 2015년 2월 부산항 조사정점별 산출된 BPI-Levels

Feeding type	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10
N1	370	150	470	60	160	40	40	70	140	280
N2	210	100	750	190	90	50	110	70	180	240
N3	280	380	1340	50	230	600	30	30	170	1,150
N4	130	40	240	70	0	0	10	30	20	20
BPI	60.94	51.24	50.60	54.95	61.81	39.61	64.91	63.33	62.09	48.72
Levels	I	II	II	II	I	IV	I	I	I	III

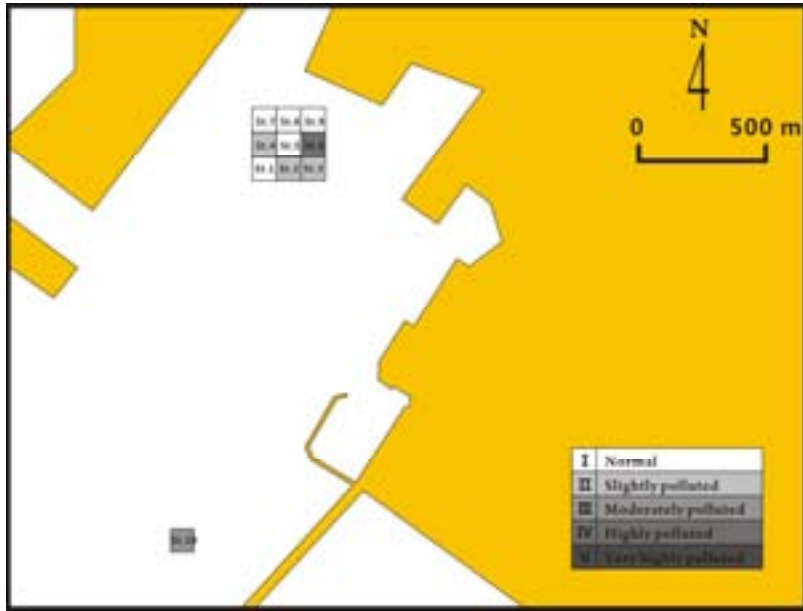
- Feeding type에 따른 피복예정지와 대조구에서 출현한 환형동물의 개체수에 따라 BPI를 산출하면 표 IV-가-26과 같다.

[표 IV-가-26] 2015년 2월 부산항 피복지와 대조구 산출된 BPI-Levels

Feeding type	피복지	대조구
N1	1,256	280
N2	1,711	240
N3	3,144	1150
N4	456	20
BPI	52.45	48.72
Levels	II	III

□ 2015년 5월

- 2015년 5월 대형저서동물의 유기물 오염에 대한 반응정도는 그들의 서식 유형에 따라 다르게 나타난다는 가정하에, 각 조사지점에서 우점하여 출현한 환형동물을 기준으로 4개의 섭식유형군으로 나누고, Word(1978)가 제안한 식성지수공식을 응용하여 이들의 섭식형 구조를 1~100 사이의 수치로 나타낸 표 IV-가-24를 활용하였다(한국해양연구소 1995).
- Feeding type에 따른 조사정점별 출현한 개체수에 따라 BPI를 산출하면 표 IV-가-27와 같다.
- 피복지와 대조구의 BPI-Levels은 표 IV-가-27과 같이 산출되었으나, 피복직후 시행된 2015년 5월에 출현한 환형동물의 출현빈도가 낮아 Feeding type에 따른 피복지와 대조구에서 산출된 BPI-Levels는 그 신뢰도가 낮다.
- 지속적인 오염도 평가를 위해서는 모니터링 작업을 지속적으로 병행하면서 시간흐름에 따른 BPI-Levels의 변화양상을 살펴야한다.



[그림 IV-가-36] 2015년 2월 출현한 대형저서동물의 섭식 특서에 따른 저서오염지수(BPI)

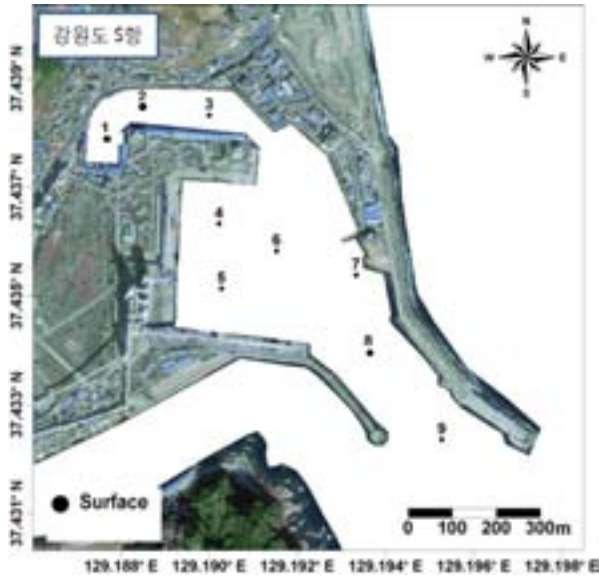
[표 IV-가-27] 2015년 5월 부산항 피복지와 대조구 산출된 BPI-Levels

Feeding type	St. 5(피복지)	St. 10(대조구)
N1	-	80
N2	-	220
N3	7	160
N4	-	20
BPI	33.33	58.33
Levels	IV	II

(2) 국내 오염해역 조건 분석을 통한 피복기술 적용안 도출

(가) 적용시험 대상해역 외 타 오염해역에 대한 해역 특성 분석(강원도 S항)

① 대상 해역 조사



[그림 IV-가-37] 2014년 11월 강원도 S항 퇴적물 조사 정점

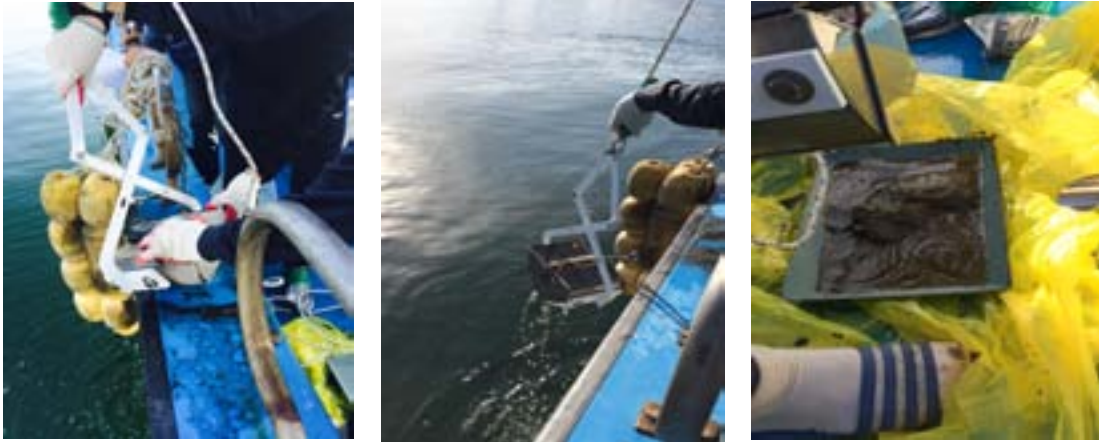
○ 조사 해역 개요

- 대상 해역: 강원도 S항
- 조사 기간: 2014년 11월 11일
- 조사 정점 및 지도

[표 IV-가-28] 강원도 S항 퇴적물 조사 정점 좌표

지점	Latitude	Longitude
1	37°26.273'	129°11.258'
2	37°26.308'	129°11.308'
3	37°26.300'	129°11.400'
4	37°26.180'	129°11.413'
5	37°26.108'	129°11.417'
6	37°26.150'	129°11.492'
7	37°26.123'	129°11.600'
8	37°26.038'	129°11.617'
9	37°26.942'	129°11.717'

- 조사사진



[그림 IV-가-38. 2014년 11월 현장 조사 및 시료채취 사진]

- 주요 조사 항목: 유기물, 중금속 및 그 외 항목(pH, 입도, 함수율, IL 등)
- 시료 특성: Silt-clay 질 우세

○ 조사 방법

- 조사 지역 표층 퇴적물의 퇴적물 특성을 조사하기 위하여 그랩 퇴적물 채취기(Grab sampler)를 이용하여 표층 퇴적물을 시료로 채취하였음.
- 퇴적물 내 쓰레기, 나무 조각 등을 제거하고 나머지 퇴적물을 밀봉한 후 아이스 박스를 이용하여 실험실로 이동시켜 분석함.

② 분석 항목 및 분석 방법

○ 분석항목

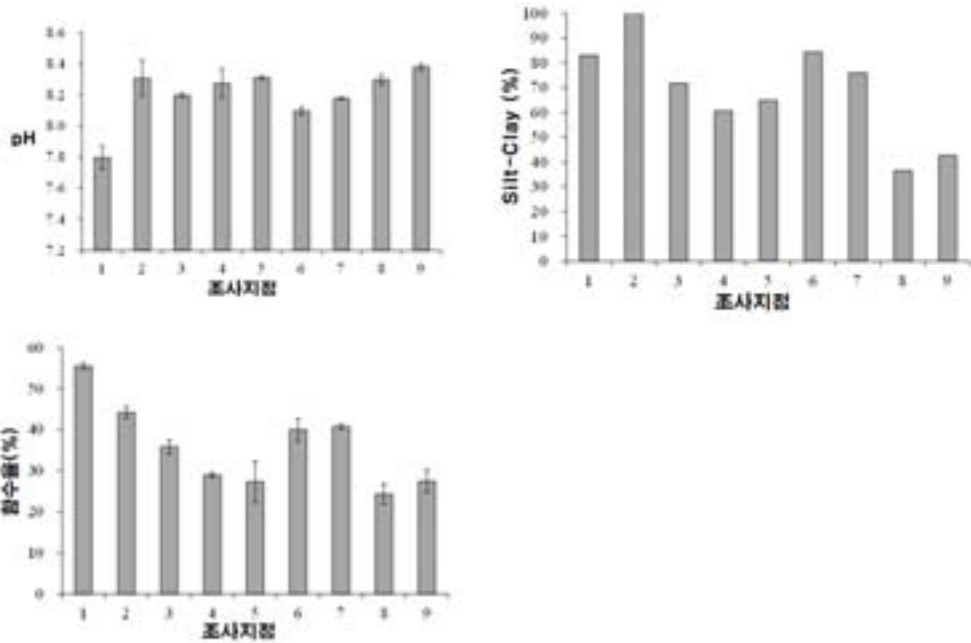
- 일반항목: pH, 함수율, 입도, 총 유기탄소(TOC), 화학적 산소요구량(COD), 총 질소(T-N), 총 인(P) (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)
- 유해화학물질: 니켈(Ni), 아연(Zn), 구리(Cu), Pb(납), Cd(카드뮴), 비소(As), Cr(크롬) (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)

○ 분석 방법: 해양환경공정시험기준에 준하여 분석함

③ 분석 결과

㉞ 물리적 특성

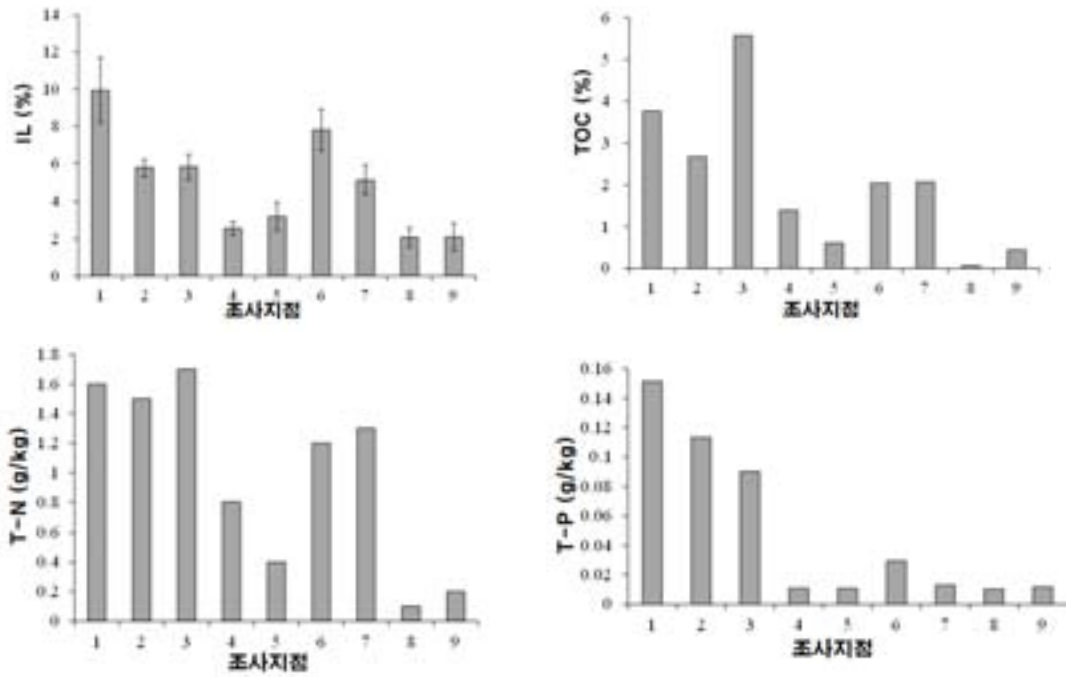
- pH: 전체적으로 7.8 ~ 8.3의 범위를 보이고 있어 약 알칼리성의 특성을 보이고 있음.
- 입도: 저서퇴적물의 Silt-clay양을 조사한 결과 내항쪽인 조사지점 1,2,3 지점과 지점 6,7에서 70~100%로 높은 Silt-clay 양을 보였으나, 지점 8,9에서는 30~50%의 분포를 보임. 특히, 내항쪽에서 미립자의 퇴적물들이 많이 퇴적되는 환경을 보여주고 있음.
- 함수율: 조사지점의 저서 퇴적물의 전체적인 함수율을 보면 20~60%의 분포 특성을 보였음. 이러한 변화는 입경과 비슷한 변화 경향을 보이고 있음. 즉, 내항쪽이 함수율이 높고 외항쪽으로 갈수록 함수율이 낮아지는 것으로 나타냄(지점 6,7 제외).



[그림 IV-가-39] S항의 조사 지점별 저서 퇴적물의 물리적 특성

#### ㉔ 부영양화 물질 오염도

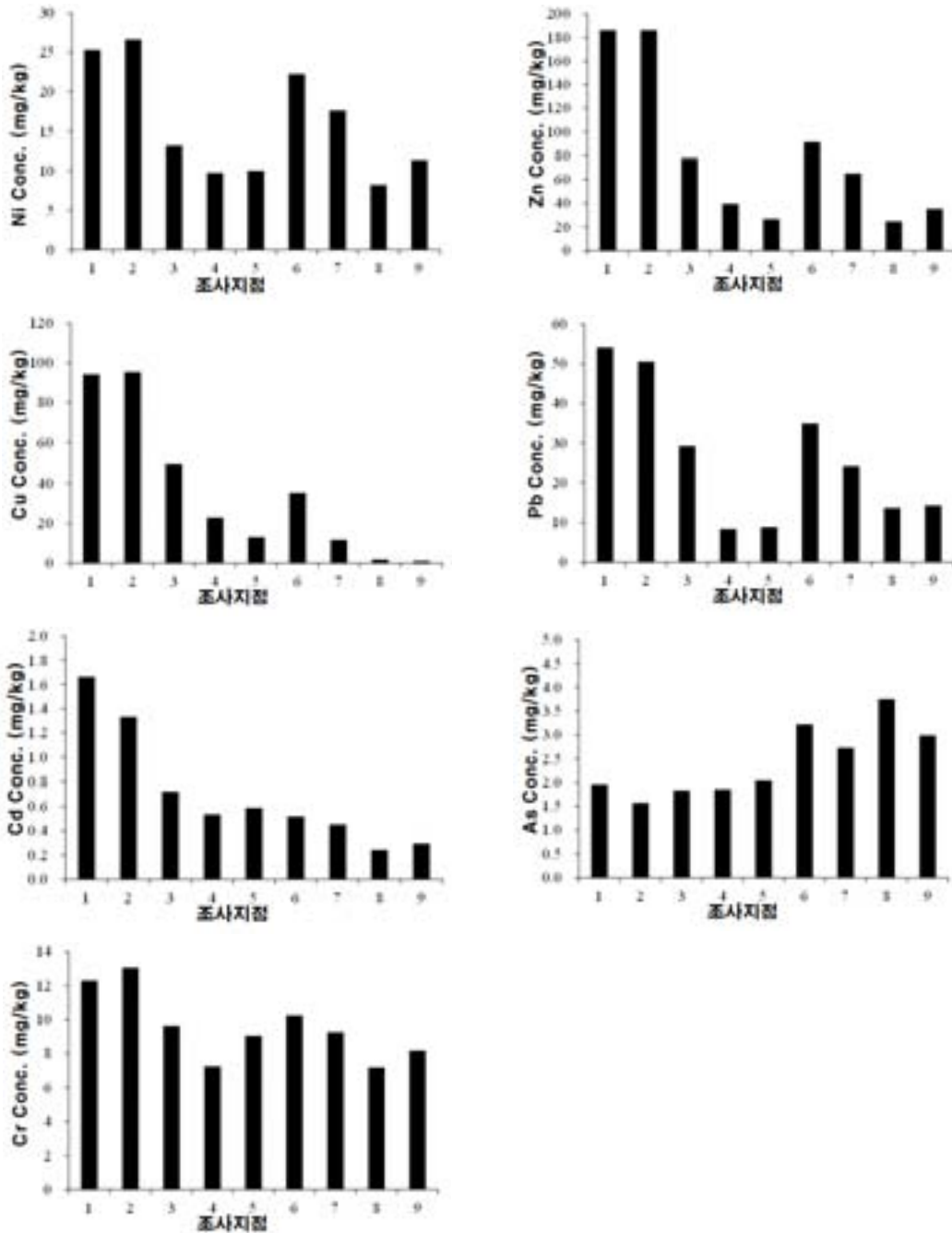
- 강열감량(IL): S항의 퇴적물의 강열감량(IL)의 농도 분포는 2.0 ~ 9.9의 범위를 보이고 있음. 내항쪽인 지점 1,2,3과 지점 6,7에서 비교적 높은 IL 값을 나타냄.
- 총 유기탄소(TOC): 조사 지점의 TOC는 0.06 ~ 5.57%의 범위를 보이고 있음. 조사 지점 간 큰 차이를 보이고 있음.
- 총 질소(T-N): 조사 지점의 T-N 농도는 0.1 ~ 1.7 g/kg의 범위를 보이고 있음. 특히 내항쪽인 지점 1,2,3 지점에서는 매우 높은 농도로 분포하고 있었고 지점 6,7에서도 높은 농도를 보이고 있음.
- 총 인(T-P): 조사 지점의 T-P 농도는 0.01 ~ 0.15 g/kg의 범위를 보이고 있음. 총인에서도 내항쪽인 지점 1,2,3에서 높은 농도를 보이고 있음.



[그림 IV-가-40] S항의 조사 지점별 저서 퇴적물의 부영양화 물질 오염도

#### ㉔ 중금속 오염도

- S항 조사 지점간 퇴적물 내 중금속별 농도를 보면, 조사지점 1,2에서 니켈(Ni), 구리(Cu), 납(Pb), 카드뮴(Cd)에서 기준치 1을 초과하는 농도를 보였음.
- 내항쪽 조사 지점인 1,2,3에서 중금속들이 비교적 높은 농도로 검출되었고 외항쪽으로 갈수록 농도는 낮아지는 경향을 보였음. 하지만 비소(As)인 경우에는 내항보다 외항쪽에서 좀 더 높은 농도 특성을 보이고 있음.
- 아연(Zn)이 가장 높은 농도를 보이고 있고, 그 다음으로 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni)순으로 높은 농도를 보였음. 비소(As), 크롬(Cr), 카드뮴(Cd)은 비교적 저농도를 나타내고 있음.



[그림 IV-가-41] S항 조사 지점간 퇴적물 내 중금속 농도 변화

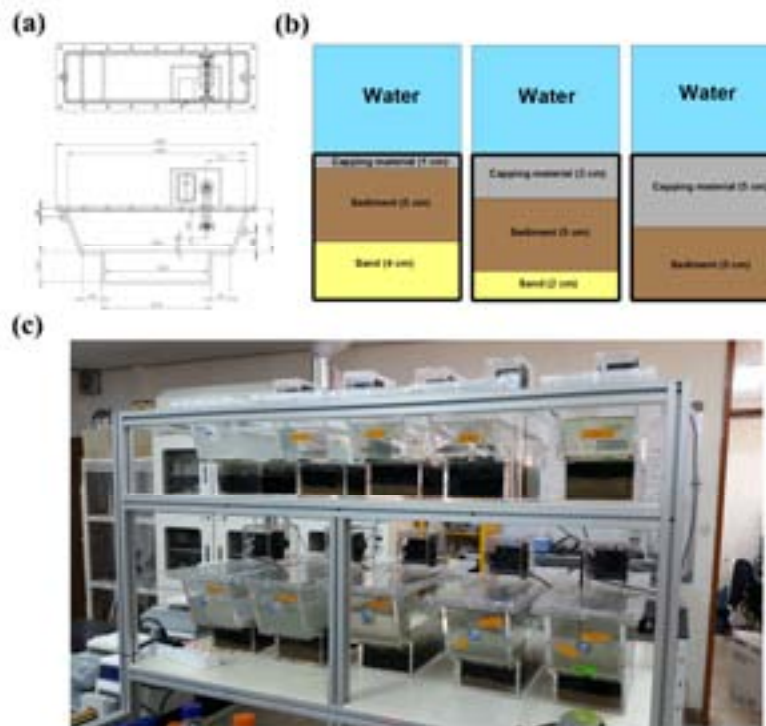
(나) 현장 모사 수조를 활용한 중금속, 영양염류, 유기오염물질 용출 저감 및 안정화를 위한 피복소재 적용안 도출(적용시험 대상외 해역(I항))

① 피복소재 및 수조실험

- 실험에 사용된 제올라이트는 경북 포항에 위치한 (주)렉셈에서 구입하였고, 모래는 충남 목항에서 직접 채취하였다. 또한 열처리한 제올라이트는 고온 반응조에서 500℃로 열처리 후 사용하였음
- 제올라이트와 열처리한 제올라이트는 입도크기 1.18~2.36 mm 로 체가름 후 증류수로 세척 후 풍건하여 실험에 사용하였다. 해사는 별도의 세척 및 입도 구분 없이 사용하였음
- 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사의 피복두께에 따른 중금속 용출차단 정도를 평가

하기 위하여 그림 IV-가-42(a)와 같이 길이 35 cm, 폭 15 cm, 높이 25 cm 크기의 아크릴 수조를 사용

- 제작한 아크릴 수조에 퇴적물을 5 cm 두께로 채우고, 퇴적물 위에 피복소재를 각각 0, 1, 3, 5 cm 두께로 피복하였으며, 퇴적물과 피복소재의 총 두께를 10 cm로 하여 수층의 깊이를 일정하게 유지하기 위해 퇴적물 밑면을 모래로 충전(그림 IV-가-42(b)).
- 이후 퇴적물 및 피복층이 교란되지 않도록 정량펌프(Masterflex L/S model No. 7528-10, Thermo Fisher Scientific, USA)를 이용하여 해수 8 L를 수조에 채운 후 실험 실시
- 실험을 위한 조건으로 수체의 흐름을 유도하기 위하여 수조의 상부에 임펠러를 설치하였고, 60 rpm의 속도로 운전하였고(그림 IV-가-42(c)), 9개의 피복소재를 충전한 수조와 피복소재를 충전하지 않은 1개의 수조에 대하여 1주 1회 시료 채취 및 분석을 수행 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균값 제시)
- 시료채취는 50 ml 주사기를 이용하여 해수시료 20 ml를 채취한 후 pH/EC meter (Sevenmulti S40, Mettler Toledo, Switzerland)를 사용하여 pH와 EC를 측정하였고, 채취한 해수의 양은 즉시 보충하였음



[그림 IV-가-42] 실험 구성 (a) 파랑수조 모식도, (b) 파랑수조의 퇴적물 및 피복소재 구성 단면, (c) 파랑수조를 이용한 실험실 규모의 용출실험 사진

- 채취된 시료는 0.45  $\mu\text{m}$  실린지 필터(Whatman 0.45  $\mu\text{m}$  pp filter, USA)로 여과하여 해수 중 존재하는 중금속에 농도는 ICP-OES(Perkin-Elmer, Optima 8300, USA)로 측정

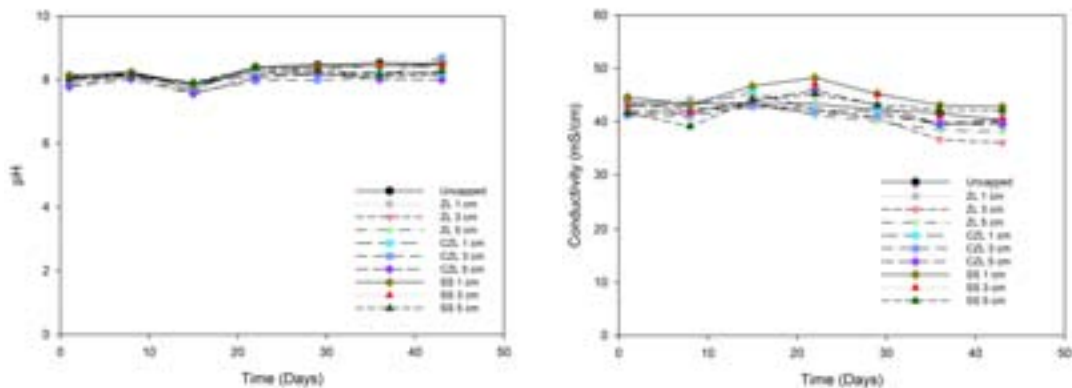
## ② 피복소재의 피복두께의 따른 pH, EC 변화

- 피복소재의 피복두께에 따른 오염퇴적물 내 중금속 용출차단을 위하여 제올라이트 1 cm(ZL1), 3 cm(ZL3), 5 cm(ZL5), 열처리한 제올라이트 1 cm(CZL1), 3 cm(CZL3), 5



cm(CZL5), 해사를 각각 1 cm(SS1), 3 cm(SS3), 5 cm(SS5)를 각각 피복하였고, 약 2개월 동안 pH와 EC의 변화를 나타내었음(그림 IV-가-43)

- 미 피복수조의 pH는 실험 1일차 8.04에서 실험 43일차 8.50으로 증가하는 경향을 나타냈고, 제올라이트를 1, 3, 5 cm 피복한 경우 실험 종료시 pH는 각각 8.13(ZL1), 8.17(ZL3), 8.40(ZL5)으로 제올라이트 피복 두께가 증가함에 따라서 pH가 미미하게 증가하는 경향을 나타내었음
- 열처리한 제올라이트 피복의 경우 pH는 피복 두께별로 각각 8.20(CZL1), 8.70(CZL3), 8.00(CZL5)으로 미미하게 감소하는 경향을 나타내었음.
- 해사 피복시 초기 pH는 8.48(SS1), 8.45(SS3), 8.27(SS5)으로 피복두께에 비례하여 미미한 감소경향을 나타내었음
- 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사의 피복 두께에 따른 EC를 분석한 결과, 미피복 수조는 실험 시작시 43.6 mS/cm에서 실험 종료시 40.2 mS/cm로 감소하였고, 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사 피복시에도 EC가 미미하게 감소하였음



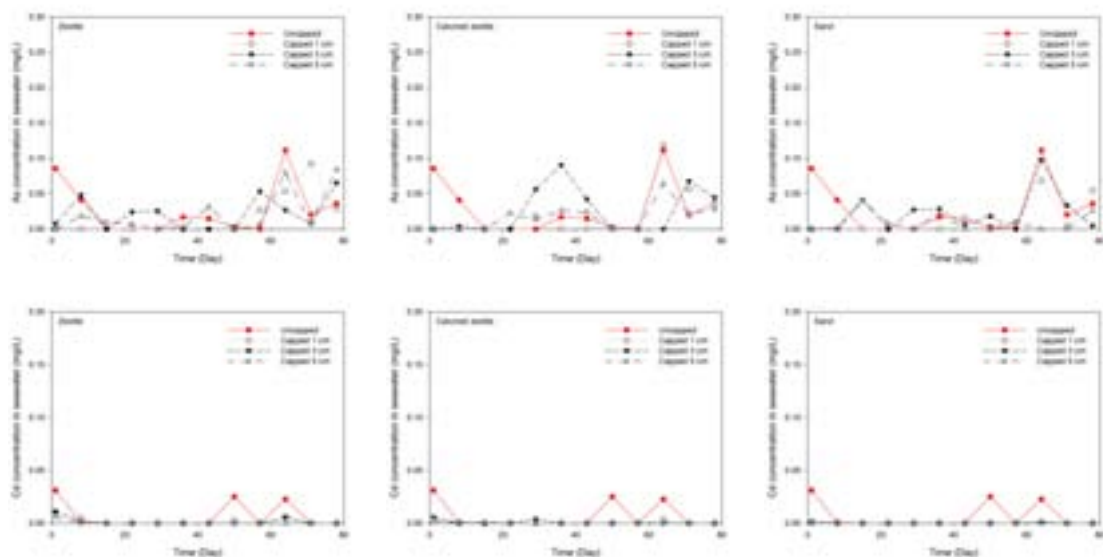
[그림 IV-가-43] 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사 피복에 따른 pH 및 EC 변화

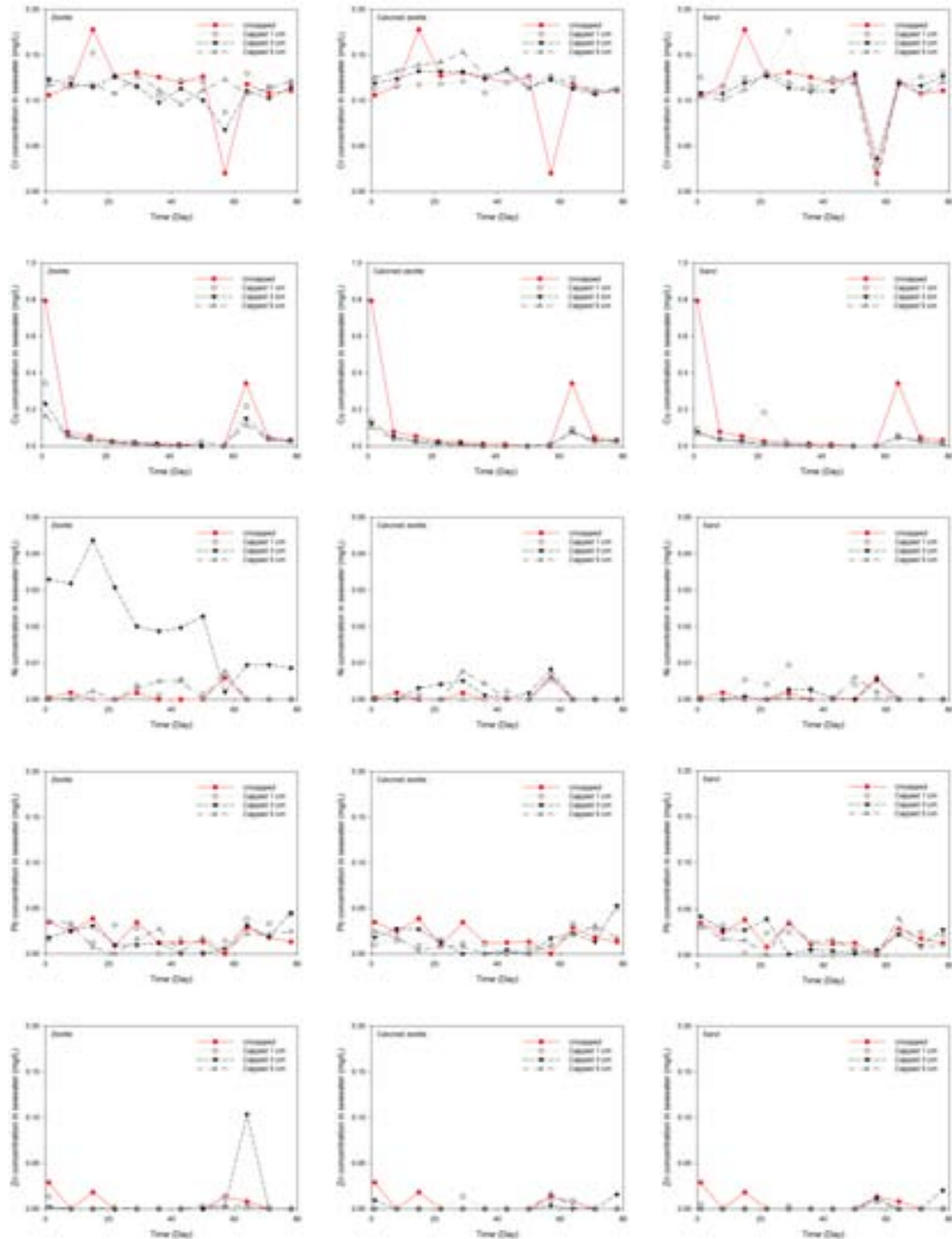
### ③ 피복두께에 따른 퇴적물 내 중금속 용출 특성

- 각각의 피복소재를 0, 1, 3, 5 cm 피복하고 퇴적물에서 중금속이 용출되는 경향을 파악하기 위하여 약 78일간 수조실험을 수행하여 해수 내 중금속 함량을 분석
- 미피복시 As의 용출은 실험 시작시 0.0856 mg/L에서 실험 종료시 0.0359 mg/L로 감소하였고, 제올라이트 1 cm 피복의 경우 As는 0.0000-0.0289 mg/L, 3 cm 피복시 0.0077-0.0652 mg/L, 5 cm 피복시 0.0000-0.0840 mg/L의 농도 범위를 나타내었음
- 열처리한 제올라이트 피복시 피복 두께별 As의 농도는 0.0000-0.0349 mg/L(CZL1), 0.0000-0.0444 mg/L(CZL3), 0.0000-0.0285 mg/L(CZL5) 범위로 나타냄
- 해사 피복시 피복 두께별 As의 농도는 0.0000-0.0546 mg/L(SS1), 0.0000-0.0045 mg/L(SS3), 0.0000-0.0261 mg/L(SS5) 범위로 나타냄
- 미피복 수조의 Cr은 실험기간 동안 0.1058-0.1107 mg/L의 농도 범위에서 뚜렷한 변화를 나타내지 않음
- 제올라이트 피복시 Cr의 농도는 제올라이트의 피복두께가 증가 할수록 용출되는 Cr의 농도가 큰 변화가 없는 것으로 나타났지만, 제올라이트 피복시 Cr 농도는 미피복시 보다 높게 형성
- 열처리한 제올라이트를 피복한 경우 Cr의 농도는 두께에 따른 뚜렷한 농도 변화를 나타

내지 않았으며, 미피복 수조의 Cr 농도와 차이를 나타내지 않았음

- 해사 피복시 피복 두께가 증가함에 따라 Cr의 농도가 감소하는 것으로 나타났지만, 미피복 수조에 비하여 Cr 농도가 낮게 나타나지는 않았음
- Cu 용출은 미피복 수조의 경우 0.7931 mg/L에서 0.0311 mg/L로 시간이 지남에 따라 농도가 감소하였음
- 제올라이트를 피복하였을 경우 미피복 수조의 Cu 용출량보다는 낮아지는 결과를 나타내었음
- 열처리한 제올라이트를 1 cm 피복하였을 때 초기 0.1401 mg/L 0.0266 mg/L로 감소하였고, 3 cm 피복수조는 0.1255-0.0270 mg/L, 5 cm 피복시 0.1028-0.0239 mg/L로 미미하게 용출량이 감소됨
- 해사를 피복하였을때 시간이 경과함에 따라 Cu의 용출량이 감소되는 결과를 나타냄
- Ni의 경우 미피복 수조는 실험 1일차 0.0040 mg/L에서 실험 종료시 용출이 일어나지 않았고, 제올라이트 피복시에는 미미하지만 약간의 용출이 발생되었음
- 반면, 열처리한 제올라이트와 해사의 경우 실험 초기와 종료시에는 용출이 발생하지 않았음
- 미피복 수조의 Pb용출은 실험초기 0.0347 mg/L에서 종료시 0.0132 mg/L로 감소하였지만, 제올라이트 피복시에는 실험종료시 0.0436 mg/L(ZL1), 0.0449 mg/L(ZL3), 0.0245 mg/L(CL5)를 나타내었음
- 또한 열처리한 제올라이트와 해사의 경우도 0.0502 mg/L(CZL1), 0.0528 mg/L(CZL3), 0.0173 mg/L(CZL5), 0.0213 mg/L(SS1), 0.0277 mg/L(SS3), 0.0112 mg/L(SS5)를 나타내어 미피복 수조에 비해 약간 증가하는 경향을 보였음
- 반면, Cd와 Zn의 용출 특성은 미피복 수조 및 피복 수조 모두 시간이 경과하면서 용출이 일어나지 않는 것으로 나타났음





[그림 IV-가-44] 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사 피복에 따른 중금속 용출 결과

#### ④ I항 퇴적물을 이용한 용출 차단 실험

- 유효 용량 1 m<sup>3</sup>의 수조에 오염퇴적물(대조군)과 오염퇴적물을 순환골재, 제올라이트로 피복한 상태에서 60일 후, 수질 및 오염퇴적물의 중금속 변화를 비교 분석함.
- 각 실험군의 피복층의 두께는 1-2 cm로 피복을 하였으며, 피복소재의 입경의 크기는 1-3cm인 순환골재와 제올라이트를 각각 사용하였음.
  - 수질항목: 화학적 산소요구량(COD), 총 질소(T-N), 총 인(T-P), 니켈(Ni), 아연(Zn),

구리(Cu), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As), 크롬(Cr)

- 퇴적물 항목: 니켈(Ni), 아연(Zn), 구리(Cu), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As), 크롬(Cr)



<현장모사 실험 전경>



<순환골재 피복>



<제올라이트 피복>



<대조군(오염퇴적물)>

[그림 IV-가-45] 1m<sup>3</sup> 규모 현장모사 수조 전경 및 피복소재들의 피복 후 전경

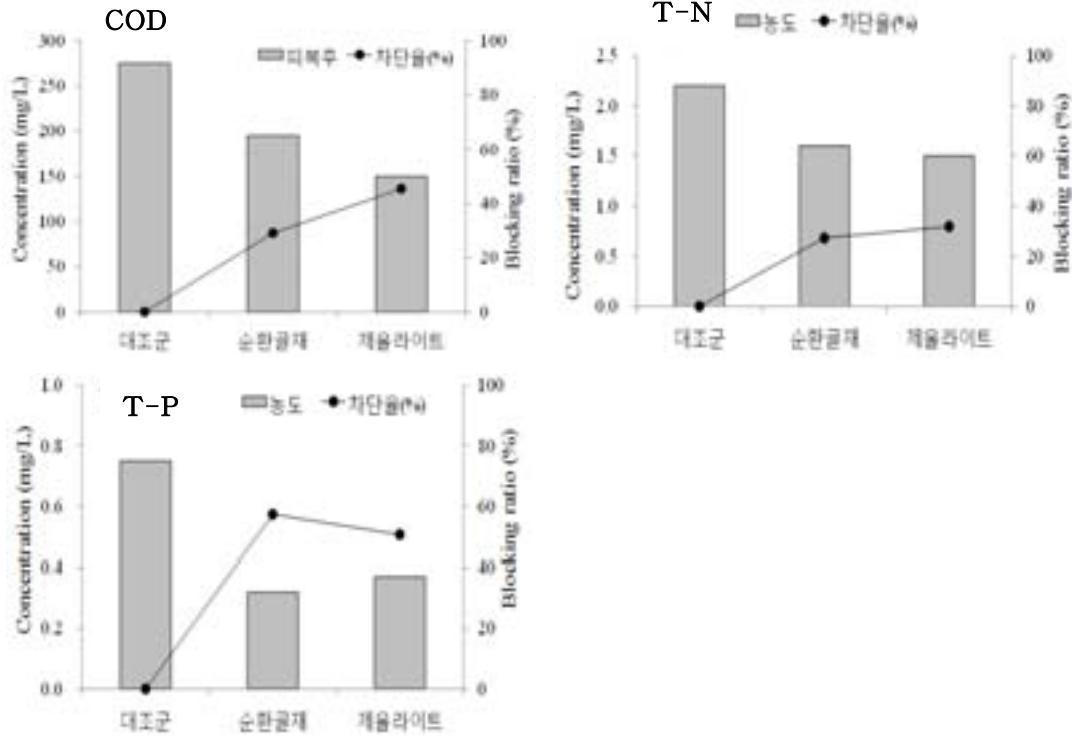
### ㉔ 피복소재에 의한 오염물질 용출저감 효과

#### ■ COD

- 피복소재인 순환골재, 제올라이트, 대조군(퇴적물)을 60일 동안 배양한 후 수중의 COD값을 측정한 후, 대조군과 피복소재들간의 차단율을 비교함.
- 대조군의 유기물 감소비를 고려한 COD 저감 효과에서는 순환골재가 29.1% 차단율을 보였으며 제올라이트는 45.5%을 보였다. 이 결과로부터 순환골재보다 제올라이트가 높은 차단율을 보였음.

#### ■ T-N, T-P

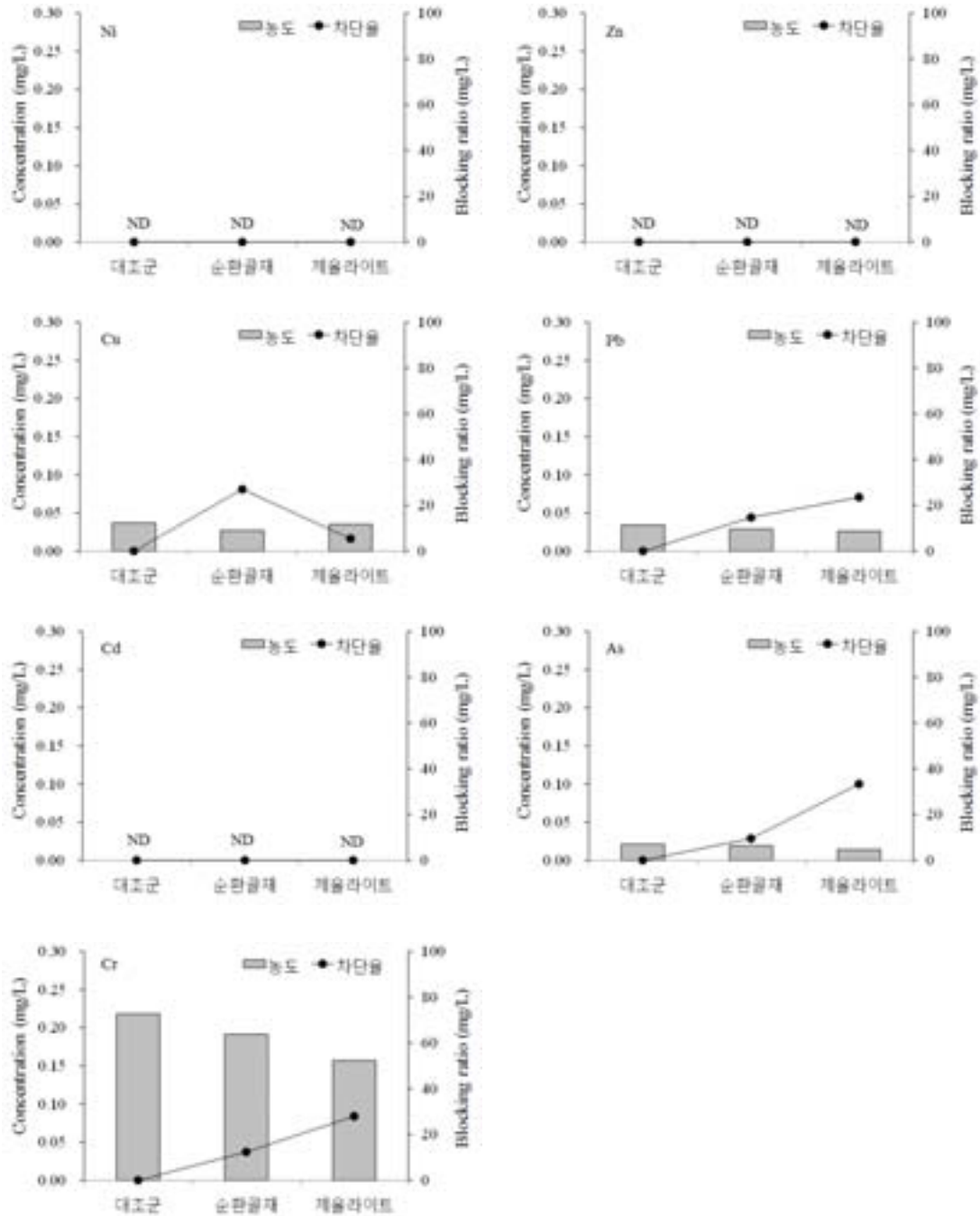
- 피복소재인 순환골재, 제올라이트, 대조군(퇴적물)을 60일 동안 배양한 후 수중의 질소와 인의 값을 측정한 후, 대조군과 피복소재들간 차단율을 비교함.
- 대조군과 비교해서 순환골재와 제올라이트에서 각각 총질소는 순환골재(27.3%)가 제올라이트(31.8%)를 사용할 경우 보다 조금 낮은 차단 효과를 보였음.
- 대조군과 비교해서 순환골재와 제올라이트에서 각각 총인은 순환골재(57.3%)가 제올라이트(50.7%)를 사용할 경우 보다 더 높은 차단 효과를 보였음.
- 피복소재인 순환골재와 제올라이트를 사용할 경우 영양염류인 질소와 인의 차단효과를 나타내고 있음을 알 수 있었음.



[그림 IV-가-46] 피복소재에 의한 오염물질 저감 효과

㊤ 피복소재에 의한 중금속 용출저감 효과

- 순환골재와 제올라이트에 의한 중금속 용출 차단 효과에 대한 결과를 보면, 먼저 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd)은 용출이 되지 않아 차단을 또한 계산할 수 없었음.
- 오염퇴적물로부터 구리(Cu), 납(Pb), 비소(As), 크롬(Cr)은 각각 0.037mg/L, 0.034 mg/L, 0.021 mg/L, 0.218 mg/L 농도로 용출 특성을 보였음.
- 순환골재에 의해 구리(Cu), 납(Pb), 비소(As), 크롬(Cr)의 차단율은 각각 27%, 14%, 9%, 12%를 보였으며, 제올라이트에서는 각각 5%, 23%, 33%, 27%의 차단율을 보였음.



[그림 IV-가-47] 피복소재에 의한 중금속의 용출 저감 효과

(3) 다양한 오염특성에 대응하는 피복기술 고도화

(가) Calcination 및 표면처리를 통한 반응성 피복 소재의 용출 차단 및 흡착 효율 향상

① 열처리한 폐콘크리트를 이용한 인산염의 제거효율 향상

㉠ 실험재료

- 본 실험에서 사용된 흡착제는 건설 공사현장에서 발생한 산업폐기물로써 경기도 안성시 원곡면 산하리에 있는 동부이엔티(주)로부터 입경 5 mm이하의 것을 구입하여 사용
- 폐콘크리트는 사용하기 전, 균일한 입경을 가진 것을 얻기 위해 No.20체와 No.16체를 이

---

용하여 0.85 mm~1.18 mm크기로 입도 구분

- 실험에 사용된 모든 인산염 용액은  $K_2HPO_4$ 와  $KH_2PO_4$ 를 각각 1:1로 혼합하여 제조하였고, 0.1 M NaOH와 0.1 M  $HNO_3$ 를 사용하여 pH 7로 조절하여 사용

#### ㉔ 배치 테스트

- 열처리하기 전과 각각의 조건 즉, 100, 300, 500, 700, 900°C에서 열처리한 폐콘크리트의 화학적 구성성분을 알아보기 위해 XRF, XRD분석을 수행
- 폐콘크리트에 대한 비표면적과 기공크기를 살펴보기 위해 BET분석을 수행
- 시간에 따른 인산염 흡착 특성을 알아보기 위한 실험에서 반응시간은 10, 20, 40 min, 1, 3, 6, 12, 24 hr로 각각 설정하였고, 인산염 용액의 농도가 고농도일 때와 저농도일 때의 폐콘크리트 흡착 거동을 살펴보기 위하여 인산염 용액의 농도는 각각 300과 50 mg- $PO_4^{3-}$ /L로 제조하여 실험에 사용
- 용액의 농도에 따른 흡착특성을 알아보기 위한 실험에서 인산염 용액의 농도는 각각 10, 20, 50, 100, 200, 300, 600 mg- $PO_4^{3-}$ /L로 하였고, 각각의 온도에서 열처리한 폐콘크리트의 농도에 따른 흡착특성을 비교
- 또한, 용액의 pH에 따른 흡착 영향을 알아보기 위하여 인산염 용액의 초기 pH를 3, 5, 7, 9, 11로 설정하였고 각각의 pH에 따라 나타나는 흡착제의 흡착능 평가
- 모든 실험은 3반복 하에서 이루어졌으며, 실험에 따라 흡착제와 반응한 샘플용액은 상등액만을 채취하여 No.6(fiter papers, Whatman, USA)여과지로 여과하여 아스크로빈산 환원법에 의해 인산염의 잔류농도, 단위 질량당 흡착제의 흡착량, 제거효율 등을 분석

#### ㉕ 데이터 분석

- 흡착제의 동역학적 흡착실험결과는 유사 1차 모델(Pseudo first-order model)과 유사 2차 모델(Pseudo second-order model)을 이용하여 분석(Park et al., 2010)

$$q_t = q_e [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (1)$$

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (2)$$

- 여기서  $q_t$ 는 시간 t 일 때 여재 단위질량당 흡착된  $PO_4^{3-}$ 의 양(mg/g),  $q_e$ 는 평형상태에 도달하였을 때 흡착제의 단위질량당 흡착된  $PO_4^{3-}$ 의 양(mg/g),  $k_1$ 은 유사 1차 반응 상수(1/h),  $k_2$ 는 유사 2차 반응 속도 상수(g/mg/h)임
- 평형흡착 실험결과는 Freundlich model과 Langmuir model을 이용하여 분석

$$S = K_F C^{1/n} \quad (1)$$

$$S = \frac{Q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (2)$$

- S는 단위질량의 흡착제당 흡착된  $PO_4^{3-}$ 의 양(mg/g), C는 평형 상태에서 액상의  $PO_4^{3-}$  농
-

도(mg/L),  $K_F$ 는 분배계수(L/g),  $n$ 은 Freundlich 상수,  $K_L$ 은 결합 에너지와 관계된 Langmuir 흡착상수(L/mg),  $Q_m$ 은 단위 질량의 흡착제 당 P의 최대 흡착량(mg/g)이다.  $K_F$ ,  $n$ ,  $K_L$ ,  $Q_m$ 은 실험 결과에 Freundlich model과 Langmuir model을 적용하여 값을 산출

- 칼럼으로 주입된  $PO_4^{3-}$ 의 총 양은 다음과 같이 산정

$$M_{total} = \frac{C_0 Q_{total}}{1000} \quad (3)$$

- $C_0$ 는 P의 유입 농도,  $Q$ 는 체적유량, 그리고  $t_{total}$ 은 총 주입시간
- 주입되는  $PO_4^{3-}$ 의 농도와 유량이 일정할 때 칼럼에서  $PO_4^{3-}$  제거량( $q_{total}$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{total}} (C_0 - C_t) dt \quad (4)$$

- $C_t$ 는 시간  $t$ 에서  $PO_4^{3-}$ 의 농도이다. 실험을 수행하는 동안  $PO_4^{3-}$ 의 제거율( $R_e$ )는 다음에 의해 결정

$$R_e = \left( \frac{q_{total}}{M_{total}} \right) \times 100 \quad (5)$$

#### ㉔ 폐콘크리트 열처리에 따른 화학적 성분 변화

- 열처리 폐콘크리트의 화학적 조성을 살펴보기 위하여 XRF분석을 수행하였고, 그 결과를 표 IV-가-29에 나타내었음
- 분석 결과, 폐콘크리트를 이루고 있는 주요 성분은  $Al_2O_3$ ,  $SiO_3$ ,  $CaO$ 가 가장 많은 것으로 나타났으며, 열처리 온도가 증가할수록  $CO_2$ 의 함량이 줄어드는 것을 확인할 수 있었음
- 이를 통해 인산염( $PO_4^{3-}$ )을 흡착하기에 순환골재가 적합한 소재임을 알 수 있음

[표 IV-가-29] 폐콘크리트 열처리에 따른 화학적 조성 변화

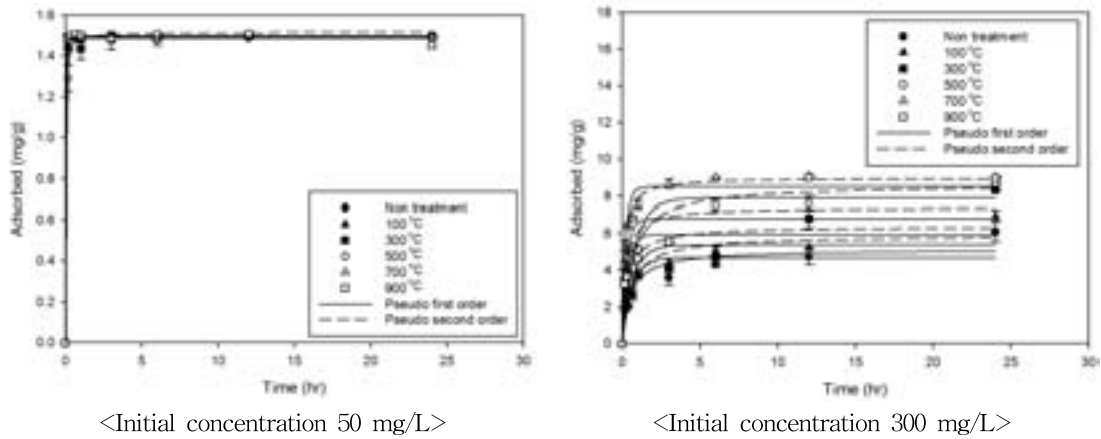
Thermo treatment (°C)	Element Wt.(%)								
	CO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI*	Total
Non treatment	14.6	0.993	7.84	44.0	2.34	25.6	2.33	2.32	100
100	14.2	1.15	8.23	41.8	2.08	27.6	2.65	2.29	100
300	13.5	1.06	8.25	44.7	2.26	25.3	2.60	2.33	100
500	13.2	1.23	8.26	42.0	2.11	28.0	2.83	2.37	100
700	9.35	1.21	8.62	46.4	2.57	27.2	2.62	2.03	100
900	4.22	1.17	9.54	50.9	3.01	25.1	2.84	3.22	100

#### ㉔ 열처리 폐콘크리트의 동역학적 흡착 특성

- 각각의 열처리 폐콘크리트에 따른 인산염의 흡착특성을 평가하기 위해 동역학적 흡착실험을 수행



- 저농도인 50 mg-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L에서는 각각의 조건으로 열처리한 순환골재의 경우 모두 반응 직후 평형에 도달하였고, 고농도의 300 mg-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L에서는 열처리 온도가 높을수록 평형에 빨리 도달함
- 유사 1차 모델과 2차 모델을 이용하여 분석한 결과를 표 IV-가-30에 나타냄
- 50 mg-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L의 경우, 유사 1차 모델과 유사 2차 모델에 모두 부합하였으며, 고농도인 300-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L의 경우에는 유사 2차 모델에 더 부합함을 알 수 있음
- 이를 통해 열처리 순환골재의 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 흡착은 저농도에서는 입자내의 확산과 화학적 작용이 흡착반응속도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었고, 고농도에서는 화학적 작용이 흡착반응속도에 영향을 미친다는 것을 알 수 있음



<Initial concentration 50 mg/L>

<Initial concentration 300 mg/L>

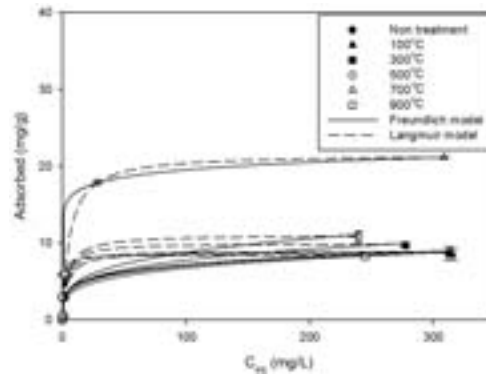
[그림 IV-가-48] 폐콘크리트 열처리에 따른 동역학적 실험결과

[표 IV-가-30] 동역학적 실험결과에 따른 유사1차 2차 모델 파라미터

Adsorbent	Initial Concentration (mg-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /L)	Pseudo first order			Pseudo second order		
		q <sub>e</sub> (mg/g)	k <sub>1</sub> (1/h)	R <sup>2</sup>	q <sub>e</sub> (mg/g)	k <sub>2</sub> (g/mg/h)	R <sup>2</sup>
Non treatment	50	1.492	24.509	0.999	1.495	222.965	0.999
	300	4.696	1.602	0.845	5.136	0.392	0.902
100°C	50	1.496	24.616	0.999	1.499	222.37	0.999
	300	5.3805	1.496(NAN)	0.873	5.893	0.310	0.929
300°C	50	1.490	-	0.998	1.488	-1428.57	0.998
	300	5.948	2.943	0.700	6.373	0.490	0.758
500°C	50	1.499	12.016	0.999	1.517	29.96	0.995
	300	6.787	3.611	0.756	7.393	0.623	0.857
700°C	50	1.491	27.43	0.999	1.492	478.74	0.999
	300	8.502	4.540	0.943	8.988	0.812	0.989
900°C	50	1.495	28.992	0.999	1.495	836.12	0.999
	300	7.899	1.298	0.819	8.620	0.197	0.904

- Freundlich 모델과 Langmuir 모델의 R<sup>2</sup> 값을 비교해보면, Langmuir 모델의 R<sup>2</sup> 값은 Freundlich 모델의 R<sup>2</sup> 값 보다 큰 것으로 나타남(표 IV-가-31).
- 따라서, 평형 흡착 실험 결과 Freundlich 모델 보다 Langmuir 모델에 더 적합함을 알 수 있음

- 본 결과를 통해 열처리 순환골재의  $\text{PO}_4^{3-}$  흡착은 다층 흡착보다는 단일층 흡착으로 일어남을 알 수 있음
- Freundlich 모델의  $1/n$  값은 로 1보다 작으므로 열처리 순환골재의  $\text{PO}_4^{3-}$  흡착은 강하게 형성되어 있다는 것을 알 수 있고, 각각의 열처리한 순환골재의 단위 질량당 흡착량을 비교해보면 700°C로 열처리한 순환골재의 흡착능이 다른 경우보다 월등히 높다는 것을 알 수 있음
- 이는 또한 타 연구에서 제시한 적니의 흡착량 0.43 mg/g, 산처리 적니의 흡착량 5.06 mg/g, 제강 전기로 슬래그의 인산염 흡착량 0.43 mg/g(kang et al., 2013) 월등히 높은 수치를 나타냄



[그림 IV-가-49] 폐콘크리트 열처리에 따른 평형흡착 실험결과

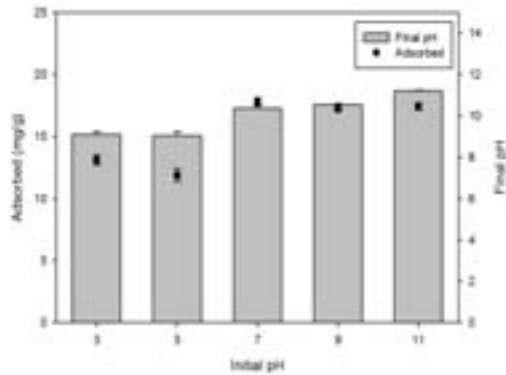
[표 IV-가-31] 폐콘크리트 열처리에 따른 Freundlich, Langmuir 모델 파라미터

Adsorbent	Freundlich model			Langmuir model		
	K (L/g)	1/n	R <sup>2</sup>	Q <sub>m</sub> (mg/g)	K (L/mg)	R <sup>2</sup>
Non treatment	2.738	0.206	0.826	8.926	2.414	0.958
100°C	2.270	0.237	0.801	8.878	3.608	0.958
300°C	2.531	0.244	0.846	9.959	3.045	0.974
500°C	2.538	0.269	0.908	11.059	4.164	0.993
700°C	14.061	0.071	0.903	21.552	5.842	0.903
900°C	2.907	0.197	0.632	8.497	0.925	0.824

#### ㉞ 용액의 화학적 특성 영향

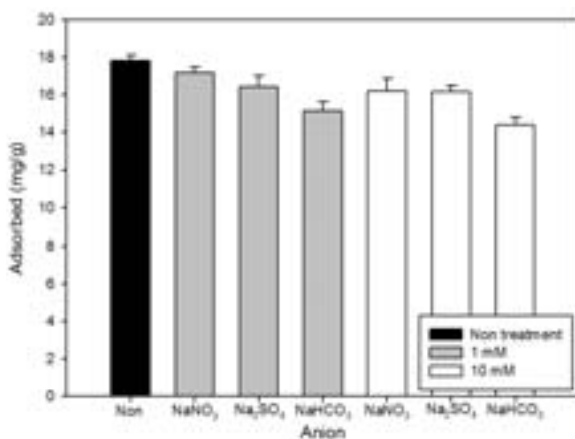
- 용액의 화학적 특성이 열처리 폐콘크리트의  $\text{PO}_4^{3-}$  흡착에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 pH, 경쟁이온의 조건에 따른 실험을 수행하
- 먼저 용액의 초기 pH 3, 5, 7, 9, 11에서 실험을 수행하였으며, 그 결과를 그림 IV-가-50에 나타내었음
- 용액의 초기 pH가 중성 및 염기성인 경우, 산성인 경우보다 높은 흡착량을 나타냄
- 이는 pH에 따른  $\text{PO}_4^{3-}$ 의 존재 형태가 강염기의 pH 영역에서는  $\text{PO}_4^{3-}$  이고, 약 산 및 약 염기의 pH에서는  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  및  $\text{HPO}_4^{2-}$ 로 존재하게 됨, 따라서 중성 및 약염기의 pH에서  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  혹은  $\text{CaHPO}_4$ 의 불용성 화합물로 제거(Tchobanoglous and Burton, 1991; Ramalho, 1983)

○ 그 결과 높은 pH에서  $\text{PO}_4^{3-}$  흡착량이 많은 것으로 판단

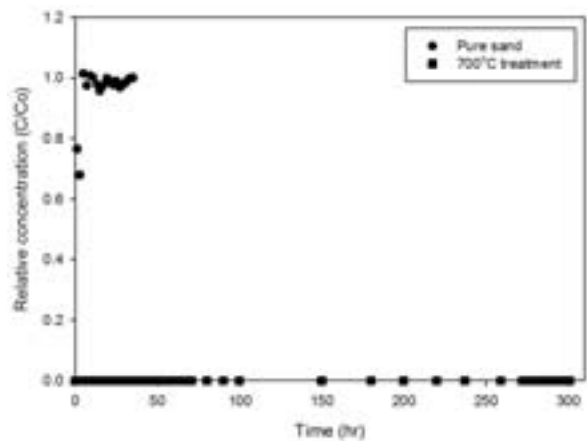


[그림 IV-가-50] 용액의 pH 변화에 따른 열처리 폐콘크리트의 흡착 실험결과

- 용액에  $\text{PO}_4^{3-}$  이외의 타 이온의 존재 시  $\text{PO}_4^{3-}$  흡착 특성을 살펴보기 위하여 자연계에 다량 존재하는 음이온인 황산염 이온( $\text{SO}_4^{2-}$ ), 질산염 이온 ( $\text{NO}_3^-$ ), 중탄산염이온 ( $\text{HCO}_3^-$ ) 이 열처리 순환골재의  $\text{PO}_4^{3-}$  흡착에 미치는 영향을 살펴보았음
- 또한 각 이온들이 인산염 제거에 미치는 상대적인 크기를 살펴보기 위하여 각 이온의 농도는 1, 10 mM로 고정하였고, 동일하게 Na를 양이온으로 결합된 화학물질을 사용
- 그림 IV-가-51의 실험 결과를 살펴보면 경쟁 음이온의 존재 시  $\text{PO}_4^{3-}$  에 영향을 주는 것으로 나타났고, 경쟁 음이온의 농도가 증가할수록 그 영향이 커지는 것을 알 수 있었음
- 경쟁 음이온 중  $\text{NaHCO}_3$ 의 영향이 가장 큰 것으로 나타났음
- 인산염 연속주입 조건에서 열처리 순환골재의 흡착특성을 살펴보았고 그림 IV-가-52에 제시
- 실험 결과, 깨끗한 모래에서는 인산염이 용출되어 완전히 파괴하는데 걸리는 시간은 5시간 이후부터 나타났고, 700°C로 열처리한 순환골재의 경우에는 반응 300시간 이후에도 계속해서 인의 용출이 나타나지 않는 것을 알 수 있었음



[그림 IV-가-51] 용액 내 경쟁이온 및 농도에 따른 열처리 폐콘크리트의 흡착 실험결과



[그림 IV-가-52] 연속식 컬럼실험에 따른 열처리 폐콘크리트 실험결과

---

## ② 산처리 및 열처리한 레드머드(Red mud)의 불소 제거효율 향상

### ㉠ 실험재료

- 본 실험에서 사용한 흡착제는 전남 영암에 있는 KC corporation에서 제공한 red mud를 사용
- 실험을 위하여 red mud의 입자크기를 63-125  $\mu\text{m}$ 로 구분하였고, 증류수로 3회 세척 후 105 $^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 건조
- Red mud의 화학적 구성 성분을 알아보기 위하여 X-ray fluorescence(XRF, S8 Tiger 4K, Bruker, Germany)분석을 수행하였다.

### ㉡ 레드머드의 산처리 및 열처리

- Red mud의 산처리를 위하여 각각 0.2 M(0.2M-ATRM), 0.4 M(0.4M-ATRM), 0.6 M(0.6M-ATRM), 0.8 M(0.8M-ATRM), 1.0 M(1.0M-ATRM)로 조절된 염산(HCl, Daejung, Korea) 1 L에 Red mud 100 g을 넣고 10:1 (solution/adsorbent, v/w)비율로 혼합하고, 염산과 Red mud의 충분한 반응을 유도하기 위하여 24시간 교반
- 이후 증류수로 세척 및 건조하였고, 입경분포를 63-125  $\mu\text{m}$ 로 구분
- 0.8M-ATRM의 열처리를 위하여 고온전기로 (UP-350, 16 kW Max: 1100 $^{\circ}\text{C}$ , H&C, Korea)에서 온도를 100, 300, 500, 700 $^{\circ}\text{C}$ 로 각각 달리하여 약 3시간 동안 열처리를 수행

### ㉢ 회분실험

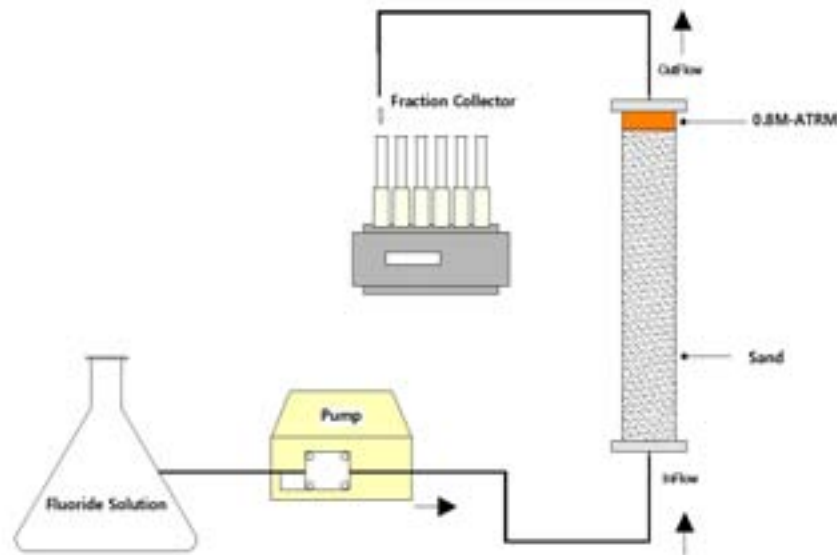
- 불소용액은 불화나트륨(NaF, Sigma Aldrich, USA)을 초순수 증류수에 용해하여 각 실험 농도에 맞게 사용
- Red mud의 산처리에 따른 흡착능을 비교하기 위하여 100 mg-F/L의 불소용액(pH 7) 30 mL를 50 mL 코니컬튜브에 넣고 처리하지 않은 Red mud(NTRM), 0.2M-ATRM, 0.4M-ATRM, 0.6M-ATRM, 0.8M-ATRM, 1.0M-ATRM을 1 g 주입한 후 향온교반기 (Shaking Incubator, SJ-808SF, Sejong Scientific Co, Korea)에 25 $^{\circ}\text{C}$ , 100 rpm의 조건으로 24시간 교반
- 교반 후 용액은 0.45  $\mu\text{m}$  실린지필터(Whatman, 0.45  $\mu\text{m}$  pp filter, USA)로 여과하고 수용액 중 불소의 잔류농도를 분석
- 열처리조건에 따른 불소의 흡착효율을 비교하기 위하여 300 mg-F/L의 불소용액(pH 7) 30 mL를 50 mL 코니컬튜브에 넣고 100, 300, 500, 700 $^{\circ}\text{C}$ 에서 열처리한 0.8M-ATRM 1 g을 주입한 후 산처리에 따른 흡착능 비교 실험과 동일한 조건으로 분석
- 산처리와 열처리 조건에 따라 제조된 red mud의 불소 흡착 특성을 살펴보고자 동역학적 흡착, 평형 흡착, 용액의 pH에 따른 흡착, 흡착제의 주입량에 따른 흡착 실험을 수행
- 동역학적 흡착실험은 0.8M-ATRM 1 g에 pH를 7로 조절된 저농도(50 mg-F/L)와 고농도(500 mg-F/L)의 불소용액 30 mL를 코니컬튜브(50 mL)에 넣고 향온교반기(shaking incubator, SJ-808SF, Sejong scientific Co, Korea)를 이용하여 25 $^{\circ}\text{C}$ , 100 rpm의 조건으로 10 min, 20 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h 교반 후 불소의 잔류 농도를 분석
- 평형흡착실험은 50, 100, 300, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 mg-F/L의 농도로 동역학적 흡착실험과 동일한 방법으로 24 시간 반응 후 분석하였고, pH에 따른 흡착특성을 살펴보고자 300 mg-F/L의 용액을 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH로 pH를 3, 5, 7, 9, 11로 조절하고

평형 흡착실험과 동일하게 24시간 반응 후 잔류농도를 분석

- 흡착제 투입량에 따른 흡착특성은 0.8M-ATRM을 50 mL 코니컬튜브에 각 1~5 g 넣고 300 mg-F/L 불소용액 30 mL를 투입하여 24시간 교반 후 잔류농도를 분석
- 모든 실험은 3회 반복하여 수행하였고, 반응시료는 0.45  $\mu\text{m}$  실린지필터(Whatman 0.45  $\mu\text{m}$  PP filter, USA)로 여과 후, ion chromatography(DX-120, Dionex, USA)를 이용하여 측정

#### ㉔ 칼럼테스트

- 본 연구에서 사용된 칼럼은 아크릴 재질로 내경 50 mm, 높이 300 mm로 실시
- 칼럼 실험은 여과사와 흡착소재로써 0.8M-ATRM이 충전된 칼럼에서 수행
- 칼럼 실험을 수행하기 전 여과사에 존재하는 부유물질 등 불소 제거에 영향을 미치는 오염물질을 제거하기 위하여 초 순수 증류수를 칼럼 하부에서부터 상향식으로 약 8시간 동안 투입하여 세척한 후 본 실험을 수행
- 투입된 불소용액은 초 순수 증류수에 NaF를 10 mg-F/L의 농도(pH 7)로 제조한 것을 사용하였고, 칼럼 하부에서 상향으로 유입수를 투입하기 위하여 액체정량펌프(Stepdos, KNF Flodos, Switzerland)로 유입속도를 0.5 ml/min으로 고정하여 24시간 동안 수행 (Fig. 10)
- 0.8M-ATRM의 충전 두께에 따른 불소의 흡착영향을 알아보기 위하여 충전 두께를 0 cm(0 g), 1 cm(22 g), 3 cm(66 g), 5 cm(110 g)로 각각 달리하여 실험을 수행
- 칼럼을 통과한 시료는 자동분취기(Retriever 500, Teledyne, CA, USA)를 이용하여 채취하였고, 채취된 시료는 ion chromatography(DX-120, Dionex, USA)를 이용하여 잔류농도를 측정



[그림 IV-가-53] 연속식 컬럼실험 모식도

#### ㉕ 레드머드의 화학적 조성 및 산처리, 열처리에 따른 흡착특성

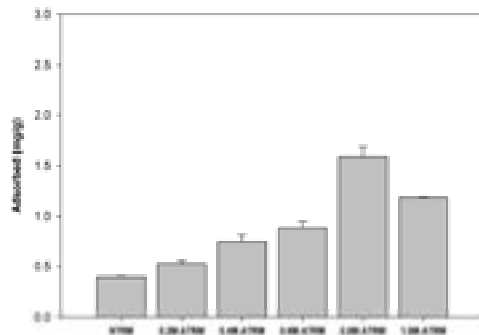
- Red mud의 화학적 조성을 파악하기 위하여 XRF 분석을 수행하였고 그 결과를 표 IV-가

-32에 나타내었음 본 실험에 사용된 Red mud는 불소에 높은 친화력을 갖고 있는  $Al_2O_3$  함량이 19.04%로 다량 함유

[표 IV-가-32] 레드머드의 화학적 조성

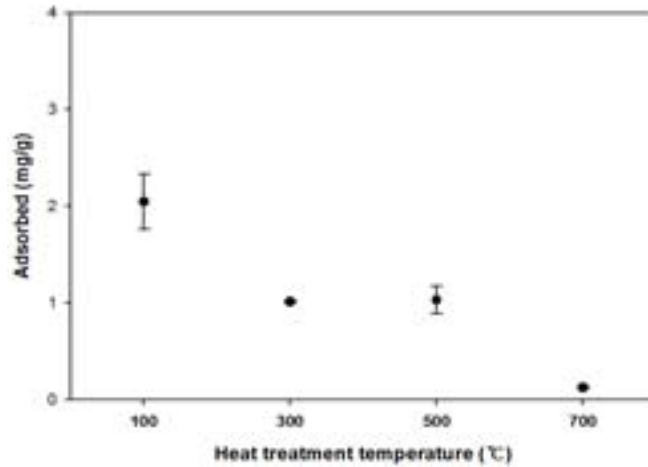
	Element Wt. (%)					Total
	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$SiO_2$	$TiO_2$	LOI	
Red mud	19.04	54.46	13.60	11.01	1.89	100

- 또한, 불소 제거에 흔히 사용되는 활성알루미나의 가격이 US\$ 800-1600/ton에 비하여 매우 저렴한 US\$ 25/ton임



[그림 IV-가-54] 레드머드 산처리에 따른 불소 흡착결과

- Red mud의 산처리 조건에 따른 흡착특성을 파악하기 위하여 열처리 하지 않은 red mud(NTRM)와 0.2M-ATRM, 0.4M-ATRM, 0.6M-ATRM, 0.8M-ATRM, 1.0M-ATRM을 100 mg-F/L의 불소용액과 24시간 반응 후 제거율을 그림 IV-가-54와 같이 나타내었음
- 각각의 효율은 NTRM이 0.40 mg/g, 0.2M-ATRM 0.53 mg/g, 0.4M-ATRM 0.75 mg/g, 0.6M-ATRM 0.88 mg/g, 0.8M-ATRM 1.58 mg/g로 HCl의 농도가 0.2 M에서 0.8 M로 증가하면서 불소의 단위질량당 흡착량이 증가하였지만 1.0M-ATRM은 1.18 mg/g으로 0.8M-ATRM에 비하여 흡착량이 감소
- 산처리에 따라서 red mud의 불소 흡착량이 증가하는 것은 선행연구의 결과 red mud의 산처리에 따른 표면적 증가와 미세공극의 발달에 기인한 것으로 판단
- 또한 Red mud의 HCl 처리는  $Fe_2O_3$ , CaO,  $Na_2O$ ,  $Al_2O_3$ 를  $FeCl_3$ ,  $CaCl_2$ , NaCl,  $AlCl_3$  등의 염화물 형태로 변화되어, 산소와 결합된 금속 산화물 보다 염화물 형태의 흡착제에서는 쉽게 금속 이온이 용출되어 불소와 화합물을 형성하여 흡착이 증가하는 것으로 판단
- 1.0M-ATRM의 흡착량이 감소하는 이유는 높은 농도의 산처리는 미세기공을 붕괴시키는 결과를 초래하여 흡착량을 감소시키는 것으로 판단되며, 기존 연구에서 높은 농도의 산처리에서는 red mud의 인산염 흡착량이 감소하는 결과를 나타내었음

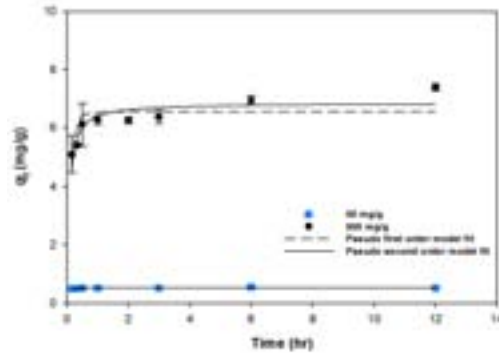


[그림 IV-가-55] 레드머드 열처리에 따른 불소 흡착결과

- 0.8M-ATRM의 열처리 조건에 따른 흡착 특성을 그림 IV-가-55에 나타내었음 100°C~700°C에서 3시간 열처리한 0.8M-ATRM의 불소 흡착량은 각각 2.05, 1.01, 1.03, 0.12 mg/g으로 500°C를 제외하고 열처리 온도가 100°C에서 700°C로 증가함에 따라서 전반적으로 흡착량이 감소하는 결과를 나타냄
- 고온(700°C) 처리된 활성알루미나가 열처리하지 않은 활성알루미나 보다 비표면적이 작음에도 불구하고 불소 제거에 효과적이었다는 선행 연구와 본 연구 결과는 상반됨
- 본 연구에서 열처리 온도가 높아짐에 따라 red mud의 불소 제거 효율이 감소하는 이유는 열처리에 따른 흡착제 표면 및 미세기공이 산화됨에 따라서 비표면적 감소와 red mud에 존재하는 수산화기의 분해에 따른 것으로 사료, 이를 토대로 산처리를 위한 HCl의 농도는 0.8 M, 열처리 온도는 100°C가 불소흡착에 효과적으로 나타남

#### ㉞ 0.8M-ATRM의 동역학적 흡착 및 평형 흡착 특성

- 0.8M-ATRM의 동역학적 흡착특성 즉, 시간에 따른 불소 흡착특성을 그림 IV-가-56에 나타냄
- 50 mg-F/L에서는 30분 이전에 흡착평형에 도달하였고, 500 mg-F/L에서는 반응 1시간 경과 후 평형에 도달
- 동역학적 흡착특성을 유사 1차 및 2차 모델을 이용하여 분석한 결과를 표 IV-가-33에 나타냄
- 유사 1차 모델에서 불소의 초기농도가 50 mg-F/L일때  $q_e$ 는 0.516 mg/g,  $K_1$ 은 16.818 l/hr이고, 500 mg-F/L의 농도에서는  $q_e$  6.535 mg/g,  $K_1$  7.435 l/hr로 불소의 초기농도가 높으면 평형 흡착량이 증가하지만 반응속도가 느려짐
- 유사 2차 모델에 의해 분석된  $q_e$ 는 초기농도 50 mg-F/L일때 0.524 mg/g, 500 mg-F/L의 경우 6.840 mg/g으로 유사 1차 모델의  $q_e$ 와 유사한 값을 나타냄
- 유사 1차 모델과 유사 2차 모델의 상관계수( $R^2$ )를 비교 하였을 때 유사 2차 모델의  $R^2$  값이 높은 것으로 나타남(표 IV-가-33).



[그림 IV-가-56] 0.8M-ATRM의 동역학적 실험결과

- 이를 통해 불소가 0.8M-ATRM에 흡착되는 속도는 화학적 흡착(chemisorption)에 의해 결정되는 것으로 판단

[표 IV-가-33] 동역학적 실험결과에 따른 유사1차 2차 모델 파라미터

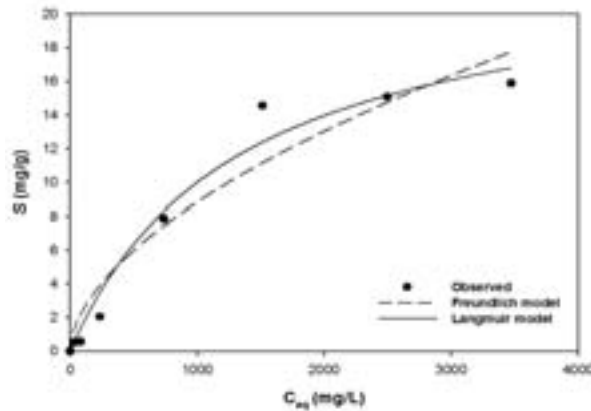
Initial concentration (mg-F/L)	Pseudo first order model			Pseudo second order model		
	$q_e$ (mg/g)	$K_1$ (1/hr)	$R^2$	$q_e$ (mg/g)	$K_2$ (g/mg/hr)	$R^2$
50	0.516	16.818	0.336	0.524	0.015	0.599
500	6.535	7.435	0.570	6.840	0.070	0.806

- 0.8M-ATRM의 평형흡착 실험결과를 그림 IV-가-57에 나타내었고, 평형흡착 실험결과를 Freundlich 모델과 Langmuir 모델을 적용한 결과를 표 IV-가-34에 나타냄
- Freundlich 모델에서 분배계수인  $K_F$ 는 0.184 L/g으로 나타났고, 흡착경향(1/n)은 0.560으로 0.8M-ATRM과 불소간의 강한 결합이 형성
- Langmuir 모델에서는 단위 질량당 불소의 최대흡착량( $Q_m$ )이 23.162 mg/g으로 나타났고, 흡착상수  $K_L$ 은 1316.240 L/mg으로 나타남
- 본 연구에서 제시한 0.8M-ATRM의 최대 흡착량은 기존 연구에서 제시된 red mud(5.28 mg/g)와 열처리된 활성알루미나(5.70 mg/g), 활성탄(4.62 mg/g), 이온교환수지(9.40 mg/g)보다 높은 것으로 나타남
- 이에 0.8M-ATRM은 불소 제거에 효과적인 흡착제로 판단

#### ㉔ 용액의 pH, 흡착제의 주입량에 따른 흡착특성

- 용액의 pH 변화에 따른 0.8M-ATRM의 불소 흡착특성 실험결과를 그림 IV-가-58에 나타냄



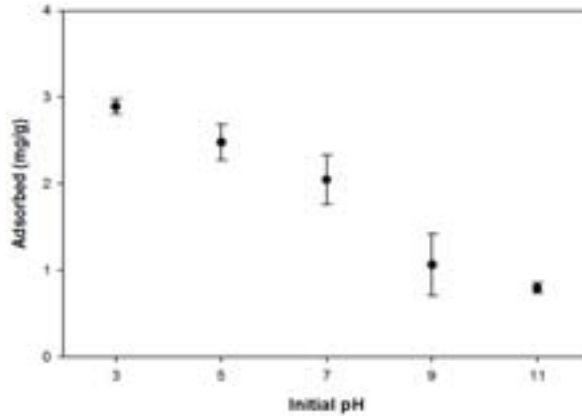


[그림 IV-가-57] 0.8M-ATRM의 평형흡착 실험결과

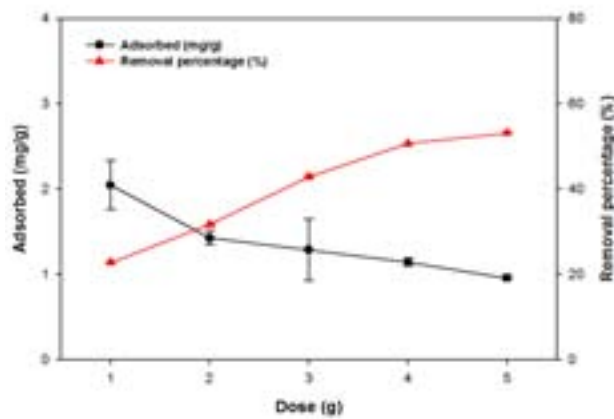
[표 IV-가-34] 0.8M-ATRM의 Freundlich, Langmuir 모델 파라미터

Freundlich model			Langmuir model		
$K_F$ (L/g)	$1/n$	$R^2$	$Q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$
0.184	0.560	0.939	23.162	1316.240	0.977

- pH 3에서는 2.891 mg/g로 가장 높은 흡착량을 나타내었고, pH 5에서는 2.479 mg/g, pH 7과 9에서는 각 2.046 mg/g, 1.063 mg/g의 흡착량을 보임
- 마지막으로 pH 11에서는 0.793 mg/g의 흡착량을 나타내어 용액의 pH가 높을수록 불소의 흡착량이 감소하는 것을 알 수 있었음, 높은 pH에서 0.8M-ATRM의 불소 흡착량 감소는 두 가지 요인으로 설명될 수 있다. 먼저 불소 이온의 red mud에 흡착은 ligand exchange에 의해 흡착시 수산화이온(OH<sup>-</sup>)이 방출되고 불소 이온이 흡착되는데, pH 조건에서는 수산화이온(OH<sup>-</sup>)이 쉽게 방출되지 않음
- 또한 red mud는 다른 등전점(point of zero charge)을 가진 광물의 혼합물로서 hematite(7.8), maghemite(6.7), gibbsite (5.0), boehmite (8.2), 그리고 quartz (2.0)으로 각각 다른 등전점을 갖고 있기 때문에 이 등전점 이상의 pH에서는 입자의 표면전하가 음전하를 나타내어 pH가 증가함에 따라서 red mud는 음전하를 띄게 되고 음전하인 불소 이온과 서로 반발하게 되어 정전기적 흡착이 감소
- 0.8M-ATRM의 주입량을 1-5 g으로 1 g씩 증가시켜 불소의 흡착특성을 살펴보고, 그 결과를 Fig. 16에 나타내었음
- 0.8M-ATRM의 주입량이 1 g에서 5 g으로 증가 할수록 제거율은 각각 22.73%, 31.69%, 42.90%, 50.68%, 53.16%로 증가
- 반면 단위질량당 흡착량은 2.05 mg/g(1 g)에서 0.96 mg/g(5 g)으로 감소
- 이를 통해 0.8M-ATRM의 주입량이 증가하면 불소의 제거율은 높아지지만 단위 질량당 흡착량은 감소하는 것으로 나타남



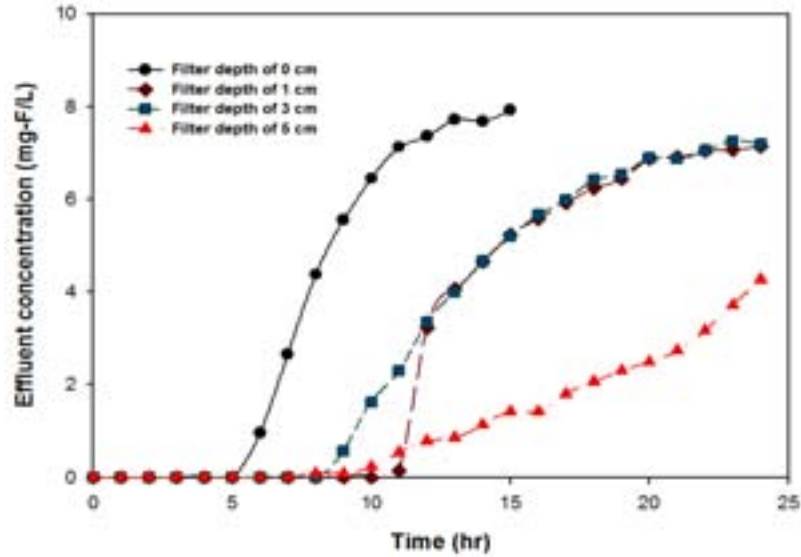
[그림 IV-가-58] 용액의 pH에 따른 0.8M-ATRM의 불소 흡착 실험결과



[그림 IV-가-59] 0.8M-ATRM의 주입량 변화에 따른 불소 흡착 실험결과

#### ㉠ 연속식 조건에서의 불소흡착 특성

- 0.8M-ATRM의 불소 흡착특성을 연속식 조건에서의 알아보기 위해 0.8M-ATRM의 충전 두께를 각 1, 3, 5 cm로 달리하며 실험을 수행
- 불소의 초기농도는 10 mg-F/L, 유량은 0.5 mL/min으로 실험조건을 설정(그림 IV-가-60)
- 0.8M-ATRM을 충전하지 않고 여과사만 충전한 칼럼의 경우 6시간 경과 후 불소가 과과되기 시작하였으며, 9시간 경과 후 유출수의 불소 농도는 유입 농도의 50%에 도달
- 0.8M-ATRM을 각 1 cm(22 g), 3 cm(66 g) 충전한 칼럼 실험의 경우 각각 11시간, 9시간 후 불소가 과과되기 시작하였고, 15시간 후 불소 농도는 유입 농도의 50%에 도달
- 마지막으로 0.8M-ATRM를 5 cm(110 g) 충전한 칼럼은 10시간 후 불소가 과과되었고, 실험 종료시까지 불소의 농도는 유입 농도의 50%이하
- 칼럼 실험에 따른 과과곡선 분석 결과를 표 IV-표-35에 제시
- 0.8M-ATRM을 1 cm(22 g) 충전 하였을 때 불소의 제거량( $q_{total}$ )은 5.01 mg이고, 제거율(Re)은 69.6%를 나타냈으며, 3 cm(66 g) 충전 하였을 때 불소의 제거량과 제거율은 각 4.86 mg, 67.5%로 1 cm, 3cm 충전량과의 차이를 보이지 않음
- 하지만 5 cm(110 g) 충전 시에는 불소 제거량은 6.39 mg, 제거율은 88.8%로 증가



[그림 IV-가-60] 0.8M-ATRM 충전두께에 따른 연속식 조건에서의 불소흡착 결과

[표 IV-가-35] 0.8M-ATRM을 이용한 컬럼실험 조건에 따른 결과

Mass of red mud (g)	Red mud depth /column height (cm)	Influent concentration (mg/L)	Flow rate (ml/min)	$M_{total}$ (mg)	$Q_{total}$ (mg)	Re (%)
0	0/30	10	0.5	7.2	3.48	48.3
22	1/30	10	0.5	7.2	5.01	69.6
66	3/30	10	0.5	7.2	4.86	67.5
110	5/30	10	0.5	7.2	6.39	88.8

③ 석회석, 제올라이트, 폐콘크리트의 열처리에 따른 중금속 흡착 특성

㉞ 실험재료

- 본 실험에서 사용한 폐콘크리트는 경기도 안성에 위치한 동부ENT에서 제공받았으며, 제올라이트는 경북 포항에 위치한 렉셈에서 제공받았음
- 마지막으로 석회석은 충북 진천의 GMC에서 공급받아 사용
- 실험 전 입자크기를 0.85-1.18 mm로 구분하였고, 증류수로 3회 세척 후 105℃에서 24시간 건조하여 준비

㉟ 열처리

- 석회석, 제올라이트, 폐콘크리트의 열처리를 위하여 내경 56 mm, 길이 550 mm의 스테인레스관에 각각의 소재를 100 g 주입 후 튜브퍼니스(CRFT 830S, Dongseo science co. Ltd, Korea)에서 질소조건으로 4시간동안 각각 100, 300, 500, 700, 900℃으로 열처리를 수행

㊱ 회분실험

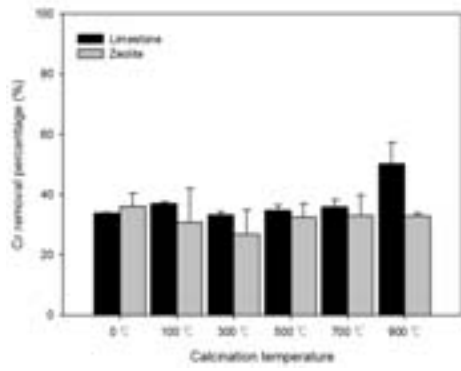
- 석회석, 제올라이트, 폐콘크리트의 열처리 조건에 따른 Cr, Pb, Cd의 흡착특성을 파악
- Cr은 각 10 mg/L, 20 mg/L 의 농도로 희석한 용액 30 ml에 열처리 조건에 따른 석회석, 제올라이트를 각 1 g씩 주입하여 24시간 후 분석
- Pb와 Cd는 각 10 mg/L, 100 mg/L의 농도로 희석한 용액 30 ml에 열처리 조건에 따른 석회석, 제올라이트를 각 1 g씩 주입하여 24시간 후 분석
- 폐콘크리트의 열처리 조건에 따른 Cr 흡착특성을 파악하기 위하여 10 mg/L, 50 mg/L의 농도로 희석한 용액 30 ml에 열처리 조건에 따른 폐콘크리트를 각 1 g씩 주입하여 24시간 후 분석
- 모든 실험은 3회 반복하였고, 평균 값을 제시하였음

**㉔ 열처리 조건에 따른 석회석, 제올라이트의 Cr, Pb, Cd의 제거특성**

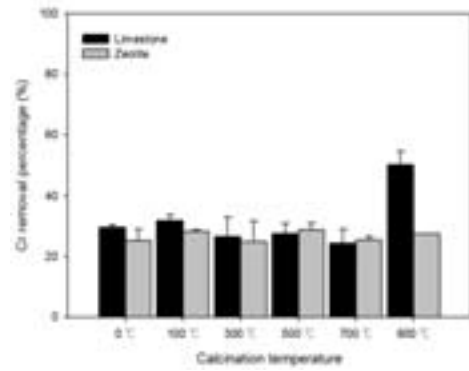
- 석회석 및 제올라이트의 열처리 조건에 따른 Cr의 제거특성을 그림 IV-가-61에 제시
- Cr제거를 위하여 석회석을 열처리 하였을 때 700℃까지 열처리는 제거율(33.77%~35.88%)에 큰 차이를 보이지 않았음
- 하지만 900℃ 열처리시 제거율이 50.19%로 높아짐을 알 수 있었음
- 반면 제올라이트의 경우 열처리에 따른 흡착량의 변화를 발견하지 못하였음
- 석회석 및 제올라이트의 열처리 조건에 따른 Pb(10 mg/L, 100 mg/L), Cd(10 mg/L, 100 mg/L)의 제거특성을 그림 IV-가-61에 제시
- 석회석 및 제올라이트의 열처리 조건에 따라 Pb, Cd의 제거특성에는 변화가 없는 것으로 나타남(그림 IV-가-61)
- 또한 100 mg/L 농도의 Pb의 제거에도 큰 변화가 없는 것으로 나타났지만, Cd(100 mg/L)의 경우 제올라이트는 열처리 온도가 증가할 수록 흡착량이 감소하였고, 석회석의 경우는 900℃로 열처리하였을때 매우 좋은 흡착량을 나타냄(그림 IV-가-62)

**㉕ 열처리 조건에 따른 폐콘크리트의 Cr의 제거특성**

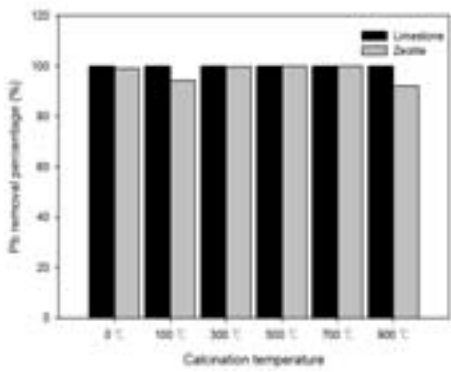
- 폐콘크리트의 열처리 조건에 따른 Cr의 제거특성을 그림. IV-가-63에 제시
- Cr제거를 위하여 폐콘크리트를 열처리 하였을 때 열처리 온도가 증가함에 따라 제거율도 증가하는 것으로 나타났음
- 특히 900℃ 열처리시 제거율이 가장 높은 것으로 나타남



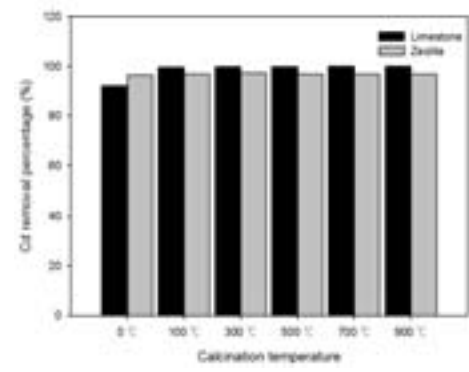
<Cr 10 mg/L>



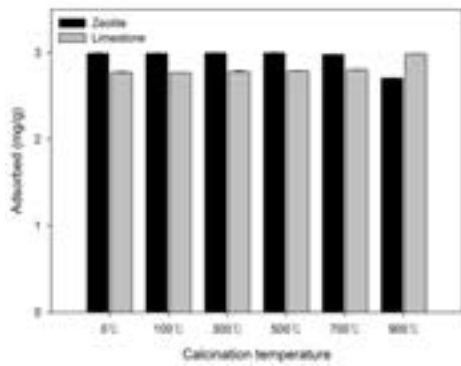
<Cr 20 mg/L>



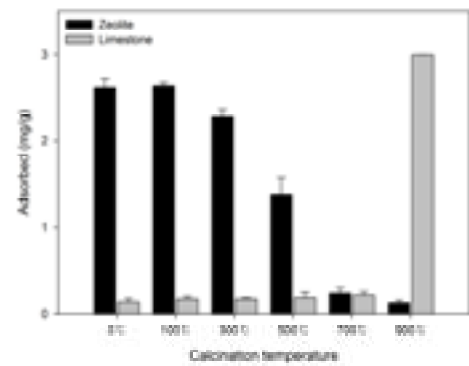
<Pb 10 mg/L>



<Cd 10 mg/L>

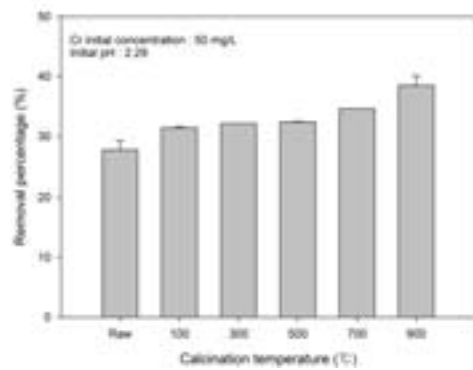
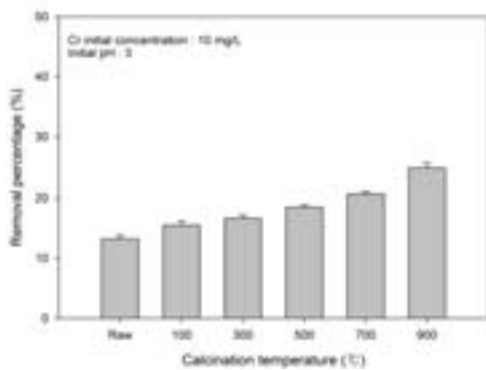


<Pb 100 mg/L>



<Cd 100 mg/L>

[그림 IV-가-61] 석회석, 제올라이트 열처리 조건에 따른 중금속 제거특성



[그림 IV-가-62] 폐콘크리트 열처리 조건에 따른 Cr 제거특성  
(좌) 10 mg/L, (우) 50 mg/L

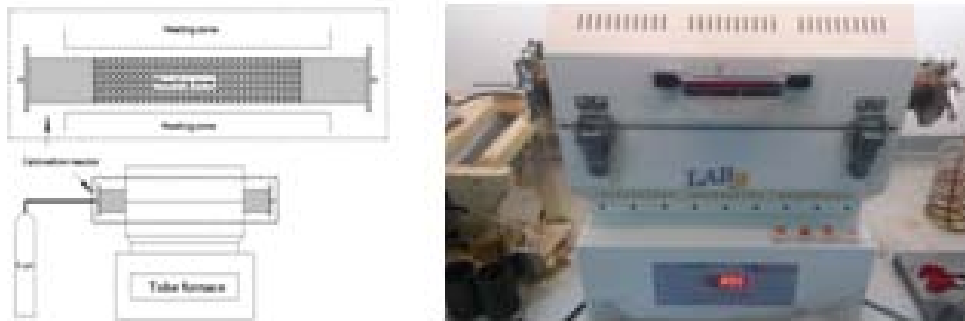
#### ④ 석회석, 제올라이트 표면처리에 따른 중금속 흡착특성

##### ㉠ 실험재료

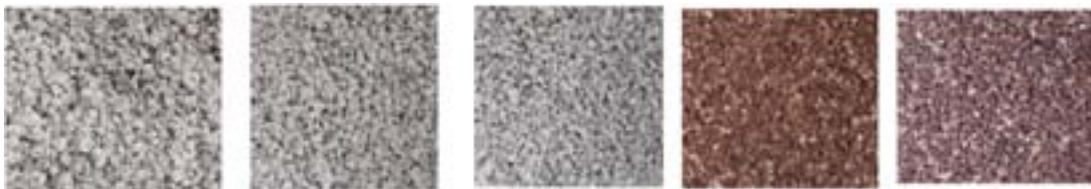
- 본 실험에서 사용한 석회석은 충북 진천의 GMC에서 제공받았으며, 제올라이트는 경북 포항에 위치한 렉셈에서 제공받았음
- 실험 전 입자크기를 0.85~1.18 mm로 구분하였고, 증류수로 3회 세척 후 105℃에서 24시간 건조하여 준비

##### ㉡ 표면처리(철코팅)

- 석회석, 제올라이트의 표면처리를 위하여  $\text{FeCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  용액 각각 0.01 M-0.5 M로 제조하여 석회석, 제올라이트 표면에 반응 처리함
- 이후 석회석, 제올라이트 표면에 고정하기 위하여 내경 56 mm, 길이 550 mm의 스테인레스관에 각각의 소재를 100 g 주입 후 튜브퍼니스(CRFT 830S, Dongseo science co. Ltd, Korea)에서 500℃으로 열처리를 수행(그림 IV-가-63)



[그림 IV-가-63] 튜브퍼니스 구성도 및 이미지



[그림 IV-가-64]  $\text{FeCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  농도에 따라 표면처리된 석회석 이미지

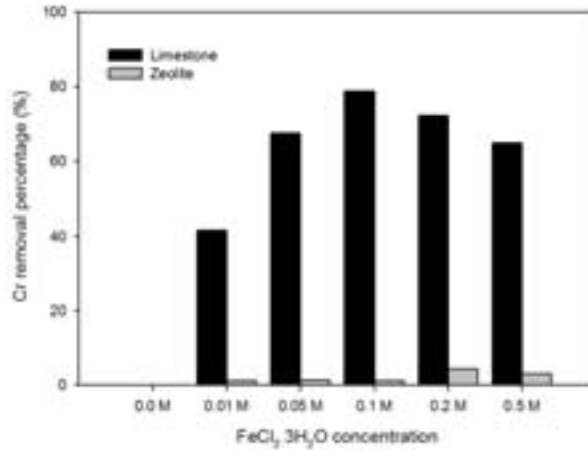
##### ㉢ 회분실험

- $\text{FeCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  표면처리 농도에 따른 Cr의 제거특성 파악
- Cr은 각 10 mg/L의 농도로 회석한 용액 30 ml에  $\text{FeCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  표면처리 농도에 따른 석회석, 제올라이트를 각 1 g씩 주입하여 24시간 후 분석
- 이후  $\text{FeCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  표면처리 농도에 따른 석회석의 시간에 따른 Cr 5, 10 mg/L의 흡착특성 분석 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균 값을 제시)

##### ㉣ 석회석 및 제올라이트의 표면처리에 따른 Cr의 제거특성

- 석회석 및 제올라이트의 표면처리에 따른 Cr의 제거특성을 그림 IV-가-65에 제시
- 석회석의 표면처리에 따른 Cr의 제거특성은 0.1 M 농도의  $\text{FeCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  처리하였을때가 가장 좋은 효과를 나타냄

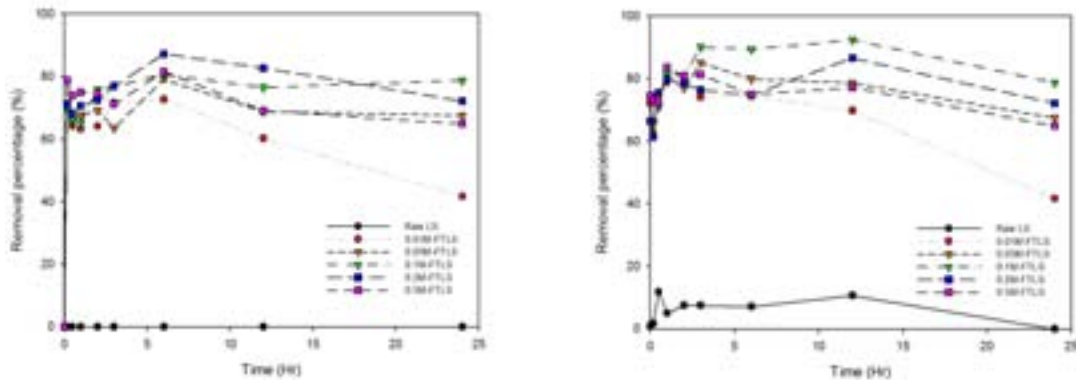
- 0.1 M 이상의 농도로 처리시 흡착효율이 감소하는 것으로 나타남
- 반면 제올라이트의 경우 표면처리에 따른 흡착량의 변화를 발견하지 못하였음



[그림 IV-가-65] FeCl<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O 농도에 따라 표면처리된 석회석, 제올라이트의 Cr(10 mg/L) 흡착특성

㉞ 표면 처리된 석회석의 시간에 따른 Cr의 제거특성

- 표면 처리된 석회석의 시간에 따른 Cr의 제거특성을 그림 IV-가-66에 제시
- 표면 처리된 석회석의 시간에 따른 Cr의 제거특성을 분석한 결과 0.1 M 농도의 FeCl<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O 처리 하였을때가 가장 높은 제거효율(약 80%이상)을 지속적으로 나타냄



[그림 IV-가-66] FeCl<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O 농도에 따라 표면처리된 석회석의 시간에 따른 Cr 흡착특성

(좌) Cr 5 mg/L, (우) Cr 10 mg/L

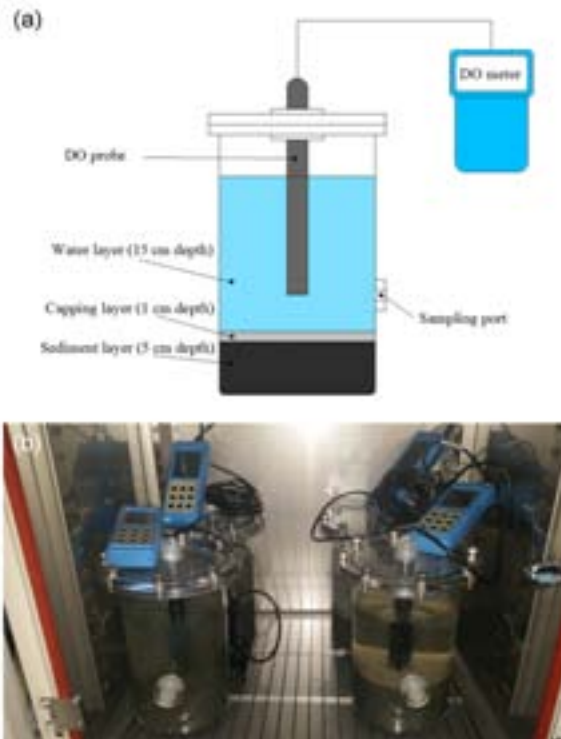
(나) 반응성 피복 소재의 산소 소모 유기물질(COD) 흡착성능 평가

① 실험방법 및 피복소재

- 피복소재 적용에 따른 산소 소비량 변화와 퇴적물로부터 중금속 용출 정도를 평가하기 위하여 지름 15 cm, 높이 25 cm 규격의 아크릴 재질의 원통형 수조를 사용
- 제작한 원통형 수조에 퇴적물을 5 cm 두께로 채우고, 퇴적물 위에 피복소재를 1 cm 두께로 채운 후 각 수조에 채운 후 해수를 2.65 L씩 퇴적물 및 피복층이 교란되지 않도록

정량펌프 (Masterflex L/S model No. 7528-10, Thermo Fisher Scientific, USA)를 이용하여 해수를 수조에 채움

- 해수의 용존산소 (dissolved oxygen, DO) 농도를 모니터링 하기 위하여 DO meter (HI-9146, Hanna instrument, USA)를 사용
- 외부와의 공기를 차단하기 위하여 DO meter가 부착된 뚜껑으로 수조를 밀폐시키고, 차광과 온도 유지를 위하여 인큐베이터 (Incubator model IB-21E (Max temp 120°C), JEIO Tech CO. LTD., Korea)에서 20°C로 17일간 실험을 수행(그림 IV-가-67)
- 실험에 사용된 제올라이트는 경북 포항에 위치한 렉셈에서, 석회석은 충북 진천에 소재한 GMC에서, 페콘크리트는 경기도 안성에 위치한 동부이엔티에서 각각 제공 받았고, 입도 크기를 1.18 -2.36 mm로 체가름하였고, 실험 전에 증류수로 세척, 풍건하여 실험
- 3개의 피복소재를 충전한 원통형 수조와 피복소재를 충전하지 않은 원통형 수조 1개에 대하여 1일 1회 시료 채취 및 분석을 수행
- 수중 DO는 수조에 부착된 DO meter로 측정하였으며, 이와는 별도로 해수 시료 20 mL를 주사기를 이용하여 채취한 후 pH, EC는 pH/EC meter (Sevenmulti S40, Mettler Toledo, Switzerland)를 사용하여 측정



[그림 IV-가-67] 산소소모 수조실험 모식도(a) 및 산소소모 수조실험 이미지

- 이후 0.45  $\mu\text{m}$  실린지 필터 (Whatman 0.45  $\mu\text{m}$  pp filter, USA)로 여과하여 해수 중 존재하는 중금속의 농도를 ICP-OES (Perkin-Elmer, Optima 8300, USA)로 측정

## ② 산소 소비 및 중금속 용출속도 산정

- SOD (Sediment oxygen demand)는 퇴적물에서 유기물 분해 시 소모되는 산소량으로 수질을 결정하는데 지표로 이용(Otubu, 1989)
- 퇴적물에 의한 수중 DO의 감소 정도를 지속적으로 측정하여 SOD (sediment oxygen



---

demand) 값을 식 (1)과 같이 산출

$$\text{SOD (mg/m}^2\cdot\text{d)} = \frac{\Delta C_O \times V}{A \times t} \quad (1)$$

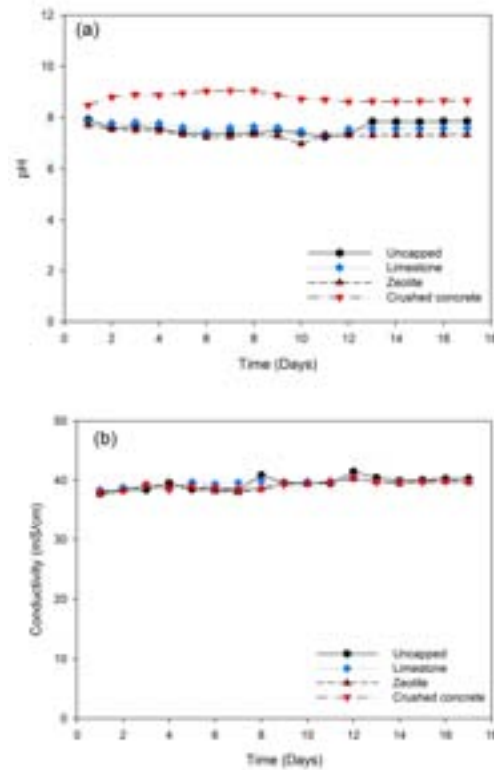
- 여기서  $\Delta C_O$ 는 초기와 분석시기의 용존산소 차이값 (mg/L)이고,  $V$ 는 해수의 부피 (L),  $A$ 는 해수와 퇴적물의 접촉면적 ( $\text{m}^2$ ),  $t$ 는 시간 (day)임
- 중금속 용출속도의 산정은 다음 식 (2)를 이용

$$\text{Release rate (mg/m}^2\cdot\text{d)} = \frac{(C_F - C_I) \times V}{t \times A} \quad (2)$$

- 여기서  $C_F$ 는 해수 채취시 중금속의 농도 (mg/L)이고,  $C_I$ 는 해수의 초기 중금속 농도 (mg/L),  $V$ 는 해수의 부피이며 (L),  $t$ 는 시간 (day),  $A$ 는 해수와 퇴적물의 접촉면적 ( $\text{m}^2$ )임

### ③ 피복소재 적용에 따른 pH, EC 및 산소 소비 경향 분석

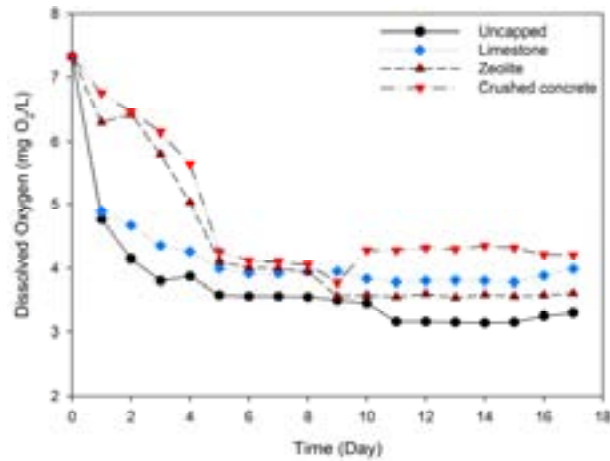
- 해양퇴적물 내 오염물질 용출저감을 위하여 오염퇴적물 위에 석회석, 제올라이트, 페콘크리트를 피복하였고, 이에 따른 pH 및 EC의 변화를 그림 IV-가-68에 나타내었음
- pH의 경우 피복을 하지 않은 수조는 실험 1일차 7.92에서 17일차 7.86으로 나타났고, 석회석을 피복한 수조의 경우 1일차 7.83에서 17일차 7.60, 제올라이트는 1일차 7.70에서 17일차 7.33으로 큰 변화가 없었음
- 반면 페콘크리트를 피복한 수조의 경우 1일차 8.48에서 실험 8일차 9.05로 증가하다가 17일차 8.65로 다시 감소하는 경향을 나타냄 (그림 IV-가-68(a))
- 페콘크리트의 pH가 높은 이유는 페콘크리트의 생성과정에 있어 칼슘-실리케이트-알루미늄네이트 화합물의 수화반응에 의해 알칼리성을 띠는 수산화칼슘 ( $\text{Ca(OH)}_2$ )을 보유하기 때문으로 알려져 있음(Seo and Lee, 2002)
- 석회석, 제올라이트, 페콘크리트 피복에 따른 전기전도도 (EC)를 측정한 결과 미피복 수조의 경우 실험 1일차 37.8 mS/cm에서 17일차 40.3 mS/cm로 증가하였고, 석회석, 제올라이트, 페콘크리트를 피복하였을 때 1일차 각 38.4, 37.7, 38.2 mS/cm에서 실험 17일차 39.8, 39.7, 39.9 mS/cm로 미미하게 증가(그림 IV-가-68(b))
- 실험 조건에 따라서 EC 값은 차이가 거의 없는 것으로 나타남



[그림 IV-가-68] 미피복 수조 및 피복 수조의 (a) pH, (b) EC 변화

- 피복소재 적용에 따른 산소 소비 경향 즉, 수중 DO를 측정된 결과를 그림 IV-가-69에 제시
- 미피복 수조와 석회석 피복 수조의 경우 해수의 DO는 실험 1일차에 급격하게 감소하고 실험 12일차까지 꾸준히 감소하여 미피복 수조와 석회석 피복 수조의 DO 농도는 각각 3.2, 3.8 mg O<sub>2</sub>/L로 유지
- 제올라이트 및 폐콘크리트 피복 시 DO 농도의 변화는 5일간 뚜렷한 감소 경향을 보였고 10일까지 꾸준히 감소
- 폐콘크리트 피복시 10일 이후 미세하게 증가되는 DO는 광물 또는 유기물과 결합되어있던 산소들이 제한된 산소 조건에서 일부 분해되기 때문으로 판단(Kim and Jeong, 2006)
- 퇴적물 내 용존산소 감소정도인 SOD (sediment oxygen demand) 분석 결과를 Table 8에 나타내었음
- 17일간 진행된 SOD의 평균값을 비교한 결과 미피복 수조는 981.34 mg/m<sup>2</sup>·d를 나타냈고, 석회석 피복은 904.53 mg/m<sup>2</sup>·d, 제올라이트 피복은 428.96 mg/m<sup>2</sup>·d, 폐콘크리트 피복은 288.37 mg/m<sup>2</sup>·d의 값을 나타냄
- 이를 통해 제올라이트 피복은 SOD저감을 약 2배 이상, 폐콘크리트 피복은 약 3배 이상의 SOD를 저감할 수 있는 것으로 나타남
- 제올라이트 및 폐콘크리트 피복 시 미피복 수조에 비하여 SOD 값이 감소하는 실험 결과를 통해서 피복소재의 적용에 의해 용존산소의 소비가 늦춰지는 것을 알 수 있었는데, 이는 퇴적물에서 용출되는 용존산소를 소모하는 생화학적 물질의 수계로 용출이 피복에 의해 감소한다고 판단(Kim and Jeong, 2006)
- 폐콘크리트 피복의 경우 타 조건에 비하여 높은 pH (평균 pH 8.78)는 미생물의 서식 및

유기물 분해에 악영향을 미쳐서 SOD 감소에 일부 기여한 것으로 판단



[그림 IV-가-69] 미피복 수조 및 피복 수조의 퇴적물 내 산소소비 경향

[표 IV-가-36] 미피복 수조 및 피복 수조의 산소소비량 비교

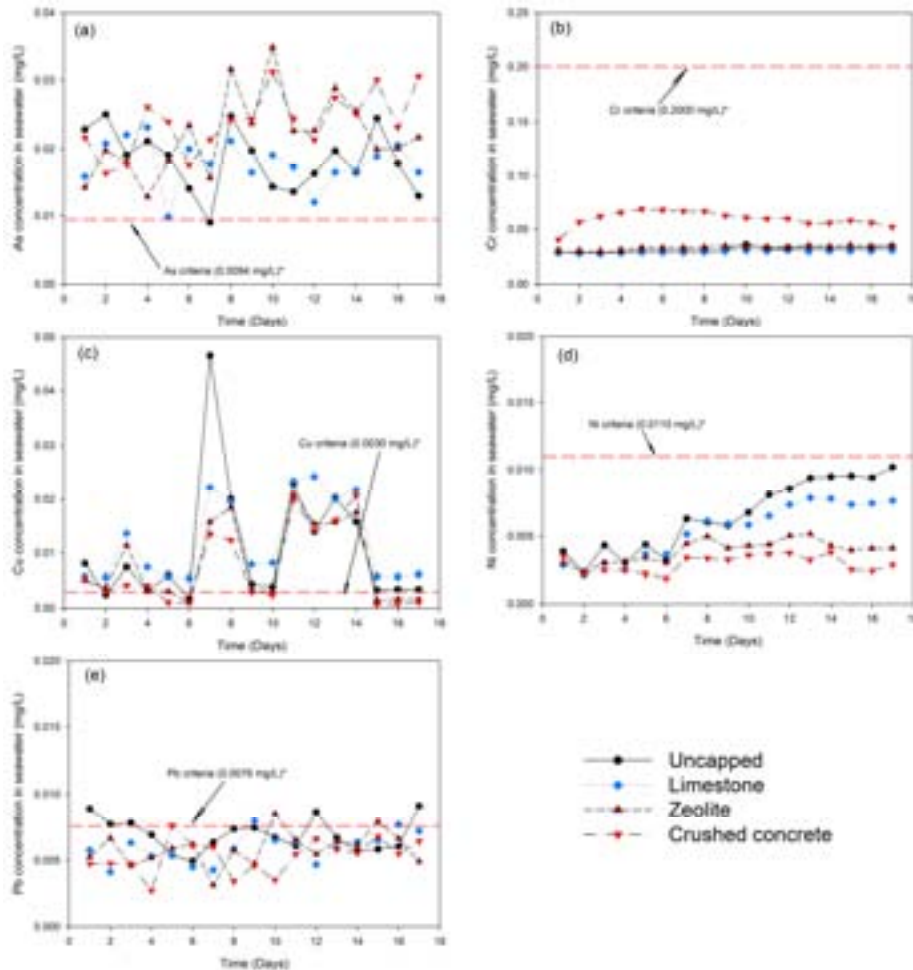
capping materials	Uncapped	Limestone	Zeolite	Crushed concrete
Sediment oxygen demand (mg/m <sup>2</sup> ·d)	981.34	904.53	428.96	288.37

#### ④ 미피복 및 피복 퇴적물에서 중금속 용출 농도

- 실험 17일 동안 미피복 수조와 피복 수조의 퇴적물 내 중금속 (As, Cr, Cu, Ni, Pb) 용출 결과를 그림 IV-가-70에 나타냄
- 해수 내 용존 As의 농도 측정결과 미피복 수조는 실험 1일차에서 17일차까지 0.0090-0.0251 mg/L의 농도범위로 측정되었고, 석회석 피복수조의 경우도 실험 1일차에서 17일차까지 0.0099-0.0232 mg/L의 농도 범위에서 불규칙적으로 나타남
- 제올라이트와 페콘크리트를 피복한 수조에서도 각각 0.0129-0.0349, 0.0164-0.0312 mg/L의 농도범위를 나타냄(그림 IV-가-70(a))
- 미피복 수조 및 피복 수조 모두에서 As의 농도는 전 실험 기간 동안 해양생태계보호 기준의 단기기준 (As: 0.0094 mg/L)을 모두 초과하므로 이에 대한 관리 및 주의가 필요
- Cr의 경우 미피복 수조와 제올라이트 피복 수조는 각각 실험 1일차 0.0301, 0.0300 mg/L에서 17일차 0.0340, 0.0347 mg/L로 농도가 미미하게 증가하는 추세를 나타내지 않았지만, 석회석을 피복한 경우 실험 1일차 각각 0.0292 mg/L에서 17일차 0.0315 mg/L로 미피복 수조보다는 낮은 Cr의 농도를 나타내었음
- 반면 페콘크리트를 피복한 수조는 실험 1일차 (0.0403 mg/L)부터 상대적으로 높은 수치의 Cr농도를 나타내었으며, 실험 5일차 (0.0686 mg/L)까지 지속적으로 증가하는 경향을 보인 후 6일차부터는 감소하는 추세를 나타내었고, 실험 17일차 0.0521 mg/L의 Cr농도를 나타냄(그림 IV-가-70(b))
- Cr의 경우는 실험기간동안 해양생태계보호 기준의 단기기준 (Cr(VI): 0.2000 mg/L) 미만의 양으로 용출되는 것으로 나타났음
- 미피복 수조의 Cu 농도는 실험 2일차와 6일차를 제외하고는 해양생태계보호 기준의 단기

기준 (Cu: 0.0030 mg/L) 농도를 초과하였으며, 7일차에 0.0466 mg/L로 최대값을 나타냈음

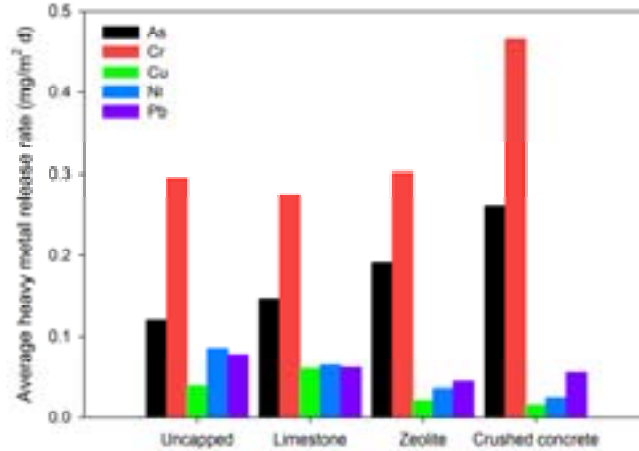
- 석회석 피복 수조의 Cu 농도는 실험 기간 17일 동안 해양생태계보호 기준의 단기기준 (Cu: 0.0030 mg/L) 이상으로 존재
- 제올라이트, 폐콘크리트를 피복한 수조의 경우는 실험 15일차부터 해수 내 용존 Cu의 농도가 기준치 미만으로 낮아진 것을 알 수 있었음
- 미피복 수조 및 석회석 피복 수조에서 Ni 용출은 시간이 지남에 따라서 지속적으로 증가하여 미피복 수조에서 Ni 농도는 해양생태계보호 기준에 근접
- 실험 종료 시 Ni 농도는 석회석 피복, 제올라이트 피복, 폐콘크리트 피복 순으로 높은 농도를 나타냄
- 마지막으로 Pb은 모든 실험 조건에서 증가 및 감소가 반복
- 미피복 수조에서 Pb 농도는 실험 초기 3일간 해양생태계보호 기준을 초과하였고, 12일차와 실험 종료 17일차에 그 기준을 초과
- 반면 폐콘크리트의 경우에는 Pb 농도가 증가 감소를 반복함에도 불구하고 해양생태계보호 기준 아래에 존재



[그림 IV-가-70] 석회석, 제올라이트, 폐콘크리트 피복에 따른 중금속 용출 경향  
(a) As, (b) Cr, (c) Cu, (d) Ni, and (e) Pb

⑤ 석회석, 제올라이트, 폐콘크리트 피복에 따른 퇴적물 내 중금속 용출 차단

- 
- 피복소재 적용에 따른 수조실험 결과를 중금속의 평균 용출속도로 산출하여 그림 IV-가-71에 나타냄
  - As는 미피복수조 (0.1195 mg/m<sup>2</sup>·d) < 석회석 (0.1463 mg/m<sup>2</sup>·d) < 제올라이트 (0.1906 mg/m<sup>2</sup>·d) < 페콘크리트 (0.2604 mg/m<sup>2</sup>·d)의 순으로 용출속도가 낮게 나타났고, Cr은 석회석 (0.2741 mg/m<sup>2</sup>·d) < 미피복수조 (0.2951 mg/m<sup>2</sup>·d) < 제올라이트 (0.3020 mg/m<sup>2</sup>·d) < 페콘크리트 (0.4652 mg/m<sup>2</sup>·d)의 순으로 낮은 용출속도를 보였음
  - 실험 결과 석회석, 제올라이트, 페콘크리트 피복은 As의 용출 차단에 효과적이지 못한 것으로 나타났고, Cr은 페콘크리트를 피복하였을 때 미피복 수조에 비하여 훨씬 높은 농도의 용출속도를 나타내었음
  - 피복에 따른 As, Cr의 증가는 다음과 같이 설명할 수 있음
  - 토양 및 수용액에서 음이온으로 존재하는 As와 Cr은 비특이적인 정전기적 인력 (Nonspecific electrostatic forces)과 리간드 교환반응 (Ligand exchange reaction)에 의하여 토양에 흡착되는 것으로 알려져 있으며 (McBride, 1994), 이중 정전기적 인력에 의한 비특이적 흡착은 수용액의 pH에 많은 영향을 받음
  - 즉, 수용액의 pH가 입자의 등전점 (point of zero charge) 이상일 경우에는 입자의 표면 전하는 음전하를 띄게 되어 음전하를 띄는 As, Cr 이온과 정전기적으로 반발하게 됨
  - 미피복 수조의 pH는 실험 기간동안 7.24-7.92를 나타낸 반면 페콘크리트를 피복한 수조의 pH는 8.48-9.05로 매우 높은 pH를 나타내었음
  - 석회석으로 피복한 수조의 pH의 범위는 7.34-7.83로 나타났으며, 실험 시작부터 12일차까지 미피복 수조의 pH 보다 높게 나타남
  - 따라서 피복 수조의 pH가 미피복 수조의 pH 보다 높아서 As 및 Cr의 용출을 효율적으로 차단시키지 못한 것으로 판단
  - 피복소재 적용에 따른 Cu의 용출은 페콘크리트 (0.0165 mg/m<sup>2</sup>·d) < 제올라이트 (0.0220 mg/m<sup>2</sup>·d) < 미피복수조 (0.0390 mg/m<sup>2</sup>·d) < 석회석 (0.0610 mg/m<sup>2</sup>·d)의 순으로 용출 속도가 낮았고, Ni의 경우는 페콘크리트 (0.0249 mg/m<sup>2</sup>·d) < 제올라이트 (0.0357 mg/m<sup>2</sup>·d) < 석회석 (0.0648 mg/m<sup>2</sup>·d) < 미피복수조 (0.0852 mg/m<sup>2</sup>·d)의 순서로 나타남
  - 마지막으로 Pb의 용출속도는 제올라이트 (0.0441 mg/m<sup>2</sup>·d) < 페콘크리트 (0.0551 mg/m<sup>2</sup>·d) < 석회석 (0.0617 mg/m<sup>2</sup>·d) < 미피복수조 (0.0773 mg/m<sup>2</sup>·d)의 순서로 낮은 용출 속도를 보였음
  - Cu, Ni, Pb의 용출차단에 페콘크리트 및 제올라이트가 효과적인 것으로 나타났으며, 특히 Cu와 Ni은 페콘크리트가, Pb은 제올라이트가 용출 차단에 효과적인 것으로 나타남
  - 본 연구에 사용된 반응성 피복 소재는 중금속의 용출을 제한하는 물리적 차단층 뿐만 아니라 음전하로 대전된 피복 소재의 표면과 양이온을 띄는 Cu, Ni, Pb과 같은 중금속과의 정전기적 인력에 의하여 결합을 형성하며, 피복소재에서 용출되는 수산화이온 (OH-)의 영향으로 인하여 중금속의 이동성이 감소(McBride, 1994; Aziz and Smith, 1992; Kang et al., 2012)
  - 더불어 피복소재 표면의 화학적흡착 (Chemisorption)에 의한 작용에 의하여 용출량이 감소한 것으로 사료(Stipp et al., 1992; Xu et al., 1996; Sturchio et al., 1997; Cheng et al., 1998)
  - 본 연구의 결과를 토대로 석회석 및 페콘크리트는 퇴적물 내 Cu, Ni, Pb의 용출차단 소재로 매우 적합할 것으로 판단
-



[그림 IV-가-71] 석회석, 제올라이트, 폐콘크리트 피복에 따른 중금속 평균 용출속도

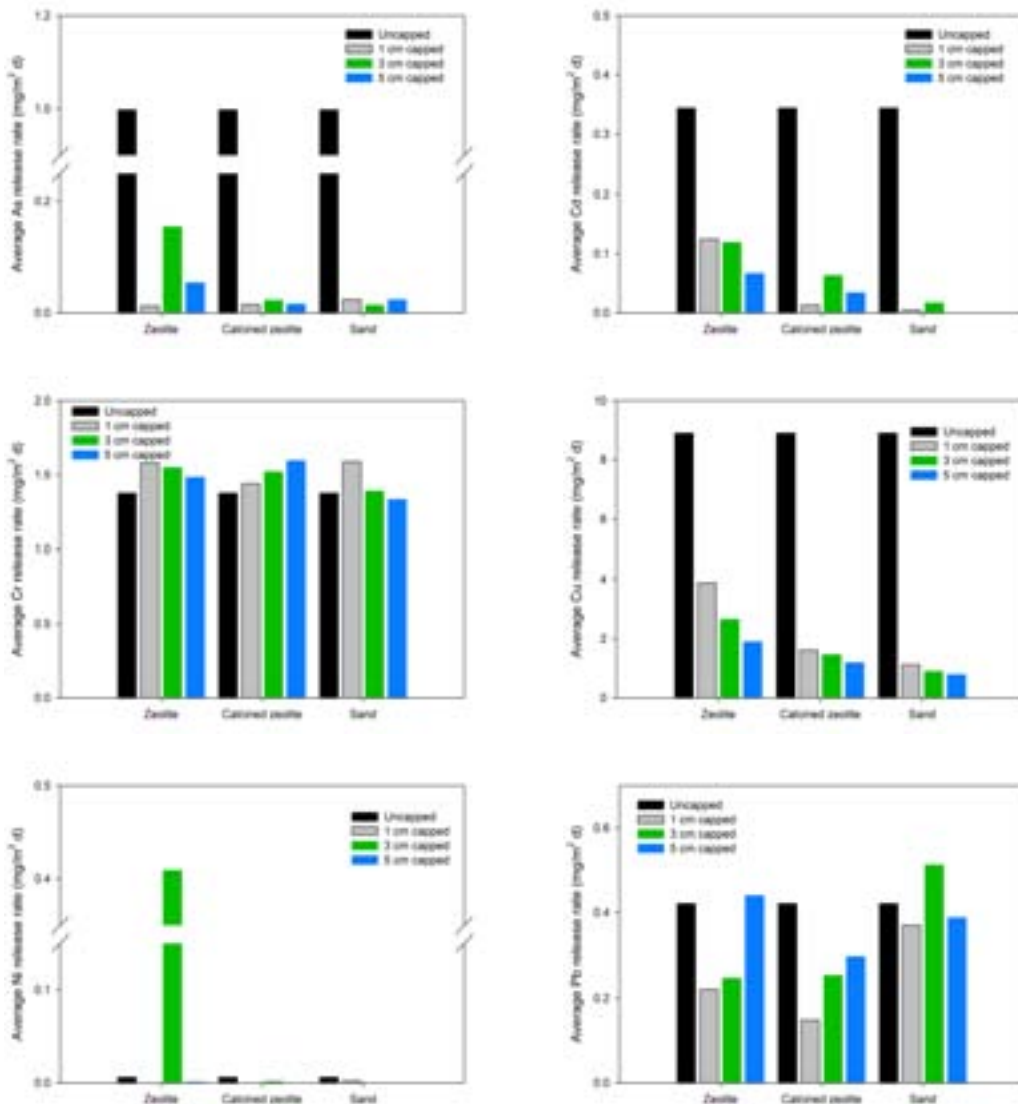
(다) 피복소재의 시간에 따른 흡착능 변화 및 흡착소재 수명 평가

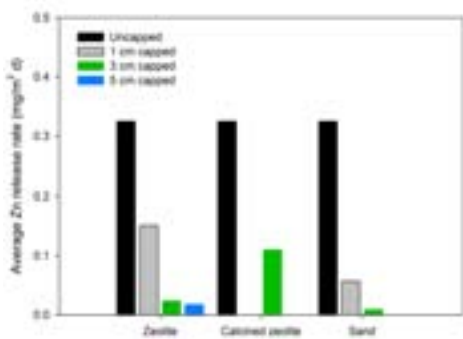
① 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사의 피복두께에 따른 퇴적물 내 중금속 용출 차단 성능 변화 평가

- 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사의 피복두께에 따른 중금속의 평균용출속도를 산출하여 그림 IV-가-72에 나타내었음
- As의 경우 미피복 수조(0.9973 mg/m<sup>2</sup>·d)의 평균 용출량을 실험기간동안 나타내었고, 제올라이트의 경우 0.0127 mg/m<sup>2</sup>·d(ZL1), 0.1541 mg/m<sup>2</sup>·d(ZL3), 0.0539 mg/m<sup>2</sup>·d(ZL5)의 결과를 보였음, 열처리한 제올라이트의 경우 0.0153 mg/m<sup>2</sup>·d(CZL1), 0.0224 mg/m<sup>2</sup>·d(CZL3), 0.0156 mg/m<sup>2</sup>·d(CZL5), 해사는 0.0239 mg/m<sup>2</sup>·d(SS1), 0.0138 mg/m<sup>2</sup>·d(SS3), 0.0234 mg/m<sup>2</sup>·d(SS5)를 나타내어 피복을 하였을 때 용출이 저감되는 결과를 보임
- 미피복 수조의 Cd 평균 용출속도는 0.3437 mg/m<sup>2</sup>·d이며, ZL1(0.1248 mg/m<sup>2</sup>·d), ZL3(0.1189 mg/m<sup>2</sup>·d), ZL5(0.0666 mg/m<sup>2</sup>·d)로 제올라이트의 피복 두께가 클수록 용출량이 감소하였고, 열처리한 제올라이트는 CZL1(0.0131 mg/m<sup>2</sup>·d), CZL3(0.0630 mg/m<sup>2</sup>·d), CZL5(0.0341 mg/m<sup>2</sup>·d)로 나타났으며, 해사의 경우 SS1(0.0044 mg/m<sup>2</sup>·d), SS3(0.0168 mg/m<sup>2</sup>·d), SS5는 검출되지 않았음
- Cr의 평균용출속도는 미피복 수조의 경우 1.3750 mg/m<sup>2</sup>·d이며, 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사를 피복하였을 때 평균용출속도가 증가하는 결과를 나타냈음[ZL1(1.5792 mg/m<sup>2</sup>·d), ZL3(1.5476 mg/m<sup>2</sup>·d), ZL5(1.4826 mg/m<sup>2</sup>·d), CZL(1.4393 mg/m<sup>2</sup>·d), CZL3(1.5192 mg/m<sup>2</sup>·d), CZL5(1.5944 mg/m<sup>2</sup>·d), SS1(1.5882 mg/m<sup>2</sup>·d), SS3(1.3882 mg/m<sup>2</sup>·d), SS5(1.3312 mg/m<sup>2</sup>·d)]
- 미피복 수조의 Cu 평균 용출속도는 8.9009 mg/m<sup>2</sup>·d로 높게 나타났으며, 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사의 피복 두께에 비례하여 평균 용출속도는 3.8833 mg/m<sup>2</sup>·d(ZL1), 2.6489 mg/m<sup>2</sup>·d(ZL3), 1.8959 mg/m<sup>2</sup>·d(ZL5), 1.6114 mg/m<sup>2</sup>·d(CZL1), 1.4547 mg/m<sup>2</sup>·d(CZL3), 1.1874 mg/m<sup>2</sup>·d(CZL5), 1.1201 mg/m<sup>2</sup>·d(SS1), 0.8893 mg/m<sup>2</sup>·d(SS3), 0.7879 mg/m<sup>2</sup>·d(SS5)로 낮게 나타남
- Ni의 평균용출속도는 미피복수조의 경우 0.0059 mg/m<sup>2</sup>·d이며, ZL1(0.0000 mg/m<sup>2</sup>·d), ZL3(0.4089 mg/m<sup>2</sup>·d), ZL5(0.0007 mg/m<sup>2</sup>·d)로 나타났고, CZL1(0.0004 mg/m<sup>2</sup>·d), CZL3(0.0014 mg/m<sup>2</sup>·d), CZL5(0.0004 mg/m<sup>2</sup>·d), SS1(0.0020 mg/m<sup>2</sup>·d), SS3(0.0002

mg/m<sup>2</sup>·d), SS5(0.0000 mg/m<sup>2</sup>·d)의 결과를 보였음

- Pb는 미피복 수조의 경우 0.4211 mg/m<sup>2</sup>·d의 평균 용출속도를 나타낸 반면, 제올라이트의 피복두께가 높아질 수록 Pb의 용출이 0.2211 mg/m<sup>2</sup>·d(ZL1), 0.2470 mg/m<sup>2</sup>·d(ZL3), 0.4396 mg/m<sup>2</sup>·d(ZL5)로 증가하였고, 열처리한 제올라이트의 경우도 0.1483 mg/m<sup>2</sup>·d(CZL1), 0.2537 mg/m<sup>2</sup>·d(CZL3), 0.2983 mg/m<sup>2</sup>·d(CZL5)로 증가함
- 마지막으로 Zn의 미피복 수조의 평균 용출속도는 0.3249 mg/m<sup>2</sup>·d로 나타났고 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사의 피복두께에 비례하여 용출량이 감소하는 결과를 나타내었음
- 이상의 결과에 따르면 복합적인 오염원이 존재하는 해양퇴적물의 오염물질 용출차단을 위한 피복두께는 오염원에 따라 1 cm피복에도 효과적인 경우도 있으나, 시공의 적절성 및 유지관리 차원에서는 5 cm이상 피복하는 것이 매우 효과적일 것으로 판단됨
- 또한 본 연구진에서 도출한 제올라이트의 중금속 흡착용량과 본 실험결과를 토대로 제올라이트를 약 20 cm(200 kg/m<sup>2</sup>) 두께로 피복하고, 외부환경 영향을 무시하였을 때 약 178년 이상의 흡착효율 유지가 가능한 것으로 판단됨





[그림 IV-가-72] 제올라이트, 열처리한 제올라이트, 해사 피복에 따른 중금속 평균용출속도 결과비교

#### (4) 피복공법의 경제성 분석

##### (가) 피복공법의 기존 다 정화방법 대비 경제성 평가

###### ① 해양오염퇴적물 정화기술 개발의 경제성 분석 방향

- 해양오염퇴적물 정화기술의 개발은 해양오염퇴적물 정화사업의 효율성을 높여 정화사업의 추진시기를 앞당기고 시행 해역을 크게 넓힐 수 있음. 이에 따라 정화사업의 시장규모를 확대하고 정화사업을 더 효율적으로 수행함으로써 국가경제에 기여하고 국민들에게 직·간접적인 혜택을 제공하게 됨
- 경제성평가의 틀은 그간 진행된 연구 및 향후 기술개발에 의해 확대되는 해양오염퇴적물 정화사업의 시장규모를 추정하고 이로 인해 발생하는 직·간접적인 경제적 파급효과를 추정함. 또한 해양생태계 복원에 따른 환경, 건강, 여가 등의 비화폐적인 효용을 파악하는 것이 중요함
- 해양오염퇴적물 정화사업 소요 비용 절감효과 추정
  - 선진국의 해양오염퇴적물 처리시 평균 단가는 약 80천원/m<sup>3</sup> (50천원/m<sup>3</sup>~130천원) 수준임에 비해, 우리나라의 현행 해양오염퇴적물 처리단가는 평균 105천원/m<sup>3</sup>이 소요(부산남항 정화사업 사례)되며 일반 준설의 경우 약 25천원/m<sup>3</sup> 수준임
  - 우리나라도 다양한 원위치 처리공법을 자체 개발하여 성공적으로 정화사업에 사용할 경우, 정화사업비의 절감을 기대할 수 있음
- 해양오염퇴적물 정화사업 촉진 및 확대에 따른 부가가치 추정
  - 해양오염퇴적물 정화기술 개발 및 사업시행 과정에서 해양 대형 토목구조물 설계·시공 기술 등과 관련된 건설업 부문, 연구사업 부문, 기타 화학·생물학적 기술과 관련된 산업에 이르기까지 해양오염퇴적물 정화복원과 관련된 직·간접적인 경제활동부문에 대한 산업연관효과를 통한 연구·개발의 시너지 효과를 기대할 수 있음
- 해양생태계 복원에 따른 직·간접적인 편익
  - 해양오염퇴적물 정화를 통해 해양환경 개선으로 지역주민 생활환경 개선 및 관광·레저 등 다양한 목적으로 해역이용 활성화와 해역이용의 부가가치 상승이 기대
  - 해양생태계 복원에 따른 국민건강 증진의 경제적 가치
- 해양오염퇴적물 정화기술 국제 경쟁력 제고로 해외시장 개척효과
  - 산업화가 급속도로 진전되고 있는 중국과 동남아시아 지역에서는 현재 하천, 호수, 연안 등의 오염퇴적물 정화사업이 시작 또는 준비 단계에 있으므로 관련 기술을 개발하여 산업화할 경우 향후 해외시장 개척이 가능함



## ② 해양오염퇴적물 정화사업 경제적 편익 분석

### ㉠ 해양오염퇴적물 정화사업 경제성 분석의 특성

- 해양오염퇴적물 정화사업의 성과는 먼저 경제적 가치를 지닌 기술발전의 형태로 나타나고 다음으로 상용화를 통한 경제적 잉여의 창출을 가져와 궁극적으로 경제성장에 기여한다고 볼 수 있음
- 사업의 경제성 분석은 투자와 관련된 직·간접적인 투입과 산출, 비용과 편익을 화폐가치로 측정하는 것은 물론 기술가치와 시장성 등을 종합적으로 파악하여 실현가능성을 검토하는 과정이 필요함
- 경제성 분석은 다음과 같은 세 가지 특징을 가지고 있음
- 첫째, 상용화를 전제로 미래의 가상적 상황에 대한 경제적 가치를 추정해야 하고, 둘째, 해양오염퇴적물 정화사업은 사업의 수혜대상이 국민인 공공사업이며, 셋째, 해양오염퇴적물 정화사업에 대한 정부차원의 지원은 직접적으로 해당 산업의 생산 및 부가가치 창출, 고용창출을 유발하는 효과 외에도 국가적으로는 기술의 선점효과에 대한 투자 성격을 동시에 지니고 있다는 점임
- 대부분의 공공사업이 일정한 가치를 가지고 추진되나 모든 투자가 기회비용을 수반한다는 점에서 대안적인 사업간 효율성을 비교하는 것이 필요
- 정책결정에 있어서의 문제는 공공사업의 ‘비용’(cost)은 공적자금의 투입액으로 파악이 가능하지만, ‘편익’(benefit)은 사업의 특성상 시장가격기구를 통하여 직접적으로 파악되지 않는 특성을 지님
- 해양오염퇴적물 정화사업과 같은 공공사업의 추진은 영리조직의 의사결정과는 차이가 큼
- 영리조직은 사업별로 예상 수익과 비용을 분석하여 순이익이 기대되는 사업을 추진하지만, 공공사업의 결과는 시장에서 평가되지 않는 편익도 고려해야 하기 때문임
- 특히 해양오염퇴적물 정화사업과 같은 경우 환경이라는 변수를 수반하기 때문에 시장가격을 통한 수익성 평가가 어려운 공공사업임

### ㉡ 비용편익분석

- 비용-편익분석은 정책의 사업적 타당성을 판단하기 위한 중요한 근거로 널리 사용되고 있는 방법으로, 직접적 비용과 편익만을 고려하는 기업 차원의 투자 산출과는 달리 공공투자에 있어서는 이 정책을 통해 간접적으로 발생하는 효과도 고려 대상이 됨
- 비용-편익분석 기법은 어떠한 정책사업을 평가하고 서로 다른 정책제안들에 대해 우선순위를 부여하기 위한 도구로서 정책결정자들에게 유용하게 이용되고 있음
- 비용-편익 분석은 공공부문에 있어서 자원의 이용은 경제적 효율성에 의존한다는 인식에서 출발하므로 어떤 사업은 정책수단을 통해 달성 가능한 추가적인 편익이 그에 소요되는 추가비용을 넘어설 때에야 경제적으로 합리적이라는 평가가 내려지게 됨
- 기본적인 비용-편익분석 방식은 편익(B)의 현재가치에서 비용(C)의 현재가치를 뺀 것으로 정의되는 ‘순현재가치’(net present value, NPV)가 양(+)의 값을 가질 때 해당사업이 경제성이 있는 것으로 평가하는 것임

$$NPV = \frac{B_0 - C_0}{(1+r)^0} + \frac{B_1 - C_1}{(1+r)^1} + \dots + \frac{B_n - C_n}{(1+r)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t},$$

(여기서  $t=0, 1, 2, \dots, n$ ,  $r$ 은 사회적 할인율,  $n$ 은 사업의 기간을 의미)

- 이 같이 순현재가치가 널리 사용되는 평가기준이기는 하지만 대규모 사업일수록 유리한 결과를 나타내는 한계가 있음
- 이러한 문제 때문에 총편익의 현재가치(B)와 총비용의 현재가치(C)의 비율로 경제적 효과를 판별하는 ‘편익-비용 비율’(benefit-cost ratio)이 자주 이용됨. 즉

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

- 비용-편익 분석에 있어서는 비용과 편익의 구성요소를 잘 파악하는 것이 중요한 문제임
- 첫째, 사업의 비용은 연구비, 개발비, 사업준비과정에 소요되는 비용, 투자비용, 사업유지 및 운영비용과 같은 “직접비용”과 사업계획기간 중 제3자에게 발생하는 간접비용으로 구분됨
- 둘째, 사업의 편익은 자금이 투자되어 해당 사업으로부터 직접 발생하는 직접편익과 사업으로부터 직접 이득을 얻는 사람들이 아닌 제 3자에게 발생하는 간접편익으로 구분됨
  - 다음으로 비용-편익분석 절차에서 중요한 단계 중 하나는 비용과 편익요소에 대한 화폐가치화 작업임
- 경제 전체적인 측면에서 합리적이라고 판단되는 정책수단은 해당 정책의 도입에 의해 추가적으로 발생하는 편익이 여기에 드는 추가비용(한계비용)보다 높아야 하는데, 사회적 이득과 손실에 관한 정보는 일반적인 화폐단위로 표시됨으로써 비로소 체계적으로 비교될 수 있기 때문임
  - 한편 공공사업에서 비용-편익 분석을 적용할 때 시차를 두고 발생하는 편익과 비용의 비교 가능성에 대한 문제가 발생함
- 예를 들어 비용은 초기에 집중적으로 발생하는데 비해 편익은 여러 해에 걸쳐 나타나는 것이 일반적이므로 비용과 편익을 서로 비교 가능하도록 만들기 위해서는 이들을 하나의 공통된 시점을 기준으로 환산해야 하는데, 이와 같은 시차에 의한 문제는 ‘할인율’(discount rate)을 이용하여 해결하게 됨
- 즉 할인율이란 상이한 시점에서 발생하는 수익이나 비용을 동일한 시점에서의 가치로 환산하는데 이용하는 환산율으로써 평가하고자 하는 대안의 비용-편익 요소가 경상가격으로 표시되었을 경우에는 명목할인율을 사용하여 다음과 같이 정의되는 할인계수를 이용하여 평가함

$$\text{할인계수} = \frac{1}{(1+r)^t}$$

(단  $r$ 은 할인율,  $t=0, 1, 2, \dots, n$ ,  $n$ 은 사업 기간을 의미)

- 이론적으로 적정할인율 수준은 유사한 기존의 투자에서 요구되고 있는 수익률을 유추하여 적용하며 이는 해당 투자를 선택함으로써 다른 사업에 투자할 기회를 잃게 된다는 것을 반영한 것으로서 결국 의사결정자의 기회비용으로 해석될 수 있음
  - \* 자본·금융시장이 잘 발달되어 있는 경우에는 각 경제주체들이 자본 또는 금융시장에서 요구하는 수익률이 각자의 기회비용을 가장 적절히 반영하게 되므로 자본의 가중

---

평균비용을 할인율로 사용하는 것이 바람직함

- 할인율이 높은 경우 장기적인 사업의 결과는 별로 좋지 않게 나오는데 이것은 미래의 화폐크기에 대한 현재가치가 낮게 평가되어 현재비용이 미래의 편익보다도 높게 평가되기 때문임
  - \* 따라서 너무 낮은 할인율이 선택되면 사회적으로 바람직하지 못한 규제나 투자가 시행될 수 있고 반대로 너무 높은 할인율이 선택되면 사회적으로 바람직한 규제나 투자가 시행되지 않을 가능성이 있음
- 본고에서 사업자 관점의 평가에 적용되는 경제성은 비용과 편익의 비율에 의해 판정하며, 비용과 편익의 현재가치(PV)는 특정시점  $t$ 에서의 가치인  $V_t$ 에 할인계수를 곱해서 구함. 즉

$$PV = V_t \cdot \frac{1}{(1+r)^t}$$

### ㉔ 산업연관분석

- 일반적으로 한 재화나 서비스의 생산에 있어 각 산업은 원재료의 거래관계를 토대로 직·간접적으로 상호 연관되어 있으며, 생산활동을 통해 이루어지는 이러한 산업간의 상호의존 관계를 수량적으로 파악하는 분석 방법이 바로 ‘투입-산출분석’(input-output analysis) 혹은 산업연관분석임
  - 해양오염퇴적물 정화기술 개발은 다양한 분야의 기술적 융합과 인프라 구축 등 체계적인 시스템을 필요로 함
  - 해양오염퇴적물 정화기술 개발 및 사업시행 과정에서 대형 토목구조물 설계·시공기술 등과 관련된 건설업 부문, 연구사업 부문, 기타 화학·생물학적 기술과 관련된 산업에 이르기까지 해양오염퇴적물 정화 복원과 관련된 직·간접적인 경제활동부문에 대한 산업연관효과를 통한 연구·개발의 시너지 효과를 기대할 수 있음
  - 한편 투입-산출분석은 1년 동안 국민경제 내에서 발생하는 재화와 서비스의 생산 및 처분과 관련된 모든 거래내역을 내생변수로 하여 내생부문과 관계없이 결정되는 외생부문 값의 변동이 이들 내생변수 값에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴봄으로써 국민경제적 파급효과를 설명함
  - 따라서 산업연관표를 이용하여 해양오염퇴적물 정화기술 개발 사업의 생산·부가가치·고용 등 측면에서 국내 산업에 미치는 파급효과를 추정하기 위해서는 통상적으로 단계별 투자소요 금액 및 관련 산업부문을 내생부문에서 외생부문으로 이동 설정하여 파급효과 분석을 위한 투입산출구조로 사용하여야 함
    - 이상과 같은 외생부문의 충격 각각이 내생부문의 산출액 및 취업자수에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해 다음의 그림 IV-가-73과 같이  $n$ 개의 국산중간투입내역을 국산부문과 수입부문을 합친 총투입액으로 나눈 내생산업부문의 투입계수행렬( $A_{nm}^d$ )과 1개의 외생부문 투자액(산출액) 벡터( $Y_{n,1}$ )로 구성된 투입산출표를 고려함
  - 여기에서 투입계수행렬은 수입된 재화나 서비스로 인한 산출효과를 배제하고 일정액의 생산활동이 “국내” 산업 각 부문에의 산출, 부가가치, 고용에 미치는 직·간접적인 파급효과를 계측하기 위해 수입거래금액을 제외한 국산투입계수를 사용함
-

	산출			노동계수
투 입	내생부문	외생부문	$Y_{n,1}$	$l_{n,1}$
	내생부문	$A_{nn}^d$		
	부가가치	$v_{1,n}$		

주: 내생 산업부문행렬( $A_{nn}^d$ )의 각 열의 각 셀은 생산물 한 단위를 생산하기 위하여 필요한 각 산업부문 생산물의 크기를 나타내는 투입계수임

### [그림 IV-가-73] 투입-산출분석의 데이터 구조

- 한편 분석에는 상품생산을 위한 중간투입 구조와 함께 산업별 부가가치 계수의 행벡터( $v_{1,n}$ ) 및 노동계수의 열벡터( $l_{n,1}$ )를 이용함
- 이 중 부가가치 계수는 총 산출액(투입액) 중 피용자보수·영업잉여·고정자본소모 등 생산활동에 노동과 자본을 제공하는 경제주체들에 귀속되는 소득에 관한 정보(기능적 소득분배)를 제공함
- 그리고 노동계수는 단순히 피용자(임금근로자)만을 의미하는 고용계수의 개념에 자영업자와 무급가족 노동자까지 포함하는 포괄적인 개념으로써의 취업계수를 사용함
- 아래에서 수행하게 될 경제적 파급효과는 해양오염퇴적물 정화기술 개발 사업의 추진으로 인한 국민경제활동의 변화를 의미하며, 총산출, 총부가가치, 고용창출에 의해 계량화됨
- ‘총산출’(total output)은 국민경제내 모든 소비의 합으로 정의되며, 최종재 생산에 중간재로 판매되는 중간수요를 포함함
  - \* 총생산 유발효과:  $X^d = (I - A^d)^{-1}Y$  (여기서  $I$ 는 주대각원소가 1이고 그밖에 요소는 모두 0인 단위행렬)
- ‘총부가가치’(gross value added)는 GDP의 대리변수로서 산업부문별 산출액에서 생산을 위해 투입된 중간비용을 공제한 것으로 피용자보수, 영업잉여, 고정자본소모, 순생산세의 합으로 정의됨
  - \* 부가가치효과:  $V = \hat{v}X^d$  (여기서  $\hat{v}$ 는 부가가치계수의 대각행렬)
- ‘고용’(employment)은 신규 투자사업이 유발하는 추가적인 고용증가의 합으로 정의됨
  - \* 취업유발효과:  $Lw = \hat{l}X^d$  (여기서  $\hat{l}$ 는 취업유발계수의 대각행렬)
- 해양오염퇴적물 정화기술 개발 사업의 생산·부가가치·고용효과를 계산해 내기 위해서는 기존의 산업 부문(28 대분류기준 경제활동부문)을 확장하여 한국은행의 403 경제활동부문기본표에 근거하여 해양오염퇴적물 기술과 관련된 부문(이하 해양오염퇴적물정화부문 또는 정화부문)을 별도로 분리 추출하여 설정하여야 함
- 이를 통해 해양오염퇴적물정화부문이 동 부문 이외의 여러 경제활동부문의 산출물을 중간재로 수요한다고 보고 해양오염퇴적물정화부문이 직·간접적으로 여타 부문의 생산활동에 미치는 영향을 분석할 수 있음
- 즉 이 경우의 생산유발효과는 해양오염퇴적물정화부문에서 1단위의 생산 또는 투자 등 최종수요가 발생하였을 때 여타 부문에서 발생하는 생산액의 증가를 총합한 효과이고, 부가가치유발효과는 생산유발효과와 마찬가지로 해양오염퇴적물정화부문에서 1단위의 생산 또는 투자 등 최종수요가 발생하였을 때 여타 부문에서 발생하는 부가가치 즉 GDP의 증

가를 총합한 효과이며, 취업유발효과는 해양오염퇴적물정화부문에서 10억 원에 해당하는 생산 또는 투자 등 최종수요가 발생하였을 때 여타 부문에서 발생하는 취업자 수의 증가 효과를 나타냄

- 해양오염퇴적물 정화기술 중 피복정화기술을 실시하기 위해서는 현장시공 인프라 구축과 관련하여 오염퇴적층의 격리 등을 위해 선박이나 특수기계를 필요로 하고, 기타 하역 여건, 접하 여건 인프라와 장비가 소요됨
- 이를 감안하여 본 연구에서의 해양오염퇴적물정화부문은 403부문 산업연관표에서 239부문(기타특수목적용기계), 282부문(기타 선박), 311부문(항만시설), 315부문(농림수산토목), 319부문(기계조립설치), 320부문(기타건설)을 포함함
  - 한편 산업연관분석을 위해 해양오염퇴적물정화부문에서의 최종지출액이 시설투자가 집중되는 1차년도에 초기투자비용으로 85%가 사용되고 나머지 15%는 사업운영비로 이후 9년간 균등 배분된다고 가정함
  - 이상과 같은 시나리오 하에서의 산업별 총생산효과가 표 IV-가-37에 나타나 있는데, 시설투자가 이루어지는 1차년도에 총 사업비의 182% 직·간접 생산유발효과가 발생하고, 이후 10년간 총 사업비의 210% 생산유발효과가 발생함
- 즉 생산유발효과는 실제 소요사업비의 약 2배 수준으로 나타났으며, 이를 산업별로 살펴보면 최종수요 발생으로 직접효과의 영향을 많이 받는 정화부문이 가장 큰 생산유발효과를 보이며, 다음으로 1차금속제품, 금속제품, 부동산 및 사업서비스, 일반기계, 화학제품, 도소매 등의 순으로 생산유발효과가 큰 것으로 나타남

[표 IV-가-37] 해양오염퇴적물 정화사업의 생산유발효과

	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차 년도	7차 년도	8차 년도	9차 년도	10차 년도	연도 합계
농림수산물	0.409	0.008	0.008	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006	0.006	0.472
광산물	0.542	0.010	0.010	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.624
음식료품	0.624	0.012	0.011	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010	0.009	0.719
섬유및가죽제품	0.472	0.009	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.007	0.544
목재및종이제품	1.253	0.024	0.023	0.022	0.022	0.021	0.021	0.020	0.019	0.019	1.444
인쇄및복제	0.218	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.251
석유및석탄제품	4.299	0.082	0.079	0.077	0.075	0.073	0.071	0.069	0.067	0.065	4.956
화학제품	6.066	0.115	0.112	0.109	0.106	0.103	0.100	0.097	0.094	0.091	6.992
비금속광물제품	4.721	0.090	0.087	0.085	0.082	0.080	0.077	0.075	0.073	0.071	5.442
제1차금속제품	24.140	0.460	0.446	0.433	0.421	0.408	0.396	0.385	0.374	0.363	27.826
금속제품	9.085	0.173	0.168	0.163	0.158	0.154	0.149	0.145	0.141	0.137	10.472
일반기계	6.658	0.127	0.123	0.119	0.116	0.113	0.109	0.106	0.103	0.100	7.674
전기및전자기기	3.701	0.070	0.068	0.066	0.064	0.063	0.061	0.059	0.057	0.056	4.266
정밀기기	0.932	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.015	0.015	0.014	0.014	1.075
수송장비	1.610	0.031	0.030	0.029	0.028	0.027	0.027	0.026	0.025	0.024	1.856
기타제조업제품	0.332	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.383
전력가스및수도	2.257	0.043	0.042	0.040	0.039	0.038	0.037	0.036	0.035	0.034	2.602
건설	0.267	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.308
도소매	4.922	0.094	0.091	0.088	0.086	0.083	0.081	0.078	0.076	0.074	5.674
음식점및숙박	1.254	0.024	0.023	0.022	0.022	0.021	0.021	0.020	0.019	0.019	1.445
운수및보관	2.989	0.057	0.055	0.054	0.052	0.051	0.049	0.048	0.046	0.045	3.446
통신및방송	1.141	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019	0.019	0.018	0.018	0.017	1.315
금융및보험	3.160	0.060	0.058	0.057	0.055	0.053	0.052	0.050	0.049	0.047	3.643
부동산및사업서비스	7.733	0.147	0.143	0.139	0.135	0.131	0.127	0.123	0.120	0.116	8.914
공공행정및국방	0.039	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.045
교육및보건	0.995	0.019	0.018	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.015	0.015	1.147

사회및기타서비스	1.245	0.024	0.023	0.022	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019	0.019	1.435
기타	2.335	0.045	0.043	0.042	0.041	0.040	0.038	0.037	0.036	0.035	2.692
정화부문	88.434	1.683	1.635	1.587	1.541	1.496	1.452	1.410	1.369	1.329	101.935
총계	181.835	3.462	3.361	3.263	3.168	3.075	2.986	2.899	2.815	2.733	209.596

- 정화사업의 실시로 인해 예상되는 부가가치 유발효과가 표 IV-가-38에 나타나 있는데, 그 규모는 10년간 총 투입비용의 67%인 것으로 예상됨
- 부가가치 유발효과에 경우도 정화부문의 최종수요가 발생함에 따라 정화부문이 가장 크게 나타났으며, 이어서 부동산 및 사업서비스, 1차금속제품, 도소매, 금속제품, 금융 및 보험, 일반기계 등의 순으로 부가가치 유발효과가 큰 것으로 나타남

[표 IV-가-38] 해양오염퇴적물 정화사업의 부가가치 유발효과

	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차 년도	7차 년도	8차 년도	9차 년도	10차 년도	연도 합계
농림수산물	0.2134	0.0040	0.0040	0.0038	0.0037	0.0037	0.0034	0.0034	0.0033	0.0032	0.2458
광산물	0.3169	0.0061	0.0058	0.0057	0.0055	0.0053	0.0051	0.0051	0.0049	0.0047	0.3651
음식료품	0.1586	0.0030	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0027	0.0026	0.0025	0.0023	0.1831
섬유및가죽제품	0.1407	0.0026	0.0025	0.0025	0.0024	0.0024	0.0023	0.0022	0.0021	0.0022	0.1620
목재및중이제품	0.3439	0.0065	0.0064	0.0061	0.0059	0.0058	0.0056	0.0054	0.0054	0.0052	0.3962
인쇄및복제	0.0849	0.0017	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013	0.0013	0.0978
석유및석탄제품	0.8728	0.0166	0.0161	0.0157	0.0152	0.0148	0.0143	0.0139	0.0136	0.0131	1.0060
화학제품	1.2172	0.0232	0.0225	0.0219	0.0212	0.0205	0.0200	0.0195	0.0188	0.0183	1.4032
비금속광물제품	1.4338	0.0272	0.0265	0.0257	0.0250	0.0242	0.0235	0.0228	0.0222	0.0216	1.6526
제1차금속제품	3.5735	0.0680	0.0660	0.0641	0.0623	0.0604	0.0586	0.0570	0.0553	0.0538	4.1190
금속제품	2.4550	0.0467	0.0453	0.0441	0.0428	0.0416	0.0404	0.0391	0.0379	0.0369	2.8298
일반기계	1.7506	0.0333	0.0323	0.0313	0.0305	0.0295	0.0287	0.0279	0.0272	0.0263	2.0177
전기및전자기기	0.7791	0.0148	0.0144	0.0139	0.0135	0.0132	0.0128	0.0125	0.0121	0.0117	0.8981
정밀기기	0.2380	0.0046	0.0044	0.0042	0.0042	0.0040	0.0039	0.0038	0.0038	0.0035	0.2743
수송장비	0.3826	0.0073	0.0071	0.0068	0.0067	0.0065	0.0062	0.0061	0.0059	0.0057	0.4410
기타제조업제품	0.0936	0.0018	0.0017	0.0017	0.0016	0.0015	0.0016	0.0014	0.0015	0.0013	0.1078
전력가스및수도	0.6548	0.0124	0.0120	0.0118	0.0114	0.0111	0.0108	0.0104	0.0101	0.0099	0.7547
건설	0.1067	0.0021	0.0020	0.0019	0.0019	0.0018	0.0017	0.0018	0.0016	0.0017	0.1231
도소매	2.8760	0.0548	0.0531	0.0516	0.0501	0.0487	0.0472	0.0458	0.0445	0.0432	3.3151
음식점및숙박	0.4759	0.0090	0.0088	0.0086	0.0083	0.0081	0.0078	0.0077	0.0074	0.0072	0.5486
운수및보관	1.1207	0.0213	0.0207	0.0202	0.0195	0.0190	0.0184	0.0179	0.0173	0.0169	1.2919
통신및방송	0.5041	0.0095	0.0093	0.0090	0.0088	0.0085	0.0083	0.0080	0.0079	0.0075	0.5809
금융및보험	1.7537	0.0333	0.0324	0.0315	0.0306	0.0297	0.0288	0.0279	0.0272	0.0263	2.0215
부동산및사업서비스	5.2492	0.1000	0.0970	0.0942	0.0914	0.0887	0.0862	0.0837	0.0813	0.0789	6.0506
공공행정및국방	0.0263	0.0006	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0003	0.0003	0.0303
교육및보건	0.6603	0.0126	0.0122	0.0119	0.0114	0.0111	0.0109	0.0105	0.0101	0.0099	0.7610
사회및기타서비스	0.6353	0.0120	0.0118	0.0115	0.0111	0.0108	0.0104	0.0101	0.0098	0.0095	0.7324
기타	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
정화부문	29.9498	0.5701	0.5535	0.5374	0.5217	0.5065	0.4919	0.4775	0.4635	0.4502	34.5221
총계	58.0675	1.1053	1.0729	1.0417	1.0115	0.9822	0.9535	0.9257	0.8988	0.8727	66.9317

- 한편 해양오염퇴적물정화사업의 총생산유발효과(10년간 1조원 투입을 가정하면)에 취업유

발계수의 대각행렬을 곱해서 구한 전산업의 고용창출효과는 6,441명인 것으로 분석됨

- 산업부문별로는 정화사업이 전체 고용효과의 43.2%로 가장 높게 나타났으며, 이어서 노동집약적인 산업인 광산품, 도소매, 부동산 및 사업서비스, 금속제품, 운수 및 보관업 등의 순으로 나타남

[표 IV-가-39] 해양오염퇴적물 정화사업의 취업유발효과 (단위: 명)

	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	6차 년도	7차 년도	8차 년도	9차 년도	10차 년도	연도 합계
농림수산물	65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	73
광산품	1036	19	18	17	16	16	15	14	13	12	1177
음식료품	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
섬유및가죽제품	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
목재및종이제품	24	1	1	1	1	1	1	0	0	0	27
인쇄및복제	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
석유및석탄제품	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
화학제품	58	1	1	1	1	1	1	1	1	1	66
비금속광물제품	73	1	1	1	1	1	1	1	1	1	82
제1차금속제품	90	2	1	1	1	1	1	1	1	1	102
금속제품	220	4	4	4	3	3	3	3	3	3	250
일반기계	120	2	2	2	2	2	2	1	1	1	137
전기및전자기기	39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	44
정밀기기	25	1	1	1	1	1	1	1	1	0	29
수송장비	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
기타제조업제품	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
전력가스및수도	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
건설	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
도소매	557	10	10	9	8	8	8	7	7	7	633
음식점및숙박	125	3	2	2	2	2	2	2	1	1	142
운수및보관	142	3	3	3	2	2	2	2	2	2	161
통신및방송	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
금융및보험	80	1	1	1	1	1	1	1	1	1	91
부동산및사업서비스	301	6	5	5	5	5	5	4	4	4	341
공공행정및국방	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
교육및보건	68	1	1	1	1	1	1	1	1	1	77
사회및기타서비스	94	2	2	1	1	1	1	1	1	1	107
기타	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
정화부문	2447	46	43	41	39	37	35	33	31	29	2780
총계	5668	105	100	95	90	85	80	76	73	69	6441

### ③ 사업의 비용편익분석에 의한 경제성 평가

- 연구사업의 비용은 당해 기술을 개발하는데 투여되는 사업비이며 당해 연구의 경제화폐적 편익은 기술개발로 인한 비용절감, 해양퇴적물 정화사업의 확대에 의한 편익임.
  - 해양오염퇴적물 정화사업의 경제적 가치를 분석하는데 있어 해양오염퇴적물의 정화에 소요되는 비용과 이를 통해 얻을 수 있는 편익을 화폐가치로 측정하는 것은 어려운 문제임
  - 시장가격이 존재하는 경우 시장가격에 서비스 변화량을 곱해서 비용과 편익의 화폐가치를 측정할 수 있으나(주로 사적 편익 및 비용이 이에 해당함), 환경 편익과 비용은

화폐가치로 측정하기 어려움

- 따라서 본 연구에서는 다음에서 설명하는 가정과 시나리오를 통해 비용요인과 편익요인을 식별하고 화폐가치화 함

**㉠ 기술개발로 인한 비용절감**

- 현행 부산남항정화사업을 예로 들면 해양오염퇴적물의 평균처리단가는 105천원/m<sup>3</sup>으로 선진국에 비해 약 1.3배 높은 수준으로 파악됨.
- 미국과 같은 선진국의 경우 해양오염퇴적물 처리(중간 및 최종)시 50,000원/m<sup>3</sup>-130,000원/m<sup>3</sup> 정도가 소요되어 중간 단가는 약 80,000원/m<sup>3</sup> 수준으로 파악되고 있음
- 현장피복(capping)과 준설(dredging)에 따른 비용은 표 IV-가-40와 같음. 현장피복비용은 45,000원/m<sup>3</sup> - 660,000원/m<sup>3</sup>이고, 준설비용은 132,000원/m<sup>3</sup> - 1,750,000원/m<sup>3</sup>인 것으로 나타나 상대적으로 비용이 큰 것으로 파악되고 있음.
  - 당 연구사업으로 선진국수준으로 처리 단가가 낮아질 것으로 예상한다면 정화기술개발에 따른 비용절감은 약 5,000원/m<sup>3</sup>으로 추정되어 총 사업비 절감효과는 최소 400억 원에 이를 것으로 추정됨.
  - 피복공법의 경우, 처리비용이 45,000원/m<sup>3</sup>에 불과한 해역도 있어 경제성이 높은 지역은 비용절감효과가 클 것으로 추정됨. 따라서 피복공법으로 원위치처리 하는 경우 사후관리 비용을 감안해도 10,000원/m<sup>3</sup>의 비용절감이 가능할 것으로 추정됨.
- 현재는 원위치처리를 못하고 준설하여 처리한다 해도 처리기술에 대한 신뢰성이 부족하여 해양투기를 하거나 육상매립장에 매립하는 비용이 추가적으로 발생하고 있음.
  - 또한 지역에 따라 준설만이 유일한 대안인 경우, 처리비용이 다소 높더라도 본 연구에서 명시적으로 감안하고 있지 않은 비경제적 편익(사회적 편익)이 큰 경우에는 준설을 통한 정화사업의 필요성이 있고, 정화사업의 대상해역이 확대된다면 편익은 늘어날 수 있을 것임.
  - 따라서 정화기술, 피복공법 및 준설기술이 적절히 활용된다면 비용절감 뿐 아니라, 정화사업의 대상해역이 크게 늘어나는 효과를 기대할 수 있음.
- 우리나라의 해양오염퇴적물 양이 최저 약 8백만m<sup>3</sup>에서 최대 187백만m<sup>3</sup> 달한다는 추정 규모를 감안하여 해양오염퇴적물 정화사업비용의 절감액을 산정해 볼 수 있음.

[표 IV-가-40] 준설·피복 비용 (Perelo L.W., 2010)

Technique	Area [m <sup>3</sup> ]	Pollutant	Cost [\$]	Material	Cost [\$] per m <sup>3</sup>
Dredging	200 ~ 44,100	PAH, PCB et al.	250,000 ~ 25,000,000		132~1750
Capping	10,000 ~ 760,000	Heavy metal, PCB et al.	650,000 ~ 388,000,000	sand, clean sediment, geotextile et al.	43.20~667

**㉡ 해양퇴적물 정화사업의 확대의 경제적 편익**

- 기술개발로 인해 정화사업의 효율성이 증대되면 경제성이 떨어져 사업추진이 어려웠던



해역으로까지 사업을 확대할 수 있을 것임.

- 기술개발로 인한 확대 해역을 다음 네 경우를 가정하고 산업연관의 파급효과를 추정하면 표 IV-가-41와 같음. 해양오염퇴적물정화사업의 총생산유발효과는 투입사업비의 2.1배이고 부가가치유발효과는 0.67배이므로 총 경제적 파급효과는 투입사업비의 약 2.77배임.

[표 IV-가-41] 사업해역 확대의 산업연관 경제파급효과의 편익

확대해역( $m^3$ )	투입사업비	생산유발효과	부가가치유발효과	총편익
1000	8000억	1조6760억	5352억	2조2112억
5000	4조	8조3800억	2조6760억	11조0560억
10000	8조	16조7600억	5조3520억	22조1120억
18700	14조9600억	31조3412억	10조82억	41조3494억

- 산업연관분석에서와 같이 해양오염퇴적물 정화부문에 대한 투입은 동 경제활동부문에 대한 지출을 수반하므로 최종수요를 발생시킴
- 즉 해양오염퇴적물 정화사업에 대한 비용지출은 동 부문에서의 최종지출을 통해 경제 전반으로 여타부문에서의 생산, 부가가치 및 취업유발 등의 효과를 발생시키며, 이 효과는 해양오염퇴적물 정화를 통해 경제 전체적으로 유발되는 간접적인 편익이라고 할 수 있음
  - 해양오염퇴적물 정화에 대한 비용편익분석은 이상에서 기술한 비용, 수질개선을 통한 직접 편익과 산업연관분석 측면에서의 간접 편익의 합으로 계산할 수 있는 총편익을 비교하는 방식으로 수행할 수 있음
- 구체적으로 해양오염퇴적물 정화사업을 10년간 수행하는 것으로 가정하여 전체 투입비용의 85%를 1차년도 시설투자비 등 사업비용으로 지출하고 나머지 15%를 이후 9개년 도에 관리비용 명목으로 균등 지출한다고 가정함. 해양 오염퇴적물 정화사업의 기술을 개발하는데 연구개발비로 400억원 투입을 가정함
- 연간 직접 편익은 하한을 100억 원으로 가정하고 상기비용 투입시 산업연관분석으로부터 도출한 간접편익을 이용하여 총 편익을 산정함
  - 통상 국가적으로 특정 할인율을 권고하고 있지는 않으나, 상이한 시점에서 발생하는 수익과 비용을 1차년도와 동일한 가치로 환산하기 위해 연구시점 현재 『한국개발연구원』이 대규모 사업의 예산타당성 분석에서 사용하고 있는 할인율 4%를 모든 연도에 대해 적용함
  - 이상과 같은 가정을 반영하여 다음과 같은 세 가지의 시나리오 분석을 수행함
  - 첫째, 사업성공확률 및 R&D 기여도 모두 100%일 경우의 Best scenario로 정화사업을 시행하는 해역은 현재 조사된 해역 800만 $m^3$ 에서 최대 187백만 $m^3$ 까지 가능함을 감안하여 5000만 $m^3$ 을 가정하고 분석함. 이때 기술개발에 따른 비용절감효과도 정화기술 5%, 피복기술 20%를 감안하여 10000원/ $m^3$ 을 가정함.
  - 둘째, 사업성공확률을 한국과학기술평가연구원(KISTEP) 지침에 따라 한국산업기술진흥원과 한국산업기술평가원에서 집계한 2005년-2012년의 R&D 수행 과제 중 사업화에 성공한 사업의 비율 48.74%를 감안하여 50%의 사업성공비율을 적용할 경우의 Medium scenario임.

- 이 경우에는, 사업영역의 확대가 제한적인 경우로 현재 조사된 해역 800만 $m^3$ 를 감안하여 500만 $m^3$ 에 대해 사업 시행이 가능하다고 가정하고 분석함.
- 또한 연구개발이 정화사업 해역확대에 따른 경제적 편익을 창출하는데 기여하는 정도는 50%를 가정하고, 기술개발에 따른 비용절감효과는 정화기술 5%, 피복기술 20%를 감안하여 10,000원/ $m^3$ 을 가정함.
  - 셋째, R&D 기여도가 미미한 경우에는 사업성공확률은 30%를 감안하고 R&D 기여도도 30%이하를 가정하는 경우의 Worst scenario임.

[표 IV-가-42] 시나리오별 해양오염퇴적물 정화사업 비용-편익

시나리오	확대해역	연구개발비	투입사업비	비용절감효과	산업연관효과	순효과	B/C비율
Best	5000 $m^3$	1000억	4조	5000억	11조560억	7조4560억	2.82
Medium	800 $m^3$	1000억	6400억	800억	8864억	2264억	1.30
Worst	100 $m^3$	1000억	800억	0	1108억	-384억	0.61

주: 연구개발비는 사업성공확률 및 R&D 기여도와 무관하게 투입되는 투자개념으로 간주함.

Best scenario (사업성공 확률=100%, R&D 기여도=100%)

Medium scenario (사업성공 확률=50%, R&D 기여도=100%)

Worst scenario (사업성공 확률=30%, R&D 기여도=30%이하)

- 비용절감효과가 미미하고 현재 사업을 추가로 시행하는 데 이 연구가 기여하는 바가 제한적인 경우임. 여타 기술과 조합하여 사용해야만 사업영역의 확대가 가능하므로 이 연구에 의한 해역확대가 매우 제한적인 경우로 현재 조사된 해역 800만 $m^3$  중 100만 $m^3$ 만이 사업 시행이 가능하다고 가정하고 분석함.
  - 시나리오별 비용과 편익의 연간 흐름이 표 IV-가-42에 제시되어 있는데, 해양오염퇴적물 정화사업을 10년간 시행하는 경우의 B/C 비율은 가장 낙관적인 경우 2.82로 나타났으나, 사업 성공확률 50%를 적용할 경우 B/C 비율은 1.30수준으로 낮아지며, 여기에 R&D 기여도를 28.1% 적용할 경우에는 B/C 비율이 0.61수준으로 낮아짐

#### 나. 오염 정화를 위한 생물소재 개발 및 평가

(1) 미생물 담체를 이용한 중금속 안정화에 있어서 실제 현장에서 적용 가능한 최적화 기술확립

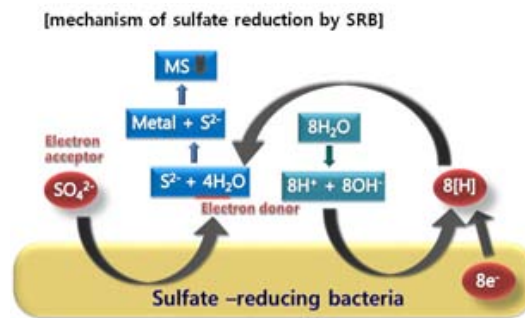
(가) 담체 표면에서의 미생물 고정화 효율 최적화 기술 확립

##### ① 국내 해역별 오염특성을 고려한 중금속 안정화 성능을 가진 생물소재 도출

- 중금속에 대한 생물학적 처리 중 하나는 미생물에 의해 흡착되는 성질을 이용하여 금속이나 금속화합물이 변형되거나 고형화 또는 무독화되는 것임. 생물흡착 과정은 음이온으로 하전된 미생물의 표면 특성을 이용하여 미생물을 흡착공정의 흡착체로 사용 가능한 방법으로서 다당류, 단백질 및 지방질로 구성된 미생물 세포벽의 음전하 작용기(카르복실기, 인산기, 수산기 등)가 용해상태에서 양전하를 띠는 중금속을 흡착할 수 있음.
- Cd, Cu, Zn, Ni 은 용해상태에서 양이온인 중금속으로 미생물의 생체 흡착 및 생체 축적에 의한 안정화가 가능함.
- As, Cr 등의 몇 가지 금속은 용해된 상태에서 산소와 결합한 음이온을 형성하여 최종적

으로 음전하를 띠거나 전하를 띠지 않으므로 정전기적 결합을 통한 제거하기 어려우며, 물리적 방법으로도 제거효율이 매우 낮은 금속임. 따라서 SRB와 같은 미생물을 이용한 생물학적 산화-환원 반응 기반의 처리가 필요함.

- Kousuke Ishii의 연구에서 보면 SRB는 산소가 거의 없는 환경인 토양의 퇴적층이나 수중에 흔히 존재하는 자생미생물임을 알 수 있음. 해양 퇴적물 내에 존재하는 미생물 중 약 10%를 차지하는 것으로 알려져 있음. 따라서 해양 환경에 적용하기에 매우 적당한 미생물임.
- 또한 SRB로 인해 발생하는 소량의 Hydrogen sulfide는 해양환경 내 존재하는 ferrous ion과 같은 metal ion과 쉽게 결합할 수 있으므로 SRB의 대사로 인해 생성되는 Hydrogen sulfide가 생태계에 미치는 영향은 미미함.

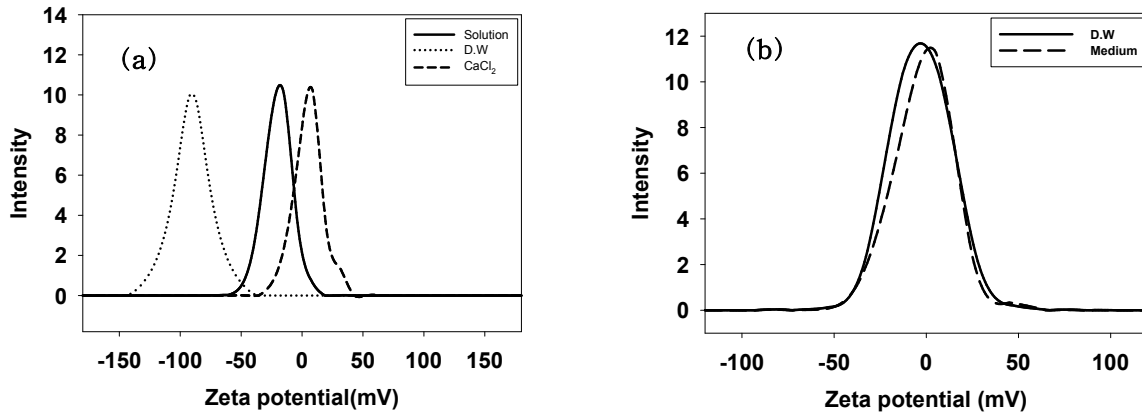


[그림 IV-나-1] SRB의 sulfate 환원 메커니즘

## ② 담체 표면에 미생물을 고정하기 위한 최적의 조건 확립

- SRB인 *D. desulfuricans*를 이용하여 여러 가지 후보 담체군들 중 제올라이트와 순환골재를 최종담체로 선정하여 미생물 고정화 실험을 진행하였음.
- 제올라이트의 경우 담체관련 연구 중 가장 많은 연구가 이루어지고 있는 물질로 제올라이트 표면의 양이온 교환 능력이 뛰어나며 이로 인한 정전기적 인력 또한 높아 미생물의 고정화 능력이 뛰어나다고 알려져 있음.
- 순환골재의 경우 건축 폐기물로서 획득이 용이하고 비용이 적게 들며 폐기물을 다시 재사용한다는 관점에서 친환경적임. 특히 다양한 중금속들에 대한 제거율이 좋게 나타남.
- 3차년도에는 해양 생태계에 영향을 최소화하기 위해 미생물과 담체간의 물리적 작용만으로 고정화하였음.
- 4차년도에는 담체 자체의 특성을 이용하여 미생물을 고정화하는 것보다 표면 처리를 통해 담체의 물리적 변수를 조정해 줌으로써 미생물 고정화 효율을 상승시킴과 동시에 중금속 안정화 효율을 극대화시켰음.
- 본 연구에서 사용한 담체의 사이즈는  $180\mu\text{m}$ - $500\mu\text{m}$ 의 사이즈를 이용하였으며 가는 모래축에 속하는 사이즈임.
- 담체의 경우는 분쇄 후 실험용 망체를 이용하여 사이즈를 분별하고 Deionized water로 3회 이상 세척한 후 멸균하여 사용함.
- 배양한 미생물과 멸균된 담체를 혼합하여 7일간 반응 시켜 담체에 미생물이 고정화 될 수 있도록 함.
- 제올라이트 표면은 강한 음전하를 띠고 있으며 미생물 또한 음전하를 띠고 있기 때문에 미생물이 부착하기 어려운 조건임.
- 미생물 배양 배지 내에  $CaCl_2$ ,  $MgSO_4$ 등이 포함되어 있어 제올라이트 표면을 약 음전하

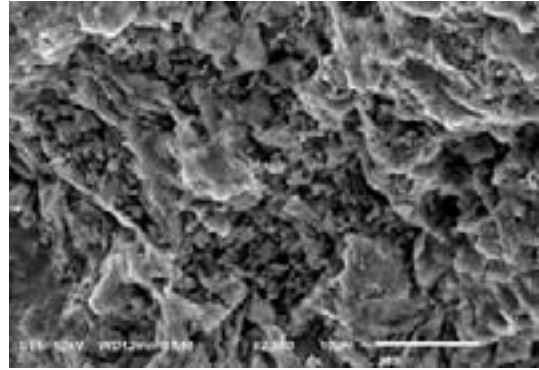
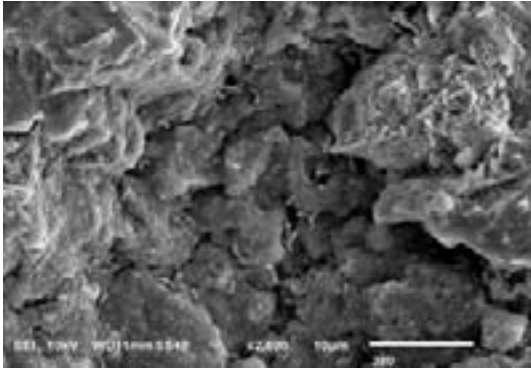
를 띠도록 전환 가능함. 해양 생태계에 영향을 최소화하기 위해 미생물 배양 배지에 포함 되는 시료들 중  $\text{CaCl}_2$ 를 이용하여 제올라이트 표면을 개질하였음.



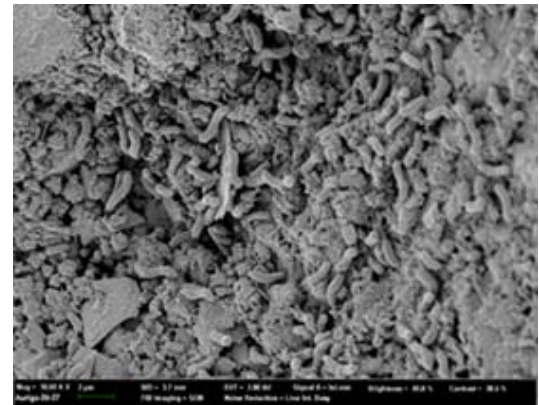
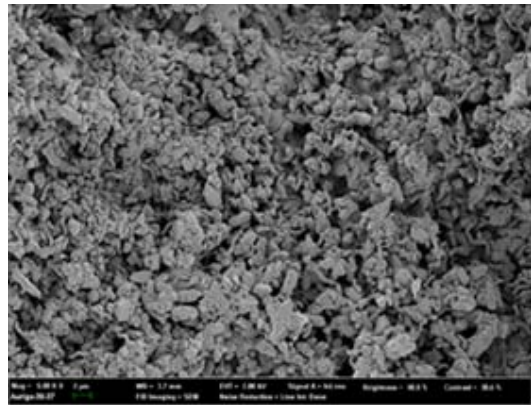
[그림 IV-나-2] 제올라이트(a) 및 순환골재(b) 표면 전하 측정

- Zeta potential을 이용하여 제올라이트 표면 전하를 측정해 본 결과 순수 제올라이트는 -90mV, 배지상의 제올라이트는 -10mV,  $\text{CaCl}_2$ 로 표면 개질한 제올라이트는 1mV로 표면 전하가 바뀐 것을 확인 가능함.
- 순환골재의 경우는 제올라이트와 달리 담체 자체가 약 음전하를 띠기 때문에 표면개질을 하지 않아도 미생물이 다량 부착 가능한 조건임.
- 순수 제올라이트에 비하여 표면 개질한 제올라이트의 표면은 약 음전하를 띠고 있어 음전하를 띠는 미생물이 정전기적 상호작용에 의해 부착하기 쉬움. 이에 따라 표면 개질한 제올라이트에 미생물이 더 많이 부착한 것을 확인할 수 있음.
- 순환골재는 약 음전하를 띠고 있어 표면개질을 하지 않은 순수한 상태에서도 미생물이 다량 부착한 것을 SEM을 통해 확인할 수 있음.
- 또한 순환골재의 경우 표면적이 넓고 기공이 많아 미생물이 많이 부착할 수 있는 조건임.
- SEM 이미지를 통하여 미생물이 담체에 고정화 되는 것을 확인하고 이를 이용하여 중금속 제거에 대한 평가를 실시함.

<제올라이트>



<순환골재>



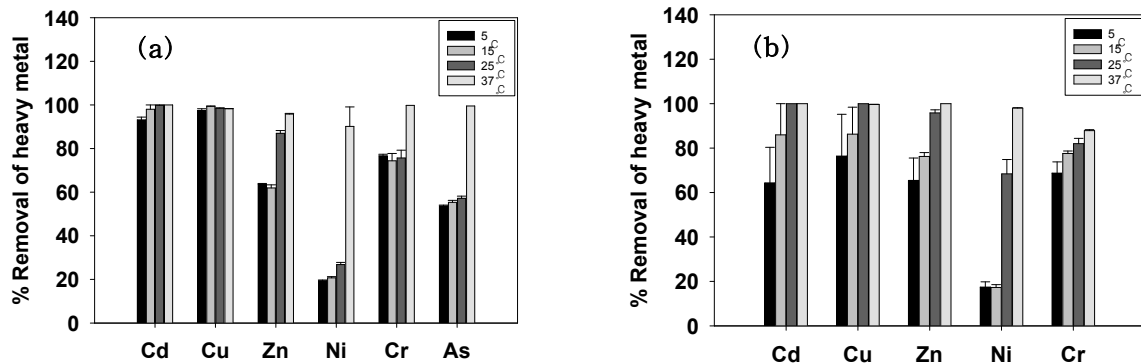
[그림 IV-나-3] 제올라이트 및 순환골재를 이용한 미생물 담체의 SEM 이미지

(나) 현장 환경을 고려한 lab scale에서 미생물 담체를 이용한 중금속 안정화 및 효능 지속성 평가

① 미생물 담체를 이용한 중금속 안정화 기술 확립

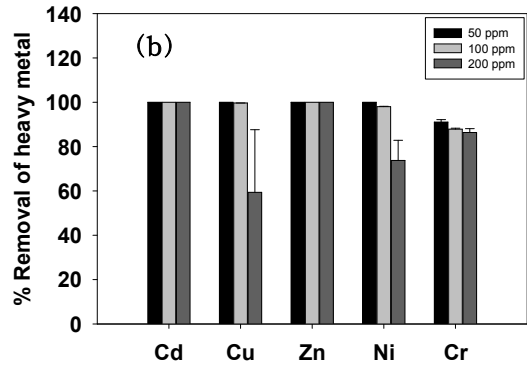
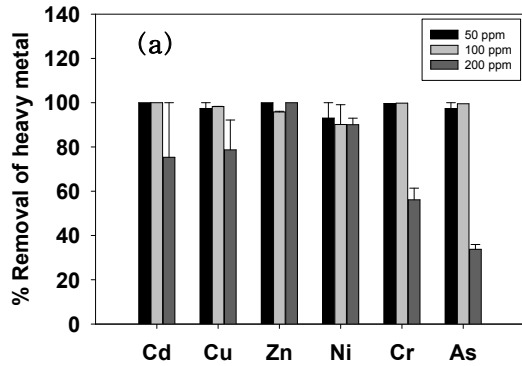
- 연구를 통해 도출된 최적의 조건에서 제작된 미생물 담체를 이용하여 중금속이 존재하는 해양 환경과 비슷한 조건에서 실험을 통해 중금속 안정화 기술 확립.
- 실제 해양의 여름철 최고 온도인 약 25°C와 겨울철 최저온도인 약 5°C에서 미생물 담체의 중금속 제거율을 비교함으로써 현장 적용 가능성을 검토하였음.
- 온도에 따른 제올라이트의 중금속 제거율은 Cd의 경우 5°C에서는 93%, 15°C에서는 98%, 25°C와 37°C에서는 100%로 나타났으며, Cu의 경우는 온도별 중금속 제거율 모두 약 98%로 나타남. Zn의 경우 5, 15°C에서는 62% 정도로 나타났으며 25°C에서는 87%, 37°C에서는 95% 였으며, Ni의 경우 5°C에서는 19%, 15°C에서는 20%, 25°C에서는 27%, 37°C에서는 90%로 나타남. 또한 Cr의 경우 5, 15, 25°C에서는 약 75%, 37°C에서는 약 100%로 나타났으며, As의 경우 5°C에서는 53%, 15°C에서는 55%, 25°C에서는 57%에서 서서히 제거율이 상승하다가 37°C에서 100%에 가까운 제거율을 보임. 대부분의 경우 온도가 올라갈수록 중금속 제거율이 상승하는 것으로 나타남.
- 온도에 따른 순환골재의 중금속 제거율은 Cd의 경우 5°C에서는 64%, 15°C에서는 86%, 25°C와 37°C에서는 100%로 나타났으며, Cu의 경우 또한 5°C에서는 76%, 15°C에서는 86%, 25와 37°C에서는 100%로 나타남. Zn의 경우 5°C에서는 65%, 15°C에서는 76%, 25°C는 95%, 37°C는 100% 정도로 나타났으며, Ni의 경우 5, 15°C에서는 17%, 25°C에서는 68%, 37°C에서는 98%로 나타남. 또한 Cr의 경우 5°C에서는 68%, 15°C에서는 77%, 25°C에서는 82%, 37°C에서 88%의 제거율을 보임.

- SRB의 최적 활성 온도가 37°C이기 때문에 이때 미생물 담체의 중금속 제거율이 최대로 나타났으며, 수온이 낮을 때 보다는 37°C에 가까울수록 중금속 제거율이 상승하는 것으로 나타남.



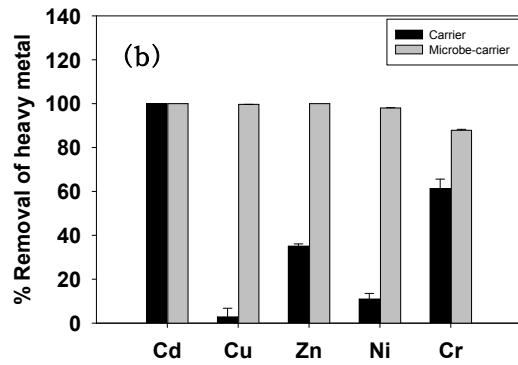
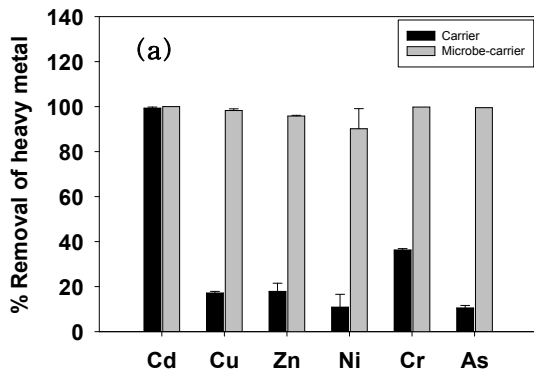
[그림 IV-나-4] 제올라이트(a) 및 순환골재(b)를 이용한 미생물 담체의 온도에 따른 중금속 제거율

- 해양 퇴적물 내의 중금속 농도가 다르기 때문에 중금속을 50, 100, 200 ppm으로 조절하며 퇴적물 내 중금속 농도에 따른 미생물 담체의 효율을 평가하였음.
- 제올라이트의 경우 미생물 담체의 중금속 농도에 따른 제거율은 Cd은 50, 100 ppm에서 100% 200 ppm에서 75%로 떨어졌으며 Cu의 경우도 이와 마찬가지로 50, 100 ppm에서는 약 89%의 제거율을 보였으나 200 ppm에서 78%로 떨어짐. Zn의 경우는 모든 농도에서 약 100%의 제거율로 미생물 담체가 200 ppm 이상에서도 제거율이 높을 것으로 사려되며, Ni도 모든 농도에서 90% 정도의 제거율을 보임. Cr은 50, 100 ppm에서 100%, 200 ppm에서 56%로 제거율이 절반가까이 줄었으며, As 또한 50, 100 ppm에서는 약 99%의 제거율을 보이나 200 ppm에서 33%로 급격히 감소함.
- 순환골재의 경우 미생물 담체의 중금속 농도에 따른 제거율은 Cd은 50, 100, 200 ppm에서 100%의 제거율을 보였으며, Cu의 경우 50, 100 ppm에서는 약 100%의 제거율을 보였으나 200 ppm에서 59%로 떨어짐. Zn의 경우는 모든 농도에서 약 100%의 제거율을 보이며, Ni의 경우 50, 100 ppm에서는 98% 이상의 제거율을 보이나 200 ppm에서 73%로 떨어짐. Cr은 50 ppm에서 91%, 100 ppm에서 87%, 200 ppm에서 86%로 나타남. Cd과 Zn은 미생물 담체가 200 ppm 이상에서도 제거율이 높을 것으로 사려되며, Cu, Ni, Cr의 경우 중금속의 농도가 높아질수록 제거율이 서서히 감소하는 것으로 나타남.



[그림 IV-나-5] 제올라이트(a) 및 순환골재(b)를 이용한 미생물 담체의 중금속 농도에 따른 제거율

- 제올라이트는 Cd의 경우 담체와 미생물 담체에서 모두 제거율이 100%로 나타남. Cu의 경우 담체만 이용했을 경우 17% 제거가 되는 반면 미생물 담체를 이용했을 경우 98%의 제거율을 보임. Zn의 경우 담체에서는 17%의 제거율을, 미생물 담체에서는 52%의 제거율을 보임. Ni의 경우 담체만 이용했을 경우 10%의 제거율을 보이며, 미생물 담체를 이용했을 때에는 86%의 제거율을 보임. Cr의 경우 담체에서는 36%, 미생물 담체에서는 100%의 제거율을 보였고, As의 경우 담체에서는 10%의 제거율을, 미생물 담체에서는 100%의 제거율을 보임. 따라서 Cd를 제외한 모든 중금속은 미생물 담체의 제거율이 훨씬 더 좋은 것으로 나타남.

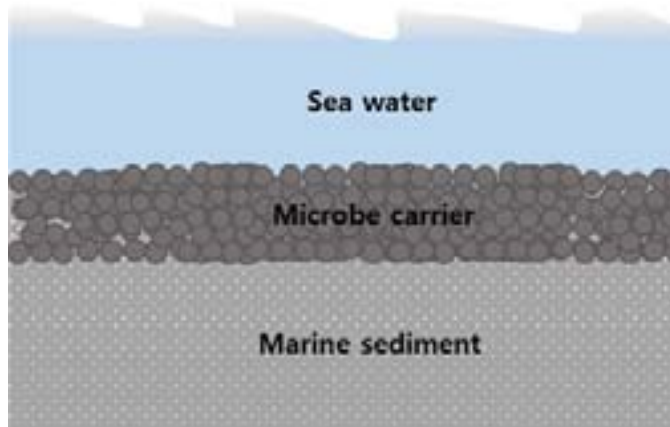


[그림 IV-나-6] 제올라이트(a) 및 순환골재(b)를 이용한 담체와 미생물 담체의 중금속 제거율 비교

- 순환골재의 경우 Cd은 담체와 미생물 담체 모두에서 제거율이 100%로 나타남. Cu의 경우 담체만 이용했을 때 제거율은 2%로 거의 제거가 되지 않은 반면 미생물 담체를 이용했을 때에는 99%이상 제거됨. Zn의 경우 담체에서는 35%, 미생물 담체에서는 100%가 제거되었으며, Ni의 경우 담체에서는 10%, 미생물 담체에서는 98%의 제거율을 보임. Cr의 경우 담체에서는 61%의 제거율을, 미생물 담체에서는 87%의 제거율을 보임. 순환골재의 경우 Cd를 제외한 모든 중금속에서 제거율이 상승했으며 Cu와 Ni의 제거율은 매우 큰 폭으로 상승한 것을 볼 수 있음

## ② 미생물 담체의 현장 적용성 평가

- SRB가 고정화된 미생물 담체의 현장 적용성을 평가하기 위한 첫 번째 단계로 미생물 담체의 피복소재로서 성능을 평가하였음.



[그림 IV-나-7] 미생물 담체를 이용한 해양 퇴적물 피복 정화 모식도

- 오염된 해양 퇴적물과 제올라이트에 고정화된 미생물 담체의 적층 비율은 5:1로 하였음. 이 sample을 토대로 시간이 지남에 따라 연속추출을 통해 중금속의 정상변화를 관찰하였음.



[그림 IV-나-8] 미생물 담체를 이용한 생물학적 피복 정화 실험

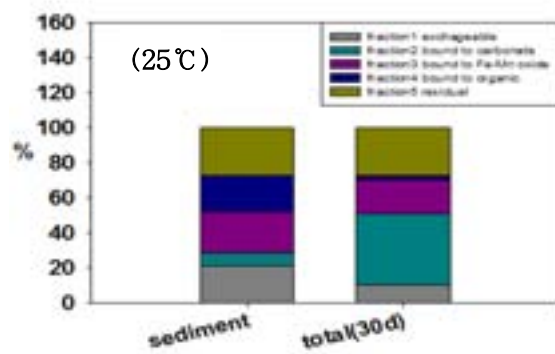
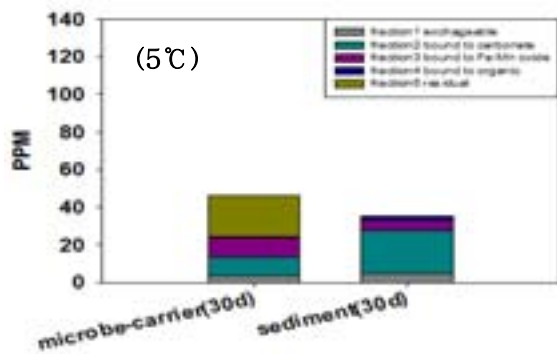
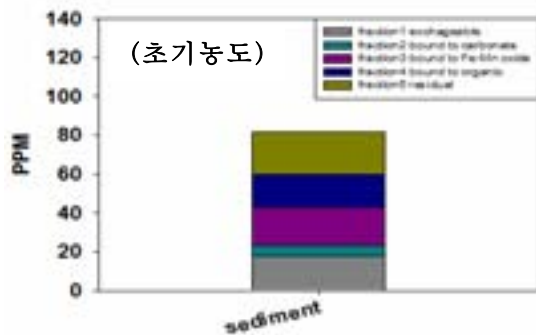
- 연속추출은 5단계로 나누어지며, 중금속의 결합 형태에 따라 각 단계마다 추출용매의 pKa값을 낮춰가며 중금속을 구분함. 각 단계별 성상은 다음과 같음.
  - Fraction 1 (exchangeable)은 퇴적물에 단순 흡착 상태로 수용액상에서 이온형태로 쉽게 용출될 수 있는 상태임.
  - Fraction 2 (bound to carbonate)는  $\text{CO}_3^{2-}$ 와 결합하고 있는 상태임.
  - Fraction 3 (bound to Fe-Mn oxide)는 철, 망간 산화물 입자 표면에 코팅형태로 결합하고 있는 상태임.
  - Fraction 4 (bound to organic)는 수용액상 유기물과 결합하고 있는 상태로 생물 농축 현상이 대표적임.
  - Fraction 5 (residual)는 잔류형태로서 실리콘 격자구조에 갇힌 상태임.

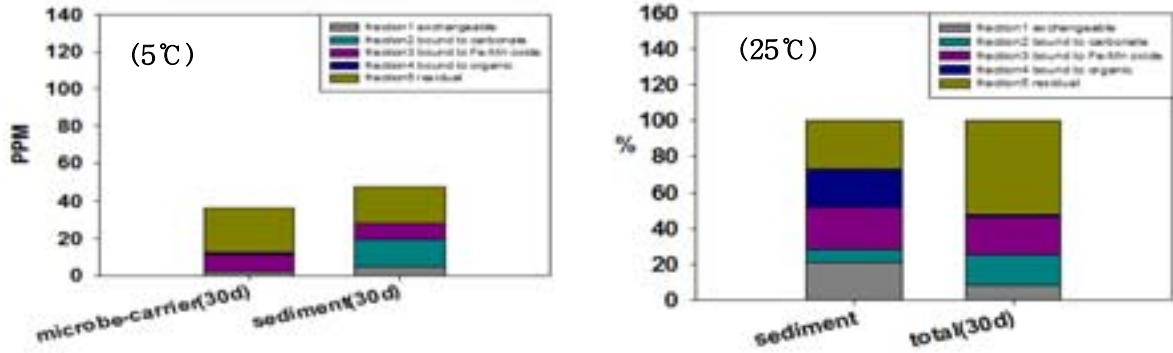


- 퇴적물 상에 중금속의 안정도는 fraction 1이 가장 불안정하며 5단계로 갈수록 안정성이 높아짐. 특히 퇴적물 상의 중금속 fraction 1 상태는 해수로 쉽게 용출될 수 있으며, 그 외의 중금속들은 비교적 안정화되어 해수상으로 쉽게 용출되지 않음.
- 실험상에서의 온도는 5도와 25도에서 각각 수행하였으며, 회복 후 한달이 지난 후에 퇴적물, 미생물 담체, 해수의 중금속의 농도 및 성상을 분석하였음.
- 실험에 적용된 오염된 퇴적물에서 구리, 아연, 니켈, 크롬이 검출되었기에 아래의 실험적 고찰은 네가지 금속에 대해서 수행하였음.

## ■ 구리

- 5도에서 구리 농도는 가장 불안정한 1단계가 21.5%에서 10.3%로 감소하였으며, 탄산염 형태인 2단계는 7.0%에서 40.7%로 증가하여 안정화되었음. 탄산구리는 불용성 물질이기 때문에 전반적으로 퇴적물 내의 중금속은 미생물 담체에 의해서 안정화되었다고 판단될 수 있음.
- 25도에서 구리 농도는 30일 후 해수로 쉽게 용출될 수 있는 1단계가 21.5%에서 8.4%로 13.1% 감소하였으며, 가장 안정한 5단계의 경우 27.1%에서 52.1%로 25% 증가하였음.
- 온도에 따른 영향을 보면 25℃는 5℃에 비해 SRB가 대사 작용을 하기 비교적 적합한 환경이기 때문에 25℃에서 구리가 더욱 안정적인 형태로 전환되었음.

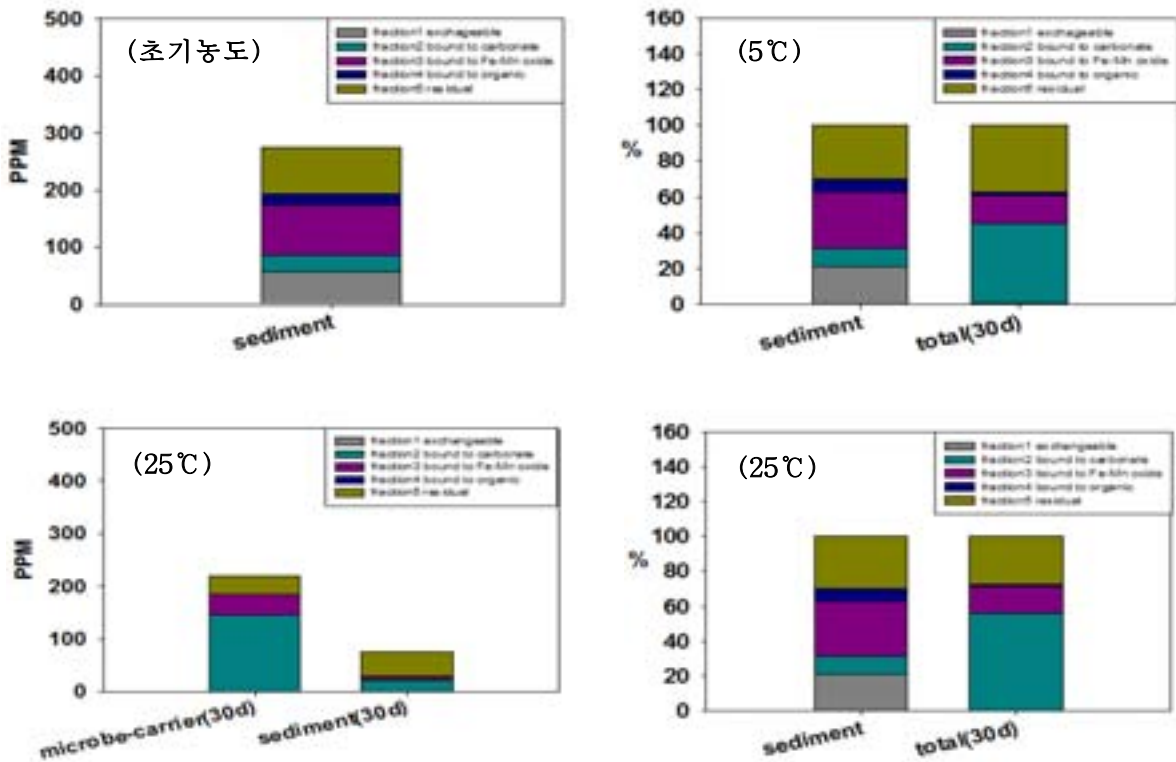




[그림 IV-나-9] 5°C 및 25°C에서 각 단계별 구리(Cu) 농도

■ 아연

- 5도에서 아연농도는 불안정한 1단계는 21.1%에서 0.9%로 20%이상 감소하였으며, 비교적 안정적인 탄산염 형태의 2단계는 10.5%에서 44.5%로 증가하였음. 또한 가장 안정한 형태인 5단계는 30.0%에서 36.9%로 증가하였음.
- 25도에서 아연농도는 불안정한 1단계는 21.1%에서 0.9%로 20%이상 감소하였으며, 비교적 안정적인 탄산염 형태의 2단계는 10.5%에서 44.5%로 증가하였음. 또한 가장 안정한 형태인 5단계는 30.0%에서 36.9%로 증가하였음.

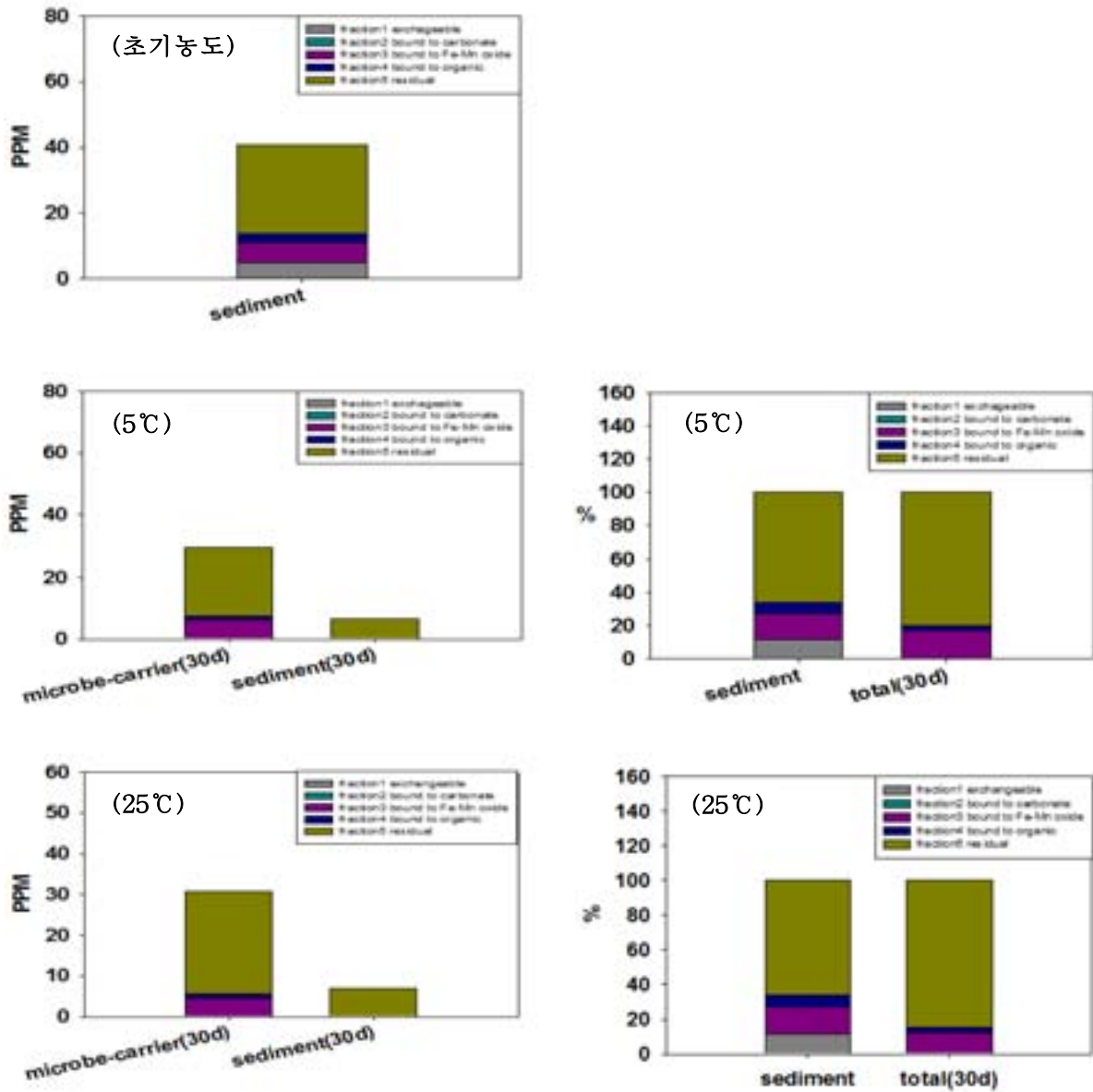


[그림 IV-나-10] 5°C 및 25°C에서 각 단계별 아연(Zn)의 농도

■ 니켈

- 5도에서 니켈농도는 1단계는 11.6%에서 30일 후 0%로 완전히 제거되었으며, 더 안정한 상태인 5단계는 66.1%에서 79.6%로 13.5% 증가하였음.

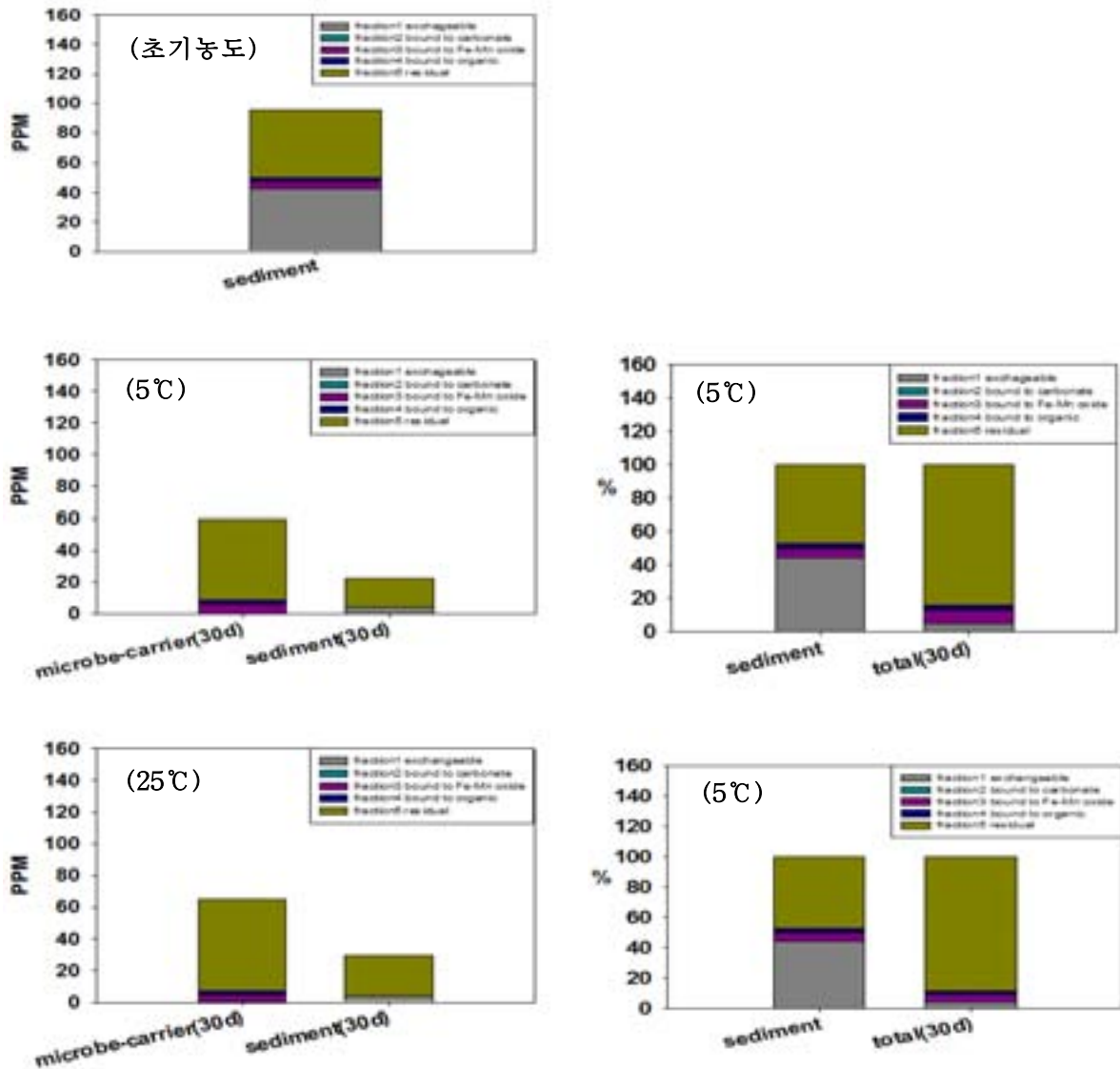
- 25도에서 니켈농도는 해수상으로 용출되기 쉬운 1단계 형태의 중금속이 30일 후에 완전히 제거되었으며 가장 안정한 형태인 5단계가 미생물 담체에 의해서 대폭 증가됨을 알 수 있음.



[그림 IV-나-11] 5°C 및 25°C에서 각 단계별 니켈(Ni)의 농도

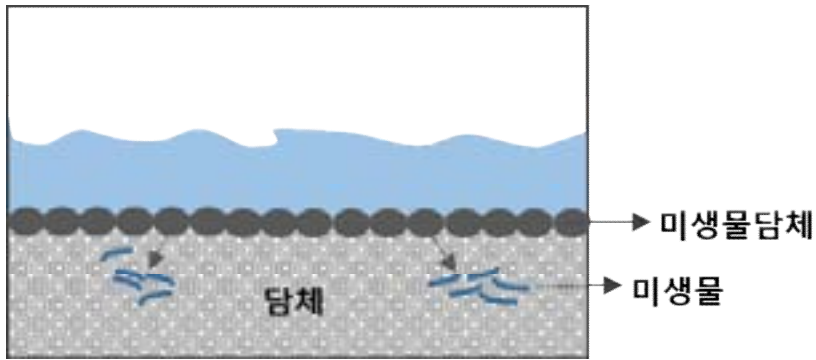
■ 크롬

- 5도에서 크롬농도는 퇴적물 내에 존재하는 불안정한 1단계는 44.6%에서 5.1%로 크게 감소하였고 가장 안정한 형태인 5단계는 47.4%에서 84.2%로 상당히 증가한 것을 확인할 수 있음.
- 25도에서 크롬농도는 불안정한 1단계가 44.6%에서 4.6%로 40%가량 감소하였고, 안정한 형태인 5단계는 47.4%에서 88.1%로 40.7% 가량 증가한 것을 확인할 수 있음.
- 5°C와 25°C에서 진행한 실험 모두 인공바닷물로 유출된 중금속은 검출 되지 않았음. 이에 따라 피복 정화 공법이 해양 퇴적층으로부터 해수로 용출되는 중금속을 효과적으로 처리할 수 있을 것이라 판단됨.



[그림 IV-나-12] 5°C 및 25°C에서 각 단계별 크롬(Cr)의 농도

- 위의 결과를 통해 본 연구가 오염된 해양 퇴적물 내의 중금속을 효과적으로 안정화할 수 있다는 것을 확인할 수 있었음. 그러나 미생물 담체는 대량으로 제작하기 어렵다는 단점을 가지고 있기에 미생물 담체를 현장에 적용하기 위해서 극소량의 미생물 담체를 이용한 on-site 피복소재의 미생물 담체화에 대한 심층적인 고찰이 필요하다고 판단됨.
- 세가지 형태의 소량의 미생물 담체를 이용한 피복방식을 활용하여 담체 내의 미생물이 피복소재로 아래의 그림 IV-나-13과 같이 확산시킴으로 피복소재를 미생물 담체화시키는 방식을 시도하였음.

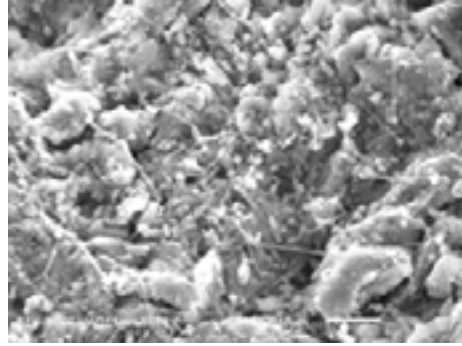
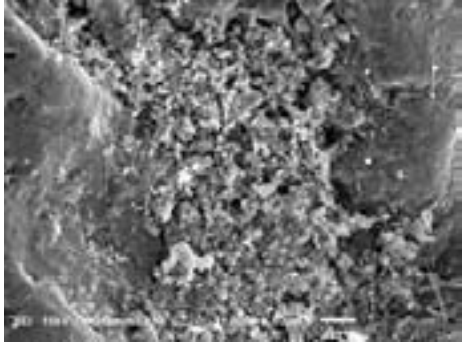


[그림 IV-나-13] 시간에 따른 미생물 spreading 모식도

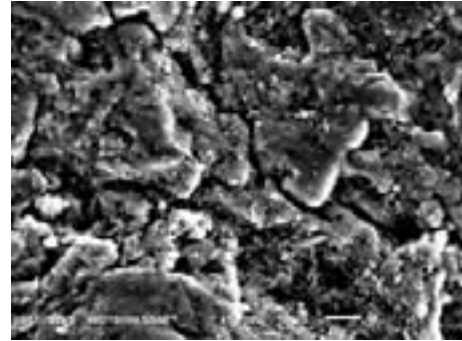
	0일	4일	7일
위			
아래			
부분적			

[그림 IV-나-14] 시간에 따른 미생물 확산 효과에 의한 피복소재의 미생물 담체화

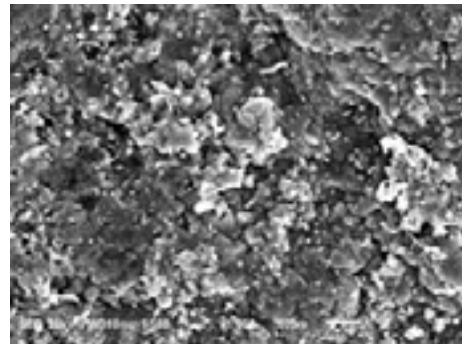
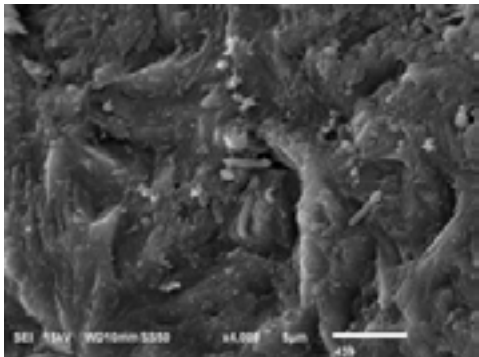
<피복재 위쪽에 도포>



<피복재 아래쪽에 도포>



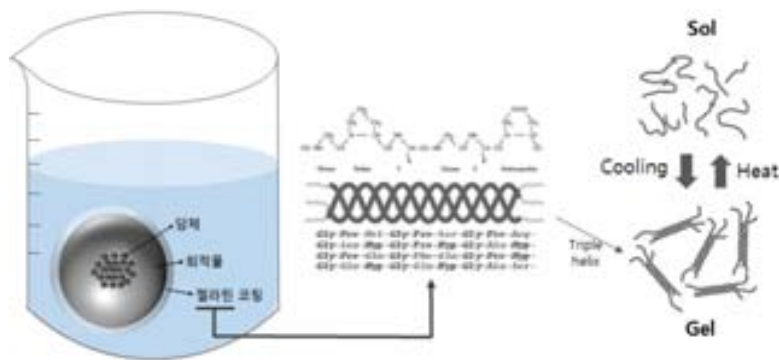
<피복재에 부분적으로 도포>



[그림 IV-나-15] 미생물 담체를 피복재에 도포하여 7일 경과 후 SEM 이미지

- 미생물 담체를 담체의 위, 아래, 부분적으로 도포한 후 시간에 따른 미생물 담체 내의 미생물 확산을 확인하였음. SRB는 Fe와 결합하여 FeS를 형성하기 때문에 검정색을 띠며, 미생물 담체를 형성 했을 때 담체 자체도 검정색으로 변하는 것을 확인할 수 있음. 시간이 지남에 따라 미생물 담체를 도포한 부분 이외의 순수 담체의 색이 검정색으로 변해가는 것을 확인할 수 있음.
- 미생물 담체를 도포한 곳 이외의 부분에서 샘플을 채취하여 SEM 측정 결과 미생물이 다량 부착된 것을 확인할 수 있음.
- 실제 해양 환경 적용 시, 미생물 담체가 해양 내에 소량만 존재해도 주변의 담체로 미생물이 spreading되어 미생물 담체를 형성 가능하므로 소량의 미생물 담체를 이용하여 현장에서 피복소재를 미생물 담체화가 가능하다고 사료됨.
- 실제 현장에 미생물 담체의 피복공정을 실시할 시, 혐기성 미생물의 산소와의 접촉을 최소화 하고 원하는 위치에 미생물 담체를 효율적으로 피복하기 위한 방법을 모색함. 이에 따라 미생물 담체를 ball 형태로 만듦.

- 젤라틴은 글리신과 프롤린 등으로 이루어진 아미노산 복합체로 삼중나선으로 이루어짐. 35°C 이상의 온도에서 sol 형태이며 냉각하면 gel 형태로 일정한 모양을 유지 가능함.
- 젤라틴에 존재하는 칼슘, 구리, 철과 같은 금속 양이온들이 gel 형태로 변할 때 카르복실기와 결합함. 시간이 지나면 금속양이온이 용액으로 용출되고 물 분자들이 카르복실기나 암모늄 이온과 수소결합을 형성하여 팽윤됨. 20°C 정도에서 완전한 팽윤 상태이며 30°C 이상에서 결국 용해됨.
- 미생물의 최대 활성온도는 37°C이며, 여름철 최대 해수온이 약 25°C인 점을 감안하여, 35°C 이상에서 녹고 25°C 상온에서 젤리형태인 젤라틴을 이용하여 ball을 제작함.



[그림 IV-나-16] 미생물 담체를 이용한 ball 제작

	0h	24h	48h	60h
5°C				
25°C				

[그림 IV-나-17] 시간에 따른 미생물 담체 ball의 변화

- 실제 해양 퇴적물을 이용하여 ball을 제작하였으며 내부에 담체를 넣고 외부로 퇴적물에 젤라틴을 혼합하여 반죽을 씌움. 해양 퇴적층에 도달할 때까지 형태를 유지하도록 외부로 젤라틴 코팅함.
- 시간에 따라 미생물 담체 ball의 형태를 관찰한 결과 5°C에서는 형태가 무너지지 않고 일주일 이상 지속되었으며, 25°C에서는 48시간 까지는 형태의 변화가 없었으나 60시간 경과 후 서서히 무너져 내리는 것을 확인할 수 있음.

- 실제 해양 적용시 미생물 담체가 주변으로부터 받는 영향을 최소화하여 퇴적층까지 도달할 수 있을 것이며 시간이 지난후 ball이 서서히 풀어져 미생물 담체가 해양 퇴적층 상단부에 정착할 수 있을 것이라 예상된다.
- 담체의 중금속 제거율과 미생물 담체의 중금속 제거율을 비교하여 보면 제올라이트와 순환골재 모두 미생물 담체 제작 소재로 활용하여 중금속 안정화에 활용할 시 중금속 제거율이 매우 우수한 것으로 나타났으며 미생물이나 제올라이트, 순환골재만을 이용하는 것보다 미생물이 고정화된 미생물담체를 이용하는 것이 더 효율적인 것을 확인하였음.
- 미생물 spreading과 ball 제작 실험을 통해 현장 적용 가능성을 향상시킴으로써 실제 해양환경의 오염퇴적물을 정화하는데 미생물 담체를 이용하는 것이 충분히 좋은 효과를 얻을 수 있을 것이라 사료됨.

## (2) Pilot 시스템을 이용한 생물활성촉진제의 현장 적용성 평가

### (가) 생물활성촉진제의 효능극대화를 위한 최적운영조건 연구

#### ① 실험방법 및 분석

##### ㉞ 연안퇴적물 시료채취 및 물리화학적 특성

- 오염된 연안 퇴적물 시료는 부산북항 인근 해역에서 채니기를 이용하여 채취하였으며, 채취한 북항 퇴적물의 함수율, 입도조성, COD, VS, pH, 중금속 등 물리화학적 특성을 조사하였음.
- 부산북항 퇴적물 시료는 실트 및 점토질의 함량이 82.6~85.7%인 미세입자들로 이루어진 것으로 평가되었으며, COD 및 VS 함량은 각각 18.82~28.4g/kg, 110.60g/kg이었음. 또한, pH는 7.56~8.02로서 약알카리였으며, 중금속 함량은 미국해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)의 오염기준치 이상으로 평가되었음.
- 생물활성촉진제 제작에 사용된 오염되지 않은 퇴적물시료는 개발준설에 해당하는 부산신항의 준설 퇴적물 적치장에서 채취하였으며, 물리화학적 특성을 분석하였음.
- 부산북항 및 부산신항 퇴적물에 함유된 중금속의 존재형태를 확인하기 위하여 연속추출법으로 전처리한 뒤 중금속 함량을 분석하였음.
- 부산신항 퇴적물시료의 중금속 함량(Cu, Cr, Zn, Pb, Cd, Fe)은 미국해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)의 오염기준치 이하로 평가되었음.
- 연안퇴적물시료의 입도분포는 sieving technique으로 조사하였으며, COD, TN, TP와 pH는 해양오염공정시험법과 Standard methods (APHA, 1998)에 따라 분석하였음.
- 중금속 함량과 분포형태는 연속추출법으로 전처리한 뒤 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy)를 이용하여 분석하였음(Song et. al.,2009).
- 해수의 DO, pH 및 수온은 현장에서 측정하였음.
- 모든 분석항목은 3회 반복실험하여 평균값을 이용하였음



[표 IV-나-1] 부산북항 및 부산신항 연안퇴적물의 물리화학적 특성

Parameters	Busan Newport	Busan Northport
Sand (%)	12.1	17.4
Silt & clay(%)	87.9	82.6
pH (at 25°C)	8.26	8.47
CODMn(g/kg)	12.2	25.37
TN (g/kg)	2.3	12.6
TP (g/kg)	0.86	1.08
Water content (%)	47	48
Heavy metals (mg/kg)		
Cd	ND	0.94
Cu	7.029	37.3
Cr	2.37	35.7
Pb	10.51	42.4
Zn	61.83	203.7
Fe	20882	25763
Microbial population		
Colony forming Units (CFU)/ g	22 X 10 <sup>3</sup>	3.5 X 10 <sup>5</sup>

㉠ 생물활성촉진제 제조

- 부산신항 퇴적물을 자생미생물의 활성을 향상시키기 위한 생물활성촉진제 재료로 이용하였음.
- 생물활성촉진제는 부산신항 퇴적물 1kg에 황산염, 질산염 및 초산염을 각각 48g, 62g 및 29g을 첨가하여 완전 혼합한 후 실온에서 약 48시간 동안 부분 건조시켰음.
- 반 건조 된 생물활성촉진물질에 함유한 퇴적물을 수작업으로 볼의 형태로 만들었으며, 60°C에서 48hr 동안 건조시킨 후 고분자물질인 폴리설펜으로 코팅하여 생물활성촉진제를 제조하였음.
- 생물활성촉진제의 제조에 사용된 코팅물질인 폴리설펜 용액은 폴리설펜(10%wt)에 N,N-dimethyl acetamide(90%wt)와 혼합하여 사용하였음.
- 폴리설펜 고분자 코팅은 2회 반복하였으며, 수분을 없애기 위하여 60°C에서 건조시켰음.

㉡ 반응표면 분석법(Response Surface Methodology)

- 볼 형태의 생물활성촉진제를 현장에서 활용하는데 있어 최적의 운영 조건으로 생각되는 볼 직경과 배치간격을 컬럼을 이용한 현장실험을 통하여 결정하였으며, 반응표면분석법을 이용하여 실험을 계획하였음.
- 반응표면분석법(Response Surface Methodology: 설계입력변수와 응답 출력변수 사이의 기능적 관계를 추정하는 통계 도구)을 이용한 실험계획에는 Design expert version 8.0.3.1을 이용하였음.

- 반응표면분석법에서 사용한 입력 설계변수들에 대한 방정식은 아래의 2차 다항식으로 나타내었음.

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3$$

여기서, 중심합성계획법을 사용하여 실험을 계획하였으며, Y는 예상되는 응답이며, X1, X2 와 X3 는 입력 변수이고, 입력 변수들의 낮은 레벨, 중간 레벨, 높은 레벨을 각각 -1.682, 0 그리고 1.682을 사용함(표 IV-나-2).

- 생물활성촉진제의 입경과 배치간격 및 시간을 입력변수로 하여 중심합성계획법에 의하여 설계된 실험은 총 20가지의 경우로서 표 IV-나-3과 같음.

[표 IV-나-2] 반응표면분석법을 위한 입력 설계변수와 레벨

Variables	Factors	Levels				
	X	-1.682	-1	0	+1	+1.682
Biostimulant ball size	X <sub>1</sub>	1	1.75	3	4.25	5
Biostimulant ball distance	X <sub>2</sub>	1	2.8	5.5	8.2	10
Time (month)	X <sub>3</sub>	0	1	2	3	4

[표 IV-나-3] 중심합성계획법을 이용하여 설계한 실험계획

Run order	Biostimulant ball size (X <sub>1</sub> )	Biostimulant ball distance (X <sub>2</sub> )	Time(months) (X <sub>3</sub> )
1	3	5.5	3
2	4.25	2.8	1
3	1.75	2.8	1
4	4.25	8.2	3
5	3	1	2
6	3	5.5	2
7	3	10	2
8	1.75	8.2	1
9	4.25	8.2	1
10	3	5.5	2
11	3	5.5	2
12	4.25	2.8	3
13	1	5.5	2
14	3	5.5	0

15	3	5.5	4
16	3	5.5	2
17	1.75	2.8	3
18	5	5.5	2
19	3	5.5	2
20	1.75	8.2	3

㉠ 최적운영조건연구를 위한 생물활성촉진제의 준비

- 생물활성촉진제의 최적 볼 직경과 배치간격을 실험하기 위하여 사용한 볼의 입경은 표 IV-나-2에 제시하였음.
- 중심합성계획법에 따라 설계된 결과에 따라 직경이 1, 1.75, 3, 4.25, 5cm 로 준비하였으며, 준비된 볼은 60°C에서 48 h 동안 건조 후 폴리설피온(10 wt %)과 N,N-dimethyl acetamide(90 wt %) 폴리머로 코팅하였음.
- 오염퇴적물에 주입하는 생물활성촉진제의 배치간격은 표 IV-나-2의 중심합성계획법에 따라 설계된 결과에 따라 1, 2.8, 5.5, 8.2, 10cm로 결정하였음.
- 생물활성촉진제의 영향반경을 보다 정확히 평가함으로서 생물활성촉진제의 배치간격을 보다 명확하게 평가하기 위하여 부산북항의 오염퇴적물을 생물활성촉진제(1 ~ 5cm) 외면에 설계된 배치간격과 같은 두께로 감싸는 방법으로 일종의 오염퇴적물 볼을 준비하였음.



[그림 IV-나-18] 최적운영인자 연구에 사용된 생물활성촉진제의 제작

㉠ Bench scale 칼럼 제작

- 생물활성촉진제의 입경과 배치간격에 따라 준비한 오염퇴적물볼을 40\*50\*90cm(W\*L\*H)의 플라스틱 칼럼에 충전하고 적당량의 모래로 빈 공간을 채운 뒤 모래가 유실되지 않도록 칼럼상부에 잔자갈로 덮고 부직포로 유입구를 봉함.
- 그림 IV-나-19와 같이 Bench scale의 칼럼을 준비 한 뒤 안전한 북항인근 연안에 침수시켜 고정하였음.



[그림 IV-나-19] 생물활성촉진제의 최적운영조건 연구를 위한 Bench scale 현장실험

- 실험하는 동안 반응표면분석법에 따라 계획된 시간간격별(0month, 1month, 2month, 3month, 4month)로 오염저질물 시료를 취하여 물리화학적 및 생물학적 변화를 분석 함.

#### ㉞ DNA 증폭을 위한 PCR

- PCR 반응은 Theromocycler(MJ Research, Reno, USA)를 이용하여 수행하였음. 간략히 절차를 설명하면 94℃에서 5분 동안 초기 변성시킨 후 95℃에서 30초 동안 25cycle 변성시켰음. Annealing은 60℃에서 1분 동안 수행하고, elongation을 72℃에서 1분 20초 동안 수행하였음.
- 증폭된 16S rRNA gene은 resin spin column을 이용하여 정제하였으며, 각각의 증폭된 시료 1ug을 혼든 후 pyrosequencing 하였음.
- Pyrosequencing은 4454 Genome sequencer FLX Titanium (Roche, Basel, Swiss)를 이용하여 Chunlab, Inc (seoul, Korea)에서 수행하였음.

#### ㉟ 미생물군집 pyrosequencing 분석

- 미생물군집은 16S rRNA 유전자 파이러시퀀싱 기법으로 분석하였음.
- 증폭, sequencing library 배열, sequencing과 bioinformatics 분석은 454 GS FLX Junior sequencing system (Roche, Brandford, CT, USA)를 이용하여 수행하였음.
- 미생물 군집의 통계적 분석은 Mothur Program을 사용하여  $\pm 3\%$  오차 범위에서, Cluster 분석은 CL community software (Chunlab, Inc. Seoul, Korea)을 이용하여 수행하였음.

### ② 실험결과

#### ㉞ 분산분석(ANOVA) 결과

- 표 IV-나-4은 pH, COD, TS, VS, 중금속의 실험값과 RSM을 이용한 예상 값을 보여 줌.
- RSM을 이용한 예상 값이 유효한 값인지를 평가하기 위하여 ANOVA를 이용함.

- 예상 값의 유효성을 평가하기 위하여 2차 다항식이 이용되었고, RSM을 이용한 예상 값들은 등고선과 3차면 표면도로 시각화하였음.
- 다항식모델의 정밀도는 결정계수(R2)로 표현되며, 수정결정계수(adjusted R2)와 타당성정밀도(결정계수)와 그것의 통계적 유의성은 F-value와 P-value로 검토함.
- 방정식의 적합성과 각 변수들의 유의성은 분산분석(ANOVA, P<0.05)에 의해 결정됨.

[표 IV-나-4] 설계인자들의 CCD matrix와 COD저감, VS저감 및 증균속 안정화(%)

Run order	Biostimulant ball size (X <sub>1</sub> )	Biostimulant ball distance (X <sub>2</sub> )	Month (X <sub>3</sub> )	COD reduction (%)		VS reduction (%)		Fe (%)		Cr (%)		Cd (%)		Cu (%)		Zn (%)		Pb (%)	
				Exp value (%)	Pred value (%)	Pred value (%)	Pred value (%)	Exp value (%)	Pred value (%)	Exp value (%)	Pred value (%)	Exp value (%)	Pred value (%)	Exp value (%)	Pred value (%)	Exp value (%)	Pred value (%)	Exp value (%)	Pred value (%)
1	3	5.5	3	85.87	86.40	5.17	55.17	33.89	33.79	10.06	10.03	35.94	34.31	63.29	63.28	53.98	54.06	15.65	15.62
2	4.25	2.8	1	41.26	46.19	29.31	33.15	24.35	20.82	11.15	11.19	24.66	26.28	61.63	61.30	24.96	26.69	13.60	14.60
3	1.75	2.8	1	24.48	35.05	13.45	16.33	20.18	15.85	6.16	5.43	22.94	17.68	51.87	52.29	20.35	12.00	12.94	8.87
4	4.25	8.2	3	86.08	88.63	58.10	57.10	37.43	39.34	5.87	5.77	46.89	53.09	57.49	56.75	45.41	55.67	47.67	50.91
5	3	1	2	85.03	79.20	45.43	40.43	30.40	27.69	3.67	4.06	33.23	34.14	56.06	56.33	12.85	20.03	13.13	17.50
6	3	5.5	2	85.87	86.40	55.26	55.71	33.89	33.79	10.06	10.03	35.94	34.31	63.29	63.28	53.98	54.06	15.65	15.62
7	3	10	2	86.57	73.85	53.45	41.65	11.63	17.75	5.82	6.61	47.05	44.82	58.14	58.33	43.66	33.77	38.14	34.96
8	1.75	8.2	1	20.98	30.49	18.45	25.98	25.15	16.15	7.23	7.53	27.16	27.38	63.86	62.51	22.90	21.37	18.06	13.78
9	4.25	8.2	1	21.68	33.46	14.91	19.83	25.13	18.86	14.97	13.64	28.69	27.45	53.14	54.64	22.47	31.73	20.00	27.54
10	3	5.5	2	85.87	86.40	55.26	55.71	33.89	33.79	10.06	10.03	35.94	34.31	63.29	63.28	53.98	54.06	15.65	15.62
11	3	5.5	2	85.87	86.40	55.26	55.71	33.89	33.79	10.06	10.03	35.94	34.31	63.29	63.28	53.98	54.06	15.65	15.62
12	4.25	2.8	3	86.82	90.43	60.95	65.30	44.86	51.46	5.99	4.84	49.37	50.09	63.58	64.60	45.27	48.71	31.60	35.04
13	1	5.5	2	86.71	75.43	50.52	41.14	10.81	14.60	3.00	3.09	21.87	24.43	52.71	54.19	7.69	18.74	5.04	15.69
14	3	5.5	0	5.49	5.07	32.76	15.20	8.60	21.20	15.66	16.27	12.96	16.18	60.35	60.05	33.96	34.21	8.74	8.23
15	3	5.5	4	89.65	86.65	78.79	79.55	62.23	53.04	10.06	10.63	54.96	50.41	59.65	60.41	79.41	76.46	40.15	41.86
16	3	5.5	2	85.87	86.40	55.17	55.71	33.89	33.79	10.06	10.03	35.94	34.31	63.29	63.28	53.98	54.06	15.65	15.62
17	1.75	2.8	3	87.62	88.96	58.62	55.59	29.35	33.22	6.10	6.59	30.57	32.75	52.44	50.61	45.65	38.30	33.88	25.49
18	5	5.5	2	86.43	79.16	51.55	44.13	32.60	32.22	5.66	6.76	42.96	39.07	60.35	59.33	49.96	36.20	44.74	35.29
19	3	5.5	2	85.87	86.40	55.26	55.71	33.89	33.79	10.06	10.03	35.94	34.31	63.29	63.28	53.98	54.06	15.65	15.62
20	1.75	8.2	3	87.13	95.32	62.33	70.36	22.23	23.36	8.06	7.18	44.96	44.28	59.65	59.65	49.41	49.59	35.15	33.32

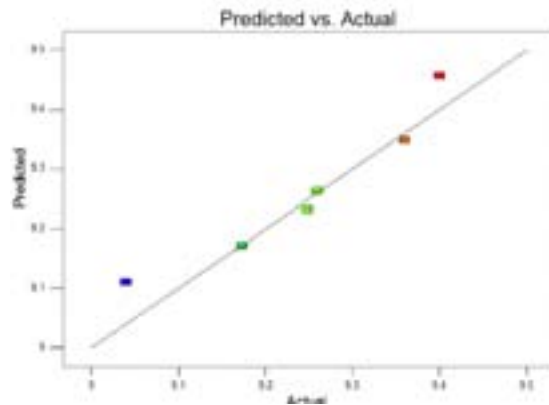
#### ㉠ pH

- pH에 대한 영향인자들에 의해 얻어진 2차 다항식(식 1)을 이용함.

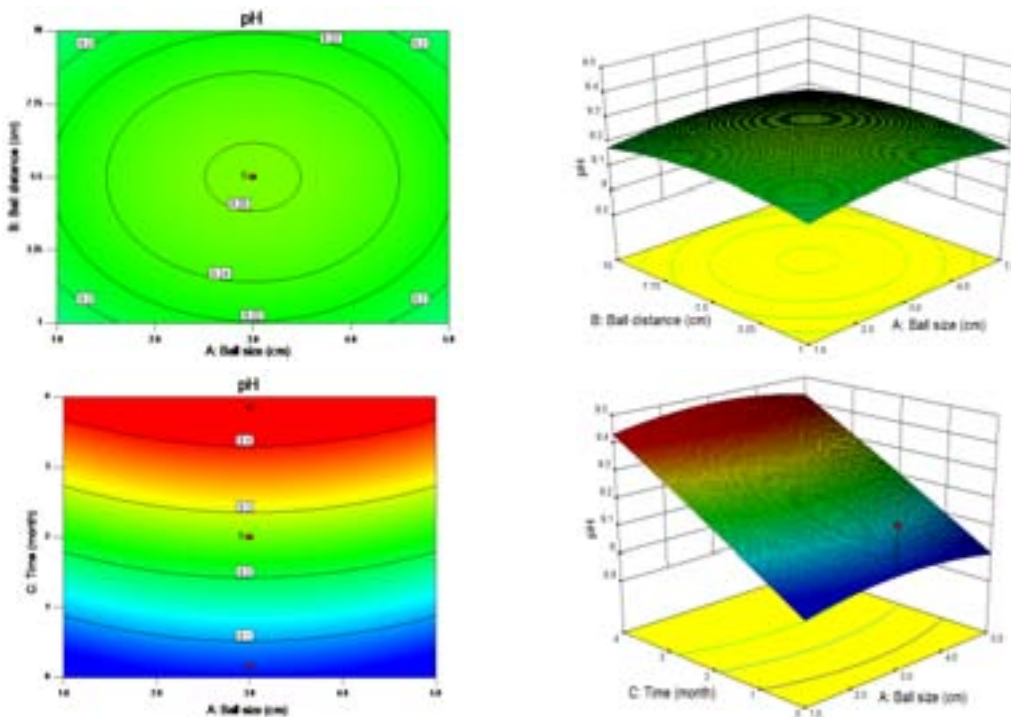
$$pH (Y_1) = 9.26 - 7.245E-016X_1 - 5.828E-016X_2 + +0.12X_3 - 0.016X_1^2 - 0.016X_2^2 - 1.504X_3^2 + 1.254 X_1X_2 + 1.239X_3 + 1.24X_2X_3 \dots \dots (1)$$

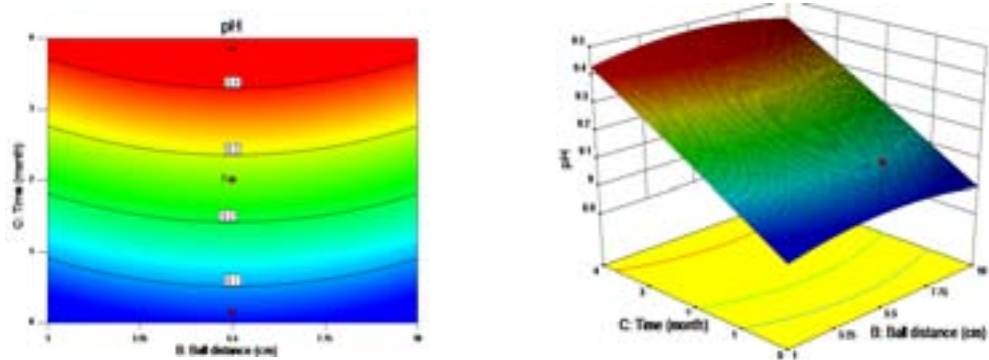
- 모델 F-value 는 4.30 이며, 이는 이 모델이 유의하다는 것을 의미함. 모델 F-value가 노이즈가 발생할 확률이 단지 1.62% 임을 의미함.
- 확률값 F < 0.05 값은 모델 조건이 유의하다는 것을 의미함. 여기서는 pH, 시간이 유의한 모델조건임.
- 표준편차는 0.071, 예상잔차제곱의 합(Predicted residual sum of squares : PRESS)은 0.39, 평균과 변동계수는 각각 9.24와 0.77임. 결정계수(R-square)는 0.9748임.
- 예상결정계수는 0.5553이며, 수정결정계수(adjusted R-squared value) 0.6101이며, 이는 예상결정계수가 의미 있는 값을 보여줌.

- 그림 IV-나-20는 실측 pH와 모델로 예상한 pH값을 보여줌. 예상한 pH는 모델 방정식 1을 이용하여 계산한 값임. 그림 IV-94에서 보는바와 같이 모델로 예측한 pH값은 실측 pH 값과 잘 맞았음.
- 미리 설계된 범위 내에서의 설계인자들의 상호작용과 반응은 적합다항식에 의해 3차(3D) 표면도로 표시됨.
- 시간은 주요인자이고, BSB 직경은 3cm, 투여간격은 5,5cm에서, 알칼리 pH구간 및 시간은 최대시간(4month)에서 유효 모델임을 보여줌.



[그림 IV-나-20] 실측 pH값과 모델 예상값





[그림 IV-나-21] pH의 등고선과 3차면 표면도

㊦ COD와 VS의 통계분석과 모델링

- 설계된 범위에서 설계인자들의 상호작용과 반응을 통한 COD와 VS 저감을 등고선과 3차(3D) 표면도로 나타냄.
- 여기서, COD에 관한  $A(x_1)$ ,  $B(x_2)$ ,  $C(x_3)$ 와  $C2(x_{32})$ 과 VS 저감율에 대한  $A(x_1)$ ,  $B(x_2)$ ,  $C(x_3)$ ,  $B2(x_{22})$ 과  $C2(x_{32})$ 은 유효한 모델조건임.
- BSB 직경(Biostimulant ball size,  $x_1$ ), BSB 투여간격(Biostimulant ball distance,  $X_2$ )과 시간( $X_3$ )에 대한 COD와 VS 저감 영향을 실험하였고, COD와 VS를 위한 입력된 인자들의 조건에 대해 다음 식을 얻었음.

COD and VS

$$\text{COD } (Y_2) = 84.60 + 1.11X_1 - 1.59X_2 + 27.27X_3 - 3.22X_1^2 - 3.49X_2^2 - 16.13X_3^2 - 2.04X_1X_2 - 2.42X_1X_3 - 2.73X_2X_3 \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{VS } (Y_3) = 55.71 + 0.89X_1 + 0.36X_2 + 19.13X_3 - 4.62X_1^2 - 5.19X_2^2 - 2.95X_3^2 - 5.74X_1X_2 - 1.78X_1X_3 + 1.28X_2X_3 \dots\dots\dots(3)$$

- 모델방정식의 통계적 유의성은 F-test로 계산하였으며, P value < 0.05임. 이는 quadratic model 결과들이 유효한 값을 의미 하며, quadratic model 결과들은 수정 R2와 예상된 R<sup>2</sup> 값이 최대임. 변수 Y<sub>2</sub>과 Y<sub>3</sub>에 관한 ANOVA결과는 R<sup>2</sup>가 각각 0.9291과 0.9369로 높은 값을 갖는 유효한 값이었음.
- 그림 IV-나-22은 실측 COD와 VS값과 quadratic model로 예상한 COD와 VS값을 보여 줌. 모델방정식으로 예상한 COD와 VS는 그림 IV-나-23에서 보는바와 같이 실측값과 매우 잘 맞았음.
- COD와 VS의 결정계수(determination coefficient)는 각각 93% 및 93.6%이며, P-value는 0.0001과 0.0059이므로 quadratic model이 유효한 모델임을 보여줌.
- 표 IV-나-5은 COD와 VS에 대한 모델의 적정성을 보여줌. quadratic model의 Prob > F가 0.05보다 낮고, LOF(lack of fit)는 실험오차(pure error)와 잔류오차로부터 계산됨.
- 모델 F-value는 COD가 7.31, VS가 5.70임.

[표 IV-나-5] 설계변수에 대한 모델의 정밀도, 결정계수, 유의성 등 quadratic model의 적정성

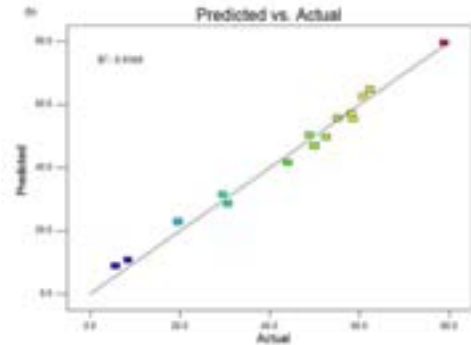
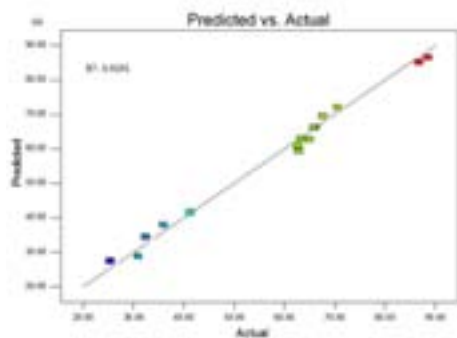
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
<b>pH</b>						
Model	0.20	9	0.022	4.30	0.0062	significant
A-Ball size	0.17	1	0.17	37.15	0.0001	
B-Ball distance	0.18	1	0.18	37.05	0.0001	
C-Time	0.19	1	0.19	37.47	0.0001	
AB	2.776E-017	1	2.776E-017	5.437E-015	1.0000	
AC	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	
BC	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	
A^2	3.528E-003	1	3.528E-003	0.69	0.4252	
B^2	3.528E-003	1	3.528E-003	0.69	0.4252	
C^2	3.258E-005	1	3.258E-005	6.382E-003	0.1379	
Residual	0.051	10	5.105E-003			
Lack of Fit	0.051	5	0.010			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	0.25	19				
<b>COD</b>						
Model	14176.27	9	1575.14	14.55	0.0001	significant
A-Ball size	16.83	1	16.83	0.16	0.7017	
B-Ball distance	34.52	1	34.52	0.32	0.5847	
C-Time	10154.62	1	10154.62	93.81	< 0.0001	
AB	33.33	1	33.33	0.31	0.5912	
AC	46.73	1	46.73	0.43	0.5260	
BC	59.70	1	59.70	0.55	0.4748	
A^2	149.45	1	149.45	1.38	0.2672	
B^2	175.76	1	175.76	1.62	0.2314	
C^2	3747.72	1	3747.72	34.62	0.0002	
Residual	1082.52	10	108.25			
Lack of Fit	1082.52	5	216.50			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	15258.79	19				
<b>VS</b>						
Model	6010.08	9	667.79	5.70	0.0059	significant
A-Ball size	10.85	1	10.85	0.093	0.7671	
B-Ball distance	1.79	1	1.79	0.015	0.9040	
C-Time	4999.51	1	4999.51	42.69	< 0.0001	
AB	263.91	1	263.91	2.25	0.1642	
AC	25.29	1	25.29	0.22	0.6521	
BC	13.15	1	13.15	0.11	0.7444	
A^2	307.97	1	307.97	2.63	0.1359	
B^2	387.68	1	387.68	3.31	0.0989	
C^2	125.11	1	125.11	1.07	0.3257	
Residual	1171.01	10	117.10			
Lack of Fit	1171.00	5	234.20	1.182E+005	< 0.0001	significant
Pure Error	9.909E-003	5	1.982E-003			
Cor Total	7181.09	19				
<b>Fe</b>						
Model	2288.13	9	254.24	4.91	0.0102	significant
A-Ball size	374.55	1	374.55	7.23	0.0227	
B-Ball distance	119.32	1	119.32	2.30	0.1599	
C-Time	1223.37	1	1223.37	23.63	0.0007	
AB	2.54	1	2.54	0.049	0.8290	



AC	88.14	1	88.14	1.70	0.2212	
BC	51.58	1	51.58	1.00	0.3417	
A <sup>2</sup>	194.28	1	194.28	3.75	0.0815	
B <sup>2</sup>	220.90	1	220.90	4.27	0.0658	
C <sup>2</sup>	19.95	1	19.95	0.39	0.5487	
Residual	517.74	10	51.77			
Lack of Fit	517.74	5	103.55			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	2805.87	19				
<b>Cr</b>						
Model	204.87	9	22.76	30.60	< 0.0001	significant
A-Ball size	16.25	1	16.25	21.84	0.0009	
B-Ball distance	7.86	1	7.86	10.56	0.0087	
C-Time	38.37	1	38.37	51.58	< 0.0001	
AB	0.060	1	0.060	0.080	0.7831	
AC	28.24	1	28.24	37.96	0.0001	
BC	1.16	1	1.16	1.55	0.2409	
A <sup>2</sup>	47.00	1	47.00	63.18	< 0.0001	
B <sup>2</sup>	39.68	1	39.68	53.34	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	21.11	1	21.11	28.37	0.0003	
Residual	7.44	10	0.74			
Lack of Fit	7.44	5	1.49			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	212.31	19				
<b>Cd</b>						
Model	1955.59	9	217.29	9.97	0.0006	significant
A-Ball size	258.84	1	258.84	11.88	0.0063	
B-Ball distance	137.84	1	137.84	6.33	0.0306	
C-Time	1414.48	1	1414.48	64.91	< 0.0001	
AB	36.38	1	36.38	1.67	0.2254	
AC	38.21	1	38.21	1.75	0.2149	
BC	1.68	1	1.68	0.077	0.7871	
A <sup>2</sup>	11.84	1	11.84	0.54	0.4781	
B <sup>2</sup>	48.08	1	48.08	2.21	0.1683	
C <sup>2</sup>	1.86	1	1.86	0.085	0.7762	
Residual	217.90	10	21.79			
Lack of Fit	134.57	5	26.91	1.61	0.3059	
Pure Error	83.33	5	16.67			
Cor Total	2173.49	19				
<b>Cu</b>						
Model	326.99	9	36.33	27.38	< 0.0001	significant
A-Ball size	31.90	1	31.90	24.04	0.0006	
B-Ball distance	4.83	1	4.83	3.64	0.0856	
C-Time	0.16	1	0.16	0.12	0.7351	
AB	142.53	1	142.53	107.41	< 0.0001	
AC	12.37	1	12.37	9.32	0.0122	
BC	0.71	1	0.71	0.53	0.4825	
A <sup>2</sup>	76.60	1	76.60	57.73	< 0.0001	
B <sup>2</sup>	63.74	1	63.74	48.03	< 0.0001	
C <sup>2</sup>	16.75	1	16.75	12.62	0.0052	
Residual	13.27	10	1.33			
Lack of Fit	13.27	5	2.65			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	340.26	19				
<b>Zn</b>						
Model	5205.98	9	578.44	7.22	0.0024	significant
A-Ball size	367.97	1	367.97	4.59	0.0578	

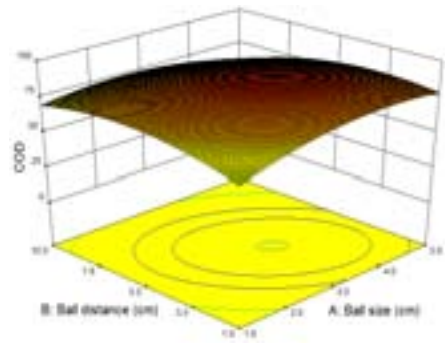
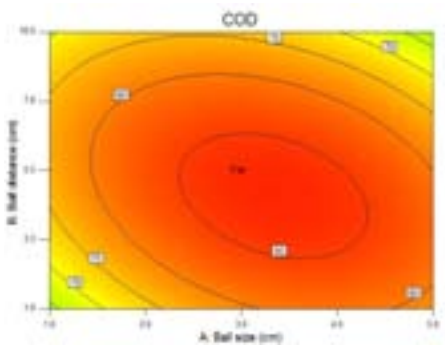
B-Ball distance	227.72	1	227.72	2.84	0.1228	
C-Time	2154.32	1	2154.32	26.88	0.0004	
AB	9.38	1	9.38	0.12	0.7394	
AC	9.16	1	9.16	0.11	0.7424	
BC	1.84	1	1.84	0.023	0.8825	
A <sup>2</sup>	1273.18	1	1273.18	15.88	0.0026	
B <sup>2</sup>	1328.40	1	1328.40	16.57	0.0022	
C <sup>2</sup>	2.93	1	2.93	0.037	0.8521	
Residual	801.53	10	80.15			
Lack of Fit	801.53	5	160.31			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	6007.50	19				
<b>Pb</b>						
Model	2690.34	9	298.93	7.06	0.0026	significant
A-Ball size	464.05	1	464.05	10.95	0.0079	
B-Ball distance	368.21	1	368.21	8.69	0.0146	
C-Time	1364.83	1	1364.83	32.22	0.0002	
AB	32.32	1	32.32	0.76	0.4029	
AC	7.31	1	7.31	0.17	0.6867	
BC	4.25	1	4.25	0.10	0.7579	
A <sup>2</sup>	175.45	1	175.45	4.14	0.0692	
B <sup>2</sup>	202.78	1	202.78	4.79	0.0535	
C <sup>2</sup>	159.95	1	159.95	3.78	0.0807	
Residual	423.64	10	42.36			
Lack of Fit	423.64	5	84.73			
Pure Error	0.000	5	0.000			
Cor Total	3113.98	19				

- 최적 BSB 직경과 투여간격은 3cm 및 5,5cm 였으며, COD와 VS 최대 저감율은 각각 89.7% 및 78.8% 임.

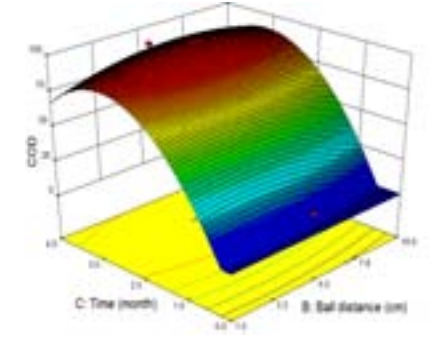
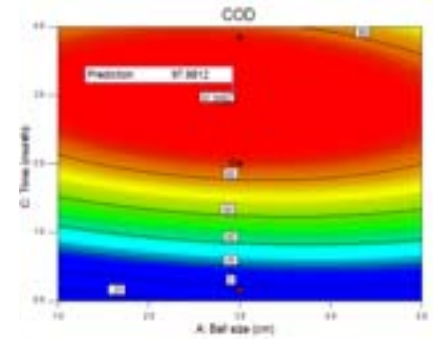


[그림 IV-나-22] 실측 값과 모델 예상 값 (a) COD reduction (b) VS reduction

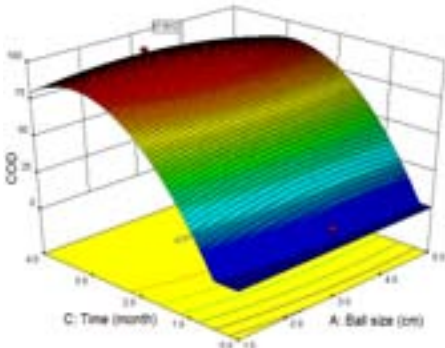
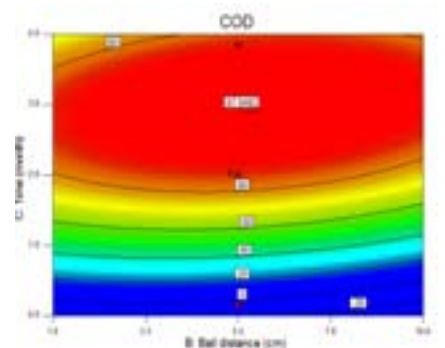
(a)



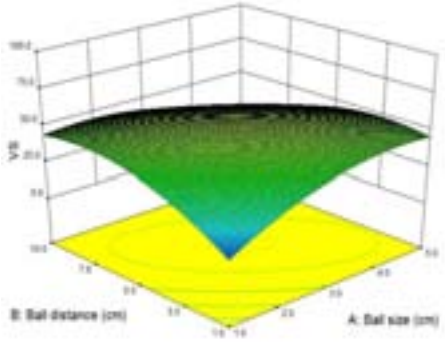
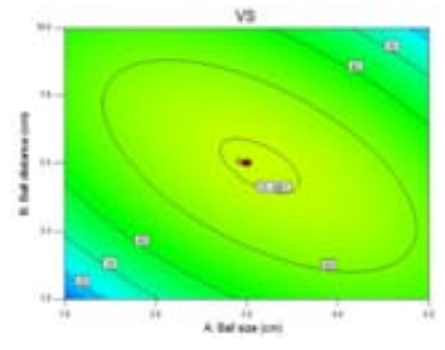
(b)



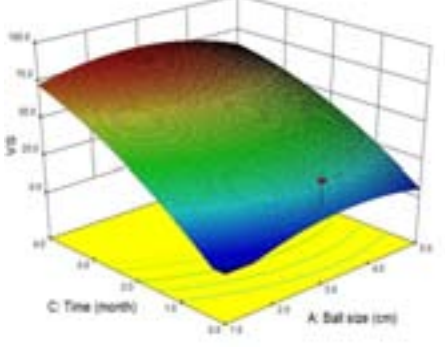
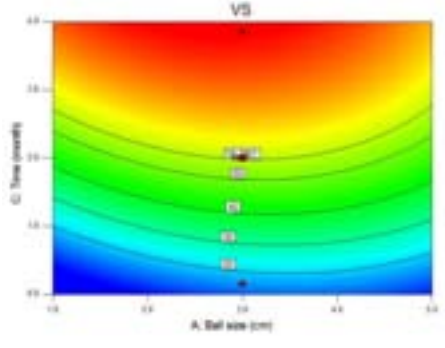
(c)



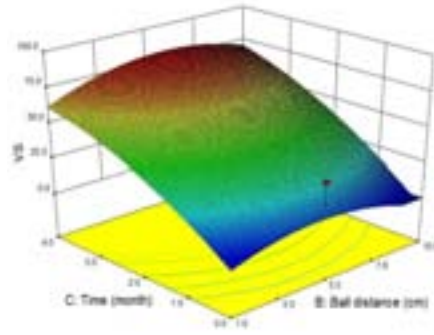
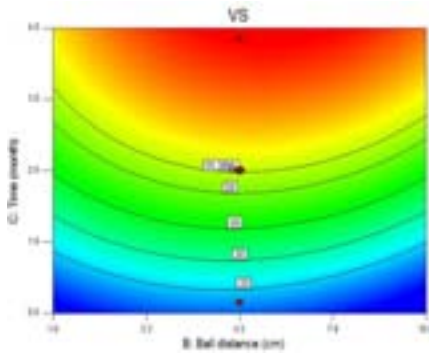
(d)



(e)



(f)



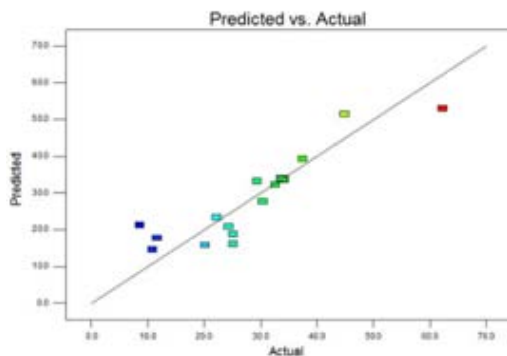
[그림 IV-나-23] COD(a, b, c)와 VS (d, e, f)등고선과 3차표면도 (a, d)시간고정 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b, e) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c, f)BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향

### ㉔ Fe

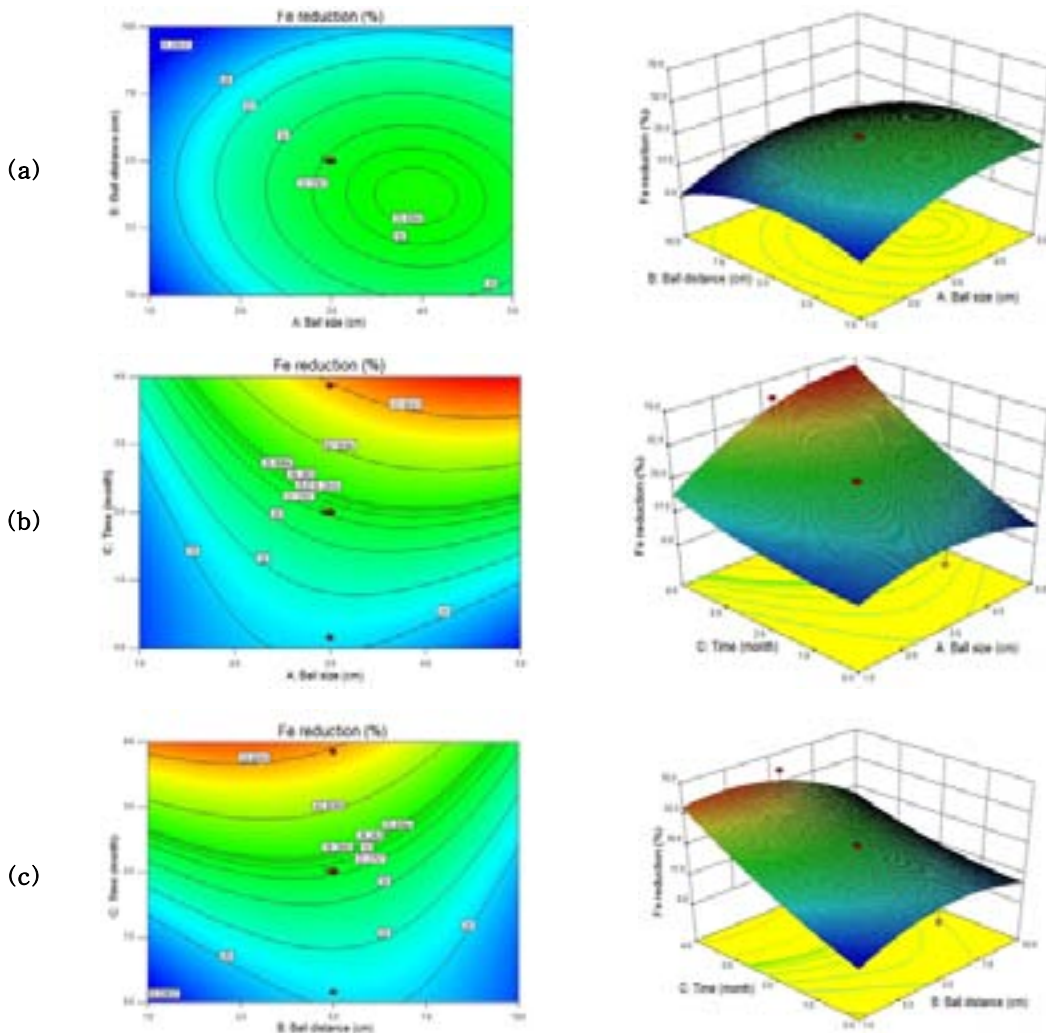
○ Fe 안정화(%)에 대한 2차 다항식은 다음과 같음.

$$Fe (Y_4) = 33.79 + 5.24X_1 - 2.96X_2 + 9.46X_3 - 3.67X_{12} - 3.92X_{22} + 1.18X_{32} - 0.56X_1X_2 + 3.67X_1X_3 - 2.54X_2X_3 \dots\dots\dots(4)$$

- 영향인자의 높은 레벨은 +1, 낮은 레벨은 -1로 코드 됨. 표 IV-나-5은 모델의 적정을 보여주며, Prob > F가 0.05 이하 값 임. 이는 모델이 유효하다는 것을 의미 함.
- 모델 F-value가 4.91이며, BSB 직경, 투여간격과 시간에 대한 모델은 유효한 모델임.
- 모델의 정밀도는 R<sup>2</sup>와 수정 R<sup>2</sup>로 표현되며, R<sup>2</sup>는 0.9155이고, 수정 R<sup>2</sup>는 0.6494, predicted R<sup>2</sup> 값은 0.4023 임.
- 표준편차는 7.20, 평균값은 29.42임.
- 그림 IV-나-24은 Fe 안정화율에 대한 실측값과 모델로 예상한 값을 보여주며, 그림에서 보는바와 같이 두 값이 유사함을 보여줌.
- 그림 IV-나-26는 BSB 직경, 투여간격과 시간에 대한 Fe 안정화율을 등고선과 3차표면도로 나타냄.



[그림 IV-나-24] 실측 값과 모델 예상값 Fe 안정화



[그림 IV-나-25] Fe 안정화에 대한 등고선과 3차표면도 (a) 시간고정 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c) BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향

○ Fe 안정화의 최대 값은 BSB 직경 3cm와 투여간격 5.5cm에서 64.5%로 평가되었음.

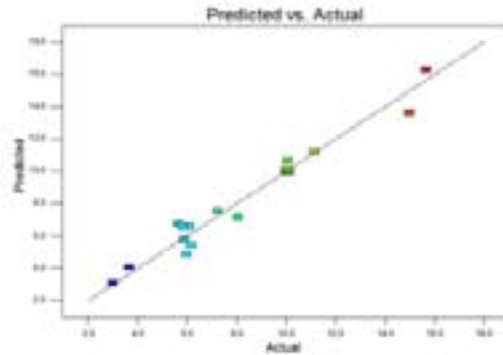
㉔ Cr

○ Cr 안정화(%)에 대한 2차 다항식은 다음과 같음.

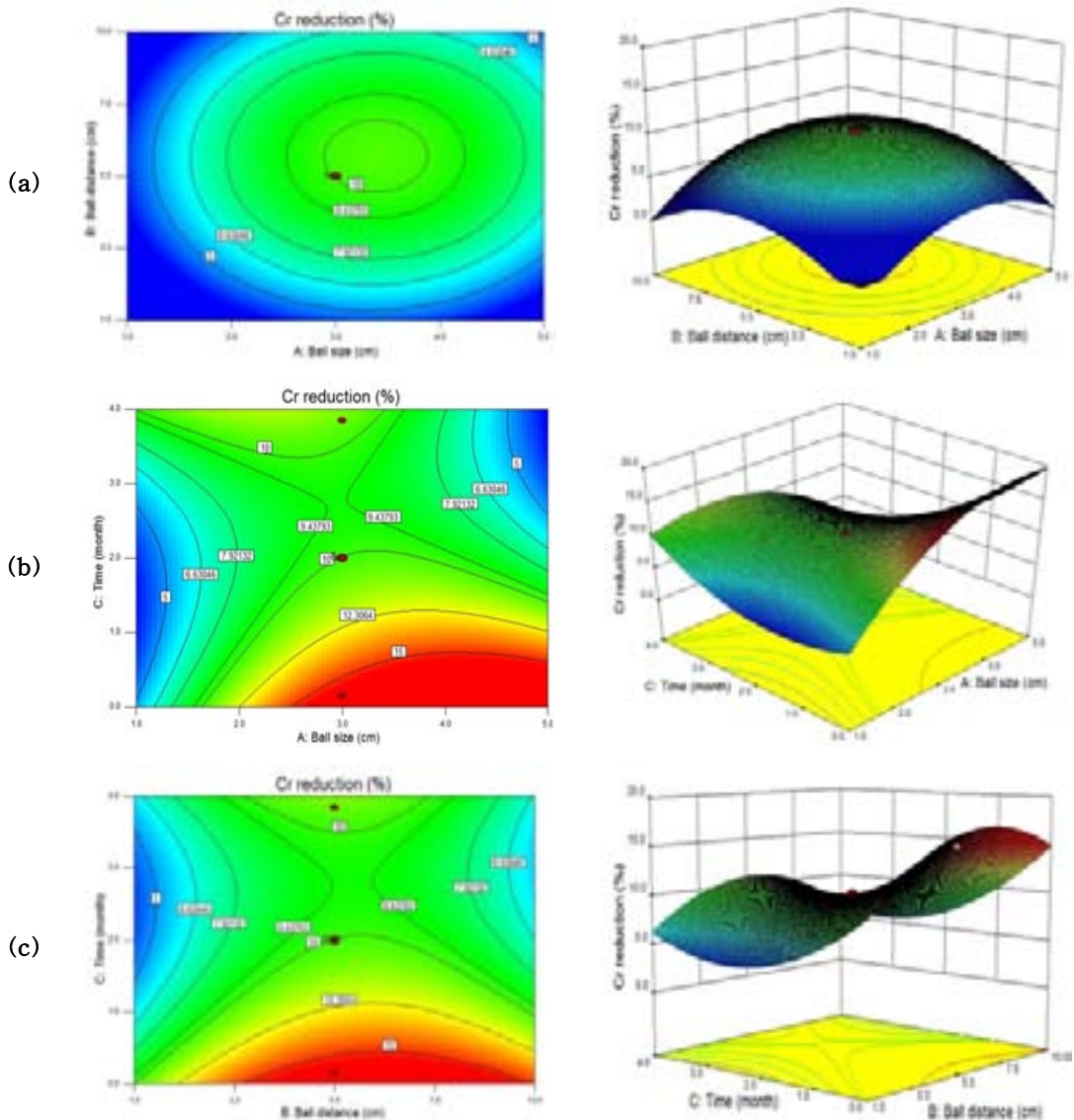
$$Cr (Y_4) = 10.03 + 1.09X_1 + 0.76X_2 - 1.68X_3 - 1.81X_1^2 - 1.66X_2^2 + 1.21X_3^2 + 0.086X_1X_2 - 1.88X_1X_3 - 0.38X_2X_3 \dots \dots \dots (5)$$

- 그림 IV-나-26은 Cr 안정화율에 대한 실측값과 모델로 예상한 값을 보여주며, 그림에서 보는바와 같이 두 값이 유사함을 보여줌.
- 모델 F-value 값은 30.60이며, 이는 모델이 유효하다는 것을 의미함. 노이즈가 일어날 확률이 단지 0.01%임.
- 모델의 정밀도는 R<sup>2</sup>와 수정 R<sup>2</sup>로 표현되며, R<sup>2</sup>는 0.7129이고, 수정 R<sup>2</sup>는 0.9334 임. 이는 정밀한 모델임을 보여줌.
- Cr 안정화에 대한 변수들과 설계인자들의 상호작용의 영향을 그림 IV-나-28과 같이 등고선과 3차표면도로 나타냄.

○ 최적 조건은 BSB 직경 3cm와 투여간격 5.5cm로 평가되었으며, Cr안정화의 최대값은 15.3% 였음.



[그림 IV-나-26] 실측 값과 모델 예상값 Cr 안정화



[그림 IV-나-27] Cr 안정화에 대한 등고선과 3차표면도 (a) 시간고정 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c) BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향

○ Cr 안정화는 시간이 최대 영향인자이며, 최대 Cr 안정화율은 시간이 증가할 때 안정화율

은 최소값으로 나타남. 이는 Cr은 안정화시키기가 어려운 것으로 평가됨.

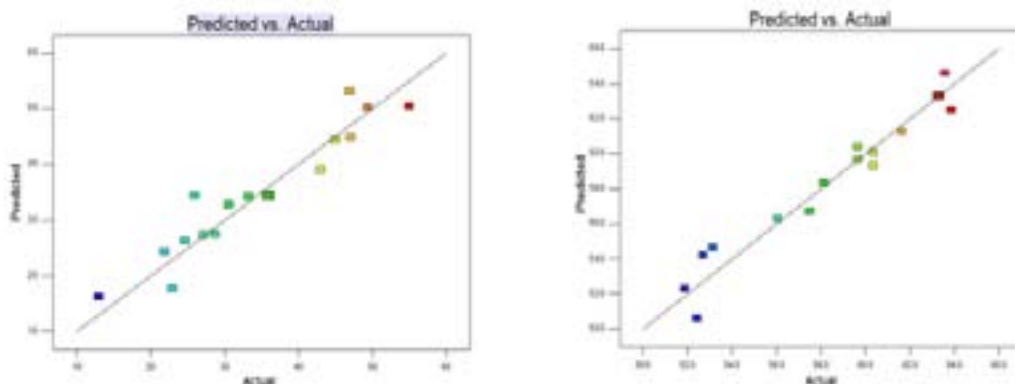
㉞ Cd과 Cu

- BES 직경, 투여간격과 시간간격(Cd에 대한 A, B, C와 C2와 Cu에 대한 A, AB, AC, A2,B2,C2)은 중요한 모델조건임.
- 모델 F-value는 Cd과 Cu가 각각 9.97 및 27.39이며, 이는 모델이 Cd과 Cu안정화 산정에 타당하다는 것을 의미함(타당한 모델임).
- “Lack of Fit F-value”는 Cd이 1.61이고, Cu가 2.65이며, 이는 모델이 잘 맞지 않아 유효하지 않음을 의미함.
- 모델의 정밀도는 R2와 수정 R2로 표현되며, Cd 안정화에서, 모델 R2는 0.8997이고, 수정 R2는 0.8095 임.
- Cu 안정화에서, 모델 R2는 0.9610이고, 수정 R2는 0.9259 임. 이는 Cd과 Cu을 위한 모델은 유효한 모델임을 의미 함.
- 표준편차, 평균, CV%press value는 Cd 안정화가 4.67, 34.70, 13.45와 1196.69이며, Cu 안정화가 1.15, 59.53, 1.93과 110.87임.
- Cd과 Cu 안정화(%)에 대한 2차다항식은 다음과 같음.

$$\text{Cd } (Y_5) = 34.31 + 4.35X_1 + 3.18X_2 + 10.18X_3 - 0.91X_1^2 + 1.83X_2^2 - 0.36X_3^2 - 2.13X_1X_2 + 2.19X_1X_3 + 0.46X_2X_3 \dots\dots\dots(7)$$

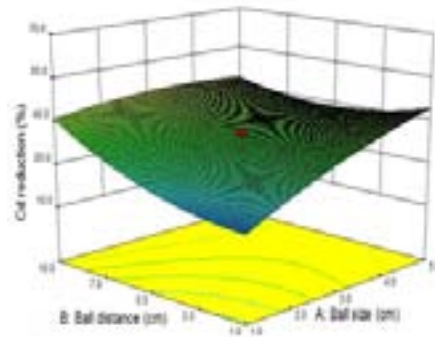
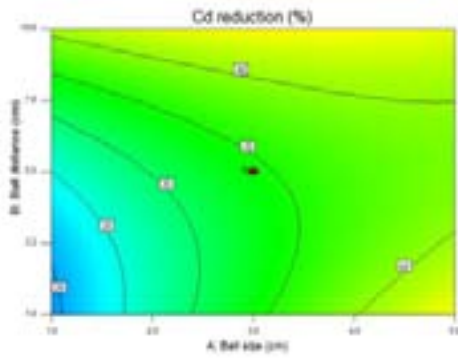
$$\text{Cu } (Y_6) = 63.28 + 1.53X_1 + 0.59X_2 + 0.11X_3 - 2.31X_1^2 - 2.10X_2^2 - 1.08X_3^2 - 4.22X_1X_2 + 1.24X_1X_3 - 0.30X_2X_3 \dots\dots\dots(8)$$

- 그림 IV-나-28는 Cd과 Cu 안정화율에 대한 실측값과 모델로 예상한 값을 보여주며, 두 값이 유사하여 모델이 잘 맞는다는 것을 보여줌.
- Cd과 Cu의 Probability value는 0.0006과 < 0.0001이며, 이는 이 모델이 유효한 모델이라는 의미임.
- 그림 IV-나-29(a, b)은 BSB 직경이 투여간격과 매우 상관관계가 있음을 보여주며, 등고선과 3차 표면도로 나타냄.
- 최적 BSB 직경과 투여간격은 각각 3cm, 5.5cm 였으며, 최대 Cd 및 Cu 안정화율은 54.9% 및 63.8%임.

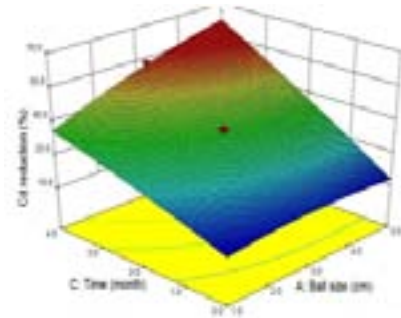
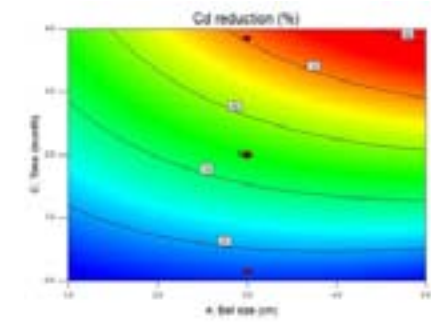


[그림 IV-나-28] Cd과 Cu 안정화의 실측 값과 모델 예상값

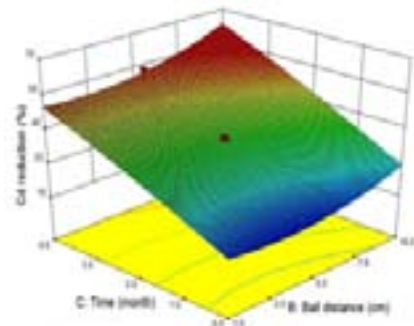
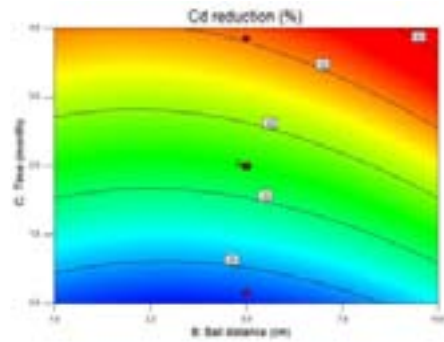
(a)



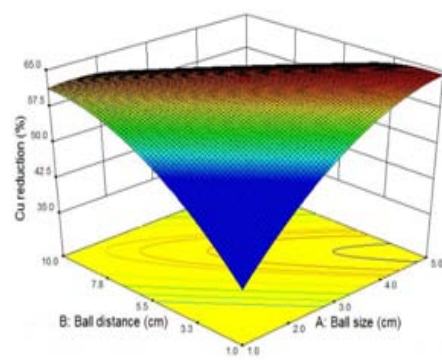
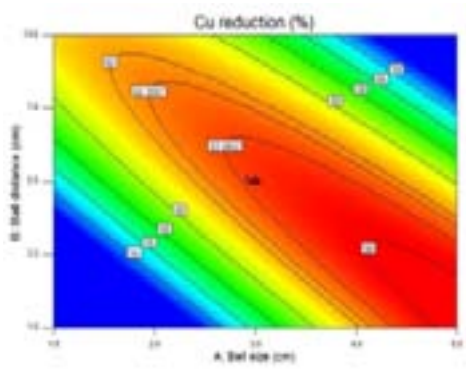
(b)



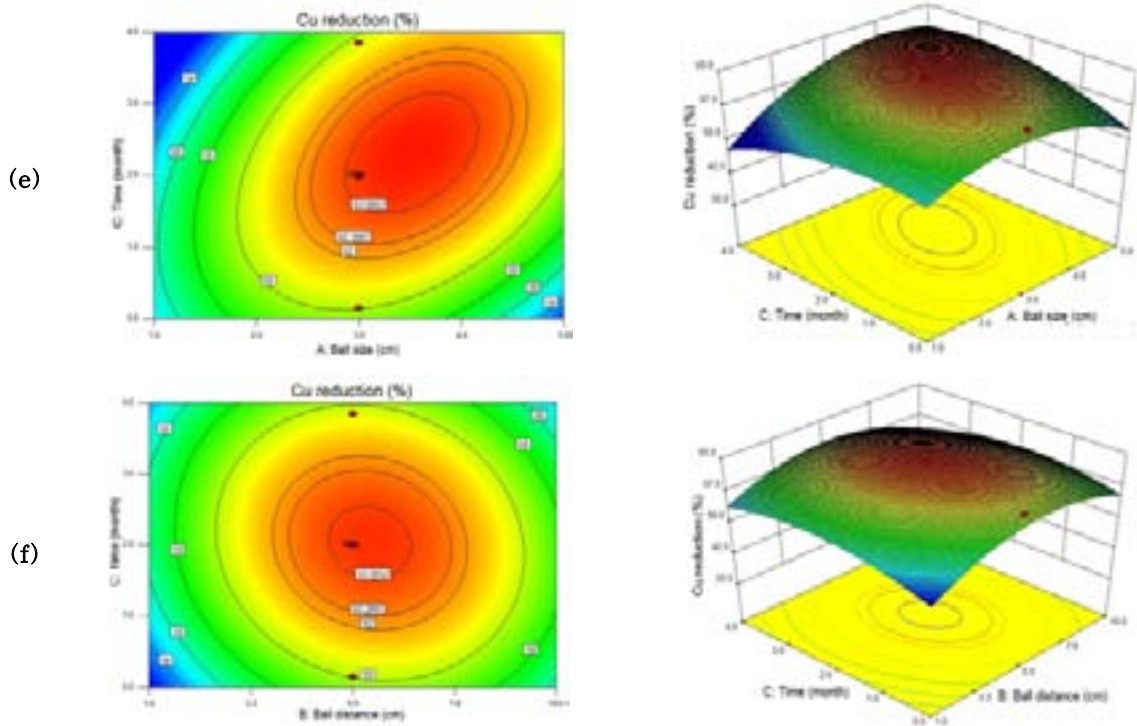
(c)



(d)







[그림 IV-나-29] Cd(a, b, c)와 Cu(d, e, f) 안정화에 대한 등고선 및 3차표면도 (a, d) 시간간격 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b, e) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c, f) BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향

○ 시간간격도 Cd과 Cu 안정화율에 중요한 변수임.

#### ㉔ Zn과 Pb

- Zn과 Pb 안정화 실험에서, 시간 간격(C), BSB 입경과 투여간격(A2, B2)은 상관관계가 크고, Zn을 위한 유효모델과 Pb에 관한 A, B, C는 중요함.
- Zn과 Pb안정화 모델 F-value는 7.22와 7.06이며, 이는 Zn과 Pb안정화를 위한 모델이 유효함을 의미 함.
- Zn 안정화에서 모델 R2는 0.8666이고, 수정 R2는 0.74655, 정밀도는 10.181 임.
- Pb 안정화 대해, 모델 R2는 0.9610이고, 수정 R2는 0.9272 임. 이는 Zn과 Pb를 위한 모델이 유효한 모델임을 보여줌.
- 표준편차, 평균, CV%press value는 Zn 안정화가 8.95, 41.39, 21.63%와 6088.59이며, Pb 안정화가 6.51, 22.84, 28.50%와 3254.05 임.
- Zn과 Pb 안정화(%)에 대한 2차다항식은 다음과 같음.

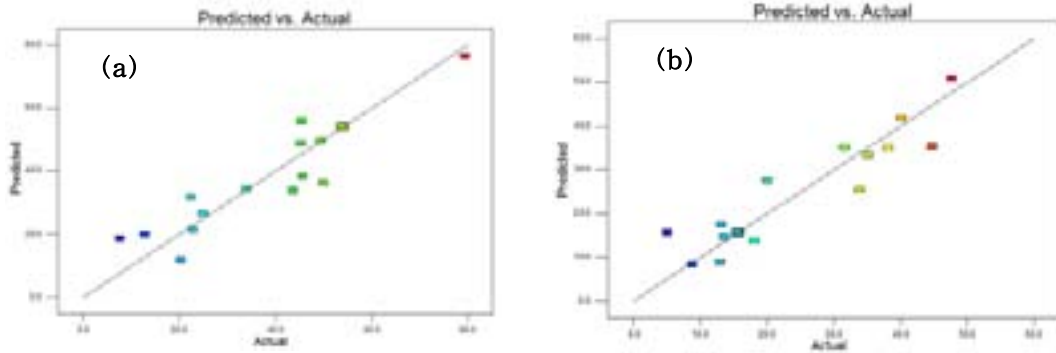
$$\text{Zn } (Y_7) = 54.06 + 5.19X_1 + 4.08X_2 + 12.56X_3 - 9.40X_1^2 - 9.60X_2^2 - 0.45X_3^2 - 1.08X_1X_2 - 1.07X_1X_3 + 0.48X_2X_3 \dots\dots(8)$$

$$\text{Pb } (Y_8) = 15.62 + 5.83X_1 + 5.19X_2 + 10.00X_3 + 3.49X_1^2 + 3.75X_2^2 + 3.33X_3^2 + 2.01X_1X_2 + 0.96X_1X_3 + 0.73X_2X_3 \dots\dots(9)$$

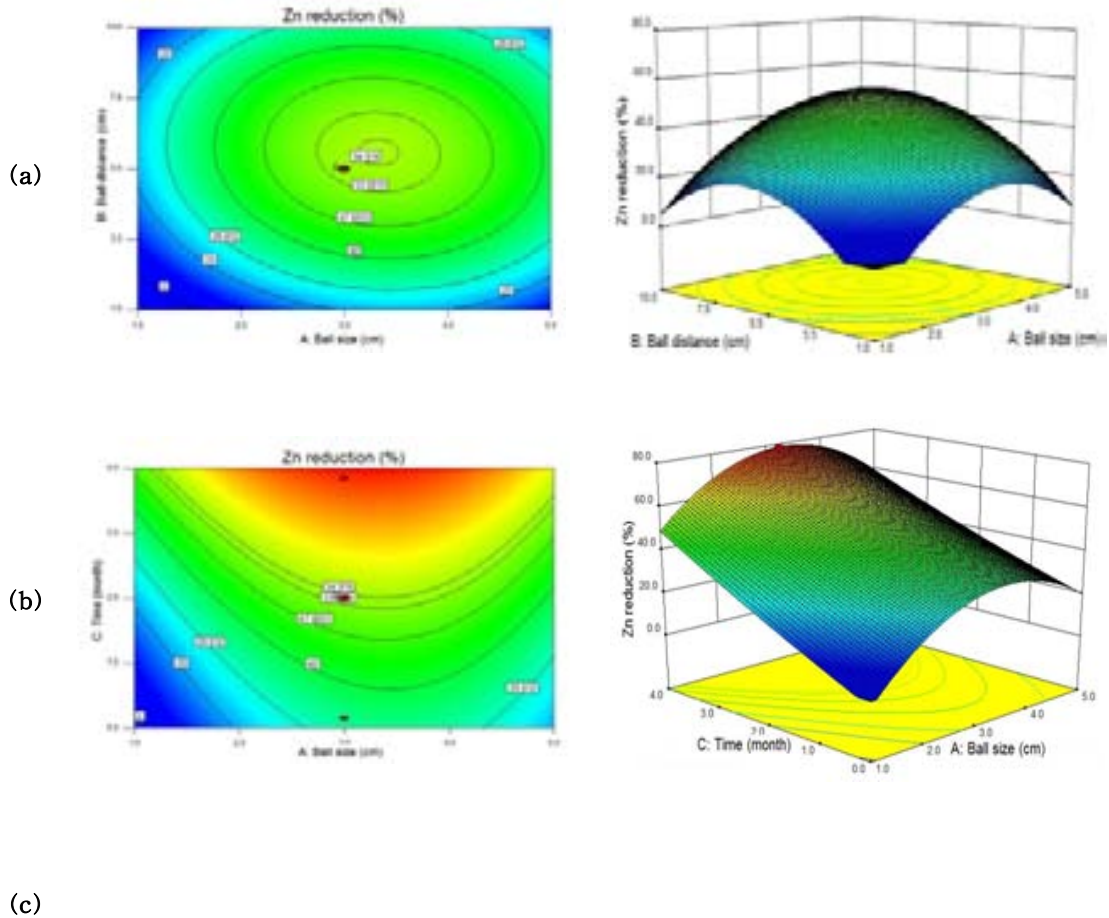
○ 그림 IV-나-30는 Zn과 Pb 안정화율에 대한 실측값과 모델로 예상한 값을 보여주며, 두

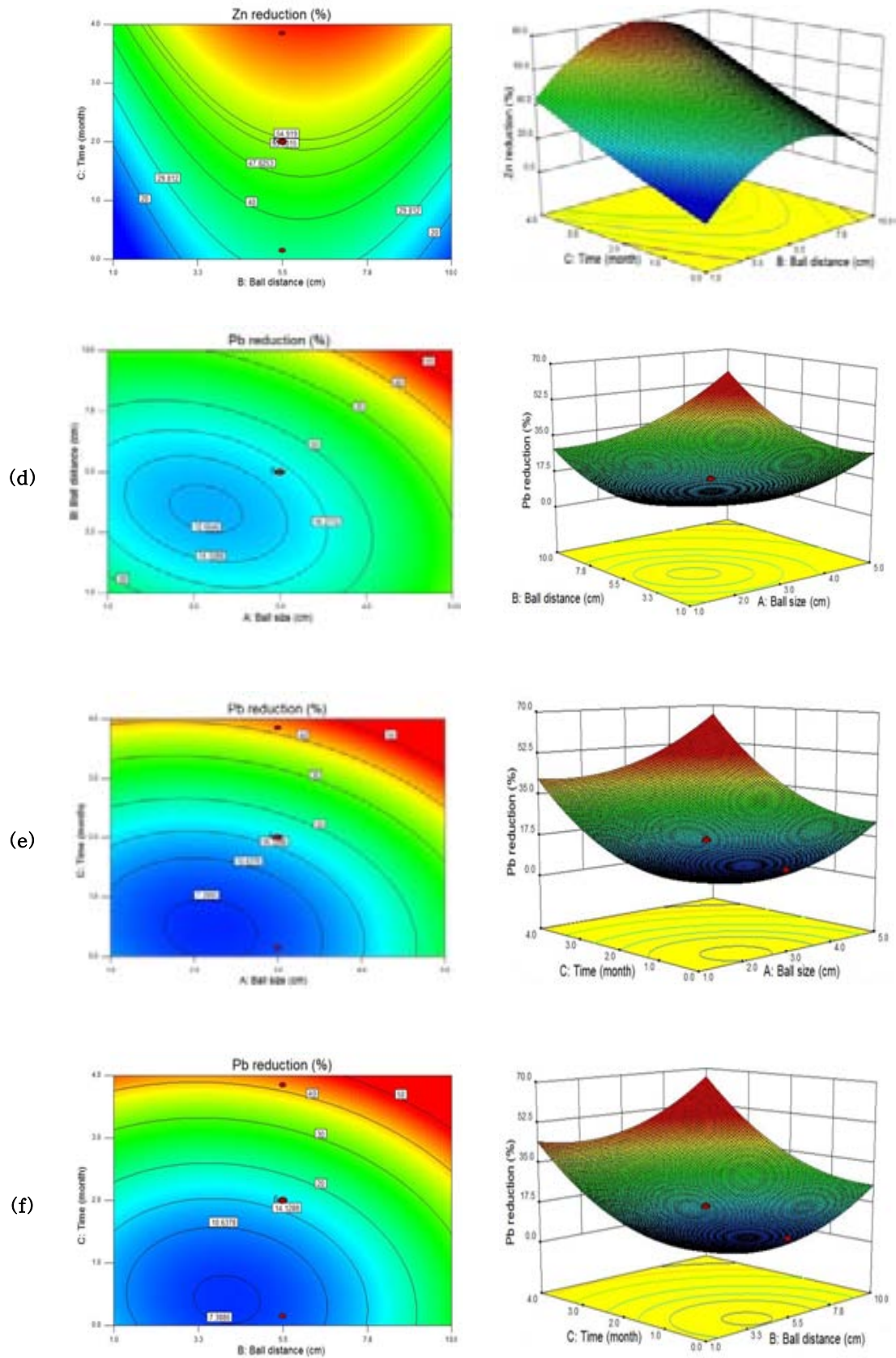
값이 유사하여 모델이 잘 맞는다는 것을 보여줌.

- Zn과 Pb의 Probability value는 0.0024와 0.0026이며, 이는 이 모델이 유효한 모델이라는 의미임.
- 그림 IV-나-31(a, b)은 BSB 입경이 투여간격과 매우 상관관계가 있음을 보여주며, 등고선과 3차 표면도로 나타냄.



[그림 IV-나-30] Zn(a)과 Pb(b) 안정화의 실측 값과 모델 예상값



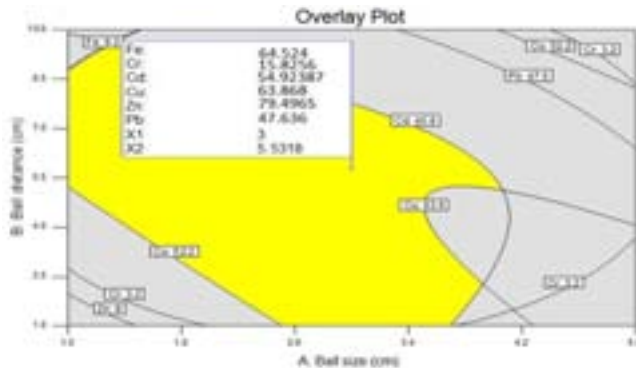


[그림 IV-나-31] Cd(a, b, c)와 Cu(d, e, f) 안정화에 대한 등고선 및 3차표면도, (a, d) 시간고정 시 BSB 직경과 투여간격의 영향, (b, e) 투여간격 고정 시 BSB 직경과 시간의 영향, (c, f) BSB 직경고정 시 투여간격과 시간의 영향

- 최적 BSB 직경과 투여간격은 각각 3cm, 5.5cm 였으며, 최대 Zn 및 Pb 안정화율은 79.4% 및 47.6%임.

**㉔ Overlay Plot**

- 그림 IV-나-32은 모델로 예상된 중금속의 안정화율을 BSB 직경, 투여간격 및 시간에 대한 영향을 Overlay Plot을 보여줌.
- 중금속 안정화를 위한 최적설계조건은 Design-Expert software로 수행하였음.
- 중금속의 최대안정화는 4개월에서 BSB 입경 3cm와 투여간격 5.53cm에서 일어남.



[그림 IV-나-32] 변수들을 종합한 중금속 안정화에 대한 겹침선

**㉕ 오염 퇴적물에 함유된 자생미생물 군집**

- 오염 퇴적물 샘플의 초기와 4개월 후의 DNA sequencing length는 각각 446.95bp와 478.41bp 임.
- 표 IV-나-6은 GS Junior System으로 얻은 평균 DNA sequencing length를 보여줌.
- 초기샘플의 OTU는 1932 OTUs로 매우 낮았으며, 4개월 후 4205 OTUs로 매우 높았음.
- Shannon index, Chaol와 Good's coverage는 초기샘플 7.197, 5649.037, 0.578 보다 4개월 후 7.840, 10122.46, 0.717로 매우 증가하였음.

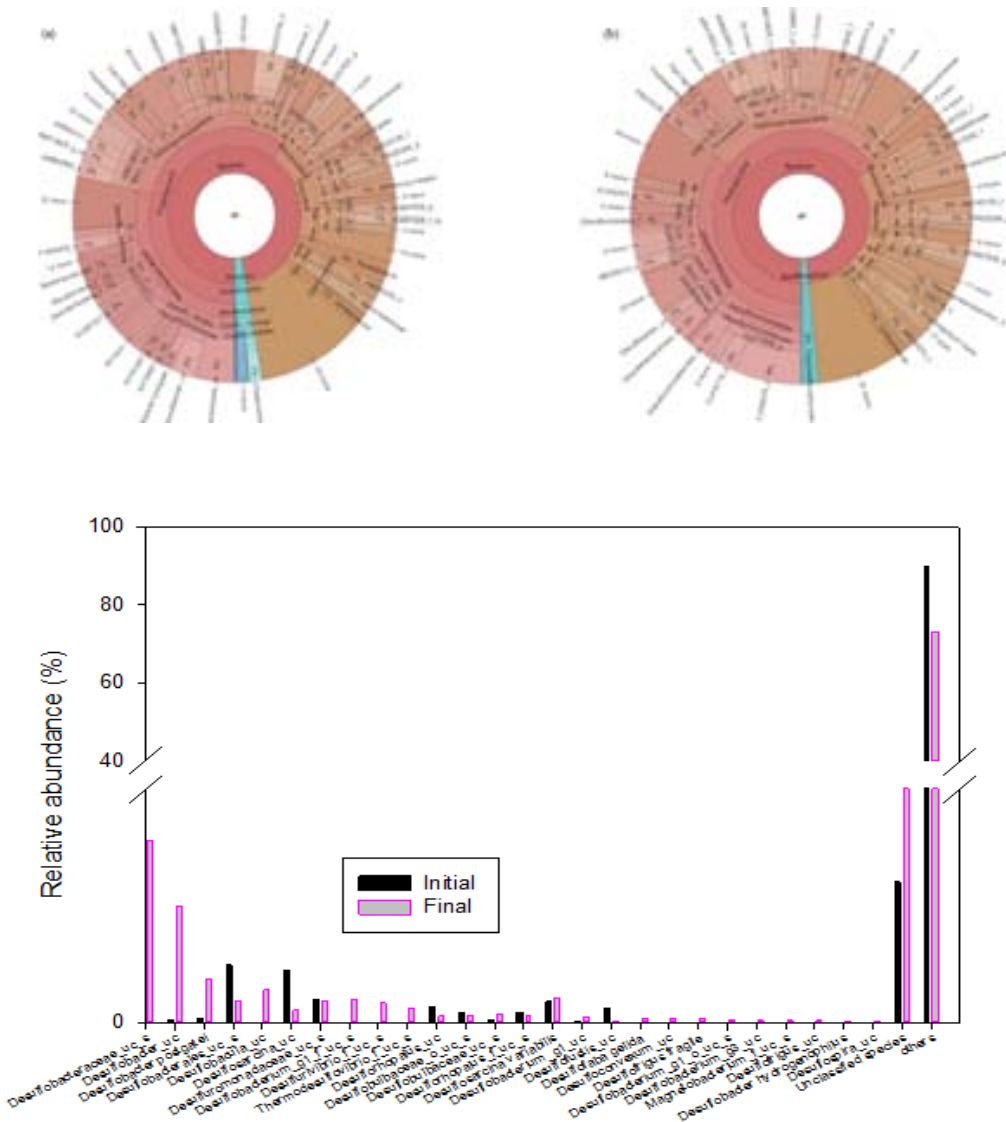
[표 IV-나-6] Pyrosequencing 분석

Samples	Read length	Observed OTUs	Ace	Shannon index	Chao	Simpson	Good's coverage
Initial (control)	33.30	1932	9364.582	7.197	5649.037	0.001	0.578
BSB added final sample	9990	4205	17548.85	7.840	10122.46	0.002	0.717

**㉖ 미생물 군집 분석- 유전자 및 종 식별**

- 그림 IV-나-33은 초기와 4개월 후 오염퇴적물 내 미생물문의 계통발생적 분류와 유전자 레벨을 보여줌

- 우점종은 초기 샘플에서 *Proteobacteria* (54%), *Bacteroidetes* (24.64%), *Chloroflexi* (2.64%), *Acidobacteria* (2%) and *Planctomycetes* (1.3%)(그림 IV-나-33(a)).
- 반면, 4개월 후 *Proteobacteria* (61.4%), *Bacteroidetes* (8%), *Chloroflexi* (6.36%), *Planctomycetes* (5.86%) and *Acidobacteria* (3.8%)(그림 IV-나-33(b)).



[그림 IV-나-33] Pie charts showing the percentage of abundance of the phylum with species level of the microbial communities (a) Sediment initial sample (b) Sediment final sample (4thmonth) (c) comparative analysis of relative abundance in species level

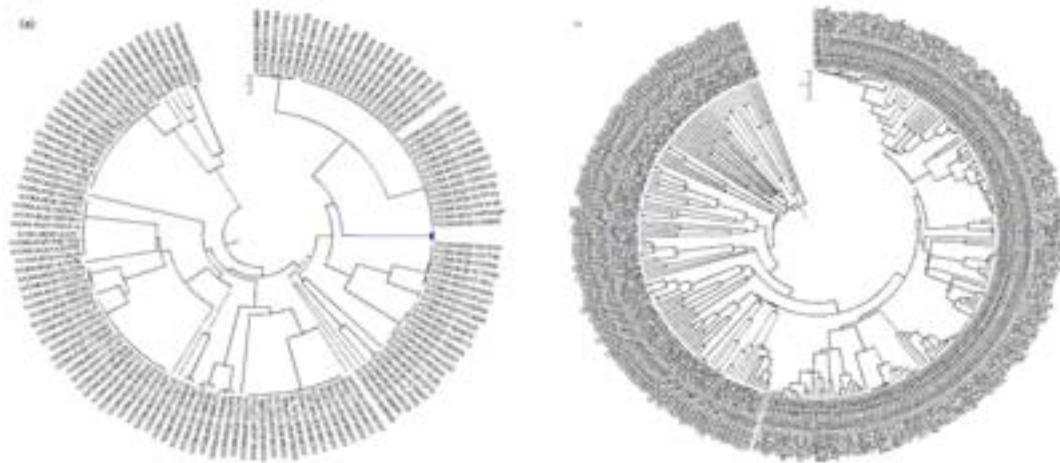
- *Proteobacteria*는 초기 샘플 52.13%보다 생물활성촉진제를 투여한 4개월 후의 퇴적물 샘플에서 61.46%로 매우 증가함.
- 4개월 후 퇴적물 샘플의 우점속(dominant genus level)은 *Desulfobacteraceae* (4%), *Desulfobacter* (3.55%), *Sulfurovum* (3.42%), *Desulfosarcina* (0.4%), *Desulforhopalus* (0.8%), *Desulfobacula* (0.1%) 임.
- 초기 샘플의 우점속은 *Desulfobacteraceae* (2.4%), *Sulfurovum*, *Desulfosarcina* (0.4%),

*Desulforhopalus* (0.2%) and *Desulfobacula* (0.01%) 임.

- 4개월 후 퇴적물샘플의 우점종(dominant species level)은 *Desulfobacterieae* 4.01%, *Desulfobacter* 2.56%, *Desulfobacula* 1.72%, *Desulfobacterium* 1.5%, *Desulfosarcinal* 72%, *Desulfovibrio* 1.43%, *Desulfomonanadeae* 0.46%, *Thermodesulfovibrio* (0.31%) 임.

#### ㉔ 계통수(Phylogenic tree)

- 계통수는 MSA(Multiple sequence alignment)를 기초로 구성하였으며, radial tree로 나타냄(그림 IV-나-34)
- 배양한 박테리아 그룹의 DNA 시퀀스는 90-95% 유사성을 가짐.
- 150 nucleotide 배열을 분석함. Codon position은 1st+2nd+3rd+Noncoding.
- 진화분석은 MEGA 6로부터 얻음.
- 초기샘플의 미생물 군집(그림 IV-나-34(a))과 4개월 후 퇴적물 샘플(그림 IV-나-34(b)) 비교 시 4개월 후 퇴적물 샘플의 species level이 크게 증가하였음.
- 이는, 생물활성촉진제가 SRB의 군집종 증가에 영향을 주었기 때문이며, 군집종 (*Desulfuromonadales*, *Haliea* and *Desulfococcus*) level은 초기샘플에 비해 약 16.9% 증가하였음.



[그림 IV-나-34] 진화관계분류 (a) 초기샘플, (b) 4개월 후 퇴적물샘플

#### (나) 직경 1m 관형 pilot 시스템을 이용하여 개발된 생물활성촉진제의 효능 평가

##### ① 실험방법 및 분석

##### ㉔ 연안퇴적물 시료 채취 및 생물활성촉진제 제조

- “(가) 생물활성촉진제의 효능극대화를 위한 최적운영조건 연구”의“1) 연안퇴적물 시료채취(부산북항 및 부산신항) 및 물리화학적 특성” 및 “2) 생물활성촉진제 제조”에서 설명한 방법과 동일한 방법으로 준비 함(그림 IV-나-35).
- 본 실험에 사용된 오염퇴적물(부산북항) 및 생물활성촉진제 제조에 사용한 퇴적물(부산신항) 시료의 물리화학적 특성은 표 IV-나-7와 같음.
- 생물활성촉진제 제조에 사용된 퇴적물시료의 중금속 함량(Cu, Cr, Zn, Pb, Cd, Fe)은 미

국해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)의 오염기준치 이하로 평가되었음.



[그림 IV-나-35] Pilot-scale 생물활성촉진제 현장적용성 평가를 위한 생물활성촉진제 제조

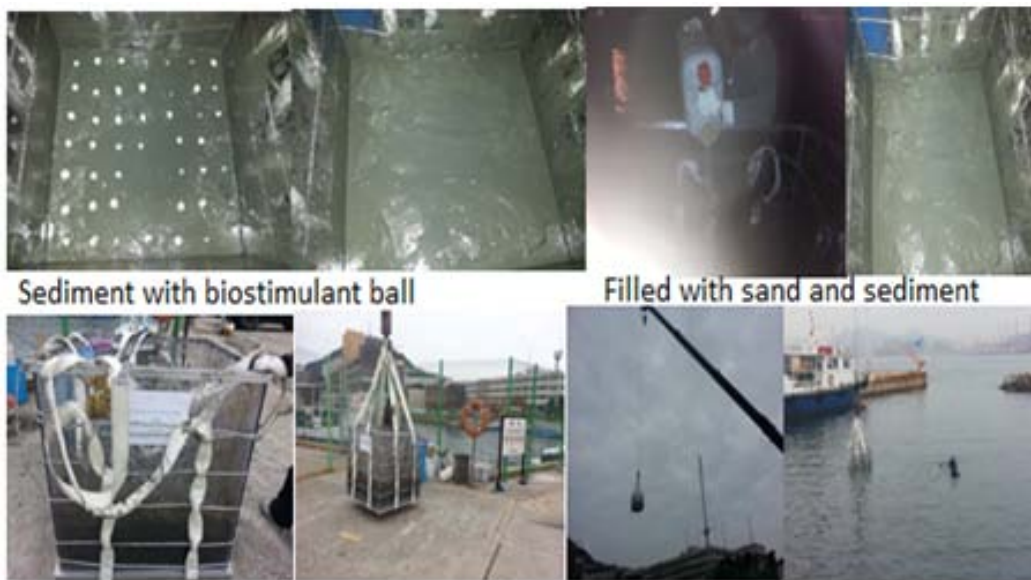
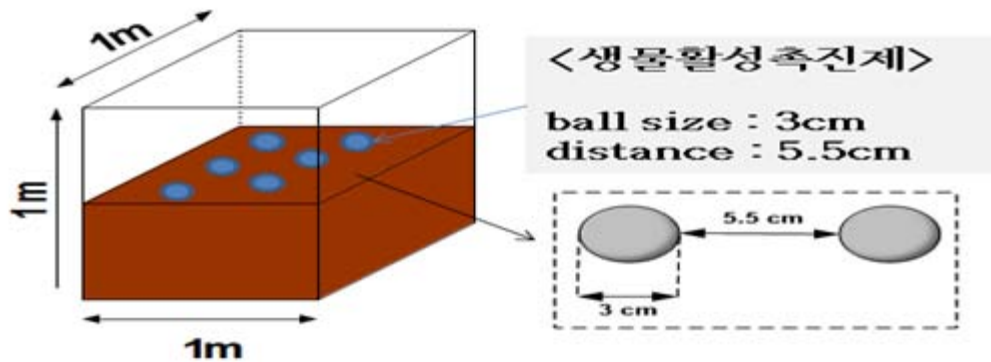
[표 IV-나-7] 부산북항 및 부산신항 연안퇴적물의 물리화학적 특성

Parameters	Busan Newport	Busan Northport
Sand (%)	12.1	17.4
Silt & clay(%)	87.9	82.6
pH (at 25°C)	8.26	8.02
CODMn(g/kg)	12.2	26.46
TS (g/kg)	7.4	49.04
VS (g/kg)	3.6	15.37
Water content (%)	42	49
Heavy metals (mg/kg)		
Cd	ND	0.94
Cu	7.029	37.3
Cr	2.37	35.7
Pb	10.51	42.4
Zn	61.83	203.7
Fe	20882	25763
Microbial population		
Colony forming Units (CFU)/g	$22 \times 10^3$	$3.5 \times 10^5$

㊤ 생물활성촉진제 효능시험을 위한 1m\*1m\*1m 면적의 Pilot 반응조 준비

- 생물활성촉진제 효능검증을 위한 생물활성촉진제는 “생물활성촉진제의 효능극대화를 위한 최적운영조건”에서 도출된 결과를 바탕으로 생물활성촉진제 크기는 직경 3cm로 제작하였고, 투여간격은 5.5cm로 투여하였음.

- 1m\*1m\*1m 부피의 pilot scale의 반응조를 제작하여, 그림 IV-나-36과 같이 오염퇴적물을 채운 후 준비한 3cm직경의 생물활성촉진제를 5cm간격으로 두었음.
- 오염퇴적물과 생물활성촉진제의 유실을 방지하고자 모래를 덮고, 그 위에 잔자갈로 덮었음.
- 크레인와 다이버를 동원하여 한국해양대학교 인근 해상에 침지 시켰음.
- 침지 후 1개월후, 2개월후, 3개월후, 5개월후, 8개월후, 12개월후 마다 다이버를 동원하여 오염퇴적물을 채취하였으며, 실험실로 옮긴 후 유기물 함량, 중금속 함량 및 분포, 미생물 개체수 및 PAH 등의 변화를 분석하여 생물활성촉진제의 효능을 평가하였음.
- 해수의 pH 및 수온, 염분은 주기적으로 현장측정 하였음.
- 퇴적물시료의 입도분포는 sieving technique으로 조사하였으며, COD 등 유기물 분석은 해양오염공정시험법과 standard methods (APHA, 1998)에 따라 분석. (3회 반복수행)
- 중금속 함량과 분포형태는 연속추출법으로 전처리한 뒤 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy)를 이용하여 분석하였음(Song et. al.,2009).



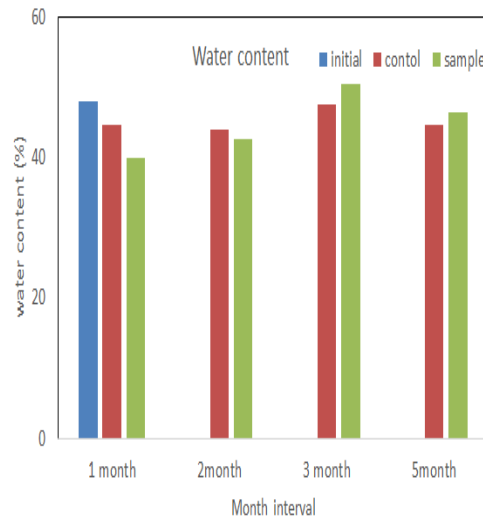
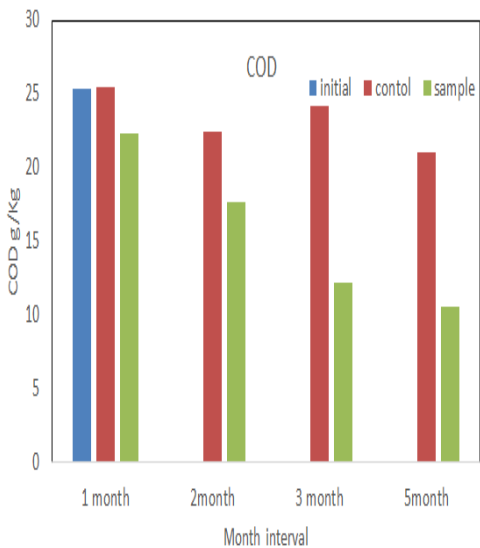
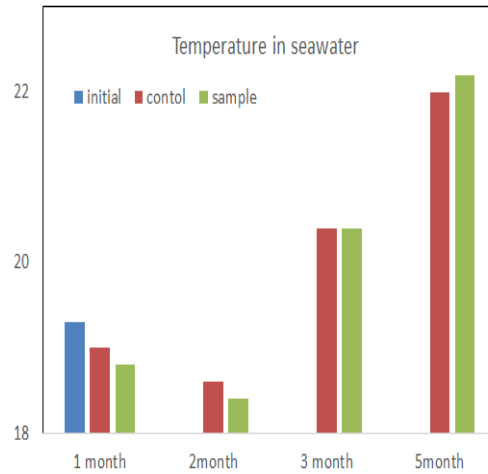
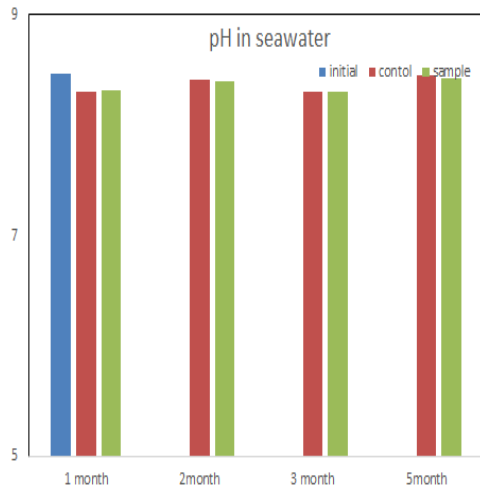
[그림 IV-나-36] 생물활성촉진제 실용화를 위한 Pilot장치 준비 및 해상 설치

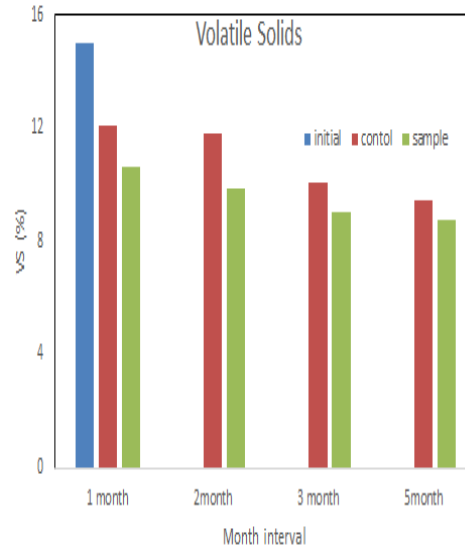
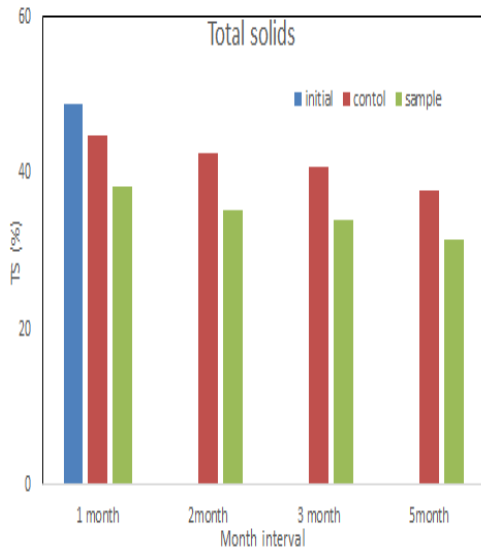
## ② 실험결과



㉔ 최적화된 생물활성촉진제 주입에 따른 오염퇴적물내 유기물 감량

- 최적화된 생물활성촉진제의 효율을 검증하기 위하여 Pilot-scale의 현장실험을 수행하였으며, 1개월, 2개월, 3개월, 5개월 후의 유기물 감량을 및 중금속 안정화 등을 평가 함.
- 실험이 진행되는 동안 Pilot 시스템 상부 해수의 pH는 약 8.5내외로 비슷하게 유지되었으며, 수온은 계절적 영향으로 다소 차이가 났음(그림 IV-나-37(a,b)).
- COD 농도는 1개월 후 22.37g/kg을 감소하였으며, 2개월, 3개월, 5개월 후 17.65g/kg, 12.2g/kg, 10.6g/kg으로 초기 COD 25.37g/kg에 비해 크게 감소하였음.
- TS 농도는 1개월, 2개월, 3개월 및 5개월 후 38.2g/kg, 35.3g/kg, 34.03g/kg, 31.46g/kg 로 감소하였음.
- VS 농도는 1개월, 2개월, 3개월 및 5개월 후 10.64g/kg, 9.88g/kg, 9.03g/kg, 8.76g/kg 로 초기농도 15.02g/kg에 비해 크게 감소하였음.

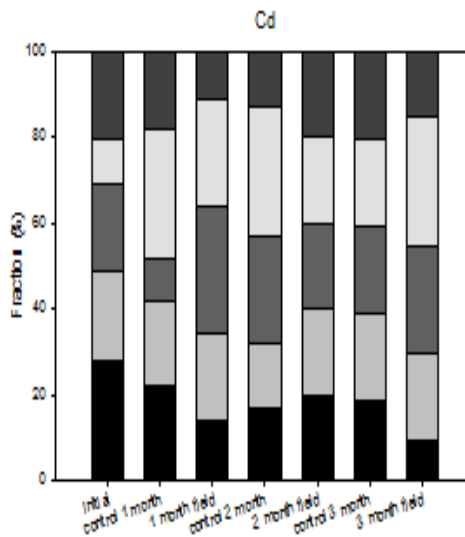
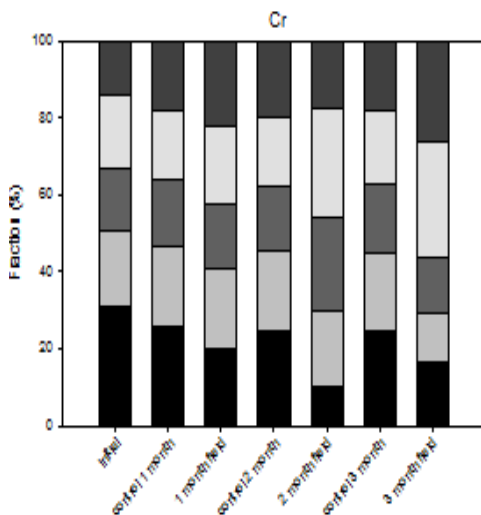


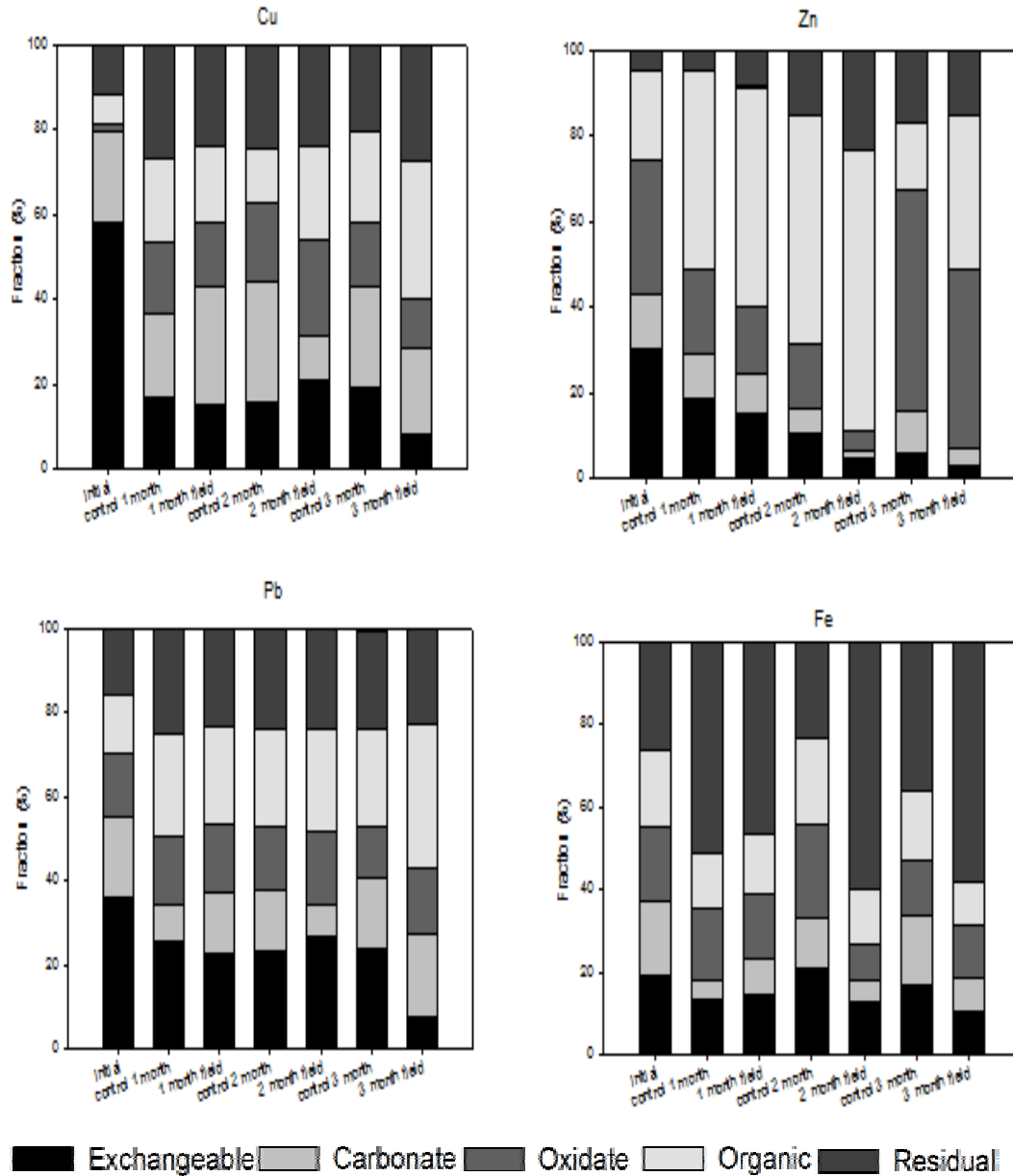


[그림 IV-나-37] Pilot-scale의 현장실험반응조 내 해수의 pH 및 수온변화와 오염퇴적물의 COD, Water content, TS, VS 감소율

#### ㊤ 중금속 안정화 특성

- 그림 IV-나-38(a-f)는 최적화된 생물활성촉진제의 주입에 따른 오염퇴적물 내 함유된 중금속 분포형태 변화를 보여줌.
- Cr, Cd, Cu, Zn, Pb과 Fe의 중금속이 초기샘플과 비교 시 중금속 분포형태가 F4 및 F5의 안정한 형태로 전환되었음.
- 모든 중금속 종류의 분포형태는 5개월 후 잔류분율(F5) > 유기물 결합분율(F4) > Fe,Mn 산화물결합분율(F3) > 탄산염결합분율(F2) > 치환가능분율(F1) 순이었음.
- Pilot-scale의 최적화된 생물활성촉진제의 효능을 실험한 결과, 유기물 뿐만 아니라 중금속 안정화에도 효능을 나타냈음을 검증하였음.





[그림 IV-나-38] 최적화된 생물활성촉진제 주입에 따른 오염퇴적물의 중금속 형태 분포변화

### ㊤ PAH 저감

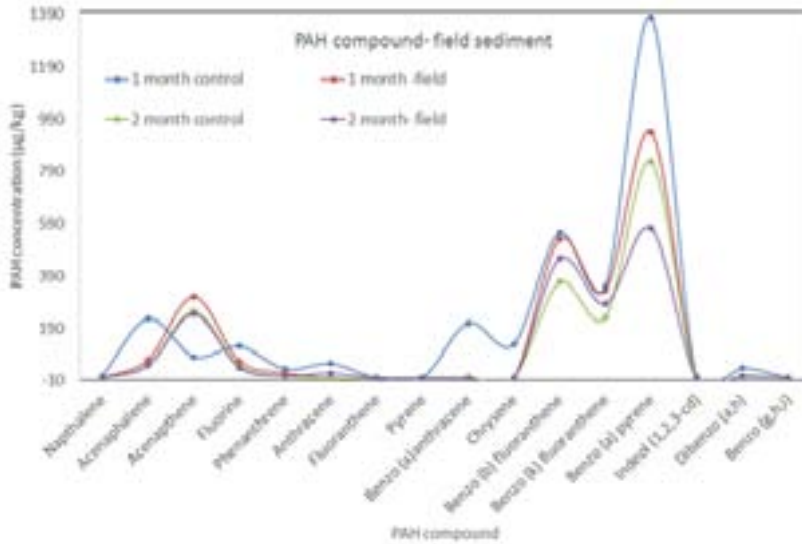
- 연안 오염퇴적물에 최적화한 생물활성촉진제 주입에 의한 PAH의 저감정도를 평가함.
- 그림 IV-나-39은 실험시작 1개월 후와 2개월 후 오염퇴적물내 함유된 PAH농도변화를 보여줌. 그림 IV-나-39에서 보는바와 같이, 바탕시험과 비교 시 2,3,4-ring PAHs가 1개월 후와 2개월 후에서 크게 감소하는 것으로 평가되었음.
- 생물활성촉진제 주입에 의한 생물분해작용에 의해 제거된 2,4-ring PAHs의 평균 제거율은 약 42-77%로 평가되었음.

(다) 생물활성촉진제 적용깊이의 영향성 평가

① 실험방법 및 분석

㉞ 투여깊이 실험을 위한 생물활성촉진제 준비

- 연안오염퇴적물 시료는 부산북항에서 채취하였으며, 생물활성촉진제의 제작에 사용된 오염되지 않은 퇴적물은 부산신항 개발준설토 적치장에서 채취하였음.



[그림 IV-나-39] 생물활성촉진제 주입에 의한 PAH 농도변화

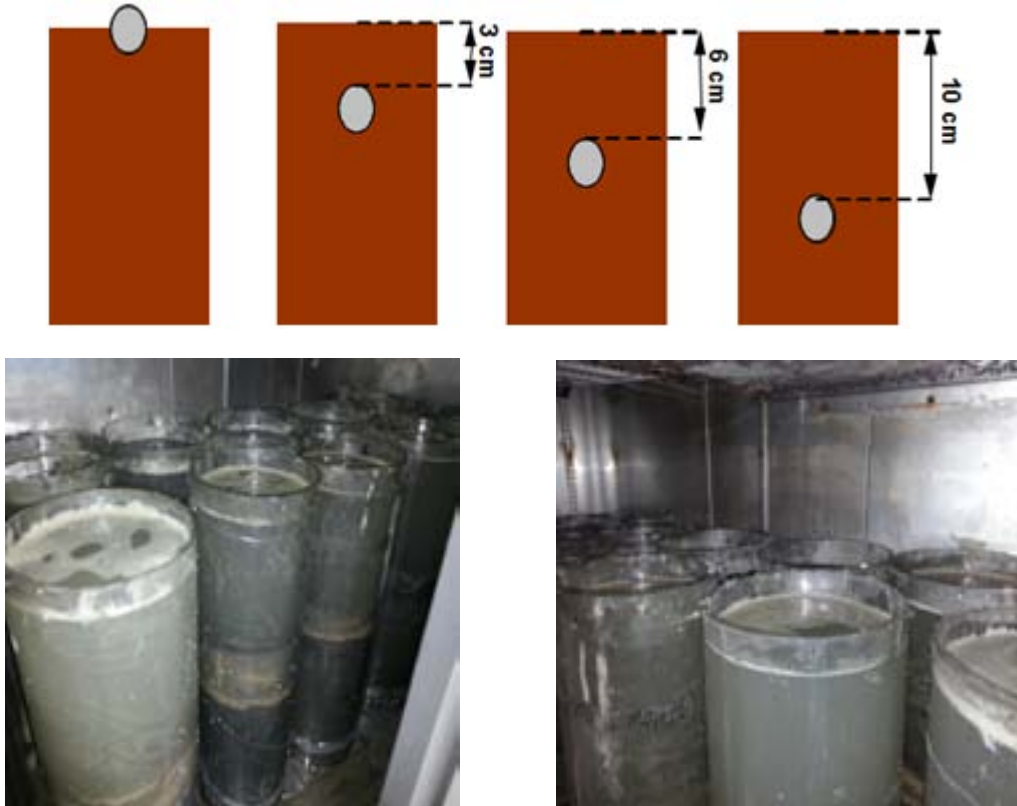
- 연안오염퇴적물시료 및 생물활성촉진제 제조를 위한 퇴적물의 물리화학적 특성과 실험에 사용된 해수의 초기성상은 표 IV-나-8과 같음.

[표 IV-나-8] 연안오염퇴적물(Sed-A)과 생물활성촉진제 제작을 위한 퇴적물(Sed-B)의 물리화학적 특성 및 해수의 초기성상

Sample	Parameters	Sed-A	Sed-B
Sediments	Sand (%)	17.4	12.1
	Silt & clay(%)	82.6	87.9
	pH (at 25°C)	8.69	8.26
	Temperature	19.3	20
	COD <sub>Mn</sub> g/kg	26.46	12.2
	Water content (%)	51	47
	TS (g/kg)	49.04	7.4
	VS (g/kg)	15.37	3.6
	Cr(mg/kg)	96.9	2.37
	Cd(mg/kg)	7.34	ND
	Cu(mg/kg)	153.51	7.0
	Zn(mg/kg)	498	61.8
	Pb(mg/kg)	78.3	10.5
	Fe(mg/kg)	37,273	20,882
Sea water	Salinity(‰)	32.1	
	DO(mg/L)	3.54	
	pH	8.70	
	Temperature	20.2	

㉔ 생물활성촉진제 주입깊이의 영향평가를 위한 장치준비

- 주입깊이의 영향평가에 사용한 생물활성촉진제는 “(가) 생물활성촉진제의 효능극대화를 위한 최적운영조건 연구”의 “2) 생물활성촉진제 제조”에서 설명한 방법과 동일한 방법으로 준비 함(Song 등(2013)).
- 생물활성촉진제 직경은 3cm로 만들었으며, 상부가 개방된 직경 20cm, 높이 60cm의 원통형 아크릴 관 10개를 준비한 후 각각에 오염퇴적물 시료를 약 10L 씩을 충전하였음.
- 생물활성촉진제는 오염퇴적물 시료를 충전하는 과정에 오염퇴적물 표면, 표면으로부터 각각 3cm, 6cm 및 10cm 깊이에 두었음.
- 오염퇴적물의 충전이 완료된 관의 상부에는 북항 해역에서 채취한 해수를 충분히 충전하였음. 실험관은 상기한 4가지 깊이조건에서 동일한 방법으로 2개씩 준비하였으며, 생물활성촉진제를 주입하지 않은 2개의 관은 별도로 준비하여 대조구로 사용하였음.
- 실험관들을 약 19°C 내외로 유지되는 항온조에 설치하였고, 실험 시작 후 5일 간격으로 오염퇴적물 상부 해수의 온도와 pH 변화를 관찰함.
- 오염퇴적물 시료는 1개월, 3개월 및 6개월 후에 각 조건의 실험관 1개씩을 선정하여 오염퇴적물 시료를 인발하였으며, 생물활성촉진제를 제거한 뒤 생물활성촉진제 주변반경 5cm 부근의 시료를 취하여 잘 섞은 후 물리화학적 특성을 분석하였음.



[그림 IV-나-40] 생물활성촉진제 주입깊이의 영향평가를 위한 실험장치

#### ㊤ Poly Aromatic Hydrocarbon (PAH) 분석

- 저질 샘플 10g을 채취하여 황산나트륨을 이용해 수분을 제거함. 노말헥산과 디클로로메탄을 3:2 비율로 섞어 추출용 용액으로 사용했음.
- 속실렛 추출기를 사용하여 16시간 동안 추출하여, 추출된 시료를 회전농축기를 사용하여 2ml까지 농축함.
- 노말헥산과 디클로로메탄을 9:1로 섞은 용액을 시료 2ml에 첨가.
- 유리관에 실리카겔을 10~15cm 넣고 황산나트륨을 2-3cm 높이로 만든 필터에 3차례 시료를 걸러냄. 걸러낸 시료를 회전농축기를 사용하여 1ml까지 농축함.
- 기기분석을 위하여 다환방향족탄화수소계열은 GC-MS (Agilent Technologies 6890N Network gas chromatograph / Agilent Technologies 5973Network mass selective detector)를 사용하고, 총석유계탄화수소계열은 GC-FID (Agilent Technologies 6890N Network gas chromatograph / flame ionization detector)를 사용하여 정량·정성 분석하였음.
- 분석에 사용된 가스크로마토그래프와 검출기의조건은 표 IV-나-9과 같음. 분석대상 다환방향족 탄화수소는 총 16종으로 분자량 128의 나프탈렌에서 278의 디벤조[a,h]안트라센까지 분석했다. EPA(1987)에서 우선관리대상물질로 정하고 있는 PAHs 16종을 기준으로 계산하여 분석하였음.
- 대상 화합물은 Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Anthracene, Fluoranthene, Pyrene, Benz[a]anthracene, Chrysene, Benzo[b]fluoranthene, Benzo[k]fluoranthene, Benzo[a]pyrene, Indeno[1,2,3-cd]pyrene, Dibenz[a,h]anthracene,

Benzo[ghi]perylene임.

[표 IV-나-9] GC(Gas chromatography)분석조건과 검출기 조건(16-PAHs)

GC/MS	
GC condition(Agilent 7890)	
Column	DP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm Film)
Temperature program	Initial @ 60°C (2 min) Ramp (7°C/min to 310°C) Final @ 310°C (40 min)
Carrier gas	He 1.0 mL/min
Injection port Temp	290°C
Injection mode	splitless
Injection volume	2 μl
MS condition(Agilent 5975C)	
Interface Temp	290°C
Scanning Range	130~300 amu, 2 cycle/sec
Ionization Voltage	30~300 amu, 2 cycle/sec
Monitoring method	Selected Ion Monitoring

② 실험결과

㉠ 생물활성촉진제 주입깊이에 따른 오염퇴적물의 정화효율

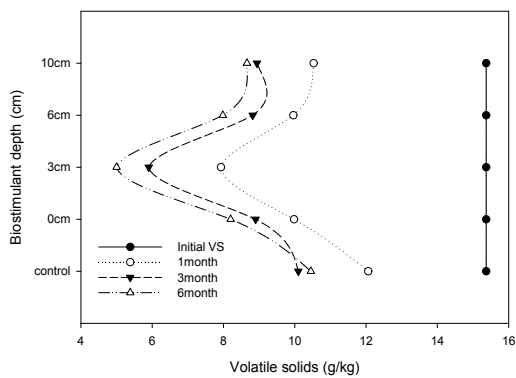
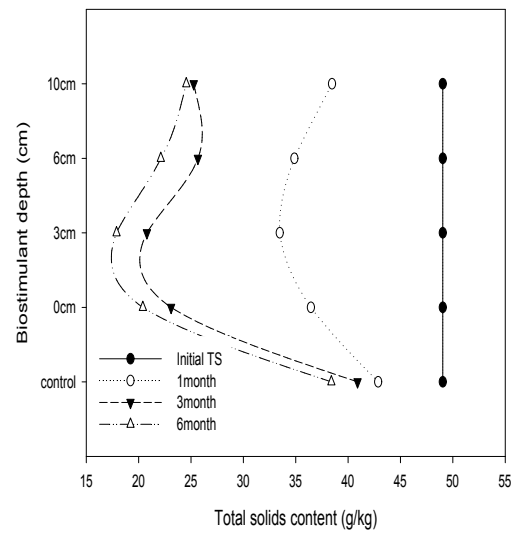
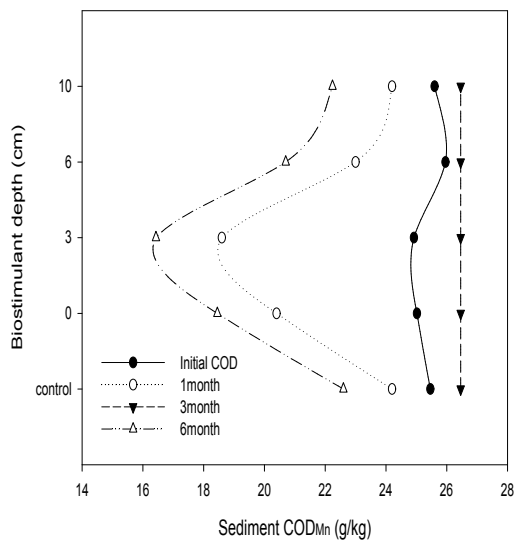
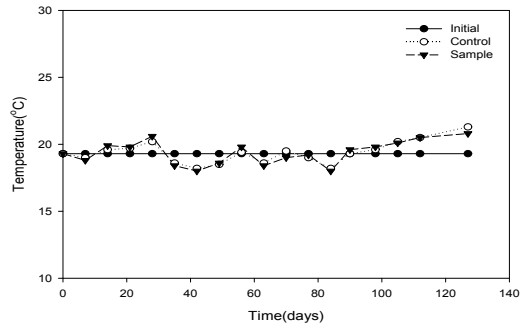
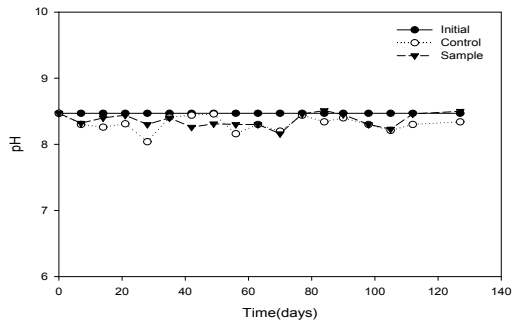
- 그림 IV-나-41는 실험실 규모의 관 실험을 통하여 유기오염물질 생물정화에 대한 생물활성촉진제 깊이의 영향을 평가한 결과 임.
- 관 실험 초기에 오염퇴적물층 상부 해수의 pH는 약 8.5로 약 알칼리였으며, 실험이 진행되는 동안 pH는 8.0~8.5로서 생물활성촉진제의 주입 깊이에 영향을 받지 않고 유지하였음(그림 IV-나-41(a)).
- 관 실험을 19°C로 유지되는 항온조에서 수행하였기 때문에 전체 실험기간동안 온도의 변화는 거의 없었으며, 실험 시작 후 1개월, 3개월 및 6개월로 시간이 경과함에 따라 오염퇴적물의 COD<sub>Mn</sub> 함량은 점차 감소하였음. 그러나, 오염퇴적물이 함유한 COD<sub>Mn</sub>의 감소정도는 생물활성촉진제 주입 깊이에 따라 차이를 보였음(그림 IV-나-41(b)). 오염퇴적물의 초기 COD 함량은 26.5 g/kg이었으나, 생물활성촉진제의 주입 위치가 관에 충전된 오염퇴적물의 표면 및 3cm인 경우 COD 함량은 실험 시작 1개월 후 약 24.9 g/kg까지 감소하였음. 생물활성촉진제를 주입한 관형 실험의 오염퇴적물에서 나타난 이와 같은 COD 함량 감소는 생물활성촉진물질에 의해 오염퇴적물에 자생하는 미생물의 활성이 촉

---

진되었기 때문임(Colwell, 2002; Li et al., 2011).

- 그러나, 관형 실험에서 오염퇴적물에 주입한 생물활성촉진제의 깊이가 6cm 이상인 경우 1개월 후의 COD 함량은 25.8 g/kg으로서 생물활성 촉진제를 주입하지 않은 대조구의 25.5 g/kg과 큰 차이가 없었음. 이는 오염퇴적물의 유기물 분해율은 표층에서 가장 빠르고 깊이가 깊어질수록 미생물 종의 다양성과 활성이 감소한다고 보고한 이전 연구결과와 일치함(Boetius et al., 2000; Fishcher et al., 2002; Romani et al., 1998; Freixa et al., 2015).
- 실험 3개월 및 6개월 후 관형 실험에서 오염퇴적물의 COD 함량의 감소는 전체적으로 1개월 후에 비해 크게 증가하였으며, COD 함량 감소에 대한 생물활성촉진제의 주입 깊이의 영향은 더욱 뚜렷하였음. 특히, 생물활성촉진제를 실험관에 충전한 오염퇴적물의 표면에 주입한 경우 6개월 후 COD 함량은 18.2g/kg으로 감소하였으나, 생물활성촉진제 주입 깊이가 3 cm인 경우 COD 함량은 16.1 g/kg 으로서 최대 COD 함량 감소를 보였음. 그러나, 생물활성촉진제 주입 깊이가 6 cm 이상으로 깊어질수록 COD 함량의 감소는 점차 감소하였음.
- 생물활성촉진제 주입 깊이 10 cm에서 6개월 후 COD는 22.4 g/kg으로서 대조구와 차이가 없었음. 연안 퇴적물에서 유기오염물질의 분해가 깊이에 따라 차이가 나는 것은 퇴적물의 깊이가 깊어짐에 따라 이용 가능한 전자수용체가 점차 제한되기 때문으로 평가됨.
- 연안오염퇴적물 표층에 해당하는 3 cm 내외에 생물활성촉진제를 주입하는 것이 유기오염물질 정화에 가장 효과적 이었음.
- 그림 IV-나-41(c)와 그림 IV-나-41(d)에서는 생물활성촉진제 주입 깊이에 따른 TS 및 VS 함량(g/kg) 변화를 각각 보여줌.
- 오염퇴적물의 TS 및 VS 함량 감소의 경우도 COD 함량의 경우와 같이 생물활성촉진제의 주입 깊이에 영향을 받았음. 오염퇴적물의 TS 및 VS 함량의 경우도 최대값은 COD 함량의 경우와 같이 생물활성촉진제 주입 깊이가 3 cm일 때 나타났음. 또한, 생물활성촉진제 주입 깊이가 깊어질수록 TS 및 VS 함량의 감소율은 점차 감소하였음. 그러나, COD 함량의 경우와는 달리 생물활성촉진제를 주입한 깊이 6 cm 및 10 cm에서도 1개월, 3개월 및 6개월에서 TS 및 VS 함량 감소현상을 계속하여 관찰할 수 있었음.
- 오염퇴적물에 생물활성촉진제를 주입하였을 때 나타난 TS 및 VS 함량이 COD 함량의 경우와 차이가 나는 것은 황산염환원반응에 의해 생성된 황화물에 의해 오염퇴적물의 산소요구량이 유기물의 분해에 필요한 산소요구량보다 크기 때문으로 사료됨. 따라서, 오염퇴적물에 함유된 유기오염물질 정화를 위해 주입한 생물활성촉진제의 영향은 COD 함량 뿐만 아니라 VS 또는 TS 함량변화 결과를 동시에 이용하여 평가하는 것이 바람직하다 할 수 있음.



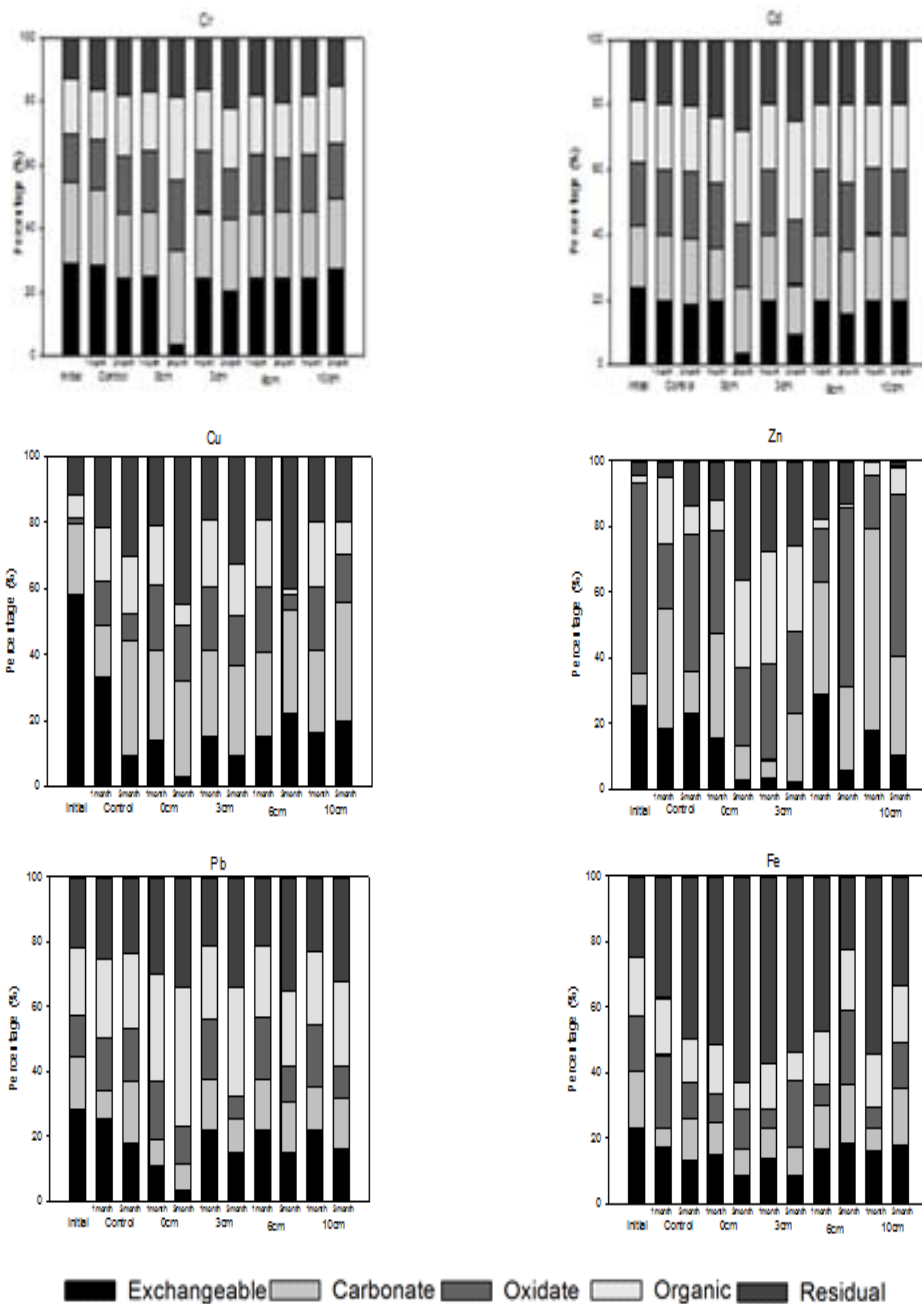


[그림 IV-나-41] 오염퇴적물 상부 해수의 pH 변화, 온도 및 생물활성촉진제 주입깊이에 따른 COD, TS and VS의 농도변화

㉠ 생물활성촉진제 주입깊이에 대한 중금속 안정화 특성

- 오염퇴적물에 주입한 생물활성촉진제의 깊이와 실험시간에 따른 중금속 분포형태 변화를 대조구와 함께 그림 IV-나-42(a-e)에 나타냄

- 중금속 존재형태는 대부분 생물활성촉진제 주입 깊이와 실험시간 경과에 따라 크게 변화하였음. 특히, 생물활성촉진제를 오염퇴적물의 표면에 주입한 경우 실험 시작 3개월 후에 철을 제외한 대부분 중금속들의 치환가능분율은 약 3% 내외로 크게 감소하였음(그림 IV-나-42).
- 실험관에 충전한 오염퇴적물의 표면에 생물활성촉진제를 주입한 경우 치환가능한 중금속 분율이 크게 감소한 것은 생물활성촉진물질과 높은 산화환원전위로 인한 미생물의 활성 증가에 기인하는 것으로 평가되지만 오염퇴적물의 표면이 해수와 접하고 있기 때문에 치환가능한 중금속 분율의 일부는 해수 중으로 용해되어 확산되었을 가능성도 있음.



[그림 IV-나-42] 생물활성촉진제 주입깊이에 따른 중금속 분포변화

- 실험에 사용된 초기의 오염퇴적물에 함유된 중금속들의 존재 형태 중에서 화학적으로 비교적 안정한 형태로 분류되는 유기물 결합분율(F4)과 광물내 잔류분율(F5)의 합은 Cr과

---

Cd의 경우 각각 30.4% 및 37.9% 이었고, Pb와 Fe는 각각 42.7% 및 42.6% 이었음. 그러나, Cu와 Zn의 유기물 결합분율(F4)과 광물내 잔류분율(F5)의 합은 각각 18.5%와 6.9%로서 상대적으로 낮았음.

- 오염퇴적물에 주입한 생물활성촉진제의 깊이가 오염퇴적물의 표면으로부터 3cm인 경우 3개월 후에 Cd, Cu, Zn, Pb, Fe에 대한 광물내 잔류분율(F5)과 유기물결합분율(F4)은 모두 증가하였으며, 그 합은 그림 IV-나-43에서 보여주는 바와 같이 각각 55.2%, 53.6%, 51.8%, 67.9% 및 62.4%로 크게 증가하였음. 이결과는 오염퇴적물에 생물활성촉진제를 주입하여 중금속의 이동성을 감소시킴으로서 오염퇴적물의 위해성을 저감시킬 수 있음을 나타냄.
- 유기물결합분율(F4)의 증가는 황산염환원균의 활성증가에 기인하는 것으로 판단됨. 미생물의 활성증가로 오염퇴적물에 함유된 유기물이 분해되면 유기물결합형 중금속들도 용출될 수 있지만 유기물 분해를 담당하는 미생물 중의 한가지인 황산염환원균은 환원조건에서 황화물을 생성시킴. 이때 생성된 황화물은 용출된 중금속들과 결합하여 금속황화물을 생성하는데, 금속황화물 형태의 중금속들은 화학적으로 비교적 안정한 형태로 분류됨 (Song et al., 2014).
- 오염퇴적물에 주입한 생물활성촉진제의 깊이가 10cm인 경우는 유기물 결합분율(F4)과 광물내 잔류분율(F5) 증가가 작았으며 대조구와 비슷하였음.
- 오염퇴적물에서 황산염환원균 등과 같은 미생물에 의한 생화학반응이 활발히 일어날 경우 중금속의 존재형태도 크게 변화하는 것으로 평가되었음.

### (3) 현장에서 생물활성촉진제의 효능지속성 평가

#### (가) 개발된 생물활성촉진제의 현장적용 시 활성촉진제의 효능 지속성 평가

- 개발된 생물활성촉진제를 투여한 Pilot-scale 장치를 현장에 적용하여 현재, 약 5개월 동안 진행되었으며, 유기물 저감 및 중금속 안정화에 대한 생물활성촉진제의 효능지속성을 평가 함.
- 실험방법 및 장치는 “나. 직경 1m 관형 pilot 시스템을 이용하여 개발된 생물활성촉진제의 효능 평가”와 같으며, 유기물과 PAHs 감량을 및 중금속 안정화에 대한 생물활성촉진제의 효능 지속성을 평가함.
- 현재까지 5개월 동안 실험이 진행되었으며, 총 12개월 동안 계속 평가 할 계획임.
- COD, TS 및 VS등으로 평가한 유기물 저감율은 5개월 동안 지속적으로 저감되는 것으로 평가되었음.
- 이전연구에서도 생물정화공법에서 해양저질에 생물활성물질을 적용하였을 때 COD 저감에 큰 효과를 보았다고 보고하였음(Colwell, 2002). 해양저질 내 함유된 유기물질은 해양저질 자생미생물에게 중요한 에너지원 즉 기질로 이용되므로 활성촉진물질이 제공된 저질 환경에서는 자생미생물의 활성 및 개체수를 증가시켜 저질 내 함유된 COD를 현저하게 저감 할 수 있음(Li et al., 2011).
- 중금속 안정화율은 활성촉진제를 주입하지 않은 대조군 및 초기와 비교 시 Cr, Cd, Cu, Zn, Pb와 Fe의 중금속이 중금속 분포형태가 F4 및 F5의 안정한 형태로 전환되었음.
- 중금속 형태들은 치환가능형태(Exchangeable form, F1), 탄산염결합형태(Carbonate bound form, F2), 산화물결합(Fe-Mn oxides bound form, F3), 유기물 결합(Organic bound form, F4) 그리고 잔류형태(Residual form, F5)로 분류됨(Lu et al., 2005). 일반적으로, 치환가능형태는 이동성이 크고 생물이용가능성이 높아 독성이 큰 반면에 잔류형태는 크리스탈 같은 격자모양의 토양광물질들 사이에 포함되어 있어 매우 안정하여 대부분

---

불활성을 나타냄(Lu et al., 2005). 탄산염결합 형태, 유기물 결합 및 철/ 망간 산화물 결합 형태는 잔류형태에 비해 결합력이 비교적 약하여 물리·화학적 해양퇴적환경조건에 따라 결합유무가 달라짐(Lu et al., 2005; Song et al., 2014).

- 모든 중금속 종류에서 치환가능형태가 감소하였고, 동시에 유기물결합 형태와 잔류형태가 증가하였음. 이는 토양 내 유기물질함량이 중금속의 이온화와 관련된 결정적인 요소이며, 유기물이 분해되어 중금속과 결합하여 유기물결합형태가 증가하는 것으로 판단됨(Lu et al., 2005). 즉, 토양속 유기물질은 치환가능형태의 중금속이온이 해리되는 것을 차단하며, Eillott et al, 1986과 Weng et al., 2002는 토양내 유기물질이 증가하면 치환가능한 환경 조건이나 산성 조건에서 중금속이 이온화되는 것을 감소시키는 효과가 있다고 보고하였음(Eillott et al, 1986; Weng et al., 2002).
- 또한, 해양퇴적토에 흔히 존재하는 황환원박테리아(Sulfate reducing bacteria: SRB)가 유기물을 분해하면서 발생하는 황화물이 치환가능한 중금속 형태와 결합하여 유기물결합 형태 분율이 증가되었을 가능성도 큼.
- 시간이 지남에 따라 이러한 불안정한 중금속 형태들의 분율이 더욱 감소하는 경향으로 나타났으므로 시간이 더욱 지나 최종 안정화 단계의 평형 분율은 더 낮게 유지될 수 있을 것으로 사료되었음.
- Pilot-scale의 최적화된 생물활성촉진제의 효능을 실험한 결과, 유기물 뿐만 아니라 중금속 안정화에도 지속적인 효능을 나타냈음을 검증하였음. 개발된 생물활성촉진제의 효능 지속성 평가는 향후 1년간 더 평가할 예정 임.

#### (4) 생물활성촉진제의 외부환경(저질 및 수질)인자에 대한 영향 평가

##### (가) 저질의 물리화학적 특성과 해수환경변화에 대한 영향 평가

- Pilot-scale(1m\*1m\*1m) 장치를 현장에 적용하여, 외부환경인자(수온, pH)에 대한 오염물질 저감에 미치는 영향을 평가 함.
- 최적화된 생물활성촉진제의 효율에 대한 저질 및 수질인자에 대한 수온 및 pH에 대한 효능을 검증하기 위하여 Pilot-scale의 현장실험을 통하여 평가 함.
- 실험이 진행되는 동안 현장에 설치한 Pilot 시스템 상부 해수의 pH는 계절에 상관없이 약 8.5내외로 비슷하게 유지되었으며, 수온은 계절적 영향(11월부터 5월)으로 약 18.3℃ ~ 22.2℃ 까지 다소 차이가 났음.
- 연안해역 온도범위는 기상조건에 영향을 받으며, 일반적으로, 겨울철 국내 바다의 바닥층 온도범위는 약 4~14℃(평균 9℃)이고, 여름철에는 약 11~26℃(평균 17℃)로 증가함(Jeong, et al., 2013). 또한, 표층과 저층수의 계절적 온도 차이는 성층현상이 뚜렷한 여름철 보다 수직적 혼합작용이 활발한 겨울철이 상대적으로 온도차가 적고, 육수의 유입이 많고 수심이 외해역에 비해 낮은 연안해역은 계절적 온도변화가 뚜렷함.
- 해양저질의 온도는 저질층과 접해있는 바닥층 해수 수온을 측정함으로써 쉽게 알 수 있으며, 바닥층 해수수온은 수심, 위도, 계절, 해수순환과 지형학적인 유역과 관련이 깊음. Pomeroy and Wiebe(2001)는 해양환경 내 서식하는 중속영양 미생물의 온도에 대한 활성을 실험한 결과, 낮은 온도에서 미생물의 활성이 확연히 낮았다고 보고하였음(Pomeroy and Wiebe, 2001).
- 계절적으로 수온변화가 있는 현장실험에서, COD 농도는 1개월(12월) 후 22.37g/kg을 감소하였으며, 2개월(1월), 3개월(3월), 5개월(5월) 후 17.65g/kg, 12.2g/kg, 10.6g/kg으로 수온 변화와 관계없이 초기 COD 25.37g/kg에 비해 크게 감소하였음.
- TS 농도와 VS 농도 또한, 1개월, 2개월, 3개월 및 5개월 후 시간이 지남에 따라 점차적

으로 크게 감소하여 해양 외부환경 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 평가되었음.

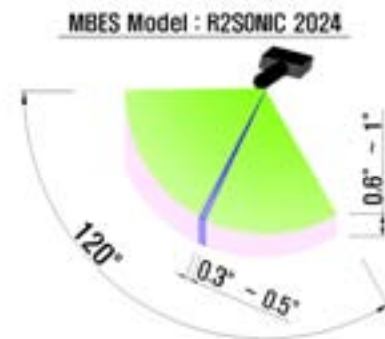
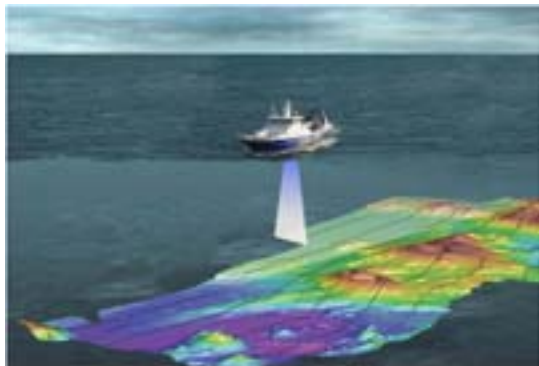
- 중금속의 안정화율은 모든 종류의 중금속에서 5개월 후 잔류분율(F5)이 가장 많았으며, 치환가능분율(F1)이 가장 낮았음.
- 저질 및 해수환경변화에 대한 생물활성촉진제의 효능 평가에서, 최적화한 생물활성촉진제를 투여한 오염퇴적물 샘플의 유기물질 저감 및 중금속 안정화는 약 5개월 동안 평가한 결과, 온도 및 pH등의 물리화학적 특성변화가 있는 현장상황에서도 효능 감소현상 없이 지속적으로 발휘되어 해양자생미생물의 활성을 촉진시킨 것으로 판단되었음.

#### 다. 현장 시험 시공 세부계획 수립

##### (1) 피복공법 적용대상 해역 현장 조사 및 시공 세부계획 수립

###### (가) 해저지형 조사 및 지형도 작성

- 멀티빔음향측심기를 이용하여 시험시공을 실시하기 전에 정밀 해저지형 조사를 수행하고 피복재 포설에 따른 지형변화를 관측하기 위해 계획을 수립함.
- 멀티빔음향측심기는 400kHz의 주파수 대역을 사용하여 천해역에 최적화 되어 있는 시스템으로 6mm의 수직해상력을 가지고 있어 고해상도의 자료를 획득 가능하고 모션센서를 연동하여 조사선박의 해상에서의 공간적 움직임(Roll, Pitch, Heave)에 의한 수심값의 오차를 실시간 보정, 자이로컴파스를 연동하여 조사선의 방위각 오차에 따른 위치를 실시간 보정, SV&P를 사용하여 수심별로 음속을 측정하여 정확한 수심 값 산정이 가능함.



[그림 IV-다-1] 해저지형조사 모식도와 소나헤드 빔 각도

###### ① 해저지형조사측선 계획

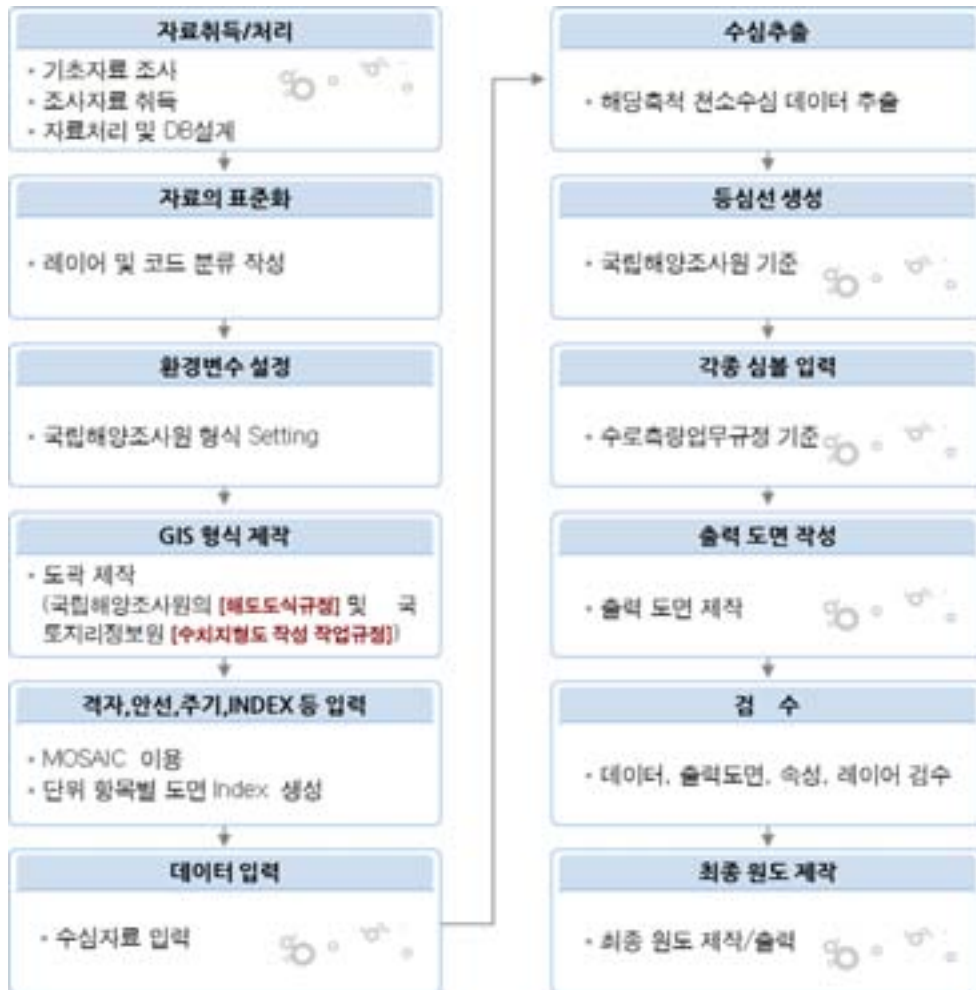
- 해저지형조사의 계획측선은 현장시공 예정구역 200mx200m과 200mx200m내 시험시공되는 25mx25m를 아래와 같이 각각 계획함.
- 해저지형조사는 자료의 품질향상을 위해 50% 이상 중첩조사가 되도록 측선을 설계함.

[표 IV-다-1. 구역별 계획측선]

구분	길이	간격	비 고
200m × 200m	240m	30m	9 Line
25m × 25m	90m	1.5m	4 Line

## ② 해저지형도 작성계획

- 본 과업에 적합한 레이어 분류체계를 가지는 GIS데이터베이스 형식의 자료를 항목별로 적합한 축척에 맞는 독과 자료 이용, 도면편집, 도면출력을 위한 작업 순으로 진행함.



[그림 IV-다-2] 도면제작 흐름도

### (나) 피복공법 현장시험시공 기본계획(지방서)작성

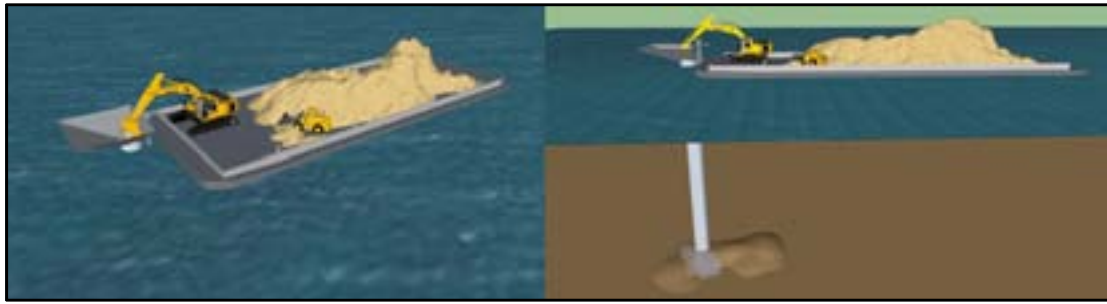
#### ① 시험시공 계획

- 700Φ 강관을 이용하여 1.5m - 2.0m 간격으로 이동하며 반응성 피복재와 모래 포설을 계획하였으며, 계획 포설높이는 다음과 같음.

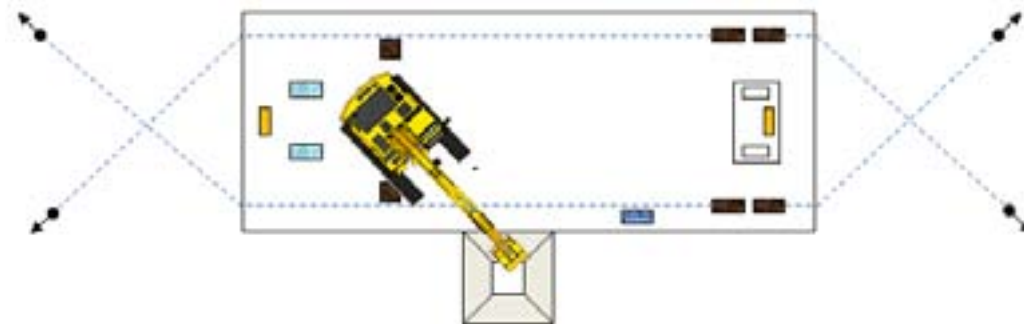
[표 IV-다-2] 포설높이

반응성 피복재(제올라이트)	모래
20cm	30cm

- 본 시험시공은 자유 낙하식 투하방식으로 기상영향에도 영향을 받지 않으며, 야간에도 작업이 가능한 특허기술을 활용하여 조류 등 해양물리현상에도 영향을 받지 않는 Pole pipe 투하공법을 이용하여 작업시간을 단축하고 반응성 피복재와 모래 유실이 적도록 계획함.



[그림 IV-다-3] 시험시공 모식도



[그림 IV-다-4] 작업바지선 평면도 (예시)

## ② 시험시공 절차

- 작업바지선은 예인선을 이용하여 작업구역에 이동한 후 작업바지선에 DGPS를 설치하여 투하지점에 정밀하게 위치를 고정함.
- 호퍼케이스와 폴 파이프를 작업바지선에 고정거치 시킨 후 시범 투하를 실시하여 지점당 계획 포설높이에 적절한 투하량을 산출하고 아래의 시공 순서도에 따라 반복 수행하여 시험시공을 실시함.



[그림 IV-다-5] 시공 순서도

라. 해역에 대한 피복 공법 소규모 적용

(1) 피복 포설 및 유지관련 소규모 현장 적용

(가) 피복공법 적용성 평가를 위해 소규모(25m×25m) 현장 피복시험(피복포설형상 및 침식 분석) 및 모니터링

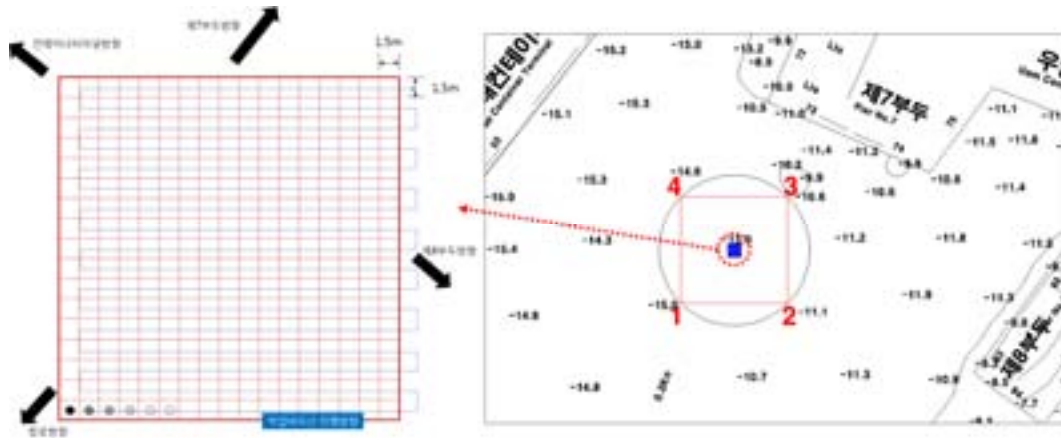
① 시험시공

- 시험시공은 2015년 3월 5일부터 3월 9일까지 총 5일간 수행되었으며, 1.5m 간격으로 소형 굴삭기 1버킷씩(0.8m<sup>3</sup>) 투하하여 총 289지점에 포설을 수행하였다.

[표 IV-라-1] 시험시공 내용

구분	내용	비고
작업면적	625 m <sup>2</sup>	25 m x 25 m
작업거리	450 m	
총 투하지점수	289 point	17 x 17
투하 및 이동간격	1.5 m	
반응성 피복재 포설물량	125 m <sup>3</sup>	25 m x 25 m x 20 cm
모래 포설물량	188 m <sup>3</sup>	25 m x 25 m x 30 cm
반응성 피복재 투하시간	3분	
모래 투하시간	1.5분	
투하후 이동 및 위치고정 시간	5분	





[그림 IV-라-1] 포설간격 및 이동

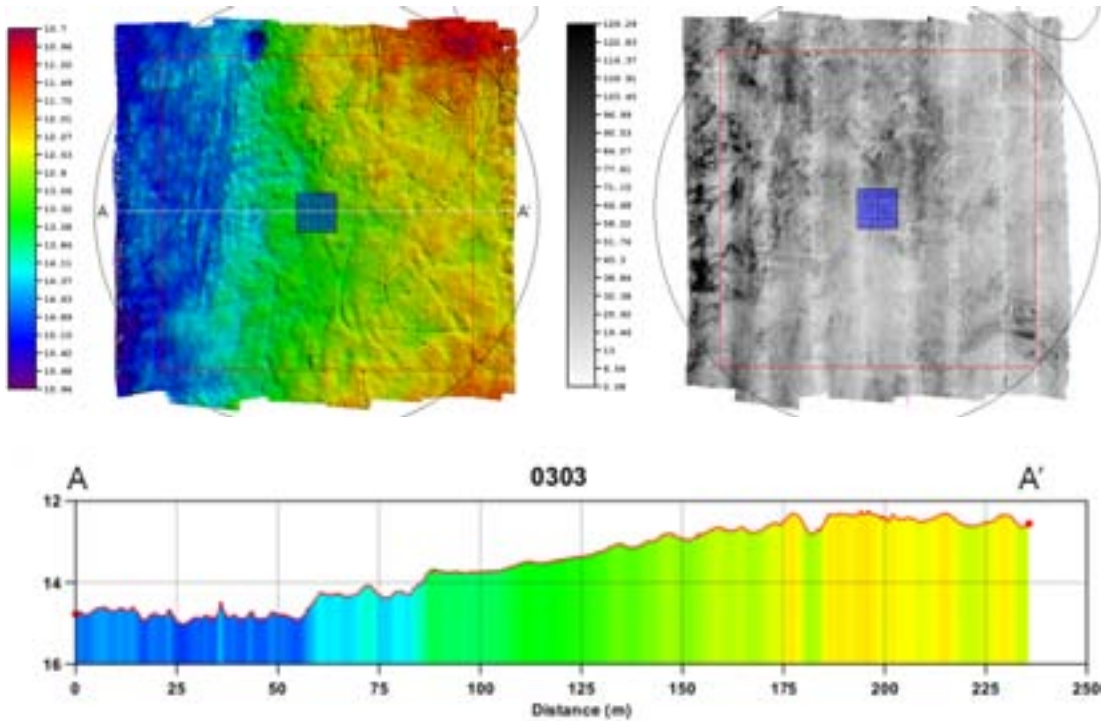


[그림 IV-라-2] 포설작업

② 해저지형조사 결과

㉠ 사전조사 결과

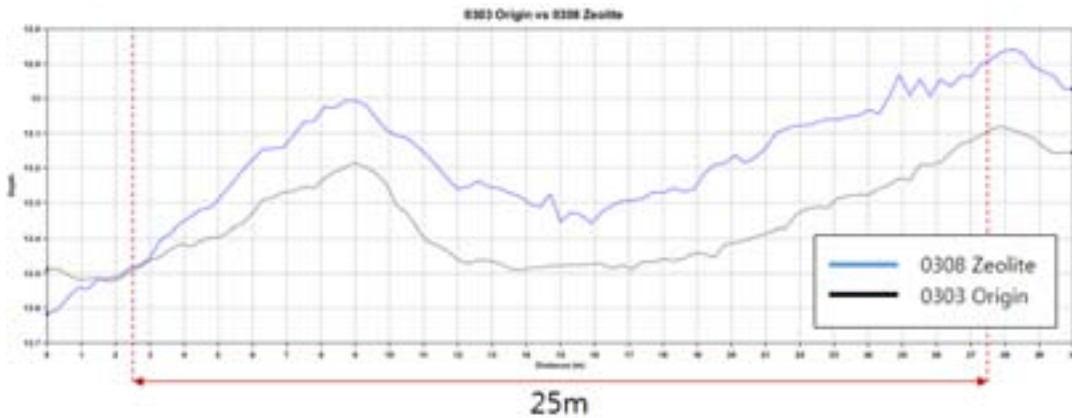
- 2015년 3월 3일 시험시공 전에 사전조사를 실시하여 원지반 데이터를 수집하였으며, 시험시공 구역의 우측에서 좌측으로 갈수록 수심이 깊어지는 지형이나 차이가 심하지 않아 완만히 경사지는 지형인 것을 알 수 있음.



[그림 IV-라-3] 멀티빔음향측심기 해저지형조사결과 [해저지형(좌), 해저면영상(우)]

㉔ 반응성 피복재(제올라이트) 포설결과

- 반응성 피복재(제올라이트)의 포설은 2015년 3월 5일부터 3월8일 오전까지 총 4일에 걸쳐 투하하여 포설을 완료함.

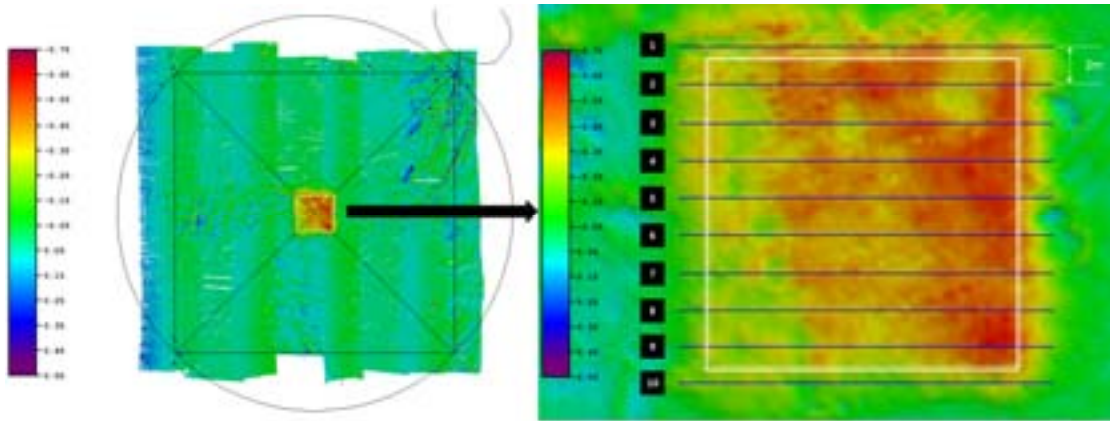


[그림 IV-라-4] 반응성 피복재 포설결과 횡단면도(3월 8일)

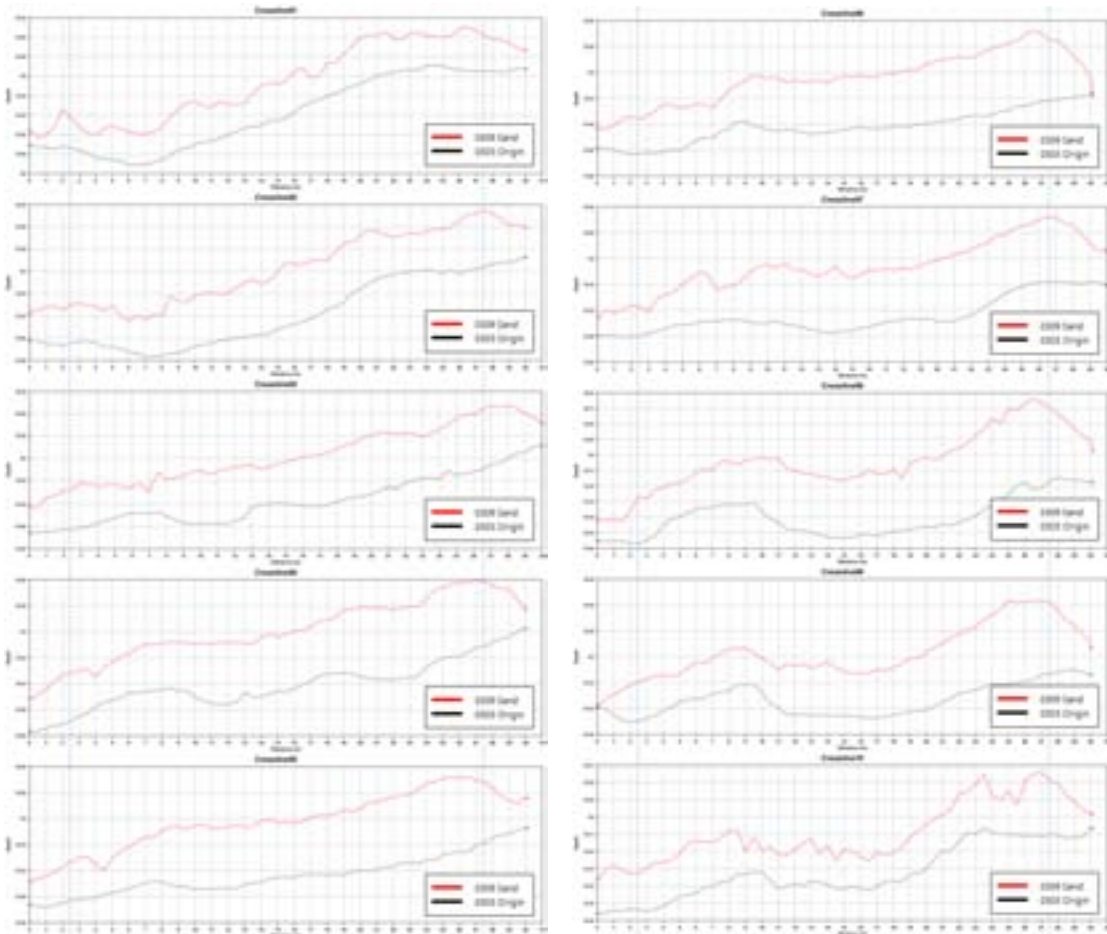
㉕ 모래 포설결과

- 모래 포설은 2015년 3월 8일 오후부터 3월 9일 오후까지 총 1일에 걸쳐 투하하여 포설을 완료함.
- 해저지형조사 이후 분석결과 평균 50cm의 포설상태를 보여주고 있으며, 최소 40cm, 최대 70cm까지 차이를 보이고 있음.

- 시험시공 구역의 좌측편에 수심이 깊어지는 경사진 해저지형으로 포설시 경사진 지형을 따라 슬라이딩 현상이 있는 것으로 판단됨.



[그림 IV-라-5] 원지반과 모래 포설 데이터 비교



[그림 IV-라-6] 횡단면도

(2) 피복공법 현장 적용에 따른 장기 안정성 검토(침식 해석)

(가) 실험조건

- 본 연구에서 적용한 실험조건은 3차년도 실내실험조건 및 현장적용 후보지 조건을 적용

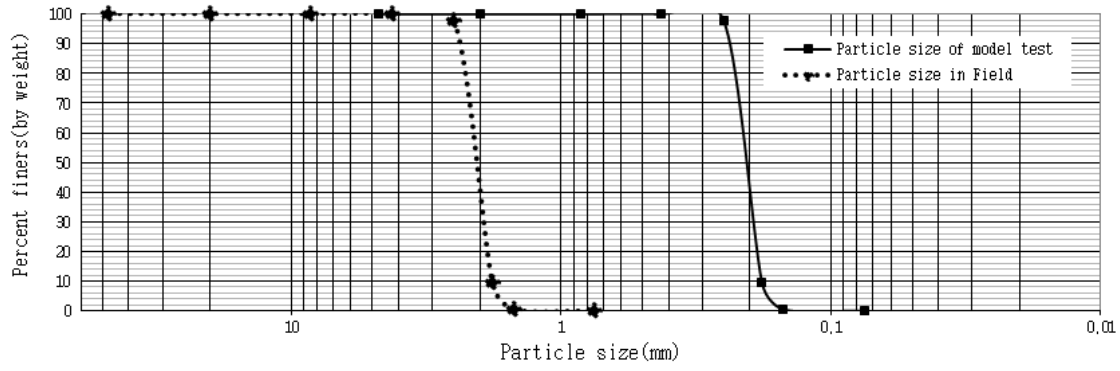
하였음.

- 수심은 12m, 파랑조건은 상세역 파랑변형해석 결과 연구대상 항내 수역에서 SE방향 50년빈도의 파고 내습 시 1.00 m, 10년빈도 파고 내습 시 0.65 m 규모의 파고가 계산되었음.
- 50년 빈도조건보다 더 극단적인 조건을 상정하기 위하여 파고조건은 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 m 을 적용하였음.
- 본 연구에서는 피복공법 현장 적용성을 분석하기 위해 실험축척 1:10의 수리모형실험을 실시하였고 조파수로의 제원은 길이 56 m, 폭 1 m, 깊이 2 m이며, 피스톤식 조파기가 한쪽 끝단에 설치되어 있음.
- 실험과 주기는 대상해역에서 자주 계측되는 대표 주기인 10초(모형실험상 3.16초)를 적용 하였으며, 본 실험에서 적용한 실험조건은 다음과 같음.

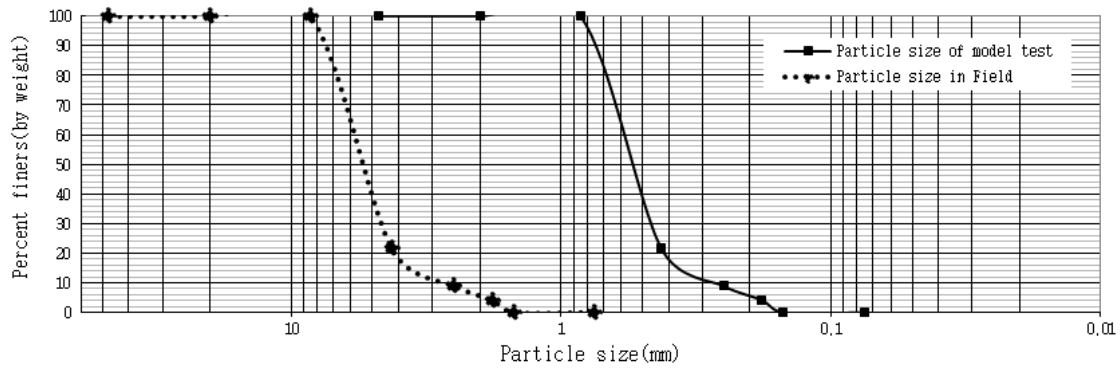
[표 IV-라-2] 입사파 특성

Case	현장조건		모형실험 조건	
	주기 (sec)	파고 (m)	주기 (sec)	파고 (m)
RE-T10H0	10	1.0	3.16	0.10
RE-T10H1	10	1.5	3.16	0.15
RE-T10H2	10	2.0	3.16	0.20
RE-T10H3	10	2.5	3.16	0.25

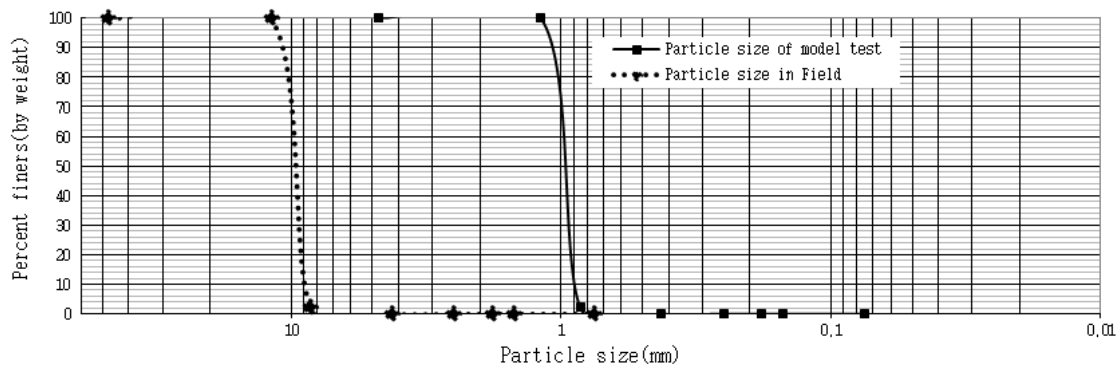
- 일반적으로 피복재 포설 시 오탁발생이 미미하고 수중에서 안정된 피복두께를 확보할 수 있는 조립질 재료를 피복재료로 많이 사용함(Palermo et al., 1998). 본 연구에서는 유속 과 피복재 입자크기 변화에 따른 영향을 보기 위하여  $D_{50} \approx 0.2$  mm,  $D_{50} \approx 0.5$  mm,  $D_{50} \approx 1.0$  mm 의 모래를 사용하였음.



(a)  $D_{50} = 0.21$  mm



(b)  $D_{50} = 0.54$  mm



(c)  $D_{50} = 0.96$  mm

[그림 IV-라-7] 피복재 3 종류의 입도분포

[표 IV-라-3] 입경, 파고에 따른 실험조건(모형실험 조건)

Case	D <sub>50</sub> , (Mean diameter of sand, mm)	Wave height (m)	Cap thickness (m)	Depth of water (m)
A-1	0.21	0.0	0.11	1.2
A-2	0.21	0.1	0.11	1.2
A-3	0.21	0.15	0.11	1.2
A-4	0.21	0.20	0.11	1.2
A-5	0.21	0.25	0.11	1.2
B-1	0.54	0.0	0.11	1.2
B-2	0.54	0.1	0.11	1.2
B-3	0.54	0.15	0.11	1.2
B-4	0.54	0.20	0.11	1.2
B-5	0.54	0.25	0.11	1.2
C-1	0.96	0.0	0.11	1.2
C-2	0.96	0.1	0.11	1.2
C-3	0.96	0.15	0.11	1.2
C-4	0.96	0.20	0.11	1.2
C-5	0.96	0.25	0.11	1.2

- 수조 안에는 높이 0.3m, 길이 6 m의 아크릴 눈금을 삽입하여 육안으로 침식깊이를 확인 할 수 있게 하였고 강사기는 수조의 3.1 ~ 3.6 m 구간에 고정하여 위치시켰으며 수조 내부에 LED 조명등을 설치하여 피복재 형상 및 눈금 확인을 용이하도록 조치하였음.

(나) 유속과 침식 해석

- 파고변화에 따른 수로 내의 유속에 대해서는 실측 외에 선형파 이론식으로 추정할 수 있으며, 다음 식과 같음(Dean and Dalrymple, 2002).

$$u = \frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{L}\right)(h+z)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}\right)h} \right] \quad (1)$$

여기서, u는 수평방향 유속(m/s), H는 파고(m), h는 전체수심(m), T는 주기(sec), L은 파장(m), z는 측정위치에서의 수심(m)

- 파고에 따른 심도별 유속을 식 (1)에 따라 계산하면 다음과 같음.

[표 IV-라-4] 이론식을 이용한 파고에 따른 유속변화  
(수면에서 z=0, 수심 1.2 m에서 z=-1.2)

z(m)	u(%)				
	H=0.1 m	H=0.15m	H=0.2 m	H=0.25 m	H=0.30 m
0	0.156	0.233	0.311	0.389	0.467
-0.5	0.131	0.197	0.263	0.329	0.394
-1.0	0.121	0.180	0.241	0.301	0.362
<b>-1.1</b>	<b>0.120</b>	<b>0.180</b>	<b>0.240</b>	<b>0.300</b>	<b>0.359</b>
-1.2	0.120	0.180	0.239	0.299	0.359

[표 IV-라-5] 이론식을 이용한 파고에 따른 유속변화  
(수면에서  $z=0$ , 수심 1.2 m에서  $z=-1.2$ )

z(m)	u(m/s)				
	H=0.1 m	H=0.15m	H=0.2 m	H=0.25 m	H=0.30 m
0	0.156	0.233	0.311	0.389	0.467
-0.5	0.131	0.197	0.263	0.329	0.394
-1.0	0.121	0.180	0.241	0.301	0.362
<b>-1.1</b>	<b>0.120</b>	<b>0.180</b>	<b>0.240</b>	<b>0.300</b>	<b>0.359</b>
-1.2	0.120	0.180	0.239	0.299	0.359

- 파고변화에 따른 모형실험 유속계측 결과는 아래 표와 같이 나타났는데, 유속계측결과는 이론식에 의한 유속과 유사하게 바닥면에서부터 해수면으로 심도가 감소할수록 유속은 점점 증가하는 경향을 보임.

[표 IV-라-6] 유속계를 이용한 유속 계측

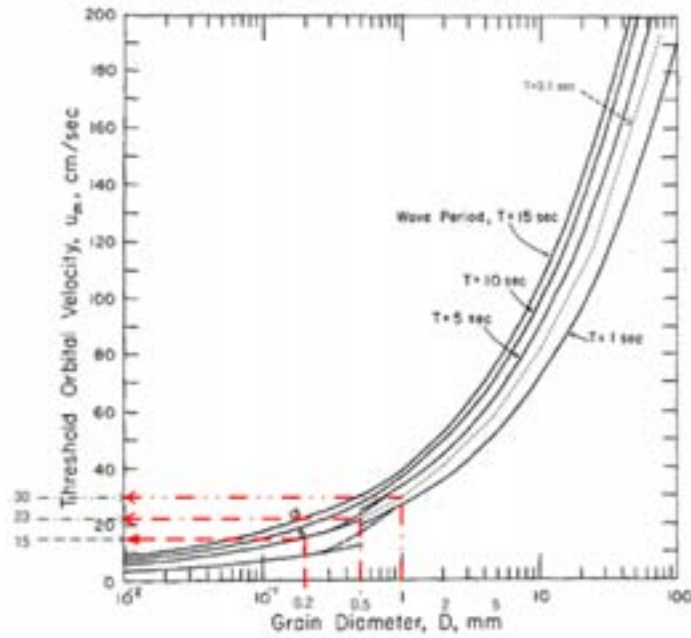
Depth from water surface	H=0.1 m	H=0.2 m	H=0.25 m	H=0.30 m
z(m)	u(m/s)	u(m/s)	u(m/s)	u(m/s)
-1.000	0.130	0.239	0.319	0.391
-1.025	0.113	0.239	0.315	0.383
-1.050	0.108	0.215	0.293	0.362
-1.075	0.116	0.227	0.297	0.365
<b>-1.100</b>	<b>0.121</b>	<b>0.239</b>	<b>0.310</b>	<b>0.383</b>
-1.125	0.113	0.239	0.302	0.370
-1.150	0.108	0.215	0.276	0.353
-1.175	0.112	0.211	0.285	0.349
-1.120	0.108	0.211	0.276	0.334

- 모형실험 유속계측과 이론식을 비교하면 아래 표와 같이 나타나며, 이론식을 이용한 유속 추정이 실제 유속과 근사한 값을 보이고 있어 향후 유속 예측에 활용이 가능함.

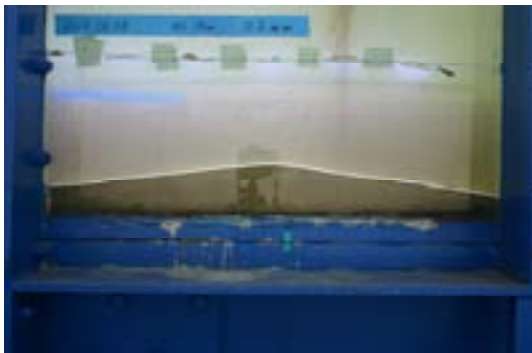
[표 IV-라-7] 파고 변화에 따른 유속의 이론 및 실측값의 비교

Depth from water surface	H=0.1 m		H=0.2 m		H=0.25 m		H=0.30 m	
	이론식	실측값	이론식	실측값	이론식	실측값	이론식	실측값
z(m)	u(m/s)		u(m/s)		u(m/s)		u(m/s)	
-1.000	0.121	0.130	0.241	0.239	0.301	0.319	0.362	0.391
-1.025	0.120	0.113	0.241	0.239	0.301	0.315	0.361	0.383
-1.050	0.120	0.108	0.240	0.215	0.300	0.293	0.360	0.362
-1.075	0.120	0.116	0.240	0.227	0.300	0.297	0.360	0.365
<b>-1.100</b>	<b>0.120</b>	<b>0.121</b>	<b>0.240</b>	<b>0.239</b>	<b>0.300</b>	<b>0.310</b>	<b>0.360</b>	<b>0.383</b>

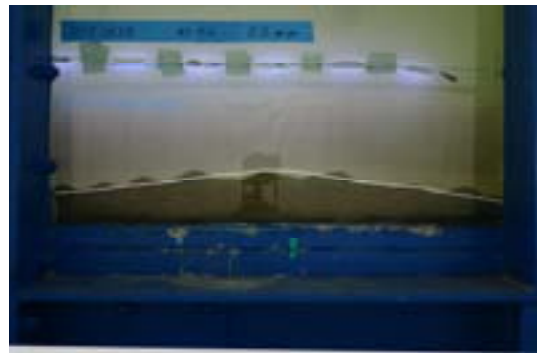
- Komar and Miller(1974)는 주기적으로 파랑이 작용하는 조건하에서 침식에 관한 실험결과를 정리하여 다음과 같은 그래프를 제시하였으며, 침전물 침식이 발생하는 한계속도  $u_m$ 을 제시하고, 이보다 유속이 빠르면 침전물 침식이 발생함.
- $D_{50} = 0.21$  mm 의 경우, 파고 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 m 를 적용한 후 촬영한 피복재의 형상을 살펴보면 파고 0.2 m에서 침식이 발생하고 파고 0.15 m에서는 침식이라고 보다는 형상 변화에 가까움.



[그림 IV-라-8] 주기적 파랑에 따른 침전물의 이송(Komar and Miller, 1974)



(a) 파고 0.1 m 적용 후



(b) 파고 0.15 m 적용 후



(c) 파고 0.2 m 적용 후

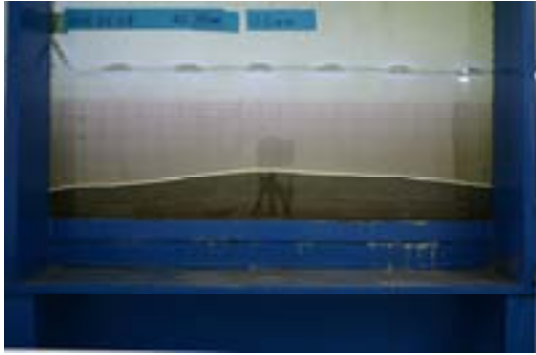


(d) 파고 0.25 m 적용 후

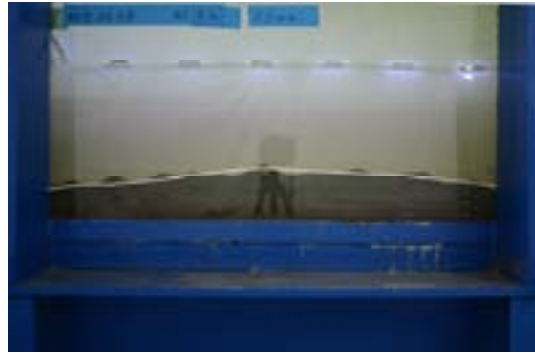
[그림 IV-라-9]  $D_{50}=0.21$  피복재를 사용한 침식 실험 결과

○  $D_{50} = 0.54$  mm 의 경우, 파고 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 m 를 적용한 후 촬영한 피복재의 형상을 살펴보면  $D_{50} = 0.21$  mm 의 경우와 유사하게 파고 0.2 m에서 침식이 발생하고, 파고 0.15 m에서는 침식이라고 보다는 형상 변화에 가까움





(a) 파고 0.1 m 적용 후



(b) 파고 0.15 m 적용 후



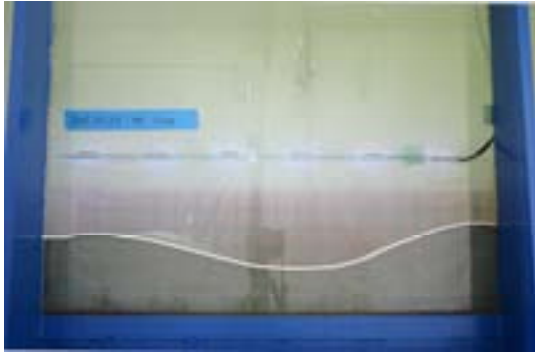
(c) 파고 0.2 m 적용 후



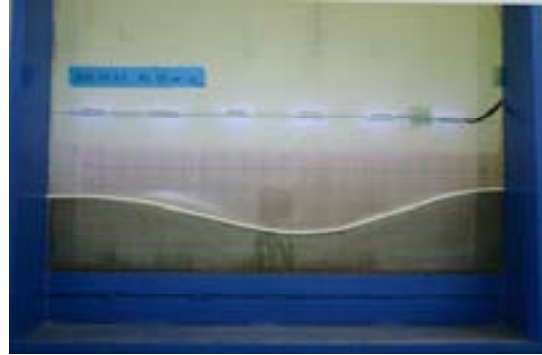
(d) 파고 0.25 m 적용 후

**[그림 IV-라-10]  $D_{50}=0.54$  피복재를 사용한 침식 실험 결과**

- $D_{50} = 0.96$  mm 의 경우, 파고 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 m 를 적용한 후 촬영한 피복재의 형상을 살펴보면 파고가 0.25 m에서 침식이 발생함.
-



(a) 파고 0.1 m 적용 후



(b) 파고 0.15 m 적용 후



(c) 파고 0.2 m 적용 후



(d) 파고 0.25 m 적용 후

[그림 IV-라-11]  $D_{50}=0.96$  피복재를 사용한 침식 실험 결과

#### (다) 소결

- 피복재 장기 안정성 검토를 위해서는 피복재가 포설된 해저의 유속 예측이 중요하며, 해저 유속에 대한 이론식과 실측값을 비교한 결과 유사하게 나타났으므로, 이론식으로도 충분히 해저 유속 예측이 가능한 것으로 판단됨.
- Komar and Miller(1974)은 침전물의  $D_{50}$ 을 가지고 침식이 발생하는지 여부를 판단할 수 있는 그래프와 한계유속( $um$ )을 제시하였고,  $D_{50}$ 이 0.21, 0.54, 0.96 mm일 때 한계유속은 각각 15, 23, 30 cm/sec로 이보다 큰 유속에서 침전물 침식이 발생할 것으로 예상함.
- 모형실험 결과를 살펴보면, 피복재 입경별( $D_{50}=0.21$  mm,  $D_{50}=0.54$  mm,  $D_{50}=0.96$  mm)로 파고 변화(0.1, 0.15, 0.2, 0.25 m)에 따른 침식 여부를 확인한 결과,  $D_{50}=0.96$  mm를 사용한 경우에는 0.25 m의 파고조건에서만 침식이 발생하고,  $D_{50}$ 이 0.21 mm와 0.54 mm에서는 0.2 m의 파고에서 침식이 발생한 것으로 관측됨.
- 피복재  $D_{50}=0.21$  mm의 경우, 파고가 0.15 m인 조건에서 수심 1.1m 지점의 유속(18 cm/s)은 한계유속(15 cm/s)을 초과하지만, 표면에서 형상 변화(ripple)이 다소 발생하였을 뿐 뚜렷한 침식의 징후는 관측되지 않았으며, 파고가 0.2 m에서 뚜렷한 침식이 발생하는 것으로 관측됨.
- 피복재  $D_{50}=0.54$  mm의 경우에는 파고가 0.20 m인 조건에서 수심 1.1m 지점의 유속(23.9 cm/s)은 한계유속(23 cm/sec)과 유사하지만 피복재  $D_{50}=0.21$  mm과는 다르게 침식이 발생하였음.
- 따라서 Komar and Miller(1974)의 그래프 경계선 상의 유속에서는 표면에서 형상변화(ripple)가 발생하고 한계유속 보다 1.2배 큰 유속에서 침식이 발생한다고 판단되지만 추

가적인 연구가 필요함.

- 현장에서는 10년 빈도의 환경외력(파고 0.65 m, 주기 10초, 수심 12m, 파장 99.6 m)을 고려하여 한계유속을 계산하면 약 24cm/s로 D50이 0.3 mm인 피복재를 사용하여 시험시공을 수행함.

**예시) 피복재 유효입경(D<sub>50</sub>) 산정 방식**

1. 피복재에 작용하는 유속계산

$$u = \frac{H}{2} \frac{2\pi}{T} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{L}(h+z)\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)} \right] = \frac{0.65}{2} \frac{2\pi}{10} \left[ \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{99.6}\right)(12-11)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{99.6}\right)*12} \right] = 0.24 \text{ m/sec} \approx 24 \text{ cm/s}$$

[H(파고)=0.65 m, T(주기)=10 sec, L(파장)= 99.6 m, h(수심)=12 m, z(피복재 포설 심도)=-11 m]

2. Komar and Miller(1974)의 도표에서 한계유속 24 cm/s를 만족하는 D<sub>50</sub>은 0.3 mm

**(3) 피복재 포설 최적화 시공 방안 마련**

- 국내에서는 피복재 전용 선박을 보유하고 있지 않은 관계로 경제성과 실현 가능성을 고려하여 피복공법 시공에 필요한 장비는 가급적 준설에 사용된 장비의 활용 방안을 검토함.
- 피복재를 포설하기 위해서는 해저면 가까이에서 피복재를 포설하는 공법과 해상에서 작업 중 위치를 고정할 수 있는 선박이 필요함.
- 일반적으로 준설에 사용되는 버킷 준설선은 해저면에 근접하여 피복재 포설이 가능하기에 설계 두께를 만족하도록 시공이 가능하지만 버킷 준설선은 포설작업 중에 해상에서 움직임을 최소화하여 피복재를 포설하기에는 어려움이 발생함.
- 피복재 포설작업 중에 선박의 움직임을 최소화하는 Setting 바지선이 가장 효과적이며, 해저면에 근접하여 피복재를 포설하기 위해 수중으로 수직 파이프(fall pipe)를 바지선에서 제작하여 측면에 거치하는 방안을 마련함.
- 또한, 피복재를 포크레인로 이송하여 fall pipe에 투하하기 위해 fall pipe 상단에는 호퍼케이스를 제작하여 부착하였으며, 최종적으로 깔대기 형상의 피복재 포설 장치를 고안함.



[그림 IV-라-12] 피복재 포설 최적화 시공 방안

- fall pipe 제작에 유의사항은 피복재를 호퍼케이스에 대량으로 투하하면 파이프 내에 압력(피스톤 압력)이 발생하여 피복재 침강이 지연되는 문제가 발생하므로 파이프 주변부에 피복재 유실이 발생하지 않도록 소구경의 구멍을 뚫어 압력을 소산시켜 침강 지연을 방

지함.

- 결론적으로 Setting 바지선에 DGPS를 설치하여 1.5 m 간격으로 정밀 이동, 포설 중에는 정지상태에 가까운 위치 고정, 호퍼케이스와 fall pipe를 이용한 피복재 포설 장치를 포함한 피복공법 시공 방안을 마련함.

#### 마. 현장시험·조사

##### (1) 현장모사를 위한 컬럼 및 수조 실험에 필요한 오염해역 해양퇴적물 채취 (인천 I항)

##### (가) 해양퇴적물 조사 및 샘플링

- 오염퇴적물은 인천 I항의 오염퇴적물을 채취(37°29' 38.25" N, 126°37' 33.35" E)하였으며, 습시료는 풍건후 체를 이용하여 이물질을 분리하여 실험 및 분석에 사용하였음.
- 오염퇴적물의 연속추출방법은 A.Tessier(1979)의 방법을 사용하였고, 다른 분석 항목들은 해양공정시험방법에 준해 분석되었음.



[그림 IV-마-1] 오염퇴적물 샘플링(I항)

##### ① 해양오염퇴적물 내 물리화학적 특성 분포

- I항 해양오염퇴적물은 약 알칼리성의 펄 특성이 아주 강한 물리적 특성을 보여주고 있음.
- 유기물 지표들인 강열감량(IL) 4.8%, 총 유기탄소(TOC)는 1.16%, 화학적 산소요구량(COD)는 30.20 g/kg으로 나타났음.
- 영양염류 지표인 총질소(T-N)과 총인(T-P)는 각각 0.13%와 0.071 g/kg으로 나타났음

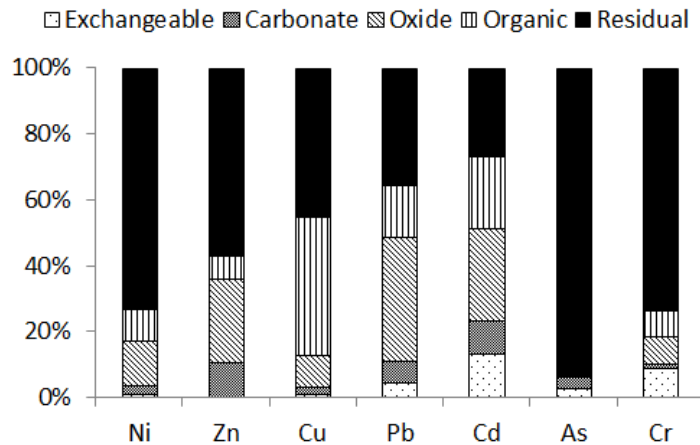
[표 IV-마-1] I항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	Values
pH	8.08
Silt-Clay (%)	95.5
Water Contents (%)	51.3
IL (%)	4.8
COD (g/kg)	30.20
TOC (%)	1.16
T-N (%)	0.13
T-P (g/kg)	0.071

- 퇴적물 중 Ni, Zn, Cu, Cd, As, Cr 이 기준 1를 초과하고 있는 것으로 나타남(표 IV-마-2).
- 그림 IV-마-2는 I항의 해양오염퇴적물 내 중금속 존재 비를 나타내고 있음.
- 기존 참고문헌을 보면, 가장 안정한 상태를 보이고 있는 residual(광물)형태는 As, Ni, Cr, Zn, Cu 가 약 50% 이상을 차지하고 있는 것을 알 수 있음.
- 가장 용출되기 쉬운 Exchangeable(이온교환)과 Carbonate(탄산염) 형태는 Pb, Cd 및 Cr 에서 비교적 높은 존재비를 보이고 있음.

[표 IV-마-2] 오염퇴적물의 중금속 오염 특성

Sediment	Values	기준(기준1-기준2)
Ni	57.9	23-52
Zn	219.6	200-410
Cu	92.1	24-108
Pb	26.1	50-220
Cd	1.4	0.68-4.21
As	9.3	9-41.6
Cr	82.5	80-370



[그림 IV-마-2] 항 해양퇴적물 내 중금속 존재 형태 특성

(2) 현장 처리기술 개발을 위한 해역 퇴적물 시료 채취(마산 N항)

(가) 시험대상 해역퇴적물의 시료채취

① 대상해역 조사

- 조사해역 개요
  - 대상해역: N해역
  - 조사기간: 2014년 8 월 21 일
  - 조사정점 상세자료 (표 IV-마-1)
  - 주요 오염 물질: 유기물, 중금속 오염
  - 시료 특성: Silt질 우세

○ 조사 방법

- 조사지역 표층 퇴적물의 퇴적물 특성 및 현장 처리기술 시험을 위하여 그랩 퇴적물 채취기(Grab sampler)를 이용하여 시료를 채취
- 125  $\mu\text{m}$  이하의 처리대상 시료준비를 위하여 wet sieve를 실시함  
(2차년 결과 참고: 125  $\mu\text{m}$  이하의 분율 94.28 %, 125  $\mu\text{m}$  이상의 분율 5.72%)

## ② 분석항목 및 분석방법

- 분석항목
  - 일반항목: 함수율, 입도, 총 유기탄소(TOC), 총 질소(TN), 총 인(P)
  - 부영양화 정화지수(CIET: Clean-up Index, Eutrophication) 관련 항목: 화학적 산소요구량(COD), 산 휘발성황화물(AVS), 강열감량(IL)
  - 유해화학물질 정화지수(CIHC: Clean-up Index, Harmful chemicals) 관련 항목: 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd)등
- 분석방법 : 해양환경공정시험기준에 준하여 분석함
- 조대입자(>125  $\mu\text{m}$ ) 분리 시 정화처리 효과 평가

### (나) 대상해역 해역퇴적물 특성 평가 (Site characterization)

#### ① 부영양화 정화지수 및 유기물 관련 오염물질의 분포특성(해양수산부, 2013)

##### ㉠ 강열감량 (Ignition Loss, IL)

- N 해역의 IL의 농도분포는 8.8 - 10.8 %의 범위였으며 평균  $9.9 \pm 0.8$  %인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과(12.8 %)에 비하여 22.3 % 낮았으며, 부영양화 관련 평가항목의 기준농도인 15 %이하로 나타났다.

##### ㉡ 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD)

- N 해역의 COD의 농도분포는 39.6 ~ 42.9 %의 범위였으며 평균  $41.0 \pm 1.4$  %인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과(42.14%)에 비하여 2.6 % 낮았으며, 부영양화관련 평가항목의 기준농도 중 40 %이상 이었다.

##### ㉢ 산 휘발성황화물 (Acid Volatile Sulfide, AVS)

- N 해역의 AVS의 농도분포는 3.95 - 4.28 mg/g의 범위였으며 평균  $4.14 \pm 0.14$  mg/g인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과(42.14 %)에 비하여 2.6% 낮았으며, 부영양화관련 평가항목의 기준농도 중 5미만이였다.

##### ㉣ 기타 유기물 농도 (총 유기탄소 (TOC), 총 질소(TN), 총 인(N))

- TOC: N 해역의 TOC의 농도분포는 2.2 - 2.6 %의 범위였으며 평균  $2.4 \pm 0.2$  %인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과인 2.2 - 2.7 ( $2.5 \pm 0.3$ ) %에 비하여 1.8 % 낮은 값이였다.
- TN: N 해역의 TN의 농도분포는 0.2 - 0.2 mg/g의 범위였으며 평균  $0.2 \pm 0.0$  %인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과인 0.25 - 0.26 ( $0.26 \pm 0.26$ ) %에 비하여 29.7 % 낮은 값이였다.
- N 해역의 TP의 농도분포는 1000 - 1011 %의 범위였으며 평균  $1006 \pm 4$  mg/kg인 것으로 나타났다.

---

② 유해화학물질 정화지수 관련 오염물질의 입자별 농도분포(해양수산부, 2013)

㉠ 크롬(Cr)

- N 해역의 Cr의 농도분포는 49.1 - 51.6 mg/kg의 범위였으며 평균 49.9 mg/kg인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과(67.7 - 73.1 (69.8 ± 2.9) mg/kg)에 비하여 28.6 % 낮았다
- N해역의 니켈(Ni) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준 중 기준 1 (80 mg/kg) 이하였다.

㉡ 니켈(Ni)

- N 해역의 퇴적물의 니켈(Ni)의 농도 분포는 24.6 - 25.3 mg/kg의 범위였으며 평균 25.0 mg/kg인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과 30.8 - 33.8 (32.0 ± 1.6) mg/kg에 비하여 19.2 % 낮았다.
- N해역의 니켈(Ni) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준 중 기준 1 (23 mg/kg)을 초과하지 만 기준 2 (52 mg/kg) 미만으로 나타남

㉢ 구리(Cu)

- N 해역의 퇴적물의 구리(Cu)의 농도 분포는 96.0 - 101.1 mg/kg의 범위였으며 평균 98.6 mg/kg인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과 92.4 - 101.5 (97.8 ± 4.8) mg/kg에 비하여 5.6 % 낮았다.
- N해역의 구리(Cu) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(24 mg/kg)를 초과하는 것으로 나타남

㉣ 아연(Zn)

- N 해역의 퇴적물의 아연(Zn)의 농도 분포는 401.0 - 409.7 mg/kg 범위였으며 평균 405.4 mg/kg인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과 395.2 - 468.6 (437.0 ± 37.7) mg/kg에 비하여 7.7 % 낮은 값이었다.
- N해역의 아연(Zn) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(210 mg/kg)를 초과함

㉤ 비소(As)

- N 해역의 퇴적물의 비소(As)의 농도 분포 9.1 - 9.7 mg/kg 범위였으며 평균 9.4 mg/kg 인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과 11.6 - 13.1 (12.5 ± 0.8) mg/kg mg/kg에 비하여 23.0 % 낮은 값이었다.
- N해역의 비소(As) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(9 mg/kg)을 초과하였다.

㉥ 카드뮴(Cd)

- N 해역의 퇴적물의 카드뮴(Cd)의 농도 분포는 0.9 - 1.0 mg/kg 범위였으며 평균 0.9 mg/kg인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과 1.4 - 1.6 (1.5 ± 0.1) mg/kg mg/kg에 비하여 37.3 % 낮은 값이었다.
  - N해역의 카드뮴(Cd) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(0.68 mg/kg)을 초과하였다.
-

㉔ 납(Pb)

- N 해역의 퇴적물의 납(Pb)의 농도 분포는 72.6 - 77.7 mg/kg 범위였으며 평균 75.2 mg/kg인 것으로 나타났다. 이는 3차년 결과 7.1 - 83.0 (79.3 ± 3.3) mg/kg mg/kg에 비하여 5.2 % 낮은 값이었다.
- N해역의 납(Pb) 농도는 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1 (50 mg/kg)을 초과하였다.

[표 IV-마-3] 대상시료의 부영양화 정화지수 및 유기물 관련 오염물질의 분포특성

	COD	IL	TOC	TN	TP	AVS
Unit	(mg/g)	(%)	(%)	(%)	(mg/kg)	(mg/g)
1	39.6	8.8	2.6	0.2	1000	3.95
2	40.6	10.2	2.5	0.2	1011	4.20
3	42.9	10.8	2.2	0.2	1006	4.28
Mean	41.0±1.4	9.9±0.8	2.4±0.2	0.2±0.0	1006±4	4.14±0.14

[표 IV-마-4] 대상시료의 유해화학물질 정화지수 관련 오염물질의 농도분포(해양수산부, 2013)

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Unit	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
Min	51.6	25.3	101.1	409.7	9.1	0.9	72.6
Max	48.1	24.6	96.0	401.0	9.7	1.0	77.7
Mean	49.863	24.970	98.576	405.376	9.397	0.940	75.166



[표 IV-마-5] 부영양화 관련 평가항목, 기준농도 및 평가점수 (제9조제2항 관련)

항 목	단 위	기준농도	평가점수
강열감량 (IL)	% (건중량)	5 미만	0
		15 미만	3
		15 이상	6
화학적산소요구량 (COD)	mg/g (건중량)	13 미만	0
		20 미만	1
		30 미만	2
		40 미만	4
		40 이상	6
산취발성황화물 (AVS)	mg/g (건중량)	0.6 미만	0
		1 미만	1
		5 미만	2
		10 미만	4
		10 이상	6
비교 1. 부영양화 관련 항목들에 대한 각각의 평가점수는 해저퇴적물시료에서 구한 항목들의 분석치로부터 기준농도 구간별 설정된 수치로 한다.			

[표 IV-마-6] 유해화학물질 관련 평가항목, 기준농도 및 산출방식 (제8조제2항 관련)

항 목	단 위	기준1	기준2	비고
비소(As)	ppm(건중량)	9.0	41.6	공통
카드뮴(Cd)	"	0.68	4.21	"
크롬(Cr)	"	80	370	"
구리(Cu)	"	24	108	"
수은(Hg)	"	0.15	1.0	"
니켈(Ni)	"	23	52	"
납(Pb)	"	50	220	"
아연(Zn)	"	200	410	"
폴리클로리네이티드비페닐(PCBs)	ppb(건중량)	21.6	189	"
다환방향족탄화수소(PAHs)	"	4,000	45,000	"
클로로데인(Chlordane)	"	0.5	6.0	선택
다이엘드린(Dieldrin)	"	0.02	8.0	"
디디티(DDT)	"	1.6	46	"
유기주석화합물(TBT)	"	5.0	105	"
비교 1. 유기염소계 농약 성분에 해당되는 클로로데인(Chlordane), 다이엘드린(Dieldrin), 디디티(DDT)은 주변의 농경지 등으로부터 이들의 과도한 유입 가능성이 제기되는 해역에 한하여 포함하며, 유해방오도로 성분에 해당되는 유기주석화합물(TBT)은 선박건조 등으로 인하여 해저 퇴적물에 유기주석화합물의 축적으로 인한 영향이 문제가 될 수 있는 해역에 한하여 평가항목에 포함한다.				

2. 유해화학물질 관련 항목들에 대한 각각의 평가점수는 해저퇴적물시료에서 구한 항목들의 분석치로부터 기준 1과 기준 2의 기준농도를 이용하여 다음과 같이 산출한다.
- 가. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 1 이하의 농도범위를 가진 항목은 항목별 평가점수를 0으로 한다.
  - 나. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 2와 동일한 농도를 가진 항목은 항목별 평가점수를 1로 한다.
  - 다. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 1 이상이면서 기준 2 미만의 농도범위를 가진 항목에 대한 평가점수는 분석치에서 기준 1의 농도를 뺀 값을 기준 2의 농도에서 기준 1의 농도를 빼준 값을 나눈 값  $[(\text{분석치} - \text{기준 1의 농도}) \div (\text{기준 2의 농도} - \text{기준 1의 농도})]$  으로 한다.
  - 라. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 기준 2 이상인 항목들에 대한 평가점수는 분석치를 기준 2의 농도로 나눈 값(분석치  $\div$  기준 2의 농도)으로 한다.

**③ 기존(2, 3차년) 분석 결과와 비교**

- 대상해역인 N해역 시료채취 및 분석결과 COD, IL, TOC, 중금속의 오염도는 전년도 대비 평균  $\pm 16.6\%$ 의 차이를 보여 시료의 동질성이 확보되는 것으로 평가됨

**[표 IV-마-7] N해역의 2013년 과 2014년 결과 비교**

		N 해역 (2차년) Bulk	N 해역 (3차년) Bulk	N 해역 (4차년) Bulk	비교 (평균 $\pm$ 편차)
COD	(mg/g)	39.05	42.14	41.0	40.7 $\pm$ 1.6
IL	(%)	14.88	12.78	9.9	12.5 $\pm$ 2.5
TOC	(%)	2.83	2.47	2.40	2.57 $\pm$ 0.23
Cr	(mg/kg)	72.99	69.84	69.8	70.9 $\pm$ 1.8
Ni	(mg/kg)	28.41	31.97	30.9	30.4 $\pm$ 1.8
Cu	(mg/kg)	180.69	97.84	104.4	128 $\pm$ 46.1
Zn	(mg/kg)	420.40	437.03	439.1	432 $\pm$ 10.3
As	(mg/kg)	12.80	12.54	12.2	12.5 $\pm$ 0.3
Cd	(mg/kg)	1.40	1.51	1.5	1.47 $\pm$ 0.06
Pb	(mg/kg)	79.52	79.26	79.3	79.4 $\pm$ 0.1

**바. 해양오염퇴적물 현장처리기술 개발**

**(1) 공정 시험용 반응기 설계**

**(가) 기본 개념**

- 기존 연구결과(2, 3차년도) 주로 부영양물질에 의해 오염된 해양퇴적물을 첨가제로 산화제(5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)와 비이온성계면활성제(0.05% Tween 80)를 사용한 조건에서 30분동안 처리할 경우, 조립질부터 32 $\mu$ m 이하의 세립질까지 모든 처리산물은 유기오염물질뿐만 아니라 중금속 등 유해화학물질까지 다양한 목적으로 유효활용 할 수준까지 저감시킬 수 있음을

---

확인함.

- 기존 연구결과(2, 3차년도) 도출된 상기 최적조건을 실제 상용 규모의 처리공정으로 구현하기 위하여 필요한 세척, 분리 및 고도처리의 각 공정별 모듈화를 위한 처리 정도와 능력을 시험할 필요가 있음.
- 처리기술의 세부 공정 시험은 처리대상 시료(퇴적물 중 입경  $125\mu\text{m}$  이하)를 실제 조건을 가정하여 공정수로서 (인공)해수를 사용하여 상기 세 가지 공정별로 각각 연속흐름(Continuous flow)에서 모듈화 기술개발을 위한 주요 공정을 시험, 평가하고 주요 요소(Factors)를 도출하는 것임.

#### (나) 시험 장치 특성

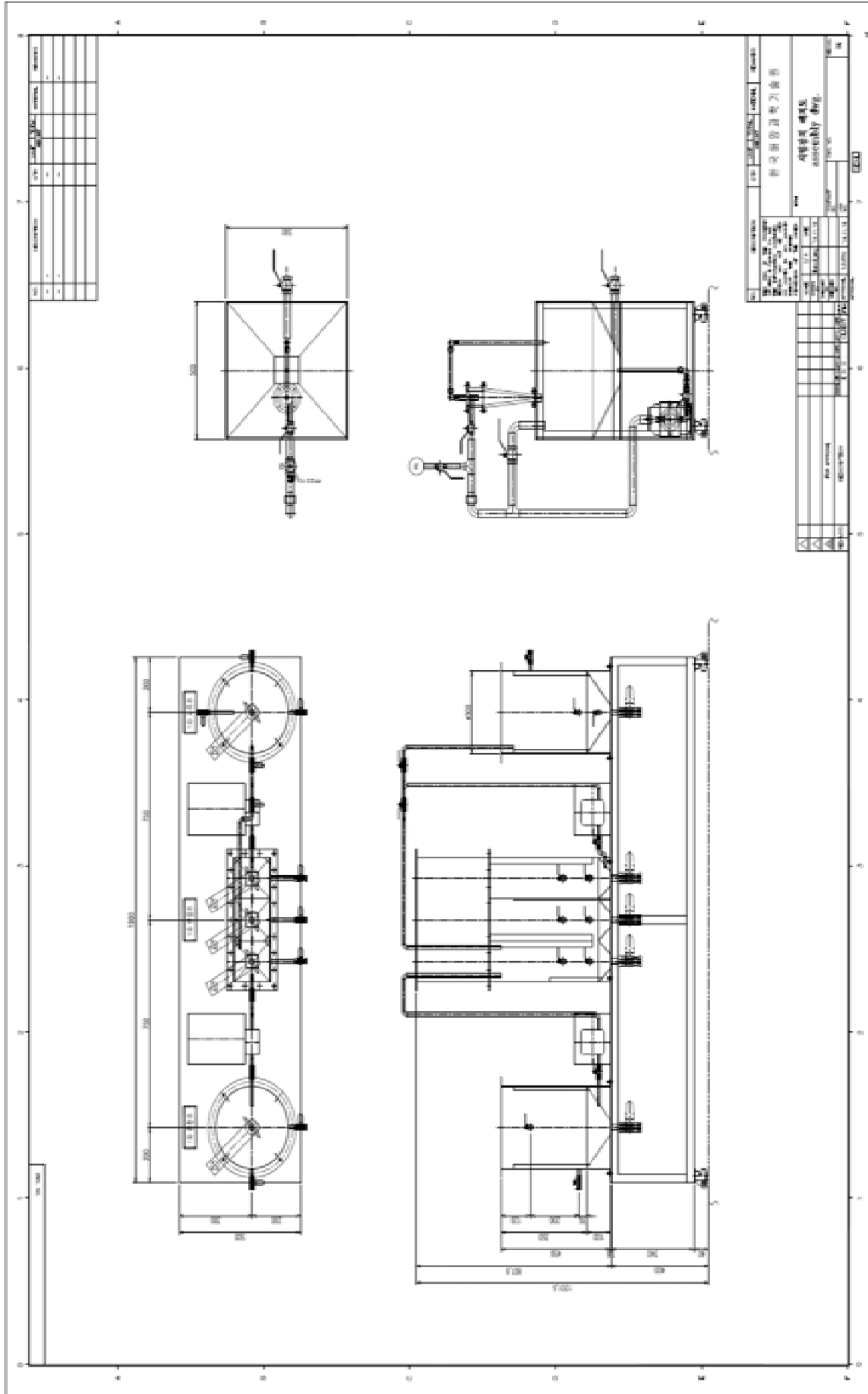
- 세척, 입자분리 및 고도처리 기술개발을 위한 시험 장치는 실험실에서 제어 가능한 규모로 하나의 닫힌 계(Closed system)로 구성되며, 연속흐름 시험뿐만 아니라 하나의 반응기(Reactor)로서 회분 시험(Batch test)도 가능하도록 구성함.
- 세척 기반 처리기술 시험 장치는 실제 처리공정을 상정하여 최소 3개의 다단 반응조(처리조, 안정화조 및 저류조)로 구성되며, 연속흐름을 위하여 시험용 해양퇴적물과 (인공)해수의 혼합 및 초기 조건(완전 혼합 및 유동성 확보)을 제어하기 위한 초기 혼합조 및 처리 공정 이후 처리 산물을 저장하기 위한 저장조로 구성함.
- 일반적으로 처리시간이 일정하다면, 반응조가 하나일 경우 보다 다단으로 구성되면, 각 개별 반응조의 크기(용적)가 상대적으로 작아지므로 실제 해양오염퇴적물 수거 현장 또는 인근(해상, 연안)에서 바지선 1~3대 위에 설치를 상정하면 매우 중요한 요소임.
- 각 반응조 간 반응물의 이송은 정량펌프와 실리콘 재질의 튜브를 사용함.
- 첨가제 2종을 처리조로 이송은 역시 정량펌프와 실리콘 재질의 튜브를 사용함.
- 반응조의 재질은 산화제 사용으로 인한 영향을 최소화시키기 위하여 현존 상용 재료 중 문헌 검토 및 상용 반응조 재질을 검토한 결과, 상기 조건을 충족하는 재질은 Hastelloy alloy와 Stainless steel이 있음(Faisal I.M., 2004). 이 중 실제 장치 제작을 고려하여 소재 비용이 상대적으로 저렴한 Stainless steel을 시험 장치 제작용 재료로 선정함(반응조 재질을 SUS 304(3차년도)에서 SUS 316(4차년도)으로 변경).
- 분리 기반 처리기술 시험 장치는 조립질( $75\mu\text{m}$ )과 세립질( $32\mu\text{m}$ )을 각각 분급하기 위하여 수력 싸이클론(Hydro-cyclone)을 각각 설계, 제작하며, 분급 시험을 위하여 별도의 시험 장치 역시 설계, 제작하여 시험에 사용함.
- 세립질( $32\mu\text{m}$ )을 분급할 수 있는 수력 싸이클론은 국내 상용 제품이 극히 제한되며, 분급 시험장치 역시 기존 제품이 없으므로 실패할 위험을 감수하고, 본 연구진이 외국 기술 문헌 등을 참고로 하여 직접 고안, 설계, 제작하여 시험에 사용함.
- 조립질 및 세립질 분급용 수력 싸이클론은 기존 싸이클론과는 전혀 다른 개념으로 상부/하부 유출구의 직경을 5가지로 각각 제작하여 이를 쉽게 장착/탈착 가능하도록 하며, 또한 분급 시험장치 역시 상기 두 종류의 싸이클론을 장착/탈착이 용이하도록 설계, 제작함. 싸이클론은 가공성과 시험 과정에서의 신뢰성 확보를 위하여 재질을 MC nylon으로 제작함.
- 특히 기존 싸이클론은 재료를 가공하여 하나의 장치로 제작하며, 본 연구에서처럼 조건(주입압력, 대상물질의 비중, 점도 및 고상과 액상의 비율 등)이 같을 경우, 실제 분급 효율에 현격한 영향을 미칠수 있는 상부/하부 유출구 직경을 용이하게 변경할 수 있는 싸이클론 또는 분급 시험장치는 2015년 6월 현재까지 국내·외 기존 연구결과, 시험장치 또는 지식재산권으로 등록·보고된 바 없음(현재 국내 특허(등록) 심사 중).

- 고도처리 기술개발을 위한 시험 장치는 앞 단계의 조건(고상과 액상의 비; 1:3) 그대로 적용할 수 있어야 하며, 추가적인 공정수 없이 초미세기포를 발생시키면서 슬러리(Slurry)를 원활하게 순환시킬 수 있으며, 초미세기포에 공기(Air)/순산소(Pure Oxygen)/오존(Ozone)의 선택적 주입을 용이하도록 하며 반응조의 유효용량은 60L로 제작함.
- 상기 장치에 의한 초미세기포는 기포의 크기  $50\mu\text{m}$  이하의 분율이 90% 이상이며, 20g/h 용량의 오존 발생장치를 사용함.
- 상기 장치에서 오존을 사용하므로 배오존 처리 설비를 장착하여 시험 시 사용함.
- 고도처리 공정의 기본 개념은 세척 기반 처리에서 첨가제의 농도 감소, 처리단가 인하 및 비교적 짧은 시간 동안 처리효율을 극대화 시키는 것이다. 즉 세척 처리 후 산화제가 잔류하는 경우라도, 상기 공정에서는 오히려 고도산화 처리(Advanced Oxidation Process)의 효과를 높일 수 있음.
- 본 연구에서 사용한 초미세기포는 기존 1~2 mm 단위의 미세기포에 비하여 표면적이  $1.0 \times 10^6$ 배 크므로 액상 중으로의 산소 전달을 또는 오존 용해율을 현격하게 증가시킬 수 있으므로, 기존 오존 처리의 문제점인 오존의 낮은 용해율을 해소할 수 있음. 또한 오존의 용해율이 증가하면, 오존의 직접 산화보다 수산화 작용기(OH Radical)에 의한 간접 반응이 이와 비례하여 증가하게 된다. 특히 오존은 액상 중에 존재하는 경우, 인체에 무해하며, 오존과 수산화 작용기는 반응 전, 후에 침전물 발생 등 영향이 전혀 없으며, 부가적인 처리도 필요 없음.

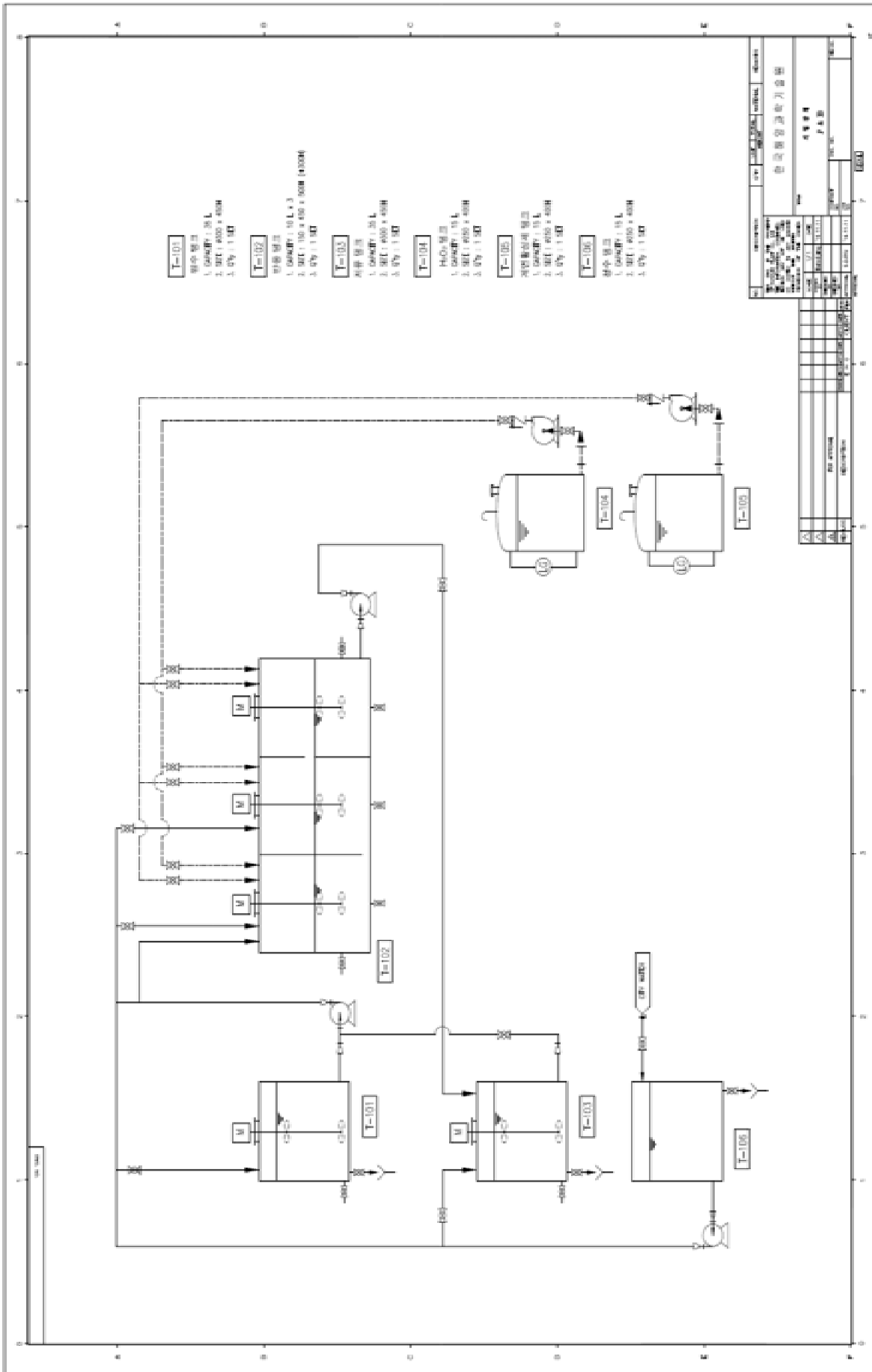
#### (다) 시험 장치 설계 및 제작

- 세척 기반 처리기술 시험장치 초기 혼합조와 저류조의 유효용적은 각 50L이며, 반응조(처리조, 안정화조, 저류조)는 유효용적(Effective Volume)을 각각 5L로 설정하며, 각 반응조 사이에는 웨어(Weir) 그리고 웨어의 상부에 산화제 사용으로 인하여 발생하는 거품이 다음 반응조로 이동을 차단할 수 있는 격벽을 설치하여 일정 시간 반응 후 반응물이 일정하게 이송되도록 하며, 처리조에 첨가제 주입 시 완전혼합을 위하여 각각 격벽을 설치함.
- 모든 반응조는 반응물(퇴적물, (인공)해수, 첨가제)의 완전혼합을 위하여 교반기를 설치하며, 교반속도는 저속에서 고속까지 제어 가능하도록 함.
- 세척 및 고도처리 시험을 위한 모든 반응조에는 반응이 진행되는 동안 주기적으로 시료채취가 가능하도록 반응조의 중간과 아래 부분에 각각 시료채취 밸브 등 장치를 설치함.
- 입자분리 시험을 위한 분급 장치는 수력 싸이클론의 특성 즉, 수 초 정도의 순간적인 시간동안 많은 양을 분급하므로 시험을 위해서는 대량의 시료가 필요하므로, 이를 해소하고자 분급 시 상부/하부 유출물을 다시 초기 혼합조로 이송하도록 함.

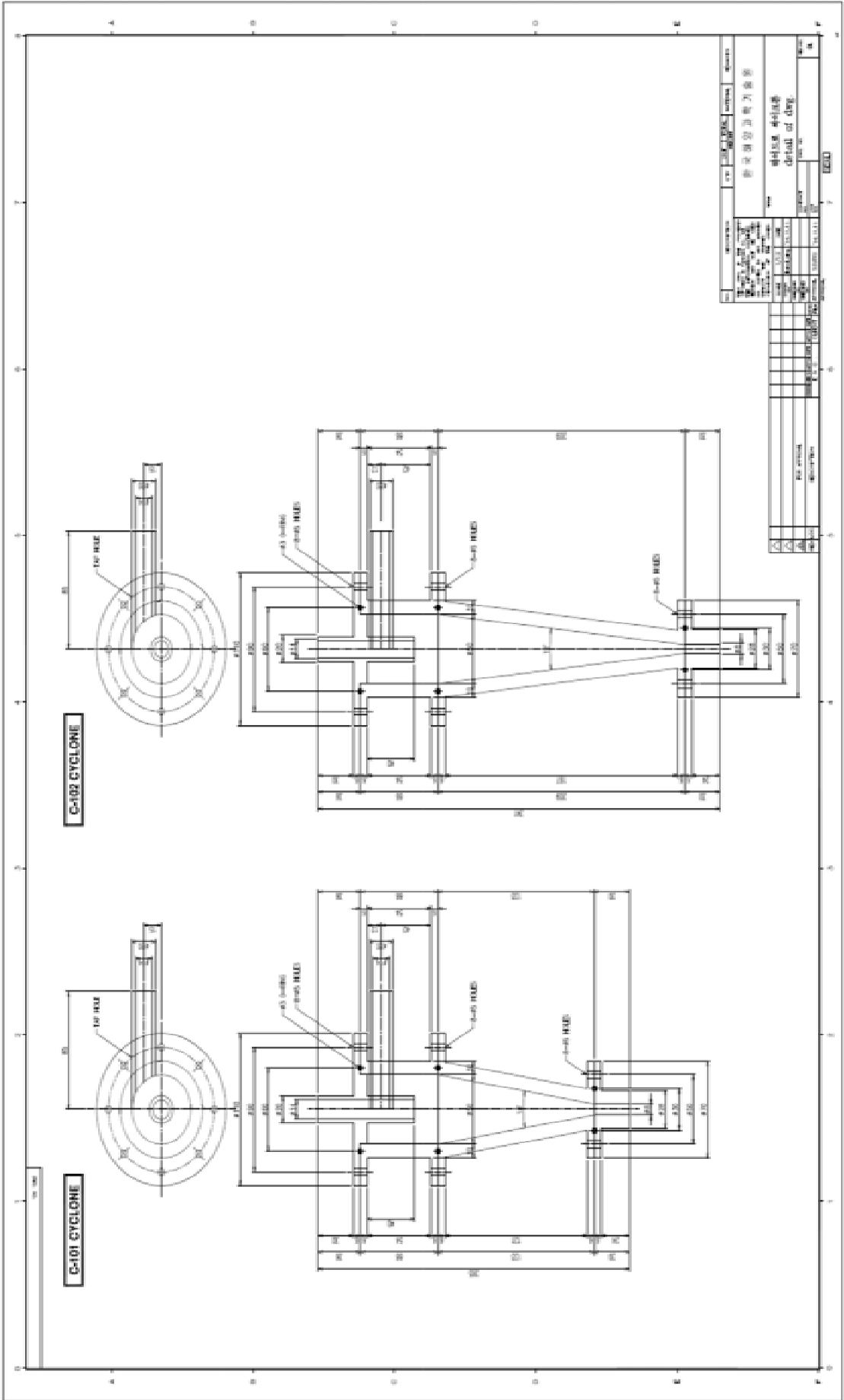




[그림 IV-바-2] 현장 처리기술 공정 시험용 장치 설계도(세척, 입자분리)

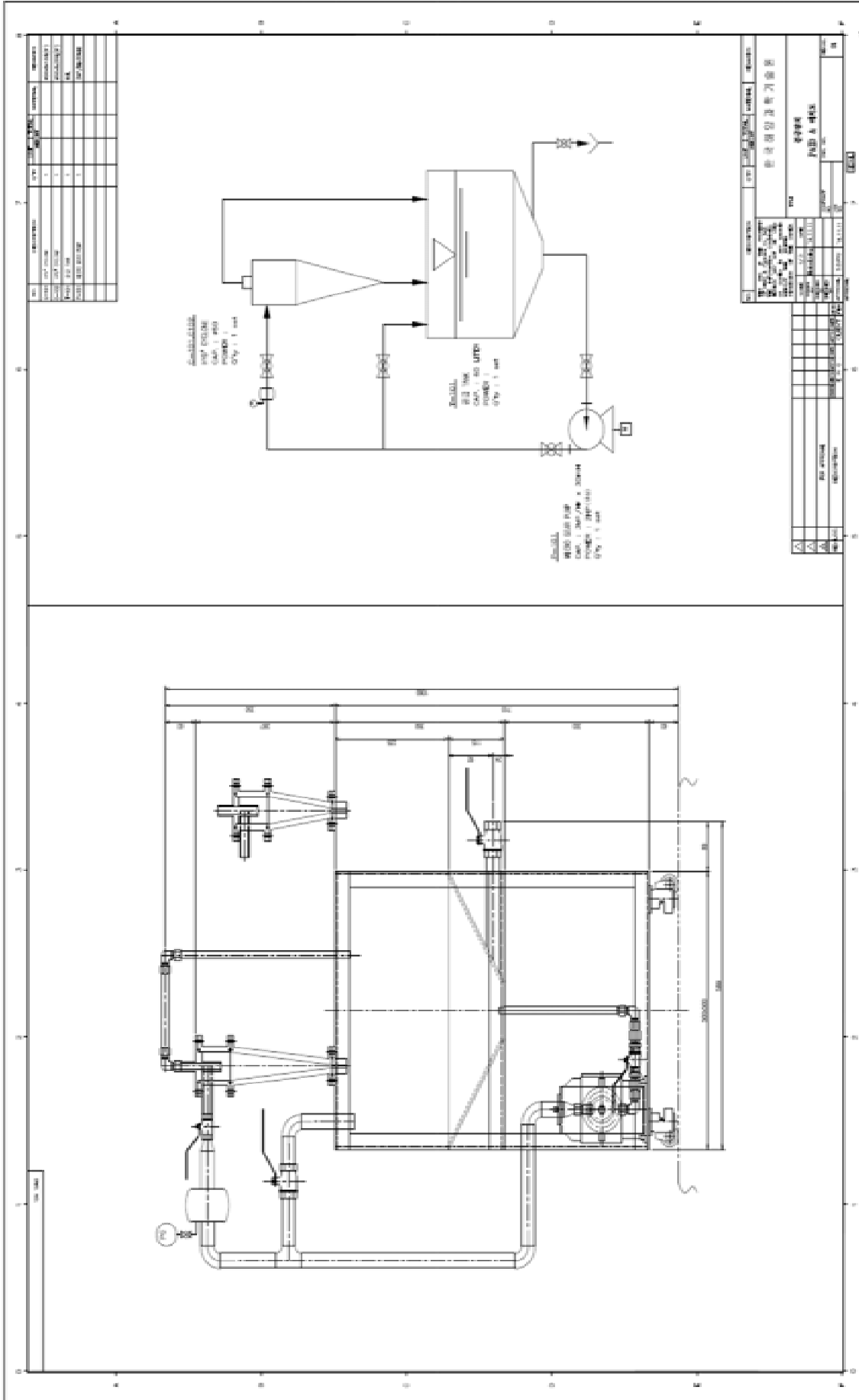


[그림 IV-마-3] 현장 처리기술 공정 시험용 장치 P&ID(세척)



[그림 IV-바-4] 수력 사이클론(Hydro-cyclone) 상세 설계도(75 $\mu$ m 및 32 $\mu$ m 분급용)





[그림 IV-바-5] 입자분리 시험장치 상세 설계도

---

## (2) 현장 처리기술 구현을 위한 세부 공정 시험, 검토 및 제안

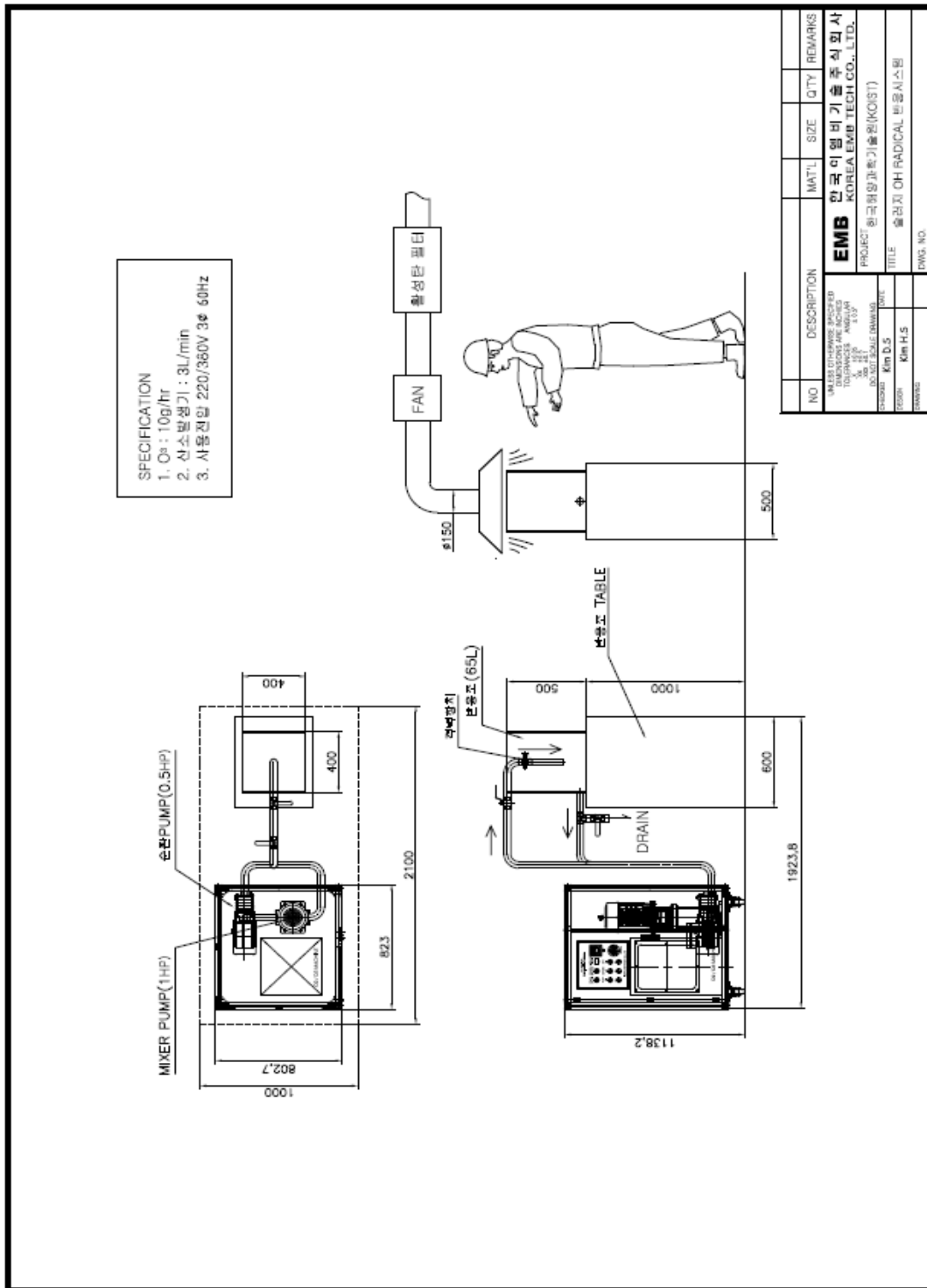
### (가) 개요

- 목표: 국내 연안의 오염해역의 주된 위치 및 형태인 항만 인근, 부영양화 및 중금속으로 오염된 미세입자(Silt, clay)의 함유율이 높은 오염퇴적물에 대한 효과적인 현장 처리기술 개발을 위한 세부공정 시험 및 처리공정 제안
- 입자분리 및 세척처리에 기초한 연속 공정의 벤치스케일(Bench-scale) 장치 시험을 통하여 주요 공정 요소를 시험, 검토하고, 효과적인 처리공정을 제안하고자 함
- 2차년의 벤치스케일 장치시험 결과를 토대로 보완할 부분을 개선하여 제작한 장치를 이용하여 공정요소를 시험검토 하였음
- 고도처리 및 입자분리 공정을 위한 벤치스케일(Bench-scale) 장치제작 및 시험을 통하여 주요 구상된 현장 처리기술을 검토하고, 효과적인 처리공정을 제안하고자 함

### ① 3차년 결과를 토대로 한 4차년 연구주안점

#### ○ 3차년 결과를 통한 연구주안점

- 해양퇴적물을 처리공정에 도입하는 단계에서 헝잡물(Debris) 및 자갈 등(Over size gravel etc.)을 기존 상용 장치로 분리, 제거가 필요함
- 그러므로 입경별 부영양물질 분포 및 공정의 용이성, 비용의 절감을 위하여 입자분리의 범위를 63  $\mu\text{m}$  이상, 32  $\mu\text{m}$  이상, 32  $\mu\text{m}$  이하의 범위로 선정하는 것이 가장 효율적이라고 판단 됨 (3차년 도 결과 시 도출된 분리 및 세척 처리기술 통합 공정 제안



[그림 IV-바-6] 고도처리 시험장치 설계도

- 여러 가지 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)의 농도와 계면활성제인 Tween 80을 이용한 산화-세척처리 시험결과 IL, TN의 저감으로 본 유기물 정화효과는 저농도에서도 큰 저감효과를 보

---

이여 저농도 처리를 이용한 공정설계가 가능함

- 각 반응조에서 다음공정으로 처리된 퇴적물을 수송 시 정확한 체류시간 및 원활한 흐름에 대한 공정보완이 필요할 것으로 나타남
- 각 반응조에서 발생하는 반응에 의한 처리대상 퇴적물의 부피팽창 및 발생하는 가스를 완벽히 수용할 수 있도록 보완이 필요함하며 이는 4차년 연구개발 시 개선시킬 계획임
- 저농도의 처리제에 미세기포 폭기 공정 추가 시 고농도 처리제를 이용한 퇴적물 정화 효과를 기대하였으나, 부영양화 관련 유기물의 정화에 동 농도의 처리제에서는 미 폭기 처리시보다 정화효과를 소폭 상승시킬 수 있는 것을 확인하였음. 그러나 고농도 처리효과 만큼의 정화효율을 기대하기는 어려운 것으로 나타남
- 처리 대상 미세입자는 단순한 유기물 산화로는 제어하기 곤란하므로, 함유된 오염물질에 대한 고도처리가 필요함

○ 평가 결과를 토대로 한 연구주안점

- 실험에 사용한 교반기(impeller) 성능이 실제 현장에서도 적용이 가능한 타입 인지 검증이 필요함

#### (나) 세척 기반 및 고도처리 기술의 구현을 위한 세부공정 별 시험

##### ① 여러 가지 저농도 산화제 비교실험

##### ㉞ 실험조건 및 방법

○ 실험 목적: 저 농도의 산화제 조건 비교실험을 통해, 125-63  $\mu\text{m}$ 의 유기물 제거를 위한 효율적 농도 도출

○ 시험조건

- 처리제:  $\text{H}_2\text{O}_2$  1M, 1.5, 2M + Tween 80 0.05 %
- soild:liquid 비율: 1:3
- 반응시간: 0, 5, 10, 20, 30, 60, 90 min, 2hr
- 대상퇴적물: 건조된 N해역 채취시료 중 미세입자 (125-63  $\mu\text{m}$ )

○ 시험방법

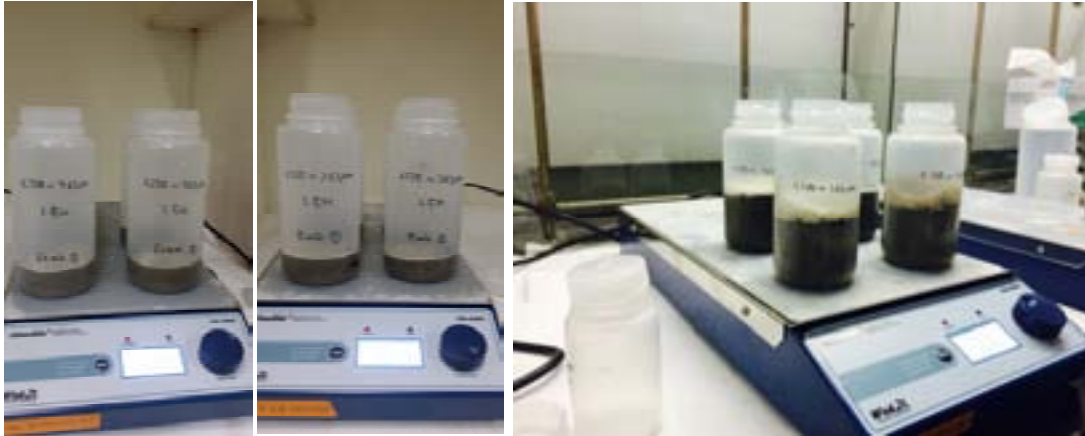
1. 퇴적물 20 g씩 담은 bottle을 Stirrer에 올려놓은 후 시약과 잘 섞이도록 마그네틱바를 넣어준 후 시약 60 g을 주입하고 시약이 모두 주입된 후 5분부터 2시간 까지 시료를 채취하였다. (그림 IV-바-7)
2. 시료 채취 직후 증류수를 첨가하고 원심분리 하여 증류수로 3번 세척 하였다.
3. 세척된 시료의 상등액을 버린 후 동결건조 하였다.
4. 동결 건조한 시료는 갈아서 COD, TOC, IL등을 분석하였다.

##### ㉟ 시험 결과 및 고찰

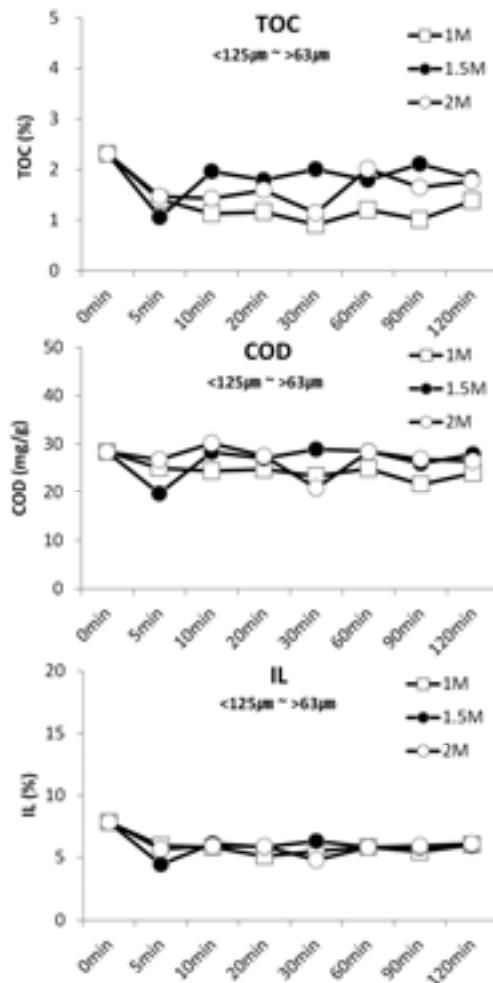
○ 시험 과정

1. 1.5M  $\text{H}_2\text{O}_2$ 조건: 시료에 시약이 주입되면서 약간의 산화반응을 보였으며, 급격한 반응은 없었음
2. 1.5M  $\text{H}_2\text{O}_2$ 조건: 시료에 시약이 주입되면서 5-8분 일 때 산화반응이 서서히 일어나기 시

작했고 10분짜리 시료를 원심분리를 위해 증류수를 넣었을 때 반응이 매우 활발하게 일어났다. 10분에 최대 반응을 보였다.



[그림 IV-바-7] 여러 가지 저농도 산화제 비교를 위한 실험



[그림 IV-바-8] 여러 가지 저 농도 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 유기물 제거결과

o 유기물 제거효율 결과

- 63-125 µm의 입자범위의 유기물 제거를 위하여 Tween 80 0.05%와 동시에 사용된

---

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1M, 1.5, 2M 의 시간별 유기물 제거효율은 TOC로 본 경우 의 경우 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1M, 30분의 조건이 가장 좋은 것으로 나타났으며 COD, IL로 본 경우에는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1.5M, 5분의 조건이 가장 좋은 것으로 나타났다. (그림 IV-바-8)

- 그러므로 부영양화 관련 탄소(C)유기물의 제거에는 1.5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 0.05 %의 단시간 (5분 이내) 혹은 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 0.05 %의 30분 정도의 공정시간이 적합한 것으로 판단되었다.

## ② 연속흐름 반응조를 이용한 세척 기반 처리기술의 조립질 정화 기초 실험

### ㉞ 실험조건 및 방법

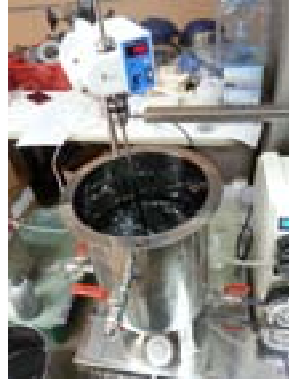
○ 실험 목적: 신규 제작한 5L 반응조를 이용, 주로 조립질 정화 공정 시험

○ 시험조건

- 처리제: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1M + Tween 80 0.05 % (사용 공정수: 인공 해수)
- soild:liquid 비율: 1:3
- 대상퇴적물: N해역 채취시료 중 미세입자 습식 체질로 분별된 <125 μm의 입자

○ 시험방법

1. 1 batch 총량 5 L: [대상퇴적물(2500 ml) + 첨가할 water (2070 ml)](4580 ml) + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(430 ml)으로 6 batch 를 준비하였다.
2. 초기 혼합조에 '퇴적물+물' 혼합물 반응용 시료 채워 넣은 후 impeller를 작동하여 미리 균질화 하였다.
3. 초기 혼합조→1차 반응조 : 펌프로 시료·H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 주입, Tween 80 필요량 수동 주입하였다.
4. 반응 시작 후 15분 후부터 5분단위로 500 ml PP bottle에 1차, 2차, 3차 반응조(처리조, 안정화조, 저류조)의 시료 채취하였다.
5. 시료 채취 후 채취한 시료에 즉시 증류수를 첨가하여 더 이상의 산화반응을 제한하였다.
6. 원심분리를 이용한 세척 및 탈수 후 시료 동결건조를 이용하여 건조하였다.
7. 완전히 건조된 시료를 다시 분석을 위하여 입도범위별로 분리하였다.



(반응시작)



(반응시작)



(반응시작 후 1분)



(반응시작 후 2분)



(반응시작 후 5분)



(반응시작 후 5분)



(반응시작 후 10분)

[그림 IV-바-9] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리조건 기초 시험

#### ㉔ 시험 결과 및 고찰

##### ○ 시험결과

- 반응조 시료 주입+ 반응 시작 후 10분 에 1차 반응조 포화상태가 되어 실험을 종료하였다.(그림 IV-바-9)

##### ○ 고찰

- 반응조 유효용적 대비 시료 량을 줄여야 할 것으로 판단되었다.
- 3-4차(반응후 저장조) 반응조 펌프 상시 작동으로 공정 연결 방식을 수정해야 할 것으로 판단하였다.
- 1 batch 당 65% 축소, 3차 반응조 절반이상 차면 3-4차 반응조 펌프 상시작동 하는 것으로 변경하였다.

#### ③ 연속흐름 반응조를 이용한 세척 기반 처리기술의 조립질 정화 보완 실험

##### ㉕ 실험조건 및 방법

- 실험 목적: 신규 5L 반응조의 기초 시험을 토대로 공정 방법 보완 및 확인 시험

---

○ 시험조건

- 처리제:  $H_2O_2$  1M + Tween 80 0.05 % (사용 공정수: 인공 해수)
- soild:liquid 비율: 1:3
- 대상퇴적물: N해역 채취시료 중 미세입자 습식 체질로 분별된  $<125 \mu m$ 의 입자

○ 시험방법

- 1 batch 총량 3.250 L 로 6 batch 를 준비하였다.
- 초기 저류조에 ‘퇴적물+물’ 혼합물 반응용 시료 채워 넣은 후 impeller를 작동하여 미리 균질화 하였다.
- 초기 저류조→1차 반응조 : 펌프로 시료· $H_2O_2$  주입, Tween 80 필요량 수동 주입하였다.
- 3차 반응조 절반이상 차면 3-4차 반응조 펌프는 상시작동하게 하였다.
- 반응 시작 후 15분 후부터 5분단위로 500 ml PP bottle에 1차, 2차, 3차 반응조의 시료 채취하였다.
- 시료 채취 후 채취한 시료에 즉시 증류수를 첨가하여 더 이상의 산화반응을 제한하였다.

㉔ 시험 결과 및 고찰

■ 정화처리과정 중의 상태변화

○ 시험결과

- 반응 시작 후 15분후 1차 반응조 포화되어 원활한 연속공정이 가능하였으므로 유효용적 대비 반응량 적당한 것으로 판단되었다.
- 반응 시간 내 1, 2, 3, 4 차 반응조로 유동 원활하였다.(그림 IV-바-10)

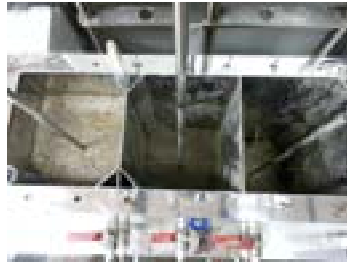
○ 고찰

- 유효용적 대비 반응량 적당하였으나 각 반응조의 form은 수동으로 제거해야 했으므로
- Impeller의 개선이 필요한 것으로 판단되었다.
- 각 반응조의 임펠러에 반응에 의한 기포 제거용 임펠러를 추가하는 것으로 장치를 수정하였다





(반응시작)



(반응시작 후 5분)



(반응시작 후 5분)  
4차 반응조 (저류조)



(반응시작 후 12분)



(반응시작 후 15분)



(반응시작 후 16분)  
4차 반응조(저류조)

[그림 IV-바-10] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리조건 보완 시험

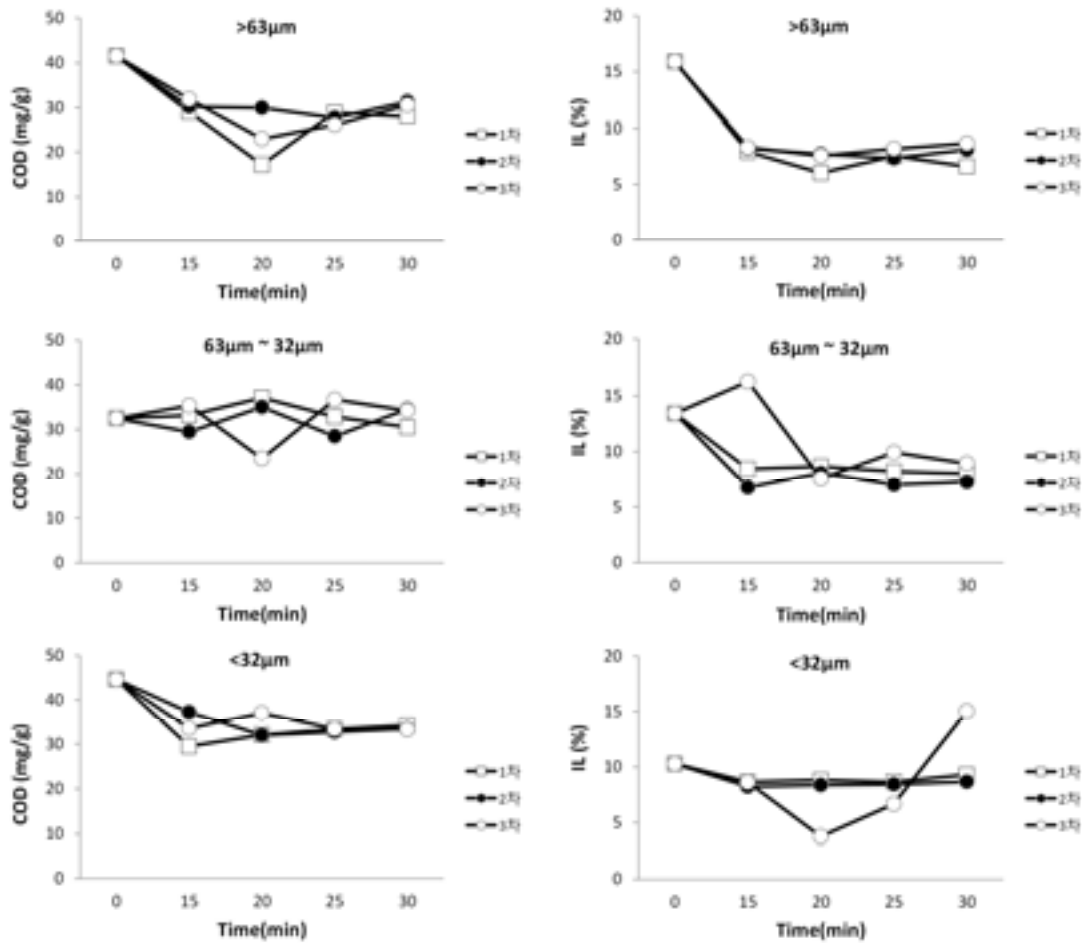
■ 부영양화관련 평가물질(COD, IL)의 농도변화

- 63 μm이상의 입자분율에서 COD, IL은 1, 2, 3차 반응조에서 모두 처리시간에 따른 현저한 감소율을 보였고, 20분에서 가장 낮게 나타났으며, 반응조에 따른 큰 차이는 보이지 않았다.(그림 IV-바-11)
- 32-63 μm의 입자분율에서 COD는 시간에 따른 감소 경향은 나타나지 않았으며, IL은 15-20분 처리시간에서 가장 낮은 값을 보였고 그 이후로 30분까지는 비슷하게 유지되었다.
- 32 μm이하의 입자분율에서 COD는 15-20분 처리시간에서 가장 낮은 값을 보였고, IL은 2,3차조는 시간에 따른 감소 경향은 나타나지 않았으며 1차조만 20분에 가장 낮게 나타났고 그 이후로 크게 증가하는 경향을 보였다.

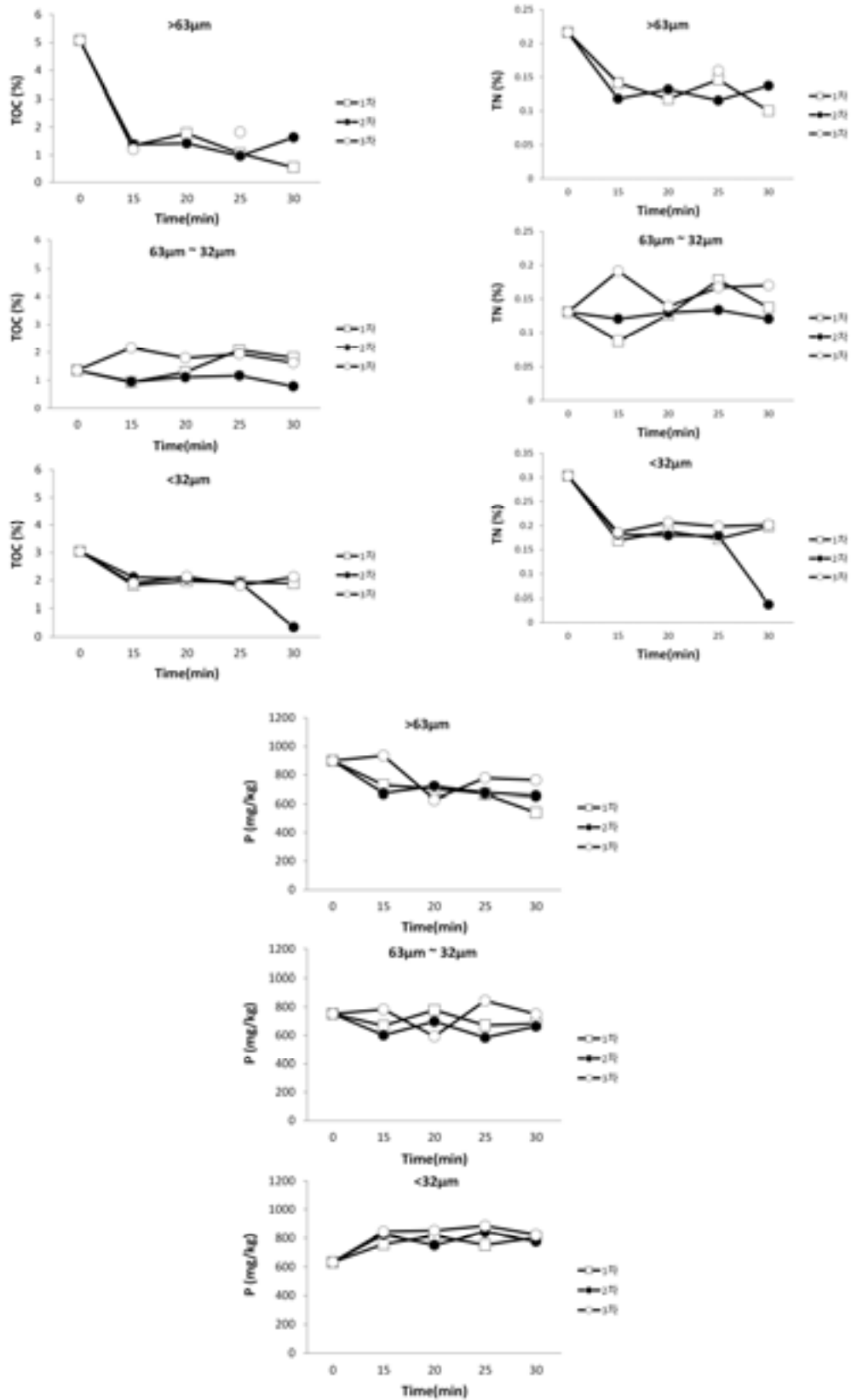
■ 기타 유기물(TOC, TN, TP)의 농도변화

- 63 μm이상의 입자분율에서 1, 2, 3차 반응조에서 모두 15분 정도까지 TOC, TN은 현저히 감소하였고, TP는 1, 2차 반응조는 30분까지 시간에 따른 감소를 보였으나 3차반응조에서는 20분 이후에 오히려 TP가 증가하는 현상을 보였다. (그림 IV-바-12)
- 32-63 μm의 입자분율에서는 TOC는 2차 반응조에서 30분에 가장 감소한 것으로 나타났으며, TN의 경우는 1차의 15분에 가장 낮게 나타났다. TP의 경우는 감소효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

- 32 μm이하의 입자분율 에서 TOC, TN의 경우 모든 반응조에서 15분까지 현저한 감소율을 보였으며 2차 반응조에서는 30에 가장 낮은값을 보였다. TP의 경우는 감소하지 않고 모든 반응조에서 반응시간동안 소폭 증가하는 경향을 보였다.



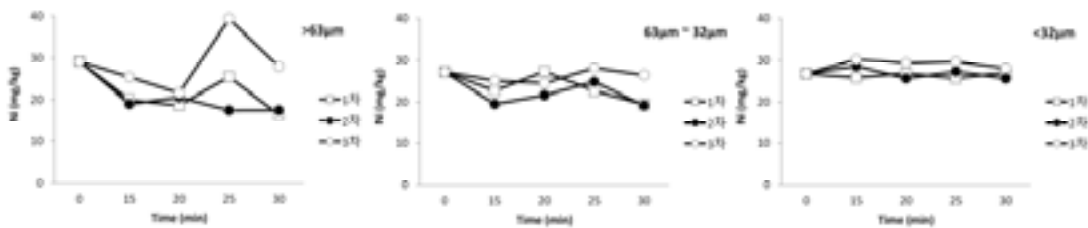
[그림 IV-바-11] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 COD, IL 의 농도변화



[그림 IV-바-12] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 TOC, TN, TP 의 농도변화

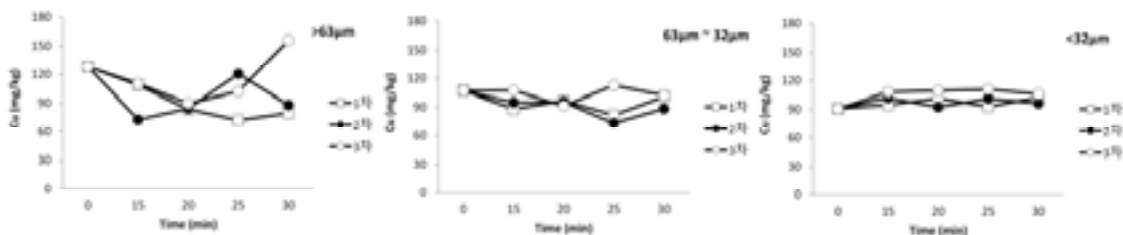
## ■ 중금속의 농도변화

- 중금속은 대상시료의 유해화학물질 정화지수 평가항목에 해당되는 농도 중 중 1기준을 초과하고 2기준에 가까운 것으로 나타난 항목인 니켈(Ni), 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb) 과 카드뮴(Cd)을 위주로 처리효율을 분석하였다.
- 니켈(Ni)의 경우 >63  $\mu\text{m}$ 분율의 경우 1차 반응조의 15분에서 20분까지는 30%가까이 감소한 것이 관찰되었으며 1차 반응조에서는 점차 증가하다가 25분부터 다시 감소하였다. 그리고 2차조에서는 농도가 유지되었고 3차조에서는 25분에 다시 증가하였다. 32-63  $\mu\text{m}$ 경우는 1,2차조에서 30분에서 가장 낮은 농도로 나타났으며 3차조에서는 처리 시간이 길수록 농도가 유지되거나 약간 증가하였다. <32  $\mu\text{m}$ 의 경우 큰 변화가 없었다.



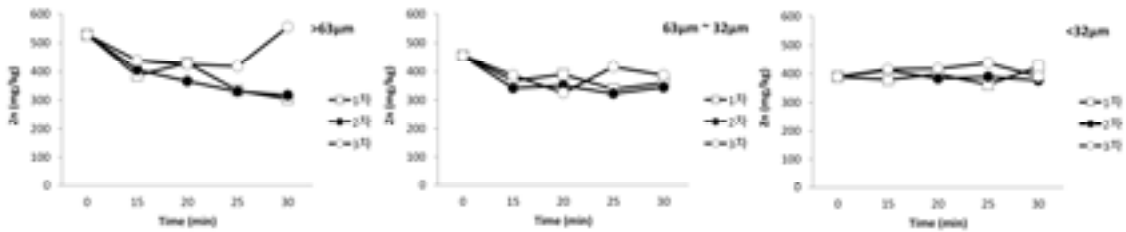
[그림 IV-바-13] 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Ni 의 농도변화

- 구리(Cu)의 경우 >63  $\mu\text{m}$ 분율의 경우 1차 반응조의 20분에서 50%가까이 감소한 것이 관찰되었으나, 그 이후 및 2차 반응조에서는 20분까지 다시 감소하였다가, 25분에서 증가하였고, 3차에서는 20분까지 감소하다가 그 이후에는 오히려 증가하였다. 32-63  $\mu\text{m}$  경우는 1,2 반응조에서 모두 25분에서 가장 낮은 농도로 나타났으며 그 이후에는 별다른 감소가 나타나지 않았다. <32  $\mu\text{m}$  경우 감소가 나타나지 않았다.



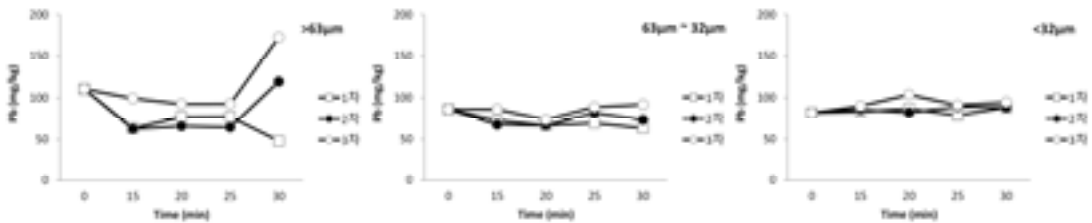
[그림 IV-바-14] 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Cu의 농도변화

- 아연(Zn)의 경우 >63  $\mu\text{m}$ 분율의 경우 1,2 차 반응조의 30분 까지 50%가까이 감소한 것이 관찰되었으나, 그 이후에 3차 반응조에서는 오히려 증가하였다. 32-63  $\mu\text{m}$ 경우는 1, 2차 반응조에서 30분까지 가장 낮은 농도로 나타났으며 그 이후에는 별다른 감소가 나타나지 않았다. <32  $\mu\text{m}$  경우 감소가 나타나지 않았다.



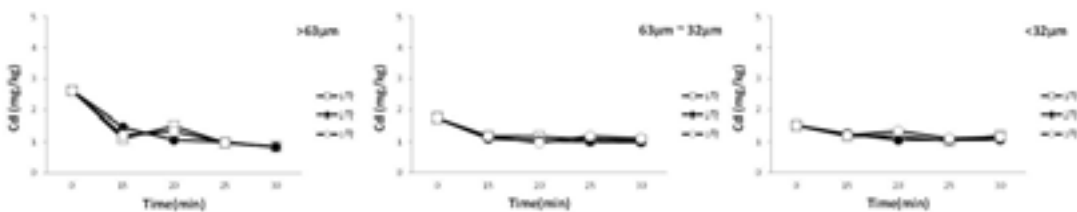
[그림 IV-바-15] 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Zn의 농도변화

- 납(Pb)의 경우 >63 µm분율의 경우 1, 2차 반응조의 25분 까지 50%가까이 감소한 것이 관찰되었으나, 그 이후 3차 반응조에서는 오히려 증가하였다. 32-63, <32 µm 경우 감소가 나타나지 않았다.



[그림 IV-바-16] 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Pb의 농도변화

- 카드뮴(Cd)의 경우 >63 µm분율의 경우 1, 2차 반응조의 25분 까지 50%가까이 감소한 것이 관찰되었다. 32-63, <32 µm 경우 30 %정도 감소한 것이 관찰되었다.



[그림 IV-바-17] 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 (in 해수) 처리조건 시험

④ 연속흐름 반응조를 이용한 세척 기반 처리기술의 조립질 정화 실험(해수 사용)

㉞ 실험조건 및 방법

- 실험 목적: 신규 5L 반응조의 보완 시험을 토대로 실제 해수 사용 시험 평가 (5월 4일)
- 시험조건
  - 처리제: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1M + Tween 80 0.05 % (사용 공정수: 실제 해수)

- 
- soild:liquid 비율: 1:3
  - 대상퇴적물: N해역 채취시료 중 미세입자 습식 체질로 분별된 <125  $\mu\text{m}$ 의 입자

○ 시험방법

- 1 batch 총량 3.250 L 로 6 batch 를 준비하였다.
- 초기 저류조에 ‘퇴적물+물’ 혼합물 반응용 시료 채워 넣은 후 impeller를 작동하여 미리 균질화 하였다.
- 초기 저류조→1차 반응조 : 펌프로 시료·H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 주입, Tween 80 필요량 수동 주입하였다.
- 3차 반응조 절반이상 차면 3-4차 반응조 펌프는 상시작동하게 하였다.
- 반응 시작 후 15분 후부터 5분단위로 500 ml PP bottle에 1차, 2차, 3차 반응조의 시료 채취하였다.
- 시료 채취 후 시료에 즉시 증류수 첨가하여 반응을 제한하였다.

㉔ 시험 결과 및 고찰

■ 정화처리과정 중의 상태변화

○ 시험결과

- 반응 시작 후 15분후 1차 반응조 포화되어 원활한 연속공정이 가능하였으므로 유효용적 대비 반응량 적당한 것으로 판단되었다.
- 반응 시간 내 1, 2, 3, 4 차 반응조로 유동 원활하였다.(그림 IV-바-17)

○ 고찰

- 반응거품 제거용 임펠러 효과 있음, 반응 시간동안 거품제거 용이한 것으로 나타났다.
- 처리수를 해수로 사용하여도 반응이나 장치에는 무리가 없는 것으로 나타났다.

■ 부영양화관련 평가물질(COD, IL)의 농도변화

- 63  $\mu\text{m}$ 이상의 입자분율에서 COD는 1 반응조에서 반응 15 분에서 가장 낮게 나타났으며 이후에는 약간 증가하였고 반응조에 따른 큰 차이는 보이지 않았다. IL은 1, 3차 반응조에서 15분에 가장 낮게 나타났으며 이후에는 약간 증가하였다.
- 32-63  $\mu\text{m}$ 의 입자분율에서 COD는 시간에 따른 감소 경향은 나타나지 않았으며, IL은 1, 3차조에서 15분 처리시간에서 가장 낮은 값을 보였고 그 이후로 30분 까지는 비슷하게 유지되었다. 2차조에서의 IL은 30분으로 갈수록 감소하는 값을 보였다.



(저류조 교반)



(반응시작)



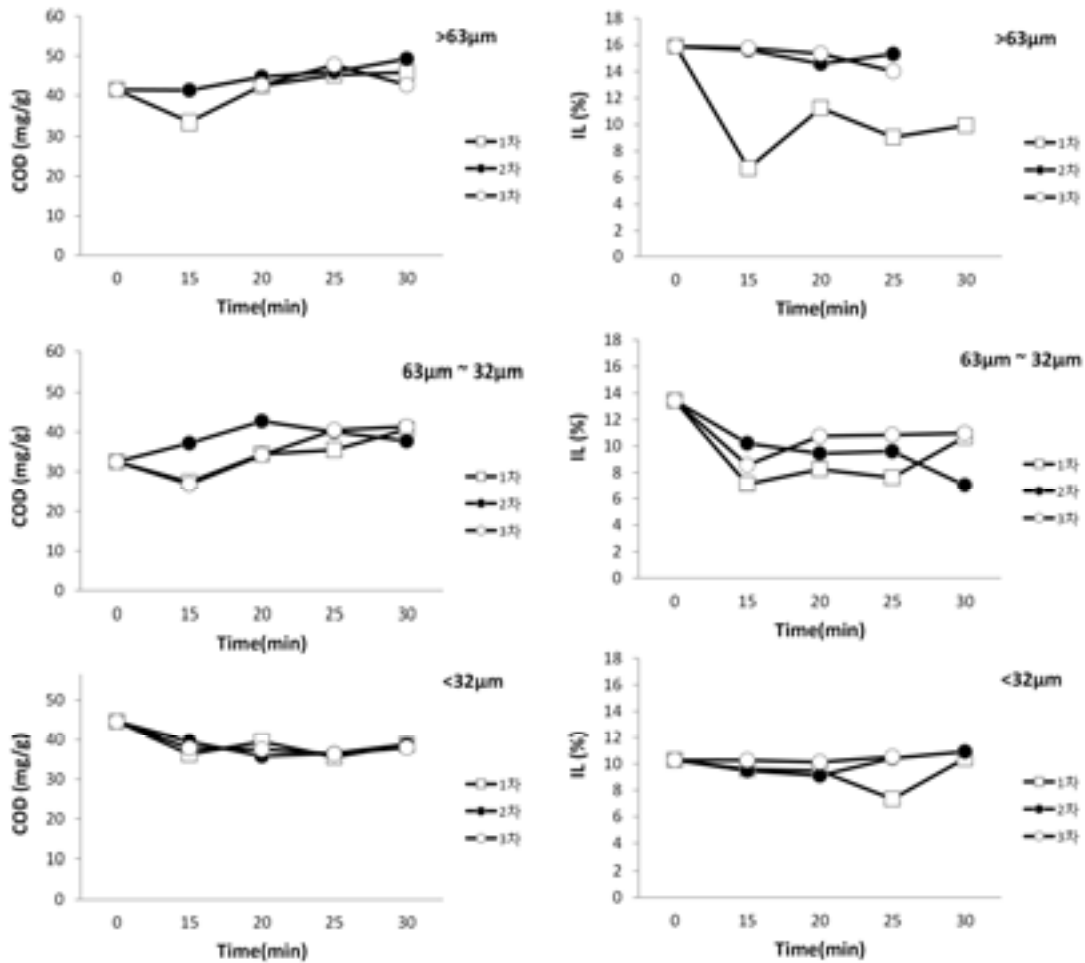
(반응시작 약 5분 후)



(반응시작 후 15분)

[그림 IV-바-17] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 (in 해수)  
처리조건 시험(해수 사용)

- 32 μm이하의 입자분율에서 COD는 1, 2, 3차조에서 모두 25분 처리시간에서 가장 낮은 값을 보였고, IL은 2,3차조는 시간에 따른 감소 경향은 나타나지 않았으며 1차조만 20분에 가장 낮게 나타났고 그 이후로 크게 증가하는 경향을 보였다.

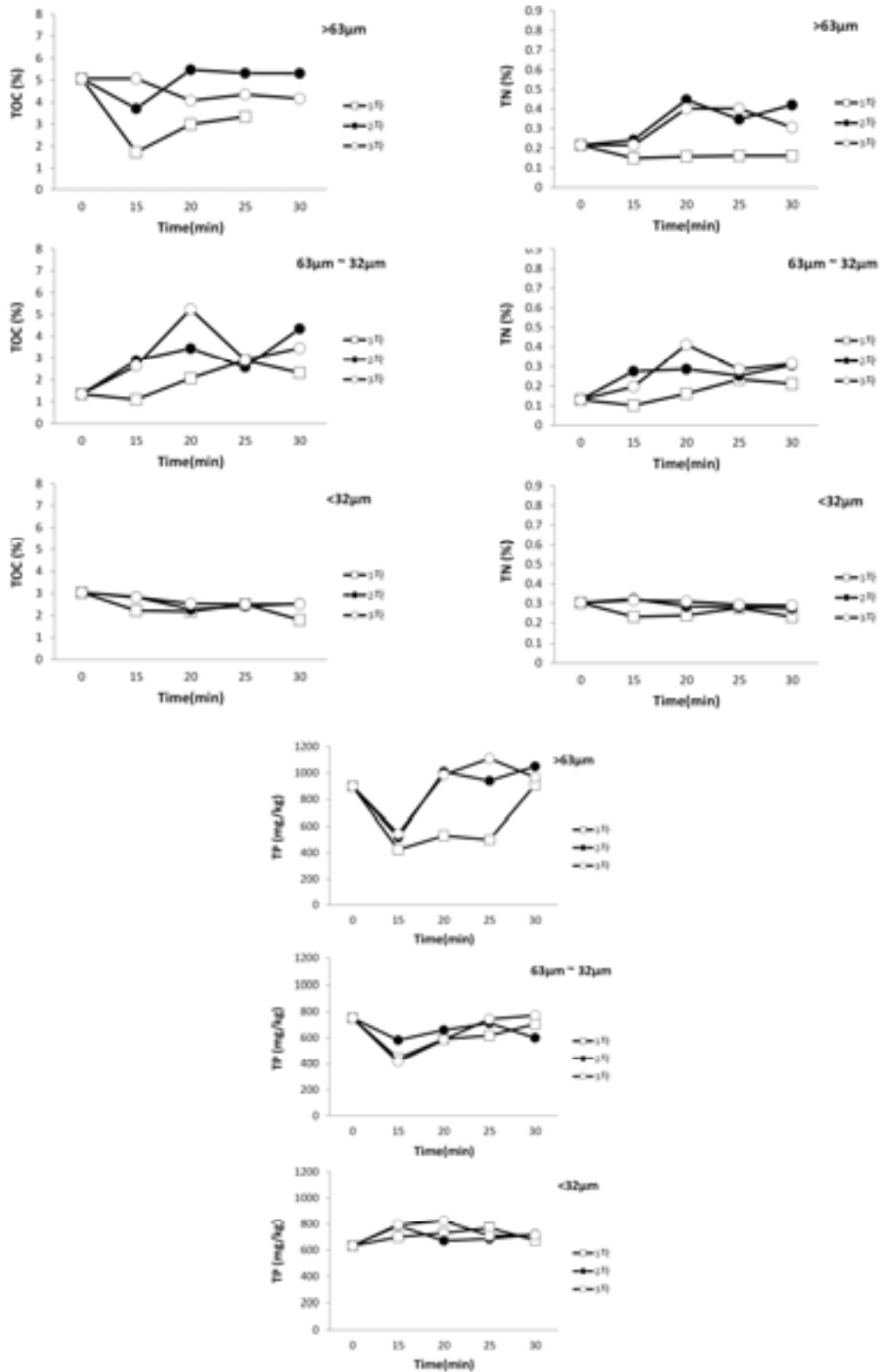


[그림 IV-바-18] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 COD, IL 의 농도변화(해수 사용)

■ 기타 유기물(TOC, TN, TP)의 농도변화

- 63 µm이상의 입자분율에서 1, 2, 3차 반응조에서 모두 15분 정도까지 TOC, TP는 15분에 1, 2 차 조에서 가장 낮게 나왔으며, 그 이상의 반응시간에서는 모두 증가하거나 농도가 감소되지 않았다, TN의 경우 1차조에서는 농도가 근소하게 감소하고 유지되었으나, 2,3 차조에서는 증가하는 경향을 보였다.
- 32-63 µm의 입자분율에서는 TP는 2차 반응조에서 15분에 가장 감소한 것으로 나타났으며, TOC, TN은 모두 증가하였다.
- 32 µm이하의 입자분율 에서 TOC, TN, TP 모두 모든 반응조에서 거의변화가 없는 것으로 나타났다.





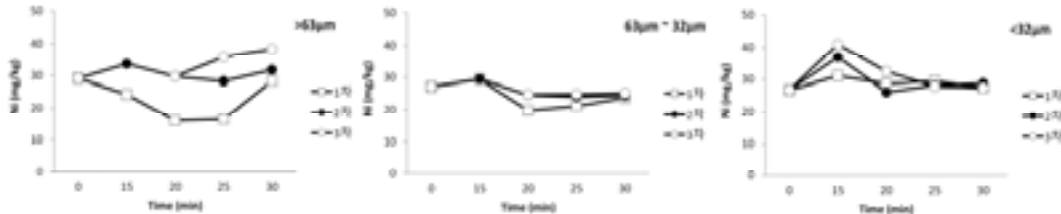
[그림 IV-바-19] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 TOC, TN, TP 의 농도변화(해수 사용)

■ 중금속의 농도변화

- 중금속은 대상시료의 유해화학물질 정화지수 평가항목에 해당되는 농도 중 1기준을 초과하고 2기준에 가까운 것으로 나타난 항목인 니켈(Ni), 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb)

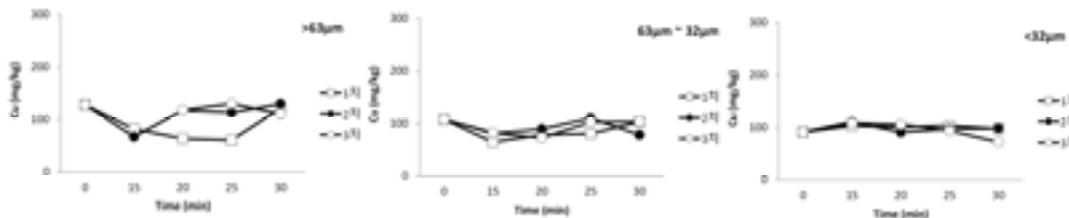
과 카드뮴(Cd)을 위주로 처리효율을 분석하였다.

- 니켈(Ni)의 경우 >63  $\mu\text{m}$ 분율의 경우 1차 반응조의 15분에서 20분까지는 50%가까이 감소한 것이 관찰되었으나, 그 이후 및 2, 3차 반응조의 경우는 감소가 나타나지 않았다. 32-63  $\mu\text{m}$ 경우는 1,2,3차 모두 20분에서 가장 낮은 농도로 나타났으며 그이후에는 별다른 감소가 나타나지 않았다. <32  $\mu\text{m}$  경우 감소가 나타나지 않았다.



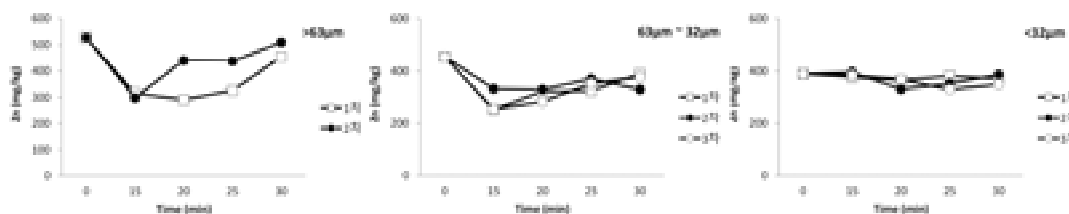
[그림 IV-바-20] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Ni의 농도변화(해수 사용)

- 구리(Cu)의 경우 >63  $\mu\text{m}$ 분율의 경우 1차 반응조의 15분에서 25분까지는 50%가까이 감소한 것이 관찰되었으나, 그 이후 및 2, 3차 반응조의 경우는 감소가 나타나지 않았다. 32-63  $\mu\text{m}$ 경우는 1,2,3차 모두 15분에서 가장 낮은 농도로 나타났으며 그이후에는 별다른 감소가 나타나지 않았다. <32  $\mu\text{m}$  경우 3차반응조의 30분에서 약간의 감소가 나타났다.



[그림 IV-바-21] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물 Cu의 농도변화(해수 사용)

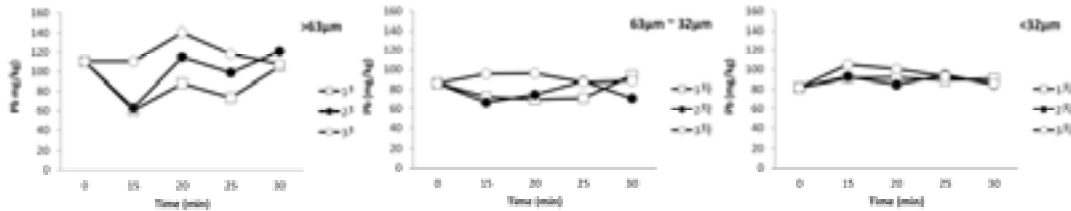
- 아연(Zn)의 경우 >63  $\mu\text{m}$ 분율의 경우 1차 반응조의 15분에서 25분까지, 2반응조의 경우 15분에 50%가까이 감소한 것이 관찰되었으나, 그 이후에는 오히려 증가하였다. 32-63  $\mu\text{m}$ 경우는 1, 2, 3차 모두 15분에서 가장 낮은 농도로 나타났으며 그 이후에는 별다른 감소가 나타나지 않았다. <32  $\mu\text{m}$  경우 감소가 나타나지 않았다.



[그림 IV-바-22] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Zn의 농도변화(해수 사용)

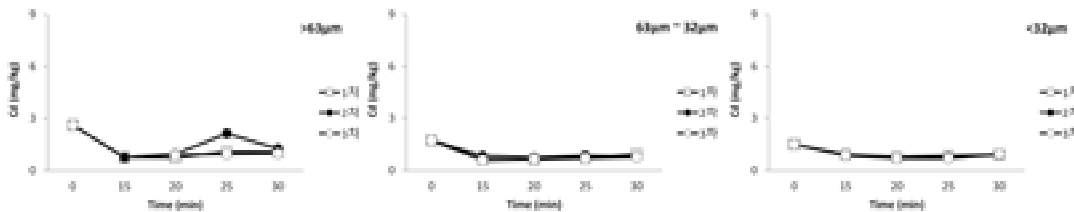
- 납(Pb)의 경우 >63  $\mu\text{m}$ 분율의 경우 1, 2차 반응조의 15분까지 50%가까이 감소한 것

이 관찰되었으나, 그 이후에는 오히려 증가하였다. 32-63, <32  $\mu\text{m}$  경우 감소가 나타나지 않았다.



[그림 IV-바-23] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Pb의 농도변화(해수 사용)

- 카드뮴(Cd)의 경우 >63  $\mu\text{m}$ 분율의 경우 1, 2차 반응조의 25분 까지 50%가까이 감소한 것이 관찰되었다. 32-63, <32  $\mu\text{m}$  경우 30 %정도 감소한 것이 관찰되었다.



[그림 IV-바-24] 5L 반응조 시험 및 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + 0.05% Tween 80 처리에 의한 퇴적물의 Cd의 농도변화(해수 사용)

## ■ 고도처리 공정 사례 검토

### □ 초미세기포

- 1995년 일본에서 개발된 초미세기포 기술은 현재까지 미세기포, 마이크로 기포 및 초미세기포의 명칭과 기포 크기 규정 등이 국제적으로 규정되어 있지 않음.
- 일반적으로 마이크로 버블(Micro bubble)은 직경은 50 $\mu\text{m}$  이상이며, 초미세기포 즉, 나노 버블(Nano bubble)은 크기가 약 0.1~수 십 $\mu\text{m}$  범위(50 $\mu\text{m}$  이하)의 미세한 기포임.
- 마이크로 버블 또는 초미세기포는 ①물을 가압한 후 공기 등을 물에 용해시켜 수중으로 유출시킬 때 압력이 해제되면서 미세한 기포를 발생시키는 방식과 ②노즐 등 재료/소재를 이용하여 미세한 기포를 발생시키는 방식 그리고 기타 방식으로 크게 3가지로 구분할 수 있음(Choi H.-E., 2011).
- 일반적으로 기포의 크기가 증가할수록 용존산소량이 낮을 경우, 유기물 분해 등 오염물질 처리 공정에서 전력비용이 증가하는 등 처리효율이 낮아지므로, 미세기포의 크기가 감소할수록 상대적으로 산소전달율 등의 증가로 오염물질의 처리 정도 및 에너지 효율성이 높아진다(Han Y.-R., 2011).
- 최근 오염물질의 정화 기작(Mechanism)이 유사한 토양 정화에서 마이크로-나노 기포를 사용하는 고도 처리공정에 대한 연구와 시도가 증가하고 있다(Ju M., 2010).

### □ 고도산화처리(Advanced Oxidation Process: AOP)

- 고도산화처리는 비교적 강력한 산화제로 알려진 수산화라디칼( $\cdot\text{OH}$ ,  $\text{EO}[\cdot\text{OH}/\text{H}_2\text{O}] = +2.8\text{VNHE}$ )을 발생시켜서 높은 Oxidation potential로 인해 난분해성 오염물질을 산화 분해시키는 것이다. 오존/과산화수소 및 UV/과산화수소는 고도산화공정의 대표적인 기술로 수처리 등 다양한 환경 분야에 적용되고 있음(Hoigné J., 1983; Lee Y., 2004).
- Ozone/High pH AOP: 오존을 높은 pH에서 많은 OH라디칼을 생성되는 원리를 이용한 것임.
  - $\text{O}_3 + \text{OH}^- \rightarrow \text{O}_3^- + \text{OH}$
  - $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^- + \text{OH} + \text{O}_2$
- $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  AOP (Ozone/HydrogenPeroxide): 오존에 인위적으로 과산화수소를 첨가하여 오존을 더 빠른 속도로 분해시켜 수산화 작용기 생성시키는 방법이다. 초기반응의 결과로 Ozonide 라디칼( $\text{O}_3^-$ )과  $\text{HO}^{2-}$ 이 생성되며 각각의 연쇄반응을 거쳐 수산화 작용기를 형성하게 된다.
- UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$  AOP: 과산화수소를 광분해하여 OH 라디칼을 생성하는 고도산화처리 중 OH라디칼 생성 면에서 가장 간단한 방법이라고 할 수 있다. 그러나 파장 254 nm에서 과산화수소의 흡광계수가 작아 흡수성이 작은 것이 큰 단점으로 충분한 양의 수산화 작용기를 얻기 위해서는 다량의 과산화수소가 필요하다.
  - $\text{H}_2\text{O}_2 + h\nu \rightarrow 2\text{OH}$

## ■ 고도처리 장치를 이용한 세립질 정화 기초 시험

### □ 실험조건 및 방법

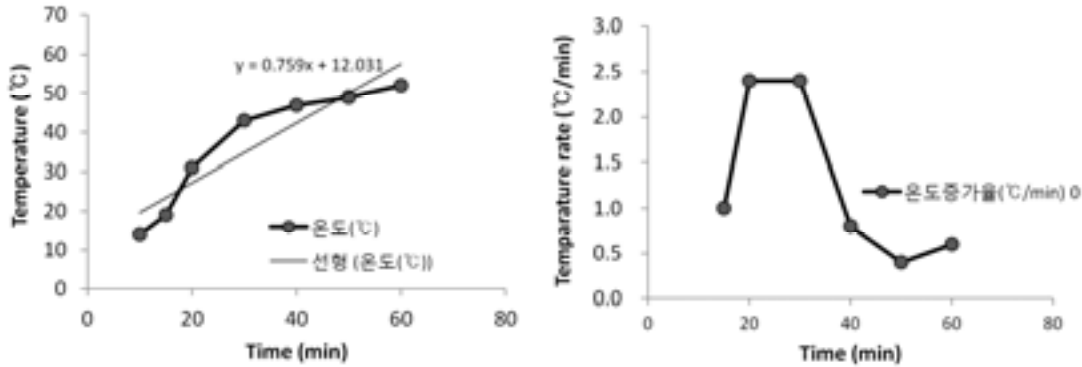
- 실험 목적: 1. 고도처리 장치를 이용한 세립질 정화 가능성과 한계 시험
  2. 고도처리 장치 운전 시 반응조 내부 시험 가능한 용적 파악
  3. 고도처리 장치 운전, 성능 시험 및 보완점 파악
- 시험조건
  - 처리제: 증류수 단독사용
  - soild:liquid 비율: 1:3
  - 대상퇴적물: N해역 채취시료 중 미세입자 습식 체질로 분별된  $<125 \mu\text{m}$ 의 입자
- 시험방법
  1. 1 batch에 필요한 대상퇴적물 + 증류수를 준비하였다. (Air 단독 폭기, 1차 오존 폭기: 40L, 2차 오존 폭기: 28L)
  2. 고도처리장치의 반응조에 '퇴적물+물' 혼합물 반응용 시료 채워 넣은 후, 펌프를 작동시켜 미리 시료를 균질화하였다.
  3. 시료가 완전히 혼합된 후, 장치가 안정화되면 Air와,  $\text{O}_3$ 를 차례로 각각 시험가동 하였다.
  4. 각 처리조건은
    - Air조건: 펌프압력  $2 \sim 2.5 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ , 유량: 2.2 L/min,
    - 1차  $\text{O}_3$  조건: 펌프압력  $2 \sim 2.5 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ , air유량: 2.2 L/min
    - 2차  $\text{O}_3$  조건: 펌프압력  $2 \sim 2.5 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ , air 유량 1.5 L/min

### □ 시험 결과 및 고찰

- ◆ 공기(Air) 단독 폭기 (Aeration) 시험

○ 시험결과

- Air 폭기 실험 중 반응조 내부의 시료 온도변화는 60분 동안 14℃에서 52℃까지 증가하였다 (표 IV-바-1, 그림 IV-바-25)
- Air 폭기 실험 중 반응조 내부의 시료의 온도증가율은 1.00~2.40 ℃/min (평균 1.09℃/min) 이었으며 초기 증가율에 비하여 후반으로 갈수록 온도증가율은 감소하였다.



[그림 IV-바-25. 고도처리장치 반응조 Air aeration 작동시 반응시료의 온도변화]

○ 고찰

- Aeration만 작동할 경우 장치 반응조의 유효용적은 40 L 이상으로 시료의 solid : liquid 비가 1:3 인 퇴적물 시료를 처리하는데 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

[표 IV-바-1] 고도처리장치 반응조 Air aeration 작동시 반응시료의 온도변화

Time (min)	0	5	10	15	20	30	40	50	60
Temp.(°C)	-	-	14	19	31	43	47	49	52

◆ 1차 오존 폭기 (O<sub>3</sub> aeration) 시험

○ 시험결과

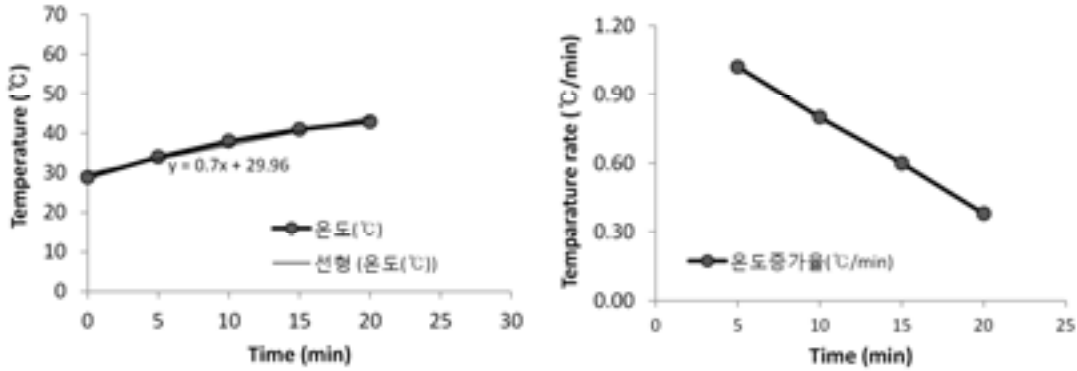
- O<sub>3</sub> 폭기 실험 중 반응으로 인한 기포 대량 발생 및 반응격화로 실험을 중단하였다.
- O<sub>3</sub> 폭기 실험 중 반응조 내부의 시료 온도변화는 20분동안 28.9℃에서 42.9℃까지 증가하였다. (표 IV-바-2., 그림 IV-바-26)
- O<sub>3</sub> 폭기 실험 중 반응조 내부의 시료의 온도증가율은 0.38~1.02 ℃/min (평균 0.70 ℃/min) 이었으며 초기 증가율에 비하여 후반으로 갈수록 온도증가율은 감소하였다.

○ 고찰

- O<sub>3</sub> Aeration 까지 작동할 할 경우 장치 반응조의 유효용적은 40 L 이하였으며 시료의 solid : liquid 비가 1:3 인 퇴적물 시료를 처리하려면 반응물의 용량을 현저히 낮추어야 할 것으로 판단하였다.
- 반응물의 용량을 30L 이하로 낮춘 후 재 실험을 수행하기로 결정 하였다.

[표 IV-바-2] 고도처리장치 반응조 O<sub>3</sub> aeration 작동시 반응시료의 온도변화

Time (min)	0	5	10	15	20	30	40	50	60
Temp.(°C)	28.9	34	38	41	42.9	-	-	-	-

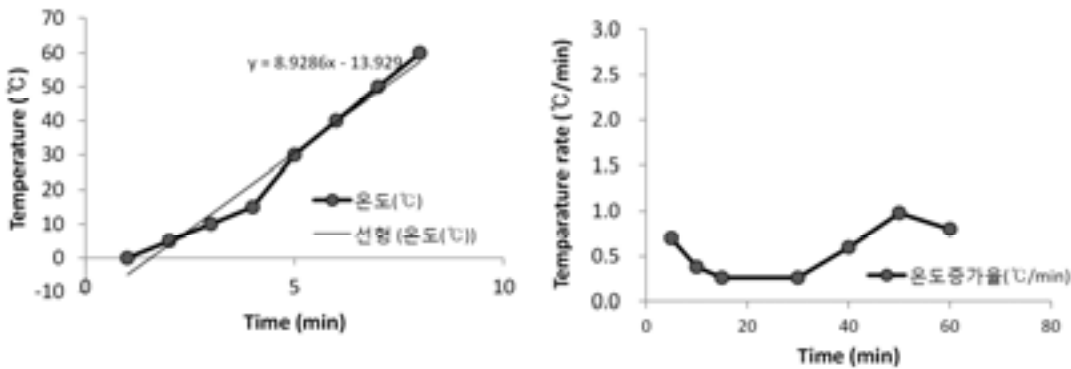


[그림 IV-바-26] 고도처리장치 반응조 O<sub>3</sub> Aeration 작동시 반응시료의 온도변화

◆ 2차 오존 폭기 (O<sub>3</sub> aeration) 시험

○ 시험결과

- O<sub>3</sub> 폭기 실험 중 반응조 내부의 시료 온도변화는 60분동안 17°C에서 48.9°C까지 증가하였다. (표 IV-바-3, 그림 IV-바-27)
- O<sub>3</sub> 폭기 실험 중 반응조 내부의 시료의 온도증가율은 0.26~0.98 °C/min (평균 0.57 °C/min) 이었으며 10-30분 까지 온도증가율은 감소하였으나 50분까지 다시 온도증가율이 증가하였다.



[그림 IV-바-27] 고도처리장치 반응조 O<sub>3</sub> Aeration 작동시 반응시료의 온도변화 - 2차 ○ 고찰

- 반응조 용량 대비 반응량은 적절하나, O<sub>3</sub> 폭기 실험 중 낮은 수위로 인하여 펌프로 기포유입 되는 이유 등으로 인한 오존 생성 펌프압력 저하가 관찰되었다.
- 따라서 동일 조건으로 지속적 처리가 불가하였다.
- 퇴적물이 원활히 처리되지 않고, 퇴적되어있는 dead zone 관찰되어 이로 인하여 처리되지 않은 시료가 있을 수 있는 것으로 판단되어, 순환펌프의 압력이 반응물 전체를 순

환시키기에는 힘이 부족한 것으로 나타났다.

- 오존생성 펌프의 원활한 작동을 위하여 반응물순환펌프 교체 혹은 대상 퇴적물 용량을 바꾸어야 할 것으로 보임 반응물 순환펌프 교체하기로 결정하였다.
- 하이드로사이클론 장치와의 연속처리 고려 및 고도처리장치 처리 시 반응물의 순환을 용이하게 하기 위하여 반응물의 solid:liquid 비를 1:6으로 조절하기로 하였다.

[표 IV-바-3] 고도처리장치 반응조 O<sub>3</sub> aeration 작동시 반응시료의 온도변화

Time (min)	0	5	10	15	20	30	40	50	60
Temp.(°C)	17	20.5	22.4	23.7	-	37	40	44.9	48.9

### ■ 고도처리 장치를 이용한 세립질 정화 보완 시험

#### □ 실험조건 및 방법

- 실험 목적: 1. 고도처리 장치를 이용한 세립질 정화 가능성과 한계 시험  
2. 교체한 펌프의 정상 작동 여부 및 성능 확인

#### ○ 시험조건

- 처리제: 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80 (사용 공정수: 인공 해수)
- solid:liquid 비율: 1:6 (보다 원활한 순환을 위하여 고액비를 조정)
- 대상퇴적물: N해역 채취시료 중 미세입자 습식 체질로 분별된 <125 μm의 입자

#### ○ 시험방법

※ 반응조에 교반용 임펠러 이외 거품제거용 임펠러 추가 부착함

※ 반응 관찰 후 고도처리 조 이동 시간 결정할 것

1. 8.9 L의 습시료를 두 개의 초기 반응조로 나누어 충분히 교반 후 시약 및 1:3 처리수와 혼합하여 미리 시료를 균질화하였다.
1. 시료가 완전히 혼합된 후, 장치가 안정화되면
2. 처리수를 초기 반응조에 주입하고, 10분 동안 펜톤반응 처리를 하였다.
3. 필요 인공 해수 첨가하여 반응 중지시킨 후
4. 시료 및 처리수 혼합물 고도처리조로 이동하여 고도반응 처리를 하였다.
5. 처리조건은 O<sub>3</sub> 조건: 펌프압력 3 kgf/cm<sup>2</sup>, O<sub>3</sub> 유량: 2.5 L/min
6. 시료가 균질화되면 0'분시료를 채취하고, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 동안 처리된 시료를 채취하였다.
7. 채취된 시료는 증류수를 담고 세척한 후 원심분리 하여 (3번 반복) 처리수를 세척해내고
8. 퇴적물만 남긴 후 동결 건조하여 입자크기별 분율로 분취하여 잔류오염물질의 농도를 분석하였다.



[그림 IV-바-28] 반응 기포 과다발생 제거용 임펠러 및 성능

## □ 시험 결과 및 고찰

### ① 장치 작동 결과

- 반응거품 제거용 임펠러 효과 있음, 반응 시간동안 거품제거 용이한 것으로 나타났다. (그림 IV-바-28)
- 따라서 40 L의 반응물을 처리하는 것도 가능하였다.
- soild:liquid 비율 1:6은 본 장치를 이용한 오염퇴적물 처리도 가능하였다.

### ② 부영양화관련 평가물질(COD, IL)의 농도변화

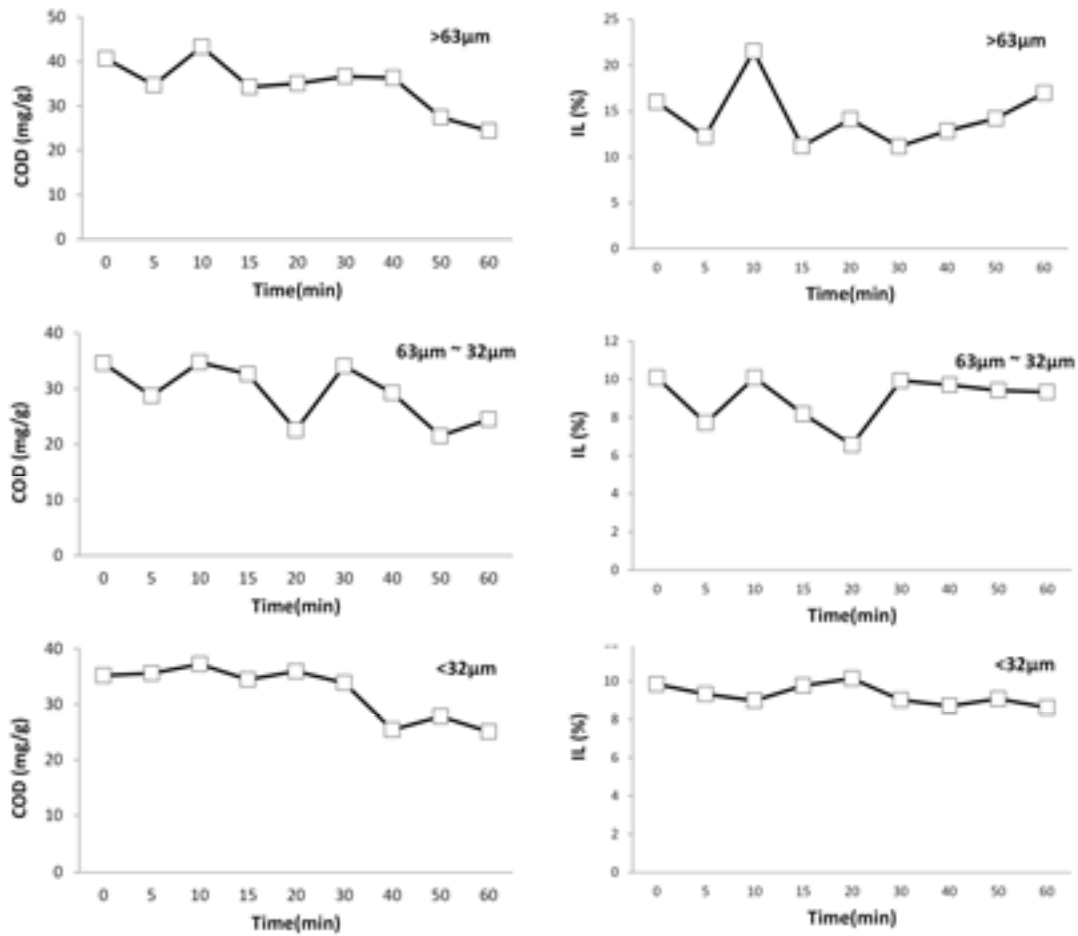
- 63  $\mu\text{m}$ 이상의 입자분율에서 COD는 초기 10분정도에 증가하나, 15분에 감소후 약간 증가하였으나 그 이후에는 60분 까지 계속 감소하였다. IL의 경우는 5분에 감소 후 10분에 크게 증가하였으나 다시 감소하였다가 30분부터 60분까지 꾸준히 증가하였다.
- 32-63  $\mu\text{m}$ 의 입자분율에서 COD는 증-감을 반복하면서 50분에 가장 낮은 값을 보였고 IL은 증감을 반복하였으나 30분 이후에는 감소되지 않았다.
- 32  $\mu\text{m}$ 이하의 입자분율에서 COD는 시간에 따라 점차 감소하여 40-60에 가장 낮은 것으로 나타났고, IL 역시 반응내내 소폭 증가하는 경향을 보였다.

### ③ 기타 유기물(TOC, TN, TP)의 농도변화

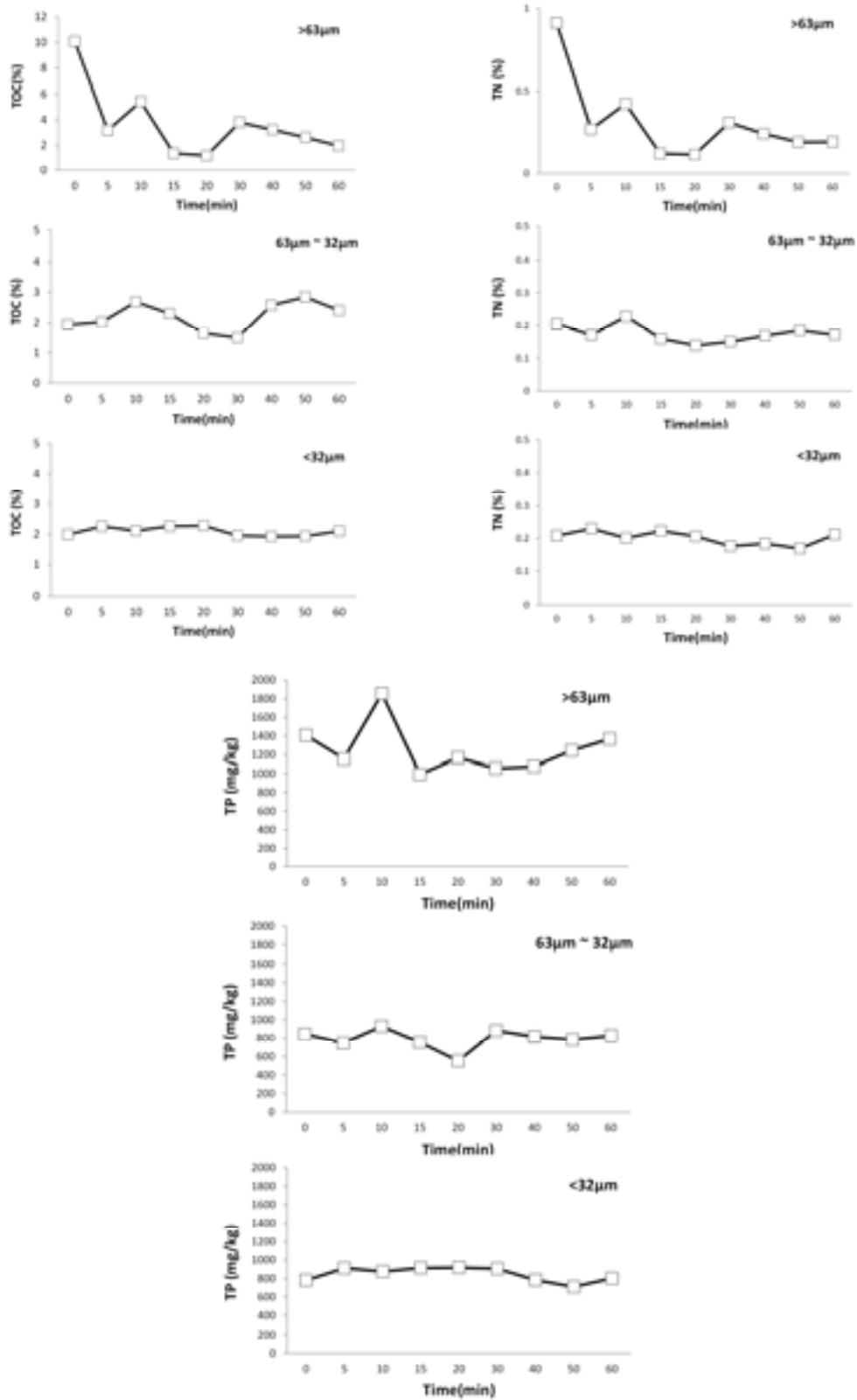
- 63  $\mu\text{m}$ 이상의 입자분율에서 TOC, TN은 반응시간동안 소폭의 증감이 있었으나 1시간 후에는 현저히 감소하였으며, TP의 크게 감소하지 않는 것으로 나타났다.
- 32-63  $\mu\text{m}$ 의 입자분율에서는 TOC, TN, TP 모두 증감은 있었으나, 감소하는 경향을 보이지 않는 것으로 나타났다.



○ 32  $\mu\text{m}$ 이하의 입자분을 역시 TOC, TN, TP 모두 모든 반응조에서 거의변화가 없는 것으로 나타났다.



[그림 IV-바-29] 2차 고도처리장치 시험 ( $\text{O}_3 + 1\text{M H}_2\text{O}_2 + \text{Tween 80}$  (in 증류수))  
결과 퇴적물의 COD, IL의 농도변화

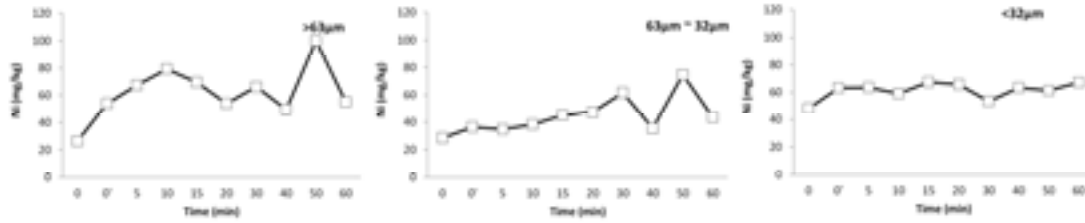


[그림 IV-바-30] 2차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  (in 증류수)) 결과 퇴적물의 TOC, TN, TP의 농도변화

④ 중금속의 농도변화

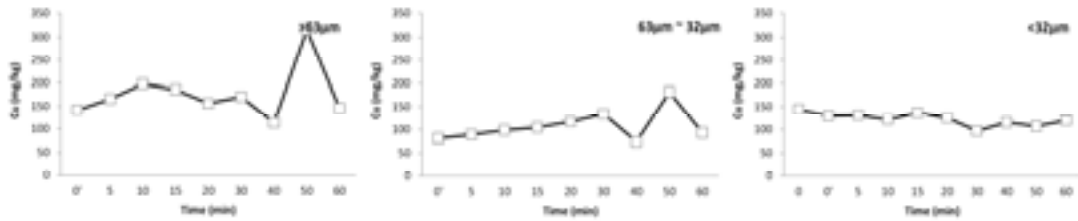
- 니켈(Ni)의 경우 >63 µm분율, 32-63 µm, <32 µm 모두 감소경향은 나타나지 않았으며

오히려 증가하는 것으로 나타났다.



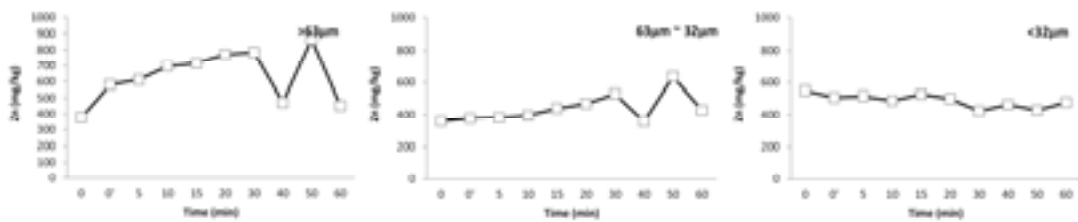
[그림 IV-바-31] 2차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  (in 증류수))  
결과 퇴적물의 Ni의 농도변화

- 구리(Cu)의 경우 역시  $>63\ \mu m$ 분율,  $32-63\ \mu m$ ,  $<32\ \mu m$  모두 감소경향은 나타나지 않았으며 오히려 큰 입자에서는 증가하는 것으로 나타났다.



[그림 IV-바-32] 2차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  (in 증류수))  
결과 퇴적물의 Cu의 농도변화

- 아연(Zn)의 경우 역시  $>63\ \mu m$ 분율,  $32-63\ \mu m$ ,  $<32\ \mu m$  모두 감소경향은 나타나지 않았으며 오히려 증가하는 것으로 나타났다.



[그림 IV-바-33] 2차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  (in 증류수))  
결과 퇴적물의 Zn의 농도변화

- 납(Pb)의 경우 역시  $>63\ \mu m$ 분율,  $32-63\ \mu m$ ,  $<32\ \mu m$  모두 감소경향은 나타나지 않았으며 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

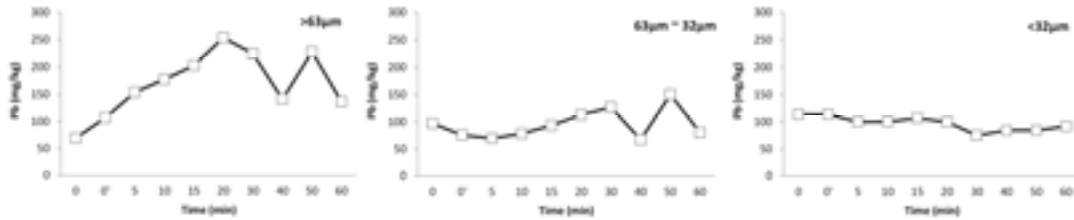


그림 IV-바-34. 2차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  (in 증류수))  
결과 퇴적물의 Pb의 농도변화

- 카드뮴(Cd)의 경우 역시  $>63\ \mu m$ 분율에서 감소경향은 나타나지 않았으며 오히려 증가하는 것으로 나타났다.  $32-63\ \mu m$ ,  $<32\ \mu m$ 에서는 큰 변화를 보이지않았다.

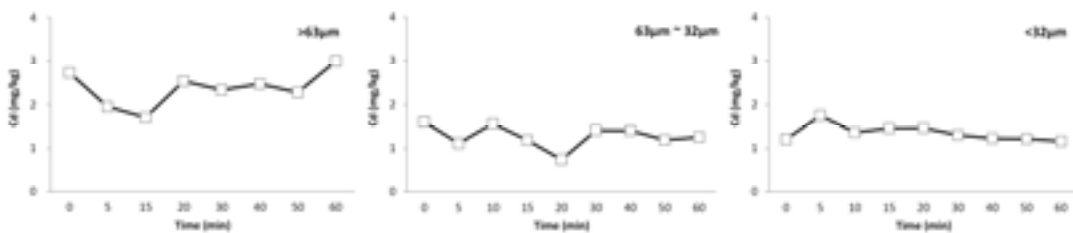


그림 IV-바-35. 2차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  (in 증류수))  
결과 퇴적물의 Cd의 농도변화

- 전반적으로 큰 입자에서의 증가가 두드러지게 나타나, 공정의 문제보다는 펌프의 재질에 의한 오염인 것으로 판단되었다.

## ■ 고도처리 장치를 이용한 세립질 정화 심화 시험

### □ 실험조건 및 방법

- 실험 목적: 1. 고도처리 장치를 이용한 세립질 정화 가능성과 한계 시험  
2. 교체한 펌프의 정상 작동 여부 및 성능 확인

#### ○ 시험조건

- 처리제:  $1M H_2O_2 + Tween\ 80$  (사용 공정수: 인공 해수)
- soild:liquid 비율: 1:6
- 대상퇴적물: N해역 채취시료 중 미세입자 습식 체질로 분별된  $<125\ \mu m$ 의 입자 (40 L)

#### ○ 시험방법

- 8.9 L의 습시료를 두 개의 반응조(각 4.45L씩)로 나누어 충분히 교반 후 시약 및 처리수와 주어 S:L=1:3으로 맞추어 충분히 교반하였다.
- $H_2O_2\ 0.725L$  (5분동안 주입) + 0.05% Tween 80를 각각 주입하였다.  
※ 반응거품 제거용 임펠러 장착하여 실험
- 10분 반응 후 반응물을 고도처리 장치로 옮겼다.  
※ 반응 관찰 후 고도처리 조 이동 시간 결정할 것 -> 37분 후 오존주입

시료가 완전히 혼합된 후, 장치가 안정화되면

처리수를 초기 반응조에 주입하고, 10분 동안 펜톤반응 처리를 하였다.

필요 증류수 첨가하여 반응 중지시킨 후

시료 및 처리수 혼합물 고도처리조로 이동하여 고도반응 처리를 하였다.

처리조건은 O<sub>3</sub> 조건: 펌프압력 3 kgf/cm<sup>2</sup>, O<sub>3</sub> 유량: 2.5 L/min --단위확인 필요

시료가 균질화되면 0'분시료를 채취하고, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 동안 처리된 시료를 채취하였다.

채취된 시료는 증류수를 담고 세척한 후 원심분리 하여 (3번 반복) 처리수를 세척해내고 퇴적물만 남긴 후 동결 건조하여 입자크기 분율별로 분취하여 잔류오염물질의 농도를 분석하였다.

## □ 시험 결과 및 고찰

### ① 장치 작동 결과

- 시료의 온도변화(표 IV-바-4)는 증류수를 처리제로 한 시험과 유사하게 나타났다.

[표 IV-바-4] 고도처리장치 반응조 O<sub>3</sub> aeration - 해수조건시료 반응시료의 온도변화

Time (min)	0	5	10	15	20	30	40	50	60
Temp.(°C)	30.5	33.9	36.6	39.3	42.3	48.8	52.8	57.9	59.8

### ② 부영양화관련 평가물질(COD, IL)의 농도변화

- 63 μm이상의 입자분율에서 COD는 증감의 반복은 있으나 크게 변화는 없었으며, IL은 증감의 반복이 있으며 그 폭이 큰 것으로 나타났다.
- 32-63 μm의 입자분율에서 COD는 증감의 반복은 있으나 크게 변화는 없었으며, IL은 증감의 반복이 있으며 그 폭이 큰 것으로 나타났다.
- 32 μm이하의 입자분율에서 COD는 IL 역시 반응 내내 소폭 감소하는 경향을 보였으나 큰 변화는 없었다.

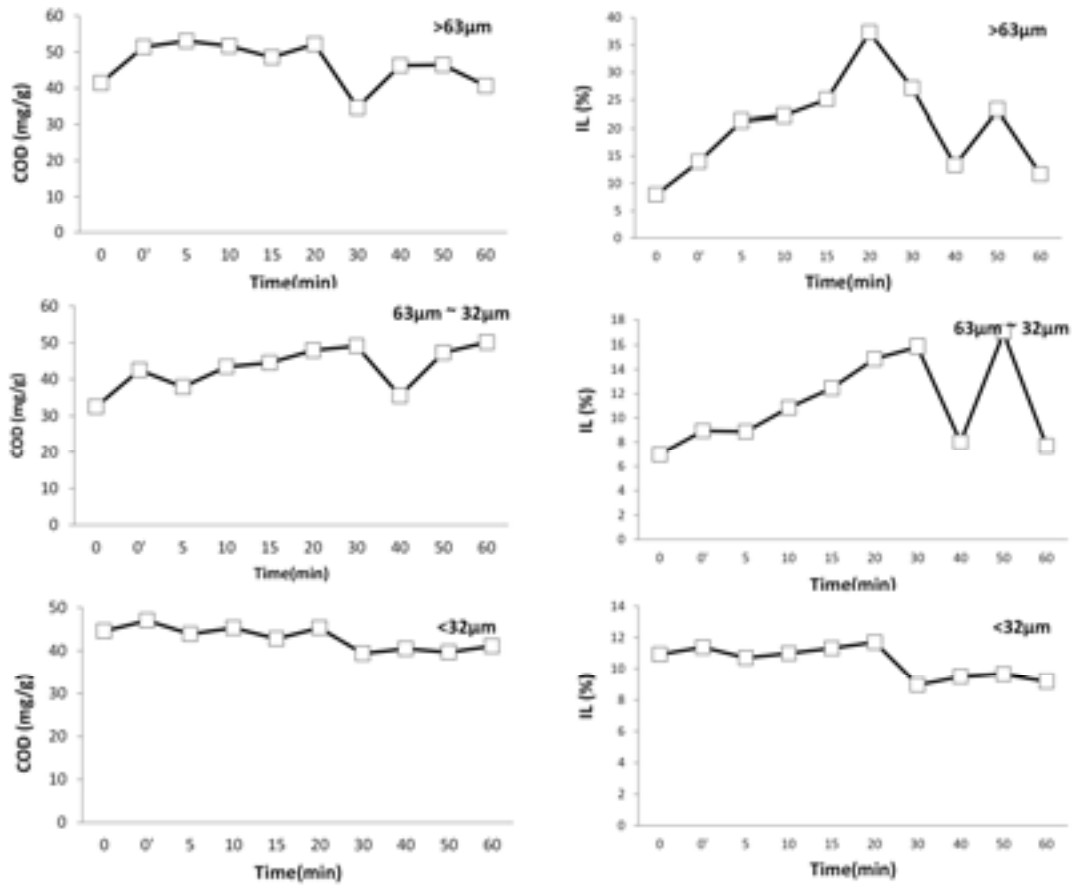


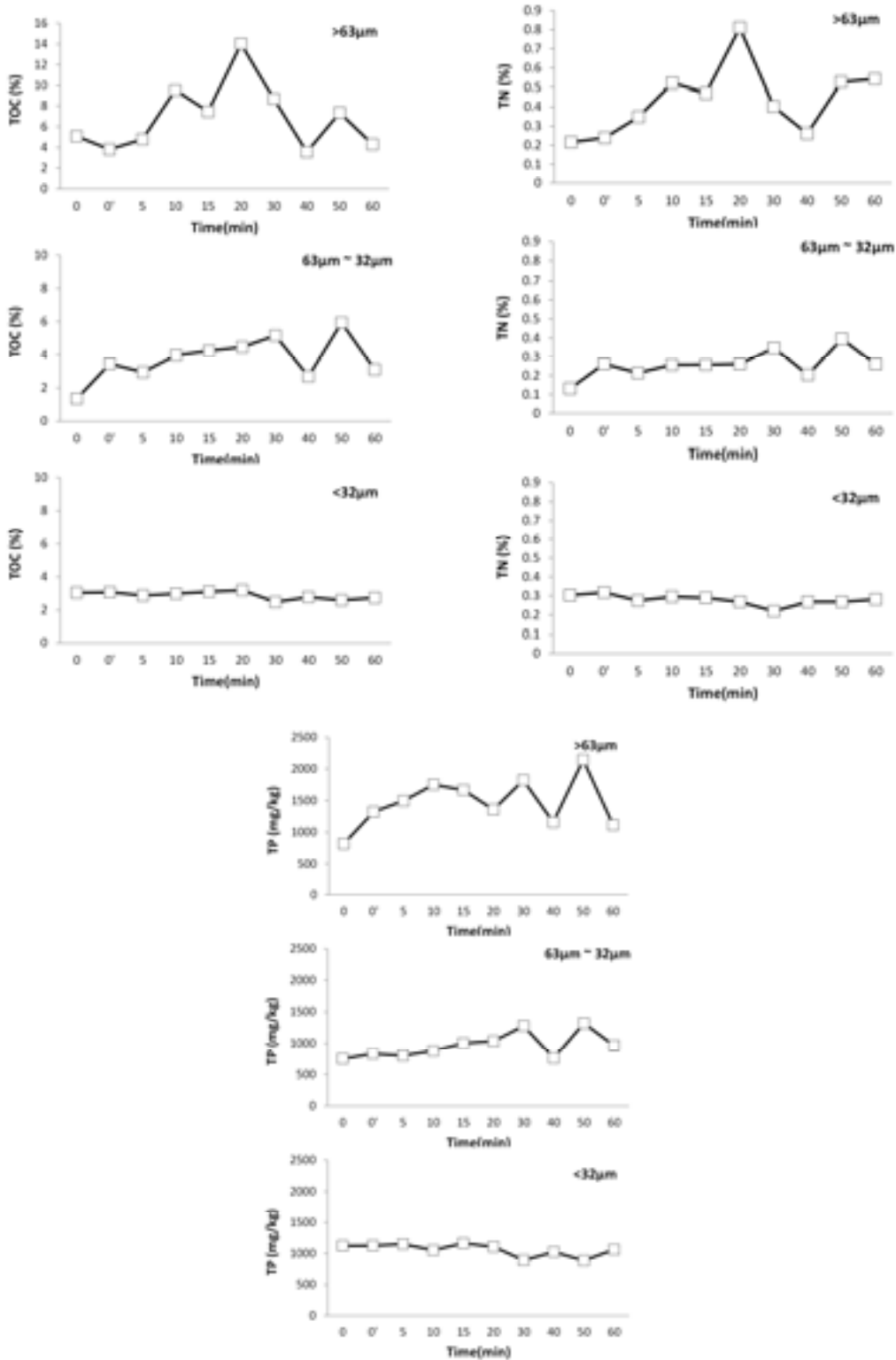
그림 IV-바-36. 3차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  결과 퇴적물의 COD, IL 의 농도변화(해수 사용)

### ③ 기타 유기물(TOC, TN, TP)의 농도변화

- 63 µm이상의 입자분율에서 TOC, TN, TP는 반응시간동안 큰폭의 증감이 있었으나 감소경향은 보이지 않았다.
- 32-63 µm의 입자분율에서는 TOC, TN, TP는 반응시간동안 큰폭의 증감이 있었으나 감소경향은 보이지 않았다.
- 32 µm이하의 입자분율 역시 TOC, TN, TP 모두 모든 반응조에서 거의변화가 없는 것으로 나타났다.



[그림 IV-바-37] 3차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$ (해수 사용))

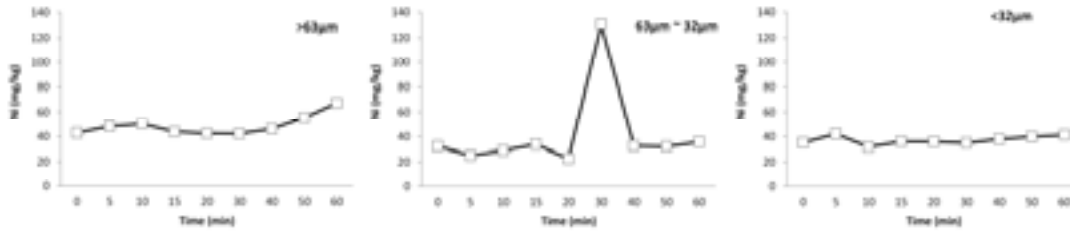


[그림 IV-바-38] 3차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween 80$  결과 퇴적물의 COD, IL 의 농도변화(해수 사용))

④ 중금속의 농도변화

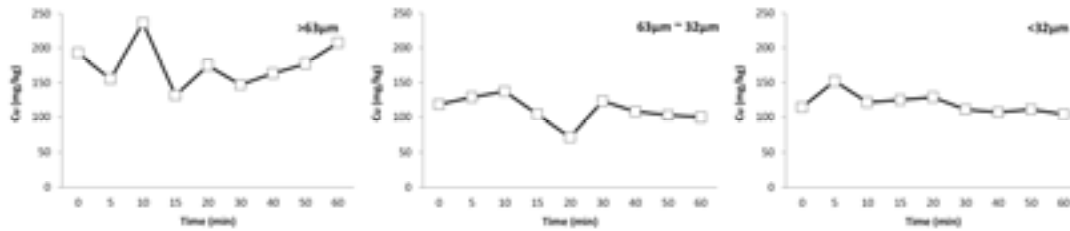
- 니켈(Ni)의 경우 >63 µm분율, 32-63 µm, <32 µm 모두 감소경향은 나타나지 않았으며 오히려 증가하는 것으로 나타났다.





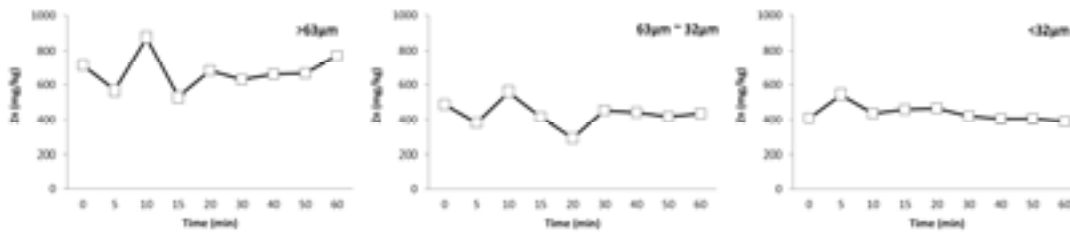
[그림 IV-바-39] 3차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  결과)  
퇴적물의 Ni의 농도변화(해수 사용)

- 구리(Cu)의 경우 역시  $>63\ \mu m$ 분율,  $32-63\ \mu m$ ,  $<32\ \mu m$  모두 감소경향은 나타나지 않았으며 오히려 큰 입자에서는 증가하는 것으로 나타났다.



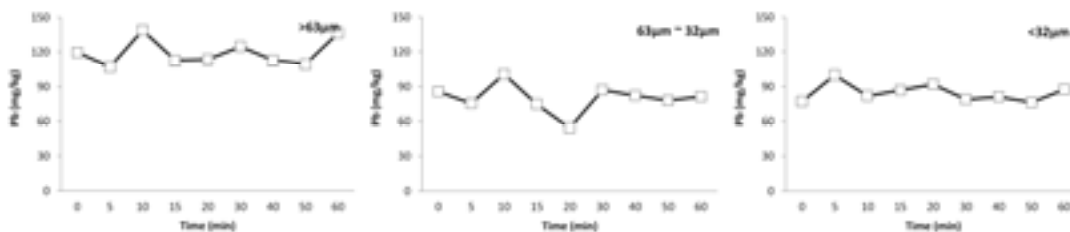
[그림 IV-바-40] 3차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  결과)  
퇴적물의 Cu의 농도변화(해수 사용)

- 아연(Zn)의 경우 역시  $>63\ \mu m$ 분율,  $32-63\ \mu m$ ,  $<32\ \mu m$  모두 감소경향은 나타나지 않았으며 오히려 증가하는 것으로 나타났다.



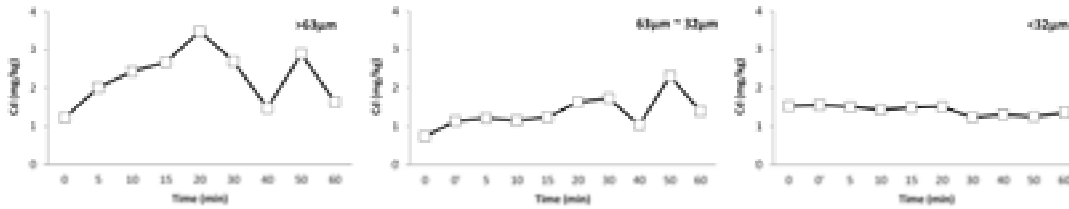
[그림 IV-바-41] 3차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  결과)  
퇴적물의 Zn의 농도변화(해수 사용)

- 납(Pb)의 경우 역시  $>63\ \mu m$ 분율,  $32-63\ \mu m$ ,  $<32\ \mu m$  모두 감소경향은 나타나지 않았으며 오히려 증가하는 것으로 나타났다.



[그림 IV-바-42] 3차 고도처리장치 시험  $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  결과  
퇴적물의 Pb의 농도변화(해수 사용)

- 카드뮴(Cd)의 경우 역시 >63  $\mu\text{m}$ 분율, 32-63  $\mu\text{m}$ , <32  $\mu\text{m}$  모두 감소경향은 나타나지 않았으며 오히려 증가하는 것으로 나타났다.



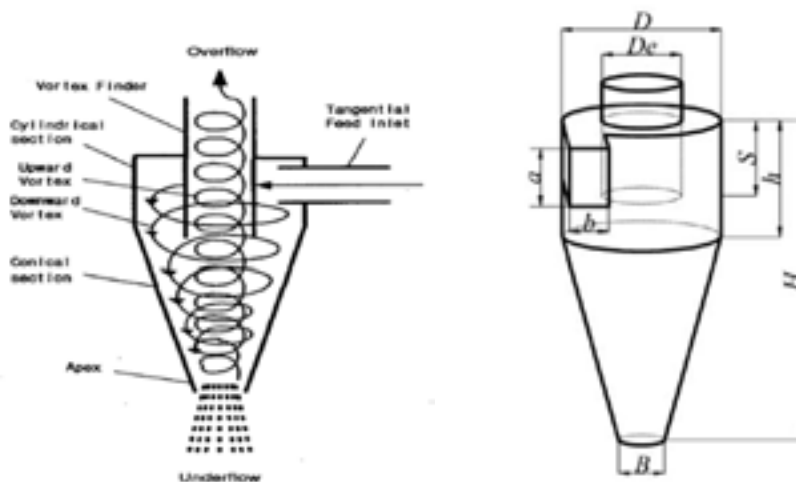
[그림 IV-바-43] 3차 고도처리장치 시험 ( $\text{O}_3 + 1\text{M H}_2\text{O}_2 + \text{Tween 80}$  결과)  
퇴적물의 Cd의 농도변화(해수 사용)

- 전반적으로 큰 입자에서의 증가가 두드러지게 나타나, 공정의 문제보다는 펌프 재질에 의한 오염인 것으로 판단되었다.
- 5차년 연구 시 이에 대한 고려가 있어야 하는 것으로 판단되었다.

### (나) 분리 기반 처리기술의 구현을 위한 세부공정 별 시험

#### ① 수력 싸이클론을 이용한 입자분급 사례 검토

- 싸이클론은 액상에 혼합된 고체 입자를 분리하는 것과 기체에 혼합된 고체 입자를 분리하는 것으로 크게 2가지로 구분함.
- 수력 싸이클론(Hydro-cyclone)은 1891년 Bretney에 의해서 고안된 이후, 낮은 시설 투자비, 용이한 설치, 소형 장치로 연속적으로 많은 양을 처리할 수 있는 등의 장점으로 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다(Chiné B., 2000; Chu L.-Y., 2004).
- 수력 싸이클론의 기본 원리는 원심가속도의 영향으로 액체에 혼합된 고체와 액체의 비중 차이를 이용하여 입자를 분리함(Choung Y.K., 2001).
- 일반적으로 원통부(Cylindrical section)와 원추부(Conical section)로 구성되어 있으며, 입자분급 효율에 영향을 미치는 주요 인자(Factors)는 싸이클론의 직경과 길이, 상부 배출구(Vortex finder)의 길이 및 유입/유출구의 직경 등임. 또한 유입 슬러리의 특성에 의한 변수로 유입수 중에 포함된 고체 입자의 비중, 유입 압력, 유입수의 농도, 고액비 및 고체 입자의 입경별 분율 등이 있음(Kim B.-K., 2005; Zhao B, 2005).



---

## ② 수력 사이클론을 이용한 분리 기반 처리기술 시험

### ㉠ 실험조건 및 방법

- 실험목적: 시료의 고액비에 따른 입자분리 효율 평가 및 최적 조건 도출
- 시험조건
  - 주입압력: 1bar
  - 시료의 solid:liquid ratio: 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7
  - 대상퇴적물: N해역의 채취시료 중 미세입자부분(<125  $\mu\text{m}$ )을 습식체질로 분별한 시료
- 시험방법
  1. 하이드로싸이클론의 시료조에 퇴적물과 물의 비율을 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7 으로 맞춘 시료를 채우고
  2. 하이드로싸이클론의 시료주입압력을 1로 맞춘 후 시료를 주입하였다
  3. 63  $\mu\text{m}$  분리용 하이드로싸이클론과 32  $\mu\text{m}$ 분리용 하이드로싸이클론을 이용하였으며, 하이드로싸이클론에서 에서 분리되어 상부로 토출되는 시료(over flow)와 하부로 토출되는 시료(under flow)를 각각 받은 후
  4. 건조된 시료를 다시 >63, <63, >32, <32  $\mu\text{m}$ 로 습식 분리한 후 시료를 동결건조하였다.

### ㉡ 시험 결과 및 고찰

#### ■ 장치 작동 결과

- 개발된 하이드로싸이클론은 작동에 큰 문제가 없었다.
- 펌프가동 시 발생하는 펌프의 발열 때문에 통과되는 시료의 온도상승이 관찰되었다.

#### ■ 입자분리 효율평가

1. 75 (63)  $\mu\text{m}$  이상 입자분리를 위한 하이드로싸이클론의 입자분리 효율 평가
  - 75 (63)  $\mu\text{m}$  이하 크기의 입자분리(Over flow)를 위한 하이드로싸이클론의 상부로 토출되는 시료 입자는 63  $\mu\text{m}$ 이하가 98.5%로 본 장치는 63  $\mu\text{m}$ 이하의 입자를 분리하기에 적절한 것으로 평가되었다.(표 IV-바-5)
  - 75 (63)  $\mu\text{m}$  이상 크기의 입자분리(Under flow)는 N해역 퇴적물 시료의 특성 즉, 75 (63)  $\mu\text{m}$  이하 입경 분율(85.55 %)이 75(63)  $\mu\text{m}$  이상, 125  $\mu\text{m}$  이하 입경 분율(11.17 %)에 비하여 약 7.66배 많기 때문에 입자분리 시 분리 대상 입경 이하의 미세입자가 포함된 영향으로 판단되며, 향후(5차년) 이를 해소하기 위한 최적화가 필요하다.
2. solid liquid ratio에 따른 32  $\mu\text{m}$  이상 입자분리를 위한 하이드로싸이클론의 입자분리 효율 평가하여 적정 solid liquid ratio를 선별
  - 32  $\mu\text{m}$  이하크기의 입자분리를 위한 하이드로싸이클론의 상부로 토출되는 시료 입자는 32  $\mu\text{m}$ 이하가 88.7 ~ 99.8 %로 본 장치는 63  $\mu\text{m}$ 이하의 입자를 분리하기에 적절한 것으로 평가되었다.(표 IV-바-6)
  - solid liquid ratio 에 따른 효율은 1:4인 경우에 32  $\mu\text{m}$ 이하가 88.7%로 낮았고, 1:5~7인 경우 95.2 ~ 99.8 %로 solid liquid ratio가 1:5 이상이어야 최적효율로 32  $\mu\text{m}$ 이하의 입자가 분리되는 것이 확인되었으며, 향후(5차년) 최적화가 필요할 것으로 판단된다.
  - 고액비 1:4 조건에서 미세입자(32 $\mu\text{m}$ ) 분급효율은 각각 Over flow(88.71%), Under

flow(86.63%)로서 실험조건 중 가장 이상적인 결과가 도출되었다.

■ 고찰

- 펌프가동 시 발생하는 펌프의 발열 때문에 통과되는 시료의 온도상승이 관찰되어 대용량, 장시간 가동 시 온도를 제어하는 방안이 필요한 것으로 판단되었다.
- 개발된 하이드로사이클론 장치는 63, 32  $\mu\text{m}$ 이하의 입자를 분리하기에 적절한 것으로 평가되었으며, 32  $\mu\text{m}$ 이하의 입자분리를 위해서는 solid liquid ratio가 1:4 이상인 조건에서 효율적인 분리가 가능한 것으로 나타났다.

[표 IV-바-5] 75 (63)  $\mu\text{m}$  이하크기의 입자분리를 위한 하이드로사이클론의 입자분리 효율

condition		size ( $\mu\text{m}$ )	rate (%)	
solid liquid ratio	1:3	Over flow	63 이상	1.49
			<b>63 이하</b>	<b>98.51</b>
		Under flow	63 이상	29.04
			63 이하	70.96

[표 IV-바-6] 32  $\mu\text{m}$  이하크기의 입자분리를 위한 하이드로사이클론의 입자분리 효율

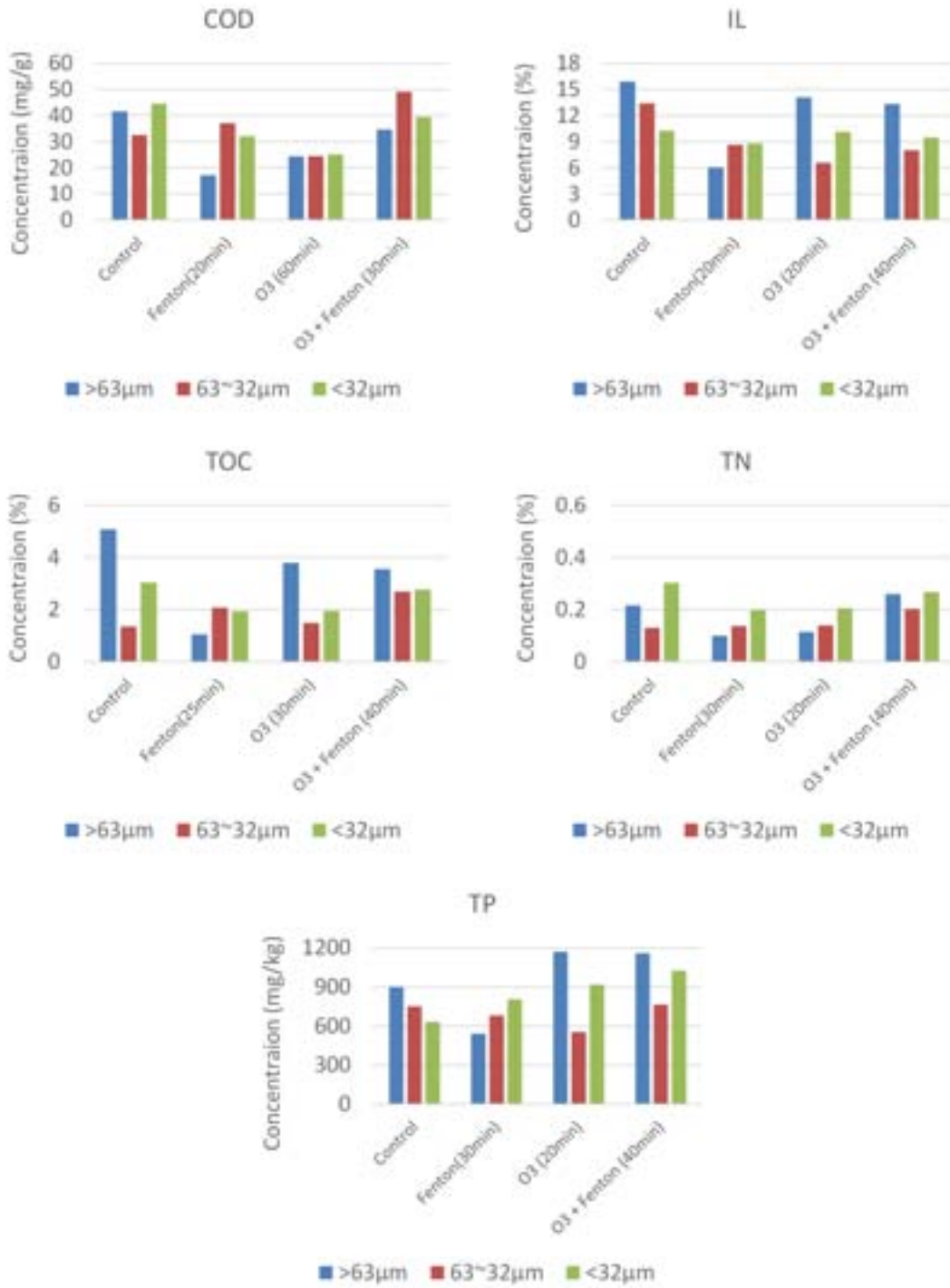
Condition		size( $\mu\text{m}$ )	rate (%)	
solid liquid ratio	1:3	Over flow	32 이상	-
			32 이하	-
		Under flow	32 이상	47.15
			32 이하	52.85
	1:4	<b>Over flow</b>	32 이상	11.29
			<b>32 이하</b>	<b>88.71</b>
		<b>Under flow</b>	<b>32 이상</b>	<b>86.63</b>
			32 이하	13.37
	1:5	<b>Over flow</b>	<b>32 이상</b>	<b>0.18</b>
			<b>32 이하</b>	<b>99.82</b>
		Under flow	32 이상	54.50
			32 이하	45.50
	1:6	<b>Over flow</b>	<b>32 이상</b>	<b>4.79</b>
			<b>32 이하</b>	<b>95.21</b>
		Under flow	32 이상	41.27
			32 이하	58.73
	1:7	<b>Over flow</b>	<b>32 이상</b>	<b>1.19</b>
			<b>32 이하</b>	<b>98.81</b>
Under flow		32 이상	50.73	
		32 이하	49.27	



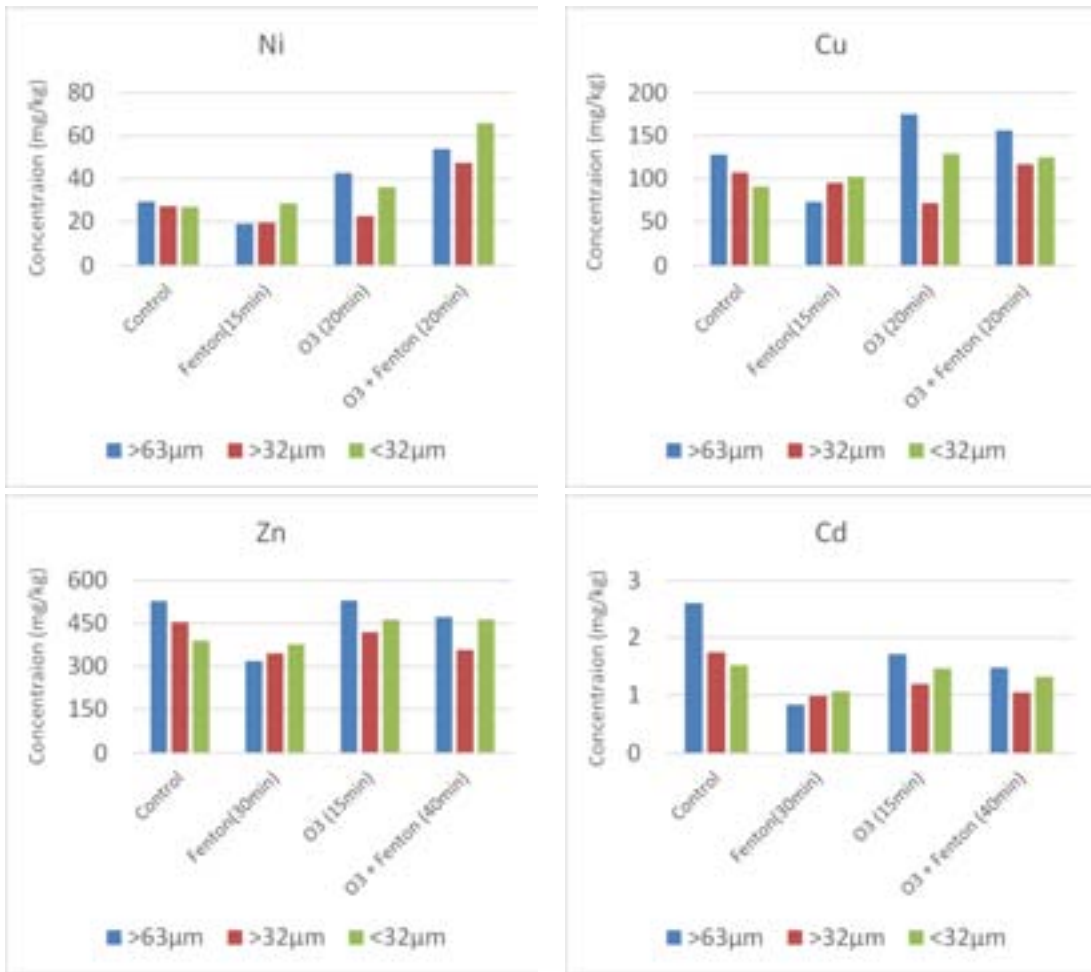
[그림 IV-바-44] 3차 고도처리장치 시험 ( $O_3 + 1M H_2O_2 + Tween\ 80$  (in 해수))

(3) 현장 처리기술 구현을 위한 모듈화 공정 효율 평가 및 보완 필요 사항 공정 효율 평가 및 제안

- 
- 시험된 공정의 효율을 평가하기 위하여 각 공정의 가장 효율이 좋은 시간대를 기준으로 처리된 항목을 비교하였다.
  - 비교한 공정은 5L 용량 연속반응조에서 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80으로 처리한 Fenton 처리, 고도처리(AOP)조에서 처리제 없이 증류수와 O<sub>3</sub>폭기만으로 처리한 O<sub>3</sub>조, 고도처리조에서 1M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Tween 80와 O<sub>3</sub> 폭기로 동시에 처리한 Fenton + O<sub>3</sub>조이며 결과를 그림 IV-바-45, 46에 나타내었다.
  - 32-63, 32 이하  $\mu\text{m}$  의 COD, IL, TOC, TN는 Fenton처리와 비교하였을 때 O<sub>3</sub>만으로도 유사한 처리효과가 있는 것으로 나타났으며, 두 처리를 동시에 하였을 때는 오히려 처리 효율이 떨어지는 것으로 나타났다.
  - TP의 경우는 Fenton과 고도처리로 인한 제거효과가 없는 것으로 나타났다.
  - 중금속의 경우에는 Ni, Cu, Zn 의 경우는 Fenton 처리가 가장 효과가 좋았으며, Cd의 경우는 세 가지 처리 모두 효과가 있는 것으로 나타났다.
  - 따라서 정화해야하는 퇴적물의 오염 특징에 따라 처리공정의 선택이 필요하며, 따라서 효율 및 경제성을 고려하여 선택할 수 있는 의사결정 기준이 마련이 필요하다.
  - 벤치스케일 5L 연속반응조를 통한 처리실험 결과 전반적으로 1, 2차 15-20분 처리시간이 대부분의 대상항목 제거에 가장 정화효율이 좋은 것으로 나타났으며 그 이상의 처리시간에는 일부항목을 제외하고는 오히려 농도가 증가하거나 더 이상 제거되지 않는 것으로 나타났다.
  - 본 평가를 통해서 3차년에 개발된 공정을 수정, 보완하여 4차년 공정 제안 안은 그림 IV-바-과 같다.

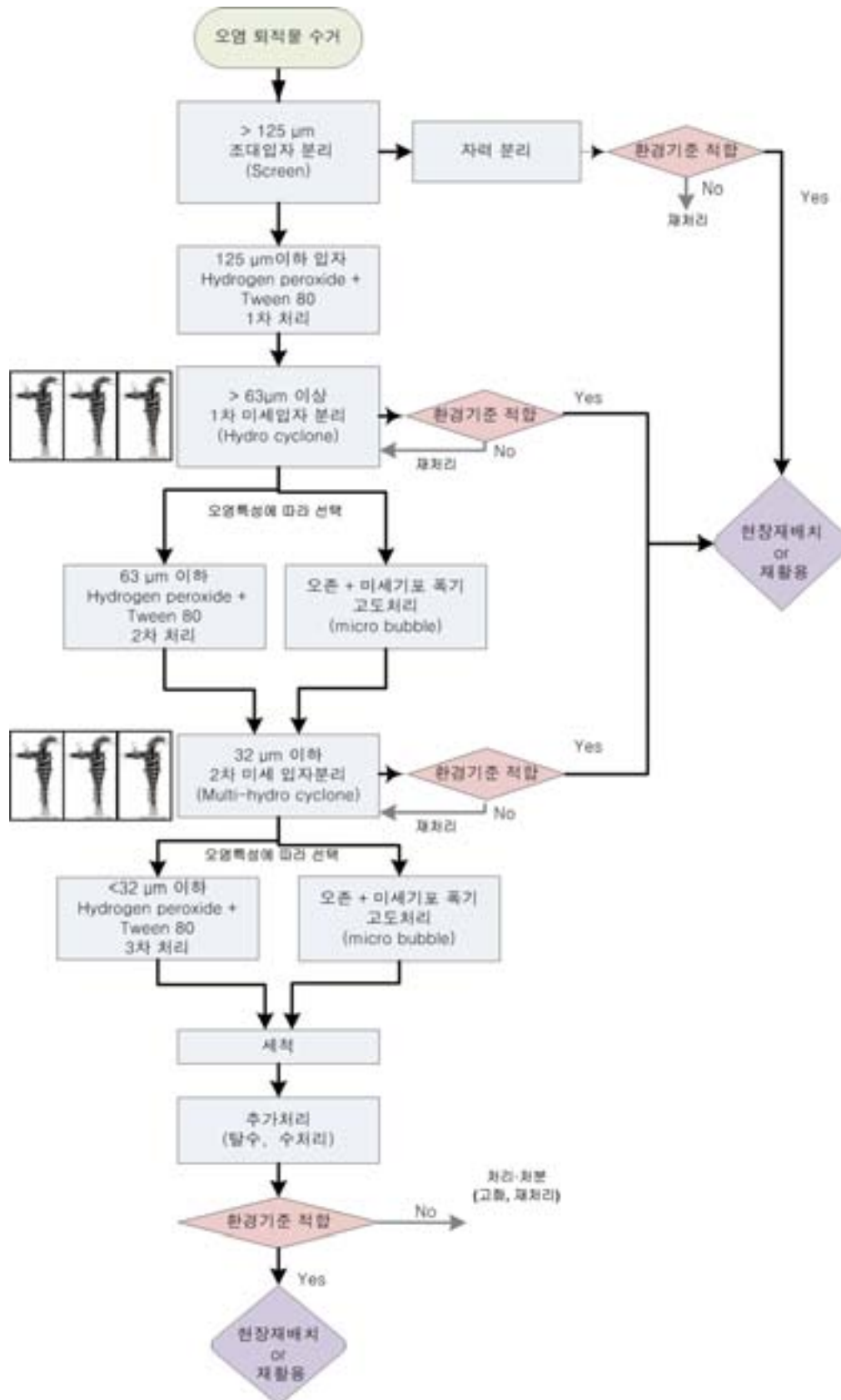


[그림 IV-바-45] 각 공정의 유기물 제거효율 비교



[그림 IV-바-46] 각 공정의 중금속 제거효율 비교





[그림 IV-바-47] 4차년 연구를 통하여 개발한 오염퇴적물 처리공정도

#### (4) 현장 처리기술 적용방안 검토

- 현장 처리기술 적용방안 초안은 기존 국내외 사례를 검토하여 처리기술을 적용할 경우

---

고려가 필요한 사항을 취합 및 평가하여 현장 처리기술 적용방안 초안을 도출함

### (가) 사례 검토

- 우리나라의 관련 제도로써 “환경기술 및 환경산업 지원법”(2015년 3월 2일, 법률 제13174호, 환경부)에 “환경신기술 지정”과 “환경기술 검증”이 있음
  - “환경기술 및 환경산업 지원법” 제7조 신기술인증과 기술검증, 같은 법 시행령 제18조 신기술인증이나 기술검증의 신청, 같은 법 시행규칙 제6조 신기술인증과 기술검증의 신청절차가 규정되어 있음
- 환경신기술 인증(New Excellent Technology)이란 우리나라에서 최초로 개발하였거나, 국내외 기술의 주요 부분을 도입하여 우리나라에서 개량한 환경 신규 기술에 대하여 국가가 검증·평가하여 기술의 우수성 인증을 부여하는 제도임
  - 환경신기술인증서 발급(환경부장관 발급): 유효기간 5년, 1회 연장 가능
- 환경기술 검증(Environmental Technology Verification)이란 개발자가 현장조사와 서류심사, 현장평가기관의 현장평가를 받아 환경 기술의 성능과 경제성 등을 검증받는 제도임
  - 환경기술검증서(환경부장관 발급): 유효기간 7년, 1회 연장 가능
- 오염물질의 정화기작(Mechanism)이 유사한 토양정화 분야는 환경부에서 정화방법 가이드라인을 마련하여 시행하고 있음(환경부, 2007)
- 환경부는 환경신기술 인정과 환경기술검증 시 기술의 범위, 신규성, 진보성(처리용량 및 효율 등), 타당성(단계별 저감 정도 등) 및 안전성(2차 오염, 발생 폐기물 등)을 평가의 주요 항목으로 함
- 미국의 경우 환경보호청 환경기술 검증 제도(Environmental Technology Verification Program) 및 슈퍼펀드 오염지역 신기술 평가(Superfund Innovative Technology Evaluation: SITE) 제도가 있으며, 주요 고려 요소는 다음과 같음
  - 필요한 기술 능력 및 운영자 교육
  - 운전 및 정지에 요구되는 시간
  - 설비의 전체적인 견고성 및 에너지 소모량
  - 설비를 사용하지 않을 때 고려사항 및 설비의 고장 빈도
  - 발생 폐기물 및 2차 오염
- 일본의 경우 해양퇴적물 정화를 위한 기술지침(일본 국토교통성 항만국, 2008)에 정화 공법 선정, 중간처리 시 관리 항목 등을 규정하고 있음
- 현재 해양환경 관련 기술에는 상기와 같은 인증 또는 검증 제도가 없으므로, 제도 정비 및 기술 적용을 위한 지침·고시 등 개선이 시급함

### (나) 현장 처리기술 적용방안 검토

- 사례 검토 결과를 기초로 환경 분야 처리기술 적용을 위해서는 다음과 같은 흐름이 필요함
  - 사전검토 필요 사항
- ◎ 대상 오염물질의 물성(입도, 함수율, 비중 등)과 오염(유기오염물질, 중금속, 지속성유기오염물질 등) 특성
- ◎ 처리기술이 대상 오염물질의 정화에 효과적인지 여부

- ◎ 처리기술을 적용할 경우 대상 오염물질을 적합한 수준으로 정화 즉, 처리 후 목적으로 하는 최종 처분 관련 환경 기준을 충족할 수 있는지 여부
- ◎ 대상 오염물질의 발생량, 보관 방법 및 처리기술 적용 시 운전 장애 요인 여부(투입 최소 물량, 처리시간 등)
- ◎ 처리기술 적용 시 2차 오염 가능성 및 폐기물 발생 여부

- 처리기술 적용 시 검토 필요 사항

- ◎ 처리설비가 대상 오염물질을 보관하기에 적합한지 여부
- ◎ 처리기술의 주요 처리공정 별 안정적으로 처리되는지 여부(처리 능력)
- ◎ 처리기술 적용 시 주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 및 안전 대책 여부(예: 독성 가스 발생 / 발생 가스 처리 설비 등)
- ◎ 환경문제 또는 2차 오염 발생 여부(예: 소음, 진동, 분진, 폐수, 폐기물 등)

- 처리기술 시험 및 평가 시 필요 사항

- ◎ 처리효율 평가를 위한 평가항목(예: 분석항목(유기물, 중금속 등))
- ◎ 처리기술 평가를 위한 시료 채취 장소 및 균질화 방법(예: 주요 처리공정 별로 각각 투입 전, 후 시료를 채취, 특정 시간별로 3회 채취 후 완전 혼합한 다음 채취 등)
- ◎ 처리기술은 최소 2~3회 이상 운전하여 각각 시료를 채취하며, 채취시료는 자체 분석 및 최소 2~3개 공인기관의 맹검 분석(Blinded test) 결과를 기초로 처리 정도 및 효율을 평가
- ◎ 처리기술 적용 과정에서 주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 여부 및 위험 발생 시 안전 대책 유효성 여부
- ◎ 처리기술 적용 과정에서 환경문제 또는 2차 오염 발생 여부 및 정도
- ◎ 처리기술 적용 과정에서 물질수지 및 에너지수지 평가
- ◎ 최종 처리산물이 목적으로 하는 최종 처분에 적합한지 여부(예: 관련 환경기준 충족, 물성·특성 충족 등)
- ◎ 처리기술 적용 과정에서 단위 물량 당 처리 단가 평가

- 기타 검토 필요 사항

- ◎ 처리기술 적용 과정에서 처리장치의 운전 및 정지에 실제 요구되는 시간
- ◎ 처리기술 적용 과정에서 처리장치의 신뢰성(예: 오작동 여부, 유지·보수 용이성 등)
- ◎ 처리기술 적용 과정에서 발생하는 폐기물(고상·액상)의 양, 처리 가능성 및 처분 방안

#### (다) 현장 처리기술 적용방안(초안)

- o 현장 처리기술 적용 시 다음과 같은 절차에 따른다.

항목	세부 절차
사전 검토	처리대상 물질의 물성과 오염 특성 평가
	처리기술이 대상 오염물질의 정화에 효과적인지 여부
	목적으로 하는 최종 처분 관련 환경 기준을 충족할 수 있는지 여부
	대상 오염물질의 발생량, 보관 방법 및 처리기술 적용 시 운전 장애 요인 여부
	처리기술 적용 시 2차 오염 가능성 및 폐기물 발생 여부
처리기술 적용	처리설비가 대상 오염물질을 보관하기에 적합한지 여부
	주요 처리공정 별 안정적으로 처리되는지 여부(처리 능력)
	주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 및 안전 대책 여부
	환경문제 또는 2차 오염 발생 여부
처리기술 시험 및 평가	처리효율 평가를 위한 평가항목(예: 분석항목(유기물, 중금속 등))
	전체 공정 중 시료 채취 장소 및 균질화 방법
	처리기술은 최소 2~3회 이상 운전하여 각각 시료를 채취하며, 채취시료는 자체 분석 및 최소 2~3개 공인기관의 맹검 분석(Blinded test) 결과를 기초로 처리 정도 및 효율을 평가
	주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 여부 및 위험 발생 시 안전 대책 유효성 여부
	환경문제 또는 2차 오염 발생 여부 및 정도
	물질수지 및 에너지수지 평가
	최종 처리산물이 목적으로 하는 최종 처분에 적합한지 여부
	단위 물량 당 처리 단가 평가
기타	처리장치의 운전 및 정지에 실제 요구되는 시간
	처리장치의 신뢰성(예: 오작동 여부, 유지·보수 용이성 등)
	발생하는 폐기물(고상·액상)의 양,性状, 처리 가능성 및 처분 방안

- 현장 처리기술 효율 평가 시 처리기술 공정과 처리 대상 시료의 특성에 따라 다음과 같은 항목을 선정할 수 있다.
- 일반 항목: 입도, 비중, 함수율
  - 부영양화 관련 항목: 총유기탄소(TOC), 총질소(TN), 강열감량(IL), 산취발성황화물(AVS), 화학적산소요구량(COD)
  - 유해화학물질 관련 항목: 중금속(Heavy metals) 구리(Cu), 아연(Zn), 납(Pb), 카드뮴

---

(Cd), 비소(As), 니켈(Ni), 크롬(Cr), 수은(Hg) 및 선택 항목(철(Fe), 망간(Mn), 알루미늄(Al)), 총다환족방향수소류(PAHs), 폴리클로리네이티드비페닐(PCBs)

- 기타: 유기주석화합물(TBTs) 등 평가에 필요한 항목
- 부가 항목: 처리 과정에서 폐수가 발생할 경우 상기 관련 항목(수질)과 부유물질(SS) 등 평가에 필요한 항목

## 사. 현장 처리기술 공정 상세설계

### (1) 모듈화 설계를 위한 공정별 요소 및 설계변수 도출

#### (가) 모듈화 공정설계 기본방향

- 본 연구에서 개발하고자 현장처리 기술은 오염퇴적물을 입자분리 공정과 세척기반 공정의 통합공정으로 연속처리(continuous treatment)가 가능하도록 함과 동시에 적용대상 해역의 특성 및 퇴적물의 오염정도에 따라 필요한 각 단위 처리장치들이 독립적으로 분리, 재배치, 재조합이 가능하도록 모듈화 하고자 함.
- 해양 현장내 바지선에 모듈화 장비의 설치 및 운영이 가능하도록 시스템을 설계하고 모듈화 장비의 제작, 운반, 설치, 운영 및 해체/철거의 전 오염퇴적물 정화복원 공정을 고려하여 설계함.
- 입자분리 및 세척기반 통합공정의 단위 장치의 규격, 용량, 특성을 고려하여 도로 이동이 가능한 최적 규모를 검토하여 정화장치 용량을 결정함.

#### (나) 모듈화 공정설계 시 주안점

- 육상에서 제작된 모듈화 장비의 오염 해역으로 운반 및 이동, 바지선상에서 조립 및 설치, 운영, 사업완료 후 철거/해체 등 전 과정을 고려한 모듈화 공정을 개발함.
- 실제 해양오염퇴적물 정화복원 사업에서 현장처리기술을 적용하기 위하여 대상 해역의 특성과 퇴적물의 오염정도에 대응 할 수 있도록 각 처리단위 및 처리 정도를 제어(최적화)할 수 있도록 모듈화 공정을 개발함.
- 각 모듈은 전체 처리장치의 일부를 구성하는 단위장치이지만, 독립적인 처리기능을 담당하는 장치로써, 각 모듈 단위별로 분리, 이동, 재배치, 재조합이 가능하도록 개발함.
- 모듈 단위장치간 연결부위는 작업용이성, 안전성을 고려하고 침출수 발생이 없도록 설계하여야 함.
- 바지선 바닥 및 방호벽 설치로 2차오염을 방지하고 안전성을 확보할 수 있도록 설계하며, 바지선 상 모듈화 장치 설치시 무게중심 및 설비 운영에 따른 진동 발생으로 해저 침하 발생 등 해상 작업 여건을 고려하여 모듈화 공정을 설계하여야 함.

#### (다) 공정별 주요 요소 및 설계변수 도출

##### ① 모듈화 장치의 육상 이동성 검토

- 모듈화 장치의 육상 이동성을 고려한 규격 및 용량을 결정하기 위해 화물차량의 적재기준 관련 법령을 검토함.
- 화물차량의 적재기준 및 운행 제한차량 등 관련 법령 및 목적
  - 도로법 : 도로의 시설 기준, 도로의 관리·보전 및 비용 부담 등에 관한 사항을 규정하여 국민이 안전하고 편리하게 이용할 수 있도록 함.
  - 도로교통법 : 도로에서 일어나는 교통상의 모든 위험과 장애를 방지하고 제거하여 안

전하고 원활한 교통을 확보하고자 함.

- 자동차관리법 : 자동차관리사업 등에 관한 사항을 정하여 자동차를 효율적으로 관리하고 자동차의 성능 및 안전을 확보하고자 함.

○ 표 IV-사-1는 모듈화 장치의 운송에 따른 도로법, 도로교통법 등 화물자동차의 화물 적재 기준 및 운행제한 차량 관련 법령 검토결과를 나타냄.

**[표 IV-사-1] 화물자동차의 화물 적재기준 및 운행제한 관련 법령 검토결과**

구분	도로법	도로교통법	자동차관리법
목적	도로구조 보존 및 통행의 위험 방지	교통안전과 원활한 소통확보	자동차의 효율적 관리
관련 조문	·법 제59조 ·시행령 제79조 제2항 (차량의 운행 제한 등)	·법 제39조 ·시행령 제22조 (운행상의 안전기준)	·법 제29조 ·시행령 제8조 (자동차의 구조 및 장치)
단속 기준	·총중량 40톤 초과차량 ·축중10톤 초과차량 ·차량제원 초과차량 - 높이 4.0m(고시된 노선 4.2m) - 폭 2.5m 초과 - 길이 16.7m (연결,굴절차 19.0m) 중 하나라도 초과하는 차량	·적재중량은 구조/성능에 따르는 적재중량의 11할 이내 ·차량제원 초과차량 - 길이:자동차 길이에 그 길이의 10분의 1을 더한 길이 - 너비:자동차의 후사경으로 뒤쪽을 확인할 수 있는 범위 - 높이:4m (고시된 노선 4.2m)	·자동차 안전기준에 적합 ·자동차 부품안전기준에 적합
단속 주체	·고속도로:도로공사 ·국도:국토교통부 ·지방도 : 지자체	·경찰청(경찰서)	·국토교통부(지자체 위임)

○ 육상이동성을 고려한 모듈화 장치의 개소 수 등 최적화를 위해 저상 트레일러 (일반적인 적재규모 2750W x 12000L x 900H)를 운송수단으로 사용함.



**[그림 IV-사-1] 모듈화 장치 운송수단인 저상 트레일러 예시**

**② 주요 설계변수 도출**

- 차량 총중량 40톤 이내 설계조건, 모듈화 장치의 육상이동성 및 경제성을 고려하여 현장 처리 장치의 적정 처리용량을 10 ton/hr으로 설계함.
- 단위장치 중 중량이 가장 무거운 탈수장치인 필터프레스는 저상 트레일러의 적재용량을

고려하여 현장조립이 용이하도록 분리 이송하는 조건임.

- 바지선은 연안 해상에서 장기간 고정되어 안전하게 작업할 수 있도록 충분한 적재용량을 갖춘 것을 선정하며, 설비 운영에 따른 해저침하 및 안전성이 확보되는 것으로 적용하고 가급적 이동성, 작업편리성 등을 고려하여 모든 처리장치가 설치 및 운영될 수 있는 규모를 갖춘 것으로 설계함.

## (2) 현장 처리기술 공정 모듈화 설계

### (가) 모듈화 공정 설계기준

- 오염퇴적물 처리용량 10 ton/hr
- 처리대상 오염퇴적물 입도분포

Size (mm)	백분율(%)	처리용량(ton/hr)
10 ~ 0.2	5 ~ 10	0.5~1.0
0.2 ~ 0.075	10 ~ 15	1.0~1.5
0.075 ~ 0.032	5 ~ 10	0.5~1.0
0.032 이하	70 ~ 80	7.0~8.0
합계	100	10.0

- 설치장소는 해상바지선이며 바지선의 규모는 W16,000 x L40,000 x H3,000, 적재용량은 1,400톤임.
- 오염퇴적물 모듈화처리장치 총중량은 약 400톤 정도로 예상함.
- 해양오염퇴적물은 퇴적물수거업체에서 헹잡물, 10mm 이상 입자를 선별 분리하여 처리한 후 10mm 이하인 오염퇴적물을 펌프로 이송하여 투입하는 조건임.
- 모듈화 장치는 각 공정별로 모듈화 하여 저장 트레일러로 운반 가능한 크기로 제작하여 현장에서 조립 설치토록 하되, 고중량 장치는 육상에서 분리하여 운송 후 현장에서 재조립하여 설치함.
- 각 모듈간 연결배관은 현장에서 신속하게 조립이 용이하도록 Rubber Hose를 사용하며 연결부품은 STS304 재질을 사용함.
- 용수는 기본적으로 해수를 사용하되, 약품 희석수, 설비 마중수 등 미량은 담수를 사용함. 처리수는 해상방류 조건임.
- 주요 장치의 재질은 해수에 내부식성을 갖춘 재질을 사용하고 입경별 처리산물은 압플박스에 임시저장 후 육상으로 이송 처리함.

### (나) 모듈장치 구성 및 모듈화 공정 흐름

#### ① 모듈화 장치의 구성

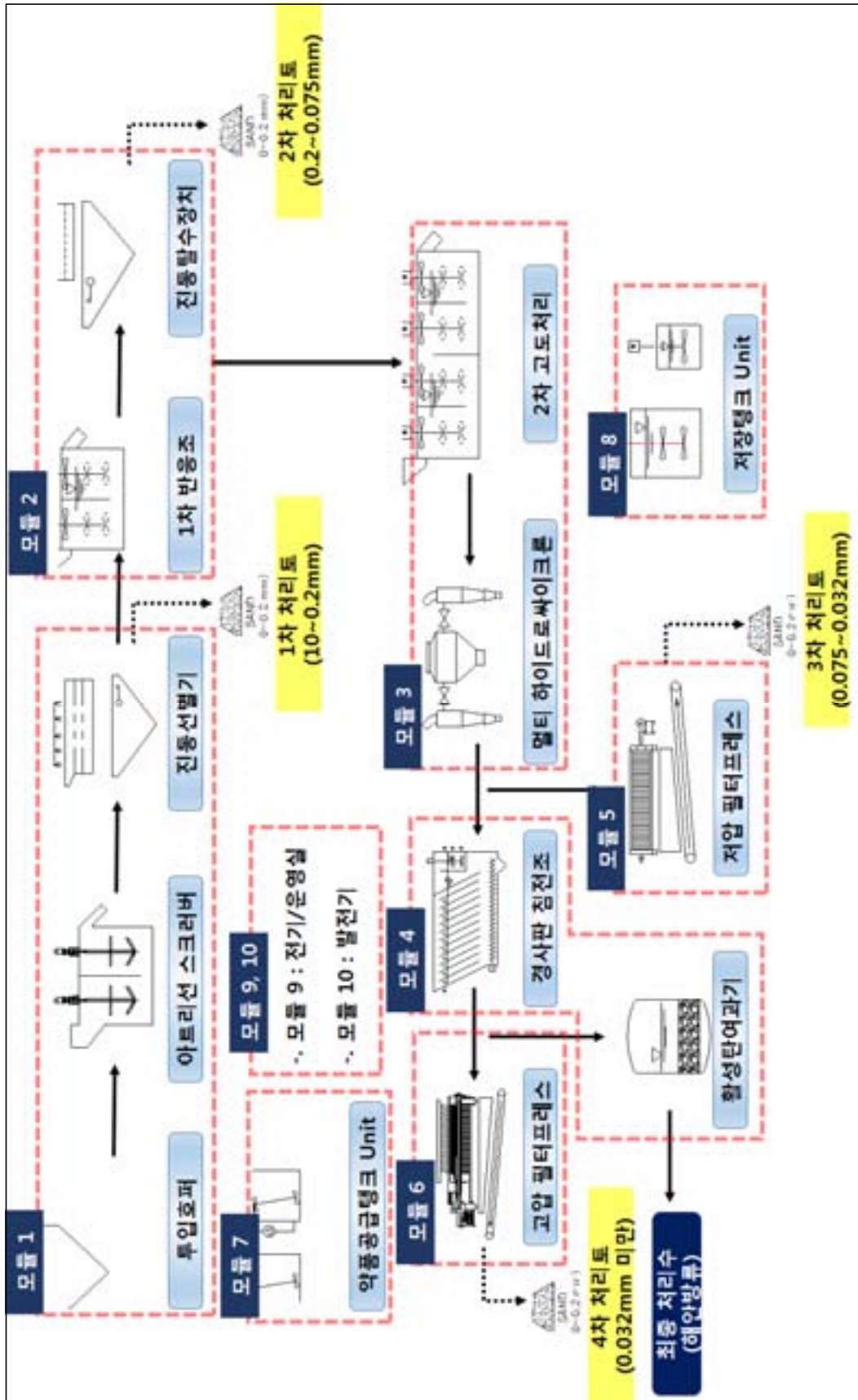
- 각 모듈은 전체 처리장치의 구성요소로서 각각 독립적인 기능을 담당하는 장치로 설계하여 대상 해역의 특성 및 오염퇴적물의 오염정도에 따라 최적의 장치구성이 될 수 있도록 개발됨.
- 전체 처리장치는 단위공정 장치, 발전기, 저장탱크 등 유틸리티(utilities)를 포함하여 총 10개의 모듈로 구성함.
- 표 IV-사-2는 단위 모듈의 기능 및 사양을 나타냄.

[표 IV-사-2] 단위모듈별 주요기능 및 사양

모듈 NO	모듈장치 및 기능	모듈장치 사양
1	·모듈명 : 1차 입자분리 장치 ·기능 : 10mm 이하 오염퇴적물이 원료 투입탱크로 유입되어 교반 및 혼합된 선별장치에서 1차 입자분리 공정 ·처리입경 : 10-0.2mm	·사이즈 : W2,600 x L10,500 x H3,150 ·주요 구성품 : 원료투입탱크, 아트리션 스크러버, 진동선별스크린 등 ·프레임 타입
2	·모듈명 : 1차 반응 및 2차 입자분리 장치 ·기능 : 부영양화물질 제거를 위한 화학약품 투입 후 2차 입자분리 공정 ·처리입경 : 0.2-0.075mm	·사이즈 : W2,600 x L10,500 x H3,000 ·주요 구성품 : 1차반응조, 진동탈수기, 하이드로싸이클론 등 ·컨테이너 박스 타입
3	·모듈명 : 고도세척처리 장치 ·기능 : 잔류오염물질 처리를 위한 물리적, 화학적 고도처리 및 미세입자 분리공정 ·처리입경 : 0.075mm 이하	·사이즈 : W2,600 x L12,000 x H3,150, W1,900 x L2,600 x H1,300 ·주요 구성품 : 고도처리반응조, 나노버블 발생장치, 오존발생장치, 멀티하이드로 싸이클론, 배오존 처리장치 ·컨테이너 박스 및 프레임 타입
4	·모듈명 : 복합오염폐수 처리장치 ·기능 : 고도처리 후 발생된 폐수 처리 공정 ·처리입경 : 0.075mm 이하	·사이즈 : W2,600 x L12,000 x H3,100 ·주요 구성품 : 중화조, 경사관침전조, 활성탄여과기 ·컨테이너 박스 타입
5	·모듈명 : 1차 탈수처리 장치 ·기능 : 세척간 발생하는 미세입자와 폐수를 분리하는 탈수공정 ·처리입경 : 0.075-0.032mm	·사이즈 : W2,100 x L6,300 x H3,700 ·주요 구성품 : 저압필터프레스, 여액탱크 ·프레임 타입
6	·모듈명 : 2차 탈수처리 장치 ·기능 : 세척폐수 처리 후 미세입자 분리를 위한 탈수공정 ·처리입경 : 0.032mm 이하	·사이즈 : W2,800 x L15,000 x H5,130 ·주요 구성품 : 고압필터프레스, 여액탱크 ·프레임 타입
7	·모듈명 : 약품공급 탱크 ·기능 : 오염퇴적물 처리에 필요한 약품을 공급하는 공정	·사이즈 : W2,600 x L9,000 x H3,150 ·주요 구성품 : 계면활성제 공급탱크, 산화제 공급탱크, 응집제 공급탱크, 교반탱크, 에어컴프레셔 등 ·컨테이너 박스 타입
8	·모듈명 : 저장탱크 ·기능 : 오염퇴적물 처리에 필요한 약품을 공급하는 공정	·사이즈 : W2,600 x L9,000 x H3,150 ·주요 구성품 : 계면활성제 공급탱크, 산화제 공급탱크, 응집제 공급탱크, 교반탱크, 에어 컴프레셔 세트 등 ·컨테이너 박스 타입
9	·모듈명 : 전기실 및 운전실 ·기능 : 각 모듈장치의 전기제어 및 장치 조작 판넬이 설치된 운영 사무실	·사이즈 : W3,000 x L6,000 x H2,500 ·주요 구성품 : MCC판넬, 장치 조작판넬, 운전실, 현장사무실 등 ·컨테이너 박스 타입
10	·모듈명 : 전원공급 설비 ·기능 : 전원공급 설비	·사이즈 : W1,620 x L3,400 x H2,100 ·주요 구성품 : 발전기 등 ·프레임 타입



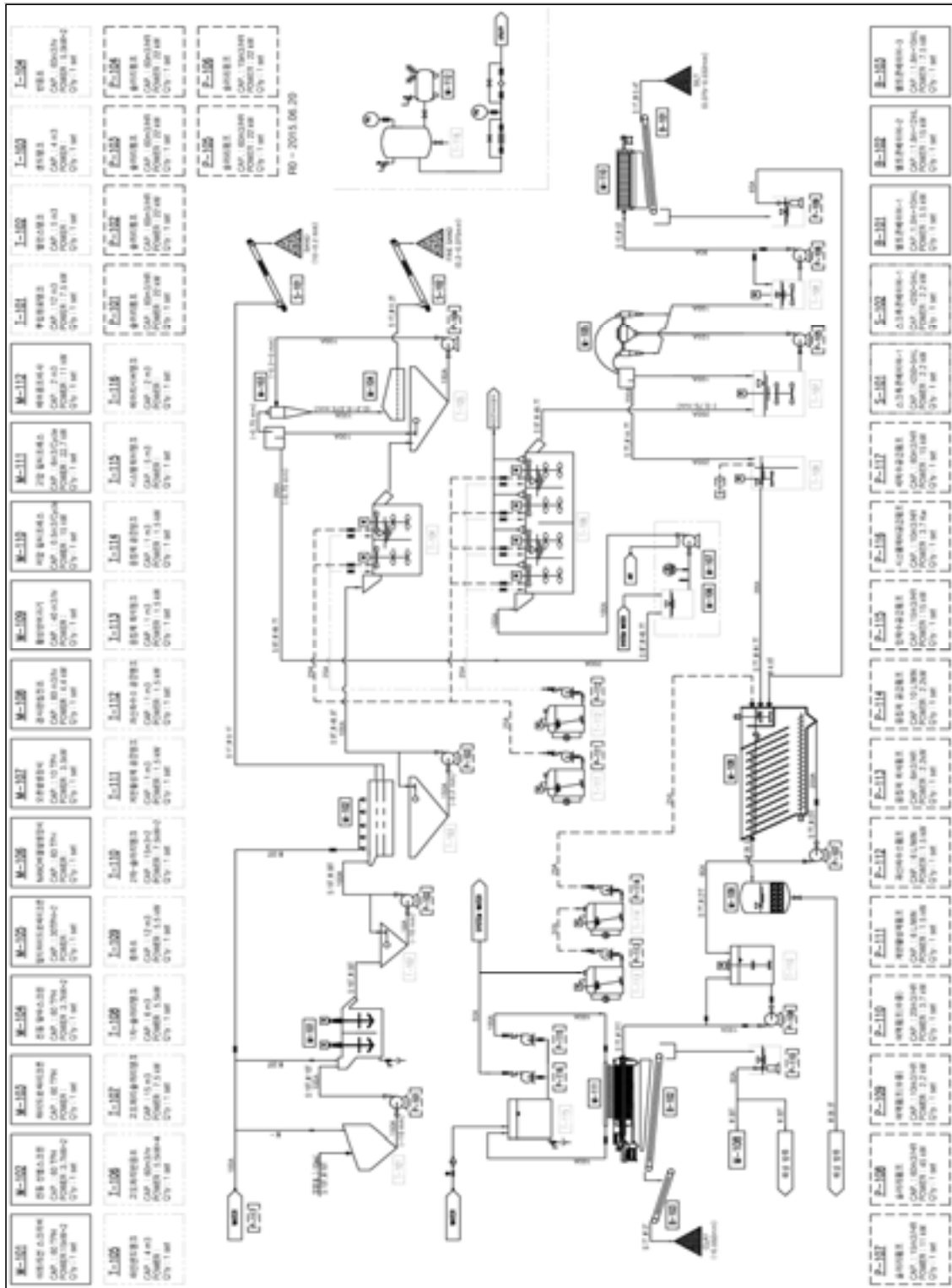
② 모듈화 공정 흐름도



[그림 IV-사-2] 모듈화 공정 흐름도

(다) 현장 처리기술 공정 모듈화 설계

① 현장 처리기술 공정설계 배관 및 계통도 (P&ID)



② 단위 모듈장치 상세사양

■ 모듈 1(1차 입자분리 장치)

SPECIFICATION	
UNIT NAME	1차 입자분리 장치
T-01	CPAL 0.873
부품명/용도	SIZE 2000×2000×400H
	POWER 7.5 kW
	QTY 1 SET
M-01	CPAL 0.873
부품명/용도	SIZE 2000×1000×1000H (200L)
	POWER 15 kW × 2 (1WATER)
	QTY 1 SET
T-02	CPAL 5.873
부품명/용도	SIZE 1000×2000×1000H
	POWER -
	QTY 1 SET
M-02	CPAL 0.873
부품명/용도	MODEL 5.5V-500W (2P)
	CPAL 0.873
	SIZE 300×300
	정격 전압 : 2.0V
	정격 전류 : 0.2.0A
	POWER 3.7 kW × 2
	QTY 1 SET
T-03	CPAL 4.873
부품명/용도	SIZE 1000×2000×1000H
	POWER -
	QTY 1 SET
S-01	CPAL 3.70A.3V
부품명/용도	SIZE 1000×3000
	POWER 2.2 kW
	QTY 1 SET
P-01	CPAL 0.873
부품명/용도	HEAD 20.0mm
	POWER 20.0kW
	QTY 1 SET
P-02	CPAL 0.873
부품명/용도	HEAD 20.0mm
	POWER 20.0kW
	QTY 1 SET
P-03	CPAL 0.873
부품명/용도	HEAD 20.0mm
	POWER 20.0kW
	QTY 1 SET

■ 모듈 2(1차 반응 및 2차 입자분리 장치)

SPECIFICATION	
UNIT NAME	1차 반응 및 2차 입자분리 장치
T-104	CAPA 60 M <sup>3</sup> /hr
SIZE	1700×1400 (CELL)
POWER	5.5 kW × 2
QTY	1 SET
M-103	CAPA 60 M <sup>3</sup> /hr
SIZE	2000 (S.M.C-300)
POWER	-
QTY	1 SET
M-104	MODEL S.M.C-0504
CAPA	60 M <sup>3</sup> /hr
SIZE	100×100
WEIGHT	0.075 ton
POWER	2.7 kW × 2
QTY	1 SET
M-105	CAPA 4 M <sup>3</sup>
SIZE	200×270×150H
POWER	-
QTY	1 SET
S-102	CAPA 3 TON/hr
SIZE	200×300L
POWER	2.2 kW
QTY	1 SET
P-104	CAPA 60 TON/hr
HEAD	20 MPa
POWER	22 kW
QTY	1 SET

■ 모듈 3(고도세척처리 장치)

SPECIFICATION	
UNIT NAME	고도세척처리 장치
CAPL	60 MPa /hr
SIZE	2100 (INC-20) * 2
POWER	-
QTY	1 SET
CAPL	-
SIZE	-
POWER	-
QTY	1 SET
CAPL	60 Ton/hr
SIZE	L 1000 * W 1000
POWER	3.5 kW
QTY	1 SET
CAPL	60 MPa /hr
SIZE	2100*2600 (4 CELL)
POWER	5.5 kW * 4 (MERGING)
QTY	1 SET
CAPL	-
SIZE	-
POWER	-
QTY	1 SET

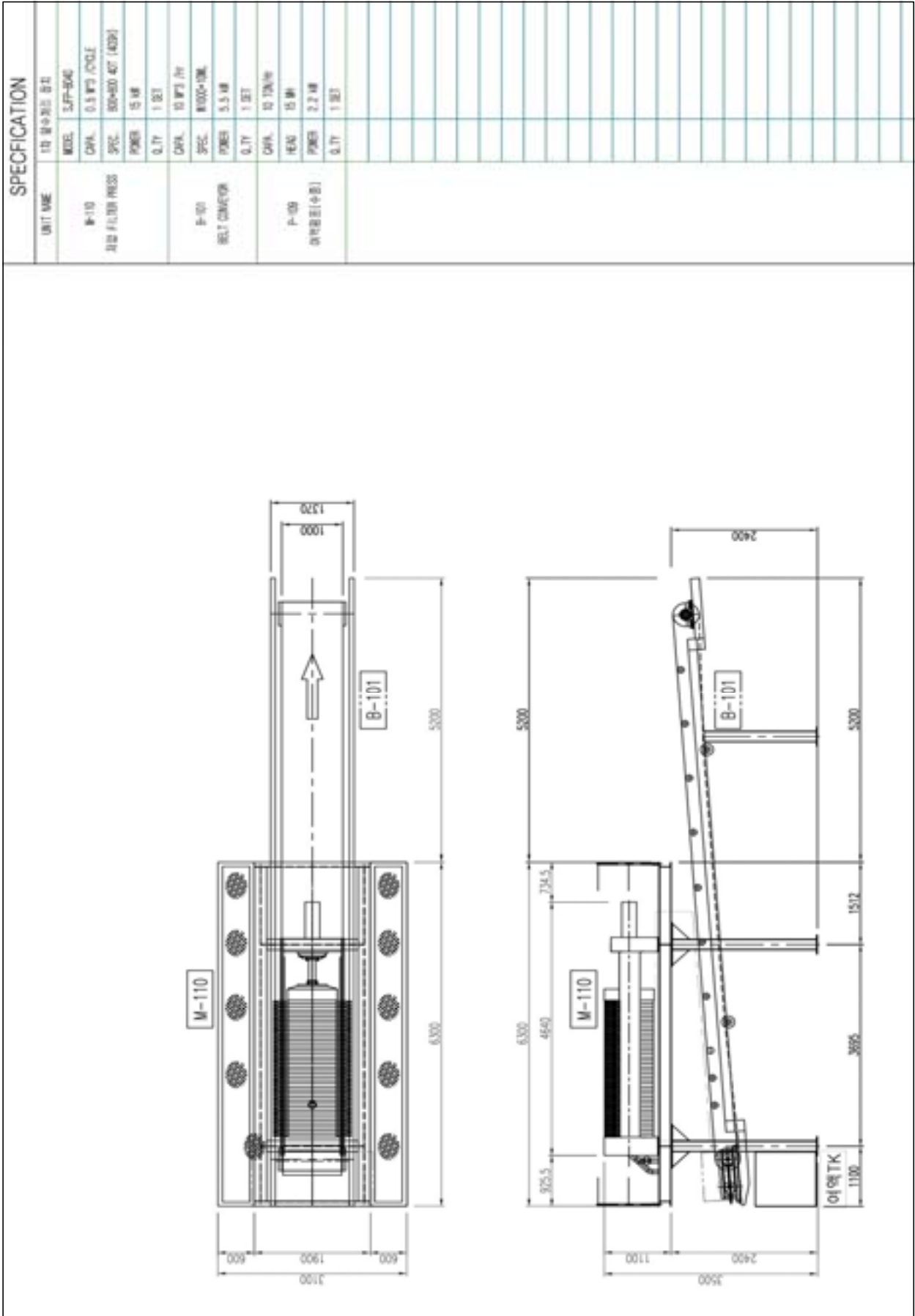
T-106  
10100 1900 2600 2600

M-105  
M-107  
M-108  
T-106  
1300 1950 13000 9600 2200

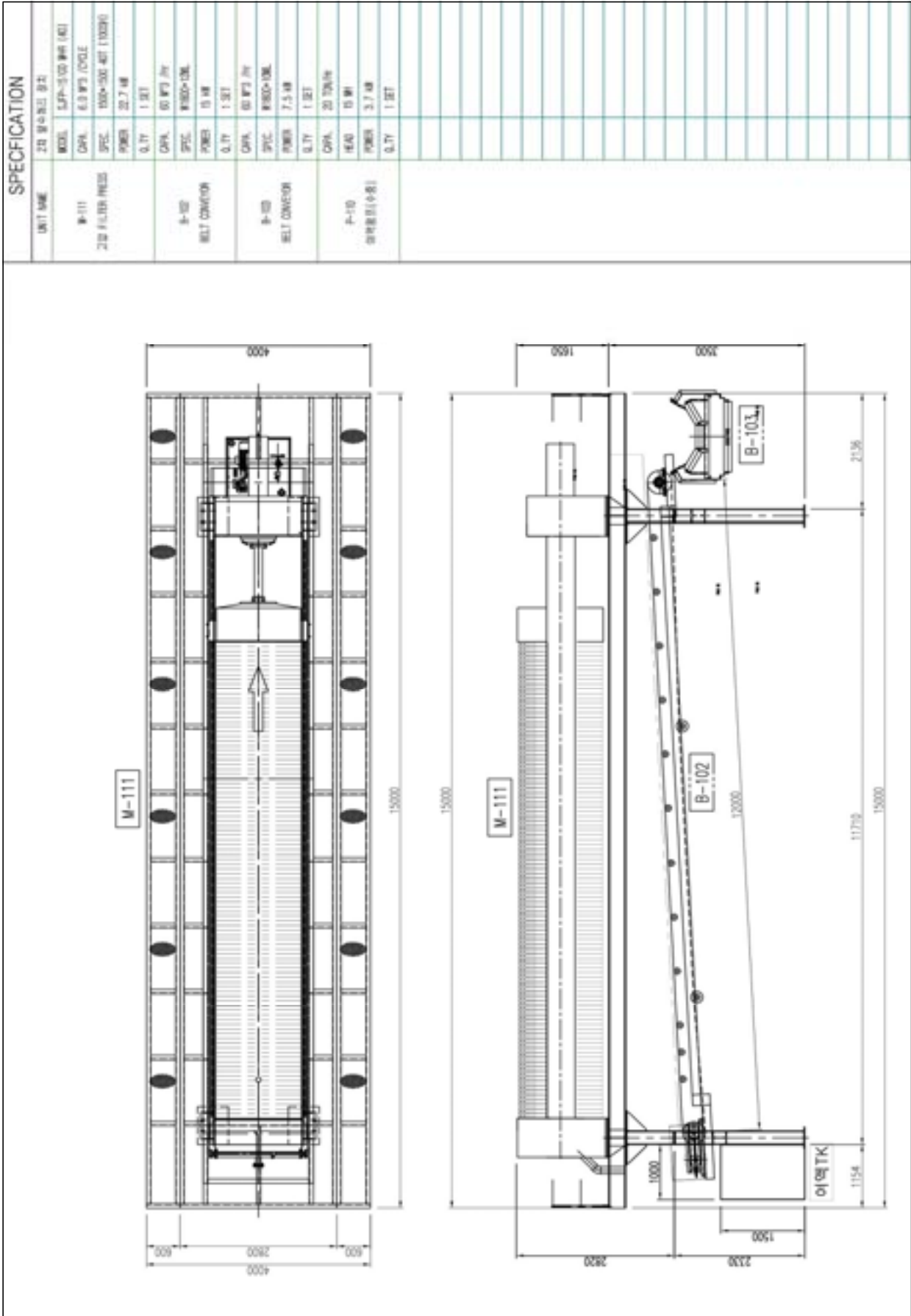
■ 모듈 4(복합오염폐수 처리장치)

SPECIFICATION	
UNIT NAME	복합오염폐수 처리장치
F-108 용출조	CAPA. 40 MPa SIZE 2100×900H POWER 5.5 kW Q.TY 1 SET
M-108 중이온교환조	CAPA. 40 MPa / 2m SIZE 2600×700×800H POWER 2.2 kW × 2 (HORIZONTAL) Q.TY 1 SET
M-109 중이온 여과기	CAPA. 40 MPa / 2m SIZE 2100×900H POWER - Q.TY 1 SET
P-107 SUPPLY PUMP	CAPA. 10 TON/H HEAD 25 M POWER 11 kW Q.TY 1 SET

■ 모듈 5 (1차 탈수처리 장치)



■ 모듈 6(2차 탈수처리 장치)





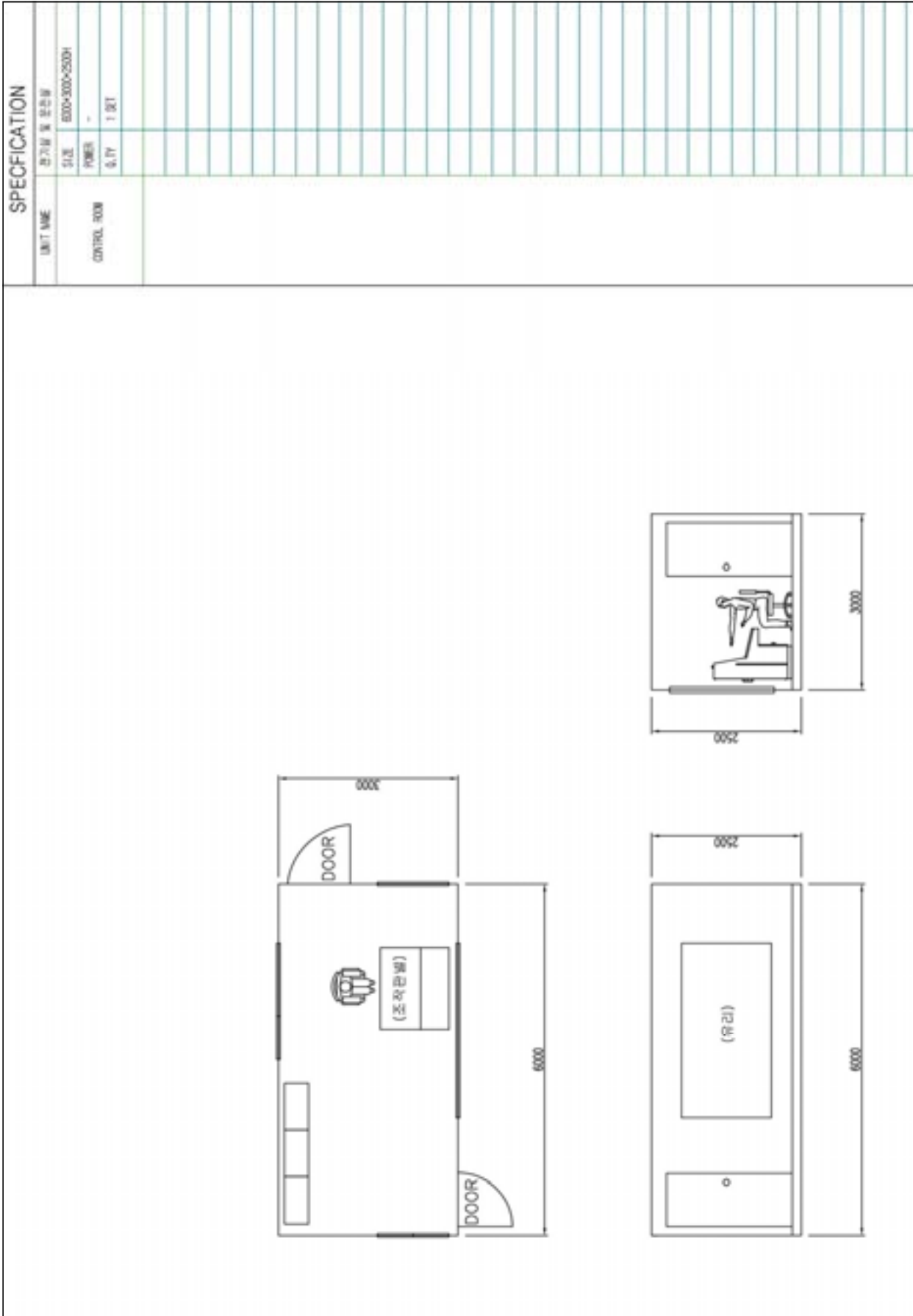
■ 모듈 7(약품공급 탱크)

SPECIFICATION	
UNIT NAME	약품공급 탱크
T-111 + P-111 계량용삼회분조 + 분조	CAPA. 1 M <sup>3</sup> SIZE D1000×1000H POWER 1.5 kW + 1.5 kW Q.TY 1 SET
T-112 + P-112 계산용수소분조 + 분조	CAPA. 1 M <sup>3</sup> SIZE D1000×1000H POWER 1.5 kW + 1.5 kW Q.TY 1 SET
T-113 + P-113 분양분배회분조 + 분조	CAPA. 1 M <sup>3</sup> SIZE D1000×1000H POWER 1.5 kW + 2.2 kW Q.TY 1 SET
T-114 + P-114 영양분공급분조 + 분조	CAPA. 1 M <sup>3</sup> SIZE D1000×1000H POWER 1.5 kW + 2.2 kW Q.TY 1 SET
T-115 시스탱회분분조	CAPA. 5 M <sup>3</sup> SIZE D2000×3000H POWER - Q.TY 1 SET
P-115 중력수분조	CAPA. 30 TON/HR HEAD 150 MM POWER 15 kW Q.TY 1 SET
P-116 시스탱회분분조	CAPA. 10 TON/HR HEAD 20 MM POWER 3.7 kW Q.TY 1 SET
P-117 시계수분조분조	CAPA. 60 TON/HR HEAD 20 MM POWER 15 kW Q.TY 1 SET
M-112 배양용삼회분사	CAPA. 2 M <sup>3</sup> SIZE - POWER 11 kW Q.TY 1 SET
T-116 배양용시회분조	CAPA. 2 M <sup>3</sup> SIZE - POWER - Q.TY 1 SET

■ 모듈 8(저장탱크)

SPECIFICATION	
UNIT NAME	재료명/크기
T-107 2.5톤 저수용량탱크	CAPL 15 MPa
	SIZE 2000×6000
	POWER 7.5 kW
	Q.TY 1 SET
P-108 송출기	CAPL 15 TON/HR
	HEAD 100 mm
	POWER 22 kW
	Q.TY 1 SET
T-108 1톤 송출기탱크	CAPL 15 MPa
	SIZE 2000×6000
	POWER 5.5 kW
	Q.TY 1 SET
P-109 송출기	CAPL 15 TON/HR
	HEAD 100 mm
	POWER 22 kW (MAXIMUM)
	Q.TY 1 SET
T-110 2.5톤 송출기탱크	CAPL 15 MPa * 2
	SIZE 2000×6000 (2 CELL)
	POWER 7.5 kW * 2
	Q.TY 1 SET
P-108 송출기	CAPL 15 TON/HR
	HEAD 100 mm
	POWER 22 kW (MAXIMUM)
	Q.TY 1 SET

■ 모듈 9 (전기실 및 운전실)



---

## 아. 법령 제정안 법제화 지원

### (1) 주요 지원 내용 및 전문가 활용(자문) 결과

- 자문: 한양대학교 법학전문대학원 김 홍균 교수/변호사

#### (가) 법률 정비 TF팀 참여 및 자문

- 3차년도 연구결과 “해양오염퇴적물관리법(안)”(법, 시행령, 시행규칙, 고시/지침 포함)을 2014년 6월 10일 해양수산부(담당: 해양보전과)에 제도 개선안으로 제출(정책제안)
- 해양수산부는 제출된 법안을 기초로 해양환경 관련 법률 정비를 위한 TF팀을 구성함
  - TF팀 구성: 해양수산부(해양보전과장, 담당 사무관), 한양대학교 법학전문대학원 김홍균 교수, 전남대학교 경상학부 신승식 교수, 한국해양과학기술원(정창수 박사, 김경련 박사, 박성욱 박사, 이문숙 박사, 안기수 연구원), 한국해양수산개발원 김경신 박사, 해양환경관리공단 이승한 차장
  - 주요 내용: 해양수산부는 관련 법률 정비를 위하여 1)해양오염퇴적물, 2)해양배출폐기물, 3)부유/침적 쓰레기, 4)침적 폐기물을 포함하는 “해양폐기물 등 관리에 관한 법률”을 정부입법으로 추진하기 위하여 전문가로 구성된 TF팀에서 추진 방향과 세부 내용을 도출
  - 회의 일정:
    - 1차: 2014년 8월 1일
    - 2차: 2014년 8월 12일
    - 3차: 2014년 8월 26일
    - 4차: 2014년 9월 19일
    - 5차: 2014년 10월 2일
    - 6차: 2014년 10월 8일
    - 7차: 2014년 10월 21일
    - 8차: 2014년 10월 30일
    - 9차: 2014년 11월 14일
    - 10차: 2014년 12월 21일
  - 기타 회의:
    - 2014년 12월 4일, 전문가 토론회 참석 및 자문

#### (나) 주요 자문 내용

- 법안의 제명
  - 이 법의 주요 규율대상이 “해양투기”, “해양폐기물(해양쓰레기)” 및 “해양오염퇴적물”로 대별된다면 그 대상들이 법의 제명에 명시되어야 할 필요가 있음
- ※ 다만, 향후, 이 법의 규율대상으로 이산화탄소 스트림(CCS), 해양시비 물질 등이 추가된다면 현재의 법 제명(해양폐기물 등의 관리에 관한 법률)으로 간략히 하는 편이 타당할 수도 있음
- 목적조항 관련

- 해양폐기물과 해양오염퇴적물은 본 법의 주요 규율대상 물질이기 때문에 본 법의 목적 조항에 이 두 가지 물질을 명시하는 것이 바람직함
- 법률안의 목적조항을 살펴보면 ‘유입’, ‘투기’, ‘방치’, ‘관리’ 등의 용어가 등장하는데, 이러한 용어에 대한 법적인 설명이 이 법의 조문에 체계적으로 드러나야 할 것임
- 이 법의 정의 조항을 살펴보면 ‘배출’, ‘처리’, ‘개선’ 등의 용어를 규정하고 있는데, 이는 목적조항과 유기적으로 연결되지 못함
- 따라서 목적조항은 다음과 같이 수정될 필요가 있음
 

“이 법은 해양폐기물 및 해양오염퇴적물 등의 발생 또는 해양에의 유입·배출·방치를 최대한 억제하고 이들을 환경 친화적으로 처리·개선함으로써 해양환경 및 해양생태계를 보전하고 국민 건강과 생활의 질적 향상에 이바지함을 목적으로 한다”

○ 용어 1 - ‘해양폐기물등’

- 이 법에서 ‘해양폐기물등’이라는 별도의 용어를 정의할 필요가 있는지 여부에 대하여 의문이 제기됨
- 해양폐기물, 해양오염퇴적물 등 각종 물질들을 통칭할 수 있는 법적 용어는 이 법 개별 조문의 복잡성과 용어 사용의 비효율을 줄여줄 수 있는 중요한 역할을 담당하는 바, ‘해양폐기물등’이라는 용어 사용하는 것은 수긍할 수 있음
- 다만, ‘해양폐기물등’을 별도로 정의하지 않고 A, B, C 물질을 열거한 다음 이들을 이하 ‘해양폐기물등’으로 한다든지 혹은 새로운 개념을 설정하여 ‘해양투기물질’이라고 설정하는 방식으로 검토할 필요가 있음

○ 용어 2 - ‘처분’

- ‘처분’이라는 개념이 결국 환경에 노출시키는 행위라고 정의되어 있다는 것은 쉽게 납득할 수 없음
- ‘disposal’의 의미가 환경에 노출시키는 행위라고 이해되기는 어려운 측면이 있기 때문
- 적절한 용어를 찾을 수 없다면, 이는 정의규정에서 삭제하고 해석에 맡겨두는 방법을 고려할 수 있음

○ 용어 3 - ‘개선’

- ‘해양오염퇴적물의 준설, 정화 등’을 의미하는 개념으로 정의한 ‘개선’이라는 용어가 해양환경 분야에서 일반적으로 사용되는 용례와 부합하지 않는다는 논의가 있음
  - ※ ‘개선’의 기존용례 : 해양환경‘개선’사업, 어장환경‘개선’ 등
- ‘개선’이라는 한 단어를 ‘준설, 정화’로 풀어 쓰는 경우도 고려할 수 있으나, 그럴 경우 개별 조문마다 중복적인 내용을 규정해야 하는 비효율성을 초래하는 문제점이 있어 ‘개선’과 같은 상위의 개념을 설정하자는 기본적 취지에는 동의함
  - ※ ‘개선’이라는 용어 대신 ‘처치’, ‘구제’ 등 다른 용어를 검토할 수 있으나, 이 용어의 원어인 ‘remediation’에 대응되는 적절한 우리말을 찾기가 쉽지 않는 것이 현실임
  - ※ 현행 「토양환경보전법」상 ‘정화’를 이 법안에서 같은 의미로 사용하여 ‘정화’ 개념 안에 ‘준설’과 협의의 ‘정화’ 즉 ‘처리’ 개념을 포함하도록 하는 방향도 검토해 볼 수 있음

- 입법기술적 문제 1 - ‘등’
  - 이 법안에는 ‘등’이라는 단어가 너무 많이 등장하고 있음
  - ‘등’은 법률을 제정함에 있어 불가피할 경우에 예외적으로 사용하는 것이며, 너무 자주 사용될 경우 법률의 해석에 혼란을 가져올 우려가 있음
  - 또한, ‘등’으로 묶일 수 있는 것은 대표적인 개념의 잔여개념이나 혹은 유사성이 있는 개념들을 전제해야 하는데, 이 법의 경우 ‘해양폐기물’과 ‘해양오염퇴적물’이라는 전혀 다른 이질적 요소를 ‘등’으로 묶고 있다는 것은 입법기술적 문제로 지적될 수 있음
- 입법기술적 문제 2 - ‘해양폐기물’과 ‘해양오염퇴적물’의 통합적 규율
  - ‘해양폐기물’과 ‘해양오염퇴적물’은 서로 별개의 개념이며 ‘폐기물’과 ‘토양’은 육상의 환경법 체계 및 대법원 판례에 따르더라도 서로 구별되는 개념임
  - 이 법에서 혼란이 시작되는 근본적인 이유는 결국 ‘해양폐기물’과 ‘해양오염퇴적물’을 함께 하나의 법률에 함께 규정하려는 시도에서 발생한다고 할 수 있음
  - 현실적으로 ‘해양폐기물’과 ‘해양오염퇴적물’의 분법이 어렵다고 한다면 “한 지붕 두 가족”과 같이 두 물질에 대한 관리를 별개의 장으로 독립적으로 규정하여 수범자로 하여금 해석의 혼란을 줄여주어야 하며, 아울러 향후 분법을 준비하여야 함
- 해양오염퇴적물의 준설업과 정화업의 구분
  - 해양오염퇴적물의 준설업은 논리적으로 정화업으로 발전하여 결국 정화업자가 준설과 정화를 통합적으로 수행할 수 있도록 하고 향후 자원순환의 관점에서 해양퇴적물의 환경친화적인 재활용에 초점을 맞추는 방향을 염두에 둬야 바람직함
  - 다만 기존의 퇴적오염물질수거업으로 등록한 자들이 이 법에 따른 정화업의 등록기준에 따른 장비 또는 전문성을 갖추기 힘들어, 업종 간 반발이 예상됨
  - ※ 현행 「토양환경보전법」의 경우 준설업과 정화업을 구분하지 않고 “토양정화업”이라는 단일 업종을 규정하고 있음
  - ※ “토양정화”의 경우 오염의 확산을 방지하기 위하여 해당 부지에서 정화해야 함이 원칙임

**(다) 주요 결과 및 예정사항**

- 기 제안된 “해양오염퇴적물관리법(안)”을 기초로 해양환경 관련 주요 관리 대상 물질을 포함하여 “해양폐기물 등 관리에 관한 법률”(안)을 도출
- 해양수산부는 도출된 법률(안)을 보완하여 2015년에 법제화(입법 예고 등 포함) 예정

**제5절. 5차년도 연구의 내용 및 결과**

**1. 5차년도 연구개발 목표**

- 해양오염퇴적물 정화사업을 위해 주로 수행되고 있는 준설(흡입식 수거)/최종처리방법이 런던의정서에 의한 해양투기 가능 준설물질 규제강화로 위기에 놓여있는 상황에서 환경친화적이고 경제성을 가지는 대안기술을 개발하고 실증화 추진

## 2. 5차년도 연구개발 내용 및 범위

### 가. 해양오염퇴적물 피복기술 개발 및 모니터링

#### (1) 국내해역 오염특성별 피복기술 적용안 개발

(가) 오염 유형별(중금속, 유기물, 부영양화) 특성을 가지는 대상 해역 조사 및 분석(3개 유형)

##### ① 유기물 오염(P항)

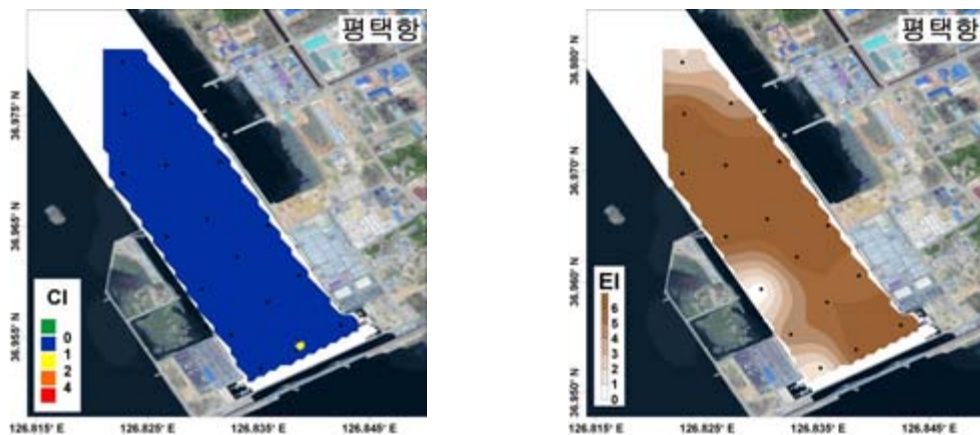
- 오염 유형별중 유기물 오염이 높은 지역으로 P항을 지정
- P항의 6개 지점에 대해 심플러를 이용하여 오염 퇴적물 채취



[그림. V-가-1] P항 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도

#### ○ 조사해역 개요

- 대상해역 : P해역
- 조사기간 : 2015년 11월 10일
- 시료 특성 : Silt질 우세



[그림. V-가-2] P항 유기물 오염도 현황(2007년 KIOST)

- 
- 조사방법
    - 조사지역 표층 퇴적물의 퇴적물 특성 및 현장 처리기술 시험을 위하여 그랩 퇴적물 채취기(Grab sampler)를 이용하여 시료를 채취
  - 분석항목
    - 일반항목: 함수율, 입도, 총 유기탄소(TOC), 총 질소(TN), 총 인(P)
    - 부영양화 정화지수(CI<sub>ET</sub> : Clean-up Index, Eutrophication) 관련 항목 : 화학적 산소요구량(COD), 강열감량(IL)
    - 유해화학물질 정화지수(CI<sub>HC</sub> : Clean-up Index, Harmful chemicals) 관련 항목 : 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd)등
  - 분석방법 : 해양환경공정시험기준에 준하여 분석함 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균 값을 제시)

### ㉔ P항 유기물 관련 해역퇴적물 특성 평가

#### ■ 강열감량 (Ignition Loss, IL)

- P 해역의 IL의 농도분포는 5.7 ~ 7.5 %의 범위였으며 평균  $6.6 \pm 0.9$  %인 것으로 나타났다.

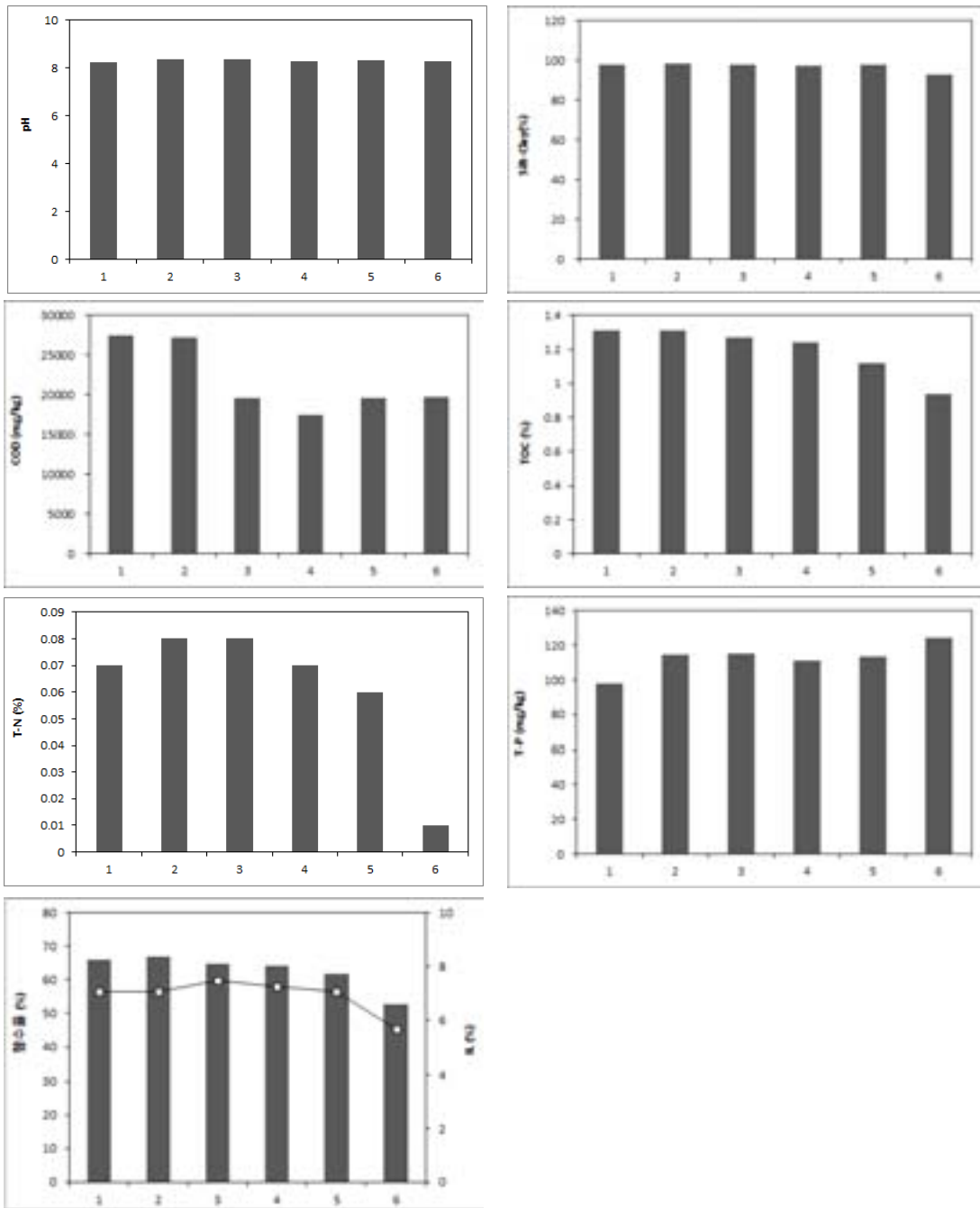
#### ■ 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD)

- P 해역의 COD의 농도분포는 17.5 - 27.5 mg/g의 범위였으며 평균  $22.5 \pm 5$  mg/g인 것으로 나타났다.

#### ■ 기타 유기물 농도 (총 유기탄소 (TOC), 총 질소(T-N), 총 인(T-P))

- TOC: P 해역의 TOC의 농도분포는 0.94 - 1.31 %의 범위였으며 평균  $1.125 \pm 0.19$  %인 것으로 나타났다.
- T-N: P 해역의 TN의 농도분포는 0.01 - 0.08 %의 범위였으며 평균  $0.045 \pm 0.035$  %인 것으로 나타났다.





[그림. V-가-3] P항 지점별 pH, 입도분포, COD, TOC, T-N, T-P

○ T-P: P 해역의 TP의 농도분포는 97.8 ~ 124.6 mg/kg의 범위였으며 평균  $111.2 \pm 13.4$  mg/kg인 것으로 나타났다.

[표. V-가-1] P항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	Values
pH	8.31
Silt-Clay (%)	97.6

Water Contents (%)	62.8
IL (%)	6.9
COD (g/kg)	21.86
TOC (%)	1.20
T-N (%)	0.06
T-P (g/kg)	0.113

### ㉔ P항 중금속 관련 해역퇴적물 특성 평가

#### ■ 실험방법

- 연속추출단계는 1단계(Exchangeable), 2단계(Carbonate), 3단계(Oxide), 4단계(Organic), 5단계(Residual)로 나누어 평가를 수행하였으며, 1단계에서 5단계로 갈수록 안정화된 상태를 나타내며, 1-3단계는 외부환경변화 및 환경외력에 의해 수계로 용출되기 쉬운 형태로 분석함
- 실험방법으로 건조된 해양오염퇴적물 중 1g을 50ml 튜브에 넣고 중금속 연속추출방법에 따라 실험을 진행한다.
- 실험 방법으로는 1단계 Exchangeable(이온교환형태)로 8ml 1M MgCl<sub>2</sub> (pH7)을 넣고 1시간 동안 실온에서 연속교반  
\*50ml 튜브 속에 있는 8ml 용액 중 여과한 5ml를 새로운 15ml 튜브에 넣고 2% HNO<sub>3</sub>로 3배 희석한다. 즉 총량이 15ml가 되도록 함  
\*\*단계에서 사용된 퇴적물을 증류수 30ml를 넣고 원심분리(3000rpm,10분간 2-3회 실시) 후 잔류하는 중금속을 버린다(1-4단계 마다 반복)
- 2단계 Carbonate(탄산염 형태) 8ml 1M NaOAc (pH 5)을 넣고 5시간동안 실온에서 연속교반  
\*단계를 반복한다.
- 3단계 Oxide(수산화물 형태) 20ml 0.04M NH<sub>2</sub>OH HCl in 25% HOAc를 넣고 96℃ 수용액상에서 5시간동안 반응을 시킴 단 가끔씩 인위적으로 교반을 시켜줌
- 50ml 튜브 속에 있는 20ml 용액 중 여과한 15ml를 새로운 50mL 튜브에 넣고 2% HNO<sub>3</sub>로 3배 희석한다. 즉 45ml가 되도록 함
- 4단계 Organic(유기물 형태) 3ml 0.02M HNO<sub>3</sub>와 2ml 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (pH 2)를 넣고 85℃ 수용액상에서 2시간 동안 반응을 시킴(가끔씩 인위적으로 교반을 시켜줌) 마지막으로 5ml 3.2M NH<sub>4</sub>OAc in 20% HNO<sub>3</sub>를 넣고 30분 동안 실온에서 연속교반 시켜줌
- 50ml 튜브속에 있는 13ml 용액 중 여과한 10ml를 새로운 50ml 튜브에 넣고 튜브에 넣고 2% HNO<sub>3</sub>로 3배 희석한다. 즉 30ml가 되도록 함
- 5단계 Residual(잔류물 형태) 0.5ml HNO<sub>3</sub>, 5ml HF, 2ml HCl를 테프론 비커에 넣고 완전히 건조가 될 때까지 반응시킨다. 그 후 일정량의 15% HCl(약 10ml)로 중금속을 다시 용해시킨다.  
\*단계를 반복한다.

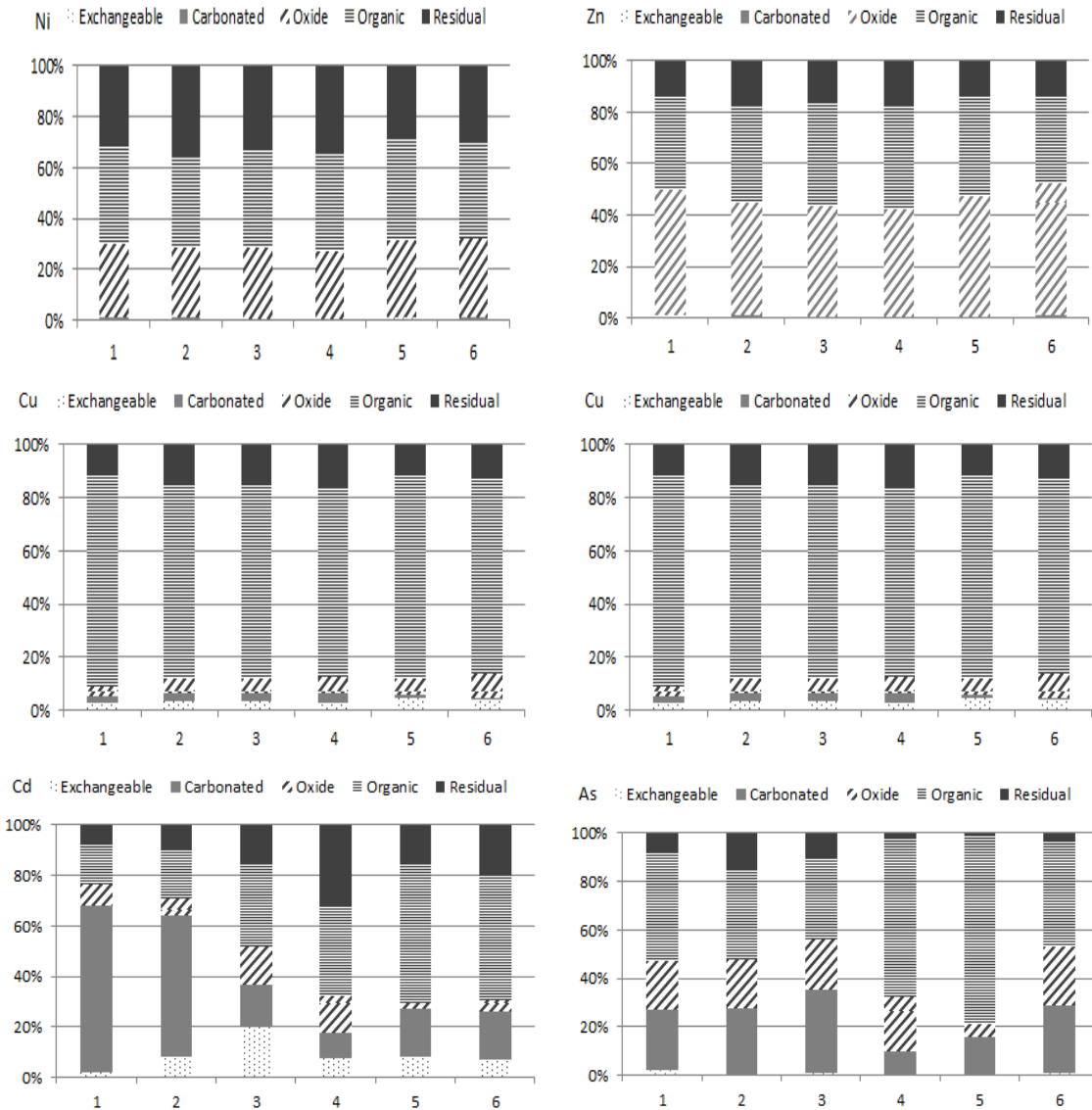
#### ■ 실험결과

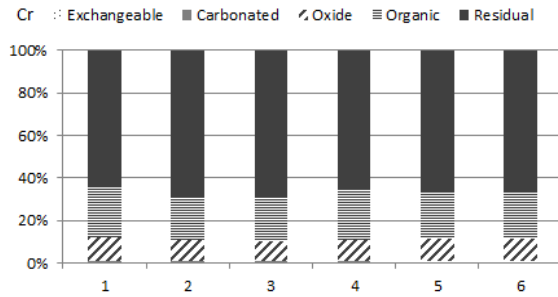
- 표 V-가-2에서 Ni는 기준을 초과하고 있음을 알 수 있음
- 그림 V-가-4에서 유기물형태의 비율이 높을 것을 볼 수 있음

○ 이러한 값으로부터 P항의 퇴적물은 유기오염물질의 오염현상을 나타내고 있는 것으로 평가

[표. V-가-2] P항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 (단위 ppm)

	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Cr
1	25.2	60.7	18.1	14.8	0.2	1.0	59.5
2	25.4	57.0	16.4	13.5	0.2	1.1	71.4
3	23.4	54.7	14.3	13.1	0.3	1.6	61.0
4	23.2	55.8	15.0	14.2	0.2	0.7	58.2
5	21.5	51.8	14.0	13.2	0.2	0.0	52.4
6	20.3	51.7	12.6	12.3	0.2	0.1	52.5
기준	23-52	200-410	24-108	50-220	0.68-4.2	9-41.6	80-370





[그림. V-가-4] P항 1~6지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과

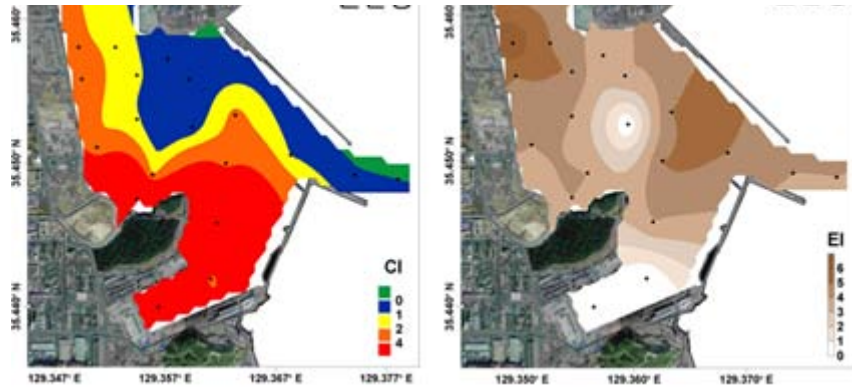
## ② 중금속 오염(O항)

- 오염 유형별중 중금속 오염이 높은 지역으로 O항을 지정
- O항의 5개 지점에 대해 샘플러를 이용하여 오염 퇴적물을 채취



[그림. V-가-5] O항 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도

- 조사해역 개요
  - 대상해역 : O해역
  - 조사기간 : 2016년 01월 13일
  - 시료 특성 : Silt질 우세



[그림. V-가-6] O항 중금속 오염도 현황

- 조사방법
  - 조사지역 표층 퇴적물의 퇴적물 특성 및 현장 처리기술 시험을 위하여 그랩 퇴적물 채취기(Grab sampler)를 이용하여 시료를 채취
- 분석항목
  - 일반항목: 함수율, 입도, 총 유기탄소(TOC), 총 질소(TN), 총 인(P)
  - 부영양화 정화지수(CIET : Clean-u[ Index, Eutrophication) 관련 항목 : 화학적 산소요구량(COD), 강열감량(IL)
  - 유해화학물질 정화지수(CIHC : Clean-up Index, Harmful chemicals) 관련 항목 : 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd)등
- 분석방법 : 해양환경공정시험기준에 준하여 분석함 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균 값을 제시)

#### ㉞ O항 유기물 관련 해역퇴적물 특성 평가

##### ■ 강열감량 (Ignition Loss, IL)

- O 해역의 IL의 농도분포는 5.6 - 6.4 %의 범위였으며 평균  $6.0 \pm 0.4$  %인 것으로 나타났다.

##### ■ 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD)

- O 해역의 COD의 농도분포는 4.6 - 5.1 mg/g의 범위였으며 평균  $4.85 \pm 0.25$  mg/g인 것으로 나타났다.

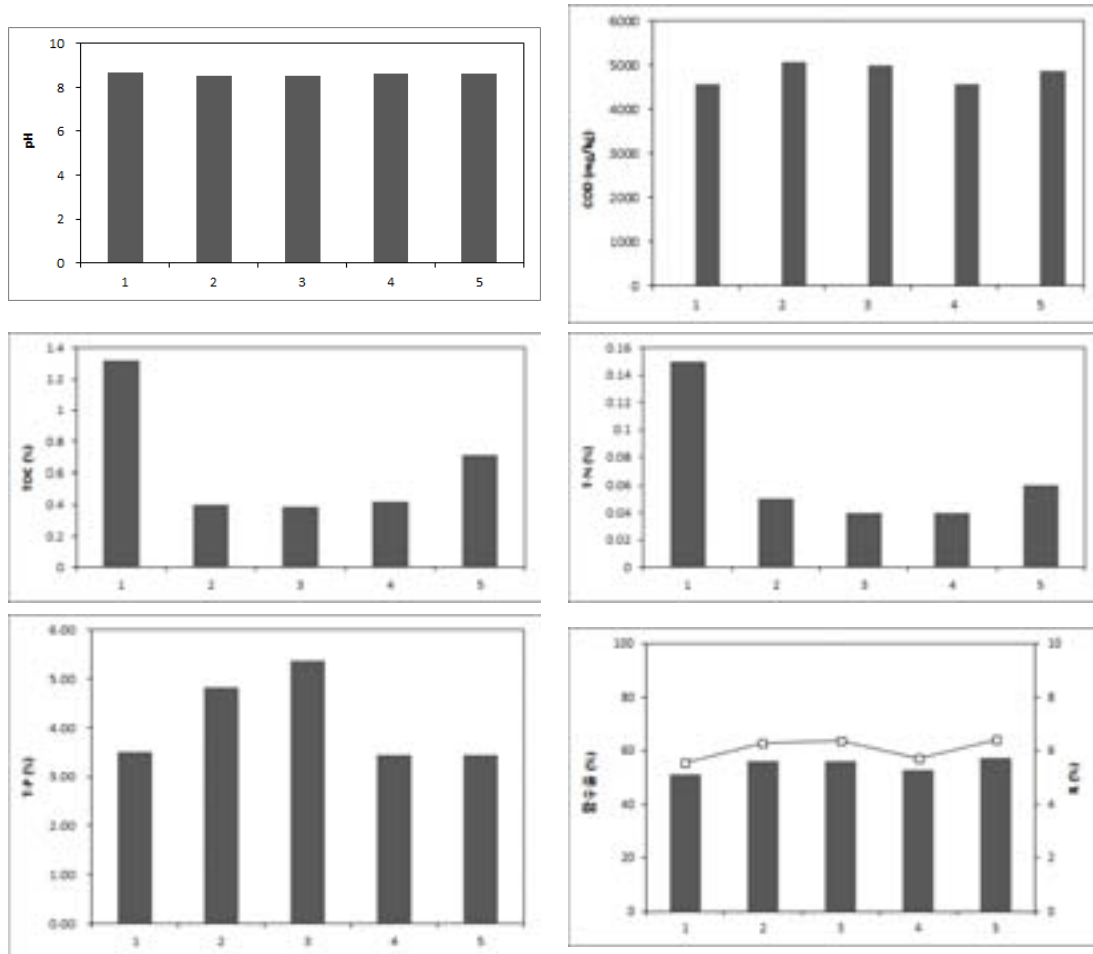
##### ■ 기타 유기물 농도 (총 유기탄소 (TOC), 총 질소(T-), 총 인(T-P))

- TOC: O 해역의 TOC의 농도분포는 0.4 - 1.3 %의 범위였으며 평균  $0.85 \pm 0.45$  %인 것으로 나타났다.
- T-N: O 해역의 TN의 농도분포는 0.04 - 0.15 %의 범위였으며 평균  $0.095 \pm 0.055$  %인 것으로 나타났다.

[표. V-가-3] O항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	Values
pH	8.60
Silt-Clay (%)	97.5
Water Contents (%)	54.7
IL (%)	6.1
COD (g/kg)	4.81
TOC (%)	0.65
T-N (%)	0.07
T-P (mg/kg)	4.11

○ T-P: O 해역의 TP의 농도분포는 3.4 - 5.4 mg/kg의 범위였으며 평균  $4.4 \pm 1.0$  mg/kg 인 것으로 나타났다.



[그림. V-가-7] O항 지점별 pH, 입도분포, COD, TOC, T-N, T-P

㉔ O항 중금속 관련 해역퇴적물 특성 평가

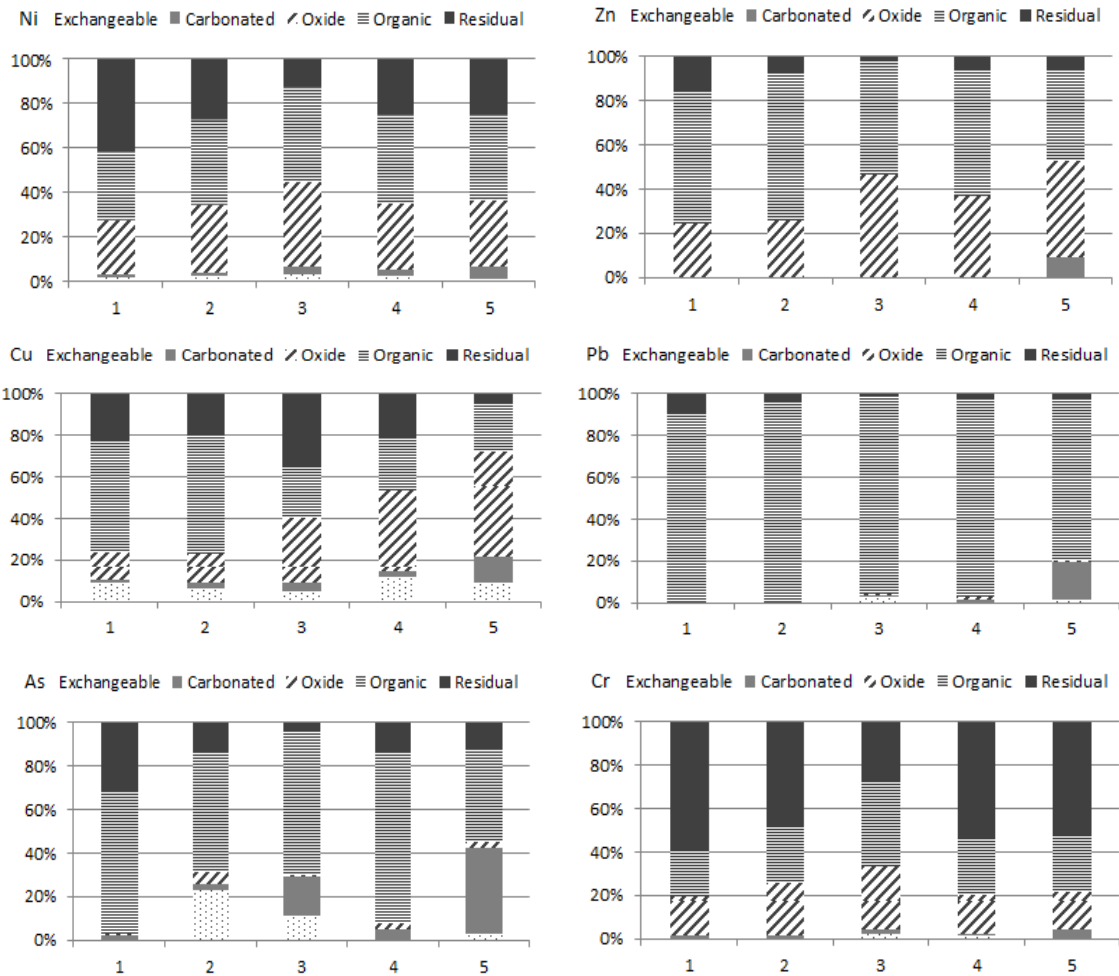
- 표 V-가-4에서 Zn, Pb, Cd는 기준을 초과하고 있음을 알 수 있음
- 그림 V-가-8에서 중금속형태의 비율이 높을 것을 볼 수 있음(선박으로 인한 항만내 오

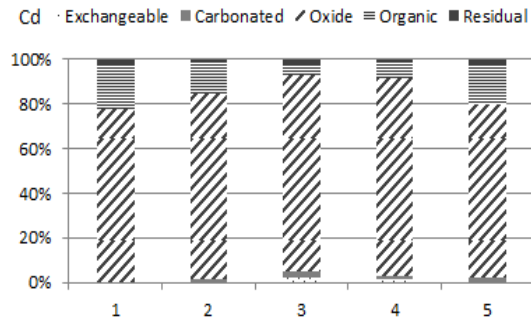
염과 산업개발 지역으로 인한 오염도가 높음)

[표. V-가-4] O항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 (단위 PPM)

	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Cr
1	13.8	760.3	3.4	454.3	295.3	8.5	29.1
2	3.2	48.2	0.7	23.6	3.6	1.8	8.9
3	19.4	272.7	1.5	96.0	76.9	3.5	33.1
4	23.1	335.4	1.9	129.5	100.7	3.1	38.4
5	22.2	146.6	0.4	42.0	33.8	0.8	49.5
기준	23-52	200-410	24-108	50-220	0.68-4.2	9-41.6	80-370

○ 이러한 값으로부터 O항의 퇴적물은 유기오염물질의 오염현상을 나타내고 있는 것으로 평가





[그림. V-가-8] O항 1-5지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과

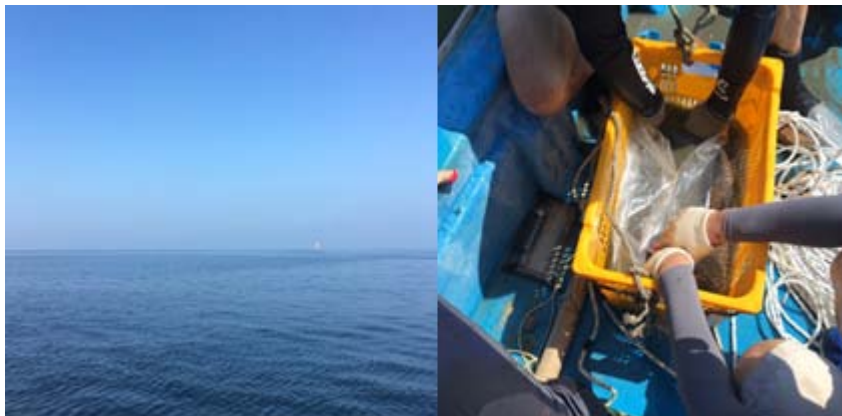
### ③ 부영양화물 오염(K항)

- 오염 유형별중 부영양화물 오염이 높은 지역으로 K항을 지정
- K항의 4개 지점에 대해 샘플러를 이용하여 오염 퇴적물을 채취



[그림. V-가-9] K항 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도

- 조사해역 개요
  - 대상해역 : K해역
  - 조사기간 : 2016년 8월 11일
  - 시료 특성 : Silt질 우세



[그림. V-가-10] K항 오염퇴적물 샘플링 작업 현황



- 조사방법
  - 조사지역 표층 퇴적물의 퇴적물 특성 및 현장 처리기술 시험을 위하여 그랩 퇴적물 채취기(Grab sampler)를 이용하여 시료를 채취
- 분석항목
  - 일반항목: 함수율, 입도, 총 유기탄소(TOC), 총 질소(TN), 총 인(P)
  - 부영양화 정화지수(CIET : Clean-up Index, Eutrophication) 관련 항목 : 화학적 산소요구량(COD), 강열감량(IL)
  - 유해화학물질 정화지수(CIHC : Clean-up Index, Harmful chemicals) 관련 항목 : 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd)등
- 분석방법 : 해양환경공정시험기준에 준하여 분석함 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균 값을 제시)

### ㉞ K항 유기물 관련 해양퇴적물 특성 평가

#### ■ 강열감량 (Ignition Loss, IL)

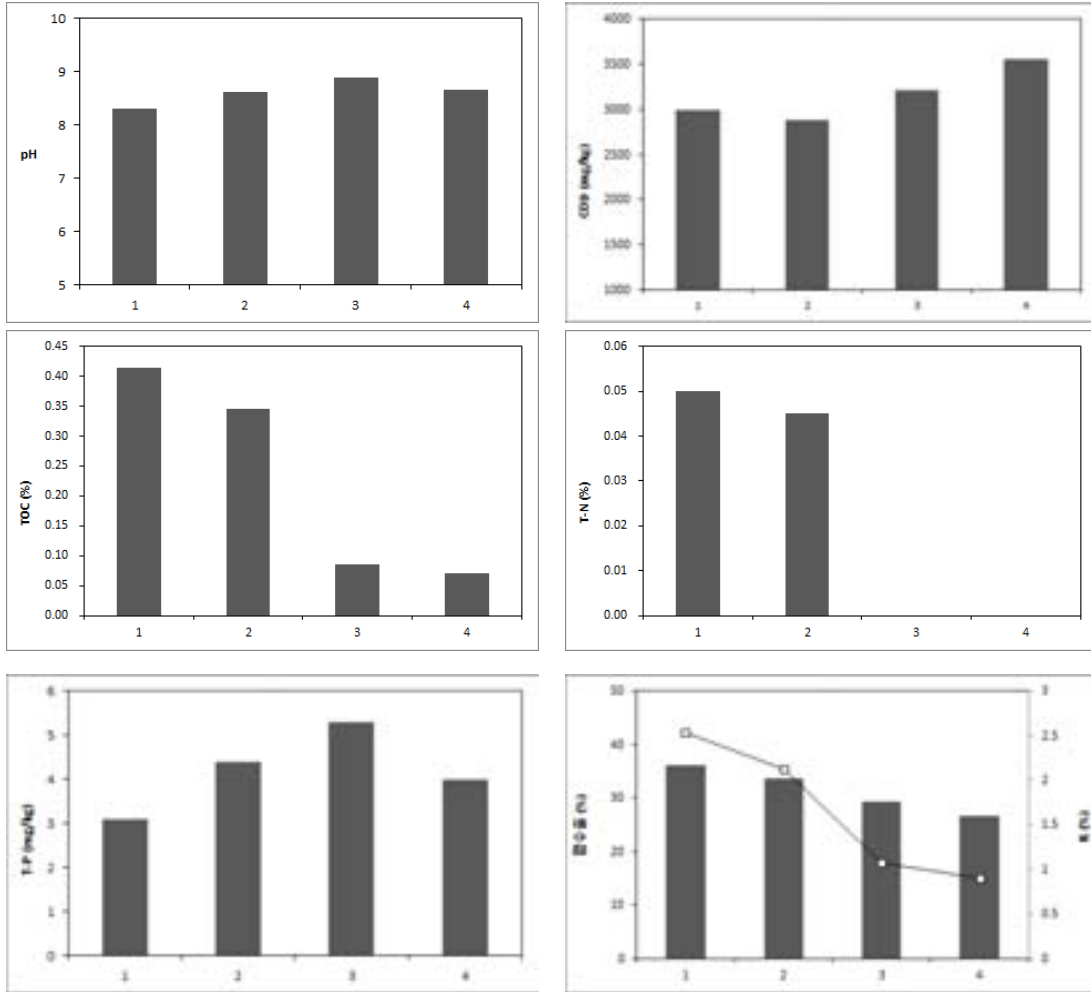
- K 해역의 IL의 농도분포는 0.9 - 2.5 %의 범위였으며 평균  $1.7 \pm 0.8$  %인 것으로 나타났다.

#### ■ 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD)

- K 해역의 COD의 농도분포는 2880 - 3560 mg/kg의 범위였으며 평균  $3220 \pm 340$  mg/kg인 것으로 나타났다.

#### ■ 기타 유기물 농도 (총 유기탄소 (TOC), 총 질소(T-N), 총 인(T-P))

- TOC: K 해역의 TOC의 농도분포는 0.07 - 0.42 %의 범위였으며 평균  $0.245 \pm 0.175$  %인 것으로 나타났다.
- T-N: K 해역의 TN의 농도분포는 0.00 - 0.05 %의 범위였으며 평균  $0.025 \pm 0.025$  %인 것으로 나타났다.
- T-P: K 해역의 TP의 농도분포는 3.1 - 5.3 mg/kg의 범위였으며 평균  $4.2 \pm 1.1$ mg/kg인 것으로 나타났다.



[그림. V-가-11] K항 지점별 pH, 입도분포, COD, TOC, T-N, T-P

[표. V-가-5] K항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	Values
pH	8.62
Silt-Clay (%)	78
Water Contents (%)	31.4
IL (%)	1.7
COD (g/kg)	3.16
TOC (%)	0.23
T-N (%)	0.02
T-P (mg/kg)	4.2

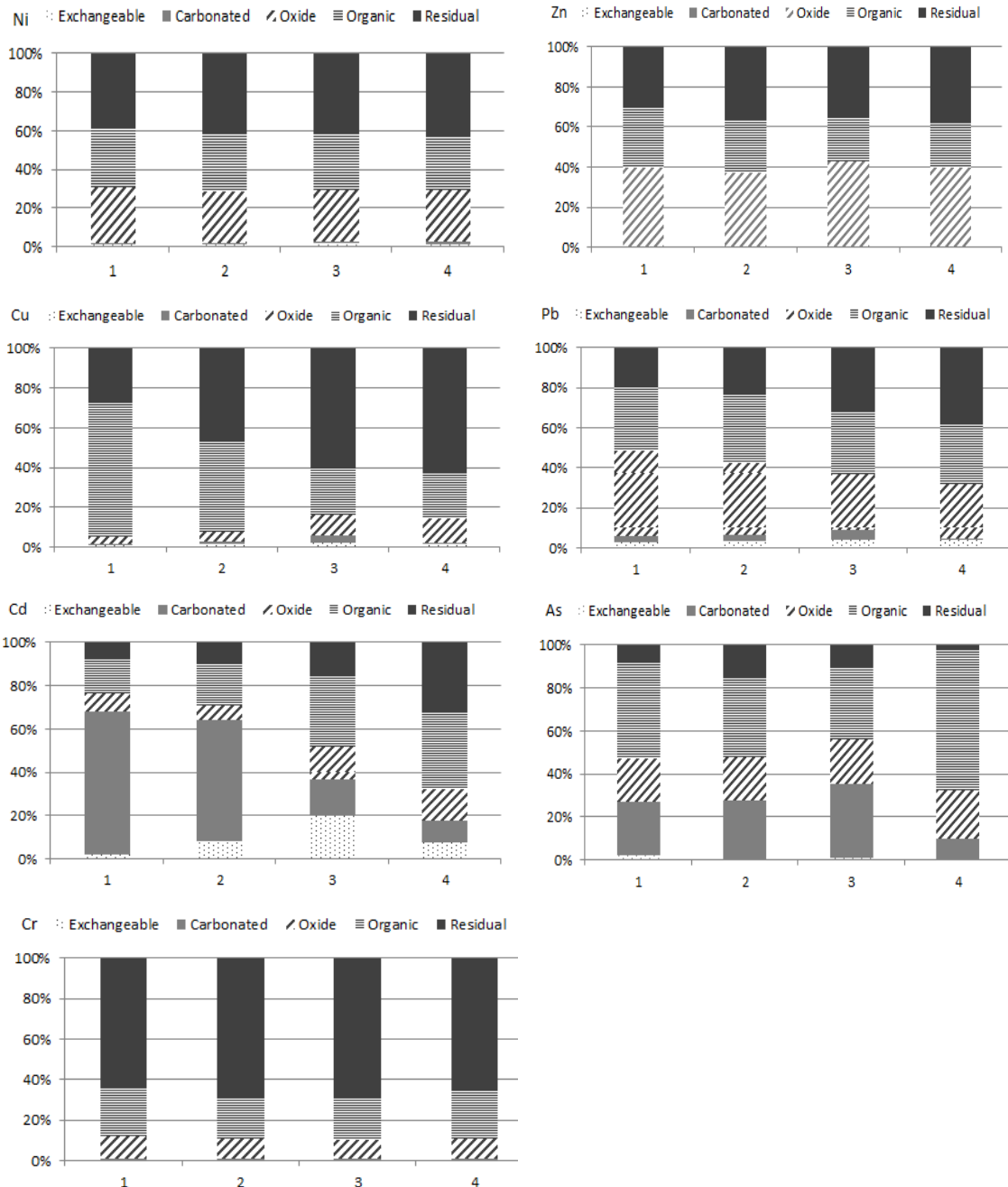
㉠ K항 중금속 관련 해양퇴적물 특성 평가

○ 표 V-가-6에서 중금속 형태는 기준수치보다 이하인 것으로 볼 수 있음

[표. V-가-6] K항 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 (단위 ppm)

	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Cr
1	16.02	40.74	8.91	13.56	0.07	4.47	41.28
2	15.51	42.47	8.36	16.28	0.07	4.14	40
3	6.06	14.02	2.03	10.15	0.08	4.55	19.4
4	7.04	19.02	2.56	12.75	0.09	4.74	21.79
기준	23-52	200-410	24-108	50-220	0.68-4.2	9-41.6	80-370

○ K항의 경우 전체 형태의 오염도를 조사하고자 하였으나 유기물과 중금속 부영양화의 오염도를 전부 충족하는 지역이 없는 것으로 판단



[그림. V-가-12] K항 1-6지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과

(나) 유력 대상 해역 오염특성별 피복효율 평가에 따른 피복소재 적용안 도출  
(3개 유형)

① 영양염류, 유기물

- 퇴적물과 해수는 P항에서 직접 채취 및 채수
- 퇴적물의 물리화학적 특성을 분석하고자 pH와 EC는 퇴적물과 증류수를 1:5비율로 혼합하여 교반 후 pH/EC meter (Sever Multi S40, Mettler Toledo, Switzerland)로 측정하였고, 함수율은 건조 전 무게와 건조 후 무게를 측정하여 산출
- 퇴적물의 T-N과 T-P 분석은 각 Kjeldahl법과 HClO<sub>4</sub> 분해법을 적용한 발색법으로 측정하였고, 퇴적물의 COD분석은 과망간산칼륨을 이용한 적정법을 사용
- 해수의 pH와 EC는 pH/EC meter로 측정하였고, 용존산소 (DO)는 DO meter (HI-9146, Hanna Instrument, USA)로 분석
- 해수의 T-N과 T-P 분석은 각 acid persulfate digestion법과 chromotropic acid법으로 발색한 후 UV-vis spectrophotometer로 측정하였고, COD는 중크롬산칼륨으로 분석
- 퇴적물 내 영양염류 및 유기물 용출차단을 위한 피복소재로는 천연광물인 석회석, 제올라이트, 모래를 사용하였고, 피복소재의 특성을 파악하기 위하여 XRF와 비표면적을 측정
- P항에서 채취한 퇴적물의 함수율은 42.08%이고, pH는 8.22, EC는 8.63  $\mu\text{m}/\text{cm}$ 임
- 퇴적물 내 T-N과 T-P 농도는 각 638.00 mg/kg, 2296.14 mg/kg으로 분석되었고, COD는 20285.85 mg/kg으로 측정
- P항의 T-N 농도는 국내 평균 해양퇴적물 내 T-N 농도인 1730 $\pm$ 12 mg/kg에 비해 현저히 낮은 것으로 나타났고, P항 퇴적물 내 COD 농도는 20285.85 mg/kg으로 일본 수산환경 수질 기준인 20000 mg/kg을 미미하게 초과하는 것으로 나타남
- 해수 수질의 경우 pH는 7.6이며, EC는 51.6 mS/cm이다. DO 농도는 4.59 mg/L이며, T-N과 T-P의 농도는 각 0.615 mg/L, 0.057 mg/L로 측정
- P항 해수의 COD농도는 2.70 mg/L로 분석

[표. V-가-7] P항 퇴적물 및 해수의 특성

marine sediment	W.C (%)	pH	EC ( $\mu\text{m}/\text{cm}$ )	T-N (mg/kg)	T-P (mg/kg)	COD (mg/kg)
s	42.08	8.22	8.63	638.00	2296.14	20285.85
sea water	pH	EC ( $\mu\text{m}/\text{cm}$ )	DO (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	COD (mg/L)
	7.60	51.60	4.59	0.62	0.06	2.70

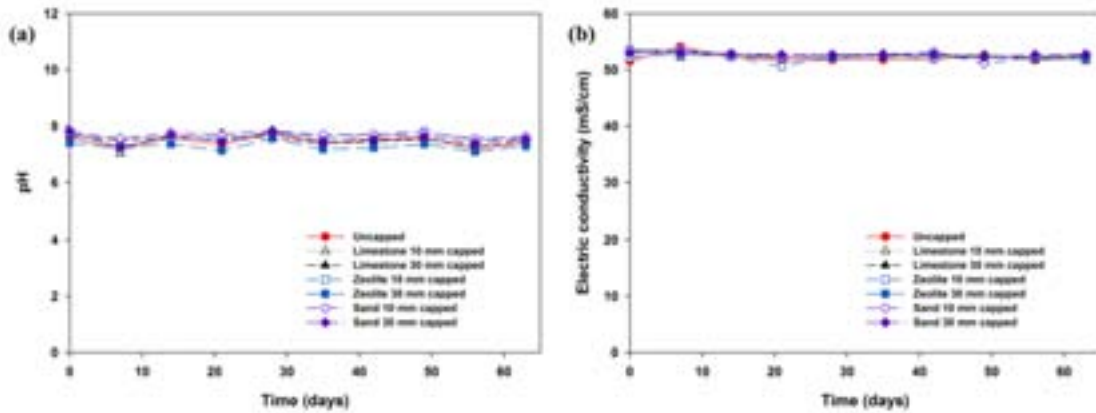
- 피복소재로 활용한 석회석, 제올라이트, 모래의 화학적 특성을 분석한 결과 석회석은 CaO (94.90%)가 주성분이며, 제올라이트는 SiO<sub>2</sub> (69.20)와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11.25%)가 높은 비율을 나타냈고, 모래의 경우 SiO<sub>2</sub>가 80.60%로 나타남
- 비표면적을 측정한 결과 제올라이트 (52.10 m<sup>2</sup>/g) > 모래 (0.76 m<sup>2</sup>/g) > 석회석 (0.08 m<sup>2</sup>/g) 순으로 나타났고, 겉보기 밀도의 경우 석회석 (1.51 g/m<sup>3</sup>) > 모래 (1.31 g/m<sup>3</sup>) > 제올라이트

트 (0.91 g/m<sup>3</sup>) 순으로 나타남, 석회석의 겉보기 밀도는 제올라이트에 비해 약 1.7배 큼

[표. V-가-8] 석회석, 제올라이트, 모래의 물리화학적 특성

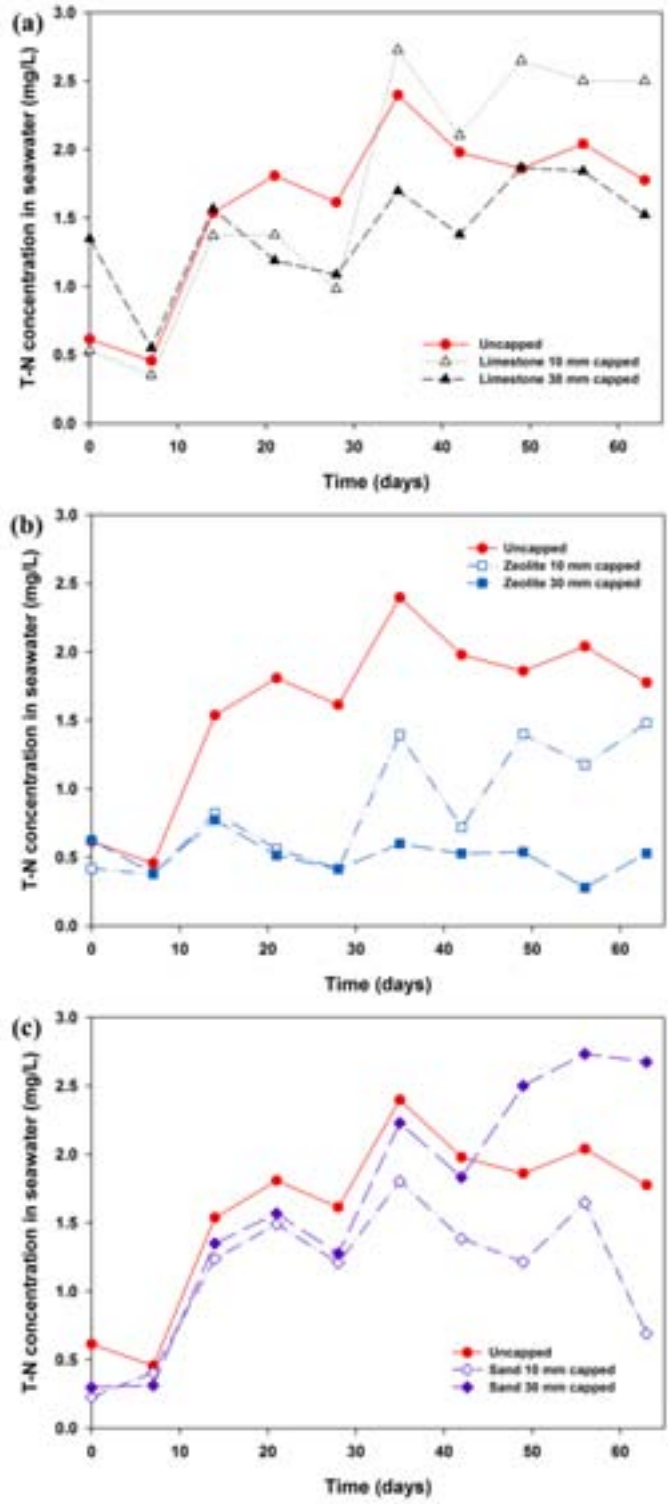
Capping materials	Weight percentage of element							Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O		
Lime stone	1.30	0.30	3.00	94.90	0.01	-	-	0.08	1.51
Zeolite	11.25	3.01	69.20	1.24	-	1.22	-	52.10	0.91
Sand	7.70	1.40	80.60	2.40	-	-	1.50	0.76	1.31

- 석회석, 제올라이트, 모래 피복에 따른 퇴적물 내 T-N, T-P, COD의 용출특성을 파악하기 위해 지름 150 mm, 높이 250 mm 규격의 아크릴 재질 원통형 수조를 사용
- 원통형 수조에 퇴적물을 30 mm 높이로 채우고 퇴적물 위에 석회석, 제올라이트, 모래를 각각 10, 30 mm 두께로 피복
- 해수는 퇴적물과 피복층이 교란되지 않도록 저유량 정량펌프를 이용해 3 L씩 수조에 채운 후 차광 및 온도 유지를 위하여 BOD incubator (KINB-250, Kukje Eng., Korea)에서 20℃로 63일간 실험을 수행
- 피복소재를 충전한 원통형 수조 6조와 피복소재를 충전하지 않는 원통형 수조 1조에 대하여 수질 및 토양시료를 채취하고 분석을 수행하였고, 수질시료의 분석은 주 1회씩 주기적으로 채취 및 분석
- 수질시료는 50 ml주사기를 이용하여 25 ml를 취수한 후 pH와 EC는 pH/EC meter를 사용하여 측정하였으며, T-N과 T-P는 각각 chromotropic acid법과 acid persulfate법으로 분석하였고, COD는 중크롬산칼륨법으로 해수 중의 농도를 측정
- 해양퇴적물 내 영양염류 용출차단을 위하여 피복소재인 석회석, 제올라이트, 모래를 퇴적물 상부에 각 10, 30 mm 두께로 피복하였고, 실험기간 동안 해수의 pH, EC 변화를 파악
- 미피복 수조의 pH는 실험시작지점 7.60에서 실험 42일차까지 증감을 반복해 7.51로 나타났고, 실험 종료시점인 63일차엔 7.42정도로 미미하게 감소된 형태를 보임
- 석회석을 각 10, 30 mm 피복한 수조의 경우 실험 1일차 7.69와 7.67로 나타났으며, 실험 종료시점인 63일차에는 7.6 (10 mm), 7.42 (30 mm)로 미미하게 감소된 pH를 보였음
- 제올라이트를 10, 30 mm로 피복한 수조의 경우도 실험 1일차 7.74, 7.4에서 실험 63일차 7.53, 7.28로 감소되는 경향의 pH를 보였고, 모래를 각 10, 30 mm 피복한 수조의 경우엔 실험 1일차 7.79, 7.84로 나타났으며, 실험 종료시점인 63일차에는 7.64, 7.53으로 역시 미미하게 감소된 pH가 나타남
- 피복에 따른 EC 분석 결과 미피복 수조의 EC는 실험 1일차 51.60 mS/cm에서 실험 63일차 52.2 mS/cm로 미미하게 증가하는 경향을 보였고, 석회석을 10 mm, 30 mm 두께로 피복한 경우 실험 1일차 각 52.9 mS/cm (10 mm), 53.6 mS/cm (30 mm)에서 실험 63일차 51.6 mS/cm (10 mm), 52.5 mS/cm (30 mm)로 미미한 감소를 나타냄
- 제올라이트와 모래를 각 10, 30 mm 두께로 피복하였을 때 실험기간 동안 최저 52.2 mS/cm에서 최고 53.5 mS/cm의 값으로 큰 차이가 없는 것으로 나타남



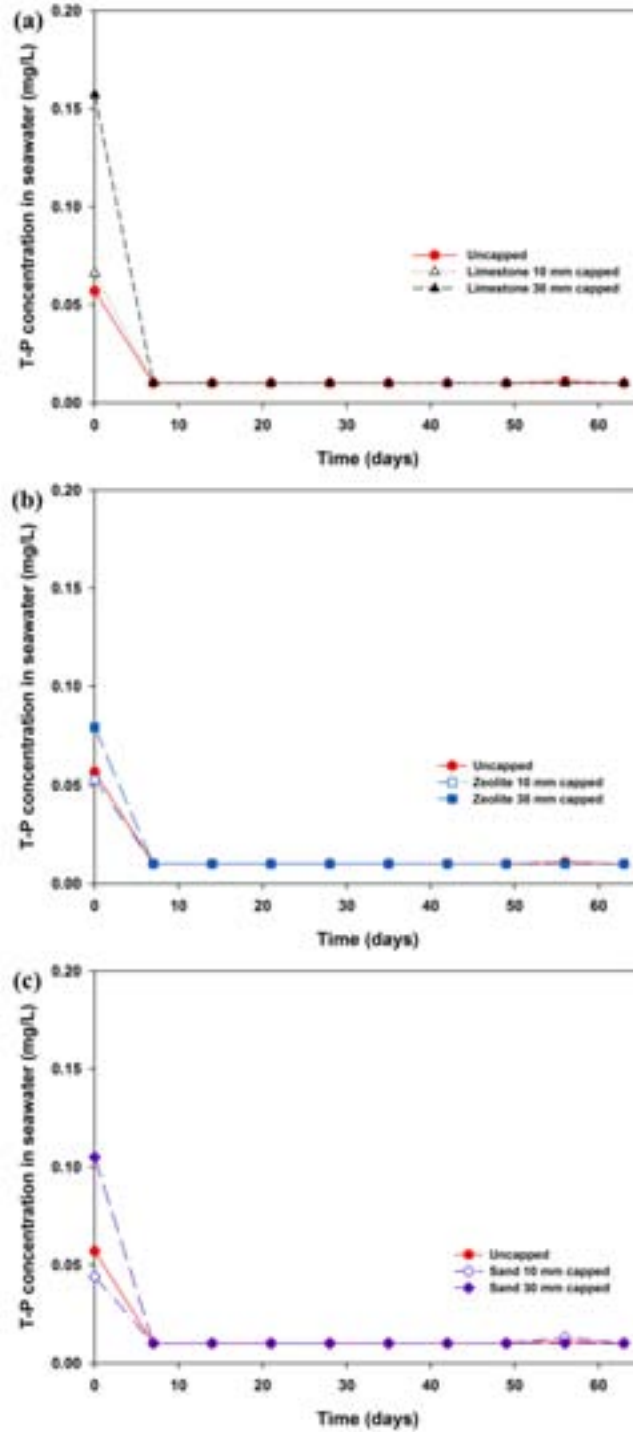
[그림. V-가-13] 석회석, 제올라이트, 모래 피복에 따른 pH (a)와 EC (b) 변화

- 석회석, 제올라이트, 모래를 각각 10, 30 mm 두께로 피복한 후 퇴적물 내 영양염류(T-N, T-P) 및 COD 용출특성을 분석한 결과 T-N은 미피복 수조에서 실험 1일차 0.6150 mg/L의 농도를 나타냈지만, 실험 63일차에는 1.7750 mg/L로 지속적인 증가 경향을 나타낸 반면 석회석 각 10 mm, 30 mm를 피복한 경우 실험 1일차 0.5310 mg/L와 1.3480 mg/L에서 실험 63일차에는 2.5000 mg/L, 1.5220 mg/L으로 T-N 농도가 증가하는 경향을 보임
- 석회석 30 mm 두께로 피복한 경우는 미피복 수조에 비해 농도가 낮게 나타나 용출차단 경향을 보였음
- 제올라이트를 피복한 경우 실험 1일차에는 0.4180 mg/L (10 mm), 0.6250 mg/L (30 mm)에서 실험 63일차에는 각각 1.4810 mg/L, 0.5290 mg/L 으로 제올라이트를 10 mm 두께로 피복하였을 때 T-N 농도가 증가한 반면, 30 mm 두께로 피복한 경우에는 농도가 감소하는 경향을 나타냄
- 제올라이트에 의한 질소제거는 이온교환 반응에 의한 흡착기작으로 설명할 수 있음
- 선행연구에서는 천연제올라이트의 질소 흡착실험 결과 흡착 후 질소 함량이 1.16 wt% 증가한 반면 Si, Na, Mg의 함량이 감소되었다고 보고 (Choi et al., 2016)
- 모래를 피복한 경우 실험 1일차에 0.2880 mg/L (10 mm), 0.2980 mg/L (30 mm)의 농도에서 실험 63일차에는 각각 0.6910 mg/L, 2.6740 mg/L의 농도로 증가하였다. 모래를 10 mm 두께로 피복한 수조는 실험 종료시 미피복 수조에 비해 T-N 농도가 낮게 나타난 반면, 30 mm 두께로 피복한 수조는 미피복 수조에 비해 높게 나타남
- 실험기간 동안의 T-P 농도를 측정된 결과 미피복 수조 및 피복 수조에서 모두 실험 1일차 이후의 농도가 0.0100 mg/L를 나타낸 후 실험 종료 시까지 유지



[그림. V-가-14] 석회석 (a), 제올라이트 (b), 모래 (c) 피복에 따른 퇴적물 내 T-N 용출특성

○ 퇴적물 내에서 인이 용출되지 않는 현상은 점토성 물질인 퇴적물 내 인의 고착 (fix) 되었거나, 해수 중에 존재하는 다양한 양이온이 음이온인 인과 결합하여 침전, 또한 수중 pH가 중성 (7.5~7.7)을 유지하고 있어 퇴적물에서의 T-P 용출이 불가능 했을 것으로 판단 (Cho et al., 2008; Cheon et al., 2012)

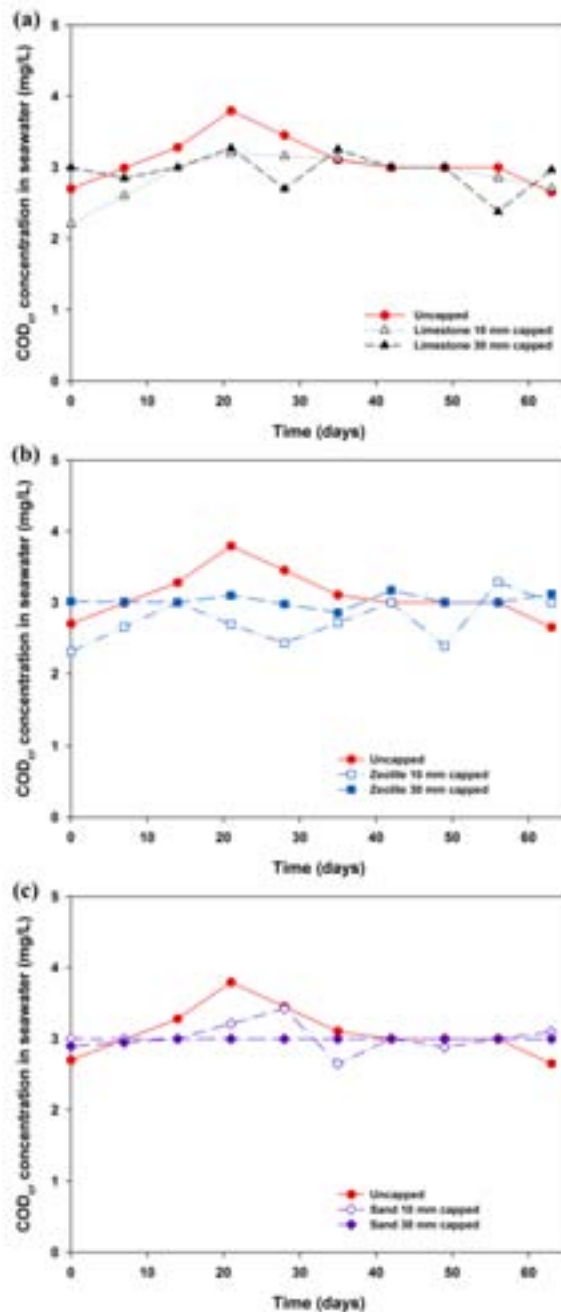


[그림. V-가-15] 석회석 (a), 제올라이트 (b), 모래 (c) 피복에 따른 퇴적물 내 T-P 용출특성

- 미피복 수조의 COD 농도를 분석한 결과 실험 1일차 2.7010 mg/L의 농도에서 실험 20일차까지 지속적으로 용출이 진행되어 약 4 mg/L의 농도 증가를 보인 이후 미미한 감소 경향을 나타내어 실험 63일차에는 2.6510 mg/L로 감소
- 반면 석회석을 각 10 mm와 30 mm 두께로 피복한 경우 실험 1일차 2.2040 mg/L (10 mm), 3.0000 mg/L (30 mm)에서 실험 63일차에는 2.7020 mg/L (10 mm), 2.9660 mg/L (30 mm)으로 측정



- 제올라이트를 피복한 경우 실험 1일차에 2.3080 mg/L (10 mm), 3.0130 mg/L (30 mm) 농도에서 실험 63일차에는 각각 2.9970 mg/L, 3.1180 mg/L 으로 농도가 증가됐고, 모래를 피복한 경우에도 실험 1일차에 3.0000 mg/L (10 mm), 2.8960 mg/L (30 mm)의 농도에서 실험 63일차에는 각각 3.0970 mg/L, 3.0000 mg/L의 농도를 나타냄
- 제올라이트, 모래를 30 mm 두께로 피복하였을 때 실험기간동안 안정된 수환경 농도를 나타내고 있어 용출차단 효과도 일부 형성하고 있지만 퇴적물로의 흡착현상 즉, 자정작용에 미미한 방해를 하는 것으로 판단
- 또한 본 연구에서 수행한 COD 용출차단 결과는 활성탄과 폐콘크리트를 피복하여 담수 환경에서 COD 물질 용출차단 연구와 유사한 결과를 나타냄 (Kang et al., 2016)

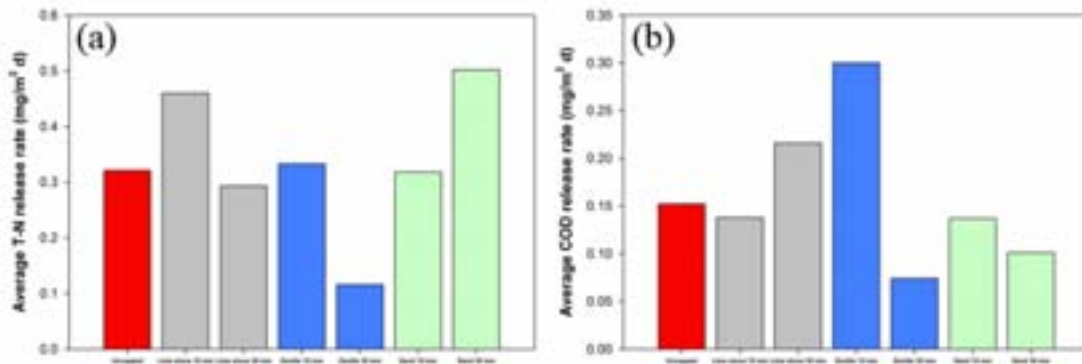


[그림. V-가-16] 석회석 (a), 제올라이트 (b), 모래 (c) 피복에 따른 퇴적물 내 COD 용출특성

- 위 결과를 토대로 퇴적물 내 영양염류와 COD의 용출속도를 산정하기 위하여 아래의 식을 이용

$$\text{Release rate (mg/m}^2 \cdot \text{d)} = (C_t - C_i) \times V / t \times A \quad (1)$$

- 여기서  $C_t$ 는 해수 채취 시 오염물질의 농도 (mg/L),  $C_i$ 는 실험 시작 시 해수 내 오염물질의 농도 (mg/L),  $V$ 는 해수의 부피 (L),  $t$ 는 시간 (day),  $A$ 는 해수와 퇴적물의 접촉면적 ( $\text{m}^2$ )임
- T-N은 제올라이트 30 mm (0.116  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 석회석 30 mm (0.293  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 모래 10 mm (0.318  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 미피복 수조 (0.321  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 제올라이트 10 mm (0.333  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 석회석 10 mm (0.460  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 모래 30 mm (0.502  $\text{mg/m}^2\text{d}$ )의 순으로 용출속도가 낮게 나타남
- COD의 용출속도는 제올라이트 30 mm (0.074  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 모래 30 mm (0.101  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 모래 10 mm (0.137  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 석회석 10 mm (0.138  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 미피복 수조 (0.152  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 석회석 30 mm(0.216  $\text{mg/m}^2\text{d}$ ) < 제올라이트 10 mm (0.300  $\text{mg/m}^2\text{d}$ )의 순서로 용출속도가 낮게 나타났음
- T-P의 경우 수조실험 결과 용출이 발생하지 않아 산출하지 않았음
- 이에 따라 T-N의 용출차단은 제올라이트와 석회석 30 mm 피복과 모래 10 mm 피복 시 효과적이었고, COD 용출차단에는 제올라이트와 모래 30 mm 두께와 석회석, 모래 각 10 mm 두께로 피복하였을 때 효과적



[그림. V-가-17] 석회석, 제올라이트, 모래 피복에 따른 퇴적물 내 오염물질 용출속도 : (a) T-N, (b) COD

## ② 중금속 (O항)

- 퇴적물은 O항에서 채취하였고, 해수는 경기도 화성시에 위치한 J항에서 채수
- 퇴적물의 물리적 특성을 분석하기 위하여 함수율과 강열감량 (IL)을 분석하였고, 퇴적물 내 COD, T-P, TOC의 함량을 측정
- 퇴적물의 T-P 분석은  $\text{HClO}_4$  분해법을 적용한 발색법으로 측정하였고, 퇴적물의 COD분석은 과망간산칼륨을 이용한 적정법을 사용
- 퇴적물의 TOC 분석을 위해 퇴적물을 염산으로 전처리 후 원소분석기를 이용하여 Carbon의 함량을 측정
- 퇴적물 내 중금속 분석은 왕수분해법으로 퇴적물을 완전분해 후 ICP-OES로 측정

- 퇴적물 내 중금속 및 영양염류 용출차단을 위한 피복소재로는 폐콘크리트를 사용하였고, 폐콘크리트의 특성을 파악하기 위하여 XRF와 비표면적을 측정
- O항에서 채취한 퇴적물의 함수율은 54.68%이고, IL은 6.07%, pH는 8.60임
- 퇴적물 내 COD와 T-P, TOC의 함량은 각 4812.60 mg/kg, 4.11 g/kg, 0.65%로 측정
- O항 퇴적물 내 COD 농도는 4812.60 mg/kg으로 일본 수산 환경 수질 기준인 20000 mg/kg을 매우 높은 농도로 초과
- 퇴적물 내 중금속 농도를 분석하였을 때 Zn (312.63 mg/kg) > Pb (149.06 mg/kg) > Cd (102.06 mg/kg) > Cr (31.80 mg/kg) > Ni (16.34 mg/kg) > As (3.52 mg/kg) > Cu (1.60 mg/kg) 순으로 높은 농도를 보이며, Cd, Pb, Zn의 농도는 해양환경관리법 해양환경기준의 관리기준을 초과하는 매우 높은 농도로 판단

[표. V-가-9] O항 퇴적물 특성

marine sediment	W.C (%)	IL (%)	pH	COD (mg/kg)		T-P (g/kg)	TOC (%)
	54.68	6.07	8.60	4812.60		4.11	0.65
	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
3.52	102.06	31.80	1.60	16.34	149.06	312.63	

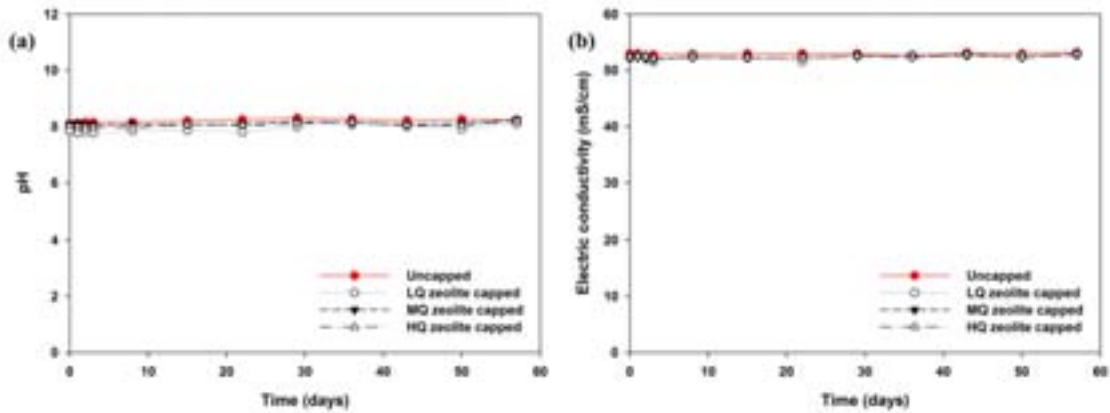
- O항 퇴적물 내 중금속 용출차단을 위한 피복소재는 천연제올라이트를 사용하였고, 제올라이트의 양이온교환능력에 따른 효율을 파악하기 위해 저급 (LQzeo), 중급 (MQzeo), 고급 (HQzeo)로 구분하여 진행
- LQ, MQ, HQ로 구분한 제올라이트의 물리적 특성을 분석한 결과 함수율은 HQzeo (15.21%) > MQzeo (14.23%) > LQzeo (5.34%)의 순이며, 비표면적 또한 HQzeo (59.43 m<sup>2</sup>/g) > MQzeo (52.10 m<sup>2</sup>/g) > LQzeo (10.12 m<sup>2</sup>/g) 순으로 높았음
- 화학적 특성을 분석한 결과 제올라이트의 pH는 HQzeo > MQzeo > LQzeo의 순이며, 양이온교환능력은 각 163.74 meq/100g (HQzeo), 127.20 meq/100g (MQzeo), 70.62 meq/100g (LQzeo)로 측정됨
- 제올라이트의 화학적 조성을 XRF를 통해 분석한 결과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11.24~12.64%)와 SiO<sub>2</sub> (69.20~76.21%)가 주된 성분으로 3가지 제올라이트에 모두 포함됨

[표. V-가-10] O항 퇴적물 내 중금속 용출차단을 위한 제올라이트별 물리화학적 특성

		LQzeo	MQzeo	HQzeo
physical properties	Water contents (%)	5.34	14.23	15.21
	Surface area (m <sup>2</sup> /g)	10.12	52.10	59.43
	Pore size (nm)	3.82	3.82	3.83
	Pore volume (cc/g)	0.03	0.09	0.10
Chemical	pH	7.14	8.52	9.02

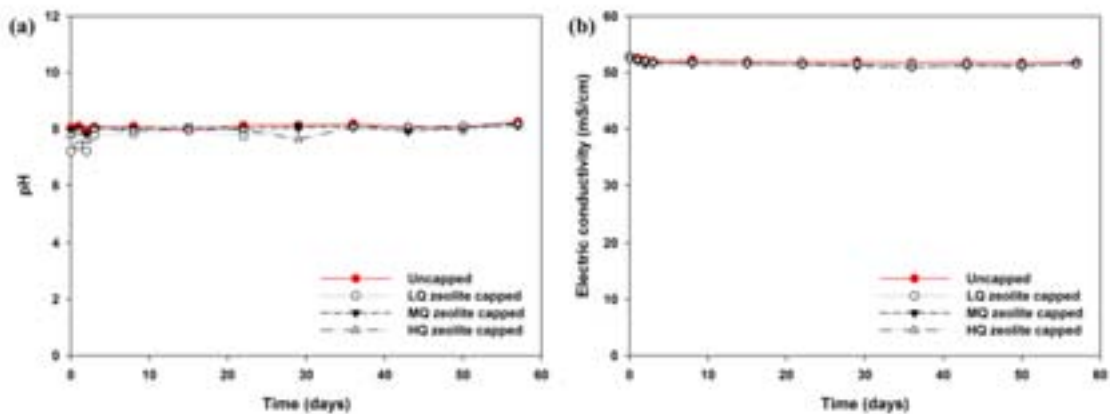
<b>properties</b>	<b>CEC (meq/100 g)</b>	70.62	127.20	163.74
	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	12.64	11.25	11.24
	<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	76.21	69.20	70.86
	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	1.84	3.01	2.84
	<b>CaO (%)</b>	1.26	1.24	1.06
	<b>MgO (%)</b>	0.76	1.22	0.92

- 등급별 (HQzeo, MQzeo, LQzeo) 제올라이트 피복에 따른 퇴적물 내 중금속 용출특성을 파악하기 위해 길이 350 mm, 폭 150 mm, 높이 250 mm 규격의 아크릴 수조를 사용
- 본 실험에서는 등급별 (HQzeo, MQzeo, LQzeo) 제올라이트 피복에 따른 특성과 수환경 변화에 따른 용출특성을 파악하기 위하여 등급별 제올라이트를 오염퇴적물 상부에 약 10 mm 두께로 피복 후 수환경 내 파랑과 산소 공급을 유도
- 이를 위해 에어펌프를 이용하였고 1 L/min의 유량으로 운전 (aeration condition)
- 반면 동일한 피복조건에서 파랑 및 산소 공급을 유도하지 않은 수조실험을 병행하여 진행 (unaeration condition)
- 해수는 퇴적물과 피복층이 교란되지 않도록 저유량 정량펌프를 이용해 7 L씩 수조에 채운 후 대기환경에서 57일간 실험을 수행
- 수질시료의 분석은 주 1회씩 주기적으로 채취 및 분석
- 수질시료는 50 ml주사기를 이용하여 25 ml를 취수한 후 pH와 EC는 pH/EC meter를 사용하여 측정하였으며, 해수 중 중금속은 ICP-OES로 측정
- 해양퇴적물 내 중금속의 용출차단을 위하여 피복소재로 등급별 (HQzeo, MQzeo, LQzeo) 제올라이트를 사용하였고, 실험기간 동안의 해수 pH와 EC를 측정한 결과를 아래 그림 V-가-18에 나타냄
- Aeration condition의 미피복 수조 pH는 실험시작 8.08에서 실험 57일차 8.24로 미미한 증가경향을 나타냈고, LQzeo, MQzeo, HQzeo의 실험초기 pH (LQzeo: 7.85, MQzeo: 8.11, HQzeo: 8.02)보다 실험 종료시 pH (LQzeo: 8.10, MQzeo: 8.24, HQzeo: 8.20)가 모두 미미하게 상승하였음
- EC의 측정결과는 미피복시 53.00 mS/cm (실험 1일차)에서 53.20 mS/cm로 큰변화가 없었으며, LQzeo의 경우 52.20 mS/cm (실험 초)에서 52.90mS/cm (실험 종료), MQzeo와 HQzeo는 각 52.40 mS/cm, 52.40 mS/cm (실험 초)에서 52.80 mS/cm, 52.90 mS/cm (실험 종료)으로 미피복 수조와 같이 큰 차이를 보이지 않았음



[그림. V-가-18] Aeration condition에서 등급별 제올라이트 피복에 따른 pH (a)와 EC (b) 변화

- Unaeration condition의 미피복 수조 pH는 실험시작 8.05에서 실험 57일차 8.26로 미미한 증가경향을 나타냈고, LQzeo, MQzeo, HQzeo의 실험초기 pH (LQzeo: 7.20, MQzeo: 7.95, HQzeo: 7.98)보다 실험 종료시 pH (LQzeo: 8.13, MQzeo: 8.15, HQzeo: 8.18)가 모두 미미하게 상승하였음
- EC의 측정결과는 미피복시 52.90 mS/cm (실험 1일차)에서 51.90 mS/cm로 미미한 감소 경향을 나타냈으며, LQzeo의 경우 52.90 mS/cm (실험 초)에서 51.80mS/cm (실험 종료), MQzeo와 HQzeo는 각 52.50 mS/cm, 52.50 mS/cm (실험 초)에서 51.60 mS/cm, 51.50 mS/cm (실험 종료)으로 미피복 수조와 같이 미미한 감소 경향을 나타냈음

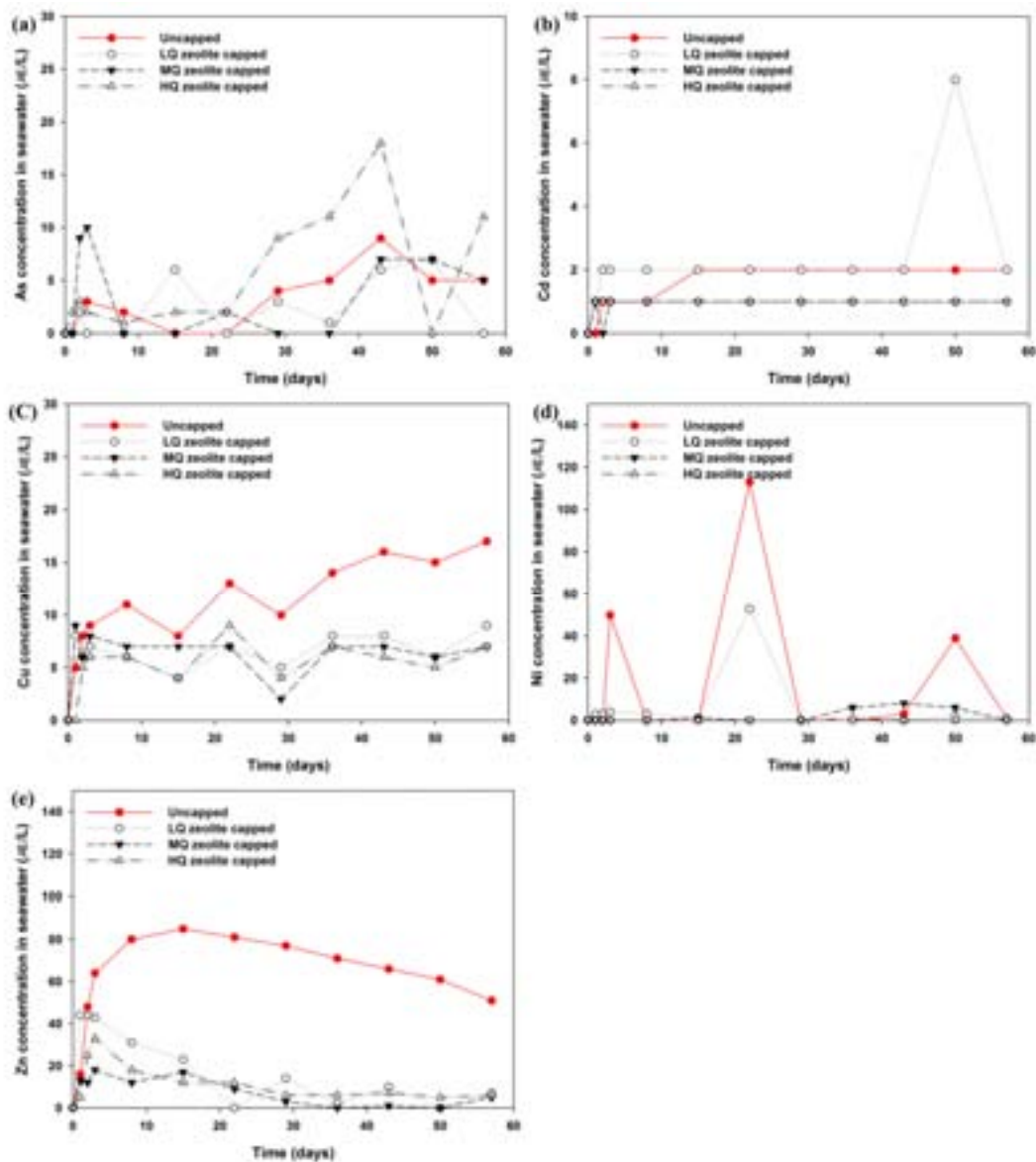


[그림. V-가-19] Unaeration condition에서 등급별 제올라이트 피복에 따른 pH (a)와 EC (b) 변화

- Aeration condition에서 실험기간동안 미피복 수조 As 분석결과 실험 초에는 농도가 측정 되지 않았지만 실험종료 시 5.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 As 농도가 측정되었고, MQzeo를 피복한 경우 실험 종료 시 5.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 농도가 측정되었으며, HQzeo를 피복한 경우에는 11.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 농도가 실험 종료 시 측정되었음
- Cd의 용출은 미피복수조에서 0  $\mu\text{m/L}$ 에서 2.0000  $\mu\text{m/L}$ 으로 미미한 농도증가를 보였고, MQzeo와 HQzeo 피복수조는 실험 종료시 미피복수조보다 낮은 1.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 농도를

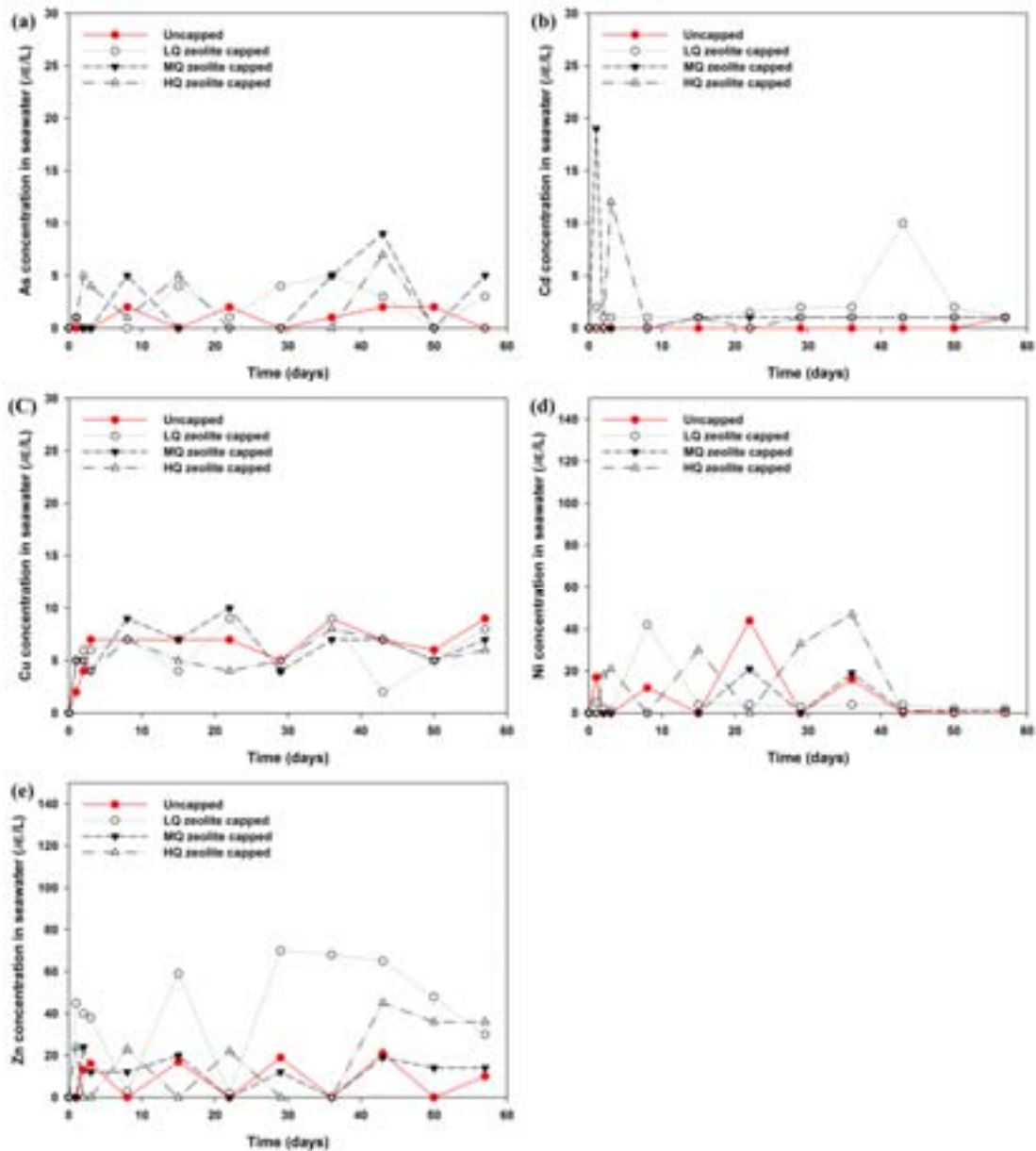
나타냈음

- 미피복 수조의 Cu는 실험 초 0.0000  $\mu\text{m/L}$ 에서 실험 57일차 17.0000  $\mu\text{m/L}$ 으로 지속적인 농도증가가 관찰되었지만 LQzeo, MQzeo, HQzeo는 각 9.0000  $\mu\text{m/L}$ , 7.0000  $\mu\text{m/L}$ , 7.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 농도가 실험 57일차에 측정되어 Cu 용출에 효과적인 것으로 나타남
- Ni은 미피복 수조에서 농도의 증가와 감소가 간헐적으로 반복되어 0.0000  $\mu\text{m/L}$ ~113.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 농도가 측정되었고, 실험 종료 시에는 1.0000  $\mu\text{m/L}$ 으로 측정됨, 반면 MQzeo와 HQzeo의 실험 종료 시 Ni농도는 측정되지 않았음
- 수조실험에 따른 Zn의 용출은 미피복 시 지속적으로 관찰되어 실험 초 0.0000  $\mu\text{m/L}$ 에서 실험 종료시 57.0000  $\mu\text{m/L}$ 으로 지속적인 증가를 보임, 반면 LQzeo, MQzeo, HQzeo 피복 시 실험 57일차 Zn농도는 각 7.0000  $\mu\text{m/L}$ , 5.0000  $\mu\text{m/L}$ , 6.0000  $\mu\text{m/L}$ 으로 양이온교환능력 등급 차이와는 상관없이 모든 제올라이트에 대해 Zn의 용출차단은 매우 효과적인 것으로 나타남



[그림. V-가-20] Aeration condition에서 등급별 제올라이트 피복에 따른 해수 내 중금속 농도변화 : (a) As, (b) Cd, (c) Cu, (d) Ni, (e) Zn

- 
- Unaeration condition에서 실험기간동안 미피복 수조 As 분석결과 실험 초와 실험 종료 시에는 농도가 측정되지 않았음, 반면 LQzeo, MQzeo 모두 미미한 농도가 측정되어 각 3.0000  $\mu\text{m/L}$ , 5.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 농도가 실험 종료시 측정되었고, HQzeo는 실험 종료 시에도 농도가 미 검출됨
  - Cd의 용출은 미피복수조에서 0  $\mu\text{m/L}$ 에서 1.0000  $\mu\text{m/L}$ 으로 미미한 농도증가를 보였고, LQzeo, MQzeo와 HQzeo 피복수조 또한 미피복 수조와 같은 1.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 농도를 나타냈음
  - 미피복 수조의 Cu는 실험 초 0.0000  $\mu\text{m/L}$ 에서 실험 57일차 9.0000  $\mu\text{m/L}$ 으로 지속적인 농도증가가 관찰되었지만 LQzeo, MQzeo, HQzeo는 각 8.0000  $\mu\text{m/L}$ , 7.0000  $\mu\text{m/L}$ , 6.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 농도가 실험 57일차에 측정
  - Ni은 미피복 수조에서 농도의 증가와 감소가 간헐적으로 반복되어 0.0000  $\mu\text{m/L}$ ~44.0000  $\mu\text{m/L}$ 의 농도가 측정되었고, 실험 종료 시에는 농도가 미 측정됨, 반면 LQzeo와 MQzeo의 실험 종료 시 Ni농도는 각 2.0000  $\mu\text{m/L}$ , 1.0000  $\mu\text{m/L}$ 임
  - 수조실험에 따른 Zn의 용출은 미피복 시 지속적으로 관찰되어 실험 초 0.0000  $\mu\text{m/L}$ 에서 실험 종료시 10.0000  $\mu\text{m/L}$ 으로 증가, 반면 LQzeo, MQzeo, HQzeo 피복 시 실험 57일차 Zn농도는 각 30.0000  $\mu\text{m/L}$ , 14.0000  $\mu\text{m/L}$ , 36.0000  $\mu\text{m/L}$ 으로 미피복 수조에 비해 높은 농도를 나타냈으며, aeration condition의 결과와 달리 용출차단에 매우 부정적인 결과를 나타냈음



[그림. V-가-21] unaeration condition에서 등급별 제올라이트 피복에 따른 해수 내 중금속 농도변화 : (a) As, (b) Cd, (c) Cu, (d) Ni, (e) Zn

### ③ 중금속, 영양염류 (K항)

- 퇴적물은 K항에서 채취하였고, 해수는 경기도 화성시에 위치한 J항에서 채수
- 퇴적물의 물리적 특성을 분석하기 위하여 함수율과 강열감량 (IL)을 분석하였고, 퇴적물 내 COD, T-P, TOC의 함량을 측정
- 퇴적물의 T-P 분석은  $\text{HClO}_4$  분해법을 적용한 발색법으로 측정하였고, 퇴적물의 COD 분석은 과망간산칼륨을 이용한 적정법을 사용
- 퇴적물의 TOC 분석을 위해 퇴적물을 염산으로 전처리 후 원소분석기를 이용하여 Carbon의 함량을 측정
- 퇴적물 내 중금속 및 영양염류 용출차단을 위한 피복소재로는 폐콘크리트를 사용하였고,



폐콘크리트의 특성을 파악하기 위하여 XRF와 비표면적을 측정

- K항에서 채취한 퇴적물의 함수율은 31.40%이고, IL은 1.66%, pH는 8.62임
- 퇴적물 내 COD와 T-P, TOC의 함량은 각 3159.51 mg/kg, 4.20 g/kg, 0.23%로 측정
- K항 퇴적물 내 COD 농도는 3159.51 mg/kg으로 일본 수산 환경 수질 기준인 20000 mg/kg을 매우 높은 농도로 초과

[표. V-가-11] K항 퇴적물 및 해수의 특성

marine sediment	W.C (%)	IL (%)	pH	COD (mg/kg)	T-P (g/kg)	TOC (%)
s	31.40	1.66	8.62	3159.51	4.20	0.23

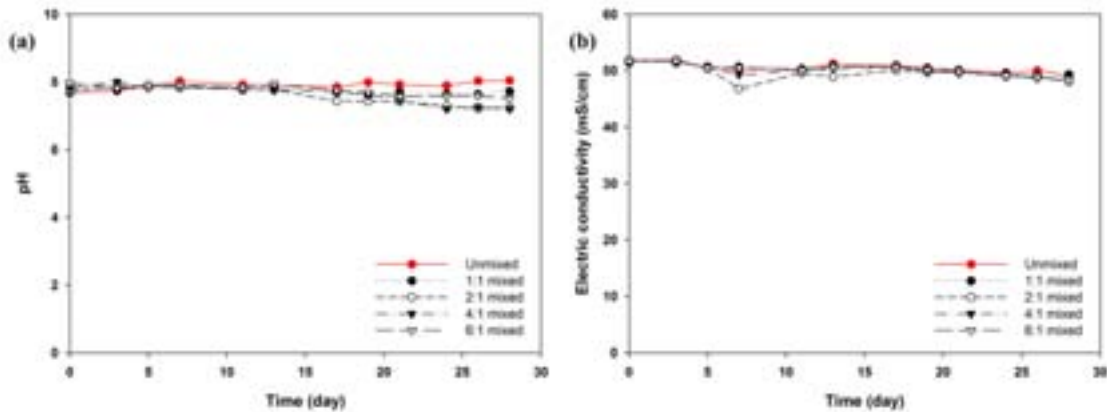
- 피복소재로 활용한 폐콘크리트의 화학적 특성을 분석한 결과 석회석은 SiO<sub>2</sub> (38.40%)와 CaO (36.20%)가 주성분이며, 비표면적을 측정한 결과 5.98 m<sup>2</sup>/g을 나타냄

[표. V-가-12] 폐콘크리트의 물리화학적 특성

Capping materials	Weight percentage of element							Surface area (m <sup>2</sup> /g)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	
Crushed concrete	9.90	6.00	38.40	36.20	0.40	0.10	1.50	5.98

- 폐콘크리트 피복에 따른 퇴적물 내 중금속과 T-P의 용출특성을 파악하기 위해 길이 350 mm, 폭 150 mm, 높이 250 mm 규격의 아크릴 수조를 사용
- 본 실험에서는 퇴적물과 피복소재의 혼합비율에 따른 용출차단 효율을 평가하기 위하여 퇴적물과 피복소재의 혼합비율을 1:1~6:1로 달리하여 수행
- 해수는 퇴적물과 피복층이 교란되지 않도록 저유량 정량펌프를 이용해 7 L씩 수조에 채운 후 대기환경에서 28일간 실험을 수행
- 피복소재를 혼합한 수조 4조와 피복소재를 충전하지 않는 수조 1조에 대하여 수질 시료를 채취하고 분석을 수행, 수질시료의 분석은 주 2~3회씩 간헐적으로 채취 및 분석
- 수질시료는 50 ml주사기를 이용하여 25 ml를 취수한 후 pH와 EC는 pH/EC meter를 사용하여 측정하였으며, T-P는 acid persulfate법으로 분석하였고, 해수 중 중금속은 ICP-OES로 측정
- 해양퇴적물 내 중금속 및 영양염류의 용출차단을 위하여 피복소재로 폐콘크리트를 사용하였고 퇴적물과 1:1~6:1비율로 각각 혼합하여 실험을 수행, 실험기간 동안의 해수 pH와 EC를 측정한 결과를 아래 그림 V-가-22에 나타냄
- 미혼합 수조의 pH는 실험시작지점 7.69에서 실험 28일차 8.04로 미미한 증가경향을 나타냈고, 퇴적물과 폐콘크리트를 1:1 비율로 혼합한 경우 실험 종료시점 (28일차)에 7.72로 미미한 증가경향을 보였음
- 반면 퇴적물과 폐콘크리트의 혼합비율을 2:1~6:1로 달리하였을 때는 실험 28일차에 각 7.25 (2:1), 7.20 (4:1), 7.51 (6:1)로 미미하게 감소하는 경향을 나타냈음
- EC 분석 결과 미혼합 수조의 EC는 실험 1일차 51.80 mS/cm에서 실험 28일차 49.20

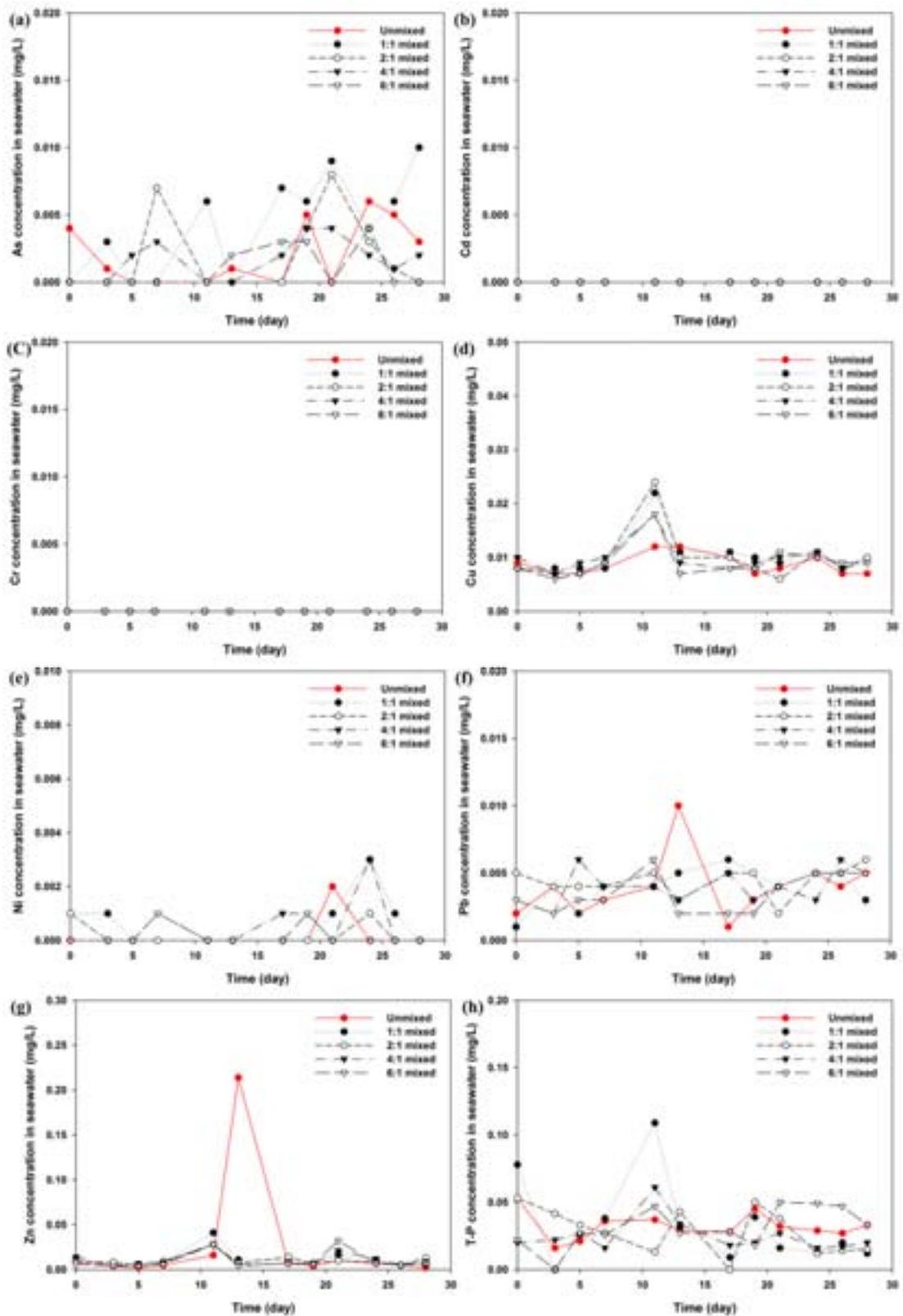
mS/cm로 미미하게 감소하는 경향을 보였고, 폐콘크리트를 1:1~6:1 비율로 혼합한 수조의 EC는 실험 28일차에 각 49.30 (1:1), 48.10 (2:1), 48.40 (4:1), 48.40 (6:1)으로 미혼합 수조와 같이 미미한 감소경향을 보였음



[그림. V-가-22] 폐콘크리트 혼합 수조 실험에 따른 pH (a)와 EC (b) 변화

- 실험기간동안의 미혼합 수조 As 분석결과 실험 초기 0.0040 mg/L의 농도가 측정되었고 실험기간동안 0.0000~0.0060 mg/L의 범위로 해수 내 농도가 측정됨
- 퇴적물과 폐콘크리트의 혼합비율을 1:1~6:1로 혼합하였을 때의 As 농도는 실험초기에 측정되지 않았지만 실험 종료시점인 28일차에는 각 0.0100 mg/L (1:1), 0.0000 mg/L (2:1), 0.0020 mg/L (4:1), 0.0000 mg/L (6:1)의 농도를 나타냈음
- 미혼합 수조의 Cu 용출은 실험 초기 0.0090 mg/L의 농도에서 실험 중반 0.0120 mg/L로 용출이 증가하는 경향을 보인 후 실험 종료 시 0.0070 mg/L로 감소함
- 폐콘크리트 혼합 시에는 실험 초기 0.0080 mg/L (1:1), 0.0080 mg/L (2:1), 0.0100 mg/L (4:1), 0.0080 mg/L (6:1)의 농도에서 실험 종료시 0.0100 mg/L (1:1), 0.0100 mg/L (2:1), 0.0090 mg/L (4:1), 0.0090 mg/L (6:1)로 실험 초기와 큰 차이를 보이지 않았음
- Ni의 경우 미혼합 수조에서는 용출이 발생되지 않았지만, 폐콘크리트를 혼합하였을 때는 실험기간 중 미미한 농도의 Ni이 간헐적으로 측정됨
- 미혼합 수조의 Pb 농도는 실험 초기 0.0020 mg/L에서 실험 종료 시 (28일) 0.0050 mg/L로 증가 경향을 보였음 반면, 폐콘크리트와 퇴적물의 비율을 1:1로 혼합한 경우 실험 종료 시 0.0030 mg/L의 농도로 미혼합 수조에 비해 용출이 저감되는 결과를 보였음
- 반면 혼합비를 2:1, 4:1, 6:1로 수행한 경우는 미혼합 수조의 농도와 비슷하거나 높은 결과를 나타냄
- Zn의 농도는 미혼합 수조에서 0.0080 mg/L에서 0.0020 mg/L로 실험이 진행될수록 농도가 감소하였고, 폐콘크리트를 혼합한 경우에도 큰 차이를 나타내지 않았음
- 수조실험 기간 동안 Cd와 Cr의 농도는 미혼합 수조, 폐콘크리트 혼합수조 모두 측정되지 않았음
- 중금속과 별도로 수조실험 중 해수 내 T-P를 측정된 결과 미혼합 수조에서는 실험 초기 0.0530 mg/L에서 실험 종료 시 0.0330 mg/L로 미미한 감소경향을 보였으며, 폐콘크리트를 1:1과 2:1 비율로 혼합한 수조는 실험초기 0.0780 mg/L (1:1), 0.0530 mg/L (2:1)에서 실험 종료 시 0.0120 mg/L (1:1), 0.0150 mg/L (2:1)로 큰 감소 경향을 나타냈음
- 반면, 혼합비율을 4:1, 6:1로 수행한 경우는 실험초기와 실험종료시의 농도변화가 없거나,

미미한 증가를 나타냈음



[그림. V-가-23] 폐콘크리트 혼합 수조 실험에 따른 중금속 및 영양염류 농도변화 :  
(a) As, (b) Cd, (c) Cr, (d) Cu, (e) Ni, (f) Pb, (g) Zn, (h) T-P

(다) 피복 공법 현장 적용 사례 분석을 통한 적용가능한 해역의 환경조건 범위

---

## 제시

### ① 해역 유형 구분

- 지형에 따른 구분
  - 열린 해역 : 해수의 소통과 순환이 원활한 해역
  - 반폐쇄성 해역 : 해수의 소통과 순환이 원활하지 못한 해역
  - 폐쇄성 해역 : 해수의 소통과 순환이 원활하지 못하고 정체된 해역
- 해역의 이용목적에 따른 구분
  - 단순 해역 : 해역의 이용 목적이 한가지인 해역
  - 복합 해역 : 해역의 이용 목적이 두가지 이상인 해역
- 내해에 비해 외해의 경우 파고가 높고 유속이 빠르기 때문에 피복시공 및 피복형상 유지에 어려움이 예상되며, 본 연구에서 수행된 피복재 입경, 유속, 파고 등 환경외력에 따른 침식의 영향결과를 참고하여 시공계획을 수립하고 시행하여야함

### ② 퇴적물 오염 정도 및 계절에 따른 구분

- 오염도에 따른 구분
  - 오염도 높음 : 정화·복원 대상 구역의 유해화학물질정화지수가 6 이상이며, 대상 구역 중 유해화학물질정화지수가 6 이상인 구역이 80% 이상인 해역
  - 오염도 보통 : 정화·복원 대상 구역의 유해화학물질정화지수가 2 이상이며, 대상 구역 중 유해화학물질정화지수가 1 이상인 구역이 50% 이상인 해역
  - 오염도 낮음 : 오염되지 않은 해역을 제외한 나머지 정화·복원 대상 해역
- 주요 오염물질에 따른 구분
  - 단순 오염 : 부영양화정화지수가 6 이상이거나 또는 유해화학물질정화지수 평가 값이 2를 초과하는 항목이 한 가지인 해역
  - 복합 오염 : 부영양화정화지수가 6 이상이며, 유해화학물질정화지수 평가 값이 2를 초과하는 항목이 한 가지 이상인 해역
- 계절적 영향을 고려했을 때 수온이 감소하는 동절기에 비해 수온이 증가하는 하절기에 오염물질의 용출이 활발하지만 피복소재의 반응성도 높아지는 현상을 보임

### ③ 침식 고려사항

- 파동에너지에 따른 침식의 영향을 고려하기 위해서는 외적 환경요인을 분석하는 것이 가장 중요
- 해안 지역에서는 태풍으로 인한 피해를 고려하고 하천 지역에서는 홍수로 인한 최고 유속에서의 피복재 침식을 고려해야 함
- 또한 피복재의 생애주기를 설정하고 생애주기 내에서 발생 가능한 최악의 기상조건을 반영하여야 함
- 예를 들어 현장피복으로 오염물 격리에 필요한 최소 주기를 25년으로 산정할 경우 25년 주기의 태풍이나 홍수를 고려하여 설계 반영
- 반면 수심이 40 m 이상에서는 환경외력에 침식에 미치는 영향이 미미한 것으로 알려져 있음

#### ④ 압밀 및 사면안정 고려사항

- 오염퇴적토는 초기 높은 함수비로 인해 비교적 작은 상재하중에서도 압밀이 발생
- 따라서 피복재의 자중이 비교적 미미하더라도 피복재와 오염퇴적토에서는 압밀이 발생
- 침식을 고려하여 입경이 0.1 mm 이상인 사질토가 피복재인 경우에는 압밀에 따른 피복재 자체의 침하는 미미할 것으로 판단
- 그러나 오염퇴적토는 압밀이 발생하고 과잉간극수압으로 인한 동수구배로 인해 순간적인 간극수 흐름이 발생
- 이러한 간극수의 흐름은 오염물 이동을 도와주고 가속시켜 피복공법의 효율성이 설계에서 예측된 결과보다 저하
- 또한 피복재 포설 시 시공기간을 단축시킬 목적으로 대량의 피복재를 일시에 포설할 경우 오염퇴적토는 피복재 자중으로 인한 파괴가 예상됨
- 단계별 피복재 포설을 통해 오염퇴적토를 압밀 시켜 지지력을 확보해야 하며, 이러한 단계별 시공에는 압밀 속도 예측 기술이 필요

#### ⑤ 피복 공법 현장 적용 범위 제시

- 유해화학물질 오염도 ( $CI_{HC} > 2$ 인 구역의 정화지수 ( $CI_{HC}$ ) 평균값  $\times$  정점분포율)가 유기물 오염도 ( $CI_{ET} > 6$ 인 구역의 정화지수 ( $CI_{ET}$ ) 평균값  $\times$  정점분포율) 보다 같거나 낮을 경우
- 정화·복원 조치 시 선박의 통항 등 최소한의 수심 확보가 가능할 경우
- 대상 지역에서 피복 형상이 장기간 유지가 가능할 경우
- 지형 특성이 피복시공이 가능할 경우

#### ⑥ 피복시 발생 가능한 문제점

- 피복시 발생 가능한 문제점으로는 유속, 파고 등의 환경적인 문제점을 고려하여야 하며, 피복 이후의 발생가능한 문제점으로는 침식, 압밀, 저서생물에 의한 교란, 지진, 대형 선박의 이동 등의 주시하여야 함

#### (라) 오염해역의 다양성에 대응하는 피복 기술 고도화 수행

##### ① $Cr^{6+}$ 제거효율 향상을 위한 폐콘크리트의 열처리

- 본 실험에서 사용한 폐콘크리트는 경기도 안성에 위치한 동부 ENT에서 제공받았으며, 실험 전 입자크기를 0.85~1.18 mm로 구분하였고, 증류수로 3회 세척 후 105 °C에서 24 시간 건조
- 폐콘크리트의 화학적 구성 성분을 알아보기 위하여 X-ray fluorescence (XRF, S8 Tiger 4K, Bruker, Germany)분석을 수행하였고, 비표면적을 측정하기 위하여 비표면적 분석기 (Surface area analyzer, Quandrasorb SI, Quantachrome Inc., USA)를 사용
- 폐콘크리트의 열처리를 위하여 내경 56 mm, 길이 550 mm의 스테인레스관에 폐콘크리트를 100 g 주입 후 튜브퍼니스(CRFT 830S, Dongseo science co. Ltd, Korea)에서 질소를 가득 채운 후 4시간 동안 100, 300, 500, 700, 900 °C에서 열처리를 수행
- Cr(VI) 용액은 산화크롬( $CrO_3$ )을 초순수에 용해 후 사용하였으며, 폐콘크리트의 열처리온도에 따른 Cr(VI) 흡착능을 평가하기 위하여 50 mL 코니컬 튜브에 30 mg/L의 크롬용액 (pH 3) 30 mL를 넣고 열처리하지 않은 폐콘크리트와 각각 100, 300, 500, 700, 900 °C로

열처리한 폐콘크리트 1 g 주입 후 항온 교반기(Shaking incubator, SJ-808SF, Sejong Scientific Co., Korea)에 25 °C 100 rpm의 조건으로 24시간 교반

- 열처리조건에 따라 제조된 폐콘크리트의 Cr(VI) 흡착 특성을 살펴보기 위하여 동력학적 흡착, 평형 흡착, 용액의 pH에 따른 흡착과 이온경쟁 및 해수에서의 Cr(VI) 흡착실험을 수행
- 동력학적 흡착실험은 50 mL 코니컬튜브에 900 °C로 열처리된 폐콘크리트 1 g에 각각 10 mg/L와 50 mg/L의 Cr(VI) 용액 30 mL를 넣고 항온교반기(Shaking incubator, SJ-808SF, Sejong Scientific Co., Korea)를 이용하여 25 °C 100 rpm의 조건으로 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h 교반 후 Cr(VI)의 잔류농도를 분석
- 평형 흡착실험은 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 mg/L의 농도로 동력학적 흡착실험과 동일한 조건으로 24시간 반응 후 분석 (모든 실험은 3회 반복한 후 평균 값을 제시)
- 용액의 pH에 따른 흡착실험은 50 mg/L의 Cr(VI) 용액을 HCl과 NaOH로 pH를 3, 5, 7, 9, 11로 조절하고 평형 흡착실험과 동일한 조건으로 24시간 반응 후 잔류농도를 분석
- 타 이온에 따른 흡착경향을 알아보기 위하여 50 mg/L의 Cr(VI) 용액에 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub>를 각 1 mM을 주입하여 실험
- 해수에서 Cr(VI) 제거 특성을 살펴보기 위하여 경기도 평택시 P항에서 채수한 후 Cr(VI)의 농도가 10 mg/L가 되도록 조절한 해수 30 mL를 50 mL 코니컬 튜브에 넣고, 900 °C 폐콘크리트 1 g을 주입하여 다른 실험과 동일한 조건으로 24시간 교반 후 분석
- 모든 실험은 3회 반복하여 수행하였고, 반응시료는 filter paper(No. 6, Whatman, USA)로 여과 후 회석하였으며, 여과된 시료는 디페닐카르바지드 용액으로 발색하여 UV-vis Spectrophotometer(Mecasys, Optizen POP QX, Korea)로 분석
- 측정된 결과의 분석을 위해 동력학적 흡착실험결과는 다음 유사 1차 모델(pseudo first-order model, Eq. 1)과 유사 2차 모델(pseudo second-order model, Eq. 2)을 이용하여 분석

$$q_t = q_e [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (1)$$

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (2)$$

- 여기에서  $q_t$ 는 시간  $t$ 일 때 여재 단위질량당 흡착된 Cr(VI)의 양 (mg/g),  $q_e$ 는 평형상태에 도달하였을 때 여재 단위질량당 흡착된 Cr(VI)의 양 (mg/g),  $k_1$ 은 유사1차 반응 상수 (1/h), 그리고  $k_2$ 는 유사2차 반응 속도 상수 (g/mg/h)이다.
- 유사 1차 및 2차 모델 외에도 동력학적 실험결과는 입자내 확산모델(intra-particle diffusion model, Eq. 3), Elovich 모델 (Eq. 4), 액막 확산 모델(liquid film diffusion model, Eq. 5)[36]을 이용하여 추가적으로 분석

$$q_t = k_{ip} t^{1/2} + c \quad (3)$$

$$q_t = \beta \ln(\alpha \beta) + \beta \ln t \quad (4)$$

$$\ln\left(1 - \frac{q_t}{q_e}\right) = -k_{fd} t \quad (5)$$

- 입자내 확산모델에서  $c$ 는 절편이고  $k_{ip}$ 는 입자내 확산의 속도상수 임
- Elovich 모델에서  $a$ 는 초기 흡착 속도( $\text{g/mg}\cdot\text{min}^2$ ),  $\beta$ 는 탈착 속도( $\text{mg/g}\cdot\text{min}$ )임
- 액막 확산 모델에서  $k_{fd}$ 는 막 확산 속도( $1/t$ ),  $q_e$ 는 단위 질량의 여재 당 흡착된 Cr(VI)의 양 ( $\text{mg/g}$ )임
- 등온 흡착 실험결과는 Langmuir (Eq. 6), Freundlich (Eq. 7), Redlich-Peterson (Eq. 8) 모델을 이용하여 분석

$$q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (7)$$

$$q_e = \frac{K_R C_e}{1 + a_R C_e^g} \quad (8)$$

- 여기에서  $C_e$ 는 평형 상태에서 액상의 Cr(VI)의 농도 ( $\text{mg/L}$ ),  $K_L$ 은 결합 에너지와 관계된 Langmuir 흡착 상수 ( $\text{L/mg}$ ),  $Q_m$ 은 단위 질량의 여재 당 Cr(VI)의 최대 흡착량 (흡착 용량) ( $\text{mg/g}$ ),  $K_F$ 는 분배 계수 ( $\text{L/g}$ ), 그리고  $n$ 는 Freundlich 상수임,  $K_R$ 은 흡착 용량과 관계된 상수이고,  $a_R$ 은 결합 지점과의 친화력을 나타내는 상수이며,  $g$ 는 흡착의 강도를 나타내는 Redlich-Peterson 상수임
- 상관계수 ( $R^2$ )와 추정의 표준오차(Standard error of estimate, SSE)를 사용하여 실험의 결과 값에 대한 모델의 적합도를 결정하였다. 추정의 표준오차는 다음과 같은 식을 이용하여 계산

$$SSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_c - y_e)^2}{n}} \quad (9)$$

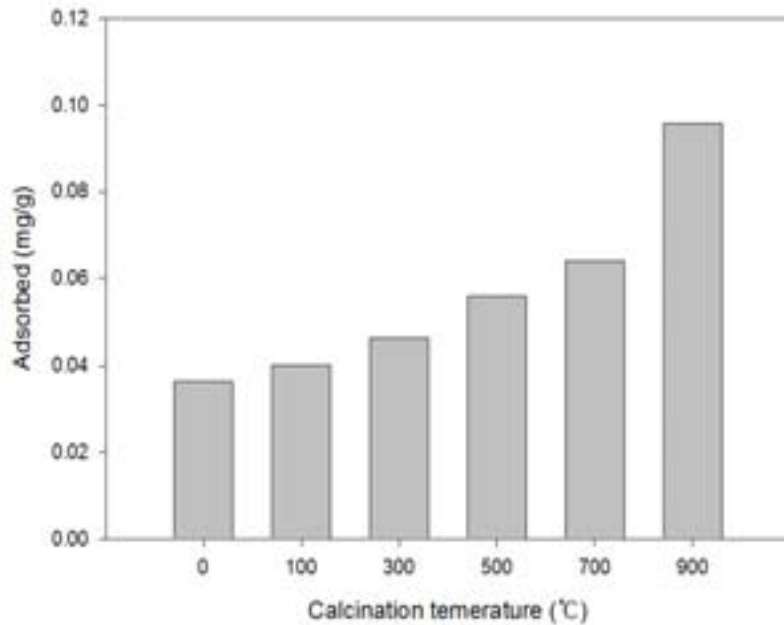
- 여기에서  $n$ 은 실험 결과 값의 개수이며,  $y_c$ 는 모델로부터 예측된 값이고,  $y_e$ 는 실험의 결과 값임

### ㉓ 페콘크리트의 열처리에 따른 Cr(VI) 흡착특성

- 본 연구에서 사용된 페콘크리트의 열처리 온도에 따른 흡착특성을 파악하기 위해서 열처리 하지 않은 페콘크리트, 100, 300, 500, 700, 900 °C에서 열처리한 페콘크리트의 Cr(VI) 흡착 특성을 아래 그림 V-가-24에 나타냄
- 실험 조건은 각각의 흡착제 1 g과 30 mg/L의 Cr(VI) 용액 30 mL를 24시간 반응시킨 후 Cr(VI) 흡착량을 결정
- 열처리하지 않은 페콘크리트의 Cr(VI) 흡착량은 0.036 mg/g에서 열처리 온도가 증가함에 따라서 흡착량이 증가하여 700 °C 열처리한 페콘크리트의 Cr(VI) 흡착량은 0.064 mg/g으

로 흡착량이 2배 가량 증가

- 900 °C 열처리시 폐콘크리트의 Cr(VI) 흡착량은 0.0959 mg/g으로 700 °C 열처리된 폐콘크리트의 Cr(VI) 흡착량 보다 약 1.5배, 열처리하지 않은 폐콘크리트의 Cr(VI) 흡착량 보다 약 3배 높은 것으로 나타남



[그림. V-가-24] 폐콘크리트 열처리 온도 변화에 따른 Cr(VI) 흡착실험 결과

[표. V-가-13] 폐콘크리트와 900°C 열처리한 폐콘크리트의 화학적 조성 및 비표면적 분석결과

Adsorbent	Chemical composition (%)									Surface area (m <sup>2</sup> /g)
	CO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI*	Total	
Raw CCG	14.6	1.0	7.8	44.0	2.3	25.6	2.3	2.3	100	6.61
900 calcined CCG	4.2	1.2	9.5	50.9	3.0	25.1	2.8	3.2	100	0.58

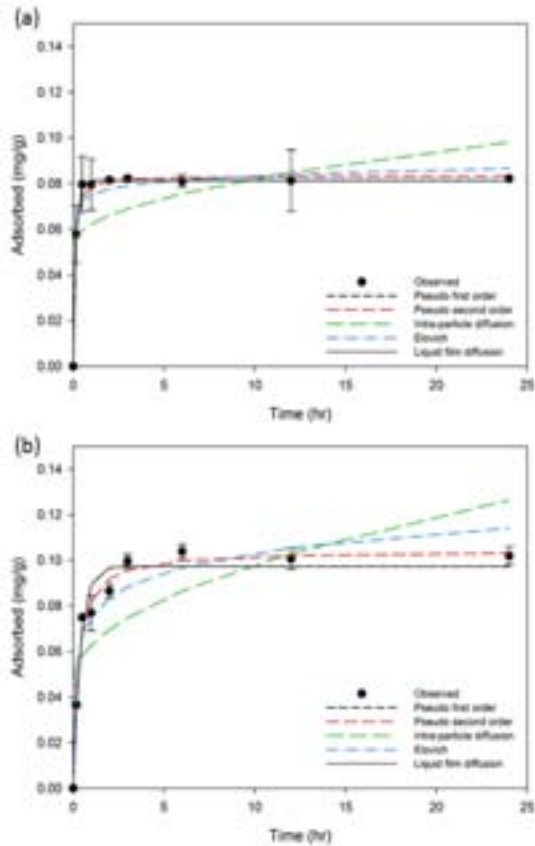
- 900 °C로 열처리한 폐콘크리트의 비표면적은 미처리 폐콘크리트의 1/10 미만으로, 이는 열처리 온도에 따른 Cr(VI) 흡착량 변화 실험과 상반된 결과를 나타냄
- 화학적 성분은 900 °C 열처리된 폐콘크리트의 CO<sub>2</sub> 함량이 열처리하지 않은 폐콘크리트 보다 적었고, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>3</sub>와 같은 무기물의 함량은 높게 나타남
- 열처리에 따른 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>3</sub>의 함량 증가로 900 °C 열처리된 폐콘크리트의 Cr(VI) 흡착량이 증가한 것으로 판단된다. Cr(VI)은 AlOH와 SiOH에 outer-sphere complex를 형성하여 흡착됨 (Zachara et al., 1988)



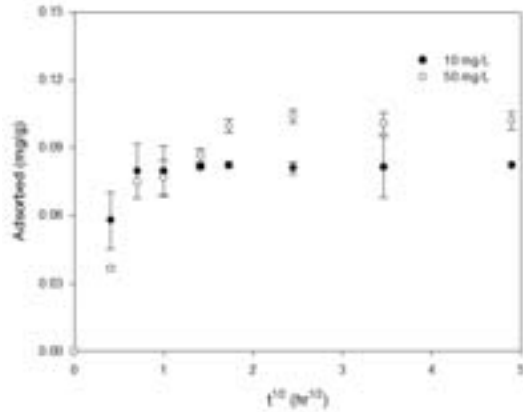
---

### ㉔ 900 °C에서 열처리된 폐콘크리트의 동력학적 흡착 및 평형 흡착 특성

- Cr(VI)의 흡착 성능이 가장 우수한 900 °C에서 열처리된 폐콘크리트의 흡착 특성을 살펴 보기 위해서 동력학적 흡착 및 평형 흡착 실험을 수행
- 900 °C에서 열처리된 폐콘크리트의 시간에 따른 Cr(VI) 흡착량과 유사 1, 2차 모델의 결과 값은 아래 그림 V-가-25, 26과 표 V-가-14에 나타냄
- 유사 1차 모델에서 Cr(VI)의 초기 농도가 10 mg/L일 때  $q_e$ 는 0.0813 mg/g이고  $k_1$ 은 7.4283 1/h임
- 50 mg/L에서는  $q_e$ 는 0.0974 mg/g이고  $k_1$ 은 2.4902 1/h으로, 50 mg/L에서 Cr(VI)의 흡착 반응은 10 mg/L에서 보다 평형 흡착량이 크지만 반응 속도는 느림을 알 수 있음
- 유사 2차 모델에 의해서 분석된 결과  $q_e$  값은 유사 1차 모델을 통해서 분석된 값보다 조금 크게 나타났으며, Cr(VI) 초기 농도가 10 mg/L에서  $q_e$ 는 0.0835 mg/g, 50 mg/L에서는 0.1044 mg/g임
- Table 2에 제시한 상관계수 값(R)에 의하면, 유사 1차 모델과 2차 모델 모두 실험결과에 잘 부합하는 것으로 나타남, 따라서 Cr(VI)의 900 °C 열처리한 폐콘크리트에 흡착은 입자 내 확산 및 화학적 흡착에 의해서 복합적 현상에 의해서 결정되는 것으로 판단 (Ho and McKay, 1999)
- 이 결과는 Fig. 3에 제시된 입자내 확산모델을 이용한 동력학적 흡착실험의 분석결과와 일치, Cr(VI)의 초기농도가 50 mg/L에서는  $t^{1/2}$ 이 1 이하에서는  $t^{1/2}$ 에 대한  $q_t$  값의 관계가 선형이고 직선의 절편이 원점을 지나므로, 초기에 Cr(VI) 흡착은 입자내 확산에 의한 것으로 나타남 (Gerente et al., 2007)
- 그러나, 1시간 이후에는  $t^{1/2}$ 에 대한  $q_t$  값의 관계가 다른 직선 형태를 나타내어 Cr(VI) 흡착은 입자내 확산뿐만 아니라 복합적인 요소에 의해 흡착 속도가 결정, Cr(VI)의 초기농도가 10 mg/L에서는  $t^{1/2}$ 이 1 이하에서 직선이 원점을 지나지 않으므로, 10 mg/L에서 Cr(VI) 흡착은 초기부터 표면흡착과 동시에 입자 내의 분산이 복합적으로 일어나는 것으로 나타남 (Bhattacharyya and Gupta, 2007)
- Elovich의 상관계수는 10 mg/L와 50 mg/L에서 각각 0.7099와 0.8994으로 낮은 값을 나타내었다. 액막 확산 모델 식 (6)을  $q_t$ 에 관해서 정리하였을 때, 유사 1차 모델과 동일한 형태를 나타내며 막 확산 속도를 나타내는  $k_{fd}$  값과 유사 1차 모델의  $k_1$ 은 같음
- Cr(VI)의 평형 흡착실험 결과를 Fig. 4에 제시하였고, 흡착모델과 관련된 모델 파라미터 값들은 Table 3에 나타냄
- Langmuir 모델에서는 단위 질량의 여재 당 Cr(VI)의 최대 흡착량( $Q_m$ )은 0.1785 mg/g이며, 흡착 상수( $K_L$ ) 값은 0.0341 L/mg임
- Freundlich 모델에서 분배계수( $K_F$ )는 0.0434 L/g,  $1/n$ 은 0.2359으로 0.5보다 작은 값을 보였는데, 흡착제와 Cr(VI) 사이에 강한 결합이 형성됨을 알 수 있음 (Edzwald, 2011)
- Redlich-Peterson 모델의 흡착 용량 상수  $K_R$ , 결합 지점과의 친화력 상수  $a_R$ , 이고, 흡착의 강도 상수  $g$ 는 각각 0.3321, 9.6656, 0.3978로 나타남



[그림. V-가-25] 900℃ 열처리한 폐콘크리트의 동역학적 실험 결과

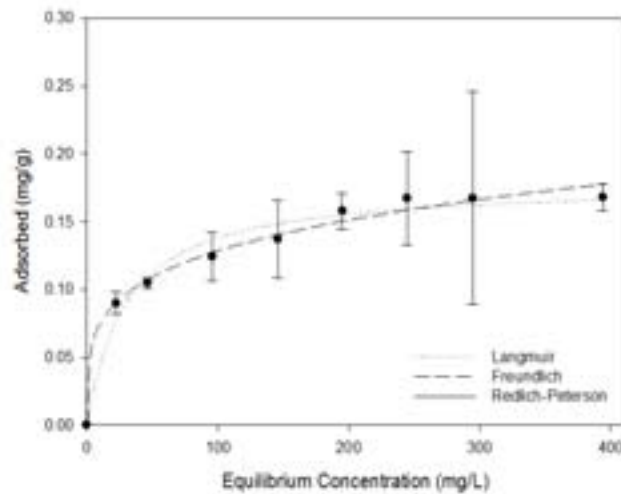


[그림. V-가-26] 900℃ 열처리한 폐콘크리트의 Intraparticle diffusion model 분석

[표. V-가-14] 900℃ 열처리한 폐콘크리트의 동역학적 실험결과에 따른 모델 파라미터

	10 mg/L				50 mg/L			
	$q_e$	$k_1$	$R^2$	SSE	$q_e$	$k_1$	$R^2$	SSE
Pseudo 1st order	0.0813	7.4283	0.9996	0.0008	0.0974	2.4902	0.9809	0.0074
Pseudo 2nd order	$q_e$	$k_2$	$R^2$	SSE	$q_e$	$k_2$	$R^2$	SSE
	0.0835	191.01	0.9961	0.0026	0.1044	35.05	0.9924	0.0047
Intra-Particle diffusion	$k_{ip}$	$c$	$R^2$	SSE	$k_{ip}$	$c$	$R^2$	SSE
	0.0092	0.0530	0.5340	0.0246	0.0163	0.0465	0.7277	0.0260
Elovich	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	SSE	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	SSE
	$3.2 \times 10^{11}$	0.0036	0.7099	0.0055	$3.3 \times 10^4$	0.0124	0.8994	0.0093
Liquid film diffusion	$q_e$	$k_{fd}$	$R^2$	SSE	$q_e$	$k_{fd}$	$R^2$	SSE
	0.0813	7.4283	0.9996	0.0008	0.0974	2.4902	0.9809	0.0074

○ 본 연구에서 사용된 세가지 평형 흡착 모델 Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 모델의 상관계수 값은 각각 0.9875, 0.9947, 0.9954으로, 모두 실험결과에 잘 부합하는 것으로 나타남



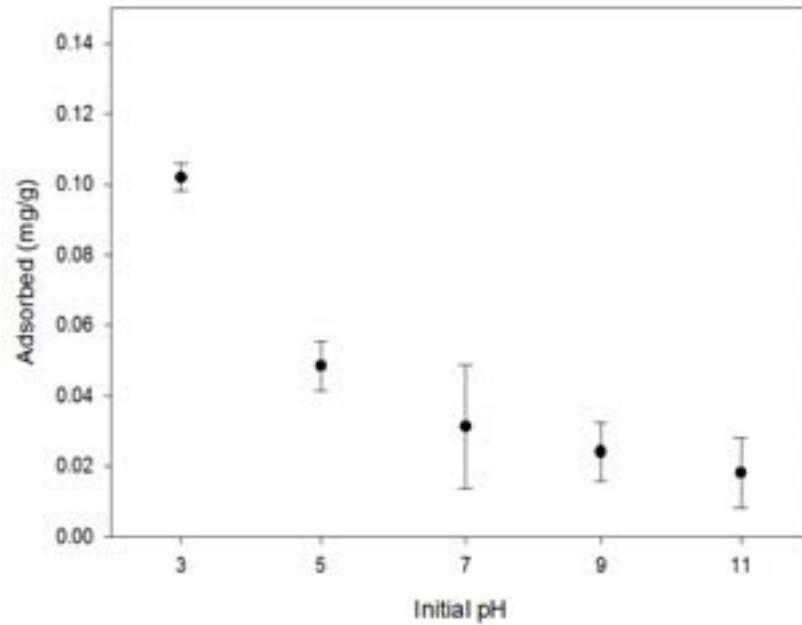
[그림. V-가-27] 900 °C 열처리한 폐콘크리트의 평형흡착 실험 결과

[표. V-가-15] 900 °C 열처리한 폐콘크리트의 평형흡착 실험결과에 따른 모델 파라미터

Model	Parameters			R	SSE
Langmuir	$Q_m$	$K_L$		0.9875	0.0092
	0.1785	0.0341			
Freundlich	$K_F$	$1/n$		0.9947	0.0060
	0.0434	0.2359			
Redlich-Peterson	$K_R$	$a_R$	$g$	0.9954	0.0061
	0.3321	9.6656	0.3978		

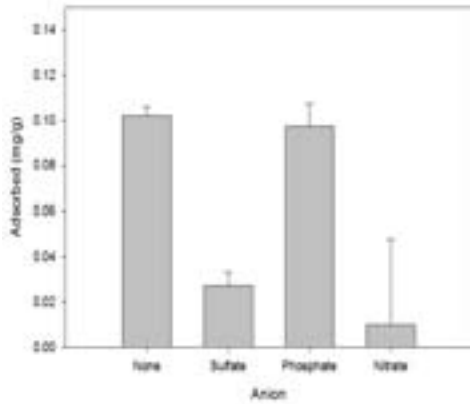
#### ㉔ pH, 경쟁 음이온, 해수 환경에 따른 흡착 특성

- 900°C에서 열처리한 폐콘크리트의 용액 pH에 따른 Cr(VI) 흡착량의 변화를 Fig. 5에 나타냄
- 실험결과에 의하면, 900 °C에서 열처리한 폐콘크리트의 Cr(VI) 흡착은 pH 3.0에서 가장 높은 흡착능(0.1020 mg/g)을 보였고, pH가 증가함에 따라서 흡착량이 감소하여 pH 11에서 Cr(VI) 흡착량은 0.0181 mg/g으로 나타남
- pH가 높을수록 Cr(VI)의 흡착이 감소한다는 것은 타 문헌의 내용과 일치 (Lim et al., 2009)
- Cr(VI)은 1 g/L이하에서는  $H_2CrO_4$ ,  $HCrO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ 의 3가지 형태로 존재한다. pH가 1.0 이하에서는  $H_2CrO_4$ 으로, pH 범위가 1.0과 6.0 사이에서는  $HCrO_4^-$ 으로, pH가 6.0 이상에서는  $CrO_4^{2-}$ 으로 존재
- Cr(VI)의 탄소에 흡착은 pH 2.0에서 최대로 일어나며, Cr(VI)은 pH 1~4 범위에서는 주로 존재하는  $HCrO_4^-$ 의 형태로 흡착이 일어나기 때문 (Mohan, 2006), Cr(VI)이 폐콘크리트의 주요 성분인 철 산화물이나 알루미늄 산화물에 outer-sphere complex를 형성하므로 (Davis and Leckie, 1978; Zachara et al., 1987), pH에 따라서 흡착 정도가 가변적인 것으로 판단 (Sparks, 1995)
- 즉, pH가 낮을 경우 흡착제의 표면전하가 양전하를 띄게 되어 음전하를 띄는 Cr(VI) 이온과 정전기적 인력이 작용하기 때문 (Sparks, 1995)

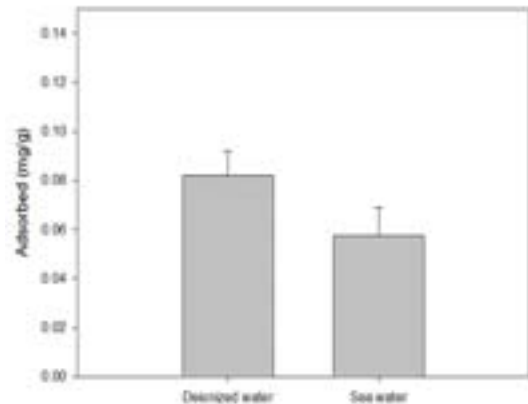


[그림. V-가-28] 900℃ 열처리한 폐콘크리트의 pH 변화에 따른 Cr(VI) 흡착량 변화

- 경쟁 이온이 존재할 때, 900 °C에서 열처리한 폐콘크리트의 Cr(VI) 흡착량을 Fig. 6에 나타냄
- 다른 음이온이 존재하지 않을 경우, 900 °C에서 열처리한 폐콘크리트의 단위 질량당 Cr(VI) 흡착량은 0.1020 mg/g임
- 황산염 이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)이 1 mM 존재할 경우, Cr(VI) 흡착량은 0.0273 mg/g으로 나타났는데, 황산염 이온 존재 시 폐콘크리트의 Cr(VI) 흡착이 약 1/4로 감소함을 알 수 있음
- 인산염 이온(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) 존재시 폐콘크리트의 Cr(VI) 흡착은 0.0974 mg/g으로, 황산염 이온 존재시 흡착량 보다 높은 것으로 나타남
- 질산염 이온(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 존재시 Cr(VI) 흡착은 0.0099 mg/g으로 나타남, 불소, 박테리아, 바이러스와 같은 음이온 또는 음이온을 띠는 물질의 흡착시 인산염의 존재에 의한 흡착 감소가 동일 농도의 황산염 보다 높다고 보고되고 있음
- 그러나, 본 연구에서는 황산염 이온에 의한 Cr(VI) 흡착량 감소가 더 큰 이유는 황산염은 Cr(VI)와 같이 철이나 알루미늄 산화물에 outer-sphere complex를 형성 하지만 (Zachara et al., 1988; Zachara et al., 1987),
- 인산염은 알루미늄 및 철 산화물에 inner-sphere complex를 형성하기 때문 (Kang et al., 2014)



[그림. V-가-29] 900 °C 열처리한 페콘크리트의 음이온 경쟁에 따른 Cr(VI) 흡착

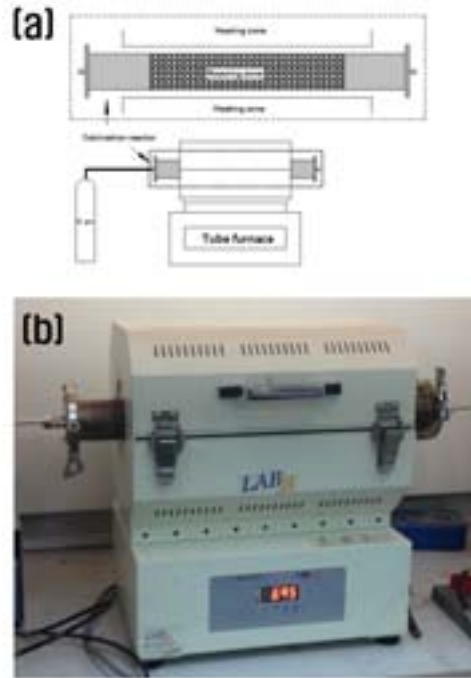


[그림. V-가-30] 해수와 담수에서의 Cr(VI) 흡착 제거

- 900 °C로 열처리한 페콘크리트의 해수에서 Cr(VI) 흡착특성을 파악하기 위해서 증류수와 해수에서 Cr(VI) 흡착을 비교 분석하였고, 이를 그림 V-가-30에 나타냄
- 해수에서 페콘크리트의 Cr(VI) 흡착은 0.0575 mg/g으로 이온이 없는 증류수에서 흡착량 0.0822 mg/g 보다 낮게 나타남
- 본 연구결과는 산처리된 적자의 Cr(VI)의 흡착이 감소하였던 선행 연구 결과 (Kang et al., 2013)와 일치하며, 해수 내에 다량 존재하는 황산염 이온이 900 °C에서 열처리한 페콘크리트의 흡착에 Cr(VI)과 경쟁하기 때문인 것으로 판단

## ② 열처리 석회석의 Cu, Cd 제거

- 본 실험에서 사용된 석회석 (lime stone)은 충북 진천에 소재한 (주) GMC에서 제공받아 사용하였고, 증류수로 3회 세척하여 불순물을 제거한 후, 건조로에서 60 °C 온도로 24시간 건조
- 석회석의 균일한 입경을 위하여 8번과 12번 체로 체질하여 입자크기를 1.18~2.36 mm로 구분, 이후 석회석의 화학적 구성성분을 알아보기 위하여 X-ray fluorescence (XRF, S8 Tiger 4K, Bruker, Germany) 분석을 수행하였고, 비표면적 분석기 (surface area analyzer, Quandrasorb SI, Quantachrome Inc., USA)를 이용하여 석회석의 비표면적을 측정
- 석회석의 양이온 교환 용량(cation exchange capacity)은 1 N NH<sub>4</sub>OAc 용액으로 양이온을 추출하여 분석
- 석회석의 열처리는 스테인레스 재질의 열처리 반응조 (ID 56 mm, L : 550 mm)에 석회석 100 g을 넣고 N<sub>2</sub>를 30분간 주입하여 무산소 조건을 형성, 이후 튜브퍼니스 (CRFT 830S, Dongseo science co. Ltd., Korea)의 온도를 100, 300, 500, 700, 900 °C로 달리하여 4시간 동안 열처리를 수행
- 열처리에 따른 석회석의 중량 손실율을 측정하기 위하여 열처리 온도별로 반응 후의 무게를 측정하여 중량 손실율을 계산



[그림. V-가-31] 석회석 열처리를 위한 튜브퍼니스 설치도(a) 및 사진(b)

- 석회석의 열처리에 따른  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$  흡착능 비교는 각 100 mg/L 농도의  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 용액 30 mL를 50 mL 코니컬 튜브에 넣고 미처리 석회석 (NT-LS)과 100~900 °C로 열처리한 석회석 (100TT-LS, 300TT-LS, 500TT-LS, 700TT-LS, 900TT-LS)을 1 g 주입한 후 항온 교반기 (Shaking incubator, SJ-808SF, Sejong Scientific Co, Korea)에 25 °C, 100 rpm의 조건으로 24시간 교반
- 교반 후 용액은 여과지 (NO. 6, Whatman, USA)로 여과하고 수용액 중  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 의 잔류 농도를 ICP-OES (Optima 8300, Perkin-Elmer, USA)를 이용하여 측정
- 900TT-LS의  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  흡착 특성을 살펴보고자 동역학적 흡착실험, 평형 흡착실험, 용액의 pH에 따른 실험, 흡착제 주입량에 따른 흡착실험을 수행
- 동역학적 흡착실험은 900TT-LS 1 g에 pH를 5로 조절한 저농도 (100 mg/L)와 고농도 (600 mg/L)의  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$  용액 30 mL를 50 mL 코니컬 튜브에 넣고 항온교반기를 이용하여 25 °C, 100 rpm의 조건으로 1, 10, 30 min, 1, 2, 3, 6, 12, 24 hr 교반 후  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 의 잔류 농도를 분석
- 평형 흡착실험을 위해  $\text{Cu}^{2+}$ 용액의 농도는 50~8000 mg/L로  $\text{Cd}^{2+}$  용액의 농도 50~2000 mg/L로 달리하여 24 hr 교반 후 잔류 농도를 분석
- 용액의 pH에 따른 특성을 살펴보고자 pH를 3~11로 조절한 100 mg/L 농도의  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  용액 30 mL에 900TT-LS 1 g을 주입하고 24 hr 교반 후  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 의 잔류농도를 분석
- 열처리 조건에 따른 석회석의 흡착성능을 비교하는 실험은 식 (1)과 같이 단위 질량당 흡착량으로 나타냄

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} V \quad (1)$$

- $q_e$ 는 흡착제 단위 질량당 흡착된  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 의 질량 (mg/g)이며,  $C_0$ 는  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 의 초기

농도 (mg/L),  $C_e$ 는 평형상태에서의  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$  농도 (mg/L),  $V$ 는 용액의 부피 (L),  $m$ 은 흡착제의 질량 (g)을 나타냄

- 흡착제의 동역학적 흡착실험결과는 유사 1차 모델 (pseudo first-order model)과 유사 2차 모델 (pseudo second-order model)을 이용하여 분석

$$q_t = q_e [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (2)$$

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (3)$$

- 여기서  $q_t$ 는 시간  $t$ 일 때 여재 단위질량당 흡착된  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 의 질량 (mg/g),  $q_e$ 는 평형상태에 도달하였을 때 흡착제의 단위질량당 흡착된  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 의 질량 (mg/g),  $k_1$ 은 유사 1차 반응 상수 (1/h),  $k_2$ 는 유사 2차 반응 속도 상수 (g/mg/h)임
- 평형흡착 실험결과는 등온흡착식 Freundlich 모델과 Langmuir 모델을 이용하여 분석

$$S = K_F C^{1/n} \quad (4)$$

$$S = \frac{Q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (5)$$

- $S$ 는 흡착제의 단위질량당 흡착된  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 의 양 (mg/g),  $C$ 는 평형 상태에서 액상의  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$  농도 (mg/L),  $K_F$ 는 분배계수 (L/g),  $n$ 은 Freundlich 상수,  $K_L$ 은 결합 에너지와 관계된 Langmuir 흡착상수 (L/mg),  $Q_m$ 은 흡착제 단위 질량당  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$ 의 최대 흡착량 (mg/g)임
- $K_F$ ,  $n$ ,  $K_L$ ,  $Q_m$ 은 실험 결과에 Freundlich 모델과 Langmuir 모델을 적용하여 값 산출

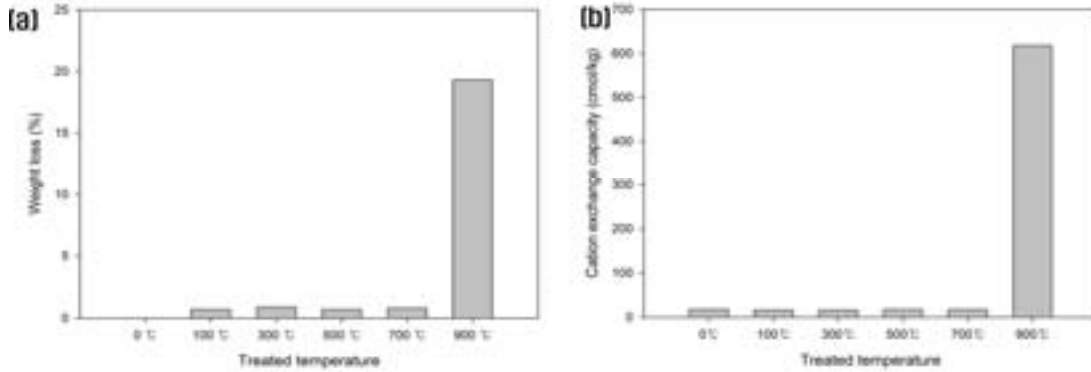
### ㉔ 열처리 석회석의 특성과 열처리 조건에 따른 흡착특성

- 석회석의 화학적 조성과 비표면적 분석결과 석회석은  $\text{CaO}$ 를 94.9%,  $\text{SiO}_2$  3.0%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1.3%를 함유하고 있어 중금속 흡착제로 사용이 가능할 것으로 판단 (Kim et al., 1999)
- 하지만 석회석의 비표면적은  $0.08 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 대표적인 점토광물인 kaolinite ( $77.6 \text{ m}^2/\text{g}$ )와 제올라이트 ( $49 \text{ m}^2/\text{g}$ )에 비해 매우 작은 것으로 나타남 (Chen and Lu, 2015; Yousef et al., 2011)
- 석회석의 열처리에 따른 수중  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cd}^{2+}$  제거를 위해 석회석의 반응온도를 0, 100, 300, 500, 700, 900 °C로 달리하여 열처리를 수행하였고, 열처리 후의 중량 손실율을 나타낸 결과 100 °C에서 700 °C로 열처리를 수행하였을 때의 중량 손실율은 0.7~0.9% 범위로 미미한 감소를 나타낸 반면, 900 °C의 열처리 조건에서는 19.3%의 높은 중량 손실율이 나타남
- 이는 700~900 °C 온도조건에서 식 (6)과 같이 석회석의 열분해가 진행되고,  $\text{CO}_2$ 가 빠져 나가기 때문으로 판단 (Han et al., 1983)



[표. V-가-16] 석회석의 화학적 구성성분과 비표면적

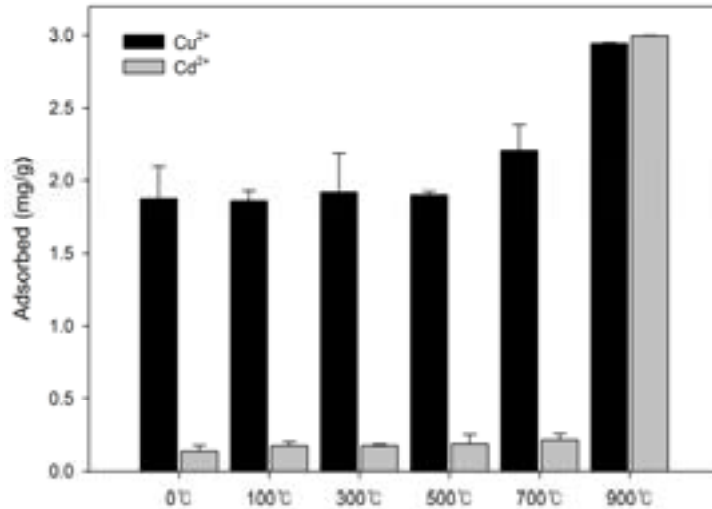
	Element. wt. (%)					Surface area (m <sup>2</sup> /g)
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	
NT-LS	3.0	1.3	0.1	0.3	94.9	0.08



[그림. V-가-32] 석회석의 열처리 온도에 따른 중량손실율(a)과 양이온교환능력(b) 변화

- 석회석의 열처리에 따른 양이온교환량 (CEC: cation exchange capacity)을 파악한 결과 열처리를 하지 않은 석회석 (NT-LS)은 17.283 cmol/kg의 양이온교환 값을 보였고, 100 °C에서 700 °C로 열처리한 석회석의 경우는 각 15.610 (100TT-LS), 15.643 (300TT-LS), 17.032 (500TT-LS), 16.707 cmol/kg (700TT-LS)로 NT-LS보다 낮거나 비슷한 양이온교환 값을 나타냄
- 반면 900 °C 열처리한 900TT-LS의 경우 617.666 cmol/kg의 매우 높은 값을 나타내었는데, 이는 타 조건에 비하여 30배 이상 높은 수치이다. 900 °C로 열처리 시 무산소 환경인 반응조에서 CaCO<sub>3</sub>가 환원되어 CaO를 생성하고 생성된 CaO의 용해도가 높아져 양이온 교환 용량이 크게 증가한 것으로 판단 (Laursen et al., 2001)
- 열처리 온도에 따른 석회석의 Cu<sup>2+</sup>과 Cd<sup>2+</sup>의 흡착량을 Fig. 3.에 나타내었다. 석회석을 0 °C부터 700 °C까지 열처리하였을 때의 Cu<sup>2+</sup> 흡착량은 1.8581 ~ 2.2054 mg/g으로 온도가 증가함에 따라 흡착량도 미미하게 증가된 반면, 900 °C로 열처리한 900TT-LS의 경우 2.9446 mg/g의 높은 흡착량을 나타냄
- Cd<sup>2+</sup>의 흡착량 역시 석회석 열처리 온도가 0 °C부터 700 °C로 증가함에 따라 각 0.1364 (NT-LS), 0.1737 (100TT-LS), 0.1745 (300TT-LS), 0.1871 (500TT-LS), 0.2148 mg/g (700TT-LS)으로 매우 낮은 흡착량을 보였지만 900TT-LS는 2.9967 mg/g으로 매우 높은 흡착용량을 나타냄
- NT-LS, 100TT-LS, 300TT-LS, 500TT-LS, 700TT-LS의 Cu<sup>2+</sup> 및 Cd<sup>2+</sup> 제거기작은 단순히 pH 상승에 기인한 불용성 침전으로 판단
- 하지만 900 °C 열처리 석회석의 Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> 제거는 pH 상승에 의한 침전과 더불어 높은 양이온교환용량에 의한 이온 교환 등 복합적인 기작에 의해 제거율이 증가되는 것으로 사료
- 이를 토대로 Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> 제거를 위한 석회석의 열처리 온도는 900 °C가 효과적인 것으로 나타남

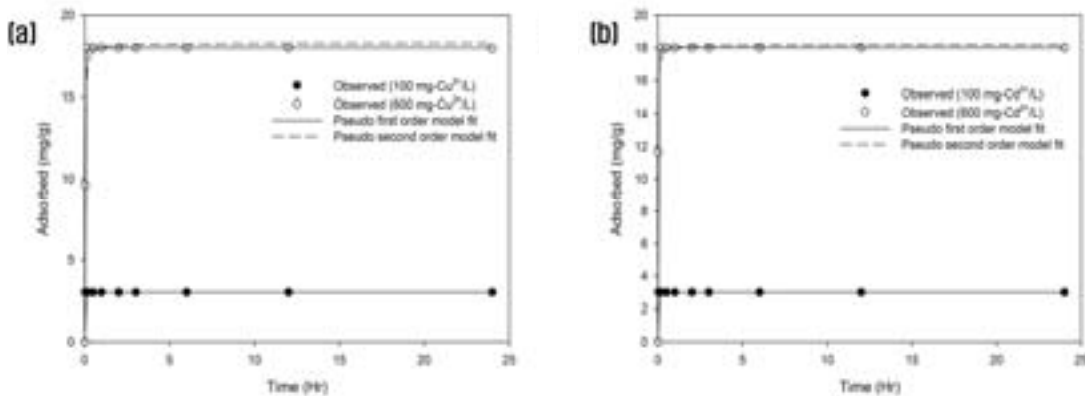




[그림. V-가-33] 석회석의 열처리 온도에 따른 Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> 흡착량

㊦ 900°C에서 열처리된 석회석의 동역학적 흡착 및 평형 흡착 특성

- 900TT-LS의 Cu<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup> 흡착 특성을 살펴보기 위해 동역학적 흡착특성을 그림 V-가-34와 같이 수행하였고, 이에 따른 유사 1, 2차 모델의 결과를 표 V-가-17에 나타냄
- 동역학적 실험결과 Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> 모두 저농도 (100 mg/L) 및 고농도 (600 mg/L)에서 반응 10 분대에 흡착평형을 나타냄
- 유사 1차 모델분석 결과 Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>의 초기농도가 100 mg/L일 때  $q_e$ 는 각각 2.9997 mg/g과 3.0000 mg/g으로 높은 흡착량을 보였고,  $k_1$  (1/h)은 492.4835와 598.7635를 나타냄
- 초기농도 600 mg/L에서도  $q_e$ 는 각 17.9943 mg/g (Cu<sup>2+</sup>)과 17.9788 mg/g (Cd<sup>2+</sup>)로 높은 흡착량을 보였고, Cu<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup>의  $k_1$  (1/h) 또한 각각 45.7568과 62.7047의 값을 나타냄



[그림. V-가-34] 900°C 열처리한 석회석의 동역학적 흡착실험 : (a) Cu<sup>2+</sup>, (b) Cd<sup>2+</sup>

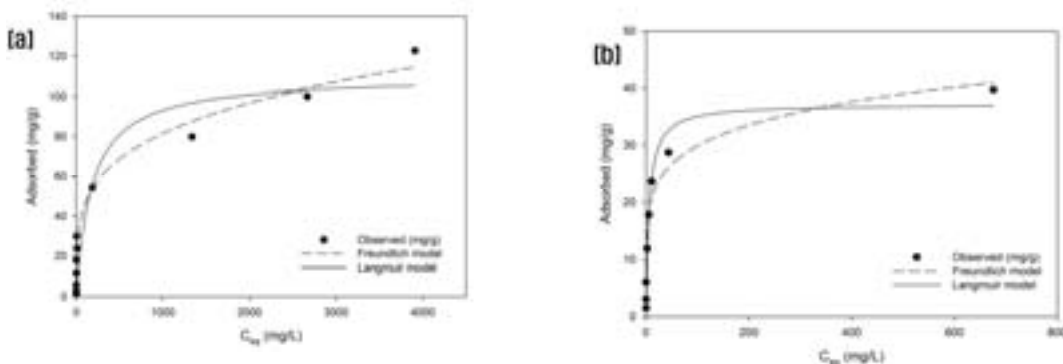
33) EPA's Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) (<http://www.epa.gov/nrmrl/lrpcd/site/>)

34) 일본 국토교통성 환경국, 2008, 항만에 있어서 퇴적물 다이옥신류 대책 기술지침

[표. V-가-17] 900℃ 열처리한 석회석의 동역학적 흡착 실험결과에 따른 모델 파라미터

	Initial conc. (mg/L)	Pseudo first-order model			Pseudo second-order model		
		$q_e$ (mg/g)	$K_1$ (1/hr)	$R^2$	$q_e$ (mg/g)	$K_2$ (1/hr)	$R^2$
Cu <sup>2+</sup>	100	2.9997	492.4835	1.0000	2.9997	1.48408E-06	1.0000
	600	17.9943	45.7568	1.0000	18.2634	0.0008	0.9947
Cd <sup>2+</sup>	100	3.0000	598.7635	1.0000	3.0000	2.5402E-07	1.0000
	600	17.9788	62.7047	0.9990	18.1574	0.0005	0.9974

- 유사 2차 모델에 의해서 분석된 Cu<sup>2+</sup>의  $q_e$ 값은 2.9997 mg/g (100 mg/L), 18.2634 mg/g (600 mg/L)이며,  $k_2$ 는 1.48408E-06 (100 mg/L)와 0.0008 (600 mg/L)임
- 유사 2차 모델에서 분석된 Cd<sup>2+</sup>의  $q_e$ 는 각 3.0000 mg/g (100 mg/L)과 18.1574 mg/g (600 mg/L)으로 나타났으며  $k_2$ 는 2.5402E-07 (100 mg/L)과 0.0005 (600 mg/L)로 나타남
- 모델의 적합성을 판단하는 R<sup>2</sup>는 유사 1차와 2차 모델 모두 0.99 이상의 높은 값을 나타내기 때문에 유사 1, 2차 모델에 모두 부합
- 900TT-LS의 평형흡착 실험결과를 그림 V-가-35에 나타내었고, Freundlich 모델과 Langmuir 모델 결과를 표 V-가-18에 제시
- Freundlich 모델에서 Cu<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup>의 분배계수는 각 14.7102 L/g와 13.9713 L/g으로 나타났고, 흡착경향 (1/n)은 0.2480 (Cu<sup>2+</sup>), 0.1650 (Cd<sup>2+</sup>)로 Cu<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup>모두 900TT-LS와 강한 결합이 형성되는 것으로 판단 (Edzwald, 2011)
- Langmuir 모델에서의 최대흡착량 ( $Q_m$ )은 109.9909 mg/g (Cu<sup>2+</sup>)와 37.1872 mg/g (Cd<sup>2+</sup>)로 나타남 본 연구에서 제시한 900TT-LS의 Cu<sup>2+</sup> 최대 흡착량 (109.9909 mg/g)은 기존 연구에서 제시된 chitosan beads (64.62 mg/g), chitosan alginate beads (67.66 mg/g), tourmaline (78.86 mg/g) 보다 높게 나타났고, Cd<sup>2+</sup> (37.1872 mg/g)의 경우도 pine bark (28.0 mg/g), fly ash pellets (18.98 mg/g) 보다 높은 흡착량을 보임 (Wan Ngah and Fatinathan, 2008; Jiang et al., 2006; Al-Asheh and Duvnjak, 1997; Papandreuos et al., 2007)
- 이에 900TT-LS는 수중 Cu<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup> 제거에 효과 적인 흡착소재로 판단
- Freundlich 모델과 Langmuir 모델의 R<sup>2</sup>를 살펴본 결과 900TT-LS의 Cu<sup>2+</sup> 흡착에는 다중흡착을 설명하는 Freundlich 모델에 부합하며, Cd<sup>2+</sup>의 경우는 Freundlich 모델 (R<sup>2</sup>: 0.9364)과 Langmuir 모델 (R<sup>2</sup>: 0.9419)의 R<sup>2</sup> 값은 큰 차이를 나타내지 않으므로 단층 또는 다층 흡착의 한가지 형태보다는 복합적인 흡착 특성을 나타내는 것으로 사료



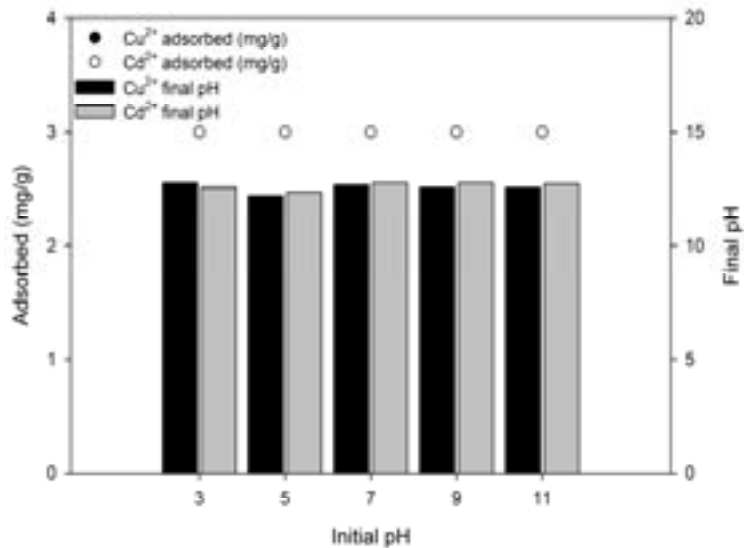
[그림. V-가-35] 900℃ 열처리한 석회석의 평형 흡착실험 : (a) Cu<sup>2+</sup>, (b) Cd<sup>2+</sup>

[표. V-가-18] 900℃ 열처리한 석회석의 평형흡착 실험결과에 따른 모델 파라미터

	Freundlich model			Langmuir model		
	$K_F$ (L/g)	$1/n$	$R^2$	$Q_m$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$
Cu <sup>2+</sup>	14.7102	0.2480	0.9839	109.9909	180.6119	0.8773
Cd <sup>2+</sup>	13.9713	0.1650	0.9364	37.1872	6.2123	0.9419

㉔ 용액 pH 특성에 따른 Cu<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup>의 흡착특성

- 용액의 화학적 특성에 따른 900TT-LS의 Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> 흡착 특성을 살펴보기 위하여 용액의 pH를 3, 5, 7, 9, 11로 달리하여 실험을 수행
- Cu<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup> 흡착량은 pH가 높아질수록 뚜렷하게 흡착량이 증가한다는 것으로 알려져 있지만, 실험결과 모든 pH에서의 단위 질량당 Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> 흡착량은 2.9990~3.00 mg/g으로 대체적으로 높은 흡착량을 보여주어 pH변화에 따른 흡착량의 증가 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았음
- 이는 용액의 900TT-LS는 알칼리성 물질이라서 초기에 낮은 pH 용액도 900TT-LS와 반응하여 OH<sup>-</sup> 이온이 생성되고 pH 10 이상의 높은 pH를 형성하기 때문으로 사료
- 또한 Cu<sup>2+</sup> 및 Cd<sup>2+</sup>는 각각 pH 5와 7 이상에서 수산화 침전작용을 하므로[31], 본 실험 조건에서는 Cu<sup>2+</sup>와 Cd<sup>2+</sup> 이온 모두 수산화 침전으로 판단



[그림. V-가-36] 900℃ 열처리한 석회석의 pH 변화에 따른 흡착 실험결과

③ Cr<sup>6+</sup> 제거효율 향상을 위한 vermiculite 표면의 Fe 처리

- 본 실험에서 사용한 vermiculite는 Sigma aldrich에서 제공받았으며, 실험 전 입자크기를 1~2 mm로 체가름 후 사용
- Fe-CV는 염화철 (FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O)을 증류수에 녹이고 pH를 7로 조정한 후, 80 °C 조건에서 8시간 증발농축 이후, 흡착제를 증류수를 이용하여 두 번 세척하여 사용
- 비표면적을 측정하기 위하여 비표면적 분석기 (Surface area analyzer, Quandrasorb SI, Quantachrome Inc., USA)를 사용
- Vermiculite를 Fe 피복시 Fe 용액의 농도에 따른 Cr(VI) 흡착량을 알아보기 위해

vermiculite 단위 질량당 Fe의 농도를 각각 1, 2, 5, 8, 10 mol-Fe/kg 으로 달리하여 흡착 실험을 수행

- 각 조건에서 제조된 Fe-CV 0.1 g과 10 mg/L의 Cr(VI) 용액 (pH 3) 30 mL를 conical tube 에 넣고 24 hr 교반
- Cr(VI) 용액은 산화크롬 (CrO<sub>3</sub>)을 증류수에 녹여서 Cr(VI) 표준용액 1000 mg/L를 제조한 후, 이를 희석하여 실험에 사용
- 가장 높은 흡착 효율을 나타낸 Fe-CV의 환경 변수에 따른 Cr(VI)의 제거 특성을 살펴보기 위하여 동적 흡착 실험 (kinetic sorption test), 평형 흡착 실험 (equilibrium sorption test), 열역학적 흡착 실험 (thermodynamic sorption test), 용액의 pH에 따른 흡착 실험, 흡착제의 주입량에 따른 흡착 실험, 다른 음이온과의 경쟁 흡착 실험을 수행
- 동역학적 실험은 0.1 g의 Fe-CV와 10 mg/L와 50 mg/L 용액 각각 30 mL를 10, 30 min, 1, 2, 3, 6, 12, 24 hr 반응시킨 후 Cr(VI) 용액을 채취 후 농도를 분석, 평형 흡착 실험도 동일한 조건에서 24 h 반응한 후 흡착량을 분석하였고, Cr(VI) 용액의 초기 농도는 10, 25, 50, 100, 150, 200 mg/L로 설정
- 용액의 pH에 따른 흡착실험은 용액의 pH를 NaOH 또는 HCl을 이용하여 2, 3, 4, 6, 8, 10으로 맞춘 후 Fe-CV에 의한 Cr(VI)의 흡착량을 비교
- Cr(VI) 흡착에 있어서 물속에 흔히 존재하는 다른 음이온의 영향을 분석하기 위해서, 동일하게 Na로 구성된 시약을 사용하여, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, NaHCO<sub>3</sub> 각각 0.01 M과 0.1 M을 Cr(VI) 용액에 첨가한 후 흡착 실험을 수행
- 흡착제의 주입량에 따른 Cr(VI)의 흡착실험은 흡착제의 주입량을 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 g으로 변화시키고, Cr(VI) 제거율을 살펴봄
- 모든 실험은 3회 반복하여 수행하였고, 반응 시료는 여과지 (No. 6, Whatman, USA)로 여과 후 디페닐카르바지드 용액으로 발색하여 UV-visible spectrophotometer (Mecasys, Optizen POP QX, Korea)로 분석
- 동역학적 흡착 실험 결과는 다음 유사 1차 모델(Pseudo first-order model)과 유사 2차 모델 (Pseudo second-order model)을 이용하여 분석

$$q_t = q_e [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (1)$$

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (2)$$

- 여기에서  $q_t$ 는 시간  $t$ 일 때 흡착제 단위질량당 흡착된 Cr(VI)의 양 (mg/g),  $q_e$ 는 평형상태에 도달하였을 때 흡착제 단위질량당 흡착된 Cr(VI)의 양 (mg/g),  $k_1$ 은 유사1차 반응 상수 (1/h), 그리고  $k_2$ 는 유사2차 반응 속도 상수 (g/mg/h)임
- 등은 흡착 실험 결과는 Langmuir (Eq. 3)와 Freundlich (Eq. 4) 모델을 이용하여 분석

$$q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

- 여기에서  $C_e$ 는 평형 상태에서 액상의 Cr(VI)의 농도 (mg/L),  $K_L$ 은 결합 에너지와 관계된 Langmuir 흡착 상수 (L/mg),  $Q_m$ 은 단위 질량의 흡착제 당 Cr(VI)의 최대 흡착량 (흡착 용량) (mg/g),  $K_F$ 는 분배 계수 (L/g), 그리고  $n$ 는 Freundlich 상수임
- 반응 온도에 따른 흡착 실험 결과는 다음 식을 이용하여 열역학적 특성을 분석

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (5)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_e \quad (6)$$

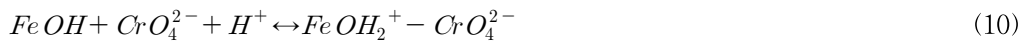
$$\ln K_e = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (7)$$

$$K_e = \frac{aq_e}{C_e} \quad (8)$$

- 여기에서  $\Delta G^0$ 는 Gibb's 자유 에너지의 변화,  $\Delta S^0$ 는 엔트로피의 변화,  $\Delta H^0$ 는 엔탈피의 변화,  $R$ 은 기체 상수,  $K_e$ 는 평형 상수, 그리고  $a$ 는 흡착제의 주입량
- $\Delta S^0$ 와  $\Delta H^0$ 는 Eq. 7의  $\ln K_e$ 와  $1/T$ 의 관계식으로부터 산출

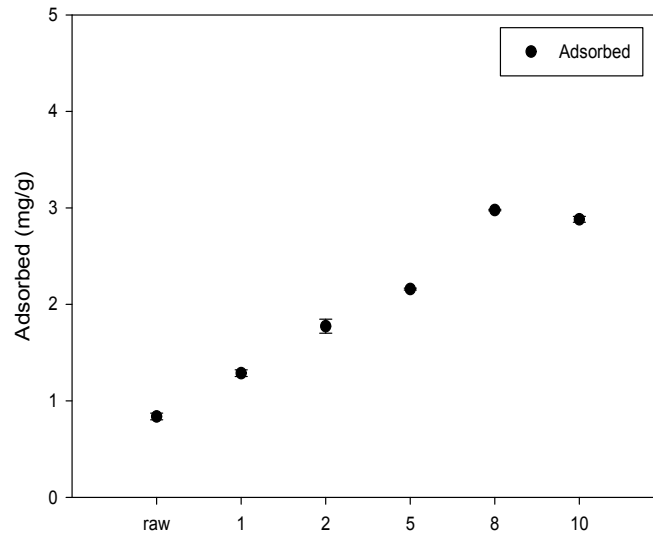
### ㉞ Fe 피복농도에 따른 vermiculite의 Cr(VI) 제거 특성

- 본 연구에서는 Cr(VI) 제거를 위한 흡착제로서 vermiculite에 Fe을 피복
- Fe 수산화물에 Cr(VI)의 흡착은 inner-sphere complex (Fendorf, 1995) 또는 outer-sphere complex (Zachara et al., 1987) 형태로 이루어짐 inner-sphere complex 형성에 의한 화학식은 Eq. 9 (Deng et al., 1996)와 같으며, outer-sphere complex에 의한 화학식은 Eq. 10 (Zachara et al., 1987)과 같음



- 사용된 vermiculite의 Fe 피복 농도에 따른 흡착특성을 파악하기 위해서 Fe 피복하지 않은 vermiculite와 1, 2, 5, 8, 10 mol-Fe/kg 으로 피복한 vermiculite의 Cr(VI) 흡착 특성을 그림 V-가-37에 나타냄
- 실험 조건은 각각의 흡착제 0.1 g과 10 mg/L의 Cr(VI) 용액 30 mL를 24시간 반응시킨 후 Cr(VI) 흡착량을 결정
- Fe 피복하지 않은 vermiculite의 Cr(VI) 흡착량은 0.8376 mg/g에서 Fe 피복농도가 증가함에 따라서 흡착량이 증가하여 8, 10 mol-Fe/kg으로 Fe 피복한 vermiculite의 Cr(VI) 흡착량은 각각 2.9776, 2.8816 mg/g으로 흡착량이 3배 넘게 증가한 것으로 나타남
- Vermiculite 단위 질량당 Fe의 농도를 8 mol-Fe/kg으로 피복 시 Cr(VI)의 흡착량이 가장 큰 것으로 나타났으므로, 8 mol-Fe/kg에서 제조된 Fe-CV를 이용하여 추후 실험을 진행

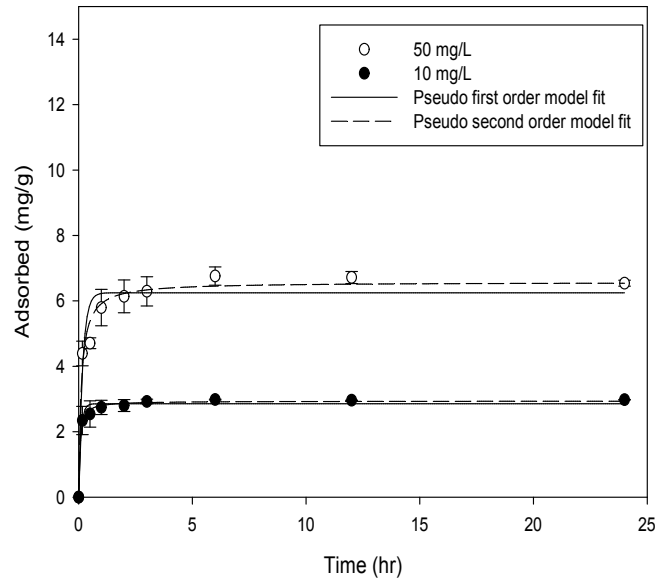
- 비표면적 측정 결과 실험에 사용된 Fe-CV의 비표면적은 9.91 m<sup>2</sup>/g으로 피복하지 않은 vermiculite의 비표면적 7.49 m<sup>2</sup>/g 보다 다소 크게 나타남



[그림. V-가-37] vermiculite의 Fe 피복에 따른 Cr(VI) 흡착능 변화

㉞ Fe-CV의 동역학적 흡착, 평형 흡착, 열역학적 흡착 특성

- Fe-CV의 시간에 따른 Cr(VI) 흡착 특성을 그림 V-가-38에 나타냄. 실험 결과 2 hr 이후에 평형에 도달하는 것을 알 수 있음
- 유사 1차 모델과 유사 2차 모델을 이용하여 시간에 따른 흡착량을 해석하여 얻은 변수를 표 V-가-19에 나타냄 R<sup>2</sup> 값을 살펴보면, 낮은 Cr(VI) 농도 (10 mg/L)와 높은 Cr(VI) 농도 (50 mg/L) 모두에서 유사 2차 모델이 더 잘 부합되는 것으로 나타남
- 이를 통해서 Fe-CV의 Cr(VI) 흡착은 화학적 흡착이 반응속도에 주로 영향을 미치는 것으로 판단 (Roundhill and Koch, 2002)
- 평형 농도인 q<sub>e</sub> 값을 살펴보면 낮은 Cr(VI) 농도에서는 유사 1차모델과 과 유사 2차모델이 각각 2.8539 mg/g 과 2.9381 mg/g 으로 나타났으며, 높은 농도에서도 각각 6.2475 mg/g 과 6.5713 mg/g 으로 유사 1차 모델 결과 값과 유사 2차 모델 결과 값 간에 큰 차이는 없었지만 유사 2차 모델이 더 크게 나타남
- 유사 1차 모델의 반응 속도 상수 k<sub>1</sub> 값을 비교해 볼 때 낮은 농도에서 반응 속도가 높은 농도에서 보다 더 빠름을 알 수 있음

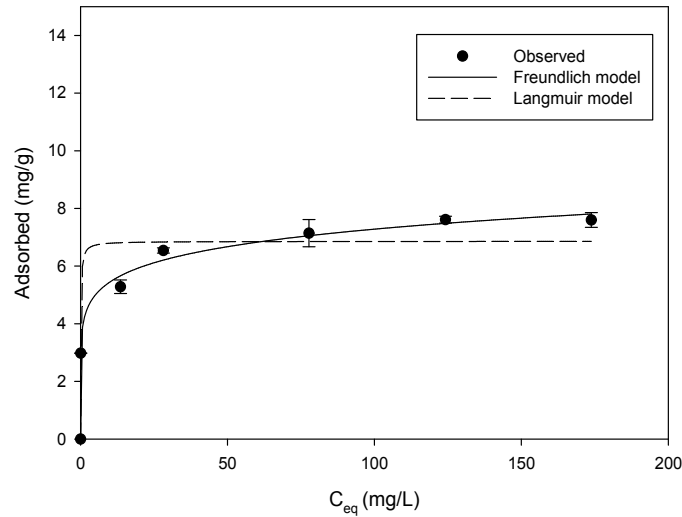


[그림. V-가-38] Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 흡착을 위한 동역학적 실험결과

[표. V-가-19] Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 동역학적 흡착실험에 따른 모델 파라미터

	10 mg/L			50 mg/L		
	$q_e$	$k_1$	$R^2$	$q_e$	$k_1$	$R^2$
Pseudo 1st order	2.8539	9.9476	0.9795	6.2475	5.7213	0.933
Pseudo 2nd order	$q_e$	$k_2$	$R^2$	$q_e$	$k_2$	$R^2$
	2.9381	0.0494	0.9945	6.5713	0.1114	0.9781

- Fe-CV의 Cr(VI) 평형 흡착실험 결과를 그림 V-가-39에 제시하였고, 흡착 모델과 관련된 모델 변수 값들은 표 V-가-20에 나타냄
- Langmuir 모델과 Freundlich 모델의  $R^2$  값을 비교해보면, Freundlich 모델의  $R^2$  값은 0.9934로 Langmuir 모델의  $R^2$  값 0.926 보다 큰 것으로 나타나, 평형 흡착실험 결과는 Langmuir 모델 보다는 Freundlich 모델에 더 적합함을 알 수 있음
- 이를 통해 Cr(VI)의 Fe-CV 흡착은 단층 흡착보다는 다층 흡착으로 일어남을 알 수 있음 (Edzwald, 2011)
- Freundlich 모델 의  $1/n$  값은 0.126으로 0.5 보다 작으므로 Cr(VI) 흡착은 Fe-CV에 강하게 형성 (Edzwald, 2011)
- Langmuir 모델에서 단위 질량의 Fe-CV 당 Cr(VI)의 최대 흡착량은 6.8594 mg/g으로, 문헌에 보고된 Cr(VI) 흡착제 hydrotalcite (4.60 mg/g), bauxite (0.52 mg/g), polyacrylamide biomass (2.58 mg/g), fly ash-wollastonite(2.90 mg/g), hydrous titanium(IV) oxide (5.0 mg/g) 보다 높은 것으로 나타남 (Janet et al., 2005; Erdem et al., 2004; Bai and Abraham, 2003; Panday et al., 1984; Tel et al., 2004)

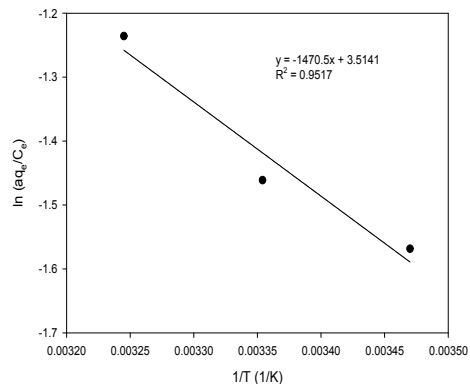
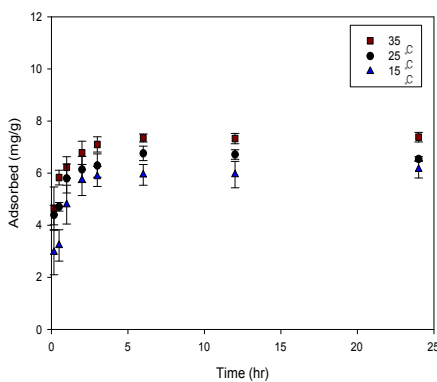


[그림. V-가-39] Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 흡착을 위한 평형 실험결과

[표. V-가-20] Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 평형 흡착실험에 따른 모델 파라미터

Model	Parameters		R <sup>2</sup>
	Langmuir	Q <sub>m</sub>	
	6.8594	0.0997	
Freundlich	K <sub>F</sub>	1/n	0.9934
	4.076	0.126	

- 반응 온도에 따른 Fe-CV의 Cr(VI) 흡착 실험 결과 온도가 높을수록 Cr(VI) 흡착량이 증가하는 것으로 나타남
- $\Delta H^\circ$  값은 12.226 kJ/mol로 (+)의 값을 나타내어 Fe-CV의 Cr(VI) 흡착은 흡열 반응이며,  $\Delta S^\circ$  값은 29.216 J/K·mol으로 흡착 과정 동안 고체와 액체 경계면에서 무질서도는 증가하는 것으로 나타남
- 15 °C, 25 °C, 35 °C에서  $\Delta G^\circ$  값은 각각 3.807, 3.515, 3.223 kJ/mol로 (+)의 값을 나타내어 각각의 온도에서 Cr(VI)의 Fe-CV에 흡착은 비자발적인 반응으로 나타남

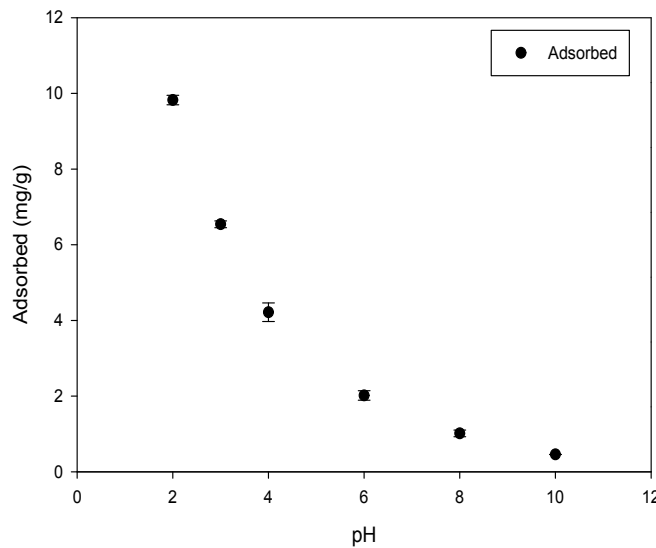


[그림. V-가-40] 온도변화에 따른 Fe 피복 vermiculite의 동역학적 흡착실험 결과 (좌)와 열역학적 흡착결과 (우)



㉔ pH, 경쟁 음이온, 흡착제 주입량에 따른 흡착 특성

- Fe-CV의 용액 pH에 따른 Cr(VI) 흡착량의 변화를 그림 V-가-41에 나타냄
- 실험결과에 의하면, Fe-CV의 Cr(VI) 흡착은 pH 2에서 가장 높은 흡착능(9.8249 mg/g)을 보임, pH가 증가함에 따라서 감소하여 pH 10에서 Cr(VI) 흡착량은 0.4579 mg/g으로 나타남
- pH가 높을수록 Cr(VI)의 흡착이 감소한다는 것은 타 문헌의 내용과 일치 (Lim et al., 2009)
- Cr(VI)은 1 g/L이하에서는  $H_2CrO_4$ ,  $HCrO_4^-$ ,  $CrO_4^{2-}$ 의 3가지 형태로 존재하는데, pH가 1.0 이하에서는  $H_2CrO_4$ 으로, pH 범위가 1.0과 6.0 사이에서는  $HCrO_4^-$ 으로, pH가 6.0 이상에서는  $CrO_4^{2-}$ 으로 존재
- Cr(VI)은 pH 1~4 범위에서는 주로 존재하는  $HCrO_4^-$ 의 형태로 흡착이 일어나는데, pH가 증가할수록 Cr(VI)이 다가의 음이온 형태로 존재하여 흡착제와의 반발력을 증대시켜 흡착량을 감소
- 또한, Cr(VI)이 Fe-CV의 주요 성분인 철 산화물이나 알루미늄 산화물에 outer-sphere complex를 형성하는데, pH가 높을 경우 흡착제의 표면전하가 음전하를 띄게 되어 음전하를 띄는 Cr(VI) 이온과 정전기적 반발력이 작용하여 흡착이 감소하게 됨
- 합성된 철산화물의 등전점(point of zero net charge)은 7.0~8.0 사이에 존재하기 때문에 등전점 이상에서는 Fe-CV의 표면전하는 음전하를 나타냄 (Sposito, 1989)

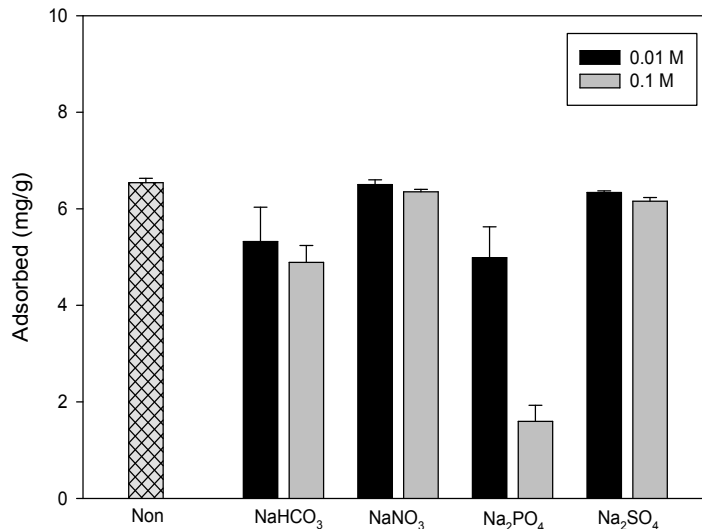


[그림. V-가-41] pH 변화에 따른 Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 흡착특성

- 용액에 Cr(VI) 이외의 타 이온의 존재시 Cr(VI) 흡착 특성을 살펴보기 위하여 자연계에 다량 존재하는 음이온인 황산염 이온 ( $SO_4^{2-}$ ), 질산염 이온 ( $NO_3^-$ ), 인산염 이온 ( $PO_4^{3-}$ ), 중탄산염 이온 ( $HCO_3^-$ )이 Fe-CV의 Cr(VI) 흡착에 미치는 영향을 파악
- 타 이온이 0.01 M 농도로 존재시, Cr(VI) 흡착량은 각각 6.337 mg/g ( $SO_4^{2-}$ ), 6.501 mg/g ( $NO_3^-$ ), 4.985 mg/g ( $PO_4^{3-}$ ), 5.323 mg/g ( $CO_3^{2-}$ )으로 증류수 조건에서 Cr(VI) 흡착량 6.541 mg/g 에 비해  $HCO_3^-$ 과  $PO_4^{3-}$  이온의 존재시 Cr(VI) 흡착량이 뚜렷하게 감소하는 것으로 나타남
- 0.1 M의  $PO_4^{3-}$ 와  $HCO_3^-$  존재 시 각각 1.595 mg/g과 4.891 mg/g으로 각 이온의 농도가 증가함에 따라서 Cr(VI)의 흡착량이 급격하게 감소, 반면에, 0.1 M  $SO_4^{2-}$ 와  $NO_3^-$ 의 존재시 각각의 Cr(VI) 흡착량은 6.158 mg/g과 6.352 mg/g으로 농도 증가에도 Cr(VI) 흡착량 변화는

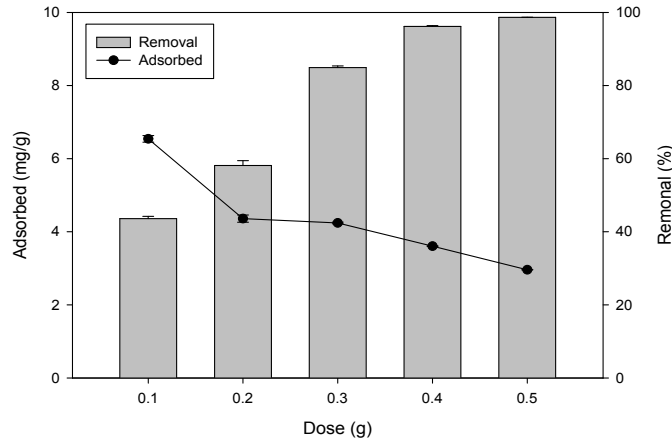
미미

- Cr(VI)는 철이나 알루미늄에 outer-sphere complex를 형성하는  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NO}_3^-$ 보다 강하게 흡착을 형성한다는 연구 결과와 일치 (Erdem et al., 2004; Lim et al., 2009), 반면  $\text{PO}_4^{3-}$ 는 Fe-CV에 존재하는  $\text{Fe}^{3+}$  과 inner-sphere complex의 강한 결합을 형성한다고 알려져 있음 (Kang et al., 2014)
- $\text{PO}_4^{3-}$ 의 전하 공유도 (shared charge)는 1.25로서  $\text{CO}_3^{2-}$  (1.33),  $\text{SO}_4^{2-}$  (1.50),  $\text{NO}_3^-$  (1.67) 보다 낮은 값을 나타내어 흡착제 표면에 존재하는  $\text{Fe}^{3+}$ 과 산화음이온의 O 원자 사이에 강한 결합을 형성 (Li et al., 2015)
- 따라서  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  순으로 Cr(VI) 흡착에 부정적인 영향을 미치는 것으로 판단
- 이온 경쟁 이외에도 서로 반대 전하의 흡착제와 흡착물 사이에는 이온 강도 증가에 따른 shielding effect에 의해서 음이온의 양이온 표면에 흡착은 감소하게 됨 (Jones and O'Melia, 2000; Lee et al., 2008)



[그림. V-가-42] 음이온 존재에 따른 Fe 피복 vermiculite의 Cr(VI) 흡착

- Fe-CV의 주입량에 따른 Cr(VI)의 흡착제 단위 질량당 흡착량과 제거율을 그림 V-가-43에 나타냄
- Fe-CV의 주입량이 0.1 g에서 0.5 g으로 증가함에 따라서 흡착제 단위 질량당 Cr(VI) 흡착량은 6.541에서 2.960 mg/g으로 감소한 반면에 Cr(VI) 제거율은 43.61%에서 98.66% 으로 증가
- 흡착제인 Fe-CV의 주입량이 증가함에 따라서 Cr(VI) 총 제거량은 증가한 반면에, 흡착제 단위 질량당 Cr(VI) 제거량은 감소하는 것으로 나타남

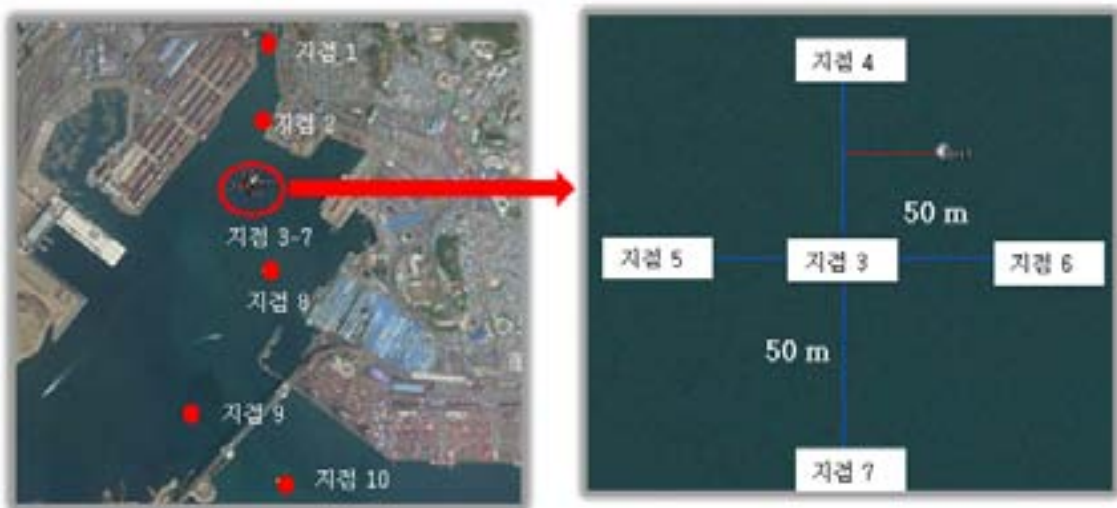


[그림. V-가-43] Fe 피복 vermiculite의 주입량 변화에 따른 Cr(VI) 제거특성

(2) 적용 대상 해역 피복정화 모니터링을 수행

(가) 피복정화 효율을 평가하기 위한 시·공간적 퇴적물 및 해수의 특성 모니터링 수행(시공 전·후)

- 부산 K항에서 현장시공 전·후 모니터링 수행
- 2015년 10월 K항의 10개 지점에 대해 샘플러를 이용하여 오염 퇴적물을 채취
- 2016년 9월 K항의 6개 지점에 대해 샘플러를 이용하여 오염 퇴적물을 채취



[그림. V-가-44] K항 오염퇴적물 샘플링 장소 및 위치도

① 피복시공 전후 퇴적물 오염특성

㉞ 강열감량 (Ignition Loss, IL)

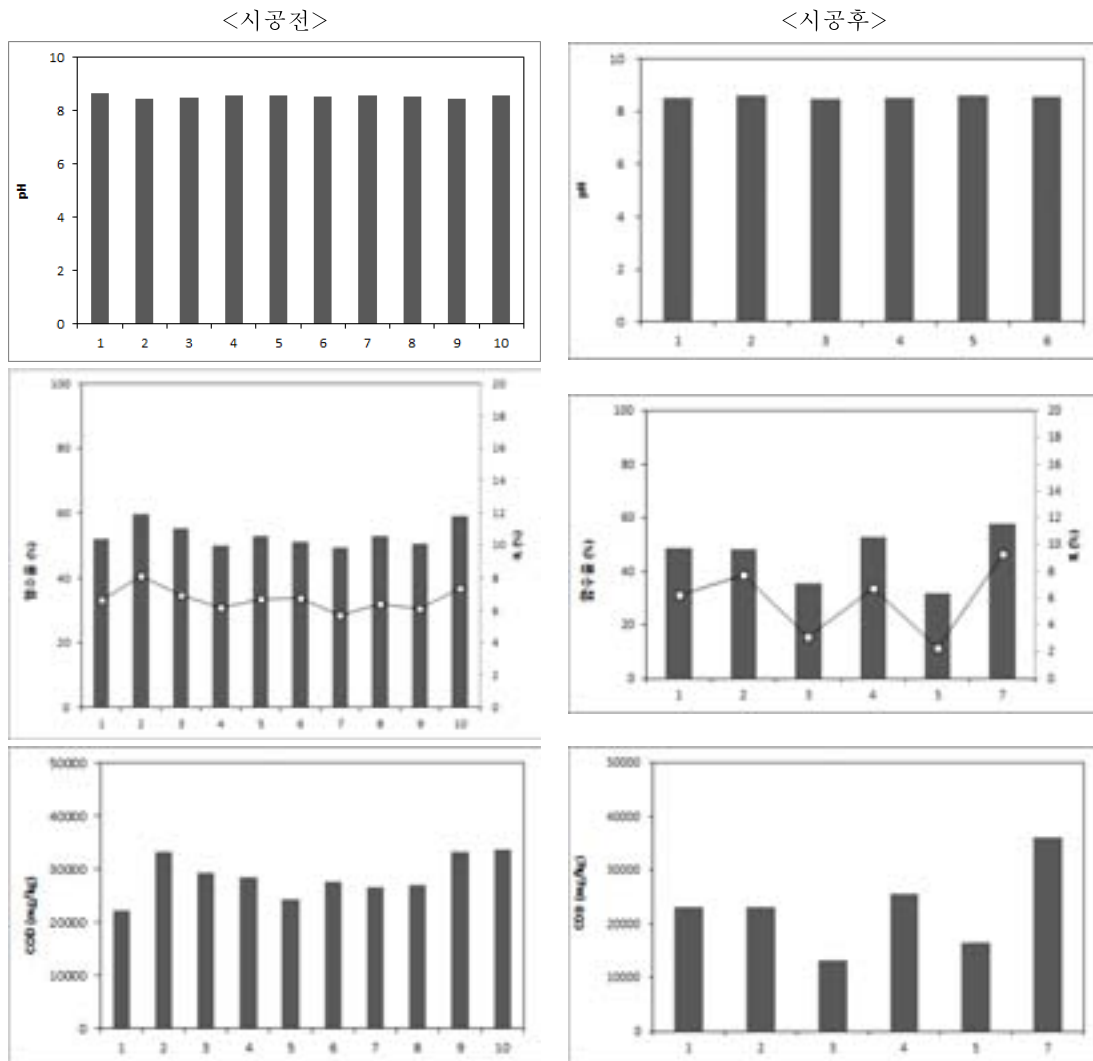
- 해역의 시공전 퇴적물 IL의 농도는 평균 10%였고, 시공후 IL의 농도는 평균 5.9%인 것으로 나타났다. 시공전보다 시공후의 IL농도가 41% 감소하였으며, 부영양화 관련 평가항목의 기준 농도인 15%이하로 나타남.

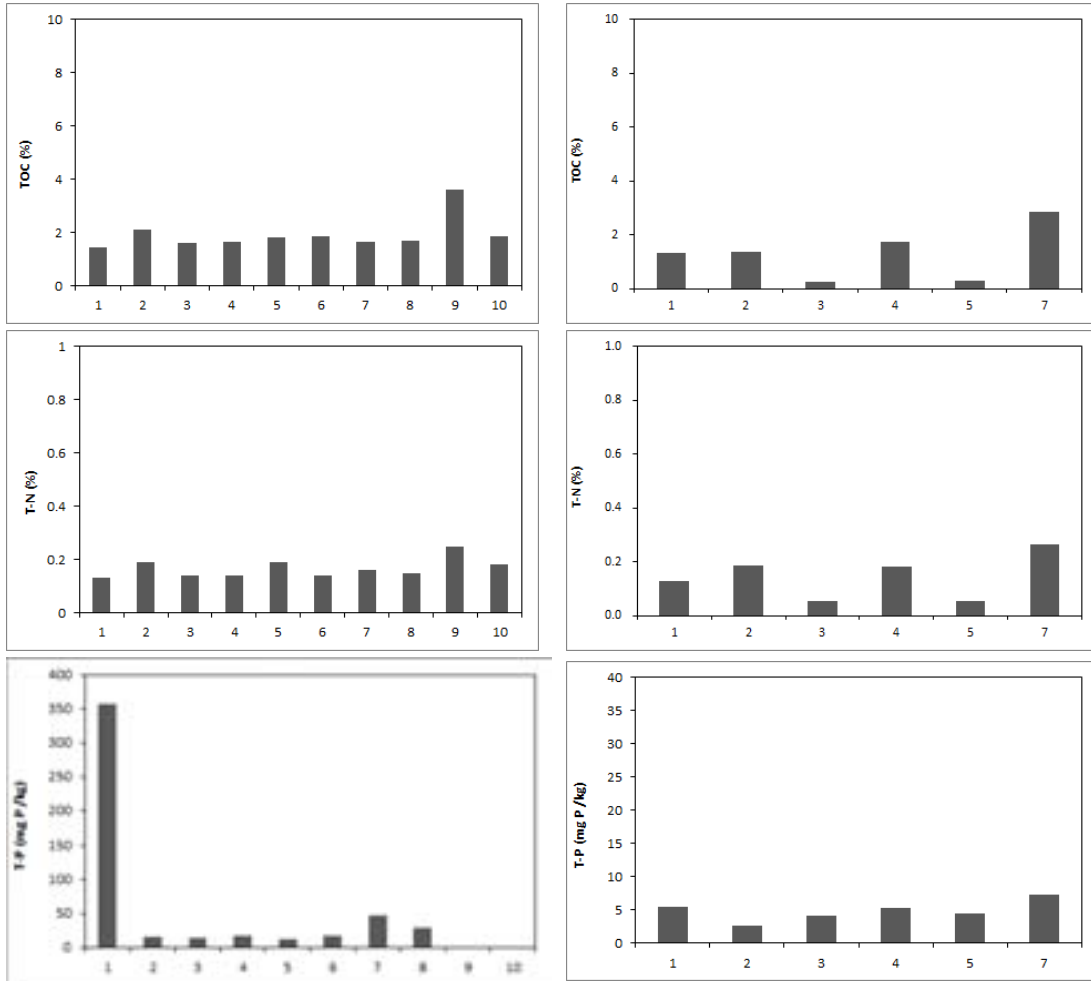
㉟ 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD)

- 해역의 시공전 퇴적물COD의 농도는 평균 28.7 g/kg였고, 시공후 COD의 농도는 평균 22.9 g/kg인 것으로 나타났다. 시공전보다 시공후의 COD농도가 20% 감소하였으며, 부영양화 관련 평가항목의 기준 농도인 20 g/kg보다 약간 높은것으로 나타남.

㊤ 기타 유기물 농도 (총 유기탄소 (TOC), 총 질소(T-N), 총 인(T-P))

- TOC: 해역의 시공전 퇴적물 TOC의 농도는 평균 2.54%였고, 시공후 TOC의 농도는 평균 1.3%인 것으로 나타났다. 시공전보다 시공후의 TOC농도가 48% 감소함.
- T-N: 해역의 시공전 퇴적물 T-N의 농도는 평균 0.14%였고, 시공후 T-N의 농도는 평균 0.15%인 것으로 나타났다. 시공전과 시공후의 T-N농도는 변화 없음.
- T-P: 해역의 시공전 퇴적물 T-P의 농도는 평균 50.9 mg/kg였고, 시공후 T-P의 농도는 평균 4.85 mg/kg인것으로 나타났다. 시공전보다 시공후의 T-P농도가 90% 감소함.





[그림. V-가-45] 피복시공 전후 지점별 pH, 입도분포, COD, TOC, T-N, T-P

[표. V-가-21] K항 오염퇴적물의 물리화학적 특성

Sediment	Values	
pH	8.48	8.55
Water Contents (%)	57.8	45.9
IL (%)	10.0	5.9
COD (g/kg)	28.7	22.9
TOC (%)	2.54	1.30
T-N (%)	0.14	0.15
T-P (mg/kg)	50.9	4.85

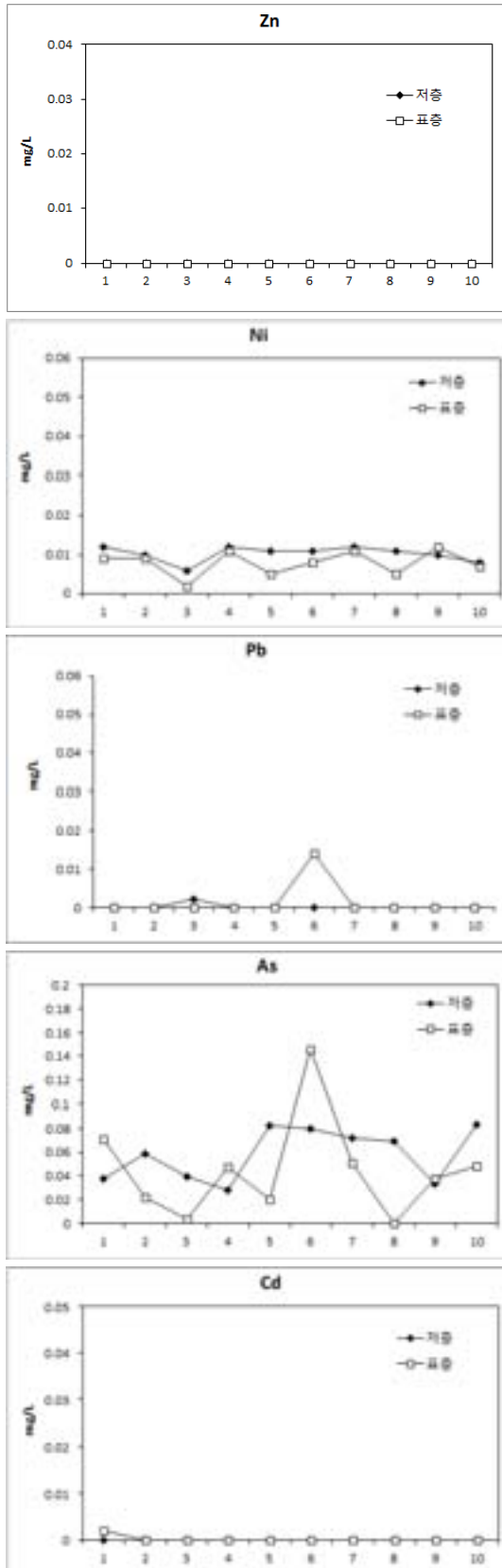
### ② 피복시공 전후 해수 중금속 오염특성

- 역의 시공전 해수 중금속 농도는 표층 및 저층에서 모두 기준 농도 이하였음.
- 시공전 표층해수에서는 Zn 0.055 mg/L, Ni 0.017 mg/L, Pb 0.007 mg/L, As 0.003 mg/L, Cd 0.002 mg/L, Cu 0.007 mg/L 검출되었고, 시공후 표층해수에서는 Zn 0.004 mg/L, Pb 0.002 mg/L, As 0.003 mg/L, Cu 0.001 mg/L 검출되었으며 Ni과 Cd는 검출되지 않았음.
- As를 제외한 표층해수의 중금속농도는 시공 전 보다 시공 후에 71-93% 감소하였음.
- 시공전 저층해수에서는 Zn 0.035 mg/L, Ni 0.02 mg/L, Pb 0.019 mg/L, As 0.019 mg/L, Cd 0.004 mg/L, Cu 0.003 mg/L 검출되었고, 시공후 표층해수에서는 Pb 0.002 mg/L, As

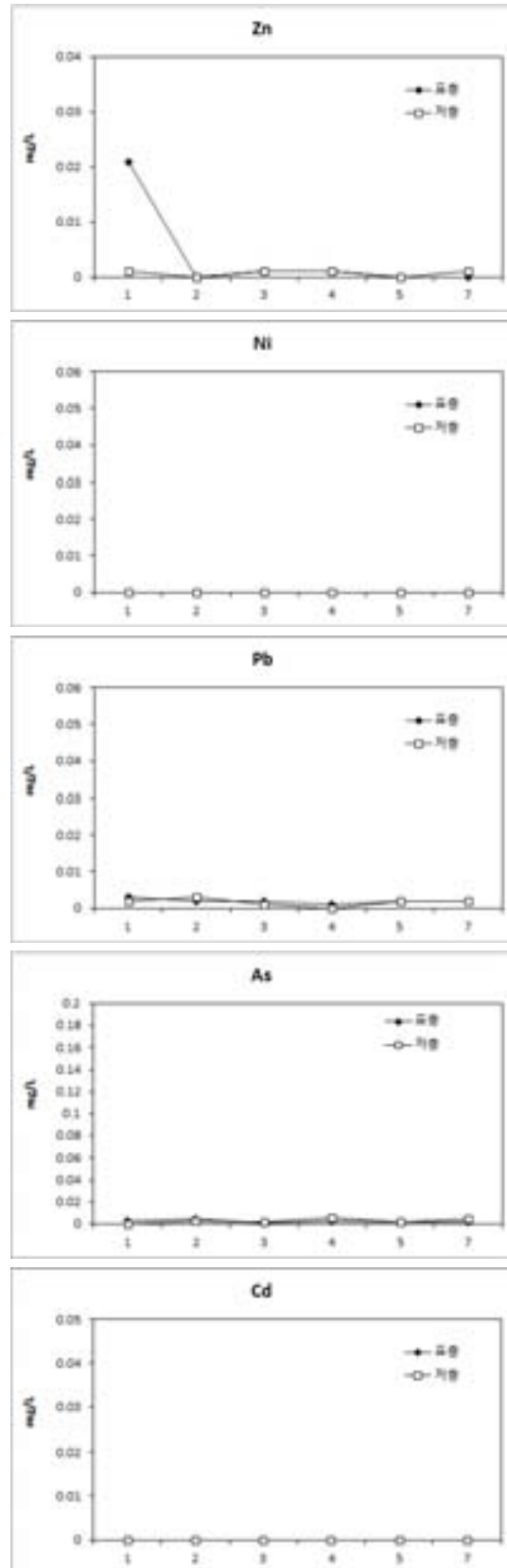
0.003 mg/L, Cu 0.001 mg/L 검출되었으며 Zn, Ni 및 Cd는 검출되지 않았음.

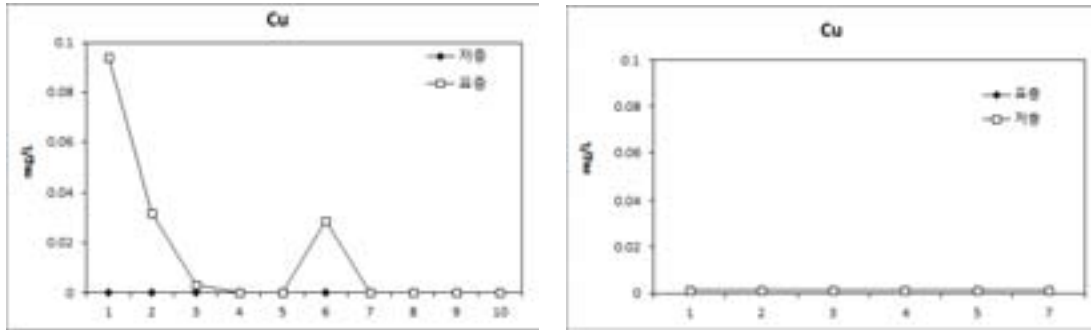
○ 저층해수의 중금속농도는 시공 전 보다 시공 후에 67-100% 감소하였음.

<시공전>



<시공후>





[그림. V-가-46] 피복시공 전후 지점별 해수 중금속 농도

[표. V-가-22] 피복시공 전후 해수 중금속 농도 평균 (단위 mg/L)

	시공전		시공후		기준
	표층	저층	표층	저층	
Zn	0.055	0.035	0.004	0	0.1
Ni	0.017	0.02	0	0	
Pb	0.007	0.019	0.002	0.002	0.05
As	0.003	0.019	0.003	0.003	0.05
Cd	0.002	0.004	0	0	0.01
Cu	0.007	0.003	0.001	0.001	0.02

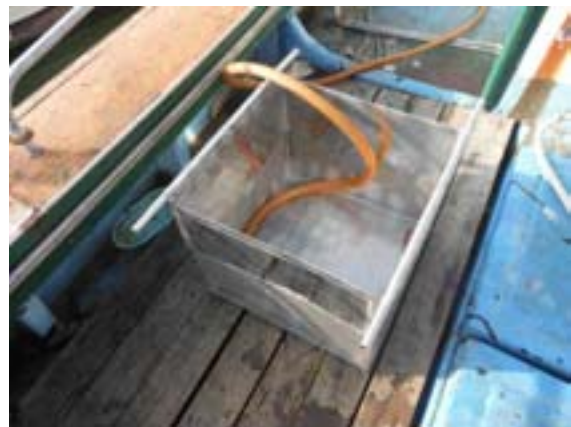
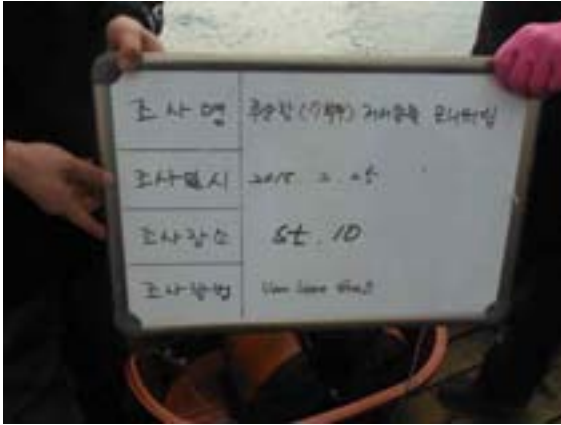
### ③ 피복시공 전후 저서동물 모니터링

○ 적용 대상 해역의 피복시공 전 대형저서동물의 서식양상을 파악하여 피복시공 후 저서생태계 변화를 파악하는 생물학적 자료를 확보하고자함.

### ㉠ 조사방법

#### ■ 서식생물상 현장조사

- 피복지와 대조구로 구분하여 부산 K항 현장조사를 수행하였으며, 현장에서 Van Veen Grab를 이용하여 시료를 채집하고, 현장에서 망목 1 mm인 Sieve를 이용하여 1차 Sieving 을 하여 실험실로 운반하였음.
- 운반된 시료는 망목 1 mm인 Sieve에 2차 Sieving하여 Sorting 작업을 통해 퇴적물과 대형저서동물을 구분하였음.
- 구분된 시료는 해부현미경하에서 가능한 종 수준까지 종 동정작업을 실시하였음.



[그림. V-가-47] 서식생물상 현장조사

#### ■ 중형저서동물 채집 및 분석

- 퇴적물과 함께 채집된 중형저서동물 시료를 분석하기 위해 시료채집은 1개소에서 Van Veen Grab(입구면적 : 0.1m<sup>2</sup>)를 이용하여 채집된 시료를 3.3 cm인 원형 채집기를 활용하여 표층과 저층으로 구분하여 1회씩 채집하였음.
- 채집된 시료는 중형저서동물(1 mm ~ 38 μm)를 Sieving하여 남은 잔존물을 루골용액으로 단백질 염색 후 현미경하에서 분류군별 출현빈도 파악하였으며, 눈금이 그려진 패트리디쉬에서 계수하여 단위면적(10cm<sup>2</sup>)당 개체수로 변환하였음.
- 피복지와 대조구에서 중형저서동물을 채집하기 위하여 개량형 van Veen grab sampler를 이용하여 직경 3.6cm 크기의 아크릴로 된 튜브를 코어링하여 퇴적물을 채취한 후, 표층으로부터 깊이 5cm까지 퇴적물 시료를 로즈벵갈(rose bengal)을 혼합한 5% 중성 포르말린으로 고정시켰음.
- 이 후 연구소로 운반되어진 생물 시료는 각 크기의 체(1mm, 500μm, 250μm, 125μm, 63μm, 38μm)로 걸러내어 광학현미경 하에서 분류 및 계수하였음.
- 퇴적물에 서식하는 중형저서동물의 밀도는 전 생물군이 표층 5cm안에 90% 이상을 차지하고 있기 때문에 본 연구에서도 5cm까지의 시료의 값으로 균일하게 표현하기로 하였음.

#### ■ 대형저서동물 채집 및 분석

- 퇴적물과 함께 채집된 대형저서동물 시료를 분석하기 위해 시료채집은 1개소에서 Van Veen Grab(입구면적 : 0.1m<sup>2</sup>)를 이용하여 채집을 실시하였으며, 채집된 시료에 대하여는 라벨링을 부착하여 정확히 구분한 다음, 선별과정을 통해 분류군별로 구분하며, 해부현미경과 광학현미경을 이용하여 종 단위까지 동정하고, 개체수 및 생체량은 피복지와 대조구로 구분하여 단위면적당(1m<sup>2</sup>) 생물량으로 환산하고 자료를 분석하였음.



- 조사지역에서 출현한 저서동물의 분류군별 출현종수, 서식밀도, 생체량을 파악하고, 각 지점별 출현종수와 서식밀도, 생체량 및 상위 2.0%의 우점종에 대해 파악하였음.
- 저서생물 군집의 특성을 설명하는 생태학적지수는 종 다양성지수(H'), 종풍부도지수(R), 종균등도지수(J), 우점도지수(D)를 조사지점별로 계산하였으며, 저서동물의 군집 구조를 파악하기 위하여 사용된 각 지수의 계산식은 아래와 같음.

◆ 종 풍부도 지수 (Species richness index (Margalef, 1958))

$$R = \frac{S-1}{\ln(n)}$$

◆ 종 다양도 지수 (Species diversity index (Shannon and Wiener, 1963))

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \cdot \ln P_i$$

◆ 종 균등도 지수 (Species evenness index (Pielou, 1975))

$$J = \frac{H'}{H'_{\max}} = \frac{H'}{\ln S}$$

◆ 종 우점도 지수 (Species dominance index (Simpson, 1949))

$$D = \sum_{i=1}^s \frac{n_i(n_i-1)}{n(n-1)}$$

■ 저서오염지수(BPI: Benthos Pollution Index)

- 유기물 오염에 대한 반응정도는 그들의 섭식유형에 따라 다르게 나타난다는 가정하에 우점종을 중심으로 대형저서동물의 4개의 섭식유형군으로 나누고, Word(1978)가 제안한 식성지수공식(ITI)을 응용하여 이들의 섭식형 구조를 1-100 사이의 수치로 나타내었음(한국 해양연구소 1995).

**BPI = [1-(0N1+1N2+2N3+3N4)/3 · (N1+N2+N3+N4)]×100**

N1 : 제 1군의 개체수  
 N2 : 제 2군의 개체수  
 N3 : 제 3군의 개체수  
 N4 : 제 4군의 개체수

[표. V-가-23] 5단계의 BPI-level

BPI level	Interval of BPI	
I	61-100	Normal
II	51-60	Slightly polluted
III	41-50	Moderately polluted
IV	31-40	Highly polluted
V	0-30	Very highly polluted

■ 주성분분석(PCA: Principal Component Analysis)

- 수질 및 표층퇴적물의 분석결과(발주처에서 제공)인 환경요인과 정점별 출현한 대형저서동물간의 관계를 파악하기 위하여 주성분분석을 실시하였음.

- 이때 사용한 변수는 우점종 중 상위 5종, 출현종수와 평균서식밀도, 생태학적체지수에 환경요인을 추가하여 항목간 상관계수를 산출하고 분석을 진행하였음.

■ 건강도 평가(AMBI : Atzi's Marine Biotic Index, Borja et al., 2003)

- 연구해역의 건강도를 평가하기 위하여 대형저서동물의 자료를 기초로 AMBI 지수를 산출하였으며, 상기 평가 산출식은 아래와 같음.

$$AMBI = [0 \times \%G1 + 1.5 \times \%GII + 3.0 \times \%GIII + 4.5 \times \%GIV + 6.0 \times \%GV / N];$$

- 여기에서 N = G1+G2+G3+G4+G5
- GI = 유기물 증가에 매우 민감한 종(정상환경에서만 출현하며, 특정 육식자와 서관을 가진 식자를 포함함)
- GII = 유기물 증가에 둔감한 종(정상상태에서 낮은 밀도를 가지는 종으로, 여과식자, 일반적인 육식자 및 부식자를 포함함)
- GIII = 유기물 증가에 내성이 강한 종(표층퇴적물식자로 얼굴갯지렁이류(spionidae) 등이 포함됨)
- GIV = 2차 기회종(표층하퇴적물식자로 실타래갯지렁이류(cirratulidae)등이 포함됨)
- GV = 1차 기회종(현저한 불균형 환경의 종으로 환원상태의 퇴적물에서 번성하는 퇴적물식자를 포함함)
- 결과 값은 0(정상)<AMBI<6(오염), >7은 무생물조건의 범위를 나타냄.

[표. V-가-24] 건강도 지수 등급에 따른 구배

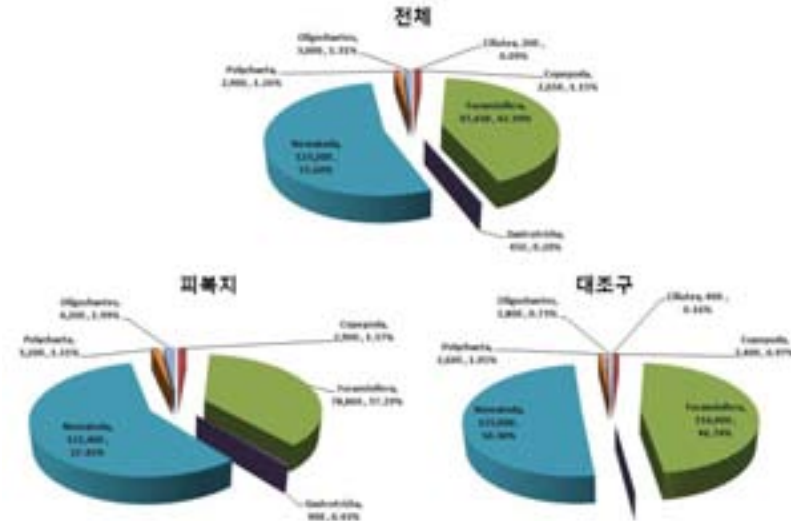
Condition / Index	BPI	AMBI	Health Grade
Normal	≥ 60	0~1.2	H, high
Slightly polluted	40~60	1.2~3.2	G, good
Moderately polluted	30~40	3.2~5.0	M, moderate
Highly polluted	20~30	5.0~6.0	P, poor
Very high polluted	≤20	6.0~7.0	B, bad

㉞ 조사결과

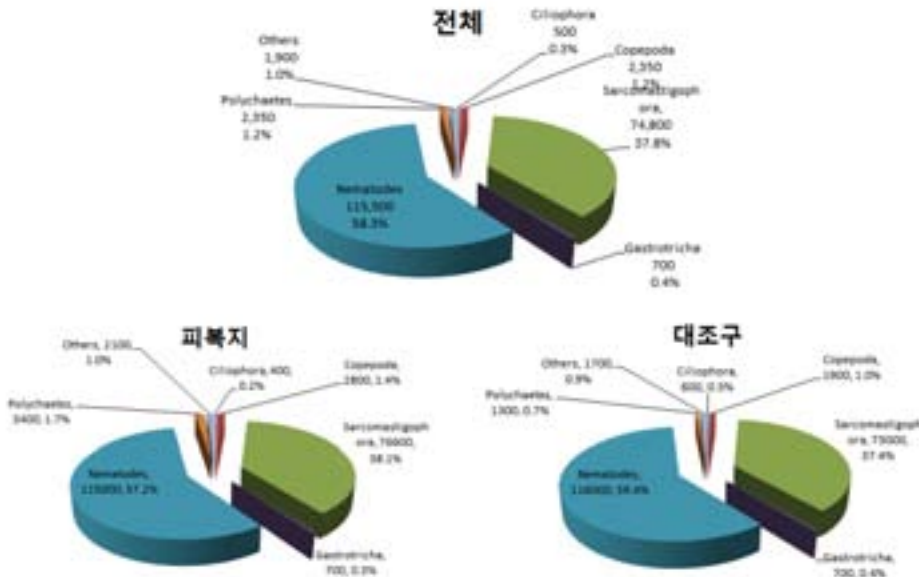
■ 중형저서동물

- 시공 전 2015년 10월 출현한 중형저서동물은 총 2,298,300 개체가 출현하였으며, Nematoda (선충류)가 1,232,000 indiv./10cm<sup>2</sup> 출현하여 53.60%로 최우점하여 나타났으며, 다음으로 Foraminifera(유공충류)가 974,300 indiv./10cm<sup>2</sup> 로 42.39%로 차우점하였으며, 그 외에 5개의 동물문이 출현하여 총 7개 동물문이 출현하였음.
- 시공 후 2016년 9월 출현한 중형저서동물은 평균서식밀도는 198,100 개체/cm<sup>2</sup>이었으며, 이 중 Nematodes(선충류)가 평균 115,500 개체/cm<sup>2</sup>으로 출현하여 전체의 58.3%를 차지하여 최우점 동물군이었으며, 그 다음으로는 Sarcostigophora(유공충류)가 평균 74,800 개체/cm<sup>2</sup>으로 전체의 37.8%으로 우점하였고, 그 외에 5개 동물군이 출현하여 모두 7개 동물군

으로 출현하였음.



[그림. V-가-48] 시공전 부산 K항에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상



[그림. V-가-49] 시공후 부산 K항에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상

- 시공전 2015년 10월 부산항 피복지에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상은 표 V-가-25와 같으며, 대조구에서 출현한 중형동물의 분류군별 출현양상은 표 V-가-26과 같음.

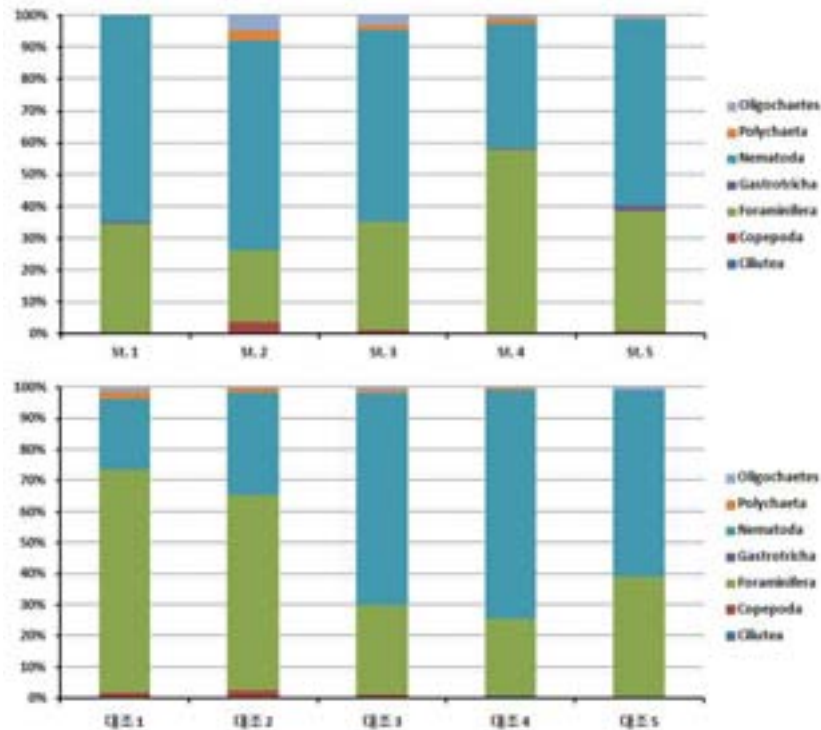
[표. V-가-25] 시공전 피복지에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상

Taxon		St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	Mean (inds./10cm <sup>2</sup> )
섬모충류	Ciliophora	-	-	-	-	-	400
요각류	Copepoda	500	7,000	4,000	1,000	2,000	2,800

유공충	Sarcomastigophora	47,800	40,500	111,000	114,000	81,000	78,860
복모동물	Gastrotricha	500	-	-	1,000	3,000	9,700
선충류	Nematodes	90,000	118,000	196,000	78,000	125,000	121,400
다모류	Polychaetes	-	6,000	6,000	3,000	1,000	3,200
기타류	Others	-	8,000	9,000	2,000	2,000	4,200
Total		138,800	179,500	326,000	199,000	214,000	211,460

[표. V-가-26] 시공전 대조구에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상

Taxon		St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	Mean (inds./10cm <sup>2</sup> )
섬모충류	Ciliophora	-	-	-	2,000	-	400
요각류	Copepoda	5,000	6,000	1,000	-	-	2,400
유공충	Sarcomastigophora	5,000	6,000	1,000	-	-	2,400
복모동물	Gastrotricha	191,000	159,000	31,000	72,000	127,000	116,000
선충류	Nematodes	-	-	-	-	-	-
다모류	Polychaetes	61,000	84,000	73,000	214,000	193,000	125,000
기타류	Others	7,000	3,000	1,000	2,000	-	2,600
Total		267,000	253,000	107,000	291,000	323,000	248,200



[그림. V-가-50] 시공전 출현한 중형저서동물의 조사지점별 출현양상

○ 시공후 2016년 9월 부산항 피복지에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상은 표 V-가-27과 같으며, 대조구에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상은 표 V-가-28과 같음.

○ 모든 정점 즉, 대조구와 피복지에서 출현한 중형저서동물의 출현비율을 비교한 결과, 그

림 V-가-51과 같이 대조구에서의 정점 1에서는 주로 선충류가 가장 우점하였으며, 대조구 정점 2에서 정점 5로 갈수록 유공충의 비율이 점점 감소한 반면, 선충류의 비율이 점점 많아지는 양상을 보여주었음.

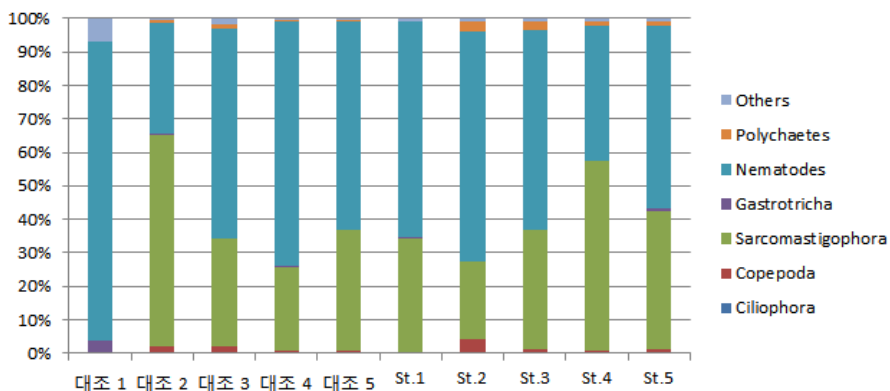
- 피복지에서는 모든 정점에서 선충류와 유공충류의 비율의 우위를 차지하였으며, 피복지에서의 다모류는 st.1을 제외하곤 모두 출현하였음.

[표. V-가-27] 시공후 피복지에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상

Taxon		St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	Mean (inds./10cm <sup>2</sup> )
섬모충류	Ciliophora			500	500	1,000	400
요각류	Copepoda	500	7,500	3,500	1,000	1,500	2,800
유공충	Sarcomastigophora	45,000	40,000	110,000	105,000	83,000	76,600
복모동물	Gastrotricha	500			500	2,500	700
선충류	Nematodes	85,000	120,000	185,000	75,000	110,000	115,000
다모류	Polychaetes		4,500	7,500	2,500	2,500	3,400
기타류	Others	1,500	2,000	3,500	1,500	2,000	2,100
Total		132,500	174,000	310,000	186,000	202,500	

[표. V-가-28] 시공후 대조구에서 출현한 중형저서동물의 분류군별 출현양상

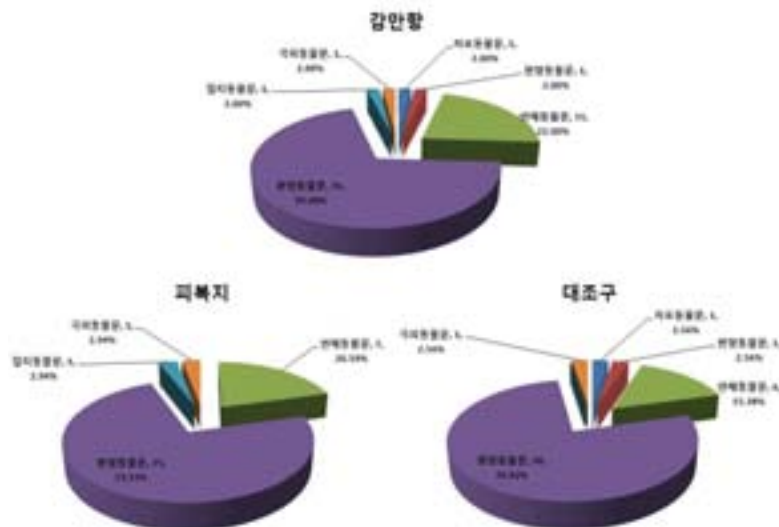
Taxon		대조 1	대조 2	대조 3	대조 4	대조 5	Mean (inds./10cm <sup>2</sup> )
섬모충류	Ciliophora		500	500	1,500	500	600
요각류	Copepoda		4,500	2,000	1,000	2,000	1,900
유공충	Sarcomastigophora		145,000	35,000	75,000	110,000	73,000
복모동물	Gastrotricha	1,000	500		1,500	500	700
선충류	Nematodes	25,000	76,000	69,000	220,000	190,000	116,000
다모류	Polychaetes		2,500	1,500	1,500	1,000	1,300
기타류	Others	2,000	1,000	2,000	1,500	2,000	1,700
Total		28,000	230,000	110,000	302,000	306,000	



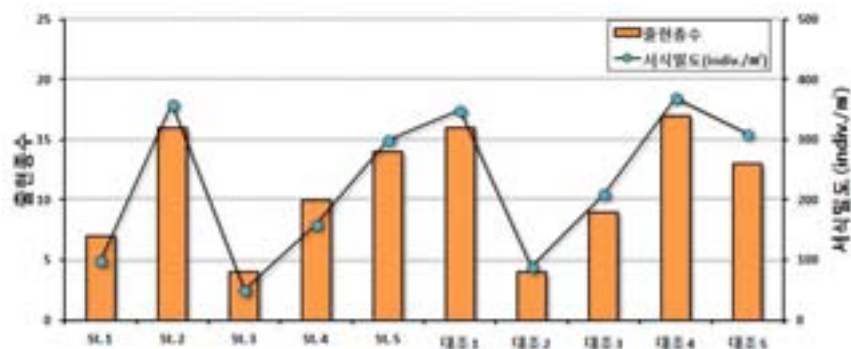
[그림. V-가-51] 시공전 출현한 중형저서동물의 분류군별·정점별 출현양상

■ 대형저서동물

- 시공전 2015년 10월 부산항에서 조사된 대형저서동물의 출현종수와 서식밀도를 기준으로 분류군별 출현양상은 Fig 5, 6과 같음.
- 6개 동물문 50종이 출현하였으며, 환형동물문이 35종으로 70.00%로 가장 많이 출현하였음.
- 피복지와 대조구로 구분하면 피복지의 경우 4개 동물문 34종이 출현하였으며, 대조구는 5개 동물문 39종이 출현하였음.
- 서식밀도를 기준으로 분류군별 출현양상은 총 2,300개체가 출현하여 단위면적당 서식밀도는 230 indiv./m<sup>2</sup>으로 나타났으며, 피복지는 970개체(194 indiv./m<sup>2</sup>), 대조구는 1,330개체(266 indiv./m<sup>2</sup>)으로 나타났음.
- 출현종수는 대조 4 정점에서 17종으로 가장 많은 종이 출현하였으며, 서식밀도도 370 indiv./m<sup>2</sup>으로 가장 높게 나타났다. 다음으로 대조 1 정점에서 16종이 출현하였으며, 서식밀도도 350 indiv./m<sup>2</sup>으로 나타났다. 출현종수가 가장 적게 나타나는 지점은 St. 3 정점으로 4종이 출현하였으며, 서식밀도는 50 indiv./m<sup>2</sup>으로 조사되었음.



[그림. V-가-52] 시공전 부산 K항에서 출현한 대형저서동물의 분류군별 출현양상

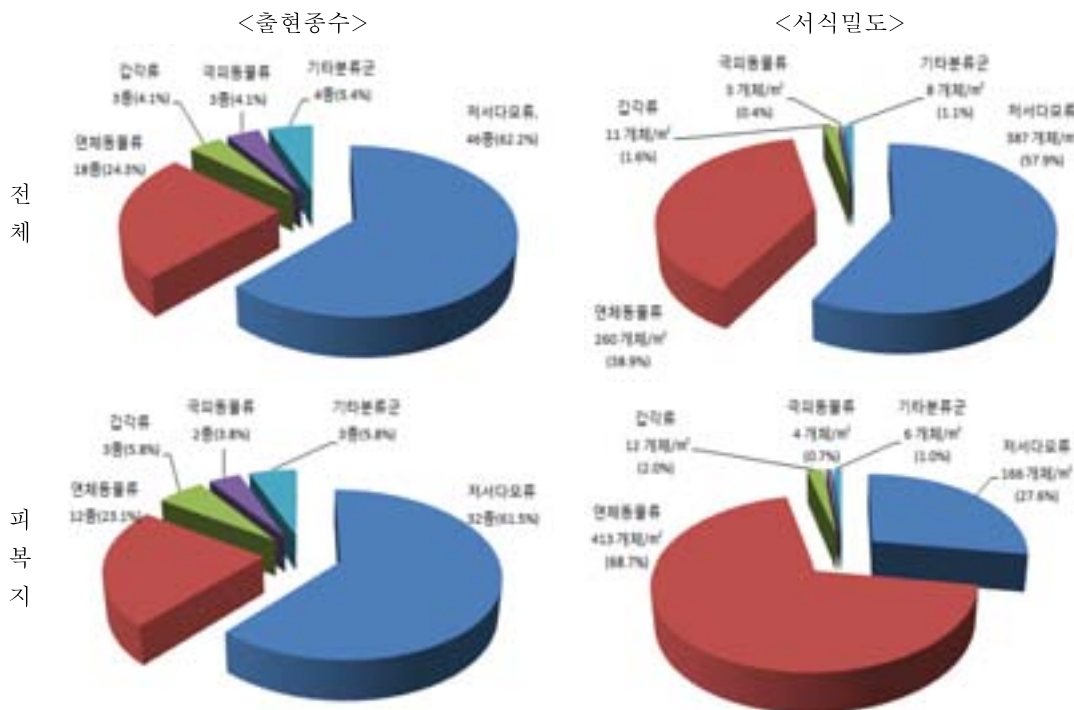


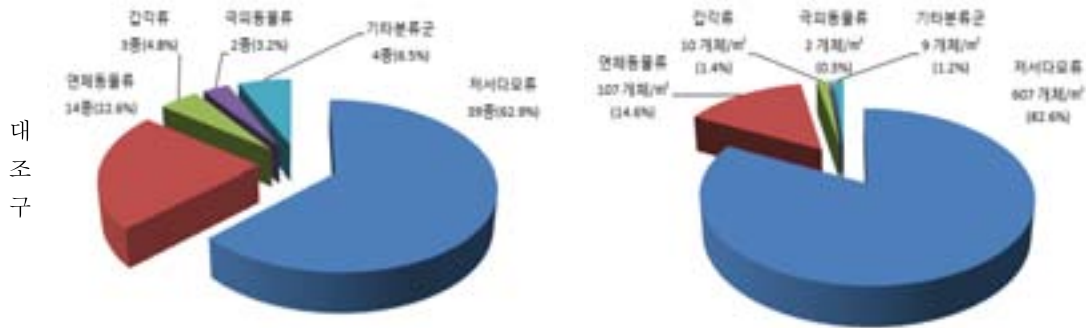
[그림. V-가-53] 시공전 부산 출현한 대형저서동물의 조사정점별 출현양상 및 서식밀도

- 시공후 2016년 9월 부산 K항에서 출현한 대형저서동물의 출현종수와 서식밀도를 살펴본

결과, 총 출현종수는 74종/1.9m<sup>2</sup>이 출현하였으며, 평균서식밀도는 668 개체/m<sup>2</sup>이었음.

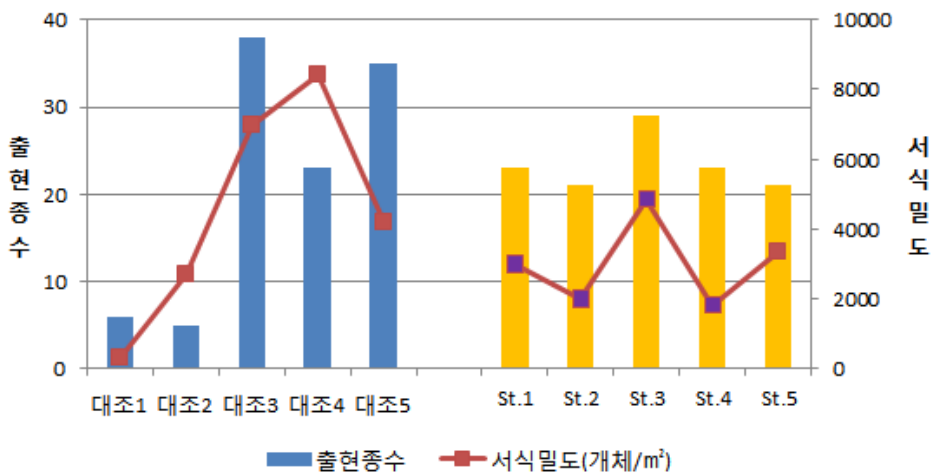
- 출현종수의 경우, 저서다모류가 46종(62.2%)으로 출현하여 최우점 동물군으로 나타났으며, 연체동물류 18종(24.3%), 갑각류 3종, 극피동물 3종 및 기타분류군 4종이었음.
- 서식밀도의 경우, 저서다모류는 평균 387 개체/m<sup>2</sup>으로 출현하여 전체의 57.9%를 차지하여 가장 우점하였으며, 그 다음으로는 연체동물류 260 개체/m<sup>2</sup>(38.9%)으로 차우점하였음.
- 피복지에서의 대형저서동물의 총 출현종수는 52종이었으며, 평균서식밀도는 601 개체/m<sup>2</sup>이었음.
- 가장 많은 종으로 출현한 동물군은 저서다모류로 32종이 출현하여 61.5%를 차지하였으며, 그 다음으로 우점 출현한 연체동물은 12종, 23.1%를 차지하였음.
- 서식밀도의 경우, 가장 우점한 동물군은 연체동물류로 413 개체/m<sup>2</sup>으로 전체의 68.7%를 차지하였으며, 그 다음으로 우점 동물군은 저서다모류로 166 개체/m<sup>2</sup>, 27.6%를 차지하였음.
- 대조구에서의 대형저서동물의 총 출현종수는 62종이었으며, 평균서식밀도는 735 개체/m<sup>2</sup>이었음.
- 가장 많은 종으로 출현한 동물군은 저서다모류로 39종이 출현하였으며 이는 62.9%를 차지하였으며, 그 다음으로 우점한 동물군은 연체동물류로 14종, 22.6%를 차지하였음.
- 서식밀도의 경우, 가장 우점한 동물군은 저서다모류로 607 개체/m<sup>2</sup>이었으며 이는 82.6%를 차지하였으며, 그 다음 우점한 동물군은 연체동물류로 107 개체/m<sup>2</sup>, 14.6%를 차지하였음.





[그림. V-가-54] 시공후 부산항에 출현한 대형저서동물의 출현종수 및 서식밀도 출현양상

- 정점별 대형저서동물의 출현종수와 서식밀도를 살펴보면, 대조구의 경우 대조1과 대조2에서 낮은 출현종수와 서식밀도를 보여준 반면에 대조3-대조5에서는 높은 종수와 서식밀도로 출현하였음.
- 피복지의 경우 출현종수는 각 정점별로 유사한 수준의 종수를 보여주었으며, 서식밀도는 St.3에서 다소 높은 밀도로 출현하였으나 전반적으로 대조구에 비해 낮은 종수와 밀도로 출현함을 알 수 있었음.



[그림. V-가-55] 시공후 출현한 대형저서동물의 출현종수와 서식밀도

- 시공전 2015년 10월 부산항에서 출현한 대형저서동물의 조사정점별 상위 2.0% 이상인 우점종은 Table 7과 같음.
- 우점종은 총 12종으로 환형동물문이 11종으로 가장 우점하여 나타났으며, *Lumbrineris longifolia* (긴자락송곳갯지렁이)가 430개체가 출현하였고, 서식밀도는 43 indiv./m², 우점률 18.70%으로 최우점하였음.
- 차우점종은 *Theora fragilis* (아기반투명조개) 7.39%으로 나타났으며, 그 외 10개종이 우점하여 나타났고, 우점종이 총 출현종의 67.39%으로 나타났음.



[표. V-가-29] 시공전 전체 해역에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종

Rank	Species name		Mean density (inds./m <sup>2</sup> )	dominant rate (%)
1	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	43	18.7
2	<i>Theora fragilis</i>	아기반투명조개	17	7.39
3	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	17	7.39
4	<i>Maldanidae unid.</i>	대나무갯지렁이류	14	6.09
5	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	12	5.22
6	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갯지렁이	11	4.78
7	<i>Mesochaetopterus sp.</i>	밀집날개갯지렁이류	11	4.78
8	<i>Amage auricula</i>	빨사슴갯지렁이	8	3.48
9	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	6	2.61
10	<i>Syllis sp.</i>	큰염주발갯지렁이류	6	2.61
11	<i>Nassarius festivus</i>	왕좁쌀무늬고둥	5	2.17
12	<i>Eteone sp.</i>	작은부채발갯지렁이류	5	2.17
Total			155	67.39

- 피복지에서 출현한 대형저서동물의 조사정점별 상위 2.0% 이상인 우점종은 Table8과 같다. 우점종은 총 17종으로 환형동물문이 14종으로 가장 우점하여 나타났으며, 연체동물문 2종과 절지동물문 1종으로 조사되었음.
- 최우점종은 *Lumbrineris longifolia* (긴자락송곳갯지렁이)가 150개체가 출현하여, 서식밀도는 30 indiv./m<sup>2</sup>, 우점률 15.46%으로 나타났으며, 차우점종은 *Maldanidae unid.* (대나무갯지렁이류) 9.28%으로 나타났음.
- 그 외 15개종이 우점하여 나타났고, 우점종이 총 출현종의 83.51%를 차지했음.

[표. V-가-30] 시공전 피복지에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종

Rank	Species name		Mean density (inds./m <sup>2</sup> )	dominant rate (%)
1	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	30	15.46
2	<i>Maldanidae unid.</i>	대나무갯지렁이류	18	9.28
3	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갯지렁이	16	8.25
4	<i>Theora fragilis</i>	아기반투명조개	14	7.22
5	<i>Mesochaetopterus sp.</i>	밀집날개갯지렁이류	14	7.22
6	<i>Nassarius festivus</i>	왕좁쌀무늬고둥	10	5.15
7	<i>Amage auricula</i>	빨사슴갯지렁이	8	4.12
8	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	8	4.12
9	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	8	4.12
10	<i>Loimia medusa</i>	괴물유령갯지렁이	6	3.09
11	<i>Syllis sp.</i>	큰염주발갯지렁이류	6	3.09
12	<i>Caprella sp.</i>	바다대벌레류	4	2.06
13	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	4	2.06
14	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	4	2.06
15	<i>Eteone sp.</i>	작은부채발갯지렁이류	4	2.06
16	<i>Diopatra sugokai</i>	털보갯지렁이	4	2.06

17	<i>Polychaeta unid.</i>	다모류	4	2.06
18	<i>Ninoe simpla</i>		4	2.06
Total			162	83.51

- 대조구에서 출현한 대형저서동물의 조사정점별 상위 2.0% 이상인 우점종은 Table 9와 같음.
- 우점종은 총 14종으로 환형동물문이 12종으로 가장 우점하여 나타났으며, 연체동물문 2종으로 조사되었음.
- 최우점종은 *Lumbrineris longifolia* (긴자락송곳갯지렁이)가 280개체가 출현하여, 서식밀도는 56 indiv./m<sup>2</sup>, 우점률 21.05%으로 나타났으며, 차우점종은 *Capitella capitata* (등가시버들갯지렁이) 11.28%으로 나타났음.
- 그외 12개종이 우점하여 나타났고, 우점종이 총 출현종의 74.44%를 차지했음.

[표. V-가-31] 시공전 대조구에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종

Rank	Species name		Mean density (inds./m <sup>2</sup> )	dominant rate (%)
1	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	56	21.05
2	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	30	11.28
3	<i>Theora fragilis</i>	아기반투명조개	20	7.52
4	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	20	7.52
5	<i>Maldanidae unid.</i>	대나무갯지렁이류	10	3.76
6	<i>Mesochaetopterus sp.</i>	밀집날개갯지렁이류	8	3.01
7	<i>Amage auricula</i>	뿔사슴갯지렁이	8	3.01
8	<i>Haploscoloplos elongatus</i>	갯모갯지렁이	8	3.01
9	<i>Lumbrineris sp.</i>	송곳갯지렁이류	8	3.01
10	<i>Glycera chirori</i>	치로리미갯지렁이	6	2.26
11	<i>Syllis sp.</i>	큰염주발갯지렁이류	6	2.26
12	<i>Eteone sp.</i>	작은부채발갯지렁이류	6	2.26
13	<i>Ophiothrix exgua</i>	짧은가시거미불가사리	6	2.26
14	<i>Macoma sp.</i>	대양조개류	6	2.26
Total			198	74.44

- 시공후 2016년 9월 부산항에서 출현한 대형저서동물의 조사정점별 상위 2.0% 이상인 우점종은 총 8종으로 연체동물류 1종과 저서다모류 7종이 출현하였으며 이는 전체의 73.8%를 차지하였음.
- 최우점종은 연체동물류 이매패류 아기반투명조개(*Theora fragilis*)으로 8개 정점에서 출현하였으며, 평균서식밀도는 216 개체/m<sup>2</sup>으로 32.3%를 우점하였
- 차우점종은 저서다모류 긴자락송곳갯지렁이(*Lumbrineris longifolia*)으로 8개 정점에서 출현하였으며, 평균서식밀도는 81 개체/m<sup>2</sup>으로 12.1%를 우점하였음.

[표. V-가-32] 시공후 전체 해역에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종

Rank	Species name		Mean density (inds./m <sup>2</sup> )	dominant rate (%)
1	<i>Theora fragilis</i>	아기반투명조개	216	32.3
2	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	81	12.1
3	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	49	7.3
4	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	48	7.1
5	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	44	6.5
6	<i>Terebella ehrenbergi</i>	고목유령갯지렁이	21	3.1
7	<i>Glycinde gurjanovae</i>	고리갯지렁이류	19	2.8
8	<i>Heteromastus filiformis</i>	벼들갯지렁이류	17	2.5
Total			495	73.8

- 피복지에서의 대형저서동물 상위 2% 이상 우점종의 출현양상을 보면, 모두 5종으로 연체동물류 1종과 저서다모류 4종이 출현하였으며 이는 447 개체/m<sup>2</sup>으로 74.4%를 차지하였음.
- 최우점종은 연체동물류 아기반투명조개(*T. fragilis*)으로 평균서식밀도는 364 개체/m<sup>2</sup>으로 60.6%를 차지하였으며, 극우점하는 현상을 보여주었다. 차우점종은 저서다모류 고목유령갯지렁이(*T. ehrenbergi*)으로 30 개체/m<sup>2</sup>으로 출현하였으며, 우점율은 5.0%으로 최우점종과 차이가 심하였음.

[표. V-가-33] 시공후 피복지에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종

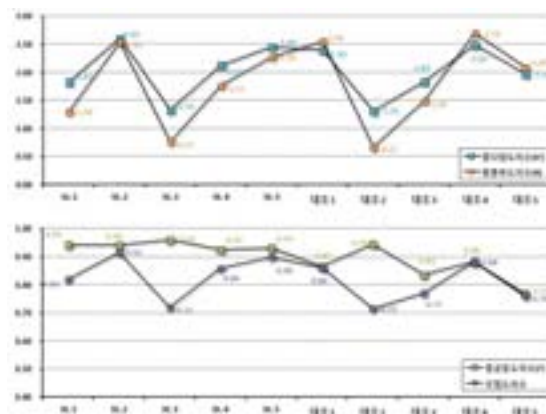
Rank	Species name		Mean density (inds./m <sup>2</sup> )	dominant rate (%)
1	<i>Theora fragilis</i>	아기반투명조개	364	60.6
2	<i>Terebella ehrenbergi</i>	고목유령갯지렁이	30	5.0
3	<i>Glycinde gurjanovae</i>	고리갯지렁이류	23	3.8
4	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	18	3.0
5	<i>Paraprionospio cordifolia</i>	얼굴갯지렁이류	12	2.0
Total			447	74.4

- 대조구에서의 상위 2% 이상 우점종의 출현양상을 보면, 8종이 출현하였으며 저서다모류 7종 및 연체동물류 1종이 출현하였다. 평균서식밀도는 548 개체/m<sup>2</sup>이었으며 이는 74.6%를 차지하였음.
- 최우점종은 저서다모류 긴자락송곳갯지렁이(*L. longifolia*)으로 143 개체/m<sup>2</sup>으로 19.5%를 차지하였으며 피복지의 최우점종처럼 극우점하는 현상을 보이지는 않았다. 차우점종은 저서다모류 등가시버들갯지렁이(*C. capitata*)으로 95 개체/m<sup>2</sup>, 12.9%를 차지하였음.

[표. V-가-34] 시공후 대조구에서 출현한 대형저서동물의 상위 2.0% 이상인 우점종

Rank	Species name		Mean density (inds./m <sup>2</sup> )	dominant rate (%)
1	<i>Lumbrineris longifolia</i>	긴자락송곳갯지렁이	143	19.5
2	<i>Capitella capitata</i>	등가시버들갯지렁이	95	12.9
3	<i>Praxillella affinis</i>	꼬리대나무갯지렁이	90	12.2
4	<i>Magelona japonica</i>	양손갯지렁이	85	11.6
5	<i>Theora fragilis</i>	아기반투명조개	68	9.3
6	<i>Heteromastus filiformis</i>	버들갯지렁이류	30	4.1
7	<i>Thelepus</i> sp.	비유령갯지렁이류	20	2.7
8	<i>Polydora</i> sp.	긴얼굴갯지렁이류	17	2.3
Total			548	74.6

- 시공전 피복지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 서식밀도를 기준으로 각각의 정점별 생태학적제지수를 산출하였음.
- 군집의 안정성을 나타내는 종 다양성지수가 피복지의 경우 평균  $2.07 \pm 0.51$ 으로 1.33-2.61의 범위에서 나타났고, 대조구의 경우 평균  $2.01 \pm 0.48$ 으로 1.31-2.50의 범위에서 나타났음.
- 종 풍부도지수의 경우, 피복지는 평균  $1.73 \pm 0.72$ 로 0.77-2.55의 범위로 나타났으며, 대조구는 평균  $1.90 \pm 0.84$ 로 0.97-2.56의 범위로 나타났음.
- 종 균등도지수의 경우는 피복지에서 평균  $0.94 \pm 0.01$ 로 0.93-0.96의 범위에서 나타났고, 대조구는 평균  $0.86 \pm 0.06$ 으로 0.77-0.95의 범위로 나타났음.
- 피복지의 생태학적제지수의 결과가 다양성 지수와 균등도 지수, 우점도 지수에서 수치적으로 큰 차이는 아니지만 대조구에 비해 안정적인 군집구조 양상을 보이며, 풍부도 지수에서만 대조구가 약간 높게 나타났음.



[그림. V-가-56] 시공전 피복지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수

- 시공후 대조구와 피복지에서 대형저서동물에 대한 생태학적 지수를 산출한 결과, 피복지에 비해 대조구에서 보다 다양한 종이 균등하게 우점하여 출현하였음.

- 종다양도지수 값은 대조구에서 평균 1.96(±0.91)이었으며, 피복지에서 평균 1.85(±0.52)이었음.
- 균등도지수 값은 대조구에서 평균 0.7(±0.24)이었으며, 피복지에서 평균 0.59(±0.17)이었음.
- 우점도지수의 최대값이 1이므로 대조구에서 대조2에서 0.76으로 극우점하는 현상을 보여주었으나 평균적으로 0.27(±0.28)이었으며, 피복지에서는 모든 정점에서 고른 양상을 보여 주어 평균 0.36(±0.18)으로 다소 높은 값을 보여주었음.



[그림. V-가-57] 시공후 피복지와 대조구에서 출현한 대형저서동물의 생태학적제지수

#### ■ 건강도 평가 AMBI(Atzi's Marine Biotic Index)

- 시공후 대형저서동물의 유기물 오염에 대한 반응 혹은 대상 해역이 어느 정도 건강한지에 대해 살펴본 결과, 대부분 해역에서 조금(slightly) 교란된 혹은 보통(moderately) 교란된 상태로 나타났음.
- 피복지가 아닌 대조구 2에서 심각(heavily)하게 교란된 상태로 나타났으며, 빈산소 수괴에 준하는 상태로 나타났음.
- 이는 특정 시기에 나타나는 일시적인 현상인지 아니면, 지속적으로 발생하는 현상인지에 대해 일정 시간으로 꾸준한 모니터링이 필요함.

[표. V-가-35] 시공후 대형저서동물 건강도 평가

Stations	I(%)	II(%)	III(%)	IV(%)	V(%)	AMBI	BI from Mean AMBI	Disturbance Classification
대조1	18.182	0	36.364	45.455	0	3.136	2	Slightly disturbed
대조2	0	1.02	0	3.061	95.918	5.908	6	Heavily disturbed
대조3	10	47.778	18.889	22.963	0.37	2.339	2	Slightly disturbed
대조4	27.5	28.75	18.75	25	0	2.119	2	Slightly disturbed
대조5	30.435	29.193	23.602	16.149	0.621	1.91	2	Slightly disturbed
St.1	2.703	18.919	5.405	72.973	0	3.73	3	Moderately

								disturbed
St.2	19.178	19.178	4.11	57.534	0	3	2	Slightly disturbed
St.3	9.626	12.834	6.952	70.588	0	3.578	3	Moderately disturbed
St.4	7.273	30.909	9.091	52.727	0	3.109	2	Slightly disturbed
St.5	1.527	10.687	7.634	80.153	0	3.996	3	Moderately disturbed


(나) 코어 샘플을 통한 피복형상 확인 및 피복 정화 효율 성능 평가

① 코어 샘플을 통한 피복 형상 확인

- 모래 포설 후 제올라이트와 모래의 피복상태를 확인하기 위해 2016년 5월 3일 ~ 2016년 5월 11일 동안 St.1 ~ St.4의 4개 지점에 대한 공내영상촬영(BIPS)를 실시
- 조사 위치는 표 V-가-36과 같음

[표. V-가-36] 피복재 포설위치 및 지반조사 위치

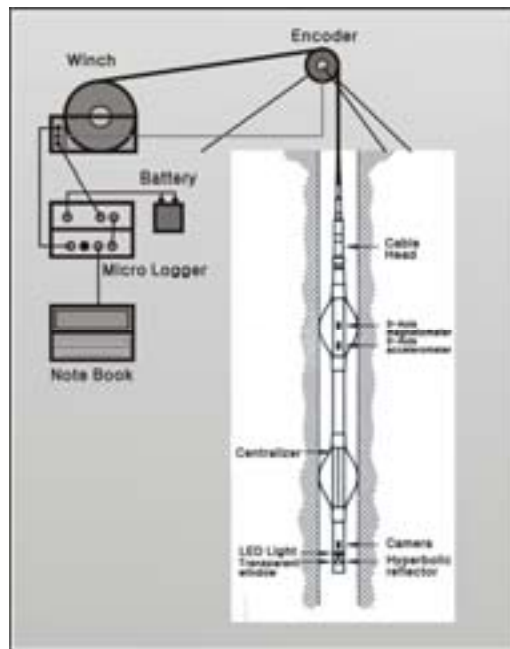
피복재 포설위치		지반조사 위치	
A	35°07'13.43" N / 129°03'48.72" E	St.1	35°07'12.84" N / 129°03'49.44" E
B	35°07'10.18" N / 129°03'48.72" E	St.2	35°07'10.76" N / 129°03'49.44" E
C	35°07'10.18" N / 129°03'52.67" E	St.3	35°07'10.76" N / 129°03'51.97" E
D	35°07'13.43" N / 129°03'52.67" E	St.4	35°07'12.84" N / 129°03'51.97" E





- 일반적으로 BIPS(Borehole Image Processing System)는 암반 내 불연속면 발달상태(주향, 경사, 간격 등) 및 충전물 유무파악을 위하여 시행하는 것으로 공벽영상을 Real Color로 재현, 암반종류 및 상태, 불연속면의 분포상태 등을 파악하기 위한 것임
- 본 과업에서는 공벽영상을 Real Color로 재현할 수 있는 점에 착안하여 교란되기 쉬운 연약 퇴적토 상에 포설되는 피복재에 대해 직접 사진을 찍어 정밀한 피복상태를 확인하기 위하여 조사를 수행하였고, 조사과정은 다음과 같음





- 1) 해상바지 위에서 시추기를 이용하여 케이싱과 아크릴 관을 해저지반에 삽입
- 2) 삽입된 케이싱내로 BIPS 센서(Probe)를 시험공 내에 삽입
- 3) 센서(Probe)를 삽입한 후 윈치에 부착되어 있는 속도조절기를 이용하여 0.5m/min의 속도로 내리거나 올리면서 심도에 따라 시추공벽을 연속적으로 360°촬영한 다음 이를 분석하여 지층에 대한 원위치 정보를 취득
- 4) 기록된 이미지를 PC에 백업받은 후, GMI\*Imager프로그램을 통하여 불연속면을 발췌하고 정보를 입력
- 5) 입력된 정보를 심도별 및 불연속면의 특성별로 정렬하여 로즈다이아그램 및 스트레오넷을 통하여 불연속면, 파쇄대, 단층대 등에 대한 각종 정보를 추정·해석



[그림. V-가-58] 시추공영상 촬영의 모식도

[표. V-가-37] 지반조사 투입장비

장비명	제품명	규격	수량	비고
시추기	Power 4000SD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 압드릴시추기</li> </ul>	1대	
SEP Barge	한영호	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작업대 : 11m×11m×2m(H)</li> <li>• SPUD : 24m×φ406.4</li> </ul>	1대	
에인선	301 일신호	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 선박번호 : BSR-927784</li> <li>• 톤수 : 22 ton</li> </ul>	1대	

				
BIPS	Surface Unit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Micro-logger 2</li> <li>- Size : 284mm(w) x 240mm(l) x 56mm(h)</li> <li>- Weight : 2.8kg</li> <li>- Power : 12VDC (eg. vehicle battery)</li> </ul>	1개	
	Borehole Camera Probe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OBI Probe</li> <li>- Size : 50mm(D), 1.51m(L)</li> <li>- Resolution <ul style="list-style-type: none"> <li>* radial : 720 pixels/360° maximum</li> <li>* vertical : 1mm minimum</li> </ul> </li> <li>- Sensor type : CCD 768x494 elements</li> <li>- Orientation : Any</li> <li>- Lighting <ul style="list-style-type: none"> <li>*Internal 'white' LEDs ; external for diameters up to 300mm (12in).</li> <li>*External lighthouse for larger diameters available.</li> </ul> </li> </ul>	1개	
	Winch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mini Winch</li> <li>- Capacity : 150m 3/16" cable</li> <li>- Speed <ul style="list-style-type: none"> <li>*0~17.5m/min (12VDC) on full drum</li> <li>*0~30m/min (24VDC) on full drum</li> </ul> </li> <li>- Motor : 550W at 24VDC</li> <li>- Size : 340 (w) x 400 (l) x 302mm (h)</li> </ul>	1개	

- BIPS 촬영에서는 혼탁한 해저구간의 영향으로 명확한 피복재 포설두께 및 심도별 포설재의 입자 크기 등을 확인하기가 어려운 것으로 나타남
- SPT 샘플러를 시추기에 의해 관입하여 관입시의 저항정도를 통하여 포설재의 두께를 개략적으로 판단할 수 있었으며 채취된 시료의 육안관찰을 통해 포설재 상하부의 입자크기의 변화를 파악할 수 있었음
- 육안관찰 결과 피복재 포설 시 원지반점토와 혼합되어 피복재는 전체적으로 암회색을 띠는 것으로 판단되고 상부층 입자는 가는 입자의 모래이며 하부층 입자는 상대적으로 굵은 제올라이트로 확인<그림 V-가-60>.
- 포설재 확인 결과는 표 V-가-38과 같으며, 각 영상은 그림 V-가-61과 같음
- 포설재의 두께는 위치별로 약 0.54 ~ 0.57 m의 범위로 판단되고, BIPS 결과상으로 심도



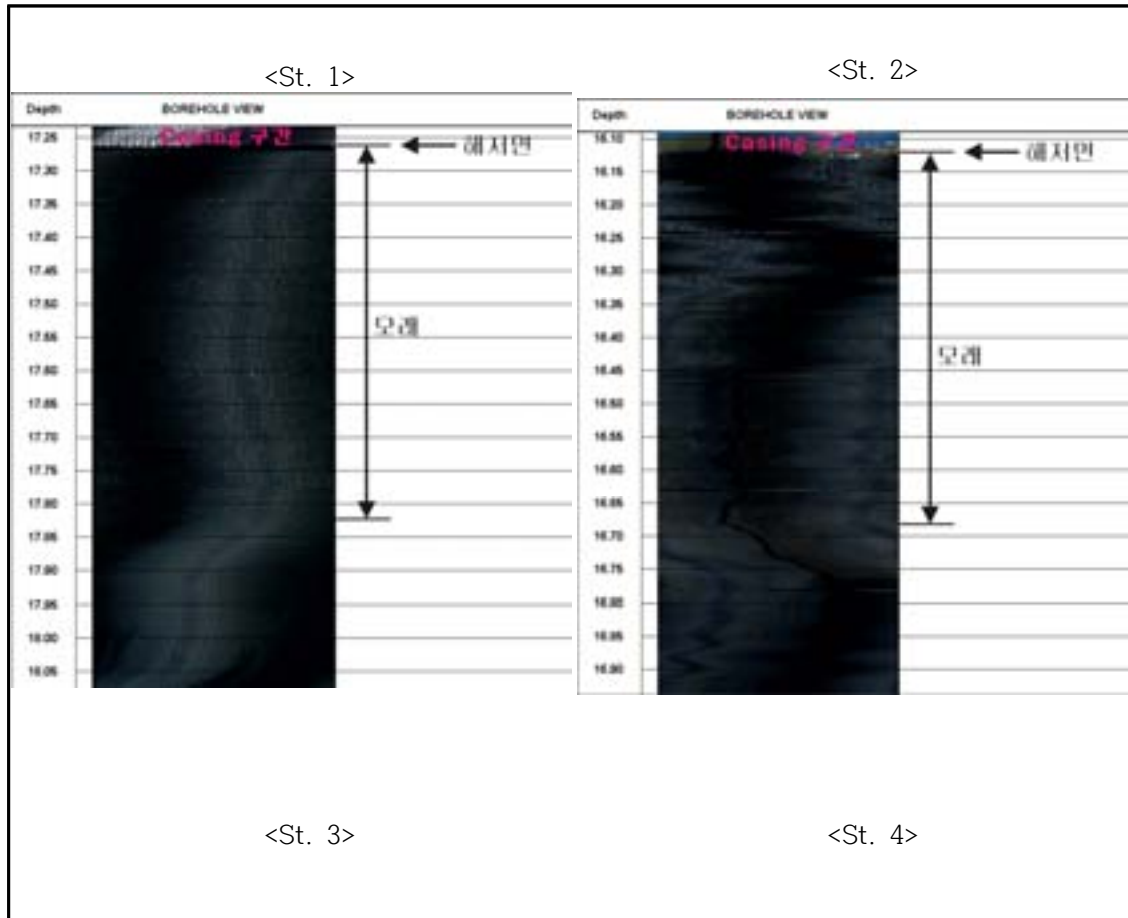
별 포설재의 입자 구분은 명확한 결과를 도출하지 못함

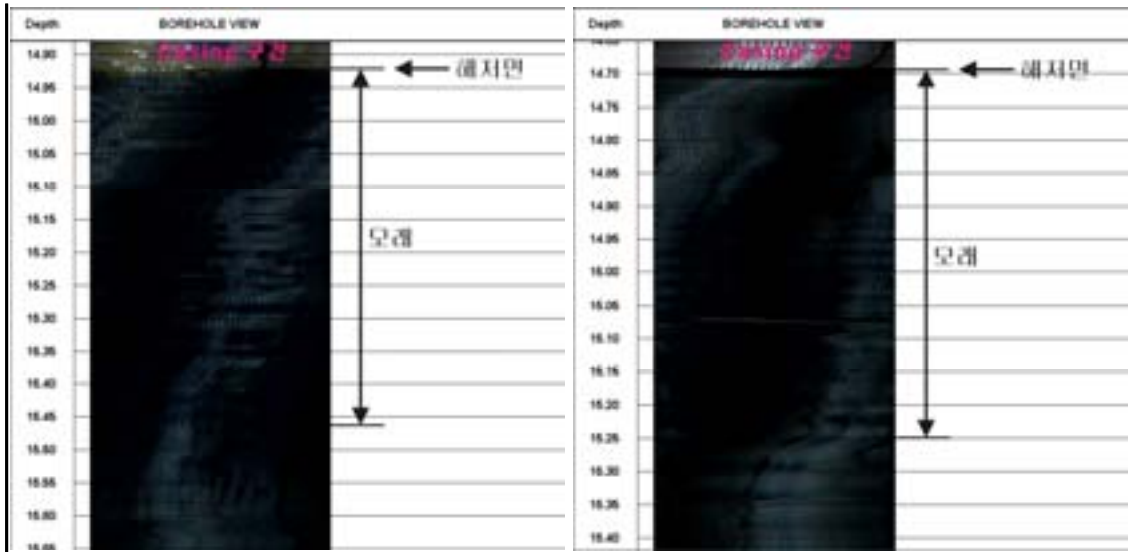


[그림. V-가-59] 포설재 상하부의 입자크기 변화

[표. V-가-38] 포설재 확인 결과

공번	해저면 내 피복층 심도(m)	피복층 두께(m)
ST-1	17.26 ~ 17.83	0.57
ST-2	16.12 ~ 16.68	0.56
ST-3	14.92 ~ 15.46	0.54
ST-4	14.69 ~ 15.25	0.56





[그림. V-가-60] 시추공영상 촬영의 모식도

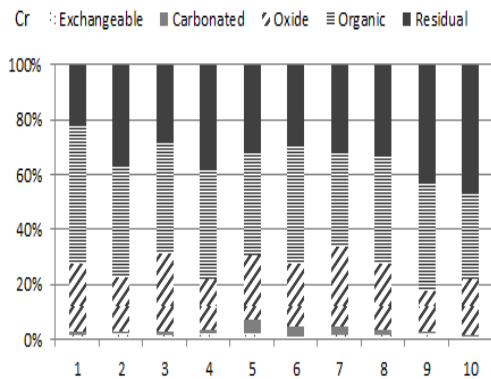
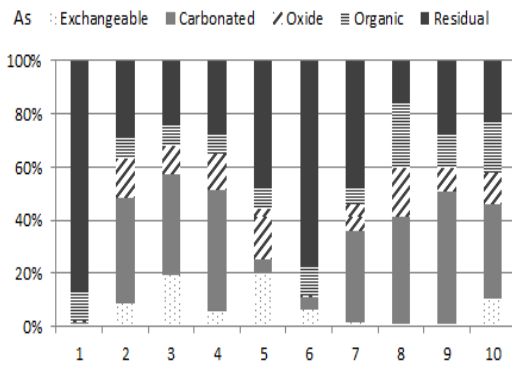
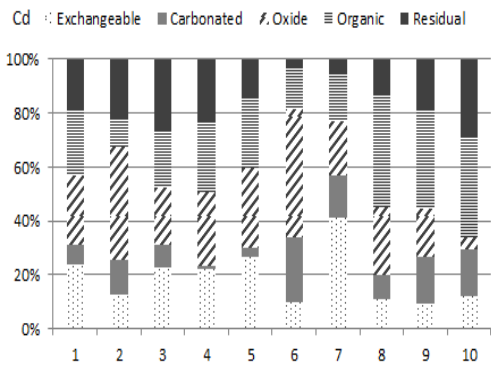
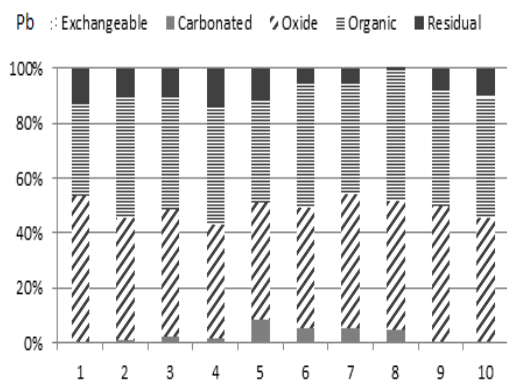
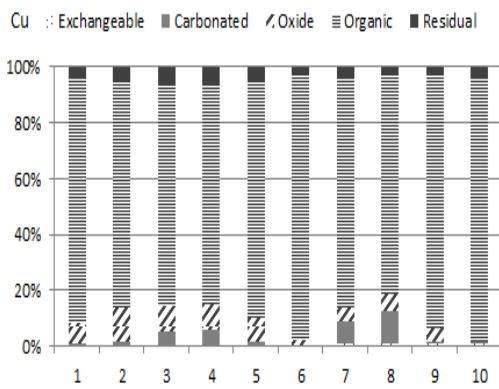
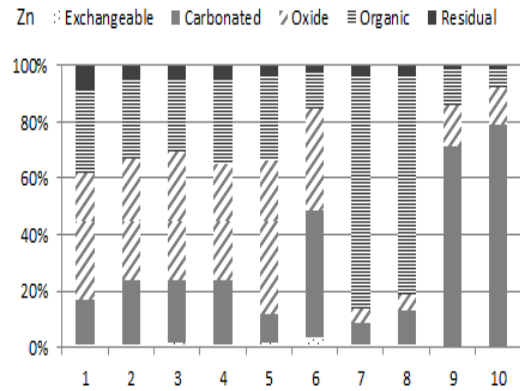
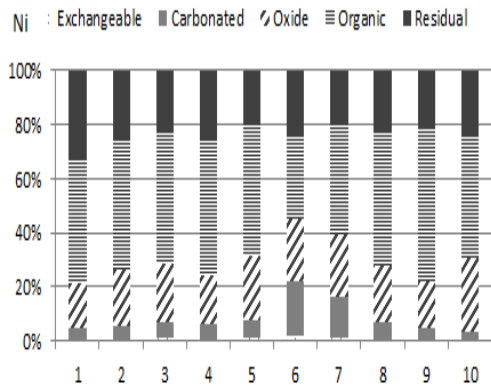
② 피복 정화 효율 성능 평가

㉠ 피복시공 전 K항 중금속 관련 해양퇴적물 특성 평가

- 부산 K항에서 현장시공 전·후 모니터링을 수행하여 퇴적물의 중금속 오염도 측정
- 표 V-가-39에서 중금속 형태는 대체로 값이 높고, 특히 Zn, Cu가 기준을 초과하고 있음을 알 수 있음
- 이러한 값으로부터 G항의 퇴적물은 중금속오염물질의 오염현상을 나타내고 있는 것으로 평가

[표. V-가-39] 부산항 시공 전 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 (단위 PPM)

	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Cr
1	16.59	85.17	35.32	19.17	0.34	1.41	36.62
2	14.28	74.44	32.75	17.61	0.26	1.30	30.68
3	15.02	83.03	30.30	18.80	0.30	2.47	34.70
4	8.70	60.26	21.74	10.72	0.21	0.48	18.04
5	20.52	391.20	98.96	38.68	1.00	2.02	43.35
6	20.95	445.56	127.33	43.95	1.14	1.55	47.19
7	18.24	185.36	69.40	29.72	0.47	1.52	43.71
8	17.28	114.23	52.41	20.85	0.21	1.08	37.29
9	17.35	111.63	50.33	21.66	0.27	0.70	37.06
10	13.07	76.82	37.19	18.27	0.24	1.68	24.19
기준	23-52	200-410	24-108	50-220	0.68-4.2	9-41.6	80-370



[그림. V-가-61] 부산항 1-10지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과

㉔ **피복시공 후 중금속 관련 해양퇴적물 특성 평가**

- 표 V-가-40에서 중금속 형태는 대체로 Ni, Zn, Cu 값이 높은 값을 보임
- 표 V-가-41은 대조군은 피복한 퇴적물의 오염도 보다 기준을 초과한 값을 보이고 있음
- 이러한 값으로부터 퇴적물은 중금속오염물질의 오염현상이 피복전과 후의 값이 달라짐을 나타내고 있는 것으로 평가

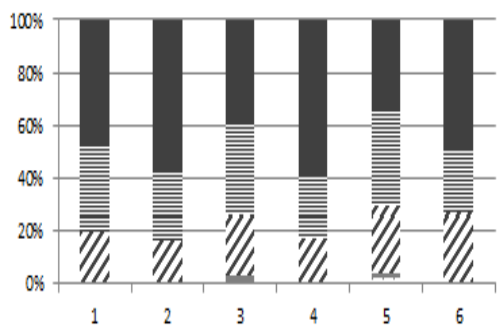
**[표. V-가-40] 부산항 시공 후 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 (단위 PPM)**

	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As	Cr
1	19.6	137.9	56.9	24.3	0.4	7.3	49.0
2	28.6	120.3	30.0	23.9	0.3	7.1	61.7
3	7.7	54.6	22.5	16.9	0.1	5.2	20.2
4	22.7	199.0	114.4	37.4	0.4	7.7	59.8
5	5.9	40.0	15.8	13.5	0.1	3.9	16.2
기준	23-52	200-410	24-108	50-220	0.68-4.2	9-41.6	80-370

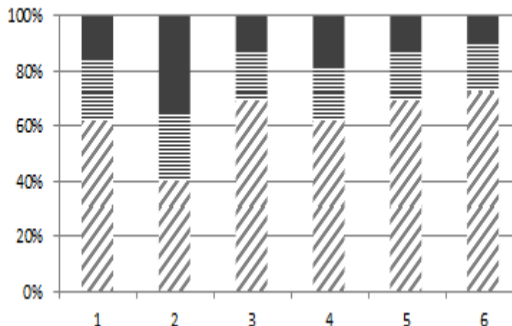
**[표. V-가-41] 부산항 대조군 해양퇴적물 내의 중금속 존재 형태 (단위 PPM)**

	Exchangeable	carbonate	Oxide	Organic	Residual	Total	기준
Cr	0.120	0.134	24.085	13.899	32.862	71.1	80-370
Ni	0.182	0.103	7.288	6.475	13.953	28.0	23-52
Cu	0.090	0.005	0.123	14.605	13.178	28.0	24-108
Zn	3.721	0.151	368.612	84.346	51.370	508.2	200-410
As	0.328	0.020	1.710	0.346	7.896	10.3	9-41.6
Cd	0.294	0.005	0.543	0.088	0.071	1.0	0.68-4.21
Pb	0.293	0.320	29.085	19.133	11.270	60.1	50-220

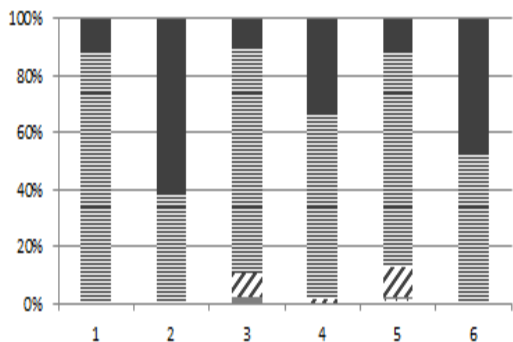
Ni : Exchangeable ■ Carbonated ▽ Oxide ≡ Organic ■ Residual



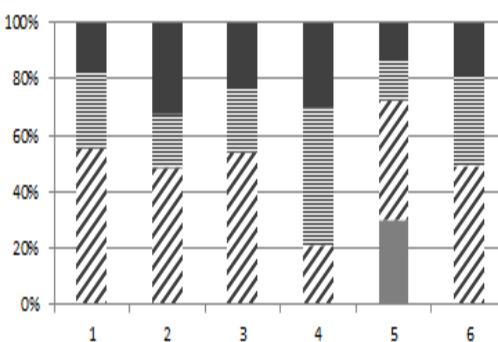
Zn : Exchangeable ■ Carbonated ▽ Oxide ≡ Organic ■ Residual



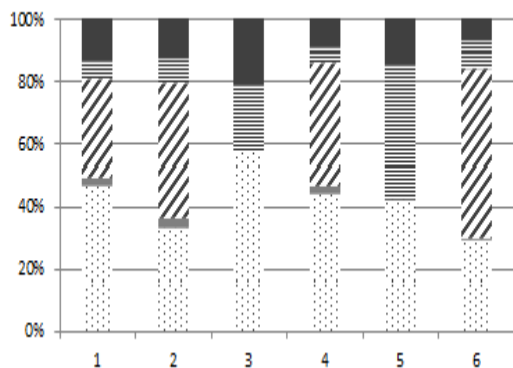
Cu : Exchangeable ■ Carbonated ▽ Oxide ≡ Organic ■ Residual



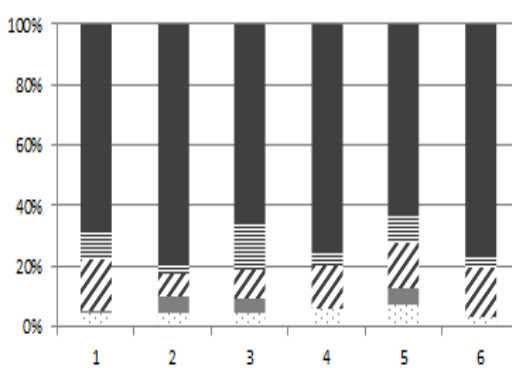
Pb : Exchangeable ■ Carbonated ▽ Oxide ≡ Organic ■ Residual



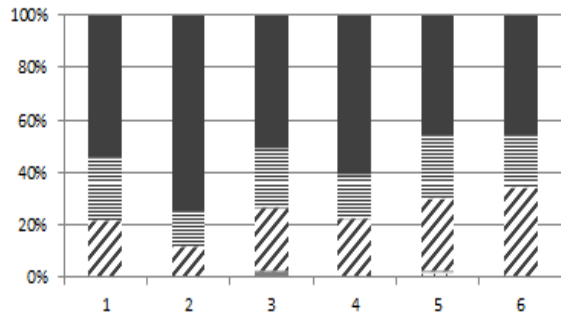
Cd : Exchangeable ■ Carbonated ▽ Oxide ≡ Organic ■ Residual



As : Exchangeable ■ Carbonated ▽ Oxide ≡ Organic ■ Residual



Cr : Exchangeable ■ Carbonated ▽ Oxide ≡ Organic ■ Residual



[그림. V-가-62] 부산항 1-5,7지점에 대한 오염퇴적물 내 중금속 연속추출 결과

나. 오염정화를 위한 생물소재 개발 및 평가

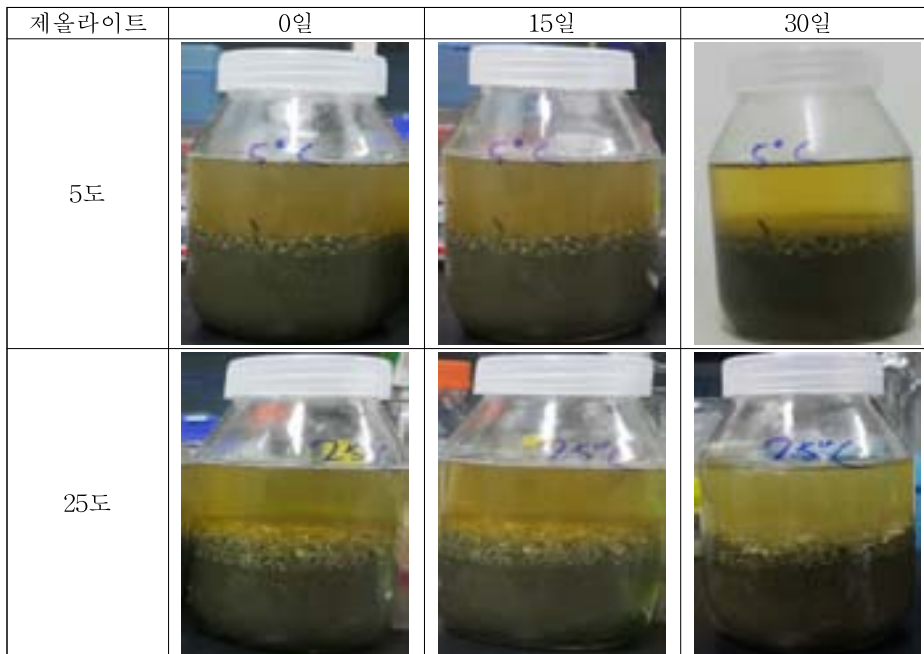
(1) 미생물 담체를 이용한 중금속 안정화에 있어서 실제 현장에서 적용 가능한 생물학적 정화기술 확립

(가) 다성분의 중금속 오염성분을 동시에 처리할 수 있는 중금속 안정화기술 확립

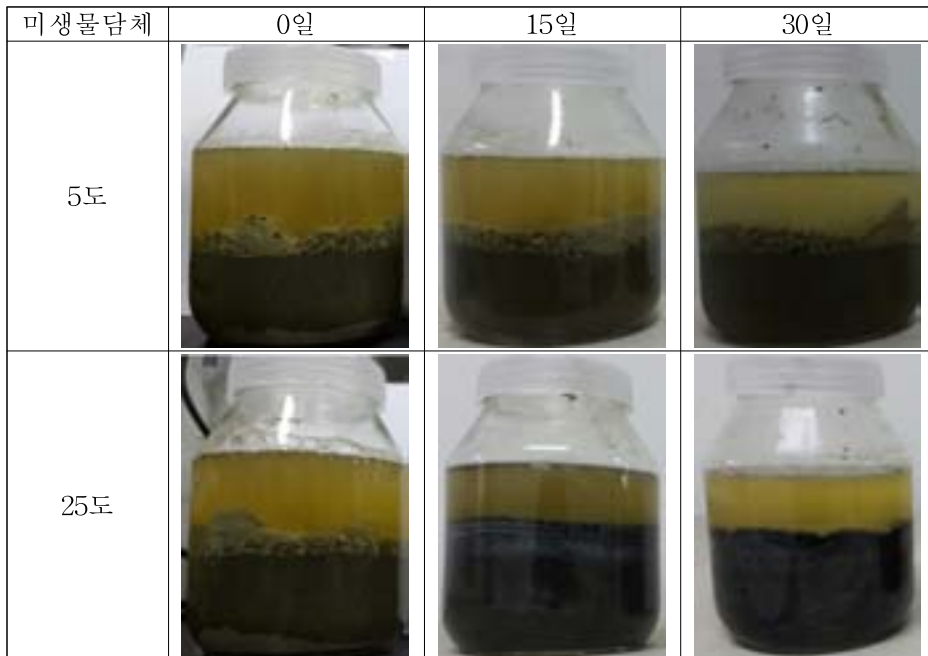
- 실제 해양오염퇴적물 환경은 단일중금속이 아닌 여러 종류의 중금속이 다른 농도로 혼재되어 있음. 때문에 실제 환경에 적용하기 전에 Cu, Zn, Ni, Cr에 의해 오염된 퇴적물과 인공바닷물배지로 인공해양환경을 조성하여 미생물담체 ball을 피복함. 이 후 미생물 담체 ball에 의한 제올라이트의 미생물담체화를 관찰하고 제올라이트와 미생물담체의 중금속 안정화특성을 확인함.

[표. V-나-1] 중금속 오염 퇴적물의 중금속별 농도

trace metals	Cu		Zn		Ni		Cr	
	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
1	5.81	0.33	18.61	2.50	5.36	1.54	5.05	1.39
2	22.65	10.75	361.24	45.23	32.79	8.89	12.29	3.73
3	34.87	8.96	351.97	28.94	39.83	9.70	86.57	25.63
4	1074.79	189.76	560.67	77.62	6.37	2.53	16.14	5.48
5	68.14	11.68	253.88	33.17	11.57	1.11	27.68	2.78

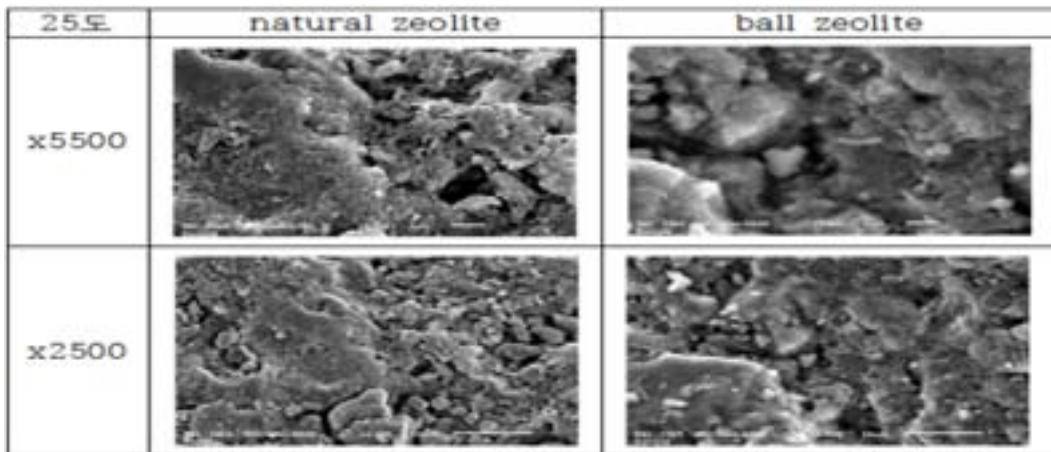


[그림. V-나-1] 인공 오염퇴적물 환경에서 제올라이트의 중금속 안정화모델



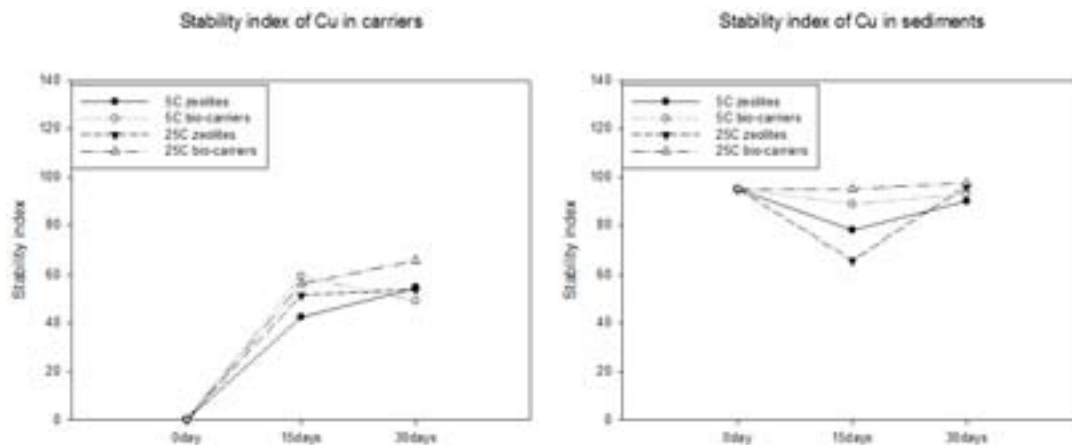
[그림. V-나-2] 인공 오염퇴적물 환경에서 미생물담체의 중금속 안정화모델

- 25°C 온도조건에서 미생물담체 ball이 시간이 지남에 따라 분해되고 균과 제올라이트의 직접적인 접촉으로 인하여 제올라이트가 미생물담체화가 되는 것을 육안 상으로 확인할 수 있었음. 그러나 5°C에서는 ball의 완벽한 분해가 이뤄지지 않았고 제올라이트의 미생물담체화도 발생하지 않았다는 것을 확인함.



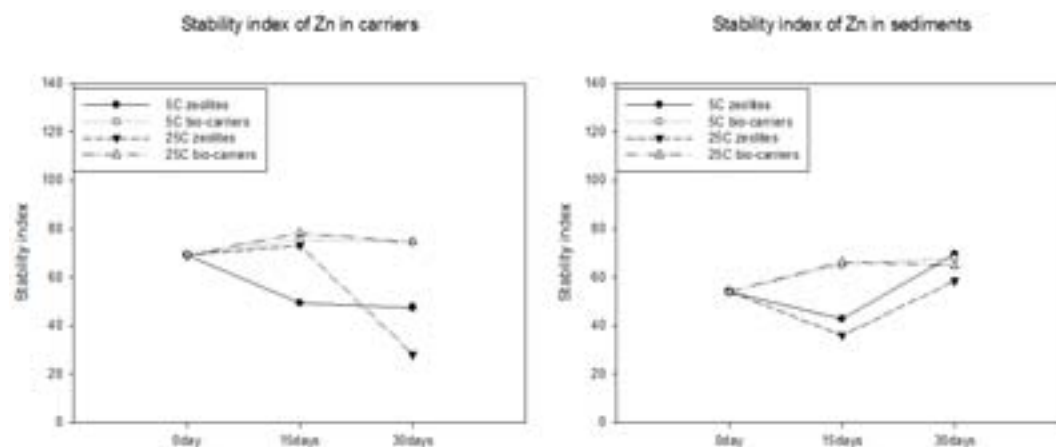
[그림. V-나-3] 30일 후 25°C 온도조건에서 미생물담체 ball과 접촉한 제올라이트의 SEM image

- 제올라이트의 미생물담체화가 육안으로 확인된 25°C 온도조건에서 제올라이트의 SEM image를 얻은 결과 제올라이트에 미생물담체가 잘 고정되었음을 확인함.
- 중금속 안정화도 판별은 중금속연속추출방법(Tessier et al. 1979)을 사용하여 안정화도별로 1. exchangeable, 2. bound to carbonate, 3. bound to Fe-Mn oxide 4. bound to organic 5. residual 상으로 나눔. 여기서 fraction 4와 fraction 5의 합을 stability index라 정의하여 피복소재와 반응 전후 15일 30일의 안정도 변화를 관별함.



[그림. V-나-4] 시간의 변화에 따른 Cu에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화

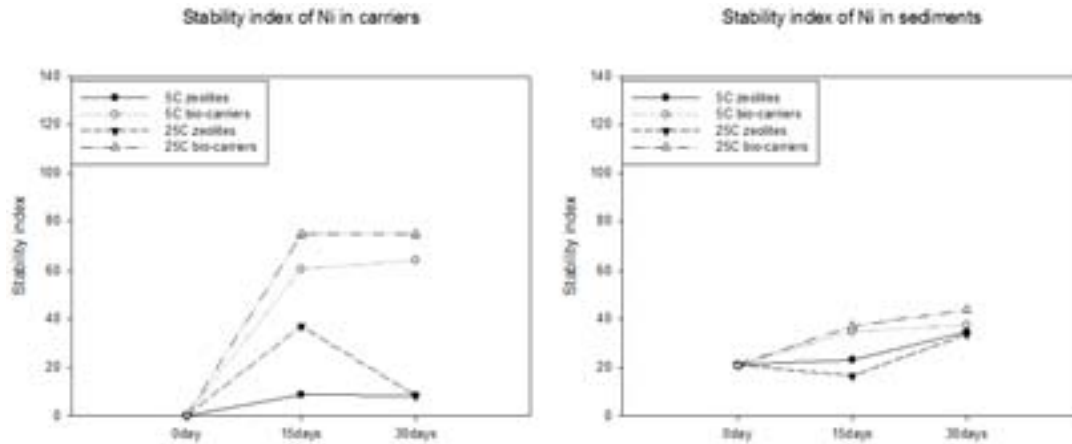
- Cu의 경우 25°C 미생물담체가 피복되었을 때, 15일 후 미생물담체의 stability index는 56.18로 두 번째의 안정도를 갖으나 30일 후 65.90으로 가장 높은 안정도를 나타냄. 퇴적물의 경우는 15일 후 94.86, 30일 후 97.57로 가장 높은 안정도를 나타냄. 이는 해양모사 환경에서 미생물담체의 중금속 안정화도는 온도에 의존한다는 것을 나타냄.



[그림. V-나-5] 시간의 변화에 따른 Zn에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화

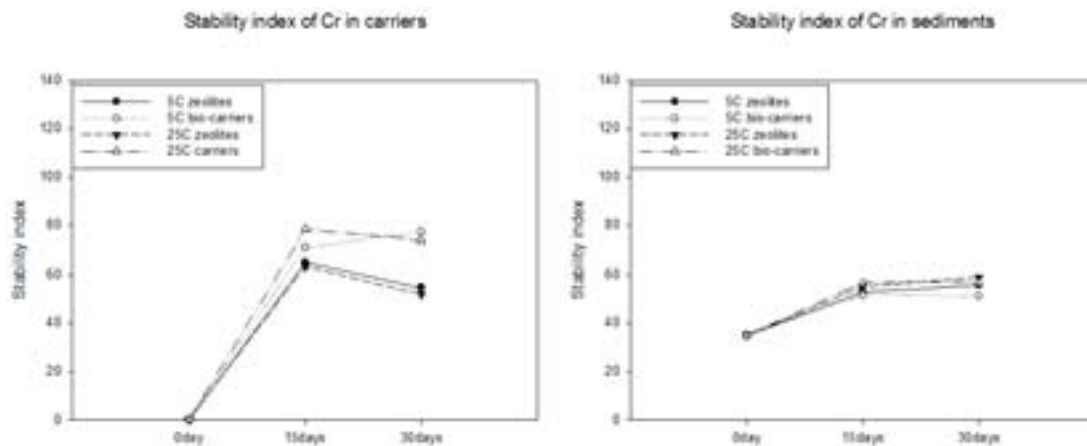
- Zn은 미생물담체가 피복될 경우 미생물담체의 stability index는 15일 후 78.20, 30일 후 74.55로 가장 높은 안정도를 나타내었으나 시간이 지난 후 안정도가 다소 낮아진 것을 확인함. 미생물담체의 퇴적물은 15일 후 66.31으로 가장 높았으나 30일 후 안정도가 감소하여 5°C 제올라이트 퇴적물의 stability index가 69.45로 가장 높은 안정도를 나타





[그림. V-나-6] 시간의 변화에 따른 Ni에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화

- Ni은 25℃ 조건에서 미생물담체가 피복되었을 경우 미생물담체와 퇴적물의 stability index가 가장 좋은 결과를 나타냄. 미생물담체의 경우 15일 후 74.69, 30일 후 74.80이었으며, 퇴적물의 경우 15일 후 37.04, 30일 후 43.83의 결과를 얻음.
- Cr의 경우 25℃ 조건에서 미생물담체와 제올라이트의 stability index가 높은 것을 확인함. 15일 후 미생물담체는 78.38, 제올라이트는 71.26으로 미생물담체가 가장 좋은 결과를 나타냄. 그러나 30일 후 미생물담체의 안정도가 소폭 감소하여 73.93, 제올라이트의 안정도가 증가하여 77.27로 제올라이트의 안정도가 가장 높음을 확인함, 퇴적물의 경우 피복소재와 관계없이 안정도가 일정한 경향으로 증가하는 것을 확인함. Cr은 산소와 쉽게 결합하여 음이온상태로 존재하는 음이온성 중금속으로 sulfide와 결합도, bioaccumulation의 효율이 감소하고 상대적으로 온도에만 의존하는 biosorption에 의존하여 나타난 결과라고 사료됨.



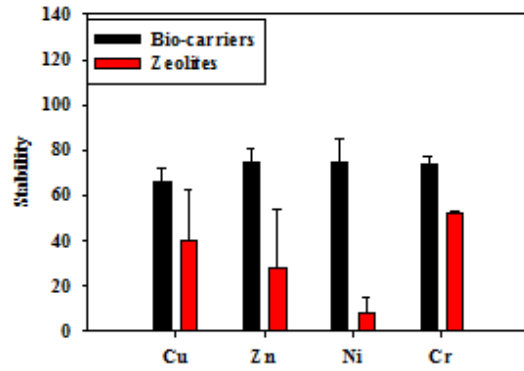
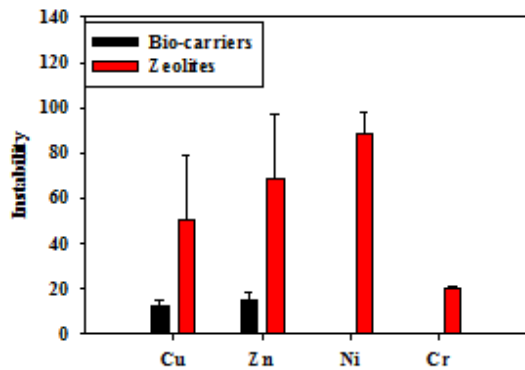
[그림. V-나-7] 시간의 변화에 따른 Cr에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화

- 피복소재로서 미생물담체를 활용한 실험결과를 정리하면 다음과 같음.

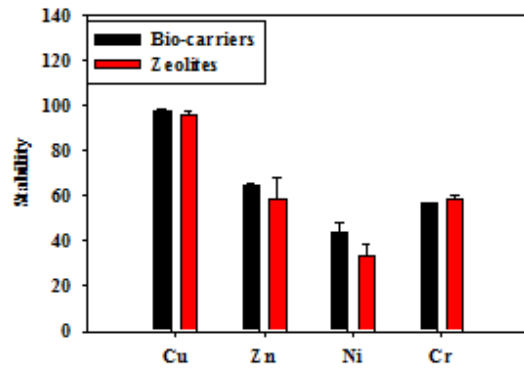
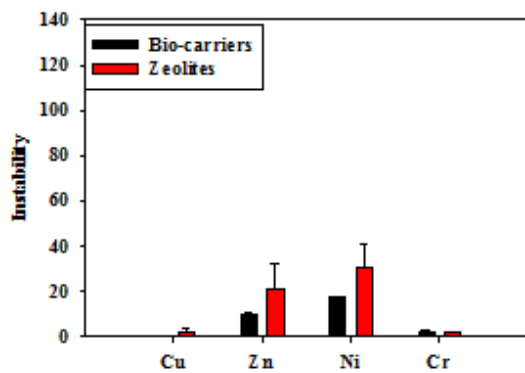
Fraction 1. Exchangeable  
 Fraction 2. Bound to carbonate

Fraction 4. Bound to organic  
 Fraction 5. Residual

[Capping materials]



[Sediment]

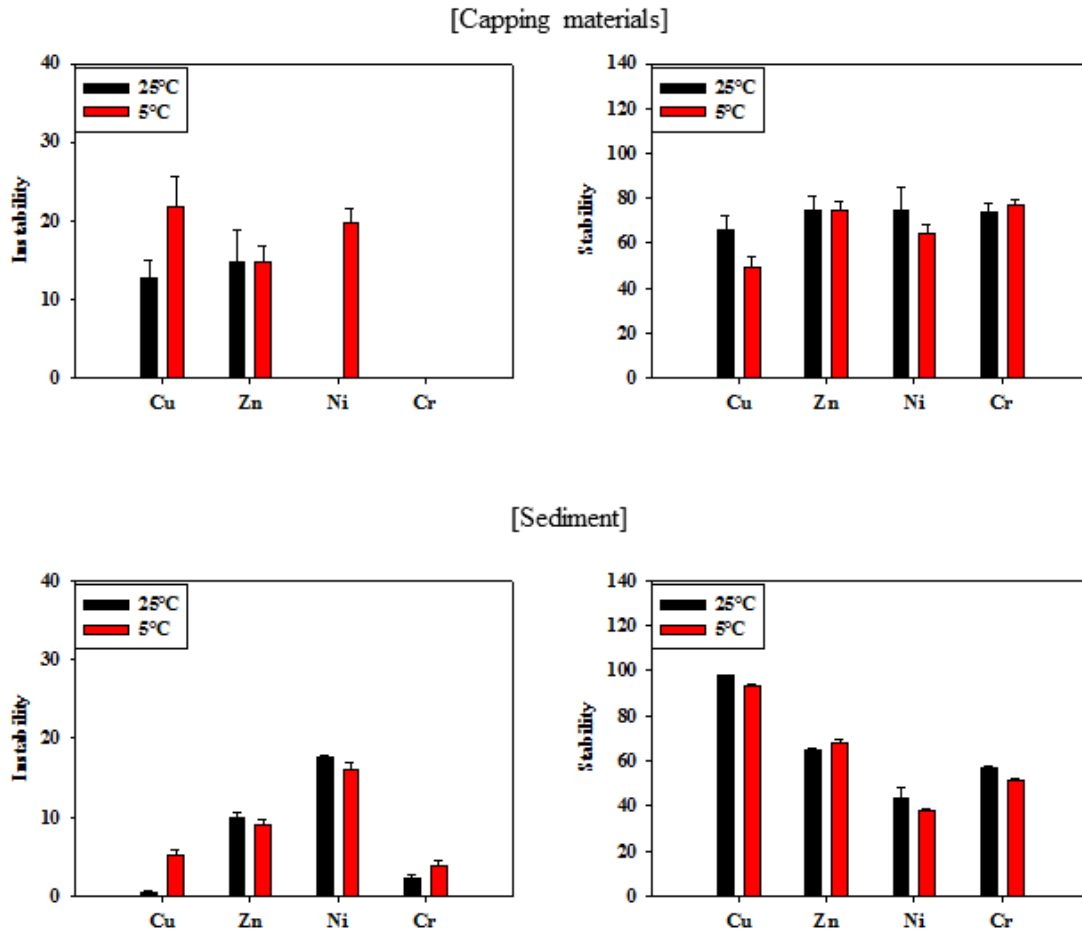


[그림. V-나-8] 미생물담체와 제올라이트와의 피복소재로서 활용후 중금속 안정도

- 그림 V-나-8을 살펴보면, 퇴적물 상의 중금속은 10%가량 피복소재로 이동을 하며, 피복 후 30일이 경과되었을 경우 미생물담체와 제올라이트를 피복소재로 사용하였을 경우 퇴적물 상의 중금속의 안정도는 큰 변화는 없음.
- 그러나, 미생물담체로 이동된 중금속의 경우 제올라이트를 피복소재로 사용하였을 때 제올라이트로 이동된 중금속과 비교하면 미생물담체로 이동된 중금속의 경우 안정화도는 크게 향상된 것을 알 수 있음.

Fraction 1. Exchangeable  
 Fraction 2. Bound to carbonate

Fraction 4. Bound to organic  
 Fraction 5. Residual



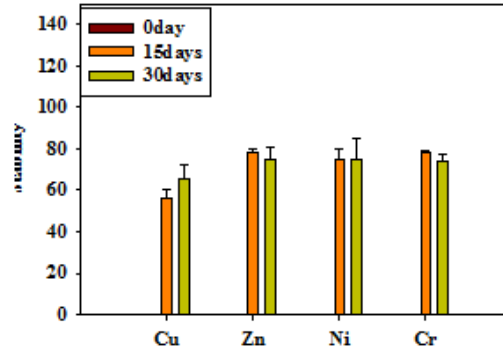
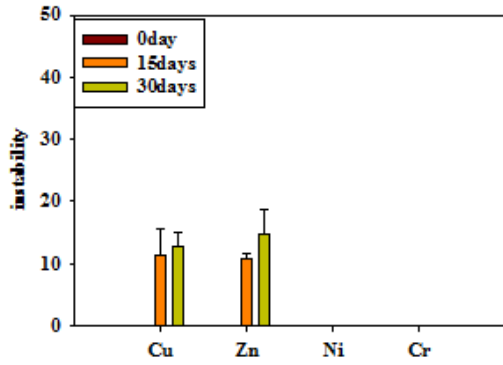
[그림. V-나-9] 미생물담체의 피복소재로 활용후 온도의 영향

- 그림 V-나-9의 피복시의 온도에 따른 영향을 살펴보면, 30일이 경과 후 퇴적물 상의 중금속의 안정화도는 크게 변화가 없으나 피복소재인 미생물담체로 이동된 중금속의 경우 25도의 경우 불안정화 형태의 중금속인 fraction 1,2는 크게 감소된 것으로 알 수 있음. 이는 온도에 따른 제올라이트에 고정화된 미생물의 활성에 의한 영향으로 판단되며, 미생물은 중금속을 안정화시키는데 역할을 한다고 판단됨.

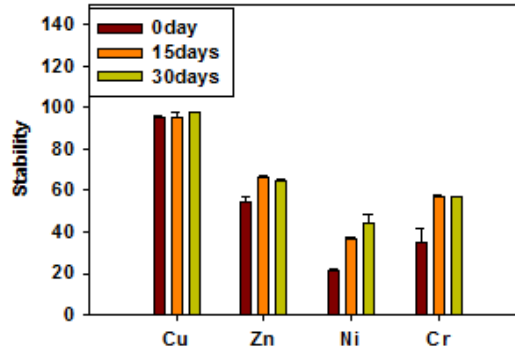
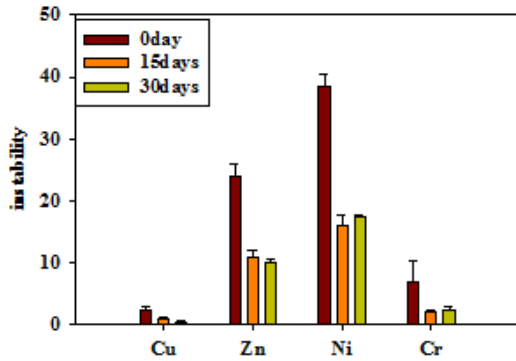
Fraction 1. Exchangeable  
 Fraction 2. Bound to carbonate

Fraction 4. Bound to organic  
 Fraction 5. Residual

[Capping materials]



[Sediment]



[그림. V-나-10] 미생물담체의 피복소재로 활용후 시간의 영향

- 그림 V-나-10의 미생물담체를 활용한 피복에 대한 시간에 따른 영향을 살펴보면, 미생물담체 상의 중금속의 경우 15일과 30일이 경과 후에 대해서 큰 변화는 살펴볼 수 없었음.
- 퇴적물 상의 중금속의 안정화도의 경우 불안정화 형태의 중금속인 fraction 1,2는 15일이 경과된 후부터 크게 감소된 것으로 알 수 있으나, 15일과 30일 상의 경우 큰 변화를 볼 수 없었음.
- 종합적으로 15일, 30일 경우 시간에 따른 영향은 크게 살펴볼 수 없었음. 시간을 더욱 장기적으로 살펴본다면 시간에 따른 영향을 관찰할 수 있을 것으로 사료됨.

(나) 미생물담체 소규모 해역 시범적용 및 중금속 안정화 모니터링 수행



[그림. V-나-11] 미생물담체 ball을 이용한 실제해양환경의 다성분 중금속 오염퇴적물 안정화 실험 (a)안정화 실험샘플, (b)실험진행준비, (c)현장적용사진

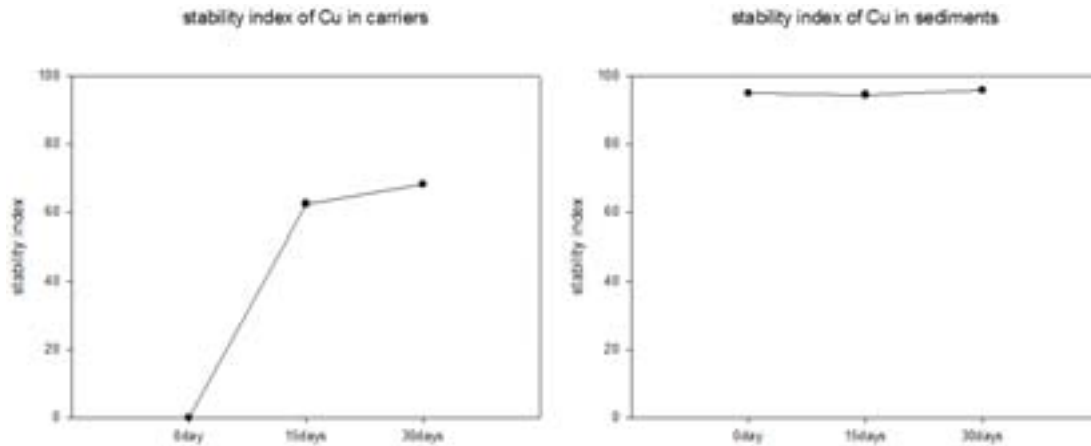


[그림. V-나-12] 실제 해양환경에서 미생물담체 ball의 중금속 안정화 모델 (a)해양환경 적용 전, (b)적용 15일 후, (c)적용 30일 후

- Cu, Zn, Ni, Cr이 혼합된 다성분 중금속 해양퇴적물의 동시처리를 위한 피복소재로 미생물담체 ball을 선정함. 균주를 고정화하여 사용하기 때문에 온도에 매우 의존하는 실험결과가 나타남. 이를 바탕으로 실제해양환경에서 미생물담체 ball의 다성분 중금속 안정화 효율을 확인하기 위한 실험을 계획함.
- 다성분의 중금속 오염성분을 동시에 처리할 수 있는 중금속 안정화기술 확립 실험에 사용된 동일한 퇴적물에 미생물담체 ball을 올리고 그 위로 샘플이 휩쓸려 나가는 것을 방지하기 위한 자갈을 채워 샘플을 제작함. 샘플을 수심 약 5m에 고정시켜 해수와 직접적인 접촉을 유지하여 실제 해양환경에서 미생물담체 ball의 다성분계 중금속 처리능력을

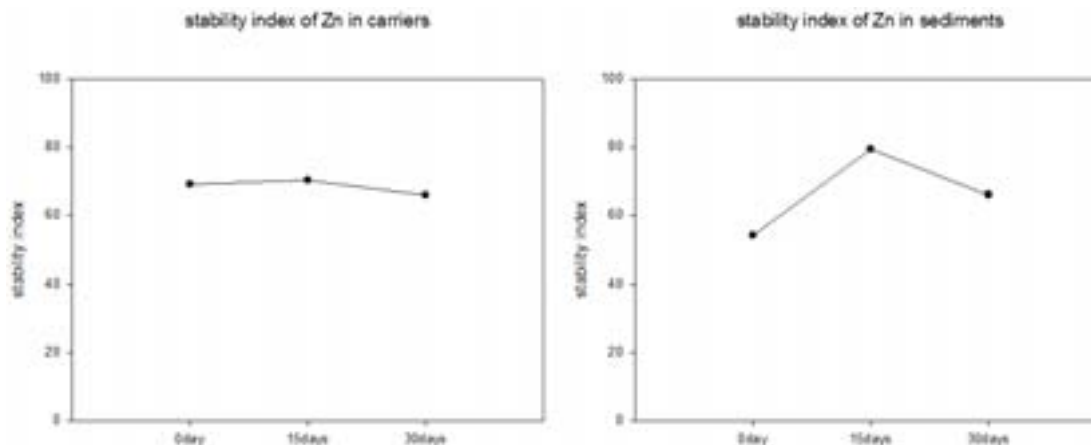
확인하는 실험을 진행함.

- 실제 해양환경 또한 미생물담체ball에 의한 제올라이트의 미생물담체화가 진행되었음을 육안으로 확인할 수 있었음.
- Cu의 경우 미생물담체는 시간이 지남에 따라 stability index가 증가하는 경향을 보임. 15일 후에는 62.41, 30일 후에는 68.12로 상승하였음. 퇴적물의 경우에는 15일 후 94.45가 되어 초기의 stability index값인 94.87보다 미세하게 감소하나, 30일 후에는 95.84로 상승함.



[그림. V-나-13] 시간의 변화에 따른 Cu에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화

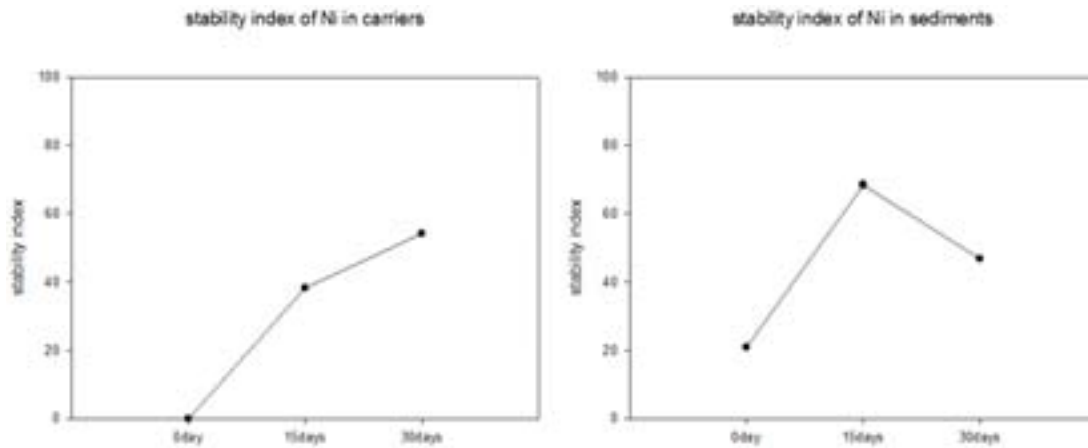
- Zn의 경우 미생물담체의 stability index는 15일 후 70.23으로 증가하나, 30일 후 65.84로 소폭 감소하였으며 퇴적물 또한 15일 후 79.25 증가하나 30일 후 65.94로 감소하여 경우 미생물담체와 퇴적물의 stability index 값이 15일에는 증가하나 30일 후에는 감소하는 공통적인 경향을 나타냄. 실제 해양환경은 open system이고 지속적인 오염물질의 유입으로 인하여 해수를 통해 추가적인 중금속 오염물질이 유입되었을 것이라고 사료됨.



[그림. V-나-14] 시간의 변화에 따른 Zn에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화

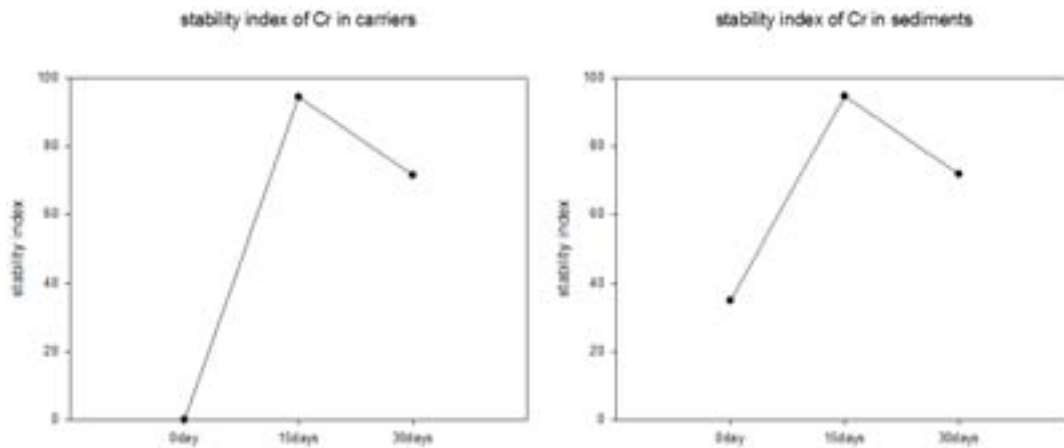
- Ni의 경우 미생물담체는 시간이 지남에 따라 상승하는 경향을 나타냄. stability index가

15일 후에는 38.23, 30일 후에는 54.19로 상승하였음. 퇴적물의 경우에는 15일 후 68.48로 가장 안정해지나 30일 후 46.86으로 감소하여 안정도가 감소하는 것을 확인함.



[그림. V-나-15] 시간의 변화에 따른 Ni에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화

- Cr의 경우 미생물담체의 stability index는 15일 후 94.30으로 증가하나, 30일 후 71.36으로 소폭 감소하였으며, 퇴적물 또한 15일 후 94.72로 증가하나 30일 후 71.71로 감소하여 경우 미생물담체와 퇴적물의 stability index 값이 15일에는 증가하나 30일 후에는 감소하는 공통적인 경향을 나타냄. 실제 해양환경은 open system이고 지속적인 오염물질의 유입으로 인하여 해수를 통해 추가적인 중금속 오염물질이 유입되었을 것이라고 사료됨.

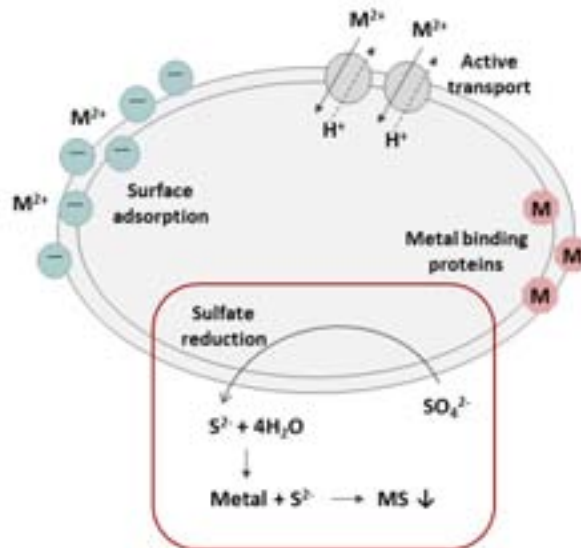


[그림. V-나-16] 시간의 변화에 따른 Cr에 대한 피복소재와 퇴적물의 stability index 변화

- 피복 후 15일 후 stability index값이 증가하는 것을 확인할 수 있으나, 실제 해양환경 특성상 추가 오염물질의 유입으로 인하여 30일에는 대체적으로 안정도가 감소하는 것을 인함.

(다) 미생물 담체를 활용한 해양오염 퇴적물 내 중금속 안정화 기술 확립

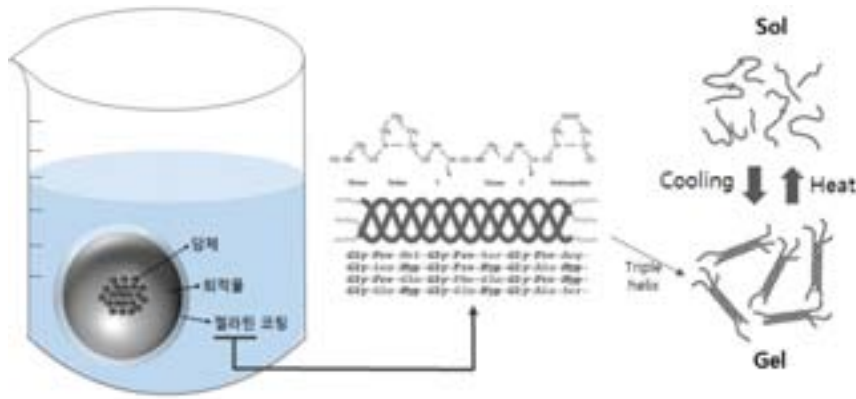
- 다년도의 연구 기간 동안 본 과제에서는 중금속 안정화 및 제거능력을 보유한 다양한 균주를 검토
- 두가지 형태의 메커니즘으로 해양오염 퇴적물 내 중금속을 효과적으로 제거 및 안정화시킬 수 있는 매우 우수한 균주인 황산염 환원균, *Desulfovibrio desulfuricans*을 최종적으로 선택
- 황산염 환원균인 *D. desulfuricans*이 중금속을 제거하는 메커니즘은 그림 V-나-14와 같음



[그림. V-나-17] 황산염 환원균의 중금속 제거 메커니즘 모식도

- 미생물을 담지하는 담체로서 순환골재, 재강슬래그, 활성탄, 천연 제올라이트 등 여러 가지 무기물을 검토
- 경제성 및 환경 친화성을 포함하여 중금속 제거능을 검토한 결과 천연 제올라이트로 최종적으로 선택
- 최종적으로 선택된 미생물 균주와 담체에 대한 균주배양 최적화, 담체 표면처리를 포함한 기초적인 실험을 완료
- 이를 해양환경에 적용하기 위한 전략으로 그림 V-나-15와 같이 gelatin을 이용하여 ball 형태로 제작





[그림. V-나-18] 미생물담체 ball 제작 모식도

- 제작된 ball형태의 미생물 담체를 해양오염퇴적물-천연 제올라이트-ball 형태의 미생물 담체 층으로 먼저 해양모사 환경에 적용하여 퇴적물 내의 중금속 용출 차단, 퇴적물 내의 중금속의 안정화 형상 변화를 검토
- 최종적으로 실제 부산 해역에서 해양오염퇴적물-천연 제올라이트-ball 형태 미생물 담체 모형물을 만들어 적용
- 적용 결과, 해양오염 퇴적물 내의 중금속의 형상이 시간이 지남에 따라 초기 대비 안정화 되는 경향을 관찰
- 이러한 실험결과를 토대로 최종적으로 본 연구과제에서 개발한 ball형태의 미생물 담체는 해양오염 퇴적물 내의 중금속을 효과적으로 안정화 시킬 수 있는 기술로 판단

## (2) 생물활성촉진제 오염해역 현장 적용성 연구

### (가) 실험방법 및 분석

#### ① 연안퇴적물 시료 채취

- 생물활성촉진제 제작에 사용된 오염되지 않은 퇴적물시료는 개발준설에 해당하는 부산신항의 준설 퇴적물 적치장에서 채취하였으며, 물리화학적 특성을 분석하였음.
- 부산신항 퇴적물에 함유된 중금속의 존재형태를 확인하기 위하여 연속추출법으로 전처리한 뒤 중금속 함량을 분석하였음.
- 부산신항 퇴적물시료의 중금속 함량(Cu, Cr, Zn, Pb, Cd, Fe)은 미국해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)의 오염기준치 이하로 평가되었음.
- 연안퇴적물시료의 입도분포는 sieving technique으로 조사하였으며, COD, TN, TP와 pH는 해양오염공정시험법과 Standard methods (APHA, 1998)에 따라 분석하였음.
- 중금속 함량과 분포형태는 연속추출법으로 전처리한 뒤 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy)를 이용하여 분석하였음(Song et. al.,2009).

[표. V-나-2] 부산북항 및 부산신항 연안퇴적물의 물리화학적 특성

Parameters	Busan Newport	Busan Northport
Sand (%)	11.2	17.4
Silt & clay(%)	88.8	82.6
pH (at 25°C)	7.96	8.11
CODMn(g/kg)	10.0	26.3
TS (g/kg)	5.9	39.1
VS (g/kg)	3.0	17.2
Water content (%)	57	51
Heavy metals (mg/kg)		
Cd	ND	0.98
Cu	6.28	47.8
Cr	2.023	31.5
Pb	8.026	44.8
Zn	51.13	201.1
Fe	19775	26341



[그림. V-나-19] 부산신항 퇴적물시료의 채취모습

## ② 생물활성촉진제 대량제조

- 오염물질 함량이 낮은 부산신항 개발 준설토를 자생미생물의 활성을 향상시키기 위한 생물활성촉진제 재료로 이용하였음.
- 생물활성촉진제는 부산신항 준설토 1kg에 황산염, 질산염 및 초산염을 각각 48g, 62g 및 29g을 첨가하여 완전 혼합한 후 실온에서 약 48시간 동안 부분 건조시켰음.
- 반 건조 된 생물활성촉진물질을 함유한 준설토를 펠렛 제조기(그림 V-나-20)를 이용하여 펠렛으로 준비한 다음 약 3cm 길이로 잘랐으며, 60°C에서 48hr 동안 건조시킨 후 고분자물질인 폴리설펜으로 코팅하여 생물활성촉진제를 완성하였음.
- 생물활성촉진제의 제조에 사용된 코팅물질인 폴리설펜 용액은 폴리설펜(10%wt)에 N,N-dimethyl acetamide(90%wt)와 혼합하여 사용하였음.
- 폴리설펜 고분자 코팅은 2회 반복하였으며, 수분을 없애기 위하여 60°C에서 건조시켰음.



Mixed with sulfate, nitrate, acetate



Making pellets and biostimulant balls dried at 60°C for 48hr



Polysulfone coating(double coating-mixing of polysulfone and N,N-dimetyl acetamide)

[그림. V-나-20] 생물활성촉진제의 실 해역 현장 적용성 평가를 위한 생물활성촉진제 대량제조

### ③ 생물활성촉진제의 실 해역 현장시험

- 대량으로 제조한 생물활성촉진제는 선박과 다이버를 동원하여 부산 북항 연안 10m×10m 면적에 투여하였음(그림 V-나-21).

- 생물활성촉진제 실 해역 평가는 5m×5m로 나누어 생물활성촉진제 투여간격을 5cm, 10cm, 20cm 및 바탕시험군(생물활성촉진제를 투여하지 않음)으로 나누어 진행하였음.
- 생물활성촉진제의 효능검증을 위해 1개월 후, 3개월 후, 5개월 후 다이버를 동원하여 오염퇴적물 샘플을 채취하였으며, 실험실로 옮긴 후 유기물 함량, 중금속 함량 및 분포 등의 변화를 분석하여 생물활성촉진제의 효능을 평가하였음.



[그림. V-나-21] 생물활성촉진제 현장 효능평가를 위한 북항 연안퇴적도에 생물활성촉진제 설치 및 퇴적도 샘플링

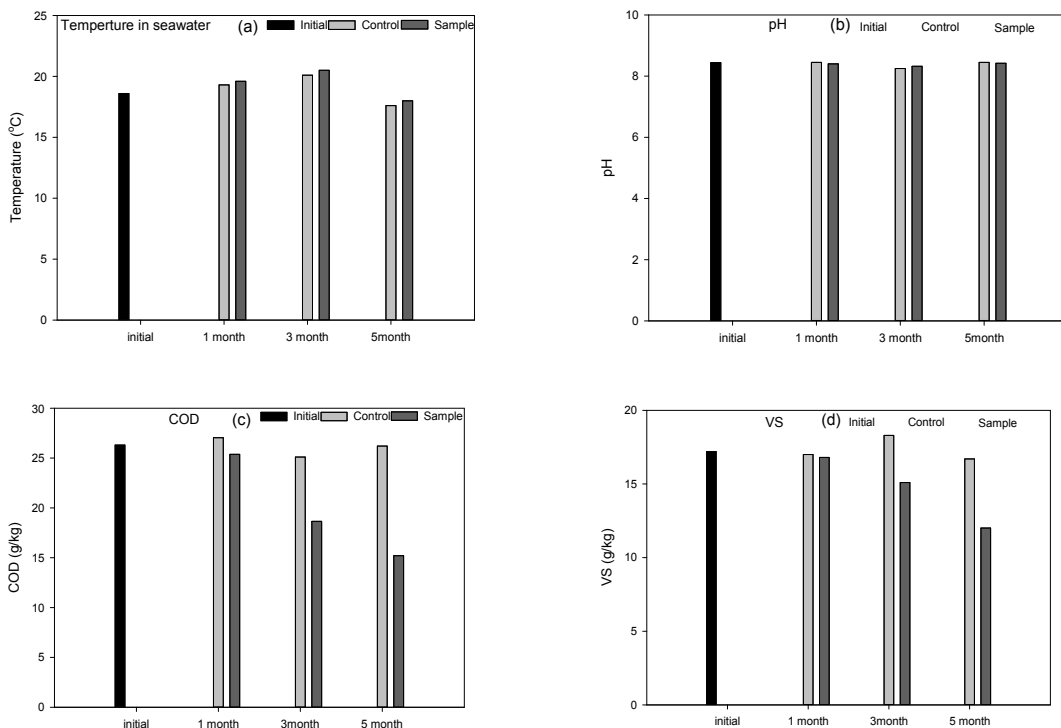
#### ④ 모니터링 및 분석

- 생물활성촉진제를 실 해역(북항해역)에 투여한 후 해수의 pH 및 수온은 현장측정 하였으며, 오염물질 저감 평가를 위하여 COD, TS, VS 및 Cr, 중금속을 분석 함.
- 퇴적물시료의 입도분포는 sieving technique으로 조사하였으며, COD 등 유기물 분석은 해양오염공정시험법과 standard methods (APHA, 1998)에 따라 분석.
- 중금속 함량과 분포형태는 연속추출법으로 전처리한 뒤 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy)를 이용하여 분석하였음(Song et. al.,2009).

#### (나) 실험결과

##### ① 10m×10m의 현장 조건에서 생물활성촉진제 주입에 따른 오염퇴적물의 유기물 감량

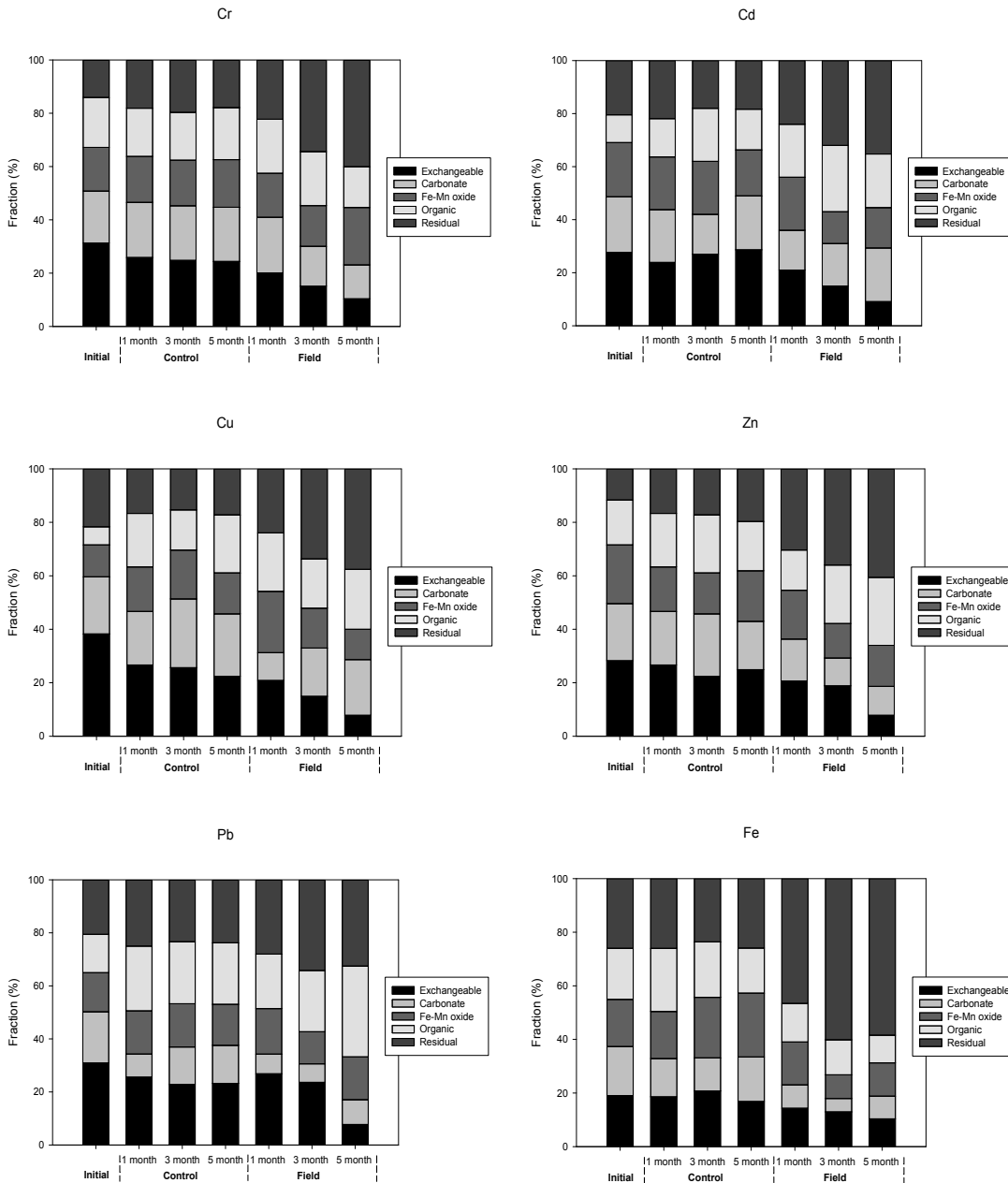
- 부산 북항 연안에서 최적화한 생물활성촉진제의 효율을 현장 검증하기 위하여 10m×10m의 현장실험을 수행하였으며, 1개월, 3개월, 5개월 후의 유기물 감량을 및 중금속 안정화 등을 평가 함.
- 현장 실험이 진행되는 동안 연안 해수의 수온은 계절적 영향으로 약 17.6℃에서 20.1℃로 다소 차이가 났으며, pH는 약 8.4내외로 비슷하게 유지되었음.
- COD 농도는 1개월 후 25.37g/kg 으로 감소하였으며, 3개월 및 5개월 후 18.64g/kg 및 15.3g/kg 으로 초기 COD 26.3g/kg에 비해 크게 감소하였음.
- VS 농도는 1개월, 3개월 및 5개월 후 16.8g/kg, 15.1g/kg, 12.01g/kg 로 초기농도 17.2g/kg에 비해 다소 감소하였음.
- 생물활성촉진제를 투여한 북항 연안퇴적물의 COD와 VS 농도 감소는 생물활성촉진제를 적용하지 않은 연안에 비해 빠르게 감소하였음.



[그림. V-나-22] 10m×10m의 부산 북항 현장실험 연안해역의 pH(a) 및 수온(b) 변화와 북항 연안퇴적물의 COD(c), VS(d) 감소율

## ② 중금속 안정화 특성

- 북항 연안퇴적물의 Cr, Cd, Cu, Zn, Pb과 Fe의 중금속은 초기에 비해 중금속 분포형태가 F4 및 F5의 안정한 형태로 점차적으로 전환되었음.
- 모든 중금속 종류의 분포형태는 5개월 후 잔류분율 > 유기물 결합분율 > Fe, Mn산화물 결합분율 > 탄산염결합분율 > 치환가능분율 순으로 평가되었음.
- 생물활성촉진제의 효능을 현장조건에서 평가한 결과, 유기오염물질 저감 및 중금속 안정화에 효과적인 것으로 평가되었음.



[그림. V-나-23] 10m×10m의 생물활성촉진제 현장실험의 오염퇴적물 내 중금속 형태 분포변화 : (a) Cr, (b) Cd, (c) Cu, (d) Zn, (e) Pb, (f) Fe

### (3) 생물활성촉진제에 의한 오염퇴적물에서 유해 중금속 안정화기작 연구 (가) 실험방법 및 분석

- 중금속 안정화 메카니즘 평가 실험에 사용된 오염 퇴적물은 부산 북항 저질을 이용하였

으며, EDTA(chelating agent)와 Zeolite, HDTMA, chitin(reducing agent)를 0.01, 0.5, 1M의 다른 농도로 주입하여 pH조건 pH 4, 7, 8.5와 온도조건 5℃ 및 15℃에서 24hr동안 반응시켰음.

- 각각의 시료는 25g의 복합 오염퇴적토에 생물활성촉진제(BSB; Biostimulant ball)를 1개 주입하고, 0.1M의 chelating agent 용액과 각각의 reducing agent를 섞은 용액 25mL를 주입하여 그림 V-나-24과 같이 Zeolite, Zeolite+HDTMA, Zeolite+HDTMA+EDTA, Zeolite+HDTMA+chitin 으로 4가지의 시료를 준비함.
- pH에 따른 영향을 평가하기 위하여 각각의 시료들은 pH 4, 7, 8.5에서 시험함
- 온도의 영향을 평가하기 위하여 각각의 시료들을 5℃ 및 15℃ 온도조건에서 100rpm으로 운전한 Shaking incubator에서 24시간 시험함.
- 오염퇴적토 만을 각각의 조건에서 시험한 바탕시험구(Control)도 함께 실험함.



Applying BSB with  
zeolite+ HDTMA+EDTA

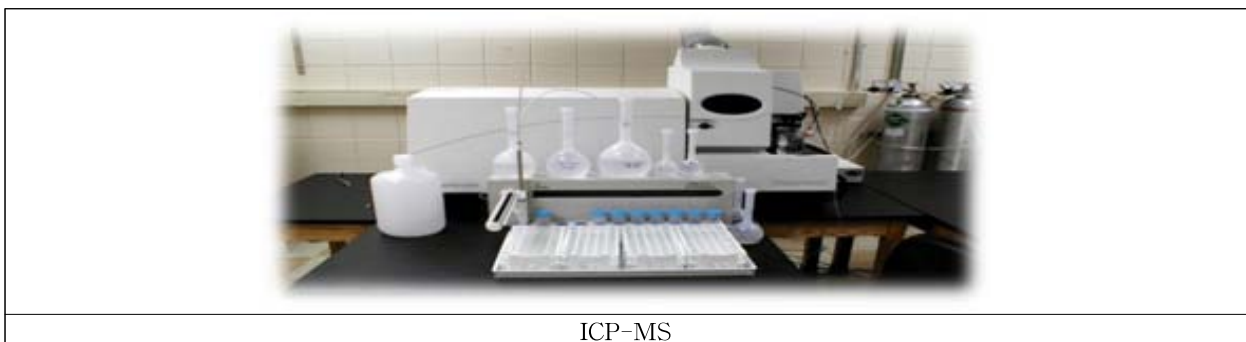


Applying BSB with  
zeolite+ HDTMA+chitin

Control : 오염퇴적물  
 Sample 1 : 오염퇴적물 + BSB + Zeolite  
 Sample 2 : 오염퇴적물 + BSB + Zeolite + HDTMA  
 Sample 3 : 오염퇴적물 + BSB + Zeolite + HDTMA + EDTA  
 Sample 4 : 오염퇴적물 + BSB + Zeolite + HDTMA + Chitin  
 BSB(Biostimulant Ball)

[그림. V-나-24] 연안오염 퇴적물에서 중금속 안정화 기작연구를 위한 시료준비

- 24시간 운전 후 각각의 샘플들은 SEM(MIRA-3, Tescan; Czech)분석과 중금속 안정화 메카니즘을 평가하기 위하여 중금속 분포, TEM(TEM, JEM-2200FS, JEOL, Japan), XRD(Rigaku, Japan), FT-IR(Norwalk, CT, USA)을 분석하였으며, pH, 유기물(COD, TS, VS)을 분석함.



	
SEM(Scanning electron microscope)	TEM(Transmission electron microscopy)
	
XRD (X-ray powder diffraction)	FTIR(Fourier transform infrared spectroscopy)

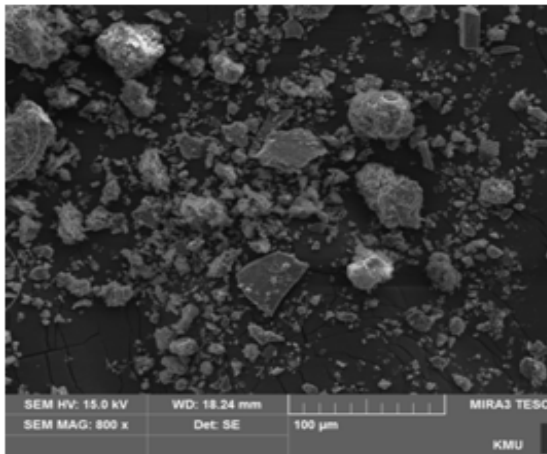
[그림. V-나-25] 오염퇴적물의 중금속 안정화 메커니즘을 평가하기 위한 분석장비; ICP-MS, SEM, TEM, XRD, FT-IR

(나) 실험결과

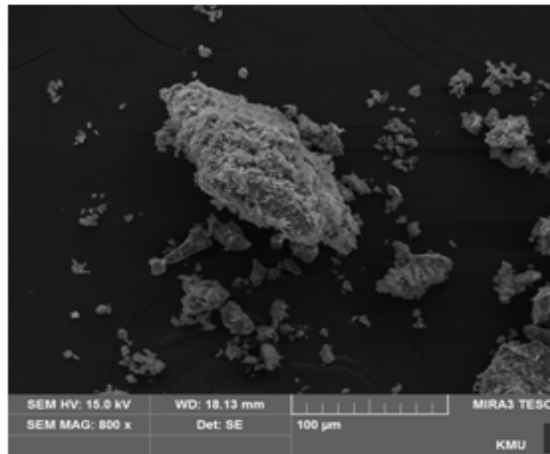
① 형태학적 분석(SEM; Scanning Electron Microscope Images)

- 오염퇴적물의 중금속 안정화 기작을 평가하고자 오염퇴적물과 zeolite, Zeolite+HDTMA, Zeolite+HDTMA+EDTA, Zeolite+HDTMA+Chitin을 첨가하여 24시간 반응시켰으며, 오염퇴적물 시료 표면의 형태학적 변화를 평가하기 위하여 SEM image분석을 실시 함.
- Control과 비교 시 zeolite, HDTMA, EDTA, Chitin을 첨가한 오염퇴적물의 표면 형태가 매우 상이함.
- 따라서, Zeolite, HDTMA, EDTA, Chitin은 오염퇴적물의 형태 및 모양을 바꿀 수 있는 것으로 평가함.
- 오염퇴적물에 Zeolite, Zeolite+HDTMA 및 zeolite+HDTMA+chitin을 첨가한 것보다 Zeolite+HDTMA+EDTA를 첨가한 것이 더 효과적인 표면형태로 전환하는 것으로 평가함.

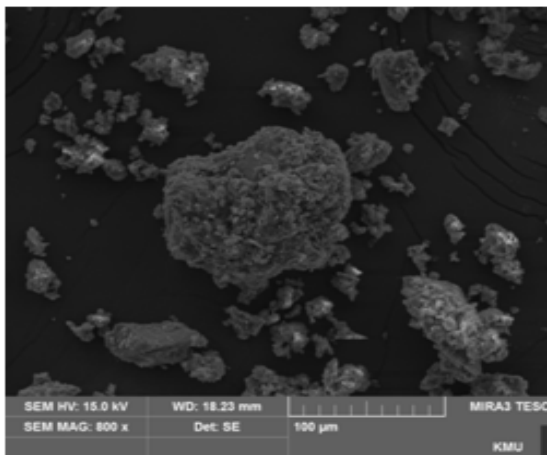




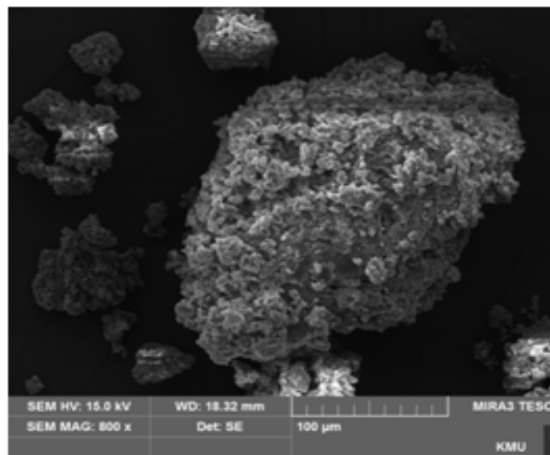
(a) Control



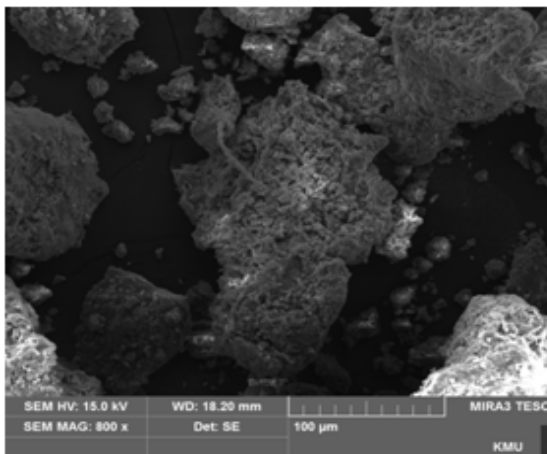
(b) Zeolite



(c) Zeolite+HDTMA



(d) Zeolite+HDTMA+EDTA



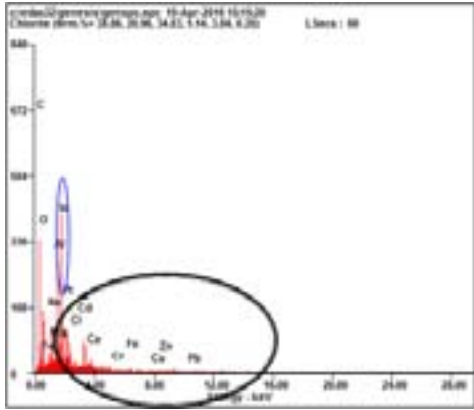
(e) Zeolite+HDTMA+chitin

[그림. V-나-26] chelating agent와 reducing agent로 처리한 오염퇴적물의 형태학적 분석(SEM)

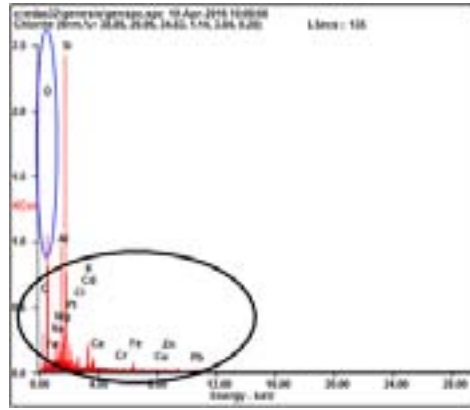
② 에너지 분산형 X-선 분광 분석(EDX; Energy Dispersive X-ray spectroscopy analysis)

- 킬레이트 물질과 환원제를 첨가하여 각각의 오염퇴적물 시료의 원소 분석 및 화학적 특성을 평가하기 위해 EDX 분석을 실시 함.
- Control과 반응물질(chelating agent and reducing agent)을 첨가한 오염퇴적물 시료에서 대부분 oxygen (O), silicon (Si) 와 Cd, Fe, Cr, Cu 및 Zn 등의 중금속이 분석 됨.

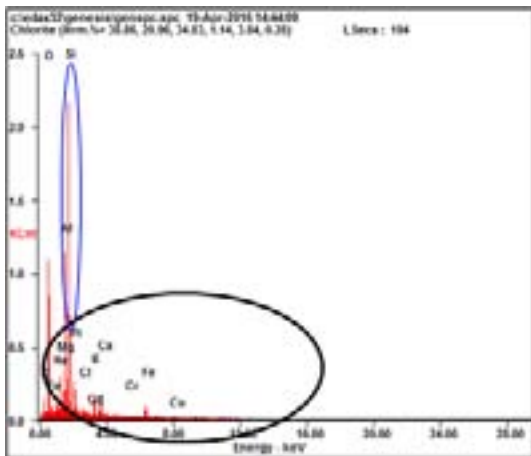
- 또한, Silicon 성분도 나타남. Control 샘플에 비해 zeolite, HDTMA 및 EDTA를 주입한 샘플에서 더 많은 중금속 발견. 이는 안정화된 중금속 분율이 높다는 것을 의미함.
- 킬레이트 물질과 환원제를 혼합한 반응물질은 오염퇴적물에 함유된 중금속 안정화에 효과적인 것으로 평가됨.



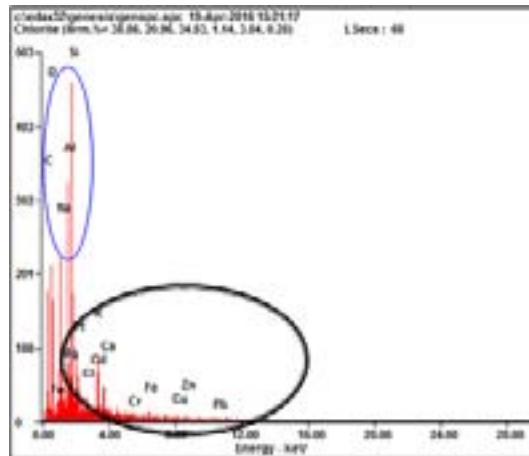
(a) Control



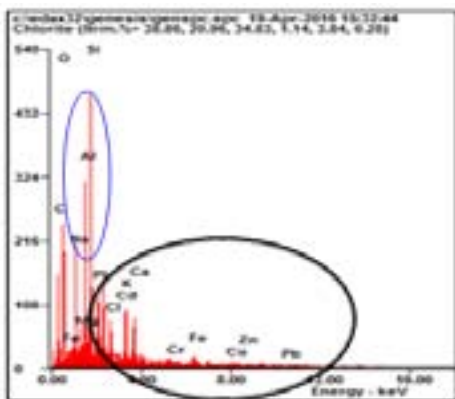
(b) Zeolite



(c) Zeolite+HDTMA



(d) Zeolite+HDTMA+EDTA

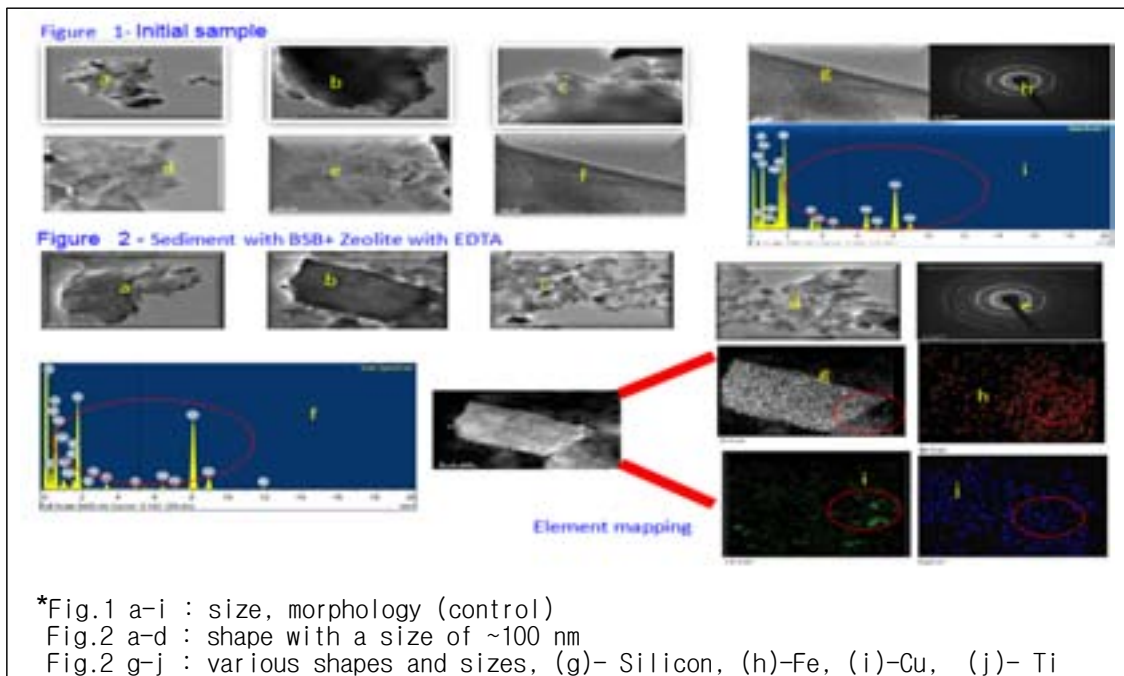


(e) Zeolite+HDTMA+chitin

[그림. V-나-27] 바탕시험구(Control) 샘플과 오염퇴적물에 Zeolite(b), Zeolite+HDTMA(c), Zeolite+HDTMA+EDTA(d), Zeolite+HDTMA+chitin(e)를 첨가한 샘플의 EDX분석

**③ 투과전자현미경 분석(TEM; Transmission Electron Microscope), EDX spectrum image, elemental mapping**

- Control 샘플과 반응물질로 반응시킨 오염퇴적물의 형태와 주요 성분을 평가하고자 TEM 분석과 원소 맵핑을 실시 함.
- 여러 방향에서 분석한 TEM 이미지를 보여주며, EDX 분석결과, control 샘플에 비해 반응 물질을 첨가한 오염퇴적물 샘플의 원소들의 피크 값이 다소 높게 분석됨.
- 따라서, 반응물질을 첨가한 오염퇴적물 샘플에서 높게 분석된 EDX 원소들을 각각 맵핑 한 결과, 그림 V-나-28의 Figure 2-g는 Silicon, h는 Fe, I는 Cu, j는 Ti으로 밝혀 짐.
- 또한, Silicon이 가장 많은 원소로 나타났고, Fe, Cu가 다음으로 많은 원소로 밝혀 짐.

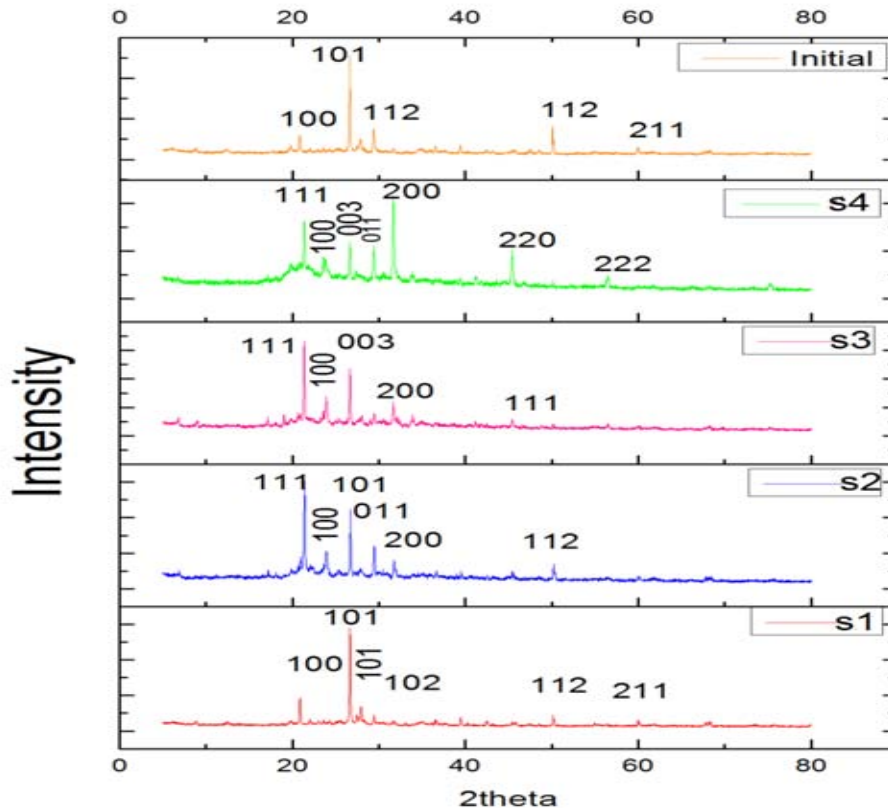


[그림. V-나-28] 초기오염퇴적물 샘플과 오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA+EDTA 샘플의 TEM images와 EDX spectrum images와 element mapping

**④ X-선 회절분석(XRD; X-ray diffraction pattern)**

- Control 샘플과 여러 가지 반응물질을 주입한 오염퇴적물 샘플의 원소들의 화학결합의 길이 및 종류를 분석하여 결정들의 구조와 기능을 밝히고자 XRD 분석을 실시 함.
- 모든 샘플에서 5개 ~ 7개의 피크가 나타났으며, 피크들을 분석한 결과, 2가지 ~ 9가지의 각기 다른 mineral portion이 나타남.
- Control에서는 그림 V-나-26에서 보는바와 같이, 5개의 다른 피크들이 나타났으나, mineral portion은 Quartz 및 Chalcopyrite의 2가지로 밝혀짐.
- Sample 1에서는 총 6개의 피크들이 나타났으며, mineral portion이 Cristobalite, Quartz, graphite, Halite, Achavalite, Carlinitite, Chalcopyrite, Calcite로 8가지로 분석됨.
- Sample 2에서는 총 6개의 피크들이 나타났으며, Cristobalite, Quartz, Halite, Bavenite, Boulangerite, Diamond, Lazurite 형태의 mineral이 분석됨.
- Sample 3에서는 총 6개의 피크들이 나타났으며, mineral portion은 Cristobalite, Quartz, graphite, Halite, Nodarite, Achavalite로 분석됨.

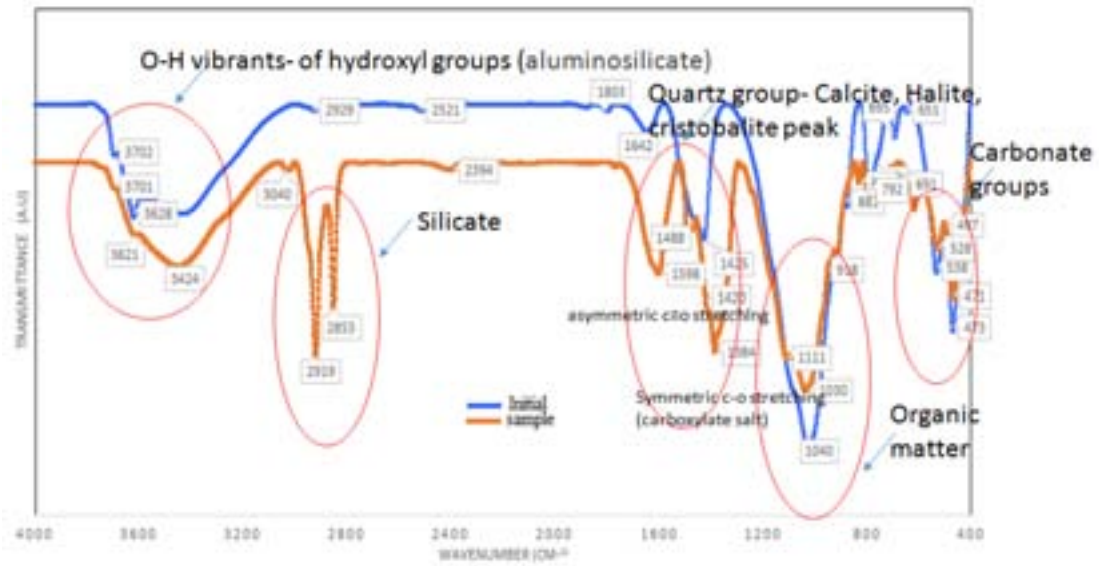
- Sample 4에서는 총 7개의 피크들이 나타났으며, Cristobalite, Quartz, graphite, Halite, Papagoite, Perite, Phosgenite, Rickardite, Senegalite의 9가지 mineral이 분석됨.
- Control에 비해 Zeolite, HDTMA, EDTA, chitine을 첨가한 오염퇴적물에서 더 많은 mineral portion이 나타남.
- Zeolite+HDTMA+EDTA와 Zeolite+HDTMA+chitine은 오염퇴적물에 함유된 중금속을 매우 안정한 형태로 전환시키는데 효과적인 것으로 평가함.



[그림. V-나-29] X-선 회절분석(Control, S1:오염퇴적물+BES+zeolite, S2:오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA, S3:오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA+EDTA, S4:오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA+Chitin)

### ⑤ FT-IR 분광 분석 (FTIR; Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

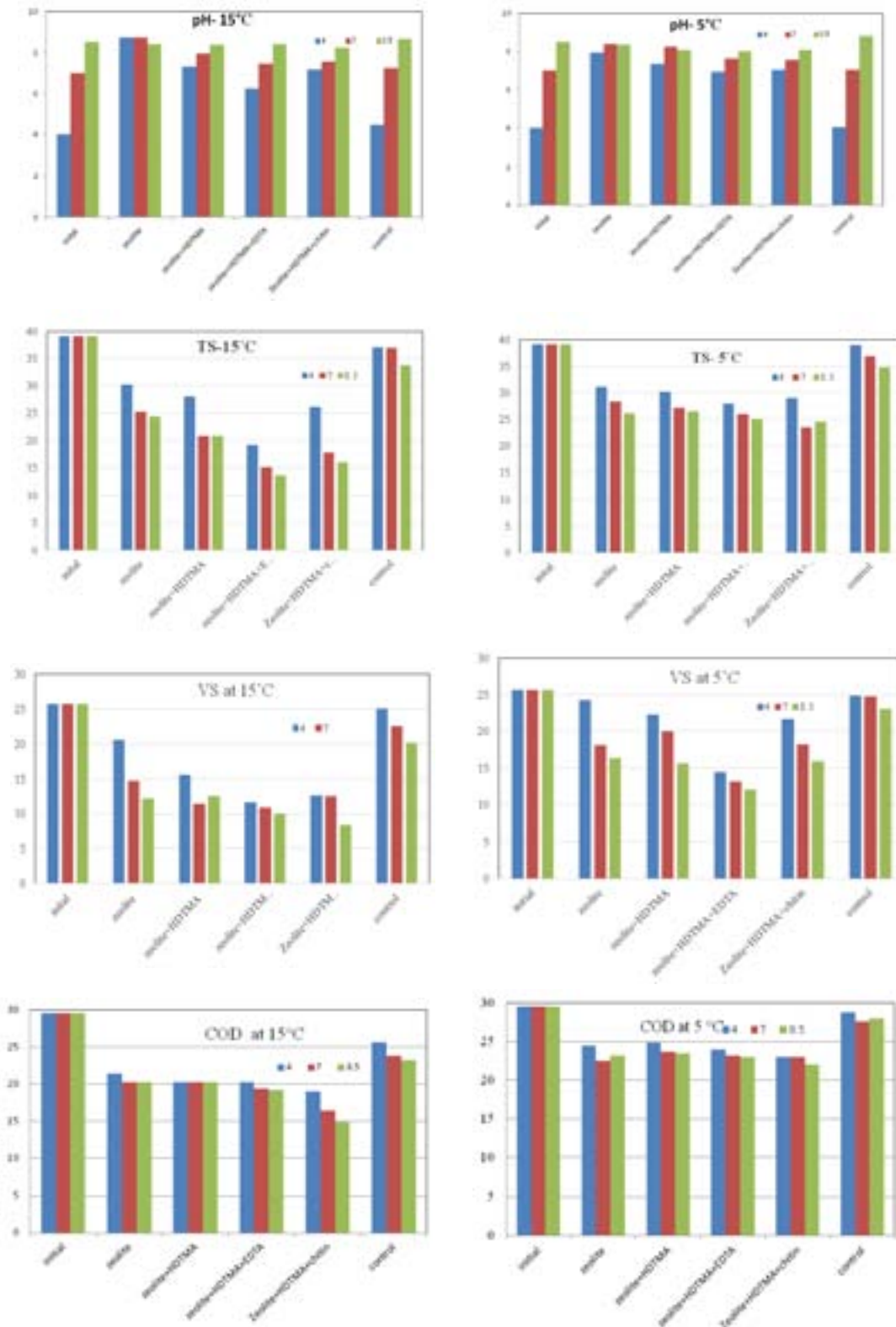
- 시험 후 오염퇴적물의 중금속 형태들 중 안정화된 중금속의 형태들의 결정유형과 mineral portion이 얼마나 있는지를 평가하기 위하여 FT-IR 분석 함.
- Zeolite와 HDTMA 및 EDTA를 첨가한 S3 샘플에서 매우 강한 결합력으로 알려져 있는 Silicate가 분석되었으며, 이는 orthosilicate, Sorosilicate (이중사면체그룹- eg. Hemimorphite, Ilvalite, Lawsonite etc), Cyclosilicate, Inosilicate, Phyllosilicate 였음.
- 또한, 결합력이 강한 (Aluminosilicate)Tectosilicate, Quartz(Tridymite, Cristobalite, Stishovite)가 관측되었음.
- 그 밖의 안정한 형태로 분류되는 Organic 및 Carbonate group도 관측되었음.



[그림. V-나-30] FT-IR spectrum과 결정 유형(crystallinity pattern); Control(Initial), S3(오염퇴적물+BES+Zeolite+HDTMA+EDTA)

### ⑥ pH 변화와 유기물질 농도변화

- pH변화는 control에 비해 zeolite, HDTMA, EDTA, chitine을 첨가한 오염퇴적토에서 변화가 크지 않았음.
- 특히, zeolite를 첨가하였을 때 모든 pH조건에서 반응 후 pH변화가 가장 적었음.
- TS, VS 및 COD는 Zeolite+HDTMA+EDTA를 첨가한 오염퇴적물과 Zeolite+HDTMA+chitine을 첨가한 오염퇴적물이 가장 농도가 낮았음.
- 온도에 대한 영향은 pH변화에는 영향을 미치지 않았으나, 유기물 감량부분에서는 5℃에서보다 15℃에서 저감율이 높았음.

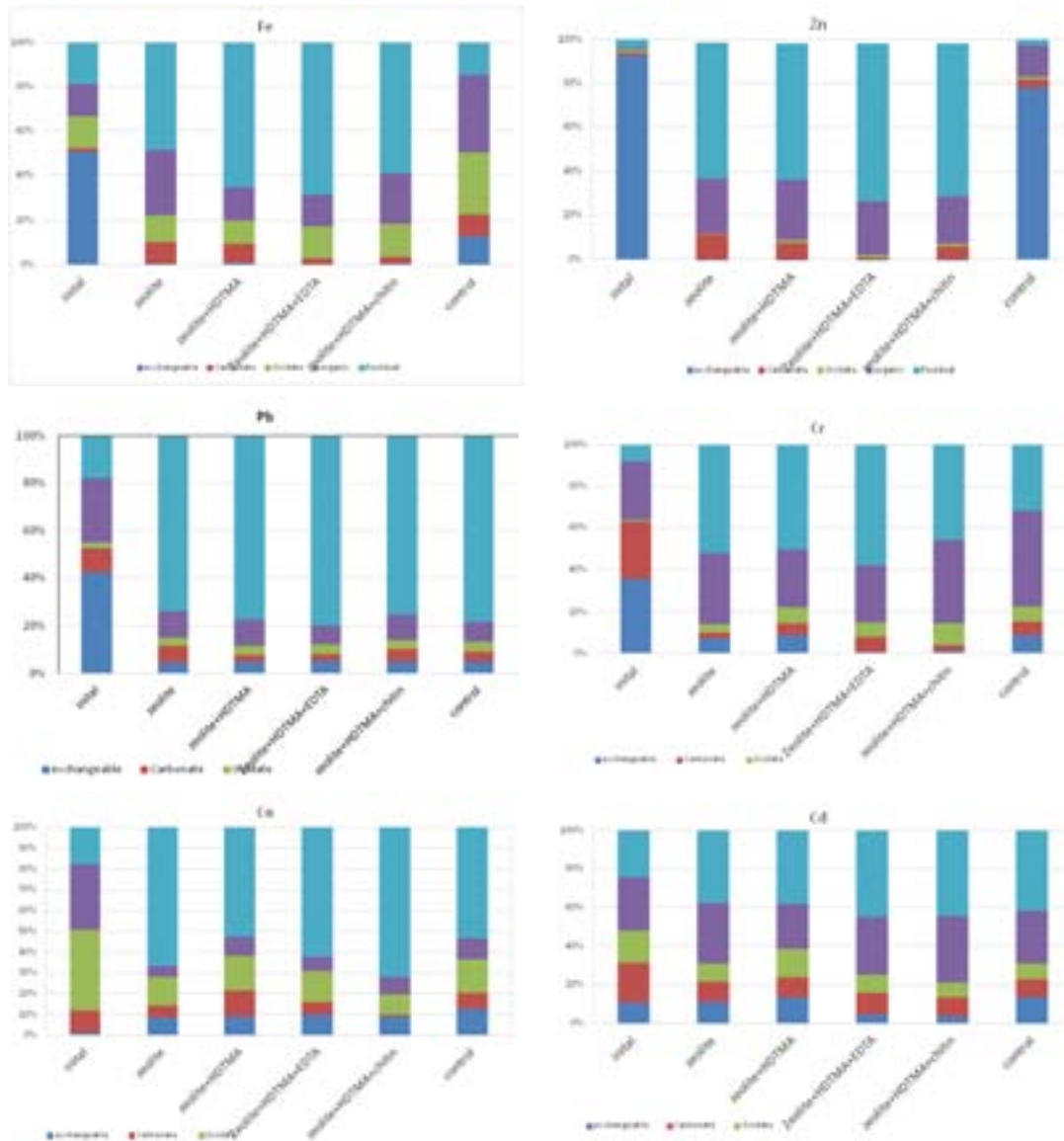


[그림. V-나-31] 온도 5°C와 15°C 및 pH 4, 7, 8.5에서 반응시킨 샘플의 pH변화, TS, VS 및 COD변화

### ⑦ 중금속 형태변화

- 반응전인 초기시료에서 많이 측정된 생물 이용가능한 형태인 exchangeable fraction이 zeolite, HDTMA, EDTA, chitine을 첨가한 시료에서 크게 감소 함.

- control에 비해 Fe-Mn oxidate fraction, Organic fraction 및 잔류분율이 크게 증가 함.
- 오염퇴적물의 최대 중금속 안정화는 chitine첨가 때 보다 EDTA를 첨가 했을 때 가장 높았음.



[그림. V-나-32] 오염퇴적물에 Zeolite, Zeolite+HDTMA, Zeolite+HDTMA+EDTA, Zeolite+HDTMA+chitine을 각각 첨가하여 온도 15℃에서 반응시킨 오염퇴적물의 중금속 형태변화

다. 피복공법 설계기법 정립 및 시공 방안 마련

(1) 피복공법 설계·시공 매뉴얼 작성



[그림. V-다-1] 매뉴얼 책자 표지

(가) 침식 예측 시스템 개발

① 해저 유속 및 유효입경 상관관계 이론식 제시

- Komar and Miller(1973, 1974)는 기존 연구자들의 데이터를 이용하여 주기적으로 파랑이 작용하는 조건하에서 유속과 침전물 입경과의 관계를 상관식으로 제시하였으며. 피복공법이 주로 적용될 천해조건을 가정하여 유속과 피복재의 입경(D)를 바로 구할 수 있는 식 (1), (2) 제시

$$D = \frac{\pi}{\alpha^{2*} T} * \left[ \frac{\rho_w}{(\rho_s - \rho_w)g} \right]^{2*} U_m^3 \quad (D_{50} < 0.5 \text{ mm}) \quad (1)$$

$$D^3 = \left[ \frac{\rho_w}{(\rho_s - \rho_w)g} \right]^{4*} \frac{\pi}{\beta} * U_m^7 \quad (D_{50} > 0.5 \text{ mm}) \quad (2)$$

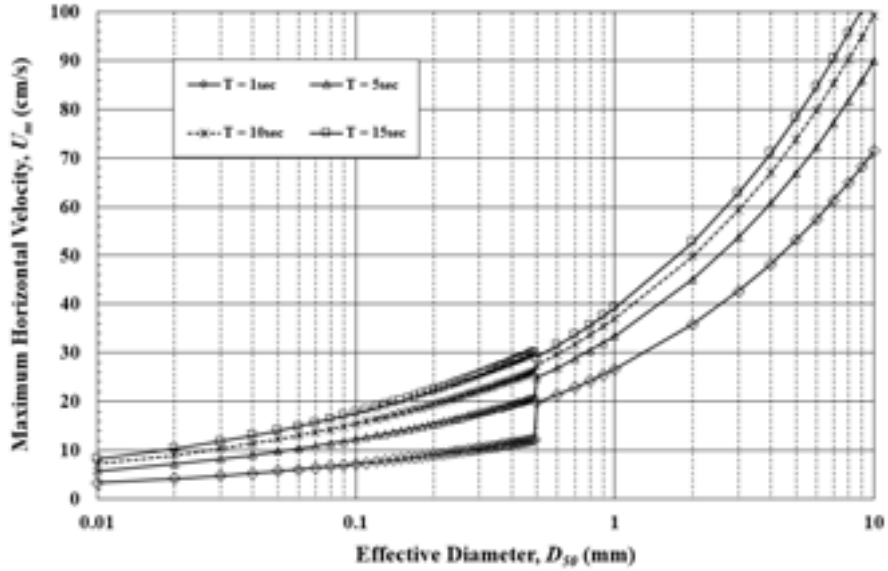
여기서, D: 피복재 입경, do: 파의 회전직경(orbital diameter of wave motion),  
 U<sub>m</sub>: 최대수평유속(maximum horizontal velocity of water motion),  
 g: 중력가속도, ρ<sub>s</sub>: 피복재 입자의 밀도, ρ<sub>w</sub>: 물의 밀도  
 α: 상수(통상 0.21), β: 상수(통상 0.463π ≈ 1.454)

- 선형파 이론에 따른 수심 z에서의 물입자의 유속은 다음과 같음



$$U_m = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi}{L}(h+z)\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L}h\right)} \quad (3)$$

여기서, H: 파랑의 파고, h: 수심, L: 파랑의 파장,  
z: 수면에서 피복재 표면까지의 수심(-부호), T: 파랑의 주기



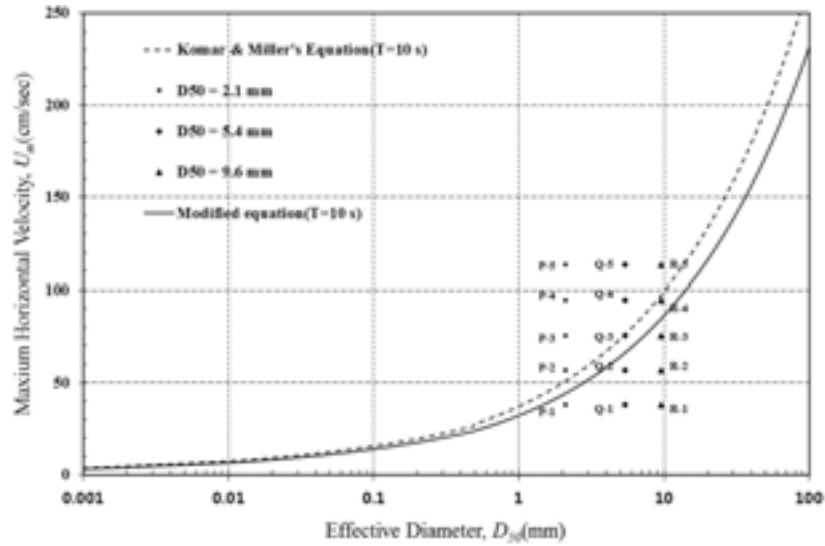
[그림. V-다-2] 피복재 입경과 유속의 상관관계 (Komar and Miller, 1974)

[표. V-다-1] 피복재 입경 선정을 위한 입력변수

Name	Description	Unit	Name	Description	Unit
h	Depth of water	m	g	Gravity coefficient	$m/g$
T	Wave period	sec	$\rho_s$	Density of capping material ( $\approx 2.65 \text{ g/cm}^3$ , quartz sand)	$\text{g/cm}^3$
H	Height of wave	m	$\rho_w$	Density of water ( $\approx 1 \text{ g/cm}^3$ )	$\text{g/cm}^3$
L	Wave length	m	$U_m$	Maximum horizontal velocity	m/s
$\alpha$	Coefficient (usually 0.21)		$\beta$	Coefficient (usually $0.46\pi$ )	

## ② 피복재 입경과 파고변화에 따른 실험모형실험 결과

- Komar and Miller(1973, 1974) 제안식의 예측결과를 검증하기 위한 실험모형실험 결과, 주기 10초 초과인 경우에는 적합하나, 주기 10초 이하인 파랑 조건에서는 부적합 경우가 확인
- 실험결과를 반영하여 계수  $\alpha$ 는 0.18,  $\beta$ 는  $0.36\pi$  로 수정할 것을 제시



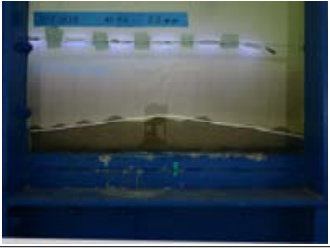

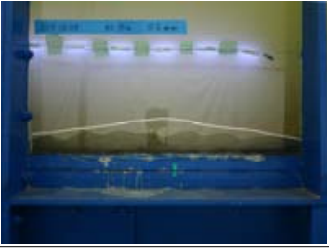


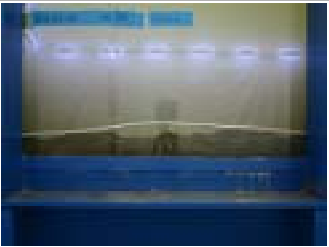

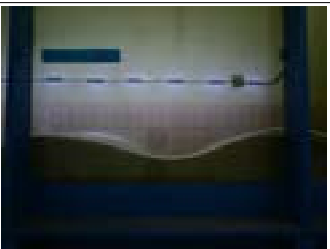

[그림. V-다-3] 실험결과를 반영한 수정식과 기존식의 비교

○ 실험결과 요약정리










[표. V-다-2] 원형상 8초(모형상 2.53초) 주기 조건에 대한 피복재 침식 실험결과

파랑 조건 입경	2.53 s		
	파고 1.5 m	파고 0.2 m	파고 0.25 m
0.21 mm	 P-2 변형 있음 (×)	 P-3 변형 있음 (×)	 P-4 변형 있음 (×)
0.56 mm	 Q-2 변형 있음 (×)	 Q-3 변형 있음 (×)	 Q-4 변형 있음 (×)
0.96 mm	 R-2 변형 없음 (○)	 R-3 변형 없음 (○)	 R-4 변형 없음 (○)

[표. V-다-3] 원형상 10초(모형상 3.16초) 주기 조건에 대한 피복재 침식 실험결과

과량 조건 입경	3.16 s		
	과고 1.5 m	과고 0.2 m	과고 0.25 m
0.21 mm			
	P-2 변형 있음 (×)	P-3 변형 있음 (×)	P-4 변형 있음 (×)
0.56 mm			
	Q-2 변형 있음 (×)	Q-3 변형 있음 (×)	Q-4 변형 있음 (×)
0.96 mm			
	R-2 변형 없음 (○)	R-3 변형 없음 (○)	R-4 변형 있음 (×)

[표. V-다-4] 원형상 12초(모형상 3.80초) 주기 조건에 대한 피복재 침식 실험결과

과량 조건 입경	3.80 s		
	파고 1.5 m	파고 0.2 m	파고 0.25 m
0.21 mm			
	P-2 변형 있음 (×)	P-3 변형 있음 (×)	P-4 변형 있음 (×)
0.56 mm			
	Q-2 변형 없음 (○)	Q-3 변형 있음 (×)	Q-4 변형 있음 (×)
0.96 mm			
	R-2 변형 없음 (○)	R-3 변형 없음 (○)	R-4 변형 없음 (○)

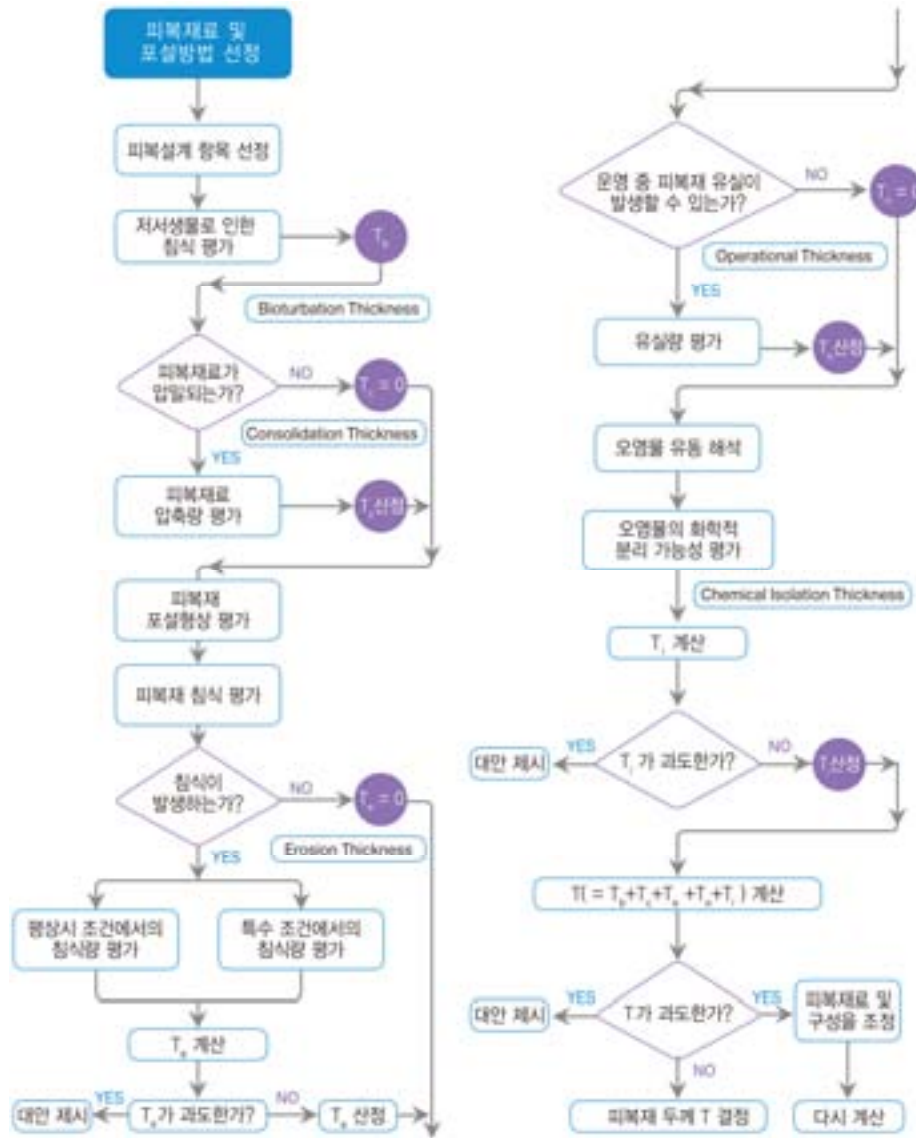
(나) 피복공법 설계기법 정립

① 설계 프로세스 제시

- 피복공법 적용 타당성을 분석하기 위해서는 오염퇴적물의 특성 분석, 지형 분석, 피복재 확보 방안 및 형상에 대한 검토가 필요

② 단계별 고려사항 및 설계기법의 정리

- 피복공법 현장적용에 필요한 엔지니어링 설계 고려사항을 정리하고 단계별 프로세스를 도식화하여 제시
- 피복형상(두께 및 면적)은 저서생물의 교란, 오염물 격리 효과, 환경적 영향에 따른 침식, 압밀을 고려하여 결정
- “피복공법 설계 시공 매뉴얼”에 고려사항별 설계 가이드라인 제시



[그림. V-다-4] 피복층 설계의 단계별 흐름도

(다) 시공 가이드라인 제시

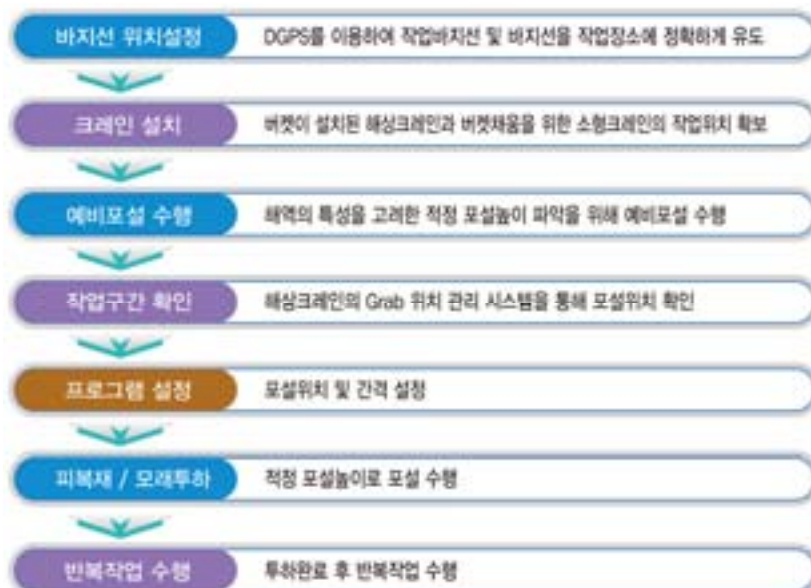
① 시공 전 고려사항

- 현장 시험시공을 토대로 피복공법 현장적용에 필요한 인허가, 해저 지형조사, 가용 장비 분석, 피복재 확보 방안(준설토사 포함), 해양 환경분석 방안을 제시

② 현장 시험시공을 통한 국내 가용장비별 시공 프로세스 정립



[그림. V-다-5] 셋팅바지를 이용한 자유낙하식 시공 순서도



[그림. V-다-6] 바지와 상자형 버킷을 이용한 목구투하방식 피복시공 순서도

### ③ 시공 중 모니터링 방안 제시

- 피복공법의 현장적용에 핵심은 피복재의 형상 확보에 있으며, 현장에서는 가용장비를 활용한 파일럿 테스트를 통한 최적 피복두께가 확보 가능한 용량을 산정하고 작업 중에도 수심측량을 통한 주기적인 두께 변화 관측이 핵심

[표. V-다-5] 시공 중 모니터링 방안

모니터링 단계	요소	방법	분석항목	빈도/위치
피복 시공 시	피복소재 질적평가	실내실험	물성 분석	
	피복두께 및 범위	수심측량	피복층 두께	기준 정점
		저서 프로파일	피복 면적	초기 시공 전체면적 최종분석
		퇴적층 단면 분석	피복층 두께	기준 초기 시공 결정된 격자
		Core	피복층 두께 및 물리적, 화학적 특성	결정된 격자
퇴적물	퇴적물 시료	퇴적물 화학적 물성	피복경계 근처 퇴적층	

④ 시공 후 관리방안 제시

- 피복공법 적용 대상지는 장기 평가로 최소 5년간 처리 기준 충족 및 피복의 침식 여부를 검토하도록 제시하고 구체적인 모니터링 방안을 제시

[표. V-다-6] 장기 모니터링 방안

모니터링 단계	요소	방법	분석항목	빈도/위치
시공완료 후	재착생 (Recolonization)	저서생물군 분석	재착생, 개체수, 종 다양성	결정된 격자, 재착생 속도에 따른 빈도
	물리적 격리	저서 프로파일 수심측량	피복층 두께	연1회(특정정점) 매5년, 전체조사
	화학적 격리	Core 필요시, Peeper 또는 seepage meter	퇴적물, 공극수 화학적 분석	매5년, 결정된 격자
특이 외력 대응	피복 보존	저서 프로파일 또는 Core		태풍 또는 지진 후

라. 피복공법 현장 시공

(1) 피복공법 현장적용을 위한 현장시공

(가) 피복 공법 현장 적용 시공(100m×100m 이내)

- 100 m × 100 m 규모의 피복 공법 현장 적용은 바지와 상자형 버킷을 사용하여 피복재를 포설하는 공법을 수행
- 그림 V-라-1과 같은 형태의 상자형 버킷을 사용하여 피복재 포설용 크레인에 설치하였고, 상자형 버킷은 하단에 문을 개폐할 수 있는 형태임

- 시공 순서는 그림 V-라-2와 같고, 시공과정을 그림 V-라-3에 나타냄
- 각 단계별 공정을 살펴보면,
  - 1단계 바지선의 위치설정을 위해 DGPS를 이용하여 작업바지선 및 바지선을 작업장소에 정확하게 유도하여 앵커링을 실시
  - 2단계로 버킷이 설치된 해상크레인과 버킷의 채움을 위한 소형크레인의 작업위치를 확보하여 포설준비를 완료
  - 3단계로 해역의 특성을 고려하기 위해 피복재 포설 전 예비 투하 실험을 수행 : 예비 투하 실험의 경우 해저면으로부터 일정 높이 간격으로 제올라이트/모래를 투하하고, 이때 포설된 높이 및 포설면적을 잠수조사를 통해 확인 후 적정 포설 높이를 선정 (본 해역의 경우 적정 포설 높이가 2.0 m로 판단)
  - 4단계에서는 해상크레인에 설치된 Grab 위치 관리 시스템을 통해 포설위치를 확인하고 포설위치 및 간격을 설정한 후 포설을 수행
- 이후 반복적으로 포설을 수행하게 되며, 본 공법은 바지를 작업장소에 앵커링 한 이후에는 바지의 이동이 없고, 일정한 높이로 적정 지점에 포설이 가능하여 시공이 비교적 간단함



(a) 상자형 버킷



(b) 피복재 포설용 크레인

[그림. V-라-1] 상자형 버킷과 피복재 포설용 크레인



### 바지선 위치설정

- DGPS를 이용하여 작업바지선 및 바지선을 작업장소에 정확하게 유도

### 크레인 설치

- 버킷이 설치된 해상크레인과 버킷채움을 위한 소형크레인의 작업위치 확보

### 예비포설 수행

- 해역의 특성을 고려한 적정 포설높이 파악을 위해 예비포설 수행

### 작업구간 확인

- 해상크레인의 Grab 위치 관리 시스템을 통해 포설위치 확인

### 프로그램 설정

- 포설위치 및 간격 설정

### 피복재/모래투하

- 적정 포설높이로 포설 수행

### 반복작업 수행

- 투하완료후 반복작업 수행

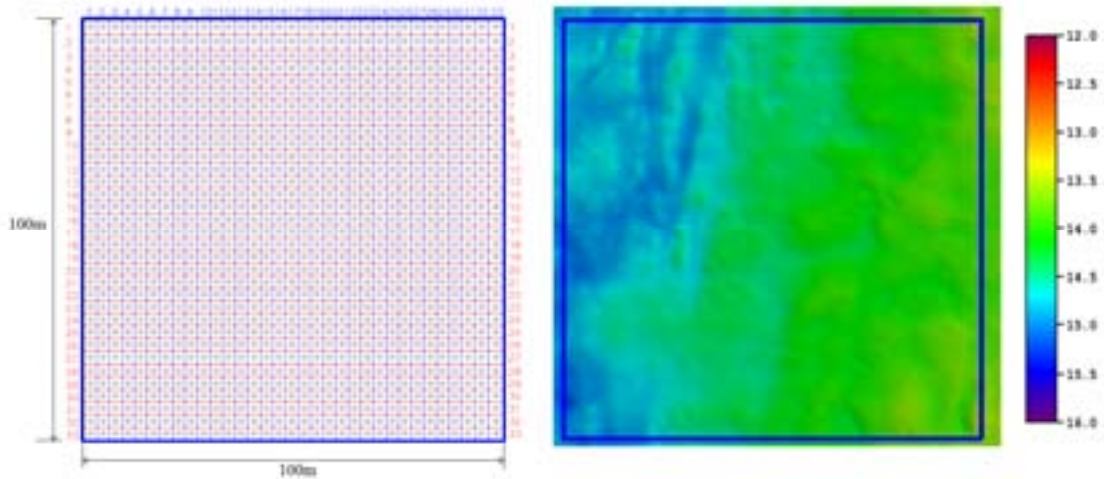
[그림. V-라-2] 시공순서도



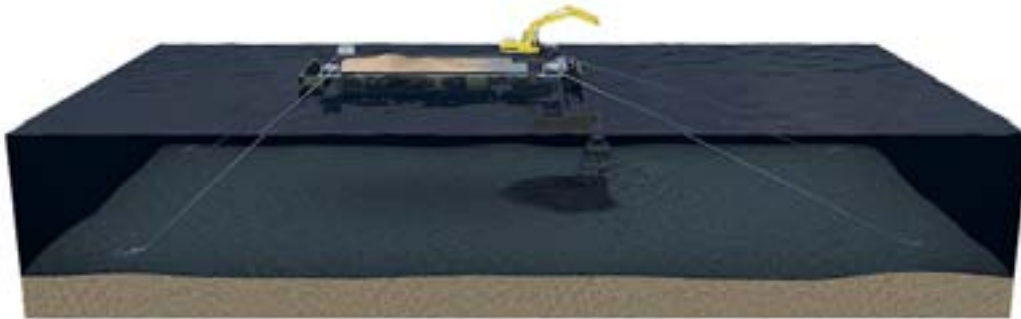
[그림. V-라-3] 실제 시공 과정

- 버킷 포설시 작업구역은 가로 100 m, 세로 100 m로 총 작업면적은 10,000  $m^2$ 이고, 3 m 단위로 격자를 구성하여, 포설을 수행

- 이에 따라 총 투하지점수는 1089이며, 반응성 피복재인 제올라이트의 포설높이 20 cm, 모래의 포설높이 30 cm로 전체 물량은 각각 2000 m<sup>3</sup>, 3000 m<sup>3</sup>임
- 공정상 바지가 앵커링을 통해 고정된 이후 1회 투하 시 걸리는 시간은 약 3~5분으로 해상크레인에 설치된 Grab 위치관리시스템을 통해 해당 격자에 포설을 수행



[그림. V-라-4] 버킷 포설을 위한 좌표도



[그림. V-라-5] 시험시공 모식도

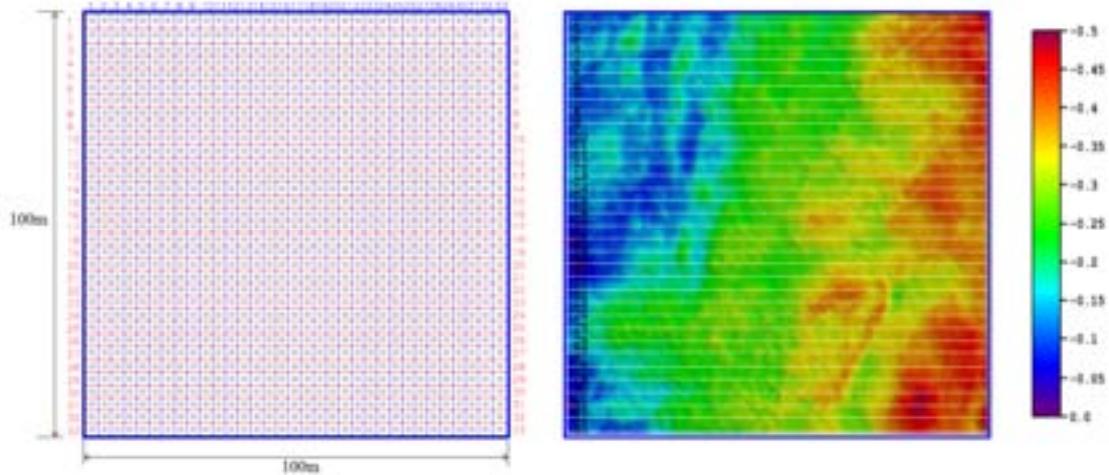
[표. V-라-1] 시공내용

구분	내용	비고
작업면적	10,000 m <sup>2</sup>	100 m x 100 m
총 투하지점수	1089 point	33 x 33
투하간격	3.0 m	
반응성 피복재(제올라이트) 포설물량	2000 m <sup>3</sup>	100 m x 100 m x 20 cm
모래 포설물량	3000 m <sup>3</sup>	100 m x 100 m x 30 cm
반응성 피복재 투하시간	3~5분	
모래 투하시간	3~5분	

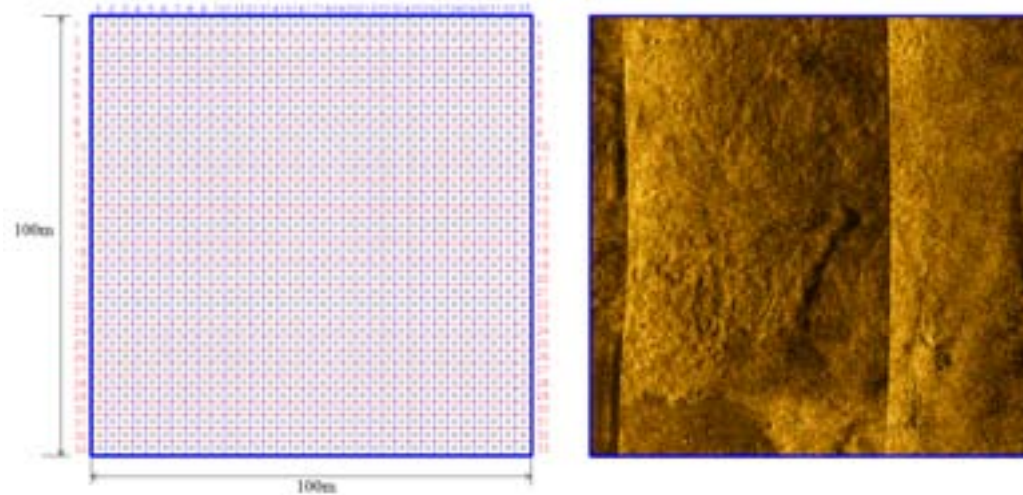
### ① 제올라이트 포설 후 지형

- 반응성 피복재(제올라이트)의 포설을 100%시공 완료하고 제올라이트의 전체적인 포설상태를 확인하기 위해 해저지형조사를 수행

- 이후 모래의 포설을 100%시공 완료하고 해저지형조사를 수행하여 결과를 비교·분석
- 반응성피복재의 해저지형 조사결과 전반적으로 20 cm의 포설높이를 만족하고 있으며, 횡 단면도를 통해 볼 때 원지반과 비교하여 고른 포설 상태를 나타내고 있음을 확인할 수 있음



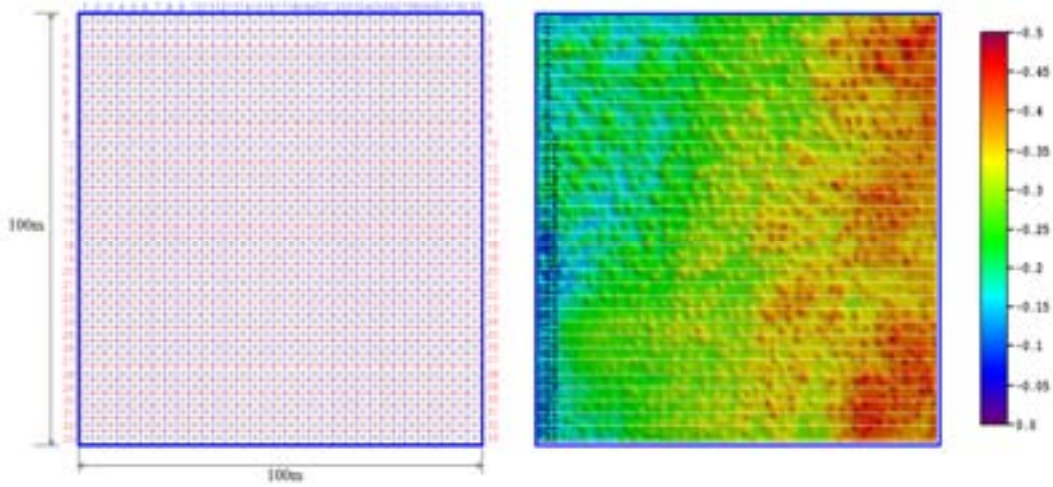
[그림. V-라-6] 제올라이트 포설 후 멀티빔수심조사(MBES) 결과



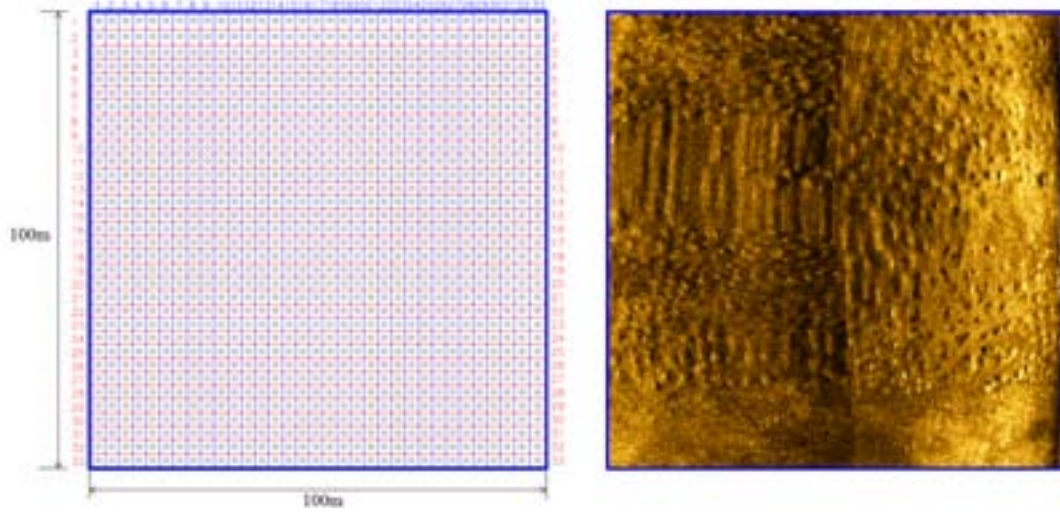
[그림. V-라-7] 제올라이트 포설 후 해저면영상조사 (SSS) 결과

## ② 모래 포설 후 지형

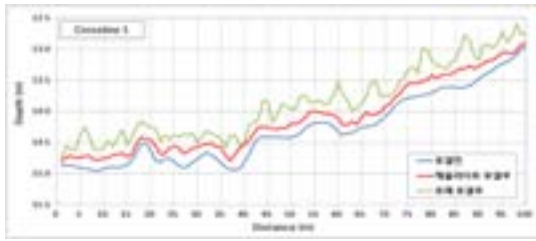
- 모래 포설결과, 멀티빔 조사결과와 횡단면도를 통해 제올라이트에 비해 상대적으로 고르게 포설되지 않았음을 확인할 수 있음
- 그러나 전반적으로 30 cm의 목표 포설높이를 만족하고 있고, 일부구간에서 포설량의 차이가 발생한 점은 향후 연구를 통해 검토해야 할 부분
- 특히, 상자형 버킷을 이용한 포설시 제올라이트의 경우 해저면으로부터 2.0 m 높이에서 투하한 경우 고르게 포설되었으나, 모래의 경우 입경 및 해역특성 등을 고려한 포설높이 조절 및 포설방법에 대한 개선이 필요하다고 판단됨



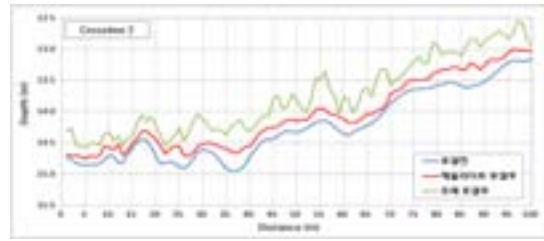
[그림. V-라-8] 모래 포설 후 멀티빔 수심조사(MBES) 결과



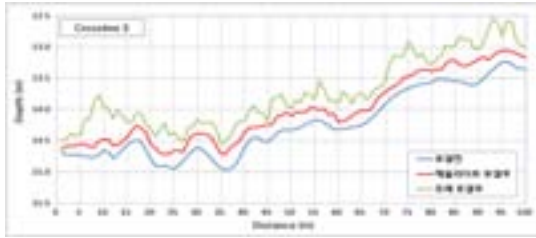
[그림. V-라-9] 모래 포설 후 해저면영상조사 (SSS) 결과



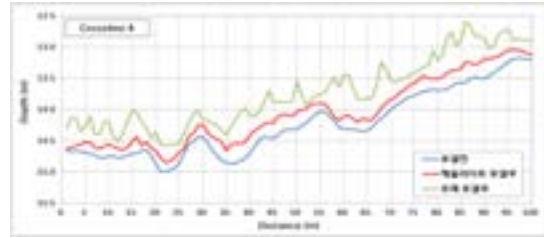
Crossline 1



Crossline 2



Crossline 3



Crossline 4



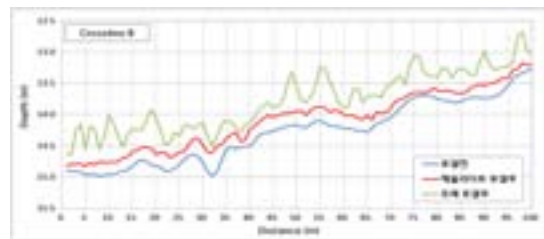
Crossline 5



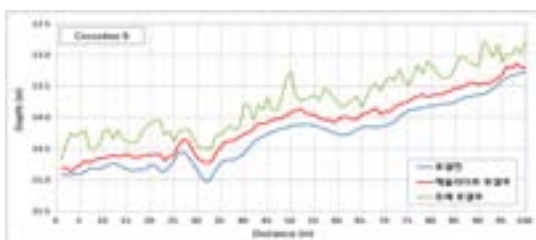
Crossline 6



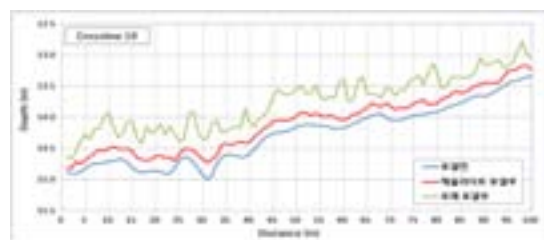
Crossline 7



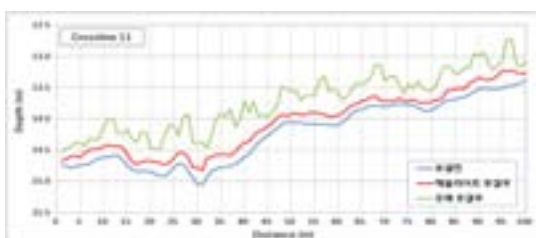
Crossline 8



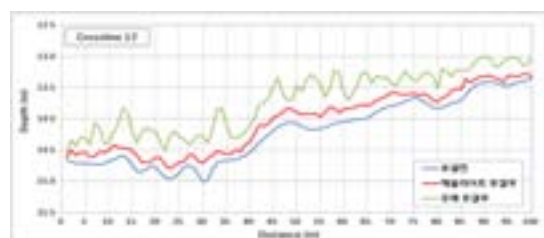
Crossline 9



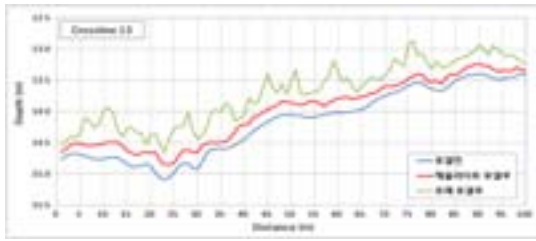
Crossline 10



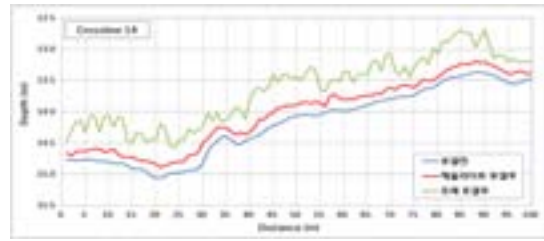
Crossline 11



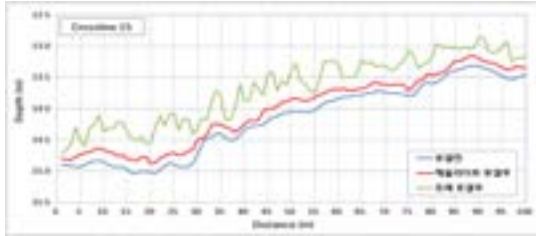
Crossline 12



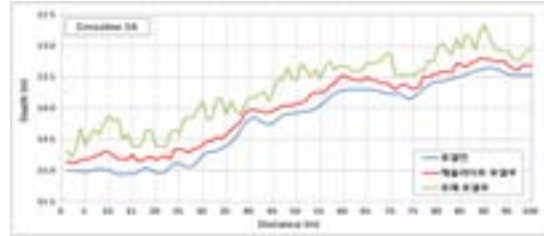
Crossline 13



Crossline 14



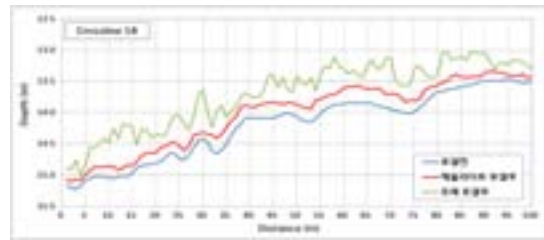
Crossline 15



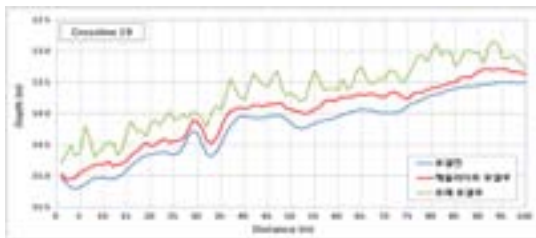
Crossline 16



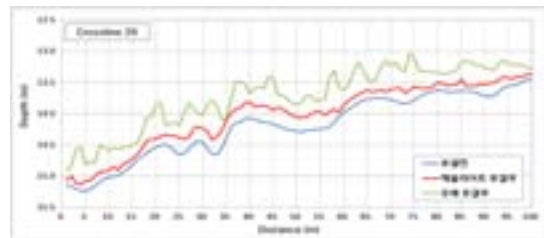
Crossline 17



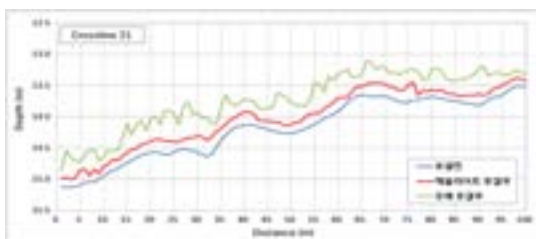
Crossline 18



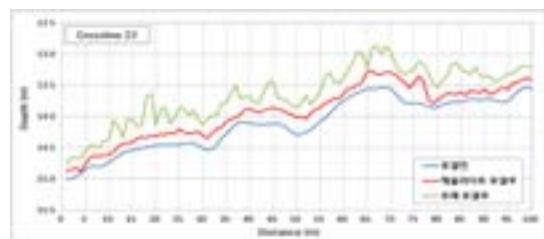
Crossline 19



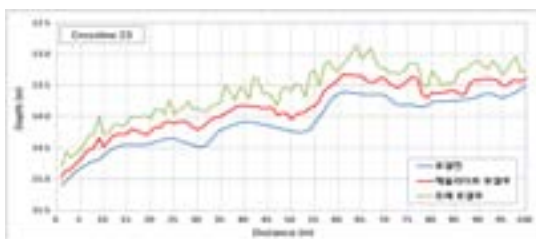
Crossline 20



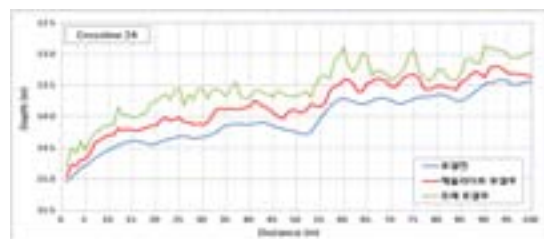
Crossline 21



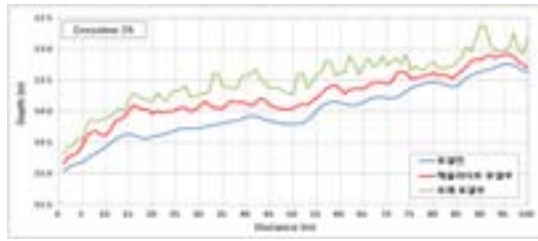
Crossline 22



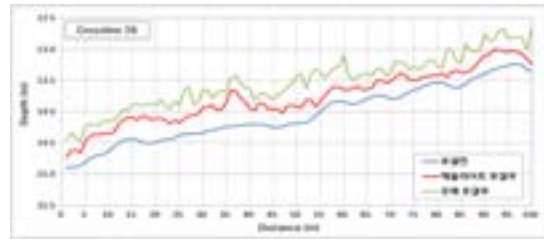
Crossline 23



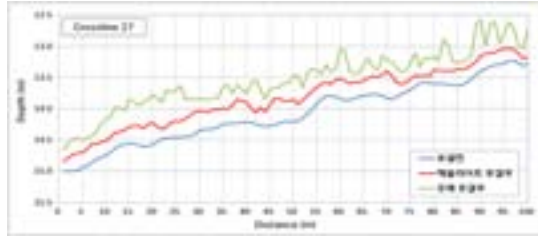
Crossline 24



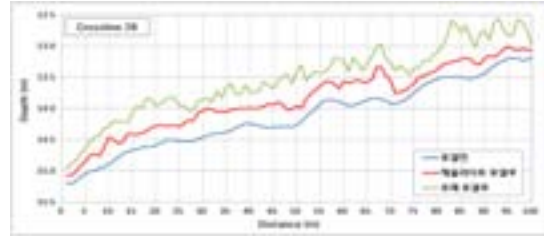
Crossline 25



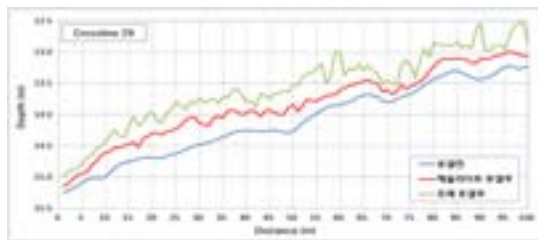
Crossline 26



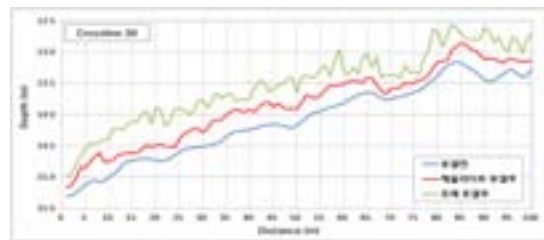
Crossline 27



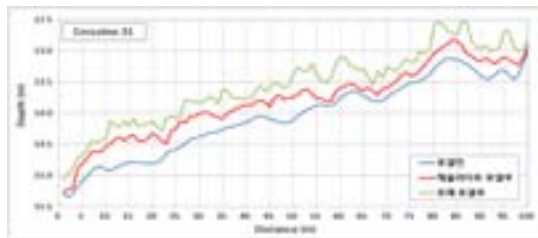
Crossline 28



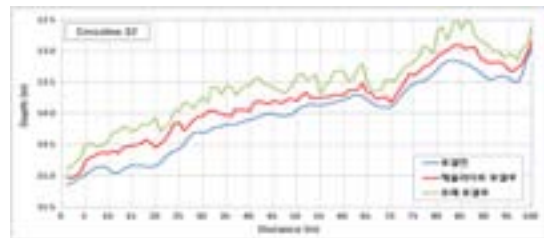
Crossline 29



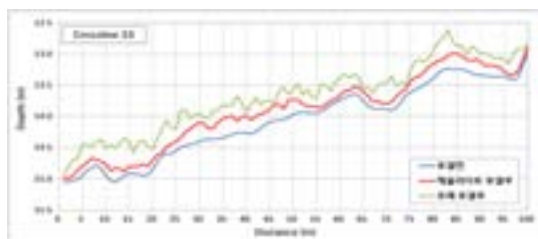
Crossline 30



Crossline 31



Crossline 32

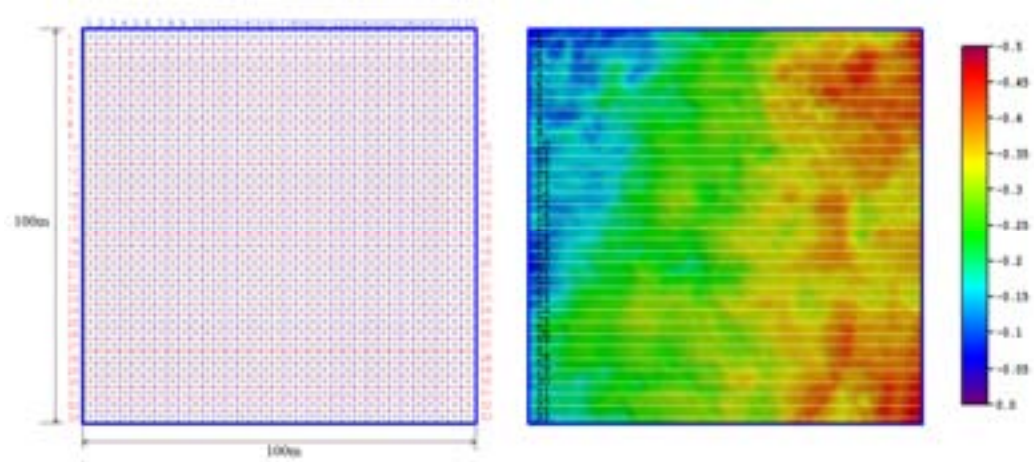


Crossline 33

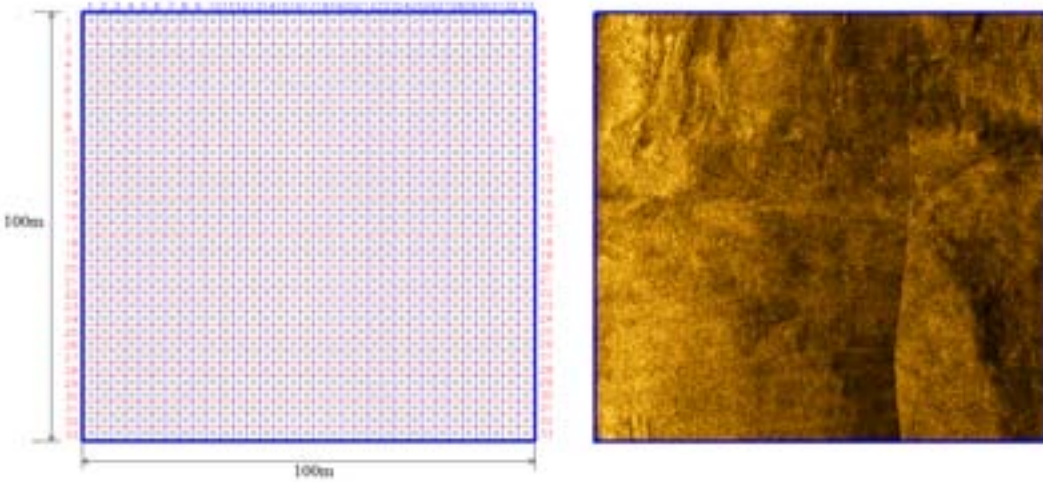
## (2) 해저지형조사를 통한 피복 공법의 안정성 검증

### (가) 피복재 포설 형상 장기 안정성 검토를 위한 주기적인 모니터링 실시

- 피복재 포설 6개월 경과 후 지형의 경우, 모래포설 당시 고르지 못하게 포설된 부분이 완만한 형태로 변화하였으며, 일부구간에서는 외력에 의해 모래층이 유실이 된 현상을 확인할 수 있었음
- 그러나 유실된 구간에서도 제올라이트의 상부층까지는 포설높이를 유지하고 있는 것으로 판단되고, 상대적으로 입자가 큰 제올라이트는 대상해역의 외력에 안정성을 확보하고 있으며, 모래의 경우 유실현상이 발생하였으므로 해역특성을 고려하여 입경을 조절할 필요가 있다고 판단

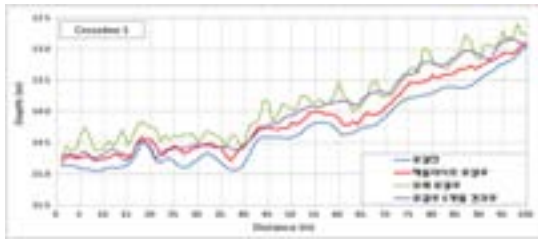


[그림. V-라-10] 피복재 포설 6개월 경과 후 멀티빔수심조사(MBES) 결과

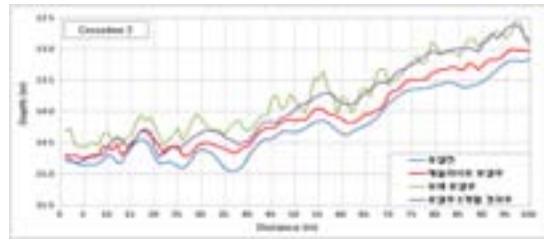


[그림. V-라-11] 피복재 포설 6개월 경과 후 해저면영상조사 (SSS) 결과

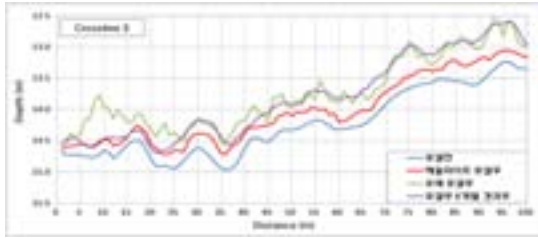




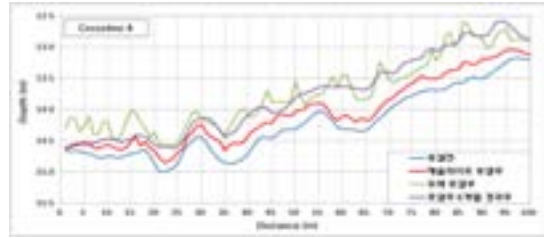
Crossline 1



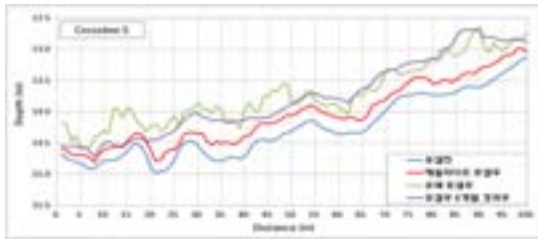
Crossline 2



Crossline 3



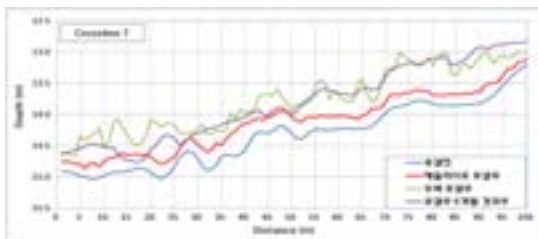
Crossline 4



Crossline 5



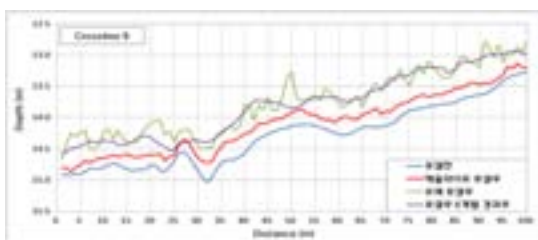
Crossline 6



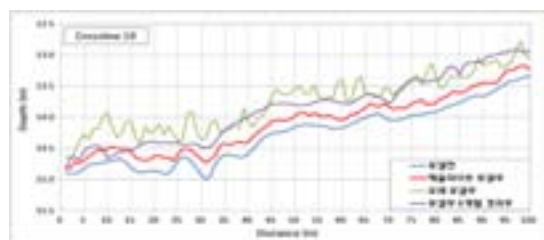
Crossline 7



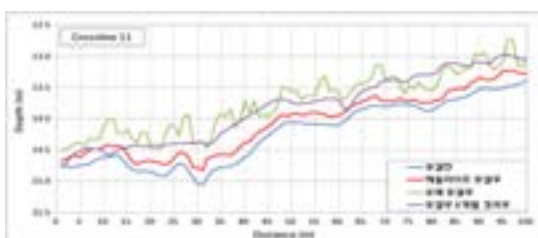
Crossline 8



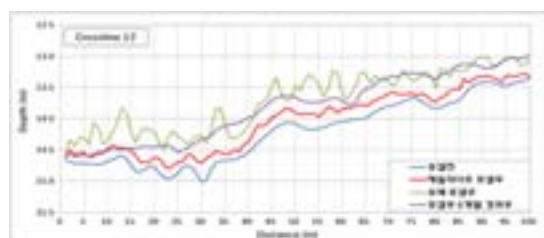
Crossline 9



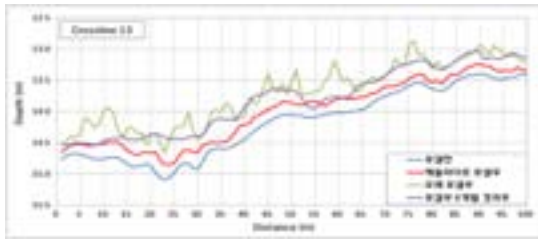
Crossline 10



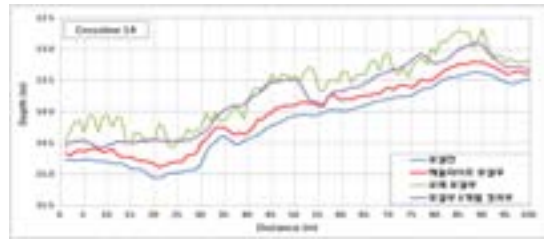
Crossline 11



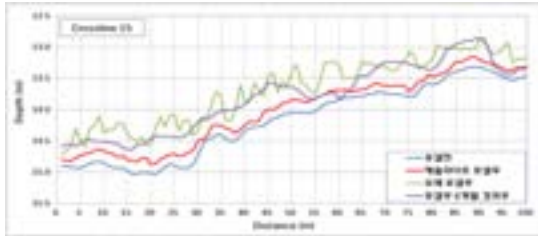
Crossline 12



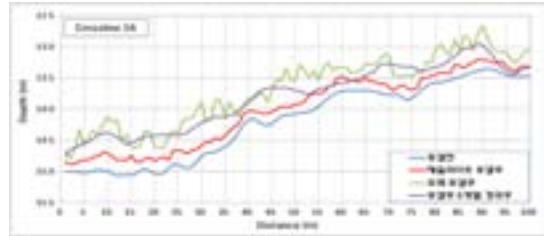
Crossline 13



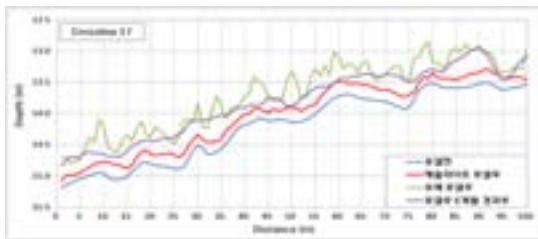
Crossline 14



Crossline 15



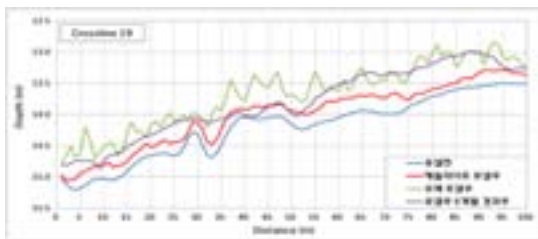
Crossline 16



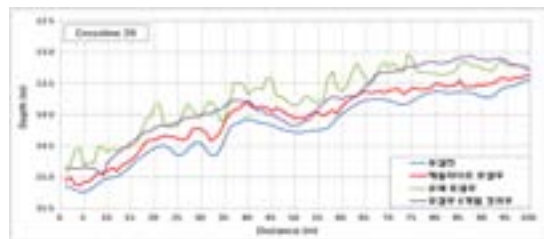
Crossline 17



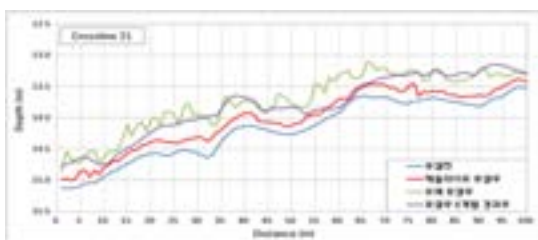
Crossline 18



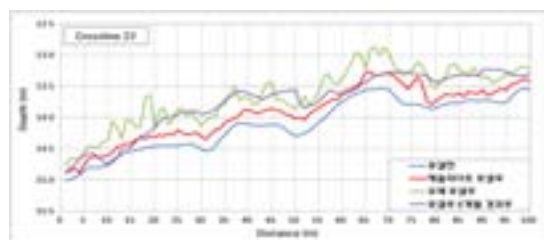
Crossline 19



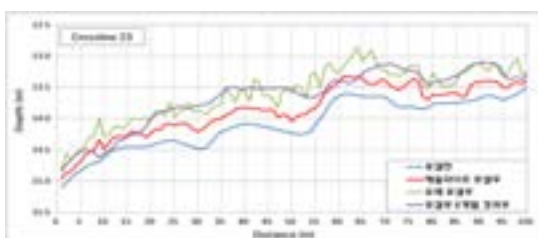
Crossline 20



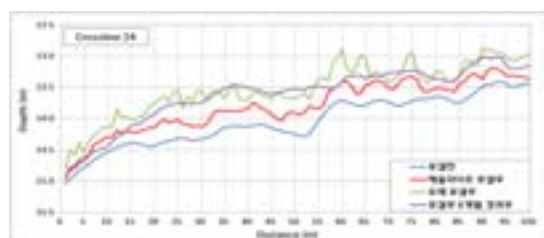
Crossline 21



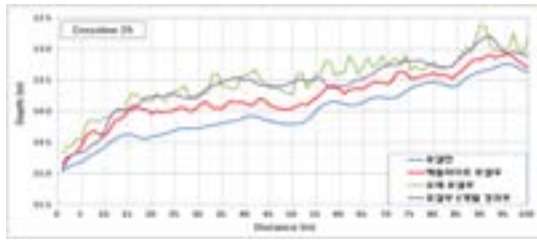
Crossline 22



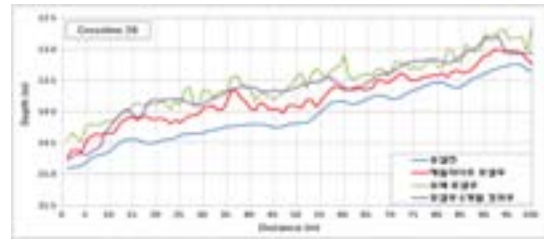
Crossline 23



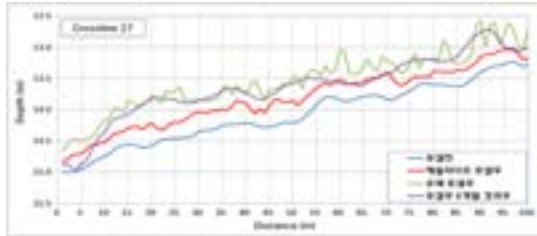
Crossline 24



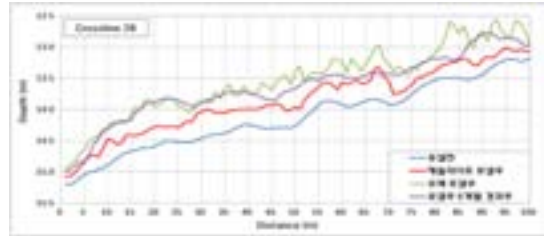
Crossline 25



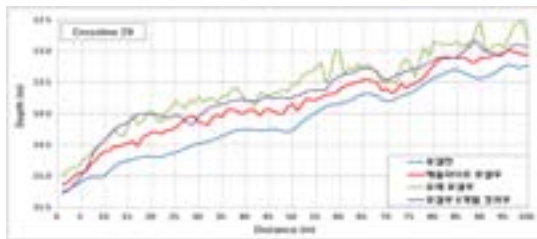
Crossline 26



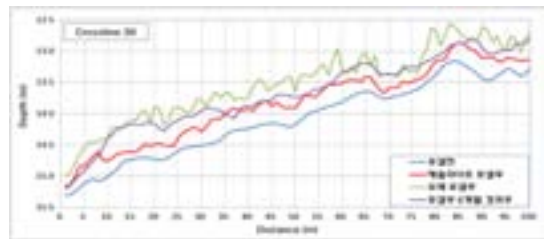
Crossline 27



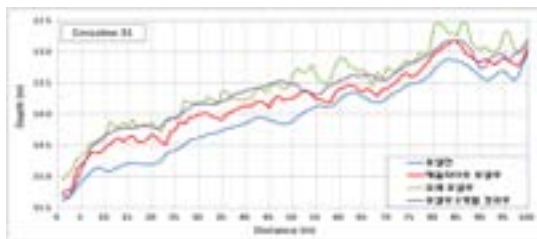
Crossline 28



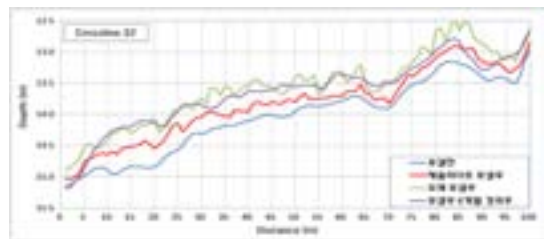
Crossline 29



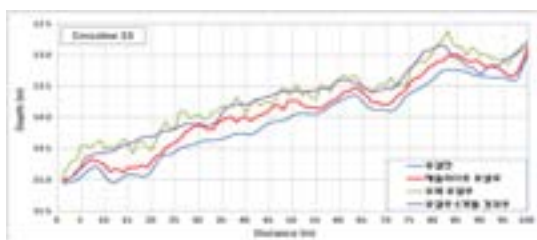
Crossline 30



Crossline 31



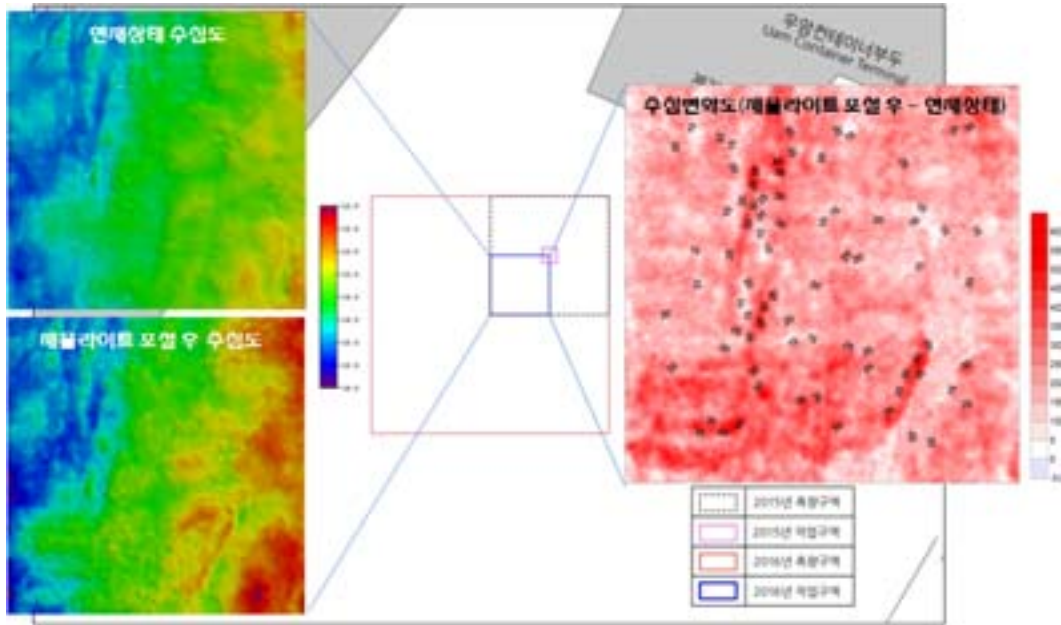
Crossline 32



Crossline 33

### ① 피복 전과 제올라이트 포설 후의 지형비교

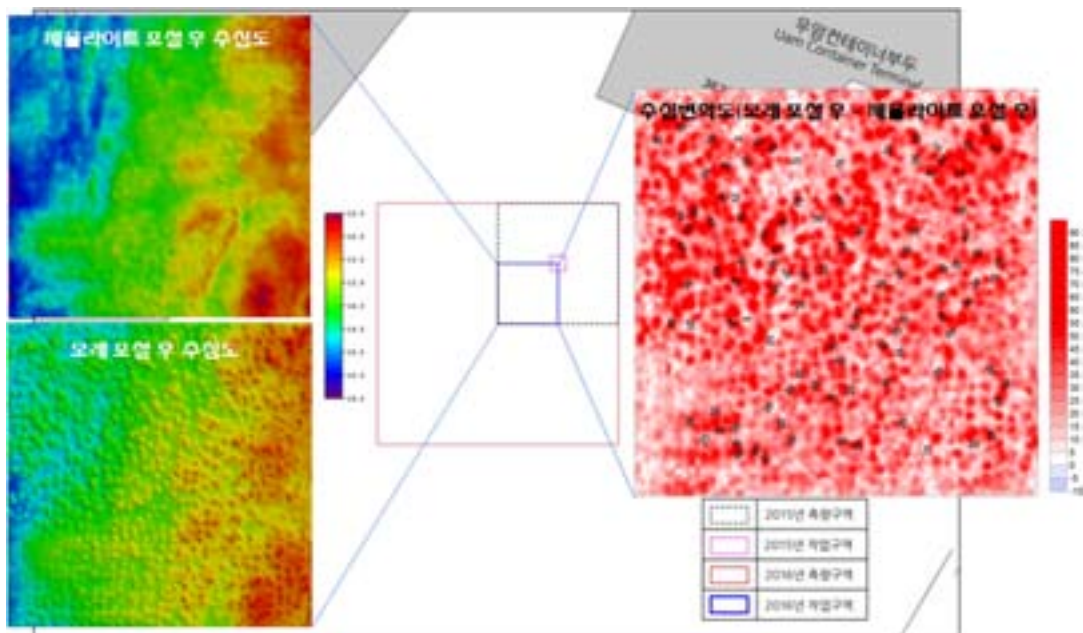
- 현재상태와 제올라이트 포설 후 공간적인 지형변화 양상을 파악하기 위해 각각의 수심도와 수심변화도를 그림 V-라-12에 나타냄
- 피복 전 해저지형 조사결과 13.2~15.4 m의 수심 분포를 보이고 있고, 제올라이트 포설 이후 수심변화도를 살펴보면, 대부분의 영역에서 20 cm의 포설높이를 만족하고 있음을 확인할 수 있었음



[그림. V-라-12] 피복 전과 제올라이트 포설 후의 수심변화도

### ② 제올라이트 포설 후와 모래 포설 후 지형비교

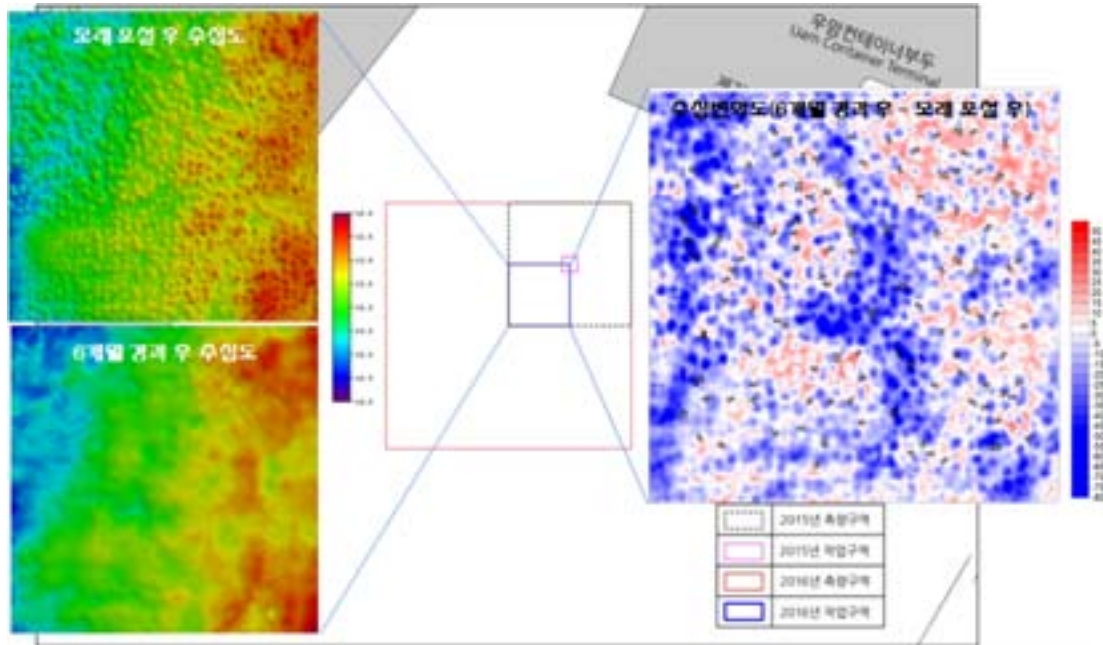
- 제올라이트 포설 후와 모래 포설 후의 공간적인 지형변화 양상을 파악하기 위해 각각의 수심도와 수심변화도를 그림 V-라-13에 나타냄
- 제올라이트 포설 후의 수심도의 경우 비교적 수심변화가 크게 나타나지 않고 있으나, 모래 포설 후의 수심도의 경우 공간적으로 고르게 포설되지 않은 영역이 분포
- 그러나 수심변화도를 통해 확인해볼 때 대부분의 영역에서 30 cm의 목표 포설높이를 만족하고 있음을 확인할 수 있음



[그림. V-라-13] 제올라이트 포설 후와 모래 포설 후의 수심변화도

### ③ 모래 포설 후와 6개월 경과 후 지형비교

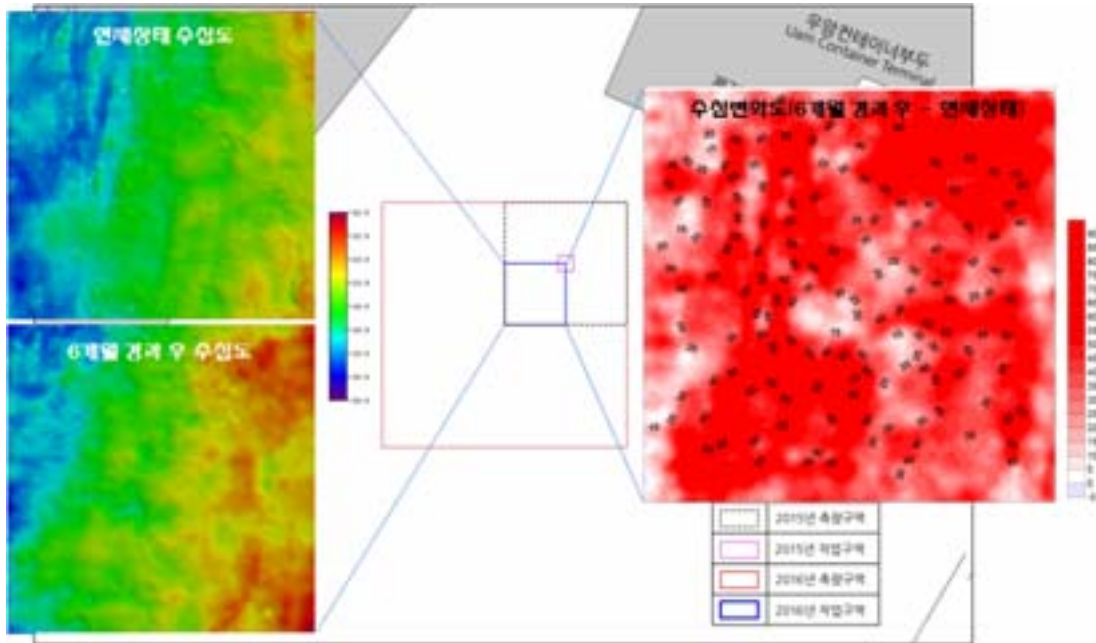
- 모래 포설 후와 피복재 포설 6개월 경과 후의 공간적인 지형변화 양상을 파악하기 위해 각각의 수심도와 수심변화도를 그림 V-라-14에 나타냄
- 모래 포설 후의 수심도의 경우 공간적으로 고르게 포설되지 않은 영역이 분포하였으나, 6개월 경과 후 모래포설 당시 고르지 못하게 포설된 부분이 완만한 형태로 변함
- 일부구간에서는 외력에 의해 모래층이 유실이 된 현상을 확인할 수 있으나, 유실된 구간에서도 제올라이트층의 상부층까지는 포설높이를 유지하고 있는 것으로 판단



[그림. V-라-14] 피복재 포설 6개월 후의 수심변화도

#### ④ 피복 전과 6개월 경과 후 지형비교

- 피복 전과 피복재 포설 6개월 경과 후의 공간적인 지형변화 양상을 파악하기 위해 각각의 수심도와 수심변화도를 그림 V-라-15에 나타냄
- 피복 전과 비교할 때 제올라이트, 모래 포설 6개월 경과라는 과정이 진행되었고, 공간적으로 50 cm(제올라이트 20 cm, 모래 30 cm)의 포설높이를 만족하고 있는 결과를 나타내고 있어, 6개월이 경과한 이후에도 대상해역의 시공상태는 비교적 잘 유지되고 있는 것으로 판단됨



[그림. V-라-15] 피복 전과 피복 6개월 경과 후의 수심변화도

(나) 해저지형조사 및 해저지형도 제작

① 멀티빔 수심조사(MBES)

㉞ 시스템 구성


- 멀티빔 음향측심기(Multi-Beam Echo Sounder)는 음원발생기(Transducer)인 송파기와 음파를 수신하는 수파기(Hydrophone) 그리고 신호처리를 위한 처리시스템(Processor)과 영상기 등으로 구성
- 이때, 단빔 음향 측심 방식과는 달리 멀티빔은 수십 개 이상의 빔이 송수신되므로 음원발생기의 움직임을 추적하는 모션 센서(motion sensor)와 방위를 측정하는 자이로 콤파스(Gyro compass)가 필요함
- 모션 센서와 자이로 콤파스는 정밀한 수심 측정을 위해 꼭 필요한 멀티빔 시스템의 요소이며, 수심자료 처리 시 각각의 보정을 위한 수층음속단면 자료 및 조석관측 자료가 필요



[그림. V-라-16] 해저지형도 제작을 위한 시스템 구성

- 인공위성위치측정기(DGPS) : 본 장비는 인공위성과 위치가 정확한 기준점을 이용하여 측정수심의 정밀위치를 파악하는 기기로서 본 조사에서는 Hemisphere DGPS를 사용

[표. V-라-2] Hemisphere DGPS의 제원

모 델	R100 Series	사 진
제 작 사	Hemisphere DGPS	
기 종	Marine Series	
주파수 대역	283.5~325 kHz	
위치결정시간	60초 (최초), 2초(재시동)	
프 로 토 콜	NMEA 0183	
Timeing out	1 PPS	
전 원	12V DC(6W)	
호환프로그램	Hypack Max™(Coastal Oceanographic Inc.)	


- 멀티빔 음향측심기(Multibeam Sonar) : 본 장비는 정밀해저지형측량의 주 장비로서 면측량(Swath Coverage) 방식의 수심측량 장비임, 한번 측량 시 수심의 수배 이상을 커버하며, 본 조사에서는 Reson사의 Seabat 7125멀티빔 음향측심기를 사용

[표. V-라-3] 멀티빔음향측심기의 제원

모 델	Seabat 7125	사 진
제 작 사	Reson Incorporation(미국)	
주 파 수	400kHz	
빔 수	256개	
최대수심측정	300 m	
해 상 도	0.5 cm	
등 급	IHO 특등급 기준 만족	
주 사 각	128°	
종주/횡주사각도	0.5°	
자료취득 SW	PDS2000™	
자료처리 SW	Caris Hips & Sips™	


- 모션센서 및 자이로컴퍼스 : 조사선의 거동(Roll, Pitch, Heading, Heave)을 수심자료와 동시에 취득하여 수심정보의 정확성을 도모하기 위한 장비로 본 조사에서는 IXSEA OCEANO사의 Octans™를 사용하였다.

[표. V-라-4] 모션센서와 자이로컴퍼스의 제원

모 델	Octans(Gyrocompass+Motion Sensor)	사 진
제 작 사	Ixsea & Oceano Technologies	
기 종	Octans™	
출력 주파수	0.001 - 300 Hz	
정 확 도	Heading: 0.1°, Roll & Pitch: 0.01°	
Settling Time	1분	
작 동 온 도	-40°C ~ 80°C	
등 급	IHO 특등급 기준 만족	
무 게	4.5 kg	
전 원	24V DC / 12W	


- 음속측정기(SVP-70 & SVP-15) : 본 장비들은 수중의 음속을 측정하는 장비들로서 멀티 빔소나 헤드(head)에 설치하여 수심과 동시에 표층음속을 취득하여 실시간으로 적용시키는 SVP-70과 조사해역 수층 음속단면을 측정하는 SVP-15임

[표. V-라-5] 표층음속측정기(SVP-70)의 제원

모 델	SVP-70	사 진
제 작 사	Reson Incorporation	
측정음속범위	1,350-1,600 m/sec	
주 파 수	2 MHz	
정 확 도	± 0.25 m/sec	
해 상 도	0.1 m/sec	
메모리 용량	6,000 measurements	
작 동 온 도	0-45°C	
Depth Range	10 m	
전 원	24V DC / 120 mA	

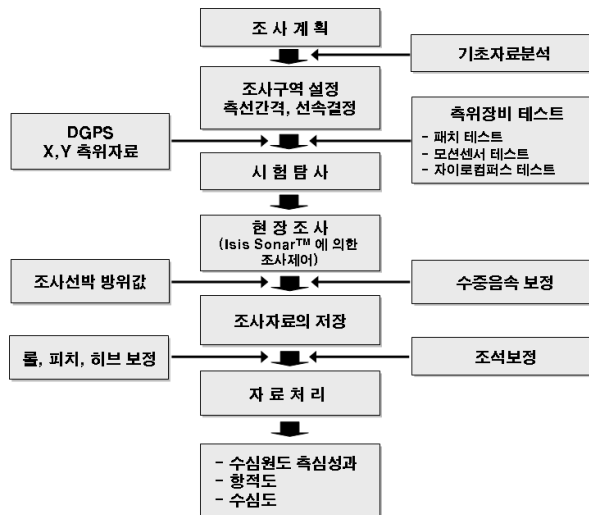


[표. V-라-6] 수중음속단면측정기(SVP-15)의 제원

모 델	SVP-15	사 진
제 작 사	Reson Incorporation	
측정음속범위	1,350-1,600 m/sec	
주 파 수	2 MHz	
정 확 도	± 0.25 m/sec	
해 상 도	0.1 m/sec	
메모리 용량	400 measurements	
작 동 온 도	0-45°C	
Depth Range	200 m / 0.5 m steps	
전 원	24V DC / 1W	

㉠ 측량 절차

- 멀티빔음향측심은 첨단 시스템을 사용하기 때문에 해상조사 특성을 고려한 조사계획의 수립과 각 장비에 대한 사전 테스트가 이루어져야 함
- 본 조사는 먼저 현장 및 조사항목에 대한 기초자료를 수집 및 분석하였으며, 조사구역에 대한 측선배치 및 선속을 설정
- DGPS를 비롯하여 각 센서에 대한 테스트는 시험탐사 시 실시하였으며, 현장조사를 통하여 취득한 멀티빔 수심자료는 각종 보정, 필터링 및 오측심을 제거한 최종 수심자료를 사용하여 수심도 및 기타 성과도면으로 작성



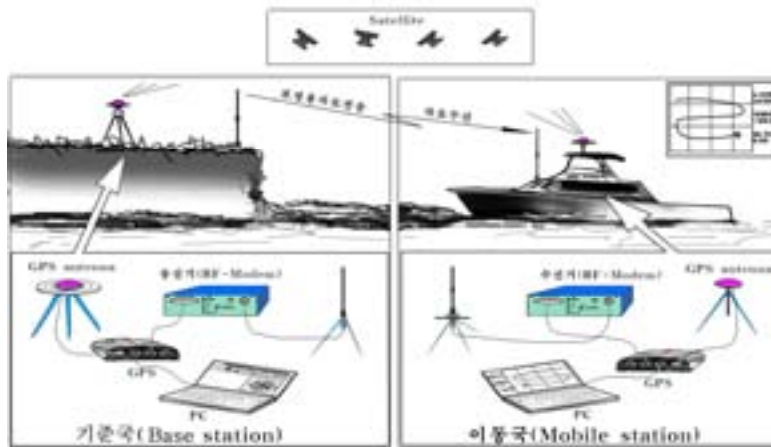
[그림. V-라-17] 작업 흐름도

㉡ 위치 측정

- 조사선의 위치는 기준국의 위치자료에 포함된 오차를 실측 자료에 보정하는 상대 측위 방

식으로 결정

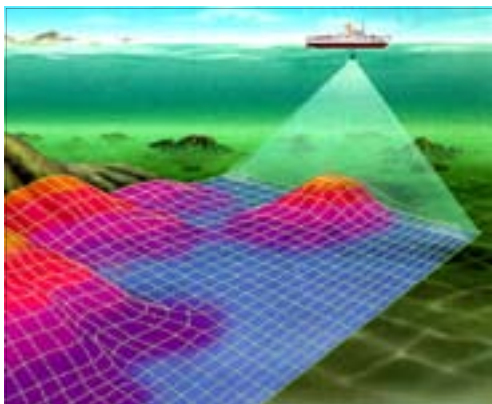
- DGPS는 위치를 정확하게 알고 있는 기준점인 기준국에서 그 기준점의 위치 자료와 위성 위치확인시스템(GPS)의 수신기를 이용하여 측정된 위치 값을 비교하여 오차 값을 검출
- 기준국에서 약 100~200 km 떨어진 지점의 실제 측정위치 오차는 기준점의 오차와 유사하므로, 측정된 위치 값에서 기준점의 오차 값을 제거하면 측정 위치의 정밀도는 현저히 향상되는 원리임



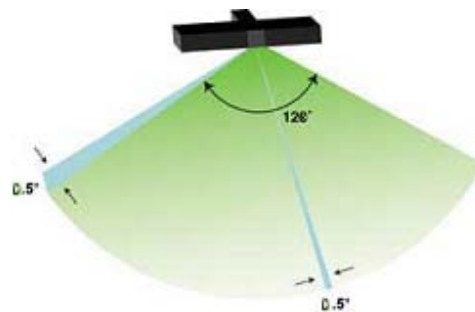
[그림. V-라-18] DGPS 위치결정 모식도

#### ㉔ 자료 취득

- Seabat 7125 멀티빔 음향 시스템은 측심기 직하방을 중심으로 총 128°의 빔을 부채꼴 형태로 0.5°씩 나누어 총 256개를 발사하며, 빔의 왕복시간에 수중 음속을 보정하여 수심을 취득
- 그림 V-라-19와 20은 각각 멀티빔 음향측심기의 탐사모식도 및 측량 범위를 나타낸 모식도임
- 자료 취득에 앞서 조사해역 주변상황 및 기상상태는 현지답사를 통하여 파악하였으며, 취득된 원자료를 효율적으로 관리하기 위하여 원자료의 내용을 함축하여 저장할 수 있는 PDS2000™을 통하여 수심을 취득

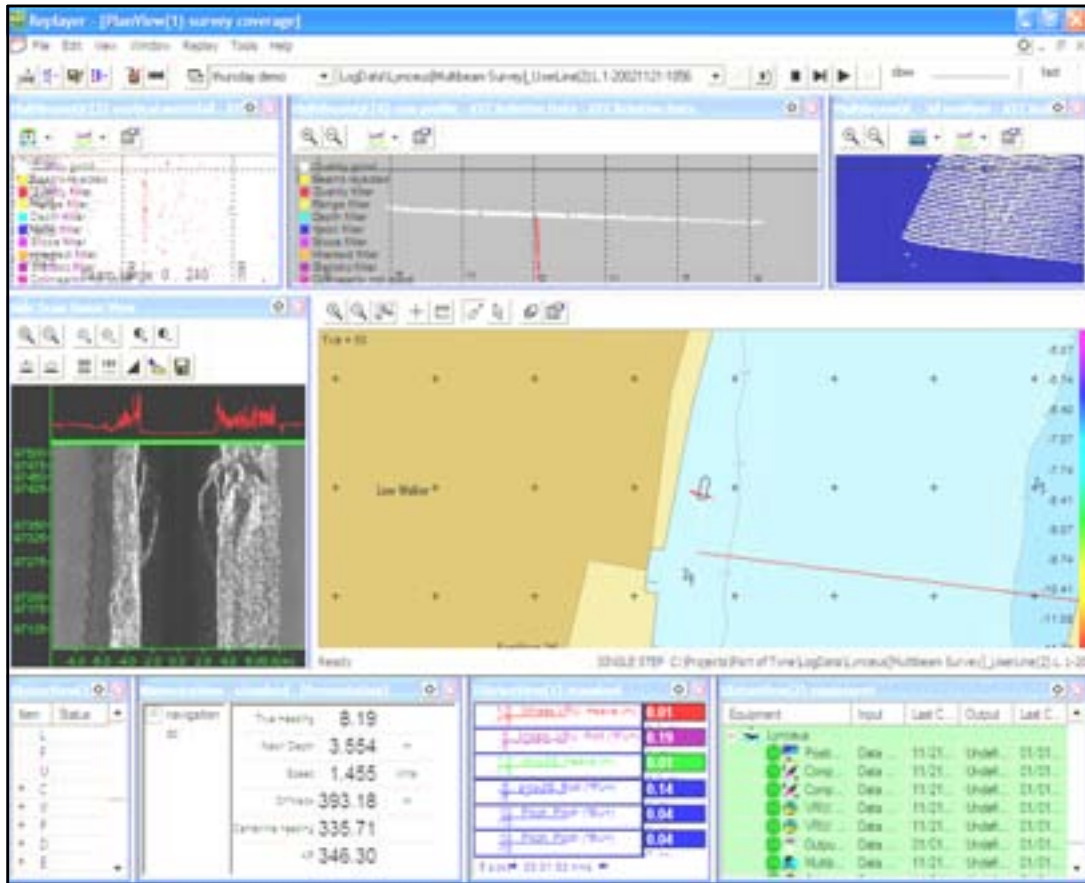


[그림. V-라-19] 멀티빔 수심측량 모식도



[그림. V-라-20] 멀티빔 송수신각(128°)





- 패치테스트(Patch test) : 패치테스트는 최초 설치되는 선박에 대해서 실시하는 테스트로 특정 해저면에서 얻어진 두 수심자료를 비교하여 멀티빔 소나헤드의 기하학적 설치 상태를 수치로 계산 후 수심자료의 오차가 최소가 되는 센서의 값을 구하기 위한 측심 과정
- 이러한 패치테스트는 Roll, Pitch, Yaw 및 Latency를 보정하기 위하여 특정지역에서 연장이 300 m~500 m인 라인을 중첩하여 실시 (Hughes Clarke & J.E., 1998).

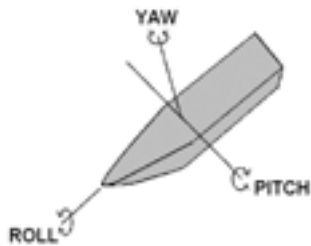


[그림. V-라-21] 멀티빔 취득 프로그램(PDS2000™)

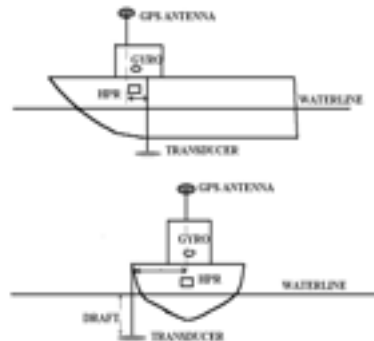
- 본 조사는 조사해역이 약 2-5m 정도의 조차 환경임을 고려하여 최단 시간, 동일한 해상 조건 및 조위 조건하에서 패치테스트를 수행
- 선박의 움직임에 대해서 시스템 보정을 위한 3성분의 지향각(Pitch, Roll, Yaw)과 Latency의 값은 조사선에 부착되는 각 센서의 위치에 따라 큰 영향을 받으므로 각 센서의 오프셋을 측정하여 패치테스트에 반영

[표. V-라-7] 패치테스트 실행방법(Herlihy et al., 1989)

	<p><b>ROLL</b></p>	<p>깊고 평탄한 해저면인 곳에서 서로 다른 방향, 같은 속도로 조사.</p>
	<p><b>PITCH</b></p>	<p>경사지거나 퇴(bank)지역에서 같은 방향, 다른 속도(약 2배)로 조사.</p>
	<p><b>LATENCY</b></p>	<p>경사지거나 퇴(bank)지역에서 다른 방향, 같은 속도로 조사.</p>
	<p><b>YAW</b></p>	<p>특정물체가 있는 해저면이나 퇴(bank)지역에서 다른 방향, 같은 속도로 수심의 두 배 간격으로 조사.</p>



[그림. V-라-22] 선박 3 성분 지향각

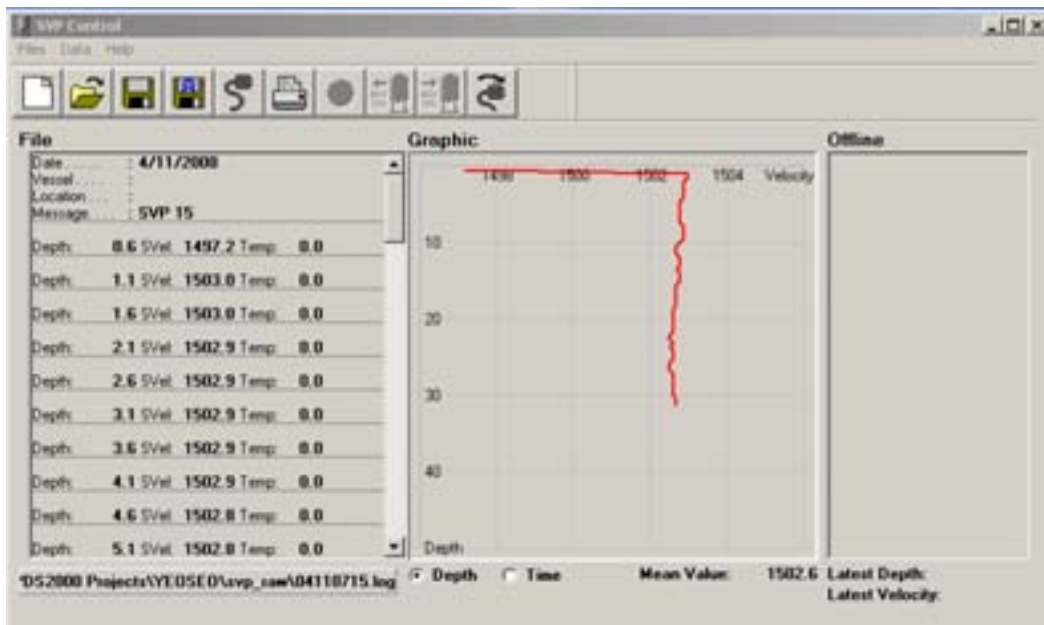


[그림. V-라-23] 센서 옵션

- 음속도 측정 : 수심은 음파가 해저면에 도달한 후 되돌아오는 시간을 환산하여 계산, 수중 음파속도는 수온과 염분에 의해 영향을 받으며, 일반적으로 1,400~1,600m/s 사이의 값을 갖음
- 정확한 수심을 계산하기 위해서 모든 음향측심기는 반드시 음속도를 보정해야 하며 염분과 수온, 수압 등을 고려한 음속단면측정기(SVP-15)에 의해 계산
- 음향 측심기의 기계적 오차 및 수중 음속도의 변화 등에 의해 야기되는 측량 오차를 측정하기 위해 수중음속단면을 취득하였으며, 가능한 한 측심 해역의 최심부에서 수행

[표. V-라-8] 음파속도 변화표

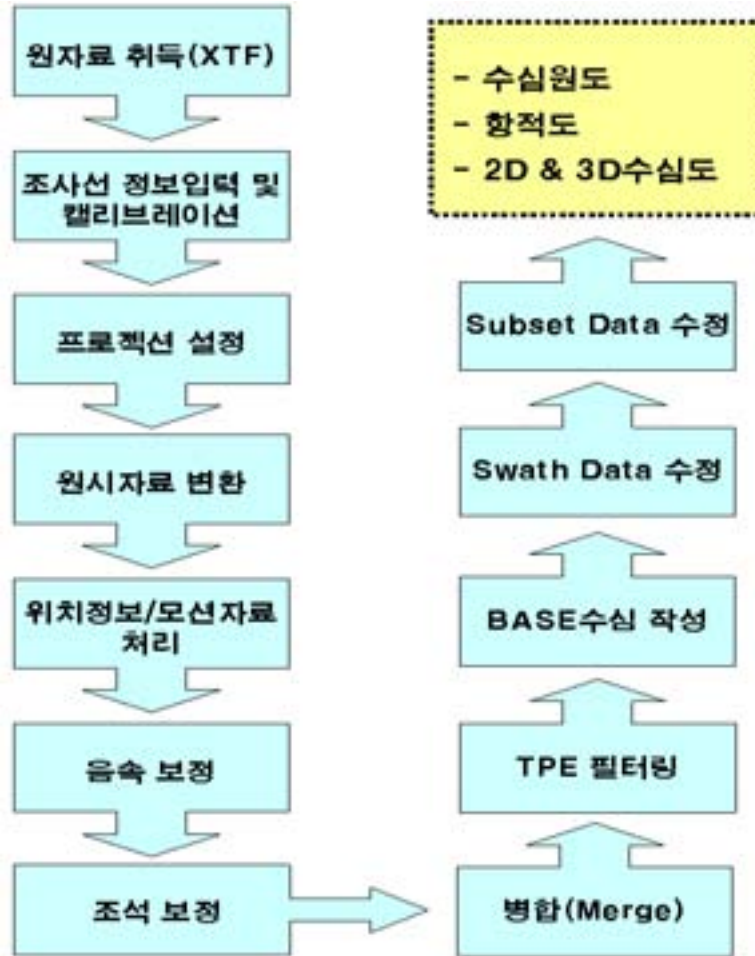
음 파 속 도(m/s)								
염분(%) \ T(°C)	0	5	10	15	20	25	30	35
0	1,403	1,410	1,417	1,423	1,430	1,437	1,443	1,450
10	1,447	1,454	1,460	1,466	1,472	1,478	1,485	1,491
20	1,482	1,488	1,494	1,500	1,505	1,511	1,517	1,522



[그림. V-라-24] 음속도 프로파일 예시

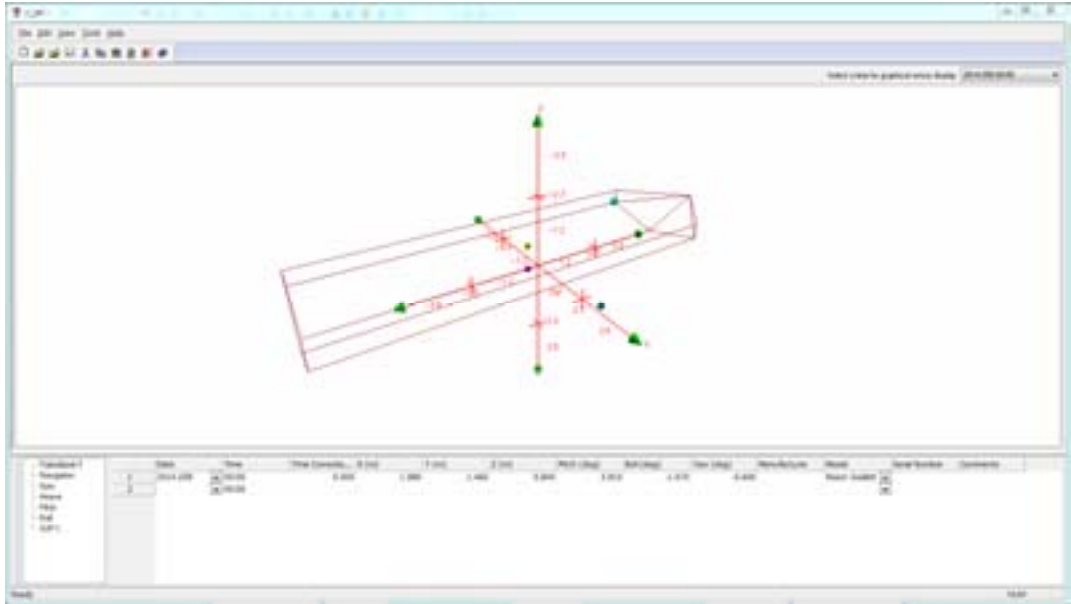
㉓ 자료 처리

- 처리과정 : 멀티빔음향측심기의 원자료는 PDS2000에서 정의하고 있는 PDS포맷 형식으로 저장되었으며, 이 자료에는 위치자료 및 모션자료도 포함



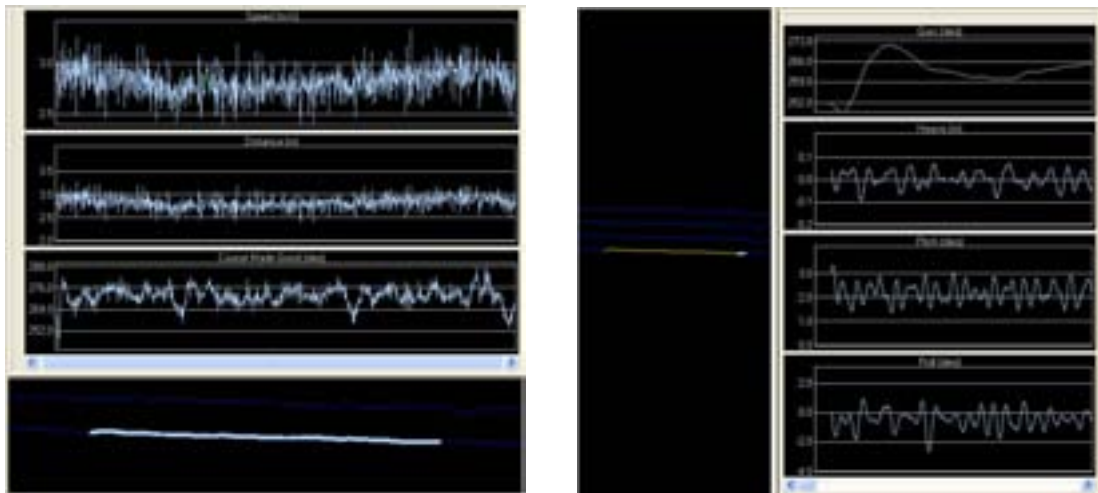
[그림. V-라-25] 멀티빔 자료처리 순서도

- 조사선 정보입력 : 조사선의 정보입력은 조사선의 무게중심(Reference Point)을 기준으로 트랜스듀서를 포함한 각 센서(DGPS, 모션센서, Gyro, 송수파기)의 오프셋(Offset)을 하나의 파일로 만드는 과정을 뜻함
- 이러한 오프셋 거리는 조사선의 선수방향을 전면으로 위치하였을 때 좌우방향이 X축, 전후방향이 Y축, 상하방향이 Z축을 뜻함
- 각 축은 거리기준을 중심으로 각각 음과 양의 부호를 붙이며 X축은 우측, Y축은 전면, Z축은 아랫방향이 양(+)수입
- 이러한 정보는 멀티빔 자료처리 시 기본이 되는 정보이며, 하나의 파일(Hips Vessel Editor)로 만들어져 각 파일에서 수심정보의 기준면을 설정하게 된다. 또한 이 파일의 이름은 프로젝션 설정 시 동일하게 적용되어 최상위 폴더를 구성



[그림. V-라-26] 센서 옵셋을 포함한 Vessel Editor 작성

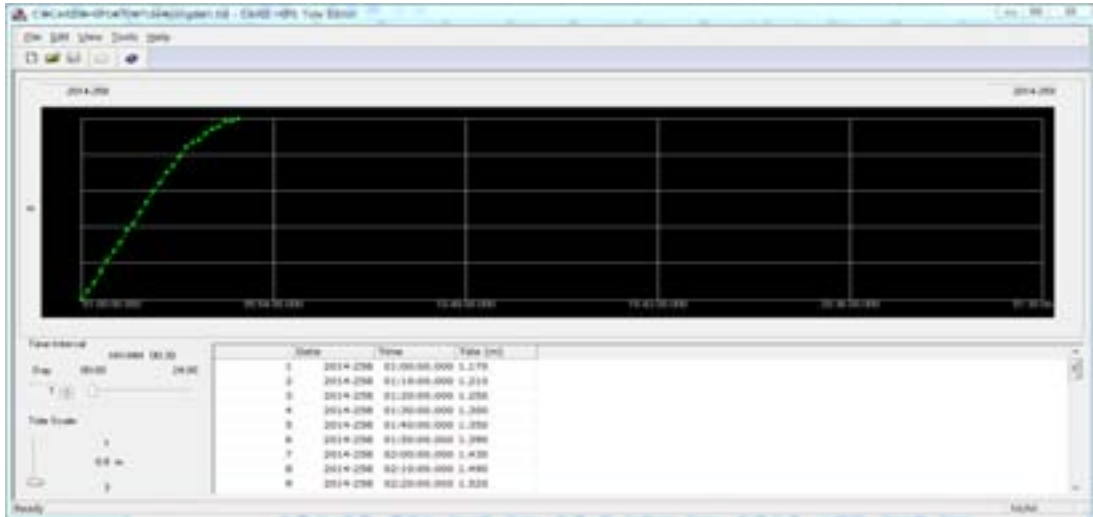
- 위치(Navigation) 및 모션자료(Attitude) 처리 : 위치자료(Navigation) 보정은 조사선속도(Speed), 거리(Distance) 및 진행방향(Course)에 대한 오측자료를 제거하는 과정
- 조사선의 속도는 3~6 knots의 범위로 설정하여 필터링하였으며, 거리와 진행방향자료의 처리는 연속된 자료 내에서 발생하는 이상변위 값을 선택하여 제거



[그림. V-라-27] Navigation 및 Attitude 보정 설정

- 모션자료(Attitude) 보정은 Roll( $^{\circ}$ ), Pitch( $^{\circ}$ ), Heave(m)의 연속된 값에 대하여 오측자료가 발생할 때 이를 제거하는 과정
- 모션자료에 대한 필터링 설정은 연속된 자료에서 Roll과 Pitch는  $0.5^{\circ}$ , Heave 0.6 m 이상의 값이 발생할 때 이를 필터링 후 자료를 연결하였으며 자료의 이상이 연속적으로 나타나는 소구간은 선택하여 제거

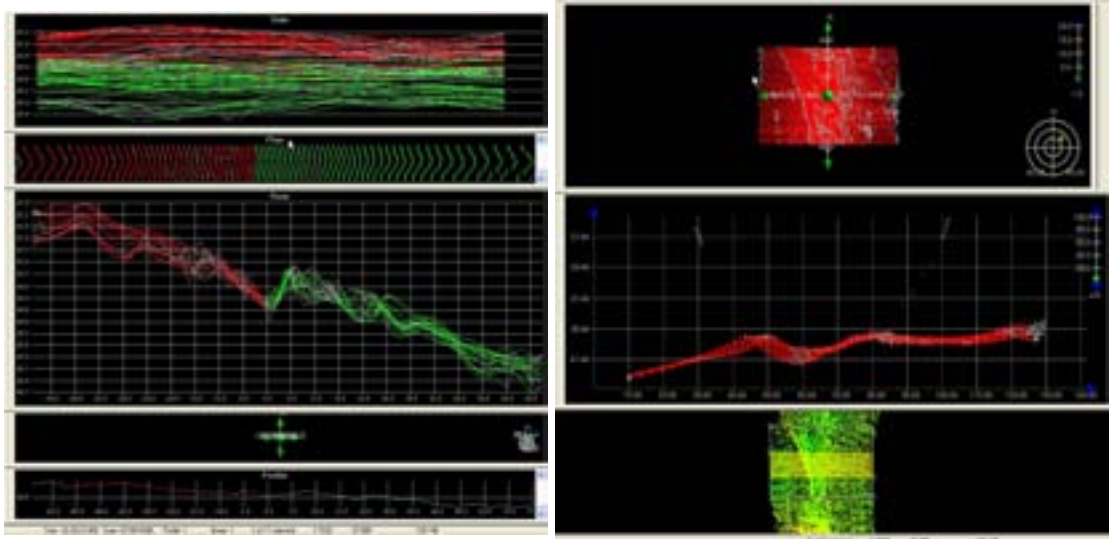
- 조석 및 음속 보정 : 취득된 시간의 조위 자료와 수층의 음속 단면자료는 수심의 기준면과 오차를 최소화하기 위한 기본 자료
- 특히 조위자료는 조석간만의 차가 큰 지역에서는 수심 오차의 최대원인으로 작용할 수 있음
- 따라서 조석파일 산정에 정확성을 도모하였으며, 조석보정을 위해 생성된 자료는 10분 간격으로 조석자료를 추출하여 \*.TID형식으로 변환하여 Caris Hips에 적용
- 수층음속단면 자료의 형식은 \*.Log이며, 조사해역 중 멀티빔 수심자료에 조사시간과 가장 근접한 음속단면 자료를 적용



[그림. V-라-28] 조위 보정 예시

- 오측심 수동(자동) 제거 : 오측심에 대한 보정은 수심의 범위, 빔 각도, 빔의 질(Poor, Low, Bad Quality) 등에 따른 수심 자료를 자동 및 수동으로 제거하는 방법을 사용
- 오측심 수동 제거는 Swath Data 수정 및 Subset Data 수정으로 나눔
- Swath Data 수정은 해저면의 측면과 후면에서 보았을 때 현저하게 차이가 나는 수심 자료를 제거하는 과정이며, Subset Data 수정은 해저지형을 면으로 잘라서 현저한 수심 자료를 제거하는 과정
- 오측심 자동제거는 필터링을 사용하며, 본 조사에서는 IHO기준 특등급(S-44) 수준 이하의 오측심자료를 제거





<Swath Editor>

<Subset Editor>

[그림. V-라-29] 오측심 수동 및 자동 제거

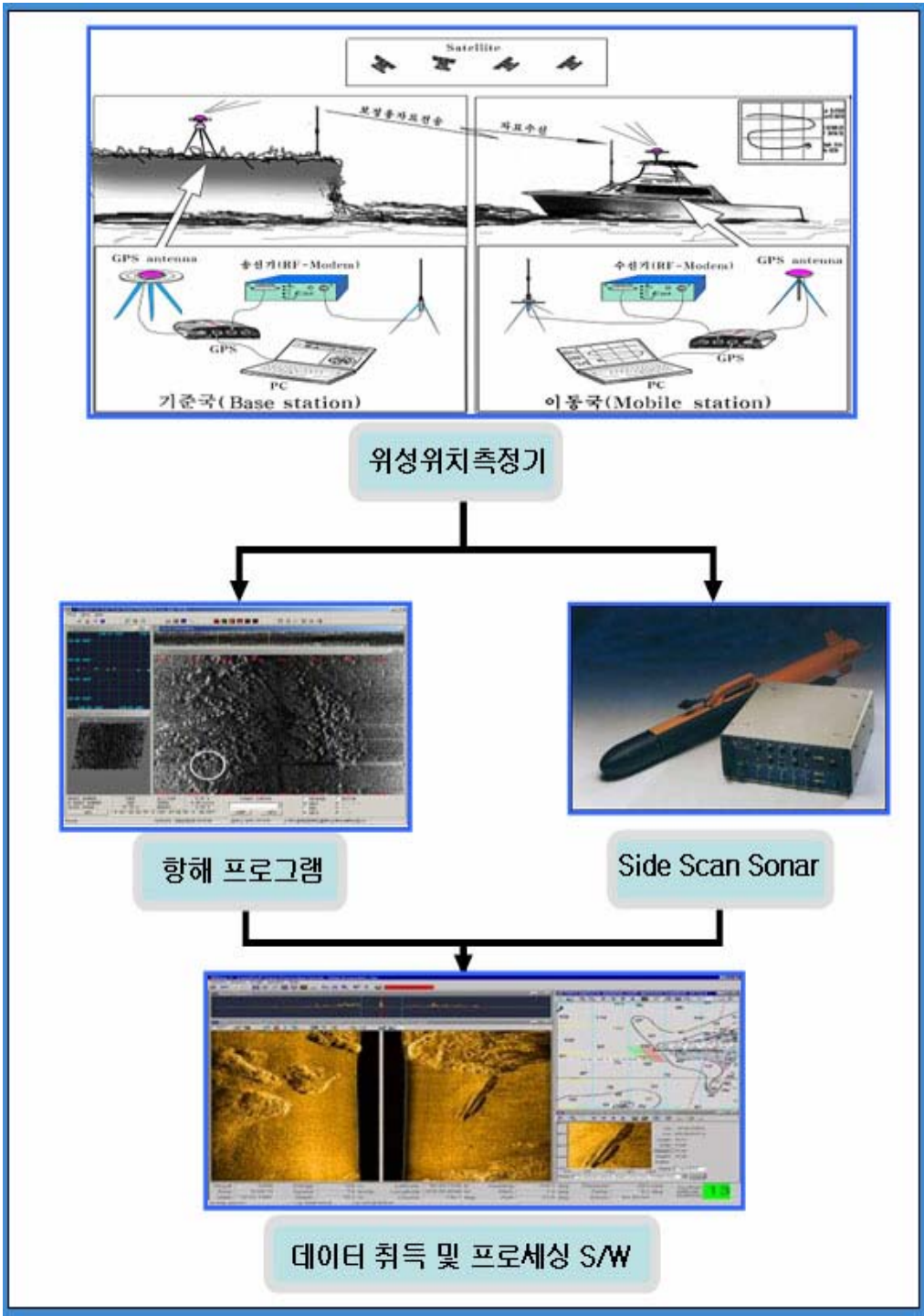
### ㉞ 자료 구현

- Caris Hips™는 자료처리를 거쳐 생성된 수심을 XYZ파일, 2-D이미지 및 CARIS map으로 변환하여 생성할 수 있음
- 본 조사에서 수심의 최종결과물은 'HIPS to ASCII'를 이용하여 처리가 완료된 자료를 XYZ(\*.xyz) 파일로 생성
- 생성된 파일은 HypackMax™에서 도면생성용 수심자료로 변환하였으며, Autocad™를 통하여 횡단도면으로 출력
- 또한 최종 처리된 XYZ자료는 Fledermaus™에서 수심범위에 따라 각각의 픽셀로 표현되는 3-D 수심도를 작성

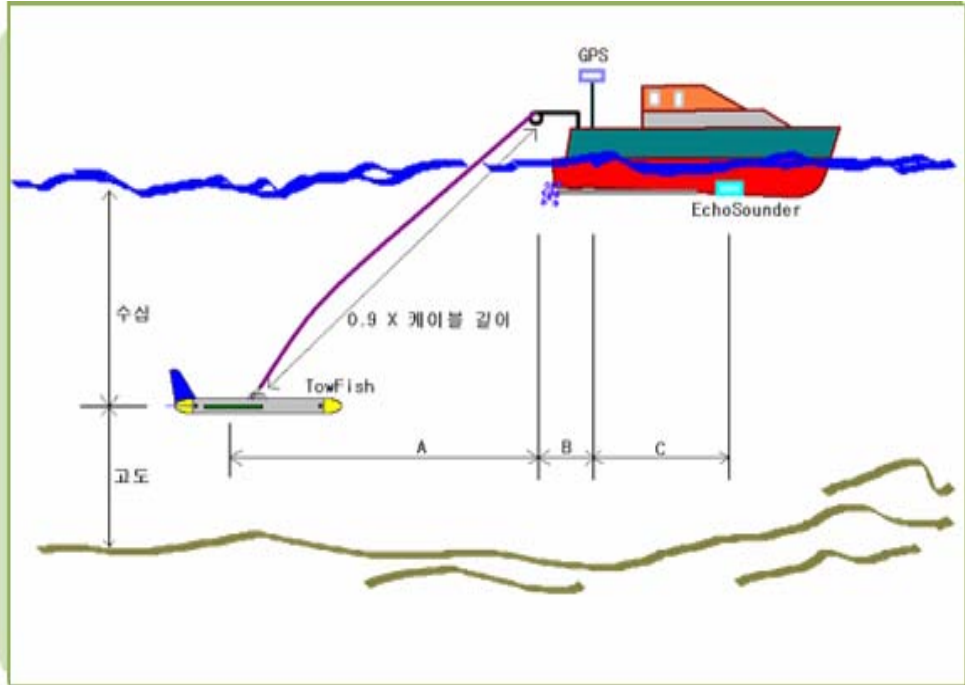
## ② 해저면영상조사(SSS)

### ㉟ 시스템 구성

- 해저면영상기(Side Scan Sonar)는 해저면에 존재하는 개체의 광역 영상을 제공하는 음향 영상기기임, 간단히 말하면, 이 시스템은 기록 장치,海中 감지 장치, 그리고 이 두 장치를 연결하는 케이블로 구성
- 해저면영상조사는 선저에 부착하는 경우도 있으나, 연안해역에서는 대부분 선미에 일정 거리를 두고 예인하는 방식으로 이루어짐
- 본 탐사에서 탐사 전 센서부착상태 확인, 케이블 결선상태 확인 및 견인 안전장치에 대한 확인을 실시하고 케이블과 탐사체의 연결 콘넥터를 확인하였으며, 신호처리부 및 영상처리부에 대한 연결상태를 확인



[그림. V-라-30] 해저면영상조사 시스템구성도



[그림. V-라-31] 해저면영상조사 모식도

㉞ 자료 취득

- 본 조사에서 센서가 해저면에서 최적 높이를 유지하도록 선미에서 케이블로 예인하고 조사구역의 해저 전면을 주사할 수 있도록 수심에 따라 주파수를 조절하여 400kHz의 고주파로 수행
- 조사 중 좌우현의 폭은 각각 60m로 유지하였으며, 조사 라인은 인접라인과 약 50미터 간격으로 계획하여 탐사
- 센서는 스크류의 영향을 최소화하기 위하여 선박의 우측 선미쪽에 설치하여 케이블의 길이를 조정

[표. V-라-9] 해저면영상조사기(SSS) 제원

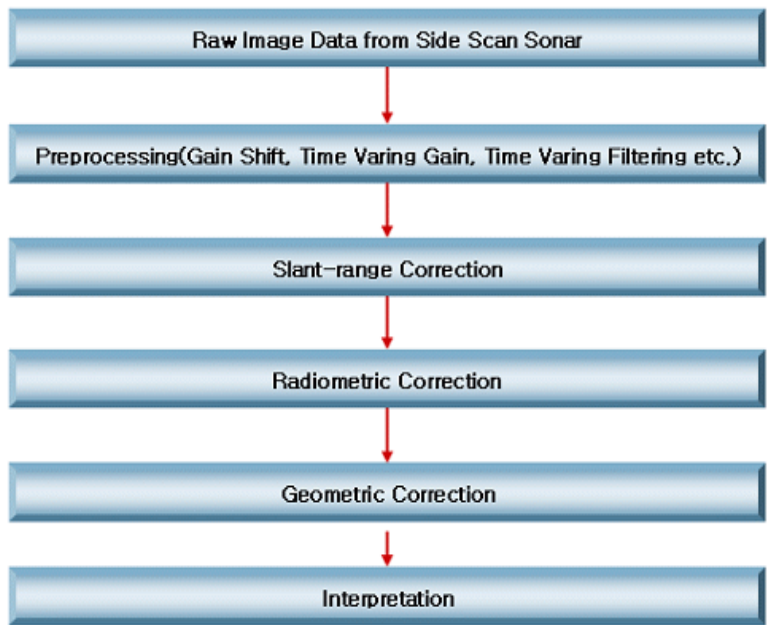
모 델	S-150S	사 진
제 작 사	DSME	
주 파 수	400 kHz	
수평/수직범폭	0.3°/40°	
송수파기 모델	TTV-170	
발신음 길이/해상도	15 ~ 200 $\mu$ s / 7cm(max)	
Power	80 ~ 240VAC, 50 ~ 60Hz, 100W	
취득/처리 SW	Real Scan / Post Scan	

㉞ 자료 처리 및 분석

- 현장에서 적정고도와 일정 정도의 감도 조절을 통한 고품질의 원자료는 경사거리보정, 방

위 조정, 모자이크처리 등의 후처리 과정을 거침

- 대상체의 높이, 중앙축선으로부터의 해저면 수평거리, 규모등을 정량적으로 산정하여 대상체의 제원을 도출하며, 해양탐사 및 지질 전문가에 의해 대상체의 정체성을 규명
- 현장에서 취득한 영상자료는 Abyss 2-5에서 각종 필터링 작업을 통하여 자료의 품질을 높이고, 해저면 탐지 과정을 수작업으로 거친 후 수주제거(Slant range correction)를 수행하며, 제거된 영상파일에서 조사구역의 지장물 분석을 실시하여 제원을 규명하고, 기존자료 및 지층탐사와 비교하여 종합적으로 검토
- 수주가 제거된 영상자료는 조사구역 전체를 한 이미지로 보기 위하여 \*.map file로 전환하여 SonarMap 프로그램에서 모자이크(mosaicking) 실시, 전체 해저면영상자료를 통합 구현
- 해저면영상조사 자료에서 국부적으로 완만한 경사지역이나 음향적으로 반투명한 물체들의 기록은 약한 그림자를 만듦
- 반면에, 암석, 모래파(sand wave), 난파선, 혹은 큰 어류들은 분명하고 강한 그림자를 형성
- 따라서 그림자의 강도는 그 그림자를 야기한 물체의 구성 물질에 관한 정보를 제공
- 음탐 기록상에 밝은 부분을 만들어 내는 요인들은 크게 3가지로 구분되며 이러한 특성을 근거로 자료를 분석
  - 음향학적으로 불투명한 물체에 소나 빔이 막혀서 생겨난 그림자 지역
  - 부드럽고 평탄한 퇴적물같이 적은 백스캐터를 만드는 지역
- 토우피시에서 먼 경사지역처럼 적은 백스캐터를 회귀시키는 지역



[그림. V-라-32] 사이드스캔소나 자료처리 순서도

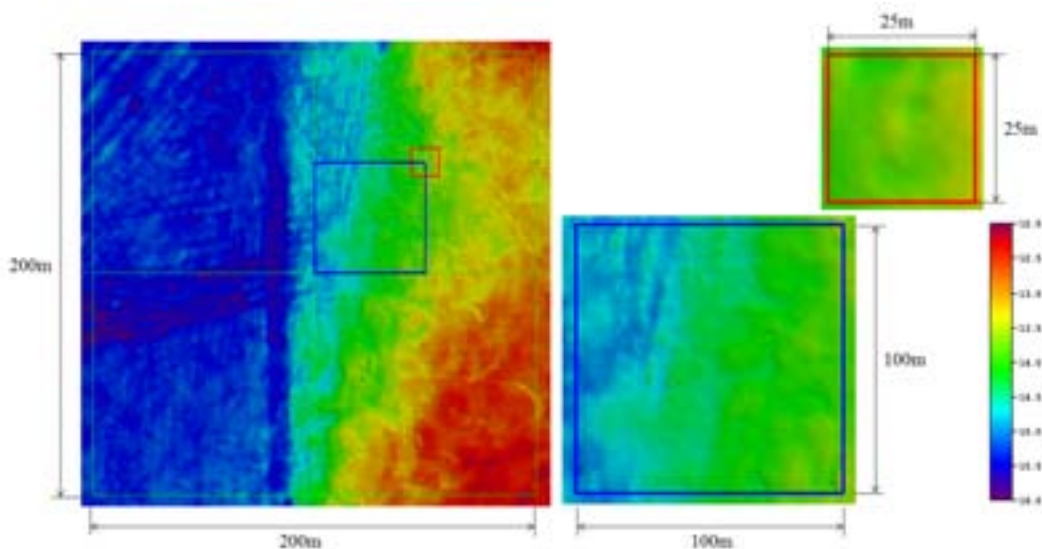
#### ㉔ 해저지형도 작성

- 시험시공 전에 사전조사를 실시하여 원지반 데이터를 수집한 결과는 표 V-라-10과 그림 V-라-33에 제시

- 200×200 m 지역은 10.7~15.9 m의 수심이 분포하였고, 2015년 3월에 1차 현장 시험시공을 시행한 25×25 m 지역은 12.8~13.6 m의 수심 분포를 보이고 있음
- 13.2~15.4 m의 비교적 평탄한 수심 분포를 보이고 있는 100×100 m 지역을 선정하여 2016년 4월에 2차 시험시공을 실시

[표. V-라-10] 시공구역좌표

구분	위치	수심분포	비고
200×200 m	① 35°07'10.14" N, 129°03'48.76" E ② 35°07'10.13" N, 129°03'56.66" E ③ 35°07'16.62" N, 129°03'56.67" E ④ 35°07'16.63" N, 129°03'48.77" E	10.7~15.9m	현장시공 예정구역
25×25 m	① 35°07'13.79" N, 129°03'52.22" E ② 35°07'13.78" N, 129°03'53.21" E ③ 35°07'12.97" N, 129°03'53.21" E ④ 35°07'12.97" N, 129°03'52.22" E	12.8~13.6m	2015년 시험시공 구역
100×100 m	① 35°07'10.18" N, 129°03'52.67" E ② 35°07'10.18" N, 129°03'48.72" E ③ 35°07'13.43" N, 129°03'48.72" E ④ 35°07'13.43" N, 129°03'52.67" E	13.2~15.4m	2016년 시험시공 구역



[그림. V-라-33] 해저지형 사전조사 결과(200×200 m(좌), 100×100 m(중), 25×25 m(우))

#### 마. 해양오염퇴적물 현장 처리기술 개발

##### (1) 현장 처리기술 개발의 기대효과 및 적용방안 검토(안)

##### (가) 현장 처리기술의 개념

- 현장 처리기술(On-site remediation technology)은 오염된 퇴적물을 수거하는 현장(해상) 또는 인접 수역에서 적용할 수 있는 기술을 의미함
- 해상 처리 시 고려하여야 할 사항은 다음과 같음
  - 해양 환경(파도 등), 공간적 제약, 인프라(전기, 물 등) 사용

- 해상 조건에서 정화 처리 시스템의 안정적인 운전 방안
  - 처리 산물의 유효활용 방안
  - 발생 폐기물 및 폐액의 처리 및 처분 방안
  - 처리수 방류 시 해양환경 영향 방지 방안
- 현장 처리를 위해서는 다음 사항을 고려하여 정화 처리 시스템을 연안, 선박 또는 바지선 위에서 설치하거나 필요한 선단을 구성하여 효율적으로 운전하여야 함
- 작업선 평균 규격은 폭 10 ~ 15 m이며 길이는 20 m임
  - 바지선 평균 규격은 폭 15 m이며 길이는 40 m임
- 현장 처리 시, “퇴적오염물질전용수거선”을 이용하여 오염된 퇴적물을 수거한 직 후, 전처리(협잡물 분리, 침전(또는 응집·침전) 및 고액분리)를 거치며, 전처리 된 고상(퇴적물)이 정화 처리 시스템의 대상 물질이 됨
- 또한 수거 및 전처리 공정의 용량 및 성질과 상태에 따라 정화 처리 시스템의 운전이 원활할 수 있도록 최적화 할 필요가 있음

#### (나) 현장 처리 기술 적용 사례 검토

- 우리나라의 관련 제도로써 “환경기술 및 환경산업 지원법” (2015년 3월 2일, 법률 제 13174호, 환경부)에 “환경신기술 지정”과 “환경기술 검증”이 있음
- “환경기술 및 환경산업 지원법” 제7조 신기술인증과 기술검증, 같은 법 시행령 제 18조 신기술인증이나 기술검증의 신청, 같은 법 시행규칙 제 6조 신기술인증과 기술검증의 신청절차가 규정되어있음
- 환경신기술 인증(New Excellent Technology)이란 우리나라에서 최초로 개발하였거나, 국내외 기술의 주요 부분을 도입하여 우리나라에서 개량한 환경 신규 기술에 대하여 국가가 검증·평가하여 기술의 우수성 인증을 부여하는 제도
- 환경신기술인증서 발급(환경부장관 발급): 유효기간 5년, 1회 연장 가능
- 환경기술 검증(Environment Technology Verification)이란 개발자가 현장조사와 서류심사, 현장평가기관의 현장평가를 받아 환경 기술의 성능과 경제성 등을 검증받는 제도임
- 환경기술검증서(환경부장관 발급): 유효기간 7년, 1회 연장 가능
- 오염물질의 정화기작(Mechanism)이 유사한 토양정화 분야는 환경부에서 정화방법 가이드라인을 마련하여 시행하고 있음<sup>32)</sup>
- 환경부는 환경신기술 인정과 환경기술검증 시 기술의 범위, 신규성, 진보성(처리용량 및 효율 등), 타당성(단계별 저감 정도 등) 및 안전성(2차 오염, 발생 폐기물 등)을 평가의 주요 항목으로 함
- 미국의 경우 환경보호청 환경기술 검증제도(Environmental Technology Verification Program) 및 슈퍼펀드 오염지역 신기술 평가(Superfund Innovative Technology Evaluation: SITE)<sup>33)</sup>제도가 있으며, 주요 고려 요소는 다음과 같음
- 필요한 기술 능력 및 운영자 교육
  - 운전 및 정지에 요구되는 시간
  - 설비의 전체적인 견고성 및 에너지 소모량
  - 설비를 사용하지 않을 때 고려사항 및 설비의 고장 빈도
  - 발생 폐기물 및 2차 오염

- 일본의 경우 해양퇴적물 정화를 위한 기술지침<sup>34)</sup>에 정화 공법 선정, 중간처리 시 관리 항목 등을 규정하고 있음
- 현재 해양환경 관련 기술에는 상기와 같은 인증 또는 검증 제도가 없으므로, 제도 정비 및 기술 적용을 위한 지침·고시 등 개선이 시급함

## (다) 기대효과

### ① 정화된 퇴적물의 유효활용을 통한 오염퇴적물의 가치 증대 효과

- 수거한 해양오염퇴적물을 적절하게 처리하여 입자의 크기에 따라 다양한 목적으로 유효 활용 할 수 있도록 함으로서 처리된 퇴적물의 새로운 가치 창조가 가능
  - 런던의정서/협약은 준설물질(Dredged materials)을 폐기물이 아니라 기타 물질로 규정함
  - 우리나라는 런던의정서 가입 당사국으로서 국제협약을 국내법과 같은 수준으로 준수할 의무가 있음
- 처리된 퇴적물을 유효활용 할 경우 준설토투기장 등 최종 처분장의 사용주기를 증가시킬 뿐만 아니라 최종 처분장 조성에 필요한 예산의 절감 및 사회적 갈등 해소에 도움이 됨
- 처리된 퇴적물을 유효활용 소재(모래 등)로 판매할 경우 경제적인 비용 편익과 정부 예산 투입 대비 효과가 증가할 수 있음

### ② 해양환경 개선과 안전한 먹거리 확보에 이바지

- 해저면으로 부터 오염된 퇴적물을 수거하여 정화하는 것은 해수, 저서생물에 미치는 영향을 제거할 수 있으므로 해양환경 개선에 직접적인 효과를 유발할 뿐 만 아니라 국민들의 안전한 수산물 먹거리(어·패류 등) 확보에 이바지 함
- 기존 오염된 퇴적물을 수거하여 간이 처리 후 단순하게 위치만 이동시키는 행위에 불과한 해양에 배출하여 처분하는 것을 지양할 수 있으므로 해양환경 보전에 이바지 함
- 오염된 퇴적물 정화는 연안지역의 악취 등 생활환경 관련 민원발생을 해소하며, 주거, 산업, 상업, 관광 및 레저 등 연안지역 이용목적 다양화에 기여하여 궁극적으로 연안지역의 가치 상승을 유발함

### ③ 기술개발로 인한 비용절감 효과

- 우리나라의 해양오염퇴적물 양이 최저 8백만 m<sup>3</sup>에서 최대 187백만 m<sup>3</sup> 달한다는 추정규모를 감안하면 다음과 같이 해양오염퇴적물 정화사업비용의 절감액을 산정 가능함
  - 현재는 원위치처리를 못하고 수거하여 처리한다 해도 처리기술에 대한 신뢰성이 부족하여 해양투기를 하거나 육상매립장에 매립하는 비용이 추가적으로 발생하고 있음
  - 오염된 퇴적물을 유효활용하기 위하여 현장 정화, 모듈화, 분리/세척 통합기술을 개발하여 기술이전을 완료한 상태
  - 기술이전('15.10.27)을 통해 4천 3백만 원의 기술료 수입이 발생하였고 매년 총매출액의 3.3%의 기술료 수입이 발생 예정

- 해양오염퇴적물 정화 및 관련 환경 시장을 준설품질, 토양, 육역 퇴적물(하천, 호소, 저수지, 댐 등)으로 까지 확대가 가능하며 이 경우, 비용절감에 따른 편익은 크게 늘어날 것임

**④ 해양퇴적물 정화사업 확대에 의한 파급효과**

- 정부 주도의 기술개발로 인한 해양오염퇴적물 정화사업 선진화 및 효율성 증대를 통하여 민간 기업의 기술개발을 촉진할 수 있음
- 기존 해양오염퇴적물 정화사업 단가대비 비용편익을 가지는 정화기술을 개발함으로써 정부의 정화사업 예산 절감시킴으로서 보다 많은 오염우려 해역에까지 정화사업을 확대시킬 수 있음
- 육역과 달리 해역의 소유권은 정부에 있기 때문에, 정부에서 정화사업에 투입하는 예산 규모에 따라 정화사업 시장이 형성됨 즉, 산업연관분석에서와 같이 해양오염퇴적물 정화사업에 대한 예산 투입은 동 경제활동 부문에 대한 지출을 수반하므로 최종 수요를 발생시킴
- 해양오염퇴적물 정화시장 확대는 관련 환경 전문 기업과 전문가의 선장을 촉진시키며, 민간 기업의 기술력 확장, 일자리 창출을 물론 새로운 해외 환경시장 진출을 유발시킬 수 있음

**(라) 현장 처리기술 적용방안 및 실증 기술에 대한 평가(안)**

- 현장 처리기술 적용 시 다음과 같은 절차에 따른다.

항목	세부 절차
사전 검토	처리대상 물질의 물성과 오염 특성 평가
	처리기술이 대상 오염물질의 정화에 효과적인지 여부
	목적으로 하는 최종 처분 관련 환경 기준을 충족할 수 있는지 여부
	대상 오염물질의 발생량, 보관 방법 및 처리기술 적용 시 운전 장애 요인 여부
	처리기술 적용 시 2차 오염 가능성 및 폐기물 발생 여부
처리 기술 적용	처리설비가 대상 오염물질을 보관하기에 적합한지 여부
	주요 처리공정 별 안정적으로 처리되는지 여부(처리 능력)
	주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 및 안전 대책 여부
	환경문제 또는 2차 오염 발생 여부
처리 기술 시험 및 평가	처리효율 평가를 위한 평가항목(예: 분석항목(유기물, 중금속 등))
	전체 공정 중 시료 채취 장소 및 균질화 방법
	처리기술은 최소 2-3회 이상 운전하여 각각 시료를 채취하며, 채취시료는 자체 분석 및 최소 2-3개 공인기관의 맹검 분석(Blinded test)결과를 기초로 처리 정도 및 효율을 평가
	주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 여부 및 위험 발생 시 안전 대책 유효성 여부



	환경문제 또는 2차 오염 발생 여부 및 정도
	물질수지 및 에너지 수지 평가
	최종 처리산물이 목적으로 하는 최종 처분에 적합한지 여부
	단위 물량 당 처리 단가 평가
기타	처리장치의 운전 및 정지에 실제 요구되는 시간
	처리장치의 신뢰성(예: 오작동 여부 유지·보수 용이성 등)
	발생하는 폐기물(고상·액상)의 양, 성상, 처리 가능성 및 처분 방안

## (2) 실증 시험용 반응기 설계

### (가) 기본 개념

- 기존 연구 결과(2-4차년) 주로 부영양물질(유기물질)에 의해 오염된 해양퇴적물을 산화제와 비이온성계면활성제를 첨가제로 한 조건에서 세척할 경우(5M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 0.05% Tween80, 30min) 조립질부터 32 μm이하의 세립질까지 높은 정화효율을 보인바 있으나 경제성을 고려한 산화제의 농도는 1 M이하임
- 실제 정화사업 현장에서 원활한 적용을 위해 입자의 분급과 고도처리공정을 연계하고, 최적조건에서 실제 정화 처리 시스템의 구현과 상용 규모 설계를 위한 처리공정을 개발하고 각각의 공정을 모듈화 하여 정화 능력을 시험할 필요가 있음
- 처리기술의 세부 공정 시험 및 실증 규모에서의 정화 효율을 확인해야하며, 공정별 연속흐름을 기초로 한 모듈화 설계가 도출되어야 함

### (나) 시험 장치 특성

- 모듈화 시스템으로 이루어진 세척, 입자분리, 고도처리 장치는 각각 닫힌 계(Closed system)으로 구성되며, 연속흐름 시험 뿐 만 아니라 하나의 반응기(reactor)로서 회분시험(Batch test)이 가능하도록 구성되어있음
- 세척 및 고도처리 반응조에서는 반응이 진행되는 동안 시료 채취가 가능하도록 반응조 유효용적의 중간과 아래 부분에 시료채취 밸브를 설치하였으며, 시료의 혼합을 확인하고 오작동 시 제어를 판단하고 시료의 혼합, 이송 등 반응조 내부의 처리 상태가 확인될 수 있도록 각 공정의 상부에서 개폐식 뚜껑을 설치함

## ① 세척장치

### ■ 구성

- 다단 반응조로 구성하여 총 반응조의 용적을 줄임으로서 현장 적용 용이성을 높임
- 4차년도 연구 결과를 바탕으로 실증 장치의 반응조 재질은 SUS316으로 하였으며 4개의 다단 반응조로 설계, 각 반응조 사이에 높이를 조정할 수 있는 격벽과 웨어(weir) 그리고 웨어의 상부에 산화제의 유기물 산화 과정에 의해 발생하는 거품의 이동을 차단할 수 있는 격벽을 설치하여 시료의 주입속도에 따라 일정하게 이송되게 함
- 모든 세척조에는 완전 혼합을 위해 교반기를 설치하였고, 교반 속도가 제어될 수 있도록 함

---

## ② 분급장치

### ■ 필요성

- 해양퇴적물은 토양이나 하천 등 육역의 퇴적물에 비해 미세한 입자가 높은 구성 비율을 차지함
- 세립질의 퇴적물은 조립질에 비하여 상대적으로 넓은 표면적을 가지고 있어 오염물질의 부착 등 물리·화학적 결합 가능성이 높기 때문에 오염도에 따라 단계별로 입자를 분리하는 것은 정화 과정에서 한 가지 중요한 공정이 됨
- 더욱이, 입자의 크기에 따른 분리와 적절한 정화 공정의 조합은 세척과정에서의 경제성과 정화대상 퇴적물의 활용에 있어 용이성을 높일 수 있음

### ■ 국내 개발 현황 및 본 연구에서의 개발 수준

- 세립질(32  $\mu\text{m}$ )을 분급할 수 있는 하이드로사이클론은 국내 상용 제품의 개발 및 사용 현황이 극히 드물며, 분급시험장치 역시 상용화된 제품이 없는 실정임
- 본 연구에서는 국내·외 관련 기술 문헌 등을 참고하여 직접, 고안, 설계, 제작, 시험함.
- 특히 본 연구에서 사용한 조립질 및 세립질 분급용 하이드로사이클론은 기존 사이클론과 전혀 다른 개념으로 상부/하부 유출구의 직경을 5가지로 제작하여 이를 쉽게 장착/탈착 할 수 있도록 설계 하여 주입압력, 대상물질의 비중, 점도 및 고상과 액상의 비율 등의 다양한 조건에 따라 유출구의 직경을 용이하게 변경하여 분급효율을 최적화 할 수 있도록 고안, 설계, 제작, 시험한 결과를 특히 등록함
- 본 연구에서 사용한 하이드로사이클론은 가공성과 시험과정에서의 신뢰성 확보를 위하여 재질을 MC nylon으로 제작함

## ③ 고도산화처리장치

### ■ 필요성

- 고도처리 공정의 기본 개념은 세척 기반 처리에서 첨가제의 농도 감소, 처리단가 인하 및 비교적 짧은 시간동안 처리효율을 극대화 시키는데 목적이 있음
- 고도처리 공정에서 초미세기포와 오존에 의한 OH 라디칼 반응에 더하여, 세척 처리공정에서 산화제로 사용한 과산화수소가 일부 잔류하는 경우, 오존과 반응하여 Peroxone 반응이 발생하여 고도산화처리의 효과를 높일 수 있음

### ■ 구성

- 초미세기포를 발생시키기 위한 슬러리 펌프와 주입 압력을 제어하기 위한 슬러리 펌프에 의해 초미세기포(기포 크기가 30  $\mu\text{m}$  미만이 약 83%)를 생성할 수 있는 시스템으로 구성
- 초미세기포에는 공기, 순산소 및 오존을 선택적으로 사용할 수 있도록 함
- 본 연구에서는 4차년까지의 결과를 기초로 오존을 발생시켜서 초미세기포를 통하여 반응물에 주입함
- 오존 발생장치의 용량은 50 ~ 130 g O<sub>3</sub>/h 범위에서 조정할 수 있도록 2개의 장치를 직렬 연결하여 사용함

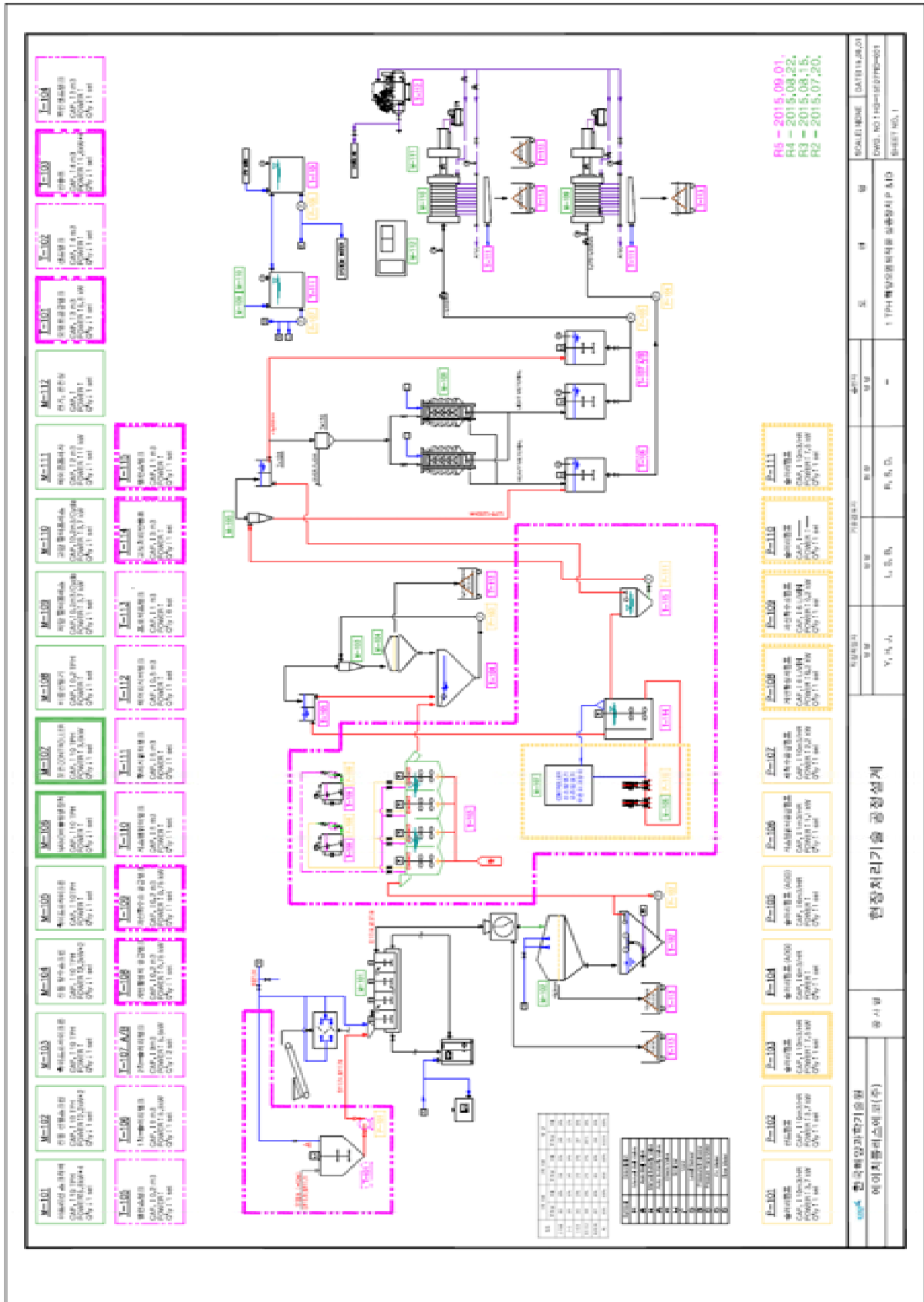
- 
- 반응물을 초미세기포 발생장치를 통하여 고도처리 반응조에 주입할 때 압력은 약 4 bar로 유지될 수 있도록 함

#### (다) 시험 장치 설계 및 제작

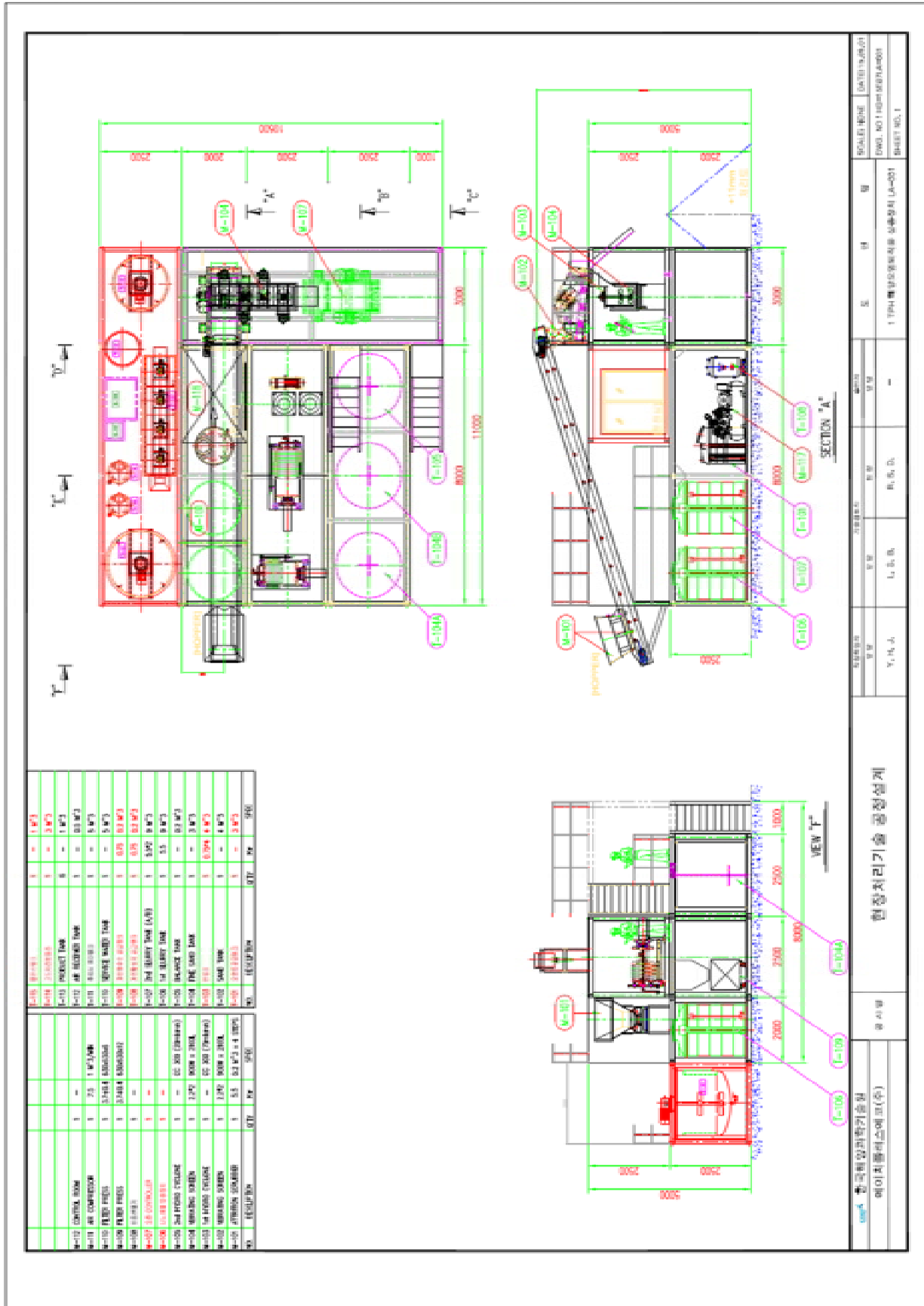
##### ① 실증 시험장치의 설계

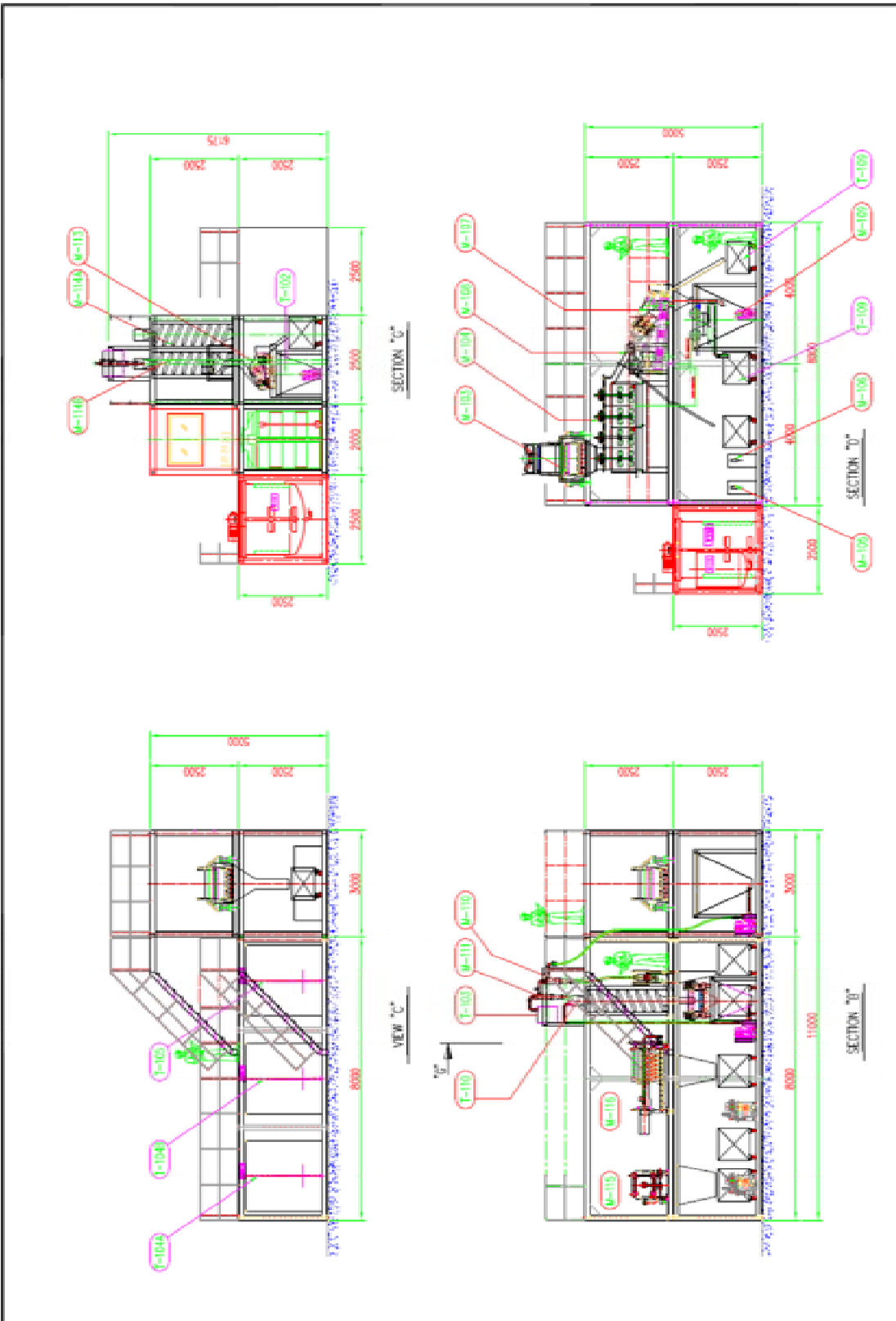
- 본 연구에서 사용한 실증 시험용 장치는 기본 개념과 각 장치의 특성을 고려하여 다음과 같이 설계, 제작함
- 시험 장치 중 세척 또는 고도처리와 직접 관련되는 모든 반응기 등 장치의 재질은 SUS316으로 하였고, 화학 반응과 관련이 없는 반응기 등 장치는 SUS 304로 설계함
- 각 반응기 또는 장치를 연결하는 배관은 SUS 304나 PE 재질 또는 Flexible tube로 설계함

㉞ 전체 시스템의 장치 및 배관 설계



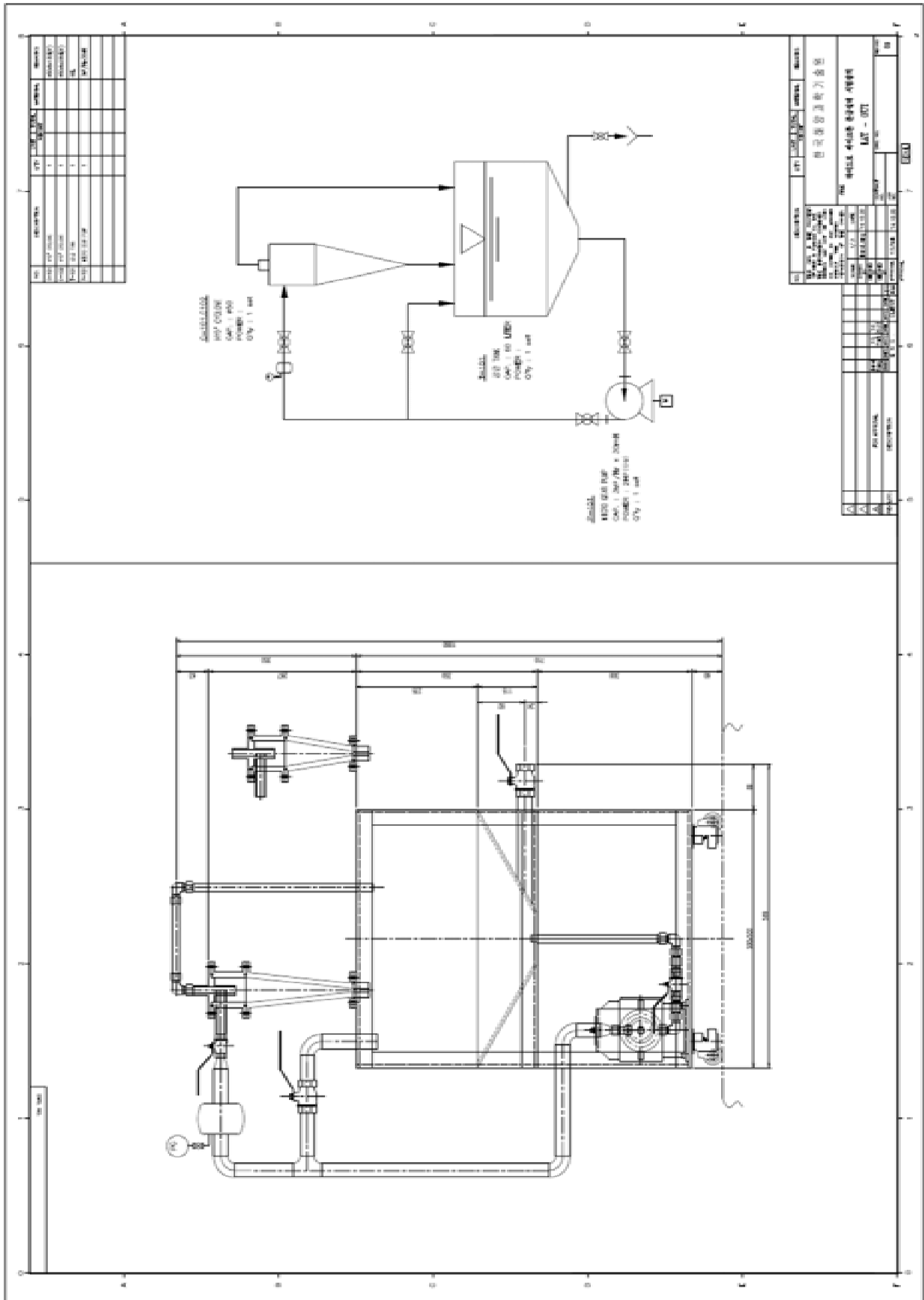
㉔ 전체 시스템 설계



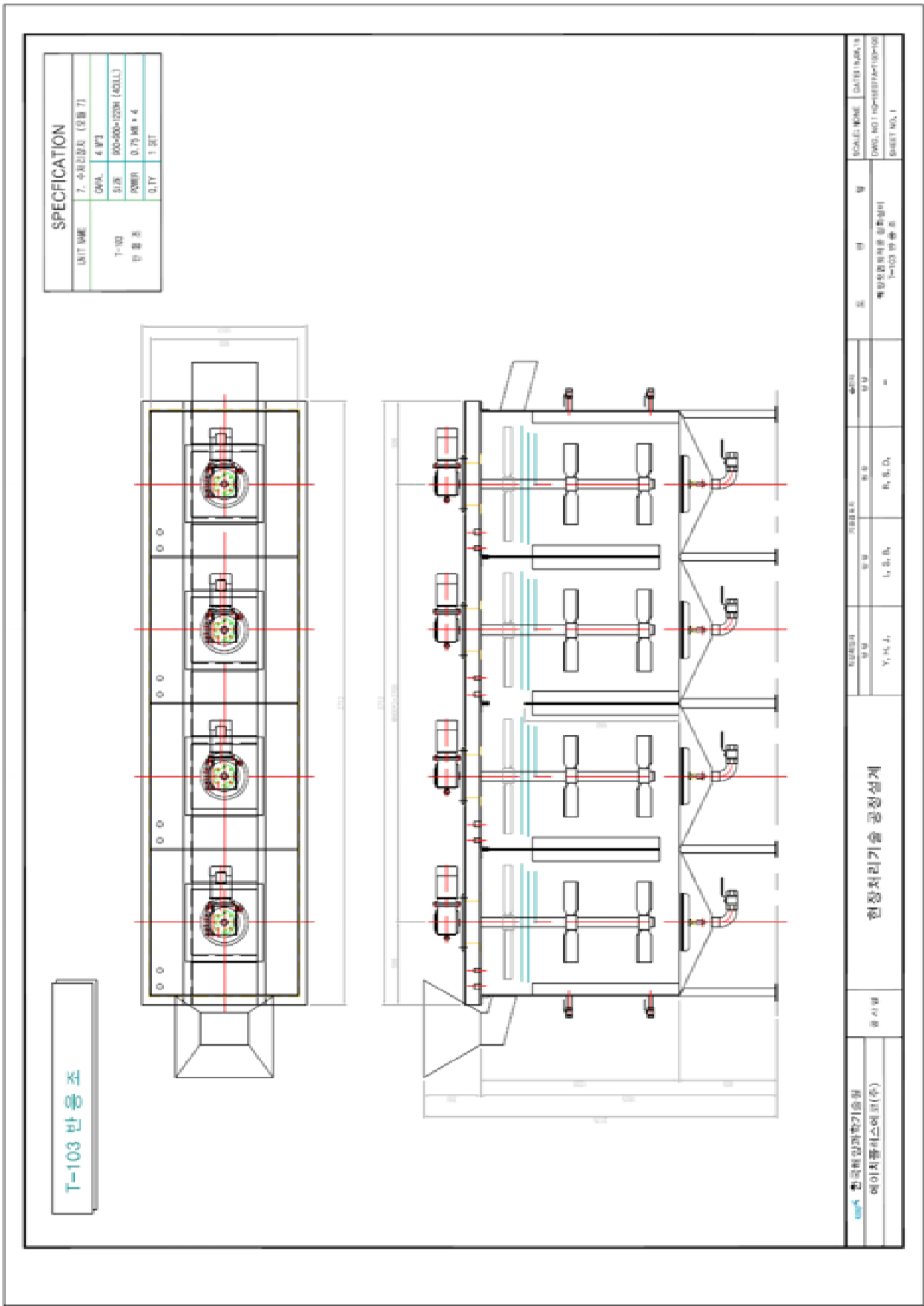


cmA 한국과학기술연구원 케이치플러스에프(주)	회사명 한국과학기술원	현정처리기술 공정설계				SCALE: NONE DATE: 14.04.01 DWG. NO: 14-001-002-LA-002 SHEET NO. 1
	담당자 Y. H. J.	담당자 L. S. B.	담당자 P. S. D.	담당자 -	담당자 -	DRAWING NO.: 14-001-002-LA-002 SHEET NO.: 1

㉔ 입자분리 장치 설계

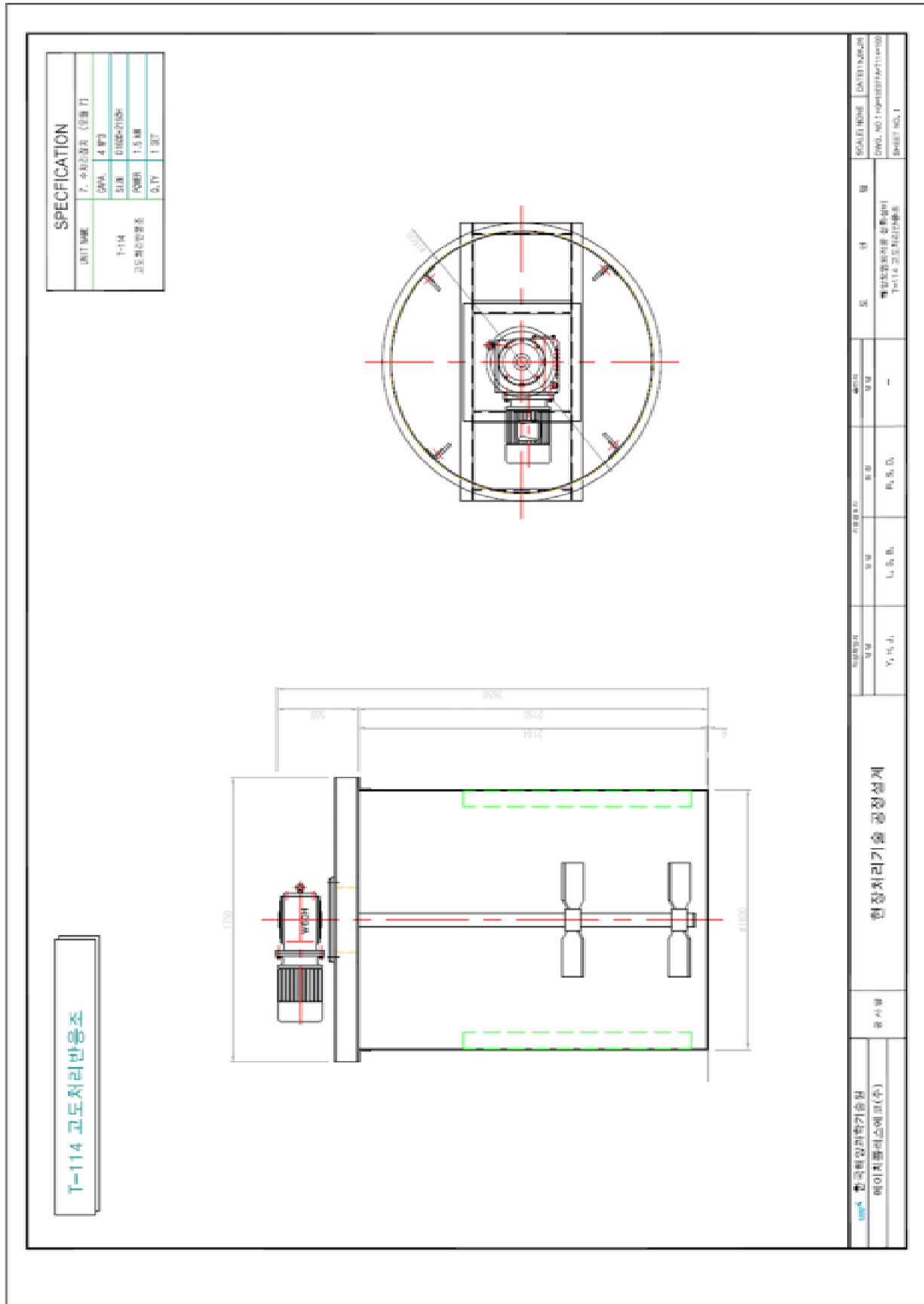


㉔ 세척 처리 반응조 설계

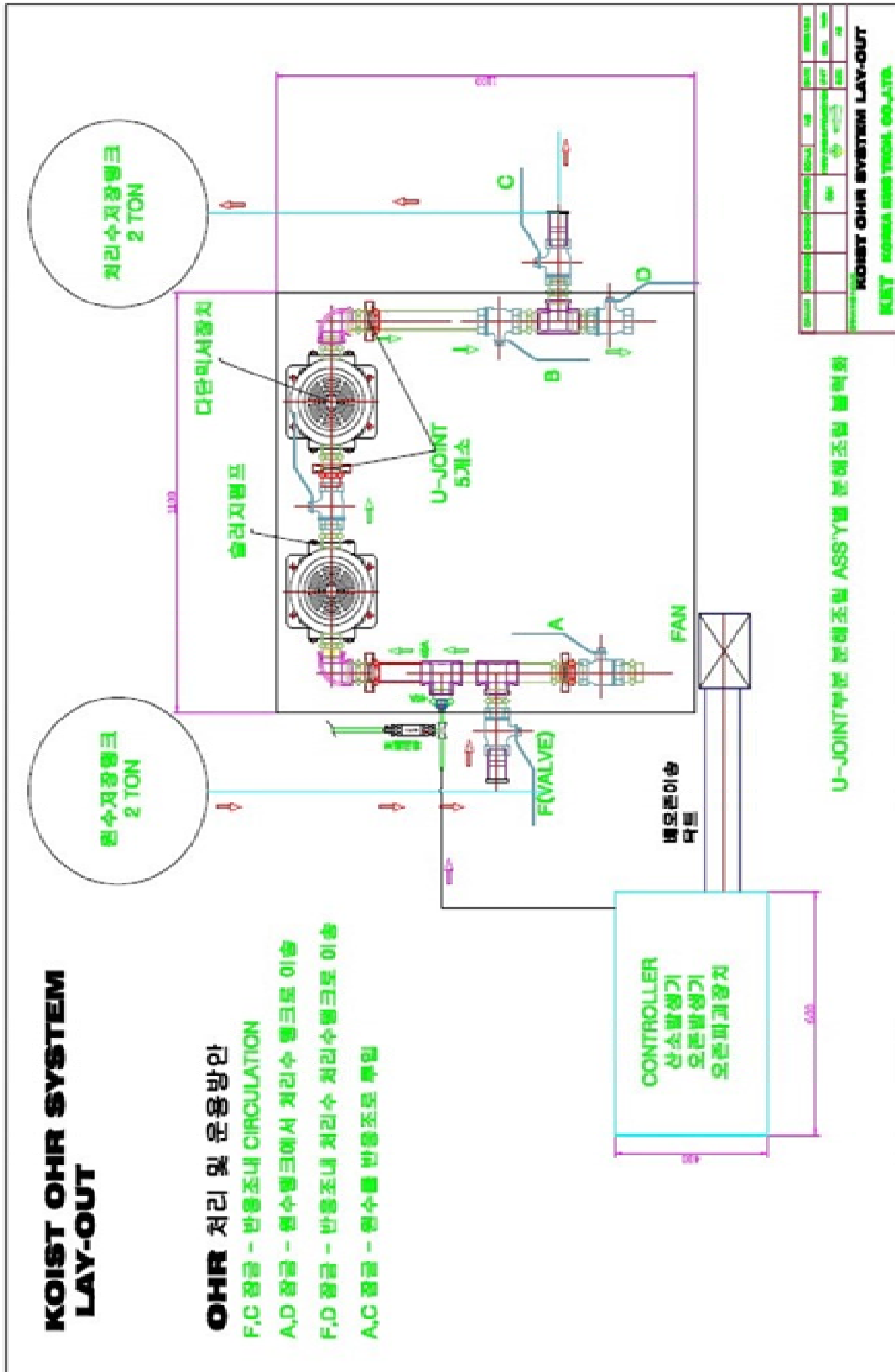




㉓ 고도처리 반응조 설계



㉞ 초미세기포 발생 시스템



## ② 실증 시험장치의 제작

- 본 연구에 사용된 시험장치는 각 공정을 모듈화하여 다음과 같이 제작함
- 단위 모듈의 규격은 폭 2.5 m, 높이 2.5 m, 길이 11 m로 제작
- 단위 모듈의 규격은 육상 운송을 고려하여 “도로교통법” 규정에 따라 저상트럭 1대를 이용하여 단위 모듈 1개를 운송할 수 있도록 하기 위한 최대의 크기임

### (라) 정화 처리시스템의 특성

#### ① 물질수지(Material balance)

- 정화 처리시스템의 물질수지는 다음과 같음
  - 정화 처리시스템에 투입한 총 시료 대비 협잡물과 자갈은 5%이며, 자력선별 2%, 2차 진동선별 6% 및 기타 공정 내 손실 3%를 제외한 나머지 84%는 세척 처리공정, 조립질 분리공정, 고도처리 공정 그리고 세립질 분리공정에서 단계적으로 처리됨
  - 기타 공정 내 손실 3%는 본 연구에서 사용한 실증 규모(최대 2 t/h, sediment dry weight, reactants 8 t/h, solid-liquid ratio 1:3, 해양오염퇴적물 정화사업 시 최소 100 m<sup>3</sup>/h 수거(해양환경관리법의 수거 장비 규정), 함유율 10%이므로 퇴적물 10 m<sup>3</sup>/h 수거 기준 1/5 규모임)의 Pilot 장치 운전에서는 일반적인 현상임



[그림. V-마-1] 현장 정화처리 실증장치(경기도 이천 소재, 오염토양 반입정화시설, H-Plus eco(주))

[표. V-마-1] 정화 처리시스템의 물질수지

공정	발생량 (kg)	퇴적물 입경	비율 (%)
투입호퍼	1,000		
과쇄선별장치	30	Over size 헝잡물	3
1차 진동선별장치	20	Over 10mm	2
자력선별장치	20	자성체	2
2차 진동선별장치	60	10 - 2mm	6
진동탈수장치 (1차반응조)	120	2 - 0.075mm	12
저압필터프레스 (고도처리반응조)	150	0.075-0.02mm	15
고압필터프레스 (수처리장치)	570	Under 0.02mm	57
기타(공정내 손실)	30		3
합 계	1,000		100

② 에너지 수지(Energy balance)

[표. V-마-2] 정화 처리시스템의 각 장치별 소요 전력

ITEM No.	장치명	실용량(L)	동력	
			PUMP	교반기
T-101	오염토공급조	4,800	2.2 Kw	5.5 Kw
T-101 #1,2	반응조 1,2 CELL	880		0.75 Kw x 2
T-101 #3,4	반응조 3,4 CELL	810		0.75 Kw x 2
T-108	계면활성제 탱크	200	0.4 Kw	0.7 5Kw
T-109	과산화수소 탱크	200	0.4 Kw	0.75 Kw
T-114	고도처리반응조 MIXER 흡입탱크	2,300 440		0.75 Kw
T-115	밸런스 탱크	890	7.5 Kw	
	소 계		10.5 kw	10.75 kw
	합 계		21.25 kw	

㉞ 장치운전비용

- 운전비용 산정 결과 기존 해양오염퇴적물 정화사업의 단위 물량 당 처리단가 대비 약 10%의 비용편익이 발생하는 것으로 평가됨
- 장치 운전을 위한 전력은 산업용 전기 요금 체계를 바탕으로 계산함(표 V-마-3)
- 연안지역에 정화 처리시스템을 설치, 사용하는 경우, 육상 전력을 사용할 수 있으므로 다음과 같이 산업용 전기의 판매단가를 기준으로 소비전력에 대응하는 운전비용을 산정함

[표. V-마-3] 한국전력 전기 요금 체계(2015년)

구분	호수 (천호)	판매량 (백만kWh)	구성비 (%)	판매수익 (억원)	구성비 (%)	판매단가 (원/kWh)
주택용	14,419	65,619	13.6	81,162	15	123.69
일반용	3,017	103,679	21.4	135,264	25.1	130.46
교육용	20	7,691	1.6	8,707	1.6	113.22
<b>산업용</b>	<b>397</b>	<b>273,548</b>	<b>56.6</b>	<b>293,826</b>	<b>54.4</b>	<b>107.41</b>
농사용	1,638	15,702	3.2	7,429	1.4	47.31
가로등	1,673	3,341	0.7	3,788	0.7	113.37
종합	22,030	483,655	100	539,637	100	111.57

[표. V-마-4] 발전기 용량별 연료 소모량(l/h)

용량 / 부하	100%	75%	50%	25%
10 kw	7.5	5.2	3.7	2.1
20 kw	7.9	5.7	4.2	2.6
<b>30 kw</b>	10.2	<b>7.6</b>	5.3	3.4
40 kw	12.5	9.4	6.4	4.2
50 kw	17	13.2	9	5.7
75 kw	25.7	19.3	13.2	8.7
100 kw	29.1	22	15.5	9.5
125 kw	36	26	17.1	11.6
150 kw	42	31.1	22.7	14.4
200 kw	62.4	47.3	32.1	18.9
250 kw	80	57.6	39.7	23
275 kw	92.7	68.1	47.3	26.9
300 kw	106	79.5	54.9	32.2
350 kw	124.1	91.6	63.2	37.7
400 kw	125.6	95	63.6	38.6
450 kw	143.8	104.1	80.6	47.3
500 kw	155.2	116.2	85.5	55.6
600 kw	179.8	136.3	96.9	63.2
800 kw	246.4	185	138.5	88.6
900 kw	275.5	192.3	140	89.6
1000 kw	306.2	213.5	155.6	77.6

- 현장정화처리시스템 운영에 따른 운전비용은 표 V-마-5와 같이 제시할 수 있음
- 정화 처리시스템을 해상, 선박, 바지선 등에 설치 운전할 경우, 육상 전력을 이용할 수 없으므로, 발전기를 사용하여 생산된 전력을 처리시스템에 활용하는 것을 고려하여 발전기가 75 %부하일 때 소비전력 용량을 대응할 수 있는 조건을 산정함
- 상기 조건에서 산업용 경유 구매 시 단가(10,500원/l)를 기준으로 연료소모량을 산정함

[표. V-마-5] 기존 해양오염퇴적물 정화사업 단가 대비 정화 처리시스템의 운전 비용

	현재 정화처리 비용	정화 처리시스템 운전비용
항목별 소요 금액	기존 퇴적물 1 M <sup>3</sup> 당 단가 해양오염퇴적물 정화사업 단가: 105,000원 준설사업 단가: 25,000원 (참고 1)  * 해양오염퇴적물 톤당 정화사업 단가: 평균 비중 1.42를 고려 105,000원×1.42=120,000원 (참고 2)  * 선진국 퇴적물 정화단가 (참고 3) 50,000~130,000원(평균 85,000원) 환경준설(Environmental dredging) 단가 제외	퇴적물 1 M <sup>3</sup> 당 단가 -산화제 (35% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ): 공업용, 탱크로리 (20kl) 장기/대량 구매 시 기준 56,760원/t, (220원/l) -비이온계면활성제(Tween80): 1,559원/t (1,039원/kg) - 전력: 8,740원/t, (발전기 30kw, 75% 부하시 경유 단가) 산업용 전기 사용 시: 3,538원/t, (107.41원/kwh, 21.55kw, 1.55h) - 운전 및 제반 비용: 약 38,200원/m <sup>3</sup> (물량 증가 시 상대적으로 감소됨)
소요 단가	해양오염물질 정화 단가 합계: 85,000원	해양오염퇴적물 정화 단가 합계: 76,559원
비용 편익		9.93%

※ 정화 처리시스템 운전비용은 실제 실증시험 장치를 기준으로 한 단가이며, 운전 및 제반 비용은 대상 물량 및 제반 조건(오염도 저감 목표, 인프라 등)에 따라 차이날 수 있음

### (3) 현장 처리기술 개발을 위한 대상 해역퇴적물 특성 및 시료 대량 채취

- 1차 년도에 중앙정부(해양수산부)에서 '04년부터 '12년까지 국내 오염 우려 해역 총 27개 해역 조사결과를 기초로 퇴적물의 오염 현황을 평가한 결과 및 해역의 특성과 이용목적 을 검토하여 피복 및 현장 처리기술 시험이 가능(조건 충족)한 6개 해역을 제안하였음
- 1차 년도에 제안된 6개 해역 중 보다 적합한 우선 시험 대상 후보 해역으로 3개 해역(M, N, R)을 선정함
- 2, 3, 4차 년도에는 1차년에 선정된 3개 해역 중에서 부영양화 정화지수(CI<sub>ET</sub>)가 가장 높은 것으로 평가된 N해역을 현장 처리기술 시험 대상 해역으로 정하여 시료를 채취하고 오염특성을 평가한 바 있음
- 5차 년도에는 정화 처리시스템의 실증시험을 위하여 N해역에서 “퇴적오염물질전용수거” 장비 및 토목섬유(Geo-textile)를 사용하여 대량의 퇴적물을 채취(약 30톤), 탈수한 다음 실증시험에 사용함
- 실증시험은 특정 해역을 대상을 위한 맞춤형 정화 기술을 개발하는 것이 아니라 주로 유기물에 의해 오염된 퇴적물을 정화하는 기술로서 일반적으로 적용할 수 있어야 함
- 이를 시험하기 위하여 N해역 퇴적물보다 유기물 및 중금속 오염도가 높으며 해양오염퇴적물 정화·복원 사업 대상인 F해역의 퇴적물을 추가로 채취하여 1:1로 혼합하여 실증시험에 사용하였음

#### (가) 시험대상 해역퇴적물의 시료채취

##### ① 대상해역 조사

㉑ 조사해역 개요

- 대상해역: N1해역
- 조사기간: 2015년 11월 9일
- 조사정점 상세자료(표 V-마-6)
- 주요 오염 물질: 유기물, 중금속 오염
- 시료 특성: Silt질 우세

[표. V-마-6] 조사정점 및 상세자료

	N1
위치	35°12'30.0"N 128°35'12.4"E
수심	6m
시료 냄새 및 색	황화수소 냄새, 검정색
패각편	많다( ) 적다(○) 없다(○)
자갈 함량	많다( ) 적다( ) 없다(○)
모래 함량	많다( ) 적다( ) 없다(○)
니질 함량	많다(○) 적다( ) 없다( )

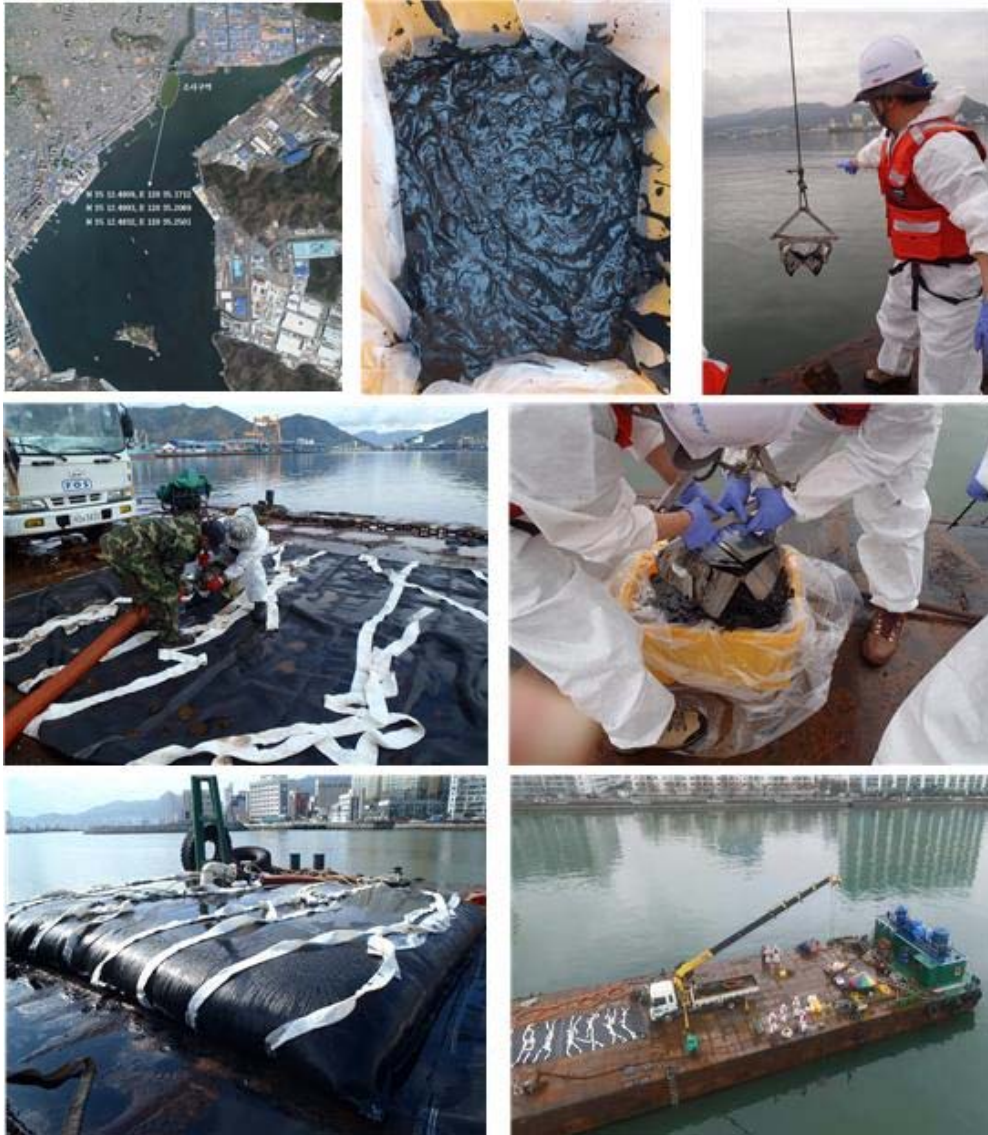
㉒ 조사 방법

- 조사지역 표층 퇴적물의 특성 및 현장 처리기술 pilot 시험을 위하여 그랩 퇴적물 채취기(Grab sampler) 및 A사(퇴적오염물질수거업 등록업체)가 보유한 흡입식 수거(펌프) 설비를 이용하여 시료를 채취함
- 실증 시험용 시료를 위한 퇴적물 시료확보를 위해서는 수중 펌프<sup>35)</sup>를 사용하였으며 토목 섬유(Geotextile)를 이용하여 현장에서 1차 탈수시킴.
- 1차 탈수시킨 퇴적물 시료를 실증 시스템이 구축된 현장(경기도 이천시 설성면 소재, A사)의 반입정화시설로 이송하여 현장 처리기술 실증실험에 사용함.
- Pilot 실험을 위해서는 125  $\mu\text{m}$  이하의 처리대상 시료준비를 위하여 wet sieve를 실시함(2차년 결과 참고: 125  $\mu\text{m}$  이하의 분율 94.28 %, 125  $\mu\text{m}$  이상의 분율 5.72%).

㉓ 분석항목 및 분석방법

- 분석항목
  - 부영양화 정화지수(CIET: Clean-up Index, Eutrophication) 관련 항목: 화학적 산소요구량(COD), 강열감량(IL)
  - 유해화학물질 정화지수(CIHC: Clean-up Index, Harmful chemicals) 관련 항목: 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd)등
- 분석방법 : 해양환경공정시험기준에 준하여 분석함
- 조대입자(>125  $\mu\text{m}$ ) 분리 시 정화처리 효과 평가

35) 4" Hydraulic submersible trash pump (model S4T, (4"(100mm) Discharge)



[그림. V-마-2] N해역 시료 채취 정점, 채취 장비 및 시료 채취 과정

36) KSEE, 29(1), 68-73, 2007.

37) DICER Techinfo Part II, 3(7), 278-290, 2004.

38) 부영양화 평가점수는 해양환경관리법 제18조, 같은 법 시행령 제24조 및 같은 법 시행규칙 제9조에 따라 해역관리청이 해양오염퇴적물에 대하여 조사를 하거나 정화·복원사업을 할 때 그 절차나 기준 등을 정하는 목적에 이용되며 제시된 평가항목 별 기준 농도와 이를 평가하기 위한 점수로 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산화발성황화물(AVS)를 항목으로 제시하고 있다.





[그림. V-마-3] 퇴적물 채취 정점

(나) 정화 대상 퇴적물의 부영양 물질 특성 평가 (Sample characterization)

① 부영양화 정화지수 및 유기물 관련 오염물질의 분포특성

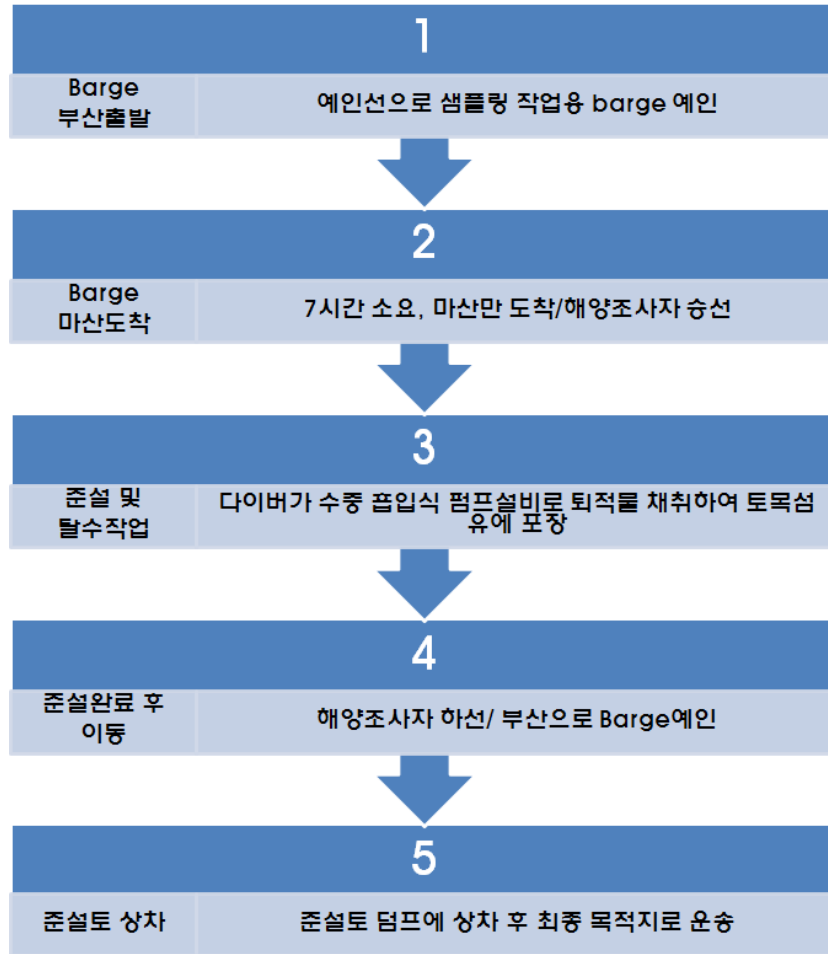
- 5차년 연구를 위해 채취된 시료의 부영양화 정화지수 및 기타 유기물 관련 오염물질의 농도를 분석하였고, 결과를 표 V-마-7에 나타냄

㉔ 강열감량 (Ignition Loss, IL, %)

- 정화 대상 오염 퇴적물의 IL은 11%였으며 부영양화 관련 평가항목의 기준농도인 15 %이하로 나타남

㉕ 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD, mg/g)

- 정화 대상 오염퇴적물의 COD의 농도는 42.9 mg/g으로 부영양화관련 평가항목의 기준농도 중 40 mg/g이상이었음



[그림. V-마-4] 퇴적물 시료 채취 및 이송 순서

㉔ 총 유기탄소 (Total Organic Carbon, TOC, %)

- TOC: 정화 대상 오염퇴적물의 TOC 농도는 4.4%였음

㉕ 유해화학물질 정화지수 관련 오염물질의 입자별 농도분포

- 유해화학물질 정화지수관련 항목인 크롬 (Cr), 니켈(Ni), 구리(Cu), 아연(Zn), 비소(As), 카드뮴(Cd), 납(Pb)을 분석하였으며, 그 결과를 표 V-마-8에 나타냄

㉖ 크롬(Cr)

- 정화 대상 오염퇴적물의 니켈(Ni) 농도는 110 mg/kg으로 해양퇴적물 정화·복원 기준 중 기준 1 (80 mg/kg) 이상이였음

㉗ 니켈(Ni)

- 정화 대상 오염퇴적물의 니켈(Ni) 농도는 61.1 mg/kg으로 해양퇴적물 정화·복원 기준 중 기준 2 (52 mg/kg) 이상으로 나타남

㉔ 구리(Cu)

- 정화 대상 오염퇴적물의 구리(Cu) 농도는 200.30 mg/kg으로 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 2(108 mg/kg)를 초과하는 것으로 나타남

㉕ 아연(Zn)

- 정화 대상 오염퇴적물의 아연(Zn)의 농도는 1050.50 mg/kg로 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 2(410 mg/kg)를 초과함

㉖ 비소(As)

- 정화 대상 오염퇴적물의 퇴적물의 비소(As)의 농도는 17.22 mg/kg이었으며 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(9 mg/kg)을 초과함

㉗ 카드뮴(Cd)

- 정화 대상 오염퇴적물의 퇴적물의 카드뮴(Cd)의 농도는 1.95 mg/kg 였고, 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1(0.68 mg/kg)을 초과함

㉘ 납(Pb)

- 정화 대상 오염퇴적물의 퇴적물의 납(Pb)의 농도는 94.36 mg/kg로 해양퇴적물 정화·복원 기준의 기준 1 (50 mg/kg)을 초과함

[표. V-마-7] N1 시료의 부영양화 정화지수 및 유기물 관련 오염물질의 특성

	COD	IL	TOC
Unit	(mg/g)	(%)	(%)
N1	42.9±1.6	11.0±0.3	4.4±0.6

[표. V-마-8] 대상시료의 유해화학물질 정화지수 관련 오염물질의 농도 및 정화기준 비교

	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Unit	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
N1	75.19	27.82	97.42	350.52	11.22	1.32	72.23
F	123.72	91.89	241.36	1080.33	15.37	2.24	80.44
N1+F	110.04	61.14	200.30	1051.50	17.22	1.95	94.36
기준1	80	23	24	200	9	0.68	50
기준2	370	52	108	410	41.6	4.21	220

39) 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙

40) 대법원 2006.5.11. 선고 2006도631 판결(황배수관 관로건설공사를 시행한 후 발생하는 토사가 폐기물에 해당하고, 피고인들이 설령 유실된 고속도로의 법면 보수공사에 사용하려 하였다 하더라도 폐기물로서의 성질을 상실하지 않는다고 한 사례).

[표. V-마-9] 부영양화 관련 평가항목, 기준농도 및 평가점수 (제9조제2항 관련)

항 목	단위	기준농도	평가점수
강열감량 (IL)	% (건중량)	5 미만	0
		15 미만	3
		15 이상	6
화학적산소요구량 (COD)	mg/g (건중량)	13 미만	0
		20 미만	1
		30 미만	2
		40 미만	4
		40 이상	6
산취발성황화물 (AVS)	mg/g (건중량)	0.6 미만	0
		1 미만	1
		5 미만	2
		10 미만	4
		10 이상	6

비고

1. 부영양화 관련 항목들에 대한 각각의 평가점수는 해저퇴적물시료에서 구한 항목들의 분석치로부터 기준농도 구간별 설정된 수치로 한다.

#### (4) 현장 처리기술 실증 시험

##### (가) 개요

###### ① 목표

- 국내 연안의 오염해역의 주된 위치 및 형태인 항만 인근, 주로 부영양화 물질(유기물)로 오염된 미세입자(silt, clay)의 함유율이 높은 퇴적물을 수거하는 현장 또는 인접 수역에서 적용할 수 있는 효과적인 현장 처리기술 개발을 위한 세부공정 시험 및 처리공정을 제안
- 입자분리, 세척처리 및 고도 처리공정에 기초한 연속 공정의 벤치스케일(Bench-scale) 장치 시험 결과를 바탕으로 실증장치에서의 규모 인자(scale-up factor)의 영향을 검토하여,
- 실증 시험은 ①실험실 규모로 개발한 정화 기작(Mechanism)과 각 정화처리 공정을 실제 정화처리 시스템으로 제작하여 구현할 수 있는지, ②정화 처리 시스템을 안정적으로 운전할 수 있는지, ③정화 처리 시스템의 효율이 실험실 규모 대비 효과적인지 여부를 과학적, 기술적으로 검증하며,
- 검증 결과를 기초로 앞으로 실제 해양오염퇴적물 정화사업 현장에서 원활하게 적용될 수 있도록 최적화를 위한 기초 자료를 제시함

###### ② 세척기반 및 입자분리 처리기술 관련 사례의 최신 연구 및 유사 기술 검토

- 최근 두 가지 이상의 복합처리를 이용한 정화 방법이 제시되는 추세
- Electro-Fenton 처리에 첨가제를 추가하여 오염물질에 대한 분리를 증가시킨 예
- 토양 기반 세척 기술을 활용, 해양 오염퇴적물 내 phenanthrene을 대상으로 하여 1일의 정화 처리 과정에서 92%의 감소
- Electrokinetic remediation에 첨가제(citric acid와 계면활성제)를 추가하여 정화의 효율을 높인 예

- 
- 토양 기반 세척 기술을 활용, 해양 오염퇴적물 내 PAHs에 대해 약 35.3~54.4%의 저감

### ③ 4차년 결과를 토대로 한 5차년 연구 주안점

- 1-4차년 연구기간 동안 개발된 세척 처리공정, 입자분리 공정 및 고도 처리공정을 평가하여 이를 실제 구현할 수 있도록 전체 정화 처리시스템을 연구, 개발하여 설계, 제작하였음
- 현장 처리기술의 실증시험은 ①실험실에서 개발된 정화 처리기술을 시스템으로 구현할 수 있는지, ②정화 처리시스템을 원활하게 운전할 수 있으며, 2차 오염 등 환경 영향은 없는지, ③실험실 규모 시험 결과 대비 오염물질의 정화 효율은 실제 정화사업에 적용을 상정할 경우 적합한지를 위주로 진행하였음
- 또한 실증시험 동안 각 공정의 원활한 연속 흐름 및 긴급 상황에서의 제어 가능 여부를 검토하며,
- 규모 인자(Scale up factor)와 안전 인자(Safety factor)를 고려한 세척 처리공정 및 이후의 연속공정에서 시료의 고도 산화와 산화제 사용으로 인한 반응물의 부피 팽창 및 반응물의 제어 가능 여부를 평가함
- 4차년 연구에서 고도처리 공정은 소규모 시험장치(Bench scale reactor, 60L)를 사용하였으며 연구결과 유기물 제거에 매우 효과적이었으나, 세부공정(미세기포 폭기 량, 오존 투입량, 오존 주입량 및 처리시간)에 대한 개선 및 최적화가 필요할 것으로 평가된 바 있음
- 실증시험에서는 고도처리 장치 설계, 제작 및 운전을 통하여 공정 제어를 포함하여 정화 효율에 대한 평가 및 검토를 실시하였음
- 현장 처리기술이 정화사업 현장에서 적용될 것을 상정하여 시스템 운전 중 발생 폐기물의 양 및 성상을 검토하였음
- 특히, 세립질 입자의 정화 처리의 효율을 높이고, 정화효율에 대한 기술적, 경제적 여건을 검토하였음

#### (나) 현장 처리기술 실증 시험을 위한 공정 조건 확립 시험

##### ① 고도산화처리 효과 확인을 위한 실험실 규모(bench-scale) 실험

- 해양오염퇴적물 정화처리 시스템의 일부 모듈을 이용하여 bench-scale test를 실시하였다. 세척처리조는 유사펜톤반응과 비이온계면활성제(Tween80)를 이용하며 고도산화처리조는 초미세기포(기포 크기 30  $\mu\text{m}$  83%)와 오존을 이용하였다. 세척 공정만 처리한 시료의 결과는 3차년도 동일한 bench-scale test결과를 이용함

##### ㉞ 실험조건 및 방법

###### ■ 실험 목적

- N해역 시료에 대한 산화제가 없는 조건에서의 고도산화처리(오존, 초미세기포)만의 효과를 확인
- 세척단계의 동시효과와의 비교를 통한 실증 공정 단계(세척+고도산화처리) 확립

###### ■ 시험조건

- 실험조건 1: 세척(1 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+ 0.05% Tween80), 3차년도 연구 결과 이용

- 실험조건 2: 고도산화처리(오존 발생양 20g/h, 오존 주입량 2 L/min)
- 실험조건 3: 세척(1 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+ 0,05% Tween80)10분 +고도산화처리(오존 조건 동일)
- 반응조의 용량: 60 L
- 고도산화처리 반응물용량(45 L), 세척+고도산화처리 반응물 용량(30 L)
- 각 반응에 대한 3회 반복 수행 및 2개의 시료 채취를 통한 반복 분석(각 조건 별 6회 분석)함

## ■ 실험방법

- 고도산화처리군
  - 정화 대상 퇴적물과 공정수를 포함한 총 반응물의 양: 45L
  - 반응조 유효용적 60L
  - liquid:solid 비율: 1:6 (퇴적물의 비중과 공극수를 고려)
  - 측정항목: COD, IL, TOC
  - 반응시간: 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60분
  
- ㉠ 협잡물이 제거된 N해역오염퇴적물을 잘 섞어 필요한 양의 습시료를 준비함
- ㉡ 반응조에 준비한 시료를 넣고 1:6의 고액비가 되도록 증류수를 첨가하여 교반기로 섞어줌
- ㉢ 1분 정도 반응물을 섞어준 뒤 500mL PE재질의 bottle에 정량펌프를 이용하여 초기 시료를 채취함
- ㉣ 오존과 미세기포 주입 후 시간대 별(0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60분) 시료를 채취함
- ㉤ 채취한 시료를 원심분리하여 상등액을 제거하고 동결건조 전까지 -20°C에 보관
- ㉥ 시료를 동결건조 하여 균질화
- ㉦ 준비된 시료에 대해 정화 기준과 비교 할 측정항목(COD, IL, TOC)을 분석

41) 대법원 2011.5.26. 선고 2008도2907 판결. 이 판결에서 문제가 되고 있는 '폐토사의 굴착행위'는 토양의 준설로 볼 여지도 있는바, 법원은 준설된 토양(준설토사)의 법적 지위에 대하여 명쾌한 답을 주고 있지 않다. 법원의 추론에 따라 경우 준설토사는 동산으로서 '물질'에 해당되어 폐기물로 볼 여지가 있기 때문이다. 한편, 법원의 "오염토양은 법령상 절차에 따른 정화 대상이 될 뿐 법령상 금지되거나 그와 배치되는 개념인 투기나 폐기 대상이 된다고 할 수 없다"는 판시는 법규의 해석을 통한 논리적 귀결이 아니라 오염토양의 정화 필요성을 강조하는 일종의 정책의 방향성을 제시하는 결론이라 할 수 있다.

42) 해양오염퇴적물 정화복원사업 추진을 위한 실무 지침서, 2010.10, 국토해양부(현 해양수산부) (연구기관: 한국해양과학기술원)



[그림. V-마-5] bench-scale의 고도산화처리 효율 실험

- 세척+고도산화처리군
  - 정화 대상 퇴적물과 공정수, 세척액을 포함한 총 반응물의 양: 30L
  - 반응조 유효용적 60L
  - 세척시 liquid:solid 비율: 1:3 (퇴적물의 비중과 공극수, 세척액의 용량 고려)
  - 고도산화처리시 liquid:solid 비율: 1:6 (퇴적물의 비중과 공극수를 고려)
  - 측정항목: COD, IL, TOC
  - 반응시간: 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60분
  
- ㉠ 협잡물이 제거된 N해역오염퇴적물을 잘 섞어 필요한 양의 습시료를 준비
- ㉡ 반응조에 준비한 시료를 넣고 1:3의 고액비가 되도록 증류수와 세척제(과산화수소, 최종 농도 1 M, 0.05% Tween80)를 첨가하여 교반
- ㉢ 10분의 세척 반응 후 고액비가 1:6이 되도록 공정수(증류수)를 추가
- ㉣ 오존과 미세기포 주입 후 시간대 별(0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60분) 시료(약 250mL)를 채취
- ㉤ 채취한 시료를 원심분리 하여 상등액을 제거하고 동결건조 전까지 -20°C에 보관하였다.
- ㉥ 시료를 동결건조
- ㉦ 준비된 시료에 대해 정화 기준과 비교 할 측정항목(COD, IL, TOC)을 분석

[퇴적물 내 부영양화 관련 항목 분석방법 (해양환경공정시험법 참고)]

[퇴적물 COD 분석을 위한 시료 전처리 및 측정 방법]

1. 채취한 시료를 건조시킨다.
2. 0.1 g의 건조된 퇴적물 시료에 0.1N 과망간산칼륨용액을 10mL첨가한다.
3. 10% 수산화나트륨 용액을 1 mL첨가하여 시료를 알칼리화 시킨다.
4. 100°C로 끓는 진탕기에 시료를 넣고 60분간 중탕 가열한다.
5. 10% 요오드화칼륨용액 10 mL를 첨가한다.
6. 빛이 차단된 조건에서 시료를 방냉한다.
7. 실온으로 방냉된 시료에 2 mL의 황산용액을 첨가한다.
8. 1-2 mL의 녹말 용액을 첨가한다.
9. 0.1N 티오황산나트륨용액을 제조하여 적정병에 넣고 시료의 보라색이 투명해질 때까지 적정한다.
10. 대조군과 실험군 시료의 적정량을 기록하고 COD값을 계산한다.

[퇴적물 강열감량(IL) 분석을 위한 시료 전처리 및 측정 방법]

1. 채취한 시료를 건조시킨다.
2. 25mL도가니(유리바이알)의 무게를 0.01g까지 측정하고 도가니에서 110°C로 말려 항량으로 될 때까지 건조한 후 시험에 사용한다.
3. 시료의 약 5g의 무게를 정확히 측정하여 25mL도가니에 담는다. 시료가 담긴 도가니를 역시 110°C에서 항량으로 될 때까지 건조하여 시료의 무게를 측정한다.
4. 전기로에 시료를 넣고 550°C의 온도로 2시간 동안 가열한다.
5. 가열이 끝나면 전기로의 온도가 100°C정도 내려간 후 전기로의 문을 열고, 데시케이터 안에서 실온으로 식힌다.
6. 실온으로 방냉 된 도가니의 무게를 측정한다.

$$\text{강열감량(\%)} = \frac{(\text{가열 전 시료 무게} - \text{가열 후 시료 무게})}{\text{가열 전 시료 무게}} \times 100$$

[퇴적물 내 총유기탄소(TOC) 분석을 위한 시료 전처리 및 측정 방법]

1. 채취한 시료를 동결건조시킨다.
2. 균질화한 뒤 분쇄한 시료를 약 0.5g 정도 정확히 측정하여 유리바이알에 담는다.
3. 1 M HCl을 넣고 잘 섞어준다.
4. 기포발생이 사라지면 후드가 장착된 오븐에서 90~100°C로 건조시킨다.
5. 데시케이터에서 냉각시킨 후 무게를 측정한다.
6. 주석박막(틴캡슐)에 5~10mg정도 담아서 잘 싸준다.
7. 원소분석기(Thermo, FlashEA)로 측정한다.

43) Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version I, EPA, USAF, 1993  
44) Technical guidelines for environmental dredging of contaminated sediments, US Army Corps of Engineers, 2008. ERDC/EL TR-08-29  
45) 일본 국토교통성 항만국, 2008, 항만에 있어서 퇴적물 다이옥신류 대책 기술지침(湾における底質ダイオキシン類対策技術指針, 平成20年4月, 国土交通省港湾局)  
46) Trudy J. Estes, "Environmental dredging project costs? The mystery, the mystique...the muddle", 4th International Conference on Remediation of Contaminated Sediements, 2007 January, Savannah, USA  
47) 일본 환경청환경법령연구회, 1998, 퇴적물 처리 및 처분 등에 관한 잠정치침.  
48) <http://www.recycle-solution.jp/2003-report.pdf/2-SHO.html/2-11.pdf#search='浚渫土砂 發生量'>  
49) 준설토사의 해양투기 및 유효활용에 관한 기술지침, 2006년(H16) 6월, 일본, 국토교통성 항만국



**[퇴적물 중금속 분석을 위한 시료 전처리 및 측정 방법]**

1. 채취한 시료를 건조시킨다.
2. 분쇄된 시료 약 0.5 g을 Teflon 용기에 넣고 고순도(Merck, suprapur-grade)의 HF와 HNO<sub>3</sub> HClO<sub>4</sub>를 각각 가한 후 테플론 뚜껑을 덮고 가열판에서 180℃로 24시간 가열하여 용기내의 시료를 완전 분해하였다(Windom et al., 1989).
3. 혼합산을 넣고 증발시켜 건조 시킨 뒤 2% HNO<sub>3</sub>를 가해 테플론 용기 내의 잔사를 녹여 10 mL로 맞추었다.
4. 희석하여 ICP-MS (Thermo, iCAP Q)로 측정하였다.

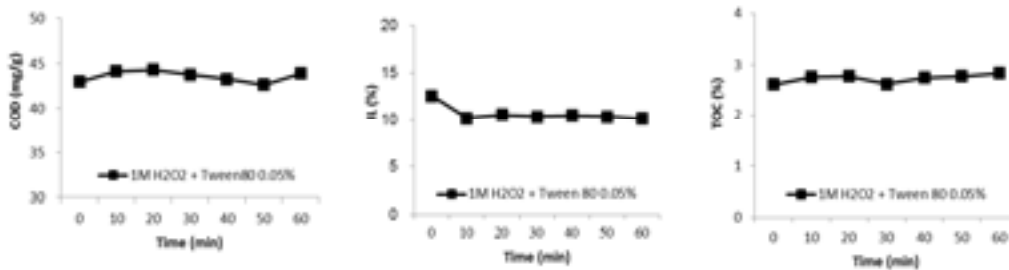


[그림. V-마-6] ICP-MS

**㉔ 시험결과 및 고찰**

**■ 세척처리**

- 세척처리에 의한 COD와 IL의 감소에는 유의한 차이가 없음
- 본 결과에서는 나타내지 않았으나 3차년도 연구 결과 80분 이상에서는 COD, IL이 약간 증가하는 경향을 보임



[그림. V-마-7] 산화제 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (0.05%, Tween80 첨가)에 의한 퇴적물 내 유기물 저감 효과(3차년도 연구결과)

■ 고도산화처리

- 고도산화처리 시간에 따른 시료의 색 변화를 확인 함(그림 V-마-8)
- 약 30분의 반응 이후 뚜렷한 색 변화를 확인함
- 실험 진행 중 약 8.7℃ 정도였던 반응물의 온도는 초미세기포의 효과로 실험 종료 60분 쯤에 약 44.6℃ 정도로 증가함(표 V-마-11)
- 오존과 미세기포만을 처리한 경우 과산화수소에 의한 유기물 산화에서 보이는 정도의 거품 발생은 보이지 않음

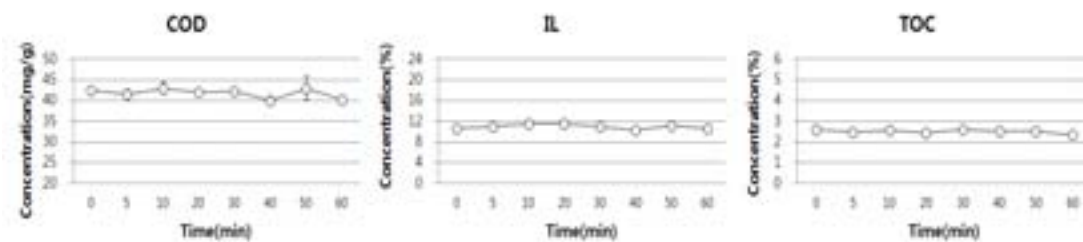


[그림. V-마-8] 고도처리 후 대상 퇴적물의 색 변화

[표. V-마-10] 고도산화처리 동안의 시료 온도

시간(분)	0	5	10	20	30	40	50	60
온도(℃)	8.7	12.9	18.6	25.5	31.35	35.2	41.3	44.6

- 부영양화 관련 평가물질(COD, IL, TOC) 변화
  - COD농도는 42.5 mg/g에서 고도처리 60분 후 약 40mg/g이 되었으나 60분간 8번의 채취 시료가 갖는 농도의 표준편차(±1.2)를 고려했을 때 유의하게 감소했다고 할 수 없음
  - 강열감량(IL, %)결과는 초기 약 10.6%에서 고도산화처리 동안 변화를 보이지 않음
  - 총유기탄소함량 역시 2.6%에서 처리 후 2.3%정도로 초기에 비해 약 10% 가량이 감소하였으나 그 차이는 유의하지 않음



[그림. V-마-9] 고도산화처리에 의한 부영양화 관련 평가물질의 변화 (COD(mg/g), IL(%), TOC(%))

■ 세척 및 고도산화처리

- 세척 및 고도산화처리 이후 상태 변화
  - 산화제 투입과 함께 급격한 색 변화와 함께 유기물 산화에 의한 거품이 발생됨

10분의 세척 공정(반응 고액비 1:3) 이후 반응물의 고액비가 1:6이 되도록 계산된 공정수 투입과 함께 급격한 산화반응을 감소시켰으나 유기물 산화에 의한 미세한 기포는 계속 발생됨

고도산화처리 정화처리는 총 60분간 진행되었으며, 실험 진행 중 시료의 증가된 온도는 표 V-마-12와 같음

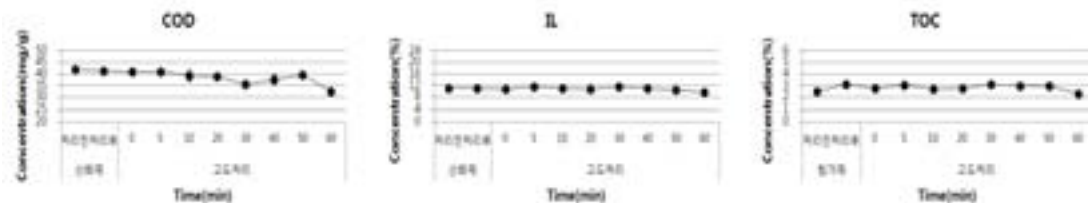
세척처리공정에서 보다 온도 증가율이 높게 확인됨

[표. V-마-11] 세척 및 고도산화처리 동안의 시료 온도

시간(분)	세척 전	세척 후	0	5	10	30	40	50	60
온도 (°C)	6.8 ±0.00	22.1 ±0.11	17.0 ±0.11	18.4 ±0.04	19.4 ±0.11	28.6 ±0.95	38.5 ±0.25	41.4 ±0.07	47.1 ±0.21

○ 부영양화 관련 평가물질(COD, IL)의 농도변화

- 세척 단계에서의 COD농도는 크게 감소하지 않음(42.1 Mg/g > 41.4mg/g). 그러나 고도산화처리 60분 후 초기 농도에서 약 23%가 감소하여 32.3 mg/g의 COD농도를 보임
- 강열감량(%) 결과 역시 산화제에 의한 세척단계에는 뚜렷한 감소를 보이지 않았으나 60분의 고도산화처리 후 초기 11.1%에서 최종 9.8%까지 약 12%감소한 결과를 나타남
- 퇴적물 내 총유기탄소함량(%)은 산화제를 이용한 세척 공정 후 오히려 약간 증가하는 경향을 보였으며 고도산화처리 60분 처리 이후 2.3%정도로 감소하여 초기 농도에 비해 약 10% 정도 감소하는 경향을 보임



[그림. V-마-10] 세척과 고도산화처리 의한 부영양화 관련 평가물질의 변화 (COD(mg/g), IL(%), TOC(%))

■ 고찰

- COD, IL, TOC 의 경우 초기 시료에 비해 세척처리 및 고도산화처리의 단독 처리 후 큰 변화가 없었으며, 세척제(과산화수소 1 M)처리와 고도산화처리를 순차적으로 진행한 조건에서 각각 약 23%, 12%, 10%의 감소를 보임
- 세척단계를 거친 후 고도산화처리를 실시한 반응물의 유기물 저감효율이 증대된 것으로 확인됨
- 이와 같은 결과는 세척 처리공정에서 유사 펜톤 반응 후 고도 처리공정에서 잔류 과산화수소와 오존 반응에 의한 peroxone 효과로 고도산화 공정에서 산화의 시너지 효과에 기인한 것으로 해석됨

② 실증장치 시운전 및 고도산화처리 장치의 오존 주입 확인

---

## ㉓ 실험조건 및 방법

### ■ 실험 목적

- 각 공정간 원활한 흐름 확인
- 실증장치의 고도산화처리 반응조에서 오존과 용존산소 농도의 측정을 통한 고도산화처리 공정의 안정성 확인

### ■ 시험조건

- 오존 발생량/주입량: 50g/h, 3.5 ℓ/min
- 측정위치: 고도산화처리 반응조 하단에서 시료를 채취하여 3 ℓ 비이커에서 바로 측정

### ■ 측정방법

- 측정위치: 고도산화처리 반응조 하단에서 시료를 채취하여 3 ℓ 비이커에서 바로 측정
- 반응조 하단 밸브를 이용하여 0~10분간 1분단위로 3 ℓ PE 비커 이용, 시료를 채취
- 비커에 멀티측정기와 오존측정기를 담가서 용존 오존, DO, pH, 온도를 측정함
- 반응수를 주입하고 반응조에 반응물이 차는 시간을 5분으로 두고 채취 시작
- 멀티측정기(Hand-held Water Quality Meter/WQC-24)와 오존측정기(OZ-20) 이용

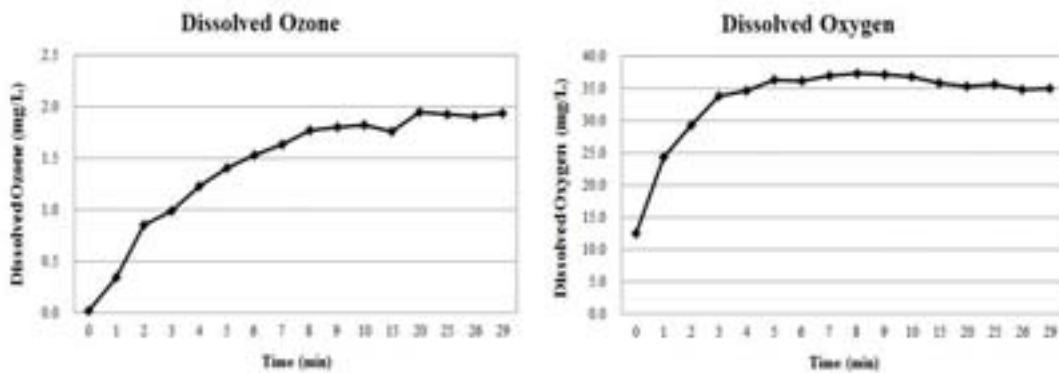
## ㉔ 시험결과 및 고찰

### ■ 실험결과

- 공정의 작동
  - 공정수를 이용한 세척, 입자분리, 고도산화처리 장치의 시운전에는 이상이 없었음
  - 주입 펌프 및 제어판의 작동은 원활하였음
- 용존산소 농도
  - 멀티측정기(Hand-held Water Quality Meter/WQC-24)로 측정한 용존 산소의 농도는 측정 시작 3분(Elapsed time)에 초미세기포의 효과로 인하여 자연환경의 이론적 최대 용존 산소 농도인 14.78 mg/ℓ (0℃, 1기압) 대비 2.03배인 30 mg/ℓ를 초과함
  - 오존을 주입하는 동안 반응기 내부(유효용적 2,300 L) 용존산소는 측정기의 정량적 측정 한계(20mg/ℓ) 이상인 약 30mg/ℓ를 유지하므로 정성적으로 이론적 최대 용존 산소 값 이상이 유지됨을 확인함
- 용존오존의 농도
  - 고도처리반응조 내부는 오존가스 확산을 방지하기 위해 밀폐 되어있었음에도 반응물이 없어 배오존 여부를 미세한 냄새로 확인 가능 (고도처리반응조에 배오존 포집 장치 및 처리장치 부착하여 시험 동안 사용함)
  - 용존오존 주입 후 경과시간 1분에 초기 농도의 약 10배 이상의 증가 경향을 보임
  - 이후 20분 동안 계속적으로 증가하여 약 1.95 mg/L의 농도에 도달함

[표. V-마-12] 시간 대 별 고도산화처리장치 내 용존오존 및 용존산소 농도의 변화

시간(분)	pH	온도	비고
0	6.91		
1	6.96	4.8	
2	6.96	4.4	용존오존 단위(mg/ℓ)이하 동일
3	6.98	4.2	
4	6.96	4.1	
5	6.98	4.1	
6	6.97	4.1	
7	6.98	4.1	
8	6.97	4.2	
9	7.01	4.1	
10	6.99	4.1	
15	7.01	4.1	
20	7.03	4.4	
25	7.06	4.7	
26			
29	7.08	5.1	



[그림. V-마-11] 시험 운전 시 고도처리장치 내 용존오존 및 용존산소 농도 변화

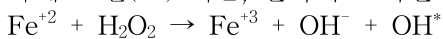
■ 고찰

- 시험 운전(고도처리반응조에 상수(Tap water) 2,300 L을 공정수로 사용) 시 오존 및 산소 농도의 실제 측정결과 초미세기포와 오존발생 및 주입에 특별한 문제가 없었음
- 그러나 퇴적물 입자와 공정수가 존재할 경우 탁도(Turbidity)가 오존 측정기를 통한 오존 농도의 정확한 측정을 방해하므로 오존 반응의 mass balance가 기초되어 발생/주입이 조절되어야 함
- 앞으로의 실험 가동 과정에서 안정적인 발생/주입이 가능한지 확인되어야 함
- 오존 농도의 stoichiometric mass balance

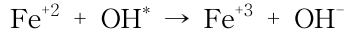
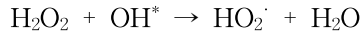
▣ 고도산화처리 공정

■ (유사) 펜톤(Fenton) 산화 (*N해역 퇴적물 시료 Fe=3.5%, bulk*)

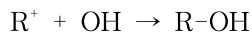
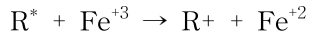
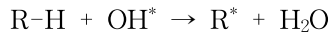
촉매로 철(II) 이온, 산화제로 과산화수소 혼합물: 펜톤 용액



유기물이 없을 경우,

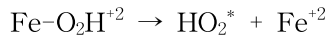
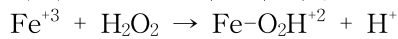


유기물(R)이 있을 경우, (*N*해역 퇴적물  $\text{TOC}=2.83\%$ , *bulk*)

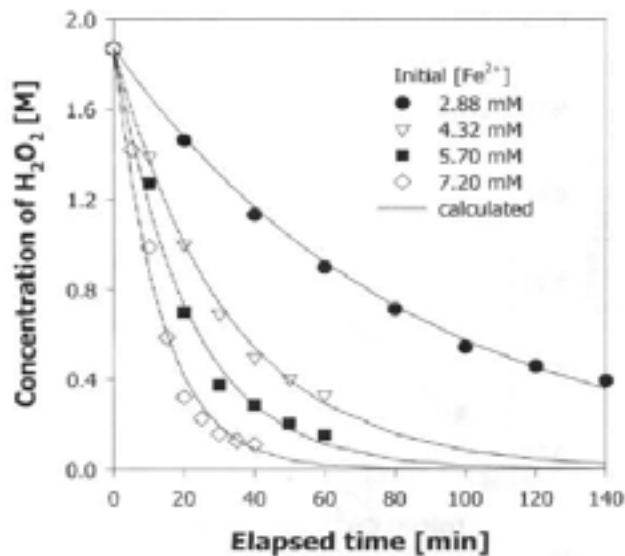
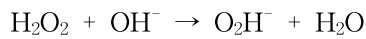


(TOC 중 약 60% 내외  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  저감 가능, 대상 유기물을 1.698%로 가정  
펜톤 산화는 과산화수소 농도, 철 이온 농도 및 유기물 농도에 따라 영향<sup>36)</sup>  
0.5 M 과산화수소는 1.7%, 17,000 mg/L 이므로 대응 가능)

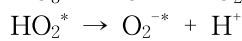
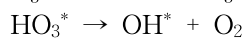
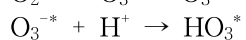
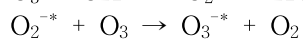
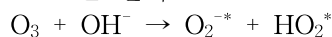
촉매로 철(III) 이온이 사용될 경우



염기성 조건에서는 라디칼 생성이 방해 가능

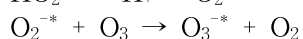
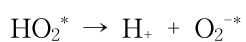
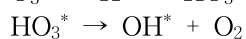
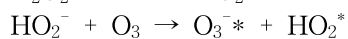


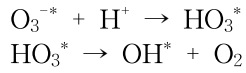
■ 오존 산화



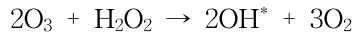
■ 페로존(Peroxon) 산화

과산화수소와 오존이 동시에 있을 때 산화





이를 종합하면



■ 산화제의 산화력 비교<sup>37)</sup>

Specification	Oxidation Potential (Volts)	Relative Oxidation Power
Fluorine	3.03	2.23
<b>Hydroxyl radical</b>	<b>2.80</b>	<b>2.06</b>
Atomic oxygen	2.42	1.78
<b>Ozone</b>	<b>2.07</b>	<b>1.52</b>
<b>Hydrogen peroxide</b>	<b>1.77</b>	<b>1.30</b>
Pethydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.68	1.24
Chlorine dioxide	1.57	1.15
Chlorine	1.36	1.00
Oxygen	1.20	0.88

- 산화 반응 중 가장 산화력이 강한 반응은 Fluorine 산화지만 공정의 제어나 사용의 위험 등 제반 여건을 고려하면 현실적으로 해양오염퇴적물 정화사업 현장에서 용이하게 사용할 수 있는 산화반응으로는 수산화 라디칼(Hydroxyl radical)이 가장 강한 산화 반응(염소 산화 대비 2.06 배)이며, 본 연구에서 사용한 오존 산화 및 과산화수소 산화 역시 염소 산화 대비 각각 1.52 및 1.30배 강한 화학적 산화 공정임

(다) 현장 처리기술 연속 흐름 공정 실증 시험

- 연속흐름의 공정 실증 조건 검증 단계
  - 다음의 흐름으로 해양오염퇴적물 정화 장치를 실증함(그림 V-마-12).
  - 각 단계별 실험 결과는 다음과 같음





## ■ 시험조건

- 대상퇴적물: N, F해역 퇴적물의 혼합 시료를 실험의 용이함을 위해 풍건조시켜 보관하여 이용
- 처리 대상 퇴적물: solid:liquid (공정수)=1:2 고액비로 저류조에 준비함
- 정화 전후의 처리대상 퇴적물의 유기물 저감 효과를 비교하기 위해 처리 전 시료에 대해 75  $\mu\text{m}$  이상, 32~75  $\mu\text{m}$ , 32  $\mu\text{m}$  이하로 입자의 크기별 시료를 분리함
- 정화 후 공정 조건에서의 정화 효율을 확인하기 위한 자료를 확보함
- 처리제: 세척 반응조에서 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 1 M + Tween80 (F.C 0.05 %)로 되도록 계속 주입을 실시함
- 실험 조건의 변경: 세척 반응조에서 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 0.5 M + Tween80 (F.C 0.05 %)로 되도록 계속 주입을 실시함
- 반응속도: 연속 공정으로 시료의 주입 속도를 이용하여 공정의 반응 속도 조절함
- 세척조 반응 시간을 조건으로 설정하기 위하여 저류조에서 세척조로의 시료 주입 속도로 반응 시간을 조절함(조건1: 20분, 조건2: 30분, 조건3: 40분, 조건4: 40분+공기(air, 기포크기 1 mm 멤브레인 산기장치 사용))

[표. V-마-13] 유량 및 고액비 조절을 위한 시료 투입 펌프 속도

	공정 조건(세척조 내 반응 시간 기준)			
	20분	30분	40분	40분+air
세척조 용량(L)	1700	1700	1700	1700
전체 유량(L/min)	85	57	43	43
시료주입 속도(L/min)	64	40	30	30
추가 공정수 주입 속도(L/min)	12	10	8	8
산화제( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 주입 속도(L/min)	4	3	2	2
Tween80 주입 속도(L/min)	5	4	3	3

※ 세척 반응조의 격벽 높이를 조정하여 정화 처리 시스템의 최대 용량 이하인 1 t/h 조건에서 안전 인자를 고려하여 시험

## ■ 측정방법

- 연속흐름 현장 정화처리 공정에서의 세척 공정 기준 처리 시간을 10분, 20분, 30분, 40분으로 고정하여 연속 정화 공정 운영 실시
- 시료의 혼합 상태가 steady-state가 된(설정된 속도로 세척조로의 시료 투입 및 세척제 투입 후 전체 세척조가 모두 채워지는 시간이 지난 후) 시점 이후에 (1) 세척조, (2) 고도산화처리 단계를 거친 시료를 채취
- 세척조 내 격벽 간 분리된 네 개의 처리조 내 시료 균질화 확인을 위해 50 mL의 시료를 채취하여 전처리를 하고 입도 분석을 통한 시료의 혼합을 비교

**[입도분석 시료 전처리 방법]**

1. 채취한 시료를 건조시킨다.
2. 1 M의 HCl을 첨가하여 무기탄소를 제거한다.
3. 과산화수소(35%)를 첨가하여 입자에 흡착되어있는 유기물을 제거한다.
4. 처리된 퇴적물을 원심분리하여 상등액을 버리고 증류수로 세척한다.
5. 측정 조건에 따라 증류수를 첨가하여 분석에 이용한다.

- 시료는 (1) 세척 전, (2) 세척조 통과 후 (3,4) 입자분급(하이드로사이클론)하부 토출수 시료, 상부 토출구 시료 (5) 고도처리 전 (6) 고도처리 후 이며, 입자분급 후 상부 토출구 시료가 고도처리 전 시료와 동일함
- 채취한 시료는 동결건조하여 측정항목을 분석함
- 분석항목: COD, IL, TOC

**㊤ 시험결과 및 고찰**

**■ 시험결과**

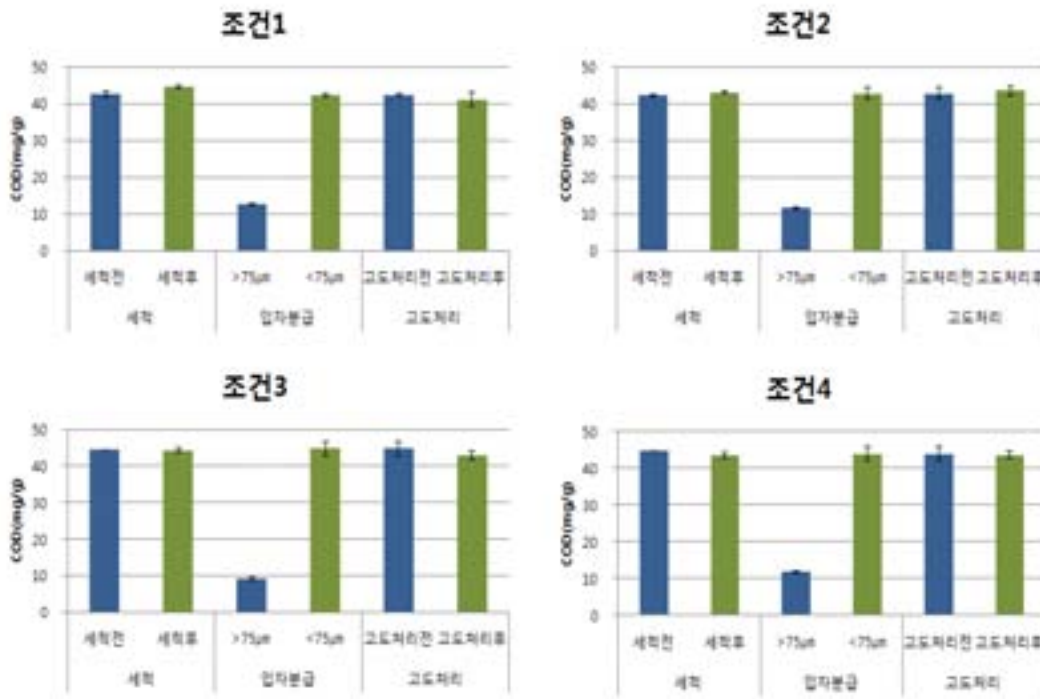
- 정화 시스템 운전 상태
  - 1 M의 세척제(산화제, 과산화수소) 처리는 정화 대상 물질 부피의 약 2배 가량의 거품을 발생시켰으며 거품이 발생되기 시작한 이후 격벽을 통한 시료의 흐름에는 영향이 없었으나 교반 목적의 임펠러 위에 별도로 설치된 거품 제거용 임펠러의 작동 높이에 따른 거품 제어의 어려움이 발생
  - 세척제 투입 초기에는 4단의 세척조 내 반응물의 이동과 월류 방지를 고려해 거품 제어 및 주입 속도의 조절이 필요하였기에 세척제 주입 최종 농도를 0.5 M로 낮추어 진행함
  - 0.5 M로 세척조 계속 주입 조건 설정 후 Steady state 상태가 된 이후에는 제어에 문제가 없이 작동됨
- 초기 시료의 분급별 부영양화지수 관련 항목 농도
  - 초기 정화 대상 퇴적물의 입자크기별 COD농도와 IL은 표 V-마-15와 같음
  - 32-75 μm 크기 입자에서 상대적으로 낮은 값을 보였으나 큰 차이는 보이지 않음

**[표. V-마-14] 정화 대상 시료의 분급 별 COD농도(mg/g)와 IL(%)**

	75 μm 이상	32-75 μm	32 μm 이하
COD (mg/g)	43.5 (±1.61)	39.2 (±1.13)	40.1 (±0.88)
IL (%)	14.5 (±0.16)	11.2 (±0.19)	10.7 (±0.14)

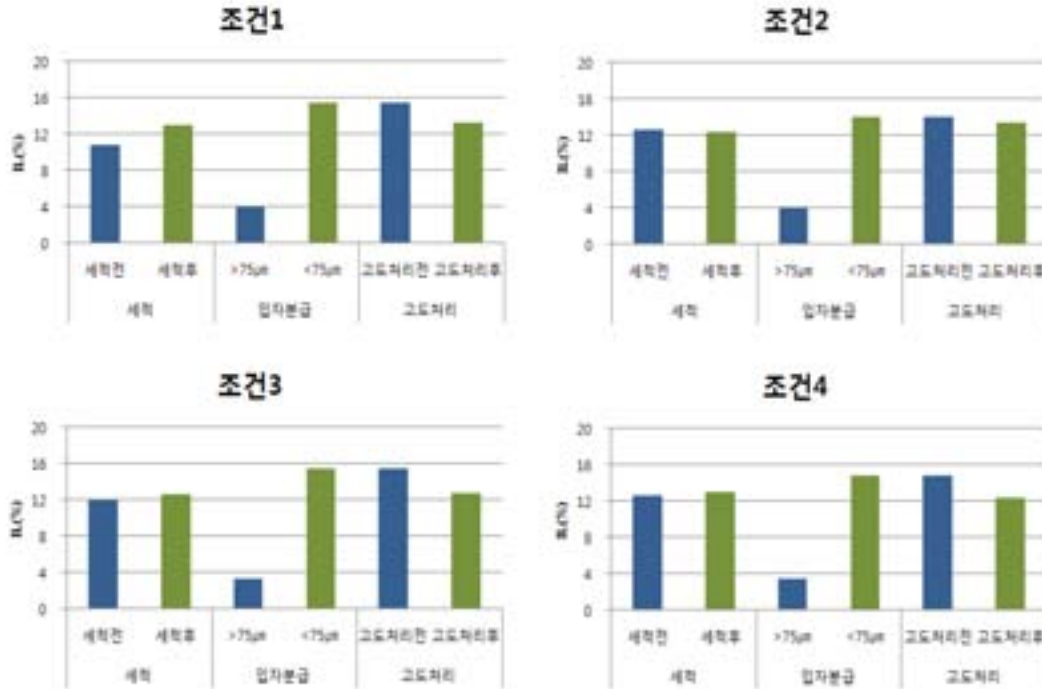
- 세척 시간에 따른 부영양화 관련 평가물질(TOC, COD, IL)의 변화
  - 퇴적물 화학적 산소요구량(COD) 변화
    - 세척 전 약 43.4 mg/g의 COD농도를 보인 퇴적물 total 퇴적물 시료는 모든 실험 조건에서 세척 후에도 크게 COD농도가 감소하지 않음

- 그러나 초기 분급을 나눈 퇴적물 시료에서의 COD 농도로 비교해 보았을 때 세척 후 75  $\mu\text{m}$ 이상 입자에 대한 정화율은 43 mg/g에서 9.3-12.8 mg/L로 70%이상의 상당히 높은 정화 효율을 보임
- 고도산화처리 공정을 거친 이후에도 총 퇴적물 내 COD농도는 유의한 차이를 보이지 않음
- 세척 정화 후 75  $\mu\text{m}$ 이상의 입자에 상대적으로 높은 COD감소율을 보였으며 세척공정의 처리 시간이 증가함에 따라(조건1, 조건 2, 조건 3) 조립질 입자의 세척 효율이 증대됨을 확인 함(12.8 mg/g, 11.7 mg/g, 9.27 mg/g)

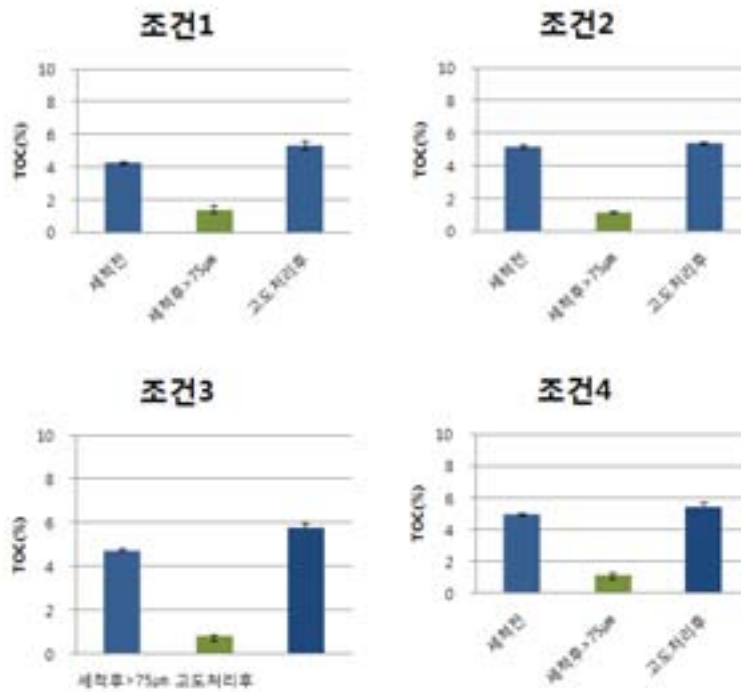


[그림. V-마-13] 정화 처리 시간에 따른 퇴적물 내 COD함량 변화  
(조건1:20분, 조건2:30분, 조건3:40분, 조건4:40분+air)

- 퇴적물 강열감량(IL) 변화
  - 세척 전 약 12.0%의 IL함량을 보인 퇴적물 total 퇴적물 시료는 모든 실험 조건에서 세척 후에도 큰 감소하지 않음
  - 그러나 초기 분급을 나눈 퇴적물 시료에서의 세척 후 75  $\mu\text{m}$ 이상 입자에 대한 정화율은 IL 14.5%에서 3.3-3.9%로 상당히 높은 감소 효율을 보임
  - 고도산화처리 공정을 거친 이후에도 총 퇴적물 내 IL은 유의한 차이를 보이지 않음
- 퇴적물 총유기탄소 함량 변화
  - 퇴적물 내 유기탄소의 함량 역시 공정 전후 COD와 IL와 같은 경향을 보임
  - 세척 후 75  $\mu\text{m}$ 이상의 입자에 대해서는 0.78%-1.4%로의 상당한 세척 효율을 보인 반면 고도처리 후 75  $\mu\text{m}$ 이하의 입자에 대한 총유기탄소함유량은 처음 시료의 4.7%와 크게 다르지 않음



[그림. V-마-14] 정화 처리 시간에 따른 퇴적물 내 IL 변화  
(조건1:20분, 조건2:30분, 조건3:40분, 조건4:40분+air)



[그림. V-마-15] 정화 처리 시간에 따른 퇴적물 내 TOC함량(%) 변화 (조건1:20분, 조건2:30분, 조건3:40분, 조건4:40분+air)

■ 고찰

- 1 M의 세척제(산화제, 과산화수소) 처리는 정화 대상 물질 부피의 약 2배가량의 거품을 발생시켰으며 거품을 제어할 수 있는 거품제어 임펠러의 작동 및 적절한 높이 조절 및 산화제 투입농도의 조절 등이 매우 중요한 요소로 판단됨
- 0.5 M의 세척제 농도로 계속 투입 조건으로 변경하여 실험을 수행하였으며, 이후 안정적인 공정의 흐름을 확인함
- 세척 조 내 시료의 혼합 및 흐름은 원활하였음
- 세척 단계에서 조립질 퇴적물에 대한 정화가 충분함을 보여주며, 분급을 통한 입자분리로 입자별 처리 및 추가 정화 공정의 연결을 통한 효과적인 정화 단계를 설립했음을 확인할 수 있음

[표. V-마-15] 세척 공정(40분) 후 분급 별 부영양화 정화지수 변화

		75 $\mu\text{m}$ 이상	32-75 $\mu\text{m}$	32 $\mu\text{m}$ 이하
부영양화 평가점수 <sup>38)</sup>	처리 전	6 (COD 40이상) 3 (IL 15 미만)	6 (COD 40이상) 3 (IL 15 미만)	6 (COD 40 이상) 3 (IL 15 미만)
	처리 후	0 (COD 13미만) 0 (IL 5 미만)	6 (COD 40 이상) 3 (IL 15 미만)	

- 40분의 정화처리 공정 조건에서 75  $\mu\text{m}$ 이상 조립질 입자에 대한 높은 유기물 저감 효과를 확인함
- 그러나 세립질의 입자에서는 뚜렷한 정화 효과를 확인할 수 없었음
- 세척 처리공정에서 기포 크기 1 mm의 공기(air) 투입을 통한 산화처리의 효율 증대는 현격하게 나타나지 않았음
- 산화제로 인한 거품 발생, 부피팽창과 반응조의 월류 현상 방지 그리고 안정적인 공정의 제어를 위해 반응조 유효용적 대비 시료 양 및 산화제의 농도를 조절하거나 간헐 투입으로 바꾸는 것을 고려해야 함
- 시간대 별 퇴적물 내 부영양화 관련 평가물질 및 중금속의 농도의 차이가 보이지 않았으며 분급별로 나누어 확인한 정화정도는 75  $\mu\text{m}$ 이상의 입자에서 세척 단계의 높은 효율을 보임
- 낮은 농도에서의 과산화수소 처리에서 잔류과산화수소 농도를 측정하여, Peroxone반응이 가능한 최소한의 과산화수소 처리 농도를 설정해야 함

## ② 세척 공정 수정을 위한 잔류과산화수소 농도 확인

### ㉞ 실험조건 및 방법

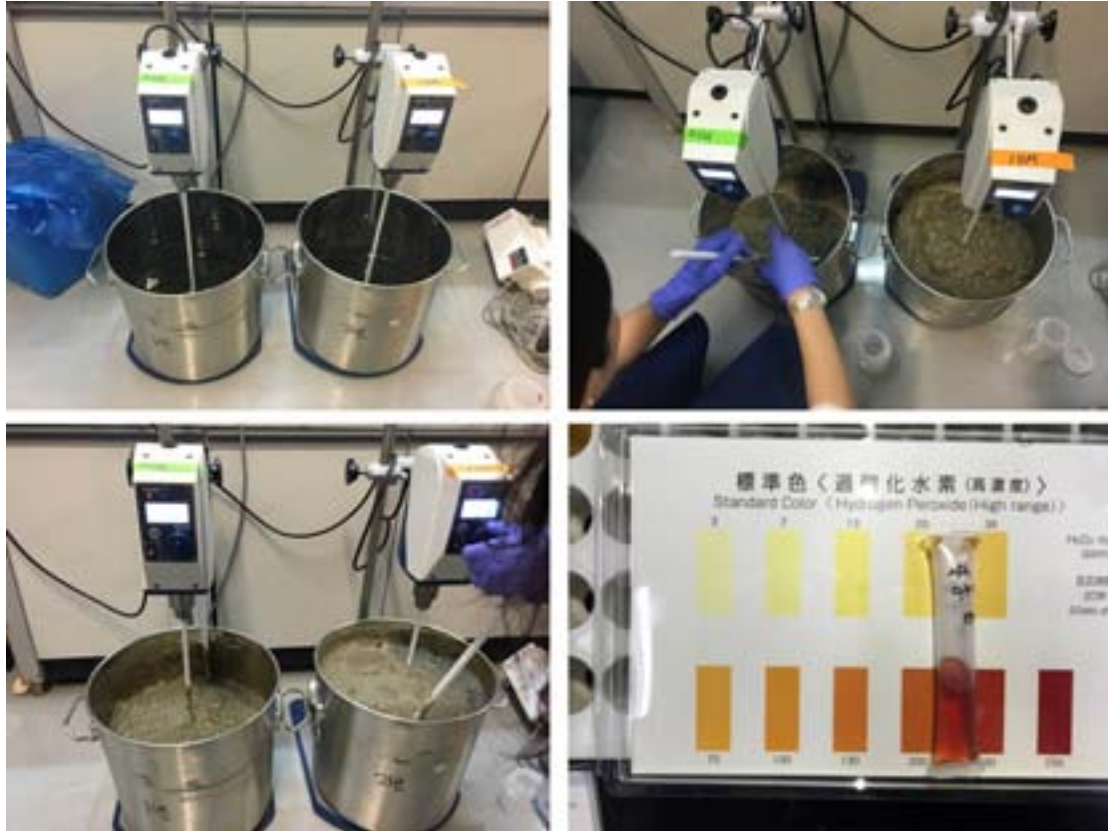
#### ■ 실험 목적

- 고도산화처리 효율을 증대시킬 수 있는 최소의 과산화수소 농도를 확인함으로써 실제 실증장치에서의 원활한 운전 및 제어를 위한 세척제 투입 시간(농도)를 확립

#### ■ 시험조건

- 과산화수소: 세척 공정 내 최종 농도 0.5 M, 1 M (그림 V-마-16)

- 대상퇴적물: N해역 퇴적물
- 최종부피: 퇴적물 약 6kg과 함수율을 고려하여 고액비 1:3으로 설정한 세척 공정과 동일하게 준비
- 세척제 농도: 최종 농도를 각각 0.5 M, 1 M로 한 과산화수소를 첨가(20 L 반응조)
- 반응시간: 시료의 원액을 이용해 과산화수소 농도를 측정하였으며 측정키트의 검출한계 이하가 되는 때까지 수행



[그림. V-마-16] 세척 공정에서의 산화제 주입 조건 확립을 위한 잔류과산화수소 농도 측정

#### ■ 측정방법

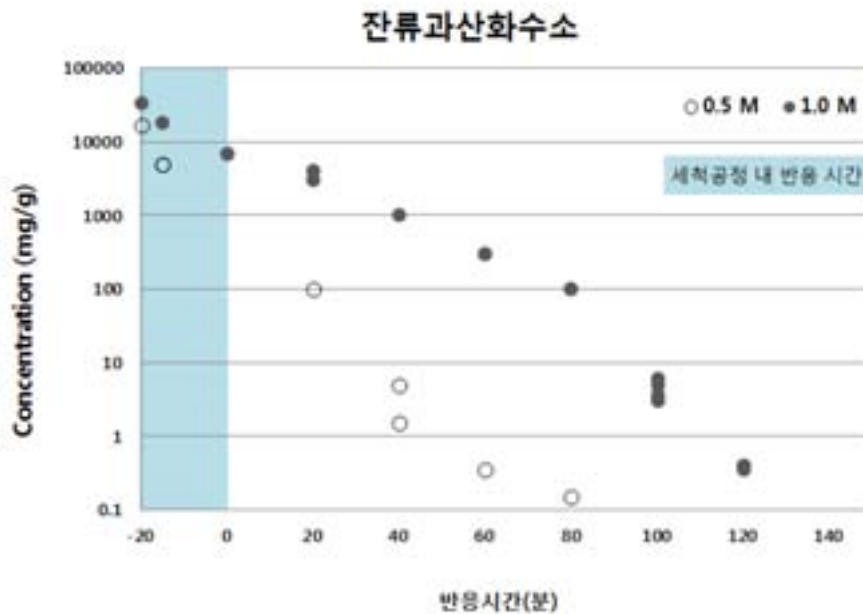
- 반응조 퇴적물과 공정수, 그리고 최종 농도를 고려한 양을 첨가한 과산화수소를 첨가한 후 반응 기포 과다 발생 제거용 임펠러를 장착한 교반 임펠러를 이용하여 상온(25°C)에서 반응시킴
- 초기 농도는 과산화 수소 농도의 이론상 농도로 설정함
- 과산화수소 측정 키트(Pack test WAK-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)를 이용하여 측정함
- Pack test WAK-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>는 발색시약이 들어있는 일회용 튜브에 액상의 시료를 넣고 지정시간이 지난 후 표준색과 비교하는 방법으로 수질을 검사하는 검사용 키트로 pH조정 등 비색적정에 필요한 전처리 과정을 최소화 시킨 측정 방법으로 염분이 있는 해수에도 사용이 가능
- 잔류과산화수소의 농도분석을 위해 solid:liquid=1:3의 비율로 반응 시킨 퇴적물 시료를 채취하여 액상을 분리하기 위해 원심분리 하여 이용함
- 상등액을 취하여 희석한 후 과산화수소 농도 측정 kit를 이용하여 농도 범위를 확인하였음

- 표준 색표를 이용한 방법으로 측정하기 때문에 보다 정확한 측정을 위해 희석배율을 달리한 시료의 발색을 통해 농도를 확인함
- 세척공정 이후 고산화처리에서 잔류하는 과산화수소 농도 측정을 위해 실증 장치에서 고려한 반응시간(20분)동안의 변화와 이후 시간 동안의 변화를 확인함
- 측정은 측정에 사용한 측정 키트의 측정 한계치 이하의 농도가 검출 될 때까지 반복
- 색도표를 이용한 농도 검출의 정확성을 높이기 위해 시료를 여러 차례 희석하여 희석 배율 별 도표를 활용하여 농도를 확인

## ㉔ 시험결과 및 고찰

### ■ 시험결과

- 과산화수소 첨가 후 시료 부피의 증가
  - 1 M의 과산화수소 조건에서 반응조 내부 시료의 부피는 반응조에 첨가한 시료의 2 배 가량으로 증가하였으며, 부피 증가는 반응 시작 후 초기 30분 동안 격렬하게 관찰됨
  - 0.5 M 과산화수소 조건에서 반응조 내부에서는 반응 대상물(퇴적물+공정수)의 2 배미만의 증가를 보임
- 시간에 따른 과산화수소 농도
  - 잔류과산화수소 농도는 0.5 M의 경우 세척 20분의 반응 이후 80분(총 100분), 1 M의 경우 180분(총 200분) 때 에 측정 한계 이하의 값을 보임
  - 초기 유기물과의 산화 반응으로 급격히 감소하는 경향을 보였으나 20분의 세척시간을 고려하고도 두 농도의 조건에서 각각 5000 mg/L, 7000 mg/L의 농도를 보임



[그림. V-마-17] 잔류 과산화수소 농도의 시간별 감소

### ■ 고찰

- 0.5 M의 조건에서 세척공정에서의 20분간의 격렬한 산화반응 이후에도 잔류한 과산화수소

소의 농도가 충분한 것으로 판단됨

- 일반적인 화학적 산화 처리 공정에서는 처리 대상물량에 함유된 유기오염물질을 산화시키기 적합한 양의 산화제를 주입하여 일정한 처리시간(Reaction time) 동안 충분히 혼합 및 산화 반응을 통하여 산화제가 잔류되지 않도록 공정을 제어하는 것이 기본적인 사항임
- 그러나 산화처리 공정 후 바로 연결되는 고도 처리공정이 있는 본 정화처리 시스템에서는 산화제가 일부 잔류되는 경우, 비록 짧은 시간동안 이지만 산화 처리 공정으로 부터 고도 처리공정까지의 이송 시간 동안에도 부가적인 산화가 진행될 뿐 만 아니라, 고도처리 공정에서 과산화수소가 잔류하는 경우 오존과 반응하여 Peroxone 반응이 발생하므로 고도처리 공정에서의 핵심 기작인 OH 라디칼에 의한 산화에 시너지 효과가 유발됨
- 0.5 M 조건인 경우 반응시간 산화반응 시작 후 20분 이후는 잔류 과산화수소가 100 mg/g 정도이므로 이 경우 앞 단의 세척 처리공정에서 반응시간을 20분 정도로 짧게 설정하고 고도처리 공정을 연계한다면 상당한 Peroxone 반응을 기대할 수 있음
- 그러나 1 M 조건(간헐주입)의 경우 산화반응 시작 후 40분 이후 약 1,000 mg/g의 과산화수소가 잔류하므로 이 경우 고도처리 공정을 연계한다면 충분한 Peroxone의 시너지 효과를 기대할 수 있음
- 0.5 M의 계속 주입 또는 1 M의 간헐주입을 통한 세척제 주입 시에도 고도산화처리 단계에서 Peroxone효과를 기대할 수 있을 최소한의 농도 이상인 것으로 판단됨
- 첨가제 사용에 대한 경제성을 고려한 최대 과산화수소 농도 1 M에서 반응물의 부피팽창률이 약 2배가량으로 확인되어 실제 공정에서의 반응조의 부피와 반응물의 부피를 고려한 간헐적 산화제 주입을 고려 할 경우 시스템의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단됨

### ③ 세척공정의 안정적 제어 및 최적의 정화 조건을 위한 세척제 농도 확립 실험

#### ㉠ 실험조건 및 방법

##### ■ 실험 목적

- 안정적인 공정 제어를 위한 거품 제어 및 연속 흐름상의 문제점을 파악
- 두 농도(0.5 M, 1 M)의 과산화수소 간헐주입(7분 주입, 13분 미주입) 처리 시 고도산화처리 이후 유기물 함량의 변화를 비교하여 낮은 농도의 산화제 처리시 유기물 저감 효율을 확인
- 세척기반 정화 공정의 회분 실험(1.0 M)을 통한 처리 시간대 별 유기물 저감 효율을 확인

##### ■ 시험조건

- 대상퇴적물: 풍건조 시켜 보관한 정화 대상 퇴적물을 이용하여 solid:liquid 비율 1:2로 저류조에 준비함
- 시스템 운영 이전에 임펠러를 이용하여 시료를 균질화 시켜 준비함
- 세척조로 넘어가는 단계에서 반응물의 고액비가 1:3이 되도록 공정수, 과산화수소, 비이온 계면활성제의 첨가량을 조절
- 처리제 조건: 두 조건, 0.5 M의 과산화수소 + Tween80, 1 M의 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) +



Tween80(최종 0.05%)로 되도록 간헐 주입

- 산화제의 주입은 세척 공정 내 4개의 세척조에 동일하게 주입
- 반응속도: 정화처리장치 내에서 약 30 L/min의 속도로 시료를 주입하여 세척조 및 고도산화처리 장치의 반응시간이 40분이 되도록 함(전체 유량 43 L/min)
- 두 처리 조건에서 시간대 별 세부 공정 별 시료를 채취

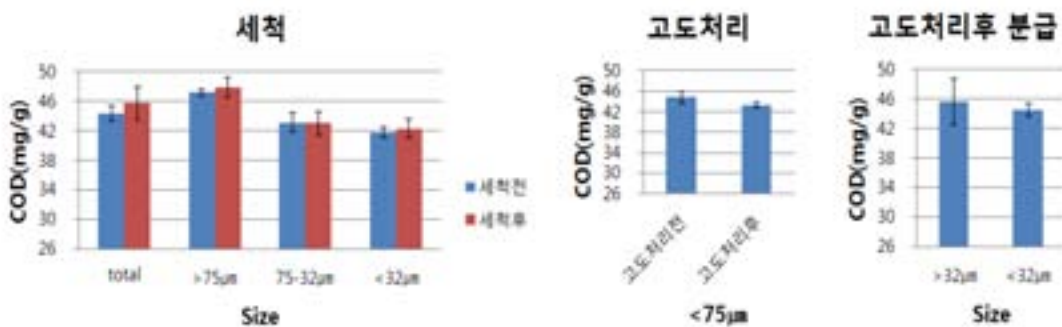
### ■ 측정방법

- 채취된 퇴적물에서의 COD(mg/L), IL(%), TOC(%), 중금속 농도를 분석
- 같은 조건에서 최소 3개의 시료를 채취하여 분석한 다음 평균값(표준편차)으로 평가함

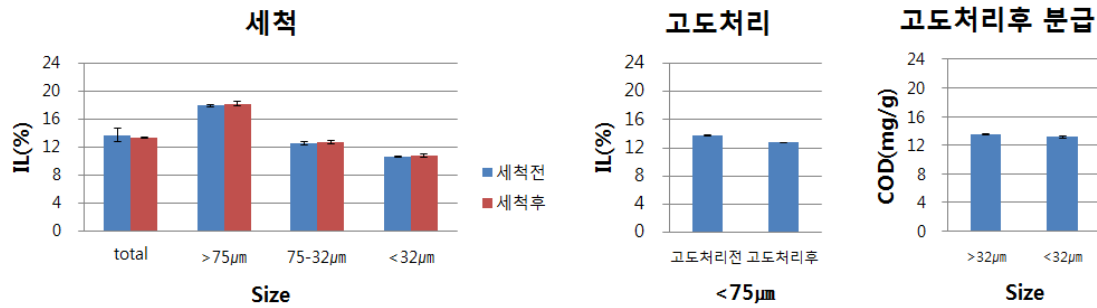
## ㉔ 시험결과 및 고찰

### ■ 시험결과

- 0.5 M 과산화수소의 간헐 주입 시 유기물 저감 효과
  - 총 퇴적물 시료의 COD농도는 0.5 M의 과산화수소 간헐 주입 조건에서 세척 후 유기물 저감 효과를 보여주지 못했다. 이는 세척 전후의 시료에 대해 입자의 크기를 나누어 분석한 결과에서도 동일하게 나타남(그림 V-마-18)
  - 고도처리 단계의 전 후 시료를 비교하였을 때 COD농도는 약 1.6 mg/g (약 3%) 감소하였으며 고도처리 후 32  $\mu\text{m}$ 를 기준으로 나누어 분석해 본 결과에서 입자별 세척 효과가 크게 다르지 않음
  - 강열감량은 COD와 상당히 유사한 경향을 보였다. 세척 전후 세척 효과를 확인 할 수 없었으며, 분급을 한 시료에서도 동일한 경향을 보임
  - 고도산화처리 후 처리 전에 비해 약 7.6%의 감소(IL 13.8% > 12.7%)를 보임
  - 고도처리 후 분급 시료의 결과는 두 구획(32  $\mu\text{m}$ 이상, 32  $\mu\text{m}$ 미만)에서 큰 차이를 보이지 않음



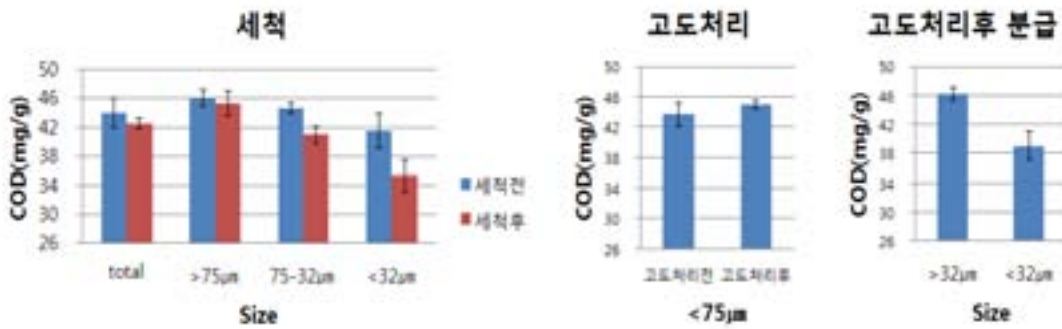
[그림. V-마-18] 0.5 M의 산화제(과산화수소) 간헐주입 세척 공정에서의 COD농도(mg/g) 변화



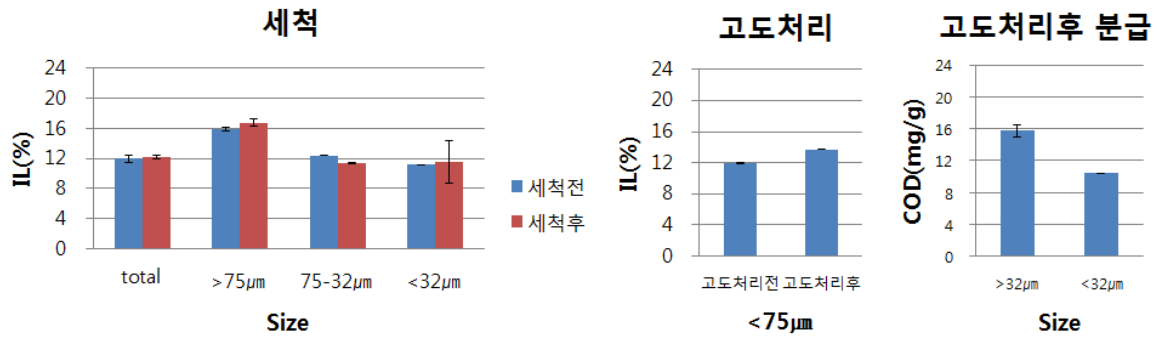
[그림. V-마-19] 0.5 M의 산화제(과산화수소) 간헐주입 세척 공정에서의 IL(%) 변화

○ 1.0M 과산화수소의 간헐 주입 시 유기물 저감 효과

- 총 퇴적물 시료의 COD농도는 1.0M의 과산화수소 간헐 주입 조건에서 세척 후 약 1.5mg/g의 감소 경향을 보였다. 세척 전후의 시료에 대해 입자의 크기를 나누어 분석한 결과 32-75 µm의 입자에 대해 약 10%의 저감 효과를 확인하였으며, 32 µm미만의 시료에 대해서는 15%이상의 감소를 보임(그림 V-마-19)
- 고도처리 전 후 총 시료와 32-75 분급에서의 COD농도는 감소하지 않았으나 32 µm 미만의 시료는 초기 41.6 mg/g에서 39.0 mg/g으로 약 5%의 감소를 보임
- 강열감량은 COD와 상당히 유사한 경향을 보였다. 32-75의 분급에서의 약간의 감소 경향을 제외하고 세척 전후 세척 효과를 확인 할 수 없었으며, 분급을 한 시료에서도 동일한 경향을 보임
- 고도산화처리 후 처리 전에 비해 오히려 증가함

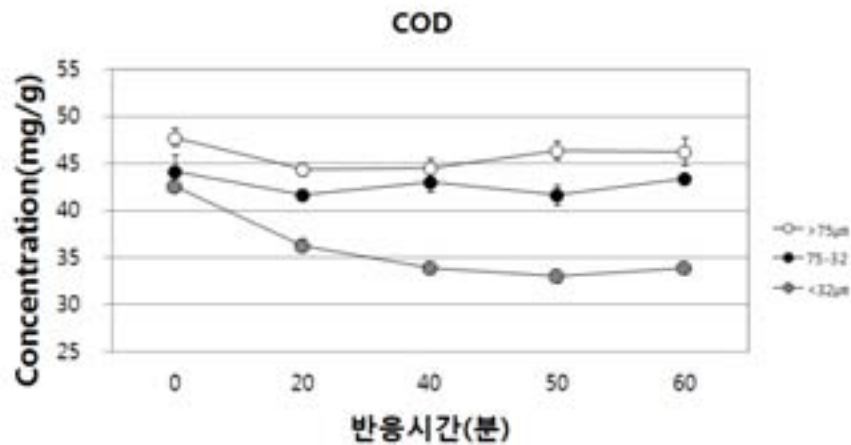


[그림. V-마-20] 1.0M의 산화제(과산화수소) 간헐주입 세척 공정에서의 COD농도(mg/g) 변화



[그림. V-마-21] 1.0M의 산화제(과산화수소) 간헐주입 세척 공정에서의 IL(%) 변화

- 1.0M 과산화수소의 간헐 주입 시 세척 시간에 따른 유기물 저감 효과
  - 세척 시간을 변수로 하여 과산화수소의 간헐 주입에 따른 시간별 유기물 감소 경향을 확인한 결과 75 µm이상과 32-75 µm의 분급 시료에서 각각 3%, 2%의 감소 경향을 보인 반면 32µm 미만의 세립질 입자에서 시간에 유의하게 감소하여 60분 처리에서는 최대 20%이상의 저감율을 확인함



[그림. V-마-22] 1.0M 과산화수소 주입에 따른 퇴적물 분급 별 COD농도(mg/g)의 변화

### ■ 고찰

- 산화제의 농도를 1 M이하로 낮추는 것은 뚜렷한 세척결과를 야기하지 못하며 이후 고도 산화처리 공정에서의 유기물 저감 효과를 도출하지 못하는 것으로 보임
- 최소 1 M의 조건에서 간헐 주입을 통한 세척 공정 운전 제어 조건을 확립할 필요성 확인됨
- 산화제의 처리는 유기물의 산화 뿐 만 아니라 잔류 과산화수소 농도를 통한 고도산화처리 효율을 증대시키기 위한 것으로, 잔류 과산화수소 농도의 확인을 통한 실증 공정의 간헐적 산화제 주입 시간 및 농도를 고려해야 함

#### ④ 산화제 간헐 주입 조건에서의 공정 안정성 및 유기물 저감 효과

##### ㉞ 실험조건 및 방법

###### ■ 실험 목적

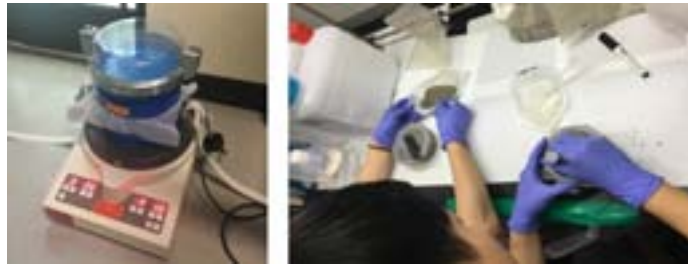
- 산화제 간헐 주입 조건에서의 공정의 안정성을 확인
- 산화제 (과산화수소, 1 M) 간헐 주입시 유기물 저감 효과 여부를 판단
- 반복 시험에서의 유기물 저감 경향을 비교하여 시스템 가동의 재현성을 확인

###### ■ 시험조건

- 산화제의 주입은 7분 주입(주입량 8 L/min) 13분 비주입의 간헐주입 조건으로 설정하였으며, 세척 공정의 각 단위 처리시간 동안 주입된 산화제의 최종 농도가 1 M(총 주입량 112 L/min)이 되도록 과산화수소(0.05%)의 주입량을 설정하였으며 비이온계면활성제(Tween80)는 총 주입량을 연속으로 일정량을 균등하게 주입하였음
- 산화제의 주입은 세척 공정 내 4개의 세척조에 동일하게 주입
- 연속흐름으로 고도산화공정으로 시료가 넘어가도록 하였으며, 세척공정에서 20분 세척을 설정
- 세척 전 다단사이클론 설치를 통해 입자의 분급 효율을 향상시킴
- 약 5시간의 연속 운영을 2회 수행하여 각 시험운영에서 시료를 확보함

###### ■ 측정방법

- 각 운영에서 세척 공정 전후, 고도처리 공정 전후로 4개의 시료를 확보
- 채취한 시료를 원심분리 하여 퇴적물을 취하여 동결건조 함
- 전체 시료의 유기물 및 중금속 분석을 위한 시료를 확보 후 나머지 시료에 대해 분급 별 정화 정도를 비교하기 위한 입자 분급(sieving) 수행(32  $\mu\text{m}$  미만, 32  $\mu\text{m}$ ~75  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  이상)(그림 V-마-23)



[그림. V-마-23] 시료의 분급을 위해 사용된 자동 입자 선별기와 시료 균질화를 위한 시료 분쇄 단계

- 총시료와 입자크기에 따라 나눈 시료를 균질화 하여 분석에 이용함
- 분석항목은 COD, IL, TOC, 중금속으로 분석 방법은 해양환경공정시험법의 퇴적물 시료 분석법을 따름

##### ㉟ 시험결과 및 고찰

■ 시험결과

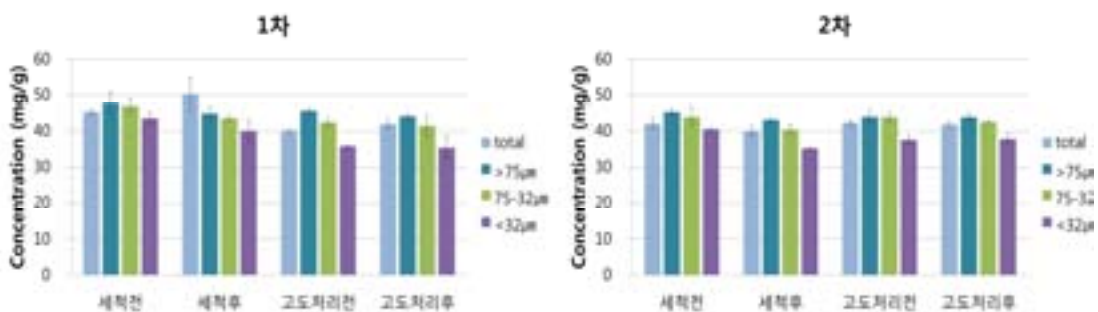
○ 시험 운전 안정성

- 연속 운행 동안 각 공정에서 오염 가능성이 있는 공정(세척 저류조 상부)을 확인하고 2차 시험 운영 시 환경을 개선함
- 세척 공정 및 고도산화처리 공정에서의 유기물 산화에 의해 발생된 거품은 시스템 내에서 완벽히 제어됨
- 세척 공정과 고도산화처리 공정 사이의 조립질 입자 분리 및 고도산화처리 후 세립질 입자분리 단계에는 하이드로 사이클론을 설치, 분급 효율을 향상시키기 위한 다단 연결을 실시하여 원활한 흐름을 확인함
- 연결된 각각의 공정에서의 시료 흐름이 원활하였음

○ 유기물의 저감 효과 분석

• 화학적 산소소비량(COD, mg/g)

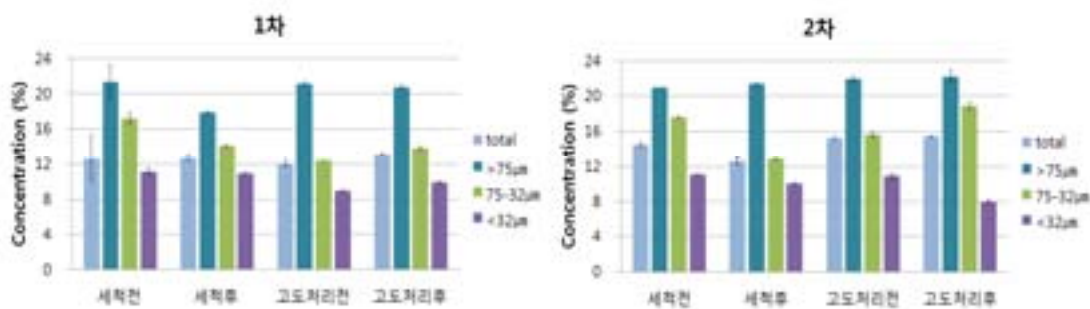
- 1차 시험운영 결과 전체 시료에 대한 COD는 45.3 mg/g의 농도에서 42.0 mg/g 정도로 약 8 % 미만 감소율을 보임
- Total 시료에서 확인되는 세척 후와 고도처리 전 시료의 COD 농도 차이는 하이드로사이클론에 의한 75  $\mu\text{m}$ 이상의 입자의 제거에 의한 결과로 판단됨
- 분급별 COD의 감소는 32  $\mu\text{m}$ 이하의 분급에 대해 세척 전 43.5 mg/g에서 세척 후 40.0 mg/g으로 10%의 감소를 보였으며, 이후 고도처리 공정 후 약 35.3 mg/g로 최종 19%의 높은 감소율을 보임
- 그러나 32-75  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  이상의 분급에서 확인된 COD 감소는 각각 12%, 8% 미만으로 세척 공정에서의 감소율이 전체 감소율의 95% 이상을 차지, 고도산화처리 공정에서의 감소는 유의하지 않음
- 2차 시험운영에서는 1차 운영에 비해 안정적인 세척공정 운영되었으며, 그 결과 유의한 유기물 저감 효과를 확인 할 수 있었음
- 반면, 2차 시험운영의 고도산화처리 공정은 1차 시험 운영시의 결과와 같이 큰 감소 경향을 보이지 않음
- 총 2회의 시험 운영에서의 퇴적물 내 COD감소는 경향은 유사하였고, 세척 단계에서의 유기물 저감 효과에 비해 고도산화처리 공정에서의 효율이 낮음을 확인할 수 있었음



[그림. V-마-24] 산화제 간헐주입 조건에서의 시료의 분급별 COD (mg/g) 농도 변화

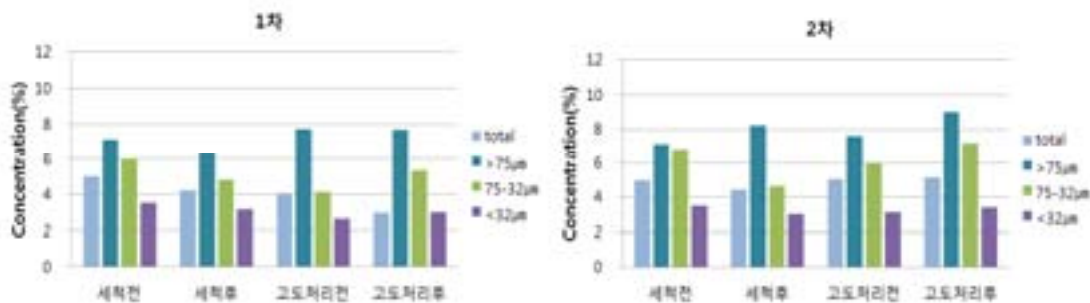
• 강열감량(IL, %, 그림 V-마-25)

- 1차 시험 운영에서 total시료에 대한 강열감량은 변화를 보이지 않음
- 1차 시험 운영 시 75  $\mu\text{m}$ 이상의 입자는 세척 후 약 16%의 감소를 보인 반면 고도산화처리에서는 오히려 세척 후에 비해 증가하는 경향을 나타냄
- 1차 시험 운영에서 32-75  $\mu\text{m}$ 의 입자에 대해서는 세척 공정에 의해 초기 값에 비해 약 18% 감소(초기 17.2%, 세척공정 후 14.0%)를 보였으며, 세척 후 하이드로사이클론에 의한 입자분리(75  $\mu\text{m}$ 이상 제거)에 의해 전 공정에 비해 약 뚜렷한 감소 효과를 보였다. 그러나 고도산화처리 공정에서 다시 증가함
- 1차 시험 운영에서 32  $\mu\text{m}$  미만의 시료에 대해서는 꾸준한 감소 및 고도산화처리에서의 감소 효과를 확인하였으나 그 감소율이 초기농도의 약 20% 미만임
- 2차 시험 운영 시 32  $\mu\text{m}$  분급을 제외한 모든 시료에서 세척 공정 이후 강열감량(%)의 감소를 확인 할 수 없었음



[그림. V-마-25] 산화제 간헐주입 조건에서의 시료의 분급별 IL (%) 농도 변화

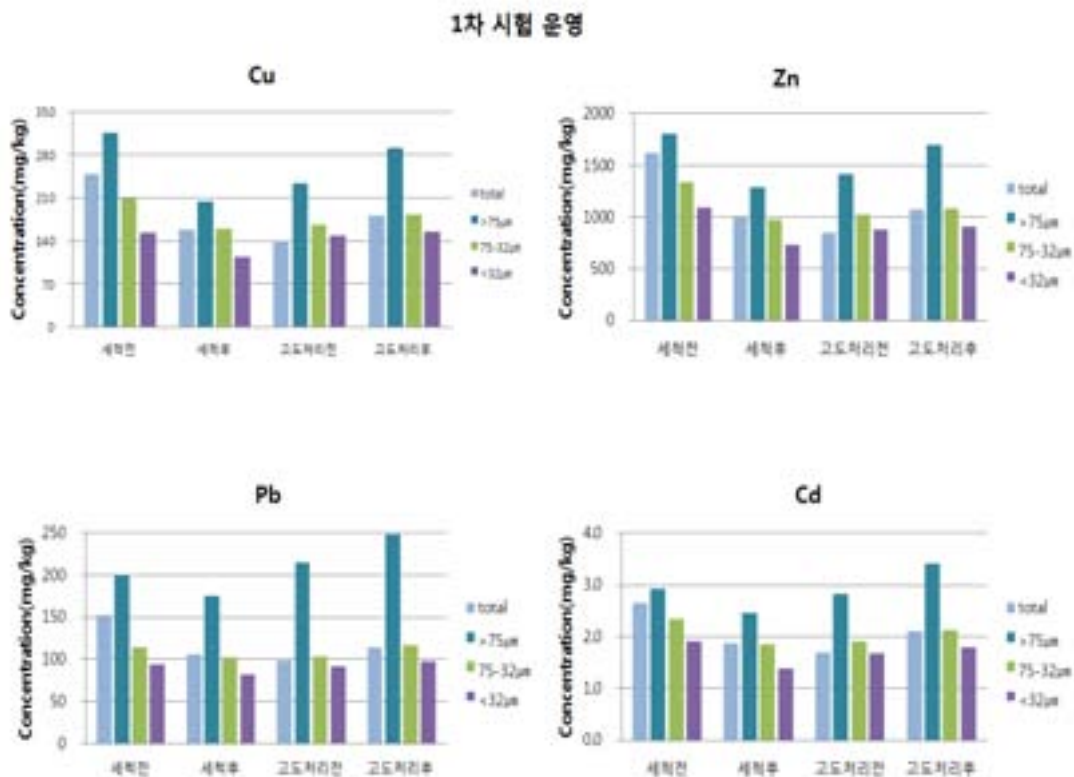
- 총유기탄소(TOC, %, 그림 V-마-26)
  - 1차 시험 운영 시 total 퇴적물 시료의 TOC함량이 5.0%에서 4.2%로 감소하여 세척공정에서 총 탄소함량의 약 15.7%가 감소됨을 확인할 수 있었음
  - 고도산화처리공정에서는 약 3.0%의 TOC농도를 보여 초기 퇴적물 유기탄소 함량의 약 40%가 감소됨
  - 그러나 2차 시험 운영에서는 32~75  $\mu\text{m}$ 분급의 세척 공정에서 나타난 저감 효과를 제외하고 total 퇴적물 시료를 비롯한 분급별 시료에 대해 세척 및 고도산화처리 공정에서의 정화효과를 확인하지 못함



[그림. V-마-26] 산화제 간헐주입 조건에서의 시료의 분급별 TOC (%) 농도 변화

- 중금속(mg/kg) (그림 V-마-27)
  - 1 M 과산화수소 간헐 주입의 1차 운영 시 total 퇴적물 시료의 Cu함량은 세척 후 초기 농도의 약 39%의 감소율을 보였다. 고도산화처리 단계에서는 큰 효율을 보이지 않

- 고 오히려 약간 증가하였으나 전체 연속 공정에서는 33%의 높은 저감 효율을 확인함
- 분급별 구리 농도의 변화는 세척 공정 후 모든 입자 분급에 대해 23-35%의 저감 효율을 보였으며 고도처리공정 전후 정화 효율은 확인되지 않음
  - 구리 농도는 세척, 고도산화공정의 연속 흐름을 고려했을 때 total, 75  $\mu\text{m}$  이상, 32-75  $\mu\text{m}$ 의 분급에 대해 각각 27%, 8%, 12%였으며, 32  $\mu\text{m}$ 미만의 분급에 대해서는 오히려 감소하지 않음
  - 분급별 아연 농도의 변화는 세척 공정 후 모든 입자 분급에 대해 27-39%의 저감 효율을 보였으며 고도처리공정 전후 정화 효율은 확인되지 않음
  - 아연은 세척, 고도산화공정의 연속 흐름을 고려했을 때 total, 75  $\mu\text{m}$  이상, 32-75  $\mu\text{m}$ , 32  $\mu\text{m}$  미만의 분급에 대해 각각 33%, 6%, 19%, 16%의 저감효과를 보임
  - 분급별 납의 농도 변화는 세척 공정에서 모든 입자 분급에 대해 11-31%의 저감 효율을 보였으며 고도처리공정 전후 정화 효율은 확인되지 않음
  - 납의 농도는 세척, 고도산화공정의 연속 흐름을 고려했을 때 total 시료에 대해 25%의 저감 효과를 보였으나 분급하여 보았을 경우 오히려 증가하는 경향을 나타냄
  - 분급별 카드뮴의 농도 변화는 세척 공정 후 모든 입자 분급에 대해 16-29%의 농도 저감 효율을 보였으며 고도처리공정 전후 정화 효율은 확인되지 않음
  - 퇴적물 내 납의 농도는 세척, 고도산화공정의 연속 흐름을 고려했을 때 total 시료에 대해 20%의 저감 효과를 보였으나 75  $\mu\text{m}$ 이상의 분급에서는 오히려 증가하고, 그 이하의 두 분급에 대해서도 상대적으로 낮은 저감율을 보여 고도산화처리 과정 동안 정화 효율이 저감되는 것을 확인함



[그림. V-마-27] 산화제 간헐주입(1.0M) 조건에서의 분급별 중금속 농도 변화(1차 시험운영)

■ 고찰

- 시험 운전 안정성을 확보함
- 세척공정에 의해 약 10% 미만에서 18%에 이르는 수준의 COD 농도(mg/g) 및 IL (%)의 감소를 확인하였으나 고도산화처리 공정에서의 유기물 저감 효율은 크지 않거나 오히려 증가하는 경향을 보임
- 구리와 아연, 납, 카드뮴은 최종적으로 감소되었으나 세척 단계에서의 높은 저감 효과에 비해 고도처리 전후 오히려 증가하는 경향을 보임
- 이는 4차년도 연구결과에서 슬러리 펌프의 내부 재질(SUS)의 산화 등 의한 오염인 것으로 차년도에 이에 대한 고료를 할 필요성을 제시한 바 있음
- 고도산화처리 오존 발생 및 주입 농도는 bench-scale에서의 test를 바탕으로 scale-up 영향을 고려하여 설정하였음
- Bench-scale test 시 오존 발생량 20 g/h, 주입량 2 L/min, 주입 압력 2 bar로서 반응시간 30분동안  $0.33 \text{ g/min} \times 30 \text{ min} = 10 \text{ g}$ 의 오존이 반응조로 주입되어 약 97% 정도의 오존이 기체 상태에서 용존 상태로 변화되어 화학적 산화 반응이 이루어 졌음
- Bench-scale 대비 시험장치는 오존 발생량 50 ~ 130 g/h, 주입량 4 L/min, 주입 압력 4 bar로서 오존 발생량에 있어서 약 2.5~6.5배, 주입량의 2배 및 주입 압력의 2배이므로 최소한  $2.5 \times 2 \times 2 = 10$  이상 초미세기포 및 오존에 의한 효과가 증가될 수 있음
- 각 반응기의 유효용적(60L, 2,300L)은 1:38.3을 기준으로 규모 인자 3를 고려할 경우 최소한 bench-scale 대비 최소한 3배 이상의 효과를 기대할 수 있음
- 그러나 실제 공정에서 시료가 처리되는 동안 고도처리 반응조 내부에서 오존의 농도를 정확하게 측정할 수 없기 때문에 오존 발생기로부터의 발생과 주입되는 오존 농도 점검 및 시료가 존재한 조건에서 처리시간에 따른 효과를 재확인 할 필요가 있다고 생각됨
- 실제로 고도처리조의 주입량은 설계상 계산되어 발생 장치의 조건을 확립한 바 있으나 세척조에서의 정화 효율이 bench-scale에서 만큼의 높은 효율을 보이지 않았고, Peroxone반응(오존) 유기물 산화로 제한할 경우 퇴적물 양과 관련해 아래와 같은 계산에 의해 오존주입량에 조정이 있어야 한다고 판단됨(이하)

고도처리조 용량: 2,300 L  
 세척처리조 용량: 1,700 L  
 세척처리조 반응시간: 40분 (유입 유량: 43 L/min)  
 고도처리조 퇴적물 양은 최초 고액비 1:3에서 75  $\mu\text{m}$  이상 퇴적물 입자가 처리 후 분리된 다음이므로 다소 증가한 상태로 약 575L가 되며 유입 COD(Mn법)은 약 40 mg/g이므로 고도처리조에서 체류시간(약 54분) 동안 처리되는 퇴적물 함유된 COD의 양은 23 g  
 $\text{TOC} \times 2.67 = \text{COD}(\text{Mn}) / 0.4 \sim 0.6$ 의 관계가 있으므로, 총 탄소는 약 21.53 g으로 추정 ( $(23/0.4)/2.67=21.53$ )  
 오존 발생장치 50g/h 사용 유량 4l/min일 경우,  $33.3 \text{ g O}_3/\text{h} = 0.555 \text{ g O}_3/\text{min}$   
 $(50:6 = x:4)$   
 유기물이 오존에 의해서만 산화된다고 가정할 때, 유기물(R):O<sub>3</sub> = 1:1 의 관계로 추정할 수 있음  
 탄소(C)는 산화되어 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 제거된다고 가정하면,



21.53\*2.67=57.5 g O<sub>3</sub>가 필요함

위 오존 발생/주입량으로 계산하면  $57.5/0.555 = 103.6$  min이 필요함 (유기물 100% 산화 시)

만약 유기물 60% 산화를 가정하면  $57.5*0.6/0.555 = 62.2$  min이 필요하며,

또한 유기물 40% 산화를 가정하면  $57.5*0.4/0.555 = 41.4$  min이 필요함

고도처리조의 반응시간은  $2,300/43=53.5$  min이므로, 이론상 약 51.64%의 유기물이 산화되어야 타당하지만, 실제 고도 처리 공정에서 유기물 제거 효율이 bench-scale 결과 보다 낮게 나타났음

상기 원인은

- ① 처음 설계, 제작한 사양 기준, 발생 오존량 대비 슬러리 펌프를 통하여 생성된 초미세기포에 오존 가스의 공급이 원활하지 못하였을 가능성이 있으며,
- ② 고도 처리 반응조 내부로 주입된 오존이 전체 반응물과 균일하게 혼합된 다음 산화에 필요한 최소한의 시간 동안 접촉하지 못하고 일부 반응물만 접촉한 상태로 일정 경로를 통하여 그대로 배오존 등으로 배출되거나 산화 반응에 원활하게 기여하지 못하는 현상 즉, 채널링(Channeling) 현상이 발생하였을 가능성이 있으며,
- ③ 각 단위 처리 공정 및 장치를 모듈식으로 설계(단위 모듈: 폭/높이 각 2.5m, 길이 11 m)하였기 때문에 고도처리 반응기의 단면적 대비 높이의 비율이 작기 때문에 반응기 내부에 충분한 압력이 가해지지 않아서 주입한 오존이 충분한 시간 동안 체류하지 못하였을 가능성이 있는 것으로 판단됨

## ⑤ 고도산화처리장치의 회분 실험

### ㉠ 실험조건 및 방법

#### ■ 실험 목적

- Bench-scale test에서의 scale up factor를 고려한 조건에서 유의한 감소 경향을 확인하지 못하여 고도처리 회분실험을 통한 처리 시간에 따른 유기물 저감 효과를 확인하고 최적의 고도처리 조건(시간 조율 포함)을 찾기 위함

#### ■ 시험조건

- 연속흐름에서 고도산화처리 공정의 반응시간 조절을 가능하게하기 위한 bi-pass용 유량조정조를 추가 설치함
- 오존발생장치(80 g/h, 5.0L/min)를 추가함
- 이전의 실증 실험과 동일한 조건(산화제의 주입은 7분 주입 13분 비주입의 간헐주입 조건)을 유지하되 세척 반응(40분, 전체 유속 43L/min) 후 고도산화조와 유량조정조가 모두 채워진 후에 유입과 배출을 차단하고 고도산화처리조 내 시료를 순환토록 하여 고도산화 공정에서의 처리 시간별 유기물 및 중금속 함량의 변화를 확인함

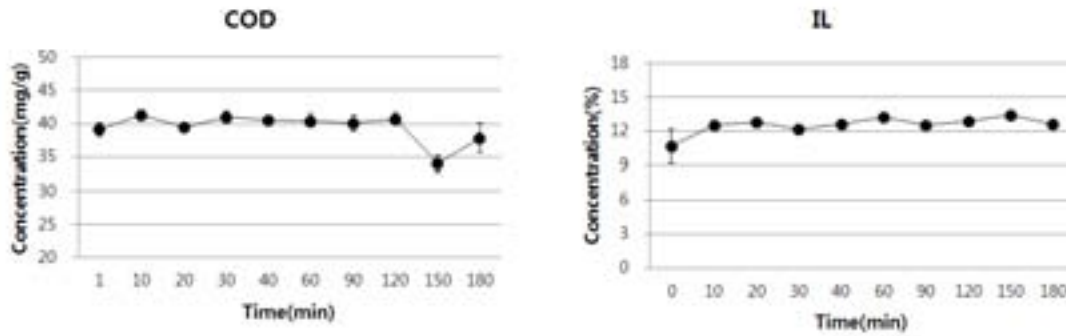
#### ■ 측정방법

- 연속흐름을 차단하여 고도산화처리 공정의 반응시간에 따라 시료를 채취함
- 채취한 시료는 원심분리 후 동결건조하여 COD, IL, TOC를 측정
- 같은 조건에서 최소 3개의 시료를 채취하여 분석한 다음 평균값(표준편차)으로 평가함

## ㉔ 시험결과 및 고찰

### ■ 시험결과

- 고도산화처리 시간에 따른 퇴적물 유기물 함량의 변화
  - 고도산화처리공정에서 COD농도는 약 120분째 까지 큰 감소를 보이지 않았으나 150분째 일시적으로 감소함(그림 V-마-28)
  - 퇴적물 IL은 오히려 고도처리 반응이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 나타냄



[그림. V-마-28] 고도산화공정의 처리 시간에 따른 유기물 저감 효과

### ■ 고찰

- 고도산화처리 공정에서 초미세 기포를 통해 오존 가스를 주입하는 과정은 벤추리(Ventury) 방식이며, 슬러리 펌프에 오존을 주입하는 분사 노즐(Nozzle)의 효율성이 낮아서 산소의 용존율은 좋았으나, 실제 오존 용존율이 높지 않았던 것으로 판단되며 이로 인한 고도 산화 처리의 효율이 낮은 것으로 판단됨

최대 유량(6l/min)일 경우 최대 발생  
 $\therefore 0.49\text{g/min} + 0.42\text{g/min} = 0.91\text{g/min}$   
 경과시간 150분  
 $0.91\text{g/min} * 150\text{min} = 136.5 \text{ g O}_3$   
 유기물(R)이 산화될 때 오존은 1:1 정도로 가정  
 약 2.8mole; ~136g 산화  
 (현장 측정 결과: 펌프 토출구(아랫쪽) 0.013mg/l, 고도처리 후: 0.006mg/l)

## ⑥ 오존 발생량 조절에 의한 고도산화처리정화에서의 유기물 저감 효과 비교

### ㉔ 실험 목적

- 실제 실증 장치에서 약 1700 L의 반응조 내 고도산화처리 정화공정에 효율적인 오존주입량의 확인
- 고도산화처리 장치 효율을 증대시킴으로서 기존의 안정화 된 오염퇴적물 정화처리 시스템의 효율을 높일 수 있는지 확인

### ㉔ 시험조건

- 고도 처리 공정에서 발생 오존량을 증가함으로서 실제 오존량 증가가 고도 처리 공정에

미치는 영향을 평가하기 위하여 기존 오존 발생장치(50 g/h)에 직렬로 연결하여 오존 발생장치(80 g/h)을 추가하여 고도 처리 공정을 추가로 시험하였음

- 이전의 실증 실험과 동일한 조건(산화제의 주입은 7분 주입, 13분 비주입의 간헐주입 조건)을 유지함
- 고도처리 전 후의 시료는 회분 실험 진행 전에 고도산화처리조에 유입, 배출되는 시료를 채취함(그림 V-마-29, 시료 (1)전, (2)후).
- 고도처리의 회분을 위해 유량조절조를 채우는 시간(약 1시간)동안 오존 주입을 중지하였으며 유량조절조에 시료가 채워진 이후 고도산화조로의 유입과 배출을 차단함
- 고도산화처리조로의 유입과 배출을 차단한 시간을 0분으로 하여 오존 주입을 시작하고 이후 10분, 20분, 30분, 40분, 60분, 120분, 150분, 180분 시료를 채취함
- 총 9번의 시료 채취 후 유기물 및 중금속 함량의 변화를 확인함

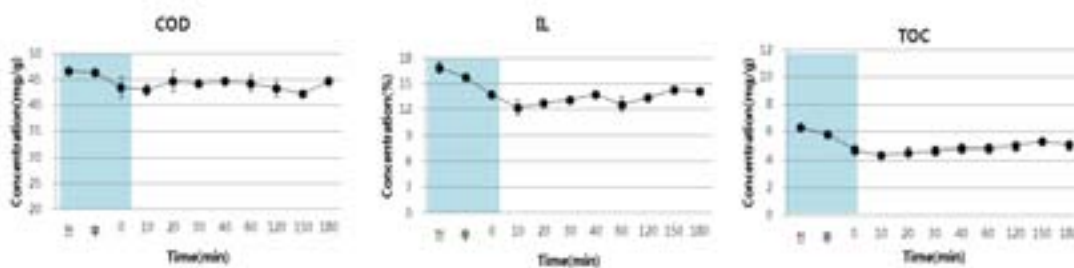
### ㉔ 측정방법

- 연속흐름을 차단하여 고도산화처리 공정의 반응시간에 따라 시료를 채취함
- 채취한 시료는 원심분리 후 동결건조하여 COD, IL, TOC, 중금속을 측정
- 같은 조건에서 최소 3개의 시료를 채취하여 분석한 다음 평균값(표준편차)으로 평가함

### ㉕ 시험결과 및 고찰

#### ■ 시험결과

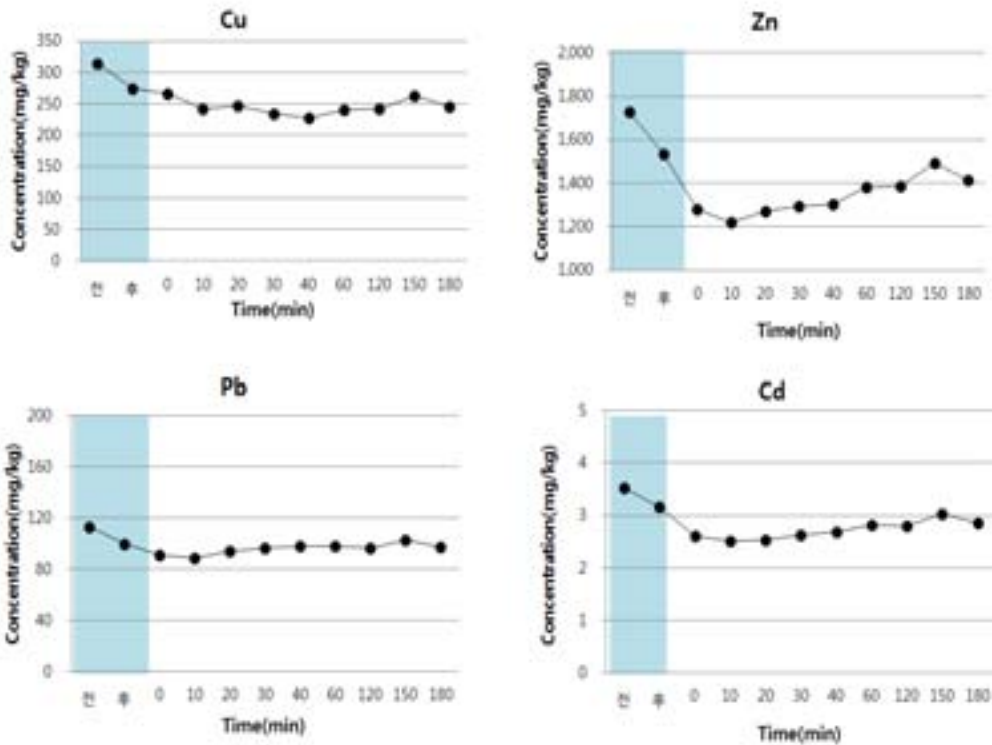
- 고도산화처리 오존 발생량 증가 후 시간에 따른 퇴적물 유기물 함량의 변화
  - 처음 연속흐름상에서의 고도산화처리는 COD농도의 변화를 야기하지 않음. 그러나 IL과 TOC함량(%)에서 각각 13%, 8%의 저감 효율을 확인함
  - 유량조절조가 채워지는 1시간 동안(추가 오존의 주입 없었음) COD의 농도는 6% 감소하였으며, IL과 TOC는 13%, 19%의 감소를 보임
  - 고도산화처리 추가 공정을 실시한 결과 10분의 추가 반응 시 COD농도는 처음 시료에 비해 약 8%, IL은 24%, TOC함량은 약 31%가 감소하였으며 이후 180분 동안의 처리 동안 유의한 감소 변화는 보이지 않았으며 IL의 경우 60분의 처리 이후에는 오히려 증가하는 경향을 나타냄



[그림. V-마-29] 고도산화처리공정의 주입량 변경 후 시간에 따른 유기물저감효과 (COD, IL, TOC)

- 고도산화처리 오존 발생량 증가 후 시간에 따른 퇴적물 중금속 함량의 변화
  - 유량조절조가 채워지는 1시간 동안(추가 오존의 주입 없었음) 측정된 네 개의 원소(Cu,

Zn, Pb, Cd)의 농도는 급격히 감소하였으며, 고도산화처리 추가 공정을 실시한 결과 10분의 추가 반응 시 조금 더 감소 이후에는 유사한 값을 나타냄



[그림. V-마-30] 고도산화처리공정의 주입량 변경 후 시간에 따른 중금속 저감 효과

## ■ 고찰

- 오존 주입 없이 유량조절조를 채우는 동안에도 유기물의 감소가 확인되었으며 추가 10분의 오존 추가 산화 반응에서 가장 높은 유기물 저감 효과를 확인함
- 기존의 오존 발생 장치의 문제점을 보완하였음
- 오존의 발생량을 증가시킨 결과 실제적으로 반응기 내부의 용존 오존량을 증대시킬 수 있었으며 유기물 및 중금속의 저감율이 증가함을 확인함
- 이 결과로부터 고도 처리 공정에서는 발생하는 오존량 중 가능한 한 많은 양을 반응기 내부로 주입하여 정화 처리 목표를 충족시킬 수 있도록 충분한 시간 동안 반응물과 완전 혼합 및 접촉할 수 있도록 최적화하는 것이 고도 처리 공정에서 가장 중요한 사항임을 도출하였음

### (라) 입자분리 처리기술 공정 실증 시험

#### ○ 정화 기반의 입자분리

- 해양오염퇴적물은 토양에 비해 미세 입자의 비율이 높아 토양에서의 정화 공정과 다른 정화 기작으로 처리해야 함
- 퇴적물은 입자의 크기에 오염 정도가 다르며 이 같은 이유에서 복합 정화 단계를 이용한 정화 처리에서 입자 분리는 분급만으로도 정화 된 큰 입자의 분리하여 정화대상물

질을 분리하고 다음 정화 단계가 필요한 대상에 대해 최적화 기작 조절 및 정화 효율을 증대 시킬 수 있음

## ① 조립질 분리 처리기술 공정 실증 시험

### ㉞ 실험조건 및 방법

#### ■ 실험 목적

- 정화의 개념에서의 분급을 위해 목표로 한 75  $\mu\text{m}$  크기의 입자 분급 효율을 확인

#### ■ 시험조건

- 1 M의 세척 조건으로 설정한 정화 시스템에서 세척조 이후에 입자분리를 위한 단계로 공정을 추가함
- 수력 사이클론을 이용한 분리 목표한계치로 75  $\mu\text{m}$ 을 설정하여 설계함

#### ■ 측정방법

- 75  $\mu\text{m}$ 의 입자를 분리하도록 설계한 수력사이클론의 상단(over flow 75  $\mu\text{m}$  미만 입자)과 하단(under flow, 75  $\mu\text{m}$  미만의 입자) 통과하는 시료를 50 mL 튜브에 채취
- 입도분석을 위해 전처리를 실시함

#### [입도분석 시료 전처리 및 분석 방법]

1. 채취한 시료를 건조시킨다.
2. 1 M의 HCl을 첨가하여 무기탄소를 제거한다.
3. 과산화수소(35%)를 첨가하여 입자에 흡착되어있는 유기물을 제거한다.
4. 처리된 퇴적물을 원심분리하여 상등액을 버리고 증류수로 세척한다.
5. 측정 조건에 따라 증류수를 첨가하여 분석에 이용한다.
6. 입도분석기를 이용하여 분석한다.

- 전처리된 시료를 입도분석기(Mastersizer2000, Malvern)를 이용하여 분석
- 분석은 3회 반복하여 평균값(표준편차)을 사용함

### ㉟ 시험결과 및 고찰

#### ■ 시험결과

- 작동 및 공정 내 정화대상 시료의 분급
  - 저류조에서의 시료 입자 크기별 분포는 표 V-마-17과 같았으며 2mm 진동 스크린을 통한 협잡물 제거 이후 그 구성비가 조금은 바뀌었으나 정화 대상으로 한 2~63  $\mu\text{m}$ 의 구성비는 전체 시료의 약 70% 정도로 큰 차이를 보이지 않음
  - 개발된 하이드로사이클론은 운전에 장애 요인이 없었으며, 작동 시 시료의 유입 배출량에도 문제가 없음
  - 하이드로사이클론의 작동 원리상 하부토출구(under flow)에서 분리되는 큰 입자의 시료는 함수율이 현격하게 감소하였으며 그 결과 상부토출구로 배출되는 시료는 보다 높은 함수율을 가지고 있음

[표. V-마-16] 시료 저류조와 세척조에서의 퇴적물 입자 크기별 구성비(%)

Sample size fractionation	Size fraction (%)			
	>63.00 $\mu\text{m}$	63.00-20.00 $\mu\text{m}$	20.00-2.00 $\mu\text{m}$	<2.00 $\mu\text{m}$
Raw sample	16.31	22.39	51.00	10.30
Washing reactor	10.10	16.65	55.58	17.67

○ 조립질 입자 분리 효율

- 조립질 입자의 분리를 위한 수력사이클론의 분리 효율은 표 V-마-18과 같음
- 75  $\mu\text{m}$ 이하의 입자를 분리하는 상부 토출구(over flow)의 경우 약 96%의 효율을 보여 75  $\mu\text{m}$  이하의 입자에 대한 추가 공정을 위한 분급을 위해 적절한 것으로 평가됨
- 그러나 기준 분급 이상의 크기를 분리하는 하부 토출구(under flow)에서는 약 45%의 다소 낮은 효율을 보임
- 이는 입자가 큰 조립질과 입자가 작은 세립질이 분리될 때 세립질은 조립질에 비하여 점성이 다소 강하므로 분리되는 조립질에 일부 세립질이 짐착되어 나타난 현상으로 평가됨

[표. V-마-17] 조립질 분급을 위한 하이드로사이클론에서의 분급효율(%)

Sample	Size fraction (%)	
	>75.00 $\mu\text{m}$	<75.00 $\mu\text{m}$
over flow	3.91	96.09
under flow	44.89	55.11

■ 고찰

- 작은 입자가 분리 되서 토출되는 over flow의 경우 본 정화 시스템에서 목적에 맞는 높은 분리 효율을 보여 정화 기작 내 고액비를 고려했을 때 최적화 된 조건을 확인함
- 그러나 큰 입자를 분리하는 under flow의 경우 세척이 완료 된 75  $\mu\text{m}$ 이상의 입자를 분리해야하는 반면 50% 미만의 낮은 효율을 보여 효율을 높이기 위한 정비가 필요할 것으로 생각됨
- 실제 현장 적용 시 수력사이클론의 개선 또는 다단수력사이클론 연결을 이용한 2차 분리를 통한 효율 증대와 같은 수정이 필요할 것으로 사료됨

② 세립질 분리 처리기술 공정 실증 시험

㉞ 실험조건 및 방법

■ 실험 목적

- 정화의 개념에서의 분급을 위해 목표로 한 20  $\mu\text{m}$  크기의 입자 분급 효율을 확인

■ 시험조건

- 1 M의 세척 조건으로 설정한 정화 시스템에서

- 수력 사이클론을 이용한 분리 목표한계치로 32  $\mu\text{m}$ 을 설정하여 설계, 실증 장치의 고도산화처리 전 단계에 설치함

### ■ 측정방법

- 75  $\mu\text{m}$ 의 입자를 분리하도록 설계한 수력사이클론의 상단(over flow, 75  $\mu\text{m}$  미만 입자)과 하단(under flow, 75  $\mu\text{m}$  미만의 입자) 통과하는 시료를 50 mL 튜브에 채취
- 입도분석을 위해 전처리를 실시
- 전처리 된 시료를 입도분석기(Mastersizer2000, Malvern)를 이용하여 분석
- 분석은 3회 반복 분석하여 평균값(표준편차)를 나타냄

## ㉔ 시험결과 및 고찰

### ■ 시험결과

- 조립질 입자의 분리를 위한 수력사이클론의 분리 효율은 표 V-마-19와 같음
- 32  $\mu\text{m}$ 이하의 입자를 분리하는 상부 토출구(over flow)의 경우 약 94%의 효율을 보여 32  $\mu\text{m}$  이하의 입자에 대한 추가 공정을 위한 분급을 위해 적절한 것으로 평가됨
- 그러나 기준 분급 이상의 크기를 분리하는 하부 토출구(under flow)에서는 약 46%의 낮은 효율을 보임

[표. V-마-18] 세립질 분급을 위한 하이드로사이클론에서의 분급효율(%)

Sample	Size fraction (%)	
	>32.00 $\mu\text{m}$	<32.00 $\mu\text{m}$
over flow	5.91	94.09
under flow	45.76	54.24

### ■ 고찰

- 작은 입자가 분리 되어 토출되는 over flow의 경우 본 정화 시스템에서 목적에 맞는 높은 분리 효율을 보여 정화 기작 내 고액비를 고려했을 때 최적화 된 조건을 확인함
- 그러나 큰 입자를 분리하는 under flow의 효율을 높이기 위해서는 수력사이클론 조절 또는 다단수력사이클론 연결을 이용한 2차 분리를 통한 효율 증대와 같은 수정이 필요할 것으로 생각됨

## ③ 입자 분급 효율 향상을 위한 다단 하이드로 사이클론 공정

### ㉕ 실험조건 및 방법

#### ■ 실험 목적

- 다단 하이드로 사이클론을 통해 하이드로사이클론 하부 토출부의 시료(사이클론 under flow)의 분급공정 효율을 높일 수 있는지 확인
- 상용화 가능한 효율 범위를 확인하고 상용화를 고려한 재질에 대한 자료를 확보

---

■ 시험조건

- 기존의 연속흐름 공정에서 세립질 분급을 위한 사이클론의 하부 토출부의 시료를 2차 수력사이클론에 주입되게 연결함
- 1차 시험운영 후 토출구의 길이를 조절함

■ 측정방법

- 1 M의 간헐 주입 조건의 연속흐름 공정에서 고도산화처리 공정 이후 분급 시료(32  $\mu\text{m}$  이상, 32  $\mu\text{m}$ 미만)를 각각 채취
- 고도처리 공정 이후 1단계 하이드로사이클론을 통과하는 상부 토출부의 시료(32  $\mu\text{m}$  미만)와 2단의 하이드로 사이클론으로 주입되는 하부토출부(32  $\mu\text{m}$ 이상) 그리고 다시 분리되는 2차 분리 시료(32  $\mu\text{m}$ 이상, 32  $\mu\text{m}$ 미만)를 각각 채취
- 각 공정 단계에서 채취한 조립질 및 세립질 분급 시료에 대한 입도분석을 실시함

④ 시험결과 및 고찰

■ 실험 결과

○ 1차 시험

- 상부토출구(Over flow)에서 채취한 시료는 목표로 한 32  $\mu\text{m}$ 이하의 입자가 94%이상으로 분석됨
- 그러나 하부토출구(under flow)에서 채취한 시료는 약 70%에 달하는 32  $\mu\text{m}$  미만의 입자를 포함하고 있었음
- 다단 사이클론을 통과한 시료에서는 1단 하이드로사이클론과 비슷한 분급 효율을 보여 결과적으로 다단사이클론 이용을 통해 하부토출구에서 분리 되었어야 할 시료의 약 50% 이상(1단 33% + 2단 20% (67% 시료의 30%))을 분급하는 효과를 확인함

○ 2차 시험

- 상부토출구(Over flow)에서 채취한 시료는 1차 시험에 비해 낮아진 87%의 효율을 보였으나 분급 효율 75% 이상이므로 상용 분급 장비로 특별한 문제점은 없는 것으로 판단됨
  - 다단 사이클론을 통과한 시료에서는 1단 하이드로사이클론과 비슷한 분급 효율을 보여 결과적으로 다단사이클론 이용을 통해 하부토출구에서 분리 되었어야 할 시료의 약 60% 이상(1단 34% + 2단 27% (66% 시료의 40%))을 분급하는 효과를 확인함
-



[표. V-마-19] 세립질 분급 향상을 위한 다단 하이드로사이클론에서의 분급효율(%)

Sample		Size fraction (%)			
		>32.00 $\mu\text{m}$	<32.00 $\mu\text{m}$	>20.00 $\mu\text{m}$	<20.00 $\mu\text{m}$
1차	over flow	5.6	94.4	8.4	91.6
	under flow	32.7	67.3	49.5	50.5
	2 <sup>nd</sup> under flow	29.2	70.8	43.9	56.1
2차	over flow	12.1	87.9	17.1	82.9
	under flow	33.8	66.2	62.4	37.6
	2 <sup>nd</sup> under flow	40.5	59.5	14.0	86.0

■ 고찰

- 입자의 분급에 따른 오염도를 고려, 추가적인 정화처리 공정 적용 여부를 위한 over flow (목표 분급보다 작은 입자)의 분급율(회수율)은 32 $\mu\text{m}$  및 20 $\mu\text{m}$ 에서 각각 94.4 %, 91.6%이었으며, 특히 20 $\mu\text{m}$ 까지의 미세입자를 안정적으로 분급할 수 있음을 입증함
- 정화 완료 이후 탈수 및 최종 처분을 위한 분급에 이용될 under flow의 경우 32  $\mu\text{m}$ 를 목표로 한 하이드로 사이클론에서는 약 29-34%로 비교적 낮은 효율을 보였으나 다단사이클론에 의해 분급율은 1차 및 2차 각각 71.181 %, 71.136%로서 약 1.5배의 효율 증대를 확인하였으며, 분급율이 70% 이상이므로 상용 정화기술로 적용하기에 충분함
- 미세입자 분급을 위한 하이드로사이클론 설계, 제작, 시험 및 실증결과 상용 정화기술로 적용 가능성과 다단 하이드로사이클론 처리의 효율 향상을 확인하였음
- 실제 정화사업 현장에서 적용할 경우, 분급 효율을 향상시키기 위하여 모듈식 사이클론의 토출구 조정은 필요하며, 이는 정화 대상 퇴적물 및 필요한 정화 기작에 따른 처리 조건 (고액비 등)에 따라 달라질 수 있기에 퇴적물의 물성 등 현장 여건에 따라 최적화 하여야 함
- 미세입자 분급이 전체 정화 처리 시스템에서 중요한 이유는 대부분의 정화 처리 산물을 유효활용하기 위하여 각 단계 별로 처리 후 처리산물을 적합한 입자의 크기별로 구분하며, 미세입자의 경우 최종 분급 입자크기는 더 이상의 추가적인 처리 없이 미세입자를 포함한 공정수를 수처리한 다음 응집침전 등의 과정을 거쳐서 고형물을 유효활용 할 수 있으므로, 수처리 시 어떤 입자크기까지를 포함할 것인지를 결정하는 요소이기 때문임

(마) 부가 처리기술 공정 실증 시험

① 실증 공정에서의 공정수 재순환을 위한 여과 장치 추가

- 공정수의 재순환을 통해 현장의 발생 폐액 및 폐기물을 최소화하기 위한 검토로 공정수의 순환을 위한 여과 처리를 계획
- 활성탄 여과를 통해 공정수를 여과 재사용하여 정화 공정을 운영하고 이 과정에서의 공정수의 화학적 분석을 통한 배출 및 재사용 가능성을 판단

㉠ 실험조건 및 방법

■ 실험목적

- 
- 현 장치에서 추가 가능한 여과 공정(활성탄여과)의 여과 효율을 확인하고 향후 공정수 재순환 및 배출수의 추가 정화 여부 설정을 위해 자료를 확보하여 추후 공정 추가에 활용하고자 함

### ■ 실험조건

- 1 M의 과산화수소, 0.05% 비이온계면활성제를 첨가한 조건에서 세척 반응시간을 20분으로 고정시킨 연속 정화 공정에서 시료를 채취함
- 활성탄 여과 조건: 70kg
- 연속흐름 정화처리공정에서 (1) 처음 사용된 공정수를 대조군으로 하였으며, (2) 2회 순환한 공정수, (3) 활성탄여과를 통해 여과된 공정수 (활성탄 여과1), (4) 활성탄 여과 이전 단계에서 채취 후 공정 외 조건(lab based condition)에서 활성탄 여과를 한 경우(활성탄 여과2)의 네 시료를 채취
- 각 공정의 반응조 용량을 고려하여 2회 순환 한 공정수의 채취 시간(정화처리공정 연속운행 약 2시간 후)을 정하였으며 시료 채취 정점은 고도처리 장치로 정함
- 채취한 시료를 여과한 후 입자가 제거된 공정수를 총유기탄소(TOC), 화학적산소요구량(COD), 총질소(Total nitrogen), 총인(Total phosphorus) 분석에 이용함

### ■ 측정방법

- Suspended particle matter (SPM, mg/L)
    - 채취한 각각의 시료에 대해 0.45  $\mu\text{m}$  pore size의 여과지를 이용하여 시료를 여과하였다. 여과 전후 여과지의 무게를 측정하여 시료 내 부유물질의 함량을 측정
  - 총 유기탄소 (TOC, mgC/L)
    - SPM 함량 측정을 위해 여과된 공정수를 이용하여 분석에 이용함
    - HACH test에서 제시하는 방법(Method 10129)을 따라 분석을 실시
    - pH 2로 맞춘 시료를 교반시켜 균질화 한 후 TOC persulfate powder와 organic free water를 첨가하였다. 마지막으로 Acid digestion vial을 시료 tube에 넣은 후 DRB200을 이용하여 105°C에서 2시간 동안 반응시킴
    - HACH 5000, TOC (low range) method를 이용하여 분석함
  - 화학적 산소요구량 (COD, mg/L COD)
    - 분석에는 HACH, method8000을 이용하여 분석함
    - 해수를 균질화 한 뒤 제공하는 test tube에 넣은 뒤 잘 섞어 주어 DRB200에서 2시간의 반응 시간(120°C)을 거친 후 HACH DR5000으로 분석함
  - 총질소 (TN, mg/L N)
    - HACH®에서 제공하는 분석 tube에 total nitrogen persulfate reagent powder를 넣은 후 2 mL의 준비된 시료와 blank시료를 첨가
    - DRB200을 105°C에서 30분간 반응 시킨 후 HACH에서 제공하는 Total nitrogen reagent A, B를 각각 첨가한 후 5분의 반응 시간 후 blank와 시료를 각각 측정하여 농
-

---

## 도를 확인

### ○ 총인(TP, mg/L P)

- 분석 tube에 5mL의 시료를 넣은 후 potassium persulfate powder를 첨가한 후 30분간 200°C에서 반응 시킴
- 이후 1.54 N의 sodium hydroxide를 첨가하여 섞어준 뒤 HACH DR5000에서 zero값을 측정 한 후 PhosVer3시약을 넣고 녹여준 후 다시 측정하여 그 값을 이용하여 총인의 농도를 확인함



[그림. V-마-31] 실험실 내에서의 활성탄 여과 과정 및 공정수의 총유기탄소 측정

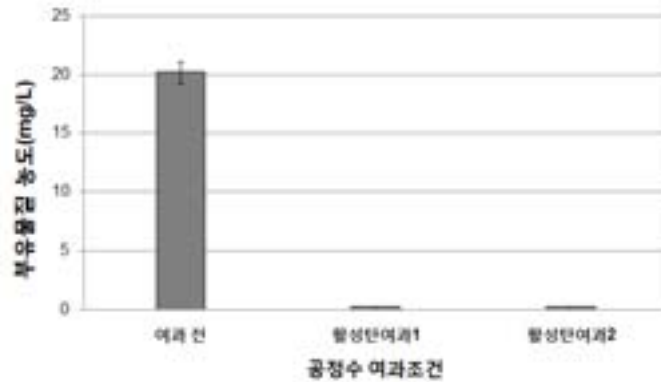
### ㊤ 실험결과 및 고찰

#### ■ 활성탄여과 장치 상태

- 약 2회 전체 공정이 순환 된 시점에서는 활성탄의 여과 능력이 초과되어 여과 효율이 낮아짐을 확인함
- 활성탄 여과 장치는 공정의 2회 순환 후 중지하였으며 이후의 공정에서는 순환을 고려하지 않은 정화 시스템 운영을 실시함

### ■ 부유입자 (SS, mg/L)

- 순환하지 않은 공정수(수돗물)의 입자 농도는 측정한계 이하를 나타냄
- 약 2회 순환 후 여과하지 않은 공정수는 정화 대상 퇴적물을 포함하고 있어 20 mg/L의 높은 부유입자 농도를 보임
- 공정 내 활성탄 여과를 거친 시료의 경우 부유입자의 농도는 0.20 mg/L로 실내에서 활성탄 여과를 수행한 0.24 mg/L와 유사한 값을 보임
- 활성탄여과를 통해 대부분의 입자는 제거되는 것을 확인함



[그림. V-마-32] 공정수의 여과 전후에 대한 부유물질 농도(mg/L) 비교

### ■ 총 유기탄소 (TOC, mgC/L)

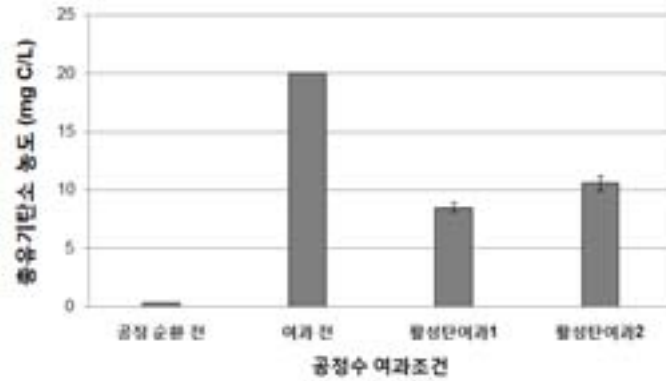
- 순환하지 않은 공정수(수돗물) 내 TOC함량은 0.3 mg C/L의 값을 보임
- 약 2회 순환 후 여과하지 않은 공정수는 20 mg C/L의 높은 TOC 농도를 보임
- 공정 내 활성탄 여과를 거친 시료의 경우 8.5 mg C/L의 농도로 유기탄소 함량이 감소되는 것을 확인할 수 있었음

### ■ 화학적 산소요구량 (COD, mg/L COD)

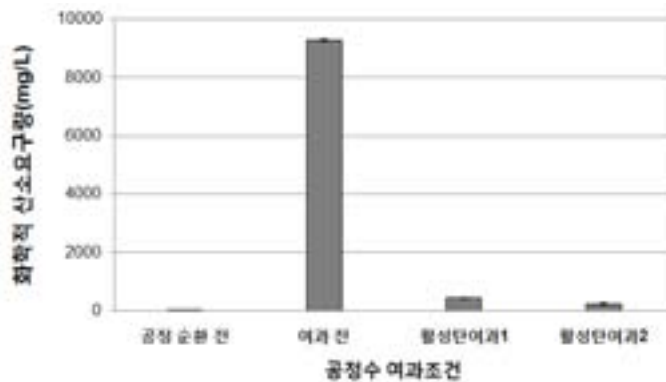
- 공정에 사용된 공정수는 초기 약 15.3 mg/L에서 9000 mg/L이상의 높은 증가를 보임
- 활성탄 여과 시 약 228 mg/L(활성탄 여과조건1), 430 mg/L (활성탄 여과조건 2)로 감소하는 경향을 보였으나 배출수 기준에 비하면 상당히 높은 농도로 분석됨

### ■ 총질소 (TN, mg/L N)

- 공정수 내 총 질소 함량은 공정 순환 전 1.8 mg/L 의 농도에서 2회의 공정 순환 후 약 25배 이상 증가한 50 mg/L 의 농도를 확인함
- 활성탄을 이용한 여과 처리 후 공정수 내 총질소함량은 약 36 mg/L정도로 감소함



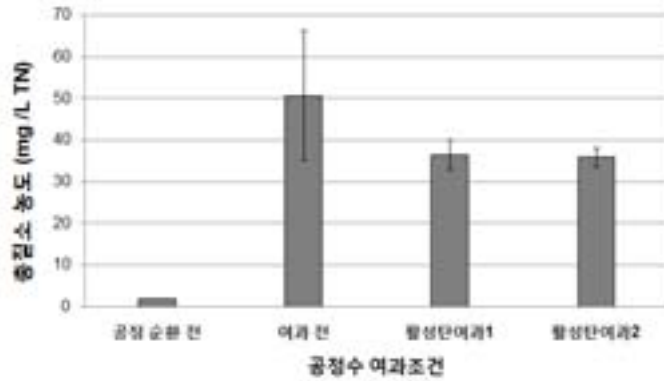
[그림. V-마-33] 공정수의 여과 전후에 대한 총 유기탄소 농도(mg/L) 비교



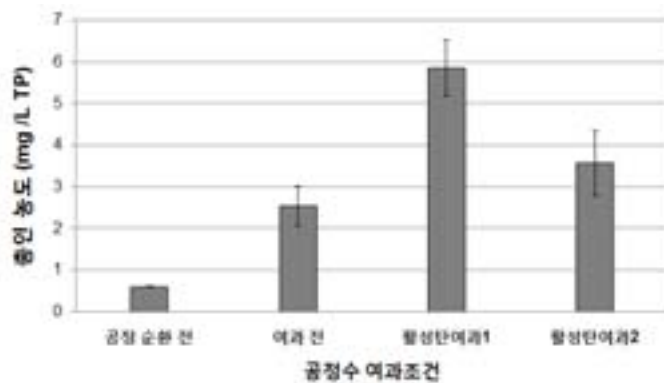
[그림. V-마-34] 공정수 여과 전후에 대한 공정수 내 화학적산소요구량 농도(mg/L) 비교

■ 총인(TP, mg/L P)

- 공정수 내 총 인 함량은 공정 순환 전 0.6 mg/L의 농도로 낮은 편이었으나 공정 순환 이 후 약 2.6 mg/L정도로의 증가를 보임
- 활성탄 여과 후 여과 전에 비해 더욱 증가된 결과를 보여 활성탄의 흡착 능력이 인 제거에 효율적이지 못했음을 확인함



[그림. V-마-35] 공정수 여과 전후에 대한 공정수 내 총질소 농도(mg/L) 비교



[그림. V-마-36] 공정수 여과 전후에 대한 공정수 내 총인 농도(mg/L) 비교

### ■ 고찰

- 정화시스템 내 퇴적물이 정화됨에 따라 공정수 내 유기탄소, 화학적산소요구량, 총질소 및 총인의 농도가 증가함을 확인할 수 있었음
- 여과 이전의 공정수는 방류수 수질기준을 상당히 상회하는 농도를 보였다.
- 활성탄 여과 후 총인을 제외한 모든 항목의 측정값이 감소하였으며, 여과 후 COD를 제외한 TN, TP, SS의 모든 항목이 방류수 수질기준 이하로 확인됨
- 활성탄 여과 후 순환된 공정수의 각 측정항목(COD, TN, TP, SS)은 배출수 정화기준(표 V-마-21)에 비교하였을 때 상당한 여과 효율 및 흡착 가능성을 보여 활성탄 여과 후 공정수의 재사용 및 배출에 대한 향후 가능성을 보여줌
- 그러나 활성탄 여과 후 총인의 증가 및 COD의 방류수 수질 기준을 상회하는 결과로 보았을 때 인을 흡착하기 위한 흡착제 양의 조절 및 개질이 요구됨
- 수처리 시 효율을 높이기 위하여 목표로 하는 오염물질을 처리할 수 있는 막분리 공정 등 설치 공간이 최소화되며 처리 효율을 높일 수 있는 공정의 선택이 중요함

[표. V-마-20] 방류수 수질기준 및 오염퇴적물 정화공정수의 특성

	방류수 수질기준 <sup>39)</sup>	여과 전(순환공정수)	여과 후
COD (ppm)	40	9276	329
TN (ppm)	60	51	36
TP (ppm)	8	3	5
SS (mg/L, ppm)	20	20	0.2

- 2회 순환 한 공정 수의 부유물(정화 대상 물질의 잔류물)이 20mg/L 가량 존재하는 바, 정화처리 공정의 순환 및 연속 운전을 고려하여 활성탄 여과 전 응집 침전을 통한 여과 능력을 보완할 필요가 있을 것으로 생각됨

(5) 현장 처리기술 공정 최적화 및 실증 시험 평가

(가) 실증 결과 교차 분석을 통한 정화 효율 검증

① 맹검 분석(Blinded test)을 통한 처리 정도 및 효율 평가 결과

- 맹검 분석에는 최종 실증 시험에서 채취한 고도처리 회분실험 시료를 활용
- 결과에 본 연구팀이 분석 결과와 함께 제시

㉞ 효율 평가 방법

- 분석대상은 고도산화처리 장치를 추가하고 고도산화처리의 처리시간 별 효과를 보기위한 검증 단계에서 확보한 시료를 이용함
- 처리 전과 처리 후는 고도산화처리 40분 공정 전후를 의미하며 추가로 설치한 유량조절조를 모두 채운 1시간 후(오존 주입 중지)를 0으로 함. 이후 유입과 유출을 중지하고 다시 오존을 주입하며 고도산화처리조에서 순환되는 동안 시간대 별 시료를 채취함
- 시료는 본 연구팀이 분석에 이용한 동일한 시료를 검증기관에 의뢰하여 분석
- 분석항목은 부영양화관련 평가물질로 TOC를 분석하였으며, 중금속(Cu, Zn, Pb, Cd)함량에 대한 분석은 전함량법으로 실시
- 각각 두 기관에 시료를 의뢰 분석함

[표. V-마-21] 맹검분석 의뢰 기관

분석항목	분석 기관		
총유기탄소(TOC)	기관 A	기관 B	본 연구팀
중금속	기관 C	기관 D	본 연구팀

㉞ 부영양화관련 평가물질(TOC)의 농도 변화

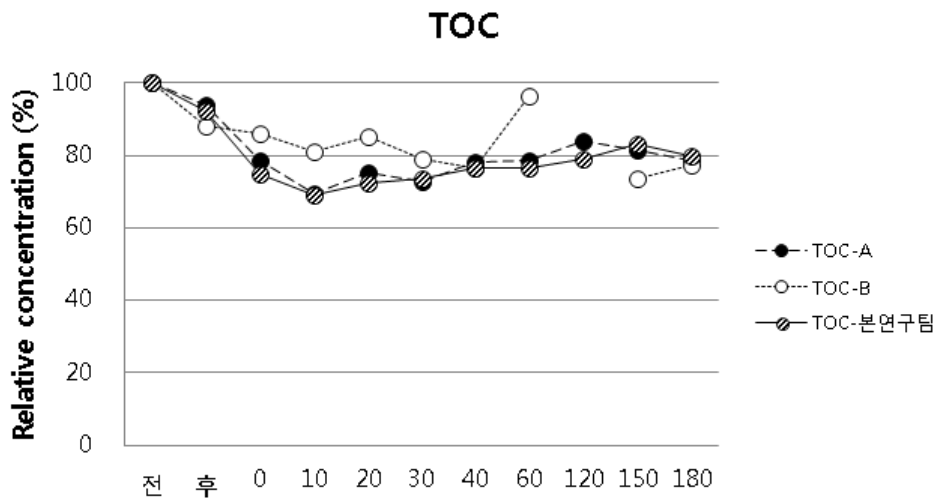
- 분석 결과는 표 V-마-23에 나타내었으며 각 기관에서의 분석 확인 및 시험검사기록서는

부록에 첨부함

- TOC농도의 감소 경향은 세 분석기관 모두 유사함(그림 V-마-37)
- 백분율로 감소율을 나타냈었을 때 평균 21% (최소20.1%, 최대22.5%)의 감소율을 보임

[표. V-마-22] 고도처리공정의 시간에 따른 TOC 농도의 교차분석 결과(단위 %)

기관	처리전	처리후	처리시간(분)								
			0	10	20	30	40	60	120	150	180
A	6.76	6.35	5.31	4.69	5.09	4.93	5.29	5.30	5.66	5.50	5.30
B	10.98	9.69	9.45	8.88	9.37	8.68	8.41	10.58	-	8.08	8.51



[그림. V-마-37] 기관별 상대적인 함량비로 나타낸 TOC변화(%), 맹검분석을 통한 유기물 저감 효과의 검증

㉔ 중금속 함량 변화

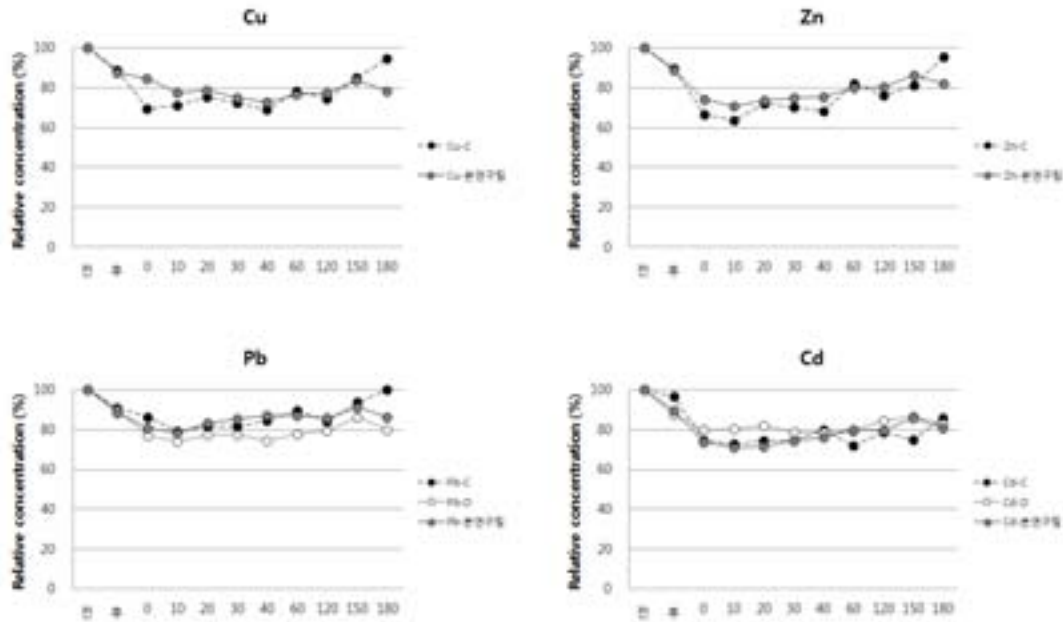


- 분석 결과는 표 V-마-24에 나타내었으며 각 기관에서의 분석 확인 및 시험검사기록서는 부록에 첨부함
- 중금속 네 개의 원소 별 농도의 감소 경향은 세 분석기관 모두 유사하였다(그림 V-마-38).
- 백분율로 감소율을 나타냈었을 때 평균 21% (최소20.1%, 최대22.5%)의 감소율을 보였다.

[표. V-마-23] 고도처리공정의 시간에 따른 중금속 농도의 교차분석 결과  
(단위 mg/kg)

기관	처리 전	처리 후	처리시간(분)									
			0	10	20	30	40	60	120	150	180	
C	Cu	329.3	292.5	229.5	234.8	248.6	238.6	226.8	258.3	245.2	280.4	311.9
	Zn	1750.4	1572.2	1166.4	1115.5	1262.0	1232.6	1190.9	1439.1	1331.0	1420.6	1669.7
	Pb	127.9	116.1	110.3	101.2	104.4	104.4	108.1	114.8	107.9	120.0	127.9
	Cd	3.4	3.3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.7	2.4	2.6	2.5	2.9
D	Cu	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Zn	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Pb	429.9	384.8	331.7	318.0	332.6	332.5	321.2	335.6	341.2	370.7	343.4
	Cd	5.7	4.9	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.5	4.8	4.9	4.7

\*ND. not detected. 검출한계 미만



[그림. V-마-38] 기관별 상대적인 함량비로 나타낸 중금속변화(%), 맹검분석을 통한 유기물 저장 효과의 검증

㉔ 맹검분석을 통한 정화 효율 고찰

- 고도처리공정에서 시간에 따라 채취한 시료를 교차 분석 한 결과 본 연구팀이 분석한 유기물 및 중금속의 농도 경향과 상당히 유사하였으며, 감소율 또한 유사함
- 따라서 유기물 저장 효율에 대해 검증함

(6) 자체평가

- 방안 및 실증 기술에 대한 평가(안)을 바탕으로 본 연구에서 수행한 현장정화처리 시스템 실증에 대한 평가를 실시함
- 일부 항목에 대해서는 본 실증규모의 실험에 해당사항이 없음

(가) 기술에 대한 평가 검증

항목	세부 절차	검증항목	Check
사전검토	- 처리대상 물질의 물성과 오염 특성 평가	- 오염물질의 함량 및 입도분포 등 분석	○
	- 처리기술이 대상 오염물질의 정화에 효과적 인지 여부	- 부영양화관련 평가 항목(TOC, IL, COD)의 감소 관찰	○
	- 목적으로 하는 최종 처분 관련 환경 기준을 충족할 수 있는지 여부	- 높은 정화효율이 재현성 있게 관찰되지는 않았으나 현재 각 공정에서의 최대로 관찰된 유기물 저장 효율로는 충분한 가능성을 확인함	○
	- 대상 오염물질의 발생량, 보관 방법 및 처리기술 적용 시 운전 장애 요인 여부	- 실증에서는 특별한 장애 요인 없음	○
	- 처리기술 적용 시 2차 오염 가능성 및 폐기물 발생 여부	- 폐수 발생(추가 공정에 대한 연구 필요)과 관련 공정수 재순환 및 폐기물의 개량 연구 진행 중	○

처리기술 적용	- 처리설비가 대상 오염물질을 보관하기에 적합한지 여부	- 실증에서는 특별한 장애 요인 없음	○
	- 주요 처리공정 별 안정적으로 처리되는지 여부(처리 능력)	- 처리능력 확인	○
	- 주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 및 안전 대책 여부	- 모듈 내에서의 안전 확보 - 해상 작업시 안전에 관한 체크리스트 필요	○
	- 환경문제 또는 2차 오염 발생 여부	- 폐수 발생(추가 공정에 대한 연구 필요)과 관련 공정수 재순환 및 폐기물의 개량 연구 진행 중	○
처리기술 시험 및 평가	- 처리효율 평가를 위한 평가항목(예: 분석항목(유기물, 중금속 등))	- COD, IL 분석 및 TOC분석을 통한 검증	○
	- 전체 공정 중 시료 채취 장소 및 균질화 방법	- 실증시험 시 시료채취에 반영, 장애 요인 없음	○
	- 처리기술은 최소 2-3회 이상 운전하여 각각 시료를 채취하며, 채취시료는 자체 분석 및 최소 2-3개 공인기관의 맹검 분석(Blinded test)결과를 기초로 처리 정도 및 효율을 평가	- 맹검 분석을 통한 분석값 및 정화 효율 검증	○
	- 주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 여부 및 위험 발생 시 안전 대책 유효성 여부	- 연구실 안전조치 이행 계획 및 필요한 연구 안전 확보 계획에 따라 수행	○
	- 환경문제 또는 2차 오염 발생 여부 및 정도	- 발생폐액 및 폐기물에 대한 고려를 위한 추가 실험 진행 중	○
	- 물질수지 및 에너지 수지 평가	- 약 00%로 물질 수지 평가 완료 - 에너지 수지 평가 완료	○
	- 최종 처리산물이 목적으로 하는 최종 처분에 적합한지 여부	- 실증시험 시 고도처리 공정 후 처리산물은 다소 적합하지 않았음	△
기타	- 단위 물량 당 처리 단가 평가	- 현 실증 설계 수준에서 완료	○
	- 처리장치의 운전 및 정지에 실제 요구되는 시간	- 실증을 통해 대상 시료에 대한 시간을 확인함	○
	- 처리장치의 신뢰성(예: 오작동 여부 유지 보수 용이성 등)	- 총 00시간의 운영·보완하였으며 안정적인 운전과 제어를 확인함	○
	- 발생하는 폐기물(고상·액상)의 양, 성상, 처리 가능성 및 처분 방안	- 고상 폐기물 처분은 장애 요인 없음 - 발생폐액 수처리에 대한 보완 필요	△

#### (나) 공정에 대한 자체 평가

- 1차년부터 4차년까지 실험실 규모로 연구, 개발한 해양오염퇴적물 정화 기작(Mechanism) 과 처리기술 및 각 공정별 핵심 요소들을 기초로 설계하였으며, 이를 실제 처리기술 시험을 위한 규모(처리용량: 퇴적물 2 t/h, dry weight)의 각 처리장치를 제작하여 전체 정화 처리 시스템을 구축하였음
- 정화 처리 시스템은 각 공정별 제어에 장애 요인이 발생하지 않았으며, 전체 시스템을 연속 운전함에 있어서 원활하게 진행되었음
- 세척 처리 공정에서 첨가제로 산화제와 비이온계면활성제의 주입과 이로 인한 산화과정에서 발생하는 거품 및 반응물의 부피 팽창에 대한 충분한 제어를 확인하였음
- 세척, 입자분리 및 고도 처리 등 각 공정 사이의 연결부에서의 시료의 흐름이 원활하였음
- 저류조 및 4단의 세척조에서 반응기의 상·하부에서 반응 및 운전 시간 동안 반응물의 상태가 안정적이며 균질한 것을 확인하였음
- 실증 장치에서의 정화효율은 bench-scale의 결과에 비해 미흡하게 관찰 된 경우도 있었음
- 그러나 세척공정에서 최대 16%(TOC의 경우)의 유기물 저감 효과를 보였으며, 고도산화 처리의 회분실험에서 40분의 반응 후 10분의 추가 오존 처리 시 처리 전에 비해 30%이상의 TOC 농도 저감을 확인함
- 또한 각 단위 공정별로 해양오염퇴적물 정화사업 현장에 적용할 경우 필요한 충분한 운

---

전 노하우 및 적용 가능성을 확인함

- 정화 처리 시스템에서 가장 중요한 것은 고도산화처리장치에서의 단위 시간 당 오존 mass transfer인 것으로 판단됨
- 또한 오존 발생량, 오존 주입량과 및 반응기 내에서 높은 용존 효율을 전체 반응시간 동안 일정하게 유지하는 것이 장치 운전의 핵심사항임
- 연속 흐름과 각 공정의 필요에 의한 정화처리시간 조절이 가능하게(유량조절조의 설치) 개발, 설계 및 제작, 운전하여 정화사업 현장 여건에 따라 정화 효율의 조정 가능성을 확인함
- 실증시험 기간 동안 정상상태(Steady state) 운전조건에서 정화 처리 시스템을 운전한 전체 연속운전시간(Continuous operation time)은 총 17시간 10분이었으며, 운전 중 장애 요인 발생은 없었음
- 현장 처리기술 연구, 실증 및 자체평가 결과를 기초로 해양오염퇴적물 정화사업 대응 가능한 상용 규모(10톤 - 35톤/시간, 건중량) 설계를 제안
- 현장 처리기술의 적용은 대상 해역의 상황(주변 여건, 처리 공간 등)과 퇴적물의 특성(물성, 오염도 등)을 기초로 정화목표를 고려하여 각 단위 모듈과 전체 처리 시스템을 최적화하여야 함

(7) 현장 실증 보고

## R&D 과제 지속가능 해양오염퇴적물 정화기술 개발: 피복 및 현장처리기술 현장 정화처리 현장 실증 결과 보고서

- **주최/주관:** 한국해양과학기술원
- **후원:** 해양수산부, 한국해양과학기술진흥원
- **일시:** 2016년 9월 22일(목) 오전 11시~3시 (식사: 2시 ~ 2시45분)
- **장소:** H-Plus eco(주) The Soil R&D center
- **참석:** 관련 전문가 8명 외 과제 책임자 및 연구원 (총30명)  
(광운대학교, 서울대학교, 충남대학교, 환경대학교, 한양대학교,  
해양수산부, 한국환경정책평가연구원, H-Plus eco(주))
- **주요 내용:**
  - **현장 정화 기술에 대한 소개 및 자문 (11:00~13:00)**
    - 현장정화처리의 필요성 및 공정 소개, 기술영상상영 (김경련박사, 책임연구  
자, 한국해양과학기술원)
    - 자문의원: 김규범 교수(서울대학교), 박재우 교수(한양대학교), 신경훈 교수  
(한양대학교), 최만식 교수(충남대학교), 황상일 박사 (한국환경정책평가연  
구원)
    - 참석자: 김영기 교수(환경대학교), 김남훈 사무관(해양수산부), 김태기 과장  
(해양수산부), 공준 이사(H-Plus eco(주)), 박정석 부사장(H-Plus eco(주)),  
최진영 박사(한국해양과학기술원), 원은지 박사(한국해양과학기술원, 박사),  
장민(광운대학교, 교수) 외 과제 연구원 12명
  - **현장실증: 장비 소개 및 공정 설명 (13:10~13:40, 김경련박사)**
    - 세부 공정에 대한 소개
    - 공정 시연
    - 공정 단계별 유기물 오염 퇴적물 시료 확인
    - 입자별 최종 탈수시료 확인
    - 단체 사진 촬영

---

## ① 주요 내용

### ㉠ 현장 정화처리 공정 및 기술에 대한 자문

#### ■ 신경훈 (한양대학교, 교수)

- 수저오염퇴적물에 대한 현장처리가 가능한 새로운 정화기술로 향후 수저오염퇴적물 정화 기술에 핵심적인 기술로 발전할 가능성이 매우 높음
- 본 연구결과는 현장에서 분리/세척 기반 공정을 모듈화 하여 통합처리하는 시스템으로 새로운 개념의 수저오염퇴적물 정화처리 시스템으로서의 가치가 인정될 수 있음

#### ■ 김규범 (서울대학교, 교수)

- 높은 유기물 분해 효율을 보이는 장치를 개발한 것으로 생각됨
- 국내외 기존 기술에 비해 향상된 부분을 강조해야함
- 대부분의 해양 준설은 mud입자로 분급 장치 사용에 대한 필요성을 설명해야함

#### ■ 최만식 (충남대학교, 교수)

- 장치의 효율점검을 위해 다양한 종류의 해양퇴적물에 대한 자료가 필요할 것으로 생각됨
- 유기물의 존재 형태에 따라 효율이 다를 것으로 생각됨
- 유기물을 화학적으로 제거하는 과정에서 중금속이 처리되며 COD와 TOC의 효율차이는 퇴적물 내 황화물 성분에 의한 것으로 생각됨. 따라서 폐수 처리에 대한 고려가 필요함
- 20micro이하 처리 및 수처리 기술 공정에 대한 세부 기술개발에 대한 연구 및 처리비용에 대한 조사가 필요함

#### ■ 황상일 (한국환경정책평가연구원, 박사)

- 현재 실증규모에서 상용규모로 scaleup할 때 처리 속도의 bottleneck이 예상되는 module은 무엇인지와 해결방법에 대한 고민이 제시되어야함
- 염분제거기작에 대한 설명 필요
- 복합오염지역에의 적용에는 좀 더 기술개발이 필요할 것으로 생각됨

#### ■ 박재우 (한양대학교, 교수)

- 유효활용에 대한 내용이 강조되어야 함
- 과산화수소사용시 COD분석의 overestimation을 고려해야함

## ② 사진자료

---



[그림. V-마-39] 실증 현장(2016년 9월 22일)

(8) 결론: 현장 처리기술 적용을 위한 제안

- 연구, 개발 및 실증 시험에 이용한 오염퇴적물 시료의 특성은 ① 높은 유기물 함량, ② 정화 기준을 초과하지 않는 일부 중금속 원소와, 정화 기준 초과하는 수준의 중금속 농도, ③ 세립질의 높은 비율이며, 이와 같은 오염특성은 우리나라 해양오염퇴적물 정화·복원 대상 해역 중 오염도 보통 정도에 해당함
- 상기 시료 또는 오염도 보통에 해당하는 퇴적물에 대해서는 (1) 세척 > (2) 정화 목표에

---

맞게 세척된 조립질 분리 > (3) 세립질 입자의 고도산화 정화 처리 > (4) 유효활용 목적에 따라 정화된 세립질 입자의 분리 > (5) 미세입자를 포함한 공정수의 처리 및 처리된 미세입자의 유효활용 순서의 각 단계별 정화 처리 공정을 통해 조립질의 오염퇴적물을 대상으로 한 1차 세척과 세척된 입자의 분리, 잔류과산화수소와 오존의 반응을 이용한 미세입자의 고도산화처리가 가장 효율적이라고 판단됨

- 산화제의 농도와 세척 처리시간(Reaction time), 그리고 고도산화처리 공정의 처리시간은 초기 산화제에 의한 유기물의 산화와 유기물 함량에 따라 잔류된 과산화수소의 농도에 기인한 오존과의 peroxone 반응, 그리고 퇴적물의 입자 크기별 오염도에 따라 영향을 받기 때문에 정화 처리 시스템을 현장에 원활하게 적용하기 위해서는 무엇보다도 대상 퇴적물의 물성(입도분포, 미세입자 분율, 함수율 등)과 오염 특성(유기물, 중금속, 잔류성유기오염물질 등)에 대한 평가와 대상 퇴적물에 적합한 정화기작(Mechanism)의 선정이 가장 중요한 요소임
- 실증 시험에 사용한 하이드로사이클론의 재질은 mono cast nylon으로 이는 제작 및 실증 과정에서 수정과 변경을 용이하게 하기 위한 것으로서 실제 정화사업 현장에서 적용될 경우, 정화 과정에서 퇴적물 입자에 의한 마모와 손상을 최소화하기 위해 내부에 세라믹 등 보강 소재를 이용한 코팅을 하거나 또는 SUS (stainless steel) 재질로 제작하여 사용하는 것이 적합할 것으로 판단됨
- 연구, 개발 및 실증시험 결과를 기초로 정화 처리 시스템을 실제 정화사업 현장에서 적용할 경우 전체 시스템의 처리시간을 결정하는 인자(Bottleneck)는 미세입자를 함유한 폐액을 수처리 한 다음 분리된 고형물의 탈수 공정으로 평가됨
- 기존 물리적인 탈수 기작에 의한 처리장치는 대부분이 필터프레스로서 연속 처리가 불가능하며, 한 순환의 처리시간이 긴 단점이 있음
- 현재 개발된 정화 처리 시스템을 보완하고 처리효율을 개선하기 위해서는, ① 정화 처리 시스템에서 수처리 공정 및 탈수 공정을 배제하기 위한 화학적 탈수 기술(Chemical dewatering technologies), ②처리 산물의 성상을 변화시켜 유효활용성을 높이는 개량 기술(Improvement technologies), ③실시간, 대용량 입자분리 기술, ④중금속, 잔류성유기오염물질 등 유해화학물질 정화기작 및 처리기술에 대하여 지속적인 연구, 개발이 필요할 것으로 사료됨

### 현장 처리기술의 경제성 평가 결과(자문)

(서울여자대학교 경제학과 이 준행 교수)

○ R&D사업의 비용은 당해 기술을 개발하는데 투입되는 사업비이며 당해 연구의 경제화폐적 편익은 기술개발로 인한 비용절감, 해양퇴적물 정화사업의 확대에 의한 편익임.

- 해양오염퇴적물 정화사업의 경제적 가치를 분석하는데 있어 해양오염퇴적물의 정화에 소요되는 비용과 이를 통해 얻을 수 있는 편익을 화폐가치로 측정하는 것은 어려운 문제임

○ 해양생태계 복원에 따른 직·간접적인 편익

- 해양오염퇴적물 정화를 통해 해양환경 개선으로 지역주민 생활환경 개선 및 관광·레저 등 다양한 목적으로 해역이용 활성화와 해역이용의 부가가치 상승이 기대

---



---

- 해양생태계 복원에 따른 국민건강 증진의 경제적 가치 등과 같은 편익은 시장가격이 존재하지 않는 가치의 평가는 쉽지 않음

○ 소비자의 지불의사액(WTP: willingness to pay)을 추정하는 방법을 사용할 수 있는데 이를 추정하기 위해 이용되는 방법론으로 조건부 가치추정법(CVM: contingent value method)을 사용하는 것이 일반적임.

○ CVM은 대상재화에 대한 WTP를 설문조사를 통해 직접 조사하는 방법으로 시간과 비용이 많이 소용되는 방법임.

○ 따라서 현 R&D사업의 경제적 편익에서는 구체적인 수치를 제시하기 어려움.

## 1. 기술개발로 인한 비용절감

- 현행 부산남항정화사업을 예로 들면 해양오염퇴적물의 평균처리단가는 105천원/ $m^3$ 으로 선진국에 비해 약 1.3배 높은 수준으로 파악됨.

○ 미국과 같은 선진국의 경우 해양오염퇴적물 처리(중간 및 최종)시 5,000원/ $m^3$ -130,000원/ $m^3$  정도가 소요되어 중간 단가는 약 85,000원/ $m^3$  수준으로 파악되고 있음

- 그리고 우리나라의 해양오염퇴적물 양이 최저 약 8백만 $m^3$ 에서 최대 187백만 $m^3$  달한다는 추정규모를 감안한다면 다음과 같이 해양오염퇴적물 정화사업비용의 절감액을 산정해 볼 수 있음

- 현재는 원위치처리를 못하고 준설하여 처리한다 해도 처리기술에 대한 신뢰성이 부족하여 해양투기를 하거나 육상매립장에 매립하는 비용이 추가적으로 발생하고 있음.

- 현장정화, 모듈화, 분리/세척 통합기술을 개발하여 기술이전을 완료한 상태임.

○ 기술이전('15.10.27.)을 통해 4천3백만원의 기술료 수입이 발생하였고 매년 총액의 3.3%의 기술료 수입이 발생 예정임.

○ 정화기술개발에 따른 비용절감은 약 5,000원/ $m^3$ 으로 추정되어 총 사업비 절감효과는 최소 400억 원에 이를 것으로 추정됨

○ 해양오염퇴적물 정화 및 관련 환경 시장을 토양, 육상 퇴적물(하천, 호소, 댐 등으로 까지 확대가 가능하며 이 경우, 비용절감에 따른 편익은 크게 늘어날 것임.

## 2. 해양퇴적물 정화사업의 확대의 경제적 편익

- 기술개발로 인해 정화사업의 효율성이 증대되면 경제성이 떨어져 사업추진이 어려웠던 해역으로까지 사업을 확대할 수 있을 것임.

---

○ 기술개발로 인한 확대 해역을 다음 네 경우를 가정하고 산업연관의 파급효과를 추정하면 표 V-마-25와 같음. 해양오염퇴적물정화사업의 총생산유발효과는 투입사업비의 2.1배이고 부가가치유발효과는 0.67배이므로 총 경제적 파급효과는 투입사업비의 약 2.77배임.

[표. V-마-24] 사업해역 확대의 산업연관 경제파급효과의 편익

확대해역( $m^3$ )	투입사업비	생산유발효과	부가가치유발효과	총편익
1000	8000억	1조6760억	5352억	2조2112억
5000	4조	8조3800억	2조6760억	11조0560억

- 산업연관분석에서와 같이 해양오염퇴적물 정화부문에 대한 투입은 동 경제활동부문에 대한 지출을 수반하므로 최종수요를 발생시킴

○ 즉 해양오염퇴적물 정화사업에 대한 비용지출은 동 부문에서의 최종지출을 통해 경제 전반으로 여타부문에서의 생산, 부가가치 및 취업유발 등의 효과를 발생시키며, 이 효과는 해양오염퇴적물 정화를 통해 경제 전체적으로 유발되는 간접적인 편익이라고 할 수 있음

### 해양오염퇴적물 유효활용 법·제도 자문의견

(한양대학교 법학전문대학원 김홍균 교수)

#### 주요 내용

- 해양오염퇴적물의 유효활용을 위한 법·제도 정비
- 현행 법제도 검토를 기반으로 향후 유효활용을 촉진하기 위한 관련 법령의 제, 개정 방안의 모색

#### 1. 배경 및 필요성

- 수거 필요성과 수거 사례가 증가함에도 불구하고 현재 우리나라는 수거한 해양오염퇴적물의 처리 등과 관련하여 실질적인 관리법제가 없는 상황임
- 퇴적물, 준설물질, 해양오염퇴적물, 수거한 해양오염퇴적물, 수거 및 처리 등에 대한 기본 개념조차 정립되어 있지 않으며, 수거 및 처리 등에 대한 구체적인 지침이나 기준이 미비함
- 「해양환경관리법」을 비롯한 현행 법제에서는 수거토의 수거 및 유효활용 등에 대한 기본적인 관리 및 처리방안을 적절히 제시하지 못하고 있음
- 수거한 해양오염퇴적물을 오염도와 무관하게 일률적으로 폐기물로 자의적으로 간주하여 처리할 경우에는 자원의 낭비는 물론이거니와 적절하지 아니한 처리를 하는 경우에는 육상 매립으로 인한 2차오염의 우려마저 낳을 수 있음
- 한정된 자원을 보유한 국내의 실정상 자원순환의 차원에서 수거한 해양오염퇴적물 투기나 폐기 대상으로 볼 것이 아니라 정화 및 처리대상으로 보는 전향적인 자세가 요망됨
- 이에 수거한 해양오염퇴적물을 폐기물로 규정하지 않거나 폐기물이 아닌 재활용 가능한 자원으로 보아 유효활용을 유도하는 적극적인 검토가 요망됨
- 런던의정서/협약에서는 준설물질은 폐기물로 규정되어 있지 아니하며, 기타 물질로 규정

---

되어 있으며, 우리나라는 런던의정서 가입/비준 국가이므로 국내법과 동일하게 준수하여야 할 의무가 있음

- 법적인 관점에서 해양오염퇴적물의 유효활용방안에 대한 연구는 초보 단계에 머무르고 있다고 할 수 있음
- 그 논의는 구체성이 떨어져 국내법적인 제도 설계를 위해서는 미흡하다고 할 수 있음
- 그 연구는 주로 법제도 차원이 아닌 공학적, 토목학적, 생·화학적 차원에서 그리고 해양공간을 대상으로 이루어지고 있는데, 관련 환경기준 개발에 관한 연구와 해양오염퇴적물의 재활용기술에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 해양오염퇴적물에 대한 관리체계 및 법제 개선을 위한 논의는 활성화 되어 있지 않음

## 2. 자문 의견

### 1) 수저준설토에 대한 개념정의

- ‘준설’이라 함은 법률상 따로 정의되어 있지 않음
- 참고로 「건설산업기본법 시행령」에서는 준설공사업의 업무내용으로 “하천, 항만 등의 물밑을 준설선 등의 장비를 활용하여 준설하는 공사”로 규정함으로써 간접적으로 준설을 설명하고 있음(제7조, 별표 1)
- 이렇게 준설한 퇴적물 중 점토·실트·모래·자갈 및 암석을 준설토사라고 할 수 있으나 그 개념 정의를 분명히 할 필요가 있음

### 2) 준설토의 법적 지위

#### 가) 폐기물인가?

- 건설공사, 준설공사 또는 작업 등으로 폐기물을 5톤 이상 배출하였다고 볼 여지가 많기 때문에 수거된 퇴적물은 사업장일반폐기물로 취급될 가능성이 많음
- 그러나 오염되지 아니 한 준설토사의 경우에는 「폐기물관리법」상의 폐기물 개념정의인 생활이나 사업활동에 “필요하지 아니 하게 된 물질”에 해당하지 않아 폐기물이 아니라고 할 여지도 충분함. 더욱이 준설물질이 5톤 이하 발생한 경우에는 「폐기물관리법」 명문상 사업장폐기물이 될 수 없음
- 「해양환경관리법」은 수저준설토사를 선박으로부터 공유수면을 매립하려는 장소에 배출할 수 있는 폐기물과 육상에서 발생한 폐기물 중 해양에 배출가능한 폐기물의 일종으로 보고 있음(시행규칙 제11조 제1항, 별표 3 제1호, 제12조 제1항, 별표 6 제2호, 제12조 제2항, 별표 8 제3호). 그 결과 준설토사를 육상 내 처리하는 경우에는 준설토사에 포함된 유해물질과 상관없이 사업장일반폐기물로 분류되어 「폐기물관리법」상의 폐기물 규정이 적용될 가능성이 있음

#### 나) 토양인가?

- 준설토사를 「토양환경보전법」이 적용되는 토양으로 볼 수 있는지 논란이 있음
- 오염된 토양 자체는 폐기물이 아니나, 오염된 토양을 파내어 처리하는 경우에는 폐기물에 해당한다는 견해, 원칙적으로 오염된 토양은 지하에 방치되어 있든 지상으로 옮겨졌든 폐

---

기물로 보지 않되, 예외적으로 불법매립·투기된 폐기물로 인하여 직접 오염된 토양에 한하여 폐기물로 보아야 한다는 견해가 있음

- 원래 위치로부터의 분리 여부, 오염 여부에 의해 폐기물에 해당하는지 여부가 결정된다고 볼 것은 아니라는 견해도 강력히 제기되고 있음

- 법원은 오염 여부를 불문하고 준설토사를 폐기물로 보고 있음.<sup>40)</sup> 그러나 한편으로는 오염토양이 폐기물에 해당하지 아니하고 『토양환경보전법』의 적용대상이라고 함으로써,<sup>41)</sup> 혼란을 부추기고 있음

다) 유효활용 관련법제 검토 및 정비방안

- 유효활용 관련법제로는 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」, 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」, 「골재채취법」 등이 있음

- 준설품질을 법논리적으로 폐기물이라고 보아야 할 필연성이 없으며 발생장소, 성질, 처리·처분 방법 등 특이성에 비추어 폐기물과 달리 취급할 필요성도 있음

- 활용의 대상인 준설토사를 폐기물로 보는 것은 사회관념에도 맞지 않음

- 이에 준설품질을 폐기물 개념에서 제외하는 방안을 검토할 필요가 있음

- 여기에는 다음의 방안이 일응 검토될 수 있음

- 준설토사, 준설토, 수저준설토사 등을 폐기물로 파악하고 있는 「해양환경관리법」 관련 규정을 개정하는 방안

- 별도의 특별법(예컨대, 준설품질관리법)을 제정하는 방안

- 「토양환경보전법」에 관련 규정을 두어 그 처리방법을 제시하는 방안

- 「폐기물관리법」 제3조의 적용범위에 관한 조항에 토양에 관한 예외규정을 신설하여 「토양환경보전법」에 따라 토양정화의 대상이 되는 우려기준을 초과하는 토양은 「폐기물관리법」의 적용대상에서 제외되는 것으로 규정하되, 그 이외의 오염토양은 「폐기물관리법」에 의한 폐기물로 관리할 수 있음을 명시하여 혼란을 잠재우는 방안

3) 유효활용 기준

- 재활용의 용도 또는 방법을 정하는 방식을 고수하는 「해양환경관리법」은 준설토사의 재활용을 저해할 가능성이 크므로 재고가 필요함

- 즉 2012. 6. 19. 제정·고시된 ‘수저준설토사의 유효 활용 기준 등 규정’(해양수산부 고시 제2012-338호)은 수저준설토사의 재활용 용도를 해수욕장의 양빈, 습지 등 해안의 복원, 인공섬의 조성, 어장개선사업, 항만시설 또는 어항시설의 개발시 공사용 재료, 그 밖에 해양수산부장관이 해양환경의 보전을 위해 필요하다고 인정하여 수저준설토사를 활용하는 경우 등으로 국한하고 있음

- 참고로 2015. 7. 20. 개정 「폐기물관리법」은 폐기물의 재활용을 활성화하고, 그 과정에서 발생하는 환경오염을 사전에 예방하기 위하여 폐기물의 재활용 원칙 및 준수사항을 새로 설정하여 이를 위반하지 아니하는 경우에는 재활용이 가능하도록 규제 방식을 원칙허용·예외금지 방식으로 변경하였음(제13조의2)

- 준설토사의 재활용을 촉진, 장려하기 위해서는 그 용도 및 방법에 대한 제한을 폐지할 필요가 있으며, 위 ‘수저준설토사의 유효 활용 기준 등 규정’을 개정할 필요성이 있음

---

---

## 바. 현장처리기술 상용규모 공정 설계

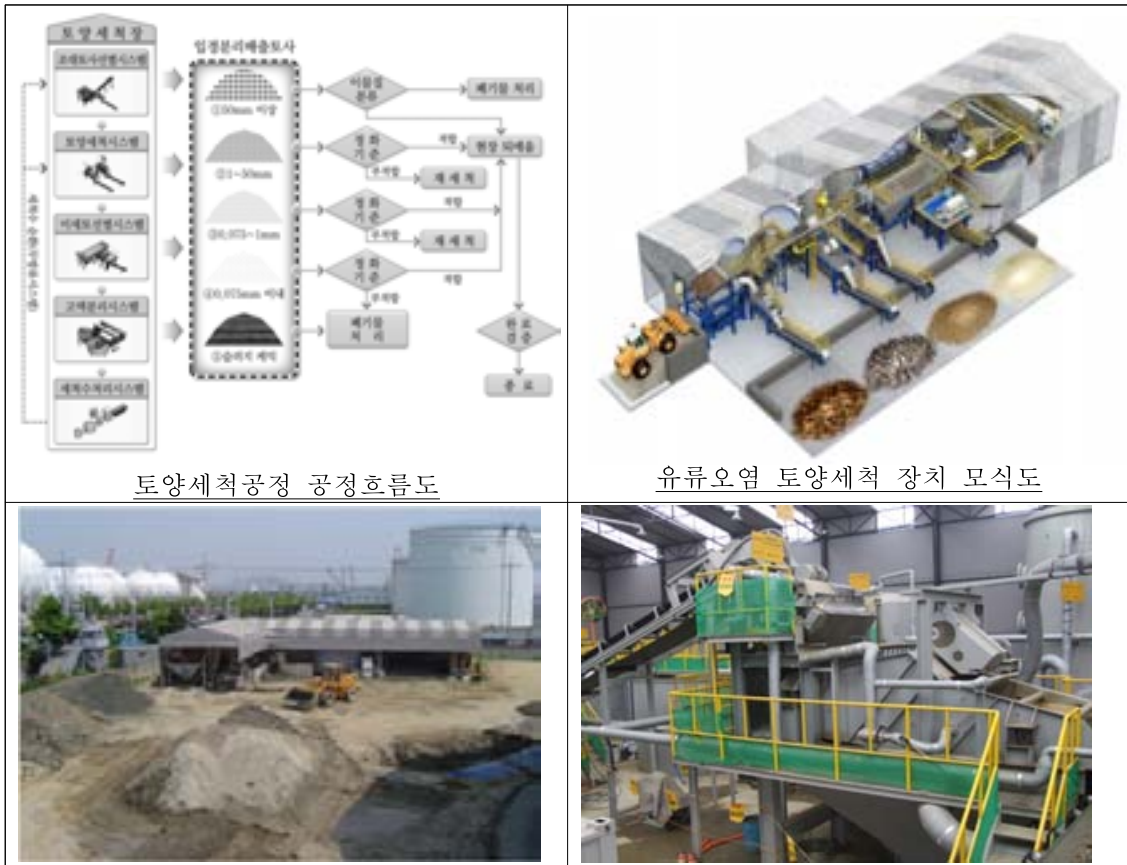
### (1) 국내·외 관련 처리기술 공정 검토 및 설계인자 도출

#### (가) 국내·외 관련 처리기술 공정 검토

- 본 연구에서 개발하고자 하는 현장처리 기술은 해상에서 오염퇴적물을 입자분리 공정과 세척기반 처리공정 및 고도 처리공정의 통합공정으로 연속처리(continuous treatment)가 가능하도록 함과 동시에 적용대상 해역의 특성 및 퇴적물의 오염정도에 따라 필요한 각 단위 처리장치들이 개별 처리 능력을 유지하면서, 분리, 결합, 재배치, 재결합이 가능하도록 각 공정을 모듈식으로 개발한 새로운 개념의 정화처리 시스템임
- 국내·외 유사 처리기술로 육지에서는 토양환경보전법에 근거한 지중에 유류 등 유기화합물이나 중금속 등으로 오염된 토양을 정화하기 위해 적용되는 토양세척공법 사례와 수저에서는 호안, 저수지, 하천 및 해양 바닥에 퇴적되어 유기화합물이나 중금속으로 오염된 퇴적물을 정화·복원하기 위해 적용된 사례를 검토함

#### ① 국내 유류오염 토양정화 공정 사례 1

- 주로 반환미군기지 및 군부대내 대규모 유류저장시설 토양정화에 적용함
  - 주요 처리공정
  - 공정 검토 내용
    - 설비구성 : 토사 입경분리(선별) 시스템, 세척수 재활용(수처리) 시스템, 세척슬러지 탈수시스템으로 구성
    - 유류 세척장치의 특성 : 습식선별 과정에서 토양입자 표면의 유류가 탈착 후 수처리시설에서 제거되며 자체 수처리시설 탑재로 폐수 무방류시스템으로 운전가능토록 설계됨
    - 운전조건 : 분리입경 범위는 일반적으로 0.075 ~ 0.053mm로 경제성으로 고려하여 결정하며 세척액은 주로 물 단독으로 사용하며 Surfactant는 제한적으로 사용함. 또한 경제적인 미세토 함량은 30%이내가 일반적임.
-



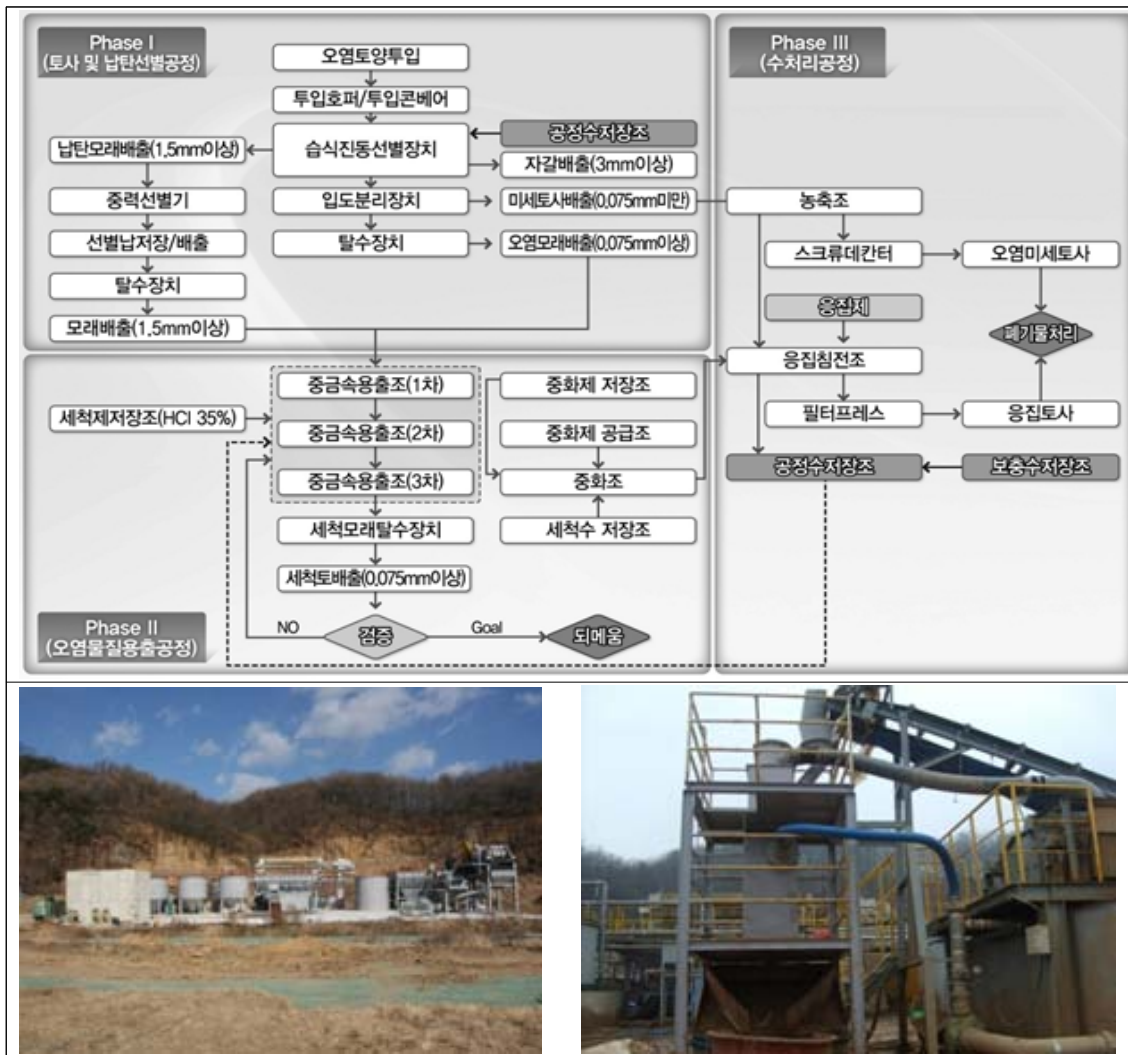
토양세척공정 공정흐름도

유류오염 토양세척 장치 모식도

[그림. V-바-1] 유류오염 토양세척 장치 공정 흐름 및 현장 설치 예시

② 국내 중금속오염 토양정화 공정 사례 2

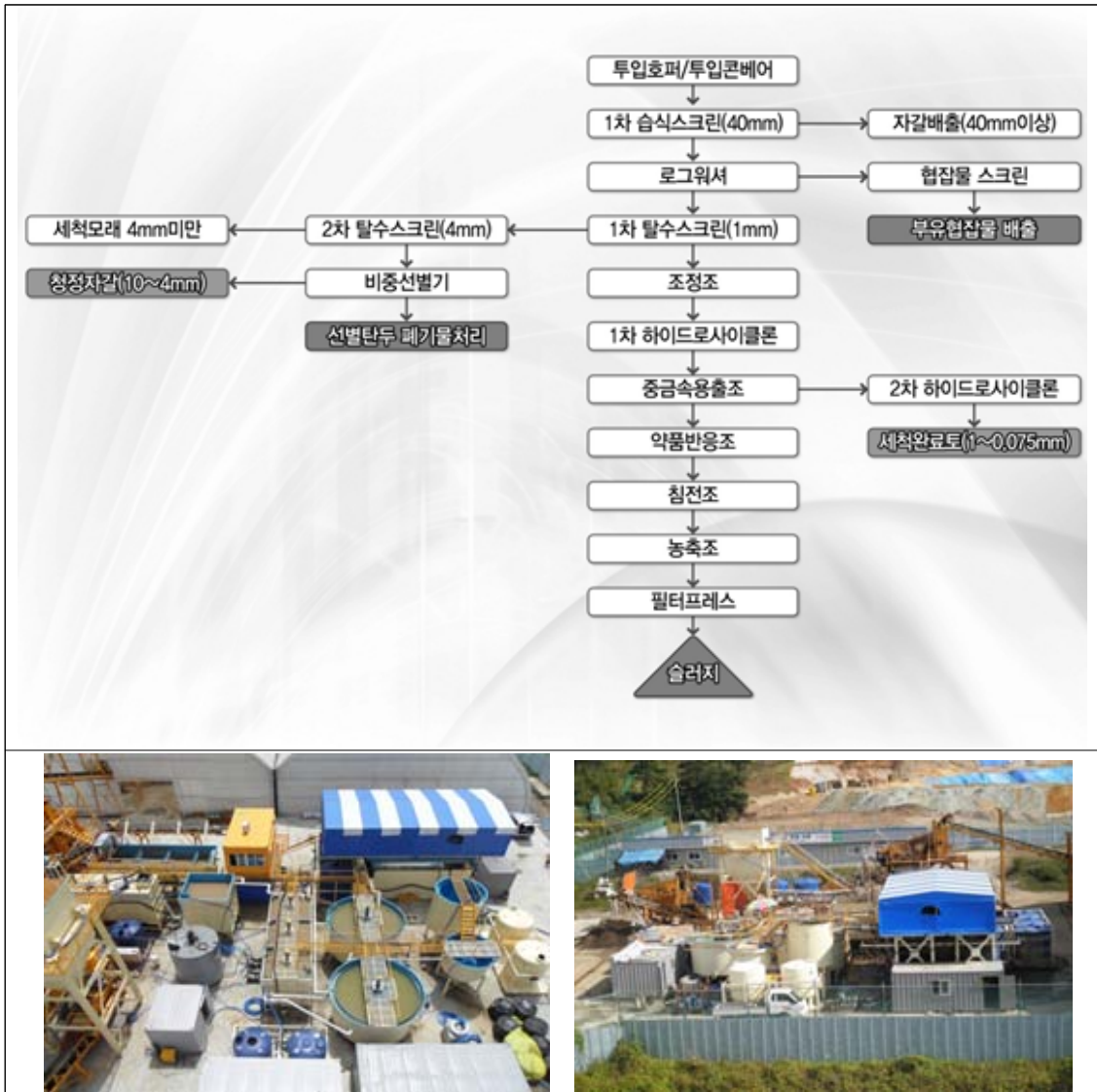
- 시립사격장 토양정화에 적용함
- 주요 처리공정
- 공정 검토 내용
  - 설비 구성 : 토사 및 납탄선별공정, 오염물질 용출공정, 수처리공정으로 구성
  - 운전 조건 : 무기산 (0.1N HCl) 용출액 적용을 통한 중금속 오염토양 정화  
고농도로 연속식 공정운영이 불가하여 회분식 (Batch type) 산용출조 운영하여 작업효율 저하
- 납탄 사전선별을 위한 중력선별 시스템 적용 및 소식회 등을 이용하여 산용출 토양에 중화처리 후 정화현장 내 되메움 실시



[그림. V-바-2] 중금속오염 토양세척 장치 공정 흐름 및 현장 설치 예시 1

### ③ 국내 중금속오염 토양정화 공정 사례 3

- 군부대내 소총사격장 토양정화에 적용함
- 주요 처리공정
- 공정 검토 내용
  - 설비 구성 : 토사 선별공정, 오염물질 용출공정, 수처리공정으로 구성
  - 운전 조건 : 미세토 분급효율을 높이기 위해 다단 하이드로사이클론(Hydro-cyclone) 적용
- 회분식 산용출조를 연속식 (Continuous Type) 운전방식으로 전환하여 장비 운영효율 제고
- 산용출조내 토양입자 표면의 중금속 용출효율을 높이기 위해 마이크로버블, Jet Mill 등의 보조 장치 적용

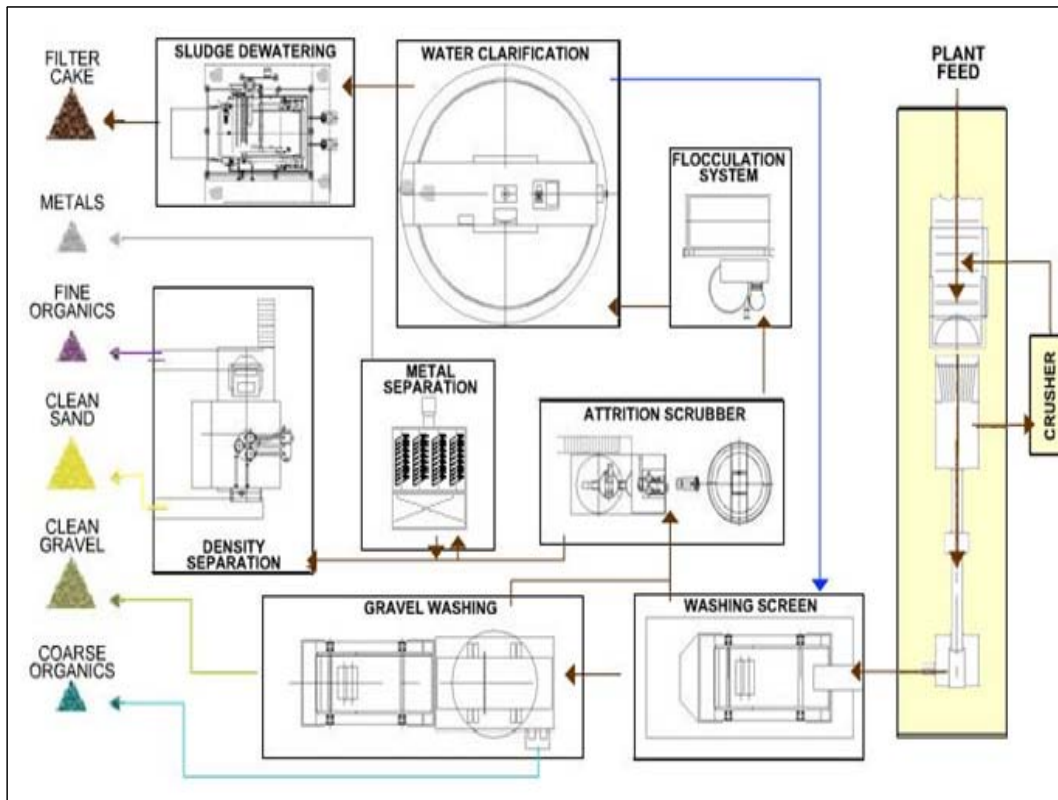


[그림. V-바-3] 중금속오염 토양세척 장치 공정 흐름 및 현장 설치 예시 2

#### ④ 국외 중금속오염 토양정화 공정 사례 1

- 사격장이나 폐기물 매립부지 내 토양정화에 적용함
- 주요 처리공정
- 공정 검토 내용
  - 설비 구성 : 토사 파쇄공정, 토사 입자분리공정, 중금속 분리공정, 수처리공정으로 구성
  - 운전 조건 : 기본적인 공정흐름은 국내 토양세척공정과 유사
- 토사 인입(Feeding) 단계에서 세척효율 증대를 위해 파쇄공정 적용
- 중금속 탈착, 고액분리, 유기물 산화반응 및 탈수공정에서 특화시스템 적용

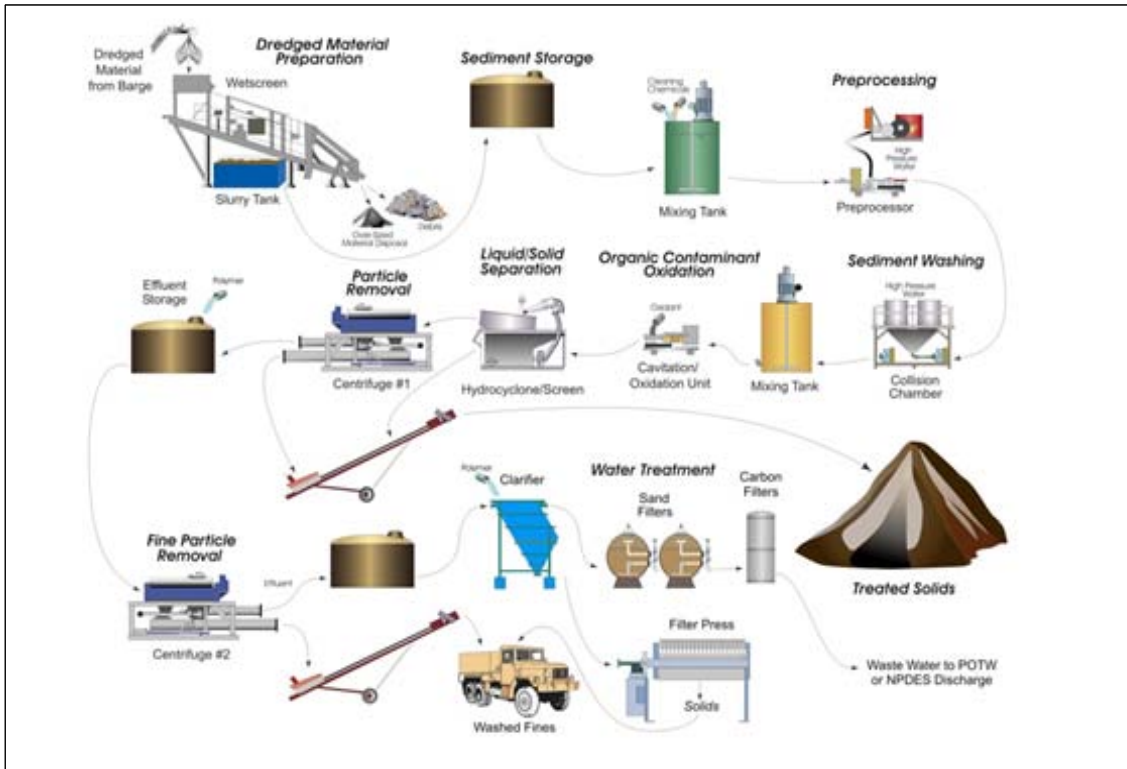




[그림. V-바-4] 국의 중금속오염 토양세척 장치 공정 흐름 예시

⑤ 국의 수저오염퇴적물 정화 공정 사례

- 해양, 하천이나 호소내 오염퇴적물 정화에 적용함
- 주요 처리공정
- 공정 검토 내용
  - 설비 구성 : 사전 선별공정, 1차세정 및 고압파쇄공정, 입자충돌 반응공정, Cavitation 산화반응공정, 토사 입자분리공정, 미세토 분리공정, 탈수공정으로 구성
  - 운전 조건 : 고압살수/산화 및 충돌(Collision)공정, Cavitation 공정을 거쳐 유기성 유기물질 분해
- 세척액내 중금속 등 무기성 오염물질은 침전과정을 통해 제거
- 세척액내 미세토(고/액)분리, 유기물 산화반응 공정이 Key 프로세스



[그림. V-바-5] 국의 수저오염퇴적물 정화 장치 공정 흐름 예시

(나) 현장처리기술 설계인자 도출

- 입자분리 및 세척기반 현장처리기술 공정설계에 있어 주요 영향인자로는 오염특성에 따라 입도분포, 75  $\mu\text{m}$  이하 미세입자의 함량, 유기물함량, pH 및 완충능력, 양이온교환용량 등이며, 오염물질 특성에 따라 입도별 오염물질 농도분포, 용해도, 흡착성 등임. 또한 세척제 특성에 따라 세척제 종류, 주입농도, 생분해성 그리고 생물학적 독성 등임
- 본 처리기술은 유해한 유기오염물질이 입자가 작은 미세토양에 많이 분포되어 있으므로 미세토만을 분리하여 오염부피를 감소시키는 기술임. 따라서 미세토의 분포, 성상, 분리효율이 가장 큰 영향인자로 작용하며 오염물질의 특성, 세척제의 특성 등이 주요 설계인자로 작용하게 됨.

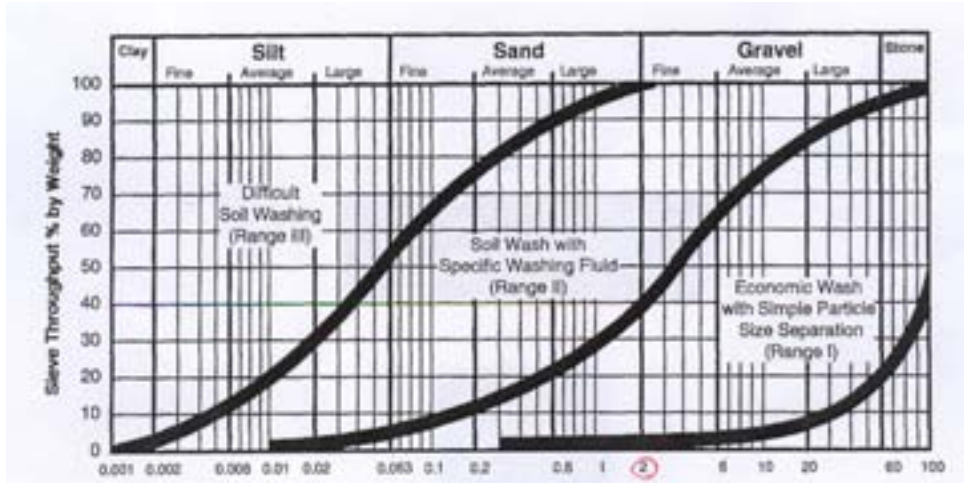
① 오염퇴적물 특성에 따른 영향인자

㉞ 입도분포 및 점토함량

- 토양 입도 분포는 표준화된 물리적인 특성 중의 하나임. 오염물질이 토양 입자의 크기와 함수관계를 갖고 있는 경우가 많으며, 처리효율 또한 입자의 크기와 유관함을 보여주고

있음.

- 세척공정을 적용할 수 있는 Range II는 대부분의 오염물질이 분포하는 범위로서, 오염물질의 형태에 따라 세척액의 조성 및 전체 공정의 효율이 영향을 받으며, 공정 효율은 퇴적물 입도 분포 형태와 미세 입자에 존재하는 오염물질의 분율에 따라 영향을 받음. 이 범위에서는 입자의 크기에 따른 분리와 오염물질의 용해 모두가 낮은 비용으로 효과적인 토양처리를 위해 중요한 인자로 작용함.



[그림. V-바-6] 토양세척 적용 시 적용가능한 입도범위

- 세척공정의 적용이 어려운 Range III은 미세한 모래, silt, clay 범위며, 이러한 퇴적물은 종종 높은 부식질을 함유하고 있어 유기화합물이 강하게 흡착되어 있을 수 있음. 입자 크기에 따른 분리는 이 범위에 포함된 토양에 흡착된 오염물질을 보다 작은 부피로 효과적인 농축을 할 수 있음.

#### ㉠ 유기물 함량

- 오염퇴적물 중의 휴믹산과 같은 유기물(humus)도 오염물질을 강하게 흡착하는 특성을 가지고 있음. 이러한 미세퇴적물 및 유기물의 함량에 따라 세척기반 공정의 처리효율 및 경제성이 달라지기 때문에 퇴적물의 유기물함량은 세척공정의 적용가능성을 검토하는데 중요한 인자로 작용함.

#### ㉡세척제 특성에 따른 주요 영향인자

- 세척수의 경우 세척효율을 높이기 위하여 여러 가지 첨가물이 물과 함께 사용되는데, 용출시험 등을 이용한 실증시험을 통하여 오염특성에 맞는 세척제를 선택해야 함.
- 주로 사용되는 첨가제로는 pH조절제, 계면활성제, 착화제, 산화제, 응집제 등이 있음.
- 일반적으로 토양세척용 첨가제로는 계면활성제를 주로 사용하며, 이는 표면에 흡착되어 계면의 활성을 크게하고 표면장력을 현저히 떨어뜨리는 효과를 이용한 것임.
- 효율적인 세척을 위한 계면활성제는 활성제 자체의 용해도, 대상 오염물에 대한 용해도, 흡착성, 생분해성 및 생물학적 독성 등의 성질과 비용 등의 여러 면에서 선택되어야 하며, 세척에는 표면장력이 작은 계면활성제를 선택하는 것이 바람직한데, 이는 퇴적물과 계면활성제 용액의 혼합물에서 중력에 의한 고액분리가 용이하기 때문임.
- 중금속을 제거하기 위한 세척액은 다양한 종류가 사용될 수 있으며, 대표적인 세척제로는

---

킬레이트제, 산, 염기, 그 밖에 염이 사용됨. 중금속의 추출을 위해 EDTA나 NTA와 같은 킬레이트제가 많이 사용됨. 킬레이트제는 세정효율은 우수하나, 중금속과 매우 안정된 착화합물을 형성하므로, 중금속의 분리와 회수가 어려우며, 가격이 비싸고 회수성의 감소를 가져올 수 있으며, 일부는 생물독성을 가지는 단점을 가지고 있음.

## (2) 기존 결과를 기초로 상용규모 현장처리기술 공정 상세설계

### (가) 상용규모 현장처리기술 공정 상세설계의 기본조건

- 4차년도에 개발된 모듈화 공정설계 결과와 5차년도 수행한 현장처리기술 실증을 통한 공정 최적화 결과를 반영하여 상용규모 현장 처리기술 공정을 설계함.
- 대상해역은 N해역으로 하되, 입자분리 및 세척기반 통합공정의 단위 장치의 규격, 용량, 특성을 고려하여 도로 이동이 가능한 최적 규모를 검토하여 정화장치 용량을 최소 10 ton/h(건중량), 최대 35 ton/h(건준량)로 설정하여 해양오염퇴적물 정화사업 현장 여건에 대응하도록 함.
- 모든 현장처리설비는 해상의 Barge선 상에 설치하여 정화처리되는 조건이며 처리대상 물질은 부영양화물질 등 유기물을 중점적으로 처리하는 것임.
- 본 정화처리 설비로 유입되는 오염퇴적물은 오염퇴적물 수거업체가 오염퇴적물을 준설하여 대형폐기물, 오탁물질 등 협잡물 등을 선별장치로 전처리 한 후 선별된 30 mm 이하의 오염퇴적물을 처리대상으로 설정.
- 정화 및 처리후 발생되는 0.020 mm이하 미세퇴적물은 개량(안정화 및 성상 변화) 처리공정과 연계하여 유효활용으로 재활용될 수 있도록 설계
- 해양 현장내 바지선에 모듈화 장비의 설치 및 운영이 가능하도록 시스템을 설계하고 모듈화 장비의 제작, 운반, 설치, 운영 및 해체/철거의 전 오염퇴적물 정화복원 공정을 고려하여 설계함.
- 최종 처리수는 현장에서 정화 후 방류될 경우를 상정, 해역별 수질기준에 적합하게 세척 폐수 처리 후 처분

### (나) N해역 오염현황

- N해역의 부영양화 정화지수(CIET: Clean-up Index, Eutrophication)은 평균 6.6으로 25개 조사해역 중 4번째로 높은 수준임.
- N해역의 유해화학물질 정화지수(CIHC:: Clean-up Index, Harmful chemicals)는 평균 3.0으로 25개 조사해역에서 14번째를 차지함.
- 이는 정화복원 대상구역 설정기준인 CIET = 6.0 이상 또는 CIHC = 2.0 이상인 해역으로 정화복원 대상 해역임.
- 조사결과 N해역의 퇴적물 오염면적은 약 2,974,000 m<sup>2</sup> 이며, 정화대상 물량은 약 1,265,819 m<sup>3</sup> 인 것으로 조사됨.
- 입경분석 결과, N해역 해양퇴적물은 모래질(Sand)이 22.5%, 미사질(Silt)이 12.67%, 점토질(Clay)이 64.83%로 대부분 점토질로 구성되어 있음.

[표. V-바-1] N해역 주상퇴적물의 부영양화물질 농도분포

구분	COD (mg/g)	AVS (mg/g)	IL (%)	TOC (%)	TN (%)	Al (%)	Fe (%)
최소	21.4	0.0	4.70	1.00	0.07	5.76	2.39
최대	75.0	4.98	10.60	4.11	0.26	11.02	3.22
평균	40.2	1.82	8.59	1.85	0.12	8.35	2.88

[표. V-바-2] N해역 입경별 부영양화물질 농도분포

구분	입경분포 (%)	COD (mg/g)	AVS (mg/g)	IL (%)	TOC (%)	TN (%)	WC (%)
>125 $\mu$ m	5.72	25.6	-	10.4	2.33	0.114	-
>63 $\mu$ m	16.78	41.3	-	12.2	2.36	0.147	-
>32 $\mu$ m	12.67	36.0	-	11.8	2.33	0.177	-
<32 $\mu$ m	64.83	39.8	-	16.2	3.14	0.287	-
Bulk	100.0	39.0	4.96	14.9	2.83	0.238	51.2

(다) 현장처리기술 공정 상용규모 설계 시 주안점

- 일반적으로 오염물질의 농도가 집중된 미세퇴적물의 처리가 가능하도록 고도세척처리 공정 설계
- 정화효율 향상을 위해 다단 하이드로싸이클론의 적용으로 분리입경을 0.020mm까지 가능하도록 설계
- 해양오염퇴적물의 처리 및 정화시 발생하는 미세퇴적물을 고품화/안정화 연계처리로 유용자원으로 재활용할 수 있도록 공정설계
- 전기, 용수 등 유틸리티는 정화설비내에서 공급이 가능하도록 설계
- 용수로 사용되는 해수는 오염퇴적물을 정화처리한 후 해양에 최종방류될 수 있도록 적절한 수처리 프로세스를 설계
- 본 연구사업을 통해 확보한 해양오염퇴적물 정화기술 개발 연구성과인 특허 등 지적재산권의 실질적인 상용규모 공정 설계에 반영하며, 반영된 연구결과(특허)는 아래 표 V-바-3과 같음.

[표. V-바-3] 상용규모 설계에 반영된 연구결과(특허)

번호	특허(출원)번호	특허명	비고
1	10-1426519	수저오염퇴적물 정화처리 시스템	
2	10-1524438	나노비블을 이용한 수저오염퇴적물 정화처리 시스템	
3	10-1656859	모듈식 사이클론	
4	10-1609737	모듈식 싸이클론	
5	10-1649567	수저퇴적물 유효활용을 위한 모듈식 정화처리 바지선	
6	10-1426512	미세기포전처리를 포함하는 수저오염퇴적물 정화처리공정	
7	10-1590037	모듈식 수저퇴적물 정화처리 시스템 및 공법	
8	10-1569072	싸이클론을 이용한 입자분급 시험장치 및 이를 이용한 시험방법	
9	10-1473314	도양 내 중금속 정화방법 및 이를 이용하여 얻어진 자성분리 입자를 이용한 수질정화방법	
10	10-2016-0054414	에너지 자립형 퇴적물·도양·수처리 모듈식 정화처리 시스템	특허출원 (2016.5.3.)
11	10-2016-0159488	퇴적물도양 유효활용을 위한 무방류 개량 시스템	특허출원 (2016.11.28.)

(라) 현장처리기술 공정 상용규모 설계 기준

- 설치장소는 해상바지선이며 바지선의 규모는 W20,000 x L35,000 x H3,500, 적재용량은 1,400톤임.
- 오염퇴적물 모듈화처리장치 총중량은 약 500톤 정도로 예상함.
- 해양오염퇴적물은 퇴적물수거업체가 협잡물, 30 mm 이상 입자를 선별 분리하여 오염퇴적물저장조에 공급하는 조건임.
- 모듈화 장치는 각 공정별로 모듈화 하여 저장 트레일러로 운반 가능한 크기로 제작하여 현장에서 조립 설치토록 하되, 고중량 장치는 육상에서 분리하여 운송 후 현장에서 재조립하여 설치함.
- 육상이동성을 고려한 모듈화 장치의 개소 수 등 최적화를 위해 저장 트레일러 (일반적인 적재규모 2750W x 12000L x 900H)를 운송수단으로 사용함.
- 각 모듈간 연결배관은 현장에서 신속하게 조립이 용이하도록 Rubber Hose를 사용하며 연결부품은 STS304 재질을 사용함.
- 용수는 기본적으로 해수를 사용하되, 약품 희석수, 설비 마중수 등 미량은 담수를 사용함. 처리수는 해상방류 조건임.
- 주요 장치의 재질은 해수에 내부식성을 갖춘 재질을 사용하고 입경별 처리산물은 압력박스에 임시저장 후 육상으로 이송 처리함.
- N해역 대상 오염퇴적물 물질수지는 아래 표 V-바-4와 같음.

[표. V-바-4] N해역 대상 오염퇴적물 현장실증 물질수지

공종	발생량(kg)	퇴적물 입경	비율	비 고
투입호퍼	1,000			-
파쇄선별장치	30	Over size 헝잡물	3%	폐기물처리
1차 진동선별장치	20	Over 10mm	2%	재활용
자력선별장치	20	자성체	2%	폐기물처리
2차 진동선별장치	60	10 ~ 2mm	6%	재활용
진동탈수장치 (1차반응조)	120	2 ~ 0.075mm	12%	재활용
저압필터프레스 (고도처리반응조)	150	0.075~0.02mm	15%	재활용
고압필터프레스 (수처리장치)	570	Under 0.02mm	57%	고형화/안정화 연계
기타(공정내 손실)	30		3%	-
합 계	1,000		100	

(마) 현장처리기술 공정 상용규모 설계 내용

- 각 모듈은 전체 처리장치의 구성요소로서 각각 독립적인 기능을 담당하는 장치로 설계하여 대상 해역의 특성 및 오염퇴적물의 오염정도에 따라 최적의 장치구성이 될 수 있도록 설계됨.
- 전체 처리장치는 단위공정 장치, 발전기, 저장탱크 등 유틸리티(utilities)를 포함하여 총 12개의 모듈로 구성함.

[표. V-바-5] 단위 모듈별 주요기능 및 사양

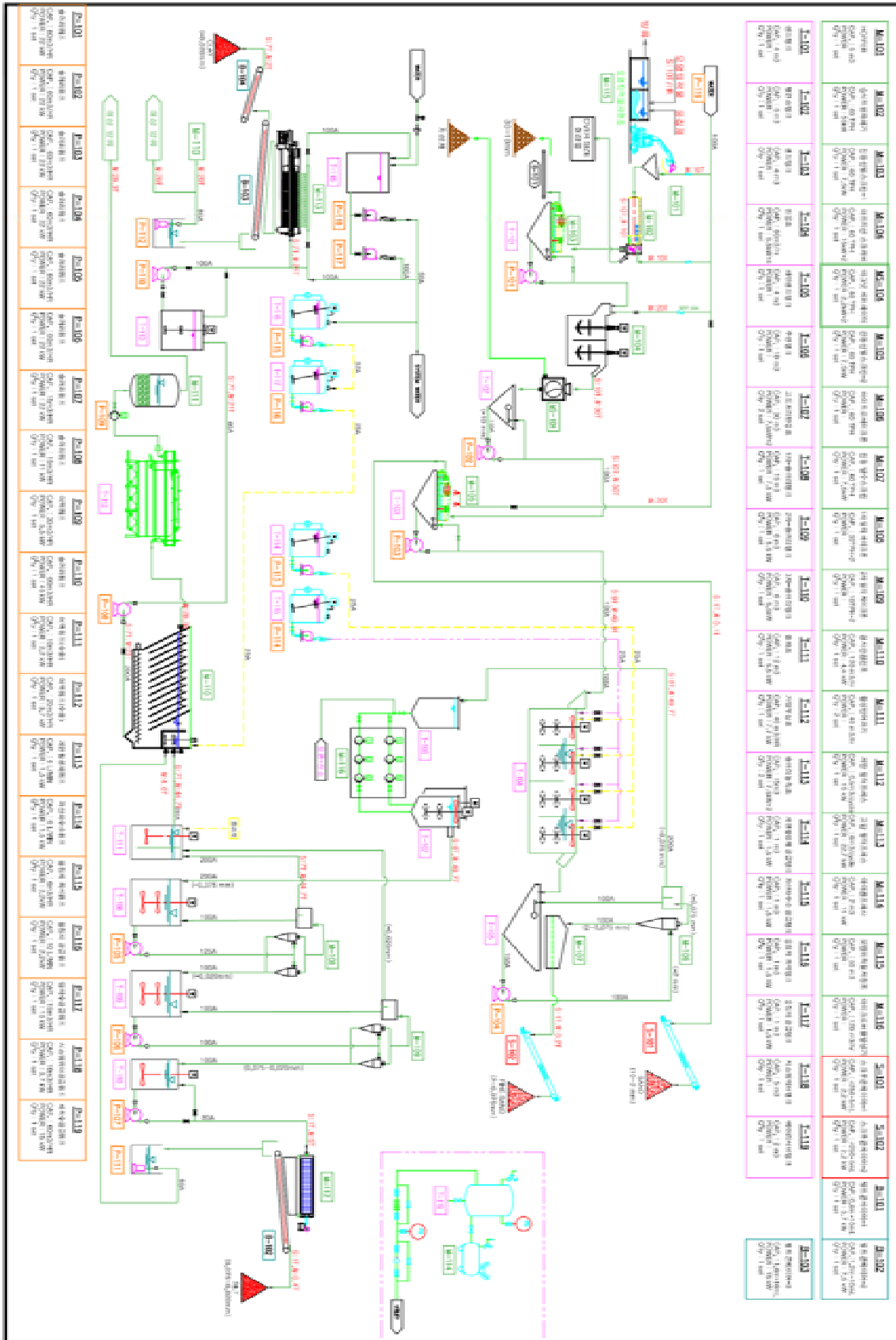
모듈 NO	모듈장치 및 기능	모듈장치 사양
1	·모듈명 : 1차 입자분리 장치 ·기능 : 30mm 이하 오염퇴적물이 습식드럼파쇄기에서 유입되어 교반 및 혼화된 후 선별장치에서 1차 입자분리 ·처리입경 : 30~2mm	·사이즈 : W2,600 x L12,000 x H3,000 ·주요 구성품 : 진동선별스크린, 아트리션 스크러머, 벨런스탱크, 스크류컨베이어, 드럼자력선별기, 샌드탱크 등
2	·모듈명 : 2차 입자분리/고도처리 장치 ·기능 : 부영양화물질 제거를 위한 고도처리반응 후 2차 입자분리 공정 ·처리입경 : 2~0.075mm	·사이즈 : W3,000 x L12,000 x H3,600 ·주요 구성품 : 고도처리반응조, 진동탈수기, 이드로싸이클론, 쿠션탱크, Fine sand 탱크 등
3	·모듈명 : 반응처리/분급장치 ·기능 : 부영양화물질 제거를 위한 1차	·사이즈 : W2,600 x L12,000 x H4,550, ·주요 구성품 : 멀티하이드로 싸이클론,

	반응 및 미세입자 분리공정	배오존 처리장치, 1차반응조, 마이크로버블발생기
4	·모듈명 : 응집침전장치 ·기능 : 고도처리 후 발생한 폐수 처리 공정 ·처리입경 : 0.020mm 이하	·사이즈 : W2,600 x L12,000 x H3,100 ·주요 구성품 : 중화조, 경사판침전조
5	·모듈명 : 1차 탈수처리 장치 ·기능 : 세척간 발생하는 미세입자와 폐수를 분리하는 탈수공정 ·처리입경 : 0.075~0.020mm	·사이즈 : W3,100 x L15,500 x H3,500 ·주요 구성품 : 저압필터프레스, 여액탱크, 벨트컨베이어
6	·모듈명 : 2차 탈수처리 장치 ·기능 : 세척폐수 처리 후 미세입자 분리를 위한 탈수공정 ·처리입경 : 0.020mm 이하	·사이즈 : W4,000 x L15,000 x H5,150 ·주요 구성품 : 고압필터프레스, 여액탱크, 벨트컨베이어
7	·모듈명 : 약품공급 탱크 ·기능 : 오염퇴적물 처리에 필요한 약품을 공급하는 공정	·사이즈 : W2,600 x L9,000 x H3,150 ·주요 구성품 : 계면활성제 공급탱크, 산화제 공급탱크, 응집제 공급탱크, 교반탱크, 에어컴프레셔 등
8	·모듈명 : 저장탱크 ·기능 : 실트질 퇴적물 선별분리를 위한 슬러리 탱크	·사이즈 : W3,000 x L12,000 x H3,150 ·주요 구성품 : 1, 2, 3차 슬러리 탱크, 슬러리농축조 등
9	·모듈명 : 원료투입장치 ·기능 : 오염퇴적물 원료를 세척공정에 투입 및 원료의 균질화 공정	·사이즈 : W3,000 x L11,700 x H5,500 ·주요 구성품 : 투입호퍼, 습식드럼파쇄기
10	·모듈명 : 가압부상/여과장치 ·기능 : 스크 제거 및 부유물질 제거를 위한 수처리공정	·사이즈 : W3,000 x L12,000 x H3,600 ·주요 구성품 : 가압부상조, 활성탄여과탑
11	·모듈명 : 오염퇴적물 저장조 ·기능 : 준설된 오염퇴적물을 저장	·사이즈 : W3,250xL5,000xH3,500, 2기 ·주요 구성품 : 오염퇴적물저장조
12	·모듈명 : 전기실 및 운전실 ·기능 : 전원공급 설비 및 조작판넬 등 세척공정 운전실	·사이즈 : W3,000 x L6,000 x H2,500 ·주요 구성품 : Contol room 등



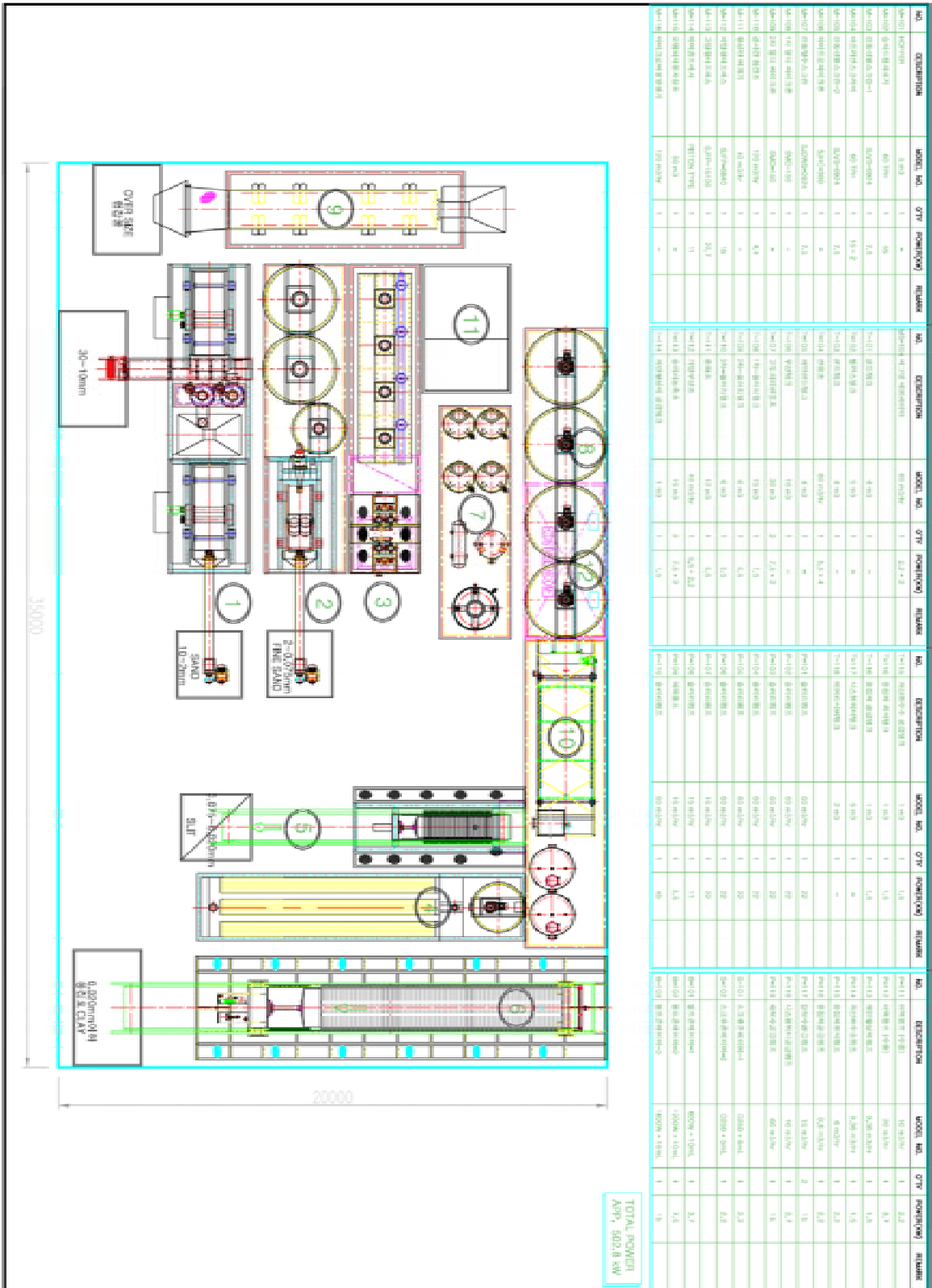
(바) 현장처리기술 공정 상용규모(10톤/시간, 건중량) 상세설계

■ 현장처리기술 공정 배관 및 계통도(P&ID)



[그림. V-바-7] 입자분리 및 세척기반 통합 현장처리기술 P&ID

■ 현장처리기술 공정 정화설비 배치도 (Lay-out)



[그림. V-바-8] 입자분리 및 세척기반 통합 현장처리기술 정화설비 배치도

■ 단위 모듈장치 상세사양

① 모듈 1(1차 입자분리 장치)

SPECIFICATION																																																																																																													
<table border="1"> <tr> <td>UNIT NAME</td> <td>1차 입자분리 장치(모듈 1)</td> </tr> <tr> <td>CAPA.</td> <td>60 m<sup>3</sup>/hr</td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>800×1200</td> </tr> <tr> <td>POWER</td> <td>2.2×2 kW</td> </tr> <tr> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> </tr> </table>	UNIT NAME	1차 입자분리 장치(모듈 1)	CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr	SIZE	800×1200	POWER	2.2×2 kW	Q.TY	1 SET	<table border="1"> <tr> <td>UNIT NAME</td> <td>1차 입자분리 장치(모듈 1)</td> </tr> <tr> <td>CAPA.</td> <td>60 m<sup>3</sup>/hr</td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>800×1200</td> </tr> <tr> <td>POWER</td> <td>7.5 kW</td> </tr> <tr> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> </tr> </table>	UNIT NAME	1차 입자분리 장치(모듈 1)	CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr	SIZE	800×1200	POWER	7.5 kW	Q.TY	1 SET																																																																																								
UNIT NAME	1차 입자분리 장치(모듈 1)																																																																																																												
CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr																																																																																																												
SIZE	800×1200																																																																																																												
POWER	2.2×2 kW																																																																																																												
Q.TY	1 SET																																																																																																												
UNIT NAME	1차 입자분리 장치(모듈 1)																																																																																																												
CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr																																																																																																												
SIZE	800×1200																																																																																																												
POWER	7.5 kW																																																																																																												
Q.TY	1 SET																																																																																																												
	<table border="1"> <tr> <td>M-104</td> <td>진동전달스크린-1</td> <td>CAPA.</td> <td>60 m<sup>3</sup>/hr</td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>800×1200</td> <td>POWER</td> <td>7.5 kW</td> </tr> <tr> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>M-105</td> <td>아보리진달스크린-2</td> <td>CAPA.</td> <td>60 m<sup>3</sup>/hr</td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>2200×1100×1800H (2CELL)</td> <td>POWER</td> <td>15 kW × 2 (INDUCTION)</td> </tr> <tr> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>S-101</td> <td>SPIRAL CONVEYOR</td> <td>CAPA.</td> <td>60 m<sup>3</sup>/hr</td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>1250×3000L</td> <td>POWER</td> <td>2.2 kW</td> </tr> <tr> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>T-101</td> <td>센드통-3</td> <td>CAPA.</td> <td>4 m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>1200×700×1000H</td> <td>POWER</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>T-102</td> <td>플라스틱통</td> <td>CAPA.</td> <td>6 m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>1900×700×1500H</td> <td>POWER</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>T-103</td> <td>센드통-3</td> <td>CAPA.</td> <td>4 m<sup>3</sup></td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>1200×700×1000H</td> <td>POWER</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>P-101</td> <td>SUBMERSE PUMP</td> <td>HEAD</td> <td>20 MH</td> </tr> <tr> <td>POWER</td> <td>22 kW</td> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> </tr> <tr> <td>P-102</td> <td>SUBMERSE PUMP</td> <td>HEAD</td> <td>20 MH</td> </tr> <tr> <td>POWER</td> <td>22 kW</td> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> </tr> <tr> <td>P-103</td> <td>SUBMERSE PUMP</td> <td>HEAD</td> <td>20 MH</td> </tr> <tr> <td>POWER</td> <td>22 kW</td> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> </tr> <tr> <td>B-102</td> <td>BELT CONVEYOR</td> <td>CAPA.</td> <td>10 m<sup>3</sup>/hr</td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>1000×1000L</td> <td>POWER</td> <td>3.7 kW</td> </tr> <tr> <td>Q.TY</td> <td>1 SET</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	M-104	진동전달스크린-1	CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr	SIZE	800×1200	POWER	7.5 kW	Q.TY	1 SET			M-105	아보리진달스크린-2	CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr	SIZE	2200×1100×1800H (2CELL)	POWER	15 kW × 2 (INDUCTION)	Q.TY	1 SET			S-101	SPIRAL CONVEYOR	CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr	SIZE	1250×3000L	POWER	2.2 kW	Q.TY	1 SET			T-101	센드통-3	CAPA.	4 m <sup>3</sup>	SIZE	1200×700×1000H	POWER	-	Q.TY	1 SET			T-102	플라스틱통	CAPA.	6 m <sup>3</sup>	SIZE	1900×700×1500H	POWER	-	Q.TY	1 SET			T-103	센드통-3	CAPA.	4 m <sup>3</sup>	SIZE	1200×700×1000H	POWER	-	Q.TY	1 SET			P-101	SUBMERSE PUMP	HEAD	20 MH	POWER	22 kW	Q.TY	1 SET	P-102	SUBMERSE PUMP	HEAD	20 MH	POWER	22 kW	Q.TY	1 SET	P-103	SUBMERSE PUMP	HEAD	20 MH	POWER	22 kW	Q.TY	1 SET	B-102	BELT CONVEYOR	CAPA.	10 m <sup>3</sup> /hr	SIZE	1000×1000L	POWER	3.7 kW	Q.TY	1 SET		
M-104	진동전달스크린-1	CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr																																																																																																										
SIZE	800×1200	POWER	7.5 kW																																																																																																										
Q.TY	1 SET																																																																																																												
M-105	아보리진달스크린-2	CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr																																																																																																										
SIZE	2200×1100×1800H (2CELL)	POWER	15 kW × 2 (INDUCTION)																																																																																																										
Q.TY	1 SET																																																																																																												
S-101	SPIRAL CONVEYOR	CAPA.	60 m <sup>3</sup> /hr																																																																																																										
SIZE	1250×3000L	POWER	2.2 kW																																																																																																										
Q.TY	1 SET																																																																																																												
T-101	센드통-3	CAPA.	4 m <sup>3</sup>																																																																																																										
SIZE	1200×700×1000H	POWER	-																																																																																																										
Q.TY	1 SET																																																																																																												
T-102	플라스틱통	CAPA.	6 m <sup>3</sup>																																																																																																										
SIZE	1900×700×1500H	POWER	-																																																																																																										
Q.TY	1 SET																																																																																																												
T-103	센드통-3	CAPA.	4 m <sup>3</sup>																																																																																																										
SIZE	1200×700×1000H	POWER	-																																																																																																										
Q.TY	1 SET																																																																																																												
P-101	SUBMERSE PUMP	HEAD	20 MH																																																																																																										
POWER	22 kW	Q.TY	1 SET																																																																																																										
P-102	SUBMERSE PUMP	HEAD	20 MH																																																																																																										
POWER	22 kW	Q.TY	1 SET																																																																																																										
P-103	SUBMERSE PUMP	HEAD	20 MH																																																																																																										
POWER	22 kW	Q.TY	1 SET																																																																																																										
B-102	BELT CONVEYOR	CAPA.	10 m <sup>3</sup> /hr																																																																																																										
SIZE	1000×1000L	POWER	3.7 kW																																																																																																										
Q.TY	1 SET																																																																																																												

|  | |       |                         |       |                       | |-------|-------------------------|-------|-----------------------| | M-104 | 진동전달스크린-2               | CAPA. | 60 m <sup>3</sup> /hr | | SIZE  | 2200×1100×1800H (2CELL) | POWER | 15 kW × 2 (INDUCTION) | | Q.TY  | 1 SET                   |       |                       | | M-105 | 아보리진달스크린-1              | CAPA. | 60 m <sup>3</sup> /hr | | SIZE  | 800×1200                | POWER | 7.5 kW                | | Q.TY  | 1 SET                   |       |                       | | S-101 | SPIRAL CONVEYOR         | CAPA. | 60 m <sup>3</sup> /hr | | SIZE  | 1250×3000L              | POWER | 2.2 kW                | | Q.TY  | 1 SET                   |       |                       | | T-101 | 센드통-3                   | CAPA. | 4 m <sup>3</sup>      | | SIZE  | 1200×700×1000H          | POWER | -                     | | Q.TY  | 1 SET                   |       |                       | | T-102 | 플라스틱통                   | CAPA. | 6 m <sup>3</sup>      | | SIZE  | 1900×700×1500H          | POWER | -                     | | Q.TY  | 1 SET                   |       |                       | | T-103 | 센드통-3                   | CAPA. | 4 m <sup>3</sup>      | | SIZE  | 1200×700×1000H          | POWER | -                     | | Q.TY  | 1 SET                   |       |                       | | P-101 | SUBMERSE PUMP           | HEAD  | 20 MH                 | | POWER | 22 kW                   | Q.TY  | 1 SET                 | | P-102 | SUBMERSE PUMP           | HEAD  | 20 MH                 | | POWER | 22 kW                   | Q.TY  | 1 SET                 | | P-103 | SUBMERSE PUMP           | HEAD  | 20 MH                 | | POWER | 22 kW                   | Q.TY  | 1 SET                 | | B-102 | BELT CONVEYOR           | CAPA. | 10 m <sup>3</sup> /hr | | SIZE  | 1000×1000L              | POWER | 3.7 kW                | | Q.TY  | 1 SET                   |       |                       | |







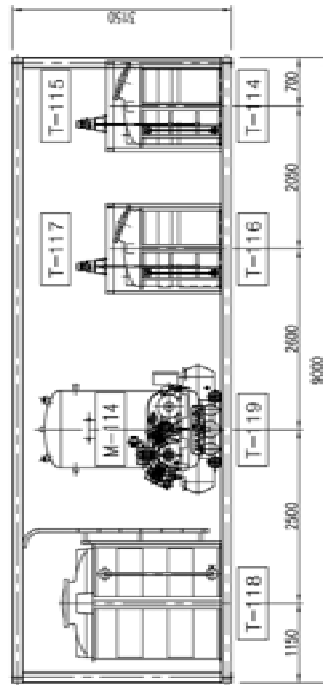
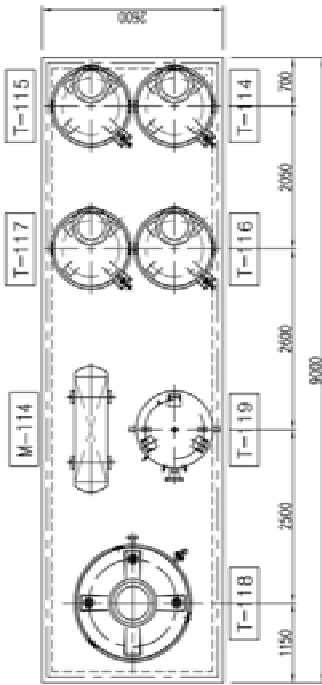






⑦ 모듈 7(약품공급 탱크)

SPECIFICATION	
UNIT NAME	약품공급 탱크 (모듈 7)
T-114 + P-119 계량수조탱크 + 펌프	CAPA, 1 m <sup>3</sup> SIZE, Ø1000×1000H POWER, 1.5 kW + 1.5 kW Q.TY, 1 SET
T-115 + P-114 공급수조탱크 + 펌프	CAPA, 1 m <sup>3</sup> SIZE, Ø1000×1000H POWER, 1.5 kW + 1.5 kW Q.TY, 1 SET
T-116 + P-115 용출조탱크 + 펌프	CAPA, 1 m <sup>3</sup> SIZE, Ø1000×1000H POWER, 1.5 kW + 2.2 kW Q.TY, 1 SET
T-117 + P-116 용출조탱크 + 펌프	CAPA, 1 m <sup>3</sup> SIZE, Ø1000×1000H POWER, 1.5 kW + 2.2 kW Q.TY, 1 SET
T-118 시스템여과탱크	CAPA, 5 m <sup>3</sup> SIZE, Ø2000×3000H POWER, - Q.TY, 1 SET
P-117 압축공기펌프	CAPA, 15 kW/hr RFID, 150 mH POWER, 15 kW Q.TY, 1 SET
P-118 시스템여과탱크	CAPA, 10 kW/hr RFID, 20 mH POWER, 3.7 kW Q.TY, 1 SET
P-119 시액수공급펌프	CAPA, 60 kW/hr RFID, 20 mH POWER, 15 kW Q.TY, 1 SET
M-114 배양조/여과사	CAPA, 2 m <sup>3</sup> SIZE, - POWER, 11 kW Q.TY, 1 SET
T-119 배양조시버탱크	CAPA, 2 m <sup>3</sup> SIZE, - POWER, - Q.TY, 1 SET







⑩ 모듈 10 (가압부상/여과장치)

SPECIFICATION	
UNIT NAME	가압부상 여과장치 (모듈 10)
M-111	CAPA, 40 m <sup>3</sup> /hr
충성여과장	SIZE, 0200×0450H
	POWER, -
	Q.TY, 2 SET
T-112	CAPA, 40 m <sup>3</sup> /hr
가압부상조	SIZE, 2100×0800×0030H
	POWER, 7.7 kW
	Q.TY, 2 SET
P-109	CAPA, 15 m <sup>3</sup> /hr
여과필트	HEAD, 20 mm
	POWER, 11 kW
	Q.TY, 1 SET





수저오염퇴적물 정화처리시스템  
( 35 TON/HR PLANT )

2016 년 11월

한국해양과학기술원 (KIOST)

\*\*\* 본 설계는 계약자 간의 "인용, 시공, 유지관리" 등 100%의 책임이 포함된 것으로 책임자의 확인을 득하지 않고 "비, 도급, 시공" 책임에서 인계해상의 모든 책임의 부담을 지고 있습니다.\*\*\* (본 도면은 상용화상 등의 이유로 다소 변경될수 있습니다.)

제 목	내 용	단 위	수 량	단 가	총 가	비고
한국해양과학기술원 (KIOST)	PROJECT NAME	포항 동빈내항 오염퇴적물 정화사업				

- ※ 포항 동빈내항 해양오염퇴적물 정화·복원사업 실시설계에 제안 ('17년 정화사업 예정)
- 주 1] 해양오염퇴적물 정화사업 현장에서 사용하는 흡입식 설비에 의한 평균 수거량: 350 m<sup>3</sup>/h
- 주 2] 흡입식 설비로 수거시 함니율은 약 10%로서 실제 퇴적물 수거량은 약 35 m<sup>3</sup>/h임
- 주 3] 정화사업 현장에 적용을 상정하여 기존 설계(10 톤/시간, 건중량)를 용량 증대 등 보완하여 상용규모(35 톤/시간, 건중량) 상세설계 함

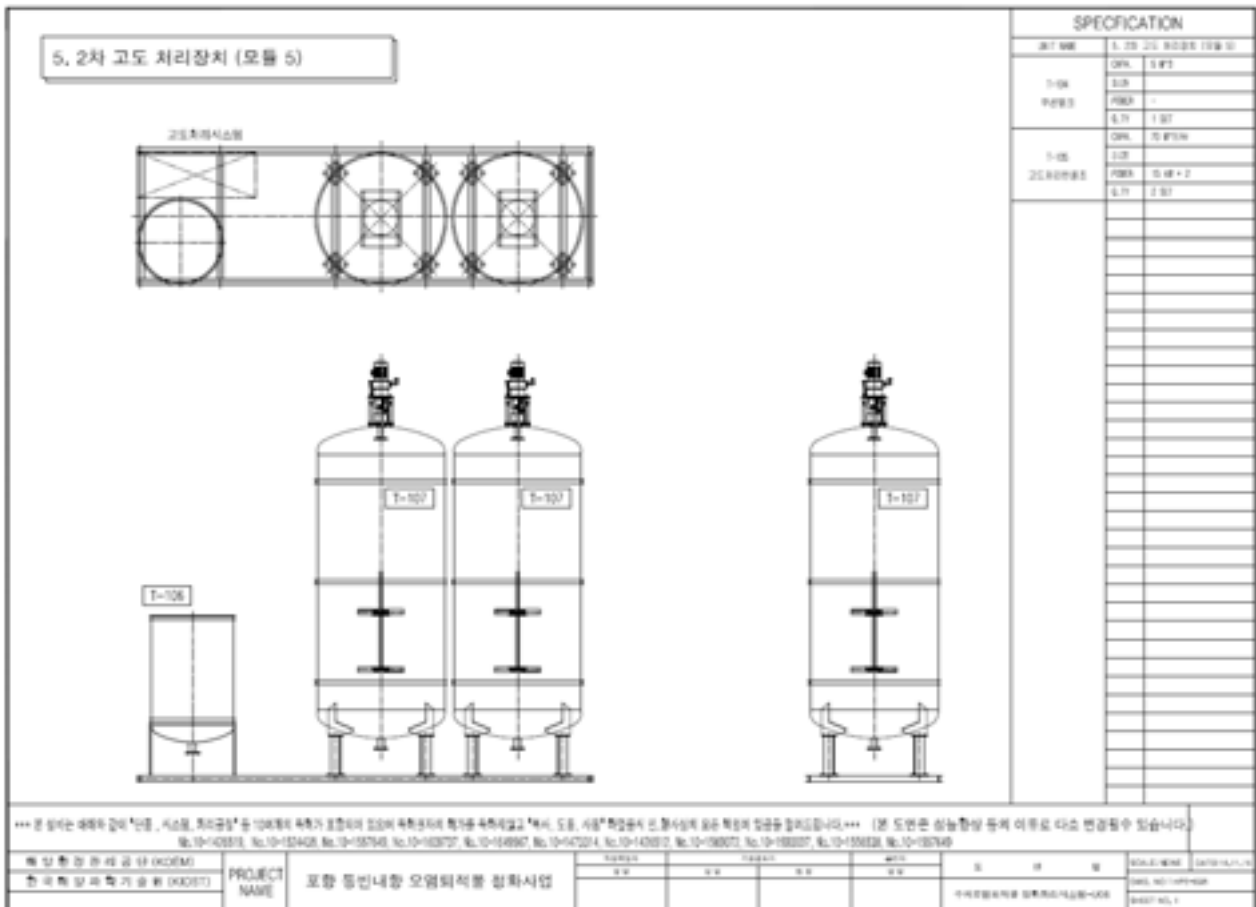
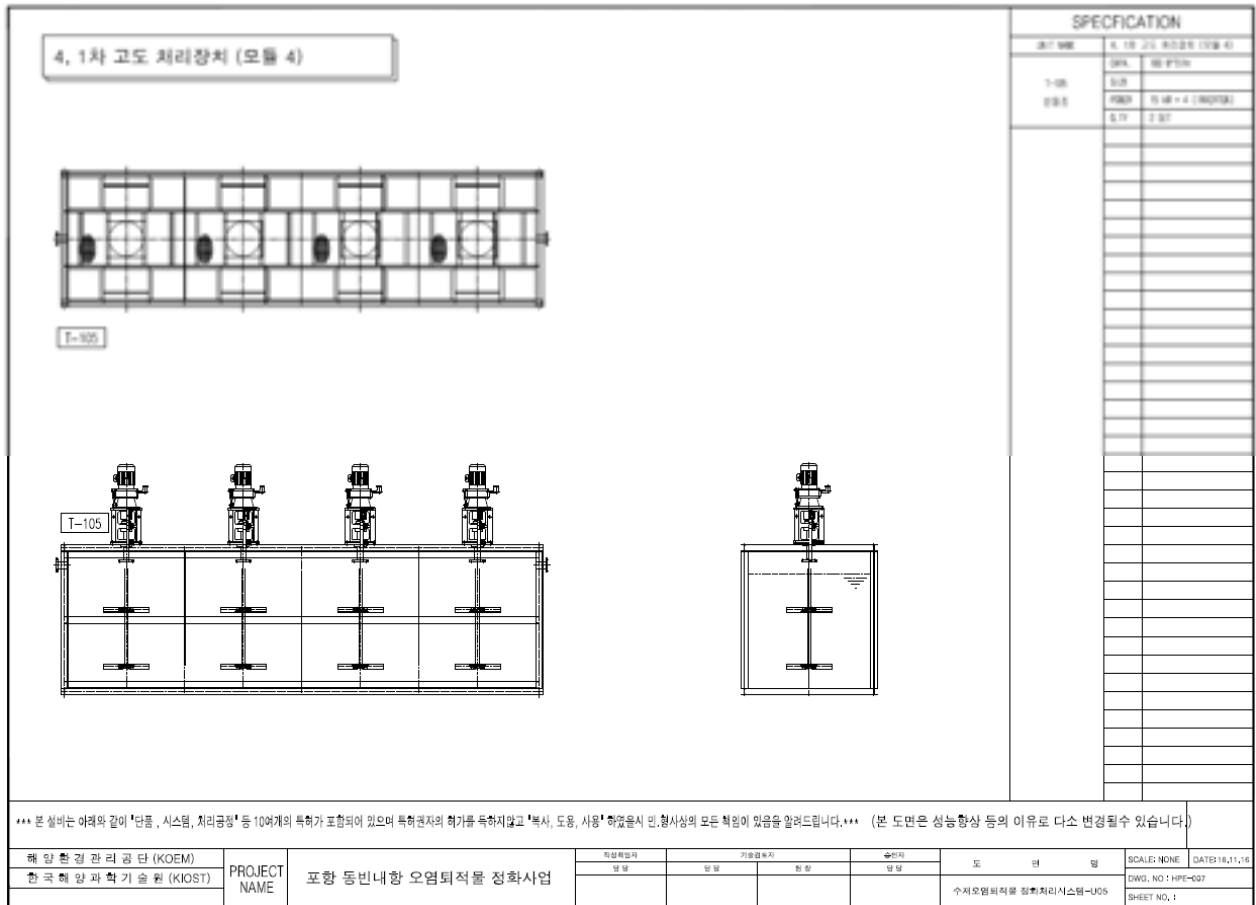




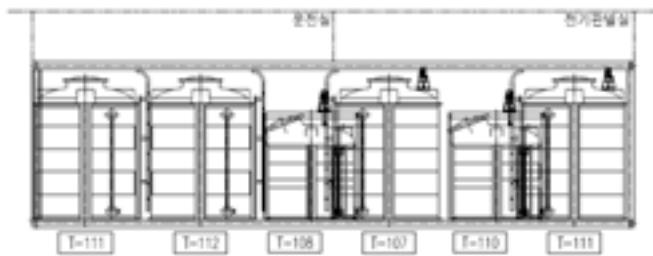
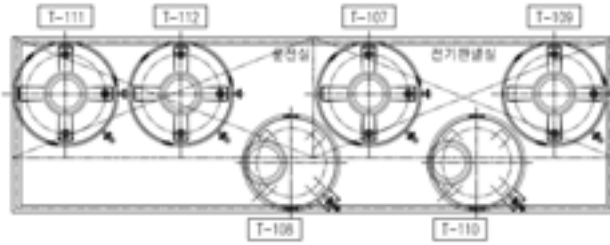


2. 1차 입자 선별장치 (모듈 2)		SPECIFICATION									
	모듈 번호	E-101	모듈 크기 (W×H×D)								
	W-102	입력	DN, 30 150A								
		출력	DN, 30 150A								
		중요성	중요								
	W-104	입력	DN, 30 150A								
		출력	DN, 30 150A								
		중요성	중요								
	E-101	입력	DN, 30 150A								
		출력	DN, 30 150A								
		중요성	중요								
	E-102	입력	DN, 30 150A								
		출력	DN, 30 150A								
중요성		중요									
E-103	입력	DN, 30 150A									
	출력	DN, 30 150A									
	중요성	중요									
<p>*** 본 장비는 배터리 없이 '인동, 시멘트, 자갈' 등 100kg의 무게가 포함되어 있으며 육중물의 취급을 목적으로 '배터, 도동, 시멘트' 취급용이므로 철사망의 굵은 특성의 입상을 금지합니다.*** (본 도면은 성능향상 목적 이유로 다소 변경될 수 있습니다.)          해당도면의 적용 순서(순서) : No.10-10310, No.10-10340, No.10-10350, No.10-10370, No.10-10380, No.10-10390, No.10-10400, No.10-10410, No.10-10420, No.10-10430, No.10-10440, No.10-10450, No.10-10460, No.10-10470, No.10-10480, No.10-10490</p>											
제 1 차 입 자 선 별 장 치 (M O D E L)	PROJECT NAME	포항 동진내항 오염퇴적물 정화사업	SCALE: 1/10	DATE: 2014.11.14							
한국해양과학기술원 (KIOST)			도	시	구	동	로	번	길	NO. 10-10310	NO. 10-10310
											NO. 10-10310

3. 2차 입자 선별장치 (모듈 3)		SPECIFICATION									
	모듈 번호	E-102	모듈 크기 (W×H×D)								
	W-105	입력	DN, 30 150A								
		출력	DN, 30 150A								
		중요성	중요								
	E-102	입력	DN, 30 150A								
		출력	DN, 30 150A								
		중요성	중요								
	E-103	입력	DN, 30 150A								
		출력	DN, 30 150A								
		중요성	중요								
	E-104	입력	DN, 30 150A								
		출력	DN, 30 150A								
중요성		중요									
E-105	입력	DN, 30 150A									
	출력	DN, 30 150A									
	중요성	중요									
<p>*** 본 장비는 배터리 없이 '인동, 시멘트, 자갈' 등 100kg의 무게가 포함되어 있으며 육중물의 취급을 목적으로 '배터, 도동, 시멘트' 취급용이므로 철사망의 굵은 특성의 입상을 금지합니다.*** (본 도면은 성능향상 목적 이유로 다소 변경될 수 있습니다.)          해당도면의 적용 순서(순서) : No.10-10310, No.10-10340, No.10-10350, No.10-10370, No.10-10380, No.10-10390, No.10-10400, No.10-10410, No.10-10420, No.10-10430, No.10-10440, No.10-10450, No.10-10460, No.10-10470, No.10-10480, No.10-10490</p>											
제 2 차 입 자 선 별 장 치 (M O D E L)	PROJECT NAME	포항 동진내항 오염퇴적물 정화사업	SCALE: 1/10	DATE: 2014.11.14							
한국해양과학기술원 (KIOST)			도	시	구	동	로	번	길	NO. 10-10310	NO. 10-10310
											NO. 10-10310



6. 약품공급 탱크 (모듈 6)



JIT NO	구분	단위	수량
A-08	OPN	3.870	
	WLD	10.000	
	FRM	3.748	
	단위	1.927	

SPECIFICATION		
JIT NO	구분	
1-07	OPN	3.870
	WLD	10.000
	FRM	3.748
	단위	1.927
1-08	OPN	3.870
	WLD	10.000
	FRM	3.748
	단위	1.927
1-09	OPN	3.870
	WLD	10.000
	FRM	3.748
	단위	1.927
1-10	OPN	3.870
	WLD	10.000
	FRM	3.748
	단위	1.927
1-11	OPN	3.870
	WLD	10.000
	FRM	-
	단위	1.927
1-12	OPN	3.870
	WLD	10.000
	FRM	-
	단위	1.927
A-09	OPN	3.870
	WLD	10.000
	FRM	3.748
	단위	1.927
A-10	OPN	3.870
	WLD	10.000
	FRM	3.748
	단위	1.927

\*\*\* 본 도면은 해당 설계 "단종, 시스도, 최리공정" 등 10여개의 특허가 포함되어 있으며 특허권자의 허가를 취득하였고 "특시, 도용, 사형" 취급하여 신중히 사용의 요구 사항을 준수하십시오. (본 도면은 상설항상 통해 이유로 다시 변경될수 있습니다.)  
 No.19-142819, No.19-152428, No.19-157548, No.19-163737, No.19-168947, No.19-172214, No.19-142812, No.19-168272, No.19-168273, No.19-168274, No.19-168275, No.19-168276, No.19-168277

특수환경관리공정 (KOCOM)	PROJECT NAME	포항 동진내항 오염퇴적물 정화사업	구분	수량	단위	비고	설계	시공	비고	제출일	2024.05.14
한국환경과학기술원 (KOST)										수정일	2024.05.14

7. 운전실 (모듈 7)



SPECIFICATION		
JIT NO	구분	
A-10	OPN	-
	WLD	-
	FRM	-
	단위	1.927

\*\*\* 본 도면은 해당 설계 "단종, 시스도, 최리공정" 등 10여개의 특허가 포함되어 있으며 특허권자의 허가를 취득하였고 "특시, 도용, 사형" 취급하여 신중히 사용의 요구 사항을 준수하십시오. (본 도면은 상설항상 통해 이유로 다시 변경될수 있습니다.)  
 No.19-142819, No.19-152428, No.19-157548, No.19-163737, No.19-168947, No.19-172214, No.19-142812, No.19-168272, No.19-168273, No.19-168274, No.19-168275, No.19-168276, No.19-168277

특수환경관리공정 (KOCOM)	PROJECT NAME	포항 동진내항 오염퇴적물 정화사업	구분	수량	단위	비고	설계	시공	비고	제출일	2024.05.14
한국환경과학기술원 (KOST)										수정일	2024.05.14





### (아) 결론

- 모듈화 공정을 적용한 해양오염퇴적물 현장처리기술은 단계별 입자분리, 세척 및 고도처리 공정을 통합한 복합공정으로 유기물 등 부영영화 물질을 처리할 수 있을 뿐만 아니라 일부 중금속(Cu, Zn, Cd)의 동시 처리도 가능하도록 설계하였고, 적용 대상 해역의 특성 및 퇴적물의 오염정도에 따라 필요한 각 단위 처리장치들이 독립적으로 분리, 이동, 재배치, 재조합이 가능하도록 모듈화 하였음.
- 상용규모 현장처리기술 공정 설계 시 가장 큰 설계변수인 모듈장치의 육상 이동성에 대해 도로법, 도로교통법 등 화물의 적재 및 운반에 관한 관련 법령을 검토하여 처리용량을 산정한 결과, 육상이송 및 경제성을 고려하여 모듈화가 가능한 적정 처리용량은 10 ton/h로 설계하였음.
- 해상바지선의 규모는 W20,000 x L35,000 x H4,000 으로 1대의 바지선에서 모듈화 정화설비의 설치, 조립, 운영 및 해체/철거 등 오염퇴적물 정화복원사업이 모두 이루어질 수 있도록 설계하였고, 총 적재중량은 약 1,400톤으로 연안 해상에서 발생할 수 있는 현장여건을 충분히 고려하여 바지선을 설계하였음.
- 본 상용규모 상세설계는 N해역의 오염특성 및 퇴적물의 물리적 특성을 고려하여 설계하였으나, 정화대상 해역별 물리적 특성 및 오염특성에 따라 단위장치의 재조립, 이동, 재배치를 통해 국내 모든 해역의 부영양화 물질을 정화할 수 있도록 수정 및 변경이 가능하도록 설계하였음.
- 각 모듈별 독립적인 기능을 갖는 총 12개의 모듈장치로 분류하였음. 물리적, 기계적 탈착을 통한 오염물질을 제거하는 1차 입자분리장치(모듈 1), 2차 입자분리/고도처리 장치(모듈 2), 부영양화물질 제거를 위한 반응처리/분급장치(모듈 3), 고도처리 후 발생된 폐수 처리공정인 응집침전 장치(모듈 4), 실트성 정화산물을 배출하는 1차 탈수처리 장치(모듈 5), 점토성 처리산물을 배출하는 2차 탈수처리 장치(모듈 6), 약품공급 탱크(모듈 7), 각종 저장탱크(모듈 8), 준설된 오염퇴적물을 세척공정에 투입하기 위한 원료투입장치(모듈 9), 스킴 및 부유물질 제거를 위한 가압부상/여과장치(모듈 10), 오염퇴적물을 저장조(모듈 11) 및 전체 장치의 운전제어를 담당하는 전기실 및 운전실(모듈 12)으로 모듈화 설계하였음.

### 사. 해양오염퇴적물 오염특성별 해역유형 구분 기준에 의한 최적 정화공법 선정 의사결정 도구 개발(KIOST)

#### (1) 오염특성별 해역유형 구분 및 적용해역의 특성별 분류

##### (가) 국내·외 관련 사례 검토

- 현재 우리나라의 관련 사례는 해양오염퇴적물 정화·복원 사업 실무지침서<sup>42)</sup>가 있음
- 실무지침서는 다음 사항을 제시하고 있음
  - 오염해역 퇴적물 정화복원 원칙 수립
  - 해양오염퇴적물 현황 조사계획 수립 및 조사방법
  - 오염물질 제어방안 및 해양오염퇴적물 처리방안 체계도
  - 정화복원사업 효과 검증, 해역 환경관리 방안
  - 조사 지침서 및 모니터링 방법
- 실무지침서는 오염특성별 해역유형 구분은 포함되어 있지 않음

- 국외 사례 검토 결과는 다음과 같음
- 미국 환경보호청(USEPA)의 오염물질 정화기술 평가방안<sup>43)</sup>
  - 정화기술 평가는 정화기술 선택 행렬(The remediation Technologies Screening Matrix: RTSM)을 사용하고 있으며, 주요 변수로는 오염원, 기술 개발상태, 총 비용, 소요 시간을 포함함
- 미국 육군 공병대 기술연구센터의 환경준설 기술지침<sup>44)</sup>
  - 정화기술 선정 시 사전에 대상 해역 조건(수심, 해저지형, 해황 등)과 퇴적물 특성(입도, 오염도 등)을 평가하며,
  - 수계로의 접근, 해역의 이용목적, 주변 인프라, 운송/처리 부지, 제한 시기, 생물 서식 및 주변 해역 수질 및 대기질 등을 고려하며,
  - 정화과정에서 2차 오염 등 환경에 영향을 미치지 않도록 가장 적합한 정화기술을 선정하도록 규정함
- 일본 항만 다이옥신류 대책 기술지침<sup>45)</sup>
  - 해양오염퇴적물 정화·복원 사업에서 주로 ①환경준설(Environmental Dredging) 및 처리, 처분(유효활용 포함), ②현장 피복(In-situ capping), ③현장 고화(In-situ solidification)가 사용됨
  - 정화방법의 선정은 위험 저감효과, 시공의 난이도, 2차 오염의 위험, 비용 등을 평가하며,
  - 기존 구조물에 대한 영향, 해역 이용에 대한 영향을 고려하며,
  - 해역 특성에 가장 적합한 정화 방법을 선정함
- 선진국의 정화·복원 기술 선정 사례 검토 결과는 다음과 같음
- 미국의 해양오염퇴적물 정화·복원 기술 적용 현황
  - 1980년 폐기물에 의해 오염된 환경을 복원하기 위한 법률(The Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act: CERCLA)을 제정 후 조성된 슈퍼펀드(Superfund)를 재원으로 현재까지 약 150개 이상의 오염지역을 정화·복원함
  - 주로 사용된 기술의 비율은 단순 매립 또는 적절한 처리 후 매립이 36.2%(46건), 오염도 저감 등 중간처리 후 최종처리(처분)이 9.5%(12건), 수중 고립 처분이 4.7%(6건), 현장 처리/처분은 1.6%(2건)임<sup>46)</sup>
- 일본의 해양오염퇴적물 정화·복원 기술 적용 현황<sup>47),48)</sup>
  - 일본에서는 주로 해역의 특성(지형, 수심, 해황, 서식 생물, 어민 조업 시기 등)과 퇴적물의 특성(입도, 오염도 등)을 고려하여 정화 기술을 선정하여 사용함
  - 특히 기술지침<sup>49)</sup>에 따라 준설(환경준설 포함)사업에서 발생하는 퇴적물을 정화기술로 적절하게 처리한 다음 가능한 부분까지 모두 유효활용하고 그 나머지 최소한의 양을 해양배출 등으로 최종처분하고 있음
  - 주로 사용되는 기술은 ①입자분리, ②탈수·건조, ③물리·화학적 세척, ④고화·안정화 및 ⑤소성가공임

#### (나) 해역유형 및 오염도 구분 방안

- 본 연구팀에서는 1차년도('11.8.16-'12.8.15) 연구기간 동안 “해역(오염)유형별 최적 정화공법 선정 의사결정 도구(초안)”을 개발 하였으며,



- 해양오염퇴적물 정화·복원사업 대상 해역(총 25개 해역)을 평가한 결과 현장 피복 및 현장 처리기술 적용을 위한 후보 해역으로서 적합한 6개 해역과 수거 후 정화 기술 적용에 적합한 7개 해역을 제시하였음
- 5차년도 연구기간 동안 1차년도 연구결과를 보완하기 위하여 ①해역유형 구분 방안과 ②오염도 구분 방안을 연구한 결과는 다음과 같음
- 해역유형 구분 방안
  - 국내·외 관련 사례, 해양조사로부터 습득한 지식 그리고 실제 해역 상태를 평가한 결과 해역유형은 ①지형적 특성, ②이용목적 그리고 ③오염도에 따라 구분하는 것이 타당함
- 연구결과 지형적 특성에 따른 해역유형 구분은 다음과 같음
  - 지형적 특성에 따라 해수의 순환 및 소통, 서식 생물의 이동, 용존산소 등 해양환경을 구성하는 주요 요소가 변화할 수 있음
  - 주요 요소 변동을 고려하면, 지형적 특성은 ①열린 해역(Open sea area), ②반폐쇄 해역(Half closed sea area), ③폐쇄 해역(Closed sea area)로 구분할 수 있음
  - 열린 해역은 해수의 소통 등 상기 주요 요소에 현격한 문제가 없는 해역임



[그림. V-사-1] 열린 해역 사례

- 폐쇄 해역은 방파제, 교각 등 인공구조물 또는 지형적 특성으로 해수의 순환 등 상기 주요 요소에 문제가 발생하여 해양환경에 현격한 영향을 미치는 해역임



[그림. V-사-2] 폐쇄 해역 사례

- 반폐쇄 해역은 상기 주요 요소에 문제가 있어서 해양환경에 다소 영향을 미치는 해역임



[그림. V-사-3] 반폐쇄 해역 사례

- 반폐쇄 해역의 사례로서 그림 V-사-3과 같이 탁도가 다소 높은 해역의 항만 구역 내부와 외부의 해수 소통 등이 원활하지 않은 경우 항만 구역 내부에는 해수가 정체되어 바닥까지 투명하게 보이는 사례도 있음
- 연구결과 이용목적에 따른 해역유형 구분은 다음과 같음
  - 단순 해역은 한 가지 목적으로 대상 해역을 이용하는 경우임
  - 복합 해역은 주거, 상업, 산업, 유통, 여가, 관광 등 적어도 두 가지 이상의 목적으로 대상 해역을 이용하는 경우임
- 연구결과 퇴적물의 오염도에 따른 해역유형 구분은 다음과 같음
  - 정화복원 대상 해역 퇴적물의 오염도는 오염의 정도에 따라 ①오염도 높음, ②오염도 보통, ③오염도 낮음으로 구분하는 것이 타당함
  - 오염도 높음: 정화·복원 대상 구역의 평균 유해화학물질정화지수가 6 이상이며, 대상 구역 중 유해화학물질정화지수가 6 이상인 구역이 80% 이상인 해역
  - 오염도 보통: 정화·복원 대상 구역의 평균 유해화학물질정화지수가 2 이상이며, 대상 구역 중 유해화학물질정화지수가 1 이상인 구역이 50% 이상인 해역
  - 오염도 낮음: 오염되지 않은 해역을 제외한 나머지 정화복원 대상 해역

## (2) 의사결정 도구(고시안) 개발

### (가) 의사결정 도구 개발 방향

- 1차년도('11.8.16~'12.8.15) 연구결과, “해역(오염)유형별 최적 정화공법 선정 의사결정 도구(초안)”를 기초로 5차년도 연구결과인 ①해역유형 구분 방안과 ②오염도 구분 방안을

---

보완하여 의사결정 도구(고시안)을 개발함

- 특히 자연정화, 현장피복 및 수거 공법 선정 절차를 보완하며,
- 해역 유형 및 오염도에 따른 평가 방법 (별표 1)과
- 수거 해양오염퇴적물 처리 공법 선정 절차 (별표 5)를 개발함

**(나) 해역 유형 및 오염도에 따른 정화공법 선정 의사결정 도구(고시안)**

- 본 연구의 결과로 개발된 “해역 유형 및 오염도에 따른 정화공법 선정 의사결정 도구”(고시안)는 별첨함

※ 2016년 11월 10일 해양수산부(해양환경정책관실 해양보전과)에 고시안 제출

**해역 유형 및 오염도에 따른 정화공법 선정 의사결정 도구 (고시(안))**

**제1장 총칙**

**제1조(목적)** 이 규정은 해양환경관리법 제18조(해양환경개선조치) 제1항의3호 ‘오염된 퇴적물의 수거’(이하 “법”이라함) 및 해양오염퇴적물 조사 및 정화복원 범위 등에 관한 규정 해양수산부고시 제2016-80호(이하 “고시”라 함)에 따른 정화·복원사업에서 해역 유형 및 퇴적물의 오염도에 적합한 정화공법을 선정 할 때 절차나 기준 등을 정함을 목적으로 한다.

**제2조(정의)** 이 규정에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

1. “자연정화”란 퇴적물에 함유된 오염물질 등을 생물·화학적 반응 등 자연환경의 자정작용을 촉진시켜서 퇴적물을 정화시키는 공법을 말한다.

**제2장 정화공법 선정 절차 등**

**제3조(전제 조건)** 해양오염퇴적물 정화·복원사업을 실시하기 위해서는 다음 조건에 적합하여야 한다.

1. 우려지역 오염 현황을 정확하게 조사, 평가하여 대상 범위 및 물량을 산정
2. 대상 지역 오염 방지 및 오염원 관리 조치 실시
3. 오염원 관리 조치 후 더 이상의 오염물질 유입되지 아니할 경우, 정화·복원사업 의사 결정

**제4조(대상 지역 및 퇴적물 특성 평가)** 정화·복원사업 대상 지역 및 퇴적물 특성 평가는 고시에 따르며, 고시에 규정되어 있지 아니한 사항은 다음 절차에 의한다.

1. 대상 지역 평가
  - 가. 대상 지역의 지형적인 특성과 이용목적을 평가
  - 나. 정화·복원사업 조건과 계획을 사전 검토
2. 퇴적물 특성 평가
  - 가. 수계로의 접근
  - 나. 주변 인프라
  - 다. 운송/처리 부지

---

**제5조(정화·복원 목적 및 정화 수준 설정)** ① 대상 지역 정화·복원사업의 목적을 구체적으로 설정하여야 한다.

② 대상 퇴적물의 오염을 어느 정도 수준으로 저감 또는 관리할 것인지 다음 각 호에 따라 정화 수준을 설정하여야 한다.

1. 대상해역 퇴적물의 오염도를 저감시켜서 다양한 목적으로 유효활용 하기 위하여 관련 환경기준을 충족시켜야 한다.
2. 오염도를 저감시킨 퇴적물의 성질과 상태가 선정된 유효활용 목적에 적합하여야 한다.

**제6조(정화공법 선정)** ① 정화공법은 다음 각 호 중 하나 또는 여러 공법을 선정할 수 있다.

1. 자연정화
2. 현장피복
3. 수거

② 자연정화방법을 선정하는 절차는 별표 2와 같다.

③ 현장피복방법을 선정하는 절차는 별표 3과 같다.

④ 수거는 제2항 및 제3항에 따른 공법 선정이 적합하지 아니하는 경우 선정할 수 있다.

1. 해양오염퇴적물을 수거하기 위해서는 정화복원사업 의사결정 전에 수거 예정 해양오염퇴적물의 처리(중간, 최종, 재활용 포함) 방안을 선정하여야 한다

**제7조(자연정화 공법 선정)** ① 자연정화 공법 선정 시 자연환경의 자정작용을 촉진시키기 위하여 다음 각 호의 방법을 사용할 수 있다.

1. 퇴적물에 함유된 유기 오염물질의 분해를 촉진시키기 위한 산화제 등 물질의 배치
2. 해수의 순환을 원활하게 하기 위한 기술 또는 방법의 적용

② 자연정화 공법을 사용하는 경우, 공법 사용 전, 후 자연정화의 효과를 평가하고, 대상 지역을 관리하기 위하여 모니터링을 실시하여야 한다.

③ 모니터링 결과에 따라 대상 지역의 환경을 관리하기 위하여 필요한 조치를 취할 수 있다.

**제8조(현장피복 공법 선정)** ① 현장피복을 위해서는 오염된 퇴적물 위에 오염되지 않은 물질을 배치하여 오염물질이 수층 등 외부환경으로 유출 또는 누출되거나 미치는 영향을 물리적, 화학적 또는 복합적 방법으로 차단시키는데 적합한 공법을 선정하여야 한다.

② 현장피복 공법은 다음 각 호의 조건을 충족시켜야 한다.

1. 피복소재는 천연물질 또는 인공물질 등을 가공하거나 그대로 사용할 수 있다.
2. 피복소재 배치 시 오염을 차단하는 층과 외부환경 변화로부터 피복층을 보호하기 위한 보호층을 각각 배치할 수 있다.
3. 피복소재를 배치할 때는 해저면에 가장 가까운 위치에서 포설하여 탁도 발생 등 2차 오염 또는 해양환경에 저해현상이 발생하지 않도록 적합한 공법을 선정, 사용하여야 한다.
4. 피복층과 보호층은 태풍 등 50년 주기 해황에도 불구하고 형상을 유지하고, 저서생물의 침투를 배제할 수 있어야 하며, 선박활동 등으로부터 침식되지 않도록 포설하여 관리하여야 한다.

③ 현장피복 공법을 사용하는 경우, 공법 사용 전, 후 자연정화의 효과를 평가하고, 대상 지역을 관리하기 위하여 모니터링을 실시하여야 한다.

---

---

④ 모니터링 결과에 따라 대상 지역의 환경을 관리하기 위하여 필요한 조치를 취할 수 있다.

**제9조(수거 공법 선정)** ① 정화공법으로서 수거를 선정할 경우, 적합한 공법(장비)를 선정하는 절차는 별표 4 및 별표 5와 같다.

② 해양오염퇴적물의 수거 시 탁도 등 2차 오염이 발생하지 않고, 주변 해역 환경을 교란하지 않도록 적합한 수거공법을 선정, 사용하여야 한다.

③ 수거 해양오염퇴적물의 처리는 유효활용 등 최종처리에 관련된 환경기준과 다음 각 호를 충족시킬 수 있는 처리 공법(장치)를 사용하여야 한다.

1. 처리과정에서 악취발생 등 2차 오염을 유발하지 않아야 한다.

2. 처리과정에서 적절하지 않게 처리된 액상 등으로 주변 해역 환경에 영향을 미치지 않아야 한다.

3. 처리과정에서 발생하는 폐기물 또는 폐액 등은 관련 규정에 따라 환경에 안전하게 처리 및 처분하여야 한다.

## [참고]

### 해역 유형 및 오염도에 따른 정화공법 선정 의사결정 도구 (고시(안))

## 제1장 총칙

**제1조(목적)** 이 규정은 해양환경관리법 제18조(해양환경개선조치) 제1항의3호 ‘오염된 퇴적물의 수거’(이하 “법”이라함) 및 해양오염퇴적물 조사 및 정화복원 범위 등에 관한 규정 해양수산부고시 제2016-80호(이하 “고시”라 함)에 따른 정화·복원사업에서 해역 유형 및 퇴적물의 오염도에 적합한 정화공법을 선정 할 때 절차나 기준 등을 정함을 목적으로 한다.

**제2조(정의)** 이 규정에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

1. “자연정화”란 퇴적물에 함유된 오염물질 등을 생물·화학적 반응 등 자연환경의 자정작용을 촉진시켜서 퇴적물을 정화시키는 공법을 말한다.

## 제2장 정화공법 선정 절차 등

**제3조(전제 조건)** 해양오염퇴적물 정화·복원사업을 실시하기 위해서는 다음 조건에 적합하여야 한다.

1. 우려지역 오염 현황을 정확하게 조사, 평가하여 대상 범위 및 물량을 산정

2. 대상 지역 오염 방지 및 오염원 관리 조치 실시

3. 오염원 관리 조치 후 더 이상의 오염물질 유입되지 아니할 경우, 정화·복원사업 의사 결정

**제4조(대상 지역 및 퇴적물 특성 평가)** 정화·복원사업 대상 지역 및 퇴적물 특성 평가는 고시에 따르며, 고시에 규정되어 있지 아니한 사항은 다음 절차에 의한다.

1. 대상 지역 평가

가. 대상 지역의 지형적인 특성과 이용목적을 평가

- 나. 정화·복원사업 조건과 계획을 사전 검토
- 2. 퇴적물 특성 평가
  - 가. 수계로의 접근
  - 나. 주변 인프라
  - 다. 운송/처리 부지

**제5조(정화·복원 목적 및 정화 수준 설정)** ① 대상 지역 정화·복원사업의 목적을 구체적으로 설정하여야 한다.

- ② 대상 퇴적물의 오염을 어느 정도 수준으로 저감 또는 관리할 것인지 다음 각 호에 따라 정화 수준을 설정하여야 한다.
  1. 대상해역 퇴적물의 오염도를 저감시켜서 다양한 목적으로 유효활용 하기 위하여 관련 환경기준을 충족시켜야 한다.
  2. 오염도를 저감시킨 퇴적물의 성질과 상태가 선정된 유효활용 목적에 적합하여야 한다.

**제6조(정화공법 선정)** ① 정화공법은 다음 각 호 중 하나 또는 여러 공법을 선정할 수 있다.

1. 자연정화
  2. 현장피복
  3. 수거
- ② 자연정화방법을 선정하는 절차는 별표 2와 같다.
  - ③ 현장피복방법을 선정하는 절차는 별표 3과 같다.
  - ④ 수거는 제2항 및 제3항에 따른 공법 선정이 적합하지 아니하는 경우 선정할 수 있다.
    1. 해양오염퇴적물을 수거하기 위해서는 정화복원사업 의사결정 전에 수거 예정 해양오염퇴적물의 처리(중간, 최종, 재활용 포함) 방안을 선정하여야 한다

**제7조(자연정화 공법 선정)** ① 자연정화 공법 선정 시 자연환경의 자정작용을 촉진시키기 위하여 다음 각 호의 방법을 사용할 수 있다.

1. 퇴적물에 함유된 유기 오염물질의 분해를 촉진시키기 위한 산화제 등 물질의 배치
  2. 해수의 순환을 원활하게 하기 위한 기술 또는 방법의 적용
- ② 자연정화 공법을 사용하는 경우, 공법 사용 전, 후 자연정화의 효과를 평가하고, 대상 지역을 관리하기 위하여 모니터링을 실시하여야 한다.
  - ③ 모니터링 결과에 따라 대상 지역의 환경을 관리하기 위하여 필요한 조치를 취할 수 있다.

**제8조(현장피복 공법 선정)** ① 현장피복을 위해서는 오염된 퇴적물 위에 오염되지 않은 물질을 배치하여 오염물질이 수층 등 외부환경으로 유출 또는 누출되거나 미치는 영향을 물리적, 화학적 또는 복합적 방법으로 차단시키는데 적합한 공법을 선정하여야 한다.

- ② 현장피복 공법은 다음 각 호의 조건을 충족시켜야 한다.
  1. 피복소재는 천연물질 또는 인공물질 등을 가공하거나 그대로 사용할 수 있다.
  2. 피복소재 배치 시 오염을 차단하는 층과 외부환경 변화로부터 피복층을 보호하기 위한 보호층을 각각 배치할 수 있다.
  3. 피복소재를 배치할 때는 해저면에 가장 가까운 위치에서 포설하여 탁도 발생 등 2차 오염

---

또는 해양환경에 저해현상이 발생하지 않도록 적합한 공법을 선정, 사용하여야 한다.

4. 피복층과 보호층은 태풍 등 50년 주기 해황에도 불구하고 형상을 유지하고, 저서생물의 침투를 배제할 수 있어야 하며, 선박활동 등으로부터 침식되지 않도록 포설하여 관리하여야 한다.
- ③ 현장피복 공법을 사용하는 경우, 공법 사용 전, 후 자연정화의 효과를 평가하고, 대상 지역을 관리하기 위하여 모니터링을 실시하여야 한다.
- ④ 모니터링 결과에 따라 대상 지역의 환경을 관리하기 위하여 필요한 조치를 취할 수 있다.

**제9조(수거 공법 선정)** ① 정화공법으로서 수거를 선정할 경우, 적합한 공법(장비)를 선정하는 절차는 별표 4 및 별표 5와 같다.

- ② 해양오염퇴적물의 수거 시 탁도 등 2차 오염이 발생하지 않고, 주변 해역 환경을 교란하지 않도록 적합한 수거공법을 선정, 사용하여야 한다.
- ③ 수거 해양오염퇴적물의 처리는 유효활용 등 최종처리에 관련된 환경기준과 다음 각 호를 충족시킬 수 있는 처리 공법(장치)를 사용하여야 한다.
  1. 처리과정에서 악취발생 등 2차 오염을 유발하지 않아야 한다.
  2. 처리과정에서 적절하지 않게 처리된 액상 등으로 주변 해역 환경에 영향을 미치지 않아야 한다.
  3. 처리과정에서 발생하는 폐기물 또는 폐액 등은 관련 규정에 따라 환경에 안전하게 처리 및 처분하여야 한다.

[별표 1]

**해역 유형 및 오염도에 따른 평가 방법**

(제4조 관련)

다음 절차에 따라 해역 유형 및 퇴적물 오염의 정도를 평가한다.

1. 해역 유형 구분

가. 지형에 따른 구분

- 1) 열린 해역: 해수의 소통과 순환이 원활한 해역
- 2) 반폐쇄성 해역: 해수의 소통과 순환이 원활하지 못한 해역
- 3) 폐쇄성 해역: 해수의 소통과 순환이 원활하지 못하고 정체된 해역

나. 해역의 이용목적에 따른 구분

- 1) 단순 해역: 해역의 이용 목적이 한 가지인 해역
- 2) 복합 해역: 해역의 이용 목적이 두 가지 이상인 해역

2. 퇴적물 오염 정도에 따른 구분

가. 오염도에 따른 구분

- 1) 오염도 높음: 정화·복원 대상 구역의 유해화학물질정화지수가 6 이상이며, 대상 구역 중 유해화학물질정화지수가 6 이상인 구역이 80% 이상인 해역
- 2) 오염도 보통: 정화·복원 대상 구역의 유해화학물질정화지수가 2 이상이며, 대상 구역

---

중 유해화학물질정화지수가 1 이상인 구역이 50% 이상인 해역

3) 오염도 낮음: 오염되지 않은 해역을 제외한 나머지 정화·복원 대상 해역

나. 주요 오염물질에 따른 구분

1) 단순 오염: 부영양화정화지수가 6 이상이거나 또는 유해화학물질정화지수 평가 값이 2를 초과하는 항목이 한 가지인 해역

2) 복합 오염: 부영양화정화지수가 6 이상이며, 유해화학물질정화지수 평가 값이 2를 초과하는 항목이 한 가지 이상인 해역

[별표 2]

### 자연정화 방법 선정 절차

(제6조제2항 관련)

다음 제한 조건에 해당되지 아니할 경우 자연정화방법을 선정할 수 있다.

1. 중금속 등 유해화학물질의 오염도가 높아서 자연의 자정작용으로 정화시키기 곤란한 경우  
(예: 전체 대상 구역 중 퇴적물의 유해화학물질정화지수( $CI_{HC}$ )가 2 이상인 구역이 50% 이상)
2. 지역주민의 생활환경과 직접 관련 되는 지역  
(예: 대상 해역 인근에 주거지역, 수변구역, 횃집 또는 어시장 등 상업시설 존재)
3. 대상 해역에 직접 영향을 미칠 수 있는 산업시설 등 오염원이 존재할 경우
4. 정화·복원 조치가 단기간에 완료되어야 하는 사유가 있는 경우

[별표 3]

### 현장피복 방법 선정 절차

(제6조제3항 관련)

다음 제한 조건에 해당되지 아니할 경우 현장피복 방법을 선정할 수 있다.

1. 유해화학물질 오염도( $CI_{HC}>2$ 인 구역의 정화지수( $CI_{HC}$ ) 평균값 × 정점분포율)가 유기물 오염도( $CI_{ET}>6$ 인 구역의 정화지수( $CI_{ET}$ ) 평균값 × 정점분포율) 보다 높을 경우
2. 정화·복원 조치 시 선박의 통항 등 최소한의 수심 확보가 어려울 경우
3. 대상 지역에서 피복 형상이 장기간 유지 되기 곤란할 경우  
(예: 해황(50년 평균)을 고려 피복이 어렵거나, 선박의 투묘, 양묘 등 영향이 예상되는 지역)
4. 지형 특성으로 시공이 곤란할 경우  
(예: 경사면 또는 퇴적 형상으로 시공이 곤란한 지역)



[별표 4]

**수거 공법 선정 절차**  
(제9조 관련)

수거공법은 다음 절차에 따라 선정한다.

1. 공법의 적합성은 다음과 같이 각 요인별 평가점수의 합을 산정하여 평가한다.

요인	내용
시공능력	해당 공사의 시공토량에 대한 적용성
범용성	현재 존재하는 선박, 기계에 의한 공사의 적용성
상용토질	제거하는 퇴적물에 대한 상용성, 부유 퇴적물의 유무
퇴적심도	제거 퇴적물의 퇴적심도, 층두께에 대한 적용성
퇴적형상	제거 대상 퇴적물이 존재하는 장소의 평면형상
파고, 유속	제거 퇴적 해역의 파고, 조류
장애물	장애물, 쓰레기 등의 혼입에 대한 상용성
선박통항 장애	항행 선박에의 장애 유무, 정도
최종 처리장 규모, 거리	배수 처리의 필요 유무, 최종 처리장의 규모, 거리
시공 장소 제약	준설선, 기계의 규모, 이동성에 의한 적용성
탁도, 분진	제거시의 탁도, 분진 발생량의 많고, 적음
소음, 진동, 악취	제거시의 소음, 진동, 악취의 유무, 많고, 적음
비고	1. 적합성 평가: 좋음(3), 보통(2), 나쁨(1)

2. 각 요인별 적합성 평가 점수의 합이 24점 이상인 경우, 정화복원사업에 활용 가능한 공법(장비)로 평가한다.
3. 활용 가능한 공법(장비) 중 적합성 평가 점수가 높은 순으로 우선순위 공법(장비)로 선정한다.
4. 만약 선정된 공법(장비)으로 시공이 곤란할 경우 차순위 공법(장비)를 선정한다.

**수거 해양오염퇴적물 처리 공법 선정 절차**  
(제9조 관련)

수거 해양오염퇴적물 처리 공법은 다음 절차에 따라 선정한다.

1. 공법의 적합성은 다음과 같이 각 요인별 평가점수의 합을 산정하여 평가한다.

요인	내용
사전 검토	처리대상 물질의 물성과 오염 특성 평가 결과 처리기술에 적합 여부
	처리기술이 대상 오염물질의 정화에 효과적인지 여부
	목적으로 하는 최종 처분 관련 환경 기준을 충족할 수 있는지 여부
	대상 오염물질의 발생량, 보관 방법 및 처리기술 적용 시 운전 가능 여부
	처리기술 적용 시 2차 오염 가능성 및 폐기물 발생 여부
처리기술 적용	처리설비가 대상 오염물질을 보관하기에 적합한지 여부
	주요 처리공정 별 안정적으로 처리되는지 여부(처리 능력)
	주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 및 안전 대책 여부
	환경문제 또는 2차 오염 발생 여부
처리기술 시험 및 평가	처리효율 평가를 위한 평가항목(예: 분석항목(유기물, 중금속 등)) 선정
	전체 공정 중 시료 채취 장소 및 균질화 방법
	처리기술은 최소 2~3회 이상 운전하여 각각 시료를 채취하며, 채취시료는 자체 분석 및 최소 2~3개 공인기관의 맹검 분석(Blinded test) 결과를 기초로
	처리 정도 및 효율을 평가한 결과가 적합 여부
	주변 환경 또는 작업자에게 위험 발생 여부 및 위험 발생 시 안전 대책 유효성 여부
	환경문제 또는 2차 오염 발생 여부 및 정도
	물질수지 및 에너지수지 평가 결과 처리기술이 적합한지 여부
	최종 처리산물이 목적으로 하는 최종 처리(유효활용 포함)에 적합한지 여부
	단위 물량 당 처리 단가 평가결과 처리기술이 적합한지 여부
기타	처리장치의 운전 및 정지에 실제 요구되는 시간이 적합한지 여부
	처리장치의 신뢰성(예: 오작동 여부, 유지·보수 용이성 등) 여부
	발생하는 폐기물(고상·액상)의 양, 성상, 처리 가능성 및 최종 처리 방안
비고	
1. 평가: 좋음(3), 보통(2), 나쁨(1)	

2. 각 요인별 적합성 평가 점수의 합이 40점 이상인 경우, 수거 해양오염퇴적물 처리에 활용 가능한 공법(장비)로 평가한다.

3. 활용 가능한 공법(장비) 중 적합성 평가 점수가 높은 순으로 우선순위 공법(장비)로 선정한다.

4. 만약 선정된 공법(장비)으로 시공이 곤란할 경우 차 순위 공법(장비)를 선정한다.

## 제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

### 제1절. 연구개발 목표의 달성도

#### 1. 연차별 실험목표 달성도

구분	세부 연구개발목표	추진 실적 (%)										연구비 (천원)	
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
1차년도 (‘11-’12)	기본 문헌 및 자료조사												30,000
	반응성 피복소재 개발 -흡착제/산화제												100,000
	피복소재 환경영향저감 성능시험												100,000
	오염지역탐사장비 및 오염도 모니터링 장비기술 조사												30,000
	오염물질 제거능이 우수한 미세조류 선별 및 고농도 세포배양법 선정												50,000
	국내 오염퇴적물-오염특성 기존조사 자료 분석												40,000
	선진처리방법과 비교검토로 해역별 최적정화공법 선정												80,000
	해역 유형 및 오염도에 따른 정화공법 선정 의사 결정도구 개발												80,000
	선박부착형 오탁확산방지 시설 설계												80,000
	오염퇴적물 특성 현장조사												44,000
	피복공법 설계·시공 매뉴얼(안) 기본계획수립												40,000
	해양미생물을 이용한 생물학적 피복 정화 기반기 술 확립												50,000
	오염물질 용출 차단제 개발 및 성능시험												50,000
	부영양물질의 물리화학적처리 기반기술 확립												100,000
	바이오스파장을 통한 부영양 물질의 생물학적 분 해능 향상 성능 실험												100,000
	기능성철강부산물 복토정화제 및 현장처리 정화제 성능평가												30,000
	시험 최적 Eng.방안 도출												20,000
	투자계획/경제적 효과 전망												35,000
경제성평가/정책적 분석												35,000	
정화기술 효율평가 방법개발												70,000	





## 2. 정량적 목표달성도

구분	년도	성과목표	목표치 (건)	달성치 (건)	비고
성과목표 합계	-	국내특허(출원/등록)	20/2	27/15	
		국제특허(출원/등록)	3/0	3/0	
		논문(SCI/비SCI)	21/47	22/51	
		학회발표(국내/국외)	39/11	113/34	
		기술료(기술실시계약)	2	2	
		인력양성(학사/석사/박사)	0/9/1	1/14/5	
		연구개발홍보(세미나, 워크샵등)	10	15	
		기술확산교류(기술교류실적)	15	16	
		정책개발	3	3	
		시험·조사	10	18	
1차년도	2011	국내특허(출원/등록)	2/0	2/0	
		국제특허(출원/등록)	0/0	0/0	
		논문(SCI/비SCI)	3/2	1/3	
		학회발표(국내/국외)	5/0	15/0	
		기술료(기술실시계약)	0	0	
		인력양성(학사/석사/박사)	0/0/0	1/3/1	
		연구개발홍보(세미나, 워크샵등)	2	5	
		기술확산교류(기술교류실적)	3	3	
		시제품 출시(현장처리 피복정화재료 등)	1	0	
		시험·조사	1	1	
2차년도	2012	국내특허(출원/등록)	3/0	3/0	
		국제특허(출원/등록)	0/0	0/0	
		논문(SCI/비SCI)	0/8	5/9	
		학회발표(국내/국외)	6/0	22/4	
		기술료(기술실시계약)	0	0	
		인력양성(학사/석사/박사)	0/0/0	0/2/1	
		연구개발홍보(세미나, 워크샵등)	2	2	
		기술확산교류(기술교류실적)	3	3	
		시험·조사	1	8	
3차년도	2013	국내특허(출원/등록)	4/0	7/4	
		국제특허(출원/등록)	0/0	0/0	
		논문(SCI/비SCI)	3/9	4/11	
		학회발표(국내/국외)	6/2	9/5	
		기술료(기술실시계약)	0	0	
		인력양성(학사/석사/박사)	0/2/1	0/2/2	
		연구개발홍보(세미나, 워크샵등)	2	3	
		기술확산교류(기술교류실적)	3	3	
		정책제안	1	1	
시험·조사	3	4			
4차년도	2014	국내특허(출원/등록)	7/0	10/3	
		국제특허(출원/등록)	0/0	0/0	
		논문(SCI/비SCI)	7/13	4/13	
		학회발표(국내/국외)	12/4	34/12	
		기술료(기술실시계약)	1	0	
		인력양성(학사/석사/박사)	0/3/0	0/4/0	
		연구개발홍보(세미나, 워크샵등)	2	2	
		기술확산교류(기술교류실적)	3	4	
		시험·조사	2	2	

5차년도	2015	국내특허(출원/등록)	4/2	5/8	
		국제특허(출원/등록)	3/0	3/0	
		논문(SCI/비SCI)	8/15	8/15	SCI 2편 심사 중
		학회발표(국내/국외)	10/5	33/13	
		기술료(기술실시계약)	1	2	
		인력양성(학사/석사/박사)	0/4/0	0/3/1	
		연구개발홍보(세미나, 워크샵등)	2	3	
		기술확산교류(기술교류실적)	3	3	
		정책개발	2	2	
		시험·조사	3	3	

## 제2절. 관련분야 기술발전의 기여도

### 1. 학문적, 인력양성 측면에서의 기여도

- 본 연구과제를 수행함으로써 선진국 대비 국내 기술개발수준이 미흡한 분야인 해양오염 퇴적물의 정화기술분야의 학문적 수준을 크게 향상시킬 수 있었음
- 본 연구에서 중점적으로 추진한 연구분야는 현장피복기술과 현장처리기술로 현장피복기술관련 해서 국내 현실에 맞는 경제적인 피복소재를 개발하고, 국내 보유 장비를 활용한 시공기술을 개발하는 등 관련 학문분야의 발전을 이룸
- 현장처리기술은 수거된 오염퇴적물을 처리할 시설을 설치할 공간이 제약되는 국내현실에서 바지선 또는 소규모 공간 확보만으로도 처리시설을 설치할 수 있는 모듈형 현장처리 공정을 개발하여 이 분야에서 국제적인 학문적 성과를 이룩함
- 또한, 최근 각광받고 있는 오염퇴적물의 생물학적 정화기술분야에서는 저질에 자생하는 미생물의 활성을 강화하여 생물학적 자율정화능력을 최대화시킬수 있는 생물활성촉진제 분야에서 세계적인 연구성과를 창출하였으며, 피복소재에 미생물을 고정화하여 피복의 물리·화학적 정화능력과 생물학적 정화능력을 동시에 발현할 수 있는 신기술을 개발하여 국제논문 게재 및 국외특허를 출원함
- 이상의 학문적 연구성과는 총 71편의 국내·외 논문으로 발표되었으며,, 이 중 20편은 SCI 급 국제학술지에 게재됨으로써 오염퇴적물 정화분야에서 세계적 수준의 학문적 기술수준을 달성함
- 관련 분야의 국내 연구자 및 국제적 연구자와의 교류와 연구결과 발표를 위해 다수의 학술발표를 수행하였고, 이 중 34건은 해외 학술대회 발표를 통해 연구결과의 우수성을 홍보하고 우수논문 발표상 수상
- 본 과제 수행기간 중 총 19명 (박사 : 5명, 석사 14명)의 전문연구인력을 배출하였으며, 배출된 연구인력은 충남연구원, 한국수자원공사 등 공공기관과, 대기업 및 중소기업 산하 연구소에 취업하여 관련 분야 기술발전의 기여하고 있음

### 2. 기술적, 경제·산업적 측면에서의 기여도

- 해양오염퇴적물 정화기술은 선진국이 기술이전을 기피하는 분야이며 국내 연안의 지형적 특성과 오염특성이 선진국과 달라 선진 기술의 국내 직접 적용이 어려운 분야임. 또한 선진국은 실정에 맞는 신기술이 지속적으로 개발, 적용되어 기술적 격차가 계속 유지되고 있어 국내실정에 맞는 기술 개발이 필수적임

- 
- 피복성능평가 시스템 구축을 통한 설계 기술 고도화 및 합리적이고 체계적인 피복공법 설계 및 시공 기법 정립을 통해 한국형 피복공법 설계 및 시공 매뉴얼 도출
  - 생물 활성촉진제는 오염된 연안저질을 경제적인 방법으로 정화/관리하는 첨단 기술이며, 연안해역에서의 자생하는 황산염 환원균에 대한 생리학적 특성 및 활성 촉진에 관한 기술개발
  - 해양오염물질을 처리할 수 있는 미생물담체를 활용하여 해양오염퇴적물의 정화를 위한 생물학적 처리공정 기술은 기존의 화학적 처리법에 비하여 상대적으로 처리비용이 낮아 정화비용 절감할 수 있으며, 일부 오염물질에 대한 낮은 처리능력, 처리공정에서의 높은 체류시간 등의 생물학적 해양오염물 처리 기술의 기술적 한계 극복
  - 해양오염퇴적물 현장 정화 기술 적용과 신기술 개발을 통한 토양 오염 정화, 오염퇴적토 등 응용분야의 기술개발 촉진 효과
  - 오염퇴적물 정화관련 기술의 국제 경쟁력 확보로 중국, 동남아시아 등 개발도상국가의 정화복원사업 진출 및 해외 시장 개척
  - 본 연구에서 개발하고자 하는 현장피복기술은 연안저질을 경제적인 방법으로 정화/관리하는 기술로, 연안해역의 적극적인 관리에 크게 기여
  - 한국형 피복공법 기술 정립에 따른 개발도상국 기술이전 및 국내기업 참여를 통한 해외 진출 촉진
  - 개발된 기술은 오염퇴적물 정화사업 외 우리나라 남·서해안의 어패류 양식어장에 적용할 경우 연안어장을 복원시켜 수산양식업의 활성화에도 크게 기여할 것으로 기대됨
  - 피복기술 및 현장처리기술 개발로 중앙정부의 정화·복원사업 예산 절감과 정화·복원사업의 효율 극대화로 사업 활성화가 가능
  - 다양한 기술을 적용이 가능하도록 해양퇴적오염물의 정화를 위한 관련 법령을 제정하여 오염퇴적물 경제적, 효율적 정화를 위한 법적 기반 마련
  - 신뢰할 수 있는 상용 정화기술 개발 및 기술이전으로 현재 정화복원사업의 처리단가(105천원/m<sup>3</sup>)를 낮출 수 있으며, 중앙정부(해양수산부)의 예산절감 효과뿐만 아니라 동일한 예산으로 정화사업 확대가 가능
  - 본 과제를 통해 개발된 기술은 다수의 국내·외 특허 출원 및 등록이 완료 및 진행되고 있어 향후 기술 이전으로 관련 산업체 경쟁력 제고 (국내 특허출원 : 27건, 국내 특허 등록 : 15건, 국제특허출원 : 3건)
  - 개발된 기술은 국내 전문기업에 기술이전을 실시하여 국내 기업체 기술경쟁력 강화에 기여 (피복기술 1건(통상실시권) 및 현장처리기술 1건(공개모집 절차에 의한 전용실시권) 기술이전 완료). 향후 기술이전은 공공성과 공익성 확보를 위한 검토 후 공개적으로 추진함.
-



## 제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 연구개발 결과물로 얻어진 현장피복기술과 현장처리기술은 현재 국내 보유한 해양오염퇴적물 정화기술의 대안기술로서 국내 오염퇴적물 정화사업에 활용(2017년 정화사업을 수행할 계획인 포항 동빈내항 정화사업에 실제 적용 계획임)
- 현장피복기술은 연구사업을 통해 실제 후보 해역에 대한 피복소재 적용안과 설계·시공안을 개발하고, 이를 실제 현장 적용함으로써 유용성을 검증하였으며, 향후 국내해역에 확대적용 가능함
- 현장피복기술 시험 해역에 대한 중장기 모니터링을 통한 지속적 성과확인작업을 추진함
- 현장처리기술은 개발된 처리기술을 최적화하여 기술개발을 완료하고 이를 처리기술 검증을 통하여 신뢰성 있는 기술임을 공개적으로 입증함(관련기술 기술이전 완료)
- 현장처리기술의 최종 결과물로서 상용 규모 처리기술 설계를 제시하였으며, 기술(특허)이전을 통해, 제시된 설계에 의거 플랜트를 제작할 경우 실제 정화사업 현장에서 해양오염퇴적물의 처리가 가능함. 즉 국내 정화사업 현장에서 광범위하게 활용될 수 있는 기술을 확보함
- 본 연구과제에서 개발될 정화기술은 환경적인 측면에서 환경오염 방지 및 산업적 측면에서 오염퇴적물 정화 신산업 창출에 이바지하여 새로운 환경 산업을 창출할 수 있을 것임
- 현장 처리기술은 주로 유기물로 오염된 퇴적물을 수거(준설)하는 현장 또는 인근 수역에서 적용할 수 있는 기술로서, 입자의 크기에 따라 오염도가 다르므로 하나의 처리 흐름에서 필요한 입자분리, 세척 및 고도처리 공정을 반복함으로써 퇴적물의 오염도를 저감시켜서 매립재, 제품의 소재 등 여러 가지 목적으로 유효활용 할 수 있음
- 현장 처리기술은 해양오염퇴적물 정화복원 및 유효활용뿐만 아니라 정화기작이 유사한 어장정화(퇴적물), 오염토양, 하천 또는 호수 퇴적물 정화사업에 활용 가능(환경부에서 유사연구 수행)
- 본 연구개발이 성공적으로 이루어짐으로써 연안수질/저질오염 문제에 적극적으로 대처할 수 있는 기술적 기반을 마련
- 본 연구의 성과물인 피복공법, 현장처리 융복합기술을 연안국가 들을 대상으로 수출함으로써 국가 기술경쟁력 제고에 큰 도움이 되며, 창조산업을 창출할 수 있음. 이를 위해 국제적 홍보와 시장 개발을 위한 산업계와의 협력전략을 수립하여 세계시장 진출을 모색함. 이를 위한 영문판 피복공법 설계 및 시공 매뉴얼 작성 추진
- 해양오염물질을 처리할 수 있는 생물소재를 활용한 해양오염퇴적물의 정화기술은 세계적 선도기술로 원천기술의 확보가 가능함
- 본 과제에서 개발되는 기술은 다수의 지적재산권(특허)으로 확보하는 것을 추진하였으며, 해양오염퇴적물수거업체 등 관련 업체에 신뢰성 있는 기술의 이전을 가능하게 하여, 실제 정화·복원사업에 적극 활용함. 또한 해양분야 전문학술지에 지속적인 연구결과 발표로 연구정보의 공유와 홍보, 연구성과의 확산을 도모하고자 함
- 본 과제의 결과물로 제시되는 해양오염퇴적물 정화복원 관련 법령 개정안(법, 시행령, 시행규칙 및 관련 고시)은 중앙정부(해양수산부)에서 현행 “해양환경관리법”의 해양오염퇴적물 정화복원 관련 내용을 포함하여 별도의 법으로 제도화 하는데 기초 자료로 활용될 예정으로서, 주요 내용은 오염된 퇴적물의 수거뿐만 아니라, 처리(오염도 저감, 유효활용, 최종 처분 등) 및 사후관리까지 포함하므로, 본 과제에서 개발되는 기술과 앞으로 개발될 수 있는 다양한 기술을 정화·복원사업 현장에 적용할 수 있는 기반을 마련하므로 큰 의미를 가짐

## 제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

---

- 해양오염퇴적물 정화기술 및 산업은 미국을 중심으로 캐나다, 일본, 노르웨이, 독일, 영국 등 선진국이 주도하고 있음
  - 선진국에서는 해양오염퇴적물의 정화기술로 감시하 자연정화기법(Monitored Natural Attenuation, MNA), 준설후 처리기법, 피복기법의 세가지가 동등한 가치를 인정받고 있으며 정화사업 대상 해역의 지정학적 특성과 오염 특성에 따라 적합한 정화기법을 하나 또는 그 이상 복합적으로 선정하여 사용하고 있음
  - 오염퇴적물이 있는 해역에서도 오염특성에 따라 오염정도가 심하지 않고 해수로의 유출이 주변 생태계 및 인간활동에 위해를 가하지 않는 정도라면 감시 하에서 자연정화기법을 적용하고 있으며, 오염에 의한 생태계 파괴 및 인간활동에 위해가 가해질 정도인 경우에는 준설 및 피복기법을 해역 특성에 따라 선택적으로 적용하고 있음
  - 미국에서는 1980년대 오대호 관리프로그램을 시작으로 수많은 오염퇴적물 정화복원 기술을 개발하여 현재 약 250여개 기술이 오염 지역 및 오염특성에 따라 개별적, 복합적으로 사용되고 있으며, 다양한 정화복원 기술이 지속적으로 개발, 적용되고 있음
  - 수거 해양오염퇴적물의 처리기술 분야에서는 물리/화학적 처리기술로 현장 복토, 봉쇄, 고형화/안정화 처리방법 및 고립처분 방법 등이 지속적으로 개발되어 활용되고 있음
  - 해양오염퇴적물의 중간 처리기술은 입자분리, 생물학적처리, 화학적처리, 추출/세척, 고정화(고형화/안정화), 열처리(파괴, 탈착) 등 주로 6가지 처리기술이 개발되어 사용되고 있음
  - 피복기술로는 오염퇴적물을 수계로부터 고립시키는 물리적 차단을 위한 단순 피복기술에서 오염물질의 안정화, 고정화를 통하여 오염의 근본적 완화를 도모하는 반응성 피복기술의 개발 및 적용이 활발히 이루어지고 있음
  - 현장피복기술의 개발과 적용 측면에서 최근 노르웨이의 적용사례가 급증하고 있으며, 반응성 피복소재를 활용한 현장피복기술의 적극적 적용이 이루어지고 있음
  - 현재 산업화가 급속도로 진행되고 있는 중국, 동남아시아 등 지역에서 해양환경에 대한 인식 변화로 해양오염퇴적물 정화·복원산업에 대한 새로운 시장 창출이 기대되고 있음
  - 구미 선진국의 경우 황산염환원균 등과 같은 미생물을 이용하는 현장생물정화기법(In-situ bioremediation)으로 오염된 토양, 지하수, 해양 등을 저비용으로 처리하기 위한 연구를 활발히 진행하여 왔으며, 최근에 실용화 가능성을 확인하고 현장적용기술에 대한 연구를 진행하고 있음
  - 일본의 경우는 석회석을 저질 상부층에 투여하여 유기물질을 분해를 촉진하는 기술을 개발하여 실용화하고 있음
  - 미국, 유럽, 일본 등의 선진국들은 오염퇴적물 처리를 위한 대안기술로 원위치 피복(in-situ capping)에 대한 관심과 연구가 지속적으로 진행되고 있는데, 특히 반응성 피복소재로서 apatite, calcium phytate, mineral rock phosphate, lime stone 등을 이용하여 퇴적물 내 중금속 및 영양염류 용출차단을 위한 소재로 연구되고 있으며, activated carbon, coke, organic soil, sand, organoclay, geotextile, aquablok 등과 같은 소재를 중금속, 영양염류, 중금속 용출차단을 목적으로 실제 적용한 사례가 있음
  - 미국에서는 1970년대 5건 미만의 현장 피복공법이 사용되어 왔지만, 1990년 이후 피복공법의 적용사례가 급격히 증가하여 2000년대에는 35건 이상 수행됨
-

## 제7장. 연구개발성과의 보안등급

---

### 1. 보안등급의 분류

보안	일반
	○

### 2. 결정사유

보안과제로 결정할 특별한 사유가 없으므로 일반과제로 결정함

---

## 제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치장소)	NTIS장비 등록 번호

국가과학기술종합정보시스템 등록이 필요한 연구시설·장비 구입내역이 없음

## 제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

---

### ○ 해양 현장조사 및 시료채취 등 관련 안전조치

- 해양오염퇴적물 시료 채취시, 현장 특성에 의해 선박 이용률이 높음. 이러한 조사 환경에 따른 위험성은 다음과 같음

- 파도 등에 의한 선박 흔들림에 의한 상해
- 채니기를 이용시 조작 미숙에 의한 상해
- 장시간 선박 탑승에 의한 신변변화(탈진, 멀미 등)

- 위험성 해결 방안

- 사전 이용할 샘플링 도구 이용방법 습득
- 채니기와 도르래를 이용하여 선상위에서도 안전한 샘플링이 되도록 숙달
- 구명조끼, 안정화, 장갑, 헬멧 등 안전장비 필수 착용
- 샘플링 시 선박을 고정시켜 흔들림을 최소화함
- 응급 비상약품을 구비함
- 보험 가입

### ○ 연구 수행시 실험과정에서의 안전조치

- 실험시 위험성

- 실험 조작 미숙에 의한 강산, 강염기 등에 의한 상해
- 유독성 가스 흡입 등
- 중금속 및 유기오염물질에 의한 중독

- 위험성 해결 방안

- 실험방법 및 조작 등에 관한 사전 조작방법 및 안전교육을 실행해 안전을 도모함
  - 실험시 필요한 각종 도구 착용 후 실험 수행을 도모함(실험용 가운, 장갑, 안경, 마스크 등)
  - 가스성 물질을 취급시, 안전을 도모하기 위해 후드 내에서 실험 수행을 도모함
  - 비상약품 구비
  - 연구참여인력 전원 실험실 상해 보상 보험 가입
-

## 제 10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명 /기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Stabilization of heavy metal contaminated marine sediments with red mud and apatite composite	환경대학교	제1저자/교신저자	Journal of Soils and Sediments	2.206	2016.02.20.	단독사사	SCI
2	특허	모듈식 수저퇴적물 정화처리 시스템 및 공법	한국해양과학기술원	출원인	대한민국	-	2016.01.25.	단독사사	PCT출원, 기술이전실시
3	특허	해양오염퇴적물 정화를 위한 피복 소재 개발 및 그 이용	환경대학교	출원인	대한민국	-	2014.07.10.	단독사사	기술이전실시
4	논문	Magnetic characteristics of sediment grains concurrently contaminated with TBT and metals near a shipyard in Busan, Korea	한국해양대학교	제1저자/교신저자	Marine Pollution Bulletin	3.099	2014.08.30.	단독사사	SCI
5	논문	Optimization of biostimulant for bioremediation of contaminated coastal sediment by response surface methodology (RSM) and evaluation of microbial diversity by pyrosequencing	한국해양대학교	제1저자/교신저자	Marine Pollution Bulletin	3.099	2015.09.15.	단독사사	SCI

## 제11장. 기타 사항

---

○ 특이한 기타사항 없음.

---

## 제 12장. 참고 문헌

---

- 국토교통부, 『4차 골재수급기본계획 수립 연구』, 2008
- 국토교통부, 『5차 골재수급기본계획 수립 연구』, 2014
- 국토해양부, 『수저준설토사 유효활용기준 등 규정』, 제2012-338호, 2012.
- 국토해양부, 『해양오염퇴적물 조사 및 정화복원 범위 등에 관한 규정』, 제2011-700호, 2011.
- 김경련·김석현·홍기훈, 「해양오염퇴적물 정화·복원 처리기술 현황」, 한국환경준설학회, 20면, 2012.
- 김수삼·김병일·한상재·김정환, 「남으로 오염된 철성분 함유토의 동전기 정화 특성에 세척제가 미치는 영향」, 한국지하수토양학회지, 54-62면, 2003.
- 대한광업진흥공사, 『광물자원매자량 현황』, 2009
- 윤길림·조홍연, 「준설토 재활용 방안 및 적용사례 분석」, 지방환경, 2002.
- 이대영, 「인천해양퇴적물의 오염현황과 관리대책」, 인천발전연구원, 39면, 2001.
- 이용수·현재혁·정하익·정형식, 「폐콘크리트의 유효활용을 위한 환경특성 평가」, 한국지반공학회는 문집, 143-150면, 2001.
- 이창희·김은정, 「호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안」, 한국환경정책평가연구원, 5면, 1998.
- 지식경제부, 『2009년도 광산물 수급현황』, 2010.
- 최상원·김빅토르·장우석·김은영, 「국내외 철강슬래그의 발생 및 이용 현황, 콘크리트학회지」, 28-33면, 2007
- 한국지질자원연구원, 『2012년도 광업·광산물 통계연보』, 2013
- 한국해양과학기술진흥원, 『지속가능 해양오염퇴적물 정화기술 개발, 2차년도 결과보고서』, 2013.
- 해양수산부, 『준설토사 처리 및 유효활용 -지침서-』, 1면. 2007.
- 해양수산부, 『준설토 재활용 방안 연구』, 34-35면, 2000.
- 해양수산부, 『준설토 재활용 방안 연구,Ⅲ :경량혼합토 개발을 중심으로』, 151면, 2002.
- 해양수산부, 『해양오염퇴적물 조사, 정화·복원체계 구축(Ⅲ)』, 2007.
- 해양수산부, 『해양오염퇴적물 정화·복원사업 추진을 위한 실무 지침서』, 36면, 2010.
- 해양수산부, 『해양오염퇴적물 정화·복원사업 추진을 위한 실무 지침서』, 32-36면, 2010.
- 해양수산부, 『해양오염퇴적물 정화·복원사업 추진을 위한 실무 지침서』, 36-39면, 2010.
- 해양수산부, 『해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정』, 제2013-206호, 2013.
- 환경부, 『오염토양 정화방법 가이드라인』, 2007.
- 환경부, 『토양복원 기술 및 사례집』, 2002
- 환경부, 『토양환경보전법 시행규칙』, 별표3, 2011.
- 환경부, 『환경백서』, 549면, 2007,

Bu-Gi Kim, W.-H.H., Dae-Hwan Cho, Min-Seon Choi., Applicability of the Hydrocyclone for Efficiency Improvements to Sea-water Cooling Systems, Jownal of the Korean Society of Marine Enviroument & Safety, p109-115, 2005.

Chiné, B., Concha, F., Flow patterns in conical and cylindrical hydrocyclones, Chemical Engineering Journal, p267-273, 2000.

Choi, H.-E., Jung, J.-H., Han, Y.-R., Kim, D.-Y., Jung, B.-G., Choi, Y.-I., A Study on the Treatment of Oil Contaminated Soils with Micro-nano Bubbles Soil Washing System, Journal of

---



- 
- Environmental Science International, p1329-1336, 2011.
- Choung, Y.K., Separation of dredged sediments and behavior of organic materials with a hydrocyclone, Korean Society Of Environmental Engineers, p25-26, 2001.
- Chu, L.-Y., Yu, W., Wang, G.-J., Zhou, X.-T., Chen, W.-M., Dai, G.-Q., Enhancement of hydrocyclone separation performance by eliminating the air core, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, p1441-1448, 2004.
- Faisal, I.M., Quitain, A.T., Urano, S., Daimon, H., Koichi Fujie, K., Metal elution from Ni/Fe-based alloy reactors under hydrothermal conditions, Journal of Hazardous Materials, p213-216, 2004.
- Fenton, Oxidation of tartaric acid in presence of iron, Journal of Chemical Society, p899-910. 1984.
- G. Allen Burton, Jr, Sediment quality criteria in use around the world, Journal of Limnology, p66, 2002.
- Haag, W.R., Rate constants for reaction of hydroxyl radicals with several drinking water contaminants, Environmental Science & Technology, p1005-1013, 1992.
- Han, Y.R., Choi, Y.I., Yoon, T.K., Lee, G.C., Jung, B.G., Comparative Study of Oxygen Transfer Efficiency Between Micro-nano Bubble- and Conventional Bubble-Diffuser Systems, Journal of Korean Society of Water Science and Technology, p11-22, 2011.
- Hoigné, J., Bader, H. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water-I: Non-dissociating organic compounds, Water Research, p173-183, 1983.
- Ju, M., Choi, H.-E., Han, Y.-R., A Study on the Treatment of Contaminated Soils with Micro-nano Bubbles Soil Washing System, JOURNAL OF KOREA SOLID WASTES ENGINEERING SOCIETY, 2010.
- J. Näslund, Ecosystem effects of materials proposed for thin-layer capping of contaminated sediments, Marine Ecology Progress Series, p27-39, 2012.
- Lawrence Juda, Richard Burroughs, Dredging Navigational Channels in a Changing Scientific and Regulatory Environment, Journal of Marine Law and Commerce, p190, 2004.
- Lee, Y., Cho, M., Kim, J.Y., Yoon, J., Chemistry of ferrate (Fe (VI)) in aqueous solution and its applications as a green chemical, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, p161-171, 2004.
- L.W. Perelo, Review: In situ and bioremediation of organic pollutions in aquatic sediments, Journal of hazardous materials, 177, p81-89, 2010.
- Robert S. Meinick, Dredging: Make Waves for Commerce or Environmental Destruction, Villanova Environmental Law Journal, p148, 2008.
- SPAWAR Systems Center (SSC) San Diego, Implementation Guide for Assessing and Managing Contaminated Sediment at Navy Facilities, Naval Facilities Engineering Command, p6-28, 2003.
- US EPA, Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites, Chapter 8. Remedial Action and Long-Term Monitoring, 2005.
- US EPA, Guidance for In-Situ Subaqueous Capping of Contaminated Sediments, 2005.
- U.S. EPA, Guidance for monitoring at hazardous waste sites: Framework for monitoring plan development and implementation, OSWER Directive 9355. p4-28, 2004.
- U.S. EPA, Guidance for the data quality objectives process, U.S. Environment Protection Agency,
-

---

2000.

Watts, R.J., Mineralization of solvated and NAPL-phase hexadecane by catalyzed hydrogen peroxide, Water Research, p1405-1414, 1999.

Zhao, B., Development of a new method for evaluating cyclone efficiency, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, p447-451, 2005.

港湾における底質ダイオキシン類対策技術指針, 平成20年4月, 国土交通省港湾局(항만에서 퇴적물 다이옥신류 대책 기술지침, 2008년 4월, 일본 국토교통성 항만국)

---

### 주 의

1. 이 최종보고서는 해양수산부에서 시행한 해양수산환경기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 해양수산부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

