

**유류오염 피해지역 해양환경복원
프로그램 개발 기획연구**

**주관연구기관
한국해양연구원**

2008. 11

**국 토 해 양 부
한국해양수산기술진흥원**

제 출 문

국토해양부 장관 귀하

본 보고서를 “유류오염 피해지역 해양환경복원 프로그램 개발 기획연구” 용역의 최종보고서로 제출합니다.

2008. 11

주관연구기관 : 한국해양연구원

연구책임자 : 심원준

연구참여자 : 최진우, 박홍식, 임동일

: 권개경, 임운혁, 김문구

: 유옥환

외부자문위원 : 광주과기원 최희철

한국해양수산개발원 장원근

경상대학교 김기범

(주)네오엔비즈 이종현

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 기획연구 개요	3
제 2 절 추진목적 및 필요성	3
제 3 절 연구범위 및 추진전략	5
제 2 장 국내외 유류사고 및 환경복원 사례	7
제 1 절 국내 유류오염 사고사례	9
제 2 절 국외 유류오염 사고사례	23
제 3 장 국내외 환경복원 관련 제도 및 개선방안	49
제 1 절 유류오염에 따른 환경복원 관련 국내 제도 분석	51
1. 검토배경	51
2. 환경복원 관련 국내법	51
3. 허베이 스피리트호 유류오염사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복 원 등에 관한 특별법	54
제 2 절 국제협약 및 향후 국내입법 방향	56
1. 국제협약	56
2. 향후 국내정책 방향	57
3. 관련제도 개선방안	57
제 4 장 유류오염 피해지역 해양환경 복원 프로그램	61
제 1 절 특별해양환경복원 지역 지정절차 및 계획	63
1. 배경	63
2. 추진경위	63
3. 지정근거	64
4. 지정방법	64
5. 특별환경복원지역 지정계획	67

제 2 절 유류오염 피해지역 오염영향 조사계획	68
1. 해안 유징분포 정밀평가	70
2. 해수 유류오염 평가	72
3. 퇴적물 유류오염 평가	74
4. 생물 유류오염 평가	77
5. 생물독성 평가	80
제 3 절 유류오염 피해지역 장기 생태계 모니터링 계획	83
1. 부유환경생태 장기모니터링	84
2. 조간대 생태계 장기모니터링	87
3. 조하대 연성퇴적물/조간대 갯벌 생태계 장기모니터링	93
4. 조간대 천해 어류분야 장기모니터링	95
5. 해빈퇴적환경 장기모니터링	97
제 4 절 유류오염 피해지역 해양환경복원 방안	103
1. 환경복원의 정의	103
2. 유류사고 영향 대상별 복원방안	106
3. 환경복원 단계별 추진내용 및 전략	111
제 5 장 유류오염 평가 및 환경복원 기술개발	115
제 1 절 추진배경	117
제 2 절 유류오염 환경법과학기술 개발	127
제 3 절 유류의 환경위해성 평가기술 개발	132
제 4 절 유류오염 환경복원기술 개발	139
1. 유류오염 친환경 복원기법	139
2. 유류오염지역 진단/예측/관리기법	150
제 6 장 연구개발 추진전략	159
제 1 절 추진전략	161
제 2 절 실행계획, 소요예산 및 성과지표 설정	163
1. 실행계획	163
2. 연도별·단계별 소요예산	167

3. 성과지표 설정	171
제3절 과제 제안요구서(RFP)	173
1. 허베이스피리트호 원유 유출사고에 따른 해양오염 영향조사 및 생태계 장기모니터링	173
2. 해양 유류오염 평가 및 환경복원 기술 개발	176
참고문헌	179

제 1 장 서론

제 1 절. 기획연구 개요

- 2007년 12월 7일에 태안 만리포 북서방 약 10km 해상에 정박중이던 홍콩 선적 유조선 허베이스피리트호를 삼성중공업 크레인바지선이 충돌하면서 유조선에 적재되어있던 3종류의 원유 총 12,547 kl가 서해상에 유출되는 국내 최대의 해상 원유 유출사고가 발생
- 해상 유출유는 태안반도를 포함한 충청남도과 전라도 해안은 물론 101개의 유무인도서 해안에 표착하여 해양환경을 오염시키고 해양생태계에 막대한 영향을 미침.
- 국내 해양환경관리법에 따라 100 kl의 유류 유출사고에 적용되는 법적인 해양오염영향조사가 사고이후 2007년 12월 18일부터 긴급하게 시행되어 2008년 11월 현재까지 사고해역의 유류오염의 수준, 시공간적인 변화, 생물독성 및 영향, 생태계 피해 등의 연구가 수행됨
- 사고에 따른 환경오염 및 생태계영향의 범위와 정도가 크며 영향의 지속기간이 장기화할 것으로 예측되고, 장기적인 환경영향의 모니터링 및 환경복원의 필요성이 대두되어 이를 위한 기획을 수행
- 또한 향후에 발생할 수 있는 해양 유류 유출사고 발생에 대비하기 위하여 해양환경에서의 유류오염에 따른 환경영향을 평가하고 오염해역을 친환경적으로 복원하기 위한 기술 개발의 필요성이 대두됨에 따라 연구개발을 위한 기획을 수행

제 2 절. 추진목적 및 필요성

- 허베이스피리트호 원유 유출사고에 따라 태안반도 해안의 경우 사고 초기에 액상의 원유가 표착하면서 물, 퇴적물, 생물 등 모든 환경매체가 사고유에 심각하게 오염됨
- 전라도 해안의 경우 에멀전 또는 타르 형태로 풍화된 유류가 다량 표착하여 해안을 오염시켰으며, 충청남도와 전라도를 통틀어 101개 도서의 해안이 액상의 원유, 에멀전 또는 타르에 의하여 오염됨.
- 유류오염은 사고 직후인 2007년 12월에 최고 수준을 나타냈다가, 시간이

지나면서 뚜렷하게 감소하는 경향을 보이고 있으나 방제 진행 상황에 따라 2008년 6월 까지 심한 변동을 보임.

- 2008년 6월 이후 해수, 퇴적물, 생물체 등 모든 매질에서 유류오염은 전반적으로 사고 직후에 비하여 감소하는 경향을 보이고 있으나, 해수를 제외하고는 사고이전과 비교하여 2008년 11월 현재 여전히 오염된 수준을 보이고 있음.
- 사고유에 노출된 조간대 및 조하대의 다양한 해양생물이 영향을 받고 있음이 확인되었으며, 유류가 심하게 표착한 조간대에서는 많은 종의 해양생물이 대량폐사하고 종수, 서식밀도, 종다양성 등이 감소하는 피해가 확인됨.
- 생태계영향은 초기 영향 이후에 시간이 지나면서 회복의 징후가 발견되는 경우도 있으나, 암반조간대 생태계는 오히려 악화되는 경향이 확인되었으며, 구멍갈파래 이상 번식, 기회종의 다수 출현 등 생태계 교란의 영향은 더욱 다양하게 나타나고 있음.
- 사고이후 1차 및 2차에 걸친 오염방제가 진행되어 육안으로 식별되는 표층의 표착유는 전반적으로 제거되었으나, 여전히 바위틈, 갯벌 퇴적물 표층하부, 섬 등 접근이 어려운 지역에는 잔존유가 발견되고 있음.
- 사고에 따른 환경의 영향을 파악하고 훼손된 환경을 사고이전의 상태로 조속히 복원하기 위해서는 좀 더 장기적이고 체계화된 환경오염 및 생태계 모니터링 계획 및 환경복원 계획의 수립이 요구됨
- ‘허베이 스피리트호 유류오염 사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법’이 2008년 3월 14일에 공포되었으며, 특별법 제10조에서는 특별해양환경복원지역의 지정 및 고시에 관한 사항을 포함하고 있음.
- 특별해양환경복원지역의 지정 및 고시에는 1) 특별해양환경복원지역의 생태계에 대한 조사 및 연구계획, 2) 생태계에 대한 지속적인 모니터링 계획, 3) 해안, 해양, 해저 등의 복원계획, 4) 그 밖에 해양환경복원에 필요한 사항을 포함하도록 하고 있음.

제 3 절. 연구범위 및 추진전략

- 본 기획 연구에서는 특별법 상 요구되는 사고해역의 장기 환경영향 및 생태계 모니터링 계획과 특별해양환경복원 계획을 포함하도록 하였으며, 미래의 오염사고에 대비하기 위한 유류오염의 평가 및 친환경적 복원기술 개발을 위한 연구기획을 포함하고 있음.
- 환경영향 모니터링 계획 부분은 허베이스피리트호로 부터 유출된 사고유가 사고해역의 환경(물, 퇴적물, 생물 등)에 미친 환경오염 영향을 과학적으로 모니터링 하여 환경오염 여부를 입증할 수 있는 장기계획을 담고 있음.
- 생태계 모니터링 계획 부분은 사고해역의 해양생태계가 유류오염에 의하여 직·간접적으로 받은 영향을 밝히고 생태계의 회복을 모니터링 할 수 있는 계획을 포함하고 있음.
- 사고해역의 환경복원 방안은 제한적이거나 현재까지 가용한 환경오염 및 생태계 영향자료에 근거하여 피해지역의 환경을 사고이전 상태로 복원하기 위한 방안을 제시하였음. 단, 본 기획연구에서 제시한 환경복원 방안은 사고 이후 1년이 되지 않은 시점에서 마련된 것으로 구체적인 실행계획을 마련하는 데는 한계점이 있어서 환경복원을 위한 대상, 목표, 전략 등을 전반적으로 기술하였으며, 이후 지속적인 현장조사 및 연구를 통해서 사안별로 구체적인 실행계획이 마련되어야 함.
- 유류오염의 평가 및 친환경적인 환경복원 기술개발 부분은 미래를 위한 연구개발 기획부분으로 향후에 발생할 수 있는 해양유류유출사고에 대비하기 위하여 기 확보하여야할 기술분야를 선별하여 기술 로드맵을 제시하도록 하였음.

제 2 장 국내외 유류사고 및 환경복원 사례

제 1 절. 국내 유류오염 사고사례

자료출처: 해양경찰백서 (해양경찰청)

해양오염방제사례집 (해양경찰청, 해양환경관리공단)

- 국내의 유류오염 사고는 1980, 90년 대 꾸준히 증가하여 2000년 483건으로 최대 발생건수를 기록하였으며, 이후에는 지속적인 감소추세에 있음
- 단, 2007년에는 기상악화 등의 이유로 총 345건의 해양오염사고가 발생하여 전년도에 비해 발생건수 및 유출량이 크게 증가
- 최근 10년간 (1998-2007) 총 3,881건의 오염사고가 발생하여 20,814 kL의 기름이 유출
- 국내 해양오염사고 발생 현황

연도	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95
건수(건)	226	166	158	152	158	200	248	240	328	371	365	299
유출량(kL)	201	2,204	2,618	482	1,058	368	2,421	1,257	2,943	15,460	456	15,776
연도	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07
건수(건)	337	379	470	463	483	455	385	297	343	355	285	345
유출량(kL)	1,720	3,441	1,050	387	583	668	410	1,458	1,462	410	365	14,021

- 선박에 의한 국내 주요 유류오염사고

연도	유출 선박	유출량 (kL)	발생지	비고
1985	천일호	1,680	경북 영일군 구룡포 앞	
1986	진용호	1,220	부산 영도 앞	
1990	코리아 호프호	1,500	인천 월미도 앞	
1993	코리아 비너스호	4,228	인천항 동수도	항공유, 경유
	제5급동호	1,228	전남 여천 묘도 앞	
	프론티어 익스프레스호	8,322	충남 대산항	나프타
1995	씨프린스호	5,035	전남 여천 소리도 앞	
	다니타호	4,970	울산 방어진항 남방	등유
	제1유일호	2,392	부산 북형제도	
	호남 사파이어호	1,402	전남 여천 삼일항	
1997	제3오성호	1,699	경남 통영 등가도	
2007	허베이 스피리트호	12,547	충남 태안군 신도 앞바다	

(1) 코리아 호프호 충돌사고

□ 사고 개요

- 1990년 7월 15일 09:45경 (주)대한유조선 소속 코리아 호프호가 짙은 안개상태에서 인천 호남정유의 계류부표에 접안하려고 접근 중, 이안하여 출항하던 유조선 코리아 씨니힐호와 충돌
- 코리아 호프호의 좌현 외판에 27.5 m × 6 m 크기의 파공이 발생하여 2, 3, 4번 화물탱크에 적재된 벙커C유 중 약 1,500 kL가 유출

□ 방제 개요

- 해상에 유출된 기름은 유처리제 살포, 유흡착제로 흡착하여 수거 또는 뜰채 등으로 두꺼운 유층을 걷어냄
- 기름유출량의 62%에 달하는 924 kL의 유처리제 사용하여 과다 사용 논란
- 해안가 구석에 고여 있는 기름은 삽, 바가지 등으로 퍼담아 수거
- 해안가 바위 및 안벽에 부착된 기름은 분무기로 유처리제를 살포하여 씻어 냄
- 자갈, 모래 속에 스며든 기름은 구덩이를 파서 고이게 한 후 유흡착제로 제거
- 기름 묻은 자갈은 드럼통에 담아 유처리제로 세척하거나 유흡착제로 닦아내고, 세척하기 어려운 모래, 자갈은 마대에 담아 매립

□ 환경 영향

- 인천 연안부두에서 팔미도 해상까지 광범위하게 유류오염
- 영종도, 용유도, 무의도, 작약도 등 60 km의 도서 해안 및 남항, 연안부두, 월미도 주변 등 항만시설 안벽 11 km 등 총 71 km의 해안선이 오염됨

□ 피해배상

- 방제작업에는 연인원 약 7만명, 선박 1,578척이 동원되어 총 62억원이 소요됨
- 영종도, 용유도, 무의도, 송도, 동막 및 고잔 등 15개 어촌계의 공동어장, 양식어장, 관행어장, 어선피해, 어선조업손실, 일반 상인피해 등 총 392억여원의 피해보상액이 청구되었으나 실제 45억여원이 합의 지급됨

(2) 코리아 비너스호 좌초사고

□ 사고 개요

- 1993년 6월 16일 12:07경 유조선 코리아 비너스호가 짙은 안개 속에서 인천항 동수도를 따라 호남정유 인천저유소로 항해 중, 역행하는 어선을 피하려다 백암등대 암초에 좌초
- 코리아 비너스호 선수의 선저 51 m 정도에 4 m × 3 m 크기로 8군데가 심하게 굴곡, 파손되어 1번 화물탱크의 항공유 2,288 kL 및 3번 화물탱크의 경유 2,000 kL 등 총 4,288 kL가 유출

□ 방제 개요

- 유출된 기름이 항공유 및 경유로서 유출 후 1-2일 이내에 완전히 증발하기 때문에 적극적인 방제작업을 실시하지 않고 자연방산을 유도
- 해상에 잔존하는 유막은 유처리제를 동력분무기로 살포하여 제거

□ 환경 영향

- 인천 자월도, 승봉도, 풍도, 영흥도, 대부도 해상을 오염시킴
- 어장 및 양식장 내에서 유막은 발견되지 않았으나 영흥도, 대부도, 화성 일대에서 생산되는 굴, 조개, 바지락 등 어패류가 기름에 오염됨

□ 피해배상

- 선박 동원하여 유처리제 살포 및 잔존유 이적을 위하여 1억2,980만원 소요
- 인천, 옹진, 대부, 화성지역의 5,600여 어민 및 상인들이 약 1,037억4,432만원의 피해를 주장하였으나 63억314만원으로 최종 보상액 산출

(3) 제5금동호 충돌·침수사고 사고 개요

- 1993년 9월 27일 19:12경 광양항 LG정유 제품부두에서 벙커C유를 적재하고 광양제철소 인접 한국금유(주) 저유소로 이동하던 제5금동호가, 광양제철소 제품부두에서 코일 적재 후 상대선의 위치를 정확하게 파악하지 않은 채 임시투묘지점으로 이동하던 Bijiasan호와 충돌
- Bijiasan호의 선수부가 제5금동호의 우현 정 중앙을 충돌하여 제2번창에서 제4번창까지 길이 18 m × 폭 4.5 m가 파손되어 적재한 벙커C유 1,228 kL가 유출

 방제 개요

- 사고 후 오일붐 400 m를 전장했으나 파공탱크로부터 기름이 순식간에 유출되어 광양항 내 전역으로 대부분 확산됨
- 사고 직후 선체 주변은 유흡착제를 이용하여 방제
- 광양제철소 동편과 묘도 남쪽 등은 갈색 유막이 넓게 분포되어 있어 유회수기를 이용하여 기름 회수
- 남해도 서편과 동편 쪽 해상은 유흡착제와 유처리제를 이용하여 방제작업 실시
- 해안의 오염된 암벽, 자갈 등은 유처리제 및 석유 등을 사용하여 닦아 냄
- 오염된 모래와 기름 덩어리는 삽과 쪽대로 수거

 환경 영향

- 광양만 일원과 노량수도, 진주만, 삼천포 수도 일원까지 유출유 확산
- 여천, 여수, 광양시 및 남해군 해안 120 km에 기름 부착

 피해배상

- 방제비용은 총 56억6600여만원이 청구되어 이중 55억8400여만원이 지급 됨
- 어업피해에 대하여 전체 청구액 916억원 중 73억원이 지급 됨

(4) 프론티어 익스프레스호 좌초사고 사고 개요

- 1993년 10월 1일 10:26경 충남 대산항 외항에 묘박 후 대산항 삼성종합화학 부두로 항행하던 유조선 프론티어 익스프레스호가 도선사의 부주의로 수심 9.5미터의 암초에 좌현측 선저가 좌초
- 이후 선수를 돌려 이초된 후 가인서 등대로부터 북동쪽 1.1마일 지점에 묘박조치 하였으나, 파공이 발생한 선저로부터 8,322 kL의 나프타(naphtha)가 유출

 방제 개요

- 강한 북서풍으로 인해 유출된 나프타가 쉽게 휘발, 소멸 됨
- 적재화물 이적 외에 특별한 방제 작업 수행치 않음

 환경 영향

- 유출된 나프타는 강한 휘발성으로 쉽게 증발되어 오염사항이 발견되지 않음
- 나프타가 휘발되어 기화가스가 사고 장소로부터 약 7 km나 떨어진 대죽리와 별말에서 12 km나 떨어진 화곡리까지 확산되어 주민들의 호흡기 등을 자극해 두통과 구토증세 유발하는 등 심각한 대기오염피해 유발

 피해배상

- 어민 측에서 수산물 피해, 인적피해, 노동손실피해 등을 종합하여 총 36억 원의 보상을 요구하였으나 재판결과 최종 보상액은 1억8200만원으로 확정

(5) 씨프린스호 좌초사고 사고 개요

- 1995년 7월 23일 (주)호유해운의 씨프린스호가 여수 호남정유 부두에 접안하여 양하작업 중 태풍 ‘페이’의 북상으로 외해역으로 피항

- 피항하던 중 빠른 바람(40-45 m/s)과 높은 파도(8-10 m)에 밀려 여수 작도에 선미측이 충돌하면서 기관실 파손 및 화재
- 이후 조종불능 상태에서 2시간 정도 서쪽으로 떠밀려 여수 남단 소리도에 15:00경 좌초
- 적재된 8만6천여톤의 기름 중 파손된 2개의 탱크에서 5,035 kL의 기름이 유출되어 73.2 km의 해안을 오염시킴

□ 방제 개요

- 해상에 유출된 기름은 오일붐을 설치하고 유회수기, 유흡착제, 유처리제 등을 이용하여 제거
- 외해로 확산되는 기름은 헬기와 항공기를 이용하여 유처리제를 사용한 항공방제 병행
- 사고 후 1개월 정도 지나 휘발성분이 대부분 증발되고 해초류와 혼합되어 끈적이고 있는 기름은 어장 쓰레기를 수거하는 정화선을 이용하여 수거
- 해안으로 밀려든 두터운 기름층은 유회수기, 고압펌프, 삽, 뜰채 등으로 회수
- 쓰레기 등과 혼합된 기름은 청소선, 쓰레기 수거장치 등으로 회수
- 조간대의 기름은 개뿔이, 유처리제 세척, 물리 기계적 방법 등으로 제거
- 돌, 암벽 등에 부착된 기름은 유흡착제, 걸레 등으로 닦아내는 작업에 의해 제거
- 자갈층에 깊이 스며든 기름은 포크레인 등으로 파서 철재 용기에 담아 경유로 기름을 용해시킨 다음 해수로 재 세척

□ 환경 영향

- 전남지역 38개 마을 47 km와 부산, 경남지역 13개 마을 약 26 km 등 총 연장 73 km의 해안을 광범위하게 오염시킴
- 여수 일대는 물론 경남 남해, 거제, 부산, 울산, 포항 해상까지 오염
- 일부 기름은 대마도에서도 발견

□ 피해배상

- 인건비, 선박임차료, 방제기자재 사용료, 수거 폐유 및 폐기물 처리비용 등 방제비용은 총 청구액 224억5천만원 중 212억2천만원 지급
- 어민 및 비어민을 포함한 보상 청구액 735억원 중 169억원 지급
- 유류오염이 아닌 태풍 자체나 적조 피해로 인한 손해배상 금액 불인정

(6) 제1유일호 좌초·침몰사고

□ 사고 개요

- 1995년 9월 20일 23:40경 울산항을 출발한 유조선 제1유일호의 1등 항해사가 반수면 상태로 운행하던 중 21일 오전 4:55경 부산 남형제도 부근 소암초에 좌초
- 예인선 선진202호가 제1유일호를 이초시켜 감천항으로 예인 항해하던 중, 21일 오전 11:50경 부산 북형제도를 1.5마일 가량 지날 무렵 제1유일호의 좌초 당시 선저 파공부위로 해수가 유입되어 기관실 부분부터 가라앉기 시작하여 16:20경 선체가 완전 침몰
- 적제된 벙커C유 2,392 kL가 유출

□ 방제 개요

- 침몰선으로부터 유출된 기름 중 유층이 두꺼운 부분은 유회수기, 유흘착제, 중질유 부착제를 이용하여 방제
- 유층이 얇은 부분은 유처리제를 살포하면서 항해파와 스크류암차를 이용하여 분산시킴
- 기름이 부착된 모래해안은 포크레인으로 기름이 스며든 부분까지 파내 수거하여 마대에 담아 운반, 처리
- 자갈밭 해안 부착유는 포크레인으로 자갈을 한 곳에 모아 유처리제로 세척한 후 흡착제로 자갈을 일일이 닦아냄
- 암벽에 묻은 기름은 유처리제를 흡착제에 묻혀 닦아내는 작업과 고압세척 작업을 병행

□ 환경 영향

- 침몰 해저 및 거제시 동부연안, 가덕도 서부, 부산 목도 해상, 해운대, 송정 연안, 기장군 공수리 앞 해상, 고리 연안 해상 등까지 유막 형성
- 거제시 동부해안 약 37 km, 진해만 도서 일원 약 8 km 해안, 부산 가덕도, 태종대, 해운대, 송정해안 약 10 km, 기장군 해안 일원 약 7.5 km가 기름에 의해 오염됨

피해배상

- 방제비용은 총 125억6400만원을 청구하여 123억8800만원이 지급됨
- 어민피해 총 청구액 663억5500만원 중 29억4900만원이 지급됨

(7) 호남 사파이어호 충돌사고

사고 개요

- 1995년 10월 26일 16:10경 여천시 낙포동 삼일항 소재 LG정유 원유부두에 접안 하려던 원유수송선 호남 사파이어호가 부두에 근접할 때까지 강한 전진 타력을 소멸시키지 못하고 계속 밀려 제2부두 제8번 돌핀에 부착된 방현재 전반부와 접촉되면서 방현재를 지지하는 체인 고정용 U-볼트 및 돌핀 교각 모서리와 접촉
- 호남 사파이어호 좌현 2번 원유탱크에 접촉으로 인한 파공이 발생, 적재된 원유 중 1,402 kL가 해상으로 유출

방제 개요

- 사고 즉시 설치한 오일붐 내에 유출유 대부분을 가두어 놓을 수 있었으나 시간이 지나면서 조류가 빨라져 오일붐 아래로 많은 양의 기름이 빠져나감
- 가막판 등 민감해역에 기름유입 방지를 위한 오일붐을 설치
- 유처리제 살포장치가 장착된 헬기를 이용하여 항공방제작업 실시
- 해안가로 밀린 많은 양의 유출유는 유회수기를 이용한 기계적 회수작업과 흡착제를 이용 흡착, 수거하는 방법을 병행 실시
- 해안자갈, 암벽, 모래사장에 부착된 기름은 주민과 군인을 동원 개담기 작업과 손삽, 쪽대 등을 이용하여 수거
- 고착된 해안 부착유는 고압세척기를 이용하여 암벽 세척작업 실시
- 기름이 부착된 자갈, 모래는 특별히 제작된 가마솥에 유처리제 및 해수와 혼합하여 가열 분리한 후 다시 깨끗한 해수로 세척하여 원상 복귀시킴

환경 영향

- 광양항 내 묘도 앞 해상에서 여수 신항-돌산도를 지나 방죽포까지 유막이 형성
- 돌산읍 진두마을을 비롯한 9개 마을과 남해군의 9개 마을 등 총 33 km의 해안에 기름이 소량 부착

□ 피해배상

- 방제비용은 약 64억여원을 청구하여 대부분 지급되었으나 여수수협과 여천군청에서 청구한 3천600만원은 보험사가 합리적인 비용으로 인정하지 않아 지급되지 못함
- 어민 피해보상 요구는 약 82억원에 이르렀으나 합동 피해조사 후 기술적으로 인정 가능한 피해사항에 대하여 약 15억5000여만원의 보상액이 대부분 합의, 지급됨

(8) 제3오성호 침몰사고

□ 사고 개요

- 1997년 4월 3일 울산시 온산항 쌍용정유 부두에서 병커C유 1,700 kL를 적재하고 전북 군산항으로 항해 중이던 유조선 제3오성호가 항해거리를 단축하고 파도가 낮은 곳으로 항해하기 위하여 유조선 항해 금지구역인 매물도를 근접하여 항해 중 비바람과 야간 시정 악화로 인해 선체가 예정된 침로에서 크게 벗어남
- 레이더에 포착된 등가도를 앞서가는 선박으로 오판하고 따라가다 뒤늦게 섬인 것을 확인하고 항로를 변경하려 하였으나 피하지 못하고 21:00경 등가도 해안 암초 위에 좌초
- 좌초 후 선체가 파도에 의해 이초되어 등가도 남서쪽으로 표류하면서 기관실이 침수되자 닻줄을 내어 투묘 시도 하였으나 계속 표류, 침수되어 같은 날 23:25경 침몰
- 화물탱크 및 연료탱크 에어벤트, 선저 파공부위를 통하여 약 1,694 kL가 유출

□ 방제 개요

- 깊은 수심(70 m)과 빠른 조류의 영향으로 오일붐의 고정 설치가 불가능

- 하여 등가도 주변의 넓은 해역에 대한 효과적인 유출유 회수를 위하여 대형 유회수 장비인 트롤스키머를 이용 두꺼운 기름층을 회수
- 갈색 유막은 유흡착제를 투하한 후 흡착제 수거에 용이한 소형 경비함정이나 스크린을 장착한 방제정을 이용하여 수거
 - 기름 흡착이 어려운 얇은 유막은 유처리제를 살포한 후 소화포로 분산시킴
 - 외해 등 피해가 우려되지 않는 넓게 트인 해역에서는 조류 및 바람에 의한 자연 소멸을 유도
 - 해안에 부착된 기름은 흡착제를 사용하여 흡착, 제거하고 얇은 유막은 유처리제를 사용 분산처리

□ 환경 영향

- 유출된 기름은 쿠로시오 해류와 강한 북동풍의 영향으로 등가도와 국도, 대구울비도 부근으로 이동하여 등가도 남방 22마일까지 오염시키고 일본 대마도까지 영향을 미침
- 등가도, 매물도 해안 및 대마도 서부 및 북동부 일부 해안에 기름 부착
- 매물도, 소매물도, 가왕도, 어유도, 대구울비도, 소구울비도, 흥도, 등가도, 가익도, 국도 등 10개 도서의 미역, 툇, 김, 우뚝가사리, 전복, 홍합 등에 피해를 입힘

□ 피해배상

- 방제비용은 총 청구액 10억9100만원 중 7억9100만원이 지급됨
- 어업 피해는 공동어업 및 패류양식업을 포함하여 총 12건 1억9100만원의 보상이 요구되었으나 6500여만원 만 실제 보상됨

(9) 유조선 덕양호 침몰사고

□ 사고 개요

- 2003년 9월 12일 20:30경, 태풍 매미를 피해 부산항에 선박 상호간 계류색으로 결박한 채 피항 중이던 덕양호의 14척 선박의 계류색이 절단, 영도대교 방향으로 표류
- 일부 선박이 영도대교 교각과 충돌 후 좌초 된 후, 덕양호는 영도대교 교

각과의 충돌을 피하기 위해 동력을 최대한으로 높였으나 여러 척의 선박들과 뒤엉켜 선수가 돌아가면서 선체가 기울어 복원력을 상실하여 전복

- 화물탱크의 덮개가 파손, 개방되면서 화물탱크 내에 적재되었던 벙커C유 360 kL가 모두 유출됨

□ 방제 개요

- 유출유의 대부분이 부두 모퉁이에 쓰레기와 혼합되어 두꺼운 유층을 형성, 일부 기름은 외해로 확산
- 부두에 밀린 기름은 오일붐을 다중으로 설치하고 유회수기 및 집게차를 이용하여 기계적으로 회수
- 오일붐 내 포집된 기름은 쓰레기와 유흡착제가 뒤엉켜 있어 유회수기의 회수작업을 방해하므로 방제조합 청방선 스크린 벨트로 유출유와 쓰레기의 회수 작업을 병행하였고 대형 쓰레기는 육상에서 집게차를 이용하여 수거
- 부산항 내에 확산된 기름은 경비함정 및 방제정을 동원하여 유흡착제 및 유처리제를 이용하여 제거
- 부두 안벽 및 선체외판에 고착된 기름은 유처리제를 살포하여 녹인 후 고압세척기를 이용하여 제거

□ 환경 영향

- 침몰선 주변에 부두 안벽을 따라 두꺼운 유층이 형성되었으며, 부산항 내 길이 약 100 m × 폭 5-20 m의 검은 색 유막이 4-5개소 분포
- 9월 14일까지 영도구 한국해양대학교 및 한진중공업 앞 해상에서 5-7부두, 감만동 부산해양경찰서 전용부두, 인근 연합철강 앞 해상에 이르기까지 얽어진 상태의 유막이 부산항 전역에 걸쳐 분포 되었지만 외해로 확산되지 않았음

□ 피해배상

- 어장 및 양식장에 대한 피해는 발생하지 않았음
- 침몰선박 해역주변에 계류된 선박청소, 선박인양, 잠수부 동원, 로프교환 등 선박 불가동 손실 등의 방제작업 외 비용이 약 1억 5천만원 청구되었으나 1억 2백만원이 지급됨

- 방제비용 총 청구금액은 약 36억원이었으나 검정액은 약 28억원으로 산정됨

(10) 유조선 정양호 충돌사고

□ 사고 개요

- 2003년 12월 23일 새벽 3시경, 전남 여수시 월내동 소재 LG칼텍스정유(주) 제7번 부두에서 벙커C유 6,701톤을 적재하고 광양항 제2항로를 따라 항해하던 유조선 정양호가, LG정유 제7번 부두로 향하던 유조선 승해호(5,914톤)와 교행 중 부주의로 인해 낙포부두 앞에서 충돌
- 정양호의 좌현 4번 탱크 외판이 길이 4.5 m × 폭 3.6 m × 깊이 8 m의 크기로 파공되어 파공부위부터 벙커C유 623 kL가 유출

□ 방제 개요

- 창조류를 타고 부두 쪽으로 흘러오는 해상 유출유는 오일붐을 V자 형태로 설치, 포집하여 제품부두 내 오일붐 5개소에 완전히 가두어 둔 후, 낮은 수온에 의해 굳어져 고형화된 검은색의 두꺼운 유층은 유회수기에 의한 회수작업이 불가능하여 스크린 벨트 및 모래채취 그라브선, 포크레인 이 장착된 평바지 및 차도선을 이용하여 물리적으로 회수하고 일부는 어선에서 인력으로 삽과 뜯채 등을 이용하여 회수
- 사고 선박 주위에 전장된 오일붐에 갇혀진 기름은 대부분 고형화되어 유회수기로 회수되지 않아 방제선에 장착된 스크린벨트를 이용하여 회수
- 부두 교각에 부착된 기름은 고압세척기를 이용하여 탈락시켜 수거
- 해안에 부착된 기름은 삽과 갈퀴 등을 이용하여 긁어 내거나 모래나 자갈해안에 올라온 기름은 손으로 수거, 암벽에 달라붙은 기름은 걸레를 사용 개뿔이 작업과 고압세척기로 세척 제거

□ 환경 영향

- 사고선박 주변 및 광양항 내측 서치도에서 광양항 입구 LG칼텍스정유 원유부두까지 약 10 km에 이르는 해상에 부분적으로 검은색 기름 덩어리와 은백색 유막이 부유
- 사고인근 묘도와 낙포부두 안벽에 덩어리 상태의 기름이 부착

- 남해도 염해마을 앞 해상에서 유두마을 앞 해상까지 길이 1 km × 폭 300 m 정도의 검은색 기름 덩어리 및 은백색 유막이 부유하여 조류를 타고 이동
- 묘도 남쪽해안 약 3.5 km, 남해도 서쪽의 17개 마을 해안 10 km에 덩어리 상태의 검은색 기름이 간헐적으로 부착

□ 피해배상

- 남해도 3개면 17개 마을, 10.32 km에 어망(각망) 10통, 염해마을 공동어장 179 ha와 가두리 양식장 2곳에서 1억5400만원을 청구

(11) 허베이 스피리트 유류오염사고

□ 사고 개요

- 2007년 12월 7일 07시경 대형 크레인선을 예인하던 삼성 T-5호 예인선의 예인줄이 절단되면서, 크레인선 삼성1호가 태안군 원북면 신도 앞바다에서 투묘 중이던 원유운반선 허베이 스피리트호와 충돌
- 원유운반선의 좌현 탱크 3개소가 파공되어 원유 12,547 kL가 해상에 유출

□ 방제 개요

- 선박주변에 유출된 기름은 오일붐을 설치하였으나 빠른 조류 및 강한 파도에 의해 제 기능을 다하지 못하여, 전국의 방제선박을 총 동원하여 해상부유유 회수, 유처리제 살포, 소화포에 의한 분산처리 등의 조치를 취함
- 해안에 밀려들어 두껍게 부착된 기름은 지역 주민 및 자원봉사자들이 참여하여 직접 퍼담기, 유회수기 및 하수구 준설차량을 이용한 기계적 회수, 닦아내기, 고압세척, 저압세척, 온수세척, 갈아엎기, 골파기 등의 다양한 방법으로 회수, 제거 하였으며 시험적으로 기름세정제 및 미생물처리제가 사용하기도 함
- 자갈해안에 밀려든 기름은 유흡착제나 형겅으로 직접 자갈이나 바위를 닦아내거나, 온수로 씻어낸 후 파도에 노출시켜 제거
- 부두, 안벽, 바위 표면에 말라 붙은 기름은 고압세척기로 제거
- 전라도 지역의 타르 덩어리는 주민 동원하여 주워내어 제거

□ 환경 영향

- 태안 해안 70여 km 중 약 35 km가 두터운 기름층에 의해 오염
- 충남지역 59개 도서에 기름 유입
- 타르 또는 에멀전 상태의 기름덩어리가 군산 앞 해상, 전라도 해안 및 도서 지역, 제주도 조천읍 다려도 해안까지 확산
- 신두리, 소근리 등 갯벌 지역 생물서식 굴 내로 기름 침투 및 잔존
- 태안 연안 굴 양식장에 기름 피해 및 갯벌 지역에 서식하는 갑각류인 쪽 대량 폐사
- 태안 연안 서식 이매패류 및 어류 체내에 사고 초기 유분함량 증가
- 전라도 도서 지역 김양식장에 타르 부착 피해
- 야생동물 (조류 포함) 53마리 폐사 (2007. 12. 23현재)

제 2 절. 국외 유류오염 사고사례

자료출처: CEDRE (2008) Understanding Black Tides.

○ 국외 대표적 해양오염사고 발생 현황

연 도	유출 선박	유출량 (kL)	발 생 지	비 고
1978	Amoco Cadiz	227,000	프랑스 Brittany	
1989	Exxon Valdez	38,500	미국 알래스카	
1991	Haven	144,000	이탈리아 Ligurian	
1992	Agean Sea	67,000	스페인 Galicia	
1993	Braer	84,500	스코틀랜드 Shetland	
1996	Sea Empress	73,000	영국 Milford Haven만	
1999	Erika	20,000	프랑스 Brittany	중질연료유
2002	Prestige	64,000	스페인 Galicia	중질연료유

(1) Amoco Cadiz (1978.3.16)

- 사고유형: 기계적 결함
- 적재량: 227,000톤
- 오염물: 경질 원유
- 유출량: 227,000톤
- 폐기물수거량: 100,000톤
- 오염해안선 길이: 360km

□ 사고 개요

- 1978년 3월 16일 아침 라이베리아 선적의 유조선 Amoco Cadiz호가 프랑스 Brittany 지역의 Finistere 연안에서 조타(steering) 시스템의 문제가 발생함.
- Amoco Cadiz 유조선은 당시에 227,000톤의 원유를 페르시아만에서 네덜란드 로테르담으로 운송 중이었으며, 기상이 악화되면서 해안쪽으로 표류하였음.
- 독일의 예인선이 예인 시도하였으나 성공하지 못함.

-9:45 조타 시스템의 문제 발생

- 13:15 예인선 Pacific호 도착. 일차 예인 시도
- 15:00 유조선과 예인선이 모두 동쪽으로 표류. 바람이 더욱 거세짐
- 16:18 예인줄이 절단됨. 강도 8의 동풍과 강도 9-10의 돌풍.
- 22:00 5차례의 시도로 2번째 예인줄이 장착되었으나 너무 늦음.
유조선은 Portall의 바위에 좌초됨.
- 23:55 선원을 구하기 위한 구조작업 진행됨.

- 2주에 걸쳐서 적재된 227,000톤의 모든 원유가 유출됨.
- 유출된 원유는 바람과 해류에 의해 확산되고 Brenton의 해안선 360km를 오염시킴.
- 지역주민들은 예견된 대재앙으로 내몰렸으며, 프랑스 국민들은 텔레비전에 비친 목시적인 유류사고 화면에 압도당함.

□ 방제 개요

- 바가지, 삽, 부유 펌프, slurry spreaders, 덤프트럭, 탱크로리 등이 유출유의 회수 및 임시 저장소로의 이송에 사용되어짐.
- 초기 몇 일 간 14,000명의 자원봉사자와 군인들이 심하게 오염된 바위, 해안, 하천의 방제에 참여함.
- 초기 수 주 동안에 15,000톤의 기름과 45,000톤의 기름에 오염된 해조류, 모래, 토양 폐기물이 수거됨.
- Finistere와 Cotes d'Armor에 조류구조센터를 설치하였으나, 기름에 오염된 조류 20개체 중 1개체 미만으로 구조에 성공함. 몇 개체의 물개 사체가 수거되었음. 유류가 심하게 표착한 해안을 따라 엄청난 동식물 폐사가 발생함.
- 초기 몇 일간의 긴급한 방제가 진행된 이후에, 점차 조직화된 방제작업이 이루어짐. 해상에서는 유류의 침강제 및 유처리제가 사용되고 Channel 섬으로 유류가 표류하는 것을 막기 위해 바람의 방향을 바꾸는 작전이 수행됨.
- 해안 방제는 2단계로 진행되었음. 1단계는 액상으로 존재하는 기름의 회수작업이며, 2단계는 기름에 오염된 폐기물을 제거하는 작업임. 총 100,000톤의 초콜릿무스 형태의 기름과 폐기물이 수거되었으며, 생석회를 이용하여 바로 중화시킴.
- 사고발생 직후부터 4월말까지 어선의 조업은 전면 금지됨. Finistere 하천 지역과 Morlaix만 지역의 굴의 경우 섭취에 부적합하여 채취가 금지되고 전량 폐기처분됨. 수산관계기관은 어민과 종묘배양업 종사자를 위한 경제

적 지원책을 시행함. 관광업계는 관광 성수기 전체가 영향을 받을 것을 두려워함.

□ 후속조치

- Amoco Cadiz호 유류유출 사고를 계기로 프랑스 정부는 사고위험을 줄이기 위한 일련의 방안을 시행하였으며, 방제 자원을 확충함. 만장일치의 결론은 이런 사고는 다시 발생하지 않아야 한다는 것임.
- 새로운 해양오염 방제계획(Polmar Plan)이 수립됨.
- 선박의 운항 경로가 변경되었으며, 유류 및 유해물질을 운반하는 선박의 경우는 해안으로부터 50 km 밖의 경로를 택해야함. 해상의 악기상 상황에서도 운영이 가능한 강력한 예인선 Abeille Flandre가 24시간 대기로 운영되기 시작하였고, 전문화된 기술지원 조직인 CEDRE가 지속적이며 기술적인 감시가 이루어지도록 설립되었음. CEDRE는 오염사고시 24시간 가동됨.

□ 영향

- 1978년 가을 기름으로 오염되었던 해안지역의 경우 몇몇 남아있는 폐기물 저장소를 제외하고는 남아있는 것이 거의 없었음. 그해 겨울의 폭풍은 사람이 시작한 해안방제 작업을 마무리하였음.
- 정부기관, 과학자, 생태학자, 해양전문가, 관광산업계에서는 이 재앙의 영향을 평가하였으며, 1979년의 잠정적인 피해는 19,000-37,000개체의 조류 피해, 6,400톤의 굴 피해, 해조류와 패류 채취의 심각한 피해, 수천명의 어민의 실직, 관광 성수기의 타격으로 집계되고 있음. 그러나 단기적인 경제적 손실보다 전문가들이 더 걱정하는 것은 미래임.
- Amoco Cadiz와 같은 대형 유류 유출사고는 선례가 없었기에, 훼손된 생태계가 어떻게 균형을 찾을 수 있을지를 예측하기 어려움.

□ 사고 후 30년

- 비록 일부 생태학적인 연구가 아직까지도 생태계의 불균형에 대한 증거를 보여주고 있으나, 이는 심하게 영향을 받은 만지역의 일부 제한된 저서생물 개체군에 해당됨. 하지만 Amoco Cadiz호 사고가 가져다 준 수산업, 관광업 및 기타 산업에 대한 피해는 여전히 과거의 기억이 아님.

- 여전히 특정 생물종에 대한 장기적인 영향, 생물에서의 암 발생, 생식장애에 따른 생산력의 감소, 오염이후 약화된 세대 등에 대한 우려가 여전히 존재함. 과학적인 연구는 이런 우려에 대하여 확인하지 못함. 복잡한 영향이 다중으로 작용하기 때문에 관찰 및 해석을 통해 입증하기가 매우 어려움. 이 모든 영향을 꼭 Amoco Cadiz와 연결시키는 것이 반드시 현명한 것만은 아닐 수 있음.
- 시간이 지나면서 해안의 경제적인 그리고 생태적인 균형이 여러 요인에 의하여 영향을 받았음. 이후의 다른 유류 유출사고도 발생했으며, 관광산업이 발달하고, 수산기술이 발달하였으며 우선순위도 바뀌었고, 도시와 농촌의 오염물질이 유역과 연안으로 유입되었음.
- 침몰선은 현재 어류와 갑각류의 은신처 노릇을 하고 있음. 여행객은 Portsall 항구의 유물로 전시된 Amoco Cadiz의 뒀 앞에서 사진을 찍음. Amoco Cadiz호 유류 유출사고는 현재 역사의 일부분이 되었음.

(2) Exxon Valdez (1989.3.24)

- 사고유형: 좌초
- 적재량: 180,000톤
- 오염물: 원유
- 유출량: 38,500톤
- 폐기물수거량: 25,000톤
- 오염해안선 길이: 1,700km

□ 사고개요

- 1989년 3월 24일 밤 초대형 유조선 Exxon Valdez호가 미국 알래스카의 Valdez 석유적재 터미널에서 180,000톤의 North Slope 원유를 적재하고 캘리포니아의 롱비치로 향하던 중, Bligh Reef에서 좌초함.
- 좌초 발생 몇 일이 지나서야 유류 저장 탱크가 파손되고 38,500톤의 원유가 유출되었음이 확실해짐.
- Exxon Valdez호는 남은 원유를 모두 이적하고 예인된 후 조선소에서 수리를 함.
- 수리 이후에 Exxon Mediterranean으로 선명을 개명한 후 운영됨. 다른 회사에 선박이 매각된 이후에는 Sea River Mediterranean 선명을 개명하고 계속 운영됨.

□ 방제개요

- 알래스카 주시사는 사태가 긴급함을 천명하고 방제의 책임을 사고 선박의 소유자인 Exxon사 부과함. Exxon사는 사고의 책임을 인정하고 모든 방제작업과 방제비용을 사측이 부담하기로 함.
- 부유식 오일붐과 스키머 바지가 현지에 급파되고, 전체 적재 원유가 해상으로 유출되는 것을 차단함.
- 선박에 잔류한 적재 원유는 다른 유조선인 Exxon Baton-Rouge로 이적됨.
- 2개월간에 걸쳐 7,000 km²의 면적으로 표류한 기름은 800 km의 해안선(내해와 작은섬을 포함할 경우 1,700 km)을 오염시킴.
- 수만명의 방제전문가 및 자원봉사자와 1,400척의 선박 및 85대의 헬리콥터가 방제작업은 물론 바다새와 포유류의 구조에 동원됨.
- 주요 방제작업은 방제자의 수거작업, 기계적인 방제, 펌프, 세척(저압저온 세척, 세척제를 포함한 고압고온세척), 생물정화제 사용이 포함됨.

□ 동물피해

- 3,700-5,800개체의 9종의 다른 포유류가 오염의 영향을 받았음. 300개체의 물개 폐사가 보고되었으며, 폐사의 원인은 주로 기름으로부터 발생한 휘발성 유해물질의 흡입으로 야기된 것임. 2,800개체의 해달의 폐사 원인은 질식, 기름의 섭취 및 저체온증임. 사고이전에 보고된 Prince Williams Sound의 36개체의 Killer 고래 중 14개체가 사고이후 1989-1990사이에 자취를 감춘 것으로 보고됨. 사슴 및 곰을 오염된 먹이로 부터 보호하기 위하여 비오염지역으로 이동시키는 활동이 전개됨.
- 71종에 이르는 바다새가 영향을 받았음. Guillemots가 가장 심하게 피해를 받은 조류로 22,000개체의 사체가 수거됨. 유류 유출사고로 폐사된 조류는 250,000-350,000개체로 추정됨. 대머리 독수리도 예외 없이 153개체의 사체가 수거됨. 약 1,630개체의 기름에 오염된 조류가 4곳의 구조센터로 보내졌고, 이 중 837개체가 치료 후 재활에 성공하여 자연으로 방사됨. 조류의 구조사업에 사용된 비용만 25,300,000 USD(한 개체 당 30,000 USD)으로 추산됨.
- 무척추동물의 폐사는 선박이 좌초된 해역을 중심으로 사고 발생 이후 2주간 가장 심하게 발생했음. 대부분의 갑각류가 사라졌고, 다른 무척추동

물도 찾아보기 어려웠음. 무척추동물 중 조간대에 서식하는 특정 고둥류와 삿갓조개류가 심각하게 영향을 받았음.

- 사고 후 2주간 수천마리의 폐사한 물고기가 관찰되었으나, 다른 생물군과 비교할 경우는 상대적으로 영향이 작았음. 그러나 지느러미의 손상이나 기름 성분의 축적과 같은 아치사 수준의 영향은 대부분의 물고기에서 나타났음.

□ 어업피해

- 알래스카 지역은 12,000명의 어민이 존재함. Prince Williams Sound의 1987년 수산물 생산량은 174,000,000 USD으로 이는 미국 수산물 시장의 6%에 해당하는 규모임. 청어의 조업은 4월초에 시작되며, 연간 생산량은 14,000,000 USD에 해당됨. 분홍연어의 조업은 6-7월에 시작되며, 연간 33,000,000 USD의 생산량을 기록함. 사고 직후 알래스카 주지사는 오염에서 생존한 수산자원의 고갈을 막기 위하여 Prince Williams Sound에서의 조업을 금지하였으며, 이 조치로 4,000개의 수산업 관련 일자리가 영향을 받음.
- 오염된 수산물의 섭취를 통한 인체건강의 위해성을 평가하고자 수백마리의 어류와 패류 시료가 분석되었음. 오염된 수산물의 섭취를 통한 발암위해성 평가 결과는 무시할만한 수준이었음. 하지만 해당 결과는 누구도 만족시킬 수 없었으며, 사고 이후의 연구결과 조사된 15개 마을 중 10개의 마을 주민의 음식물 섭취 중 수산물 섭취가 31-77%까지 감소하는 방향으로 바뀌고 있음을 보여주었음. 사고 이후 2-3년 이후에 수산물을 주식으로 하는 마을에 대한 조업이 전면적으로 재개 되었으나, 일부 가족들만이 조업을 함.

□ 인간에 대한 영향

- 사고 1년 후, 심리적인 장애의 유병율과 유류 사고에 대한 노출 및 방제 작업 참여 정도 간의 상관성에 대한 연구가 수행됨. 노출정도는 심리적 불안증, 외상 후 스트레스 증후군 및 우울증의 유병율과 유의한 상관관계를 보였음. 이 결과로 부터 유류사고와 유류 유출사고의 피해지역 주민의 심리적인 장애의 유병율과 상관성이 있다는 가설이 입증되었으며, 이는 합리적인 결과임. 사고 피해지역의 여성과 원주민들이 가장 위해도가 높은 그룹에 속했음.

□ 영향 이후

- Prince Williams Sound는 알라스카의 피요르드식 해안지역에 포함된 복잡한 해안선과 많은 섬과 초를 포함하는 지역임. 유류사고의 영향을 받은 해역은 생태적으로 매우 민감한 지역에 속함. Exxon Valdez 유류 유출사고 신탁위원회(Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council; EVOSTC)는 사고 이후 여름에 설립되었으며, 환경피해의 조사 및 피해지역의 복구의 계약 및 조정자 역할을 수행함.
- EVOSTC는 1994년 아래의 5개의 실행계획을 수립함.
 - 영향을 받은 주요자원과 종의 감시
 - 영향을 받은 지역의 복원
 - 서식지의 보호
 - 기금의 장기적인 관리
 - 과학적인 조정, 운영, 의사소통
- 위의 계획 하에서 엄청난 숫자의 연구가 진행됨. 물개, Killer고래, 해달의 경우만 장기적인 관점에서 조사가 진행됨. 사고가 발생한 해에 대머리 독수리의 생식 실패율은 중-상의 오염지역에서 85%로 중-하의 오염지역의 생식 실패율 55%비해 높게 관찰됨. 이 생식 실패율은 이듬해인 1990년에 정상적으로 회복되어. 최종적으로는 대머리 독수리의 개체군에 영향이 없는 것으로 보고됨. 상업적으로 이용되는 종의 경우에는 1990년 성어의 회귀가 현저히 감소한 분홍연어와 1993년 개체군이 현저히 감소한 청어에 대해서 연구가 수행됨. 해당 연구결과는 EVOSTC의 홈페이지와 많은 연구문헌을 통해 발표되었음.

□ 결론

- 미국은 유류 유출사고와 관련된 국제적인 보상시스템의 회원국이 아님. Exxon Valdez호 사고는 미국이 이를 재검토하도록 한 것이 아니라, 오히려 국내법으로 유류오염법(Oil Pollution Act; OPA)를 1990년에 제정함. 이 법은 크게 두 가지 사안을 다루고 있음. 첫째, 미국 영해에 운항 중인 모든 선박은 이중선체구조를 갖도록 하는 강제조항의 신설로 단일선체를 퇴출되도록 한 것임. 둘째, 유류를 운송하는 자가 분담금을 내어 국가적인 신탁기금을 조성하도록 하였으며, 유출사고 발생 시 오염된 해역의 방제와 피해보상 규정을 법제화한 점임. 피해평가의 경우 방제가 적절하게 진행되는 경우에는 참여한 당사자들이 판단하도록 남겨둔 점이 특이함.

또한 보상에는 피해를 저감하고 이를 지속적으로 이루도록 하는 노력에 들어가는 비용이 포함되며, 국제기금과 달리 자연자원에 대한 피해의 보상 가능성도 법적으로 보장하고 있음.

□ 오염비용

- 1991년 연방정부, 알래스카 주정부 및 엑손사 간에 다음과 같이 합의가 이루어짐.
- 형사소송합의: 방제에 소요된 125,000,000 USD의 현물납을 포함하여 150,000,000 USD에 합의함. 나머지 금액 중 13,000,000 USD는 범죄희생기금에, 12,000,000 USD는 습지보호기금에 출연됨.
- 유류사고로 인한 피해의 복구에 사용하기로 합의된 100,000,000 USD은 연방정부와 알래스카 주정부가 반으로 나눔.
- 민사소송합의: 900,000,000 USD가 10년에 걸쳐서 지불하는 것으로 엑손사에 부과되었으며, 이 비용은 환경의 복원 및 연구에 사용되도록 함. 이 합의는 2002년 9월에서 2006년 9월에 사이에 평가 시점에 발견되지 않은 새로운 사실이 확인될 경우 재심의 하여 100,000,000 USD의 추가 금액이 부과될 수 있는 여지를 남겼음. 이후 2006년 6월에 미국 법무부와 알래스카 주 정부는 이 규정에 의거하여 소를 제기하여 유류오염 지역의 추가 방제비용으로 92,000,000 USD를 엑손사에 부과함.
- 위의 액수에 더하여 엑손사는 손해에 대한 징벌성격으로 5,000,000,000 USD가 1994년에 법원에서 부과됨. 이 부과금에 엑손사가 이의를 제기하면서 2002년에 4,000,000,000 USD로 감소되었다가 다시 4,500,000,000 USD로 상향조정됨. 더욱이 2,000명의 어민은 사고 이후의 연어 생산량의 감소와 관련하여 평균 10,000 USD의 보상을 받았거나, 받을 예정임.
- Exxon Valdez 사고는 해사 기록 상 유출량에서 26번째로 규모가 큰 선박에 의한 해상 유출사고로 기록되었지만, 가장 많은 언론매체의 관심을 받았고 가장 큰 비용의 댓가를 치른 사고로 기록되었음. 엑손사에게 환경 피해의 복원과 연구에 부과된 비용만 치더라도 Amoco Cadiz호 사고에서 Amoco사에 부과된 전체 보상비용을 초과함.

(3) Haven (1991.4.11)

- 사고유형: 폭발/화재
- 적재량: 144,000톤
- 오염물: 원유
- 유출량: 144,000톤
- 폐기물수거량: 3,300톤
- 오염해안선 길이: 100km
- 보상청구액: 112,000,000 Euro
- 보상액: 65,000,000 Euro

□ 사고개요

- 1991년 4월 11일 이탈리아의 Genoa 항구 근처에서 144,000톤의 이란산 원유를 적재하고 있던 Cypriot선적의 Haven호가 폭발 후 선체에 화재가 발생함.
- 이튿날 선수부가 떨어져나가면서 460미터 깊이의 해저로 침몰함.
- 4월13일 해안가에서 유출 원유가 목격되기 시작함.
- 4월14일 남은 선미부 선체를 바다 쪽으로 예인도중 연속적인 폭발이 일어나면서 선미부가 80미터 해저로 침몰함.

□ 방제개요

- 현장 방제지휘관은 유출유가 가능한 한 많이 연소되도록 선체의 화재를 그대로 방치하도록 하여 원유의 유출을 최소화시킴.
- 해안가의 유류오염을 줄이기 위하여 선체를 바다 쪽으로 예인함.
- 연소된 원유의 양은 100,000톤으로 추정되며, 침몰한 난파선의 잔류 원유량은 3,000톤으로 추정됨.
- 해상 방제는 부유식 오일붐과 표층 오일스키머가 사용되었음. 오일붐은 항구와 해안의 민감지역을 보호하기 위하여 사용되었고, 유류가 표착한 해안에서는 해안방제 활동이 이루어짐.

□ 영향

- 타르질의 원유의 많은 연소 잔유물이 빠르게 해저면으로 침강하였으며,

남은 적재 원유는 해류와 바람에 의해 분산되었음.

- 해상에서의 방제활동에도 불구하고 원유 slick은 서쪽으로 표류하다 이탈리아의 Ligurian 연안의 많은 항구들 뿐만 아니라 프랑스의 Cote d'Azur를 오염시켰음.
- 5월말의 수중음향 조사결과 침몰한 유조선 잔해 주변의 12 ha를 10cm 두께의 두꺼운 타르층으로 덮혀 있는 것으로 나타났음.

□ 보상

- 1991년 가을 많은 의뢰인이 참여한 소송이 보상의 한계와 환경피해와 관련하여 이탈리아에서 제기되었음. 이탈리아 정부는 국내법에 의거하여 해양환경에 대한 피해에 대하여 60,000,000 Euro를 부과하였음. 이탈리아 Ligurian 지역은 IOPC 기금을 대상으로 동일한 보상청구를 하였으나, IOPC 기금은 책임영역을 넘는다며 해당 보상청구를 거절함. 매우 복잡한 사례에 해당하는 사건이었지만 1995년 최종적으로 총 82,000,000 Euro의 보상액이 이탈리아 정부에 부과되었음. 이에 15,000,000 Euro의 위자료 성격(계량적인 피해에 대한 증거를 필요로 하지 않는 자발적인 성격의 보상금)의 액수가 포함됨. 1996년 법원에서는 환경피해 비용이 방제비용의 1/3에 해당된다고 추산하였으며, 이는 24,000,000 Euro에 해당되었음. 1999년 3년 Haven 특별법은 전체 보상액을 과거 제안액수에 근접하게 확정하였으며, 보험사의 위자료 성격의 보상을 확정함.
- Haven호 원유 유출사고는 지중해에서 발생한 가장 최악의 유류 유출사고이며, 유류 사고에 의한 생태계의 피해에 관한 문제들을 국제사회에 제기한 사건으로 기록되었으며, 사고이후에 15년간의 장기 환경복원 프로그램이 최초로 실행된 사례에 해당됨.

(4) Aegean Sea (1992.12.3)

- 사고유형: 좌초
- 적재량: 79,000톤
- 오염물: 원유
- 유출량: 67,000톤
- 폐기물수거량: 2,200톤

- 오염해안선 길이: 300km
- 보상청구액: 384,000,000 Euro
- 보상액: 56,000,000 Euro

□ 사고개요

- 1992년 12월 3일 동트기 전에 79,000톤의 원유를 적재하고 스페인 Galicia의 La Coruna 항구로 입항하던 그리스 선적의 유조선 Aegean Sea호가 폭풍의 영향으로 좌초한 후 선체가 두동강이 나게됨.
- 선체에 화재가 발생하여 당일 정오까지 도시 전체가 검은 연기에 휩싸일 정도였으며, 익일에서야 화재가 잡힘.

□ 방제개요

- 원유의 유독 연소가스 때문에 지역주민은 소개되었으며, 해상에서 예인 오일붐을 이용한 유출유의 회수 작전이 시행됨.
- 해안에서는 펌프 및 수작업으로 원유 slick의 회수작업이 진행됨.
- 해상 및 해안의 회수작업으로 총 5,000 m³의 에멀전 및 1,200 m³의 오염된 폐기물이 수거되었음. 오염된 폐기물은 전량 소각처리되었음.
- 12월 9일 수천 톤의 선미 탱크 적재 원유의 이적 작업이 시작되었으며, 12월 21에 완료되었음.

□ 영향

- 약 300km의 해안선이 유출유에 의하여 오염되었고 중요한 어업, 양식, 패류 채취 해역이 오염되었음. 연안의 어업 및 양식 활동이 금지되었고, 이는 약 4,000 여명의 수산업 종사자의 경제활동에 영향을 미쳤다. 이들은 1976년에 같은 지역에서 발생한 Urquiola 유류 유출사고의 보상액 지급도 주정부에서 아직 마무리되지 않은 상태였음. 보상은 진행 중이며, 조업금지 조치는 1993년 1월 및 9월에 단계적으로 해제되었음.

□ 보상

- 약 900건의 총 액수 400,000,000 Euro의 보상청구가 개인, 회사, 협동조합

등을 통해 제기되었음. 첫 공판은 1996년에 열렸으며, 1997년에 유조선의 선장과 항구의 도선사에게 모두 책임이 있다는 판결이 나옴에 따라 선주측(IOPC 기금)과 스페인 정부가 경제적 손실에 대하여 동등한 책임을 지게 됨. 2000년에 법정 외에서의 화해를 통해 320,000,000 Euro의 1/4에 해당하는 금액으로 법적인 소송절차를 마무리함.

(5) Braer (1993.1.5)

- 사고유형: 기술결함
- 적재량: 84,500톤
- 오염물: 경질 원유
- 유출량: 84,500톤
- 폐기물수거량: 2,000톤
- 오염해안선 길이: 15km
- 보상청구액: 222,000,000 Euro
- 보상액: 75,000,000 Euro

□ 사고개요

- 1993년 1월 4일 밤 84,5000톤의 북해산 경질유를 적재하고 노르웨이에서 캐나다로 이동하던 중 선체의 기술적인 결함으로 문제가 발생하였고 이어서 엔진이 멈춤.
- 새벽 5시경 해안에서 약 10마일거리에서 조난신호를 보냄. 이후 4시간이 경과한 시점에서 선원들은 헬기에 의해 구조가 되고, 선박은 표류를 하다가 스코틀랜드의 Shetland 섬 남쪽에서 오전 11시 20분에 좌초됨.
- 좌초 후 선체는 점진적으로 파손되고 10일 동안에 걸쳐 적재 원유 전량이 유출됨.

□ 방제개요

- 기상악화로 해상에서의 방제는 불가능한 상황이었으며, 해안 방제도 제한됨. 하지만 약 8,000톤의 원유는 좌초 선박에서 바지로 이적되었음.
- 해상으로 유출된 원유는 유처리제의 항공살포로 분산시켰으나, 유출유의 대부분은 파도에 의해서 자연 분산됨.

- 부유식 오일붐으로 해안을 유출유로부터 보호하고자 했으나, 성공적이지 못했음.
- 유출유는 바위에 들러붙지 않았으며, 물에 젖은 모래층으로 많이 침투하지는 않았음. 해안 방제는 대부분 방제 작업자에 의해 수작업으로 진행되었으며, 부분적으로 기계적인 방제가 이루어졌음.
- 오염된 폐기물은 2,000톤이 수거되었음.

□ 영향

- 좌초된 선박 주변으로 광범위한 해역에 대하여 조업금지 조치가 취해졌음. 흡착제가 장착된 붐을 사용했음에도 불구하고, 연어 양식장이 영향을 받아 수 주 동안 연어 생산이 불가능해짐.
- 양떼들은 오염된 풀을 섭취하거나 휘발성 유기화합물의 호흡으로 문제가 발생했으며, 양털은 기름으로 오염되었음. 따라서 오염된 목초지역에서는 양떼의 방목이 금지되었으며, 양들은 우리에게 머물도록 조치되었음.
- 기름 입자와 휘발성 물질은 지붕을 오염시켰으며, 50 km²의 농경지의 생산물에 대한 섭취가 금지되었음.

□ 보상

- 주정부, 공공서비스 기관 및 2,000명의 개인 피해자들이 보상을 청구함. 이들 보상청구 건 중 대부분이 사고 후 3년 내에 법원 외에서 화해에 의해서 결정이 났음. 법원 외 화해에 실패한 청구자는 소송을 제기하여 법원에 계류 중이며, 총 청구 금액은 상한선을 훨씬 넘는 액수임. 첫 법적인 소송 제기 이후에, 다른 소송건의 법원 외 화해를 위해서 영국 정부가 제기했던 방제 비용에 대한 보상청구를 취하함. 총 75,000,000 Euro에 해당되는 금액이 할당됨.

(6) Sea Empress (1996.2.15)

- 사고유형: 좌초
- 적재량: 130,000톤
- 오염물: 경질 원유
- 유출량: 73,000톤

- 폐기물수거량: 47,000톤
- 오염해안선 길이: 200km
- 보상청구액: 71,000,000 Euro (진행중)
- 보상액: 53,000,000 Euro (진행중)

□ 사고개요

- 1996년 2월 15일 저녁 130,000톤의 북해산 경질유를 적재하고 이동 중이던 라이베리아 선적의 유조선 Sea Empress호가 영국 Milford Haven만의 입구에서 좌초됨.
- 영국의 British Maritime and Coastguard Agency에 의하여 수립된 국가 긴급계획에 따라 선박을 안정화 시키고, 적재 원유를 이적하며, 가능한 빠르게 선체를 재부유 시키도록 함.
- 2월 21일 밤사이에 12척의 예인선의 도움으로 좌초된 유조선은 Miford Haven만 근처에 위치한 정유시설의 사용 중단된 부두로 예인 조치됨.
- 예인된 선체는 부두에서 오일붐으로 둘러쳐짐. 부두로 최종 예인 완료되기 전까지 약 73,000톤의 원유가 유출됨.

□ 방제개요

- 해상에서의 방제는 크게 분산과 회수라는 2가지 전략을 택함. 화학 유처리제는 해상에서 항공살포가 이루어짐. 유출유의 확산방지 및 회수는 외해에서는 방제 전용선에 의해서 이루어졌으며, 근해에서는 바지선과 어선에 의해서 수행됨.
- 전례가 없던 방제의 국제협력이 성공적으로 이루어진 사례로 평가를 받으며, 4,000톤의 기름을 함유한 총 8,500톤의 에멀전이 회수되었음. 육상에서는 총 500명의 방제인력이 30군대의 해안에서 방제에 동원되었음.
- 항구, 강하구 및 습지를 보호하기 위하여 2 km의 오일붐이 설치되었음.

□ 영향

- 3월 1일부터 영향을 받은 해역에서 조업이 금지됨. 조업금지는 연어와 해산 송어와 같은 어류가 회유하는 하구와 강으로 확대됨. 조업은 5월20일부터 점차 재개되기 시작함.

- 약 200 km의 해안선이 유출유에 의해 오염되었음.
- 조류와 포유류는 유출량에 비하여 상대적으로 피해가 적었음. 약 3,000 개체의 조류 사체와 6,900 개체의 기름이 ane은 조류가 수거되었음.
- 환경영향 조사를 조직하고 수행하기 위하여 국가적인 Sea Empress Environmental Committee가 만들어졌음. 환경영향 보고서는 1997년에 발간됨.

□ 보상

- 가능한 보상 금액은 65,000,000 Euro로 제한적으로 설정되었음. 1996년 6월까지 약 200건의 보상청구가 있었음. 2004년 말까지 53,000,000 Euro의 보상이 법원 외 화해로 이루어짐. 1999년 2월부터 법원 외 화해에 실패한 건에 대하여 법적인 소송이 제기되기 시작했으며, 현재까지 일부 소송은 진행 중에 있음.

(7) Erika (1999.12.12)

- 사고유형: 선체 구조결함
- 적재량: 31,000톤
- 오염물: 중질 연료유
- 유출량: 20,000톤
- 폐기물수거량: 270,000톤
- 오염해안선 길이: 400km
- 보상청구액: 388,000,000 Euro (진행중)
- 보상액: 129,000,000 Euro (진행중)

□ 사고개요

- 1999년 11월 11일 저녁 31,0000톤의 중질 연료유를 적재하고 프랑스 Dunkirk에서 이탈리아 Livorno로 이동 중이던 몰타 선적의 유조선 Erika 호에 악화된 기상 조건 하에서 선체의 구조적인 문제가 발생함.
- 다음날 안전을 위하여 선원들은 모두 항공 구조가 이루어지고, 선박은 표류 중 프랑스 Brittany지역의 Penmarc'h 남쪽 30마일 해상에서 선체가 두개로 갈라짐.
- 선수부는 밤사이에 침몰하고, 선미부는 예인되던 도중에 다음날에 침몰

함. 두 부분으로 갈라진 선체는 약 10km의 거리를 두고 약 100m의 수심의 해저로 침몰함.

- 약 20,000톤의 연료유가 침몰된 선박에 남아있었으며, 이는 침몰 후 서서히 유출됨.

□ 방제개요

- 프랑스의 해양오염 방제계획이 12월 12일 부터 효력을 발휘함.
- 연료유의 경우 점성이 높고 해상 상태가 좋지 않아 펌프를 이용하여 해수면에서 회수하기 어려움. 하지만 12월 23일까지 약 2,300톤이 회수됨.
- 대부분의 해안의 민감지역을 보호하기 위하여 오일붐이 설치됨.
- Vendee, Charente-Maritime, Loire-Atlantique, Morbihan, Finistere의 해안방제계획이 12월 22일에서 12월 24일 사이에 발효됨.
- 군인, 소방관, 민간 방제업체, 자원봉사자를 포함하여 수천명의 방제인력이 해안방제에 참여함.
- 많은 지역에서 방제 종료이후에 지속적으로 연료유가 표착하는 일이 발생함.
- 2000년 여름 동안에 침몰 유조선 내에 밀봉된 약 11,000톤의 연료유를 액화시켜서 회수함.

□ 영향

- 해안 400 km가 유출유에 의해서 오염되었으며, 70,000개체의 기름에 오염되었거나 죽은 조류가 수거되었음.
- 해안 방제 시에 예방적인 조치가 이루어졌음에도 불구하고 방제작업에 의한 2차적인 훼손을 막을 수 없었음.
- 유출유의 해안 표착에 의하여 어업, 패류 채취, 염전 및 관광산업이 영향을 받음.
- 프랑스 환경부에 의해서 영향에 따른 후속 프로그램이 수행됨.

□ 보상

- 가능한 보상 금액은 185,000,000 Euro로 설정되었음. 2007년 10월에 IOPC 기금에서 129,000,000 Euro가 방제비용과 경제적 손실에 대한 보상비용으로 확정됨. 7,000건의 보상청구건이 385,000,000 Euro의 액수로 발생했으며, 285건이 62,000,000 Euro에 대하여 법적인 소송을 제기함.

(8) Prestige (2002.11.13)

- 사고유형: 선체 구조결함
- 적재량: 77,000톤
- 오염물: 중질 연료유
- 유출량: 64,000톤
- 폐기물수거량: 170,000톤
- 오염해안선 길이: 2,000km
- 보상청구액: 868,000,000 Euro (진행중)
- 보상액: 57,000,000 Euro (진행중)

□ 사고개요

- 2002년 11월 13일 바하마 선적의 유조선 Prestige호가 스페인 Galicia 연안에서 조난신호를 보냄. Prestige호는 77,000톤의 연료유를 라트비아의 Ventspils 터미널과 러시아의 Saint Petersburg 터미널에서 적재 후 싱가포르로 운송 중이었음.
- 조난 신고 이후에 안전을 위하여 선원들은 모두 항공 구조되었으며, 선박은 예인 중이었음.
- 해상에서 피항지를 찾기 위하여 6일 보내는 동안에 선박은 두동강이 났고, 이미 2건의 큰 해상 유류 유출사고가 발생했던 해역에서 130마일 떨어진 3,500미터 수심해역에서 침몰함.
- 스페인 전문가에 의하여 추정된 연료유의 유출량은 25,000톤 이하였으나, 이후에 64,000톤으로 수정됨.

□ 방제개요

- 선박이 예인되는 동안에 해상에서 방제가 동시에 수행될 수 없는 상황이었음.
- 연료유의 높은 점성과 좋지 않은 해상상태에서 5개국의 7척의 방제선이 동원되어 스페인 Galicia 연안에서 회수작업을 수행함.
- 12월말에 전문 방제선은 전례가 없던 어선 방제선단의 도움을 받게됨.
- 하구지역에서는 수천명의 어민과 패류 채취 어민이 어선과 급조된 회수도구를 이용하여 방제를 함.
- 전문 방제선과 어선의 방제노력으로 유출유의 약 1/3에 해당하는 53,000톤

의 에멀전을 회수함.

□ 영향

- 유출사고 발생 이후에 수주일 동안 해상에서 유출유가 회수되지 못하여 수천 킬로미터의 해안선을 오염시킴. 처음에는 스페인 해안을 시작으로 프랑스와 포르투갈 해안을 오염시켰으며 멀리는 네덜란드 해안까지 오염시킴.
- 사고 직후에 스페인의 Galicia 지역의 해안을 따라서 조업 및 패류채취가 금지되었고, 수산물의 판매가 금지되었음. 이후에 조업금지 및 수산물 판매금지 조치는 순차적으로 해제되기 시작하여 2003년 10월에 금지가 완전히 해제되었음.
- 해안가의 유류오염에 의하여 사고 이듬해의 여름 관광산업은 직접적으로 영향을 받았음.
- 23,000개체가 넘는 기름에 오염된 조류가 조류재활센터에서 처리되었음. 전문가에 의해 추정된 죽은 조류는 150,000에서 230,000개체임.

□ 침몰선

- 심해로 침몰한 Prestige호에 잔류한 연료유는 무시될 수 없는 수준임. 잔류량이나 침몰 수심이나 해안으로부터의 거리가 모두 과거의 유류 유출 사고에서 선례가 없는 수준임. 선례가 없는 침몰선 잔류 유류의 회수 연구 및 시도가 이루어 졌고, 2004년 9월 30일 완료 시점에서 총 13,600톤의 연료유가 침몰선으로 부터 회수되었음.

□ 보상

- 2006년 6월 IOPC 기금의 연차보고서에서 Prestige호 사건의 보상과 관련하여 스페인에서 755,000,000 Euro, 프랑스에서 109,000,000 Euro, 스페인에서 4,000,000 Euro로 총 868,000,000 Euro의 보상청구가 있다고 보고됨. 이 액수는 보상 최고 설정 금액인 171,000,000 Euro를 훨씬 넘는 금액임. 초기 보상액은 보상 확정금액의 15%를 초과하지 못하나, 이후에 30%로 책정하였음.

제 3 절. 국내외 유류오염 사고 환경복원 사례

1. World Prodigy 기름유출 사고(1989년, 미국 Newport)

- 유출 사고에 의해 훼손된 바닷가재, 조개류, 어류, 염습지 등의 자연자원을 복원하기 위해 57만 불을 사용함
- 바닷가재, 대합류, 어류 등의 서식지 확보 및 보호를 위해 Narragansett 만에 거머리말 이식하여 군락지 조성
- 바닷가재 생물량 복원을 위하여 Narragansett만 안에 자갈 어초(cobblestone reefs)를 설치하여 바닷가재 서식을 위한 안전한 서식처를 제공하였으며, 인공부화장에서 길러진 바닷가재 유생을 살포함. 인공어초에서 자라난 바닷가재의 상업적 수확은 5년 이내에 가능할 것으로 추정하고 시행 함.
- 대합류의 복원을 위해서, 인근의 오염되지 않은 곳에 산란보호지역을 설정하여, 대합 성체를 이식함. 이식된 대합이 자체 산란, 성장하여 정상 밀도를 되찾은 약 2년 후 지역 어민이 채취할 수 있도록 개방함
- 어류의 주요 산란장인 염습지를 복원하기 위하여 물길이 막혀있던 염습지에 조류(tidal flow)가 유입될 수 있게 함으로서 어류의 접근성을 확보하고 염생식물의 성장을 촉진시킴

2. Exxon Bayway - BT Nautilus 기름유출사고(1990년, 미국 뉴욕)

□ Staten섬 염습지 복원

- 1992년에서 1996년에 걸쳐 약 24,000 m²의 오염된 염습지에 약 400,000 포기 of 염생식물(*Spartina alterniflora*) 묘목 이식 (\$800,000 소요)
- 복원작업이 수행되지 않은 지역에서는 염생식물이 전혀 자연복원되지 않은 데 반하여 복원지역에서는 3년 후 완전히 회복됨

□ Bridge Creek 염습지 복원

- 약 53,000 m²의 오염된 퇴적물 약 8,410 m³을 제거한 후 염생식물(*Spartina alterniflora*) 이식
- 2005년까지 총 약 2백만 불의 비용을 들여 복원 완료

3. 씨프린스 유류오염사고(1995년, 여수)

- 생태계 복원을 위한 해양환경 보존 활동
 - 수산자원 조성을 위하여 치어 125만 마리(우럭 79만, 광어 40만, 전복 6만)를 피해지역에 살포
 - 1997년에서 2005년에 걸쳐 치어방류 외에 덕포 등지에 전복 치패 추가 살포(7천8백만원 소요)
 - 어장환경 개선을 위하여 어장 청소 및 쓰레기를 수거하고 공동어장 개별 객토를 위하여 헥타 당 5톤 이상의 황점토를 살포함

4. North Cape 기름유출 사고(1996년, 미국 로드아일랜드)

- 바닷가재 생물량 복원
 - 사고 후 약 9백만 마리의 바닷가재 폐사
 - 산란양을 증가시킴으로서 바닷가재의 생물량을 복원시키려는 목적으로, 2000년에서 2006년에 걸쳐 약 125만 마리의 바닷가재에 표식을 부착하여 방류한 후 표식 부착된 바닷가재의 어획을 금지시킴
 - 방류된 바닷가재의 지속적인 산란을 통해 바닷가재 생물량을 증가시켰으며, 표식 부착된 바닷가재의 어획 감시를 위해 감시원을 승선시킨 후 어획된 바닷가재의 어획위치, 크기, 배란유무, 이동경로 등을 관찰, 기록하여 관리 함
- 패(貝)류의 복원
 - 사고 후 약 350,000 kg의 대합, 전복, 굴 등의 조개류가 폐사하였으며, 이들의 복원을 위하여 6년간 약 150만 불 투입
 - 전복 성체를 cage에 넣어 복원해역에 투입함으로써 포식자에 의한 손실을 방지하고 주변해역에 전복 종묘를 지속적으로 공급하는 역할을 수행하게 한 후, 유생의 안착 및 생물량을 지속적으로 모니터링 함
 - 굴 유생을 조개껍질에 부착시킨 후 종묘배양장에서 약 5 - 6개월 성장시킨 후 복원 현장에 살포; 생존을 파악을 위하여 매년 지속적으로 다이빙 조사
 - 대합 종패 또는 준설 해역 내에서 채취된 대합을 산란 보호장소로 이식, 성장시킨 후 다시 원래 복원 지역에 이식; 생존율 및 성공률 지속 모니터링

5. Exxon Valdez 기름 유출 사고(1989년, 미국 알래스카)

□ 오염된 담치군락의 복원

- 기름에 오염된 담치군락에서 지속적으로 기름이 유출되어 주변 환경을 오염시키며, 담치를 섭식하는 생물에 영향을 미침
- 오염된 담치를 걷어내어 오염된 표층 퇴적물 약 33톤을 깨끗한 퇴적물로 교체 후 다시 본래 서식하던 담치를 세척 후 이식하였고(1994년), 이후 5년간 기름농도와 담치군락을 모니터링함
- 복원작업 후 담치군락의 생물량 및 현존량 변화는 대조구에서의 지역적, 자연적 변화와 구별이 어려움
- 초기 일시적인 기름농도의 감소는 관찰되었고 1999년까지 담치 내의 기름농도는 배경농도 수준으로 감소하였으나 자연복원 지역과 차이가 크지 않음

□ 검은머리물떼새(Black Oystercatchers) 복원

- 사고 직후 전체 군집의 12 ~ 15% (120 ~ 150마리)가 폐사하였고 이후에도 1989년과 1990년에 기름오염지역에서 개체수 감소 및 생식력 감소가 관찰됨
- 자연복원 및 서식지 보호 조치 후 1991년까지 오염지역에서 생식력이 상당히 회복된 것으로 판단되며 추가의 복원조치는 필요치 않은 것으로 판단됨

□ 조간대 표서생물(epibiota) 복원

- 기름 오염 후 방제조치가 이루어진 지역과 이루어지지 않은 지역의 조간대 표서생물량을 1989년부터 1997년까지 모니터링 수행
- 방제작업이 이루어지지 않은 지역은 1992년까지 표서생물 군집이 정상수준으로 회복된 것으로 나타났으나, 오히려 방제작업이 이루어진 곳에서는 1994년에 정상수준으로 회복된 것으로 나타남

□ 곱사송어(Pink Salmon) 복원

- 사고 후 곱사송어의 난치사, 치어 기형, 성장률 감소, 개체수 감소가 관찰됨
- 곱사송어의 난치사율 등 지속 모니터링 및 서식지 보호, 조업제한 조치를 취함
- 1993년까지 오염된 퇴적물로부터 유출되는 PAHs에 의해 난치사율이 높게 나타났으나, 1994년 이후에는 모든 산란지에서 치사수준 이하의

농도로 회복된 것으로 판단됨

□ 해조류(*Fucus gardneri*)의 복원

- 기름 유출사고 및 이에 따른 방제작업으로 인하여 조간대 상부에 서식하는 갈조류(*Fucus gardneri*)에 큰 피해를 야기
- 해안의 침식방지와 갈조류의 착생 및 착생 후 건조를 방지하기 위하여 자연분해 성분의 매트(藻床)를 조간대에 깔아 주었으며, 일부 지역은 *Fucus*의 접합체(zygotes)를 살포함
- 1994년 여름까지 모든 매트에서 *Fucus*가 밀도 있게 서식하였으나, 매트를 설치하지 않은 암반지역에서는 관찰되지 않음
- 매트에서 성장한 *Fucus*는 이후 *Fucus* 배아(embryo)의 지속 공급원으로서 주변의 *Fucus* 복원에 기여할 것으로 판단됨

□ 자급어업 복원

- 자급어업 어종 내 탄화수소 오염에 따른 어족피해로 인하여 자급어업 주민의 생활 양식이 변화하였고, 이 후에는 자급 수산물 안전성에 대한 신뢰도 회복이 필요 하였음
- 지역사회 모임, 수산물안전에 대한 다양한 정보물 제공, 자급 수산물의 채취 및 유류오염 분석, 지역 대표의 분석 실험실 견학 등의 복원 조치를 통해 자급수산물 안정성에 대한 신뢰도를 확보하였으며, 수산물 내 유류분석 결과에 대한 대외 신뢰도를 향상시킴

□ 흰머리 독수리(Bald Eagles)

- 사고 후 200 ~ 300 마리의 흰머리 독수리 폐사
- 자연복원 전략을 취하며, 완전히 회복될 때까지 지속적으로 모니터링 수행

□ 조개류(Clams)

- Littleneck clam (대합의 새끼 조개)과 butter clam이 기름오염과 방제작업에 의해 폐사되었으며, 성장저하가 관찰됨
- 자연복원; 조개 밀도 및 크기 모니터링; 서식지 주변 해수 수질 관리

□ 바다오리류(Common Murres)

- 사고 후 개체수 감소

- 개체수가 회복되지 않는 이유에 대한 연구수행 및 이에 따른 대책 수립하고 개체수 및 번식력에 대한 지속 모니터링; 섭식 및 번식 보호를 위한 서식지 보호 조치
- 컷스로트송어(Cutthroat Trout)
 - 비오염지역 보다 오염지역에서 성장 속도가 느림
 - 자연회복 및 성장률 모니터링을 실시하고 수질, 산란보호를 위한 서식지 보호; 자원관리를 위한 정보제공; 스포츠 낚시 어획량을 제한시킴
- 곤들매기(Dolly Varden)
 - 오염지역에서 성장속도 저하
 - 자연회복 및 성장률 모니터링을 실시하고 수질, 산란보호, 번식을 위한 서식지 보호; 자원관리를 위한 정보제공; 스포츠 낚시 어획량을 제한시킴
- 바다표범(Harbor Seal)
 - 사고 후 수백 마리 치사; 사고 후 개체수 약 43% 감소(비오염 지역은 11% 감소)
 - 개체수가 회복되지 않는 이유에 대한 연구 수행 및 이에 따른 대책 시행, 회복 모니터링 실시; 섭식 및 새끼 생육을 위한 서식지 보호; 자급 사냥꾼에게 사냥이 미치는 영향에 대해 교육 실시
- 흰줄박이오리(Harlequin Ducks)
 - 번식시기 동안 서식 밀도 감소; 번식율 감소
 - 번식율 감소 원인에 대한 연구 실시 및 흰줄박이오리의 먹이원인 오염된 담치 군락 제거 또는 정화; 서식지 보호 및 스포츠 사냥 제한 조치 시행
- 범고래
 - Prince Willam Sound 내의 범고래 떼 중 13마리가 사라짐
 - 자연회복 및 지속 모니터링 실시
- 바다쇠오리류(Marbled Murrelets)
 - 유출사고에 의해 8,400 개체가 치사하였고, 사고 후 개체수 감소 속도가 더욱 빨라짐
 - 개체수가 회복되지 않는 이유에 대한 연구 및 대책 마련하고, 산란, 번식, 섭식 보호를 위한 서식지 보호 조치 및 지속적인 모니터링 수행

□ 청어류(Pacific Herring)

- 사고 후 난치사 및 유생의 기형이 발생하였고 개체수 감소
- 개체수가 회복되지 않는 이유에 대한 연구수행 및 대책 마련; 어류의 건강도 및 산란양 모니터링; 서식지 보호; 자원관리를 위한 정보 제공; 조업 금지 조치

□ 수달류(River Otter)

- 탄화수소류의 독성에 의한 아치사 영향
- 자연회복 및 건강도 모니터링; 서식지 보호

□ 해달(Sea Otter)

- 사고 후 수개월 내에 수천마리의 해달이 치사
- 회복되지 않는 이유에 대한 연구 수행 및 대책 마련; 생체량 및 치사율에 대한 모니터링; 서식지 보호

□ 볼락(Rock Fish)

- 성체 치사 및 탄화수소 독성에 의한 아치사 영향이 나타났고, 연어의 조업 금지 조치로 인하여 볼락의 어획 요구가 증가
- 자연회복 및 자연자원 피해 평가를 통한 복원 여부 판단; 회복 모니터링 실시

□ 홍연어(Sockeye Salmon)

- 개체군 감소 및 2년생 연어(smolt)의 지속 감소
- 자연회복; 회복 지연에 대한 연구 수행 및 대책 마련; 치어 및 2년생 연어 개체수 등 모니터링; 서식지 보호 및 관리를 위한 정보 제공

□ 퇴적물

- 자갈 해안 표면하 기름 침하
- 퇴적물 내 기름농도 및 넙치류에 대한 기름 노출 지속 모니터링 실시하였고 자연회복이 더딜 경우에는 잔존유를 제거함

□ 일반어업

- 어자원에 대한 기름 노출 피해 및 조업 중단에 의한 손실 발생
- 피해어종에 대한 개별 복원작업과 병행하여 수산자원관리 강화, 대체어

종 제공, 서식지 보호 및 취득, 자원관리를 위한 정보 제공, 어자원 회복 모니터링 등의 복원조치를 취함

6. Chalk Point 기름 유출사고(2000년, 미국 메릴랜드)

- 140,000 갤런의 기름이 유출되어 습지 및 해변, 조류, 어류, 패류 등이 피해를 입음
- 자연복원을 일차적인 복원방안으로 책정하였으며, 항목별 추가 복원계획 수립
- 습지의 복원: 습지로 물을 유출입 시키기 위한 수로 건설; 식물 이식; 지속적 비료 살포; 외래식물종 제거
- 어류 및 패류: 굴 군락지 조성을 위한 보호지역(sanctuary) 설치 후 종패 살포; 이를 통한 저서 서식지 복원 및 어류 복원을 위한 기반 조성
- 저서 군집: 굴 군락 보호지역 조성을 통한 저서 생물량 복원
- 홍오리(Ruddy Duck): 습지 취득 및 복원; 초지 조성 등을 통한 서식지 확보
- 조류: 굴 군락 보호지역 조성을 통해 저서 생물량을 복원하고 이를 통한 조류의 먹이원 확보
- 후미거북(Diamondback Terrapins): 서식지 및 산란지 보호를 위한 해변 침식 방지; 추가의 해변 조성; 서식지 환경 개선을 통한 복원

7. 국외 복원사례 분석 및 적용

- 국외의 많은 복원계획은 인위적인 조치보다는 대부분 자연치유/복원 방법을 가장 활발하게 적용하였고, 자연회복 속도를 높이기 위하여 잠재적 위험요인 제거(해양오염방지 등), 서식지 보호 조치 등을 취하였으며, 이와 병행하여 회복 제한요인을 밝히기 위한 연구 및 모니터링을 지속적으로 수행하였음
- Exxon Valdez 기름유출 사고 시, 오염된 담치 군락지 등 기름오염이 심한 지역에서 추가 방제 및 복원작업에 의해 초기 기름농도는 확실히 감소하였으나, 자연복원지역과 비교하였을 때 장기적인 관점에서는 큰 차이를 보이지 않았음. 조간대 표서생물의 경우에도 방제작업이 진행되지 않은 곳이 방제작업이 진행된 곳보다 오히려 더 빠르게 회복되어, 방제작업에 의한 추가의 생태계 훼손 및 회복지연을 확인할 수 있었음
- 해조류, 염생식물의 이식을 통한 서식지 복원, 패류 및 어류, 갑각류의 종묘 살포 및 이식을 통한 복원의 경우 성공적으로 보고된 사례가 많음. 대체

로 이식 후 수년 내에 정상수준으로 회복 되거나 상업적 수확이 가능해진 것으로 보고됨에 따라 가장 용이하게 적용할 수 있는 복원계획으로 판단됨. 이와 더불어 서식지 보호 및 대상 생물종의 어획제한 조치를 병행해야 함

- 대부분의 유류유출 사고 및 이에 따른 복원계획 이행 시 문제점 중의 하나는, 사고이전의 생태계 자료 부재로 인하여 사고의 영향, 복원의 효율성 등을 완전히 이해, 해석할 수 없었다는 것임. 따라서 사고 이후의 지속적인 모니터링 뿐 만 아니라 사고 이전의 해양생태계 조사가 매우 중요함을 알 수 있음. 특히 사고 이전의 기름오염 배경농도 및 생물량 수준은 복원작업의 목표 기준을 설정하는 데 있어 매우 중요함
- 장기모니터링/연구 프로그램은 복원작업을 효율적으로 수행하기 위해, 훼손된 생태계의 현재 상태, 회복 여부, 복원작업의 성공 여부, 회복을 더디게 하는 요인 파악 등 복원작업에 필요한 중요한 정보를 제공함. 지속적인 모니터링/연구가 없다면, 복원을 위한 노력이 비효율적이고 적절치 못한 방법들이 사용될 수 있음. 또한 필요한 정보부재로 인한 추가 복원 기회의 상실, 이로 인한 지속적인 피해 유발 등을 일으킴으로, 모니터링은 대상 자원이 완전히 회복될 때까지 지속적으로 수행되어야 함
- 복원계획은 실제 복원비용, 복원성공 가능성, 자연복원 속도, 접근방식의 유연성 및 용이성, 적용의 적법성, 이해집단간의 유기적인 협조, 중복투자 방지, 부작용의 최소화 등의 요소를 감안하여 인간 및 자연환경에 모두 이익이 되는 방향으로 진행되어야 함. 일부의 경우, 복원작업이 생태적으로 꼭 필요하다고 객관적으로 판단되어 지는 곳에서 다자간 협조 하에 수행되는 것이 아니라, 대부분 관련 집단 간 이해관계에 의해 결정되는 경우가 많음. 이러한 복원작업은 관계되어 있는 모든 집단의 시간 및 재정적 손실을 초래할 수 있으므로, 이해 집단 간 유기적인 협조 하에 복원계획을 수립, 집행해야 함

제 3 장 국내외 환경복원 관련 제도 및 개선방안

제 1 절. 유류오염에 따른 환경복원 관련 국내 제도 분석

1. 검토배경

- '07. 12. 7 충남 태안 해안지역에서 발생한 허베이스피리트호 유류오염 사고에 따라 광범위한 유류오염 발생, 해양생태계의 심각한 훼손.
- 유류오염사고가 발생한 뒤에 생태계를 원래 상태로 복원하기 위해 소요되는 시간은 유류의 종류 및 유출량, 기상조건, 방제사항 등에 따라 수년에서 수 십년 이상이 걸리기도 하기 때문에 해양생태계와 지역에 미치는 영향은 상당함.
- 국내 유류오염 피해에 따른 해양환경 및 해양생태계의 복원에 관한 법률은 허베이스피리트호 유류오염사고에 따른 주민지원 및 해양환경의 복원을 위해 제정된 「허베이 스피리트호 유류오염사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법」(이하, '허베이스피리트호 특별법'이라 함)이 최초임.
- 이하에서는 태안지역의 생태계 복원을 위한 입법론적인 방향을 제시하기 위하여 허베이스피리트호 특별법 이외에 「해양환경관리법」, 「해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률」, 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 등 국내관련 법률과 UNEP의 Agenda 21, 유엔해양법협약 등 생태계 복원관련 국제협약에 대하여 개괄적으로 살펴보고자 함.

2. 환경복원 관련 국내법

- 허베이스피리트호 특별법이 제정되기 이전까지는 「해양환경관리법」 제24조에 따른 해양오염방지활동, 제64조 (오염물질이 배출된 경우의 방제조치), 제77조 (해양오염영향조사) 등 관련규정을 적용하여 오염방지활동 및 방제조치, 오염된 지역에 대한 해양오염영향조사 및 주민의견수렴 조치 등이 이루어져 왔음.
 - 유류오염 시 방제조치 및 사고책임자에 대한 처벌
- 다만 허베이스피리트호 특별법 이전까지는 「유류오염손해배상 보장법」과 같이 유류오염에 대한 환경 및 생태계 복원에 초점을 두기 보다는 유류오염에 따른 손해배상에 중점을 둔 법률이었음.
 - 우리나라는 국제해사기구의 '유류오염손해의 민사책임에 관한 국제협

약'(The International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage, 일명 CLS), '유류오염손해 국제기금 협약', '유류오염손해 국제기금 협약'(일명 FC), '유류오염손해에 관한 유조선 선주의 자주협정'(Tanker Owners Voluntary Agreement concerning Liability for Oil Pollutions, 일명 TOVALOP), '유조선의 유류오염책임에 대한 잠정적 보상에 관한 협정'(Contract Regarding an Interim Supplement to Tanker Liability for Oil Pollution, 일명 CRYSTAL)에 체결, 발효하였으며, 협약내용은 국내이행입법인 「유류오염손해배상 보장법」을 통해 반영됨.¹⁾

- 그 밖에 「해양환경관리법」, 「해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률」, 「습지보전법」, 「연안관리법개정(안)」에서는 '유류오염'이라는 특정 사건 발생시 복원조치가 아니라 일반적인 해양환경 및 해양생태계의 복원이나 보호구역에 대한 훼손조치에 대한 복원에 관하여 규정하고 있음.
- 한편 「공유수면관리법」, 「공유수면매립법」은 불법적인 점·사용이나 불법매립, 허가면적 초과, 기간 만료 등의 후속조치로서 원상회복 의무를 부과하고 있음.
- 「자연환경보전법」, 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법」, 「하천법」, 「소하천정비법」상 복원이나 원상회복 관련 규정도 유류오염에 특정된 개선조치가 아니라 자연환경, 수생태계, 하천구역, 소하천에서의 복원 및 원상회복에 관한 규정이라고 할 수 있음.

<환경 및 생태계 복원 관련 국내제도>

법률명	환경 및 생태계 복원 관련규정	특징	제정시기
해양환경법	제5조 (국가의 책무 등) 제7조 (오염원인자 책임의 원칙) 제21조 (부담금의 용도) 제18조 (해양환경개선조치)	오염원인자책임원칙과 국가의 복원책무 규정, 해양환경 개선조치의 일환으로 복원사업 추진	2007.1
해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률	제3조 (해양생태계의 보전 및 관리의 기본원칙) 제9조 (해양생태계 보전 관리 기본계획의 수립)	해양생태계의 복원에 관한 원칙규정, 기본계획에 반영 추진	2006.10

1) 2008.3.31 기준으로 1992 CLS 및 1992 FC는 각각 120개국 및 102개국이 가입하여 있음. 성승제, “해양유류오염 손해보상-허베이 스피리트호 사건과 관련하여 -, 「법제연구」 제 34호, 2008.6, p.281.

법률명	환경 및 생태계 복원 관련규정	특징	제정시기
	제19조 (보호대상해양생물의 보전계획) 제25조 (해양보호구역의 지정·관리) 제46조 (해양생태계의 복원)		
습지보전법	제14조 (중지명령등)	습지보호지역내 행위제한 위반시 중지명령, 원상회복 조치	1999.2
연안관리법 개정 (안)*	제32조 (자연해안관리목표제)	자연해안의 효과적인 보전과 연안환경의 기능 증진 등을 위하여 자연해안관리목표제 실시, 연안정비사업의 일환으로 자연해안 복원사업을 실시	2008.9 현재 국회제출
공유수면관리법	제12조 (원상회복 등)	불법점사용, 무단점사용, 점사용기간 만료 시 공유수면에 설치한 공작물 시설물 토석, 그 밖의 물건을 제거후, 해당 공유수면을 원상으로 회복	1961.12
공유수면매립법	제35조 (원상회복)	불법매립, 무단매립, 면허실효·소멸, 취소시 원상회복 의무	1962.1
허베이 스피리트호 유류오염사고 피해 주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법	제10조(특별해양환경복원지역의 지정 등)	허베이 스피리트호 유류오염사고로 해양환경이 훼손된 지역과 생태계 변화 등이 우려되는 지역을 특별해양환경복원지역으로 지정 고시, 특별해양환경복원계획 수립 시행	2008.3
수질 및 수생태계 보전에 관한 법	제19조의3 (수변생태구역의 매수·조성)	하천·호소 등의 수질 및 수생태계 보전을 위하여 필요한 경우 수변습지 및 수변토지를 매수하거나 생태적으로 조성·관리	1990.8

법률명	환경 및 생태계 복원 관련규정	특징	제정시기
자연환경보전법	제9조 (자연환경보전기본계획의 내용) 제44조 (우선보호대상 생태계의 복원 등) 제45조 (생태통로의 설치 등)	기본계획에 복원사항 반영, 우선보호대상 생태계의 복원, 생태통로의 설치 등 복원정책 추진	1997.8
하천법	제44조 (자연친화적 하천조성을 위한 보전지구 등의 지정) 제45조 (보전지구 등의 관리)	하천구역 안에서 하천환경보전 또는 복원, 하천공간활용 등을 위하여 필요한 경우에는 보전지구 복원지구 및 친수지구를 지정, 하천복원사업 추진 가능	1961.12
소하천정비법	제16조 (원상회복의무)	점·사용허가의 실효, 폐지 시에는 소하천을 원상회복	1995.1

3. 허베이 스피리트호 유류오염사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법

가. 제정목적 및 적용범위

- 2007. 12. 7 충남 태안군 해안에서 발생한 ‘허베이 스피리트호 유류오염사고’로 피해를 입은 주민 및 해양환경 등에 대하여 신속하고 적절한 수습 및 복구대책을 수립·시행함으로써 피해지역 주민들의 재기와 해양환경의 조속한 복원을 도모.
- ‘허베이 스피리트호 유류오염사고’에 대하여만 적용(제3조 적용범위)

나. 주요 내용

- 유류오염사고특별대책위원회의 설치(법 제5조 및 제6조)
 - ◇ 허베이 스피리트호 유류오염사고에 따른 피해의 조속한 복구를 위하여 국무총리 소속으로 유류오염사고특별대책위원회를 설치
 - 손해보전의 지원에 관한 사항, 환경복원에 대한 협의·조정

사항, 피해지역 지원에 관한 사항의 심의 등의 사무를 수행

- ◇ 대책위원회는 위원장 1명을 포함한 15명 이내의 위원으로 구성, 위원장은 국무총리가 되고, 위원은 대통령령으로 정하는 중앙행정기관의 장 또는 관계 기관·단체의 장이 됨.
- ◇ 대책위원회에 부의될 안건의 사전검토·조정 등을 위하여 농림수산식품부장관 및 국토해양부장관을 위원장으로 하는 조정위원회 설치
- 피해주민단체(법 제7조)
 - ◇ 허베이 스피리트호 유류오염사고로 인하여 피해를 입은 주민은 피해주민단체를 구성하여 농림수산식품부장관 등에게 신고할 수 있고, 대책위원회, 조정위원회 또는 지방자치단체는 피해주민단체의 대표를 참석시켜 의견을 청취할 수 있음.
- 손해보전의 지원 등(법 제8조 및 제9조)
 - ◇ 국가 또는 지방자치단체는 허베이 스피리트호 유류오염사고와 관련 「유류오염손해배상 보장법」에 따른 손해배상금 또는 보상금을 지급받기 전에 ‘대위권’ 행사를 전제로 일정범위 금액 지급가능
 - ◇ 국제기금 등에 대한 손해배상 또는 보상 청구 후 6개월 이내에 손해액의 사정이 이루어지지 아니하는 경우에는 국가 또는 지방자치단체가 대부 등의 지원을 할 수 있음.
 - ◇ 손해액이 국제기금의 보상한도액을 초과하는 경우에도 국제기금에서 인정한 총 사정액을 초과하지 아니하는 범위에서 국가 또는 지방자치단체가 피해의 전부 또는 일부를 보상할 수 있음.
- 특별해양환경복원지역의 지정 등(법 제10조)
 - ◇ 국토해양부장관은 환경부장관과 협의하여 유류오염사고로 해양환경이 훼손된 지역과 생태계 변화 등이 우려되는 지역을 특별해양환경복원지역으로 지정·고시할 수 있고, 이 지역에 대하여는 특별해양환경복원계획을 수립·시행하여야 함.
 - ◇ 국토해양부장관은 특별해양환경복원지역의 생태계복원을 위하여 유류오염 관련 연구·조사 및 해양환경 측정·분석을 담당하는 연구기관 또는 학술기관을 지정할 수 있고, 지정된 연구기관 및 학술기관에 대하여 예산의 범위에서 필요한 지원을 할 수 있음.
- 유류오염사고 피해지역에 대한 지원 등(법 제11조 및 제12조)
 - ◇ 국가 또는 지방자치단체는 i) 유류오염사고 피해지역에 대하여 의료·방역·방제, 쓰레기 수거활동 등에 대한 지원 및 의연금품 특별지원 등의 지원, ii) 피해주민 중 보상을 받지 못한 자에 대한 지원, iii) 유류

오염사고 피해지역의 이미지 개선 및 지역경제 활성화를 위하여 지원 사업을 할 수 있음.

제 2 절 국제협약 및 향후 국내입법 방향

1. 국제협약

- 유류오염 관련한 국제협약은 앞서 살펴본 바와 같이 해양유류오염 사고 시 손해보상에 관한 협약이 주를 이루고 있으며, 유류오염에 따른 해양환경 및 해양생태계의 복원에 관한 국제협약은 없음.
- 의제21 (Agenda21, chapter17)
 - 1992년 브라질 리우데자네이루에서 채택된 '의제 21(Agenda 21)'의 제17장에서는 폐쇄해, 반폐쇄해 및 연안을 포함한 전해양의 보호와 해양생물자원의 보호, 합리적 이용 및 개발에 관하여 규정하고 있으며, 각국의 공해 해양생물자원의 보존 및 지속적 이용에 관한 노력으로서 위기에 처한 해양어족의 보호 및 자원회복을 강조하고(17.46.e), 수산자원의 총량유지회복(17.75.c)과 멸종위기에 처해있는 동식물의 보호 및 회복(17.75.e) 등 해양생물자원의 회복을 강조함.
- 생물다양성협약 (CBD)
 - 생물다양성협약은 생물다양성 보전을 위한 생태계와 천연서식지의 현존지내 보전과 자연환경속에서의 종의 적정한 개체군의 유지 및 회복을 강조하였으며(협약 전문), 계획 또는 그 밖의 관리전략의 개발과 시행을 통해 악화된 생태계의 회복·복원과 위협받는 종의 회복촉진(8.f), 생태계·서식지 또는 종을 위협하는 외래종의 도입 방지 및 통제(8.h), 멸종위기에 처한 종 및 개체군의 보호를 위한 입법 및 기타 규제 제정 또는 유지(8.k), 위협받는 종의 회복 및 복구를 위한 조치와 적절한 조건하에서 이들을 천연 서식지로 되돌리기 위한 조치(9.c) 등 생물종의 복원 및 서식지 복원에 관하여 규정하고 있음.
- 그밖에 「물새서식지로서 국제적으로 주요한 습지에 관한 협약」(Convention on Wetlands of International Importance Especially as Waterfowl Habitat, 일명 람사르협약, 1971) 「멸종위기에 처한 야생 동식물의 국제거래에 관한 협약」(Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora, 일명 CITES, 1973) 등은 서식지 보전 및 멸종위기 종의 회복 및 복원 등에 관한 사항을 규정하고 있음.

2. 향후 국내정책 방향

- 유류오염에 따른 해양환경 및 해양생태계 복원정책을 체계적이고 효율적으로 추진하기 위해서는 「해양환경관리법」상 국가긴급방체계획상 해양환경 및 해양생태계의 복원을 고려한 방제조치가 이루어지도록 중앙-지사체간 협력, 국제협력 등의 사항이 구체적으로 포함되어야 하며, 허베이스피리트호 특별법상 특별해양환경복원계획, 관련 조사·연구, 복원프로그램이 지속적으로 추진될 수 있도록 정책적 관심과 예산이 안정적으로 투입되어야 할 것임.
- 또한 국내 복원관련 제도의 경우는 유류오염사고라는 특정사항에 한정된 환경 및 생태계의 복원 또는 회복규정이 아니라는 점에서 허베이스피리트호 특별법에서 규정하지 않은 사항에 대하여 적용가능하나, 대부분 보호지역 중심의 서식지 복원이나 보호종의 복원에 대하여 규정하고 있으므로 충남 태안지역에 대해 적용하는데 한계가 있음.
- 따라서 향후 유류오염사고시 환경 및 생태계 복원을 시의적절하게 실시하기 위해서는 「해양환경관리법」상 해양환경관리종합계획상 해양환경복원계획이 포함되도록 하여야 할 것이며, 이는 국가긴급방체계획이 상호연동되어야 할 것임.
- 또한 중장기적으로는 지속적인 관련 조사·연구와 전문인력 양성을 통해 유류오염사고를 포함하여 사안별, 지역별 복원프로그램을 수립·시행하는 것이 필요함.

3. 관련제도 개선 방안

가. 지속적인 조사 및 생태계 복원을 위한 제도적 기반 마련

- 「허베이 스피리트호 유류오염사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법」은 전체 13개 조문으로 구성되어 있으나 피해지역에 대한 지원에 관한 규정이 대부분을 이루고 있어, 유류오염사고 피해지역의 생태계 조사 및 복원을 위한 제도적 기반이 미흡함.

법률의 주요 내용

- 유류오염사고특별대책위원회 구성·기능(법 제5조 및 제6조)
- 피해주민단체(법 제7조)
- 손해보전의 지원(법 제8조)
- 국제기금보상한도 초과액에 대한 특례(법 제9조)

- 특별해양환경복원지역의 지정 등(법 제10조)
 - 유류오염사고 피해지역에 대한 지원(법 제11조)
 - 지역경제활성화(법 제12조)
- 법 제10조에서 특별해양환경복원지역의 지정과 복원계획의 수립·시행에 대해서 규정하고 있으나,
- 단순히 복원지역 지정과 계획 수립에 대한 근거만 규정하고 있을 뿐 복원지역 지정이나 복원계획에 필수적인 사고지역에 대한 조사나 복원조치, 사후관리 등에 관한 규정이 미비된 상태임.
 - 「자연환경보전법」, 「해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률」, 「연안관리법」 등 환경관련 입법례에서는 지역지정의 절차, 행위제한, 조사 및 관찰 등 관련 정책을 구체화할 수 있는 사항을 법률에서 규정하고 있음.
- 따라서 특별해양환경복원지역을 실질적으로 지정, 관리하기 위한 규정과 조사, 복원조치, 관계기관 간 협력에 관한 내용이 법률과 하위법령에 추가되어야 함.
- 또한 허베이 스피리트호 유류오염사고 피해지역에 대한 지속적인 조사 및 생태계 복원을 위해서는 추가입법사항을 구체화하여 집행할 수 있도록 시행령을 수정·보완하고, 세부절차와 방법에 대한 시행규칙을 제정하는 것이 필요함.
- 시행령에서는 법에서 위임된 사항을 규정하는 것이며, 특별해양환경복원지역의 지정절차, 기타 행위제한, 조사 및 모니터링의 주요내용, 정보체계의 구축·운영 사항, 세부관리계획에 포함될 사항, 기타 복원대책 등이 포함될 수 있음.
 - 시행규칙은 법률과 시행령에서 위임된 사항을 규정하는 것이며, 세부적인 절차나 방법, 기준 등에 관해 규정하게 됨.

법률 개정 시 추가입법 사항 요약

- 특별해양환경복원지역 지정절차
- 특별해양환경복원지역에서의 행위제한
- 특별해양환경복원지역에 대한 조사 및 관찰
- 세부적인 조사지침을 제정할 수 있는 고시 근거
- 유류오염 사고지역에 대한 정기조사 및 모니터링
- 특별해양환경복원지역에 대한 정밀조사 및 모니터링
- 특별해양환경복원지역 생태계(서식지 및 생물다양성, 물리적·화학적 환경 등)의 변화관찰
- 조사 및 변화관찰 결과의 정보체계구축
- 특별해양환경복원지역내 행위제한 위반시 중지명령
- 특별해양환경복원지역에서의 주민지원
- 개발계획과의 연계, 관련 기술개발 및 전문기관의 육성
- 특별해양환경복원지역의 세부관리계획의 수립
- 관계 중앙행정기관 및 지자체 등의 업무협조 및 자료제출, 정보공유 등 협력사항
- 복원대책 또는 조치 등에 관한 사항
- 복원을 위한 예산지원
- 다른 법률에 따른 조사 및 복원조치와의 연계
- 권한 위임 및 위탁에 관한 사항
- 기타 보칙 및 별칙

나. 허베이스피리트호 유류오염사고 피해지역의 생태계 조사 및 복원지침」 개발

- 「허베이 스피리트호 유류오염사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원에 관한 특별법」 및 동법 시행령, 시행규칙(안)에 생태계 조사 및 복원에 관한 규정이 신설될 경우, 유류오염사고 피해지역의 해양환경 및 해양생태계에 대한 영향조사 및 모니터링, 복원, 사후관리에 세부절차 및 방법을 정하기 위한 지침 개발이 필요함.
- 기타, 허베이 스피리트호 유류오염사고 피해지역에 대한 관련 중앙행정기

관 및 지자체간의 조사에 대한 상호협력 사항 및 절차

- 조사결과 통보 및 자료공유, 필요시 공동조사 실시 가능

지침의 주요 내용

- 지침의 적용범위
- 지침에 사용되는 용어정의
- 허베이유류오염피해지역의 조사단의 운영
: 조사단의 구성, 조사분야, 예산지원 등
- 조사항목 및 조사방법
: 조사지역, 분야별 조사항목, 모니터링 횟수 및 방법 등
- 조사결과의 보고 및 통보
- 복원에 관한 의사절차 및 복원의 최소한의 기준
- 사후관리 사항 및 사후관리 세부절차

제 4 장 유류오염 피해지역 해양환경 복원 프로그램

제 1 절. 특별해양환경복원지역 지정절차 및 계획

1. 배경

- '07.12.7(금) 태안군 만리포 북서방 10km 해상에서 묘박중인 홍콩 선적의 허베이스피리트호에 삼성중공업의 크레인바지가 충돌하여 허베이스피리트호에 선적 중인 원유 12,547kl가 해상으로 유출
- 태안반도 해안선 약 70km 및 전라도 남도 영광 해안 일부 및 충청남도 와 전라남북도 101개 도서가 유출유에 의해 오염
- 유류오염 피해가 집중된 충남 관내 6개 시·군에 대하여 1차 특별재난지역을 선포('07.12.11)하였으며, 오염피해지역 확대에 따라 영광군 등 전남 3개 지역에 대하여 2차 특별재난지역 선포('08.1.18)
- 허베이 스피리트호 유류오염 사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법 공포('08.3.14)
 - 특별해양환경복원지역 지정·고시
 - 특별해양환경복원계획 수립·시행(조사 및 연구계획, 지속적인 모니터링 계획, 해안·해양·해저 등의 복원계획, 해양복원에 필요한 사항)

2. 추진경위

- 해양환경관리법 제77조에 따라 해양오염영향조사 실시('07.12~)
- 환경복원 관련 전문가회의 개최('08.4.25)
 - 환경복원과 지역 경제활성화를 최대한 연계한 통합적 사업계획 작성 및 구체적·실용적 복원지표 마련 필요
 - 해양환경복원지역 지정 및 복원계획 수립을 위해 국토해양부, 농림수산식품부(수산자원회복), 환경부(해안국립공원복원) 간 협의체 구성·운영
 - 구체적 복원계획 수립을 위한 전문가 및 이해관계자 워크숍 개최, 환경복원 사업 관련 다양한 의견 및 요구 정리 필요
- 환경복원 관련 토론회개최('08.6.26)
 - 국외 유류오염사고 지역의 환경복원 사례
 - 피해지역의 환경복원을 위한 개념 및 범위의 설정

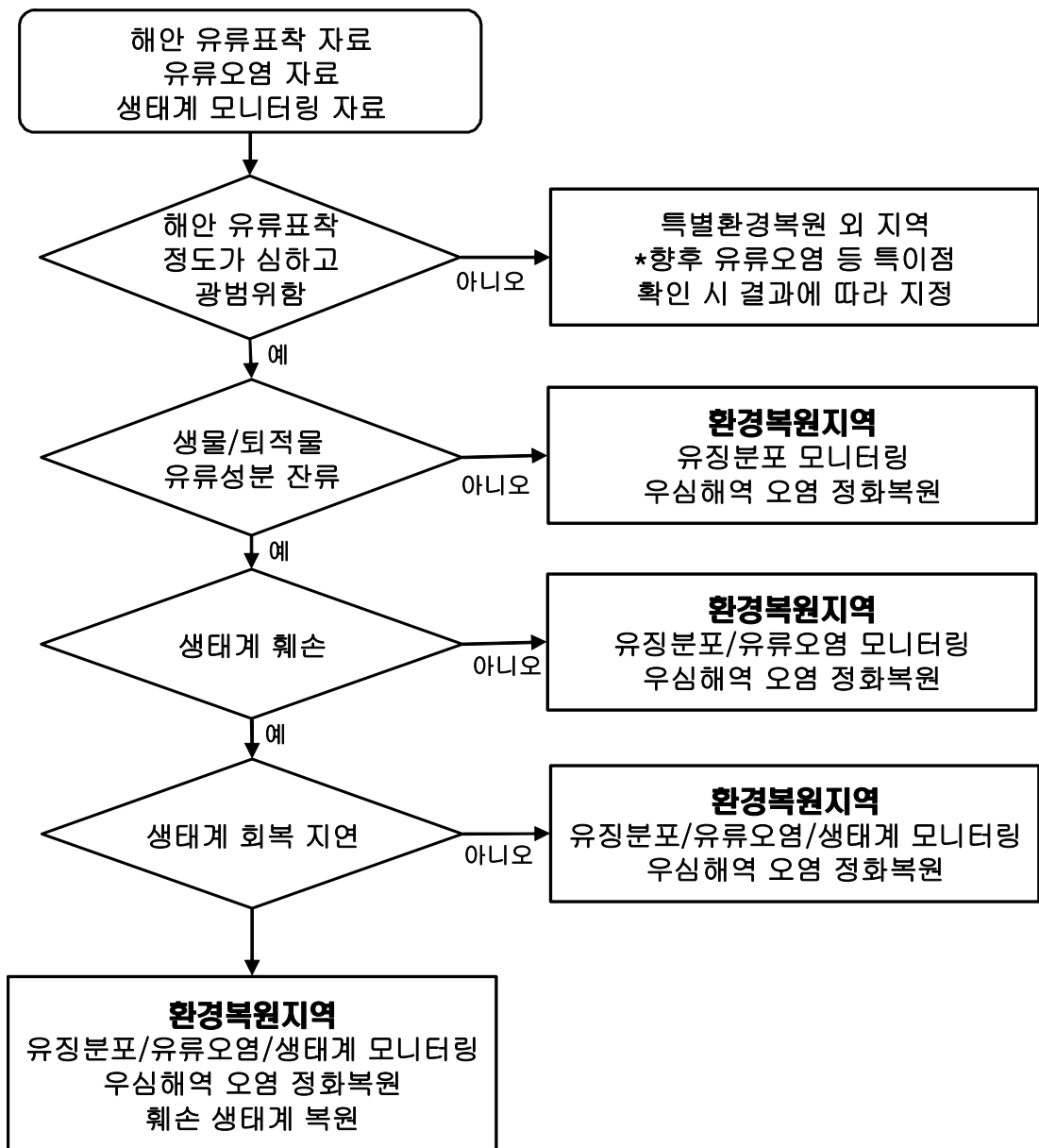
- 환경복원 계획수립 방향 및 추진 절차 논의
- 허베이 스피리트 유류 유출사고 피해지역의 해양환경복원프로그램 개발 기획 사업 추진('08.08-11)
 - 국내외 관련 기술동향 및 제도 분석
 - 유류오염 피해지역 해양환경복원 프로그램 개발
 - . 특별해양환경복원지역 지정 절차 및 계획
 - . 유류오염 피해지역 조사계획 및 오염평가 체계 개발 방안
 - . 장기 생태계모니터링 방법 및 체계
 - . 친환경적 복원기법개발, 적용범위 및 단계별 추진계획 수립
 - 해양환경복원 프로그램의 추진전략 수립

3. 지정 근거

- 허베이 스피리트호 유류오염 사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법 제10조
 - * 제10조(특별해양환경복원지역의 지정 등) ① 국토해양부장관은 환경부장관과 협의하여 허베이 스피리트호 유류오염사고로 해양환경이 훼손된 지역과 생태계 변화 등이 우려되는 지역을 특별해양환경복원지역으로 지정·고시할 수 있다.

4. 지정 방법

- 방제주관 부서인 해양경찰청의 오염자료 및 해양환경관리법에 따라 시행 중인 해양오염 영향조사의 유류오염 및 생태계 영향 중 '08.07.30 현재 가용한 자료를 근거로 아래의 기준에 의하여 환경복원지역을 설정하고 모니터링 및 환경복원 계획을 수립함.



[조사자료에 근거한 환경복원지역 지정방법(안)]

[환경오염 및 생태계영향 수준에 따른 모니터링 및 환경복원 수준]

환경오염 현황	모니터링 및 환경복원 수준
<ul style="list-style-type: none"> ○ 액상 원유 형태로 유류 표착 ○ 유류 표착 범위가 넓고 심함 ○ 생물 또는 퇴적물에 유류성분 잔류 ○ 생물의 대량폐사가 발생 ○ 생물 또는 생태계의 영향 확인 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 퇴적물 표면 및 표면하 유징 분포 확인 ○ 다매체(물, 퇴적물, 생물)유류오염 모니터링 ○ 계절단위의 훼손 생물종 및 생태계 회복 모니터링 ○ 전반적인 생태계 건강성 모니터링 ○ 유류오염 환경의 정화복원 계획수립 및 시행 ○ 회복이 지연되는 생태계의 복원 계획 수립 및 시행
<ul style="list-style-type: none"> ○ 원유 또는 에멀전/타르 형태로 유류 표착 ○ 유류 표착 정도가 심하나 국지적임 ○ 생물 또는 퇴적물에 유류성분 잔류 ○ 생물 유류오염 노출 징후는 있으나 생태계 훼손 정도 경미함 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 우심지역 퇴적물 표면 및 표면하 유징 분포 확인 ○ 퇴적물 또는 생물 잔류 유류오염 모니터링 ○ 유류오염 환경의 정화복원 계획 수립 및 시행
<ul style="list-style-type: none"> ○ 에멀전 또는 타르 형태의 유류가 국지적으로 표착 ○ 일부 유징은 확인되나 주변지역 생물 또는 퇴적물의 유류 성분 잔류 영향 경미함 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 우심지역 퇴적물 표면 및 표면하 유징 분포 확인

5. 특별환경복원지역 지정 계획

가. 지정해역별 지정 근거 설명자료 마련

- 지정해역별 해안 유류표착, 유류오염 현황 및 생태계 영향 자료를 종합한 지정 근거 설명자료 작성
- 지정해역별 모니터링 및 환경복원 계획 수립

나. 특별해양환경복원지역 모니터링 및 환경복원 계획 수립

- 유류오염 정도 및 훼손된 생태계에 대한 조사자료 정밀 검토 및 세분화 작업
- 유류오염 및 생태계 정밀 모니터링 계획 수립
- 유류오염의 지속적인 잔류가 확인된 지역에 대한 추가 정화복원 기술 및 타당성 검토
- 생물 및 생태계 영향이 확인된 지역에 대한 생태계 복원 기술 및 타당성 검토
- 지속적인 정밀 모니터링 수행 및 타당성이 확인된 환경복원 사업계획 수립 및 시행
- 환경복원 계획은 복원대상 별 목표를 설정하고, 목표 도달시점이 복원지역의 지정기간이 됨.

제 2 절. 유류오염 피해지역 오염영향 조사계획 및 오염 평가체계 개발방안

□ 허베이스피리트호 원유 유출사고 피해 해역의 해양환경 중 해안·해양의 수질·저질·생물의 유류오염 상태, 사고유 노출여부, 생물영향을 과학적으로 평가하여 사고에 따른 환경피해를 입증할 수 있는 과학적인 증거자료 확보는 물론 환경복원의 사전·사후 평가를 통한 효율성을 검증할 수 있도록 함. 사고 후 1년간의 조사내용을 토대로 작성되었으며, 차후 조사결과에 따라 내용 및 범위를 수정/보완할 예정임.

분 야	내 용	범 위
해안오염 정밀평가(SCAT)	<ul style="list-style-type: none"> - NOAA/EC 지침에 따른 해안 표층 및 표면하 유징분포 확인 - 구획별 표준화된 오염정보도 작성 - 전체 오염해안 유징분포 작성 및 주기적 갱신 	<ul style="list-style-type: none"> - 유류가 표착한 모든 해안 지역(약 250개 구획)
해수 유류오염 평가	<ul style="list-style-type: none"> - 해수 중 잔존유의 공간적 분포 특성 파악 - 수층잔존유 흡착장치 (SPMD)를 이용한 해수오염 정밀평가 - 대용량 해수시료채취기를 이용한 미량 유류오염 평가 - 해수 중 잔존유의 생물위해성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 태안 해역 30개 정점 - 오염우심해역 7개 정점 (SPMD) - 충남도서, 전라도 해안 및 도서지역
퇴적물 유류오염 평가	<ul style="list-style-type: none"> - 태안해역 조간대, 조하대 퇴적물 유류오염 및 독성물질 잔존 현황 모니터링 - 충남도서, 전라도 해안 및 도서 	<ul style="list-style-type: none"> - 태안 해역 조간대 30개 정점 - 태안 해역 조하대 30개 정점

	<ul style="list-style-type: none"> 지역 퇴적물 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링 - 해수욕장 및 모래해안 공극수 정밀 모니터링 - V-SORS를 이용한 가라앉은 기름 조사 및 오염지도 작성 - 갯벌 표층 및 표층하 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> - 충남도서, 전라도 해안 및 도서지역 - 15개 유류표착 해수욕장 모래해안(공극수 조사) - 주요 영향 갯벌 지역 (신두리, 소근리, 근소만, 가로림만) - 사고해역 일대 (가라앉은 기름)
<p style="text-align: center;">생물체 유류오염 평가</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 태안해역 이매패류내 독성물질 축적현황 모니터링 - 충남도서, 전라도 해안 및 도서지역 이매패류내 독성물질 축적현황 모니터링 - 태안지역 어류내 독성물질 축적현황 및 담즙 분해산물 오염 확인 - 생물이식을 통한 잔존유류성분에 의한 생물축적 영향 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 태안해역 30개 정점 - 충남도서, 전라도 해안 및 도서지역 - 이각망 설치해역 (어류 조사) - 오염우심해역 7개 정점 (생물이식실험)
<p style="text-align: center;">생물독성 평가</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 유류오염 퇴적물의 생물독성 평가 - 현장어패류의 아치사 수준 영향 평가 - 어류 생활사에 따른 사고유 생물독성 검증 - 풍화유의 생물독성 검증 - 화학적 분산유 생물독성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 주요 우심해역 대표정점 - 감시생물의 아치사 스트레스 및 건강성 여부 정밀 평가

1. 해안 유징분포 정밀평가

가. 필요성

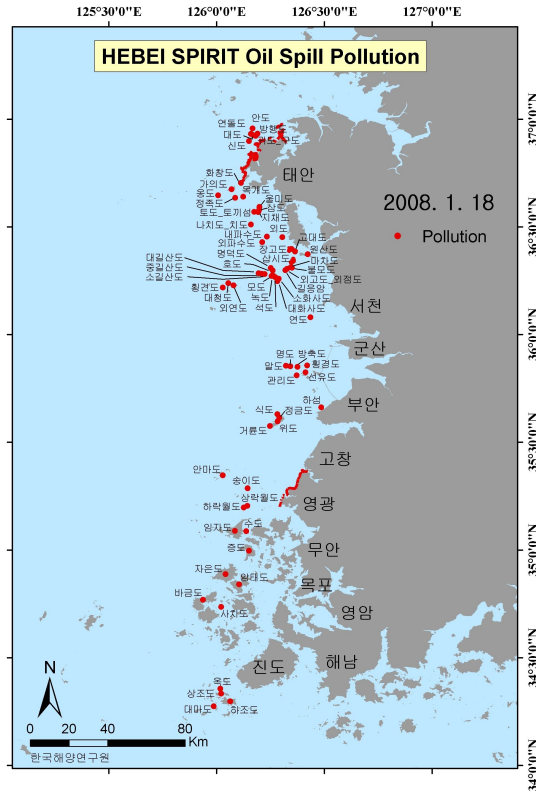
- 유류 오염 사고 발생 시 방제 인원 및 장비의 효율적인 동원 및 적용을 위해서는 정확하고 표준화된 해안선의 오염상태 파악이 필요함.
- 해안 유징분포 정밀평가는, 유류오염사고 시 오염해안을 여러 단위 구획으로 구분하여 해안가 표면 및 표면하의 잔존유를 육안으로 식별하여 표준화된 양식에 맞게 작성함으로써 해안의 유류 오염도를 정밀하게 평가하는 기법임.
- 초기 오염 방제 및 잔존유에 의한 오염해안의 정화 복원에 반드시 필요한 절차이나 현재 우리나라에서는 방제당국에서 사고 초기에 제한적으로 단순하게 수행한 후, 더 이상 시행되지 않고 있음.
- 방제 작업의 효율성 검토, 해안선의 추가 오염 여부 판단, 표면하 유징분포 파악 및 추가 방제 여부 판단, 방제계획 수립 등을 위하여 초기방제 이후에도 사고 해역에서 추가의 유징이 더 이상 발견되지 않을 때까지 지속적으로 수행 되어야 함.

나. 연구목표 및 내용

- 연구목표
유류가 표착되었던 태안 및 충남, 전라도서의 약 300 km 해안의 표면 및 표면하의 잔존유 분포 상황 및 특징을 파악하여, 사고 해역의 유류 잔류 현황 파악 및 유류오염 장기 모니터링을 위한 기본 자료로 사용하고자 함.
- 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (2012-2014년)	3단계 (2015-2017년)
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 유류표착해안 표면 및 표면하 유징분포 조사(250개 구획) - 구획별 표준화 오염 정보도 작성 	<ul style="list-style-type: none"> - 유류표착해안 표면 및 표면하 유징분포 조사(1단계조사 유징 잔존 구획) - 구획별 표준화 오염 	<ul style="list-style-type: none"> - 유류표착해안 표면 및 표면하 유징분포 조사(2단계조사 유징 잔존 구획)

	- 전체 오염 해안 유징분포도 작성	정보도 작성 - 전체 오염 해안 유징분포도 작성	- 구획별 표준화 오염 정보도 작성 - 전체 오염 해안 유징분포도 작성
--	------------------------	--------------------------------------	--



[해안 유징분포 정밀평가 조사해역]

다. 단계별 추진계획 및 소요예산

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
해안 유징분포 정밀 평가	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	13
계	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	13

2. 해수 유류오염 평가

가. 필요성

- 유류 유출 사고 후 해수 중에 잔존하는 유류는 사고 해역에 서식하는 어류, 이매패류, 갑각류, 해조류 등 다양한 종류의 서식 생물의 생존에 직접적인 영향을 미침.
- 유류 유출 사고 직후 활발한 방제 작업을 통하여 해수 표면 또는 해수 중으로 직접적으로 유입되었던 기름의 대부분은 제거되었으나, 퇴적물 내 또는 바위, 자갈 틈 속 등에 잔존하였다가 서서히 녹아나오는 기름 등에 의해 인근 해수 중으로 기름이 지속적으로 유입될 수 있음.
- 따라서 사고 이후에도 장기적으로 해수 중의 잔류 유분 농도를 감시하는 것은 매우 중요하며, 유분 농도의 측정 뿐만 아니라 저농도의 잔류 유분에 장기 노출된 서식 생물체에 대한 영향 여부 및 정도를 판단하는 것이 매우 중요함.
- 특히 유출 사고 후 상당 시간이 경과된 후에는 해수 중의 유분 농도가 사고 초기보다 매우 낮게 감소하므로, 낮은 농도에 장기 노출된 생물체에 대한 영향 정도 판단을 위하여 수층 잔존유 흡착장치, 대용량시료채취기 등을 이용한 장기 시료농축 채취기법 및 극미량 오염측정기법 등을 도입하여 조사할 필요성이 있음.

나. 연구목표 및 내용

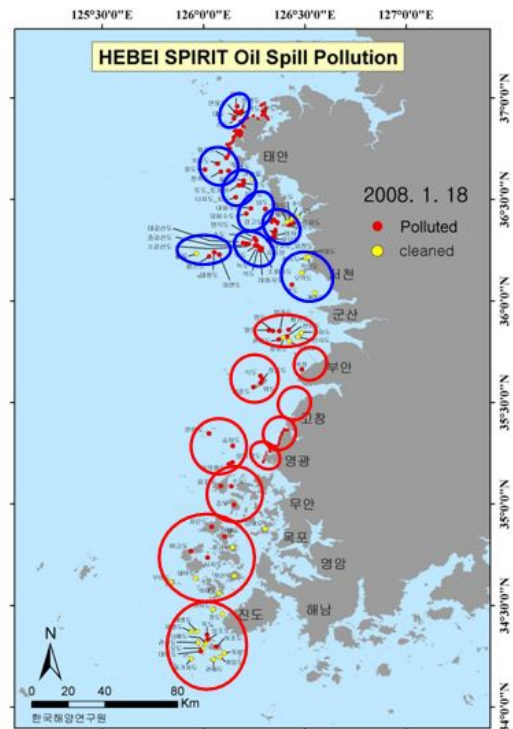
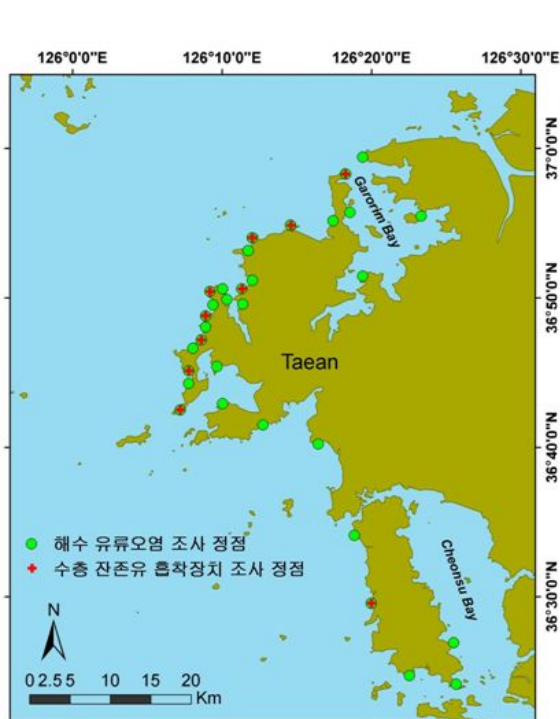
- 연구목표
사고해역내 미량 혹은 이벤트성으로 유입되는 잔존유를 다양한 시료채취기법 및 분석기법을 이용하여 조사, 분석하여 사고유에 의한 오염 지속여부 및 주변 생태계에 미치는 영향을 파악
- 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (20012-2014년)	3단계 (2015-2017년)

<p>연구 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 해수 중 잔존유의 공간적 변화 특성 파악 - 수층 잔존유 흡착장치를 이용한 해수 유류오염 정밀 평가 - 대용량 해수시료 채취기를 이용한 미량 유류오염 평가 - 해수 중 잔존유의 생물 위해성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 수층 잔존유 흡착장치를 이용한 해수 유류오염 정밀 평가(계속) - 유류잔존 해역 및 접근 제한 해역 해수 유류오염 평가 - 대용량 해수시료 채취기를 이용한 미량 유류오염 평가(계속) - 해수 중 잔존유의 생물 위해성 평가(계속) 	<ul style="list-style-type: none"> - 수층 잔존유 흡착장치를 이용한 해수 유류오염 정밀 평가(계속) - 해수 중 잔존유의 생물 위해성 평가(계속)
--------------	---	--	---

1. 태안 지역 해수 조사 정점

2. 충남도서, 전라도 해안/도서 지역 조사 정점



[조사해역 및 조사정점]

다. 단계별 추진계획 및 소요예산

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
해수 유류오염 평가	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	13
계	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	13

3. 퇴적물 유류오염 평가

가. 필요성

- 유류내 생태계 및 인체에 위해성이 높은 독성물질, 특히 다환방향족탄화수소(PAHs)의 경우 친유성이므로 수층에 용해된 상태로 존재하기보다 해수 내 미세입자에 흡착되어 입자상으로 존재.
- 태안해역은 연중 탁도가 높은 지역으로 수층 내 분산된 유류입자가 퇴적물 입자와 결합하여 해저에 잔류하며 장기간에 걸쳐 해양생태계에 영향을 미칠 가능성이 상존함.
- 사고초기 대부분의 사고유가 조간대 해역으로 밀려왔으며, 사고에 의해 직접적인 영향을 받은 태안해역의 경우 액상원유 상태로, 충남도서 및 전라도 해안, 전라도 도서지역의 경우 타르형태로 영향을 받음. 방제 후 조간대에 잔류한 사고유는 저질의 조성에 따라 침강 혹은 퇴적물이동에 의해 문혀 표층하에 잔류.
- 일부 해역의 경우 가라앉은 기름(sunken oil or submerged oil)의 존재가 보고되고 있으며, 형망조사, 다이빙조사, 양수조사 등을 통해 확인작업이 계속되고 있음. 사고지역 피해어민, 환경단체, 언론 등에서 지속적인 문제 제기가 되고 있는 현안으로 과학적, 체계적인 방식으로 조사가 진행될 필요가 있음.

- 사고해역 내 갯벌(신두리, 소근리, 근소만, 가로림만) 지역으로 다량의 유류가 유입되었으나, 갯벌지역은 상부조간대 지역을 제외하고 방제작업이 불가하여 사고유가 잔존하고 있음. 미국의 사례에 의하면, 염습지의 경우 30년이 경과한 이후에도 사고유의 독성이 남아있음.

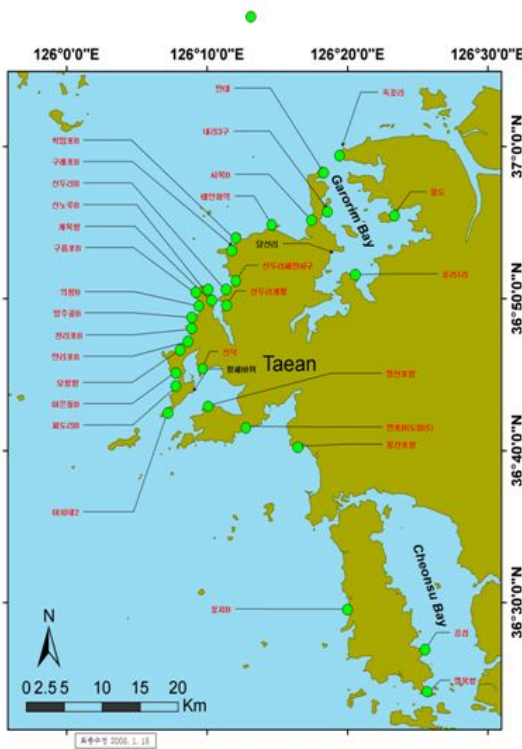
나. 연구목표 및 내용

- 연구목표
사고해역 전지역의 퇴적물내 잔존유 분석을 통해 환경내 잠재적/지속적인 유류오염 배출원의 장기적인 변동특성 및 주변생태계 영향 파악

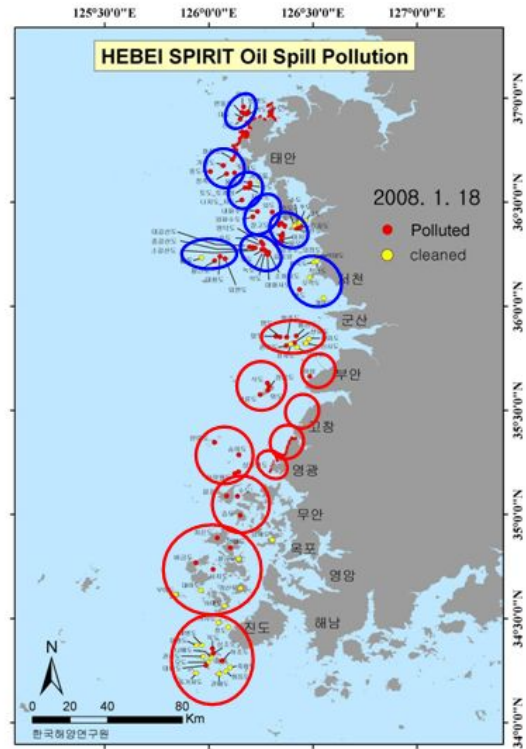
- 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (2012-2014년)	3단계 (2015-2018년)
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 태안해역 조간대, 조하대 퇴적물 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링 - 충남도서 및 전라도 해안, 전라도 도서지역 퇴적물 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링 - 모래해안 조간대 표층하 침하유 오염현황 및 독성물질 잔존현황 모니터링 - 해수욕장 및 모래해안 공극수내 유류오염 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> - 태안해역 조간대, 조하대 퇴적물 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링(계속) - 도서지역 오염우심해역 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링 - V-SORS(vessel seabmerged oil recovery system)을 이용한 가라앉은 기름 모니터링 및 지도작성 - 갯벌 표층 및 표층하 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> - 태안해역 조간대, 조하대 퇴적물 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링(계속) - 도서지역 오염우심해역 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링(계속) - 물리적/생물적 복원지역 유류 및 독성물질 잔존현황 모니터링 - 갯벌 유류오염 및 독성물질 잔존현황 모니터링(계속)

1. 태안지역 조간대 퇴적물 조사정점



2. 충남도서, 전라도 해안/도서 조사정점



[태안해역, 충남도서 및 전라도 해안, 도서 조사정점]

다. 단계별 추진계획 및 소요예산

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
태안해역 조간대/조하대 퇴적물 유류오염 조사	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	13
충남도서, 전라도 해안/도서 퇴적물 유류오염 조사	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	16
조간대 표층하 침하유 오염 조사	1	1	1								3

해수욕장 및 모래 해안 공극수 유류 오염 조사	1	1	1								3
가라앉은 기름 오 염조사 및 지도작 성				2	2	2	1	1	1	1	10
갯벌 유류 및 독 성물질 오염 조사				1	1	1	1	1	1	1	7
계	6	6	6	6	6	6	4	4	4	4	52

4. 생물 유류오염 평가

가. 필요성

- 허베이스피리트호 유류유출사고로 인해 해양환경내로 유입된 원유내에는 발암성, 유전독성, 기형유발성 등의 독성을 발현하는 다환방향족탄화수소 (PAHs)가 다량 포함되어 있음. 현재까지는 대부분 독성이 알려져 있는 16종 PAHs를 기준으로 독성이 평가되고 있지만 원유 내에 알킬 PAHs가 다량 포함되어 있으며, 이들의 독성이 최근 연구를 통해 밝혀지고 있음.
- 사고유인 이란산, 아랍에미레이트산, 쿠웨이트산 원유에는 16종 PAHs 및 알킬 PAHs가 최고 2% 이상 포함되어 있으며, 환경 내에 잔류한 PAHs 성분이 장기간 해수 중으로 유입되어 주변생물에 축적이 되고 있음.
- 태안지역의 경우 신두리 앞바다를 중심으로 다수의 굴양식장이 있으며, 맨손어업, 낚시, 통발 등의 어업활동이 활발하여, 환경 내 잔존하고 있는 기름에 오염된 어패류가 시중에 유통될 가능성이 있음.
- 이때패류, 특히 굴이나 담치의 경우 오염물질에 대한 대사능력이 부족하고 전세계 해양에 널리 분포하기 때문에 오염을 연구하기 위한 bio-monitoring 종으로 이용되고 있음.
- 사고해역 내 잔존하고 있는 기름이 생태계에 장기적으로 미치는 영향을 확인하고, 오염된 수산물에 의한 국민의 건강을 보호하기 위해서 이때패류를 중심으로 유류 내 독성물질을 모니터링할 필요가 있음.

나. 연구목표 및 내용

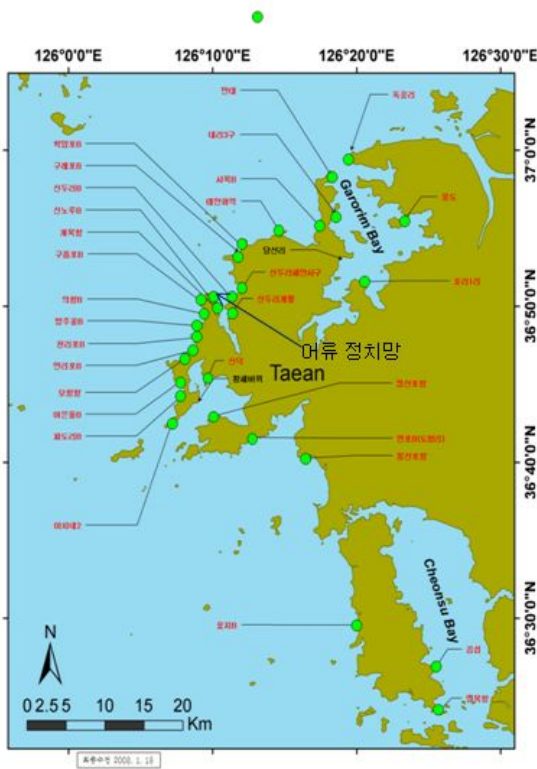
○ 연구목표

사고해역 어패류 내 유류계 독성물질 축적현황을 지속적으로 모니터링하고 잔존유가 장기적으로 생태계 및 수산자원에 미치는 영향 파악

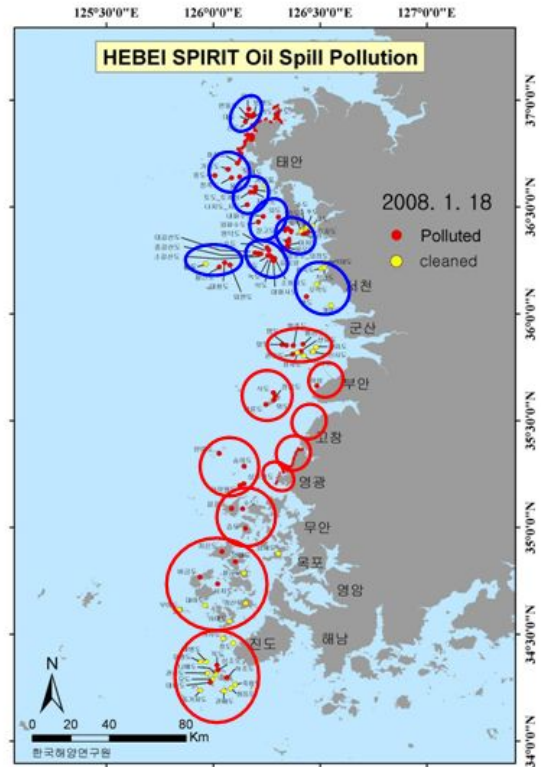
○ 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (2012-2014년)	3단계 (2015-2018년)
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 태안해역 이패패류내 독성물질 잔존현황 모니터링 - 충남도서 및 전라도 해안, 전라도 도서지역 이매패류내 독성물질 잔존현황 모니터링 - 태안지역 어류내 독성물질 잔존현황 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> - 태안해역 이패패류내 독성물질 잔존현황 모니터링(계속) - 도서지역 우심해역 이매패류내 독성물질 잔존현황 모니터링 - 태안지역 어류내 독성물질 잔존현황 모니터링(계속) - 생물이식을 통한 잔존유류성분 오염평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 태안해역 이패패류내 독성물질 잔존현황 모니터링(계속) - 도서지역 우심해역 이매패류내 독성물질 잔존현황 모니터링(계속)

1. 태안지역 조간대 조사정점



2. 충남도서, 전라도 해안/도서 조사정점



[태안해역, 충남도서 및 전라도 해안, 도서 조사정점]

다. 단계별 추진계획 및 소요예산

(단위 : 억원)

분야	년도	1단계			2단계			3단계				계
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
태안해역 이때패류내 독성 물질 조사	조간대	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	13
충남도서, 전라도 해안/도서 이때패 류내 독성물질 조 사	조사	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	13
태안지역 독성물질 황 조사	어류내 잔존현	1	1	1								3

생물이식 실험을 통한 잔존유류성 분 오염평가				2	2	2					6
계	5	5	5	4	4	4	2	2	2	2	35

5. 생물독성 평가

가. 필요성

- 허베이스피리트호에서 유출된 3종의 원유에는 생물에게 발암성, 돌연변이성 및 다양한 독성을 나타내는 것으로 알려진 다환방향족탄화수소(PAHs) 뿐만 아니라 기준에 잘 알려지지 않은 독성물질도 다량 함유되어 있음.
- 사고이후에 2008년 1월에 유류에 오염된 퇴적물에서는 단각류 독성시험에서 높은 치사율을 보였으며, 같은 시기 유류오염 퇴적물 공극수의 어류 수정란 부화율은 급격히 저하된 값을 보였음. 이후 4월 조사에서는 독성이 뚜렷이 감소하는 경향을 보였으나, 유류오염 지역에서는 여전히 높은 독성이 관찰됨.
- 사고이후에 2007년 12월부터 의항리 등 주요 유류오염 지역에서 채집된 우럭, 문치가자미, 농어 등의 어류에서 아치사(sub-lethal) 수준의 스트레스를 어류 간의 생체지표(biomarker)를 이용하여 확인한 결과 뚜렷하게 영향을 받고 있음을 확인하였음.
- 미국 알래스카의 엑손발데즈 사고 이후에 잔존유에 의한 분홍연어와 청어 등의 아치사 영향을 평가하기 위하여 어류 생체지표를 이용한 생물영향 모니터링 사고 이후 18년이 지난 시점까지도 지속적으로 이루어졌음.
- 허베이스피리트호 원유 유출사고 이후에 육상 종묘배양장 등의 시설에서 치어의 폐사, 종묘의 성장저해 및 기형발생 증가 등의 민원이 발생하고 있음. 유류 사고 이후에 현장에서 나타나는 생물영향을 밝히기 위해서는 실험실에서 사고유의 노출과 생물의 영향간의 인과관계(cause-effect relationship)를 증명하기 위한 독성실험이 수행되어야 함.
- 대형 유류오염 사고 이후에 현장에서 잔존유가 발견되고 생물영향이 확인된 경우에는 1) 현장 오염 시료에 대한 전생물(whole organism) 노출 독성 시험, 2) 현장 서식 어패류의 아치사 수준 생물독성 시험, 3) 유류노

출과 생물 영향의 인과관계 입증 실험실 독성시험이 반드시 수행되어야 함.

나. 연구목표 및 내용

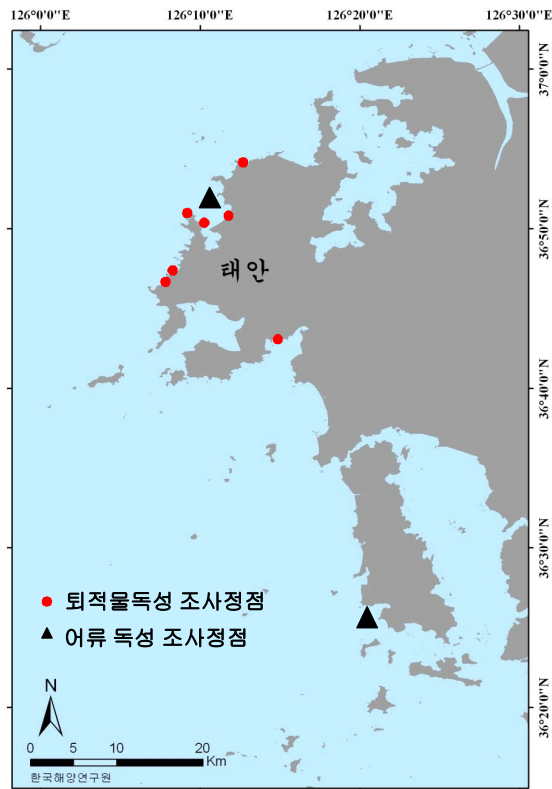
○ 연구목표

본 연구는 사고이후에 발생한 유류오염이 해양생물에 미치는 영향을 독성 측면에서 평가하고, 유출유의 노출에 따른 생물영향과의 인과관계를 규명함.

○ 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (2012-2014년)	3단계 (2015-2017년)
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 유류오염 퇴적물의 생물독성 평가 - 현장 어패류의 아치사 수준 영향 평가 - 어류 생활사에 따른 사고유 생물독성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> - 현장 어패류의 아치사 수준 영향 평가(계속) - 현장 유류흡착제를 이용한 생물독성 평가 - 사고 풍화잔존유의 생물독성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> - 현장 어패류의 아치사 수준 영향 평가(계속) - 화학적 분산유 생물독성 검증 - 잔존유와 생물독성 간의 관계 규명

- 조사 항목: 퇴적물 단각류 치사 독성, 공극수 어류 수정란 부화율 독성, 현장 어패류 간해독효소(CF, HSI, GSI, CYP1A 유전자발현, CYP1A mRNA 발현, CYP1A 단백질 발현, EROD 효소 활성) 등



[생물독성 조사 정점 안 .조사정점은 연차별로 조사내용에 따라 변경될 수 있음.]

다. 단계별 추진계획 및 소요예산

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
현장 어패류 아치사 영향평가	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	27
생물영향 검증 실험실 독성평가	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	31
계	4	4	4	6	6	6	7	7	7	7	58

제 3 절. 유류오염 피해지역 장기 생태계모니터링 계획

□ 허베이스피리트호 원유 유출사고 피해 해역의 해양생태계 영향을 평가하여 사고에 따른 환경영향을 과학적으로 입증할 수 있는 자료를 확보하고, 훼손된 생태계의 회복여부를 장기적으로 모니터링하여 생태계 건강성의 회복여부를 평가함은 물론 환경복원의 사전·사후 평가를 통한 효율성을 검증할 수 있도록 함.

분 야	내 용	범 위
부유환경/생태계	<ul style="list-style-type: none"> - 사고해역 부유환경/생태계 모니터링 - 부유환경/생태계의 중, 장기적 변동특성 규명 - 조사항목: 일반수질, 동 식물 플랑크톤, 원생생물, 난자치어 	<ul style="list-style-type: none"> - 태안반도 주변 연안역 - 광역조사는 30개 정점, 계절별 조사 - 집중조사는 15개 정점, 계절별 조사
조간대 생태계	<ul style="list-style-type: none"> - 연성조간대 및 암반생태계 모니터링 - 생물군의 급격한 변동 (대량폐사, 대량번식 등) 에 영향을 주는 환경요인 파악 - 연성조간대 및 암반생태계 장, 단기변동 특성 규명 - 갯벌지역 정밀 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> - 연성조간대 4정점 - 암반조간대 4정점 - 암반조하대 3정점 - 계절별 조사 - 저서동물 개체군, 군집구성 등 - 주요 갯벌지역 (신두리, 소근리, 근소만, 가로림만)
조하대 저서생태계	<ul style="list-style-type: none"> - 사고해역 저서생태계 모니터링 - 조사해역의 저서먹이망 파악 - 조사해역 저서환경 생태계의 단기, 장기 변동특성 및 원인 규명 	<ul style="list-style-type: none"> - 광역조사: 태안해역 조하대 30개 정점 - 집중조사: 태안해역 조하대 15개 정점
어류	<ul style="list-style-type: none"> - 조간대 근해 천해어류 종조성 변화 조사 - 정치망 채집어류 생체량, 종 	<ul style="list-style-type: none"> - 지인망 조사 3개정점 - 이각망 조사 1개 정점

	조성 변화 보상 - 주거종 대상 표지방류 조사를 통한 천해 어류자원 회복 및 유어가입 평가	
해빈퇴적환경	- 해빈지형/퇴적환경 모니터링 - 퇴적환경 변화과악 및 원인규명 - 변형된 해빈의 자연적 신위적 복원 - 해빈의 중장기적 변화예측	- 정밀지형/수심측량 - 비디오 모니터링 이용 상시 관측 - 퇴적물 이동 수치/수리모델 - 만리포, 삼봉, 꽃지 해수욕장

1. 부유환경생태 장기모니터링

가. 필요성

- “해양생태계 변화”라 함은 다양한 자연환경 요소들의 계절적 변화에서 십수년 단위의 장기적 변화까지를 통칭하며, 이러한 변화를 감지하기 위해서는 해양생태계를 공간적으로는 조밀하게, 시간적으로는 빈번하게, 그리고 장기간에 걸쳐 반복적으로 조사를 실시하여 자료를 지속적으로 생산해야함.
- 연구해역인 태안반도 주변 해역으로 최대 수심 약 70 m의 조류로가 발달하고 있으며, 강한 조석작용에 의한 혼합층이 발달함.
- 연구해역에 남서-북동 방향으로 발달하고 있는 조류로는 서해 북부해역과 중부해역을 구분하는 경계역으로 작용하는 동시에 황해 저층냉수를 경기만(서해 북부)으로 운송하는 서해연안에서 중요한 해양학적 생태축 역할을 하는 것으로 판단됨.
- 이로 인하여 연구해역에는 봄과 여름철에 강한 조석전선(tidal front)이 발달하며, 서해 북부의 경기만과 황해 저층냉수역으로부터 풍부한 물질(예, 영양염, 부유물질 등) 공급을 받는 해역으로 경기만의 수질환경 특성에 의해 조절됨(그림 1).
- 특히 연구해역에 발달하는 조석전선은 서해 연안의 식물플랑크톤의 생산력 증가와 그에 따른 상위 단계 생물들의 분포와 성장에 직접적인 영향을

미치는 중요한 해양학적 현상으로 작용함(임 등, 2008).

- 이와 같이 태안반도 주변 부유환경생태계는 조석전선, 조류로, 경기만으로 부터의 물질 공급 등 다양한 해양환경에 의해 조절되는 시(계절), 공간적으로 매우 역동적인 해역으로 판단됨.
- 따라서 연구해역인 태안반도 주변 해양이 경기만 연안역과 연계하여 시(계절)·공간적으로 매우 역동적으로 변화하는 해양환경임을 고려할 때 수질의 특성과 변화에 대한 이해와 체계적인 조사가 필요하며, 더 나아가 자연 및 인위적 환경변화가 해양 생태계에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 생태계의 기능과 구조에 대한 체계적인 모니터링과 전반적인 연구가 필요함.

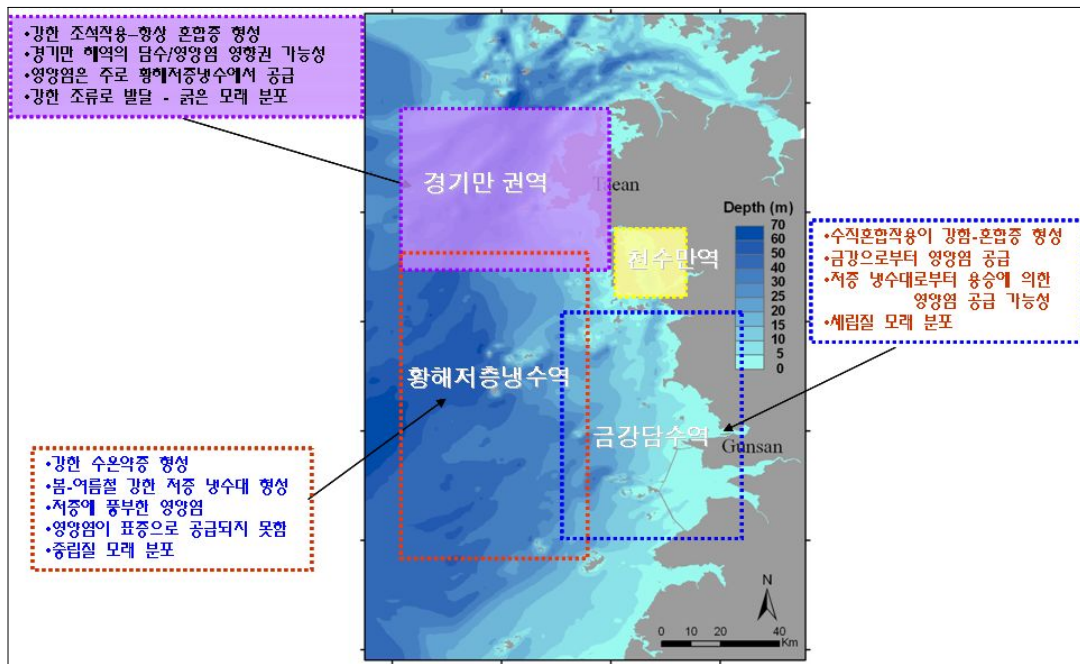
나. 연구목표 및 내용

○ 연구목표

본 연구에서는 태안반도 주변 연안역에서 해수의 수온, 염분 및 영양염류, 동·식물 플랑크톤 등의 시(계절)·공간적 변동과 조절 요인을 중장기적으로 파악하고, 이를 토대로 태안반도 주변 연안역의 부유환경/생태계의 특성과 유류오염에 따른 영향을 파악하고자 함.

○ 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (2012-2014년)	3단계 (2015-2018년)
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 연구해역 부유 환경/생태계 모니터링 및 시·공간적 변화 특성 연구 - 기존 자료 비교 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 부유 환경/생태계 모니터링(계속) - 연구해역 부유 환경/생태계 중기적 변동 특성 규명 - 유류오염에 따른 환경/생태계 변화 규명 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 부유 환경/생태계 변화 모니터링(계속) - 부유 환경/생태계 장기 변동 특성과 원인 연구

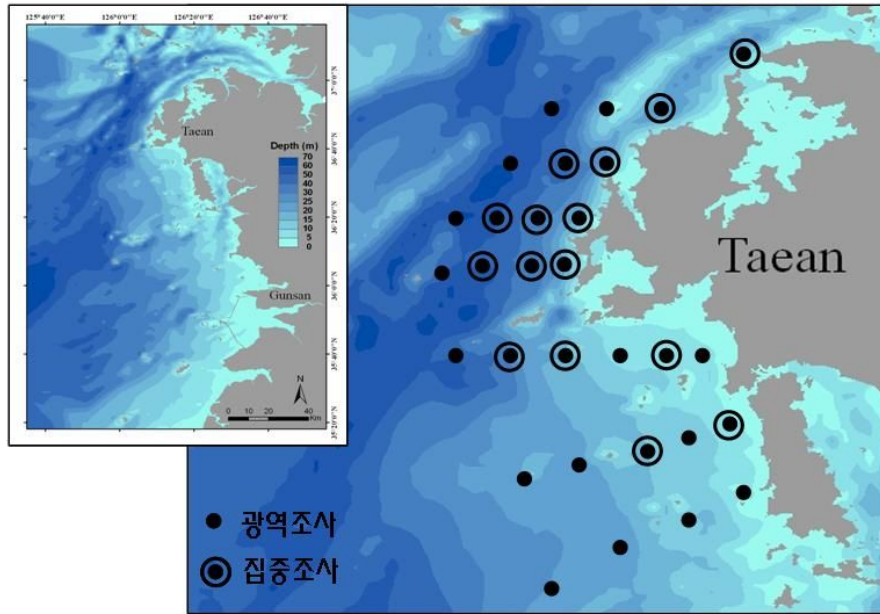


[서해 중부 해역 수질환경 특성 (임 등, 2008)]

- 조사 항목: 수온, 염분, 용존산소, 총부유물질함량, 입자성유기탄소, 투명도, 엽록소-a, 영양염류(질산염, 아질산염, 암모니아, 인산염, 규산염), 식물플랑크톤(개체수, 종조성, 우점종), 동물플랑크톤(중형/소형, 개체수, 종조성, 우점종, 생체량 등), 원생생물, 난자치어 (출현량, 우점종)
- 조사 해역/정점/시기
 - 유류유출사고 해역을 중심으로 북쪽으로 가로림만 입구에서 남쪽으로 천수만 주변 해역까지의 태안반도 주변 연안역
 - 광역조사는 총 30개 정점의 표층수에서 년 4회 계절별 조사
 - 집중조사는 총 15개 정점의 표층수에서 연속 3일 이상의 모니터링을 4회/년 이상 실시하는 것을 원칙으로 함(그림 2).
- 현장조사 및 시료분석 방법
 - 현장조사는 모든 정점의 표층 약 1-2m 깊이에서 수온과 염분 관측 그리고 시료 채취가 이뤄져야 함.
 - 수온과 염분은 전기전도도 원리를 이용한 CTD를 사용함.
 - 해수의 용존산소량, 총부유입자물질함량, 부유입자성유기탄소는 해양환경공정시험분석법에 준함. 영양염류, 동식물플랑크톤, 난자치어는

해양생태계기본조사 지침서(해양수산부 2005)에 제시된 방법에 준함.

- 모든 자료의 정확도와 신뢰도 또한 해양생태계조사 지침서에 제시된 방법에 따라 분석되고 제시되어야 함.



[조사해역 및 조사정점]

○ 단계별 소요예산 (단위: 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
부유환경생태	3	3	4	3	3	4	3	3	3	4	33
계	3	3	4	3	3	4	3	3	3	4	33

2. 조간대 생태계 장기모니터링

가. 필요성

- 허베이스피리트호 유류 사고로 인한 유류 오염 및 방제에 따라 연성조간대 및 암반생태계 훼손이 크게 나타나, 사고 이전 고유한 서식 특성 (중수,

개체수, 생체량, 종 다양도, 군집구조 등)의 회복을 파악하기 위한 장기 모니터링이 필요함.

- 유류 사고 이후 조간대의 유용생물 자원(굴, 전복, 바지락, 쪽 등)의 급작스러운 대량 폐사에 대한 영향을 파악하고, 사고 이전의 생물자원군으로 회복되어지는 과정을 파악하기 위한 장기 모니터링이 필요함.

나. 연구목표 및 내용

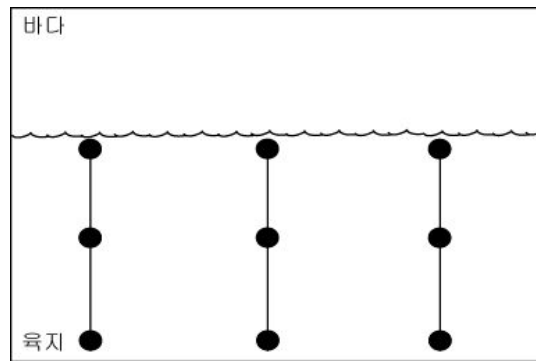
- 연구목표
유류 사고 이후 연성조간대 생태계 및 암반 저서생태계의 시·공간적 변화 특성 연구
- 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (2012-2014년)	3단계 (2015-2017년)
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 연성조간대 및 암반 생태계 모니터링 및 시·공간적 변화 특성 연구 - 기존 자료 비교 연구 - 생물 특성(대량 폐사 포함)에 영향을 주는 환경요인 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 연성조간대 및 암반생태계 모니터링(계속) - 연성조간대 및 암반생태계 단기 변동 특성 규명 	<ul style="list-style-type: none"> - 연성조간대 및 암반생태계 모니터링(계속) - 연성조간대 및 암반생태계 장기 변동 특성과 원인 파악 연구

■ 연성조간대 생태계 모니터링

(1) 조사 지역

- (가) 조사 지점: 조사 지점은 최대 대조시 고조선 (EHWS) 부터 저조선 (ELWS)까지 최소 3개 이상의 조사선을 선정하며, 최소 3개 조위(상부, 중부, 하부) 이상에서 조사를 실시함.



(2) 조사방법

- (가) 채집 기기 선정 : can corer (0.14 x 0.24 x 0.3 m)를 사용함.
- (나) 채집 회수 및 면적: 한 정점에서 최소 3회 이상 (0.1 m²의 표면적)을 실시하여, 채집 깊이는 30 cm 깊이까지 채집되어야 함.
- (다) 생물 크기: 채집된 시료는 1 mm 망목 크기의 체를 사용하여 퇴적물 분리.
- (라) 종 동정: 가능한 종 (species) 수준까지 분석하며, 종 수준까지 어려운 경우 ,시료 번호를 표기하며, 동정이 가능한 수준 까지 분석 (최대 과(family)수준 까지 허용)
- (마) 개체수: 개체수는 단위 면적 (1 m²) 당 환산하여 분석함
- (바) 생체량: 생물의 습중량 또는 건중량으로 분석함.
- (사) 환경 인자 분석: 퇴적물(입도, 유기물, 유분 분석 등) 및 조간대 경사도 측정

(3) 조사기간 및 빈도

- (가) 최소 계절별 1회 이상 실시(생물의 가입 특히 연안은 기회종 가입이 예상되므로 수온변화 폭에 의한 연간 4회 정도조사가 이루어져야 하며, 군집구조변동은 장기적 변화요인이므로 최소 정점 하에서 지속적인 모니터링이 반드시 수행되어야 함).
- (나) 대상해역에 가입되는 생물 조사를 위해 건강망 또는 조망을 활용하여 조하대에서 연 1회 정도 조사(초대형 저서동물의 분포 파악은 주로 공간적 유사도를 평가하기 위한 자료임).

(4) 자료 제시 및 분석

- (가) 정량 분석이 가능하도록 종 수 개체수, 생체량 자료를 정리. 특히 서

식밀도 및 생체량 자료는 Q-mode matrix 제시.

(나) 정점별 단변량 분석 (생물다양도 등) 및 다변량 분석 (유사도 분석 등)을 실시하며, 모든 자료의 비교시 통계 검증을 실시함.

(5) 고려사항

(가) 기존 연구 자료를 통한 퇴적환경 파악 특히 유류 가입 이전 퇴적특성 및 물리특성을 파악(초기 가입 영상에 대한 자료 평가가 중요함. 환경 조사와의 밀접한 관계 형성으로 퇴적학, 지화학적 자료 확보가 생물 군집 해석에 필수적임).

■ 암반생태계 모니터링

(1) 조사 지역

(가) 조사 지점: 조사 지점은 최대 대조시 고조선 (EHWS) 부터 저조선 (ELWS)까지 최소 3개 이상의 조사선을 선정하며, 최소 3개 조위(상부, 중부, 하부) 이상에서 조사를 실시함.

* 동일지점의 지속적인 모니터링을 위해 조사 대상 암반에 직접 표기 필요함.

(2) 조사방법

(가) 채집 기기 선정 : 방형구(50 x 50 cm, 소방형구 10 x 10 cm 표식) 선정

(나) 채집 회수: 조간대의 경우 한 정점에서 최소 3회 이상의 고정 방형구를 설치하며, 조하대에서는 정선 조사가 불가능 하므로, 가능한 상(수면하 1 - 3 m), 중 (6 m), 하 (9 m)에서 조사 실시함.

(다) 채집 방법: 고정 방형구의 경우에는 현장에서 개체수 조사 및 영상 분석을 실시하며, 생물 채집은 고정 방형구와 유사한 지점에서 방형구 (25 x 25 cm)를 설치하여 정량 채집

(라) 생물 크기: 채집된 시료는 1 mm 망목 크기의 체를 사용하여 퇴적물 분리.

(마) 종 동정: 가능한 종 (species) 수준까지 분석하며, 종 수준까지 어려운 경우, 시료 번호를 표기하며, 동정이 가능한 수준 까지 분석 (최대 과(family)수준 까지 허용)

- (바) 개체수: 개체수는 단위 면적 (1 m^2) 당 환산하여 분석함
- (사) 생체량: 생물의 습중량 또는 건중량으로 분석함.
- (아) 피도: 대형부착생물 (굴 등) 및 군체를 형성하는 생물 (해면 등)의 경우 방형구 내의 피도를 분석함.
- (자) 환경 인자 분석: 조간대 경사도 측정

(3) 조사기간 및 빈도

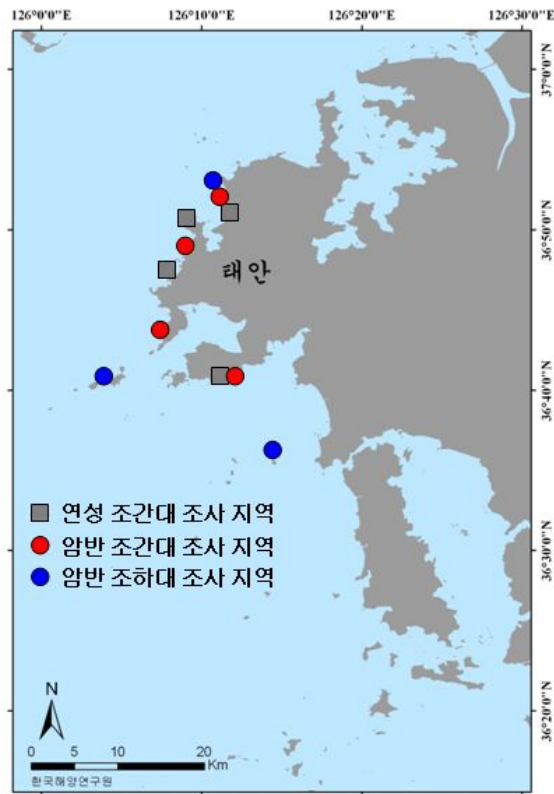
- (가) 계절별 연간 4회 조사 수행 - 조간대의 경우 반드시 동일 정선 조사 실시(계절별 생물의 공간경쟁에 따른 영향 언급, 물리적 요인에 의한 생물 이탈 양상 파악).

(4) 자료 제시 및 분석

- (가) 정량 분석이 가능하도록 종 수 개체수, 생체량 자료를 정리. 특히 서식밀도 및 생체량 자료는 Q-mode matrix 제시.
- (나) 정점별 단변량 분석 (생물다양도 등) 및 다변량 분석 (유사도 분석 등)을 실시하며, 모든 자료의 비교시 통계 검증을 실시함.

(5) 고려사항

- (가) 암반 분포 상황, 조류의 흐름, 수심 지형도 등을 고려하여 조간대, 조하대를 이원화한 정점 선정.
- (나) 환경변화에 따른 자연적 이탈현상을 고려하기 위해 유사환경을 지닌 대조구를 반드시 선정하여 병행조사 실시(조간대, 조하대 모두 선정).



[조사해역 및 조사정점]

다. 단계별 추진계획 및 소요예산

(단위 : 억원)

분야	년도	1단계			2단계			3단계				계
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
연성조건대 및 암반 생태계 모니터링		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	25
생물 특성 (대량 폐사 포함)에 영향을 주는 환경요인 파악		0.5	0.5	0.5								1.5
연성조건대 및 암반 생태계 단기 변동 특성 규명					0.5	0.5	0.5					1.5
연성조건대 및 암반 생태계 장기 변동 특성과 원인 파악 연구								0.5	0.5	0.5	0.5	2
계		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30

3. 조하대 연성퇴적물/조간대 갯벌 생태계 장기모니터링

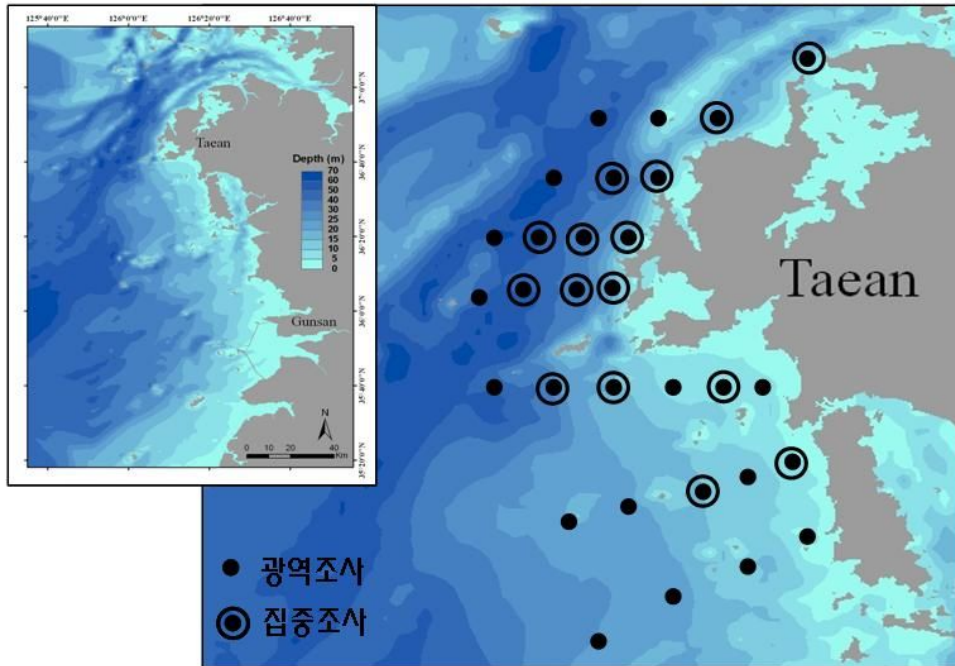
가. 필요성

- 유류오염은 저농도 조건에서도 생태계의 먹이망 구조를 통해서 장기간에 걸쳐 만성독성을 생물에 미침.
- 신두리 갯벌에는 표층 하에 액상 유분이 존재하여 장기오염원으로 작용.
- 유류오염해역의 생태계 회복과정을 파악하고 지연 원인규명에는 장기간의 현장 조사가 필요.

나. 연구목표 및 내용

- 연구목표
 - 허베이 스피리트 유류오염 피해지역의 해양생물군집이 시간에 따라 회복되는 과정을 현장조사를 통하여 파악함
- 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (2012-2014년)	3단계 (2015-2018년)
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 연구해역 저서생태계 모니터링 및 시·공간적 변화 특성 연구 - 연구해역의 저서먹이망 연구 - 기존 자료 비교 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 저서환경/생태계 모니터링(계속) - 연구해역 저서환경/생태계 단기 변동 특성 규명 - 연구해역의 저서먹이망 연구 - 유류오염에 따른 환경/생태계 변화 규명 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 저서환경/생태계 변화 모니터링(계속) - 연구해역의 저서먹이망 연구 - 저서환경/생태계 장기 변동 특성과 원인 파악 연구



[조하대 생태계 조사 정점]



[신두리 갯벌 생태계 모니터링 조사선 (L1-L3) 및 대조구 갯벌 조사선 (L4)]

다. 단계별 추진계획 및 소요예산

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
조하대 연성저질 생태계 모니터링	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	21
신두리 조간대 생태계 모니터링	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	16
계	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	37

4. 조간대 천해 어류 분야 장기모니터링

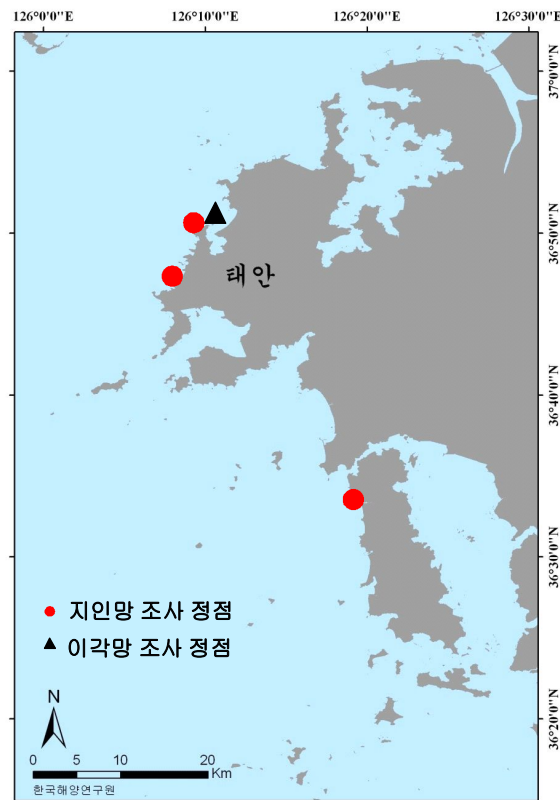
가. 필요성

- 사고유의 해안포착으로 인한 환경오염 및 조간대 먹이생물의 감소 등으로 인하여 조간대 천해의 어류 종조성 및 군집의 변화 가능성이 상존함.
- 사고이후 2007-2008년 조사에서 과거 자료와 비교하여 만리포 지역에서 조간대 천해 어류의 종수의 감소가 확인되었음.
- 조간대 지역은 상업어종은 물론 생태계를 구성하는 비상업 어종의 유어의 주요서식지로서 천해 어류의 종조성 변동은 물론 유어의 가입 여부를 조사하여 유류오염의 영향 여부를 평가할 수 있음.

나. 연구목표 및 내용

- 연구목표
허베이 스피리트 유류오염 피해 조간대 지역에서 천해 어류의 종조성 및 유어가입 여부를 조사하여 어류 생태계에 미치는 영향을 평가함.
- 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (20012-2014년)	3단계 (2015-2018년)
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 조간대 근해 천해 어류 종조성 변화 조사 - 정치망 채집어류 종조성 변화 조사 - 표지 방류 대상 어종 선정 - 표지선정 및 표지 가능성 예비시험 	<ul style="list-style-type: none"> - 조간대 근해 천해 어류 종조성 변화 조사 (계속) - 정치망 채집어류 종조성 변화 조사 (계속) - 주거종을 대상으로 표지방류 조사 	<ul style="list-style-type: none"> - 조간대 근해 천해 어류 종조성 변화 조사 (계속) - 정치망 채집어류 종조성 변화 조사 (계속) - 표지방류에 따른 근해 천해 어류자원 회복 및 유어가입 평가



[생물독성 조사 정점 안 .조사정점은 연차별로 조사내용에 따라 변경될 수 있음]

다. 단계별 추진계획 및 소요예산

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
조간대 천해 어류 조사	0.5	1	1	1.5	2	2	1	1	1	1	12
계	0.5	1	1	1.5	2	2	1	1	1	1	12

5. 해빈퇴적환경 장기모니터링

가. 필요성

○ 해빈(Sand Beach)은 해안경관으로서의 아름다움뿐만 아니라 해안을 바다 폭풍과 파도로부터 보호하고 육지 쪽으로는 후안(backshore) 또는 조상대를 보호하는 기능을 가지는 일종의 완충장벽임.

○ 또한, 많은 야생동물 특히 바다 철새들과 주요 수산자원의 성육 또는 섭이장소로서도 중요한 기능을 가지며, 최근에는 수변환경 (Water-Front Environment)에서의 거주, 휴양, 관광 등 인간 생활에서의 중요성이 크게 증가하고 있음.

○ 우리 삶의 수준이 향상됨에 따라 이 같은 필요성이 보다 강조될 것이며, 향후에는 수변환경의 생태적, 사회적 중요성이 현재에 비해 10배 이상의 가치를 지닐 것으로 평가되고 있음.

○ 최근 다양한 자연적, 인위적 요인들로 인해 기존의 평형을 이루던 연안역 해빈과 사구 시스템은 불균형이 초래되고 지속적인 변화를 유발하여 해안침식과 해안선 후퇴가 발생하여 해안 생태계(Coastal Ecosystem) 전체가 심각한 변화를 겪고 있음.

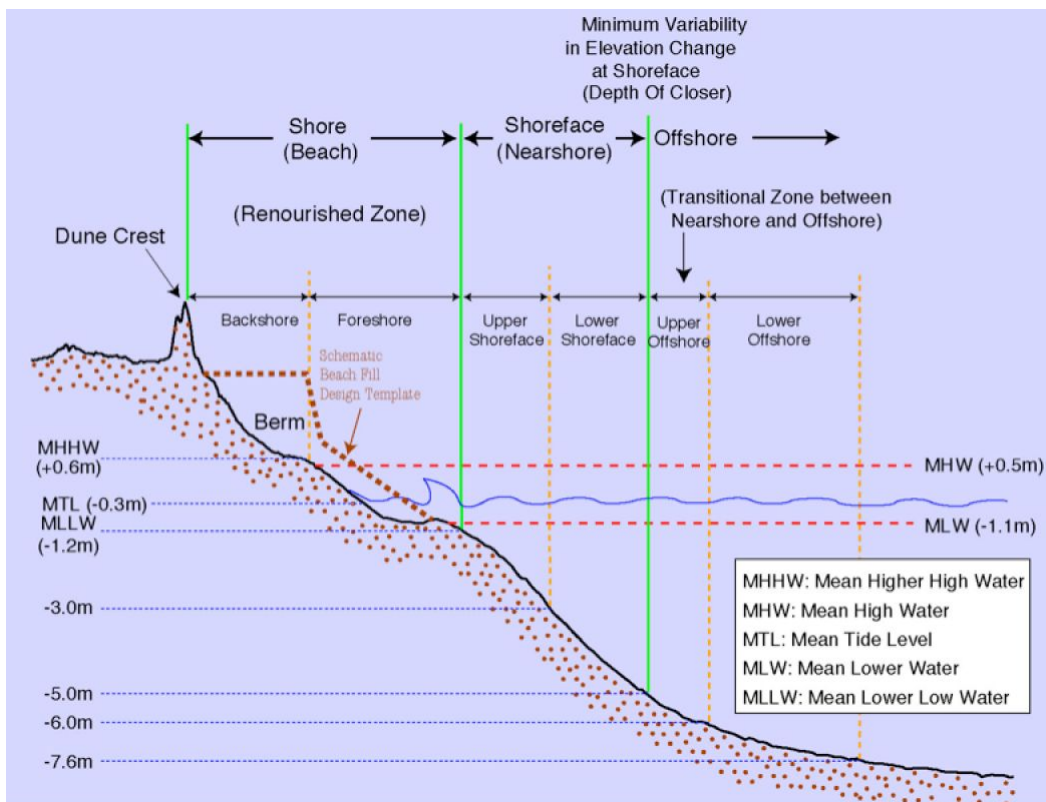
○ 서해 중부 태안반도 해안은 전형적인 리아스식 해안으로 신두리, 만리포, 몽산포, 꽃지 해빈 등 크고 작은 포켓형 해빈 퇴적환경(beach environment)이 발달하고 있음.

○ 서해안에 발달한 많은 해빈들의 성장과 쇠퇴는 해저 사질 퇴적물의 저장고인 연안 사퇴의 발달과 이동에 크게 영향을 받으며, 해안사구 또한 해빈과 함께 해안의 모래 저장고로서 태풍과 폭풍에 의한 완충지대 역할 뿐만 아니

라 저장된 모래를 연안으로 제공함으로써 해빈의 급격한 침식을 방지하고 평상시에는 모래 교환을 통해 해안지역의 퇴적물 수지를 조절하는 중요한 역할을 함.

○ 그러나 태안반도를 비롯한 서해의 연안역의 퇴적환경들은 태풍 및 폭풍해일 등의 자연재해 이외에도 지역적으로 구분별한 연안역 골재 채취나 방조제 건설, 구조물 설치, 해빈 훼손 등에 의한 인위적 환경변화는 해빈 침식을 가속화 시키고 있으며, 특히 연안 침식과 해안선 후퇴, 해빈과 해안사구 유실, 급격한 생태계 변화 등의 문제에 직면하고 있음.

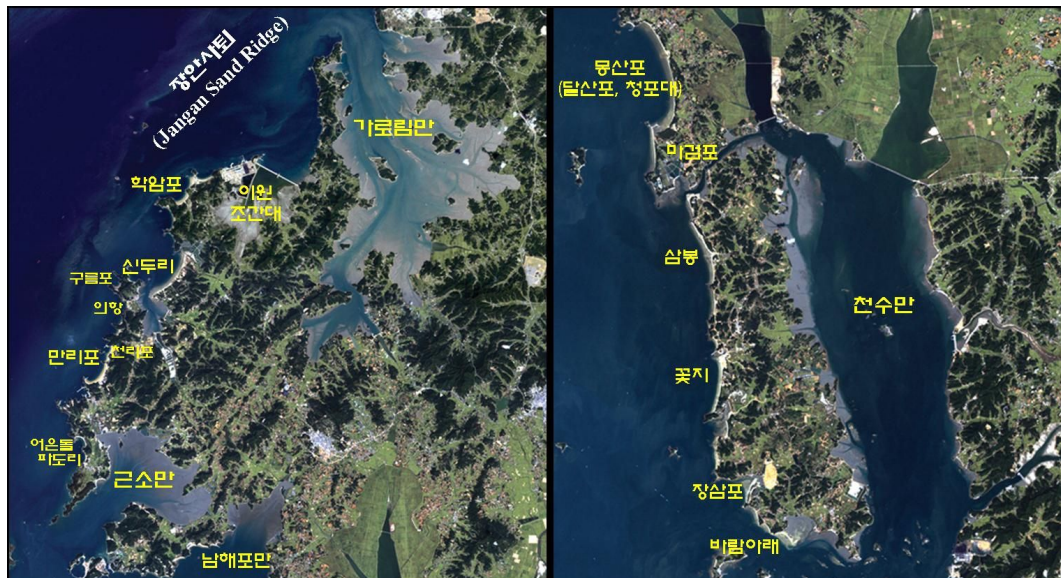
○ 더욱이 이러한 상황에서 최근 발생한 유류오염 방제를 위한 광범위하고 인위적인 “reworking 이나 tilling”에 의한 해빈의 변형과 훼손은 자연 상태의 해빈 퇴적환경의 변화를 더욱 심화시키고, 특히 해빈-사구-연안사퇴 사이의 평형상태를 깨트려 해빈의 침식현상을 가속화 시킬 것으로 예상됨. 따라서 유류오염 방제에 따른 해빈의 변형 정도와 복원 (평형상태 도달) 대책을 수립하기 위해서는 장기적이고 체계적인 해빈 지형 및 퇴적환경 모니터링 프로그램이 필요한 실정임.



[해빈과 해안사구의 지형 모식도]

○ 해빈 침식 및 퇴적환경 변화의 원인

구분	세부 원인	비고
자연적 요인	지구온난화에 따른 해수면 상승	전 지구적 변동
	지진해일 및 폭풍해일	대규모 침식
인위적 요인	방파제 및 방조제 축조	주로 지역적 변동
	도로 건설을 위한 해안석축 축조	
	유류오염 방제에 따른 해빈 교란 (reworking and tilling)	
	인근해역의 간척 매립	광역변동의 영향
바다 모래 채취		



[태안반도와 안면도 주변 해안선에 발달한 조간대와 해빈의 분포 .전형적인 리아스식 해안으로 크고 작은 많은 포켓 해빈 (pocket beach)이 집중 발달하고 있음]



[방제작업을 위한 해변 모래의 reworking과 tilling작업 및 해변 변형/훼손]

나. 연구목표 및 내용

○ 연구목표

대규모 방제작업으로 인한 해변의 지형 및 퇴적환경 변화/훼손 정도를 파악하고, 이후 변화 과정 모니터링을 통한 자연적 복원 가능성 여부 및 인위적 복원 대책 마련을 위한 기술 개발

○ 단계별 연구내용

	1단계 (2009-2011년)	2단계 (2012-2014년)	3단계 (2015-2018년)
연구 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 해변지형/퇴적환경 모니터링 - 방제활동에 의한 해변 변화 정도 파악 - 방제활동에 의한 변형된 해변과 대조구 해변의 단기적 퇴적환경 변화 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 해변 지형/퇴적환경 모니터링(계속) - 비디오 영상 시스템 구축 및 분석 - 해변 주변의 수력학적 및 퇴적물 이동 역학 모니터링 - 방제활동에 의한 변형된 해변과 대조구 해변에서의 퇴적환경 변화 및 원인 규명 - 변형된 해변의 자연적 복원 가능성 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 해변 지형/퇴적환경 모니터링 및 비디오 영상 분석(계속) - 해변 주변의 수력학적 및 퇴적물 이동 역학 모니터링(계속) - 해변의 중장기적 변화 예측 연구 - 인위적 복원 방안 개발

○ 연구 범위 및 방법

● 연구지역: 만리포 해변 (인위적 훼손이 가장 심한 해변), 삼봉과 꽃지 해변 (인위적 훼손이 심하지 않은 대조구 해변)

● 연구방법

○ 정밀지형/수심측량조사:

- 정밀 지형측량(광파측정기를 이용, 6회 이상/년)
- 정밀 수심측량(다중빔 음향측시기 이용, 6회 이상/년)
- (*폭풍/태풍시에는 전후 약 1개월간 지속 측량)

○ 비디오 모니터링 시스템 활용 조사(상시관측)

- 만리포와 주변 해변에 실시간 비디오 영상 촬영을 통한 해변 변화 관찰
- 실시간 장기 해변 변화 영상 수집 및 정량적/정성적 변화량 파악
- 장기 지형변화 분석 기술 개발



[비디오를 이용한 연안침식 모니터링 구축지역 및 구축의 예 (해양수산부)]

○ 해변 퇴적환경 모니터링

- 외력환경조사: 파랑, 조석 및 조류관측(각 연 2회), 유사-소류사 관측(연 2회), 비사량 조사(연 4회)

- 해빈 퇴적물 입도 특성 조사 (6회/년 이상)
- 퇴적물 조직 특성을 분석을 통한 퇴적물 이동 과정 해석
- 해안사빈 퇴적체 형성과정 분석 (해빈 퇴적체의 퇴적상 분석)
- 퇴적물 이동 역학 모니터링 및 수치/수리모델 구축
 - 해빈의 연안류와 퇴적물 이동에 대한 정보 구축을 위한 수력학적 특성 (수심, 유속, 유향, 탁도, 해저면 높이 변화 등) 조사 (2-3개 정점에서 15일 이상 관측, 4회 이상/년)
 - 수력학적 특성 자료에 근거한 해빈 및 주변 연안 퇴적환경 분석을 통한 해빈의 침식/퇴적 체계 분석
 - 종합적 자료 해석을 통한 방제작업 이전으로의 자연적 복원 가능성 여부 파악 및 다양한 복원 방안 검토

다. 단계별 추진계획 및 소요예산

(단위: 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
해빈퇴적환경	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	44
계											

제 4 절. 유류오염 피해지역 해양환경복원 방안

1. 환경복원의 정의

가. 환경복원의 개념

유류오염 피해지역의 복원 프로그램은 크게 일반 복원(general restoration)과 모니터링/연구(monitoring/research)의 두 분야로 나뉘질 수 있다.

일반 복원 작업은 훼손된 특정 생태계의 회복에 초점을 두는 것으로서, 주로 인간활동의 제한, 주변 해양오염원의 제거, 또는 주변 환경여건을 개선시키는 일련의 활동 등을 포함한다. 즉 인간의 출입 및 활동을 제한하거나 해양 오염을 감소시킴으로서 훼손된 생태계의 자연회복 속도를 향상시킬 수 있는 활동 등을 말한다. 또한 유류오염에 의해 감소된 수산자원량을 회복시키기 위하여 인공어초나 어도를 설치한다든지, 해초 등을 이식하여 서식 환경 여건을 인위적으로 개선하는 것도 일반 복원에 포함되며, 이러한 작업들은 환경에 미치는 역효과에 대해 충분한 사전 검토 후에 수행되어야 한다. 민감한 지역으로의 인간의 접근을 제한시키는 시설이나 복원활동을 지원하는 시설, 그리고 유출사고에 의해 손상된 시설을 복구하거나 설치하는 업무도 또한 일반 복원에 포함된다.

피해 지역에서 일반 복원 계획이 채택되어 적용되기 위해서는, 인간이나 생태계에 가치가 있는 복원 대상 자원에 한하여, 복원작업이 자연회복 속도보다 상당히 빠르게 훼손된 자원을 회복시킬 수 있다고 판단되어 질 때, 적용의 용이성, 성공 가능성, 적용의 적법성, 부작용 최소화 및 다른 복원 사업과의 중복여부 등을 감안하여 수행 되어 질 수 있다.

복원 프로그램이 시행된 이후에도 복원 활동의 비용 및 비용대비 효과, 환경의 회복 속도 및 추가 피해 발생 여부 등 복원과정에서 파악되는 새로운 정보를 바탕으로 복원프로그램을 지속적으로 수정, 보완하여 적용하여야 한다.

나. 환경복원 모니터링 및 연구

모니터링(monitoring and research) 프로그램은 복원작업을 효율적으로 수행하기 위해, 훼손된 생태계의 현재 상태, 회복 여부, 복원작업의 성공 여부, 회복을 더디게 하는 요인 파악 등 복원작업에 필요한 중요한 정보를 제공한다.

복원해역이 지속적으로 모니터링 되지 않는다면, 복원을 위한 노력이 비

효율적이고 적절치 못한 방법들이 사용될 수 있으며, 또한 필요한 정보부재로 인한 추가 복원 기회의 상실, 이로 인한 지속적인 피해 유발 등을 불러올 수 있다.

복원계획의 수립 및 수정 위해서는 생태계 장기 모니터링이 반드시 필요하며, 지속적인 모니터링을 통하여 훼손된 자원의 회복 속도 및 회복 정도를 추적하고, 복원과정 중에 발생할 수 있는 재손상, 문제점 등을 찾아 낼 수 있으므로, 모니터링은 자원이 완전히 회복될 때까지 지속적으로 수행되어야 한다.

보다 효과적인 생태계의 복원 및 관리를 위해서는, 대상 자원 및 생태계의 먹이원, 먹이구조, 서식지 조건, 다른 생태계 조건과의 상호 관계 등을 밝히는 과학적 연구가 수반되어야 하며, 이를 통해 복원에 필요한 과학적 정보를 얻을 수 있다.

다. 환경복원의 방향

복원작업의 궁극적 목적은 손상된 자원(또는 생태계)의 회복 즉, 자연적인 생물다양성을 지닌 건강하고 생산성 있는 생태계로 회복시키는 것이다.

복원 작업의 구체적인 목표는, 개체수의 증가 및 개체군의 안정화, 활발한 증식 활동, 성장률과 생존률의 증가, 연령비 및 성비의 정상화 등을 들 수 있으며, 이들 과정을 통해 생태계가 유출 사고 이전 수준 또는 비오염 지역 수준으로 회복되어야 한다.

복원 전략은 목표를 달성하기 위한 구체적인 계획으로서, 생태계의 훼손 및 회복에 관한 다양한 연구를 바탕으로 각각의 환경에 맞게 세워져야 한다.

회복되고 있는 환경에서 복원 전략은 주로 자연 회복에 의존한다. 이와 더불어 서식지 보호와 지속적인 모니터링, 그리고 잠재적인 위험요인의 제거가 필요하다.

회복되지 않는 환경에서는, 회복되지 않는 이유를 파악하지 못한 상태에서 복원 작업은 무의미하기 때문에, 그 이유를 밝히는 연구와 기타 위험요인을 제거하는 것이 중요하다. 즉 제한요인을 찾아내어 회복속도를 높이는 일, 지속적인 모니터링, 훼손된 자원 및 서식지 보호의 작업이 필요하다.

회복 정도를 알 수 없는 자원이나 피해가 완전히 알려지지 않은 경우에는 대부분 자연 회복에 맡긴 후, 지속적인 모니터링을 수행하고 서식환경을 기타 위험 요인으로부터 보호하는 작업을 할 수 있다.

국내 여건상 복원예산의 확보가 어려워 현재까지의 조사에서 **영향이 확인된 생태계 및 서식지 위주로** 먼저 복원작업을 진행한다. 1차년도 조사결과 유류오염 및 생태계의 영향이 확인된 대상들 위주로 진행하며, 장기적인 복원 전후 모니터링 결과를 토대로 복원의 대상 및 방법을 수정/보완해야 한다.

라. 유류사고 환경영향 및 복원방안 요약

대 상	환경영향	1차 복원방안	대체 방안
습지 및 해안	<ul style="list-style-type: none"> ○ 태안 70km 해안/충남 5개 도서/전라도 해안 6개소 및 47개 도서 지역 유류 표착 ○ 해안, 도서 일부지역 잔존 유정분포 및 갯벌 등 지역 표면하 액상 원유 잔존 ○ 인공구조물 및 바위틈에 풍화유 잔존 및 타르 입자가 간헐적으로 해안 표착 	○ 자연회복	<ul style="list-style-type: none"> ○ 추가 물리적 방제 ○ 생물학적 정화복원
조간대 저서생태계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 조간대 갯벌 및 암반 서식생물 폐사 및 밀도 감소 ○ 구멍갈파래 이상 번식 ○ 방제에 따른 서식생물 이탈 ○ 이상 증식에 따른 생태계 균형 손실 	○ 자연회복	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기회종 서식 원인 규명 및 제어 관리 ○ 생물 가입 향상을 위한 기질 확보 ○ 관리 구역 선정 이후 시설물 보강
생물 생산성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 굴, 바지락 및 기타 유용생물 폐사 및 감소 ○ 잔존 원유에 의한 지속적인 건강성 영향 ○ 새로운 개체군 가입에 필요한 주 공급처 손실 	○ 자연회복	<ul style="list-style-type: none"> ○ 생산성 회복을 위한 자원투입 ○ 주 공급처 확보를 위한 시설물 투입 ○ 건강성 평가 및 항체 관리

주요서식생물	○ 해역 우점종의 생물량 감소 ○ 고유 서식처의 유류 피복에 의한 개체군 교란	○ 자연회복	○ 생물 이식 ○ 대체 서식처 조성
서식처	○ 유류 피복에 의한 고유 서식처 기능 감소 ○ 암반, 갯벌, 해중립 등 특성별 서식처내 유류 잔존	○ 자연회복	○ 서식처 특성별 환경 조성 ○ 이식 및 유사 환경 보강
어류	○ 조간대 천해 어류 종수 및 서식 밀도 감소 ○ 연안 어류 유류 만성노출 및 아치사 스트레스	○ 자연회복	○ 치어 방류 ○ 친어 표지 방류

2. 유류사고 영향 대상별 복원 방안

가. 습지 및 해안 오염

□ 환경영향 및 회복

태안반도 70km 해안, 충청남도 54개 도서 및 전라도 47개 도서 해안에 유출 유가 액상, 에멀전 또는 타르 형태로 표착하여 영향을 줌. 대부분의 해안에서 긴급방제 및 1, 2차 방제를 통하여 표착유가 제거되었으나, 태안군 소원면 및 원북면등의 갯벌 조간대는 표면하층에 유류가 잔존하고 있으며, 충남(가의도, 삽시도, 호도, 녹도, 대화사도, 외연도 등) 및 전라도(십이동과도, 안마도, 무안담섬, 지도, 어의동 등)의 도서지역의 경우 표층에 잔존유가 있음. 표층 잔존유의 경우 자연정화로 서서히 감소하겠으나, 표면하 잔존유의 경우에 장기간 지속될 것으로 예상. 유출유 기원 다환방향족탄화수소 농도는 사고 이후에 지속적으로 감소하고 있으나, 태안반도 신두리-파도리 구간의 경우 사고이전에 비하여 오염되어 있음

□ 복원목표

육안으로 식별되는 표층 및 표면하의 잔존유가 발견되지 않는 수준으로 복원되어야 하며, 원유 성분인 다환방향족탄화수소의 농도가 해수, 퇴적물, 생물체내에서 사고이전 수준으로 회복되도록 함

□ 복원전략

▶ 해안 표층 및 표면하 잔존유 정밀조사(SCAT). 표층의 잔존유는 상당부분

방제되었으나, 일부 도서 및 해안가의 접근 용이하지 않은 지역에 표층 및 표면하에 유류가 다양한 형태로 잔존하고 있으며, 특히 갯벌 등의 일부 습지 지역에서는 표면하에 액상의 형태로 유류가 잔존하고 있음. 사고유가 표착한 해안에 대한 해안 유징분포 정밀 평가

- ▶ 복원의 시작 및 촉진. 유징 분포가 확인된 해안 지역에 대하여 잔존유의 형태에 따라 물리적 또는 생물학적 정화복원
- ▶ 회복의 모니터링. 유징의 육안식별 및 화학분석을 통하여 사고이전 수준으로 오염의 회복여부를 모니터링

나. 조간대 저서생태계

□ 환경영향 및 회복

유출유의 영향은 해안으로 유입되면서 침적되는 과정을 통해 생태계에 영향을 받음. 조석의 차에 의해 밀물에 따라 유출수가 표층을 통해 가입하면서, 최상부 및 상부 조간대에 표착되어 심각한 피해를 나타냄. 한편 유류 방제시 퇴적물 제거 및 암반 청소과정에서 이탈로 인하여 상당수 생물 서식량이 감소함. 하부 조간대와 중부 조간대는 생태계 구성원의 가입으로 인하여, 회복되는 경향이 보이고 있으나, 전반적으로는 연중 특정 시기에 생물 가입이 진행되는 우리나라 환경에 의해 회복이 느리게 진행됨. 특히, 생태계 구성원별로 유출유의 민감도에 따라 대상 생물의 회복이 상이하게 나타나면서 생태계 구조의 변동이 진행됨.

□ 복원목표

각 해역의 생태계 구조를 파악하여 사고 이전의 군집구성 및 개체군 구조로 회복시키는 것을 목표로 함

□ 복원전략

- ▶ 자료 분석 및 모니터링 결과에 따라 대상 해역별로 공간적인 생태계 구조 파악
- ▶ 구멍갈파래 등 생태계 구조에 영향을 주는 이상 번식 생물 제어
- ▶ 자연회복 우선의 해역별 관리 구역 선정을 통한 모니터링
- ▶ 암반, 사질 해역의 생물 가입 유도를 위한 공간 확보를 통한 투석, 침식 방지 시설

다. 생물생산성

□ 환경영향 및 회복

유류 유출해역의 대부분이 마을어장 등 생물생산성이 매우 높은 해역이거나 양식 활동 해역으로 굴, 바지락 등 이동이 어려운 대상생물이 대량 폐사가 발생하였음. 패류 잔류 다환방향족탄화수소 성분은 사고 이후 꾸준히 감소하고 있으나, 사고 이전에 비하여 상대적으로 오염되어 있음. 방제이후에도 일부해역에서 자연산 굴 및 채묘하여 양식 중인 굴의 지속적인 폐사가 발생. 해안 자연산 굴의 성장이 대조구에 비해서 느리며, 굴의 생식력 및 생육상태가 불량함. 굴의 가입 및 자원회복에 시간 소요 예상.

□ 복원목표

사고해역의 생산생물인 굴, 바지락, 미역, 전복 등 유용생물의 개체군 동태, 생육 상태, 생식력, 생리.생화학적 건강성이 사고이전 또는 영향을 받지 않음 대조구 수준으로 회복되도록 함

□ 복원전략

▶ 조건대 자연산 굴 및 바지락의 가입 제한 및 생육상태 저해 요인 조사. 양식 및 자연산 굴의 자연가입률을 평가하고, 자연 착생 후 성장 및 생식 저해, 생육상태의 불량에 대한 규명. 굴 개체군 변동에 따른 주변 조건대 생태계 구조 및 기능 변화 분석.

▶ 복원의 시작 및 촉진. 조건대 생물의 회복지연 이유가 규명되면, 잔존유의 영향 등의 원인을 제거하고, 인공적인 이식 수행

▶ 모패 서식장 조성을 통한 개체군 가입이 원활히 진행될 수 있는 공간 확보. 특히 굴의 경우 천해용 어초 등을 시설하여 인공 기질 시설을 통해 건강한 모패와 해조류가 주변에서 서식하는 공간 확보.

▶ 바지락 등 갯벌 생물은 주변 모니터링을 통한 health management map 작성을 통한 공급 체계 확보

라. 주요 서식동물

□ 환경영향 및 회복

대상 해역에 우점하는 생물들이 유출유에 의한 대량 폐사가 발생하였는데, 특히, 쪽이 집단 서식하고 있는 의항리(신노루)해변에서 유출유 유입에 따른 집단 대량폐사가 발생. 쪽은 펄 개펄에서 구멍 (약 50 cm 깊이 이상)을 깊게 파 서식하고 있어, 사고 이후 인위적인 방제는 이루어지지 않고, 자연적인

방제에 의존하고 있어, 피해가 지속적으로 나타나고 있음. 유류 오염 이후 미성체의 가입이 매우 불안하고, 쪽이 서식하는 주변 환경 변화(굴 양식장 철거)에 따른 퇴적 환경의 변화가 예상되어, 사고 이전 상태로의 회복하는데 많은 어려움이 예상, 한편 주변 생태계 먹이 사슬의 연결 단계가 되는 옆새우류, 갯지렁이의 개체군 교란 정도 평가 및 회복

□ 복원목표

의항리(신노루) 해변에 서식하는 쪽과 사구해역의 옆새우류, 갯지렁이류의 개체 및 개체군 특성이 사고이전의 상태로 회복되도록 함

□ 복원전략

- ▶ 잔존 유류 제거. 펄 조건대에 잔존하는 유류를 생물학적정화에 의해 제거 시스템 도입
- ▶ 대상 생물 이식을 통한 개체군 정보 확보
- ▶ 원활한 유생가입을 위한 기질 개발 및 보완
- ▶ 퇴적물 유실방지 시설 설치, 수로 확보를 통한 우점종 가입량 확보

마. 서식처

□ 환경영향 및 회복

유출유는 해역별로 구성된 다양한 연안 서식처에 심각한 영향을 초래함. 갯벌이나 암반의 경우도 지형과 구성원에 따라 여러 가지 형태로 구분되며, 여기에 해조장, 잘피 등 우점생물 서식에 의한 서식처 등이 2차적인 생태계 구조에 변동을 초래함. 집중 방제활동 이후에도 부분적으로 잔존하는 유류에 의해 간접적으로 지속되는 영향과 폐사 또는 교란에 의해 공간적인 규모가 축소되거나 재생되지 않은 서식처를 복원에 회복시키는 활동 전개

□ 복원목표

대상해역에서 대표적인 서식처를 생태계 구조 등을 고려하여 규정하고, 서식처 규모 및 구성원을 파악하여 유사한 규모의 공간으로 회복될 수 있는 시스템 수행

□ 복원전략

- ▶ 다양한 생물 가입을 유도하기 위한 공간 확보 (암반 투석, 사질해역 수로 확보)

- ▶ 잘피, 해조류 이식 및 경쟁 생물 제거를 통한 서식환경 조성
- ▶ 관리구역 선정에 따른 시공간적 변동영향 파악

바. 어류

□ 환경영향 및 회복

사고 이후에 사고유가 대량으로 표착하였던 해역에서 조간대 천해 어류의 종수 및 서식밀도 감소가 확인되었음. 유어의 가입여부 및 사고이전 수준으로의 회복여부는 지속적인 조사가 필요함. 조간대 천해 어류의 종수 및 서식밀도의 감소가 조간대 지역의 유류오염의 직접적인 영향인지 아니면 조간대 저서생태계 파괴에 따른 먹이생물 밀도 감소 및 생태계 안전성의 변동에 따른 간접적인 영향인지 규명할 필요성이 있음.

□ 복원목표

조간대 천해 어류의 종수, 서식 밀도, 유어의 가입 정도가 사고이전의 수준으로 회복되도록 하는 것임.

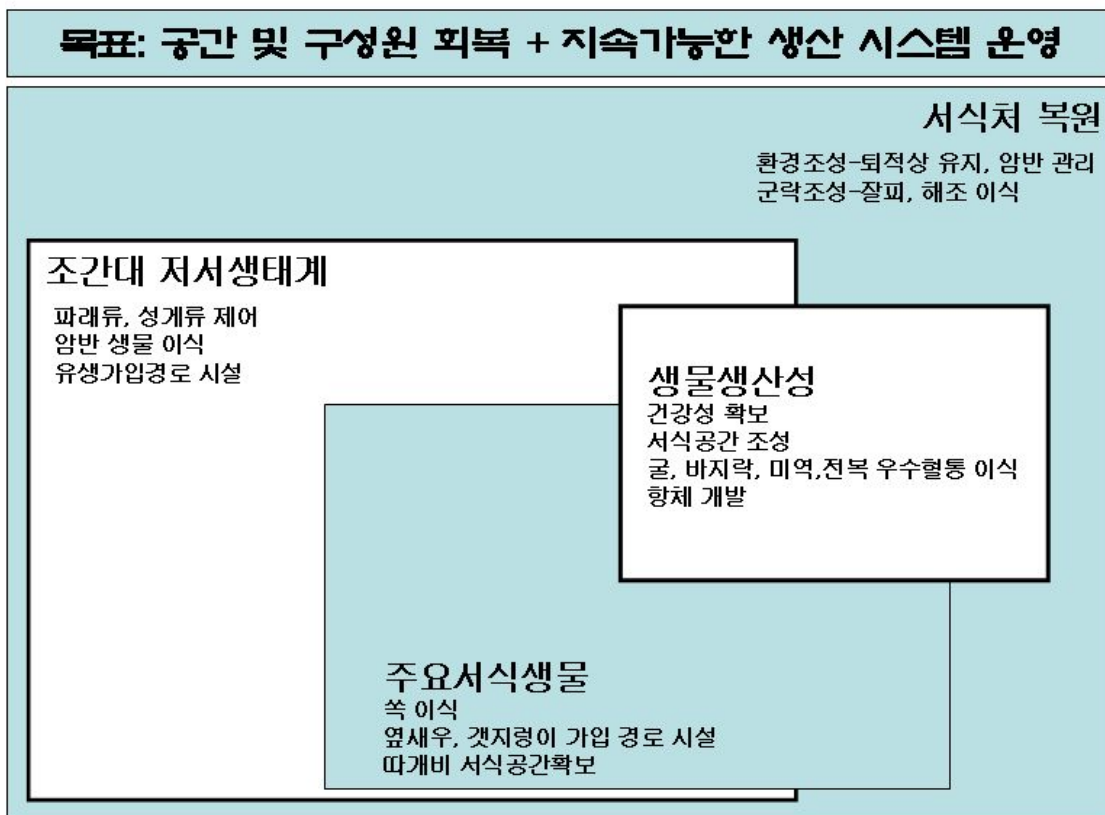
□ 복원전략

- ▶ 조간대 천해 어류는 연안생태계에서 조간대와 조하대 및 표영생태계와 저서생태계의 연결고리 역할을 하는 주요한 생태계지위를 점하고 있으며, 해안 어류 산란장 및 서식지의 적합성 여부를 지시해주는 지표가 됨.
- ▶ 복원의 시작 및 촉진. 조간대 천해 어류의 어종 및 서식밀도 감소 원인이 규명되면 원인을 제거하고 자원을 회복시키기 위한 노력을 경주함. 일차적으로 대표적 어종을 선정하여 표지 방류를 수행함.
- ▶ 조간대 천해 어류의 종수, 서식밀도, 유어 가입 수준이 사고 이전과 유사하게 회복되는지 여부를 모니터링 함.

3. 환경복원 단계별 추진 내용 및 전략

가. 환경복원 분야별 구성도

- 환경복원에서 가장 포괄적인 개념은 서식처 복원으로 환경조성과 생태계 구성에 따른 우점생물에 의한 환경을 조성하는 과정이 필요함. 일반적으로 환경조성은 지형적, 또는 물리적 영향에 의해 생성되는 특성을 파악하여 복원하려는 시도이며, 생물 우점에 의한 군락 조성을 생물이식을 통해 훼손된 주요생물을 서식하도록 시도하는 방안임.
- 이러한 환경을 바탕으로 생태계가 구성되었을때, 인위적구분에 의해 산업종과 우점종을 나눌 수 있으며, 이때 관점에 따라 상호 중복되거나 유사한 전략이 필요하기도 함. 따라서 산업종 생산성 복원 분야와 지역 고유종 또는 우점종의 서식복원을 통해 기존 생태계 특성을 유지하는 노력이 필요함

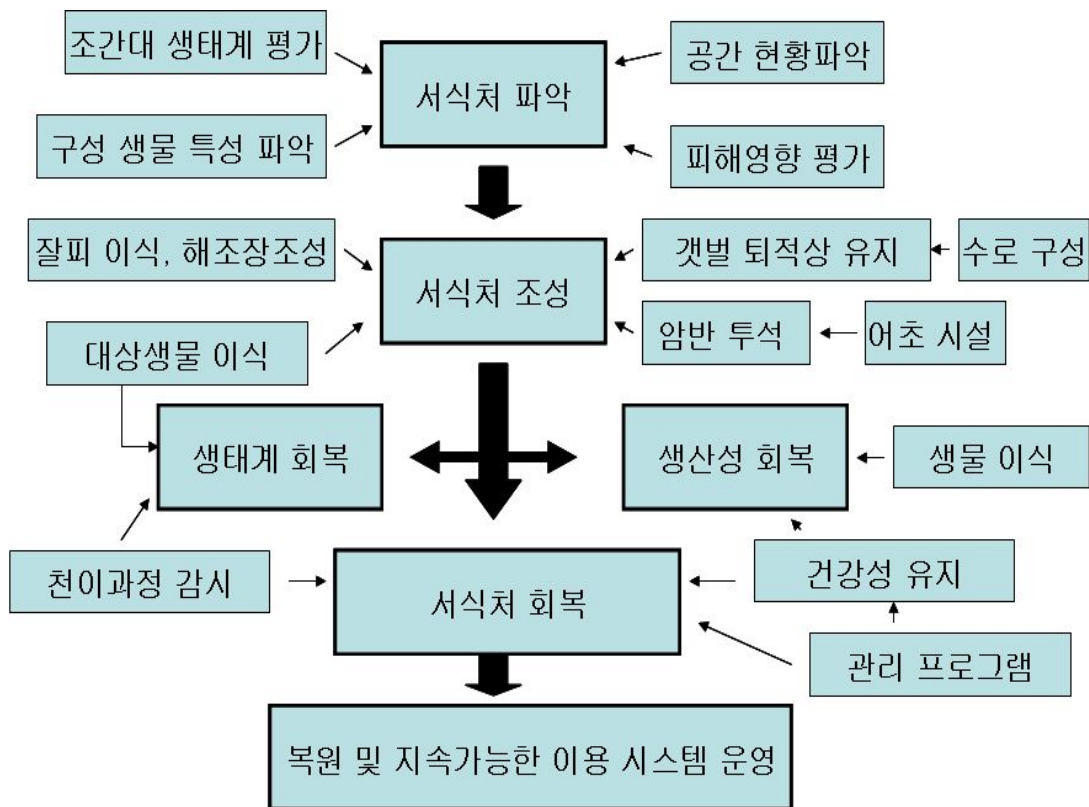


나. 환경복원 단계별 추진 내용

대 상	1단계 (2009년-2011년)	2단계 (2012년-2014년)	3단계 (2015년-2017년)
조간대 저서생태계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해역별 생태계 구조 파악 ○ 모니터링 해석을 통한 규모 선정 ○ 이상 번식 생물 제어 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 투석을 통한 암반 기질 공간 확보 ○ 준설 및 시설물 투입에 따른 갯벌 수로 확보 ○ 관리 구역 선정에 따른 생태계 모니터링 ○ 이상 번식 생물 제어 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 생물 가입 경로 확보를 통한 생태계 구성 생물 군집 모니터링 ○ 기회종 제어 및 관리 공간 확대
생물 생산성	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대상 생물 분포 및 생산량 산정 ○ 건강성 확보 및 항체 개발 ○ 퇴적상 안정 시설 및 어초 투입 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 굴, 전복 모패 성장 공간 시설 ○ 바지락 이식을 통한 우수 혈통 서식 공간 조성 ○ 미역 포자 공급 시설 ○ 철거된 생산 공간 회복 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공간 확대를 통한 생산성 유지 ○ 생물 생산 프로그램 개발 ○ 회복된 우수 혈통 생산 홍보 프로그램 개발
주요 서식생물	<ul style="list-style-type: none"> ○ 우점종 분포 및 서식 공간 연계성 파악 ○ 개체군 특성 파악 ○ 주변 서식 밀도 정보 파악 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해역별 생물 이식 ○ 원활한 생물 가입경로 시설 ○ 서식처 조성과의 연계한 서식동향 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 서식량 회복 ○ 적정 가입량 조정 ○ 서식분포 지도 작성
서식처	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공간적인 주요 서식처 규모 파악 ○ 장기 모니터링 결과 분석에 따른 유사 환경 시설 방안 정립 ○ 예비 이식 실험을 통한 공간 규모 선정 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 잘피 이식 및 해조장 공간 시설 ○ 방제이후 퇴적상 변동 모니터링에 따른 조위 회복 시설 ○ 서식처별 구역 관리 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 서식처 공간 확대 ○ 관리 프로그램 운영

다. 환경복원 추진전략

- 우선 대상해역의 서식처 특성을 파악하는 것이 중요하며, 이때 공간구성, 지형, 구성 생물상, 생물 간의 지위 등에 대한 정보를 확보함. 다음으로 서식처 회복을 위한 로드맵작성으로 통하여 어떻게 조성할 것인지에 대한 조성 프로그램을 수행하여, 우점생물 이식, 공간 조성을 통해 안정된 천이 과정을 유도하기 위한 방안을 모색함. 마지막으로 회복단계에서 이전 생태계와의 비교를 통해 요인별 추가 또는 배제 등 조정이 필요함.



제 5 장 유류오염 평가 및 환경복원 기술개발

제 1 절. 추진배경

1. 정부 R&D 투자 현황

최근 3년간('04년~'06년) 해양오염관련 정부 R&D투자는 국토해양부, 교과부 등 8개 부처가 R&D를 개별 추진하고 있으나 큰 증감이 없으며 투자규모도 미미함. 특히 유류오염 평가 및 복원기술 분야의 경우 다른 분야에 비해서 투자가 극히 미진함.

□ (연도별) '04~'06년 관련 정부 R&D 총 투자액은 530억원

- 동기간 해양오염 관련 투자 연구비는 530억이며, 이중 유류오염 투자 연구비는 135억원으로 해양오염관련 전체 연구비의 25% 수준

년도	2004	2005	2006	합계	비율
해양오염 관련 R&D투자액(억원)	174	183	173	530	100
유류오염 관련 R&D투자액(억원)	39	27	69	135	25.4%

*출처: 해양유류오염 대응 범부처 R&D 추진 전략(안), 2008

□ (부처별) 교과부(62억원, 46%), 국토해양부(50억원, 37%)가 투자 연구비의 대부분(83%)을 차지

부처	국토 해양부	교과부	환경부	산자부	소 방 방재청	해 양 경찰청	중기청	합계
투자액 (억원)	50	63	8	2	7	4	1	135
비 율 (%)	37	46	6	1	5	3	1	100

*출처: 해양유류오염 대응 범부처 R&D 추진 전략(안), 2008

□ (기술분야별) 오염방제(54억원), 사전예방(21억원), 확산예측(10억원) 등 8개 기술 분야 연구 지원

- 동기간 유류오염관련 기술분야 투자현황은 방제기술, 사전예방, 확산예측기술 순으로 해양오염관련 전체와 비슷

기술분야	오염방제	사전예방	확산예측	생태계복원 등	모니터링	피해복구	환경복원평가	기타
유류오염 (억원)	54	21	10	1	4	8	2	35
해양오염 (억원)	148	61	53	34	24	10	9	191

*출처: 해양유류오염 대응 범부처 R&D 추진 전략(안), 2008

□ '08년도의 경우 확산예측(38억),오염방제(23억), 사전예방(16억) 등 6개 기술분야 연구 지원. 생태계복원, 모니터링 등의 분야에는 지원 실적이 극히 저조함.

기술분야	오염방제	사전예방	확산예측	생태계복원	모니터링	피해복구	환경복원평가	기타	합계
유류오염 (억원)	23	16	38	-	-	12	1	22	112
비율 (%)	20	14	34	-	-	11	1	20	100

*출처: 해양유류오염 대응 범부처 R&D 추진 전략(안), 2008

2. 국내의 유류오염 평가, 복원관련 R&D 기술 동향

□ 조사 및 평가 분야

- 기름오염 식별을 위한 유지문 분석기술(oil fingerprinting)이 개발되어 왔으며, 최근에는 특수한 지표나 안정동위원소 분석기법을 활용
 - 사고유의 확인, 해역별 background 농도 확인, 오염원 추적 등에 사용
- 기름오염 현황을 조사하기 위하여 생물체내와 퇴적물의 다환방향족탄화수소(PAHs) 분석기술 개발
 - 기름에 오염된 어류의 쓸개즙을 분석하여 기름에 의한 치사인지를 파악하거나, 오염물질에 의한 효소의 증가나 스트레스 수준 등을 조사하는 바이오마커(biomarker) 기술 적용
 - 기름오염 현장에서 수중에 용해된 기름성분을 연속적으로 형광측정하는 장비가 사용됨
- 기름오염사고후 직접피해 입증 및 장기적인 환경영향을 조사하기 위하여 다양한 생태계 조사기법이 활용됨

- 기름 성분이나 종류에 따라 서식생물에게 미치는 독성이 다르므로 영향을 파악하기 위하여 독성실험을 통해 생물독성 데이터베이스 구축
- 기름오염지역에 대한 10년 이상의 장기 모니터링 사업 시행중. 인위적인 방제 정화활동에 의한 영향, 기름의 풍화 및 잔류독성 조사, 생태계에 미치는 장기적인 영향 등을 모니터링
- 기름오염사고 지역에 대해 자연자원 피해를 추정하는 기법(Natural Resources Damage Assessment, NRDA) 활용

□ 환경복원 분야

- 오염된 해안의 복구를 위해 현장조사, 정화계획수립, 평가 등의 과정을 표준화한 해안평가지침(Shoreline Assessment)이 개발되어 보급
 - 오염된 해안 및 오염 퇴적물의 정화작업 이전에 과학적인 평가와 정화방법별로 비용효과분석을 통해 정화계획을 수립 시행.
 - 오염해안의 정화작업에 사용되는 방법은 해변세척제, 흡착제, 도랑파기, 퇴적물 제거, 해수 넘쳐 흘리기, 냉수 저압세척, 냉수 고압세척, 온수 고압세척, 고온 고압세척, 모래 현탁액 분사, 진공 흡입, 식생 제거, 현장 소각, 퇴적물 재배열, 퇴적물 세척 및 교체, 영양염 첨가, 미생물 살포 등 다양하며 현장여건과 환경에 따라 방제책임자가 선택하여 사용
- 갯벌이나 습지와 같이 유류오염에 매우 취약한 해안에서는 오염사고 후 자연적인 복구에 의존할 수 밖에 없음. 모래해안이나 암석해안 등에서 고온 고압 세척 등 인위적인 정화복구작업이 오히려 피해를 가중시키거나 자연적인 회복을 지연시킬 수 있음이 밝혀짐
- 분리배양된 유류분해 미생물을 살포하는 방법이 오랫동안 연구되어 왔으나, 질소와 인과 같은 영양물질을 동시에 살포해야만 효과가 있음.
 - 오염된 해안에서는 자연적으로 유류분해 미생물이 증가하게 되므로 현장 실험결과 영양염류만 살포한 경우와 미생물+영양염류를 함께 살포한 경우와 비교할 때 통계적인 차이를 보이지 않는 경우가 많았음
- 생물정화(bioremediation) 작용을 촉진하기 위하여 기름에 달라붙는 특수한 영양물질제제(oleophilic fertilizer)도 개발됨.
 - 생물정화촉진제로는 BET Biopetro, BioGee HC, INIPOL EAP 22, Land and Sea 001, Micro-Blaze, Oil Spill Eater, S-200, PRP, Pristine Sea II 등 다양한 영양염 제제가 판매 중.
- 미국 등 선진국에서는 오염된 해안뿐만 아니라 오염된 토양을 정화하기 위하여 막대한 예산을 투입하여 혁신 기술을 개발

- 미국의 경우 1980년에 CERCLA가 제정된 이후 Superfund의 규모가 연간 22억불(2조 6천4백억원)에 달함.
- Superfund 혁신기술평가(SITE) 프로그램에 의해 입증되고 상용화된 기술이 70여개 이상이며, 대부분 물리/화학적 처리, 생물학적 처리, 열적처리, 안정화/고형화, SVE, 열탈착, 생물학적 복원, 소각기술 등
- 고점도유나 난분해성 유기독성물질 처리를 위해 Dehydro-Tech, Terra-Kleen, RCC, CF Systems 등에서 추출식 토양정화장치도 개발

□ 기술수준 비교

분야	선진국수준	기술 대비	국내수준
오염, 평가 분야	- 오염해안복구를 위한 현장조사, 정화계획 수립, 평가 등의 과정을 표준화한 해안평가(Shoreline Cleanup Assessment)방법 및 지침이 개발되어 활용 중	20%	- 해경 및 해양환경관리공단에서 일부 수행 중이나 표준화된 방법과 지침이 없음 - 해안평가를 위한 해안의 각 종 자료에 대한 D/B가 확보되지 못하고 있으며, 일부 자료도 해안평가 목적으로 작성되지 않아 실효성이 떨어짐 - 평가를 수행할 전문 인력이 없음
	- 유류오염 원인자 식별 및 피해 유무 입증에 위한 유지문 분석기술(oil finger printing)이 개발되어 왔으며, 최근에는 특수한 분자지표나 개별화합물 안정동위원소 분석기법, 다차원분석기술이 개발되어 적용	60%	- 기본적인 유지문 분석기술을 확보하고 있어 오염사고 시 기름 식별 실무에 활용 중 - 다양한 정제유 및 풍화유에 대한 유지문 분석 기술은 확보되어 있지 못함 - 유류 중 미분리 성분 및 새로운 분자지표를 개발할 수 있는 기술수준이 부족함
	- 유류오염이 생물 및 생태계에 미치는 독성학적인 영향을 종합적으로 평가할 수 있는 환경위해성평가기술을 개발하여 방제 우선순위 결정, 각 종 환경기준 설정, 만성적/장기적 생물 영향의 입증 등 사고 현장에 적용 중	30%	- 다양한 원유 및 HNS에 대한 국내 서식종 및 유용수산생물에 대한 독성 자료가 미비함 - 독성물질의 안전성을 평가할 수 있는 각 종 환경기준이 마련되어 있지 못함 - 만성적, 장기적, 생활사에 따른 독성영향 및 종합적인 위해성을 평가할 자료와 기술확보가 안되어 있음
	- 유류 오염사고 후 방제, 피해 입증 및 장기적인 환경영향을 조사하기 위하여 다양한 모니터링 기법이 활용됨	50%	- 오염평가를 위한 기본 모니터링 기술은 확보하고 있음. - 유류사고 발생 시, 동일 유종을 이용한 환경내 거동을 모사할 시험수조 미확보 - 극미량으로 잔류하는 유류, 해저 침강 유류, 지반 침하 유류 등의 모니터링 기술 미확보 - 현장에서 연속측정을 하거나 사고 시 조기경보 등을 수행하기 위한 기술 미확보
	- 유류 오염사고 지역에 대해 자연자원 피해를 평가하는 기법(Natural Resources Damage Assessment, NRDA)의 개발하고 적용함	10%	- 생태계의 모니터링 기술을 확보하고 있으나, 국내 실정과 여건에 맞는 NRDA 기법은 마련되어 있지 못함 - 장기적인 환경피해와 생태계 피해에 대한 정량화할 수 있는 기법 미확보
환경 복원 분야	- 유류오염 생물정화(bioremediation) 기술의 개발하고 상용화하여 해안에서 적용함	70%	- 유류분해 미생물의 분리 및 배양기술은 확보하고 있으며, 미생물제제도 개발, 상용화함 - 해안에서 생물정화를 평가할 수 있는 현장 실증기술과 지침이 표준화되어 있지 못함

			<ul style="list-style-type: none"> - 생물정화 작용 촉진을 위한 기름 유착 특수 영양물질제(oleophilic fertilizer)의 개발은 일부 확보 - 생물기원의 바이오유화제 등의 정화제제 개발 기술 확보
	<ul style="list-style-type: none"> - 미국 등 선진국에서는 오염된 해안뿐만 아니라 오염된 토양을 정화하기 위한 물리적 정화 기술을 개발 	30%	<ul style="list-style-type: none"> - 카복시 섬유 등 새로운 흡착제 개발 기술 확보 - 토양의 물리적 정화기술은 확보 중 - 유류 해안의 경우 단순한 물리적 정화기술 활용 중. 이를 극복할 혁신적인 요소기술의 개발이 필요함 - 토양에서 활용 중인 기술의 적용 및 신기술의 개발은 제한 적임

□ 선진국의 주요 프로그램 및 국내 확보 방안

구분	주요 선진국의 관련 프로그램	기술 확보/연계 방안
미국	<ul style="list-style-type: none"> - 1970년대 후반부터 유류오염 대응분야를 전문적으로 연구하고 있으며, 엑슨발데즈호 사고 이후 해양 유류오염 연구개발을 종합적으로 지원하는 유류사고 대응 연구 프로그램(Oil Spill Response Research Program, OSRR) 및 오염피해 평가 및 복원(Damage Assessment Remediation and Restoration Program)을 수립·운영 - 해양대기청(NOAA)에서는 이 프로그램을 주도하면서 기존의 연구개발을 확대 보장하였으며, 대비 대응 분야로서 유출유 확산예측 모델인 GNORM, 피해 위험도 분석 모델인 TAP, 유출유 성장변화 모델인 ADIOS, 방제정보지도인 ESI Map, 대기확산모델인 ALOHA, 방제장비 소요량 산정 모델인 Spill Tool 등을 개발하여 운영 중임. - 또한 NOAA는 해양오염 대응 및 복원 장기 모니터링 프로그램(NOAA's Office of Response and Restoration: Long-Term Monitoring Program)을 운영 - 연방정부에서는 National Spill Control School을 설치하여 운영 중이며, 현장 실무자를 대상으로 업무수행의 필수 요구조건으로 과정 이수를 요구함으로써 법적 제도적 교육체제를 구축하고 있음. - 또한 평상시 SST를 운영하고 있으며, 사고 발생시 SST 지역 전문가를 중심으로 SSC를 설치 운영하고 있음. - 주 단위에서 다수의 대학이 해양 유류오염 관련 연구센터를 설치·운영 	<ul style="list-style-type: none"> - 유류오염의 방제의 과학지원, 평가 및 복원 연구 분야를 주도하며, 유류오염의 생물독성, 환경위해성 및 생태계복원에서 가장 선도적인 연구를 수행함 - 유류오염 사고 대응에 관한 과학지원이 가장 체계적으로 이루어지고 있어, 주요 벤치마킹의 대상임. - 유류오염 대응 및 복원의 연구는 NOAA에서 주도적으로 하고 있으며, 현장 대응은 USCG과 MSRC에서 주도적으로 수행하고 있음. 사고 발생시 NOAA는 과학기술지원관으로서 현장 대응에 참여함 - NOAA에서 개발 운영하고 있는 방제 지원 시스템은 국내 해양오염 방제지원시스템의 기본 모델로 활용되었으며, 최근 NOAA의 기술개발 확대에 따라 국내 시스템의 확대 강화를 위한 기술협력 확대가 필요함. - 그 외 민간회사로서 방제장비 및 기술 개발을 지원하는 OHMSETT이 있으며, 다수의 방제기술 연구기관이 있음. 특히 OHMSETT에서는 각종 해양오염방제 기술 테스트를 위한 대형 야외 해양오염방제 수조를 운영하고 있음. - OHMSETT의 오염방제수조는 한국해양연구원에서 운영하고 있는 해양오염방제수조의 원조 모델이며, 향후 추가적인 투자확대를 통하여 한국해양연구원의 해양오염방제수조를 확대 강화하기 위한 표준 모델임. - 국토해양부-NOAA는 2003년부터 한미해양과학기술 협력사업을 통해 유류오염방제기술을 상호 교류하고 있으며, Hebei Spirit호 유출사고를 계기로 2009년부터 평가 복원 분야까지 협력사업을 확대할 예정임.

구분	주요 선진국의 관련 프로그램	기술 확보/연계 방안
유럽	<ul style="list-style-type: none"> - 유럽 국가들은 Oceanides, Themes, Cleopatra, Dismar, AR COP, MERSEA 등의 데이터베이스를 각각 운영하고 있으며, 유럽연합의 Community Research & Development Information Service (CORDIS) 홈페이지를 통해 관련 정보 공유 - 유럽 해양 유류오염 위성모니터링 전문가 그룹(European Group of Experts on Satellite Monitoring of sea-based Oil Pollution, EGEMP) 존재 - 국가별 연구센터 또는 프로그램 설치·운영: 프랑스 IFP(Institut Francais du Petrole), 노르웨이 SINTEF(Foundation for Scientific and Industrial Research: Oil spill, contingency and response), 스페인 Spanish Scientific Intervention Program Against Accidental Marine Spills 등 	<ul style="list-style-type: none"> - 영국의 OSRL, 프랑스의 CEDRE, 노르웨이의NOSCA 등이 유류 오염의 방제와 관련된 기술 지원, 방제자 교육 및 관련 자료의 생산에서 선도적인 역할을 수행함 - CEDRE의 경우 현장 중심의 방제 교육훈련과 유류오염 관련 자료의 생산 및 관리에서 벤치마킹이 필요하며, 유류의 거동을 평가하기 위한 소규모의 실험수조 2종을 운영 중임 - 노르웨이 NOSCA는 국가적으로 추진하고 있는 해양오염방제 협력기구로서, NOFO, FRAMO, MIROS, SINTEF 등의 방제기술 연구기관 및 현장 대응업체 등을 포함하고 있음. NOSCA 협력체 구성원과의 기술협력을 통한 벤치마크 필요. - 유럽의 경우 레이더를 이용한 현장 유출유 확산모니터링 기술을 선도적으로 개발하고 있으므로 이 분야의 기술협력이 필요함.
캐나다	<ul style="list-style-type: none"> - 캐나다는 Enviornment Canada를 중심으로 유류오염 관련 연구프로그램을 운영 중에 있으며, Environment Science Technology Department(ESTD)와 Insitutute of Ocean Science(IOS)에서 관련 연구를 주도하고 있음. 	<ul style="list-style-type: none"> - 미국과 함께 해안평가(shoreline assessment) 분야에서 가장 많은 연구자료와 노하우를 확보하고 있음. - 유류의 특성, 거동에 관한 방대한 D/B를 구축하고 있으며, 유지문 분석기술 분야에서 가장 선도적인 연구를 수행하고 있어 이 분야에 대한 연구 협력이 필요함
국제기구 및 단체	<ul style="list-style-type: none"> - 국제해사기구(IMO), 국제유류오염보상기금(IOPC) 국제 유조선 선주 오염협회(ITOPF), 국제석유산업환경보전협회(IPIECA) 등은 연구개발을 포함한 유류오염 관련 국제협약, 표준화된 국제 지침 마련, 유류오염 보상기금 지원, 개도국 대비/대응 강화 지원 및 국제적인 여론 형성 등의 역할을 수행 	<ul style="list-style-type: none"> - ITOPF와 IPIECA는 유류오염 대응 분야의 표준이 되는 주요 기술들을 개발하고 있으므로, 기술협력을 통한 기술도입 및 국내 기술의 국제 표준화 노력이 필요함. - 국제협약에 대한 국내 대응 방안을 마련하기 위하여 국제기구 및 협회관련 정보를 정기적으로 모니터링 할 필요성 있으며, 관련 회의에 전문가들의 적극적인 참여가 요구됨.

3. 중점 추진과제 도출 배경

□ 기획수요 조사 요구 반영

- 유류오염 사고를 대처하기 위해서는 1) 예방, 2) 대비, 3) 대응, 4) 평가 및 복원 등의 전반적인 연구개발이 필요하나, 본 기획연구의 범위는 해양환경 복원프로그램의 개발을 위한 기획으로 수요조사에 요구된 바와 같이 연구개발 분야를 유류사고 이후의 평가 및 복원 분야로 국한 함

□ 현장에서 수요가 파악된 평가분야 연구개발 내용 반영

- 기획연구 수요조사에는 친환경적인 복원기술 개발로 연구개발 기획 부분의 내용이 국한되었으나, 친환경적이면서 효율적인 환경복원이 이루어지기 위해서는 현장오염의 정밀한 진단이 선결요건인 바, 유류오염 및 유류의 독성성분의 생물에 대한 위해성을 평가하는 연구개발 분야를 포함하여 기획

□ 전문가 의견 반영

- 허베이스피리트호 사고 시 현장을 방문했던 UN/EC 조사팀, 캐나다 SCAT 조사팀, 미국 해양대기청 평가 및 환경복원연구팀의 권고사항 중 연구개발과 관련된 부분의 내용을 반영
- 해양환경 복원에서 중요한 요소는 지속적인 현장 모니터링과 연구를 통한 생태계 변화의 측정이며, 인위적인 복원은 선택적이고 신중한 방식으로 고려되어야 한다는 전문가 의견을 반영하여, 기계적인 방제장비 개발 등의 분야는 제외함

□ 중점추진과제 도출

○ 유류오염 평가 연구개발 분야

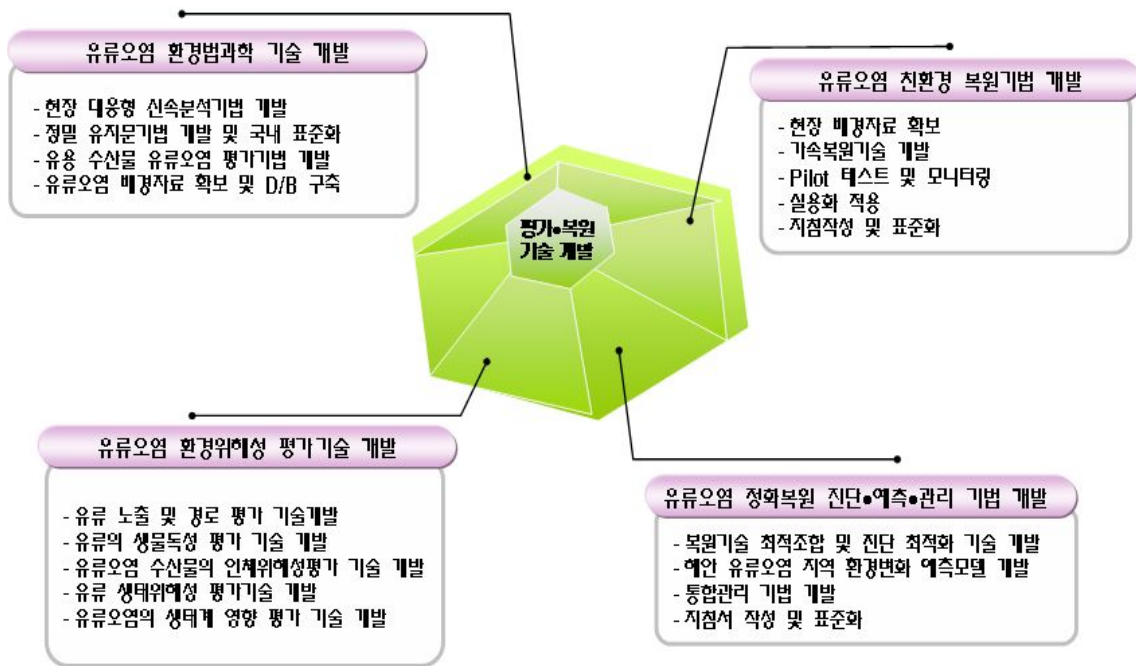
- 유류 유출사고 이후에 해양오염 영향을 파악하기 위해서는 대상이 되는 환경 및 생물체가 유출된 사고유에 노출되었는지, 노출되었다면 사고이전과 비교하여 어떤 상태인지, 영향의 정도는 얼마인지 여부 등을 과학적으로 입증하는 것이 매우 중요함. 특히 허베이스피리트호 사고와 같은 대형 유류 유출사고 이후에 주변해역의 오염 여부, 생물에 대한 독성 영향 여부, 수산물의 영향 여부 등을 입증하기 위한 과학적인 사전 연구의 필요

성이 절실하게 확인되었음.

- 유류사고 또는 평시의 만성적인 유류 유출사고 따른 영향을 평가하기 위해서는 첫째, 사고유에 노출되었는지 여부와 노출 경로를 과학적으로 입증하는 것이 최우선 과제임. 이에선 사전 유류오염의 배경농도 및 분포양상에 대한 조사 자료는 물론 수 백 종의 서로 다른 원유와 정제유을 다양한 매질에서 식별해 낼 수 있는 유류의 환경법과학(Environmental Forensics) 기술이 필요함. 둘째, 유류에 포함되어 있는 수만 종의 화합물질 성분이 다양한 해양생물 및 유용수산자원에 미치는 영향에 대한 과학적인 입증이 요구됨. 이는 다양한 유류성분, 조건, 생물에 대한 사전 독성 영향 및 기작에 대한 연구가 선행되어야 함. 생태계에 대한 영향, 수산물의 인체위해성 평가 등을 포함하여 유류의 환경위해성평가(Environmental Risk Assessment) 기술군으로 포함하였음.

○ 유류오염 환경복원 연구개발 분야

- 해상방제 및 해안의 긴급방제가 완료된 시점부터 지속적으로 제기된 이슈가 훼손된 해양환경의 친환경적 복원 관련 내용임. 그러나 국내 해양환경에서 유류오염 사고에 따른 복원사례가 없어서 복원의 목표, 복원지역의 지정, 복원방법 결정, 비용/편익 분석 등 전반적인 과정에서 합의가 도출되지 못함. 자연회복을 촉진시키는 친환경적인 복원방법의 개발 및 이의 실환경 적용은 대형 유류오염 사고를 다수 경험한 선진국에서도 현재 진행 중인 과제들로 국내에서도 집중적인 연구가 필요한 분야임.
- 생물학적 정화기술(bioremediation)은 유류오염 복원기술 중에서 최근 가장 주목을 받고 있는 방법으로 생물활성증진법(biostimulation)과 생물접종법(bioaugmentation)을 포함하는 기술임. 물리화학적 복원기술은 잔존유의 신속한 방제나 생물학적 정화기법과 연계하여 사용할 수 있는 기술이나, 복원효율과 2차 환경오염 등에 대한 충분한 검증이 필요한 기술임. 토양세척기술과 토양증기추출법이 널리 활용되고 있으며 유류오염 뿐만 아니라 일반 유기독성물질의 정화작업에도 사용될 수 있는 기술임. 검증된 단일 복원기법의 적용 뿐만 아니라 환경친화적인 통합 복원방법의 개발, 현장실증 및 표준화를 포함하고 있음.



[해양유류오염 평가 및 복원기술의 구성]

4. 향후 전망 및 기대효과

- 황해 연안국들의 급격한 산업성장에 따른 물동량 증가로 오염사고는 지속적으로 증가추세이며, 이를 해결하기 위한 연구개발의 국가적인 수요도 증가. 해양 유류 오염 피해에 대한 과학적이고 체계적인 판정 능력 확보를 통하여 사회적 갈등 요인 30% 이상 저감.
- 아시아지역은 상대적으로 유류오염 관련 연구개발이 미진하며, ET분야의 새로운 블루오션으로 국내뿐만 아니라 아시아지역에서 선진국과 경쟁할 수 있는 환경위해성평가, 친환경적 복원기법 등이 부각되고 있음. ITOPF를 비롯한 국제기구에서도 아시아에서 한국이 유류오염 대비, 대응, 진단 및 복원분야에서 선도적인 역할을 수행할 것으로 기대.
- 원유노출 평가를 위한 해양생물 기원 생체지표의 발굴 및 이를 이용한 바이오칩의 개발, 그리고 그 이용 방법과 관련된 사항은 지적재산권의 확보 및 외국으로의 기술이전도 가능할 것으로 기대.

- 유류오염 피해지역의 환경친화적 복원 촉진을 통하여 생태계 조기 회복은 물론 기존에 비해 1/4 수준으로 줄어든 해당지역 주민의 어업소득 회복에도 기여.
- 유류오염 사고에 의한 환경피해 입증 및 구체적인 환경복원 방법 제시를 통한 국제유류오염배상기금(IOPC)의 환경복원 비용청구가 가능하며, 차후 손해배상 비율을 80% 수준까지 제고.
- 현재까지 단기, 급성독성에 따른 피해위주로 어업피해 보상이 진행되어 왔으나, 유류의 환경위해성 평가기술 개발로 장기, 만성독성에 의한 영향 입증이 가능하게 되면 현재의 어업피해 보상율(2002년까지 18% 수준)을 획기적으로 개선할 수 있음.
- 친환경적 복원기술은 유류오염 사고 뿐만 아니라 국내의 육상, 담수, 해양 환경에서 발생하는 다양한 오염사고로 인해 훼손된 환경을 복원하는데 활용가능함. 특히 해양환경 적용을 목표로 개발된 기술의 경우 다양한 변수 및 환경을 고려한 통합적 기술이므로 다양한 분야에서 경쟁력있는 기술로 상품성이 있음.

제 2 절. 유류오염 환경법과학기술 개발

□ 기술개요

- 사고유가 특이적으로 가지는 사고유류의 생성환경, 정유과정, 환경 내 풍화과정 등의 정보를 분석하여 환경 내 다른 유류 오염원과 구별할 수 있는 유지문기법
- 해양내 원인불명의 유류오염 사고 발생시 사고 원인자를 추적, 식별하여 사고에 대한 기여도를 평가하는 기술
- 해양 유류오염 사고 발생시 사고해역 및 주변지역에서의 영향범위, 오염정도, 오염의 지속성 등을 평가하는 기술
- 유류 사고 이후에 오염 평가의 비교 자료가 될 수 있는 총 석유계탄화수소, 다환방향족탄화수소, 알킬화된 다환방향족탄화수소, 유류 바이오마커 등의 배경자료 생산 및 GIS를 활용한 DB 구축기술

□ 국내·외 기술개발 동향분석

- 선진국 연구개발 동향 및 기술수준
 - 미국은 1989년 알래스카에서 발생한 엑슨발데즈호 사고 이후 유류오염 대비, 방제, 보상 및 영향평가 등의 분야에서 주도적인 연구 성과를 축적
 - 특히 정부측과 엑슨모빌사 간에 알래스카만 내 유류의 오염원에 대한 장기간 논쟁으로 유지문기법이 급속히 발전할 수 있는 계기가 됨
 - 정부기관, 대학, 그리고 민간연구소를 중심으로 최근 발전을 거듭하고 있는 분석기기를 활용한 각종 분석기법들이 개발되고 있으며, 정도관리를 통한 표준화를 시도
 - 캐나다에서는 환경청(Environment Canada)을 중심으로 최신 분석기법들이 개발되고 있으며, 상시적인 유류오염 대비태세를 갖추고 있음
 - 전 세계적으로 생산 및 유통되고 있는 유류의 물리·화학적 특성 DB를 구축
 - 세스키터페인, 호페인, 스테란 등 바이오마커 화합물들을 이용한 유지문기법 개발과 현장시료에 대한 적용 등을 활발히 진행
 - 유럽에서는 스칸디나비아 국가들을 중심으로 Nordtest 기법을 표준으로 유지문기법을 사용
 - 최근 CEN(European Committee for standardization) 구축을 위해

- 수정, 보완 작업을 진행
 - 노르웨이의 SINTEF를 중심으로 북유럽의 국가뿐 아니라 유럽 각국과 미국의 주요 실험실 (대표적으로 엑슨모빌의 Battelle Memorial Institute)이 참여
 - 프랑스에서는 아모코 카디즈호 사고 이후 유류오염 사고 대응을 위해 CEDRE(Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollutions)를 창설
 - 최근 유럽에서 발생한 사고인 에리카호 사고와 프레스티지호 사고 때 그동안 축적해 온 분석기법 및 네트워크를 통해 효율적인 대응을 실시
 - 미국의 EPA와 NOAA는 상호보완적으로 전국연안 모니터링을 실시
 - EPA는 EMAP(Environmental Monitoring and Assessment Program)를, NOAA는 NS & T(National Status & Trends Program)를 운영하며 전국 연안에서 각종 오염물질의 오염현황 등에 대한 데이터베이스를 구축
 - 모니터링에는 유류계 PAHs가 주요 항목임
 - 프랑스 국립해양연구원 IFREMER는 전국 연안에서 담치 모니터링 (Mussel Watch) 프로그램을 운영
 - 중금속, 유기독성물질 등 각종 유해물질의 오염현황을 파악하고 있으며, 유류계 PAHs가 주요 분석 항목임
- 국내 연구개발 동향 및 기술수준
- 유지문기법의 활용
 - 한국해양연구원은 2002년부터 ‘유류오염 환경재해 평가기술 개발’ 과제를 통해 유류계 PAHs, 바이오마커 화합물, GCxGC 분석기법 등을 개발하고 있음 (선진국 대비 60~70% 기술 수준)
 - 현업기관인 해양경찰청은 가스크로마토그래피를 이용한 각종 분석기법을 활용하여 유류오염 행위자 및 선박 등을 탐색하고 있으나, 현장에서 사용하고 있는 기술 수준은 스크리닝 단계임
 - 학계 및 다른 연구기관에서는 유류사고시 독성 성분 파악을 위해 미국 환경청에 제시한 16종 다환방향족탄화수소(PAHs) 위주로 분석을 실시. 하지만 유류 내 다량 포함되어 있는 알킬화된 PAHs를 분석하지 않아서 오염의 과소평가 및 유지문 파악을 할 수 없는 수준
 - 유류오염 배경자료 확보

- 한국해양연구원에서 2002년부터 ‘유류오염 환경재해 평가기술 개발’ 과제를 통해 전국 주요 해역에 대한 유류오염 배경자료를 생산하고 있음. 제한적인 예산 범위 내에서 지역별로 자료를 축적하고 있으며, 자료의 갱신 주기 또한 5년 이상임
- 2003년 광양만에서 발생한 정양호 사고시 기준에 확보되어 있던 배경자료를 환경오염 영향평가에 활용한 바 있으며, ITOPF에서는 이를 국제적인 사례로 평가
- 국립수산과학원은 국가해양환경측정망을 이용하여 주변 해역에서 각종 오염물질을 주기적으로 모니터링하고 있으나, 유류의 경우 모니터링 항목에서 제외되어 있음. 특히, 오염우심 해역이 아닌 지역으로 모니터링 자료가 제한되어 있으며, 다환방향족탄화수소 외 비교를 위한 유류성분(총 석유계탄화수소, 알킬화된 다환방향족탄화수소, 유류 바이오마커 등)에 대한 자료가 확보되어 있지 못함

□ 기술개발의 필요성

- 해양내로 유입되는 유류는 다양한 오염원이 존재하기 때문에 사고유류의 산지특성, 환경 내 풍화과정 등에 따라 사고 유류를 판별하고 오염의 기여도를 산정하기 위한 유지문기법 적용이 필수
- 1995년 발생한 시프린스호 사고 이후 국내에서도 다양한 연구가 진행되었으나, 사고발생 5년 이후 대부분의 연구개발이 중단된 상태임. 2002년까지 국내에서 발생한 유류오염 사고의 배상률이 20%에 미치지 못하고 있으며, 이는 상당부분 유류오염 피해를 입증할 수 있는 과학적인 분석체계 미흡에 기인
- 최근 태안에서 발생한 허베이 스피리트호 원유유출 사고시에도 피해입증을 위한 초동대처 및 조업재개, 해수욕장 개장 등 각종 현안에 대한 과학적이고 체계적인 접근이 이루어지지 않아 피해어민 및 현지 주민들의 불신이 고조
- 다양한 연구기관에서 제시하고 있는 각종 오염자료 및 피해입증 자료의 체계적인 분석기준 및 이에 따른 정도관리 기준이 없어서 기관간 조율이 요구
- 사고 후 생업 복귀를 위한 정책결정 즉, 조업재개, 해수욕장 재개장 등을 판단하기 위한 과학적인 근거가 부족
- 사고유의 환경에 대한 직접적인 영향을 파악하기 위한 가장 신뢰성 있

는 접근법은 사고 전 자료와 사고 후 자료를 비교하는 것임

□ 기술개발의 목표

- 초동단계의 사고원인자 식별 및 오염범위, 오염정도 확인을 위한 현장 대응형 신속 분석기법 개발
- 국제 기준에 부합하고, 최신 분석기법 발전 동향을 반영한 정밀 유지문 기법 개발 및 국내 기술 표준화
- 유용수산물의 오염 여부 및 사고유역의 기여도 확인을 위한 생물체 내 축적된 사고유역 판별을 위한 유지문기법 개발
- 국내 주요해역에 대한 유류오염 배경자료 확보 및 GIS기반 데이터베이스 구축

□ 연구내용 및 범위

- 현장 대응형 신속분석기법 개발
 - 현장용 형광분석기를 이용한 사고유역의 오염범위 및 오염정도 확인기법 개발
 - 소형 가스크로마토그래피 및 질량분석기를 이용한 신속 유지문기법 개발 및 표준화
- 정밀 유지문기법 개발 및 국내 표준화
 - 가스크로마토그래피 및 질량분석기의 국제적인 연구동향을 반영한 정밀 유지문기법 개발
 - 해양경찰청, 손해감정기관, 학계 등에 사용하고 있는 각종 분석기법들의 표준화를 통한 공정시험방법 정립
- 유용수산물 유류오염 평가기법 개발
 - 고성능 액체크로마토그래피를 이용한 유용 어류자원에 대한 유류오염 여부 및 사고유역 판별기법 개발
- 국내 주요해역에 대한 유류오염 배경자료 확보
 - 사고 다발해역 및 민감해역에 대한 퇴적물, 해수, 유용 생물 체내 유류계 탄화수소의 배경 농도자료 분석
- 유류오염 배경자료의 GIS기반 데이터베이스 구축
 - 대상해역별, 매질별, 유류 성분별 자료를 대상으로 사용자 중심의 GIS

기반 데이터베이스를 구축하여 유류오염 배경자료의 활용범위 확대

□ 기술개발 소요자원 (예산, 인력, 연구기자재 및 시설)

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
현장 대응형 신속분석기법 개발	-	-	-	5	3	3	3	5	5	5	29
정밀 유지문기법 개발 및 국내 표준화	5	3	3	5	4	4	-	-	-	-	24
유용수산물 유류 오염 평가기법 개발	-	-	-	3	2	2	2	2	-	-	11
유류오염 배경자료 확보 및 DB 구축	4	2	2	5	2	2	-	-	-	-	17
계	9	5	5	18	11	11	5	7	5	5	81

□ 기대효과 및 활용방안

- 신속한 현장대응을 통한 유류오염 피해입증 및 이를 통한 합리적인 손해보상 산정
- 현장방제 및 추가정화 작업을 위한 기본 자료로 활용
- 정밀 유지문기법 개발 및 국내 표준화를 통한 국제적인 신인도 확보 및 국내 유류오염 사고 손해배상률 제고
- 유용수산물 오염 입증을 통한 조업재개 및 수산물 판매를 위한 의사결정 자료로 활용
- 육상 유류오염 사고 시에도 기 개발된 기술들을 오염 토양 및 지하수 정화, 복원을 위한 현장평가(site characterization) 및 사후 평가에 활용
- 사고이전 자료를 이용한 사고유에 의한 피해입증 및 이를 활용한 환경복원 계획 수립, 어업 피해 보상을 제고

제 3 절. 유류의 환경위해성 평가기술 개발

□ 기술개요

- 유류 유출에 따른 생물의 노출 및 영향과의 관계를 규명하여 환경의 위해성을 정성적·정량적으로 평가하는 연구 또는 기술
- 유출유에 생물의 노출 여부 및 노출 경로를 정성적·정량적으로 평가하는 연구 또는 기술
- 유출유가 생물에 미치는 영향을 평가하고 독성의 기전을 규명하는 연구 또는 기술
- 유출유에 오염된 수산물의 인체 노출 및 위해성평가 기법
- 유출유에 따른 해양생태계 피해 영향 범위를 신속히 예측하고, 체계적으로 대응할 수 있는 평가시스템과 생태계 안정화 과정을 진단할 수 있는 평가기술

□ 국내·외 기술개발 동향분석

- 선진국 연구개발 동향 및 기술수준
 - 사고유에 의한 생물 및 생태계 영향의 인과 관계를 밝히기 위해서는 사고유의 노출여부(exposure) 및 노출경로(pathway)를 평가해야 함. 미국은 엑손발테즈호 사고 이후 이를 위한 기술을 지속적으로 개발
 - 유출유의 거동모델 및 위해성평가 모델을 개발하고 접목하여 환경영향을 평가하는데 활용하고 있으며, 문제점을 지속적으로 보완해 가고 있음
 - 유류오염지역에 대한 현장 생태위해성평가를 위해 유류사고를 조사하여 노출양상 및 생태독성영향을 평가하고 예측하는 기법이 개발되어 현장에 적용되고 있음
 - 잔류유류성분의 생태독성영향을 평가하기 위한 현장모사 장기간 노출 실험 방법을 통한 만성독성영향 평가 수행
 - 선진국에서는 유류를 포함한 유해화학물질의 생물에 대한 독성을 다양한 해양생물(어류, 갑각류, 패류 등)에 대한 표준시험법이 마련되어 있으며, 실제 평가를 통해 독성자료의 DB를 구축해 놓고 있음
 - 유류의 종류 및 풍화에 따른 구성성분의 변화가 생물에 미치는 독성영향의 과정 및 기전을 연구하고 있으나, 해양서식 무척추동물에 대한

연구는 상대적으로 미흡. 유류오염과 관련해서는 유류에 포함된 방향족 탄화수소류 중에서 가장 많은 양을 차지하는 alkylated PAH 및 UCM 등에 대한 돌연변이성, 발암성, 세포간신호전달 교란 등 독성기작 연구 진행 중

- 유류성분의 생태위해성평가에 기반한 환경기준 설정은 Mono aromatic hydrocarbon(MAH)과 alkylated PAH를 포함하는 PAH에 대해서 수질 및 퇴적물 환경기준을 설정하기 위한 연구 결과 제시
- 수산물 안전성과 관련해서 발암물질을 중심으로 PAH에 대한 인체위해성평가 및 관리지침과 함께 위해도와 편익에 대한 분석을 통해 소비자 및 지역어민들에게 수산물 섭취지침 제시하고, 유류오염사고 발생 해역에 대한 어장 폐쇄 및 재개장 기준 제시
- 유류오염 발생 직후 생태계 영향을 평가하는데 필요한 생태학적 평가 항목과 분석기술 등의 평가지침서가 체계적으로 구성되어 있음. 수리적 평가 기술을 개발하고, 유류오염에 대한 생태계 영향 정도를 평가하고 있음
- 유류오염 등 인위적인 해양오염에 대한 해양생태계를 평가하는데 생태계 평가지수(AZTI Marine Biotic Index, BI 등)를 자국의 환경에 맞게 개발하여 이용하고 있음

○ 국내 연구개발 동향 및 기술수준

- 일부 시험생물에 대한 유류 독성을 평가할 수 있는 기술은 확보. 하지만 국내 서식 해양생물에 대한 독성평가 자료는 거의 전무하며, 유류의 노출 또는 영향 여부를 평가할 수 있는 생체지표 기술은 간 해독효소 등 기본적인 수준에서 확보되고 있음
- 허베이 스피리트호 사고 직후 사고 해역에 대한 급성독성영향, 사고 발생 후 주기적으로 사고해역의 공극수에 대한 어류 발생독성 및 퇴적물에 대한 단각류 급성독성영향 분석, 현장 채집 어패류에 대한 간 해독효소 모니터링을 수행하는 수준의 기술은 확보
- 정량적인 생태위해성 평가를 위한 원유의 독성 성분자료, 국내서식 다양한 분류군의 해양생물 및 유용 생물자원에 대한 독성 자료가 확보되어 있지 않아 단순 모니터링 수준의 조사를 수행할 수 있는 수준
- 수산물 내 잔류성유기화합물에 대한 모니터링과 함께 유류오염해역의 수산물에 대한 모니터링도 alkylated PAH를 포함해서 모니터링 결과가 보고되고 있으나, 아직까지 수산물 전반에 대한 인체위해성평가 및 관리체계가 구축되어 있지 않음

- 시장 유통금지 기준으로써 적용되고 있는 Codex가 권고하고 있는 잔류허용기준 이외의 국내 수산물 소비패턴을 반영하고, 인체위해성평가에 기반한 농도기준이 제시되어 있지 못함
- 수산물 섭취지침을 통한 인체노출 관리방안에도 수산물 섭취로 인한 위해도와 함께 편익을 동시에 평가하고 관리하는 체계를 구축하지 못하고 있음
- 유류오염 등에 대한 생태계 평가 기법이 표준화되어 있지 않으며, 해사 채취 등의 인위적인 해양오염에 대해 고안된 생태계 평가지침서 등이 활용되고 있음
- MSI 등에 대한 시험 적용은 일부 기관의 연구실 수준에서 수행하고 있는 상황임. 개체군 및 생리학적 정보가 부족하여, 자연환경을 평가하는데 제한 조건이 발생됨
- 1990년대 후반부터 저서생태계를 중심으로 한 생태계 평가지수 (예, Benthic Pollution Index)를 개발하였지만, 아직까지 표준화된 평가방법으로 활용하기 위한 검증이 필요한 실정임

□ 기술개발의 필요성

- 국내 서식생물 및 주요 유용 생물자원에 대한 생태독성영향 기반 환경기준 설정이 필요
 - 유류유출 사고 시 유류 내 독성물질에 대한 국내 기준이 없어 외국의 기준을 차용하여 적용할 수밖에 없는 상황
 - 사고해역의 생물과 인체건강을 보호할 수 있는 유류 포함 독성물질에 대한 각종 국내 환경기준이 마련되어 있지 않아 정책결정 및 갈등조정에 문제가 발생
- 사고이전에 국내 수입 주요 원유에 대한 독성성분 및 독성자료의 확보의 필요성 및 표준화된 시험법의 마련이 요구
 - 허베이 스피리트호 사고 이후 긴급방제가 진행 중인 상황에서도 해양생물에 대한 독성에 대한 의문이 지속적으로 제기되었으나, 이에 대해 정보를 제공하고 과학적인 판단을 내릴 수 있는 근거가 부재
 - 유출유가 풍화된 '타르'에 대한 독성시험이 급하게 일부 진행되었으나, 시험방법 및 결과해석과 관련된 논란이 야기
- 유류에 대한 노출과 생물영향과의 상관성을 밝힐 수 있는 기술과 자료의 축적이 필요

- 유류 유출사고 현장에서 대량으로 폐사하였거나 또는 영향을 받은 다양한 생물종에 대한 유출유 영향 여부는 항상 논란이 되므로, 이에 대한 과학적인 판단을 내릴 수 있는 근거가 필요
- 긴급상황에 효율적으로 대처하기 위해서는 국제적인 표준시험법에 근거 시험생물을 대상으로 한 국내수입 주요 원유에 대한 독성 자료와 국내 서식생물에 대한 독성자료의 지속적인 확보와 관리가 요구
- 유류오염사고발생 후 사고현장의 유출유와 잔류 유류성분의 생태위해성을 종합적으로 평가할 수 있는 생태독성영향 평가방법의 마련이 필요
- 수산물 유해물질에 대한 인체위해성평가지침이 요구
 - 수산물 안전성 평가는 각국의 수산물 소비패턴에 따라서 상이한 결과를 초래할 수 있기 때문에 Codex의 잔류허용 기준과 같은 권고치를 국내에 직접 적용하는 것은 부적절
 - 따라서 국내 수산물 소비량 및 소비패턴에 대한 정량적인 조사와 함께 유류오염사고 발생해역에 대한 수산물 모니터링지침 등을 통한 수산물 유해물질에 대한 인체위해성평가지침이 필요
- 단환방향족탄화수소(MAHs), 다환방향족탄화수소(PAHs), 알킬화된 다환방향족탄화수소(alkylated PAHs) 등 유류오염 기원 여러 종류의 유류성분에 대한 복합 독성영향을 반영할 수 있는 누적위해도평가(Cumulative Risk Assessment; CRA)기법의 개발이 요구
 - 최종적으로 돌연변이성, 최기형성, 발암성 등 다양한 독성기작 중 가장 민감한 독성영향에 기반한 복합독성영향모형 개발이 필요
- 유류오염관련 수산물 안전성 평가 및 관리체계 구축 필요
 - 유류오염사고 발생해역에 대해 유류성분에 대한 수산물 모니터링체계 구축을 통해서 어장 폐쇄 및 재개장에 대한 요건 평가
- 해양오염발생 직후 해양생태계 피해 영향 범위를 신속히 예측하고, 체계적으로 대응할 수 있는 평가 지침서에 따라 신속히 대처하여 경제적 또는 환경적으로 최소화된 개선 방안이 절실
- 해양 생태계를 평가하는데 소요되는 시간적 한계를 극복하기 위해 유류오염 직후 효율적 방제 방안을 제시하고 생태계 회복과정을 평가할 수 있는 기법이 필요
- 관점에 따라 해양오염에 대한 생태계 영향 평가 항목과 기준이 매우 다

양하게 해석할 수 있으므로, 분야별 평가 방식을 시스템화된 기법에 의해
 동시 다발적인 결과를 유도할 수 있는 정량화(수치화)된 생태계 평가기
 술 개발이 필요

□ 기술개발의 목표

- 유류 유출사고에 따른 환경 피해의 과학적인 입증 및 효율적인 복원을
 위해 유류유출로 인한 생물의 개체, 개체군, 군집, 생태계 및 인체 건강에
 미칠 수 있는 영향을 정성적·정량적으로 평가하는 기반기술 개발

□ 연구내용 및 범위

- 유류의 노출 및 경로 평가기술 개발
 - 유출유에 대한 생물의 노출여부를 평가할 수 있는 생리·생화학적 검
 출 기법 개발
 - 유류의 노출경로에 따른 생물축적(bioaccumulation) 메카니즘 및 정화
 과정 연구
 - 퇴적물 내 잔류 유류의 생물이용도(bioavailability) 평가기술 개발
 - 반투과성막재료(Semi-Permeable Membrane Device: SPMD) 모니터링
 기법 개발
 - 다매체(물, 퇴적물, 공극수, 생물 등)에 대한 화학적·생물학적 모니터
 링기법 개발
 - 생물의 현장이식(transplanting) 실험을 통한 유류의 생물축적 및 영향
 평가기법 개발
- 유류의 생물독성 평가기술의 개발
 - 유류의 생체 축적에 따른 독성역학(toxicokinetics) 및 대사 연구
 - 국내 서식종에 대한 생태독성시험방법 개발
 - 해양생물에 대한 수질 및 퇴적물의 독성시험방법 개발
 - 유류성분의 독성 특성을 반영하는 UV에 의한 광독성, 지연독성영향,
 발생독성영향 연구
 - 유류오염사고 지역의 잔존 유류성분에 장기간 저농도 노출에 따른 만
 성독성 연구
- 유류오염 수산물의 인체위해성 평가기술 개발
 - 지역, 소비집단, 독성민감 집단의 수산물 섭취량과 섭취패턴 연구
 - 돌연변이성, 최기형성, 발암성 등 다양한 독성기작 중 가장 민감한 독

성영향에 기반한 복합독성영향모형 개발

- 독성영향에 대한 Toxic Equivalent Factor(TEF) 산출 연구
- 유류오염사고지역에서 VOC, PAH와 같은 유류성분이 포함된 대기, 물, 토양, 수산물의 섭취, 흡입, 피부접촉 등 다경로 통합노출평가기법 개발
- 유류오염사고해역서 수산물 섭취에 대한 인체노출평가기법 개발
- 복합독성영향모형을 이용한 인체위해성평가기법 확립
- 다매체 경로별 상대노출 기여도를 반영한 유류오염사고해역의 수산물 섭취 안전수준(농도기준) 제시

○ 유류의 생태위해성 평가기술 개발

- 국내·외 유류오염 관련 생물독성 자료 수집, 평가 및 DB 구축
- 부착실험 또는 퇴적물 착생실험을 통한 생물학적 복원 정도평가기법 개발
- 국내서식 생물종을 대상으로 기저독성(baseline toxicity) 기반 MAH와 PAH에 대한 복합독성모형 개발
- 국내서식 생물종을 대상으로 alkylated PAH의 어류에 대한 발생독성 기반 복합독성모형 개발
- 유류 중 독성물질에 대한 수서생물 보호 기준 설정
- 해상 및 해안에서 유화제 처리에 따른 생태위해성 평가
- 해안방제를 위한 생물학적 방제기술의 생태위해성 평가

○ 유류오염 생태계영향 평가기술 개발

- 국내 연안 생태정보 GIS-DB 구축을 통한 유류오염 발생 시 해양 생태계 영향 범위 예측 모형 개발
- MSI(Marine Sensitive Indicator)에 대한 생태학적/생리적 정보 연구, DB화를 통한 생태계 변동 현황 파악
- 국내 환경에 적합한 MSI 개발 : 목록화 (Inventory) 및 생물지리도 DB 구축
- MSI의 개체군 생태 및 생리 정보를 통해 유류오염 평가에 적합한 최적 조건 개발
- 연안 환경을 지속적이고 안정적으로 이용할 수 있는 지수 (MBI, MDCI) 선정
- 생물의 생태학적 정보를 이용한 동시 분석시스템 개발

□ 기술개발 소요자원 (예산, 인력, 연구기자재 및 시설)

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
유류 노출 및 경로 평가기술 개발	5	7	7	5	3	3	-	-	-	-	30
유류의 생물독성 평가기술 개발	5	3	3	-	-	-	-	-	-	-	11
유류오염 수산물의 인체위해성 평가기술 개발	-	-	-	4	2	2	3	3	-	-	14
유류의 생태위해성 평가기술 개발	-	-	-	4	3	3	5	3	3	5	26
유류오염 생태계 영향 평가기술 개발	4	2	2	3	2	2	-	-	-	-	15
계	14	12	12	16	10	10	8	6	3	5	96

□ 기대효과 및 활용방안

- 유류 오염사고 시 환경피해에 대한 정밀한 평가 가능
- 유류 오염관련 제반 환경기준 설정을 통해 평가 및 복원 근거 제공
- 개발되는 방제기술의 효율성과 안전성 평가 가능
- 유류오염사고로 인한 통합적인 인체노출 및 인체위해성평가 수행 가능
- 사고후 생태계 영향 범위 예측에 따른 신속한 대응방안 도출 가능
- 효율적 방제 방안 제시 및 방제 효과 평가 가능
- 방제 활동 후 생태계 안정도에 대한 시공간적 정량 평가결과 제시 가능
- 유류 오염으로부터 생태계 및 인체의 건강을 보호할 수 있는 과학적인 근거 제공

제 4 절. 유류오염 환경복원기술 개발

1. 유류오염 친환경 복원기법

□ 기술개요

○ 생물학적 정화기술 (Bioremediation)

- 유류오염 복원기술 중에서 최근에 가장 주목을 받고 있는 방법으로 미생물, 균류 또는 녹색식물 또는 그들의 효소를 이용하여 오염된 자연환경을 오염이전의 상태로 되돌리는 모든 기술을 일컫음.
- 유류로 오염된 지역의 영양소 조건 (C/N비)이나 유산소 조건 등을 최적의 상태로 유지시킴으로써 토착 유류분해 미생물의 증식과 활성을 촉진시키는 생물활성증진법 (Biostimulation)과 이에 더하여 유류분해 박테리아의 접종 및 접종 미생물의 필수 영양소 또는 미생물 성장 촉진제 (growth-enhancing cosubstrates) 등을 첨가 시키는 생물접종법 (Bioaugmentation 또는 seeding)으로 나눌 수 있음.
- **생물활성증진법 (Biostimulation)**은 유류오염 지역에 존재하는 토착 미생물의 활성을 향상시킴으로써 유류분해 속도를 촉진시키는 방법. 자연계에서는 유류분해 미생물은 도처에 존재하며 유류유출이 발생할 경우 이러한 유류분해 미생물 개체수는 급격히 증가하게 되는데 성장을 위한 필수 영양소가 부족할 경우 그 성장률은 제한받게 되며, 이때 필수 영양소를 적절히 공급해 줌으로써 유류분해 속도를 촉진시킬 수 있음. 무기영양물질 등을 비롯한 성장에 필요한 물질을 공급하던가, pH조절, 공기 및 수분 공급 등으로 자연환경에 존재하는 유류분해 미생물이 최적의 성장을 하게 하는 것이 이 기술의 주요 목적임.
- **생물접종법 (Bioaugmentation)**은 생물활성증진법에 더하여 유류분해 능력이 우수한 미생물 제재를 동시에 첨가하여 유류분해 속도를 촉진시키는 방법으로 자연계에 서식하는 미생물의 유류분해능이 낮아 단시간 내에 효과를 얻을 수 없을 효과적일 수 있음. 또한 유류에는 다환방향족 탄화수소와 같은 난분해성 물질이 다량 함유되어 있어 자연계의 미생물에 의한 자정작용은 장시간이 걸리므로 난분해성 물질 분해 우수 미생물의 이용은 생물접종법의 유리한 점으로 사료됨. 그러나 접종 미생물이 토착미생물과 경쟁관계에 놓일 수 있으며 접종 미생물의 환경 적응 여부에 따라 효과가 다르게 나타날 수 있으며 현재까지 충분한 현장검증자료가

부족하여 그 효과는 논란의 여지로 남아 있음.

○ 물리화학적 복원기술

- 물리화학적 복원기술은 복원효율과 2차 환경오염 등에 대하여 충분한 검증이 이루어 져야하며, 모래, 자갈 해변 및 갯벌 등 연안특성별로 서로 다른 기술이 적용되어야 함.
- 이 기술은 완전한 오염토양의 재생이 아니라 오염토양의 부피를 감소시키는 개념으로서, 물리화학적인 처리기법은 유류 유출사고 직후 연안에 발생하는 대량의 기름을 신속히 방제하기 위한 경우나 후속적으로 생물학적인 정화기법과의 연계를 위해서 토양 내 유류의 농도를 필요한 수준으로 낮추어 줄 필요가 있을 경우, 그리고 기타 생물학적인 방법의 적용이 곤란한 경우에 적용할 수 있음. 대표적인 물리화학적 유류오염 복원 기술으로는 토양 세척기술과 토양증기추출법이 있음.
- 토양세척기술 (soil washing)은 고온고압 상태의 물, 화학적 세정제 등을 이용하여 오염물질의 표면장력을 약화시키거나 액상으로 변화시켜 토양입자로부터 오염물질을 영구적으로 분리하는 기술임. 1970년대 미국에서 기름유출사고로 인한 오염된 해변을 정화하기 위하여 개발되었으나, 해양환경 뿐 아니라 내륙환경에서의 유류 및 중금속 오염토양을 정화하기 위해서도 자주 사용되고 있음 (그림 1). 토양 미세입자의 비율이 높은 갯벌 또는 모래해안 보다는 비교적 공극과 입자가 큰 자갈이나 바위해안지역에서 적용성이 높을 수 있음.

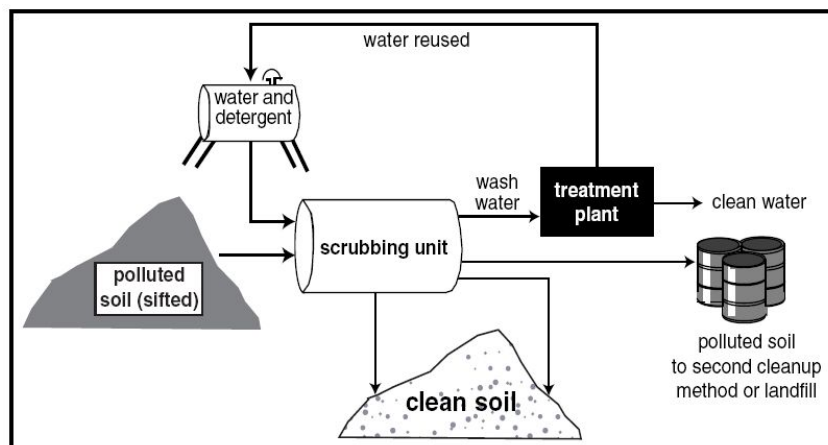


그림 1. 토양세척 공정 개념도 (USEPA, 2001a)

- 토양증기추출법은 주로 내륙환경에서의 유류오염지역의 정화를 위해

적용되어 온 방법으로 공기나 스팀을 토양 내에 불어 넣음으로써 유류오염물질을 증기 또는 기체의 형태로 분리하여 추출하는 방법임 (그림 2). 주로 염소 지방족 화합물 (chlorinated solvents)과 같이 물에 비하여 포화수증기압이 크고 비등점이 낮은 오염물질을 제거하는데 효과적이다. 유류오염물질의 증발과 분리를 촉진시키기 위해 높은 열을 가해주는 열탈착 (thermal desorption) 방법이 병행되기도 함. 현재까지는 해양유류오염에 적용된 사례는 거의 보고되지 않고 있으나 퇴적저층 깊숙이 유류가 침투하여 일반적인 물리화학적 복원기법의 적용이 어려울 경우나 기타 복원기술 적용 시 높은 비용이 요구될 경우 대안이 될 수 있을 것으로 사료됨.

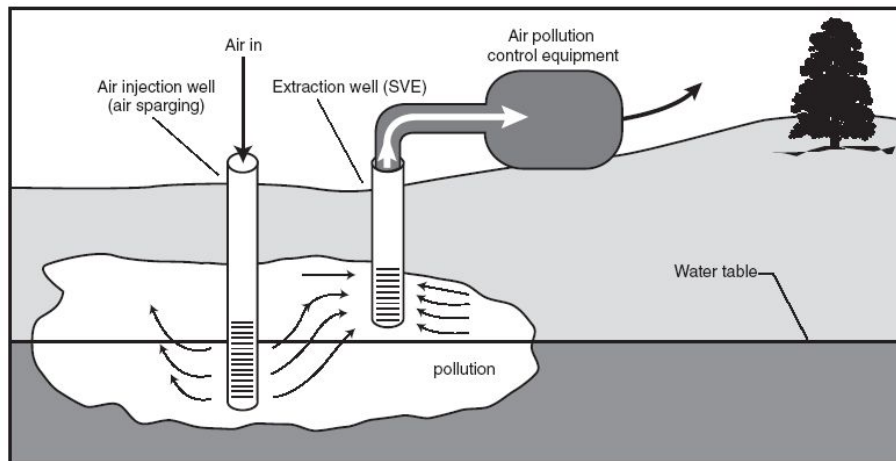


그림 2. 토양증기 추출법 개념도 (USEPA, 2001b)

□ 국내·외 기술개발 동향

○ 선진국 연구개발 동향 및 기술수준

<생물학적 정화기술>

- 미국은 수퍼펀드 사업 등을 통해 PAHs, PCBs 등에 대한 생물정화기술 개발 중
- 최근 USEPA의 중점 연구 분야로는 Bioremediation agent의 표준화, 화학적 분산제 (chemical products) 개발 및 이에 대한 프로토콜 개발, 오일의 종류에 따른 생물학적 복원 및 식생복원 기술의 효율평가, 토양의 침투율이 영양성분의 토양 내 이동특성에 미치는 영향 (penetration and retention), 생물학적 복원기법으로 처리 가능한 오일의 최대 농도 평가,

미생물에 의해 분해가 이루어지는 오일-물 계면 영역으로의 유류(crude and refined oil) 이동 메카니즘 규명, 그리고 해·수변 환경에서의 생물학적 복원기법 메뉴얼 개발 등이 있음.

- 일본, 러시아, 이스라엘, 중국, 유럽연합의 여러 국가에서 지속적으로 원유, PAHs, 유기용매 등의 생물정화기술 개발 중이며 다수의 생물정화용 제품이 시판되고 있음
- 2007년 5월, 미국 볼티모어에서 국제 현장생물정화기술 학회가 개최되는 등 매 2년 마다 정기 학술대회를 통하여 활발한 학술 교류가 이루어지고 있음
- 캐나다에 본거지를 둔 Golder Associates Inc.는 담수와 해수 등의 퇴적토 현장생물정화기술을 사업화하는 등 많은 기업들이 현장생물정화사업에 참여하고 있음
- 최근에 각광을 받고있는 생물정화 기술로는 Biosurfactants (또는 biosurfacts)를 이용하여 유류의 계면장력을 감소시켜서 탄화수소의 유화(emulsion)를 시키는 방법 (Borjana et al., 2001; Borjana et al., 2001; Cameotra and Pruthi, 1997; Kvenolden et al., 2000), 식물성 기름을 원료로 한 (vegetable oil methyl esters) biosolvent를 이용하여 토양으로부터 유류를 용해하여 수중에서 부상시킨 후 스키머 등을 이용하여 제거하는 방법(von Wedel, 2000), 그리고 식물을 이용하여 흡수 제거하거나 미생물과의 공생관계를 이용한 식생복원기술 (Phytoremediation)등이 있음 (Sadwsky, 1999; Raskin et al 1994; Kania et al.,;2002). 그러나 국내 연안해역의 경우 식생의 접종이 가능한 환경이 제한적이라는 단점이 있음.
- 외래종 유류분해 박테리아를 이용한 bioaugmentation 기술과 관련해서는, chemostat 또는 fermentor등을 이용하여 토착미생물과의 경쟁관계를 해소하여 외래종 유류분해 박테리아의 성장촉진에 효과를 보았다는 보고가 있는 반면 (Wong et al., 1988), 소위 engineered "super bug" (외래종 유류분해 박테리아)의 접종법에는 심각한 오류가 있다는 지적도 있음 (Lethbridge et al., 1994). 또한 미생물 못지 않게 토양의 물리적 특성이 유류 분해에 영향을 미치는 것으로 확인되고 있음 (Baker et al., 2008). 따라서 이 기술의 효율성은 기술이 적용되는 해안 생태환경과, 지역적, 기후적 제한요인에 크게 영향을 받는 것으로 판단됨. 연구자간에 이 방법의 효과성에 대해서 여전히 논란의 여지가 남아 있으며 미국의 복원기술 지침 등에도 bioaugmentation 에 대한 효율검증 자료가 현재까지는 부족

함을 지적하고 있음 (NOAA, 2000).

- 한편 최근의 연구 결과에 따르면 해양에서의 유류성분 분해는 주로 Alcanivorax 속, Cycloclasticus 속, Marinobacter 속, Oleispira 속, Thallassolitus 속, Sphingomonas 계통 미생물에 의해 빠르게 진행되며 특히 4 ring 이상의 고분자 PAHs가 주요 오염물질인 경우 이들 미생물의 중요성이 큰 것으로 보고되고 있다 (Alonso-Gutiérrez et al., 2008; Lafortune et al., 2008; Yakimov et al., 2007; Wang et al., 2008). 이들 보고로부터 추정해 보면 유류분해 해양미생물은 특정 속의 미생물로 제한되며 이들 미생물을 다양하게 확보하는 것 또한 중요한 사항으로 사료됨.
- 민간부분에서는 주로 유류분해 박테리아 성장 촉진제 또는 활동 촉진제의 개발 및 제품화가 이루어지고 있는데 (예, Conestoga-Rovers & Associates, USA, Oppenheimer Biotechnology, USA 등) 미국과 캐나다에 근거를 두고 있는 Limnofix사에서는 유류 이외의 다양한 환경오염 제어에 적용할 수 있는 산화제의 유효성을 pilot scale 실험 결과로 보고하였음 (Murphy et al., 1999).

<물리화학적 복원기술>

- 최근해양유류오염의 복원에 사용되는 대표적인 물리화학적 방법인 토양세척기술(Soil washing)은 1980년대 초부터 유럽 국가-독일, 네덜란드, 벨기에 등에서 연구 개발되어 미국, 캐나다 등 북미지역에서도 범용적으로 이용되고 있음.
- 갯벌에 대한 복원은 복합 퇴적물 해안 (미세입자)·모래 갯벌·진흙 갯벌·염습지·연안 지역에 대한 구체적 복원 방법 매뉴얼 및 치료 계획이 있으나 거의 자연적 회복 방법인 물 세척·유분의 자연적 상승에 의한 흡착제 사용 제거 등에 역점
- 최근에는 생물학적인 방법과 연계하여 2차 환경오염을 예방하고 유류분해 효율을 극대화 하는 연구가 많이 진행되고 있는데, Urum과 Pekdemir(2004)은 토양세척공정에 독성이 낮은 biosurfactant solution을 이용하여 오염된 토양의 처리에 효과를 보았다고 보고하였음.
- Haapea과 Tuhkanen(2006)는 PAHs 등을 효과적으로 제거하기 위해서 토양세척공정에 오존처리와 생물정화기법을 연결시켜 오존 전처리를 통

하여 난분해성 유류를 생분해 가능한 중간물질로 전환시킨 후 후속공정으로 생물정화기법을 연계시켜 물리화학적인 방법만의 한계를 극복한바 있음.

- 1990년대 후반에 들어서는 초음파를 이용하여 세척액 중의 화학반응 촉진과 분산작용을 상승시킴으로써 토양세척효과를 향상시키는 방법이 사용되기 시작했으며 최근의 연구로는 호주 CSIRO 산업물리연구소 연구진에서 토양정화용 초음파 반응장치를 개발한 바가 있음.

○ 국내 연구개발 동향 및 기술수준

<생물학적 정화기술>

- 1980년대 중반 이래 잦은 유조선 사고에 따라 생물정화기술이 대학, 출연연구소 등에서 연구되기 시작되었으며, 1995년 씨프린스호 사고 이후 대규모 유류유출 사고에 따른 환경영향 평가, 생물정화기술 등이 집중적으로 연구됨. 이후 지난 10년간 대규모 해상유류유출 사고가 발생하지 않음에 따라 유류오염 정화기술 개발 연구비 지원 급감.
- 육상 환경의 경우 주유소, 저유소 등 장기간 유류에 노출되어 심각한 오염을 보이는 환경이 다수 존재하며, 토양환경 관리법 등 환경 규제가 강화됨에 따라 다수의 토양 생물정화 전문업체가 생겨나는 등 기술의 상용화 단계에 도달하였으나 해양 유류오염의 경우 법규정으로 인하여 전문화된 업체는 없음.
- 해양유류오염 사고 시 중·단기 유류오염 복원 프로그램은 이론에 근거한 미흡한 형편이며, 사고발생시 긴급대책(실시간)·단기대책(1일-1달)·중장기대책(1달-5년) 등 응용 복원 연구가 미흡함.
- 국내 해양유류오염에 관한 연구는 주로 한국 해양연구원을 중심으로 이루어져 오고 있으며 대표적인 연구로는 김상진 등 (1994, 1995)이 유류분해 미생물 종의 하나인 아시노박터 속 미생물 종의 하나인 아시네토박터 속 미생물(*Acinetobacter* sp)을 이용하여 현장에서의 유류분해 효율을 입증한바 있음. 또한 동 연구팀은 모래해안에 메소코즘을 설치하고 인위적으로 유류로 오염시킨 다음 biostimulation과 복합미생물을 활용한 bioaugmentation의 효과를 비교하였으며 그 결과 bioaugmentation을 통해 오염 유류의 제거를 보다 신속히 할 수 있음을 입증하였으나 난분해성 물질인 PAHs의 경우에는 결과가 명확하지 않았음 (김상진 등, 2008).

- 환경부에서는 차세대핵심환경기술개발사업의 일환으로 “독성 유기화합물 오염 퇴적토의 생물정화기술” 개발 사업을 추진하였으며 그 결과 PAHs 우수분해 복합미생물제제와 bioreactor 등이 개발되었으나 현장적용단계까지는 이르지 못함(김상진 등 2005).
- 또한 (주) 에코필에서는 2004년 여수 삼남석유화학에서 발생한 원유유출 사고시 주변 해수의 영향을 받는 배수로에서 생물정화기술을 적용하여 오염 처리를 한 사례가 있음 (고성환, 개인 교신).
- 이 외에도 여러 기업 및 연구팀에서 해양 유류오염 제거를 위한 생물정화기술 혹은 제품을 개발해 왔으며 그 결과로 2008년 8월에는 8개 제품이 형식승인을 획득하기에 이르렀음. 그러나 아직까지 현장적용 경험이 부족하며 조간대 하부와 같이 저서생물 서식 밀도가 높아 기름이 갯벌 속 깊숙이까지 오염시키는 환경에 대해서는 기술 개발이 충분하지 않은 실정임.

<물리화학적 복원기술>

- 토양, 지하수 등을 대상으로 한 복원기술이 소수 개발되고 있으나, 유류 오염에 도입될 수 있는지의 여부는 검증되지 않음.
- 육상에서는 기름 및 BTEX (벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌)등 유류 오염물질 복원이 80-90% 연구가 되어 있음. 해안지형 적용가능 특성화 연구는 거의 없으며, 환경부는 2017년까지 토양·지하수 유류오염 방지기술 등으로 내륙 오염복원에 대처하고 있지만 연안의 특성별 유류 방지기술은 미흡한 실정임.
- 오염된 모래·자갈 해변에 적용 가능한 기술로서 허베이 스피리트호 사고시 방문한 UN/EC Assessment Team의 답사보고서 및 캐나다 SCAT (Shoreline Cleanup Assessment Technique)답사팀에서 권고한 기계적 킬링기술은 물리적 정화복원의 일종으로 태안지역 해수욕장 등에 적용 사례가 있음.
- 갯벌 오염시에는 기름띠 제거 및 흡착포 등으로 대처할 뿐 갯벌에 흡착된 유류에 대한 복원 기술 적용사례는 거의 없음.
- 일부 학계를 중심으로 토양세척의 효율향상을 위한 운전조건에 대한 연구가 수행된 바 있으며 (최상일과 김강홍, 2006; 이민희, 2007) 2000년을 기점으로 하여 주로 실험실 규모에서 초음파 세척의 효율을 평가하기 위

한 연구들이 수행된 바 있음 (정하익 등, 2004; 황선숙 등, 2007).

- 토양세척효율 향상을 위한 열탈착 기술 적용시 발생하는 먼지, 다이옥신류, 푸란류 등의 전구물질과 할로젠 화합물 등 2차 오염물질을 제거하기 위한 방법으로 1)제진장치이용 조대입자 및 미세입자를 제거 2)벤투리 세정기를 이용하여 산성 증기를 제거 3)활성탄 등을 활용한 잔존 유기물 제거 4)다이옥신과 푸란류 제거를 위한 집진장치 이용 5)황과 시안 등의 제거를 위한 세정장치 등의 기술이 개발되어 있음. 최종적으로 이들 오염물질의 분해 제거가 뒤따라야 함.

□ 기술개발의 필요성

- 해양 유류오염에 대비한 기반 기술은 상당 수준으로 개발되었으나 육상 환경과는 달리 해양에서는 최근 개정된 해양환경관리법이 공포되기 전까지 생물정화기술 적용의 법적 근거가 없어서 개발된 기술의 실증화가 진행되지 못함.
- 2008년 10월 현재 허베이스피리트호 유류오염 사고로 인한 해안 방제작업이 완료되었으나, 초기 오염이 심한지역과 접근이 어려운 도서지방, 그리고 소근리, 신두리 등의 갯벌지역은 유류가 지속적으로 잔존하고 있음. 특히 갯벌지역의 잔존유는 현재 알려진 정화/복원기법으로는 복원이 불가능하므로, 국내환경에 맞는 복원기법의 개발이 요구됨.
- 1995년 씨프린스호 사고 발생 10년이상이 경과한 현재에도 연안 모래, 자갈층 하부가 유류로 흡착 오염된 것이 확인되었으며, 자연 복원시 30년 이상의 시간이 소요될 것으로 예상됨.
- 허베이 스피리트호 사고의 경우 늦기 전에 자연친화적인 연안 특성별 유류오염 복원 기법이 필요하며, 환경친화적 통합 복원 방법인 가속 복원 기술 모델 개발이 필요.
- 그동안 국내에서도 다양한 해양환경으로부터 토착 유류분해 미생물의 분리 및 그들의 유류분해 메커니즘에 관한 연구가 진행되어왔으며 일부 미생물의 경우 제품화 단계에 도달하였으나 아직까지도 현장적용기술은 미흡한 수준이며 단속적인 연구로 말미암아 기술 축적과 인력 양성 및 유지에 한계가 있어 해양 유류오염의 생물정화 전문가는 많지 않은 실정임.
- 따라서 지금까지 개발된 기술 및 제품과 선진 외국에서 개발된 기술의

검증 및 응용을 통하여 우리나라 연안환경에서 생물정화기술을 실증하는 한편 인력의 훈련과 현장적용기술의 고도화를 통한 최적의 운전조건 도출이 시급함.

□ 기술개발 목표

- 연안의 토착 유류분해 미생물의 유류 분해율을 극대화 시킬 수 있는 생물복원 가속화기술 및 미생물집중법 현장실증을 통한 정착 및 표준화
- 기 개발기술과 선진기술의 도입 및 응용을 통하여 우리나라 연안환경에 적합한 친환경적 유류분해 복원 기술의 검증과 최적 운전조건 도출
- 다양한 해양환경 (모래, 자갈 해변, 갯벌, 염습지 등)에 서식하는 유류분해 미생물종의 분리와 유류분해 메커니즘의 규명 (유류분해 미생물 pool 확장)
- 검증된 단일 복원기법이 아닌 환경친화적 통합 복원방법 개발
- 태안 유류오염지역에 친환경 복원기법을 적용하여 신속한 연안생태의 회복

□ 연구내용 및 범위

- 유류오염지역의 자연정화능력 극대화를 위한 생물복원 가속화 기술 (biostimulation)
 - 태안을 포함한 우리나라 해변에 서식하는 토착 유류분해 미생물의 최적 성장조건을 제공하기 위한 환경요인 및 오염유류의 양과 종류에 대한 영향 연구를 통하여 최적 운전조건 도출
 - 영양소 및 전자공여체 동시 공급을 위한 NH_4NO_3 적용 기술
 - 질산성질소, 암모니아, 유기성 질소 (친수성, 소수성) 또는 입자성 영양소 (granular slow-release inorganic fertilizer 또는 fish-meal 부산물) 등을 이용한 조수조건(tidal condition)에서의 지속적인 영양소 공급 기술의 정착 및 응용
 - 식생재배 (phytoremediation)에 의한 통기성의 확보 및 유류분해 미생물과의 cometabolism 연구
 - 유류분해 biosurfactant 및 biosolvent 적용기술 개발

- 머드배터리 기술을 이용한 유류오염 물질 분해 기술
 - 갯벌지역 해변 또는 염습지와 같은 저산소 환경에서의 친환경적인 혐기성 및 호기성 복원기법
 - 산소의 공급 및 유지를 위한 친환경적 tilling 또는 공기주입 (forced aeration) 방법
 - 대체 전자공여체 (금속염, NO₃⁻, SO₄²⁻) 적용 기술
- 유류오염 처리용 유류분해 미생물 투입 생물복원 적용기술 (Bioaugmentation)
- 토착 유류분해 미생물의 성장과 군집이 자연조건하에서 어려운 경우, 유류분해효율을 증대시키기 위하여 유류분해 호염성 미생물 제제 및 접종 기술의 적용 및 현장실험을 통한 검증
 - 다양한 해양 유류분해 미생물의 추가 확보 및 검증
 - 유류분해 미생물의 생존력 향상을 위한 chemostat 또는 fermentor 적용 기술
 - 국내 연안에서의 유류분해 미생물 분리, 배양 및 적용
- 유류오염 갯벌/모래 해변 토양세척 자동화 공정 개발
- 현장에서의 신속한 토양세척을 위한 자동화 공정 개발
 - 초음파 또는 화학세정제를 이용한 연안 퇴적층의 세척기술에 대한 설계 및 운전조건 도출
 - 복원기술 적용에 따른 2차 환경피해 조사 및 대안
- 유류오염 해변지역 물리화학적 정화기법 실용화 기술 개발
- 연안 조건과 유류오염의 특성에 따른 물리화학적 정화기술의 적용 가능성 및 운전조건
 - 태양열 에너지를 이용한 연안지역 토양증기 추출기술 및 열탈착 기술
 - 증기상태로 수거된 유류의 처리/처분
 - 생물학적 정화기법과의 연계
 - 기술 적용에 따른 2차 환경피해 및 대안

□ 기술개발 소요예산

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
배경자료 확보	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	6
가속복원기술 개발	10	10	10	10	10	10	-	-	-	-	60
Pilot test 및 모니터링	12	7	7	7	7	7	7	6	-	-	60
실용화 적용 단계	-	-	-	-	-	-	5	5	5	5	20
지침작성 및 표준화	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	4
소계	24	19	19	17	17	17	13	12	6	6	150

□ 기대효과 및 활용방안

- 개발된 기술은 태안 유류오염지역에 적용하여 해변의 신속한 회복을 가속화시켜, 생태계 회복 및 피해주민의 삶의 터전 복구
- 유류화합물 오염사고로 훼손된 해변환경의 신속한 정화, 복원으로 사회 간접비용을 절감할 뿐만 아니라 지역 어민의 민원을 감소하고 나아가 국민 삶의 질 향상
- 빠른 복원이 필요한 해수욕장, 인구과밀지역, 양식장 주변지역, 고농도 오염지역 등 우선순위 선택 후 복원기술 적용
- 시간이 경과하며 심화되는 갯벌의 심층 흡착을 조기에 방지하고 흡착된 유류 성분을 제거
- 향후 발생 가능한 유류오염사고에 대비한 기술력의 확보 및 핵심 기술의 이전 및 수출을 통한 신규 ET시장 개척

2. 유류오염지역 진단/예측/관리 기법

□ 기술개요

○ 진단기법

- 각 유류오염 복원기술에 대한 적용 여부와 복원효율의 결정을 위해 효율 산정 방법의 표준화가 필요하며 이는 적용할 복원기술의 적합성과 복원의 중단 시점을 결정을 위하여 사용되는 진단기술.
- 진단 기법의 개발에 있어서 가장 큰 난제는 연안환경 및 기후조건의 다양성과 가변성이라고 할 수 있으며, 따라서 어떠한 기술의 효율을 측정하기 위해서는 통계적 유의성을 확보할 수 있도록 상당히 많은 양의 운전자료가 수집되어야 함. 이러한 단점은 유류내에 존재하는 hopanes나 chrysenes 등의 보존형 marker를 이용한 표준화방법 (normalization)을 사용함으로써 극복할 수 있음.
- 주로 유류분석을 위해 사용되는 GC/MS 분석법은 복원기술의 진단을 위한 유류분석을 위해 상당히 많은 시간과 비용이 소모되므로 운전관리적인 측면에서 보다 신속하고 저렴한 진단 기법이 필요함. 이를 위하여 respirometer나 radiotracer방법 등을 이용하여 현장에서 유류분해의 최종 부산물인 CO₂를 직접 측정하는 방법 (Swannell et al. 1994; Swannell et al, 1997; 김상진 등 2008) 그리고 유류분해 이화작용 경로분석을 위한 DNA, RNA 유전자 탐침 기술 (Sayler and Layton, 1990; Creer et al. 1993)등이 대안기술로 제안된 바 있음.

○ 예측기법

- 지표수 및 지하수 등 수리학적 거동과 유류의 전달/확산, 침투, 흡/탈착, 증발, 풍화, 생물학적인 반응기작 및 조수조건에 따른 유류의 이동과 용출을 예측하기 위한 유류의 이송·침투·용출 모델
- 연안 유류오염지역에서의 유류의 이송·침투·용출 모델은 유류오염의 영향 범위와 정도를 중장기적으로 예측하고 기술별 대안비교를 통하여 최적의 복원기술 적용과 설계, 그리고 복원의 영향에 대한 예측과 평가를 가능하게 하며 장기적으로 발생할 수 있는 문제점을 예측하여 사전에 대비하도록 할 수 있음.
- 유류의 이송·침투·용출 모델은 아래의 용도로 사용될 수 있음.

1. 시공간 변화에 따른 연안 유류오염의 범위와 정도 예측
2. 자연분해율 및 복원대안별 중장기적 효율비교를 통하여 최적 복원기술 선택
3. 조수조건을 고려한 운전조건 최적화 (예, 영양소 공급물질의 washout)
4. 복원기술 적용에 따른 2차 환경오염의 예측
5. 기후 및 연안조건의 급격한 변화가 유류오염 특성과 복원기술의 효율에 미치는 영향평가

○ 관리기법

- 연안의 유류오염 복원을 위하여 보다 신속하고 체계적인 대처를 위해서는 일원화된 복원기술의 선택 및 관리 지침이 필요함.
- 유류의 풍화정도, 침투정도, 그리고 연안의 형태에 따라 복원기술의 적용을 위한 구체적인 척도와 기준이 제시되어야 하며 다양한 연안 특성을 고려할 때, 때로는 유류제거를 위해서는 일괄적 또는 순차적으로 다양한 기술들이 적용이 필요하므로 (예, remove-wash-replace, remove-burn-replace, chemical washing -bioremediation) 복원기술의 조합과 복원 기간 동안의 복원 기술들의 포괄적 관리 및 운전 기법에 대한 지침이 요구됨.
- 기술지침의 내용은 아래의 내용을 포함함.

1. 연안환경 분류 체계 및 복원 기술의 종류
2. 복원기술별 fact sheet (효율, 적용성, 운전조건, 2차 환경오염 등)
3. 복원기술의 계량적 효율산출 방법
4. 복원기술의 설계, 조합 (combination/treatment train), 운전 관리 /troubleshooting 방법
5. 기술별 비용-효과 분석 방법론
6. 상업화된 Bio-remediation agent 검증 및 적용 지침
7. 유류오염 예측 기법 (진단 및 모델링)
8. 해외에서의 복원 기술 적용 성공 사례

□ 국내·외 기술개발 동향

○ 연안 유류오염 및 복원효율 진단 기법

- 복원기술의 진단을 위해서는 오염된 토양에서 박테리아의 존재여부와 그 농도를 분석함으로써 오염물질 정화 과정을 직접적으로 확인하거나, 산화-환원전위, pH, 온도, 산소 농도, 기타 전자수용체, 그리고 유류분해의 최종부산물인 CO₂등을 지속적으로 관찰함으로써 복원기술이 제대로 기능을 발휘하고 있는가를 간접적으로 파악할 수 있는 여러 가지 방법들이 개발되어 있음 (USEPA, 2001c).
- 유류분해 미생물 분석방법으로는 Plate count방법과 최적수 (MPN)방법이 전통적으로 사용되어 왔으나, 대부분의 유류분해 미생물의 배양이 힘들다는 점은 적용에 있어 커다란 장애요인으로 여겨지고 있음. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 근래에는 주로 Phospholipid fatty acid (PLFA) 분석법 이나 DNA유전자 분석방법 등 배양이 필요 없는 분자생물학 방법이 자주 사용되고 있음 (National Research Council, 1993; Muyzer 등, 1993; White 등, 1998; Yakubu, M. Bello, 2007; Jung et al., 2005; Wang et al., 2008).
- 1990년대 중반 이후 Pristane, phytane, hopane, alkylated PAH isomer등의 다양한 biomarker를 이용하여 유류분해 효율을 진단하는 연구가 활발히 진행되고 있음 (Bragg 등, 1994; Venosa 등, 1996; Lee 등 1997).

- 복원기술의 운전 상태를 간접적으로 평가하기 위한 방법으로서는 암모니아, 또는 질산성 질소, 인 등을 분석하기 위하여 electrode 방법, 흡광도법 또는 분석화학적 방법을 포함한 다양한 방법들이 제안되어 있음. 좀 더 직접적으로 유류분해 효율을 평가하기 위해서는 Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) 또는 특정 탄화수소종의 분석이 필요한데, 이를 위해서는 infrared spectroscopy (IR), gas chromatography/flame ionization detection (GC/FID), thin-layer chromatography/flame ionization detection (TLC-FID) 등 다양한 기술들이 사용될 수 있음.
- 이 외에도 다양한 dioxygenase 효소들이 방향족 탄화수소 분해과정에 관여하며 이들 효소 유전자의 microarray (DNA chip) 제작 및 mRNA 발현 분석을 통해 오염물질 제거 정도를 평가할 수 있음.

○ 연안 유류오염 모델링

- US Mineral Management Services (1988)은 연안에 접근한 유류의 거동과 연안조건에 따른 상호작용의 해석에 초점을 둔 Coastal Zone Oil Spill Model (COZOIL) 모델을 개발하였으며, 이후 Howlett과 Jayko (1998)에 의하여 그래픽 인터페이스 기능의 보완 및 GIS 도구와의 연계를 통하여 모델의 사용자환경이 향상되었음.
- Humphrey 등(1992)은 자갈해안을 대상으로 하여 연안에 도달한 유류 (stranded oil)의 분해속도를 예측하기 위해 1차 반응속도식을 이용한 비교적 간단한 모델 (SOCS)을 사용하였으며, 엑손 발테즈호 유류유출 사고 시 축적된 자료를 이용하여 모델의 평가를 수행하였음.
- Boufadel (1998)은 조수조건을 고려한 해변의 지하수 흐름 및 수위 변화와 이에 따른 영양소의 이동현상을 설명하기 위하여 2차원 수치모델 (MARUN)을 개발하였으며, 이후 Li 등(2007)이 연안유류오염지역의 생물정화효율 적용 시 연안의 조수조건을 포함한 다양한 수리적 조건을 고려하여 영양소의 최적 주입률을 결정하기 위해 이 모델을 활용한 바 있음.
- 이 외에 유류유출의 거동 및 이동현상에 관한 많은 연구들이 활발히 진행 중이나(Mackay 등, 1980; Huang, 1983; Shen 등, 1986, Shen and Yapa, 1998, Yapa 등,1994, Chao 등, 2001) 대부분의 유류유출 모델은 유출유류의 바다에서의 표층 및 수층에서의 거동에 초점이 맞추어져 있으며, (Wang 등, 2008) 연안/해변 지역에서의 유류이동 및 용출, 그리고 해

변지역에서의 유류복원기술 적용에 대한 모델링 기법에 대한 연구는 상대적으로 적음. 국내외를 막론하고 이러한 지중에서의 유류오염 거동에 대한 모델링 기법은 주로 내륙환경조건에서의 유류오염 분야에 치중되어 있음.

○ 연안유류오염 방제를 위한 기술지침

- 미국 및 캐나다에서는 다음과 같이 해양유류오염에 대비한 유류오염에 대한 평가와 연안조건에 따른 방제기술의 적용에 대한 다양한 지침서들이 개발되어 있음.
- Shoreline Countermeasures Manual (NOAA, 1992): 연안의 종류와 유류오염의 특성에 따른 복원기술 활용 방안 제공
- Pacific Coast Oil Spill Project (Environment Canada and US Department of the Interior, 1992): 북미지역 태평양 연안지역을 대상으로 복원기술의 선별 및 효율검증을 위한 소규모 또는 현장규모 oil spill 시험에 대한 계획 및 방법론 제시
- Shoreline Assessment Manual (NOAA, 2000): 연안에서의 유류오염 평가방법과 평가결과를 복원기술 선택에 활용하는 방법에 대한 기술지침
- Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments (API, NOAA, USCG, USEPA, 2001): 해양 유류오염 방제와 복원에 적용 되는 기술들의 특성과 유류오염의 시기와 특성에 따른 각 복원기술 선택과 적용 전략
- Guidelines for the bioremediation of marine shorelines and freshwater wetlands (USEPA, 2001): 해양환경과 내륙습지환경에서의 생물정화기술 진단과 현장적용, 그리고 복원의 중단시점 결정 등 세부적인 기술 지침.

□ 기술개발의 필요성

- 최적 복원기술의 적용을 위해 필요한 초기 유류오염 진단, 그리고 복원기술의 정확한 진단과 효율평가를 위해서는 유류오염에 대한 비용 효과적이고 표준화된 진단방법이 필요.
- 유류복원 예측을 통한 중장기적인 관리방안 마련과 가변적인 연안환경에 대응한 복원기술의 운전조건 도출을 위해서는 유류오염예측모델이 필

요.

- 복원기술자나 의사결정론자로 하여금 개발된 기술에 대한 활용도를 높이고 보다 객관적이고 합리적인 복원활동계획을 수립하도록 하기 위한 통합 복원 관리시스템이 필요.

□ 기술개발 목표

- 유류오염의 종류 및 연안환경 조건에 따른 단계별 복원 기술의 적용 및 진단방법에 대한 기술적 지침 개발.
- 복원기술의 적용에 따른 유류오염의 변화를 중·장기적으로 예측할 수 있는 모델링 도구 개발
- 미래의 해양유류오염사고에 대비하여 기술적용에 대한 criteria 및 기술의 최적 설계, 조합을 위한 체계적인 기술 지침 및 해변 유류오염 통합 관리기법 마련.

□ 연구내용 및 범위

- 복원기술의 최적 조합 및 진단 최적화 기술
 - 해변 유류오염의 정도와 종류의 진단, 그리고 해변생태에의 영향도를 평가할 수 있는 표준화된 방법론 개발
 - Respirometer 또는 radiotracer 방법 등을 이용한 유류 분해율 진단기법 실증
 - 미생물에 의한 유류분해과정의 관측을 위한 DNA/RNA 유전자 탐침 기술의 적용성 평가
 - 복원기법 적용에 따른 2차 환경오염 진단 기법
- 유류오염지역 환경변화 예측 모델 개발
 - 지표수, 지하수 모델 및 각 복원기술의 유류분해 메커니즘을 연계한 유류오염의 이송 및 용출 모델 개발
 - 복원기술의 실험실 실험 및 현장 적용으로부터 기술별 운전자료 구축 및 모델 파라미터 산정

- 조수와 파도조건에 따른 토양 내에서의 영양소 물질의 희석 및 이송 모델링을 통한 최적 영양소 공급방법의 도출

○ 유류오염 복원지역 지속가능 통합관리 시스템 개발

- 기술별 복원효율을 포함한 기술적 정보를 제공을 통해 목적과 용도에 적합한 최적의 복원기술 적용 및 장기적 관리를 위한 지침 마련
- 복원 부산물에 대한 처리/처분 방안 수립
- 복원활동 중단여부 결정을 위한 microscale biotest 기법의 검증 및 보완
- 기술적용에 따른 효과와 생태환경에 미치는 부정적 효과간의 trade-off 전략
- 생물정화 제제(bioremediation agent)의 적용 지침 및 평가 방법 보완

(단위 : 억원)

분야 \ 년도	1단계			2단계			3단계				계
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
배경자료 확보	1	1	1		-	-	-	-	-	-	3
복원기술 최적 조합 및 진단 최적화 기술	9	9	9	8	8	8		-	-	-	51
유류오염 예측 모델 개발	-	-	-	6	6	6	-	-	-	-	18
통합관리 기법 개발	-	-	-	-	-	-	5	5	5	5	20
지침작성 및 표준화	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	8
소계	10	10	10	14	14	14	7	7	7	7	100

□ 기대효과 및 활용방안

- 연안 유류오염의 복원을 위한 단기, 중장기적인 체계적인 지침서 제공.
- 개발된 복원기술의 적절한 활용과 관리를 위한 기술적 guideline 제공
- 향후 지침작성 및 표준화 과정을 통해 오염지역 현장책임자의 효과적인 복원기술 교육 및 장비 운전 교육 가능
- 개발된 신기술의 해외 기술이전 및 수출

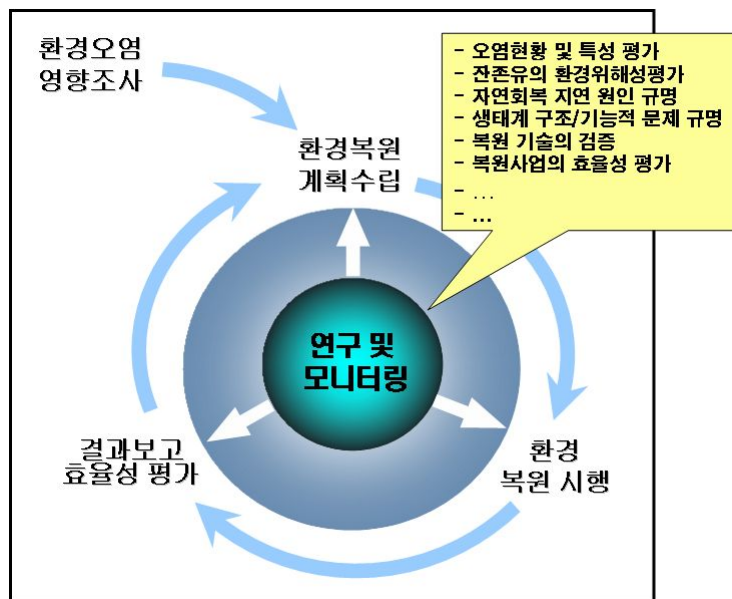
제 6 장 연구개발 추진전략

제 1 절. 추진 전략

□ 2007년 12월 7일 허베이스피리트호 원유 유출사고 이후 11개월 걸친 해양오염 영향조사에서 태안반도를 포함한 충청남도 및 전라도 해안과 도서지역이 광범위하게 유출유에 오염되어 있으며, 생물에게 치사 또는 아치사 수준의 독성영향을 미치고 있음이 확인되었고 생태계의 중수와 서식밀도가 감소하고 생태계안전성이 파괴되어 생태계변동과 이상 징후들이 계속 나타나고 있음.

□ 유출유의 표착이 심했던 태안반도 조간대 지역에서의 유류 및 원유기원 독성물질의 잔류는 장기화될 것으로 예상되며, 훼손된 생태계의 회복에는 많은 기간이 걸린 것으로 예상되는 바, 장기적으로 해양환경 중의 유류오염 영향과 생태계변동을 모니터링 해야 할 필요성이 크게 대두됨.

□ 사고해역의 해양환경영향조사는 1) 해양환경 중 유류의 오염 평가 분야, 2) 생태계의 변동 및 회복에 모니터링 분야로 구분되며, 지난 1년간의 조사에서 확인된 결과를 바탕으로 가능한 범위 내에서 환경복원 계획을 수립하여 시행하고 향후 조사에서 추가적으로 확인되는 사항을 반영하여 환경복원 계획을 변경 적용하는 아래와 같은 순환 시스템을 구축하는 것이 바람직할 것으로 사료됨.

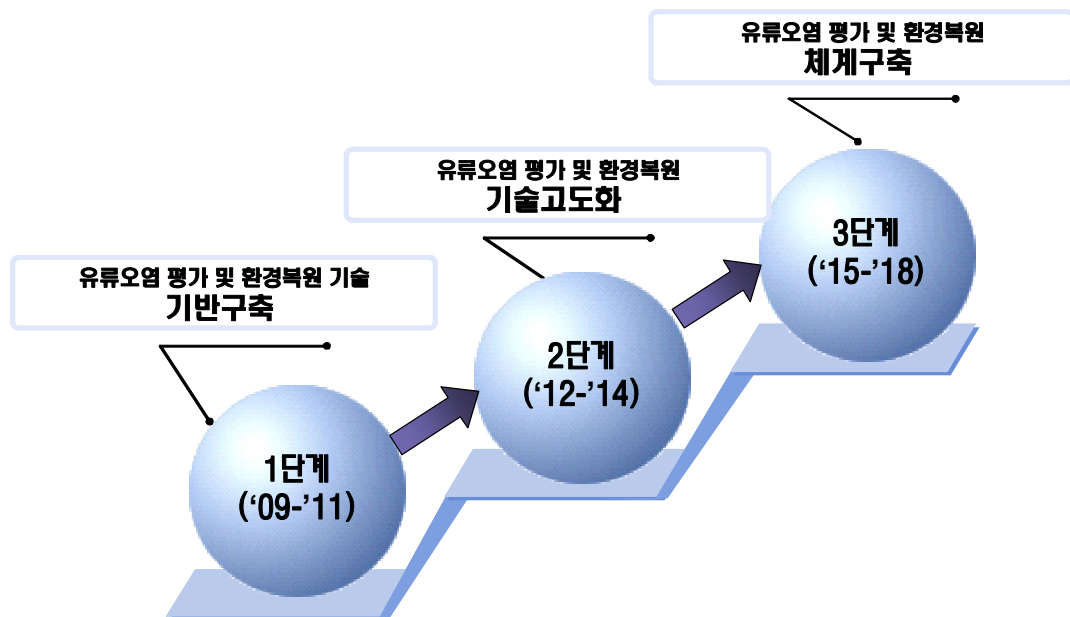


[해양환경영향 조사 및 환경복원의 연계 추진 전략]

□ 유류오염 평가 및 환경복원 복원 기술 개발 분야의 경우 허베이스피리트 원유 유출 사고에 따라 영향을 받은 해역에서는 시급성을 요하기 때문에 기존에 개발되어 있는 기술을 적용하도록 하고 미래에 있을 수 유사한 해양오염 사고를 대비하여 적용할 수 있는 선진적인 기술을 개발하는 것을 목표로 함.

□ 유류오염 평가 및 환경복원 복원 기술 개발은 단계별 연구개발 수행을 통해 해양유류오염 사고이후에 신속하고 정확한 환경오염 수준과 영향을 평가하고 이를 통한 환경복원이 수행될 수 있는 체계를 완성하도록 함.

- 1단계(2009-2011) : 우선적으로 확보가 필요한 기술분야의 개발을 통해서 유류오염 평가 및 환경복원 기술개발의 기반을 구축함.
- 2단계(2012-2014) : 기술을 점진적으로 고도화하여 선진국 수준에 근접하는 기술수준을 확보토록 함.
- 3단계(2015-2018) : 기술을 발전시키고 해당 기술들을 종합함으로써 유류오염 평가 및 환경복원 기술지원 체계를 구축함.



□ 허베이스피리트 원유 유출사고에 따른 현장에서의 해양환경영향조사, 및 생태계장기모니터링과 미래를 대비한 유류오염 환경오염의 영향평가 및 친환경복원기술의 개발 분야는 연계성을 가지고 있기 때문에 전체를 체계적으로 통합하여 현재와 미래의 유류오염 사고에 대응할 수 있는 체계화된 조직의 필요함.

□ 유류오염사고의 경우 사고이전에 충분한 기술개발과 노하우를 축적하고

있어야 사고이후의 긴급상황에 신속하게 대처를 할 수 있을 뿐만 아니라, 체계화된 조직체계를 가지고 있어야 종합적으로 대응을 할 수 있음. 미국 해양 대기청의 경우 해양에서의 유류 및 유해물질의 사고에 대응하기 위하여 Office of Response and Restoration(ORR) 부서를 두고 있으며, ORR 내에 방제과학지원을 위한 Emergency Response Department(ERD)와 유류오염 영향평가 및 환경복원을 위한 Assessment and Restoration Department(ARD)를 두고 있음.

□ 국내의 경우 방제의 현업지원이 필요한 ERD의 역할을 수행하는 기관은 방제관련 국가기관에서 수행하는 것이 바람직하며, 과학기술의 연구개발 성격이 강한 ARD 역할을 수행할 수 있는 ‘유류오염 평가·복원 연구센터’를 연구기관에 설치하여 ‘허베이스피리트호 원유 유출사고 해양오염 영향조사 및 환경복원 연구’ 및 미래를 대비한 ‘유류오염 평가 및 환경복원 기술 개발’을 종합적으로 장기적인 안목에서 수행할 것을 제안함.



제 2 절. 실행계획, 소요예산 및 성과지표 설정

1. 실행계획

□ 유류오염 및 생태계 장기모니터링

중점 추진 분야	세부분야	1단계			2단계			3단계		최종목표
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015-2016	2017-2018	
유류 오염 장기 모니터링	해안 유장분포 정밀조사	조건대 표층, 표층하 유장분포 조사, 유장분포도 작성								
	해수 유류오염 평가	SPMD 이용 해수오염 정밀평가, 생물위해성 평가								
	퇴적물 유류오염 평가	잔존유 오염도 조사			HVS이용 미량 오염도 조사					
		태안해역/도서지역 퇴적물 유류오염 모니터링			가리앉은 기름 조사					
	생물 유류오염 평가	공극수내 유류오염 조사			갯벌 유류오염 모니터링					
		태안해역/도서지역 어패류 유류오염 모니터링			생물이식 잔존유 오염 조사					
생물 독성평가	현장 어패류 아치사 수준 영향 독성평가									
	퇴적물 생물독성 평가			풍화유/화학적 분산유 독성평가						
	어류 생철사에 따른 독성 평가									
생태계 장기 모니터링	부유환경 생태계	부유환경/생태계 장기모니터링								
	조간대 생태계	부유생태계 중기적 변동특성 규명			장기적 변동특성 규명					
		연성조간대/암반생태계 장기모니터링			장기적 변동특성 규명					
	조하대 저서생태계	생물폐사 환경요인 규명			조간대생태계 중기적 변동특성 규명			장기적 변동특성 규명		
		저서생태계 장기모니터링, 저서먹이망 구조 파악								
	조간대 천해어류	조간대, 근해 천해어류 종조성 변화조사								
해빈퇴적환경	주거종 표지 방류조사, 어류자원회복 평가									
	기존 연구결과 분석			퇴적환경 변화 원인규명			중장기적 변화예측			
	해빈지형 및 퇴적환경 정밀모니터링			퇴적환경 계절적 변동특성 규명			해빈 복원방안 개발			

□ 환경복원 분야



□ 유류오염 평가 및 복원기술 개발

중점 추진 분야	세부기술	1단계			2단계			3단계		최종목표
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015-2016	2017-2018	
유류 오염 평가 및 복원 기술 개발	환경법과학 기술	정밀유지문 분석기술 개발 및 표준화						현장대응형 신속분석 기술 개발	정확한 오염진단 및 친환경적 정화복원	
		유류 특성 분석기술			유류 폼화특성 분석기술			유지문 계량분석화학 기술		
		유류오염 배경오염 분석 및 D/B 구축								
	환경위해성 평가기술	유류 생체노출 평가기술			유류 생체축적 경로평가			유류 생체대사 및 변형 평가		
		유류 생물독성 평가기술			유류 생태독성 평가기술			유류 생태위해성 모델 개발		
		생태계 영향 평가기술			서식지 가치 평가기술			생태계 피해평가 모델 개발		
	생물 독성평가 부유환경 생태계	배경자료 확보			가속 복원기술 개발			지침작성 및 표준화		
		Pilot Test 및 모니터링						실용화 적용단계		
	오염진단/예측/관리기법	배경자료 확보			복원기술 최적조합 및 진단 최적화 기술			지침작성 및 표준화		
					유류오염 예측모델 개발			통합관리기법 개발		

2. 연도별 · 단계별 소요예산

□ 유류오염 및 생태계 장기모니터링

분야 \ 연도		1단계			2단계			3단계				계
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
오염 영향 조사	해안 유정분포 정밀 평가	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	13
	해수 유류오염 평가	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	13
	퇴적물 유류오염 평가	6	6	6	6	6	6	4	4	4	4	52
	생물 유류오염 평가	5	5	5	4	4	4	2	2	2	2	35
	생물 독성 평가	4	4	4	6	6	6	7	7	7	7	58
장기 생태 계 모니 터링	부유환경생태계	3	3	4	3	3	4	3	3	3	4	33
	연성 조간대 및 암반 생태계	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	37
	연성 조하대 및 갯벌 생태계	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	37
	조간대 천해 어류 조사	0.5	1	1	1.5	2	2	1	1	1	1	12
	해빈퇴적환경	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	44
계		31.5	32	33	35.5	36	37	32	32	32	33	334

□ 환경복원 분야

분야 \ 년도		1단계			2단계			3단계				계
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
조간대 저서 생태계	생태계 구조파악 및 모니터링	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
	기회생물 제거	2	2	2	2	2	2	1				13
	기질확장		1	5	5	5	5	2				23
	관리구역 감시		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		4
생물 생산성	우수혈통확보, 생물이식	1	2	2	1	3	2	2				13
	투석, 어초시설, 공간이설			4	5	5	5					19
	생산규모평가							0.5	0.5	0.5	0.5	2
주요 서식 생물	대상생물 이식	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1				5.5
	수로시설, 암반이설			3	4	4	4					15
	천이구조, 생태계지위평가				0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3.5
서식처	생태도, 공간규모	0.5	0.5	0.5								1.5
	공간투석, 생물이식			2	5	3	3	3	1			17
	서식처 감시		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	4.5
계		5	8	21	25.5	25.5	24.5	12	4	3	2.5	131

□ 유류오염 평가 및 복원기술 개발

(단위 : 억원)

분야 \ 년도		1단계			2단계			3단계				계
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
유류오염 환경법과 학기술 개발	현장 대응형 신속분석기법 개발	-	-	-	5	3	3	3	5	5	5	29
	정밀 유지문기법 개발 및 국내 표준화	5	3	3	5	4	4	-	-	-		24
	유용수산물 유류 오염 평가기법 개발	-	-	-	3	2	2	2	2	-	-	11
	유류오염 배경자료 확보 및 DB 구축	4	2	2	5	2	2	-	-	-	-	17
소계		9	5	5	18	11	11	5	7	5	5	81
유류의 환경위해 성평가기 술 개발	노출 및 경로 평가기술 개발	5	7	7	5	3	3	-	-	-	-	30
	생물독성 평가기술 개발	5	3	3	-	-	-	-	-	-	-	11
	수산물의 인체위해성 평가기술 개발	-	-	-	4	2	2	3	3	-	-	14
	생태위해성 평가기술 개발	-	-	-	4	3	3	5	3	3	5	26
	생태계 영향 평가기술 개발	4	2	2	3	2	2	-	-	-	-	15
소계		14	12	12	16	10	10	8	6	3	5	96

<계 속>

(단위: 억원)

분야	년도	1단계			2단계			3단계				계
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
유류오염 친환경 복 원 기술	배경자료 확보	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	6
	가속복원기술 개발	10	10	10	10	10	10	-	-	-	-	60
	Pilot test 및 모니터링	12	7	7	7	7	7	7	6	-	-	60
	실용화 적용 단계	-	-	-	-	-	-	5	5	5	5	20
	지침작성 및 표준화	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	4
소계		24	19	19	17	17	17	13	12	6	6	150
유류오염 지역 진단 /예측/관 리 기법	배경자료 확보	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	3
	복원기술 최적 조합 및 진단 최적화 기술	9	9	9	8	8	8	-	-	-	-	51
	유류오염 예측 모델 개발	-	-	-	6	6	6	-	-	-	-	18
	통합관리 기법 개발	-	-	-	-	-	-	5	5	5	5	20
	지침작성 및 표준화	-	-	-	-	-	-	2	2	2	2	8
소계		10	10	10	14	14	14	7	7	7	7	100
총계		57	46	46	65	52	52	33	32	21	23	427

3. 성과지표 설정

□ 유류오염 평가 및 복원기술 개발

성과지표 (가중치)	년도별 목표치	1단계			2단계			3단계				계
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
유류오염 환경법과학 기술 개발	국내외 학술지 논문게재 (0.3)	9	5	5	18	11	11	5	7	5	5	81
	특허출원 등 록 건수(0.2)				5	3	3	2	2			15
	계획대비 관측,조사 실적(0.2)	10	5	5	5	10	5	5				45
	지침서 작성 및 표준화 (0.2)	3	2	2	3	3	3				-	16
	연구개발 홍보 건수 (0.1)	3	3	3	5	3	3	2	2	2	2	28
유류의 환경위해성 평가기술 개발	국내외 학술지 논문게재 (0.3)	14	12	12	16	10	10	8	6	3	5	96
	특허출원 등 록 건수 (0.3)	5	4	4	5	3	3	3	2	1	2	32
	기술이전/실 용화 건수 (0.2)	3	2	2	3	2	2	2	1	1	1	19
	관측,조사/ DB구축 실적 (0.1)	4	4	4	7	5	5	5	3	3	5	45
	연구개발 홍보 건수 (0.1)	5	4	4	5	3	3	3	2	1	2	32

<계 속>

성과지표 (가중치)	년도별 목표치	1단계			2단계			3단계				계
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
유류오염 친 환경 복원 기술	SCI 논문게재 (0.3)	-	2	2	5	5	5	3	3	3	3	31
	특허출원 등 록 건수(0.2)	-	-	-	3	3	3	3	3	-	-	15
	계획대비 관측,조사 실적(0.2)	5	3	3	3	3	3	-	-	-	-	20
	지침서 작성 및 표준화 (0.2)	-	-	-	-	-	-	5	5	3	3	16
	연구개발 홍보 건수 (0.1)	3	3	3	5	3	3	2	2	2	2	28
유류오염지 역 진단/세 척/관리 기 법	SCI 논문게재	-	3	3	5	5	5	3	3	3	3	33
	특허출원 등 록 건수	-	-	-	3	3	3	2	2	-	-	13
	시제품 제작건수	-	-	-	5	5	5	3	3	-	-	21
	계획대비 관측,조사 실적	5	3	3	3	3	3	-	-	-	-	20
	지침서 작성 및 표준화	-	-	-	-	-	-	5	5	5	5	20

제 3 절. 과제 제안요구서(RFP)

1. 허베이스피리트호 원유 유출사고에 따른 해양오염 영향조사 및 생태계장기모니터링

세부사업	해양환경개선 기술개발	기술분야	해양오염방제기술
과제명	해양 유류오염 평가 및 환경복원 기술 개발		
연구기간	10년 이내	예상정부지원액 (총/당해)	334억원 이내/ 31억원 이내

가. 사업추진 필요성

- 2007년 12월 7일에 서해상의 선박충돌로 유조선 허베이스피리트호에서 총 12,547 kl의 원유가 유출되는 국내 최대의 해상 유출사고가 발생하여 서해 환경을 오염시키고 해양생태계에 막대한 영향을 미침.
- 사고에 따른 환경오염 및 생태계영향의 범위와 정도가 크고 영향의 지속기간이 장기화할 것으로 예측됨에 따라 해양오염 및 생태계에 대한 장기 모니터링의 필요성이 대두.
- 사고해역에서 유류 오염의 현황과 변화 추세, 잔존유의 거동 및 생물독성 영향, 대량폐사한 생물종의 회복, 생태계의 안전성 훼손에 따른 변동, 생태계 회복의 지연 이유 등에 대한 장기적인 해답의 제시가 필요함.
- 『허베이 스피리트호 유류오염 사고 피해주민의 지원 및 해양환경의 복원 등에 관한 특별법』 제10조에서는 특별해양환경복원지역의 1) 생태계에 대한 조사 및 연구계획, 2) 생태계에 대한 지속적인 모니터링 계획, 3) 해안, 해양, 해저 등의 복원계획, 4) 그 밖에 해양환경복원에 필요한 사항을 포함하도록 하고 있음.

나. 사업 목표

- 허베이스피리트호 원유 유출사고에 따른 해양환경의 오염과 생태계 영향을 평가하여 환경피해를 입증하고, 오염된 해양환경과 훼손된 해양생태계의 회복 여부를 모니터링하여 환경복원 방안을 제시함.

다. 사업내용 및 범위

● 유류오염 평가

- 유류 표착해안 표면 및 표면하 유징분포 조사
- 해수/퇴적물/생물체내 유류오염 모니터링 및 시공간적 변화 특성 파악
- 유지분법을 이용한 사고유에 대한 노출 식별
- 퇴적물 잔존유의 생물독성 평가 및 검증
- 생체지표를 활용한 현장 서식 어패류의 생물영향 평가
- 잔존 유류성분에 대한 생태 및 인체위해성평가
- 생물학적 정화복원 현장 검증 및 적용

● 생태계장기모니터링

- 부유 및 유영생태계 모니터링 및 시공간 변화특성 평가
- 저서동물 모니터링 및 시공간적 변화특성 평가
 - .연성/경성 조간대 및 조하대 대형 저서동물
 - .연성 조간대 중형 저서동물
 - .공간에 따른 이대패류 생리 기작 평가
 - .저서생태계 오염/회복 평가 지수 기법 정량화
 - .저서생태계 구조 변화 평가
 - .저서 먹이망 구조 파악, 에너지 유전 경로 파악
- 사고해역 해조류/해초류 모니터링 및 시공간적 변화특성 평가
- 연안 생태계 서식처별 생산성 분석
 - 일차 및 이차 생물 생산성의 서식처 별 파악

- 생산성 복원을 위한 공간 평가

라. 소요예산 및 조달방안

- 사업기간: 2010 ~ 2019 (10년간)
- 총 소요예산: 334억 원

(단위: 억원)

세부영역	1단계			2단계	3단계	합계
	2010	2011	2012	2013~2015	2016~2019	
유류오염 오염평가	19	19	19	54	60	171
생태계장기 모니터링	12	13	14	55	69	163
합계	31	32	33	109	129	334

마. 기대효과

- 허베이스피리트호 유류 유출사고에 따른 환경피해 복구 및 배상의 근거 제시
- 사고해역의 환경오염 지속 원인 및 생태계 회복 지연 원인 규명을 통한 조기 환경복원 방안 제시

2. 해양 유류오염평가 및 환경복원 기술 개발

세부사업	해양환경개선 기술개발	기술분야	해양오염방제기술
과제명	해양 유류오염 평가 및 환경복원 기술 개발		
연구기간	10년 이내	예상정부지원액 (총/당해)	427억원 이내/ 57억원 이내

가. 사업추진 필요성

- 허베이스피리트호 유류 유출사고를 계기로 대형 해양 유류 유출사고 대비 필요
- 유류 오염의 영향을 과학적으로 평가 및 복원하기 위한 사전 연구 및 기술개발의 필요성 대두
- 환경피해 입증, 법적 분쟁 및 이해관계 충돌을 해결하기 위한 과학적 증거 확보 연구역량 강화 필요
- 유류오염 해안에 적용할 수 있는 환경복원기술의 개발 및 검증 필요성 대두
- 국가 재난 수준의 대형 해양유류 유출사고에 대비하기 위한 장기적이고 체계적인 연구 및 기술개발 필요

나. 사업 목표

- 해양 유류 유출사고에 따른 환경오염과 영향을 정밀하게 진단·평가하고 오염된 환경을 복원할 수 있는 연구 및 기술의 개발

다. 사업내용 및 범위

- 유류오염 환경법과학기술(Environmental Forensics) 개발
 - 현장 대응형 신속 분석기법 개발
 - 정밀 유지문기법 개발 및 국내 표준화
 - 유용 수산물 유류오염 평가기법 개발
 - 유류오염 배경자료 확보 및 D/B 구축

- 유류오염 환경위해성 평가기술 개발
 - 유류 노출 및 경로 평가기술 개발
 - 유류의 생물독성 평가기술 개발
 - 유류오염 수산물의 인체위해성평가 기술 개발
 - 유류 생태위해성 평가기술 개발
 - 유류오염의 생태계 영향평가 기술 개발
- 유류오염 친환경 복원기법 개발
 - 물리적 가속 정화복원 기술 개발
 - 생물학적 가속 정화복원 기술 개발
 - 파일럿 규모 테스트 및 실용화
- 유류오염 정화복원 진단·예측·관리 기법 개발
 - 정화복원 기술의 최적 조합 및 진단 최적화 기술 개발
 - 해안 유류오염 거동예측 모델 개발
 - 유류오염 지역 통합관리기법 개발

라. 소요예산 및 조달방안

- 사업기간: 2010 ~ 2019 (10년간)
- 총 소요예산: 427억 원

(단위: 억원)

세부영역	1단계			2단계	3단계	합계
	2010	2011	2012	2013~2015	2016~2019	
유류오염 환경법과학 기술개발	9	5	5	40	22	81
유류오염 환경위해성 평가기술 개발	14	12	12	36	22	96
유류오염 친환경복원 기술 개발	24	19	19	51	37	150
유류오염 정화복원 진단·예측·관 리기술 개발	10	10	10	42	28	100
합계	57	46	46	169	109	427

마. 기대효과

- 해양 유류사고에 따른 환경오염 및 피해 저감
- 국제유류오염기금 손해 배상을 향상에 기여
- 해양 유류사고의 과학적 대응을 통한 관리 비용의 절감
- 해양 유류사고에 따른 환경 분쟁 및 갈등의 해소

참고문헌

- Alonso-Gutiérrez J, Costa MM, Figueras A, Albaigés J, Vinãs M, Solanas AM, & Novoa B (2008) *Alcanivorax* strain detected among the cultured bacterial community from sediments affected by the 'Prestige' oil spill. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 362, 25-36.
- American Petroleum Institute, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Coast Guard, and US Environmental Protection Agency (2001). Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments. Joint publication of the API, NOAA, USCG and USEPA, Seattle, Washington, USA.
- Borjana, K.T., George, R.I., and Nelly, E.C. (2001) Biosurfactant production by a new *Pseudomonas putida* strain. *Z. Naturforsch.* 57: 356-360. 2001
- Boufadel, M.C. (1998) The transport of nutrients in beaches: effect of tides, waves, and buoyancy, Department of Civil and Environmental Engineering, Cincinnati, OH, University of Cincinnati, PhD Dissertation, p413.
- Bragg, J.R., Prince, R.C., Harner, E.J., and Atlas, R.M. (1994) Effectiveness of bioremediation for the Exxon Valdez oil spill. *Nature*, 368, 413-418.
- Cameotra SS, Pruthi V (1997) Production and properties of a biosurfactant synthesized by *Arthrobacter protophormiae* -- an Antarctic strain, *World J. Microbiol. Biotechnol.* 13, 137-139.
- CEDRE (2008) Understanding Black Tides. CEDRE, Brest.
- Chao, X.B., Shankar, N.J., Cheong, H.F. (2001) Two - and three-dimensional oil spill model for coastal waters. *Ocean Engineering* 28, 1557 - 1573.
- Dickins, D. (1990) Pacific Coast Oil Spill Project, Environmental Canada and US Department of the Interior.
- Greer, C.W., Masson, L., Comeau, Y., Brousseau, R. and Samson, R. (1993). Application of molecular biology techniques for isolating and monitoring pollutant-degrading bacteria. *Water Pollut. Res. J. Can.* 28, 275-287
- Haapea, P., Tuhkanen, T. (2006) Integrated treatment of PAH contaminated soil by soil washing, ozonation and biological treatment. *J. Hazardous Materials.* B136, 244-250.
- Howlett, E. and Jayko, K. (1998). COZOIL (Coastal Zone Oil Spill Model), Model

improvements and linkage to a Graphical User Interface. 21st Arctic and Marine OilSpill Program (AMOP), Technical Seminar, West Alberta, Canada.

- Huang, J.C., (1983) A review of the state-of-the art of oil spill fate/behavior models. In: Proceedings of the 1983 Oil Spill Conference, Washington DC, 313 - 322
- Humphery, B., Owens, E.H., and Patrick, G. (1992) Coarse Sediment and Oil Database and Fate Model. EE-139, Environment Canada, Environmental Protection Directorate, River Road Environmental Technology Centre, Ottawa, Canada
- Jung, S.-Y., Lee, J.-H., Chae, Y.K. and Kim, S.-J. (2005). Monitoring of microorganisms added into oil-contaminated microenvironments by Terminal-Restriction Fragment Length Polymorphism analysis. *J. Microbiol. Biotechnol.* 15, 1170-1178.
- Kania, J., Hannigan, M., Kujundzic, T.E. (2002) Phytoremediation. 7pp. Available at: <http://www.colorado.edu/MCEN/EnvTox/Phytoremedy.pdf>
- Kvenvolden, K.A., Rosenbauer, R.J., Hostettler, F.D., Lorenson, T.D. (2000) Application of organic geochemistry to coastal tar residues from central California, *Int. Geol. Rev.* 42, 1-14.
- Lafortune I, Juteau P, Déziel E, Lépine F, Beaudet R, & Villemur R (2008). Bacterial diversity of a consortium degrading high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons in a two-liquid phase biosystem. *Microb. Ecol.* DOI 10.1007/s00248-008-9417-4
- Baker K., Marshall S., Killham K., Nicoll G., Campbell C., Prosser J., Nicollier G., and Ricketts D. (2008). Distinguishing effects of soil microbial community structure and physicochemical characteristics to assess the biodegradation capacity of soils with contrasting degradation characteristics. Oral presentation in ISME 12 17-23 Aug. 2008, Cairns, Australia. Available abstract from CD-ROM or www.kenes.com/ismel2
- Li, H. Zhao, Q, Boufadel, M.C. and Venosa, A.D. (2007) A universal nutrient application strategy for the bioremediation of oil-polluted beaches. *Marine Pollution Bulletin*, 54, 1146-1161.
- Mackay, D., Paterson, S., Nadeau, S., (1980) Calculation of the evaporation rate of volatile liquids, In: Proceedings of the National Conference on Control of Hazardous Material Spills, Louisville, KY, 364 - 368.
- Murphy T. P., A. Lawson, M. Kumagai, and J. Babin. 1999. Review of emerging issues in sediment treatment. *Aquatic Ecosystem Health & Management*. 2, 419-434.

- Muyzer, G., De Waal, E.C., and Uitterlinden, A.G. (1993) Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA. *Appl. Environ. Microbiol.* 59, 695-700.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA (1992). Shoreline Countermeasures Manual. Hazardous Materials Response & Assessment Division Seattle, Washington, USA.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA (2000). Shoreline Assessment Manual-3rd Edition. Office of Respon and Restoration, Hazardous Materials Response Division, Seattle, Washington, USA.
- National Research Council (1993) *In Situ Bioremediation. When Does It Work?*, National Academy Press, Washington DC, USA
- Raskin, I., Kumar, P.B.A.N., Dushenkov, S., Salt, D. (1994) Bioconcentration of Heavy metals by plants' *Curr. Opin. Biotechnol.* 5, 285-290.
- Sadowsky, M.J. (1999) In *Phytoremediation: past promises and future practices*, Proceedings of the 8th International Symposium on Microbial Ecology. Halifax, Canada, 1-7.
- Sayler, G.S., Layton, A.C. (1990) Environmental application of nucleic acid hybridization. *Ann Rev Microbiol.* 44, 625-648.
- Shen, H.T., Yapa, P.D., Petroski, M.E. (1986) Simulation of oil slick transport in Great Lakes connecting channels, Report Nos.86-.1 to 4, vols. I-IV, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, Potsdam, NY, USA.
- Shen, H.T., Yapa, P.D. (1988) Oil slick transport in rivers. *Journal of Hydraulic Engineering* 114, 529 - .543.
- Wang, S.-D., Shen, M.-Y., Guo, Y.-K., Tang, J. (2008) Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas. *Ocean Engineering* 35, 503- 510
- Swannell, R.P.J., Basseres, A., Lee, K., and Merlin, F.X. (1994). In Proc. 17th Artic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar, pp. 1273-1286. Environment Canada
- Swannell, R.P.J, Mitchell, D.J., Jones, D.M., Willis, A.L., Lee, K., and Lepo, J.E. (1997). In Proc. 4th Int In Situ on-site Bioreclamation Symposium. 4, 401-406.

- United States Environmental Protection Agency, USEPA (2001a). A Citizen's Guide to Soil Washing. EPA 542-F-01-008, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, USA.
- United States Environmental Protection Agency, USEPA (2001b). A Citizen's Guide to Soil Vapor Extraction and Air Sparging. EPA 542-F-01-006, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, USA.
- United States Environmental Protection Agency, USEPA (2001c). Guidelines for the Bioremediation of marine shorelines and freshwater wetlands. Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Land Remediation and Pollution Control Division, Cincinnati, OH, USA
- Urum, K., Pekdemir, T., Çopur, M. (2004) Surfactants treatment of crude oil contaminated soils. *J. Colloid Interface Sci.* 276, 456 - 464.
- Venosa, A.D., Suidan, M.T., Wrenn, B.A., Stromeier, K.L., Haines, J.R., Eberhart, B.L., King, D.W., and Holder, E. (1996) Bioremediation of experimental oil spill on the shoreline of Delaware Bay. *Environmental Science and Technology*, 30, 1764-1775.
- von Wedel, R. (2000) CytoSol - Cleaning oiled shorelines with a vegetable oil biosolvent. *Spill Science & Technology Bulletin*, 6(5/6), 357-359.
- Wang B, Lai Q, Cui Z, Tan T, & Shao Z (2008) A pyrene-degrading consortium from deep-sea sediment of the West Pacific and its key member *Cycloclasticus* sp. P1. *Environ. Microbiol.* 10, 1948-1963.
- White, D.C., Flemming, C.A., Leung, K.T., and Macnaughton, S.J. (1998) In situ microbial ecology for quantitative assessment, monitoring and risk assessment of pollution remediation in soils, the subsurface, the rhizosphere and in biofilms. *J. Microbiol. Methods*, 32, 93-105.
- Yakimov MM, Timmis KN, & Golyshin PN (2007) Obligate oil-degrading marine bacteria. *Curr. Opin. Biotech.* 18, 257-266.
- Yakubu, M.B. (2007) Biological approach to oil spills remediation in the soil' *African Journal of Biotechnology* 6(24) 2735-2739.
- Yapa, P.D., Shen, H.T., Angamma, K. (1994) Modeling oil spills in a river - lake system. *Journal of Marine System* 4, 453 - 471.
- 김상진 외. 1994. 해양오염방지 기술-해양유류오염 방지 및 환경 회복 기술 개발. 환경부, 과학기술처, 9-4-2. 2차년도 보고서

- 김상진 외. 1995. 해양오염방지 기술-해양유류오염 방지 및 환경 회복기술 개발. 환경부, 과학기술처, 9-4-2. 3차년도 보고서
- 김상진 외. 2005. 독성 유기화합물 오염 퇴적토의 생물정화기술 개발. 환경부 보고서
- 김상진, 권개경, 이정현, 강지현, 정홍배. 2008. 유류로 오염된 해변 모래의 생물정화 기술 적용 연구. 2008년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집 p109
- 이민희, 전지혜, 김인수, 강현민, 김수곤 (2007) 유류오염토양 복원을 위한 과산화수소 용액을 이용한 화학적 토양세척법 실증실험. 환경대기환경학회2007년 환경공동학술대회 초록집. 2505-2508.
- 정하익, 손봉준, 강동우, 이경국 (2004) 초음파 전동기 세척기법을 이용한 오염부지 복원연구. 춘계학술연구회발표논문집, 한국폐기물학회
- 최상일, 김강홍 (2006) 고압공기분사를 이용한 유류오염토양 세척기법의 적용성 연구. 한국지하수토양환경학회지. 11(6), 61-68.
- 황선숙, 박준석, 남궁완 (2007) 초음파 및 환원제 첨가가 중금속 오염토양의 토양세척에 미치는 영향. 한국환경보건학회, 31(1), 75-81.