

우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명

2018. 4. 25.

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 4. 25.

연구책임자 : 김원년

참여연구원 : 김영일, 김형직, 나공태, 서인아
유주형, 이균우, 이소정, 이태희
이희일, 임운혁, 정진용, 최동한
형기성 (가나다 순)

요 약 문

I. 제 목

우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 (기획연구)

II. 연구목표 및 개요

1. 연구목표

- “우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명”의 체계적 추진을 위해 필요한 정보를 제공하고 단계별 기술개발 이정표 제시
- 정책 및 연구동향 분석, 다학제간 종합 연구를 기반으로 한 R&D 사업 체계 구축

2. 연구기간

2017년 8월 1일 - 2018년 2월 28일

III. 연구내용 및 결과

본 연구는 해양으로 유입되는 대기분진의 기원과 거동 규명을 위해 해양과학기술원의 대형 해양 연구 인프라 및 해양 연구 거점을 연결하는 광역적·입체적 연구 체계 수립을 모색하고, 대기분진의 전주기적인 연구를 수행할 수 있는 다학제적(물리/화학/생물/지질/위성) 연구시스템을 구축하기 위해 수행되었다.

<우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명> 연구의 체계적 추진을 위해, 대내·외 환경 분석, 정책·연구 동향 등 전략적 분석을 통해 과제 수행에 필요한 요소기술 분야(대기분진 정량화, 생성 및 기원지 추적, 해양거동 규명, 해양생물·생태계 영향 평가) 및 세부 핵심기술을 도출하고 연차별 목표달성을 위한 세부 기술로드맵을 작성하였다. 이러한 결과를 바탕으로 <월경성 대기분진 정량화 및 해양생물/생태계 영향 평가> 과제제안 요구서를 작성하였다.

목 차

요 약 문	
목 차	i
표 목 차	iii
그림목차	iv
제 1 장 추진 개요	1
제 1 절 기획연구 배경 및 필요성	3
1. 기획연구 배경	3
2. 기획연구 필요성	5
제 2 절 기획의 목표 및 범위	8
1. 기획의 목표	8
2. 기획의 범위	8
제 2 장 환경 분석	11
제 1 절 정책 동향	13
1. 국내 정책동향	13
2. 국외 정책동향	16
제 2 절 국내·외 연구 동향	23
1. 기원지 추적기술	23
2. 미세먼지 생성기작 연구	26
3. 해양 유입 대기분진 정량화 기술	30
4. 생물 영향 평가 기술	36
5. 해양생태계 영향 평가 기술	37
제 3 절 대내·외 환경분석	46
1. 국내 환경분석	46
2. 대외 환경분석	47
3. 시사점 및 전략방향	48
제 3 장 추진 전략	55
제 1 절 비전 및 목표 수립	57

제 2 절 추진 전략	58
제 3 절 주요 추진내용	60
1. 광역 대기분진 채집 시스템 구축	60
2. 대기분진 생성 및 기원 추적 연구	64
3. 해양거동 연구	65
4. 해양생물 영향 연구	67
5. 해양생태계 영향 연구	67
제 4 절 추진 체계	69
제 5 절 기술로드맵	71
1. 기술정의	71
2. 분야별 핵심 기술정의	71
3. 주요이슈	72
4. 기술맵	73
5. 기술로드맵	75
제 4 장 사업추진의 타당성 분석	83
제 1 절 정책적 타당성	85
제 2 절 기술적 타당성	87
제 3 절 경제적 타당성	88
제 5 장 기대효과 및 향후 활용 방안	91
제 1 절 기대 효과	93
제 2 절 활용 방안	95
참고문헌	97
제 6 장 과제제안요구서(RFP)	109
<부 록> 경제성 분석 보고서	

표 목 차

표 2-1. 대기오염방지 행동계획 10대 조치	17
표 2-2. EMEP 네트워크 센터와 태스크포스의 주요기능	22
표 2-3. 강수를 통한 영양염의 유입량의 계절 변동을 나타낸 표 (Xing et al. 2017의 연구 결과 인용)	40
표 2-4. 대기분진 플럭스 및 해양거동 연구사업의 기회요인 및 위협요인	50
표 2-5. 대기분진 플럭스 및 해양거동 연구사업의 강점과 약점	51
표 2-6. 대기분진 플럭스 및 해양거동 연구사업의 SWOT Matrix	52
표 2-7. 「우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명」 연구의 전략 목표	53
표 3-1. 연구사업 추진 세부 기술맵	73
표 4-1. 경제성 분석 결과	89
표 5-1. 직접적 경제적 편익 추정 결과	93

그림목차

그림 1-1. 아시아지역 실시간 대기질 (http://aqicn.org/map/world/)	3
그림 1-2. 기관별 국내 미세먼지 중국영향 비중	4
그림 1-3. 기획대상 연구분야의 상호연관성	8
그림 2-1. 미국 대기질 관리 process	20
그림 2-2. 중국 mineral dust 기원지별 광물조성 변화	25
그림 2-3. 안면도 주변해양에서 해양-대기의 상호작용을 통한 PAHs의 계절적 플럭스 변동 (안준건 외, 2009)	27
그림 2-4. 세계 10대 초미세먼지 오염항만 (Wan et al., 2016)	28
그림 2-5. 대기에 미치는 해양 기원 에어로졸 및 VOCs의 영향 (Carpenter et al., 2012)	30
그림 2-6. 헬리카이트를 활용한 적조 및 해양환경 관측 (A) 360° 관측 카메라 영상, (B) Gopro 카메라 촬영 영상, (C) FLIR 카메라 촬영 영상	35
그림 2-7. 미국 ARM 그룹에서 운영하는 대기관측 시스템 (A) Tethered Balloon (B) DataHawk Small Fixed-Wing UAV (C) Group 3 UAV	35
그림 2-8. 황사의 유입과 엽록소 a의 상관성을 보여주는 연구 결과 (Yoon et al. 2017의 연구 결과 인용)	38
그림 2-9. 황사 발생 빈도의 연변동을 나타낸 그림. 2000년 이후 감소 추세를 명확히 보여줌 (Yoon et al. 2017의 자료)	39
그림 2-10. 중국황사발원지에서 측정된 황사 발생 빈도의 연변동과 월별 발생 빈도를 보여주는 그림 (Wang et al. 2017의 자료 인용)	39
그림 2-11. 북태평양에서 대기분진의 유입이 엽록소 a와 입자성유기탄소 (POC)의 증가를 야기함 (Bishop et al. 2002)	41
그림 2-12. 철의 농도에 따른 인산염 이용성 및 성장 속도의 차이를 보여주는 그림 (Garcia et al. 2015의 연구결과 인용)	42
그림 2-13. 황사로부터 유입된 철 농도 증가에 따른 Vibrio의 성장 속도 증가를 나타낸 그림 (Westrich et al.의 연구 결과 인용)	42
그림 2-14. 질소순환에 참여하는 효소들에 포함된 미량금속의 종류를 나타낸 그림	43
그림 2-15. (a) 2001년 4월 9일 TOMS 에어로졸 인덱스를 이용한 황사 농도	

(b) 동해 해저지형과 해류 시스템(회색 화살표). TWC: Tsushima Warm Current. (c) 1998년부터 2002년 까지 3-5월 동안 에어로졸 인덱스가 2.5가 넘는 기간	44
그림 3-1. 사업의 비전, 핵심목표 및 전략목표	57
그림 3-2. 한국해양과학기술원의 운용 가능/예정 인프라	59
그림 3-3. 우리나라 황동중국해의 장기 해양시계열 관측을 위한 해양과학기지 및 황해중부부이	60
그림 3-4. dry 및 wet deposition 채집기 (TISCH Environmental)	62
그림 3-5. 소청초 과학기지 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축 모식도	62
그림 3-6. 이어도 과학기지 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축 모식도	63
그림 3-7. 동해 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 모식도	64
그림 3-8. KIOST 대기분진 연구 추진 체계	69
그림 3-9. 사업추진 기술 로드맵	75
그림 3-10. 시료 채집 시스템 구축을 위한 기술 로드맵	76
그림 3-11. 대기분진 발생량, 유입량 정량화 기술 로드맵	77
그림 3-12. 해양 및 선박 기원 미세먼지 평가 기술 로드맵	78
그림 3-13. 기원지 추적 및 오염원·기여율 산정 기술 로드맵	79
그림 3-14. 해양거동 규명 기술 로드맵	80
그림 3-15. 해양생물 영향 평가 기술 로드맵	81
그림 3-16. 해양생태계 영향 평가 기술 로드맵	82

제 1 절 기획연구 배경 및 필요성

1. 기획연구 배경

- 우리나라를 포함한 동아시아는 세계적으로 미세먼지/황사 등과 같은 대기 분진의 농도가 높은 지역으로 주요도시들에서 ‘건강에 해로운 (unhealthy)’ 수준의 대기질을 보임(그림 1-1)
- 우리나라의 경우, 연간 200일 이상 미세먼지(PM10) 농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 관측됨(KECO, 2016)

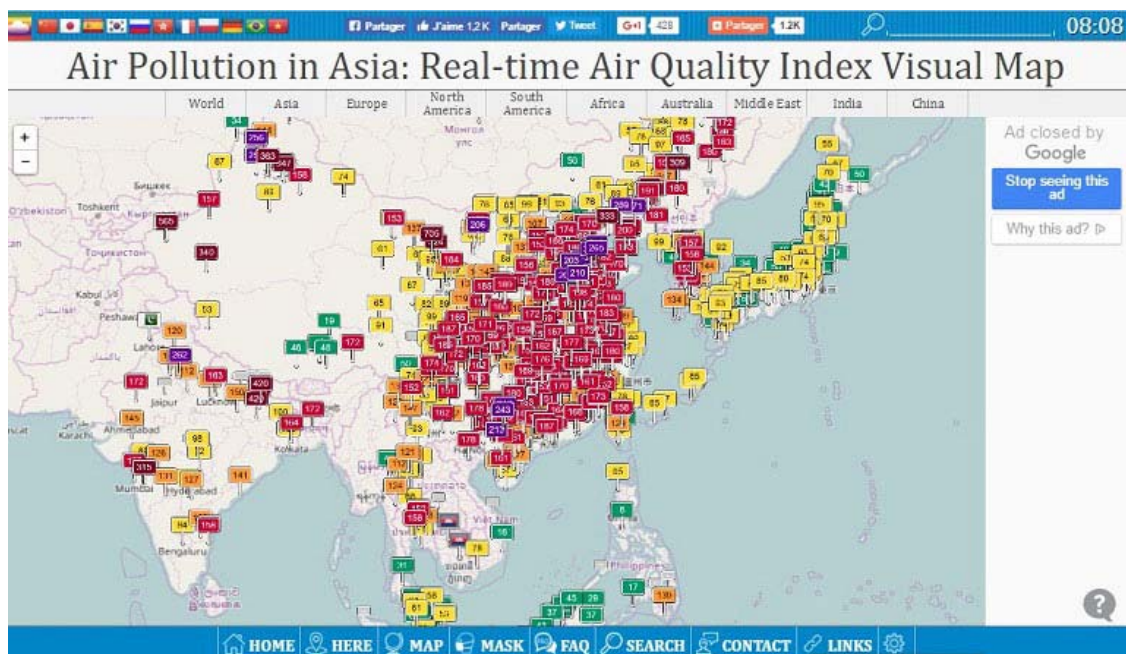


그림 1-1. 아시아지역 실시간 대기질 (<http://aqicn.org/map/world/>)

- WHO는 대기오염 관련 질병으로 사망한 사람이 세계적으로 700만명에 달하는 것으로 추정하였으며, 이는 세계 사망자의 8분의1에 해당함(WHO, 2014)
- 특히 대기오염으로 인한 호흡기 및 피부질환, 농작물과 가축 등의 폐사뿐만 아니라 유아 및 노약자 사망 등 막대한 사회·경제적 문제를 일으키고 있으며, 그 피해 규모도 매년 증가함(경선영 외, 2015; 김인수 외, 2015)

- 대기오염 관련 질환의 조기사망에 대한 경제적 가치를 미국 환경청의 통계적 생명가치(VSL)에 적용하였을 때, 2000년 22억9천만원에서 2015년 34억5천만원으로 증가함(환경부, 2016)
- 대기 질의 농도 분포가 가장 나쁜 지역의 경우 미세먼지 농도를 10%만 줄여도 조기사망자는 588명이 감소하며, 그로 인한 경제적 편익은 약 2조 300억원이고 서울시 전체로 보면 25조 2천억원에 달함(환경부, 2016)
- 급격한 산업화로 인해 중국의 주요도시들에서는 매우 높은 대기분진 농도를 보이고 있으며, 편서풍을 타고 고농도의 대기분진이 우리나라로 유입되는 것으로 알려짐
- 1994년 북경에서 개최된 한·중 정상회담에서 월경성 황사문제 논의를 기점으로 지금까지 꾸준히 공동연구를 진행하고 있으나, 최근 환경부 발표자료 및 미항공우주국과의 공동연구 결과에 의하면 상대적으로 국외 유입 영향이 적다고 평가되는 5~6월의 우리나라 미세먼지 가운데 중국 등 해외에서 발생한 미세먼지 비중이 30% 이상에 달하는 것으로 분석, 실제 고농도 시기에는 국외 유입의 비중이 더 높은 것으로 나타남(그림 2)

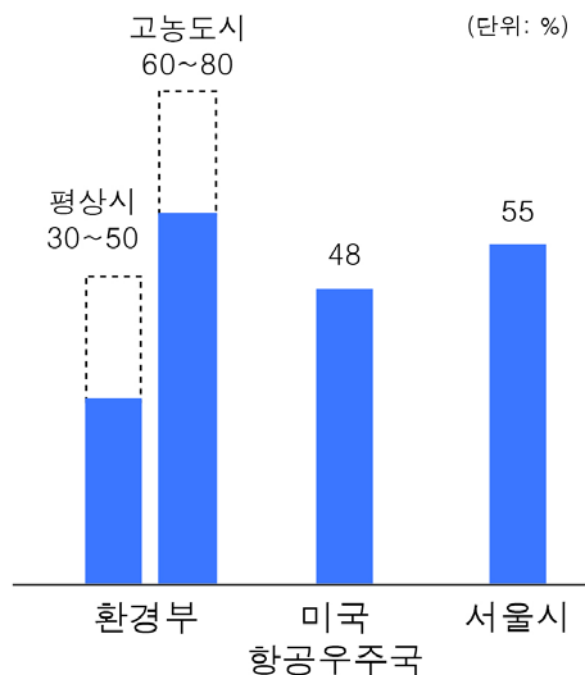


그림 1-2. 기관별 국내 미세먼지 중국영향 비중

- 월경성 대기분진에 대한 연구는 육상의 오염원에 의한 2차오염 영향이 적은 해양에서의 연구 결과가 중요함
- 최근까지 국내에서 진행 중인 대부분의 미세먼지 관련 연구는 육상기원 미세먼지의 발생원 연구, 인체위해성평가 등을 중심으로 진행됨
- 중국 기원 미세먼지의 기여도 등이 민감한 이슈로 대두되어 다양한 방식으로 평가가 진행 중이나 장거리 이동 중의 광화학적 변화 등에 대해서는 상대적으로 연구가 미흡함
- 해양이 대기 기원 오염물질의 저장소로 인식되고 있으나 해양과 대기의 상호작용을 통한 오염물질 순환에 대한 연구는 미진한 상황이며, 대기분진의 침적에 대한 정보뿐만 아니라 해양유입에 의한 물질순환, 해양 생물, 생태계, 환경 변화 등에 대한 연구가 매우 부족함
- 새 정부는 “미세먼지 걱정 없는 쾌적한 대기환경 조성(58)”을 100대 국정과제 중 하나로 추진하고 있으며, 정책적 문제해결을 위해서는 해양에서 대기분진의 발생-이동-확산-침전에 이르는 광역적이고 전주기적인 이해가 필요함

2. 기획연구 필요성

- 해양으로 유입되는 대기분진의 기원과 거동에 대한 연구가 매우 부진한 상황으로, 대기분진이 유발하는 사회·경제·과학적 문제 해결을 위해 대형 해양 연구 인프라 및 해양 연구 거점을 연결하는 광역적·입체적 연구 체계 수립과 대기분진의 전주기적인 연구를 수행할 수 있는 다학제적(물리/화학/생물/지질/위성) 연구시스템 구축이 필요함
- 대기분진을 구성하는 광물, 유해물질 등의 분해/확산-흡착-침전을 포함하는 해양거동과 해양 유입에 따른 해양 환경 및 생물/생태계 영향은 연구가 거의 수행되지 않았음. 대기분진의 해양유입 정량화 및 해양 거동에 따른 환경/생물 영향 규명을 위한 연구수행이 시급함

가. 기술적 중요성

- 광역적 해양유입 대기분진의 국내·외 기여도(기원) 정량적 평가 필요
- 지속적으로 대기분진 연구가 수행되어 왔으나, 국지적 연구의 한계로 국내·외 기원 대기분진의 상대적 기여도 평가 미흡
- 해양과학기술원의 거점 연구소, 제주/울릉 센터, 해양과학기지 등 연구 인프라를 활용을 통해, 육상에 국한된 연구의 틀을 극복하고 서해-한반도-동/남해를 아우르는 종합적인 기여도 평가 가능
- 해양 기원 휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)의 광화학반응을 통해 (초)미세먼지가 생성되는 것으로 밝혀짐. 국내의 경우 해양 식물성 플랑크톤 기원의 황산염 에어로졸인 디메틸설파이드(dimethylsulfide, DMS)의 발생과 해양-대기 상호작용에 대한 일부 연구가 진행된 바 있음
- (초)미세먼지 정량화를 위해 해양에서의 생성량 파악이 중요하며, 우리나라 주변 해역의 해수와 대기 내 VOCs 농도수준 파악, 해양-대기 상호작용을 통한 황산염, 질산염, VOCs 등 물질 플럭스 규명 등에 대한 연구가 필수적임
- 해역별 해양유입 대기분진 특성 및 해양환경/생태계 영향 파악 필요
- 황사와 미세먼지 유입이 해양생물 및 해양환경에 미치는 광역·장기 변동성 연구 부재
- 해양유입 대기분진의 생지화학적 과정(분해/확산-흡착-침전 과정) 이해 필요
- 우리원의 대기분진 연구분야 통합 및 효율화를 통한 전략적 연구시스템 확립
- 물리/화학/생물/지질/위성 등 다학제간 종합 연구를 통해 대기분진의 “발생-이동-해양유·출입-환경/생물영향”에 대한 세계 선도 연구기술 확보

나. 경제/산업적 중요성

- 해양유입 대기분진 정량화, 오염물질 특성 파악, 국내·외 대기분진의 상대적 기여도 평가, 기원지 및 오염원 추적을 통한 정책적 대기분진 저감 방안 및 배출 기준 마련을 위한 기초자료 제공
- 해양기원 미세먼지 발생기작 이해를 통한 대기오염물질 유입량 및 국내 배출량 불확실성 개선
- 특히 해양유입 대기분진의 생물·생태계, 환경 영향 파악을 통한 우리나라 생물자원 보전 및 해양환경 관리 근거마련이 중요
- 관련 환경기술 개발 기초자료로 활용

다. 사회/문화적 중요성

- 해양유입 대기분진 관측 정점 운영 및 인공위성 자료 분석을 통한 육상, 해상 및 대기층을 포함한 입체적 대기분진 자료 제공
- 대기분진의 이동, 확산, 침적 메커니즘에 대한 광역적 정보 제공
- 관할해역의 해양유입 대기분진으로 인한 환경/생태계 영향에 대한 대국민 이해 증진
- 국외 기원 해양유입 대기분진 정량화를 통한 월경성 오염문제 등 외교적 대응 자료 확보

제 2 절 기획의 목표 및 범위

1. 기획의 목표

- “우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명” 의 체계적 추진을 위해 필요한 정보를 제공하고 단계별 기술개발 이정표 제시
- 정책 및 연구동향 분석, 다학제간 종합 연구를 기반으로 한 R&D 사업 체계 구축

2. 기획의 범위

- “우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명” 은 기원지 추적, 유해물질 분석, 해양거동, 환경/생태계 영향, 생물위해성 평가를 위해 인프라 운영과 물리/화학/생물/지질/위성 분야가 상호 유기적으로 결합된 종합 연구수행이 요구됨(그림 1-3).

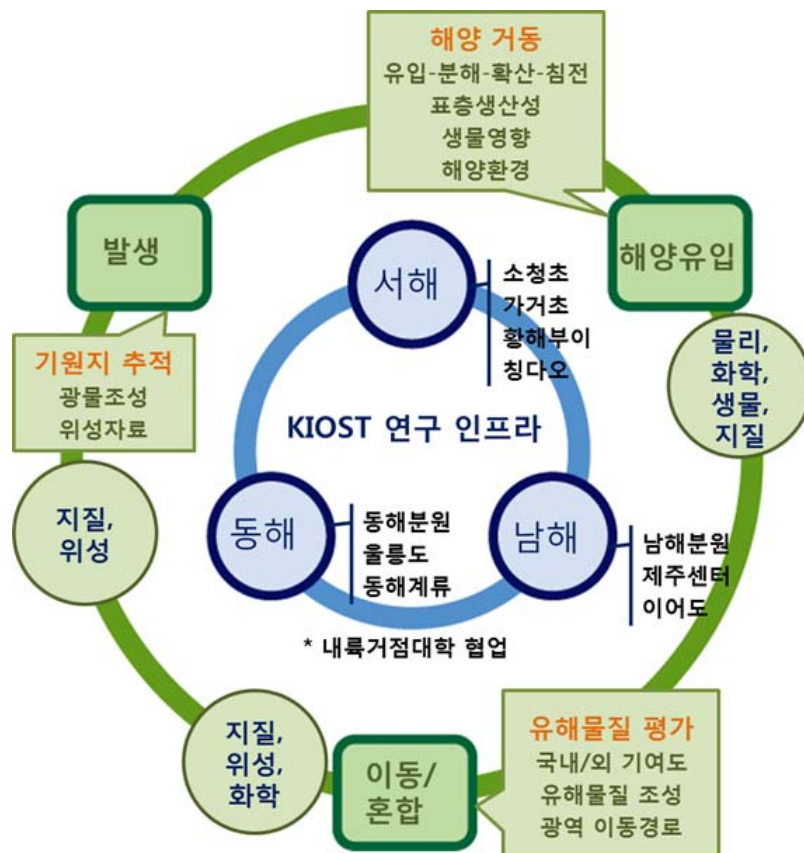


그림 1-3. 기획대상 연구분야의 상호연관성

- 기원지 추적
 - 해양과학기지 운영 방안 수립 및 단계별 대기분진 채집 시스템 구축
 - 인공위성, mineral dust 및 안정동위원소를 활용한 기원지 추적 및 국·내외 기여도 평가
- 미세먼지 생성기작
 - 선박기원 미세먼지 연구
 - 해양 식물성 플랑크톤 기원의 황산염 미세먼지 발생과 해양-대기 상호작용
- 해양 유입 대기분진 정량화
 - 무인기 시스템을 활용한 대기분진 유입량 산정
 - 해양유입 mineral dust, 무기화합물(황산염, 질산염, 암모늄 등)과 중금속(카드뮴, 납, 구리, 아연 등) 정량화 및 안정동위원소 분석
- 물질순환 연구
 - 중국/국내기원의 오염물질 해양 침적 플럭스 산출
 - 대기 분진 유입이 해양 생산력에 미치는 영향 평가
 - 해양 일차생산력 변화가 탄소순환에 미치는 영향 평가
- 생물 영향 평가
 - 표준 대기분진(airborne particulate matter, APM) 확보 및 모델생물개발
 - APM의 생물영향 연구
 - APM의 생태위해성 연구
- 해양생태계 영향 연구
 - 황사 집중기의 생태계 변동 기작
 - (초)미세 대기분진의 유입에 따른 생물 군집 반응
 - 생태계 영향 모니터링 체계 구축
 - 대기분진유입특성-해양물리특성-해양화학특성-생태계변동의 연관성 규명 및 모델링

제 2 장

환경 분석

제 1 절 정책 동향

1. 국내 정책동향

□ 문재인 정부 정책

- 2022년까지 예산 7조 2000억원을 투입해 미세먼지 배출량을 30% 이상 감축
- 이는 2016년 6월 마련한 ‘미세먼지 저감 종합대책’ (2014년 대비 2022년까지 14% 감축)보다 2배 높은 수준의 감축
- 2018년부터 미세먼지 환경 기준을 미국, 일본 등 선진국 수준인 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 현재(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 낮춤
- 2005년 7월 이전에 제작된 노후 경유차(286만대)에 대해 조기 폐차, 운행제한 확대 등을 통해 임기 내 221만대를 퇴출 계획
- 중국발 미세먼지, 한-중 정상외교의 핵심의제로 상정

○ 법·제도 / 모니터링

- 측정 및 예보 인프라 대폭 보강
- 사회·경제적 여건, 직업 특성상 고농도 미세먼지에 노출될 우려가 큰 취약집단(risk group: 어르신, 어린이, 임산부, 건설/조선/교통경찰 등 야외 근로자)에 대한 맞춤형 대응지침을 마련하여 피해 최소화
- 산업 및 생활환경 개선

○ 에너지 분야

- 봄철 노후 석탄화력발전기 가동 전면 중단

○ 수송 분야

- 경유차 퇴출 중장기 로드맵 추진
- 친환경차 보급 확대

○ 국제 외교

- 중국발 미세먼지, 한-중 정상외교의 핵심의제로 상정
- 집권 초 한-중 정상회담 시 주요 의제로 추진
- 동북아 6개국 환경협정 추진

□ 환경부 미세먼지 관리 종합대책 (환경부)

○ 기본방향



○ 핵심내용

분야		중점 추진과제
국내 배출 감축	① 발전부문	① 노후 석탄화력 폐지 등 석탄발전 비중 축소 ② 발전용 에너지 세율체계 조정 검토 ③ 친환경적 제8차 전력수급계획 수립 ④ 재생에너지 보급 확대
	② 산업부문	⑤ 총량관리 대상지역 확대 및 먼지총량제 실시 ⑥ 질소산화물 배출부과금 신설
	③ 수송부문	⑦ 노후 경유차 저공해화 및 운행제한 확대 ⑧ LPG차, 전기차 등 친환경차 보급 확대 ⑨ 친환경차협력금 제도 시행 ⑩ 선박 건설기계 미세먼지 관리 강화
	④ 생활부문	⑪ 공사장 불법소각 등 관리 사각지대 집중 관리 ⑫ 도로청소차 보급 및 도시 숲 확대
국제 협력	⑤ 한·중, 동아시아 미세먼지 협력	⑬ 한·중 정상회의를 통한 공동선언문 발표 추진 ⑭ 동아시아 미세먼지 저감 협약 체결 검토
민감 계층 보호	⑥ 민감계층 보호 인프라 및 서비스	⑮ 아이들을 위한 실내기준 마련 ⑯ 어린이집, 학교 주변 미세먼지 측정망 우선 설치 ⑰ 학교 실내 체육시설 확대 ⑱ 민감계층 대상 찾아가는 케어서비스
정책 기반	⑦ 과학적 관리 기반	⑲ 환경위성 등 활용한 측정 및 예경보시스템 강화 ⑳ 미세먼지 국가전략 프로젝트(R&D) 추진

○ 단기, 중장기 대책

• 단기대책('17년9월~'18년 상반기)

- (응급 감축조치) 고농도 미세먼지 발생에 대응, 응급 감축조치 우선 실시



- (고농도 비상저감조치) 고농도 발령시 수도권 지역에 3가지 유형(수도권 전체, 수도권 공공, 서울권역) 비상저감조치(차량부제, 사업장 운영 조정) 시행



- (국민건강 선제적 보호) 미세먼지 환경기준을 선진국 수준 강화(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow 35\mu\text{g}/\text{m}^3$), 민감계층 이용시설의 실내 미세먼지(PM2.5) 유지기준 신설



- (민감계층 활동공간 개선) 어린이 통학차량 친환경차 전환(경유차→LPG·CNG차), 체육관 없는 모든 초·중·고교(979개교) 실내 체육시설 설치 지원('19년 완료), 공기정화장치 설치 지원('17년 시범사업 후 추진)



- 중장기대책('18년 하반기~'22년)
 - (감축목표) 종전대책 대비 2배 높은 목표 설정(종전 '21년까지 14% → '22년까지 30%)
 - (국내배출량 획기적 축) 사회 전 부문에 대한 특단의 저감대책 추진



- (강화된 환경서비스 제공) 민감계층 이용시설 집중 지역을 '프리존'으로 지정, 특별관리(노후경유차 출입제한, 사업장 운영조정 등), 민감계층 찾아가는 케어서비스 실시
- (한-중 등 국제협력 강화) 미세먼지 이슈를 한중 정상회의 의제화, 국내 실질 영향이 큰 지역(화북성·산동성 등) 대상 협력사업 강화

2. 국외 정책동향

□ 중국

○ 베이징 공기정화 프로젝트

- 2015년부터 베이징에 있는 공장들을 산둥성과 허베이성 쪽으로 이전
- 현재 약 30% 완료, 2020년 까지 100% 이전 목표
- 2017년 1월 공기오염 측정결과, 한국의 서울이 베이징, 인도 뉴델리와 함께 가장 심각하게 공기가 오염된 지역으로 나타남
- 베이징의 공기는 점점 깨끗해지는 추세

○ 대기오염방지 행동계획(2013~2017년)

- 산업구조조정, 낙후생산시설 폐쇄, 관련법령 정비 및 지역방어대책 완비 등 10가지 조치
- ‘중화인민공화국 환경보호세법’ 제정, 탄소세로 알려진 이산화탄소 배출세 포함.
- 2013년 9월 중국 국무원은 대기 중 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5) 관리를 위해 2017년까지 5년간 총 1조 7,000억 위안(약 304조 원)을 투입한다는 계획을 담은 ‘대기오염방지 행동계획’ 발표(표 2-1).

표 2-1. 대기오염방지 행동계획 10대 조치

구분	내용
1. 종합관리역량 제고	제조업체의 대기오염물질 및 지역 환경오염원에 대한 관리와 이동 오염원에대한 예방 강화
2. 산업구조 고도화	에너지 다소비, 오염물질 다배출 산업의 생산능력 신규 증설 엄격 통제, 낙후생산시설 퇴출, 과잉생산능력 축소, 생산능력과잉 심각 업종의 규정 위반 건설프로젝트 진행 중지
3. 에너지 소비구조 개선	석탄 총 소비량 통제, 청정에너지의 대체이용 확대, 석탄의 청정이용 추진, 에너지 사용효율 제고
4. 모니터링 체계 구축 및 책임 평가제	PM2.5 모니터링 시스템 및 정보공개체계 구축, 책임평가제 실시, 오염심각 경보체계 확립
기타	5. 관련 기술개발 및 혁신능력 강화 6. 에너지 절감 및 환경보호 평가 기준 제고 7. 시장 메커니즘을 활용한 환경경제 구현 8. 대기오염방지법 수정 등 관련 법제 정비 9. 지역 간 협력 메커니즘 구축 10. 정부와 기업, 국민의 환경보호 총력전 전개 추진

□ 일본

○ 미세먼지 종합 대책

- 배경
 - 초미세먼지(PM2.5) 대책은 대기환경행정의 큰 과제
 - 2013년1월 이후 중국 기원의 PM2.5로 심각한 대기오염, 일본에서의 농도 상승
 - PM2.5에 의한 대기오염에 대한 포괄적인 대응 필요

- 정책 목표
 - 국민의 안전 확보
 - 환경기준 달성
 - 아시아지역의 청정한 대기 공유

- 목표달성을 위한 대책
 - 적절한 주의환기 실시: 적절한 주의환기 및 시뮬레이션 모델 구축
 - 중국 체류 내국인 대응 강화: 일본인에 대한 정보제공 강화, 현지에 의사 파견
 - PM2.5의 현상 규명과 감축 대책 검토: 중앙환경심의회 전문위원회를 설치하고 현상규명과 감축대책을 종합적으로 검토
 - 아시아 지역에서의 지역대책 추진: 한중일의 정책대화 등 협력
 - 양자간 연계강화: 일중간의 연계사업 실시, 한국과 PM2.5 자료 공유

- 상기 대책을 위한 기반 사업
 - 발생원 정보 정비
 - 2차 생성기구 해명
 - 모델구축
 - 대기환경 모니터링의 충실
 - 건강영향에 관한 자료 확보

□ 미국

○ 대기질 관리 제도

- 1967년 제정된 CAA(Clean Air Act)에 근거함
- 기관별 역할분담
 - 연방정부: 대기질 관리 총괄, 주정부관리, 대기환경기준 제정, 측정망 운영 등 정책업무 수행
 - 주정부: 연방정부의 기준보다 강화된 기준, 방법 등을 자체에서 수립하고 연방정부의 승인을 받아 지역 대기질 관리
- 주정부는 자체에서 수립한 SIP (State Implementation Plan)를 연방정부로부터 승인받아 동 계획에 따라 대기질 관리
- 주정부의 수행 계획(SIP) 내용(EPA의 승인 사항)
 - 대기환경기준 준수여부 및 수행 전략
 - 배출허용한계 준수를 위한 강제이행 규제조치, 일정, 비용
 - 계획 수행에 필요한 인력, 예산, 권한 등
 - 대기질 측정 및 고정배출원의 측정자료
 - 비상시의 대책 및 대기질 모델링 실시 자료 등
 - 기존 배출원에 대한 수행 가능한 규제 전략 강구
 - 신규 및 기존의 고정배출원 허가과 변경에 대한 사항 등

○ 대기측정망 관리 체계

- EPA OAR(환경부 대기보전국)하의 OAQPS(환경부 기후대기정책과)에서 NERL의 기술적 자문을 받아 전국 대기질(측정망 포함)을 총괄 관리하며 산하에 10개 Region을 두고 권역 대기질은 주정부에서 지역 대기질은 지방 정부에서 관리

○ 대기환경기준

- Clean Air Act에 따라 2가지 유형의 국가대기환경기준(NAAQS, National Ambient air quality standards)를 제정
 - Primary Standards: 천식환자, 어린이, 노인 등 민감군을 포함한 공공의 건강을 보호하기 위한 기준

- Secondary Standards: 공공복리를 보호하고 시정감소, 동물·식물·빌딩의 손상을 막기 위한 기준
- NAAQS는 5년 주기로 사정, 이행, 평가의 단계를 거쳐 재설정됨(그림 2-1)

The Air Quality Management Process

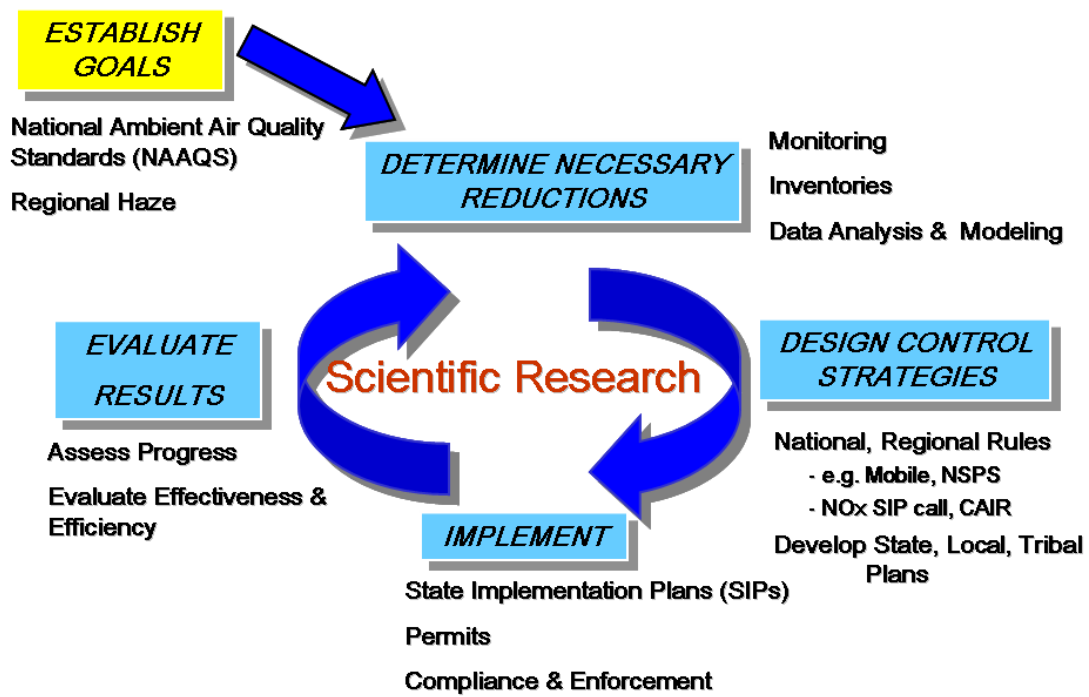


그림 2-1. 미국 대기질 관리 process

- 대기환경기준을 만족하지 못하는 지역(Non-attainment)은 어떻게 오염을 저감시킬지, 언제까지 기준을 만족시킬지에 대한 구체적인 자료를 제출해야 함
- 연방정부의 기준을 만족하지 못하는 지역에 대해서는 주정부 기준을 준수하도록 권고하고 패널티 부여
 - 1단계 패널티: 18개월 이내에 오염물질 저감에 대한 자료제출
 - 2단계 패널티: 고속도로 건설 등의 펀드 예산 삭감

□ 유럽

- 유럽감시평가 프로그램(European Monitoring and Evaluation Program,

EMEP)

- 유럽의 대기오염물질 장거리 수송 모니터링 및 평가를 위한 협력 프로그램
- 초국경적 대기오염 문제 해결에 관한 국제 협력을 위한 과학적 기반 및 정책중심 프로그램으로, 「장거리이동 대기오염물질에 대한 협약」(Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, CLRTAP)에 의거함
- EMEP 워크플랜을 지원하기 위해 5개의 EMEP 센터와 4개의 태스크포스가 있음
- 1979년 협정된 「장거리이동 대기오염물질에 대한 협약」(CLRTAP)은 34개국과 유럽연합이 참여한 환경보호의 핵심 수단 중 하나로서, 대기오염의 영향 저감에 관한 협조를 위해 광범위한 틀을 수립하고, 법적 구속력이 있는 제도적 장치를 통한 오염물질 배출 통제에 대해 구체적인 단계를 협상함
- EMEP 프로그램의 주요 목표는 CLRTAP 협약 하의 정부 및 보조기관에 정규 과학 정보를 정기적으로 제공하여, 협의된 배출 감축에 관한 국제 프로토콜의 개발 및 평가를 지원
- 초기 EMEP 프로그램은 산성화와 부영양화의 월경성 이동을 평가하는 데 초점을 맞추었음. 이후 프로그램의 범위는 지상 수준의 오존의 형성 (ground level ozone formation), 그리고 최근에는 잔류성유기오염물질(POPs), 중금속 및 미립자 물질로 확대됨
- EMEP 프로그램은 (1) 배출량 데이터 수집, (2) 대기질 및 강수질 측정, (3) 대기확산모델링의 3가지 주요 요소에 의존하며, 이 세가지 요소의 결합을 통해 대기오염물질의 배출, 농도 및 침전량, 월경성 플럭스의 양과 중요성, 그리고 임계수준과 임계값의 초과량에 대한 평가와 정기적 보고를 수행함
- EMEP 프로그램은 배출 데이터, 측정 데이터 및 통합 평가결과의 체계적인 수집, 분석 및 보고에 기여하는 과학자 및 국가전문가의 광범위한 네트워크와 협력하여 수행됨
- 현재 4개의 네트워크센터와 4개의 태스크포스를 운영함

표 2-2. EMEP 네트워크 센터와 태스크포스의 주요기능

구분	주요기능	위치/ 주도국	
Network Centre	화학종합분석센터 (CCC)	<ul style="list-style-type: none"> · 대기질 및 산침착 모니터링 총괄 · 정도관리와 모니터링 자료 관리 	노르웨이 대기연구센터
	동부기후종합센터 (MSC-E)	<ul style="list-style-type: none"> · 대기오염물질 모델링 및 평가 	러시아 기후종합센터
	서부기후종합센터 (MSC-W)	<ul style="list-style-type: none"> · 배출량 자료수집 및 배출 · 미래 배출량 예측 	노르웨이 기상청
	통합평가모델센터 (CIAM)	<ul style="list-style-type: none"> · RAINS 모델을 이용한 오염물질 전과정 평가 	오스트리아 국제시스템 해석연구소
Task Force	배출량과 예측 TF	<ul style="list-style-type: none"> · 유럽 배출량 산출 · 배출계수 토론을 위한 회의 개최 · 배출량 자료의 평가방법 개발 · 미래 배출량 예측방법 개발 	노르웨이
	측정과 모델링 TF	<ul style="list-style-type: none"> · EMEP 모델링과 모니터링 평가 · 조약 개발과 이행을 위한 지원 평가 	영국 WMO
	통합평가모델링 TF	<ul style="list-style-type: none"> · 정책사용자가 사용가능한 모델 개발 · 조약개발에 직결되는 과학정보 가공 	네덜란드
	대기오염물질 대륙간 이동 TF	<ul style="list-style-type: none"> · 대륙간 이동에 대한 이해 증진 · 대륙간 이동관련 조약에 기초자료 제공 	미국 UNECE

제 2 절 국내·외 연구 동향

1. 기원지 추적기술

(1) 인공위성 및 무인기 시스템 활용

국내 연구 동향

- 이권호 외(2006)은 MODIS 위성영상을 이용하여 주요 대기오염 에어로졸인 먼지입자, 해염입자, 오염입자를 구분하였고, 동북아시아 대기 에어로졸의 대표적인 종류별 특성에 관하여 분석함.
- 이 연구에서는 AOT (Aerosol Optical Thickness) 농도 분포가 중국연안에서 태평양으로 갈수록 낮아지는 결과를 통해 기원지 추정연구가 수행됨.
- MODIS Terra/Aqua 센서의 AOD, FW 자료를 통해 황사와 인위적 오염입자의 공간 분포 및 입자크기 특성 분석이 이루어졌고, 발생기원이 다른 모래폭풍과 인위적 오염입자는 MODIS AOD와 FW에서 뚜렷한 차이를 보임(김학성 외, 2010).
- 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다 시스템을 이용하여 발원지 및 이동경로에 따른 황사의 광학적 특성을 연구함(신성균 외, 2014).
- 라만 라이다 시스템 분석으로부터 산출된 평광소멸도를 이용하여 황사의 층을 구분해 내었고, 이 정보들은 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 통해 황사 층의 역궤적을 추적함.
- 이 연구 결과를 통해 한반도로 유입되는 황사의 대부분은 고비사막을 기원하는 경우가 가장 많은 것을 규명함.
- 그럼에도 불구하고 국외 사례와 비교하여 다양한 플랫폼 이용과 기술개발이 활성화 되어있지 않은 실정이며, 원격탐사 자료 검증과 정확도 향상을 위한 더욱 많은 현장 자료 수집이 필요함.

국외 연구 동향

- 미국 NOAA는 인공위성을 이용하여 전지구적 규모로 에어로졸의 분포를 지속적으로 관측하고 있으며, 대기중 에어로졸 입자가 기후변화에 직접 및 간접적으로 상당 수준 관련되어 있다는 것을 확인함
- Mandija 연구팀은 MODIS와 MSG/SEVIRI 센서를 이용하여 에어로졸의 분포를 탐지하였고, Hysplit, NAAPS, DREAM 모델을 이용하여 에어로졸의

기원을 추적하는 연구를 진행함(Mandija et al., 2017).

- 이 연구를 통해 Sahara 지역 기원의 광물분진이 Barcelona와 Granada 지역으로 이동하는 것을 밝힘.
- Lasteran et al. (2016)은 기존의 기구를 띄우는 샘플링 방식을 개선하기 위하여 무인기에 포집장치를 부착하여 샘플링 가능한 기술을 개발함.
- 이를 통하여 높은 고도의 에어로졸 특성과 분포 분석이 가능함을 제시.

(2) Mineral dust

- 중국과 몽고에 분포하는 건조지역은 사하라 사막 다음으로 큰 mineral dust의 공급지이며, 매해 약 800 Tg의 mineral dust를 발생시킴 (Han et al., 2008).
- 중국에는 mineral dust를 공급할 수 있는 건조지역이 광범위하게 분포하며, 각 지역에 분포하는 토양은 지역마다 다른 동위원소 조성, 광물조성, 지화학 조성을 보임(예, Chen et al., 2007; Seo et al., 2014) (그림 2-2).
- Mineral dust에 포함된 석영입자의 결정도(crystallinity index)와 electron spin resonance (ESR) 또한 기원 지역에 따라 다른 특성을 보임 (Nagashima et al., 2007). 따라서 바람에 의해 이동하여 퇴적된 mineral dust의 성분 분석을 통해 이들의 기원지역을 밝혀낼 수 있음.
- 황사 기간 동안 서울 또는 근해에서 채취된 먼지 입자의 광물조성, 지화학 조성, Sr-Nd 동위원소 조성 연구를 통해 봄철 황사는 주로 중국 북부에 위치한 사막에서 북서계절풍의해 공급되며, 이외의 계절에는 편서풍에 의해 타클리마칸 사막을 포함한 다양한 지역에서 공급되는 것으로 파악됨(Jeong, 2008; Lee et al., 2010; Nagashima et al., 2011).
- 편서풍에 의해 주로 이동하는 중국 기원 입자는 적도수렴대 이북에 위치하는 북태평양 전역에 영향을 미치며 북아메리카와 그린랜드에도 퇴적되는 것으로 알려짐.
- 북서계절풍의 영향이 강한 북서태평양 지역 또한 편서풍에 의해 공급된 풍성기원입자가 우세하게 퇴적되는 것으로 밝혀짐(Seo et al., 2014).
- 과거 퇴적기록에 따르면 추운시기(stadial)에는 몽고기원의 입자가 상대적으로 따뜻한 시기에는 타클리마칸 기원의 입자가 주로 동아시아 지역에 공급되는 것으로 알려져 있으며, 이는 추운 시기동안 편서풍의 경로가 낮은 여름까지 히말라야 남부에 머물러 있기 때문인 것으로 해석됨 (Nagashima et al., 2011, 2013)

- 먼지입자는 대기 복사 수지 및 해양 표층생산성을 조절하여 기후변화에 지대한 영향을 미침
- 특히 풍성기원입자는 철의 공급량을 높여 중위도 저생산대 지역의 표층 생산성 증대에 큰 영향을 미치는 것으로 파악됨(Han et al., 2011)

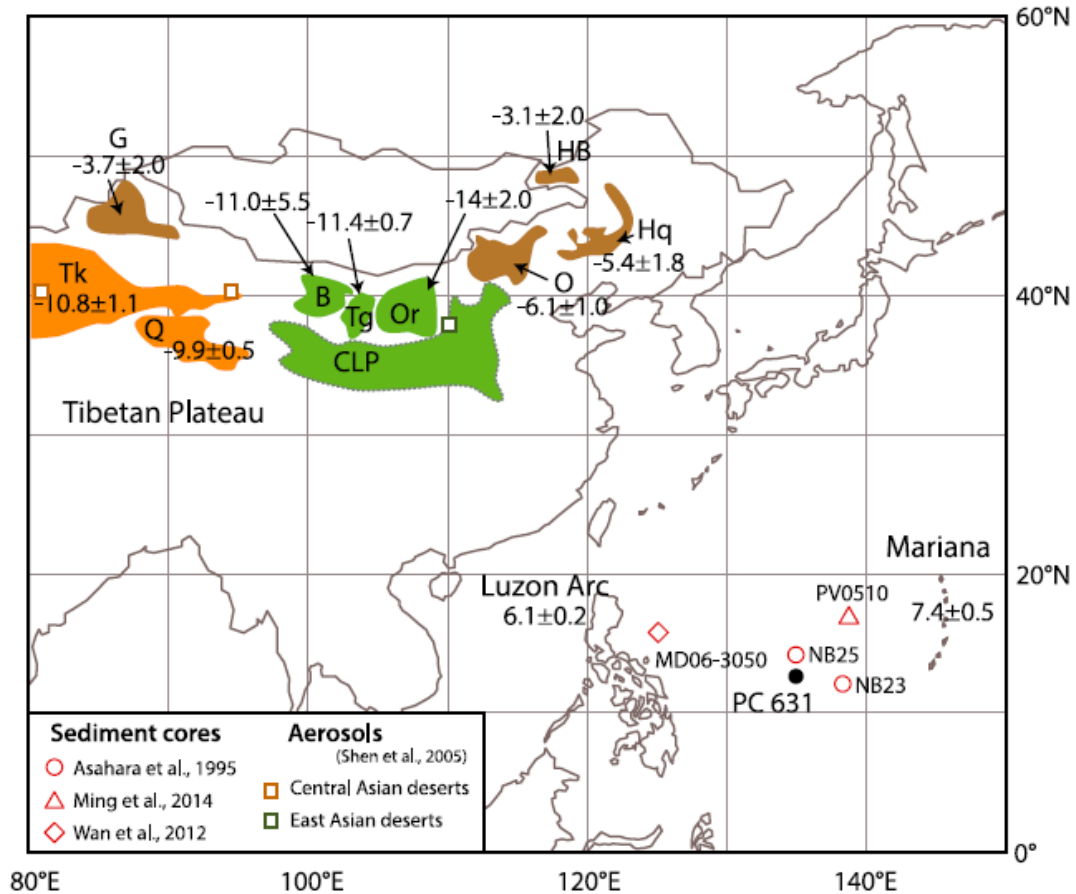


그림 2-2. 중국 mineral dust 기원지별 광물조성 변화

(3) Chemical tracer

국내 연구 동향

- 국내 미세먼지(PM2.5, PM10)에 대한 연구는 PM10/PM2.5 sequential Air Sampler (APM Engineering, PMS-103, Korea) 혹은 대용량 공기채취기 (high volume air sampler, DHA-80, Digital)를 이용하여 테프론 및 GF/F 필터 내 주요이온 및 미량원소의 정량적인 분석이 주를 이루고 있음(이순봉 외, 2011; 김기주 외., 2014)
- 이러한 농도 위주의 정량적인 접근은 통계적인 방법인 요인분석(factor

analysis)로 인위적인 오염기원 성분, 토양기원, 해염성분 등의 구분하여 기원을 추정하고자 하였음

- 유색 용존 유기물(colored dissolved organic matter)을 이용하여, 서울시 강수시료에 포함된 유기물의 기원지 추적연구를 진행함(Yan and Kim, 2017)
- 입자상 탄소와 질소의 안정동위원소 비를 이용하여 대기 중 미세먼지의 배출원 및 배출지역을 추적하는 연구가 시작되었으며 미세먼지 내 암모늄과 질산염의 질소 동위원소비는 장거리 이동 오염물질의 추적자로 사용가능성은 확인한 바 있으나, 미량금속(중금속) 안정동위원소에 대한 연구사례는 없음

국외 연구 동향

- 금속 안정동위원소(metallic stable isotope)를 활용하여 황사(asian or aeolian dust)의 기원을 추적하는 연구는 Pu (Dong et al. 2017), Sr-Nb (Nakano et al., 2005), Pb (Lee and Yu, 2010; Du et al., 2017) 동위원소 연구결과가 제시된 바 있음
- 이들 연구는 토양 및 퇴적물 시료 중심의 연구로 황사가 발생한 지역에 대한 정보를 포함하여 황사의 영향을 받고 있는지가 주요한 관심사임.
- 미세먼지(PM2.5, PM10) 내 탄소(C)와 질소(N) 동위원소를 이용하여 오염 기원을 밝히기 위한 연구(Gorka et al., 2014; Lopez-Veneroni, 2009; Widory, 2007)가 시작되고 있음
- 금속원소인 Pb 동위원소를 통해 미세먼지 오염기작 및 기원을 밝히기 위한 연구가 일부 존재하나(Widory et al., 2010; Chen et al., 2006, Graney et al., 2017), 주로 차량기원(vehicle exhaust)에 영향을 받는 대도시 위주의 연구결과임
- 미세먼지는 복합적인 오염원이 존재하며 발생기작이 다르므로, 이를 추적하기 위한 금속 안정동위원소에 대한 연구결과는 없음

2. 미세먼지 생성기작 연구

국내 연구 동향

- 환경관리공단에서는 2005년부터 전국 97개 시, 군에 설치된 322개의 도시 대기 측정망, 도로변 대기 측정망, 국가배경 측정망, 교외 대기 측정망에서 측정된 대기환경기준물질의 측정자료를 “에어코리아” 홈페이지를

통해 전국 실시간 대기오염도를 공개하고 있음

- 대기환경기준물질 6개 항목(아황산가스, 일산화탄소, 이산화질소, 미세먼지(PM10,PM2.5), 오존)에 대한 대기오염도를 대기오염 시계, 대기오염 달력 등의 표현 방식과 접목하여 시간대별, 일자별, 요일별로 제공하며, 인체 영향과 체감오염도를 반영한 통합대기환경지수도 동시에 제공
- 이에 반해 해양 및 해안 대기질, 그리고 대기-해양 상호작용에 따른 미세먼지 생성에 대해서는 상대적으로 연구가 미진하며, 연구 인프라 또한 제한적으로 설치되어 있음
- 해양 환경에서 실시된 대표적인 연구로 해양의 에어로졸 발생량 측정을 위해 해수 내 비용존성 입자와 생물기원 물질을 중심으로 측정했으며, 오염원 주변지역과 생물 생산성이 높은 지역에서 비용존성 입자의 농도가 높은 것을 확인한 바 있음(Park et al., 2014)
- 해양 인근 정점에서 진행된 미세먼지 연구는 주로 주변 오염원을 피하기 위해 제주 고산, 백령도 등의 정점을 선정하고 미세먼지의 농도 및 물리, 화학적 특성을 장기 모니터링한 결과가 대부분임

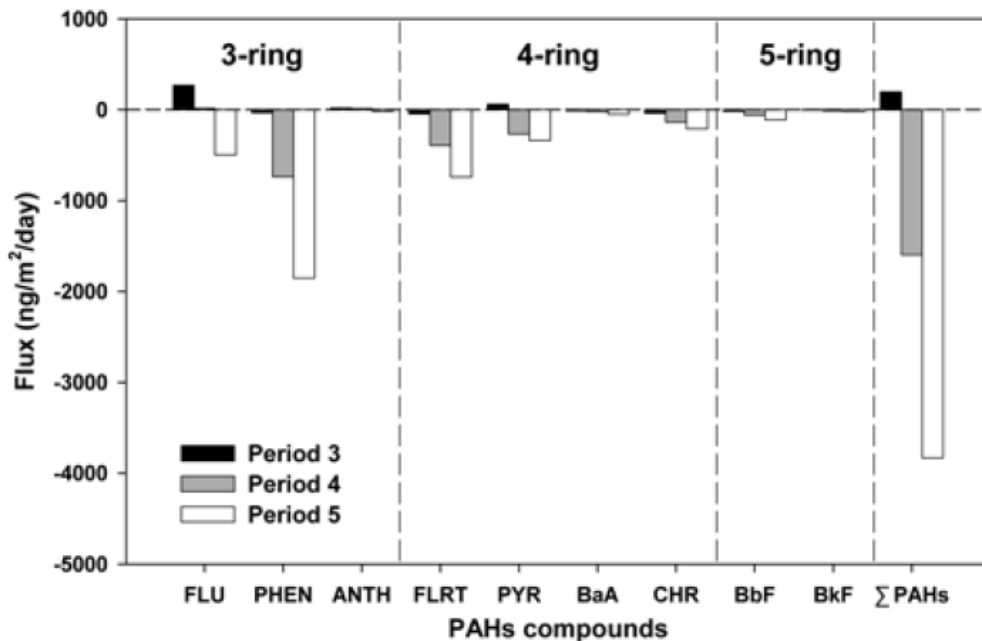


그림 2-3. 안면도 주변해양에서 해양-대기의 상호작용을 통한 PAHs의 계절적 플럭스 변동 (안준건 외, 2009)

- 2008년 제주도 고산지역에서 PM10, PM2.5 모니터링 결과 기류가 중국대륙과 한반도로부터 유입되었을 때 인위적인 오염원의 영향을 많이 받고, 북태평양이나 동해를 통해 유입되었을 때 오염원의 영향이 상대적으로

낮은 것을 확인함(이순봉 외, 2011)

- 이와 별개로 안준건 외(2009)의 안면도에서 수행한 대기 중 가스상 PAHs의 계절적 변동연구에 따르면 황해가 하계에 일부 저분자량 PAHs의 저장고로 작용하며, 황해 대기오염의 발생원이 될 수 있음을 규명(그림 2-3).
- 이 연구는 해양이 초미세먼지의 전구체가 될 수 있는 휘발성 유기화합물 질(VOCs)의 저장고 및 오염원이 될 수 있음을 시사함
- 새 정부의 미세먼지 저감정책과 맞물려 부산, 울산, 인천 등 주요 항만도시의 대기 오염도가 위험수준에 이르렀다는 진단이 나오면서 주요 항만의 미세먼지 저감사업이 한층 탄력을 받고 있음
- 또한 각 항만들은 그간 추진해왔던 그린포트 조성사업에서 한걸음 더 나아가 항만전용 대기오염측정소를 설치하고 AMP (alternative maritime power) 시설을 확대하는 등 대응책을 적극 모색하고 있음(강미주, 2017)

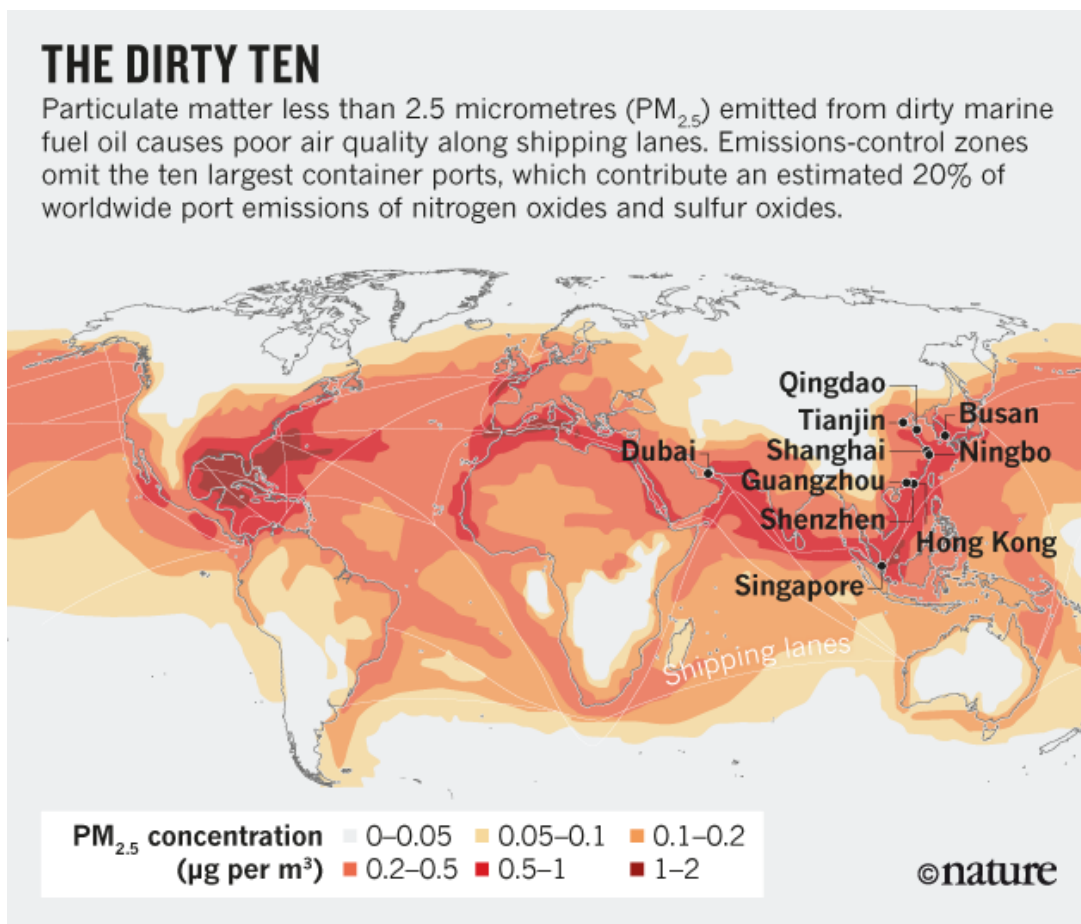


그림 2-4. 세계 10대 초미세먼지 오염항만 (Wan et al., 2016)

- 2016년 <네이처>에 따르면, 국내 대표 항만인 부산항은 중국 7개 항만,

두바이, 싱가포르와 함께 ‘세계 10대 초미세먼지 오염항만(The Dirty Ten)’ 으로 선정됨 (그림 2-4).

- 2016년 부산의 초미세먼지 오염도는 전국 최고인 27 ug/m^3 (환경기준 25)를 기록하였으며, 선박·항만분야의 부산지역 초미세먼지 기여율이 44.5%로 추정되고 있어 대책마련이 시급한 상황임.
- 최근까지 국내에서 진행된 항만 대기오염 관련 연구는 대부분 선박 운항에 기인한 대기오염물질과 온실가스 규제 현황 및 배출 특성, 배출현황 등을 조사하고, 국내 연근해 선박으로부터 배출되는 대기오염물질과 온실가스 배출량을 산정하기 위한 방법론을 설정하기 위한 연구가 주로 진행됨(국립환경과학원, 2014).

국외 연구 동향

- 지구적 규모의 생지화학적 사이클과 해양 에어로졸 생성과 변화, 대류권 오존의 형성과 소멸, 광산화 사이클, 성층권 오존 파괴 등의 과정에 미치는 해양-대기 상호작용에 대한 연구가 활발히 진행 중임(Carpenter et al., 2012, 그림 2-5).
- 해양 대기 중 이차생성 미세먼지(secondary organic aerosols, SOA) 연구결과 dimethyl-, diethyl amine salt와 methanesulphonic acid가 가장 주요한 유기화합물임이고, 이들이 해양에서 방출되는 가스상의 dimehtyl-, diethyl amine에서 기원함을 규명(Muller et al., 2009).
- 해양 생물기원 VOCs의 경우 이전에는 대기 화학에서 기여도가 낮은 것으로 평가되었으나, 최근에는 oxygenated VOCs (OVOC)가 OH 래디칼의 주요한 제거기작으로 평가받고 있으며(Read et al., 2012), 해양기원 terpene의 경우 원양 대기 중 SOA 생성원으로 추정되고 있음(Gantt et al., 2009). 특히, 해양 OVOCs 경우 해양기원의 아세트알데히드는 $75\text{-}175 \text{ Tg yr}^{-1}$ 에 이르는 것으로 평가되고 있음(Carpenter et al., 2012).
- 선진국에서도 대부분 항만에서 발생하는 대기 오염물질이 주변도시에 미치는 영향에 대한 연구가 다수이며, 대부분 수용체 모델을 이용하여 1차 발생원(primary emission)의 오염원을 규명하는 연구가 주로 진행됨.
- 최근에는 선박 배출가스에 의한 이차생성 미세먼지에 대한 연구가 추가되고 있으며, 바르셀로나에서 실시된 연구에서는 선박 배출가스와 도시 대기오염이 결합되었을 때 이차생성 미세먼지의 발생을 가속화할 수 있음을 보임(Perez et al., 2016).

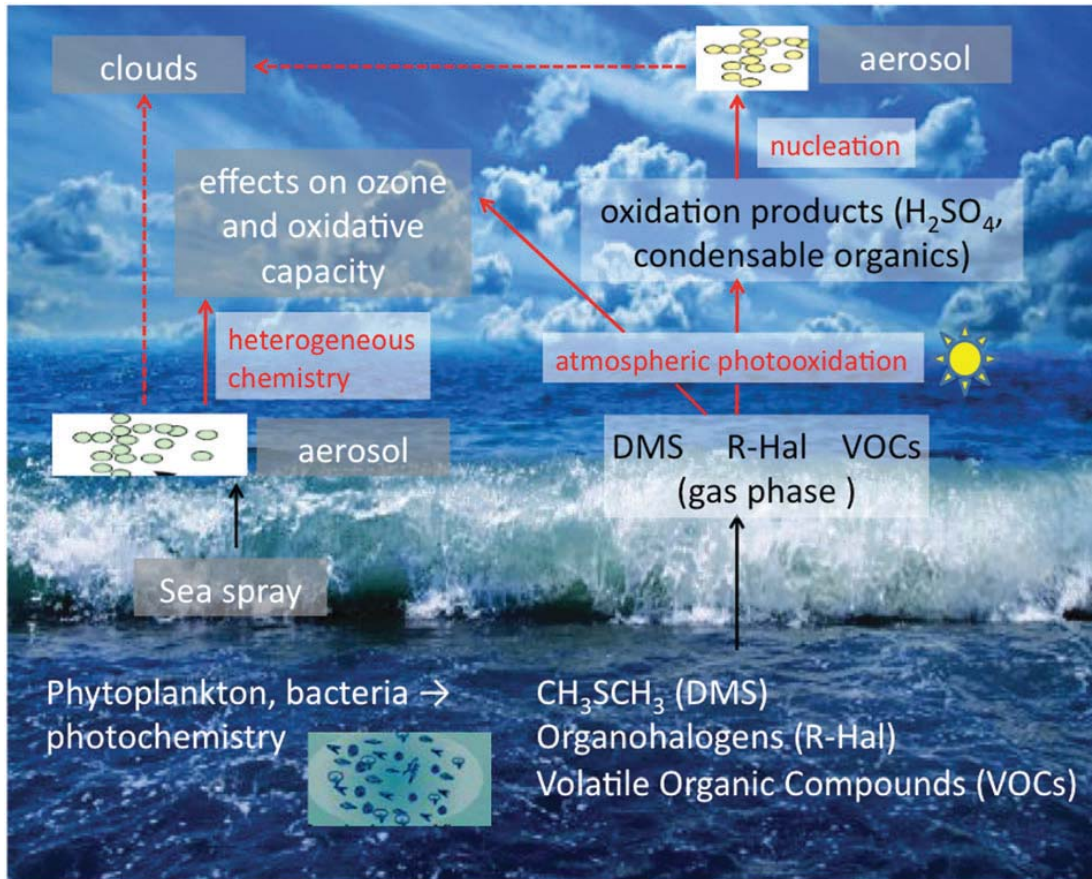


그림 2-5. 대기에 미치는 해양 기원 에어로졸 및 VOCs의 영향 (Carpenter et al., 2012)

3. 해양 유입 대기분진 정량화 기술

(1) 무기 영양염

국내 연구 동향

- 세 곳의 해양관측 정점(백령도, 제주도과 울릉도)에서 황사 분진을 분석한 결과, 고비, 타클라마탄 사막, 그리고 황토고원이 대부분의 황사 발원지로 파악하였음.
- 황사 농도에 따라 해양에서 규조류의 성장은 촉진되었으나, 와편모조류의 성장은 저하되었음.
- 대기로부터 공급된 질소는 남중국해의 해양생산성에 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있으며, 향후 대기기원 질소의 공급이 남중국해 해양 생산성 증가에 영향을 미칠 수 있다는 연구가 2014년에 보고된 바 있음.

- 장기간 대기오염 및 대기에어로졸 내 수용성 이온성분의 계절변동에 대한 연구가 주로 수행되었음.
- 황사 기원지 퇴적물 특성 및 황사의 이동과정 중 유해오염물질의 흡착에 대한 연구가 수행된 바 있음.
- 동해안에 위치한 고정 정점(울진)에서 강우시료 및 대기 중 총부유 물질을 수년간 모니터링을 통해, 무기 질소 침적에는 질산염과 암모늄이 주를 이루었으며, 건식/습식이냐에 따라 계절변화가 나타났음.
- 질산염, 암모늄 등의 이온과 철, 알루미늄 등의 금속원소들의 측정치를 기반으로 요인분석(Factor analysis)를 수행한 결과, 질산염 등은 예상처럼 오염물질 기원인 것으로 추정되었으며, 철 등은 토양성분이 주를 이루고 있는 것으로 나타남.

국의 연구 동향

- 유럽의 대기오염 관측 프로그램(European Monitoring and Evaluation Programme, EMEP)의 85개 정점에서 일별로 빗물에서 무기화합물(황산염, 질산염, 암모니아 등)과 중금속(카드뮴, 납, 구리, 아연 등)을 관측하고 있음.
- 오염물질 관리가 잘 되어 질소와 황산염이 감소하는 경향을 보임.
- 미국의 대기오염 관측 프로그램(National Atmospheric Deposition Program, NADP)은 256개 고정정점에서 빗물 내 화학조성을 지속적으로 모니터링하고 있음.
- Acid Deposition Monitoring Network in East Asia(EANET)은 동아시아에서 산성 침적물에 대한 이해도를 높이기 위한 국제적인 노력의 일환으로 조직됨.
- EANET는 현재 일본에서 관리하고 있으며, 39개의 특정 관측소에서만 침적입자 물질의 농도를 측정.
- 중국에서 1995년 이후 추정된 NO_x 배출량의 변화추이는 전체적으로 증가하였으며, 특히 2000년대 이후 빠르게 증가하는 양상을 보임.
- 2000년대 블랙카본의 배출량은 화석연료의 사용이 많은 중국과 봄철 시베리아 산불발생 지역을 포함한 동아시아에 집중되어 있음.

(2) 유기물

국내 연구 동향

- 대기 오염원으로의 유기탄소 관련 국내 연구는 대학과 연구소에서 일부 수행되고 있으나, 국제 학술지 논문 발표 실적은 선진국 수준의 5% 이내
- 강수 중 화학 물질 성분과 순환에 대해서는 선진국 대비 10% 수준
- 강수 중 유기물질의 거동에 대한 연구는 국외적으로도 이제 막 시작하는 단계에 있으며 국내에선 관련 사례가 거의 없음

국외 연구 동향

- 현재까지 인위적 기원과 관련된 전 지구적 탄소 수지에 있어서 무기탄소만을 기준으로 평가했을 때, 전 지구적 이산화탄소의 약 20%의 제거가 설명되어지지 않음
- 인간 활동 기원의 탄소 유입으로 인해, 전 지구적으로 분포하는 이산화탄소의 20%이상의 탄소(missing carbon)는 그 기원이 밝혀지지 않음
- 대기 중의 유기탄소(OC: Organic Carbon)는 많은 부분 물에 녹는 용존유기탄소(DOC)의 형태로 존재하다가 곧바로 산화되어 이산화탄소로 변형되는 것으로 알려져 있어, 이러한 OC가 “missing carbon“의 중요한 기원이 될 수 있음
- 유기탄소의 강수의 의한 침강(wet deposition flux)이 대기 중 탄소 순환의 중요한 메커니즘으로 알려져 있으나, 그에 따른 대기 중 OC의 전 지구적인 플럭스와 물질수지는 아직 거의 연구되지 않은 실정임

(3) 중금속

국내 연구 동향

- 국내 미세먼지(대기분진) 정량화 기술은 육상지역의 대도시, 산업단지 주변 및 연안에 위치하며 인위적인 영향이 상대적으로 적은 안면도, 백령도 등 배경농도 지역에서의 채취한 미세먼지 내 중금속의 농도특성 조사 등 화학적분석에 의한 것과 미세먼지 분석기 sensor를 이용한 모니터링이 주를 이루고 있음.
- Sensor를 이용한 미세먼지 정량화는 다양한 기원을 파악에는 사용이 어려우며, 필터를 이용한 시료채취 후 화학적 분석이 주를 이루고 있음.
- 미세먼지의 대표적인 자연 발생원인 해염기원을 평가는 Cl, Na, Mg의 농도 분석을 통해 고농도 관측시 해염입자가 지역대기질에 강한 영향을 준 것으로 판단하는 수준에 불과한 실정임.
- 미세먼지 내 금속(Cu, Zn 등) 안정동위원소를 이용하여 인위적/자연기원/

해양기원을 구분하고자 하는 국내 연구사례는 아직 없음.

국외 연구 동향

- 인위적기원, 자연기원, 해양기원 등 미세먼지의 기원을 추정하기 위해서 지각의 주요한 구성물질인 Al, Fe과 해수에 주요한 구성물질인 Na를 이용하여 normalization(농축계수) 산정으로 간접적인 평가를 하고 있음.
- 그러나 이러한 연구는 지역적인/계절적인 차이를 반영하기 어려우므로, 일부 분석항목이 과소평가/과대평가될 우려가 높아 농도위주로 정확한 미세먼지 발생원 및 발생기작은 연구하기 어려움.
- 중금속 농도 분석을 통하여 미세먼지의 기원 추적을 위해서 육상지역(도심지역) 혹은 실내 미세먼지에 대한 연구 등 local 한 영향을 받는 곳에서의 연구가 주를 이루고 있으며(Talbi et al., 2017; Albuquerque et al., 2017; Chandra et al., 2017; Srithawirat et al., 2016, Fernandez-Olmo et al., 2016), 해양에서 발생하던지 해양을 통한 장거리 이동에 관한 연구는 거의 없음.
- 현재까지 시료채취 및 분석적인 한계로 인하여 해양 유입 대기분진 정량화 연구는 국제적으로도 연구사례가 거의 없는 상황임.
- 미세먼지의 정확한 발생기작 규명, 오염원 및 이동경로 추적 등을 위해서는 기원에 따라 특이한 값을 가져 오염원 및 기여율 산정이 가능한 안정 동위원소 비 연구가 필요하나, 국제적으로도 분석기법 정립 등이 되어 있지 않음.

(4) Minerals

- Mineral dust는 황사 이벤트가 발생한 기간 동안 해수의 filtering을 통해 (Lee et al., 2010) 또는 high-volume air sampler 이용하여 대기에서 직접 확보하는 것이 일반적임 (Jeong et al., 2008; Lee et al., 2010).
- 하지만, 두 가지 방법 모두 mineral dust의 기원지 추적을 위한 시료확보에는 유용하지만, 이를 통한 mineral dust 유입량의 정량화는 불가능함.
- 시계열 침강입자 포집장치는 해수로 유입되는 mineral dust의 정량화에 일반적으로 사용되는 장비임. 하지만, mineral dust의 일부는 해수에 용해되어 총 유입량 산출이 어려운 점이 있으며, 또한 서해와 같이 강물에 의한 퇴적물 공급이 우세한 곳에서 대기로부터 유입되는 mineral dust의 정량화가 어려움.

- 강우는 mineral dust를 포함한 대기 분진을 효율적으로 제거하는 것으로 알려져 있으며, 강우에 의한 대기분진의 제거 정도를 파악하기 위해 강우의 채집을 통한 대기분진의 성분분석 및 정량화 연구가 수행된 바 있음 (Shimamura et al., 2007; Baez et al., 2007; Kim et al., 2014; Ouyang et al., 2015).
- 대기분진의 해양유입을 정량화하기 위해서는 실제로 해양으로 침적되는 물질의 양을 확보하는 것이 필요하며, dry deposition과 wet deposition을 모두 포함하는 total deposition을 산정하는 장비의 활용이 필요함.
- 이를 통해 mineral dust를 포함하여 해양생태계 및 생물에 영향을 미칠 수 있는 대기로부터 해양으로 유입되는 오염물질 및 영양염의 양을 정량화할 수 있음.

(5) 헬리카이트 활용

국내 연구 동향

- 국내의 경우 헬리카이트를 활용한 대기분진 연구가 논문으로 보고된 사례가 없으며 대부분 위성영상 분석을 통해 대기 분진 정량화 연구가 수행됨.
- 박 (2013)은 MODIS 영상에 배경 밝기온도차(Background Brightness Temperature Difference, BBTD) 방법을 적용하여 MODIS Asian Dust Index를 산출함.
- 또한 이 등(2002)은 가시영역에서의 대기효과를 분석하기 위하여 대기복사전달 모델인 MODTRAN3 (Moderate Resolution Transmittance)의 모사결과와 GMS-5 위성의 가시영역 채널을 이용하여 황사 에어로졸의 모니터링을 시도함.
- 이 연구를 통해 지상관측결과의 비교분석은 10% 내의 오차율을 가지는 범위 안에서 비교적 만족할 만한 결과를 보여줌.
- 국외에서는 헬리카이트를 포함하여 다양한 플랫폼을 이용한 연구가 수행되고 있는 반면 국내의 경우 매우 한정된 플랫폼을 통한 제한적인 연구가 수행되고 있음.
- 통영 해역에서 헬리카이트를 활용한 적조 및 해양환경 관측 연구를 수행한 바 있고(그림 2-6), 이를 대기 분진 탐지 연구에 적용 가능할 것으로 기대함.

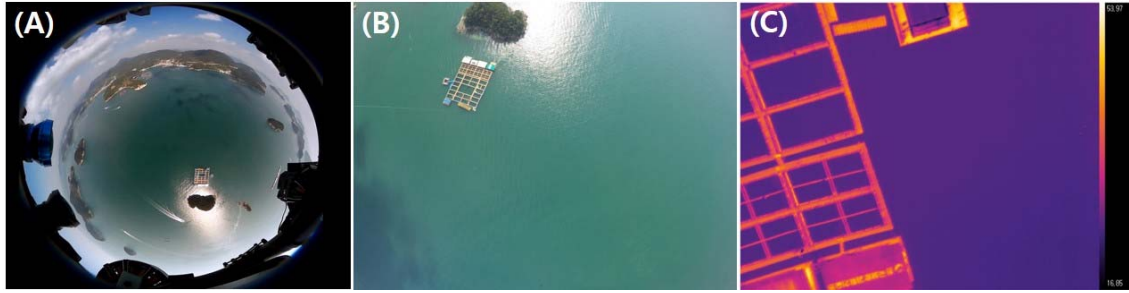


그림 2-6. 헬리카이트를 활용한 적조 및 해양환경 관측 (A) 360° 관측 카메라 영상, (B) Gopro 카메라 촬영 영상, (C) FLIR 카메라 촬영 영상

국의 연구 동향



그림 2-7. 미국 ARM 그룹에서 운영하는 대기관측 시스템 (A) Tethered Balloon (B) DataHawk Small Fixed-Wing UAV (C) Group 3 UAV

- 원주 형태의 AERONET 무인기 시스템을 이용하여 3000 m 상공에서 입자

농도, 입자크기 분포, 에어로졸 흡광 농도 등을 측정하는 연구가 수행됨 (Corrigan et al., 2007).

- 기구(Balloon-borne)를 이용하여 2.7 - 3.1 km 상공에서 화산 분진의 크기 분포를 정량화 하였고, Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) 영상 분석결과와 일치함(Vignelles et al., 2016).
- 미국의 ‘Atmospheric Radiation Measurement Climate Research Facility’ 그룹에서는 다양한 플랫폼을 이용하여(그림 2-7), 4 곳의 정기적인 관측 지점과 3곳의 이동식 지점의 관측 자료를 매시간 수집 및 관리하고 있음 (Schmid and Ivey 2016).

4. 생물 영향 평가 기술

국내 연구 동향

- 국내에서 황사의 생물관련 연구는 주로 육상생물인 곰팡이나 미생물관련 연구이며 해양 생물영향에 관한 연구는 전무함.
- 한편, 황사의 해양생물에 대한 영향연구는 2017년 이전에는 찾아볼 수 없으며 당해년에 인천대 연구팀이 수행한 연구가 단 한건이 있음.
- 이 연구에서 봄철 황사가 비황사지역에 비해 북서태평양지역의 일차생산력을 70% 이상 증가시키는 것으로 확인되었음(Yoon et al., 2017).
- 국내의 미세먼지에 관한 연구는 불과 1-2년 전부터 관심을 가지고 연구되기 시작했으며 대부분 대기의 미세먼지 현황과 발생요인의 분석 등에 관한 연구가 대부분이며 이마저도 손에 꼽을 정도로 신생 연구 분야임.
- 현재까지 보고된 연구에 의하면, 중국 산둥성 지역에서 유래된 초미세먼지 농도와 서풍계열 풍향비율이 국내 초미세먼지 농도에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있음.
- 따라서 중국발 초미세먼지는 국내로 유입되는 과정에서 황해를 경유하며 이 과정에서 침전에 의해 황해로 유입되어 해양생물에 영향을 줄 가능성이 매우 높음.
- 그러나 현재까지 미세먼지에 관한 대부분의 연구가 대기 중 초미세먼지에 집중되어 있으며 수중해양생물에 관한 연구는 전무한 실정임.

국외 연구 동향

- 황사와 미세먼지의 해양생물영향에 관한 국외연구동향도 현재 연구초기 단계에 있으며 2010년 이전의 연구는 찾아볼 수 없음.

- 중국 칭다오대학교 연구팀과 스웨덴 Umea university 연구팀은 각각, 우리나라 연구현황과 유사하게, 2017년에 황사가 북서태평양에서의 1차생산성을 높이는데 중요한 역할을 하는 것으로 보고한 바 있음(Johansson et al., 2017; Zhang et al., 2017).
- 이 연구에서, 황사가 해양의 상층부에 질소(N), 인(P), 철(Fe)과 같은 생물학적으로 이용 가능한 영양염을 공급해 주는 역할을 하지만 최근 기후변화에 의한 편서풍의 약화로 봄철 황사발생이 감소됨에 따라 북서태평양으로의 황사유입도 감소되어 향후 이 지역의 1차생산력이 감소될 수 있음을 제시함.
- 미세먼지는 생성과정에 따라 연료연소시설과 자동차 또는 선박에서 배출되는 배기가스형태의 1차 미세먼지와 질산암모늄이나 황산암모늄같은 에어로졸과 대기 중 응축유기물질 등의 2차 미세먼지로 구분됨.
- 이 중 직경 2.5 μm 이하 미세먼지를 초미세먼지(PM2.5)라 부르는데 이것은 세계보건기구(WHO)가 1급 발암물질로 지정할 정도로 유해한 물질인 것으로 알려져 있음.
- 이러한 유해물질들 중, 보고된 해양생물에 대한 영향연구는 초미세먼지인 black carbon (BC)이 유일함.
- Black carbon은 대기, 강, 연안의 빗물로부터 해양생태계로 유입되어 (Forbes et al., 2006) 유기탄소를 효과적으로 흡착해 해양의 유기물 순환에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 해양생태계에 미치는 영향은 알려져 있지 않음.
- 최근 프랑스 Pierre et Marie Curie-Paris 6 대학교 연구팀은 black carbon이 햇빛에 노출되면 박테리아 활성을 자극해서 해양생태계의 미생물과 바이러스 군집구조 및 먹이망에 영향을 미칠 수 있음을 보고한 바 있음 (Cattaneo et al., 2010; Malits et al., 2015).
- 중국 베이징 사범대학교 연구팀은 PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons)이 흡착된 black carbon이 저서생물인 깔따구(*Chironomus plumosus*)에 의해 섭취되며 이것은 PAH의 생물농축에 기여할 수 있음을 제시함(Wang et al., 2011).

5. 해양생태계 영향 평가 기술

(1) 해양생태계 영향

국내 연구 동향

- 백령도 해역에서 황사에 의한 식물플랑크톤의 반응에 대한 기초적인 연구가 수행된 바 있으나 (이희일, 2010), 체계적 해양 조사를 통한 생태계 영향 연구는 거의 수행된 바 없음.
- 최근 aerosol index (AI)와 해색위성을 활용한 엽록소 a와의 연관성 연구를 통해 한반도를 포함한 동아시아 및 북서태평양 해역에서 황사의 주요 경로 및 식물플랑크톤 생물량에 미치는 영향에 대한 광역적 연구 결과가 보고됨 (그림 2-8; Yoon et al., 2017).
- 하지만, 식물플랑크톤의 생물량을 제외한 다양한 생물학적 변수, 환경과의 상호 작용, 먹이망 구조 및 생지화학적 순환에 미치는 영향에 대해서는 현장 조사를 통한 규명이 필수적임
- 대기 에어로졸 및 빗물에 의한 세균의 유입에 대한 연구가 동해 및 육상에서 수행되었음 (Cho and Hwang 2011; Cho and Jang 2014).
- 동해 에어로졸에 세균은 약 1×10^5 cells m^{-3} 의 농도로 분포하며, 이 중 2~20% 정도는 생존하는 것으로 보고되었음. 또한 빗물에도 세균이 약 $0.1\sim 1.6 \times 10^3$ cells ml^{-1} 의 농도로 존재하는 것으로 보고됨
- 이는 에어로졸 및 빗물 등을 통해 세균이 원거리 이동이 가능함을 보여주는 결과로 황사를 통해 병원성 미생물의 전파 가능성 시사

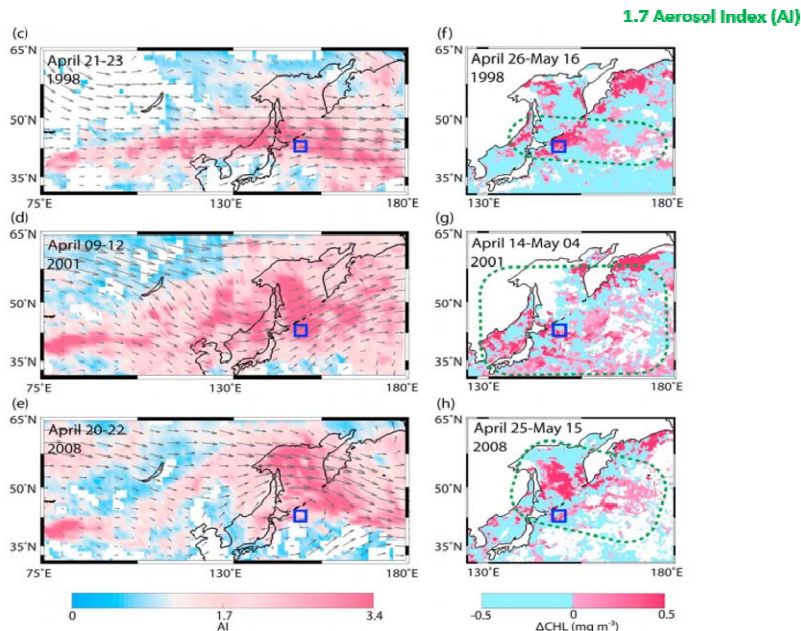


그림 2-8. 황사의 유입과 엽록소 a의 상관성을 보여주는 연구 결과 (Yoon et al. 2017의 연구 결과 인용)

- 우리나라의 경우 2000년대 이후로 황사의 발생 빈도는 감소하는 추세를 보여줌 (그림 2-9; Yoon et al., 2017).
- 미세먼지의 발생빈도의 연변동을 파악하기 위한 자료는 부족한 실정임. 다만, 황사를 제외한 미세먼지 또는 초미세먼지가 해양생태계에 미치는 영향에 대해서는 거의 연구된 바 없음.

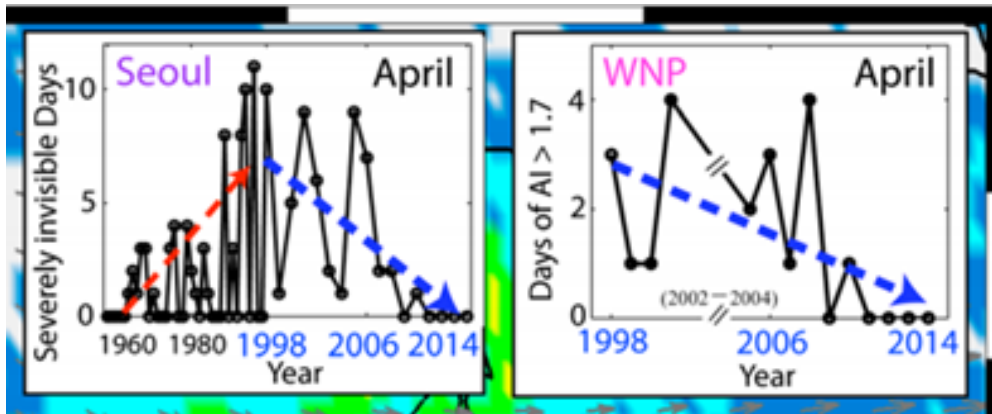


그림 2-9. 황사 발생 빈도의 연변동을 나타낸 그림.
2000년 이후 감소 추세를 명확히 보여줌(Yoon et al. 2017의 자료)

국의 연구 동향

- 중국 대륙의 황사 발생 빈도 연구
 - 중국의 황사 발원지에서 황사 발생 빈도가 1978년 이후로 꾸준히 감소하고 있으며, 대부분의 황사가 춘계에 집중되어 발생됨(그림 2-10; Wang et al., 2017).

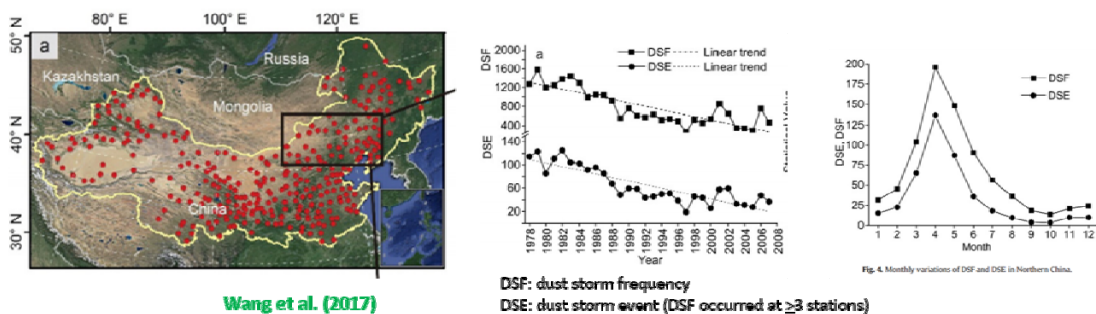


그림 2-10. 중국황사발원지에서 측정된 황사 발생 빈도의 연변동과 월별 발생 빈도를 보여주는 그림 (Wang et al. 2017의 자료 인용)

- 강우에 의한 영양염 증가

- 황사의 직접적인 침적에 의한 영향 이외에 강우를 통한 에어로졸의 해양 내 유입에 대해 Jiaozhou Bay에서 최근 연구 결과가 보고됨 (Xing et al. 2017).
- 흥미롭게도 황사의 유입이 많은 봄철 이외에 하계 및 다른 계절에도 상당량의 영양염이 강우를 통해 유입됨을 보여주었음 (표 2-3).
- 이러한 습식 침적은 미세먼지가 해양으로 다량 유입되는 경로가 될 수 있을 것으로 여겨져 이에 대한 체계적인 연구가 필요할 것으로 여겨짐.

표 2-3. 강수를 통한 영양염의 유입량의 계절 변동을 나타낸 표 (Xing et al. 2017의 연구 결과 인용)

Seasonal and annual VWM concentrations of SPM ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and nutrients ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) in AWD in Jiaozhou Bay.

Year	Season	Volume-weighted mean concentrations								References	
		SPM	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	DIN	DON	DIP	DOP		$\text{SiO}_2\text{-Si}$
2015-2016	Summer	8.08	161.5	86.0	0.58	248.1	67.4	0.16	0.63	0.10	This study
	Autumn	5.30	74.3	41.2	0.09	115.4	53.8	0.27	0.52	0.13	
	Winter	19.9	89.8	83.0	1.70	174.5	39.0	0.55	0.45	3.87	
	Spring	31.2	104.1	66.4	0.72	171.2	44.9	0.55	0.37	8.28	
	1-year average	12.3	107.1	62.9	0.49	170.5	54.8	0.32	0.52	2.00	
2009-2010	2-year average		54.8	36.3 ^a		91.1		0.12		5.12	Zhu, 2011

^a Refers to the sum of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$.

- 황사로 인한 식물플랑크톤 생물량 및 입자성 유기탄소 증가
 - 고비사막으로부터의 황사가 북태평양의 중앙부의 식물플랑크톤 생물량 및 입자성 유기탄소 증가에 직접적인 영향을 미침(그림 2-11; Bishop et al. 2002).
 - 이는 육상에서의 황사 등 대기 분진의 유입에 의해 해양 생태계가 반응함으로써, 생태계의 구조 및 기능 변동이 야기될 수 있음을 시사함.

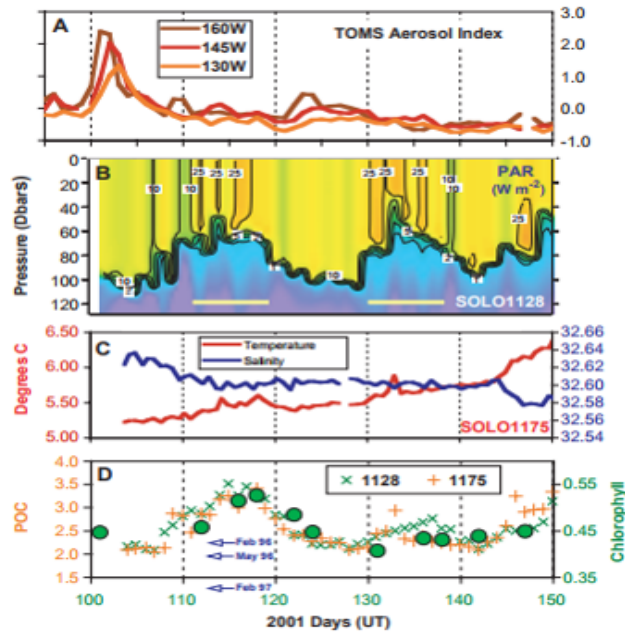


그림 2-11. 북태평양에서 대기분진의 유입이 엽록소 a와 입자성유기탄소(POC)의 증가를 야기함 (Bishop et al. 2002)

- 철 및 미량금속 공급을 통한 생태계 영향

- 대양은 영양염 뿐만 아니라 철 등의 미량 영양염이 결핍된 빈영양 해역이 많은 부분을 차지하고 있음.
- 이러한 경우, 영양염 공급 뿐만 아니라 철 등의 공급도 생산력 변동에 매우 중요함.
- 실제로 빈영양 열대해역에서 질소고정에 중요한 역할을 하는 *Crocospaera* 및 *Trichodesmium*이 철 농도에 따라 영양염 농도에 따른 반응과 성장 속도가 달라짐이 보고됨 (그림 2-12; Garcia et al. 2015).
- 이는 대기 분진을 통한 철의 유입에 따라 질소의 생지화학적 순환이 변화될 수 있음을 시사함.

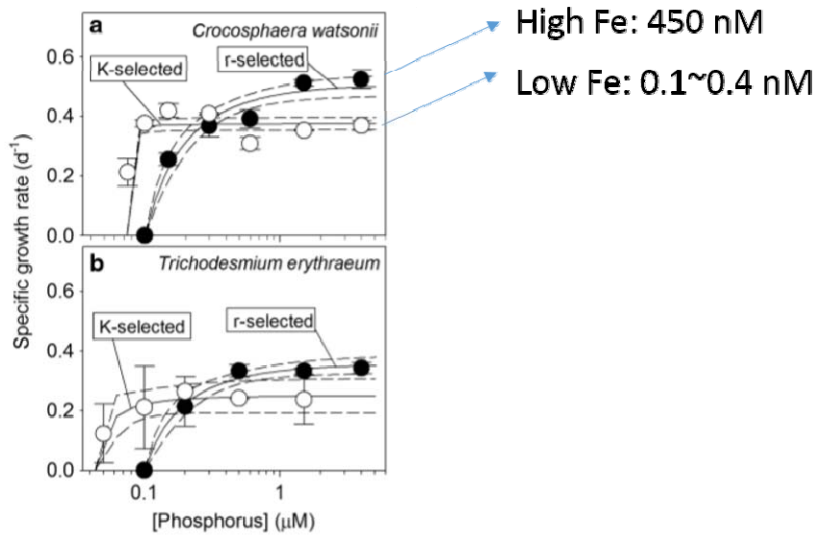


그림 2-12. 철의 농도에 따른 인산염 이용성 및 성장 속도의 차이를 보여주는 그림 (Garcia et al. 2015의 연구결과 인용)

- 대기 분진의 유입이 군집 조성의 변동을 야기
 - 대기 분진을 통해 유입된 철의 유입이 병원성 세균인 *Vibrio*의 bloom을 야기할 수 있음을 보여주는 연구결과가 보고됨 (그림 2-13; Westrich et al. 2015).
 - *Vibrio*는 때때로 해양에서 높은 비율로 나타나며, 어류의 질병에 관련되기도 함.

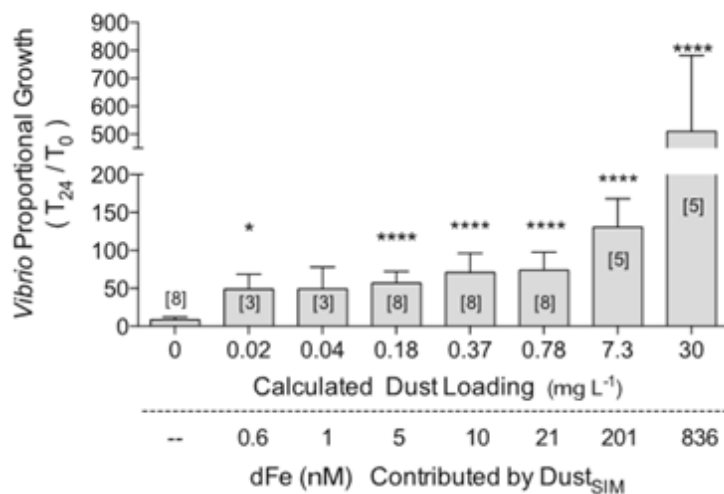


그림 2-13. 황사로부터 유입된 철 농도 증가에 따른 *Vibrio*의 성장 속도 증가를 나타낸 그림 (Westrich et al.의 연구 결과 인용)

- 특히, 많은 생지화학적 과정에 참여하는 효소들은 미량금속을 co-factor로 가져, 미량금속의 공급이 생물의 성장과 생태적 기능에 중요한 영향을 미칠수 있음(그림 2-14).
- 따라서, 대기 분진에 의한 영양염 공급 뿐아니라 미량금속원소의 공급도 매우 중요한 연구 부분임.

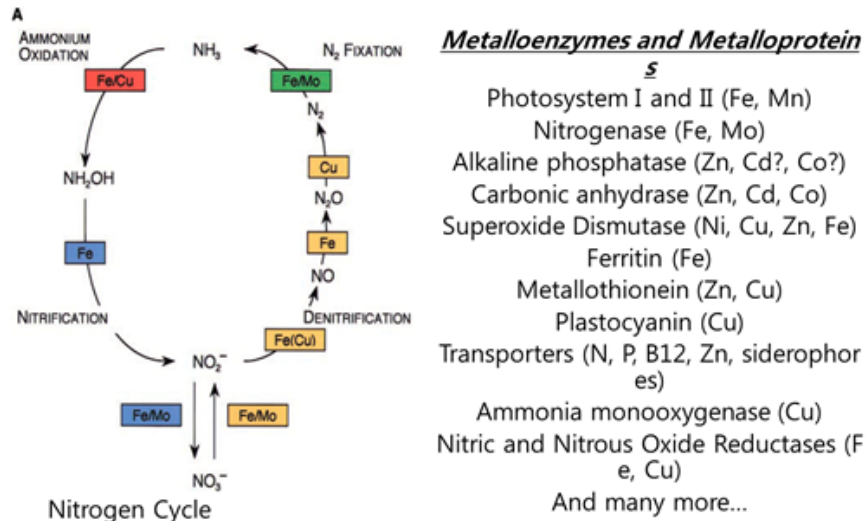


Figure from Morel and Price, 2003 – List from Mak Saito (WHOI)

그림 2-14. 질소순환에 참여하는 효소들에 포함된 미량금속의 종류를 나타낸 그림

(2) 인공위성 활용

국내 연구 동향

- Jo et al. (2007)은 동해 북부 해역에서 이른 봄철에 발생하는 클로로필 번성에 아시아 대기분진과의 상관관계를 분석하였으며, 이를 통해 동해의 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 관측 자료와 SeaWiFS 위성 클로로필 분석 자료를 비교한 결과 아시아 대기분진이 지나가는 경우 봄철 번성보다 약 1개월 정도 일찍 번성이 발생되었음을 발견함(그림 2-15).

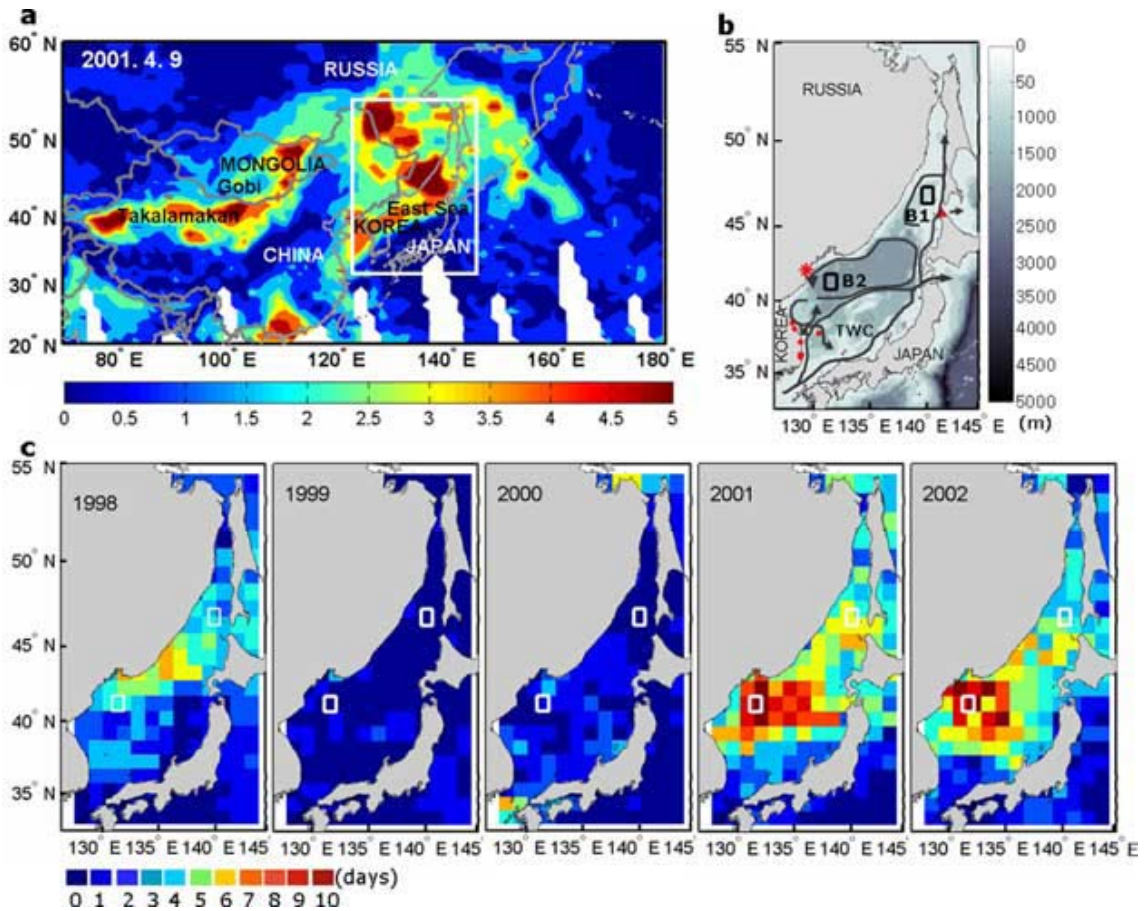


그림 2-15. (a) 2001년 4월 9일 TOMS 에어로졸 인덱스를 이용한 황사 농도 (b) 동해 해저지형과 해류 시스템(회색 화살표). TWC: Tsushima Warm Current. (c) 1998년부터 2002년 까지 3-5월 동안 에어로졸 인덱스가 2.5가 넘는 기간

국외 연구 동향

- Loye-Pilot and Morelli (1988)은 지중해 해역의 대륙에서 유입되는 에어로졸이 해양에 미치는 영향에 대해 분석함.
- 대기 기단이 유럽의 여러 산업 지역을 통과할 경우 pH 농도가 4 정도로 매우 낮고 황산에 의해 오염된 산성비가 발생되어 이온의 함량에 많은 영향을 미치는 경우가 있었으며, 반대로 북부 아프리카 해역을 지날 경우 pH 농도가 6~7 정도로 매우 높아지며 탄산칼슘의 농도가 높은 'red rain' 이 발생되어 영향을 미치는 경우가 있었음.
- Ozsoy and Saydam (2001)은 터키 에르테밀 주변 해역에서 연안 해역 표층 해수에 함유된 철 (iron) 성분의 함유량과 종류를 분석하였는데, 봄철과 가을철에 red rain이 발생되어 철 (iron), Fe(II), Fereac 등이 표층 해수

로 유입되었음을 발견함.

- Claustre et al. (2002)는 지중해 해역의 매우 맑은 빈영양화 해역에서 해상 위성에서 클로로필 농도가 높은 것처럼 녹색으로 관측된 경우에 대해 분석하였는데, 이러한 현상은 사하라 사막으로부터 유입된 먼지 입자가 해양의 상층 해역에 위치하여 블루 광 파장에서의 흡광 및 그린 광 파장에서의 후방산란을 증가시켰기 때문으로 지중해의 다양한 매우 맑은 해역에서 이러한 이유로 클로로필 농도가 과추정 될 수 있음을 지적함.
- Calvo and Pelejero (2004)는 남반구의 중위도 해역에서 입자 코어 시추 샘플 (sediment core)을 통해 대기 입자 유입으로 인한 식물 플랑크톤 조성이 변경됨을 발견함.
- Yuan and Zhang (2006)는 북서태평양 해역에서의 높은 생산성과 아시아 대기분진과의 상관관계를 분석했으며, 대기 분진의 유입은 입자 부유, 흡광, 공동 침전 등을 통해 영양분을 제공함으로써 해양의 생산성 향상에 영향을 주었음을 발견함.
- Tan et al. (2011)은 1998년부터 2008년 동안의 장기간의 아시아 먼지분진과 클로로필 및 일차생산성과의 상관관계를 분석하였고, Ren et al. (2011)은 황해 남부해역에 봄철에 유입되는 아시아 먼지분진의 알루미늄 성분이 봄철 번성에 미치는 영향을 분석함.

제 3 절 대내·외 환경분석

1. 국내 환경분석

- 지속적 대기개선 목표 강화
 - 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획('15~'24) 수립(환경부, '13.12)
 - PM2.5, O₃를 관리 대상 오염물질에 신설, 정책 방향을 인체 위해성 중심으로 전환
 - 1차 관리 대상 물질(PM10, NO_x, SO_x, VOCs)중 PM10, NO₂의 대기개선 목표 강화(PM10: 40 → 30 $\mu\text{m}/\text{m}^3$, NO₂: 22 → 21 ppb)
- 미세먼지 국가전략프로젝트 선정(미래부, '16.09)
 - 「과학기술기반 미세먼지 대응전략」 발표 및 범부처 단일사업단을 구축하여 구체적인 세부 이행계획 수립('17~'23)
 - 미세먼지 대응 중점기술 개발, 기술사업화 및 글로벌 협력, 정부R&D 중장기 투자전략의 3대 부문으로 구성
- '18년도 정부연구개발 9대 중점투자방향 발표(미래부, '17.02)
 - 과학기술을 기반으로 기존 기술의 패키지화·공백기술 확보(미세먼지 분야 포함) 및 기술실증 등 가시적 성과 창출을 위한 전략적 지원
 - (초)미세먼지 생성 원인 규명과 핵심 대응기술 조기 확보 등 국민 삶의 질 향상을 위해 중점 지원
- 새정부 미세먼지 저감 대책 발표('17.06)
 - 석탄화력발전소 셧다운(일시 가동 중지), 노후 석탄발전소 폐쇄 및 신규 석탄발전소 건설 중단 등을 발표하였으며, 별도의 미세먼지 대책기구 설치 지시
- 미세먼지 국가전략프로젝트 추진('17~'19)
 - 미래창조과학부, 환경부, 보건복지부는 국가 R&D 역량을 집중하여 (초)미세먼지 ① 발생·유입, ② 측정·예보, ③ 집진·저감, ④ 보호·대응 등 4대 분야의 근본적·과학적 해결책 마련을 위해 「미세먼지 국가전략프로젝트」 추진
 - 특히 발생·유입과 관련하여, (초)미세먼지 생성·변환 메커니즘 규명 및 미세먼지 해외유입량과 국내 주요 오염원별 기여도 정량적 평가가 주요 사업내용
- 미세먼지에 대한 국민적 관심 고조
 - '국민환경 의식조사' 시행 결과, 미세먼지 관심도가 높으며(47.9%), 정

부의 미세먼지 감축 노력이 충분하지 않다고 생각함(52.9%)

- 국내 미세먼지 수준에 대한 불만족도는 55.2%이며, (초)미세먼지가 건강에 미치는 영향에 대한 걱정 및 위협도에 대해 응답자의 68.6%가 걱정한다고 응답(한국환경정책·평가연구원, 2016)
- 국정감사('17.10)에서도 미세먼지 대책에 대한 대정부질의가 이어짐

2. 대외 환경분석

- 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 1970년대부터 대기질 관리를 시행하고 있으며, WHO 권고 기준에 비해 이미 20% 이상 낮은 (초)미세먼지 농도가 측정되고 있음에도 추가적인 미세먼지 저감 정책을 추진하고 있음
- 자동차 관리 및 석탄연료 사용에 대한 규제와 관리, 전기차 보급 등을 통해 자국내 (초)미세먼지 발생량 감축 추진
 - 미국: 전기차 세액 공제 및 330만대 무공해 자동차 보급(~'25)
 - 일본: 노후 경유차 수도권 운행제한('08~)
- 특히, 미국과 유럽은 수많은 고정 관측소에서 PM10, PM2.5 농도 뿐만 아니라, 황산염, 질산염, 암모니아 등 무기화합물 농도와 카드뮴, 납, 구리, 아연 등 중금속 함량을 관측하여, 대기질 관리 및 환경 정책 자료로 활용하고 있음
- 중국의 경우에도 지속적인 감축정책을 추진하여 베이징, 상하이 등 대도시의 미세먼지 농도 감소추세를 보임
- 중국 황사 발원지에서 측정된 황사 발생 빈도자료에 의하면 1978년 이후로 꾸준히 발생 빈도가 감소하고 있으며(Wang et al., 2017), 국내에서도 2000년대 이후로 감소추세가 나타남(Yoon et al., 2017)
- 그러나, 중국에서 1995년 이후 추정된 NOx 배출량의 변화추이는 전체적으로 증가하였으며, 특히 2000년대 이후 빠르게 증가하는 양상을 보임
- 2000년대 블랙카본의 배출량은 화석연료의 사용이 많은 중국과 봄철 시베리아 산불발생 지역을 포함한 동아시아에 집중되어 있음
- '15년부터 추진된 베이징 공기정화 프로젝트로 대도시 대기질은 개선되고 있으나, 대기오염물질 배출 공장들을 중국 동부 산둥성과 허베이성으로 이전함에 따라('20년까지 100% 이전 목표) 월경성 (초)미세먼지 문제는 점차 심각해질 것으로 예측됨

3. 시사점 및 전략방향

(1) 환경변화 시사점 및 전략적 방향성

- 미국과 유럽 등 주요국들은 수많은 고정 관측소에서 PM10, PM2.5 농도 뿐만 아니라, 황산염, 질산염, 암모니아 등 무기화합물 농도와 카드뮴, 납, 구리, 아연 등 중금속 함량을 관측하여, 대기질 관리 및 환경 정책 자료로 활용하고 있음
- 국내 미세먼지 농도는 미국, 일본 등 해외 주요국 대비 1.3배에서 2배가 높으며 적극적인 개선대책이 요구되는 상황임(환경부, 2016)
- 최근 범부처 미세먼지 국가전략프로젝트가 개시됨('17.06)에 따라, (초)미세먼지의 근본적, 과학적 문제해결이 예상됨
- 주요 사업분야로 미세먼지 생성 및 오염원 규명, 미세먼지 입체감시 및 예보기술 개발, 사업장 (초)미세먼지 저감기술 개발, 국민생활 보호·대응 기술 개발이 제시됨
- 이중, '미세먼지 입체감시 및 예보기술 개발'의 경우 미세먼지 모니터링에 중점을 두고 있기 때문에, 주요국들의 연구 동향에 맞춰 무기화합물과 중금속 함량에 대한 과학기술적 접근이 필요함
- '미세먼지 생성 및 오염원 규명' 세부 내용으로 발생원인 및 정량적 기여도 규명이 제시되어 있으며, 중국과 지리적으로 근접해 있는 우리나라의 경우 미세먼지 발생에 있어 해양(특히 서해)에서의 미세먼지 감시뿐만 아니라 해양에서의 미세먼지 생성기작과 해양-대기 상호작용 연구는 미세먼지 국·내외 기여도 평가에 매우 중요한 자료를 제공할 수 있음
- 대부분 미세먼지 연구는 내륙에서 진행되기 때문에 월경성 대기분진 정량화를 위해 우리원의 서해 해양과학기지들과 울릉센터, 동해 장기 계류 시스템을 기반으로 내륙 관측지점들과의 연계 연구를 통해 중국 기원 미세먼지 뿐만 아니라, 국내 발생 오염물질의 정량화에 대한 과학적 근거 확보 가능
- 특히, 대기분진 관련 모든 정책은 육상 관측 결과를 기준으로 하기때문에 해양에서의 연구결과는 자료 검증과 해양유입 영향 기초 자료 확보 측면에서 그 어느 시기보다 중요함
- 2016년 <네이처>에서 제시된 바와 같이 국내 항만 대기분진 오염도가 심각한 수준이며, 부산지역의 경우 44% 이상이 항만·선박 기원 대기분진임에도 불구하고 선박 배출가스의 (초)미세먼지 생성 기여도에 대한 연구

는 구체적으로 실시되지 않음

- 대기분진의 해양 유입에 의한 해양 생산성 평가, 탄소순환에 미치는 영향, 해양 생물 및 생태계에 미치는 영향에 대한 연구 전무한 실정임
- 따라서 한반도 주변해 대기분진 유입에 대한 모니터링 체계 구축을 통한 국내·외 기원 대기분진 및 유기/무기화합물, 중금속 정량화와 해양 거동, 해양 생물 및 생태계 영향 연구 등이 요구됨

(2) SWOT 분석

가. 기회와 위협요인(표 2-4)

- 해양에서의 대기분진 연구의 가장 큰 기회는 대기분진 개선에 대한 국민적 관심도가 그 어느 때 보다 높으며, 미세먼지 발생기작, 오염원 규명, 국내·외 기여도 정량적 평가 등에 대한 과학기술 기반 문제해결이 필요한 것으로 분석됨
- 국내의 미세먼지 저감정책과는 무관하게 중국의 대기오염물질 배출 시설을 산둥성과 허베이성 쪽으로 이전을 추진함(베이징 공기정화 프로젝트, '15~'20)에 따른 월경성 대기분진의 증가 가능성은 국민 생활 보호 정책 차원에서는 위협 요소이나, 해양, 특히 서해에서의 대기분진 연구는 월경성 대기분진 정량화를 통한 외교적 대응 자료 확보 측면에서 연구의 중요성이 매우 높은 것으로 평가됨
- 그러나 해양에서의 대기분진 연구를 위한 상시·고정 관측소가 부재인 상황은 연구의 위협요인으로 작용함. 동시에 해양과학기술원이 운영/관리하는 다수의 해양과학기지는 대기분진의 상시·고정 관측을 가능하게 하는 기회요인으로 작용함
- 대기분진의 농도 및 구성물질의 기원 추적에 중점을 둔 연구가 추진되어 왔으나, 향후 실제 대기분진 침적량과 이를 구성하는 유기·무기화합물, 중금속 등의 정량화가 요구되는 연구추세는 주변 환경에서 유입되는 2차 오염을 배제할 수 있는 해양에서의 시계열 침강입자 포집장치 운영 및 해양과학기지에서의 건식·습식 침적 분진 포집을 통해 제공할 수 있는 자료로 판단됨
- 해양에서의 대기분진 유입에 따른 생물, 생태계 영향 평가, 탄소·질소 순환 등에 대한 연구결과 보고가 매우 부족하며, 특히 미세먼지 생성 기작과 관련한 해양의 역할, 해양-대기 상호작용, 선박 배출 미세먼지 연구

는 세계 선도 연구분야임

표 2-4. 대기분진 플럭스 및 해양거동 연구사업의 기회요인 및 위협요인

기회요인(Opportunity)	위협요인(Threat)
O1. 과학기술 기반 대기분진 개선에 대한 국민적 관심 증대	T1. 중국기원 대기분진 국내 유입량 증가 예상
O2. 월경성 대기분진에 대한 체계적 연구 요구	T2. 해양에서의 대기분진 연구를 위한 상시·고정 관측소 부재
O3. 해양과학기지 및 해양 계류 시스템 활용 대기분진 침적량 정량화 필요성 증가	T3. 2차 오염으로 인한 대기분진 침적량 정량화 문제
O4. 선박 영향 평가 및 해양 발생 미세먼지 연구 선도	T4. 대기분진 해양유입 영향에 대한 이해 부족
O5. 해양 생물, 생태계, 물질순환, 해양-대기 상호작용 등 해양 영향 연구 필요성 증가	T5. 미세먼지 발생에 대한 해양영향 평가 미비

나. 강점과 약점(표 2-5)

- 내륙 연구 거점 부재가 약점으로 작용하지만, 소청초, 가거초, 이어도 해양과학기지 및 황해중부 부이, 동해연구소, 남해연구소, 제주센터, 울릉센터 등 광역적이고 다양한 연구 인프라는 우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 연구 사업 추진의 강점
- 광역적 연구뿐만 인공위성, 헬리카임을 활용한 상공 관측, 과학기지, 거점 연구소에서의 육상·해상 자료 확보 및 해양 계류 시스템을 활용한 해양 내 연구 등 입체적 대기분진 연구를 수행할 수 있는 강점
- 그러나, 입체적 연구는 아직 추진된 바 없기 때문에 연구 자료 간 상호호환·활용 프로토콜이 정비되지 않은 약점이 있음
- 원격탐사, 지질, 지화학, 미세먼지, 해양생물·생태계, 물질순환, 계류시스템, 해양공학 등 다양한 분야의 전문가로 구성된 연구그룹은 대기분진 종합 연구에 최적화되었으나, 분야 간 필요한 연구시료 확보 및 시료 공유·분배 문제는 약점으로 작용할 수 있음

- 인공위성을 활용한 해양 관측 및 연구선 운항을 통해 직·간접적 대기분진 유입에 의한 해양 표층 영향 연구 추진이 가능하며, 해양-대기 상호작용에 의한 미세먼지 발생기작에 대한 단초를 확보할 수 있는 장점

표 2-5. 대기분진 플럭스 및 해양거동 연구사업의 강점과 약점

강점(Strength)	약점(Weakness)
S1. 서해-남해-동해를 잇는 광역 대기분진 연구 추진 S2. 상공-육상·해상-해양내 입체적 대기분진 연구 가능 S3. 다양한 분야의 전문가 그룹 보유 S4. 직·간접적 대기분진 자료와 해양 유입, 생물, 생태/환경 영향 평가, 해양-대기 상호작용 연구 추진	W1. 내륙 연구 거점 부재 W2. 충분한 연구 시료 확보 및 시료 공유·분배 문제 발생 가능 W3. 연구 자료간 상호 호환·활용 프로토콜 부재

다. 전략대안 도출 (SWOT Matrix)

- 대내외 환경변화 분석을 통한 기회요인과 위협요인을 분석하고, 내부 역량 분석으로부터 강점과 약점을 분석하여 SWOT Matrix를 작성(표 2-6)

표 2-6. 대기분진 플럭스 및 해양거동 연구사업의 SWOT Matrix

	강점	약점
기 회 요 인	SO전략 (기회와 강점의 시너지 전략) SO1. 광역적 연구를 통한 월경성 대기분진에 대한 체계적 연구추진 (O2, S1) SO2. 입체적 연구자료 확보를 통한 대기분진 침적량 정량화 (O3, S2) SO3. 직·간접적 연구자료 분석을 통한 해양 발생 미세먼지 연구 주도 (O4, S4) SO4. 다양한 연구 접목으로 해양 생물, 생태계, 물질순환, 해양-대기 상호작용 연구자료 확보 (O4, S4)	WO전략 (기회를 통한 약점 극복 전략) WO1. 미세먼지 국가전략 프로젝트와의 협업 및 Air Korea와 같은 공개 자료 활용을 통한 내륙거점 부재 약점 극복 (W1, O1) WO2. 단기간 성과 달성을 위한 집중 투자로 해양과학기지 및 거점 연구소 등에 시료확보 및 관측 장비 설치 (W2, O3) WO2. 대기분진 정량화 자료 기반, 다양한 연구자료 간 상호 호환·활용 프로토콜 마련 (W3, O3, O4, O5)
	ST전략 (강점을 통한 위협 극복전략) ST1. 입체적 대기분진 연구 자료 확보를 통한 월경성 대기분진 정량화 (S2, T1) ST2. 서해 해양과학기지 및 제주 센터를 대기분진 연구 상시·고정 관측소로 활용 (S1, T2, T3) ST3. 연구역량 집중을 통한 선박 및 해양기원 미세먼지 발생 규명 (S3, T5) ST4. 인공위성, 헬리카이트, 연구선, 해양과학기지 활용을 통한 해양유입 영향 평가 (S4, T4)	WT전략 (약점 최소화를 통한 위협 극복) WT1. 중국기원 대기분진을 확보할 수 있는 해양과학기지 활용 극대화 추진 (W1, T1) WT2. 2차 오염이 적은 연구 거점 우선 대기분진 연구시료 확보 (W2, T2, T3) WT3. 기존 장기 계류 연구와의 협업을 통한 해양내 침강 대기분진 거동 파악 추진 (W4, T4) WT4. 부산 등 신규 연구거점 확보를 통한 선박 기원 미세먼지 영향연구 우선 추진 (W1, T5)
위 협 요 인		

- 분석된 강점, 약점, 기회요인, 위협요인을 바탕으로 수립한 “우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명” 연구의 전략목표 수립(표 2-7)

표 2-7. 「우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명」 연구의 전략 목표

광역적·입체적 대기분진 연구 시스템 구축

- 서해-남해-동해를 아우르는 광역 대기분진 연구 시스템 구축
- 인공위성, 헬리카이트, 해양과학기지, 해양 계류 시스템을 활용한 입체적 대기분진 연구
- 「미세먼지 국가전략 프로젝트」 및 내륙 주요 거점 연구소들과의 협업 추진

대기분진 생성 및 기원 추적

- 해양 대기 중 유기화합물의 (초)미세먼지 생성 기작 규명
- 선박 배출가스의 (초)미세먼지 생성 기여도 평가
- 헬리카이트 활용 대기분진 신호와 해수 신호 차이 분석
- Chemical tracer, mineral dust 분석 기반 기원지 추적

대기분진 해양 거동 규명

- 해양 계류 시스템 구축
- 유기·무기 화합물, 중금속, mineral dust 해양유입 플럭스 정량화
- 국내·외 기원별 오염물질 해양 침적 플럭스 산출
- 대기분진 영양염이 해양 생산력에 미치는 영향 평가
- 일차생산력 변화가 탄소순환에 미치는 영향 평가

해양생물 영향 평가

- 식물플랑크톤 및 여과섭식 동물 대상 실험 표준 대기분진 확보
- 모델 생물의 확보 및 유전자 정보 분석, 배양기법 개발
- 대기분진의 급/만성 독성평가기법 개발
- 물리/화학적 환경변화에 의한 복합적 영향 분석
- 먹이사슬에 의한 생물축적 및 전이영향 연구

해양생태계 영향 평가

- 해양과학기지를 이용한 황사 집중기의 생태계 변동 기작
 - (초)미세 대기분진의 유입에 따른 생물 군집 반응 평가
 - 한반도 주변해 대기분진 유입에 의한 생태계영향 모니터링체계 구축
 - 대기분진유입특성-해양물리특성-해양화학특성-생태계변동의 연관성 규명 및 모델링
 - 원격탐사 시스템을 이용한 대기분진의 영향에 따른 해양환경 변화 분석
 - 인공위성 및 헬리카이트 활용 해양유입 대기분진과 해양 클로로필 번성·용존유기물·부유물 농도 변화와의 상관관계 분석
-

제 1 절 비전 및 목표 수립

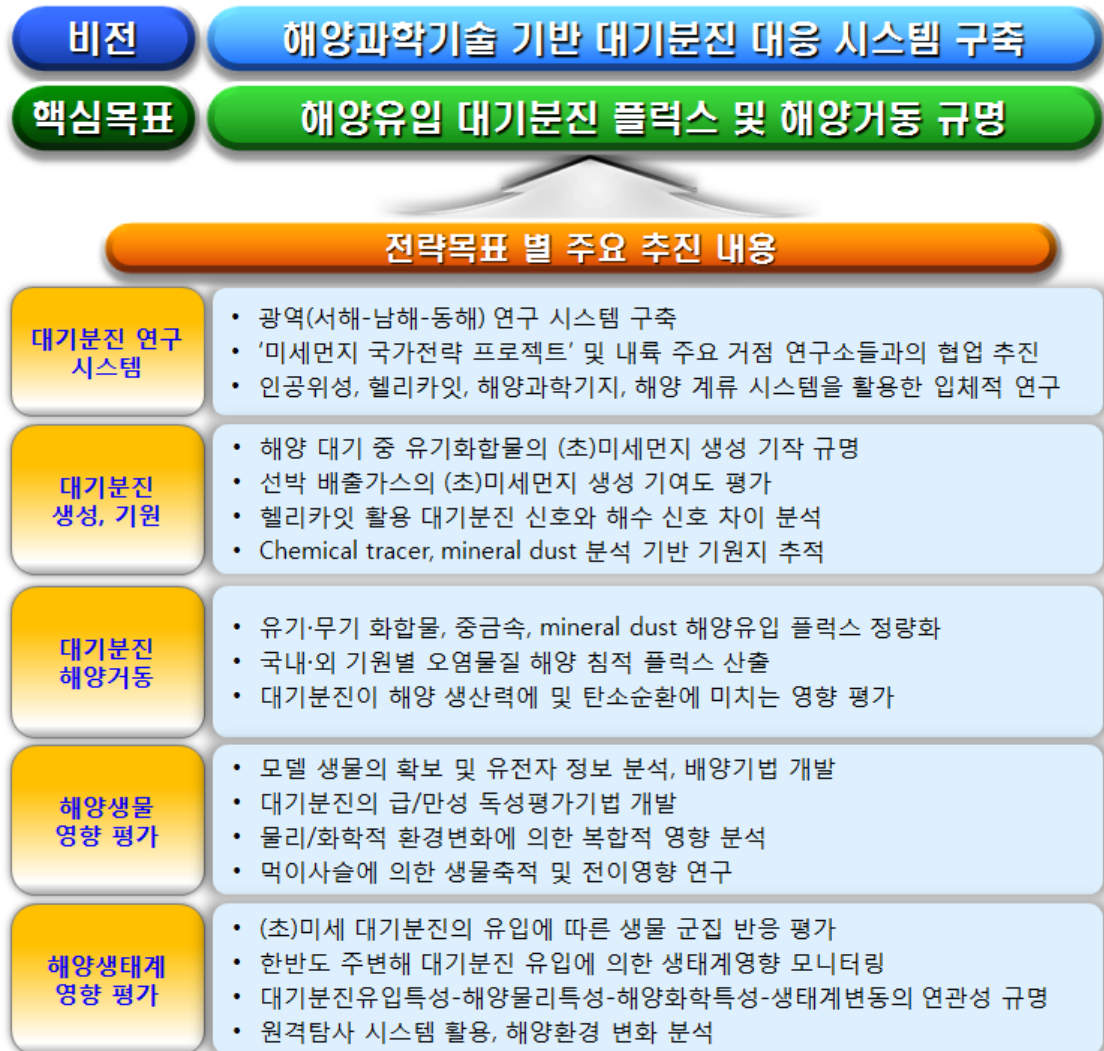


그림 3-1. 사업의 비전, 핵심목표 및 전략목표

- 해양과학기지 및 거점연구소 등 시료확보 거점 완비 및 시료 분배계획 수립, 연구 특성을 고려하여 단계별 연구 추진
- 다양한 대기분진 연구분야 중 해양과학기술원의 강점이 있는 해양에서의 대기분진 발생·유입·측정·집진 관련 연구와 해양거동, 생물·생태계 영향 평가 연구 수행

제 2 절 추진 전략

- 공동참여 및 융합연구를 통한 국가현안문제 해결
 - 대기분진을 구성하는 광물 및 유해물질(중금속, 유기·무기 화합물 등) 분석, 인공위성 자료처리뿐만 아니라, 해양유입 후 해양 내 생지화학적 거동(분해-확산-침전) 파악, 해양 생물, 생태계/환경영향 평가를 위해 물리/화학/생물/지질/위성 등 KIOST 관련 연구분야간 공동참여·융합연구 추진
 - 연구분야간 자료 공유 프로토콜 마련을 통한 융합연구 추진
 - 연구자 모두 참여하는 상시 세미나 개최를 통해, 연구자 상호간 의견 교환 및 연구목표를 향한 공감대 형성
 - 국내·외 전문가들의 자문 및 초청을 통해 주요 연구사례 및 동향 참조
 - 연구결과에 대한 정책 논리화를 통한 국가현안문제 해결을 위한 정책기초자료로 활용 추진
- 해양과학기술원 연구인프라 활용, 단독·연구분야 간 협동연구
 - 광역적·입체적 대기분진 및 해양유입/침전 물질 확보를 위해, 우리원의 연구인프라(해양과학기지, 본원/분원, 울릉센터, 제주센터 등, 그림 3-2)를 기반으로, 주요 대학(서울대, 인천대 등) 및 관련기관(기상청, 미세먼지연구사업단, 국립수산과학원 등)과의 협업 추진
 - 주요 연구분야에 대한 과기원 내·외 전문가의 적극적인 참여유도
- 연구 효율성 극대화
 - 불필요한 연구업무 최소화로 연구에만 집중할 수 있는 연구조직 운영
 - 연구자는 체계적인 현장시료 채취 및 현장 데이터 획득, 분석자료 해석 등에만 집중, 비정규직 인력활용 최소화와 연구 외적인 연구행정 업무는 연구책임자 담당

운영 가능/예정 인프라



그림 3-2. 한국해양과학기술원의 운영 가능/예정 인프라

제 3 절 주요 추진내용

1. 광역 대기분진 채집 시스템 구축

- 한국해양과학기술원의 거점 연구소, 제주/울릉 센터, 해양과학기지 등 연구 인프라를 활용한 체계적·효율적 광역 대기분진 채집시스템 구축
 - 단계별 시료 채집 시스템 구축 및 시계열 침강입자 채집 장비 운영
- 해양과학기지 활용
 - 대기분진의 주요 유입경로인 우리나라의 황해와 동중국해에 3개의 해양과학기지(이어도, 가거초, 소청초)와 1개의 대형 해양관측부이(황해중부부이)에서 관측 수행(그림 3-3)

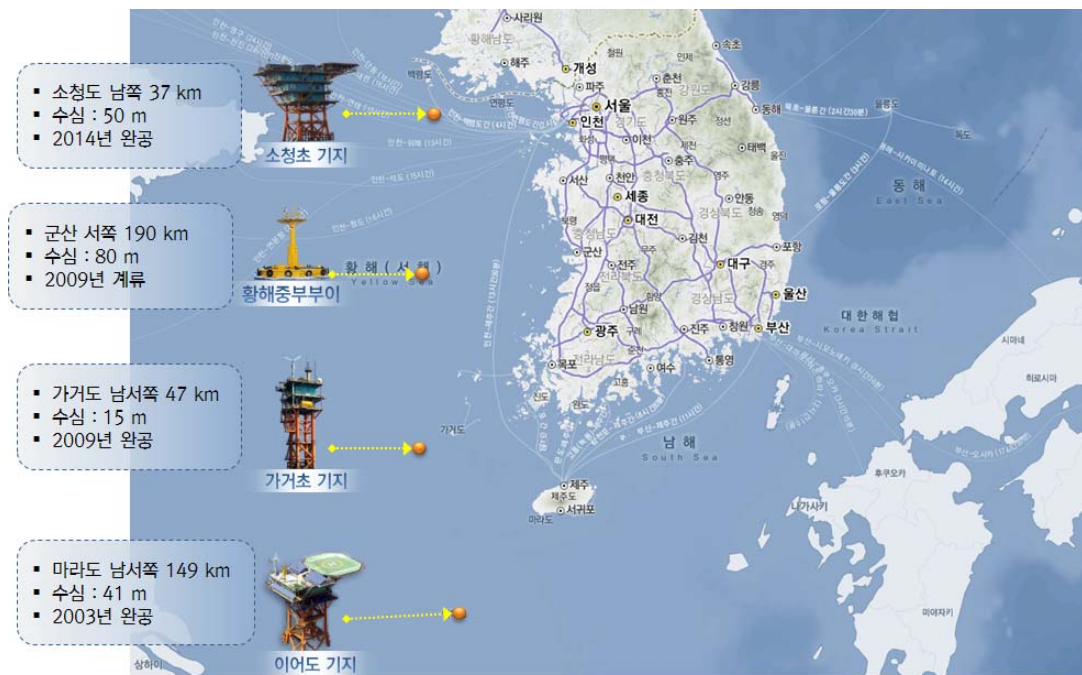


그림 3-3. 우리나라 황동중국해의 장기 해양시계열 관측을 위한 해양과학기지 및 황해중부부이

- 해양과학기지는 전력/공간 등에 대한 확장성이 크기 때문에 연속적이고 안정적으로 관측을 수행할 수 있는 대기분진 획득 체계를 마련할 수 있음
- 해양과학기지에서는 자동으로 대기분진을 샘플링하여 시계열 관측자료를 생산할 수도 있으며, 연구자들이 해양과학기지에 체류하면서 직접

대기분진 시료를 채집할 수 있음

- 위의 두 가지 샘플링 방법을 효율적으로 연계하면 기존에 다른 대기분진 관측자료보다 월등히 높은 활용성을 갖는 자료 획득이 가능하며, 대기 중의 샘플 뿐만 아니라 해수중으로 떨어지는 입자에 대한 샘플링도 가능함
- 현재 소청초 해양과학기지에서는 High Volume Air Sampler, PM2.5 센서, 오존 센서 등의 관측장비와 더불어 Wet-Deposition Sample 을 획득하기 위한 채집장비를 운영 중에 있음
- 소청초 기지는 중국으로부터 이동되어 오는 대기분진 관측에 가장 적합한 곳에 위치하고 있으며, 현재 구축되어 있는 해양과학기지 중 가장 그 규모가 크기 때문에 다양한 관측센서 및 샘플링 장비를 운영하는데 가장 좋은 조건을 가지고 있음
- 따라서 대기분진 관련 연구수행시 예산과 인력, 그리고 대기분진 샘플 획득의 가능성을 근거로 소청초 기지에 우선적으로 집중해야할 필요성 높음
- 소청초 기지의 대기분진 관측시스템이 안정화된 이후 가거초 및 이어도 기지에도 동일 관측/샘플링 시스템을 구축하는 것이 타당함
- 시계열 관측자료와 샘플의 상호비교와 지속적인 변동성 파악을 위해 해양과학기지에 구축되는 관측/샘플링 시스템은 표준화 작업을 거치는 것이 중요하며, 장비 고장 및 검교정 등으로 인한 결측을 줄이기 위해 백업장비의 확보가 반드시 필요함
- 해양과학기지 출입 주기와 시기, 그리고 체류 기간은 기지별로 다소 차이가 있으나, 대부분 1개월에 1회, 1주 정도 체류연구를 할 수 있어 이를 감안한 관측/샘플링 계획 수립 필요

○ 시료 채집장비 및 측정장비 구축

- 대기분진 해양유입 정량화를 위한 wet deposition, dry deposition, total deposition 채집 장비 구축 (그림 3-4)
- 대기분진 기원지 추적 연구를 위한 air sampler (total suspended matter, PM10, PM2.5) 장비 확보
- 과학기지의 경우, 3차원 바람관측 시스템(sonic anemometer) 설치 및 해양-대기 상호작용의 물리적 인자 파악 후 relaxation eddy accumulation 방법으로 플럭스 측정

- 대기분진 입자 포집 및 질산염, 황산염 자동분석 장치(Particle Into Liquid Sampler, PILS) 설치(과학기술지 위주)



그림 3-4. dry 및 wet deposition 채집기 (TISCH Environmental)

○ 계류 시스템 구축

- 서해 소청초 과학기지, 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축
 - 소청초 과학기지에 대기분진 획득 장치 제작, 설치
 - 소청초 과학기지에 트랩 계류, 해양유입 대기분진 플럭스 관측



그림 3-5. 소청초 과학기지 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축 모식도

- 남해 이어도 과학기지, 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축
 - 이어도 과학기지에 대기분진 획득 장치 제작, 설치
 - 이어도 과학기지에 트랩 계류, 해양유입 대기분진 플럭스 관측

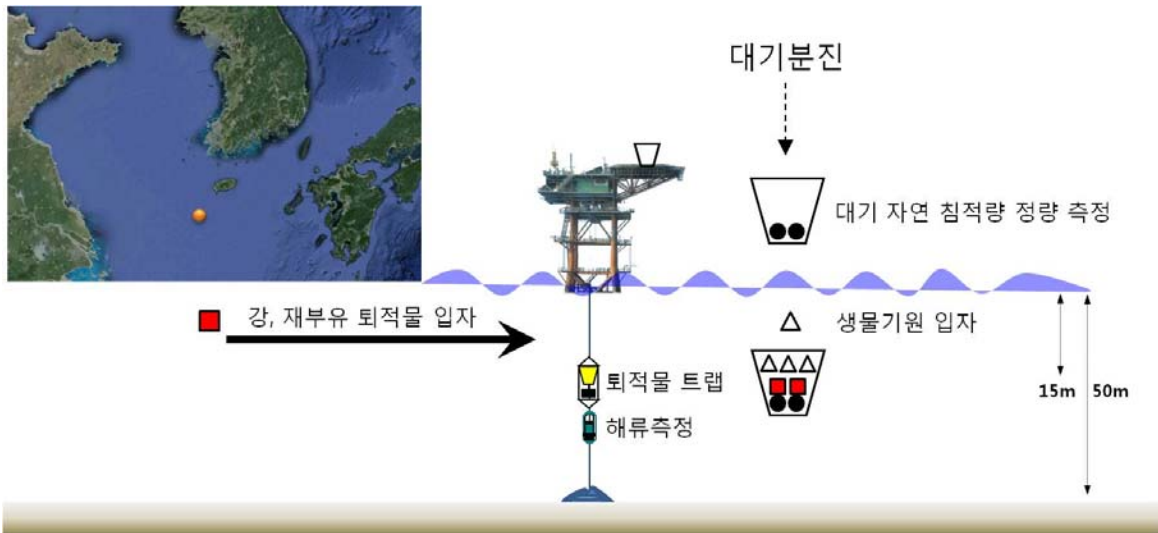


그림 3-6. 이어도 과학기지 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축 모식도

- 동해, 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축
 - 동해 연구소와 울릉도·독도 과학기지에 대기분진 획득 장치 설치
 - 울릉분지에 퇴적물 트랩 계류, 해양 유입 대기분진 플럭스 관측
 - 구간 별, 침강입자 플럭스 관찰

상부층(drifting sediment traps): 대기분진 해양 유입, 지화학 특성 변화

저층(bottom tethered sediment traps): 해양 물질순환 변화 연구

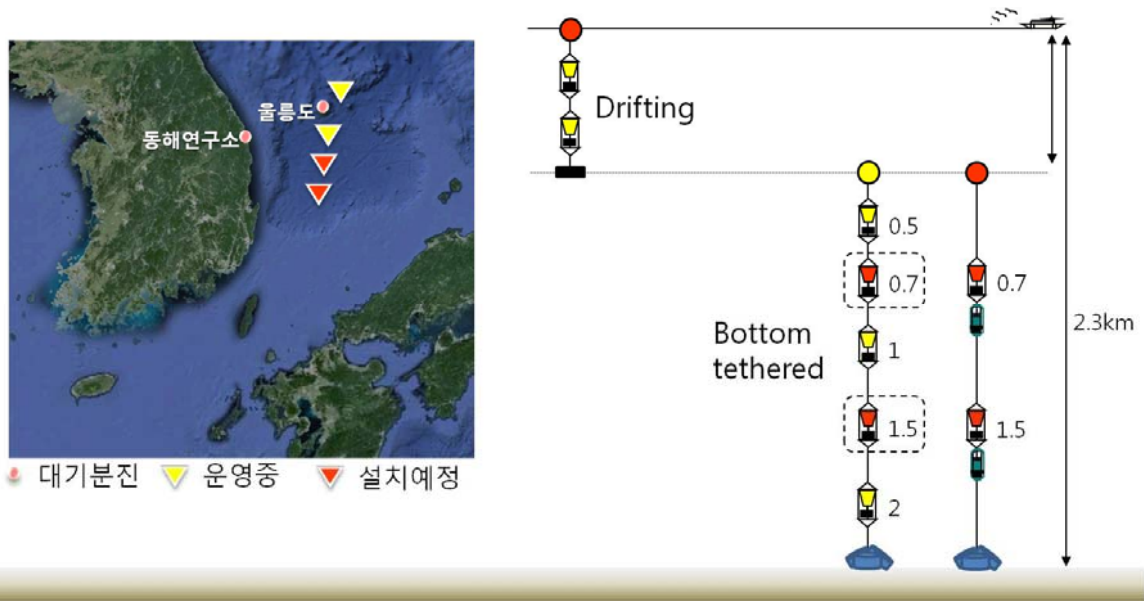


그림 3-7. 동해 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 모식도

2. 대기분진 생성 및 기원 추적 연구

- 해양 대기 중 VOCs의 초미세먼지 생성 기작 연구
 - 해양 대기 중 SOA(secondary organic aerosol) 발생 규명을 위한 VOCs의 시공간적 분포 모니터링
 - 해양 생물기원 OVOCs의 분포특성 및 해양 대기 중 SOA 발생에 미치는 영향 연구
 - 해수 중 용존상 VOCs의 시공간적 분포 모니터링 및 해양-대기 상호작용을 통한 VOCs 플럭스 계산
- 선박 배출가스의 초미세먼지 생성 기여도 연구
 - 주요 항만 대기 중 선박 배출가스 기인 VOCs 오염현황 모니터링
 - 수용체 모델(Receptor Model)을 이용한 주요 항만 대기 중 선박 배출가스 기여도 산정
 - 주요 항만 대기 중 선박 배출가스 기인 VOCs가 SOA 발생에 미치는 영향 연구
- 헬리카이트 활용
 - 헬리카이트에 초다분광 센서를 탑재해서 대기의 미세먼지 신호와 해수신호의 차이를 파악
 - 가거초 과학기지 현장관측 자료와의 검증을 통해 정량화 추진

○ Chemical tracer

- 미세먼지(total, PM2.5, PM10) 내 미량원소 분석
- 미세먼지 내 Cu, Zn, Pb 안정동위원소 분석법 정립
- 미세먼지 내 Cu, Zn, Pb 안정동위원소 분석 및 오염원/기여율 산정

○ Minerals

- 대기에서 확보한 Total suspended matter 및 시계열 침강입자 포집 장치를 이용 시료 확보하고, mineral dust를 추출한 후 동위원소, 지화학 조성, 석영의 ESR 및 CI를 측정하여 기원지 지역 규명
- 시료의 확보: 봄철 황사시기에는 event별 시료 채취 그리고 그 외 시기는 일정 주기로 시료를 채취함으로써, 계절별 기원지 변화 추적

3. 해양거동 연구

○ 유입 플럭스 정량화

- 영양염
 - (건식 침적) 소청초 과학기지, 동해 연구소, 울릉도·독도 과학기지에 대기분진 입자 포집 및 질산염, 황산염 자동분석 장치(Particle Into Liquid Sampler) 설치
 - 소청초 과학기지에 트랩 계류, 해양유입 대기분진 플럭스 관측
 - 이어도 과학기지에 트랩 계류, 해양유입 대기분진 플럭스 관측
 - 시기별 총 대기분진, 질산염, 황산염 플럭스 산출
 - (습식 침적) 강우 오토샘플러 설치
 - 시기별 빗물 내 입자성 탄소, 질소 플럭스 산출
 - 빗물 내 용존 형태의 탄소, 질산염, 황산염 플럭스 산출
- 유기물질
 - 육상 및 해양 대기 중 유기물질(유기탄소) 기원 추적과 플럭스 측정
 - 강수 시료에 대한 유색용존유기물(Colored dissolved organic matter, CDOM) 측정을 통한 대기 중 유기물의 조성과 기원 규명
 - 강수 시료 중 아미노산, 유기산, 용존유기질소등의 농도 측정을 통한 강수 중 유기화학생분 조성 파악
 - 안정 탄소동위원소(C-13) 측정을 통한 유기탄소의 기원 규명

- 중금속
 - 미세먼지(Dry/wet deposit) 내 중금속 분석
 - 해수 내 미량원소 분석(해양기원에 대한 배경농도 파악)
 - Dry deposit시료를 이용한 중금속 용출 특성 연구
 - 미세먼지/해수 내 Cu, Zn 안정동위원소 분석

○ 물질 순환

- 대기분진 유입이 해양 생산력에 미치는 영향평가
 - 대기분진 영양염(철과 질산염)이 해양 생산력에 미치는 영향평가
 - 대기분진 질산염, 황산염이 해양 알칼리도/생태계에 미치는 영향평가
 - 인공위성 자료 이용, 해양 일차 생산력 변화 관측
 - 해양 상층부(~100 m) 트랩 계류, 해양 유입 대기분진의 지화학적 거동 평가
 - 황사 전후에 현장 관측을 통한 용존 중금속 농도 비교 분석
- 해양 일차생산력 변화가 탄소순환에 미치는 영향 평가
 - 심층에 퇴적물 트랩 설치, 침강 유기탄소 플럭스 변화 측정
 - 표층 퇴적물과의 비교분석을 통한 침강 유기탄소 퇴적 기작 규명
 - 대기 침적과 해양환경 간의 상호작용 이해
- 중국/국내기원의 오염물질 해양 침적 플럭스 산출
 - 해역 별 해양유입 대기분진 플럭스 관측 시스템 구축
 - (서해) 중국기원의 오염물질 해양 침적 플럭스 산출
 - (동해) 중국과 국내 기원의 오염물질 해양 침적 플럭스 산출
 - (서해-동해 비교) 각 기원별 오염물질 해양 침적 플럭스 산출

○ Minerals

- Dry deposition 및 Wet deposition에 의해 획득한 시료에 대한 단계별 추출시험 수행함으로써, 해수에 쉽게 용존되어 해양생태계 및 환경에 직접 영향을 미치는 성분과 저층으로 침강하는 성분으로 구분하여 정량화
- 특히, 용해가 쉽게 일어나는 성분 중 해양생태계에 악영향을 미치는 금속성분 (Cd, Hg 등)과 영양염으로 활용될 수 있는 성분 (Fe 등)의 정량화

- 황사 기원지별 오염물질의 이동 매개체 및 영양염 공급원로서의 역할 규명

4. 해양생물 영향 연구

- 표준 APM 확보 및 모델생물개발
 - 실험(표준) APM의 확보 : 식물플랑크톤 및 여과섭식동물 대상
 - 모델생물의 확보 및 배양기법 개발
 - 모델생물의 유전자정보 확보
- AMP의 생물영향연구
 - AMP의 급/만성 독성평가기법 개발 : 다양한 독성평가방법을 이용한 특이적 endpoint 조사
 - AMP의 분자생물학적 영향 연구
 - 물리/화학적 환경변화에 의한 복합적 영향연구 : 수온, 염분변화 및 UV조사에 의한 독성변화조사
- AMP의 생태위해성 연구
 - 먹이사슬에 의한 생물축적 및 전이영향 연구

5. 해양생태계 영향 연구

- 소청초과학기지를 이용한 황사 집중기의 생태계 변동 기작 이해 연구
 - 춘계 황사집중기를 전후한 과학기지 체류 조사
 - 황사를 통한 영양염, 중금속, 유해물질의 유입량 변동에 따른 생태계 반응
 - 하위생태계(세균, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 원생생물) 생물량, 생산성, 군집구성 변동성 연구
 - 먹이망 구조, 생지화학적 과정 변동 연구
- (초)미세 대기분진의 유입에 따른 생물 군집 반응 연구
 - 각 계절에 포집된 (초)미세대기분진을 첨가한 메조코즘 연구
 - (초)미세대기분진 농도에 따른 생물량, 생산력 및 군집 조성 영향 평가
 - 물질순환 및 생지화학적 과정에 미치는 영향 파악

- (초)미세대기분진 유입량에 따른 해수내 영향 범위 산정
 - 미량물질(중금속,유해물질 등)이 생태계 기능에 미치는 영향 연구
 - 생태계에 미치는 영향에 대한 기초 모델 수립
- 한반도 주변해의 대기분진의 유입의 생태계 영향 모니터링 체계 구축
- 소청초, 가거초 및 이어도 과학기지, 동해연구소 및 울릉도 거점을 활용한 모니터링 체계 구축
 - 형광센서 및 광합성을 측정용 광학 장비를 이용한 식물플랑크톤 생물량 및 생산력의 연속 관측
 - 위성자료를 활용한 황사 및 미세대기분진의 농도 분포 관측
 - 대기분진이 생태계에 미치는 장기 영향 파악
- 대기분진유입특성-해양물리특성-해양화학특성-생태계변동의 연관성 규명 및 모델링
- 대기분진의 영향은 대기분진의 성분, 해양의 물리·화학적 특성 및 생물 군집조성 등 다양한 요인들이 복합적으로 결정됨
 - 각 세부 분야에 대한 연구 결과를 종합하여 대기분진이 생태계에 미치는 영향에 대해 평가할 수 있는 모형 수립 또는 모델 구축이 요구됨
- 원격탐사 기술 활용 해양환경 변화 연구
- 헬리카이트나 기지에 초다분광 센서를 탑재해서 대기의 미세먼지 신호와 해수신호의 차이를 파악하고 정량화가 가능한지 가거초과학기지에서 현장관측
 - 이어도 과학기지 스펙트로미터 자료도 분석하고 이와 위성자료간의 상관관계 파악
 - 대기 유입 에어로졸 및 미세먼지와 해양 클로로필 번성/용존유기물/부유물 농도 변화와의 상관관계 분석

제 4 절 추진 체계



그림 3-8. KIOST 대기분진 연구 추진 체계

- 해양과학기술원 연구인프라 활용
 - 해양과학기지(소청초, 가거초, 이어도, 서해중부부이), 남해·동해 연구소, 울릉·제주 센터, 동해 계류 시스템 및 연구선 활용, KIOST 주도 연구
- 광역·입체적 연구 자료·시료
 - 센서 측정자료, 인공위성 관측자료, 대기 필터 시료, 습식·건식 침적 시료, 해양 침강입자, 해수 시료 확보
- KIOST 대기분진 연구팀 구성
 - 해양 대기분진 정량화, 생성 및 기원지 추적, 대기분진 해양거동, 생물·생태계 영향 평가 분야에 대한 물리/화학/생물/지질/공학/위성 연구

센터 연구자 참여, 분야별 공동·융합 연구

- 대외 협력
 - 내륙 대기분진 시료, 침강입자 확보 및 미세먼지 생성기작, 해양거동 분석을 위한 관련연구기관 및 주요 대학과의 협업 추진
 - 주로 시료공유를 통한 협업, 토론 및 의견 교환을 추진하되, 필요시 관련 연구자가 있는 대학과 공동(위탁)연구 수행

제 5 절 기술로드맵

1. 기술정의

- (초)미세먼지 및 관련 전구물질(무기·유기화합물 등), 중금속, 광물입자 등의 채집기술, 정량화 기술, 생성기작 및 기원지 추적 기술, 해양 생지화학 거동 분석 기술, 물질순환 예측 기술, 생물·생태계 영향 분석기술

2. 분야별 핵심 기술정의

- 대기분진 정량화
 - 인공위성 및 헬리카이트 측정 신호 중 대기분진 및 해양 발생 신호 구분 기술
 - 대기분진 및 침적분진(건식·습식) 채집 기술
 - (초)미세먼지 및 전구물질, 중금속, 광물입자 등 대기분진 구성물질 별 발생량, 유입량 정량화 기술
- 대기분진 생성 및 기원지 추적
 - 해양 대기 중 유기화합물의 (초)미세먼지 변환기작 분석 기술
 - 선박 배출가스의 (초)미세먼지 생성 기여도 평가기술
 - 광물조성 분석을 통한 기원지 추적기술
 - 중금속 안정동위원소 분석기술 및 오염원·기여율 산정 기술
- 대기분진 해양거동 규명
 - 해양플럭스 유기·무기 화합물, 중금속, 광물분진 정량화 기술
 - 국내·외 기원별 해양 플럭스 산출 기술
 - 해양 생산력 영향 평가 기술
 - 탄소순환에 미치는 영향 예측 기술
- 해양생물 영향 평가
 - 생물 배양 및 유전자 정보 분석 기술
 - 급·만성 독성 평가 기술
 - 먹이사슬에 의한 생물축적 및 전이영향 분석 기술

- 물리·화학적 환경변화에 의한 복합적 생물영향 평가 기술
- 해양생태계 영향 평가
 - (초)미세 대기분진 유입에 따른 생물 군집반응 평가 기술
 - 한반도 주변해 대기분진 유입에 의한 생태계 영향 모니터링 기술
 - 대기분진 유입특성-해양무리특성-해양화학특성-생태계변동의 연관성 평가 기술
 - 원격탐사 시스템 활용 기반 해양환경 변화 분석 기술

3. 주요이슈

- 정책이슈
 - 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획('15~'24) 수립(환경부, '13.12)으로 대기질 개선 목표 강화
 - '18년도 정부연구개발 9대 중점투자방향 중 '미세먼지 분야' 포함(미래부, '17.02): (초)미세먼지 생성 원인 규명과 핵심 대응기술 조기 확보 등
 - 새정부 미세먼지 저감 대책 발표('17.06), '22년까지 예산 7조 2000억원을 투입해 미세먼지 배출량을 30% 이상 감축
- 기술이슈
 - 범부처 미세먼지 국가전략프로젝트 개시('17.06)
 - 대기분진 중 질산화물, 황산화물 등 무기화합물과 중금속 함량에 대한 과학기술적 분석 요구 증대
 - 월경성 대기분진 정량화에 대한 과학적 근거 확보, 국내·외 기원 대기분진 기여도 평가
 - 해양기원 (초)미세먼지 평가 필요
 - 대기분진의 해양유입에 따른 생물, 생태계 및 환경 영향 평가 부재
- 사회·경제적 이슈
 - '국민환경 의식조사('16)' 결과, 미세먼지에 대한 국민적 관심 고조
 - '16년 <네이처>, 국내 대표 항만인 부산항이 '세계 10대 초미세먼지 오염항만' 으로 선정
 - 베이징 공기정화 프로젝트 추진에 따라 '15년부터 베이징에 있는 공장들을 산동성과 허베이성 쪽으로 이전, '20년 까지 100% 이전 목표

4. 기술맵

표 3-1. 연구사업 추진 세부 기술맵

요소 기술	핵심기술	기술정의	최종제품	활용방안
대기분진정량화	영상신호 분석기술	인공위성 및 헬리카 잇 관측 영상신호 분석	신호분석 알고리즘	대기분진 및 해양 발생 신호 구분에 활용
	시료 채집기술	대기분진 및 침적분진(건식·습식) 채집	대기분진 및 건식·습식 침적분진 채집 장치	대기분진 연구 시료 확보 및 생물영향 평가 표준시료로 활용
	발생량, 유입량 정량화기술	(초)미세먼지 및 전구물질, 중금속, 광물입자 등 발생량, 유입량 정량화	오염물질 별 국내외 기여도 평가	월경성 대기분진 평가 자료로 활용
생성 및 기원지 추적	해양미세먼지 생성기작 분석기술	해양 대기 중 유기화합물의 (초)미세먼지 변환기작	해양-대기 상호작용에 의한 미세먼지 생성예측	월경성 대기분진 평가 자료로 활용
	선박 배출가스 분석기술	선박 배출가스의 (초)미세먼지 생성 기여도 평가	선박기원 미세먼지 생성 모델	항만관리 기초 자료 제공
	기원지 추적 기술	광물조성 분석을 통한 기원지 추적	광물분진 지도 및 유입 경로 파악	황사 등 이벤트별 광물분진 기원지 추적에 활용
	오염원·기여율 산정 기술	중금속 안정동위원소 분석을 통한 오염원·기여율 산정	대기분진 안정동위원소 분석기술 확보	대기분진 국내·외 기여도 평가에 활용
해양거동규명	해양유입 플릭스 정량화 기술	해양유입 플릭스(유기·무기 화합물, 중금속) 정량화	대상 물질별 해양거동 파악	대기분진 해양거동의 기초자료로 활용
	해양 생산력 영향 평가 기술	대기분진 해양유입에 의한 해양 생산력 변화 영향 평가	영양염 유입에 의한 생산력 변화 평가	해양환경 변화 연구의 기초자료로 활용
	탄소순환에 미치는 영향 예측 기술	일차생산력 변화가 탄소순환에 미치는 영향 예측	물질 순환에 의한 해양환경 변화 예측	해양 물질 순환 예측 자료로 활용
해양생물영향평가	유전자 정보 분석 기술	대기분진 영향 강도에 따른 생물 배양 및 유전자정보 분석	대상 해양생물 유전자 지도	대기분진의 해양생물 영향평가 기초자료로 활용
	독성 평가 기술	대기분진의 급성, 만성 독성 평가	최적화된 독성 평가 기법	생물 위해성 평가 자료로 활용
	생물축적 분석 기술	먹이사슬에 의한 생물축적 및 전이영향 분석	생물영향 종합 평가 기법	생물 위해성 평가 지침 마련

요소 기술	핵심기술	기술정의	최종제품	활용방안
해양 생태계 영향 평가	생물 군집반응 평가 기술	(초)미세 대기분진 유입에 따른 생물 군집반응 평가	해양생태계 영향 평가 기법	대기분진의 해양생태계 평가 자료로 활용
	생태계 모니터링 기술	한반도 주변해 대기 분진 유입에 의한 생태계 영향 모니터링	생태계 모니터링 기법 및 기반 구축	한반도 주변해 생태계 장기 모니터링 정점으로 활용
	해양환경변화 분석 기술	원격탐사 시스템 활용 기반 해양환경 변화 분석	시기별 해색영상 자료	광역 해양환경변화 평가 자료로 활용

5. 기술로드맵

1) 총괄 기술로드맵



그림 3-9. 사업추진 기술 로드맵

2) 요소기술 로드맵

<대기분진 정량화 기술 1-시료 채집 시스템 구축>

대기분진 기원지 및 해양 유입량 정량화를 위한 대기분진 침적 기작별 채집 장비 구축

- 정의 :

- Dry deposition, wet deposition 등 대기분진 침적 기작 및 입자 크기별 채집 장비 확보/개발 및 운영 기법 개발
- NO_x, SO_x, CO_x, VOCs 등 기체상 오염물질 실시간 관측
- 해양 침강 대기분진 채집 시계열 계류시스템 운영 기법 개발

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 광역 대기분진 채집 장비 구축
- 기체상 오염물질 실시간 측정 장비 구축
- 해양과학기지/동해 시계열 침강입자 채집장비 구축
- 광역/입체적 대기분진 채집장비 운영

그림 3-10. 시료 채집 시스템 구축을 위한 기술 로드맵

<대기분진 정량화 기술 2-발생량, 유입량 정량화 기술>

영상신호 분석, 광물입자, 자연적/인공적 발생 유기 오염물질 및 중금속 등, 대기분진의 기원별/성분별 기여도 규명 및 해양 유입량 정량화 기술

- 정의 :

- 영상신호 분석을 통한 대기분진 유입량 정량화 기술
- 대기분진의 기원별/성분별 침적량(단위면적/시간별) 산출 기술
- 외국기원 및 국내기원 대기분진의 성분별 침적량 산출 기술
- 유입 대기분진의 해양거동 (용해 및 침강 성분) 규명 기술
- 시계열 침강입자 포집장치 결과를 고려한 해양 내 하천 및 대기기원 입자 정량화 기술

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 대기분진의 기원별/성분별 최적 분석 기술 개발
- 인공위성/헬리카이트 영상분석 기술 개발
- 관측 거점별 침적량 데이터베이스 구축 및 시계열 분석기술 개발
- 유입 대기분진의 해수 내 용해를 고려한 해양환경 영향 오염 인자 및 영양염 성분 인벤토리 구축
- 하천 및 대기기원 입자 식별 기술 개발

그림 3-11. 대기분진 발생량, 유입량 정량화 기술 로드맵

<생성 및 기원지 추적 기술 1-해양 미세먼지 및 선박 배출가스>

해양미세먼지 생성기작 및 선박 배출가스 미세먼지 생성 기여도 평가 기술

- 정의 :

- 해양 대기 중 휘발성 유기화합물(VOCs) 모니터링 및 (초)미세먼지 생성 기여도 평가기술
- 선박 배출가스의 (초)미세먼지 생성 기여도 평가 및 모니터링 기술

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 해상 대기 및 해수 내 VOCs 실시간 분석기법 개발
- 우리나라 주변해역 대기과 해수 내 VOCs 오염현황 파악 및 플럭스 산정
- 해양이 SOA 발생에 미치는 영향평가
- 선박 배출가스 기인 VOCs 오염현황 파악 및 대기오염 기여도 산정
- 선박 배출가스 기인 VOCs의 SOA 발생 기여도 평가

그림 3-12. 해양 및 선박 기원 미세먼지 평가 기술 로드맵

<생성 및 기원지 추적 기술 2-기원지 추적 및 오염원·기여율 산정 기술>

미세먼지별 광물입자, 오염인자 분석, 동위원소 이용 식별/추적/기여율 산정, 해양환경 영향평가

- 정의 :

- 해양과학기지와 연안지역 미세먼지 내 광물입자, 중금속 농도 및 안정동위원소 활용, 기원지 및 오염인자 식별/추적 기술
- 해수 내 저농도 중금속 분석/안정동위원소 분석 기술 정립을 통해 해양기원에 대한 유입/거동특성/기여율을 평가하는 기술
- 미세먼지/해수 중금속 농도 및 안정동위원소 분석을 통해 미세먼지가 해양 유입 후 해양환경 및 생태계에 미치는 영향을 평가하는 기술 및 생태계에 미치는 영향을 평가하는 기술

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 미세먼지/해수 내 광물입자, 중금속 및 금속 안정동위원소 정밀 분석기법 정립
- 오염인자 식별/추적 기술 개발 및 광물입자 기원지 추적 기술 개발
- 배경농도/오염원별 시료채취 및 금속 안정동위원소비 라이브러리 구축
- 오염원 유입/거동특성/기여율을 평가하는 기술
- 해양환경 및 생태계에 미치는 영향 평가 기술
- 초미세먼지 고감도 분석기술 연구

그림 3-13. 기원지 추적 및 오염원·기여율 산정 기술 로드맵

<해양거동 규명 기술>

해양 유입 대기분진 정량화 및 해양 생산력에 미치는 영향, 탄소/질소 순환에 미치는 영향 평가

- 정의 :

- 해양 유입 유기·무기화합물, 중금속, 광물분진 정량화 기술
- 대기분진 해양유입에 의한 해양 생산력 변화 영향 평가 기술
- 일차생산력 변화가 탄소순환에 미치는 영향 및 질소 순환 평가 기술

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 광역 대기분진 해양 유입 플럭스 산출을 위한 장기 모니터링
- 해양 유입 유기/무기 화합물 정량화 기반 구축
- 대기분진 해양 내 지화학적 거동 규명
- 대기분진이 해양 물질 순환에 미치는 영향 평가

그림 3-14. 해양거동 규명 기술 로드맵

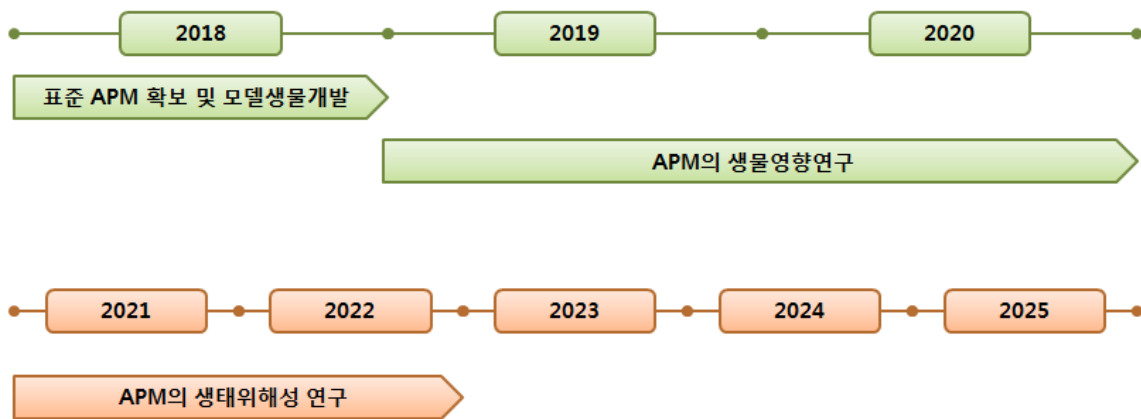
<해양생물 영향 평가 기술>

표준 대기분진(APM) 확보 및 모델생물개발, APM의 생물영향평가, APM의 생태위해성 평가 기술

- 정의 :

- 대기분진의 생물영향을 연구하기 위한 표준독성물질의 확보와 급성 및 만성독성평가를 위한 모델생물개발 기술
- 대기분진의 해양모델생물에 대한 독성을 평가하는 기술
- 대기분진의 해양생물축적 및 먹이망 내 전이여부와 상위 영양 단계 생물에 미치는 영향을 평가하는 기술

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 실험(표준) APM의 확보
- 모델생물의 확보 및 배양기법 개발
- 모델생물의 유전자정보확보
- APM의 급/만성 독성평가기법 개발
- APM의 분자생물학적 영향 연구
- 물리/화학적 환경변화에 의한 복합적 영향연구
- 먹이사슬에 의한 생물축적 및 전이영향 연구

그림 3-15. 해양생물 영향 평가 기술 로드맵

<해양생태계 영향 평가 기술>

생물 군집반응 및 해양 생태계 모니터링, 해양환경변화 분석 기술

- 정의 :

- 황사가 생태계의 구조와 기능에 미치는 세부적인 기작 규명을 통해 황사 영향에 대한 생태계 변동성 예측 능력 향상 기술
- (초)미세대기분진이 해양 생태 환경에 미치는 영향과 생태계 군집에 미치는 영향 평가 기술
- 황사 및 (초)미세대기분진의 해양 생태계 영향을 규명하고 예측하기 위한 기초모형 구축

기간별 주요 목표



세부기술별 연구개발 목표

- 황사 유입에 따른 하위 생태계 구조 및 군집 조성 변동성 파악
- 황사 유입에 따른 생지화학적 과정 변동성 규명
- (초)미세대기분진이 생물군집에 미치는 영향에 대한 기초 자료 구축
- 대기분진이 생태계에 미치는 영향 규명을 위한 장기 관측망
- 대기분진의 생태계 영향 파악 및 예측을 위한 기초 모형 수립

그림 3-16. 해양생태계 영향 평가 기술 로드맵

제 4 장

사업추진의 타당성 분석

제 1 절 정책적 타당성

□ 정책성 평가

- <우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명> 연구사업은 국가 상위 계획과 부합
 - 문재인 정부의 국정운영 5개년 계획, 100대 국정과제 중 3-58 “미세먼지 걱정없는 쾌적한 대기환경 조성”, 전략 4-84 “깨끗한 바다, 풍요로운 어장”에 부합
 - 미세먼지 이슈를 한중 정상회의 의제화에 월경성 대기분진 정량화 자료는 필수적임
 - 미래부 ‘18년 정부연구개발 9대 중점투자방향(‘17.02) 중 “(초)미세먼지 생성 원인 규명과 핵심 대응기술 조기 확보 등 국민 삶의 질 향상”에 해당
 - 미세먼지에 대한 근본적·과학적 해결책 마련을 위한 범부처(미래창조과학부, 환경부, 보건복지부) 미세먼지 국가전략프로젝트의 4대 분야 중, 미세먼지 발생·유입, 측정, 집진 분야에 해당
 - * `17년 6월 출범 미세먼지 국가전략프로젝트 4대 분야: 미세먼지 ① 발생·유입, ② 측정·예보, ③ 집진·저감, ④ 보호·대응
- 해양과기원 고유기능 발전과의 연관성
 - “해양과학기술의 창의적 원천기초연구, 응용 및 실용화 연구 “라는 해양과기원 임무와 “해양과학기술 및 해양산업 발전에 필요한 원천연구, 응용 및 실용화연구 “ 내용에 부합
 - 전략목표 1 “해양연구를 통한 기후변화 예측 및 대응”의 성과목표 중 “1-1 한반도 해역 해수순환, 물질순환, 해안지형, 고해양 연구”(한반도 해역 물질순환) 및 “1-4 해양관측위성 개발 및 서비스”에 해당(대기분진 해양유입과정 추적)
 - 전략목표 2 “해양환경/보존기술 개발 및 해양오염 관리체제 강화”의 성과목표 중 “2-2 해양 유해물질 제어기술 개발”(해양유입 오염물질 진단 및 예측) 및 “2-3 적조 및 외래생물 확산방지기술 개발”에 해당
 - 전략목표 3 “지속가능한 해양생태계 관리 및 미래 유용자원 탐색·활용”의 성과목표 중 “3-1 환경변화에 따른 해양생태계 반응 이해 및 대응기술 연구”에 해당

□ 국가차원의 연구개발 필요성

- 미세먼지 관련 연구개발 사업은 공공성, 공익성, 종합성 등 다양한 역할을 갖고 있는 사회문제 해결형 연구사업으로서 과학기술의 사회적 책임, 사회적 수요 대응 등을 위해 국가차원의 연구개발이 필요함
- 해양에서의 대기분진 플럭스 연구를 통해 획득되는 국내·외 기여도 평가 자료는 대기분진 관련 국제 외교, 특히 대중 외교 정책자료로 활용도가 높음
- 대기분진의 해양유입에 따른 해양 생물·생태계·환경변화 영향은 한반도 해역 환경보존 및 오염 관리 측면뿐만 아니라 장기적으로는 물질순환에 의한 기후변화 영향까지 평가할 수 있는 중요한 공익적 연구임
- 해양에서의 대기분진 연구가 중요함에도 불구하고 체계적·광역적으로 수행된 적이 없고, 특히 대기분진 발생, 유입, 측정 분야는 높은 공공성에도 불구하고 단기성과를 바탕으로 한 산업화 추진이 어렵기 때문에 국가차원의 연구 지원이 필요함

제 2 절 기술적 타당성

□ 비전 및 목표설정의 우수성

- 본 기획연구에서 “해양과학기술 기반 대기분진 대응 시스템 구축”을 비전으로 도출된 주요 사업 범위는 현재 추진되고 있는 미세먼지 국가 정책에 필수 자료를 제공할 수 있을 뿐만 아니라 해양과학기술원의 고유 임무와도 부합됨
- 로드맵은 미세먼지 관련 국가적 주요 이슈에 대해 해양과학기술 분야에 선점할 수 있도록 연차별로 주요 연구개발 목표를 설정하여, 연구 분야별 주요 연구쟁점에 대한 해답을 제시할 수 있도록 구성함
- 해양과학기술원의 물리/화학/생물/지질/공학/위성 분야의 연구 강점을 융합하여 대기분진 정량화, 생성 및 기원지 추적, 대기분진 해양거동 규명, 생물·생태계 영향 평가로 대표되는 세부 연구목표 수립

□ 연구개발 성공 가능성

- 지속적인 연구성과가 도출되고 있는 육상에서의 연구들을 고려했을 때 해양에서의 대기분진 연구는 지속적이고 장기적인 고정 관측 및 연구시료 확보 여부가 매우 중요한 성공 요소이며, 고정 관측소로 해양과학기술지 및 제주/울릉 센터 활용 및 동해 장기 계류시스템 운영, 시기별 연구선 운항을 통해 연구에 필요한 자료 및 시료를 확보하여 연구 성공 가능성을 높일 수 있음
- 해양의 경우, 육상과는 다르게 2차적인 오염의 영향이 적기 때문에 기존 육상에서의 연구보다 정확한 월경성 대기분진 정량화 정보를 제공할 수 있음
- 대기분진 해양유입에 의한 생물·생태계 영향 연구는 지금까지 체계적으로 수행된 바 없는 프론티어 연구로서, 독성실험 인덱스 생물 조기 개발과 최적의 메조코즘 조건 설정이 연구목표 달성에 중요함
- 특히, 최근 출범한 미세먼지 국가전략프로젝트 사업 및 연구원 관련 수행 과제와의 연계성을 통해 시료확보 및 자료공유 등 시너지 효과 창출이 가능하며, 비용 효율적 연구를 수행할 수 있음

제 3 절 경제적 타당성

□ 예산규모의 적절성

- 사업 예산은 8년('18~'25) 간 총 150억원이 투입될 예정으로 1단계 “연구 기반 구축, 기초 연구자료 확보 및 월경성 대기분진 추적”의 예산은 3년('18~'20) 간 60억원, 2단계 “대기분진 정량화, 미세먼지 해양기여도, 물질순환, 해양생물/생태계 영향에 대한 종합 평가”의 예산은 5년('21~'25) 간 90억원
 - 본 사업은 해양과학기지, 남해·동해 연구소, 제주·울릉 센터 및 해양계류 시스템에서 지속적인 연구시료 확보 및 관측 자료 획득과 연구선운항이 요구되기 때문에 거점 별 연구장비 구축이 필수적이지만, 기존 단위 사업에서 활용하던 연구장비 공동 활용 추진 및 육상 연구자료 활용을 통해 최소의 비용으로 사업효과 극대화 가능
 - 유기·무기 화합물, 중금속 분석 등 고가의 장비가 필요한 경우, 위탁 혹은 협력연구를 통해 예산 절감이 가능함

□ 과학기술적 파급효과

- 해양유입 대기분진의 <발생-이동-해양유입-침전-생물·생태계 영향> 전 과정에 대한 광역·입체적 연구 체계 및 기법 확립을 통한 <해양-대기 연계연구> 확대 및 해양과학기술원 임무 범위 확장
- 해양 생물, 생태계, 환경보호 연구기반 구축으로 과학기술연구 선진국 도약의 기회를 제공할 것으로 기대됨
- 기존 단순 대기오염물질의 측정값 기반 대기질 정보제공이 아닌, 대기오염물질의 배출, 확산, 이동, 화학반응, 자정 작용 요인들이 종합적으로 고려된 종합 대기질 예측 모델기반 정보제공을 위한 연구개발로의 전환
- 미세먼지 생성 전구물질인 휘발성 유기화합물과 질소산화물의 광화학반응에 따른 2차 오염물질 생성과 기후와의 상관성뿐만 아니라 해양 탄소·질소 순환 측면에서 기후변화 대응 연구의 초석 제공
- 대기분진의 독성실험 지표생물 확보 및 현장 메조코즘 실험의 제한인자를 규명함으로써 대기분진 구성 유기·무기 화합물, 중금속 등과 유사 해양 폐기물 및 환경오염 물질에 대한 신속한 생물·생태계 영향 평가기반

마련

□ 경제적 파급효과

- 대기 및 해수 중 극미량의 대기분진 분석값 활용 센서 보정기술 확보를 통한 대기분진 구성성분 별 감지 센서 고도화 산업에 기여
- <발생-확산-이동-화학반응-환경영향> 전 과정에 대한 국민 눈높이에 맞는 정보제공을 위한 대기분진 분야 증강현실 서비스 산업으로의 파급
- 해양 생물·생태계 영향 평가를 통한 대기분진 영향 저항물질 개발 산업 육성
- 개발된 기술은 환경영향평가와 종다양성보호 관련 산업 확장에 기여할 수 있음

□ 경제성 분석 결과

- B/C ratio, NPV(순현재가치), IRR 모두 경제적 타당성 기준을 상회
 - 경제성 분석에서 NPV0, B/C1, IRR사회적 할인율인 경우 각각 경제성이 있다고 판단함
 - NPV, B/C ratio, IRR 모두 경제성 분석 통과 기준을 상회하였음

표 4-1. 경제성 분석 결과

현재가치 (백만원)		B/C ratio	NPV (백만원)	IRR (%)
편익	비용			
49,929	11,963	4.17	37,967	29.0

제 5 장

기대효과 및 향후 활용방안

제 1 절 기대 효과

□ 경제적 측면

- 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 휘발성 유기물질(VOCs), 중금속 등 대기 분진 구성 물질 별 정량화를 통한 대기분진 영향 및 저감에 따르는 사회적 비용 책정
- 배출가스규제지역(ECA) 및 황산화물배출규제지역(SECA) 통항 선박 대상 연료 내 황함량 및 SOx, NOx, VOCs 배출 정밀평가를 통한 선진국 환경 규제 대응 및 국내 해운업계 보호
- 해양유입 대기분진 사업을 통해 개발이 예상되는 오염물질 분석/추적기술, 환경영향평가기술, 생물/환경 위해성평가기술, 저감/처리기술은 해양 환경보호에 대한 관심증대로 시장성이 점차 확대될 것으로 예상
- 관련 산업 육성 및 환경 관련 분야 신산업 창출로 산업 확장 및 고용창출 효과 기대
- 직접적 경제적 편익
 - 가구당 평균 지불의사액은 1818.2원/년으로 도출됨
 - 가구당 편익을 국내 범위로 확장한 결과, 연간 30,360백만원으로 도출
 - 향후 5년간 매년 1회 소득세에서 추가적으로 납부하는 것으로 지불의사를 질문하였으므로, 총 편익은 121,104백만원으로 도출

표 5-1. 직접적 경제적 편익 추정 결과

가구당 연간 지불의사액 (원/년)	연간 편익 (백만원/년)	총 편익 (백만원)
1,818.2	30,360	121,104

- 간접적 경제적 편익
 - 산업연관분석을 활용하여 본 사업의 간접적 경제적 편익을 추정하였음
 - 본 사업 관련 산업들을 추출하여 재구성한 산업연관표를 기준으로 생산유발효과, 부가가치유발효과, 취업유발효과를 분석하였음
 - 본 사업으로 인한 간접적 경제적 편익 (생산유발효과) 2,793억원

(부가가치유발효과): 1,163억원

(취업유발효과) 1,870명

□ 환경적 측면

- 해양에서의 미세먼지 정량화를 통한 대기오염물질 유입량 및 배출량 불확실성 개선
- 해양 관측 거점 확보 및 해양위성 자료 활용을 통한 미세먼지 예보 및 측정 범위 확장
- 해양-대기 상호 작용에 의한 미세먼지 발생이 기후변화 미치는 영향 평가 기대
- 주요 항포구 대기 중 선박 배출가스의 미세먼지 오염기여도 산정을 통한 효율적인 미세먼지 저감대책 수립 및 지역주민 노출 피해 최소화

□ 정책적 측면

- 정책적 대기분진 저감 방안 및 배출 기준 마련에 기여
- 대기분진 관련 대외 외교정책 자료 제공
- 생물 독성/위해성 및 생태계, 환경변화 영향 평가는 환경보전 프로그램 및 국제 규범에 부합 되며, 관련 환경 친화적 기술을 발전시킬 수 있는 원동력 제공
- 사업을 통해 확보한 다양한 과학적/기술적 자료는 대양의 효율적 이용 및 관리체계 구현에 활용
- 선진적인 선박 배출가스 및 미세먼지 발생량 평가를 통한 MARPOL 환경 규제 선도적 이행에 기여
- 국내 운항 선박 특성에 맞는 선박 배출가스 배출계수 산정을 통한 효율적인 온실가스, 대기오염물질, 미세먼지 저감대책 수립

제 2 절 활용 방안

- 국가적 환경현안인 미세먼지 오염원 인벤토리 구축에 활용
- 해양유입 대기분진 정량화 및 오염물질 특성 파악, 국내·외 대기분진의 상대적 기여도 평가, 기원지 및 오염원 추적을 통한 정책적 대기분진 저감 방안 및 배출 기준 마련을 위한 자료로 활용
- 해양기원 미세먼지 발생기작 이해를 통한 대기오염물질 유입량 및 국내 배출량 불확실성 개선에 활용
- 국외 기원 해양유입 대기분진 정량화를 통한 월경성 오염문제 등 외교적 대응 자료로 활용
- 연구결과에 대한 정책 논리화를 통한 국가현안문제 해결을 위한 정책기초자료로 활용
- MARPOL 부속서 VI 이행을 위한 국내 오염현황 파악 및 정책자료로 활용
- 관할해역 관리를 위한 생물·생태계, 환경변화 모니터링 자료로 활용
- 해양유입 오염물의 분석/추적, 환경영향평가, 생물/환경위해성 평가, 저감/처리에 활용
- 관련 환경기술 개발 기초자료로 활용

< 참 고 문 헌 >

- Albuquerque, M., Coutinho, M., Rodrigues, J., Ginja, J., and Borrego, C. (2017). Long-term monitoring of trace metals in PM10 and total gaseous mercury in the atmosphere of Porto, Portugal. *Atmospheric Pollution Research*, 8(3), 535–544. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.12.001>
- Báez, A., Belmont, R., García, R., Padilla, H., and Torres, M. C. (2007). Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico. *Atmospheric Research*, 86(1), 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.03.005>
- Bishop, J. K. B. (2002). Robotic Observations of Dust Storm Enhancement of Carbon Biomass in the North Pacific. *Science*, 298(5594), 817–821. <https://doi.org/10.1126/science.1074961>
- Calvo, E., Pelejero, C., Logan, G. A., & De Deckker, P. (2004). Dust-induced changes in phytoplankton composition in the Tasman Sea during the last four glacial cycles. *Paleoceanography*, 19(2). <https://doi.org/10.1029/2003PA000992>
- Carpenter, L. J., Archer, S. D., and Beale, R. (2012). Ocean-atmosphere trace gas exchange. *Chem. Soc. Rev.*, 41(19), 6473–6506. <https://doi.org/10.1039/c2cs35121h>
- Cattaneo, R., Rouviere, C., Rassoulzadegan, F., and Weinbauer, M. G. (2010). Association of marine viral and bacterial communities with reference black carbon particles under experimental conditions: an analysis with scanning electron, epifluorescence and confocal laser scanning microscopy. *FEMS Microbiology Ecology*, 74(2), 382–396. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00953.x>
- Chandra, S., Kulshrestha, M. J., Singh, R., and Singh, N. (2017). Chemical characteristics of trace metals in PM10 and their concentrated weighted trajectory analysis at Central Delhi, India. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 55, 184–196. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.06.028>
- Chen, J., Li, G., Yang, J., Rao, W., Lu, H., Balsam, W., Sun, Y., and Ji, J. (2007). Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(15), 3904–3914.

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.04.033>

- Chen, J., Tan, M., Li, Y., Zheng, J., Zhang, Y., Shan, Z., Zhang, G., and Li, Y. (2008). Characteristics of trace elements and lead isotope ratios in PM_{2.5} from four sites in Shanghai. *Journal of Hazardous Materials*, 156(1-3), 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.11.122>
- Cho, B. C., and Hwang, C. Y. (2011). Prokaryotic abundance and 16S rRNA gene sequences detected in marine aerosols on the East Sea (Korea). *FEMS Microbiology Ecology*, 76(2), 327-341. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01053.x>
- Cho, B. C., and Jang, G. Il. (2014). Active and diverse rainwater bacteria collected at an inland site in spring and summer 2011. *Atmospheric Environment*, 94, 409-416. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.048>
- Claustre, H., Morel, A., Hooker, S. B., Babin, M., Antoine, D., Oubelkheir, K., Bricaud, A., Leblanc, K., Quéguiner, B., and Maritorena, S. (2002). Is desert dust making oligotrophic waters greener? *Geophysical Research Letters*, 29(10), 107-1-107-4. <https://doi.org/10.1029/2001GL014056>
- Corrigan, C.E., G.C. Roberts, M.V. Ramana, D. Kim, and V. Ramanathan (2007), Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the Indian Ocean using autonomous unmanned aerial vehicles, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 7, 11429-11463.
- Dong, W., Zheng, J., and Guo, Q. (2017). Particle-size speciation of Pu isotopes in surface soils from Inner Mongolia (China) and its implications for Asian Dust monitoring. *Applied Radiation and Isotopes*, 120, 133-136. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.12.015>
- Du, Z., Xiao, C., Liu, Y., Yang, J., and Li, C. (2017). Natural vs. anthropogenic sources supply aeolian dust to the Miaoergou Glacier: Evidence from Sr-Pb isotopes in the eastern Tianshan ice core. *Quaternary International*, 430, 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.069>
- Fernández-Olmo, I., Andecochea, C., Ruiz, S., Fernández-Ferreras, J. A., and Irabien, A. (2016). Local source identification of trace metals in urban/industrial mixed land-use areas with daily PM₁₀ limit value exceedances. *Atmospheric Research*, 171, 92-106.

- Gantt, B., Meskhidze, N., and Kamykowski, D. (2009). A new physically-based quantification of marine isoprene and primary organic aerosol emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 4915–4927. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4915-2009>
- Garcia, N. S., Fu, F., Sedwick, P. N., and Hutchins, D. A. (2015). Iron deficiency increases growth and nitrogen-fixation rates of phosphorus-deficient marine cyanobacteria. *The ISME Journal*, 9(1), 238–245. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.104>
- Gorka, M., Rybicki, M., Simoneit, B. R. T., and Marynowski, L. (2014). Determination of multiple organic matter sources in aerosol PM10 from Wroclaw, Poland using molecular and stable carbon isotope compositions. *Atmospheric Environment*, 89, 739–748. <https://doi.org/DOI 10.1016/j.atmosenv.2014.02.064>
- Graney, J. R., Landis, M. S., Puckett, K. J., Studabaker, W. B., Edgerton, E. S., Legge, A. H., and Percy, K. E. (2017). Differential accumulation of PAHs, elements, and Pb isotopes by five lichen species from the Athabasca Oil Sands Region in Alberta, Canada. *Chemosphere*, 184, 700–710. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.036>
- Han, Y., Zhao, T., Song, L., Fang, X., Yin, Y., Deng, Z., Wang, S., and Fan, S. (2011). A linkage between Asian dust, dissolved iron and marine export production in the deep ocean. *Atmospheric Environment*, 45(25), 4291–4298. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.04.078>
- Han, Y.X., Cheng Y.H., Fang X.M., and Zhao T.L. (2008), The possible influence of dust aerosol on precipitation in Tarim Basin. *China Environ. Sci.*, 28, 102–106.
- Jeong, G. Y. (2008). Bulk and single-particle mineralogy of Asian dust and a comparison with its source soils. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(2). <https://doi.org/10.1029/2007JD008606>
- Jo, C. O., Lee, J. Y., Park, K. A., Kim, Y. H., and Kim, K. R. (2007). Asian dust initiated early spring bloom in the northern East/Japan Sea. *Geophysical Research Letters*, 34(5). <https://doi.org/10.1029/2006GL027395>
- Johansson, B., Henein, M.Y., Nicoll, R., Bengrid, T., Zhao, Y., and Schmermund, A. (2017). East Asian dust deposition impacts on marine

- biological productivity. *Mar. Pollut. Bull.*, 114(1), 6–6.
- KECO (Korea Environment Corporation) (2016). Real-time air quality, <<http://www.airkorea.or.kr/>>.
- Kim, S., Hong, K. H., Jun, H., Park, Y. J., Park, M., and Sunwoo, Y. (2014). Effect of precipitation on air pollutant concentration in Seoul, Korea. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 8(4), 202–211. <https://doi.org/10.5572/ajae.2014.8.4.202>
- Lateran, S., Sedan, M. F., Harithuddin, A. S. M., and Azrad, S. (2016). Development of unmanned aerial vehicle (UAV) based high altitude balloon (HAB) platform for active aerosol sampling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 152, 12018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012018>
- Lee, M. K., Lee, Y. Il, and Yi, H. Il. (2010). Provenances of atmospheric dust over Korea from Sr-Nd isotopes and rare earth elements in early 2006. *Atmospheric Environment*, 44(20), 2401–2414. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.010>
- Lee, P. K., and Yu, S. (2016). Lead isotopes combined with a sequential extraction procedure for source apportionment in the dry deposition of Asian dust and non-Asian dust. *Environmental Pollution*, 210, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.010>
- López-Veneroni, D. (2009). The stable carbon isotope composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City Metropolitan Area air. *Atmospheric Environment*, 43(29), 4491–4502. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.036>
- Loye-Pilot, M. D., and Morelli, J. (1988). Fluctuations of ionic composition of precipitations collected in Corsica related to changes in the origins of incoming aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 19(5), 577–585. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(88\)90209-1](https://doi.org/10.1016/0021-8502(88)90209-1)
- Malits, A., Cattaneo, R., Sintès, E., Gasol, Josep, M., Henrdl, Gerhard, J., and Weinbauer, M. (2015). Potential impacts of black carbon on the marine microbial community. *Aquatic Microbial Ecology*, 75, 27–42. <https://doi.org/10.3354/ame01742>
- Mandija, F., Sicard, M., Comerón, A., Alados-Arboledas, L., Guerrero-Rascado, J. L., Bravo-Aranda, J. A., Granados-Muñoz, M.

- J., Lyamani, H., Muñoz Porcar, C., Rocadenbosch, F., Rodríguez, A., Valenzuela, A., and García Vizcaíno, D. (2017). Origin and pathways of the mineral dust transport to two Spanish EARLINET sites: Effect on the observed columnar and range-resolved dust optical properties. *Atmospheric Research*, 187, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.12.002>
- Müller, C., Iinuma, Y., Karstensen, J., van Pinxteren, D., Lehmann, S., Gnauk, T., and Herrmann, H. (2009). Seasonal variation of aliphatic amines in marine sub-micrometer particles at the Cape Verde islands. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 9(4), 14825–14855. <https://doi.org/10.5194/acpd-9-14825-2009>.
- Nagashima, K., Tada, R., and Toyoda, S. (2013). Westerly jet–East Asian summer monsoon connection during the Holocene. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(12), 5041–5053. <https://doi.org/10.1002/2013GC004931>
- Nagashima, K., Tada, R., Tani, A., Sun, Y., Isozaki, Y., Toyoda, S., and Hasegawa, H. (2011). Millennial-scale oscillations of the westerly jet path during the last glacial period. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6), 1214–1220. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.08.010>
- Nagashima, K., Tada, R., Tani, A., Toyoda, S., Sun, Y., and Isozaki, Y. (2007). Contribution of aeolian dust in Japan Sea sediments estimated from ESR signal intensity and crystallinity of quartz. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(2). <https://doi.org/10.1029/2006GC001364>
- Nakano, T., Nishikawa, M., Mori, I., Shin, K., Hosono, T., and Yokoo, Y. (2005). Source and evolution of the “perfect Asian dust storm” in early April 2001: Implications of the Sr–Nd isotope ratios. *Atmospheric Environment*, 39(30), 5568–5575. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.050>
- Ouyang, W., Guo, B., Cai, G., Li, Q., Han, S., Liu, B., and Liu, X. (2015). The washing effect of precipitation on particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing. *Science of the Total Environment*, 505, 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.062>
- Özsoy, T., and Saydam, A. C. (2001). Iron speciation in precipitation in the

- North-Eastern Mediterranean and its relationship with Sahara dust. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 40(1), 41–76. <https://doi.org/10.1023/A:1010602026579>
- Park, J. Y., Kim, M., Han, S., Lim, S., Kim, G., and Park, K. (2014). Measurement of insoluble submicrometer particles and biological materials in seawater to investigate marine aerosol production. *Journal of Aerosol Science*, 75, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.04.004>
- Pérez, N., Pey, J., Reche, C., Cortés, J., Alastuey, A., and Querol, X. (2016). Impact of harbour emissions on ambient PM₁₀ and PM_{2.5} in Barcelona (Spain): Evidences of secondary aerosol formation within the urban area. *Science of the Total Environment*, 571, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.025>
- Read, K. A., Carpenter, L. J., Arnold, S. R., Beale, R., Nightingale, P. D., Hopkins, J. R., Lewis, A. C., Lee, J. D., Mendes, L., and Pickering, S. J. (2012). Multiannual observations of acetone, methanol, and acetaldehyde in remote tropical Atlantic air: Implications for atmospheric OVOC budgets and oxidative capacity. *Environmental Science and Technology*, 46(20), 11028–11039. <https://doi.org/10.1021/es302082p>
- Ren, J. L., Zhang, G. L., Zhang, J., Shi, J. H., Liu, S. M., Li, F. M., Jin, J., and Liu, C. G. (2011). Distribution of dissolved aluminum in the Southern Yellow Sea: Influences of a dust storm and the spring bloom. *Marine Chemistry*, 125(1–4), 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.02.004>
- Schmid, B. and Ivey M. (2016), ARM Unmanned Aerial Systems Implementation Plan, Office of Science, Office of Biological and Environmental Research, DOE/SC-ARM-16-054.
- Seo, I., Y. I. Lee, C. M. Yoo, H. J. Kim, and K. Hyeong (2014). Sr-Nd isotope composition and clay mineral assemblages in eolian dust from the central Philippine Sea over the last 600 kyr: Implications for the transport mechanism of Asian dust, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 11,492–411,504, doi:10.1002/2014JD022025
- Shimamura, T., Iwashita, M., Iijima, S., Shintani, M., and Takaku, Y. (2007).

- Major to ultra trace elements in rainfall collected in suburban Tokyo. *Atmospheric Environment*, 41(33), 6999–7010. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.010>
- Srithawirat, T., Latif, M. T., and Sulaiman, F. R. (2016). Indoor PM10 and its heavy metal composition at a roadside residential environment, Phitsanulok, Thailand. *Atmosfera*, 29(4), 311–322. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.03>
- Talbi, A., Kerchich, Y., Kerbachi, R., and Boughedaoui, M. (2017). Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2.5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Algeria. *Environmental Pollution*, 232, 252–263.
- Tan, S. C., Shi, G. Y., Shi, J. H., Gao, H. W., and Yao, X. (2011). Correlation of Asian dust with chlorophyll and primary productivity in the coastal seas of China during the period from 1998 to 2008. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(2). <https://doi.org/10.1029/2010JG001456>
- Vignelles, D., Roberts, T. J., Carboni, E., Ilyinskaya, E., Pfeffer, M., Dagsson Waldhauserova, P., Schmidt, A., Berthet, G., Jegou, F., Renard, J. B., Ólafsson, H., Bergsson, B., Yeo, R., Fannar Reynisson, N., Grainger, R. G., Galle, B., Conde, V., Arellano, S., Lurton, T., Coute, B., and Duverger, V. (2016). Balloon-borne measurement of the aerosol size distribution from an Icelandic flood basalt eruption. *Earth and Planetary Science Letters*, 453, 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.08.027>
- Wan, Z., Zhu, M., Chen, S., and Sperling, D. (2016). Pollution: Three steps to a green shipping industry. *Nature*, 530(7590), 275–277. <https://doi.org/10.1038/530275a>
- Wang, F., Bu, Q., Xia, X., and Shen, M. (2011). Contrasting effects of black carbon amendments on PAH bioaccumulation by *Chironomus plumosus* larvae in two distinct sediments: Role of water absorption and particle ingestion. *Environmental Pollution*, 159(7), 1905–1913. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.033>
- Wang, R., Liu, B., Li, H., Zou, X., Wang, J., Liu, W., Cheng, H., Kang, L., and Zhang, C. (2017). Variation of strong dust storm events in

- Northern China during 1978–2007. *Atmospheric Research*, 183, 166–172.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.09.002>
- Westrich, J. R., Ebling, A. M., Landing, W. M., Joyner, J. L., Kemp, K. M., Griffin, D. W., and Lipp, E. K. (2016). Saharan dust nutrients promote *Vibrio* bloom formation in marine surface waters. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(21), 5964–5969. <https://doi.org/10.1073/pnas.1518080113>
- Widory, D. (2007). Nitrogen isotopes: Tracers of origin and processes affecting PM10 in the atmosphere of Paris. *Atmospheric Environment*, 41(11), 2382–2390. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.11.009>
- Widory, D., Liu, X., and Dong, S. (2010). Isotopes as tracers of sources of lead and strontium in aerosols (TSP & PM2.5) in Beijing. *Atmospheric Environment*, 44(30), 3679–3687.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.036>
- Xing, J., Song, J., Yuan, H., Li, X., Li, N., Duan, L., Kang, X., and Wang, Q. (2017). Fluxes, seasonal patterns and sources of various nutrient species (nitrogen, phosphorus and silicon) in atmospheric wet deposition and their ecological effects on Jiaozhou Bay, North China. *Science of the Total Environment*, 576, 617–627.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.134>
- Yoon, J. E., Kim, K., Macdonald, A. M., Park, K. T., Kim, H. C., Yoo, K. C., Yoon, H. I., Yang, E. J., Jung, J., Lim, J. H., Kim, J. H., Lee, J., Choi, T. J., Song, J. M., and Kim, I. N. (2017). Spatial and temporal variabilities of spring Asian dust events and their impacts on chlorophyll-a concentrations in the western North Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 44(3), 1474–1482.
<https://doi.org/10.1002/2016GL072124>
- Yuan, W., and Zhang, J. (2006). High correlations between Asian dust events and biological productivity in the western North Pacific. *Geophysical Research Letters*, 33(7).
<https://doi.org/10.1029/2005GL025174>
- Zhang, C., Gao, H., Yao, X., Shi, Z., Shi, J., Yu, Y., and Meng, L. (2017). Phytoplankton growth responses to Asian dust additions in the Northwest Pacific Ocean versus the Yellow Sea. *Biogeosciences*

- 강미주 (2017). 미세먼지 이슈, 항만을 덮치다. 해양한국, 7, 78-85.
- 경선영, 김영삼, 김우진, 박무석, 송진우, 염호기, 윤형규, 이진국, 정성환 (2015). 미세먼지/황사 건강피해 예방 및 권고지침: 호흡기질환, Journal of the Korean Medical Association, 58(11), 1034-1043.
- 국립환경과학원 (2014). 국내 연근해 선박에 의한 대기오염물질 및 온실가스 배출계수 개발과 배출량 산정 최종보고서. pp. 302
- 김기주, 이승훈, 현동림, 고희정, 김원형, 강창희 (2014). 황사와 연무시 PM10 및 PM2.5 미세먼지 조성 비교 : 2010-2011년 고산지역 측정, 한국분석과학회, 분석과학 27(1), 1-10
- 김인수, 장지용, 김태훈, 박준범, 심재민, 김진배, 변영섭, 성정훈, 윤영원, 김종윤, 조양제, 김창수, 정보영 (2015). 미세먼지/황사 건강피해 예방 및 권고지침: 심혈관질환, Journal of the Korean Medical Association, 58(11), 1044-1059.
- 김학성, 윤마병, 손정주 (2010). 2008년 동아시아 대륙으로부터 기원이 다른 먼지와 인위적 오염 입자의 광역적 이동 사례에 대한 분석, Journal of the Korean Earth Science Society, 31(6), 600-607.
- 박주선 (2013). 동아시아 황사의 특성 및 MTSAT-1R과 MODIS IR 채널을 이용한 황사 탐지 방법, 부산대학교 석사 학위 논문, pp. 55.
- 송정민, 부준오, 양승혁, 이재윤, 김원형, 강창희 (2016). 황사, 연무, 박무 현상이 미세먼지 화학조성에 미치는 영향 : 2014년 제주도 고산지역 측정. 한국대기환경학회지, 32(1), 67-81
- 신성균, 노영민, 이권호, 신동호, 김관철, 김영준 (2014). 다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 발원지 및 이동 경로에 따른 황사의 광학적 특성 변화 연구, Korean Journal of Remote Sensing, 30(2), 241-249.
- 안준건, 임운혁, 심원준, 김기범, 김승규, 이희일 (2009). 안면도에서 대기 중 가스상 PAHs의 계절적 변동, Ocean Polar Res, 31, 189-198.
- 이권호, 김정은, 김영준, 서애숙, 안명환 (2002). GMS-5 인공위성 원격탐사 자료를 이용한 대기 에어러솔 모니터링, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 5(2), 1-15.
- 이동하, 이권호, 김영준 (2006). 에어로졸 종류 구분을 위한 MODIS 에어로졸 자료의 적용, Korean journal of remote sensing, 22(6), 495-505.
- 이순봉, 정덕상, 조은경, 김현아, 황은영, 강창희 (2011). PM10, PM2.5 미세먼

지의 조성 및 오염 특성 - 2008년 제주도 고산지역 측정 결과, 한국분석과학회, 분석과학, 24(4), 310-318.

이희일 (2010). 해양에서 황사가 해양환경에 미치는 영향 연구. 한국해양연구원.

한국환경정책·평가연구원 (2016). 2016 국민화경의식조사 연구

환경부 (2016). 미세먼지, 도대체 뭘까?

환경부 국립환경과학원 (2016). 대기 오염 측정망 운영계획 (2016~2020).

과제제안요구서 (RFP)

사업명	월경성 대기분진 정량화 및 해양생물/생태계 영향 평가		
과제명	우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명		
연구기간 (총)	8년	예상정부지원액 (총)	150억원

1. 연구의 필요성

○ 추진의 시급성

- 미세먼지 개선에 대한 국민적 관심도가 그 어느 때 보다 높으며, 정책적 해결책 마련을 위해서 과학기술 기반 미세먼지 발생기작, 오염원 규명, 국내·외 기여도 정량적 평가 등에 대한 연구수행이 시급함
- 특히 2차 오염이 적은 해양에서의 연구는 월경성 대기분진 특성 규명이 가능하기 때문에 외교적 대응 자료 확보 측면에서 매우 중요하며, 해양 발생 미세먼지에 대한 기여도 산정을 통해 국내 유입 미세먼지에 대한 보다 명확한 발생 및 기원에 대한 정보를 제공할 수 있음
- 국내에서는 대기분진 해양유입에 의한 생물·생태계 영향 연구가 수행된 바 없으며, 세계적으로도 연구 초기단계이기 때문에 인덱스 생물 조기 확보 및 실험실 독성/위해성 평가를 통해 관련기술·연구 분야를 선점할 필요가 있음
- 미세먼지 국가전략프로젝트 출범에 따라 시료확보 및 자료공유 등 연구연계를 통한 시너지 효과 창출이 가능하며, 해양-육상-상공을 아우르는 광역·입체적 대기분진 연구시스템 구축이 가능해짐

○ 국가차원의 연구개발 필요성

- 미세먼지 관련 연구개발 사업은 공공성, 공익성, 종합성 등 다양한 역할을 갖고 있는 사회문제 해결형 연구사업으로서 과학기술의 사회적 책임, 사회적 수요 대응 등을 위해 국가차원의 연구개발이 필요
- 해양에서의 대기분진 플럭스 연구를 통해 획득되는 국내·외 기여도 평가 자료는 대기분진 관련 국제 외교, 특히 대중 외교 정책자료로 활용도가 높음
- 대기분진의 해양유입에 따른 해양 생물·생태계·환경변화 영향은 한반

도 해역 환경보존 및 오염 관리 측면뿐만 아니라 장기적으로는 물질순환에 의한 기후변화 영향까지 평가할 수 있는 중요한 공익적 연구

- 해양에서의 대기분진 연구가 중요함에도 불구하고 체계적·광역적으로 수행된 적이 없고, 특히 대기분진 발생, 유입, 측정 분야는 높은 공공성에도 불구하고 단기성과를 바탕으로 한 산업화 추진이 어렵기 때문에 국가차원의 연구 지원이 필요

○ 국가 상위 계획과 부합

- 문재인 정부의 국정운영 5개년 계획, 100대 국정과제 중 3-58 “미세먼지 걱정없는 쾌적한 대기환경 조성”, 전략 4-84 “깨끗한 바다, 풍요로운 어장”에 부합
- 미세먼지 이슈를 한중 정상회의 의제화에 월경성 대기분진 정량화 자료는 필수적임
- 미래부 ‘18년 정부연구개발 9대 중점투자방향(‘17.02) 중 “(초)미세먼지 생성 원인 규명과 핵심 대응기술 조기 확보 등 국민 삶의질 향상”에 해당
- 미세먼지에 대한 근본적·과학적 해결책 마련을 위한 범부처(미래창조과학부, 환경부, 보건복지부) 미세먼지 국가전략프로젝트의 4대 분야 중, 미세먼지 발생·유입, 측정, 집진 분야에 해당

* '17년 6월 출범 미세먼지 국가전략프로젝트 4대 분야: 미세먼지 ① 발생·유입, ② 측정·예보, ③ 집진·저감, ④ 보호·대응

2. 기술개발 및 시장동향

- 미국과 유럽 등 주요국들은 수많은 고정 관측소에서 PM10, PM2.5 농도뿐만 아니라, 황산염, 질산염, 암모니아 등 무기화합물 농도와 카드뮴, 납, 구리, 아연 등 중금속 함량을 관측하여, 대기질 관리 및 환경 정책 자료로 활용하고 있음
- 국내 미세먼지 농도는 미국, 일본 등 해외 주요국 대비 1.3배에서 2배가 높으며 적극적인 개선대책이 요구되는 상황임(환경부, 2016)
- 최근 범부처 미세먼지 국가전략프로젝트가 개시됨(‘17.06)에 따라, (초)미세먼지의 근본적, 과학적 문제해결이 예상됨
- 주요 사업분야로 미세먼지 생성 및 오염원 규명, 미세먼지 입체감시 및 예보기술 개발, 사업장 (초)미세먼지 저감기술 개발, 국민생활 보호·대응

기술 개발이 제시됨

- 이중, ‘미세먼지 입체감시 및 예보기술 개발’의 경우 미세먼지 모니터링에 중점을 두고 있기 때문에, 주요국들의 연구 동향에 맞춰 무기화합물과 중금속 함량에 대한 과학기술적 접근이 필요함
- ‘미세먼지 생성 및 오염원 규명’ 세부 내용으로 발생원인 및 정량적 기여도 규명이 제시되어 있으며, 중국과 지리적으로 근접해 있는 우리나라의 경우 미세먼지 발생에 있어 해양(특히 서해)에서의 미세먼지 감시뿐만 아니라 해양에서의 미세먼지 생성기작과 해양-대기 상호작용 연구는 미세먼지 국·내외 기여도 평가에 매우 중요한 자료를 제공할 수 있음
- 대부분 미세먼지 연구는 내륙에서 진행되기 때문에 월경성 대기분진 정량화를 위해 우리원의 서해 해양과학기지들과 울릉센터, 동해 장기 계류 시스템을 기반으로 내륙 관측지점들과의 연계 연구를 통해 중국 기원 미세먼지 뿐만 아니라, 국내 발생 오염물질의 정량화에 대한 과학적 근거 확보 가능
- 특히, 대기분진 관련 모든 정책은 육상 관측 결과를 기준으로 하기때문에 해양에서의 연구결과는 자료 검증과 해양유입 영향 기초 자료 확보 측면에서 그 어느 시기보다 중요함
- 2016년 <네이처>에서 제시된 바와 같이 국내 항만 대기분진 오염도가 심각한 수준이며, 부산지역의 경우 44% 이상이 항만·선박 기원 대기분진 입에도 불구하고 선박 배출가스의 (초)미세먼지 생성 기여도에 대한 연구는 구체적으로 실시되지 않음
- 대기분진의 해양 유입에 의한 해양 생산성 평가, 탄소순환에 미치는 영향, 해양 생물 및 생태계에 미치는 영향에 대한 연구 전무한 실정임
- 따라서 한반도 주변해 대기분진 유입에 대한 모니터링 체계 구축을 통한 국내·외 기원 대기분진 및 유기/무기화합물, 중금속 정량화와 해양 거동, 해양 생물 및 생태계 영향 연구 등이 요구됨

3. 연구개발 목표 및 내용

(1) 최종 목표

해양과학기술 기반 대기분진 대응 기술 개발을 통한 대기분진 해양플렉스 및 해양 생물·생태계 영향 규명

(2) 연구내용 및 범위

1. 광역 대기분진 채집 시스템 구축

- 한국해양과학기술원의 거점 연구소, 제주/울릉 센터, 해양과학기지 등 연구 인프라를 활용한 체계적·효율적 광역 대기분진 채집시스템 구축
- 해양과학기지 활용
 - 대기분진의 주요 유입경로인 우리나라의 황해와 동중국해에 3개의 해양과학기지(이어도, 가거초, 소청초)와 1개의 대형 해양관측부이(황해중부부이)에서 관측 수행
- 시료 채집 장비 구축
 - 대기분진 해양유입 정량화를 위한 wet deposition, dry deposition, total deposition 채집 장비 구축
 - 대기분진 기원지 추적 연구를 위한 air sampler (total suspended matter, PM10, PM2.5) 장비 확보
- 계류 시스템 구축
 - 서해 소청초 과학기지, 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축
 - 남해 이어도 과학기지, 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축
 - 동해, 해양 유입 대기분진 모니터링 시스템 구축

2. 대기분진 생성 및 기원 추적 연구

- 해양 대기 중 VOCs의 초미세먼지 생성 기작 연구
 - 해양 대기 중 SOA(secondary organic aerosol) 발생 규명을 위한 VOCs(volatile organic compounds)의 시공간적 분포 모니터링
 - 해양 생물기원 OVOCs의 분포특성 및 해양 대기 중 SOA 발생에 미치는 영향 연구
 - 해수 중 용존상 VOCs의 시공간적 분포 모니터링 및 해양-대기 상호작용을 통한 VOCs 플럭스 계산
- 선박 배출가스의 초미세먼지 생성 기여도 연구

- 주요 항만 대기 중 선박 배출가스 기인 VOCs 오염현황 모니터링
 - 수용체 모델(Receptor Model)을 이용한 주요 항만 대기 중 선박 배출가스 기여도 산정
 - 주요 항만 대기 중 선박 배출가스 기인 VOCs가 SOA 발생에 미치는 영향 연구
- 헬리카이트 활용
- 헬리카이트에 초다분광 센서를 탑재해서 대기의 미세먼지 신호와 해수신호의 차이를 파악
 - 가거초 과학기지 현장관측 자료와의 검증을 통해 정량화 추진
- Chemical tracer
- 과학기지(소청초) 내 미세먼지 채집(total, PM2.5, PM10)
 - 우리나라 연안해역의 미세먼지 채집(total, PM2.5, PM10)
 - 미세먼지(total, PM2.5, PM10) 내 미량원소 분석
 - 미세먼지 내 Cu, Zn, Pb 안정동위원소 분석법 정립
 - 미세먼지 내 Cu, Zn, Pb 안정동위원소 분석 및 오염원/기여율 산정
- Minerals
- 대기에서 확보한 Total suspended matter 및 시계열 침강입자 포집 장치를 이용 시료 확보하고, mineral dust를 추출한 후 동위원소, 지화학 조성, 석영의 ESR 및 CI를 측정하여 기원지 지역 규명
 - 시료의 확보: 봄철 황사시기에는 event별 시료 채취 그리고 그 외 시기는 일정 주기로 시료를 채취함으로써, 계절별 기원지 변화 추적

3. 해양거동 연구

- 유입 플럭스 정량화
- 영양염
 - (건식 침적) 소청초 과학기지, 동해 연구소, 울릉도·독도 과학기지에 대기분진 입자 포집 및 질산염, 황산염 자동분석기(Particle Into Liquid Sampler) 설치
 - 소청초 과학기지에 트랩 계류, 해양유입 대기분진 플럭스 관측
 - 이어도 과학기지에 트랩 계류, 해양유입 대기분진 플럭스 관측

- 시기별 총 대기분진, 질산염, 황산염 플럭스 산출
- (습식 침적) 강우 오토샘플러 설치
- 시기별 빗물 내 입자성 탄소, 질소 플럭스 산출
- 빗물 내 용존 형태의 탄소, 질산염, 황산염 플럭스 산출
- 중금속
 - 미세먼지(Dry/wet deposit) 내 중금속 분석
 - 해수 내 미량원소 분석(해양기원에 대한 배경농도 파악)
 - Dry deposit시료를 이용한 중금속 용출 특성 연구
 - 미세먼지/해수 내 Cu, Zn 안정동위원소 분석

○ 물질 순환

- 대기분진 유입이 해양 생산력에 미치는 영향평가
 - 대기분진 영양염(철과 질산염)이 해양 생산력에 미치는 영향평가
 - 대기분진 질산염, 황산염이 해양 알칼리도/생태계에 미치는 영향평가
 - 인공위성 자료 이용, 해양 일차 생산력 변화 관측
 - 해양 상층부(~100 m) 트랩 계류, 해양 유입 대기분진의 지화학적 거동 평가
 - 황사 전후에 현장 관측을 통한 용존 중금속 농도 비교 분석
- 해양 일차생산력 변화가 탄소순환에 미치는 영향 평가
 - 심층에 퇴적물 트랩 설치, 침강 유기탄소 플럭스 변화 측정
 - 표층 퇴적물과의 비교분석을 통한 침강 유기탄소 퇴적 기작 규명
 - 대기 침적과 해양환경 간의 상호작용 이해
- 중국/국내기원의 오염물질 해양 침적 플럭스 산출
 - 해역 별 해양유입 대기분진 플럭스 관측 시스템 구축
 - (서해) 중국기원의 오염물질 해양 침적 플럭스 산출
 - (동해) 중국과 국내 기원의 오염물질 해양 침적 플럭스 산출
 - (서해-동해 비교) 각 기원별 오염물질 해양 침적 플럭스 산출

○ Minerals

- Dry deposition 및 Wet deposition에 의해 획득한 시료에 대한 단계별 추출시험 수행함으로써, 해수에 쉽게 용존되어 해양생태계 및 환경에

직접 영향을 미치는 성분과 저층으로 침강하는 성분으로 구분하여 정량화

- 특히, 용해가 쉽게 일어나는 성분 중 해양생태계에 악영향을 미치는 금속성분 (Cd, Hg 등)과 영양염으로 활용될 수 있는 성분 (Fe 등)의 정량화
- 황사 기원지별 오염물질의 이동 매개체 및 영양염 공급원로서의 역할 규명

4. 해양생물 영향 연구

- 표준 airborne particulate matter (APM) 확보 및 모델생물개발
 - 실험(표준) APM의 확보 : 식물플랑크톤 및 여과섭식동물 대상
 - 모델생물의 확보 및 배양기법 개발
 - 모델생물의 유전자정보 확보
- APM의 생물영향연구
 - APM의 급/만성 독성평가기법 개발 : 다양한 독성평가방법을 이용한 특이적 endpoint 조사
 - APM의 분자생물학적 영향 연구
 - 물리/화학적 환경변화에 의한 복합적 영향연구 : 수온, 염분변화 및 UV조사에 의한 독성변화조사
- APM의 생태위해성 연구
 - 먹이사슬에 의한 생물축적 및 전이영향 연구

5. 해양생태계 영향 연구

- 소청초과학기지를 이용한 황사 집중기의 생태계 변동 기작 이해 연구
 - 춘계 황사집중기를 전후한 과학기지 체류 조사
 - 황사를 통한 영양염, 중금속, 유해물질의 유입량 변동에 따른 생태계 반응
 - 하위생태계(세균, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 원생생물) 생물량, 생산성, 군집구성 변동성 연구
 - 먹이망 구조, 생지화학적 과정 변동 연구

- (초)미세 대기분진의 유입에 따른 생물 군집 반응 연구
 - 각 계절에 포집된 (초)미세대기분진을 첨가한 메조코즘 연구
 - (초)미세대기분진 농도에 따른 생물량, 생산력 및 군집 조성 영향 평가
 - 물질순환 및 생지화학적 과정에 미치는 영향 파악
 - (초)미세대기분진 유입량에 따른 해수내 영향 범위 산정
 - 미량물질(중금속, 유해물질 등)이 생태계 기능에 미치는 영향 연구
 - 생태계에 미치는 영향에 대한 기초 모델 수립

- 한반도 주변해의 대기분진의 유입의 생태계 영향 모니터링 체계 구축
 - 소청초, 가거초 및 이어도 과학기지, 동해연구소 및 울릉도 거점을 활용한 모니터링 체계 구축
 - 형광센서 및 광합성을 측정용 광학 장비를 이용한 식물플랑크톤 생물량 및 생산력의 연속 관측
 - 위성자료를 활용한 황사 및 미세대기분진의 농도 분포 관측
 - 대기분진이 생태계에 미치는 장기 영향 파악

- 대기분진유입특성-해양물리특성-해양화학특성-생태계변동의 연관성 규명 및 모델링
 - 대기분진의 영향은 대기분진의 성분, 해양의 물리·화학적 특성 및 생물 군집조성 등 다양한 요인들이 복합적으로 결정함
 - 각 세부 분야에 대한 연구 결과를 종합하여 대기분진이 생태계에 미치는 영향에 대해 평가할 수 있는 모형 수립 또는 모델 구축이 요구됨

- 원격탐사 기술 활용 해양환경 변화 연구
 - 헬리카이트와 과학기지의 분광센서 활용 미세먼지 신호와 해수신호 구분
 - 이어도 과학기지 스펙트로미터 자료도 분석하고 이와 위성자료간의 상관관계 파악
 - 대기 유입 에어로졸 및 미세먼지와 해양 클로로필 번성/용존유기물/부유물 농도 변화와의 상관관계 분석

(3) 연구개발 성과물 및 성과지표

분류	핵심기술/제품 성능지표		단위	달성 목표	국내 최고수준
대기 분진 정량 화	영상신호 분석기술	신호분석 알고리즘	건	2	KIOST
	시료 채집기술	대기분진, 건식/습식침적, 침강입자 채집 장비 제작 및 구축	건	10	-
	발생량, 유입량 정량화기술	중금속, 광물입자, 유기/무기화합물 정량화			
생성 및 기원 지 추적	해양미세먼지 분석기술	미세먼지 중 해양기여도			
	선박 배출가스 분석기술	주요 항·포구 선박기원 미세먼지 기여도			
	기원지 추적기술	광물분진 특성도 및 유입경로 지도	건	8	지자연
	오염원·기여율 산정 기술	대기분진 안정동위원소 분석기술 확보	건	3	KIOST
해양 거동 규명	해양플러크스 정량화 기술	유기·무기 화합물, 중금속, 광물 해양거동			
	해양 생산력 평가 기술	영양염 유입에 의한 생산력 변화 평가			
	탄소순환 예측 기술	물질 순환에 의한 해양환경 변화 예측			
해양 생물 영향 평가	유전자 정보 분석 기술	인덱스 생물 유전자 지도	건	5	KIOST
	독성 평가 기술	최적화된 독성 평가기법	건	1	KIOST
	생물축적 분석 기술	생물영향 종합 평가지침	건	1	-
해양 생태 계 영향 평가	생물 군집반응 평가 기술	해양생태계 영향 평가 기법	건	1	-
	생태계 모니터링 기술	생태계 모니터링 기반 구축	건	2	-
	해양환경변화 분 석 기술	시기별 해색영상 자료	건	16	KIOST

4. 기대효과

○ 경제적 측면

- 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 휘발성 유기물질(VOCs), 중금속 등 대기분진 구성 물질 별 정량화를 통한 대기분진 영향 및 저감에 따르는 사회적 비용 책정
- 배출가스규제지역(ECA) 및 황산화물배출규제지역(SECA) 통항 선박 대상 연료 내 황함량 및 SOx, NOx, VOCs 배출 정밀평가를 통한 선진국 환경규제 대응 및 국내 해운업계 보호
- 해양유입 대기분진 사업을 통해 개발이 예상되는 오염물질 분석/추적 기술, 환경영향평가기술, 생물/환경 위해성평가기술, 저감/처리기술은 해양환경보호에 대한 관심증대로 시장성이 점차 확대될 것으로 예상
- 관련 산업 육성 및 환경 관련 분야 신산업 창출로 산업 확장 및 고용 창출 효과 기대

○ 환경적 측면

- 해양에서의 미세먼지 정량화를 통한 대기오염물질 유입량 및 배출량 불확실성 개선
- 해양 관측 거점 확보 및 해양위성 자료 활용을 통한 미세먼지 예보 및 측정 범위 확장
- 해양-대기 상호 작용에 의한 미세먼지 발생이 기후변화 미치는 영향 평가 기대
- 주요 항포구 대기 중 선박 배출가스의 미세먼지 오염기여도 산정을 통한 효율적인 미세먼지 저감대책 수립 및 지역주민 노출 피해 최소화

○ 정책적 측면

- 정책적 대기분진 저감 방안 및 배출 기준 마련에 기여
- 대기분진 관련 대외 외교정책 자료 제공
- 생물 독성/위해성 및 생태계, 환경변화 영향 평가는 환경보전 프로그램 및 국제 규범에 부합 되며, 관련 환경 친화적 기술을 발전시킬 수 있는 원동력 제공
- 사업을 통해 확보한 다양한 과학적/기술적 자료는 대양의 효율적 이용 및 관리체계 구현에 활용
- 선진적인 선박 배출가스 및 미세먼지 발생량 평가를 통한 MARPOL 환

경규제 선도적 이행에 기여

- 국내 운항 선박 특성에 맞는 선박 배출가스 배출계수 산정을 통한 효율적인 온실가스, 대기오염물질, 미세먼지 저감대책 수립

5. 최종 연구성과물

- 대기분진, 해양 영상 신호 분석 알고리즘
- 중금속, 광물입자, 유기/무기화합물 정량화
- 국외 기원 대기분진 정량화
- 해양발생 미세먼지 기여도
- 주요 항·포구 선박기원 미세먼지 기여도
- 광물분진 특성도 및 유입경로 지도
- 대기분진 안정동위원소 분석기술
- 유기·무기 화합물, 중금속, 광물 해양거동
- 영양염 해양 유입에 의한 생산력 변화
- 물질 순환에 의한 해양환경 변화 예측
- 인덱스 생물 유전자 지도
- 생물 독성 평가기법
- 생물영향 종합 평가지침
- 해양생태계 영향 평가 기법
- 시기별 해색영상 자료

6. 기타사항

- 미세먼지에 대한 근본적·과학적 해결책 마련을 위한 범부처(미래창조과학부, 환경부, 보건복지부) 미세먼지 국가전략프로젝트 출범에 따라, 본 연구과제의 조기 추진을 통해 해양-내륙 간 상호 협력연구 시너지 효과 발생 기대

7. 연차별 투자계획

(단위 : 억원)

연 도	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	계
정부출연금	20	20	20	20	20	15	15	20	150

우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 경제성 분석

2018. 2.

주관연구기관: (주)날리지웍스



제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

이 보고서를 ‘우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 경제성 분석’ 용역의 최종보고서로 제출합니다.

2018년 2월

연구기관명: (주)날리지웍스

연구책임자 : 김진석

참여연구원 : 이주용

윤태민

권여은

< 요약 문 >

1. 개요 및 전제

연구 목적

- 본 연구는 우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 사업에 대한 편익을 추정하여 해당 사업의 경제적 타당성을 분석
 - 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 위해서는 체계적이고 국가 차원의 연구가 필요함에도 불구하고, 현재까지의 국내 연구는 거의 전무
 - 본 사업은 해양 대기분진 특성 규명, 해양생물/생태계 영향 평가 등의 연구를 수행하면서 경제적, 환경적, 정책적 효과를 기대할 수 있음
 - 이에 본 연구에서는 본 사업 추진의 타당성을 판단하기 위하여 경제적 타당성 분석을 수행하였음

편익 회임기간

- 일반적으로 연구개발 활동으로 인한 경제적 효과가 발생하기 위해서는 기술개발의 사업화 등의 과정을 거쳐야하므로, 상당한 시간이 소요됨
 - 따라서, 편익 회임기간 동안에는 편익이 발생하지 않는 것으로 간주함
- 본 연구에서는 연구개발 활동으로 인한 경제적 효과가 발생하기까지의 편익 회임기간을 선행연구 및 예타지침 자료를 바탕으로 5년으로 반영

편익 발생기간

- 본 연구에서는 국제특허분류(IPC) 클래스별 기술수명주기(TCT)를 참고하여 편익 발생기간을 9년으로 산정
- 본 연구의 편익은 사업 종료 다음 연도인 2026년에 회임기간 5년을 반영한 후, 9년의 편익 발생기간을 고려하여 2031년~2039년까지 9년으로 설정

2. 유사 분야 사업의 경제적 가치 추정 사례

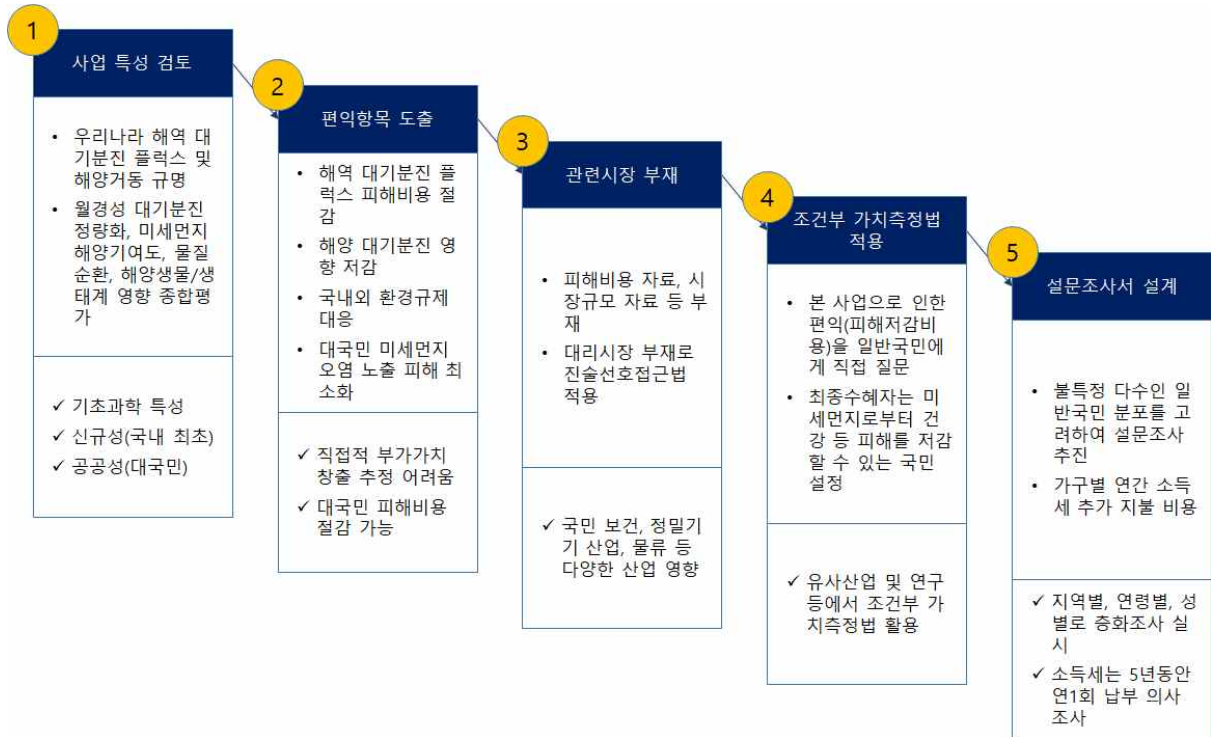
□ 해양 및 환경 관련 사업의 경제성 분석으로 CVM을 많이 활용

- 해양산업 대상 경제성 분석은 다양한 분야들을 대상으로 이루어지고 있음
 - － 환경, 건설, 생물, 교통, 에너지 등의 다양한 세부분야 대상 사업들에 대한 경제성 분석이 수행되고 있음
 - － 환경 분야의 사업들은 재화가 거래되는 시장이 형성되어 있지 않은 경우가 많아, 시장접근법 보다는 CVM을 활용한 편익 추정이 대부분임
- 해양 산업에서는 환경 분야의 사업에 대한 경제성 분석 연구가 많은 편임
 - － 본 연구의 대상 사업인 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 연구 사업 또한 해양 및 환경 분야에 해당함

<유사 분야 사례>

연도	사업명	대상 분야	분석 모형	B/C ratio
2005	해양심층수 개발 사업	해양/환경	CVM	2.13
2006	광양만 환경저감화 시설	해양/환경	CVM	4.12
2012	마리나항만 개발 및 운영 사업	해양/건설	컨조인트	1.17
2013	해양환경 위해성 평가 및 관리기술개발	해양/환경	CVM	1.76
2014	차세대 해양생물 유전체 사업	해양/생물	시장접근법	1.62
2014	해상교통 안전시설	해양/교통	CVM	3.19
2014	해양생태계 복원기술개발 사업	해양/환경	CVM	5.20
2015	해조류 바이오매스 에너지화 사업	해양/에너지	시장접근법	1.38

3. 경제적 편익 추정 및 실증연구 절차



□ 조건부 가치측정법을 이용하여 본 사업의 직접적 편익 추정

- 본 사업의 특성 및 기대효과를 고려하면, 사업으로 인해 얻을 수 있는 편익은 비시장재적 성격이 큰 것으로 판단됨
- 본 사업의 최종 수혜자는 국민과, 오염 비용부담주체라고 할 수 있음
 - 본 사업의 주요 기대효과는 해양에의 대기분진 영향 저감, 국내외 환경규제 대응, 지역주민의 오염에 대한 노출 피해 최소화 등임
 - 따라서, 부가가치 창출 편익 보다는 비용절감 편익으로 편익항목을 도출하는 것이 합당하다고 판단
- 본 연구에서는 조건부 가치측정법(CVM)을 이용해 편익을 추정하였음
 - CVM은 본 사업으로 인한 편익(피해저감비용)에 대한 지불의사액을 피설문자에게 직접적으로 질문함 (제시된 금액에 대한 Yes-No 질문)
- 본 사업의 과학기술적 편익의 최종 수혜자는 국민이라고 판단하며, 분석의 용이성 및 범용성 등을 고려하여, CVM을 이용하여 편익을 추정하였음

본 사업에 대한 조건부 시장의 상황 설정 및 제시

- (지불 방법) 가구당 연 1회, 5년간 납부하는 것
- (지불 수단) 가구당 연간 소득세에서 추가적으로 납부
- (질문 방법) 이중경계 양분선택형 질문
 - 제시금액에 대해 “예”라고 응답할 경우 2배의 금액을, “아니오”라고 응답할 경우 1/2배의 금액을 추가적으로 질문
- (표본 설계) 만 20세 이상 70세 미만의 세대주 및 배우자
 - 성별, 연령대, 거주 지역에 따른 층화추출
 - 총 1,000가구로부터의 설문 응답 결과를 확보

4. 직·간접적 편익 추정 결과

직접적 경제적 편익

- CVM을 활용하여 본 사업의 직접적 경제적 편익을 추정하였음
- 가구당 평균 지불의사액은 1818.2원/년으로 도출되었음
- 가구당 편익을 국내 범위로 확장한 결과, 연간 30,360백만원으로 도출
- 본 조사에서는 향후 5년간 매년 1회 소득세에서 추가적으로 납부하는 것으로 지불의사를 질문하였으므로, 총 편익은 121,104백만원으로 도출

<직접적 경제적 편익 추정 결과>

가구당 연간 지불의사액 (원/년)	연간 편익 (백만원/년)	총 편익 (백만원)
1,818.2	30,360	121,104

□ 간접적 경제적 편익

- 산업연관분석을 활용하여 본 사업의 간접적 경제적 편익을 추정하였음
- 본 사업 관련 산업들을 추출하여 재구성한 산업연관표를 기준으로 생산유발효과, 부가가치유발효과, 취업유발효과를 분석하였음
- 본 사업으로 인한 간접적 경제적 편익
 - (생산유발효과) 2,793억원
 - (부가가치유발효과): 1,163억원
 - (취업유발효과) 1,870명

5. 경제성 분석 결과

□ B/C ratio, NPV(순현재가치), IRR 모두 경제적 타당성 기준을 상회

- 경제성 분석에서 $NPV \geq 0$, $B/C \geq 1$, $IRR \geq$ 사회적 할인율인 경우 각각 경제성이 있다고 판단함
- NPV, B/C ratio, IRR 모두 경제성 분석 통과 기준을 상회하였음

<경제성 분석 결과>

현재가치 (백만원)		B/C ratio	NPV (백만원)	IRR (%)
편익	비용			
49,929	11,963	4.17	37,967	29.0

- 본 연구에 내재되어 있는 불확실성을 고려하기 위하여 추가적으로 편익, 비용 변화에 대한 민감도 분석을 추가적으로 수행하였음
- 민감도 분석을 통해 본 사업의 비용과 편익을 감소·증가시켰을 때의 B/C ratio를 분석한 결과, 3.34 ~ 5.22의 값을 도출하였음
- 따라서 본 사업은 민감도 분석 결과에도 여전히 경제적 타당성을 확보하는 바, 본 사업의 추진은 경제·사회적으로 바람직하다고 할 수 있음

<민감도 분석 결과>

	변화율				
	-20%	-10%	0%	+10%	+20%
편익 변화	3.34	3.76	4.17	4.59	5.01
비용 변화	5.22	4.64	4.17	3.79	3.48

<목 차>

제1장. 개요 및 전제	1
제1절. 본 사업의 개요	1
제2절. 경제성 분석을 위한 전제	3
제2장. 유사 분야 사업의 경제적 가치 추정 사례	5
제1절. 해양 및 생물 분야	5
제3장. 경제적 편익 추정 및 실증연구 절차	23
제1절. 편익의 종류 및 개념	23
제2절. 편익 추정 방법	30
제3절. 시나리오 및 설문지 설계	37
제4절. 지불의사 질문 방법	39
제5절. 제시금액 및 표본 설계	40
제4장. 지불의사액 추정 방법론	41
제1절. 효용격차모형(Utility Difference Model)	41
제2절. 0의 지불의사 처리	43
제5장. 편익 추정 결과	44
제1절. 응답 결과	44
제2절. WTP 추정 결과	48
제6장. 간접적 경제적 편익 도출	53
제1절. 본 사업과 관련된 산업의 범위 설정	53
제2절. 산업연관분석 개요 및 방법론	55
제3절. 본 사업의 간접적 경제적 편익 도출	59

제7장. 본 사업의 경제성 분석	63
제1절. 경제성 분석의 개요	63
제2절. 경제성 및 민감도 분석	66
제3절. 민감도 분석	68
제8장. 결론	69
참고문헌	70
[별첨] CVM 설문조사지	72

<표 차례>

<표 1-1> 본 사업의 총괄 기술로드맵	1
<표 2-1> 해양심층수 개발 사업의 비용편익분석 결과	6
<표 2-2> 광양만 환경저감화 시설 사업의 비용편익분석 결과	8
<표 2-3> 해양환경 위해성 관리 사업 경제성 분석 결과	12
<표 2-4> 해양생물 유전체 사업 관련 산업의 분류	14
<표 2-5> 차세대 해양생물 유전체 사업 경제성 분석 결과	15
<표 2-6> 해상교통 안전시설 사업 경제성 분석 결과	17
<표 3-1> R&D 사업의 유형별 특성	23
<표 3-2> 해양 산업의 경제성 분석 결과	35
<표 5-1> 응답자 지역, 성별, 연령대별 분포 결과	44
<표 5-2> WTP 응답 분포	45
<표 5-3> 지불거부 응답 분포	46
<표 5-4> 지불거부 사유	47
<표 5-5> 지불의사액 추정에 사용된 변수	49
<표 5-6> 계수 추정 결과	50
<표 5-7> 지불의사액 추정 결과	51
<표 5-8> 지불의사액 추정 결과의 확장	52
<표 6-1> 소분류에 근거한 본 사업 관련 산업의 정의	53
<표 6-2> 재분류된 31부문 산업부문표	54
<표 6-3> 본 사업의 경제적 파급효과 분석 결과	59
<표 7-1> 본 사업의 연도별 연구비 예산	63
<표 7-2> 본 사업의 편익 발생기간 동안의 연도별 편익 추정치	65
<표 7-3> 본 사업의 편익 발생기간 동안의 연도별 비용	66
<표 7-4> 본 사업의 비용 및 편익 흐름 (단위: 백만원)	67
<표 7-5> 본 사업의 경제성 분석 결과	67
<표 7-6> 편익 및 비용의 변화에 따른 민감도 분석 결과 (B/C ratio)	68

제1장. 개요 및 전제

제1절. 본 사업의 개요

- 본 사업은 우리나라 해역 대기분진 연구를 통하여 정보 제공, 시스템 구축
 - 우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명의 체계적 추진을 위해 필요한 정보를 제공하고, 단계별 기술개발 이정표를 제시함
 - 대기분진의 전주기적인 연구를 수행할 수 있는 다학제적(물리/화학/생물/지질/위성) 연구시스템을 구축함
- 본사업 추진은 2018~2025년까지 8년간 2단계에 걸쳐 추진
 - 1단계는 3년간 60억원으로 연구기반을 구축하고, 기초 연구자료 확보 및 월경성 대기분진을 추적함('18~'20)
 - 2단계는 5년간 90억원으로 대기분진 정량화, 미세먼지 해양기여도, 물질순환, 해양생물 및 생태계 영향에 대한 종합 평가를 수행함('21~'25)

<표 1-1> 본 사업의 총괄 기술로드맵

	1단계			2단계				
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
단계별 목표	연구기반 구축, 기초 연구자료 확보 및 월경성 대기분진 추적			월경성 대기분진 정량화, 미세먼지 해양기여도, 물질순환, 해양생물/생태계 영향 종합 평가				
예산 (억원)	60			90				
	20	20	20	20	20	15	15	20
주요 결과물	<ul style="list-style-type: none"> • 대기분진 영상분석 알고리즘 • 시기별 해색영상 자료 • 유기·무기화합물 및 중금속 해양거동 • 2단계 연구 기초자료 			<ul style="list-style-type: none"> • 국외 기원 대기분진 정량화 • 주요 항구 선박기원 미세먼지 기여도 • 대기분진 안정동위원소 분석기술 • 영양염 해양 유입에 의한 생산력 변화 • 물질 순환에 의한 해양환경 변화 예측 • 인덱스 생물 유전자 지도 • 해양생태계 영향 평가 기법 • 생물영향 종합 평가지침 				

□ 본 사업은 경제적, 환경적, 정책적 효과 기대 가능

○ (경제적 기대효과)

- 대기분진 구성 물질 별 정량화를 통한 대기분진 영향 및 저감에 따르는 사회적 비용 책정
- 관련 산업 육성 및 환경 관련 분야 신산업 창출로 산업 확장 및 고용창출 효과 등의 경제적 파급효과 발생

○ (환경적 기대효과)

- 해양에서의 미세먼지 정량화를 통한 대기오염물질 유입량 및 배출량 불확실성 개선
- 선박 배출가스의 미세먼지 오염기여도 산정을 통한 효율적인 미세먼지 저감대책 수립 및 지역주민 노출 피해 최소화

○ (정책적 기대효과)

- 정책적 대기분진 저감 방안 및 배출 기준 마련에 기여하여 대외 외교정책 기본 자료로써 활용
- 국내 선박 특성에 맞는 배출가스 배출계수 산정을 통한 효율적인 온실가스, 대기오염물질, 미세먼지 저감대책 수립

○ 해양이 대기기원 오염물질의 저장소로 인식되고 있으나, 해양과 대기의 상호작용을 통한 오염물질 순환에 대한 연구는 미진한 상황임

- 또한, 해양유입에 의한 물질순환, 해양생물, 생태계, 환경 변화 등에 대한 국내 연구는 거의 전무한 실정

○ 이처럼 사업 추진의 필요성 및 시급성과 사업의 공공적 성격을 고려하였을 때, 국가차원의 연구 추진이 필요한 상황이라고 할 수 있음

- 국가차원의 연구에 대한 지원을 위해서는 본 사업의 비용과 편익을 추정하여 경제적 타당성을 분석할 필요가 있음
- 월경성 대기분진과 해양유입 대기분진은 상호연관적이며 해양에 미치는 영향은 동일한 것으로 판단하여 통합적으로 편익 및 경제성을 분석하였음
- 따라서 본 연구에서는 우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 연구의 경제성 분석을 수행하였음

제2절. 경제성 분석을 위한 전제

1. 편익 회임기간

□ 편익 추정을 위해서는 먼저 편익 회임기간 결정 필요

- 일반적으로 연구개발투자 이후 편익이 발생되기까지는 일정 시간이 필요
- 해당 사업으로 인한 편익이 어느 시점부터 발생할 것인지를 예측하는 것은 편익 산정을 위해 중요한 과정임
 - 편익 발생 시작 시점으로부터 얼마동안 해당 사업의 편익이 유효할지를 결정하는 문제 (편익 발생기간) 도 편익 추정결과에 직접적 영향을 미침
 - 또한, 최초 편익 발생시점과 편익기간의 결정은 편익을 현재가치로 환산하는 과정에서 사회적 할인율의 적용 정도에도 영향을 미치게 됨
- 연구개발사업에 대한 투자가 이루어진 후, 경제적인 편익 또는 효과가 발생하기 전까지의 시간적 지연은 “편익 회임기간”이라고 정의됨
 - 일반적으로 연구개발 활동으로 인한 경제적 효과가 발생하기 위해서는 기술개발의 사업화 등의 과정을 거쳐야하므로, 상당한 시간이 소요됨
 - 따라서, 연구개발부문 예비타당성조사에서는 편익 회임기간 동안에는 경제적 편익이 발생하지 않는 것으로 간주함
 - Mansfield(1991)는 학술적 연구가 신제품 및 공정의 상용화로 이어지기까지 걸리는 시간을 분석, 기존연구가 없는 기초연구의 경우에는 평균 7년, 기존연구가 존재하는 응용·개발연구의 경우에는 평균 6년의 회임기간 도출
- 본 연구에서는 연구개발 활동으로 인한 경제적 효과가 발생하기까지 5년의 시간이 걸리는 것으로 가정, **편익 회임기간을 5년으로 반영**하여 분석하였음
 - KISTEP, KDI 등의 예타지침에 따르면, 사업 주관부처가 사업계획서에 편익 회임기간을 제시하는 경우에는 이를 준용하되, 별도의 언급이 없을 경우에 기초연구는 5년, 응용·개발연구는 3년을 기본으로 회임기간 반영 제안
 - 연구개발을 통한 시제품 개발 후 표준화 및 인증, 양산 준비 등을 고려한다면, 편익 발생까지의 시간적 지연인 편익 회임기간을 고려하는 것이 일반적임

2. 편익 발생기간

□ 다년도에 걸쳐서 발생하는 편익의 발생기간 결정 필요

- 연구개발 활동의 결과에 근거한 경제적 효과들은 어느 시점에 일시적으로 발생하기 보다는, 다년도에 걸쳐서 발생하는 것이 일반적임
 - 편익 발생기간을 결정하여 회임기간과 함께 분석에 반영할 필요가 있음
- 연구개발 사업의 편익 발생기간을 결정하기 위해서는 해당 기술의 특성을 최대한 반영하여 유효한 수명을 적용할 필요가 있음
 - 자료의 정확한 근거나 타당성을 바탕으로 여러 방법론을 활용할 수 있음
 - 적절한 방법론이 없을 경우에는 일반적으로 기술수명주기를 도입하여 편익 발생기간을 산정하며, 본 연구에서도 이를 도입하여 발생기간 산정
- 기술수명주기(Technology Cycle Time, TCT)는 특허의 서지정보를 이용하여 정량적으로 산출되는 지표
 - 즉, 인용-피인용 특허 시차의 중간값으로 산출된 기술수명주기는 기술발전의 속도에 대한 정보를 제공함과 동시에 해당 특허에 포함된 기술의 유효수명을 일컬음
 - 연구개발 사업의 목표로 제시된 기술이 편익으로 발현되는 기간은 해당 기술이 특허를 통해 권리를 보호받고 후발 특허에 의해 영향력이 사라지지 않는 기간으로 해석
 - 따라서, 세부분야별 특허인용분석을 통해 산출된 기술수명주기는 기술의 유효수명을 의미함
- 본 연구에서는 1960년부터 2016년까지 미국 등록특허 자료를 기준으로 국제특허분류(IPC) 클래스별 기술수명주기¹⁾를 참고하여 편익 발생기간 산정
- “CO2 물, 폐수, 하수 또는 오니(슬러지)의 처리”를 본 사업과 가장 근접한 클래스로 꼽을 수 있으며 중간값은 9년이므로, 편익발생기간을 9년으로 산정
 - 본 연구의 편익은 사업 종료 다음 연도인 2026년에 편익 회임기간 5년을 반영한 후, 9년의 편익 발생기간을 고려하여 2031년~2039년까지 9년간 발생하는 것으로 가정하였음

1) <http://www.starvalue.or.kr/itechvalue/wsp/support/tct.jsp>

제2장. 유사 분야 사업의 경제적 가치 추정 사례

제1절. 해양 및 생물 분야

1. 해양심층수 개발 사업 (김지현, 2005)

□ 해당 사업의 배경 및 필요성

- 국외로부터 해양심층수를 이용한 제품들이 수입되면서, 국내에서 심층수 개발을 추진하거나 심층수 취수시설을 허가받으려는 절차를 밟는 사례 증가
- 식수의 안정성과 건강성 기능까지 포함하고 있는 해양심층수는 지역경제를 활성화시킬 수 있는 상당히 매력적인 상품으로 부각할 가능성이 높음
- 그러나, 심층수를 규율할 수 있는 시스템이 갖추어지지 않는 상태에서 지방 정부들이 취약한 재정을 무릅쓰고 민자유치 또는 민관합작의 형태로 사업을 추진하게 되면 해양생태계 위협의 가능성을 배제할 수 없음
 - 개발이 가능한 해역이 한정되어 있음에도 불구하고 무분별한 난개발이 이루어질 가능성이 있음
- 따라서, 정부에서는 해양심층수의 개발과 이용을 둘러싼 부작용을 예방하고, 관련 산업들의 부가가치를 증진시켜 지역경제 활성화에 기여하기 위한 '해양심층수개발 및 관리의 법제화'를 진행하였음
- 미국과 일본 등의 선진국의 경우, 연안관리 시스템이 확립되어 있어 이를 기초로 지방정부를 중심으로 한 해양심층수의 공영개발방식이 정착되어 있음
- 반면 국내의 경우 아직까지는 선진국 수준의 시스템이 확립되어 있지는 않음
- 따라서, 해양심층수라는 새로운 수자원 개발 사업이 사회 후생 증진에 기여하는지 평가하기 위하여 비용편익 분석을 수행할 필요가 있음
 - 심층수의 연구개발 및 인프라 구축을 위한 취수 및 연구개발 설비에 대한 정부의 투자와, 취수시설의 건설 및 운영, 산업 활동을 위한 이용 및 가공 시설에 대한 민간투자 등의 예상 관련 사업을 포괄적으로 반영 필요

□ 동해안 해양심층수 개발 사업에 대한 비용편익분석 수행

- 조건부 가치측정법을 이용하여 해양심층수 개발 사업으로 인한 경제적 편익을 계량화하여 비용편익분석을 수행하였음
- 분석 결과, 훌륭한 해양심층수 자원을 보유하고 있는 우리나라는 해양심층수 개발이 경제적 타당성을 확보, 추진할 가치가 높은 사업으로 평가되었음
 - 해양심층수의 환경 가치가 건강위험 감소 측면만 분석에 반영되었으며, 활용상품으로 단기간에 실용화 가능한 제품 및 시설만이 분석에 포함
 - 향후 연구개발을 통해 의약, 식품, 화장품, 관광, 휴양 등과 관련된 산업에 대한 부가가치가 매우 높을 것으로 예상됨
 - 동시에, 해양심층수 개발로 인한 환경피해에 대한 연구도 진행되어 이를 기초로 한 계량화작업이 이루어져 자원의 지속가능한 개발이 이루어질 수 있도록 할 필요가 있음을 시사

<표 2-1> 해양심층수 개발 사업의 비용편익분석 결과

구분	분석결과	비고
순현재가치 (NPV)	211,928,067,794원	할인율:7.5%
비용편익비율 (B/C ratio)	2.13	할인율: 7.5% 사업타당성기준: 1.0이상
내부수익률 (IRR)	63.74%	국제협력사업의 경우 15% 이상 요구

출처: 김지현(2005)

2. 광양만 환경저감화 시설 사업 (강희용 외, 2006)

□ 해당 사업의 배경 및 필요성

- 환경 보호를 차선으로 미룬 채 추구되어온 급속도의 경제성장 과정에서 우리나라의 환경은 심하게 오염되고 파괴되어 왔음
 - 그러나 1980년대 후반에 이르기까지 환경문제는 성장제일주의에 가려져 충분한 이목을 끌지 못했음
- 최근에 들어서야 비로소 환경오염의 심각성에 대한 인식이 확대되어 여러 분야에서 환경문제와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있음
- 특히, 연안해역 개발에 따라 부가적으로 발생하는 환경오염에 관한 문제가 사회적 관심사로 부각되고 있음
- 개발과 보전 중 어느 쪽이 인간의 삶을 위해 유리한 것인지에 대한 첨예한 논의가 이루어져 오고 있음
- 이러한 환경오염 문제를 최소화하기 위하여, 환경공생형 구조물과 환경보전 및 환경창조사업에 대한 관심이 높아지고 있음
 - 또한, 사업의 실시에 있어서 사업의 경제적 타당성 평가 또한 중요한 과제로 인식되어지고 있음
- 해당 사업은 환경저감화를 위해 광양만에 컨테이너 전용 안벽 구조물을 축조함에 있어서 경제성을 분석하는 것이 주 목적임
 - 해당 사업의 대상해역인 광양만은 각종 항만 및 대규모 준설공사 등으로 인해 지속적인 환경 부하 및 이슈가 발생되고 있는 지역 중 하나임
 - 컨테이너 전용 안벽에 요철이나 구멍을 두어 게 등의 저생생물 및 해조류가 부착생울하기 쉽도록 만들어주는 친환경적인 구조물의 정비에 대한 경제적 타당성을 분석
- 분석 결과를 통해, 최근 연안 지역에서 이루어지는 각종 대규모 건설사업의 적정 규모를 산정하고, 지역주민 및 국민과의 공감대 형성에 기여할 수 있는 시사점을 도출하는 것이 필요함

□ 광양만의 환경공생시설 설치 사업에 대한 경제적 가치 평가 수행

- 컨테이너 전용 안벽 구조물을 축조함에 있어서 적절한 환경영향 저감화를 실시하고, 이러한 환경공생시설을 대상으로 경제성 분석을 수행하였음
- 조건부 가치측정법을 이용하여 설문조사를 수행, 그에 따른 집계결과를 구간 분할 생존분석방법을 기반으로 지불의사액 도출
 - 지불의사액 결과를 총 편익으로 산정하여 환경정비사업에 대한 경제적 가치 평가 및 비용편익분석 수행
- 분석결과, 지불의사액은 연간 7,381원으로 나타났으며, 이를 바탕으로 산정된 연간 편익은 314,947,270원에 달함
 - 사업구조물인 환경공생시설의 가용연수를 50년으로 가정하여 총 편익을 5,561,055,441원으로 추정
- 비용편익분석결과, 환경공생시설 사업비에 대한 B/C ratio는 4배 이상에 해당하는 것으로 나타난 바, 해당 사업의 경제적 타당성 및 유익성이 상당히 높음을 입증하였음

<표 2-2> 광양만 환경저감화 시설 사업의 비용편익분석 결과

총사업비 (세금 포함)	1,399,700,700	(원)	사회적 할인율	4.0%
유지 관리비 (사업비의 0.5%)	6,362,273	(원/년)	기준 년도	2003
연간 편익	314,947,270	(원/년)	정비 개시년도	2003
			정비 종료년도	2008
			공용 종료년도	2058
비용편익분석 결과			B/C ratio	4.16
			NPV	4,225,251,106원

출처: 강희용 외(2006)

3. 마리나항만 개발 및 운영 사업 (이민규 외, 2012)

□ 해당 사업의 배경 및 필요성

- 국민소득의 향상과 여가시간의 확대 등으로 해양레저기구(요트, 모터보트, 수상오토바이 등)를 이용한 해양 레저 스포츠에 대한 관심이 증가하고 있음
 - 특히, 광역 교통망의 확충 및 개선 등으로 연안에 대한 접근성이 향상됨에 따라 해양레저 수요가 점차 늘어나는 추세를 보이고 있음
- 해양레저 수요가 증가하고 있음에도 불구하고, 이를 뒷받침하기 위한 인프라 시설, 즉 마리나항만의 공급은 아직도 부족한 실정임
 - 마리나항만은 요트 및 보트의 생산, 판매, 보관, 정비, 임대요트, 레스토랑, 숙박시설 등의 각종 서비스 시설이 갖추어진 규모의 항만을 의미
 - 마리나항만은 종합리조트의 성격을 갖추는 형태로 발전하고 있음
- 마리나항만의 운영 실태는 국가별 고급 해양 레포츠의 수준을 가늠하는 지표로 활용되고 있음
- 이에 따라, 정부는 마리나항만 기본계획²⁾을 수립하여 마리나항만 개발에 관한 중장기적 정책방향을 설정
 - 마리나항만 개발사업의 발전과 효율을 도모해 국가 경쟁력 제고 및 경제 발전에 기여하는 것이 주요 목표
 - 관련 인프라의 적기 확충, 고부가가치 산업 육성, 관련 산업에의 파급효과 유발 등을 위해, 마리나항만 산업을 국가 전략 기간산업으로 육성 추구
- 하지만 마리나항만 개발의 경제적 타당성, 개발 및 운영에 따르는 생산유발 효과와 고용유발효과 등의 파급효과에 대한 연구결과는 제시되고 있지 않아 정부 주도의 마리나항만 개발이 경제적으로 타당한지에 대한 판단 근거 부재
- 따라서, 개발 수요가 더욱 증가할 것으로 예상되는 마리나항만에 대한 경제적 타당성 분석 연구의 필요성 역시 커지고 있음

2) 마리나항만 기본계획: 마리나항만의 조성 및 관리 등에 관한 법률 제4, 5조에 의거하여 10년 단위로 수립하는 법정 계획임.

□ 마리아항만의 비시장적 편익을 추정하여 항만 개발의 경제적 타당성 분석

- 마리아항만의 조성 및 관리 법률에는 마리아항만 기본계획 수립의 기본 원칙과 정책 방향을 제시하고 있음
 - － 그러나 마리아항만별 경제성 평가는 누락되어 있으며, 마리아항만에 대한 경제성 분석은 반드시 필요
- 마리아항만 기본계획 단계에서 경제적 타당성을 검토하였으며, 비시장적 편익 추정 방법론으로 컨조인트 분석을 이용하였음
- 분석 결과, 국민들의 마리아항만에 대한 인식도 및 관심도는 매우 낮은 상황
 - － 마리아항만은 요트를 이용하는 특정집단만을 위한 시설이라는 인식 때문, 마리아항만 건설을 정부 주도하에 추진하는 것에 대한 반대 의견이 많음
- 마리아항만이 공원, 박물관 등과 유사한 기능을 하기 위해서는 일반 국민들 모두가 마리아항만을 방문할 수 있도록 유도할 필요가 있음
 - － 설문조사 결과 국민들의 마리아항만 방문 이유 중 첫 번째 목적은 수변공간의 이용으로, 마리아항만 주변에 산책로, 휴게시설, 공원 등의 시설 조성 필요성을 시사
- 사업대상지 내 지역과, 사업대상지 외 지역의 가구당 연간 지불의사액은 각각 624.5원, 2,033.4원으로 추정되었으며, 전국적으로는 1,840.2원으로 추정
 - － 사업대상지 내 지역 주민의 지불의사액이 낮은 이유는 지역의 낙후도가 심하기 때문인 것으로 나타남
- 경제적 타당성 분석 결과, 해당 사업의 순현재가치는 221억원, B/C ratio는 1.17로, 경제적 타당성이 있는 것으로 나타났음
- 마리아항만 건설 및 운영이 전북지역에 미치는 파급효과를 분석하기 위해 지역산업연관분석을 적용하였음
 - － 생산유발효과는 1조 1,333억원, 취업유발효과는 1,000명, 부가가치유발효과는 493억원으로 분석되었음

4. 해양환경 위해성 평가 및 관리기술개발 사업 (박선영 외, 2013)

□ 해당 사업의 배경 및 필요성

- 해양환경 이용의 증가에 따른 해양폐기물 투기, 육상오염물 유입 증가 등으로 인해 해양오염이 증가하고 있음
- 이에 따라 유해물질의 생물 축적 및 생물 확산에 의한 2차 오염 문제 역시 심각해지고 있음
 - 오염된 환경은 복원에 많은 시간과 비용을 투입해야 하므로, 환경복원을 위한 종합적인 관리기술 개발 추진이 시급함
- 국내에서는 환경위해성 영향을 평가하기 위한 기초적인 작업의 일환으로, 점오염원에 해당하는 배출수에 대한 통합적인 독성평가를 위한 제도를 도입
- 그러나, 배출수에 포함된 중금속 및 유해물질에 의한 급성 생태독성영향만을 평가하고 있으며, 2차 독성이나 만성영향은 반영하지 못하고 있음
- 이같은 문제를 해결하기 위해 정부에서는 2020년까지 중금속 및 유해물질 생태위해성 평가 기술을 선진국 대비 80% 수준으로 향상시키기 위한 '해양환경기술개발사업 중장기 기본계획 수립을 위한 기획연구'를 추진하였음
- 해양환경 위해성 평가 및 관리기술이 개발된다면, 향후 국내 해양기술을 선진국 수준으로 끌어올림과 동시에 해양환경 관리 분야의 국제 경쟁력을 확보할 수 있음
 - 또한, 식수원 보호 및 해양생물 안전성 확보를 통한 국민들의 건강 및 안전에도 기여할 수 있음
- 그러나, 해양환경 위해성 평가 및 관리 기술 개발을 위해서는 막대한 정부예산을 투입해야 함
- 따라서 해당 사업에 대한 경제적 타당성 분석은 필수적으로 요구되나, 해당 사업의 편익은 비시장적 성격을 가지므로 편익 추정이 어려움
 - 그러나, 해당 기술로 인해 해양환경이 안전해지고 국민들의 안전을 향상시킴으로써 국민 후생이 제고되기 때문에, 이러한 비시장적 가치 역시 해당 사업의 편익으로 포함되어 분석할 필요가 있음

□ 해양환경 위해성 평가 및 관리기술개발 에 대한 경제적 타당성 여부 평가

- 해양 오염원의 관리, 해양생태계 개선을 위해 해양환경 위해성 평가 및 관리 기술 개발사업을 추진함에 있어서는 막대한 예산이 소요됨
 - 따라서, 해당 기술의 편익을 정량적으로 추정하여 사업의 경제적 타당성 여부를 평가함
- 엄밀한 경제이론에 근거하여 비시장적 경제적 편익을 과학적으로 추정하기 위해 조건부 가치측정법을 이용하였음
 - 지불의사액 추정을 위해 1.5단계 모형을 적용하여 설문조사를 수행하였으며, 스파이크 모형을 반영해 결과를 도출하였음
- 해당 사업의 편익을 소비자 관점과 생산자 관점으로 구분하여 고려
 - (소비자 관점) 국민후생 증가, 바닷물의 유해물질 감소로 인한 해양자원 오염 방지 효과 등
 - (생산자 관점) 해당 기술 산업과 관련 산업으로의 부가가치 유발효과, 수산업의 발전과 유해물질 검출사업 활성화 등
- 분석 결과, 해양환경 위해성 평가 및 관리기술 개발사업을 위해 가구당 연간 지불의사액은 2,663원으로 분석되었음
 - 가구당 지불의사액을 전국 단위로 확장하면, 연간 약 463억원에 달함
- 경제적 타당성 분석 결과, B/C ratio는 2.16으로 1보다 큰 값을 나타내므로, 경제적 타당성이 있는 것으로 판단되었음

<표 2-3> 해양환경 위해성 관리 사업 경제성 분석 결과

현재가치 합계 (억원)		순현재가치 (NPV) (백만원)	편익 비용 비율 (B/C ratio)	내부수익률 (IRR)
편익	비용			
458.89	212.43	246.46	2.16	15.2%

출처: 박선영 외(2013)

5. 차세대 해양생물 유전체 사업 (권영주 외, 2014)

□ 해당 사업의 배경 및 필요성

- 2010년 나고야 의정서가 체결됨에 따라, 세계적으로 생물자원 확보 및 특허 경쟁이 치열해지고 있음
- 또한 해양 유전자원에 대한 가치의 상승은 해양의 무한한 자원을 발굴하고자 세계 각국의 움직임을 가속화 시키고 있음
- 미국은 해양 정책을 지속적으로 마련하고 있으며, 해양 바이오 산업의 선두 주자로서 대규모 투자를 이어가고 있음
 - 해양생물 오믹스 분석을 통한 IT/BT 융합기술 개발, 해양신소재 및 해양 에너지 등의 신성장분야 성장을 위한 기술개발 등
- 일본은 “장기전망의 일본해양개발 기본구상 및 추진방안” 수립과 더불어, 심해미생물사업에 지난 10년간 5천억원을 지원하고 있음
- 중국은 2020년까지 해양환경변화와 해양생물자원의 이용 등에 대한 지원을 강화할 예정이며, 특히 해양생물의약산업에서 빠른 성장을 이루어내고 있음
- 이처럼 국외에서는 해양생물 자원의 가치 증가와 유전체기술 발전 속도에 부합된 융합연구 전략을 수립 및 진행 중인 반면, 국내에서는 시너지 효과를 거두지 못하고 있음
 - 예산 부족에 따른 단계적 및 분절적 사업 수행이 주요 원인
- 해당 사업은 지구상에서 기능적 다양성이 높은 해양생명체를 장기적 파급효과가 큰 차세대 유전체 기술을 적용
 - 생명현상의 근본 원리와 생명기원 및 진화에 대한 연구와 구조유전체, 활용연구 등을 통해 다양한 고부가가치와 미래성장동력 확보를 목표
- 하지만, 해당 사업은 투자 규모가 민간에게는 너무 크며, 연구 개발 결과가 생명공학 산업 전반에 영향을 미침
- 따라서 해당 사업은 공공적 성격이 강하며, 사업 추진을 위한 정량적 근거 확보를 위해서는 경제적 타당성 분석이 전제되어야 함

□ 해양생물 유전체 사업에 대한 경제성 분석을 시장접근법을 이용하여 수행

- 정부는 차세대 해양생물 유전체 사업을 통해 해양바이오 산업의 활성화 유도를 목표로 하고 있음
 - 해양유전체 연구에 대한 학문적, 경제적 요구가 급증하고 있으며, 최근 발전하고 있는 첨단 유전체 분석기술을 접목하여 해양생물 유전체 분야가 향후 국가 성장 동력의 기반이 되도록 하는 데에 목적이 있음
- 정책 판단에 유용한 정보를 제공하고자, 해당 사업의 경제적 타당성 분석
- 경제적 편익은 시장접근법(Market Approach Method)을 이용하여 추정
 - 해당 사업에 의한 미래시장규모의 증가분에 부가가치율, R&D 기여도, 사업점유율, 사업화 성공률을 고려하여 직접적 편익을 산출
- 해당 사업의 활성화로 인한 부가가치 창출편익을 주요 편익으로 상정하였으며, 관련 산업 중 제약, 에너지, 소재, 식품, 화장품 산업 등이 분석 대상

<표 2-4> 해양생물 유전체 사업 관련 산업의 분류

분류		세부 내용
제약산업		의약품: 항암제, 항염증제, 항생제 등 알물전달체: 키토산 등
에너지산업		수소생산용 미생물, 미생물배터리, Light Capture 등
소재산업	의료용	생체재료: 바이오세라믹 등 임플란트·카테테르용 오염방지제, 의료기기용 부품소재
	연구용	효소를 포함한 연구용 시약, 해양생물 라이브러리, 안정성·독성 검사용 생물모델, 유전자 마커 및 유전체 등
	산업용	고분자, 효소, 접착제, 계면활성제, 세라믹, 오염진단, 중금속 제거용 제품, 담수화 등
의료산업		생체재료: 바이오세라믹 등 임플란트·카테테르용 오염방지제, 의료기기용 부품소재
기능성 식품·화장품산업		식품첨가물: 색소, 식질감 부여제 등 질병 예방 및 치료용 건강 기능성 식품, 항산화제, Probiotics, 칼슘제 등 기능성 화장품: 주름방지·개선, 미백 등

- 시장접근법을 적용하여 경제적 편익을 산정하였음
 - 연간 경제적 편익은 시장점유율을 감안하여 미래시장규모를 추정하고, 여기에 사업화성공률, 부가가치율, R&D 기여도, 사업기여율을 곱하여 추정
- 시장접근법을 적용하여 경제적 편익을 추정한 결과, 할인율을 고려하지 않고 단순하게 산출하면 2,456.6억원에 달하는 것으로 나타났음
- 비용 및 편익 도출 값을 이용하여 해당 사업의 경제성을 분석하였음
- 비용과 편익의 미래 흐름 비교를 위해 사회적 할인율 적용
 - ※ 사회적 할인율: 자원의 기회비용이 다른 투자사업에 사용되었을 경우 얻을 수 있는 수익을 추정하며, 사람, 사회, 시대에 따라 다를 수 있는 시간의 객관적인 가치를 나타냄
 - 할인율을 사용하여 사업의 타당성을 평가하는 주체가 주로 정부이며, 정부로서는 미래사업의 중요성이 더 높게 평가되는 것을 추구하므로, 통상 시장이자율보다 낮은 수준으로 책정됨
- 경제성 분석 결과, 순현재가치, 편익/비용 비율, 내부수익률 모두 경제적 타당성 확보 기준을 상회하므로, 해당 사업은 경제적 타당성을 확보
 - 투자기간인 2013년~2020년, 편익발생기간인 2021~2027년을 분석 범위로 포함하였으며, 사회적할인율은 반영, 부가가치세는 제외하였음
 - 순현재가치는 43,927백만원으로 0을 초과, B/C ratio는 1.62로 1을 초과, 내부수익률은 12.11%로 사회적 할인율을 초과하여 경제적 타당성 확보

<표 2-5> 차세대 해양생물 유전체 사업 경제성 분석 결과

현재가치 합계 (백만원)		순현재가치 (NPV) (백만원)	편익 비용 비율 (B/C ratio)	내부수익률 (IRR)
편익	비용			
114,499	70,572	43,927	1.62	12.11%

출처: 권연주 외(2014)

6. 해상교통 안전시설 사업 (김수엽, 2014)

□ 해당 사업의 배경 및 필요성

- 해양사고는 정부의 노력에도 불구하고 예·부선 및 유조선 등 취약선종을 중심으로 지속적으로 발생하고 있음
- 정부는 국제해상기구(IMO), 국제노동기구(ILO) 등의 국제기구들이 해상안전을 위해 취하고 있는 조치들을 국내법률에 반영하고 있음
 - 또한, '07년 허베이 스피리트호 기름유출 사고로 인한 막대한 피해를 경험하였고, 유사 해양사고를 예방하기 위한 국가적 대책마련에 착수
- 해상교통, 수산, 해양 관광 및 레저 등의 복합적인 경제사회적 활동이 이루어지고 있는 해상 공간에서의 안전관리를 총괄하는 계획을 수립, 해양사고를 예방하고 대응하는 체제를 마련 및 시행중에 있음
 - 이러한 해상안전 계획에는 선박, 선원, 해상교통시설, 국제협력 등 각 분야별 추진과제가 포함
- 도로나 철도 등의 교통 분야에서 안전대책과 마찬가지로, 해상안전을 위한 분야별 과제들을 추진하는 데에 있어, 대규모 예산 투입은 필수불가결함
- 선박이나 선원에 대한 추진과제 및 정책수립은 정부가 맡더라도, 구체적인 수행 주체는 선사 등의 민간인인 경우가 대부분임
- 그러나, 해상교통시설 투자는 사회 간접자본의 하나로 정부가 투자해야 할 대상에 해당함
- 안전, 환경, 보안과 같은 민간투자가 어려운 분야에 대한 정부의 투자 및 지원은 국가의 의무이나, 충분한 예산 투자가 쉽지는 않은 실정임
 - 따라서, 국민적 공감대와 합의를 반영한 사업들에 대해 우선적인 투자가 이루어질 것임
- 해상교통 안전시설을 통한 해상 안전사고 감축 등의 예방적 효과를 분석해 향후 해상교통 안전시설 사업 투자에 대한 근거와 타당성을 마련할 필요
 - 해상교통안전시설은 비시장재에 해당하므로, 경제적 가치평가 방법을 활용하여 경제적 효과를 분석하여 시사점을 도출할 필요가 있음

□ 해상교통 안전시설 사업의 경제적 효과를 분석하여 사업의 당위성 확보

- 다양한 해상안전 정책 중 공공성이 뚜렷한 해상교통 시설의 사업 투자의 경제적 타당성을 분석하여 향후 지속적인 시설 투자의 당위성 확보
 - 다양한 해상교통 인프라 투자에 따른 안전사고 예방 및 절감효과, 관련 산업 발전 효과 등의 경제적 효과를 분석
- 비시장재인 해상교통시설 투자가치 측정을 위해 공공분야 사업 경제성 분석에 널리 활용되고 있는 조건부 가치측정법 활용
 - 해당 연구에서는 해상교통시설의 실제 이용자인 상선과 어선 소유자인 선사와 어민을 대상으로 조사를 수행
- 어가구 및 지역 해운업계 종사자를 대상으로 한 설문조사 결과, 지불의사액은 연간 4,152원으로 추정되었음
- 조건부 가치측정법을 통한 편익 추정 결과를 바탕으로 경제성 분석 수행
- 경제성 분석 결과, 순현재가치는 325억원으로 0을 초과, B/C ratio는 3.193으로 기준치인 1.0을 초과, 내부수익률은 37.4%로 사회적 할인율 5.5%를 초과
 - 세가지 기준 모두 경제적으로 타당성이 있는 것으로 분석되었음
- 조건부 가치측정법을 통한 해상교통 안전시설의 가치평가는 소비자들이 시설 투자를 위해 추가적으로 세금을 지불할 의사가 있음을 확인
 - 향후에도 관련 시설에 대한 투자, 적절한 운영이 매우 필요한 것임을 시사

<표 2-6> 해상교통 안전시설 사업 경제성 분석 결과

지불의사액		순현재가치 (NPV) (억원)	편익 비용 비율 (B/C ratio)	내부수익률 (IRR)
평균 WTP (원)	95% 신뢰구간 (원)			
4,151.8	3,275.8~5,545.4	324.8	3.193	37.4

출처: 김수엽(2014)

7. 해양생태계 복원기술개발 사업 (권영주 외, 2014)

□ 해당 사업의 배경 및 필요성

- 해양생태계의 훼손 및 변화에 신속하게 대처하기 위해서는 해양환경 건강성을 진단하고, 그 위해요소를 판별하는 기술과 해양생태계 복원을 위한 기술개발이 시급한 실정임
 - 해양생물 보호 및 서식지 복원 분야의 전문 민간기업 또한 부족한 실정
- (해양생물·서식지 훼손 심각)
 - 산업화, 공업화, 도시화 결과, 해양생물 및 서식지 파괴가 심각해짐
 - 해양수산물의 과잉어획과 남획이 지속되고 있음
 - 생태관광 등 연안이용의 증에 따라 친환경적 접근방식의 구체화 필요
- (해양생태계·서식지 복원기술 부족)
 - 해양생물종의 복원에 비해 해양서식지 복원 노력이 상대적으로 부족
 - 해양생태복원 기술개발에 대한 관심 및 투자 제고 필요
 - 해양생태복원 국가기본계획 부재 (연구수행 당시 기준)
- 이에 따라, 해양생태계 복원 기술 개발에 대한 관심 및 투자가 요구됨
 - 기후변화 등으로 인해 훼손된 해양생태계의 현황과 원인을 규명하고, 생태계의 기능 복원 및 손실 방지를 위한 기술 개발 및 전략 수립이 필요

□ 해양생태계 복원기술개발 사업의 경제적 타당성 분석

- 조건부 가치추정법을 적용하여 해당 사업 수행의 경제적 타당성 평가
- 지불의사액 유도방법으로 유인일치적인 양분선택형을 적용
 - 단, 지불의사액 추정모형으로 영(0)의 응답을 명시적으로 다룰 수 있도록 스파이크 모형을 분석에 반영하였음
- 편익 추정 결과, 가구당 연간 지불의사액은 5,414원으로 추정, 전국단위로 확장하게 되면 약 986억원에 달함
- 경제성 분석 결과, 순현재가치는 3,378억원, B/C ratio는 5.20, 내부수익률은 65.9%로 모두 기준치를 상회하여, 해당 사업은 경제적 타당성을 확보

8. 해조류 바이오매스 에너지화 사업 (배정환 외, 2015)

□ 해당 사업의 배경 및 필요성

- 거대 해조류는 육상에서 재배되는 작물을 이용한 바이오에탄올이나 바이오디젤에 비해 광대한 토지를 이용할 필요가 없고, 식량문제를 야기하지 않는다는 점에서 향후 주요한 바이오에너지용 원료로 주목받고 있음
 - 육상에서 바이오에탄올은 주로 옥수수나 카사바를 통해, 바이오디젤은 유채, 해바라기, 팜 등을 통해 추출함
- 하지만, 아직까지는 전 세계적으로 거대 해조류를 이용하여 상업적으로 바이오연료를 생산하는 사업이 활발하게 이루어지고 있지는 않음
- 국내의 경우, 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며 전통적으로 거대 해조류를 대량으로 재배해 온 기술과 노하우, 기반시설을 갖추고 있음
 - 해조류 바이오매스 에너지화 사업화에 유리한 위치를 점하고 있음
- 따라서, 중장기적으로 거대 해조류를 바이오에너지화 하는 기술을 개발하여 상용화에 성공한다면, 에너지 자립률을 높이고 관련 산업에의 파급효과를 기대할 수 있음
- 특히 국내의 바이오연료는 국산 원료로 이용하기에 현재까지는 어려운 상황이며, 수입 원료를 주로 이용하고 있어 국민들도 바이오연료 보급확대에 긍정적이지 못한 것으로 나타남
- 이에 따라 향후 바이오에탄올, 바이오디젤과 같은 바이오연료의 수송 부문이나 전력 부문에서의 이용을 제고하고, 국산 원료의 비중을 높이기 위해서 국산 거대 해조류를 이용한 바이오연료 생산이 효과적일 것으로 판단됨
- 현재까지 국내에서는 국산 거대 해조류를 이용한 바이오에너지에 대한 경제적 타당성, 파급효과를 연구한 논문이 없음
 - 다만, 일부 연구보고서에서 해외자료를 원용하거나 기초적인 경제성 분석 수준에 머무르고 있음

□ 해조류를 바이오에너지로 전환하는 사업의 경제적 타당성 분석

- 거대 해조류에 속하는 다시마를 이용하여 바이오매스 에너지화 하는 사업의 경제적 타당성, 경제적 파급효과, 온실가스 저감효과를 추정하였음
 - 인적 산업에 미치는 경제적 파급효과와 화석연료 대체에 따른 온실가스 감축효과를 추정
- 세밀한 전제와 데이터에 기반하여 비용편익기법과 산업연관분석 기법을 활용하여 경제성 분석을 수행하였음
 - 비용편익분석에는 시나리오 기반의 시장접근법을 적용
- 저유가, 기준, 고유가 시나리오별 경제성 분석을 수행
 - 메탄, 에탄올, 바이오오일의 유가가 저유가는 매년 2%씩, 고유가는 매년 4%씩 상승하는 것으로 전제하여 경제성 분석
- (저유가 시나리오)
 - 순현재가치는 444,446백만원, B/C 는 1.25, 내부수익률은 11.84%로 나타남
- (고유가 시나리오)
 - 순현재가치는 919,403백만원, B/C 는 1.52, 내부수익률은 19.23%로 나타남
- 저유가, 고유가 시나리오 모두 경제적 타당성을 확보하는 것으로 나타남
- 유가가 더 높게 상승할수록 경제성이 더 높은 것으로 나타났으나, 유가 상승은 물가 상승을 야기하여 제반비용 역시 상승할 것이므로, 유가 상승이 반드시 경제성을 더 좋게 만드는 것은 아님
- 경제적 파급효과 분석을 위해 산업연관분석을 수행하여 전후방 연쇄효과, 부가가치 파급효과, 취업 및 고용유발효과를 분석하였음
 - 기준(Standard) 시나리오를 대상으로 2030년의 파급효과를 분석
- 전후방연쇄효과는 전방이 4조 7835억원, 후방은 4조 1005억원으로 나타났음
- 부가가치효과는 1조 21억원, 고용유발효과는 10,056명으로 나타났음
- 온실가스 저감 효과를 추정한 결과, 2030년에 741,231TCO₂를 저감할 수 있는 것으로 산출되었음

9. 대기오염의 건강영향 평가 (안소은 외, 2015)³⁾

□ 해당 연구의 배경 및 필요성

- 세계보건기구는 대기오염을 환경부문 질병부담의 가장 큰 요인으로 보고했음
 - 세계보건기구는 2012년 기준 대기오염으로 인한 조기사망이 700만명에 이르는 것으로 보고하였으며, 이는 전체 사망자의 12.5%에 해당하는 수치임
- 대기오염으로 인한 건강영향은 오염물질에 대한 노출정도에 따라 급성과 만성으로 구분되는데, 만성 건강영향을 평가하기 위해서는 대규모 인구집단을 대상으로 한 코호트 자료가 필요함
 - ※ 코호트(cohort): 조사연구와 인구학적 연구에서, 특별한 기간 내에 출생하거나 조사하는 주제와 관련된 특성을 공유하는 대상의 집단을 일컫음. 예컨대 평균연령을 계산할 때, 같은 달에 태어난 십만명의 사람이 한 코호트가 될 수 있음
- 국내의 경우 코호트 자료가 미흡하여, 대기오염의 급성 영향에만 초점을 맞추어 연구가 진행되어 왔음
- 그러나, 최근 4차산업혁명 및 빅데이터 분석과 활용에 대한 사회적 관심이 높아지면서 국민건강보험공단에서 전국민 대상 표본코호트DB를 구축하였음
 - 전 국민을 대상으로 표본추출한 100만명에 대한 DB를 2014년부터 제공
- 대기오염의 건강영향 평가에 대한 기존의 국내연구들은 지역적으로 한정되어 있거나, 특정 오염물질에 제한되어 있거나, 인구학적/사회경제학적 요인의 반영이 미흡해 분석결과를 정책적으로 활용하는 데에 한계가 있었음
- 이에 따라 해당 연구는 표본코호트DB를 활용하여, 대기오염으로 인한 건강영향의 정량적 평가를 개선
 - 평가 결과에 기반하여 피해비용을 추정하고, 관련 정책평가의 기반을 마련
- 특히, 최근 활용가능하게 된 표본코호트DB를 통해 건강영향 평가 결과의 특성을 고려하여, 적절한 경제성 분석 방법으로 연계하기 위한 작업에 중점

3) 해당 연구는 경제성분석에 관련된 연구는 아니지만, 연구 대상인 '대기오염물질로 인한 피해비용'이 본 연구에서 정의내린 편익과 매우 유사하여 본 소절에 함께 제시하였음.

□ 대기오염의 호흡기계 신규입원 발생위험 및 질병비용 산출

- 대기오염의 호흡기계 신규입원 발생위험을 생존분석한 결과, 미세먼지, 이산화황, 오존의 장기노출 농도 증가는 호흡기계 신규입원위험을 증가시킴
- 신규입원위험은 전국에 비해 서울지역에서 높았음
- 미세먼지의 경우, 65세 이상 연령의 집단이 전체 연령에 비해 더 많이 받는 것으로 나타났음
- 시계열 패널 자료를 이용하여 대기오염에 따른 재입원위험을 분석한 결과, 65세 이상 연령의 집단에서 미세먼지, 일산화탄소, 오존, 이산화황이 증가할 수록 입원이 유의하게 증가하는 것으로 나타났음
- 질병비용을 항목별로 산출한 결과, 2013년 호흡기 질환 질병비용 중 의료비용이 51%, 생산성 손실비용이 33%를 차지하는 것으로 나타났음
- 서울시 미세먼지 농도를 제주도 수준으로 개선할 경우를 가정하여 서울시 65세 이상 인구집단의 질병비용을 분석하였음
 - 분석 결과, 호흡기계 질환 재입원 에피소드는 1,787건이 감소하는 것으로 추정되었음
 - 질병비용 절감으로 인한 건강편익은 67억원으로 추정되었음



[그림 2-1] 건강영향·경제성 통합평가를 위한 요구정보

출처: 안소은 외 (2015)

제3장. 경제적 편익 추정 및 실증연구 절차

제1절. 편익의 종류 및 개념

- R&D 사업의 경제적 타당성을 평가하기 위해 본 사업의 유형 파악 필요
 - R&D 사업의 유형별로 편익항목의 구성이 달라질 수 있으므로, 본 사업의 R&D 유형을 결정할 필요가 있음
 - R&D 유형으로는 기초원천기술개발사업, 공공복지기술개발사업, 산업기술개발사업, 연구장비구축사업, 연구센터구축사업, 인력양성사업의 6가지가 있음
 - KISTEP, KDI, 국회예산정책처 등에서 모두 동일하게 R&D 사업을 구분
 - R&D 사업의 편익항목은 사업의 성격과 내용에 따라 다양하므로, 사업계획서 및 기획연구보고서 등을 참고하여 편익항목을 구체화·세분화할 필요가 있음
 - R&D 사업의 특수성을 반영하기 위한 가장 기본적인 방법은 사업별로 발생하는 편익항목을 도출한 후, 이를 화폐가치로 추정하는 것임
 - 계량화가 가능한 편익항목은 화폐가치로 추정
 - 계량화가 불가능한 편익항목은 정성적으로 언급하거나 정책적 타당성 내의 특수평가항목에 반영

<표 3-1> R&D 사업의 유형별 특성

사업구분	사업특성
기초원천기술개발사업	교육훈련 및 인력양성 효과, 지식증진에의 기여도
공공복지기술개발사업	삶의 질 향상, 에너지 절감, 공해 감소
산업기술개발사업	산업경쟁력 향상, 실용화 가능성
연구장비구축사업	국가위상제고, 과학기술인프라 구축, 첨단연구 분야의 선점, 과학문화유산으로서의 가치
연구센터구축사업	지역경제 파급효과, 집적효과
인력양성사업	교육훈련효과, 지식증진에의 기여도

- 기초원천기술개발사업의 경우, 사업의 효과가 기업의 부가가치 창출에 기여한다거나, 직접적으로 소비자에게 영향을 미친다고 보기 어려움
 - 따라서, 기초원천기술을 확보하지 못할 때의 국내총생산이 향후 어떠한 부정적인 영향을 받을지 분석함으로써 편익을 추정할 수 있음
 - 또는, 경제적 편익을 추정하기보다는 비용의 적정성을 검토하거나, 파급효과 분석에 초점을 맞추어 경제성에 대한 종합적 판단을 하는 방법도 있음
- 공공복지기술개발사업의 경우, 사업의 효과가 개별 소비자에게 미치는 영향을 추정하여 산업차원에서의 부가가치창출 금액을 측정
 - 소비자에게 미치는 영향과 부가가치 창출액을 합하여 편익 추정
 - 예컨대 의료산업 관련 기술개발 사업의 경우, 잠재소비자는 해당 기술과 유사한 의료서비스에 대해 얼마나 지출하고 있는지를 평가하거나, 해당 의료기술이 없음으로 인해 발생할 불편함과 고통에 대한 금액을 측정
- 산업기술개발사업의 경우, 다른 연구개발사업에 비하여 소비자와 생산자의 식별이 용이함
 - 소비자 잉여와 생산자의 부가가치 창출액을 더해 편익을 추정할 수 있음
- 연구 장비 구축사업의 경우, 소비자와 생산자의 직접편익을 측정하는 것이 쉽지 않아, 아래 2가지 편익항목을 고려할 수 있음
 - ① 해당 연구 장비를 구축하지 않고 해외에 있는 장비를 사용함으로써 지불하는 사용료를 편익으로 반영
 - ② 사용료 수입이 크지 않거나 산업적 성과의 창출이 불확실하지만, 과학기술 인프라의 구축으로 인해 국가위상 제고, 국민의 자긍심 고취, 과학문화유산으로서의 가치 등을 창출
 - ※ 조건부 가치측정법의 적용을 고려할 수 있음
- 연구 센터 구축사업의 경우, 소비자와 생산자의 직접편익을 측정하는 것이 쉽지 않아, 아래 2가지 편익항목을 고려할 수 있음
 - ① 연구 센터의 산출물로부터 창출될 부가가치와 예상되는 기술료 수입으로 발생할 부가가치 등을 합하여 편익 추정
 - ※ 연구센터의 구축으로 인해 비용절감효과가 발생하는 경우, 비용절감편익을 반영할 수 있음

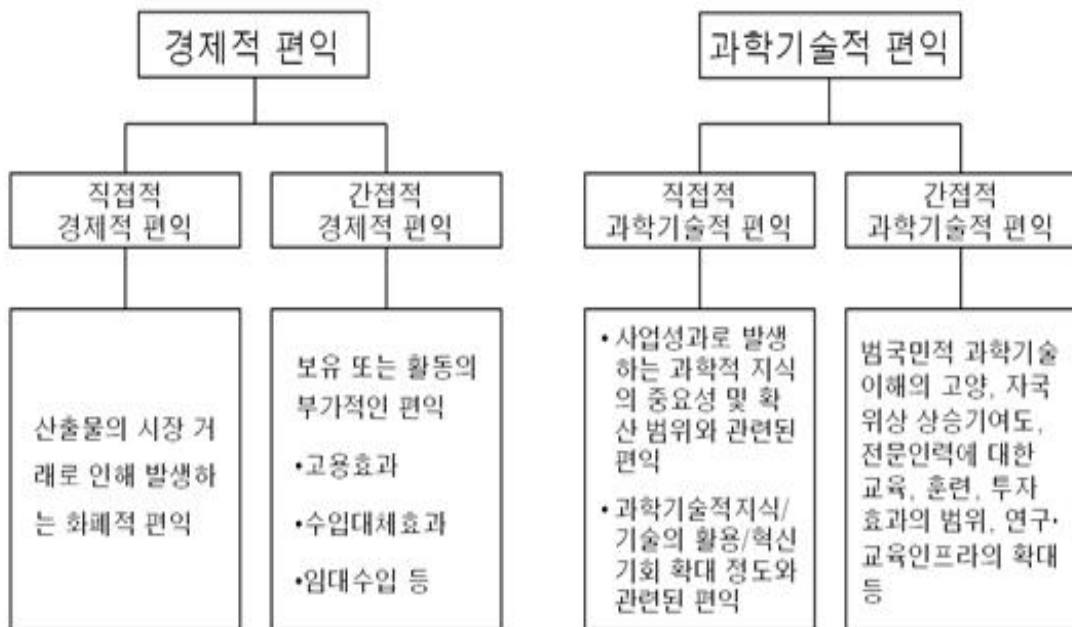
- ② 연구 센터 중 공익시설에 대해서는 조건부 가치측정법을 적용하여 편익을 추정하는 방안 고려
- 인력양성사업의 경우, 양성된 인력이 향후 창출할 부가가치를 구하여 편익을 추정할 수 있음
- 본 사업은 기초원천기술개발사업에 해당한다고 판단할 수 있음
 - 기초원천기술, 즉 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 기술을 확보하지 못할 때 어떠한 부정적인 영향을 받을지 분석하여 편익을 추정
 - 다시말해, 본 사업의 추진 및 시행으로 인해 절감될 수 있는 피해를 편익으로 추정할 수 있음

□ (R&D) 사업의 경제성 분석 기본 절차

- 먼저 사업 목표 및 내용을 분석하여 해당 사업의 편익항목을 도출함
- 시장 수요 자료로부터 계량화를 통한 수요추정 및 가격추정이 용이하다면, 편익을 추정하여 비용편익분석을 수행함
- 시장수요로부터 계량화가 어렵다면 대리시장의 존재 여부에 따라 분석방법이 달라짐
- 대리시장이 존재한다면 현시선호 접근법을 적용하여 편익을 추정한 후에 비용편익분석을 수행함
- 대리시장이 존재하지 않는다면 진술선호 접근법을 적용하여 편익을 추정한 후에 비용편익분석을 수행함
- 현시선호 및 진술선호 접근법 모두의 적용이 힘든 경우에는 비용효과분석으로 경제성 분석을 끝냄

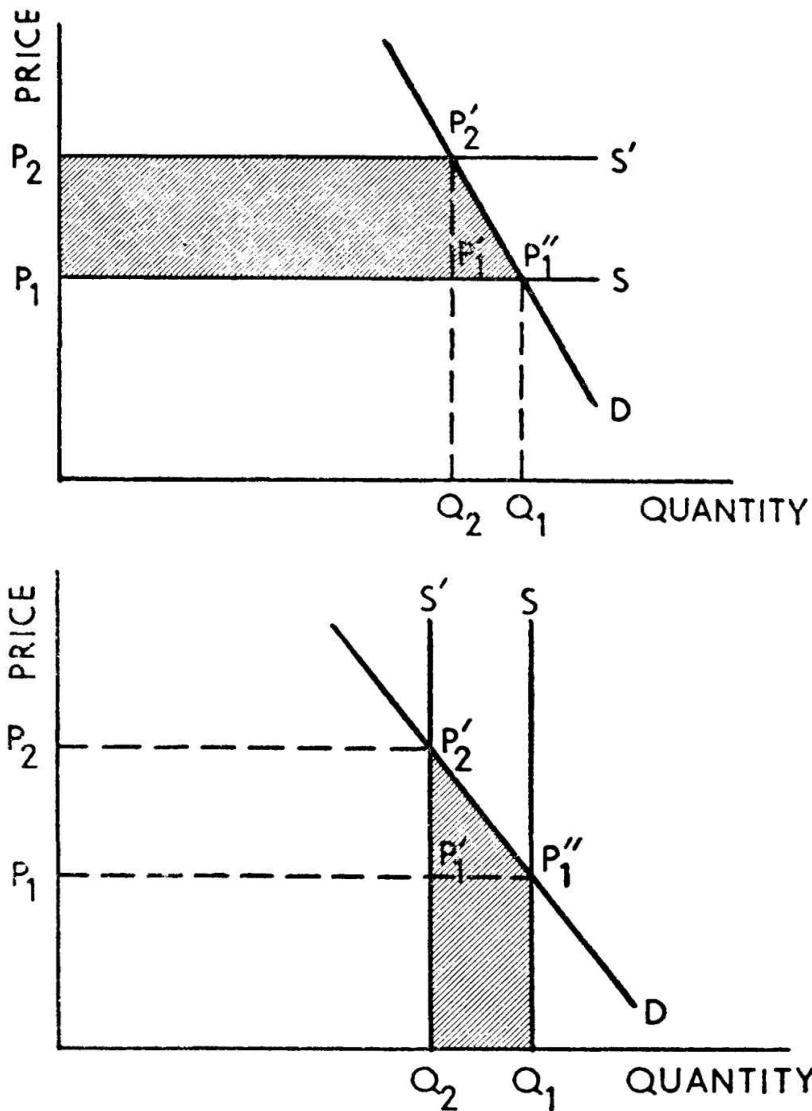
□ R&D 사업 편익은 연구개발 활동의 결과로 나타나는 모든 경제적 효과 의미

- 사전적으로 편익이란 정(+)의 사업효과를 의미하며
 - 연구개발사업의 편익은 원칙적으로 연구개발 활동의 결과로 나타나는 모든 경제적 효과를 의미함
- 연구개발사업의 편익은 단위가 금액 단위로 쉽게 도출되거나 혹은 전환되는 편익인 경제적 편익과, 해당 연구개발 사업을 통해 새롭게 발견되는 기술이나 지식 성과와 같은 과학기술적 편익으로 구분할 수 있음
 - 이들 편익은 해당 연구개발 사업으로부터 직접 파생되었는지, 혹은 다른 중간 단계를 거쳐 편익이 산출되었는지에 따라 다시 직접적 편익과 간접적 편익으로 구분할 수 있음
 - 즉, 연구개발 사업으로 인한 편익은 직접적 경제적 편익, 간접적 경제적 편익, 직접적 과학기술적 편익, 간접적 과학기술적 편익으로 크게 구분할 수 있음



[그림 3-1] 과학기술활동에 의한 편익분류

- 연구개발투자가 가져오는 경제적 수익 및 효과에 대한 연구들에서는 Griliches(1958)에서 언급된 '사회적 수익률'이라는 개념을 다루고 있음
 - Griliches는 하이브리드 옥수수라는 특정 연구개발투자로 인해 발생하는 소비자 잉여 증가분을 편익으로 정의하였음
 - 이러한 소비자 잉여의 증가분은 연구개발사업으로 인하여 발생하는 기술 및 혁신이 형성하는 새로운 시장균형으로 설명될 수 있음
 - 기존의 시장에서 혁신 및 기술을 통해 발생하는 새로운 시장을 가정할 경우, 이들 시장의 차이로 인하여 발생하는 경제학적 후생 변화 중 소비자 잉여의 증가분을 편익으로 정의함



[그림 3-2] 연구개발 편익에서의 소비자 잉여 변화

□ 직접적 편익은 신규 부가가치 창출 편익과 비용절감 편익으로 구분

- 직접적 경제적 편익은 R&D 사업의 성격에 따라 신규 부가가치 창출 편익과 비용절감 편익으로 구분됨
- 신규 부가가치 창출 편익은 연구개발사업의 결과로써 새로운 제품이나 서비스가 개발되고 상업화되어, 그 결과 시장에서 해당 제품이나 서비스가 실제 거래되어 발생하는 편익을 의미함
- 반면 비용절감 편익은 동일한 양의 산출에 드는 비용이 연구개발 사업으로 인한 신기술 적용 이전에 비해 감소할 때 발생하는 편익을 의미함
 - 비용절감편익은 연구개발사업의 목표가 기존 기술의 개선 및 개량, 혹은 새로운 생산 공정 기술의 개발 등일 경우에 주로 발생함
 - 이 경우에는 해당 기술의 개발과 적용으로 인해 기존의 생산과정에 존재하는 비효율적인 부분이 제거되거나 혹은 투입 요소 대체 등을 통해 생산의 효율성의 증가를 통해 발생함

□ 간접적 편익은 생산유발효과, 부가가치유발효과, 취업유발효과 등으로 구분

- 간접적 경제적 편익은 해당 연구개발사업의 결과로 새로운 제품이나 서비스가 시장에서 거래될 때(혹은 새로운 시장이 개척될 때)의 편익을 의미
- 해당 시장을 포함한 관련 시장에서 부가적으로 발생하는 경제적 편익에 해당

□ 과학기술적 편익은 새로운 과학기술적 지식이나 성과를 의미

- 과학기술적 편익은 연구개발 사업을 통해 얻을 수 있는 새로운 과학기술적 지식이나 성과를 의미함
 - 직접적 과학기술적 편익은 기술적 지식이나 성과와 같은 연구개발의 결과물이 논문이나 특허의 형태로 구체화된 것으로 정의함
 - 반면, 간접적 과학기술적 편익은 해당 연구개발 사업을 통해 기대되는 국민들의 과학기술 이해도 증가, 국가 위상 향상, 교육 및 연구인력 양성, 연구능력 향상 등을 포함함

□ 경제성 분석의 편익은 직접적 경제적 편익만을 반영

- 현재 연구개발사업 예비타당성조사의 비용편익분석에서는 연구개발사업의 다양한 편익들 중에서 직접적 경제적 편익만을 분석에 포함하고 있음
- 이로 인해, 직접적 경제적 편익을 어디까지 정의할 것인지 그리고 어떻게 추정할 것인지에 따라 B/C 비율이 다르게 계산되어 해당 사업의 진행유무에 결정적인 영향을 미침
- 따라서 예비타당성 조사의 객관성을 담보하기 위하여, 직접적 경제적 편익의 범위와 추정 방법을 간단하고 정확하게 규정화할 필요성이 제기됨
 - 이는 분석자의 주관이나 선호에 따라 동일한 연구개발사업의 B/C 비율이 변화하는 것을 방지하고 일관성을 담보하기 위한 조치임
- 한편, 간접적 경제적 편익은 연구개발사업의 파급효과에 해당하는 개념으로, 현행 연구개발사업 예비타당성조사에서는 편익으로 반영하지 않음
 - 하지만, 필요시에는 간접적 경제적 편익을 정책적 타당성 내의 사업특수평가항목으로 언급할 수 있음
- 과학기술적 편익의 경우에는 직접적 경제적 편익을 산정하기 위한 기준이 될 수 있지만, 일부 연구개발사업에서 비용효과분석을 수행하기 위한 효과의 대리 지표로 활용하기도 함
- 경제성 분석에 있어 비용과 편익은 모두 사회적 비용 및 편익으로 간주
 - 공공투자시설의 경우 비용은 실질적으로 투자되어 쓰인 비용을 계상하는 반면 편익은 회수방법을 통한 실제수익이 아닌 사회적 편익을 기준
- 비용과 편익의 미래 흐름을 비교하기 위하여 사용되는 할인율은 자원의 기회비용을 의미함
 - 할인율을 통하여 투자 사업에 사용된 자본이 다른 투자 사업에 사용되었을 경우 얻을 수 있는 수익을 추정할 수 있음
 - 특정 투자 사업이 정부에 의해 주도되는 경우에는 사회적 할인율의 개념을 적용
 - 민간자본에 의해 추진되는 경우에는 시장이자율에 근거한 재무적 할인율을 적용

제2절. 편익 추정 방법

□ 미세먼지의 보건, 산업 등 불특정 다수에게 다양한 피해 유발

- 미세먼지는 입자가 매우 작아 흡입을 하면 코 점막을 통과하여 폐관련 질환을 발생시킬 수 있음(천식, 폐질환 등 호흡기 질환 발생)
- 미세먼지가 눈에 자극을 주면서 눈병, 알레르기를 악화시키면서 피부질환을 발생
- 산업 측면에서는 미세먼지에 민감한 반도체, 디스플레이, 자동차 엔진 등 정밀 전자기기 등의 불량을 높일 수 있으며, 생산성을 저하시킬 수 있음
- 항공, 자동차 등 운송분야에서도 영향을 주면서 물류와 유통 수출입, 교통제한 운행 정지 등 다양한 영향을 미침

□ 정부는 국내 미세먼지 관련 연구개발사업, 종합대책을 추진 중

- 우리나라 정부는 국정과제로 지정한 '미세먼지 오염현황과 대책'과 관련하여 '미세먼지 종합대책' 수립('13년) 이후 169억원, ('14년), 179억원('15년), 3,881억원('16년), 4,834억원('17년)의 사업 수행 중
 - 미세먼지 저감을 위하여 경유와 석탄 등을 줄이고, 전기자동차 등 친환경 관련 연구개발을 수행하고 있으나, 우리나라 해외 관련 조사, 연구 미흡
 - 한, 중, 일 3개국간 협력과 대책마련을 위하여 우리나라 해외 미세먼지 유입과 활동 등에 대한 조사가 필수적이나 국내 연구 미흡한 상황임
- 문재인 정부는 '문재인정부 국정운영 5개년 계획'(국정기획자문위원회, '17년 7월 발표)에서 '내 삶을 책임지는 국가'라는 국정목표 하에 국민안전과 생명을 지키는 안심사회(전략 3)의 하나로 미세먼지 문제에 대한 신정부의 의지를 표명
- 미세먼지 관련 국가간 협력과 국내 미세먼지 발생의 정확한 원인 파악을 위하여 우리나라 해외의 미세먼지 관련 연구조사 활동의 공백 우려
 - 해외를 통하여 유입되는 외부의 미세먼지 등에 대한 정확한 조사, 모니터링은 미세먼지의 원인, 대응을 위한 체계적인 기반 가능

‘미세먼지 오염현황과 대책’ 국정과제 추진경과 및 주요 일정

- ‘13.12월: 미세먼지 종합대책 수립
- ‘14.2월 : 미세먼지(PM10) 법정예보 시행
- ‘14.3월 : 미세먼지 대책 수립 지시(국무회의)
- ‘14.4.15 : 미세먼지 오염현황 및 대책(국무회의 보고)
- ‘14.7.3 : 한·중 환경협력 양해각서(MOU) 개정 서명
- ‘15.1월 : 미세먼지(PM2.5) 예보 및 미세먼지(PM10, PM2.5) 경보제 시행
- ‘15.3월 : 제2차 한·중·일 대기오염정책대화 개최
- ‘15.3월 : 백령도, 중부권 집중측정소의 미세먼지(PM2.5) 성분농도 공개
- ‘15.6월 : 대기분야 한·중 공동연구단 구성 및 개소(중국 베이징)
- ‘15.9~10월 : 한·중·일 대기분야 정책대화 WG1, WG2 회의
- ‘15.10.31 : 한·중 대기질, 황사 측정자료 공유 합의서 체결
- ※ ‘15.12월부터 실시간 자료공유 개시
- ‘15.12.18 : 미세먼지 관리대책 및 부처협조사항 보고(사회관계장관회의)
- ‘15.12.30 : 건강취약계층 보호를 위한 고농도 미세먼지 대응매뉴얼 제정·시행
- ‘16.2월 : 제3차 한·중·일 대기오염정책대화
- ‘16.3월 : 호남권, 제주권 집중측정소의 미세먼지(PM2.5) 성분농도 공개
- ‘16.3.24 : ‘16년 봄철 황사대비 미세먼지 전망 및 대응방안 보고(국가정책조정회의)
- ‘16.3.24 : ‘16년 봄철 황사대비 미세먼지 전망 및 대응방안 보고(국가정책조정회의)
- ‘16.6.3 : 정부합동 「미세먼지 관리 특별대책」 수립·발표
- ‘16.7.1 : 「특별대책 이행 세부 추진계획」 수립·발표
- ‘16.9~‘17.3 : 특별대책 이행상황 점검(국조실 주관 총3회)
- 「미세먼지 관리 특별대책」 주기적 이행 점검(4차: ‘17.6월)
- 제19차 한·중·일 환경장관회의 계기, 미세먼지 저감을 위한 한-중 환경협력* 강화(‘17.8월)
- * 중국 북부지역 6개도시 대상 한-중 「맑은 하늘(晴天) 프로젝트」 MOU 체결 등
- 수도권, 영남권 집중측정소 미세먼지(PM2.5) 성분농도 공개(‘17)

<출처 : 환경부 홈페이지, ‘미세먼지 오염현황과 대책’ 국정과제 사업내역서 발췌>4)

4) 이명선, ‘미세먼지 관련 정부 정책 동향’, 2017 관련 재인용

58. 미세먼지 걱정 없는 쾌적한 대기환경 조성(환경부)

과제목표

- 미세먼지 발생량을 임기 내 30% 감축하고 민감계층 적극 보호

주요내용

- (원인규명 및 예보정확도 제고) 환경위성 발사('20년), 측정망 확충, 한중 공동 연구('17년5월~'20년) 등을 통해 미세먼지 발생원인 규명
 - '20년까지 도심 측정소 대폭 확충 및 고농도 시 예보정확도 74% 달성
- (발전·산업부문 감축) 석탄발전 축소, 사업장 배출규제 강화
 - '17년부터 봄철 노후 석탄발전소(8기) 일시 가동중단 및 신규 건설 불허
 - '18년 사업장 먼지총량제 시행 및 배출허용기준 20% 이상 강화
 - 임기 내('22년) 30년 이상된 노후 화력발전소(10기) 전면 폐쇄
- (경유차 단계적 감축) 경유차 비중 축소 및 친환경차 비중 확대
 - 노후경유차 운행제한 확대(서울 → 수도권), 조기폐차 사업 확대 등 경유차 비중 축소
 - '18년 저공해 건설기계 사용 의무화 및 디젤기관차 배출기준 강화
 - '22년까지 전기차 등 친환경차 보급 획기적 확대
- (민감계층 등 보호 강화) 오염우심지역 특별관리, 노인·어린이 맞춤형 대책 추진
 - '19년 배출원이 밀집한 충청·동남·광양만권 특별관리지역 지정
- (한중·동북아 협력) 한중 정상회담 의제화 및 동북아 다자협약 추진
 - '19년까지 한중 협력의지를 담은 미세먼지 공동선언문 발표

기대효과

- 미세먼지(PM2.5) 오염수준을 선진국 수준인 $18\mu\text{g}/\text{m}^3$ (잠정, '16년 26)으로 개선

<출처 : 국정기획자문위원회, 문재인정부 국정운영 5개년 계획('17.7)에서 발췌>5)

사업의 특성을 고려하여 비용절감 관점에서 편익 항목 도출

- 본 사업의 특성 및 기대효과를 고려하면, 사업으로 인해 얻을 수 있는 편익은 비시장재적 성격이 큰 것으로 판단됨

5) 이명선, '미세먼지 관련 정부 정책 동향', 2017 관련 재인용

- 비시장재란 시장에서 거래되지 않는 재화나 서비스를 일컫음
- 비시장재적 가치를 고려한 사회적 편익을 추정하여 경제성 분석에 반영하는 것이 타당하다고 판단됨
- 본 사업의 최종 수혜자는 국민과 오염에 대한 비용부담주체라고 할 수 있음
 - 경제성 분석을 위한 편익항목은 크게 '부가가치 창출'과 비용절감'이 있음
 - 본 사업의 주요 기대효과는 해양에의 대기분진 영향 저감, 국내외 환경규제 대응, 지역주민의 오염에 대한 노출 피해 최소화 등임
 - 따라서, 사업의 성과의 최종적인 수혜자는 국민들, 오염에 대한 비용부담주체들이므로, 부가가치 창출 편익 보다는 비용절감 편익으로 편익항목을 도출하는 것이 합당하다고 판단됨
- 해역 대기분진 플릭스 피해에 대한 절감비용을 본 사업의 경제성 분석 주요 편익 항목으로 도출
- 본 사업은 기존연구 및 관련시장의 부재로 피해비용 자료, 시장규모 자료 등에 대한 확보에 한계가 있음
 - 관련 시장 또는 산업의 규모 등에 대한 자료가 확보 가능하다면 피해비용 저감규모를 수식으로 추정할 수 있으나, 본 사업은 기존연구 및 관련시장 규모 관련 자료를 확보하기 어려움
 - 국민 대상의 설문을 통한 편익 추정이 합당하다고 판단됨
- **조건부 가치추정법을 이용하여 본 사업의 직접적 편익 추정**
- 본 연구에서는 현시선호 접근법과 진술선호 접근법 중에서 진술선호 접근법을 이용하여 분석을 수행하였음
 - (현시선호 접근법) 사람들의 행동으로 나타난 선호에 기반하여 비시장재화의 가치를 추정하는 방법으로, 대표적인 방법론에는 여행비용 접근법, 헤도닉 가격기법 등이 있음
 - (진술선호 접근법) 현시된 선호를 관측하기 어려울 때, 가상의 시장 상황에서 거래를 어떻게 할지 질문하여 이에 대한 진술된 선호를 이용하여 편익을 추정하는 방법으로, 조건부 가치추정법과 컨조인트 분석법이 대표적인 방법론임

- 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 사업은 아직 존재하지 않는 사업이기 때문에, 현시선호 접근법과 같은 사후적인 접근법은 적용할 수 없음
- 진술선호 접근법 중 조건부 가치측정법(CVM)을 이용해 편익을 추정하였음
 - CVM은 본 사업으로 인한 편익(피해저감비용)에 대한 지불의사액을 피설문자에게 직접적으로 질문함(제시된 금액에 대한 Yes-No 질문)
 - 컨조인트 분석법은 본 사업이 특정 속성들의 결합으로 이루어졌다고 가정하여 각 속성들의 조합으로부터 재화를 나타내는 가상의 대안집합을 구성하여 지불의사액을 추정함
- 본 사업의 과학기술적 편익의 최종 수혜자는 국민이라고 판단하며, 분석의 용이성 및 범용성 등을 고려하여, CVM을 이용하여 편익을 추정하였음
 - 본 사업에 대해 컨조인트 분석법을 적용하기에는 응답자들의 인식상 부담 문제가 제기되며, 평가에 필요한 다양한 속성들을 정의하기 용이하지 않음
 - 따라서 컨조인트 분석법을 이용한 경제성 분석의 경우, 일반적으로 전문가들을 대상으로 분석을 수행하는 경우가 많음
 - KDI 예비타당성조사 일반지침에서는 비시장재화에 대해서 CVM을 통해 지불의사액을 추정할 것을 가이드라인으로 제시하고 있음
 - 조건부 가치측정법의 타당성 및 신뢰성은 기존 연구들을 통해 검증되고 있으며, 다양한 산업을 대상으로 광범위하게 적용되고 있음

□ 유사 분야 사업에 대한 경제성 분석 시 CVM을 많이 활용

- 기존 연구들에서의 해양 산업 대상 경제성 분석은 다양한 분야들을 대상으로 이루어지고 있음
 - 환경, 건설, 생물, 교통, 에너지 등의 다양한 세부분야 대상 사업들에 대한 경제성 분석이 수행되고 있음
 - 특히, 환경 분야의 사업들은 재화가 거래되는 시장이 형성되어 있지 않은 경우가 많이 때문에, 시장접근법 보다는 CVM을 활용한 비용절감 편익을 추정하는 것이 대부분임
- 해양생물, 에너지 등과 같이 시장이 형성되어 있는 사업을 대상으로는 시장 접근법을 이용하여 경제성 분석을 수행하는 경우가 많음

- 해양 산업에서는 환경 분야의 사업에 대한 경제성 분석 연구가 많은 편임
 - － 본 연구의 대상 사업인 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 연구 사업 또한 해양 및 환경 분야에 해당함

<표 3-2> 해양 산업의 경제성 분석 결과

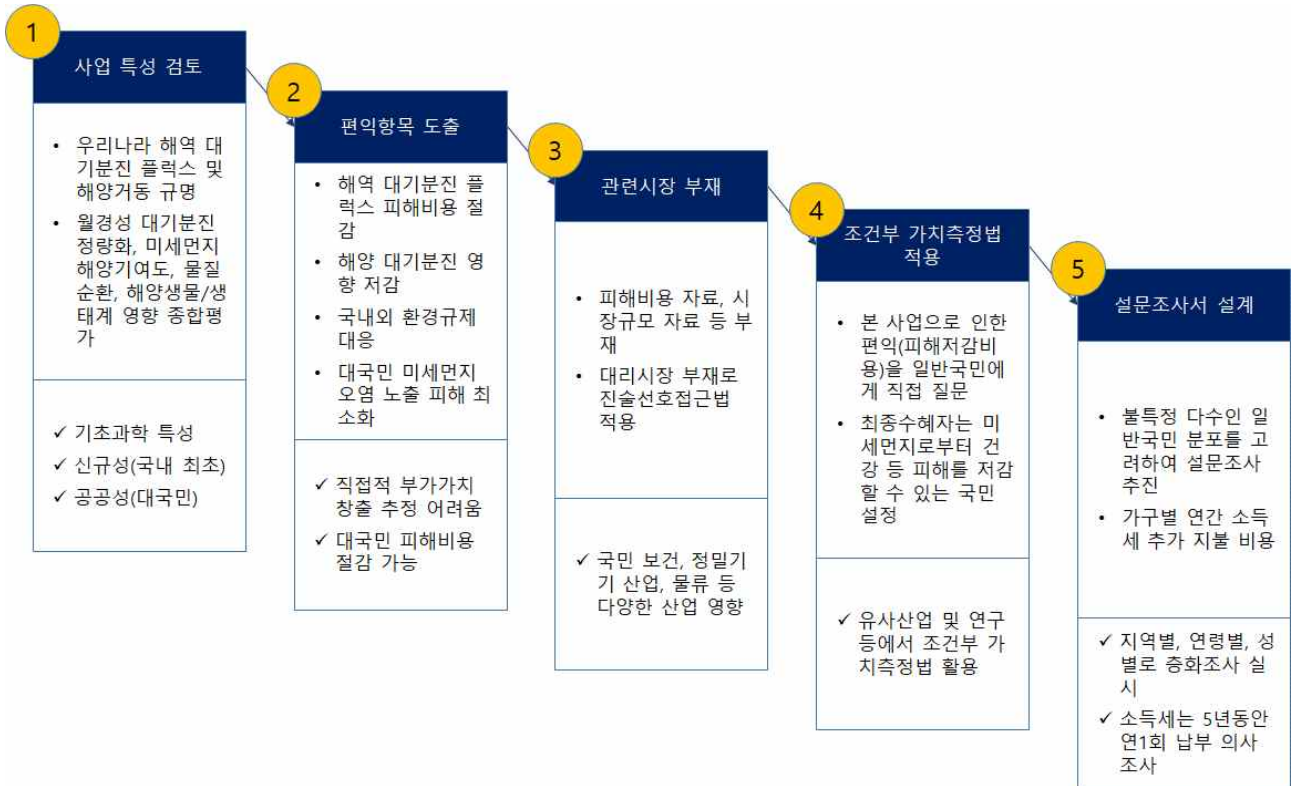
연도	사업명	대상 분야	분석 모형	B/C ratio
2005	해양심층수 개발 사업	해양/환경	CVM	2.13
2006	광양만 환경저감화 시설	해양/환경	CVM	4.12
2012	마리나항만 개발 및 운영 사업	해양/건설	컨조인트	1.17
2013	해양환경 위해성 평가 및 관리기술개발 사업	해양/환경	CVM	1.76
2014	차세대 해양생물 유전체 사업	해양/생물	시장접근법	1.62
2014	해상교통 안전시설	해양/교통	CVM	3.19
2014	해양생태계 복원기술개발 사업	해양/환경	CVM	5.20
2015	해조류 바이오매스 에너지화 사업	해양/에너지	시장접근법	1.38

□ 경제성 분석을 위한 방법론 도출 프로세스

- 사업 특성, 목표를 검토하여 본 사업의 기초과학 특성과, 국내 최초 연구조사 활동, 일반 국민 등에 영향을 주는 사업 특성을 보유함
- 편익항목은 부가가치 창출로 보기 보다는 대기분진 등으로 인한 다양한 피해를 줄일 수 있는 대응 방안을 찾는 기초자료 활용 가능
- 일반 국민의 보건, 정밀기기 관련산업 및 물류 등 다양한 산업에 영향을 주고 있어서 특정산업 또는 기술분야 등 부가가치 창출 분석보다 피해비용 절감이 적합함
- 미세먼지 관련 경제성 분석에서 조건부 가치측정법 등을 주로 활용하고 있으

며, 본사업의 특성과도 적합하여 조건부 가치측정법을 활용

- 설문조사서는 일반국민을 연령별, 지역별 등으로 구분하여 5년 동안 연1회 소득세 납부의사 조사



제3절. 시나리오 및 설문지 설계

□ 본 사업에 대한 조건부 시장의 상황 설정 및 제시

- 지불의사액 추정을 위한 설문지 설계에 앞서, 본 사업과 이에 대한 조건부 시장을 설정하였음
 - 응답자에게 해양 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 사업을 추진하기 위해서는 국가차원의 연구 지원이 필요함을 설명
 - 응답자에게 생소할 수 있는 해역 대기분진 플럭스에 대한 정의에 대해 설명하면서 본 사업의 필요성 및 시급성에 대해 설명하였음
 - 본 사업을 통하여 발생할 경제적, 환경적, 정책적 기대효과를 설명하면서, 응답자들이 추가적으로 지불하고자 하는 금액에 대해 질문
 - 본 사업의 총괄 기술로드맵을 제시하여 단계별 목표, 연차별 예산, 주요 결과물 등을 함께 제시하였음
 - ※ 2018~2025년까지 총 8년간 2단계에 걸쳐 사업 추진
 - ※ 단계별 목표 및 주요 결과물 제시
 - ※ 단계별 및 연차별 예산 제시
- CVM의 편의를 최소화하여 운용하기 위해서는 본 사업의 추진 전후의 상황을 명확하게 묘사해야 함
 - 대기분진에 대한 연구수행이 시급하나, 해양과 대기의 상호작용을 통한 오염물질 순환에 대한 연구는 미진한 상황임을 설명
 - 육상의 오염원에 의한 2차 오염 영향이 적은 해양에서의 연구의 중요성 및 필요성 설명
 - 본 사업을 시행하기 위해서는 많은 비용이 소요되며, 이 비용 중 일부는 각종 세금으로 충당될 수 있음을 명시
 - 신산업 및 고용 창출 등의 경제적 기대효과, 대기오염물질 유입량 불확실성 개선 및 지역 주민 노출 피해 최소화 등의 환경적 기대효과, 대외 정책 기본자료 제공 및 효율적인 저감대책 수립 등의 정책적 기대효과 제시
- 응답자들의 지불의사액 추정을 통해 정부와 관련 기업의 정책 및 계획 수립에 중요한 자료로 활용될 수 있음을 명시하여 본 설문조사의 목적을 설명

□ 가구별 납부하는 소득세를 지불수단으로 설정

- 조건부 시장을 설정함에 있어서, 응답자의 지불의사를 쉽게 표현하기 위해서는 명확한 지불수단(payment vehicle)을 제시하는 것이 중요함
 - 현실성 있는 지불수단이 되도록 조건부 시장을 설정하여 조건부 상황을 더욱 현실화시키고, 지불의사와 행동 간의 관계를 밀접하게 할 필요 있음
- (지불수단의 결정 기준)
 - 평가하고자 하는 재화와 의 관련성
 - 응답자의 결정에 대한 단순화 정도
 - 여러 편익(bias)들에 대한 제거 및 최소화 정도
- 본 연구에서는 가구별 연간 소득세를 지불수단으로 설정하였음
 - 해역 대기분진 플렉스 및 해양거동 규명 사업의 추진을 위한 재원확보 차원과, 응답자의 친숙성을 고려하여 설정
 - 소득세를 지불수단으로 설정한 것은 한국개발연구원(KDI) 예비타당성조사 일반지침에도 부합
- 그리고, 응답자의 소득은 제한되어 있으며 여러 용도로 지출되어야 한다는 사실을 설명하였음
 - 본 사업을 위한 지불의사액 납부로 인해 다른 재화 및 사업에 대한 지출을 줄여야 한다는 사실을 응답자에게 인식시키기 위함임
 - (응답자 설명 내용) “귀하의 가정의 소득은 제한되어 있으며, 여러 용도로 지출되어야 한다는 사실을 고려하신 후, 질문에 응답해 주시기 바랍니다”
- 지불원칙 및 지불기간은 가구당 연 1회, 5년간 납부하는 것으로 설정
- (지불의사액 질문)
 - “귀하의 가정에서는 우리나라 해역 대기분진 플렉스 및 해양거동 규명 연구 추진을 위해 귀하의 가정에서 납부하는 소득세에서 향후 5년간 한시적으로 매년 [제시금액]원을 추가로 납부하실 의향이 있으십니까?”

제4절. 지불의사 질문 방법

□ 이중경계 양분선택형 질문법(DBDC⁶⁾) 이용

- 현실시장에서 소비자들의 행동을 결정하는 유형, 국민투표에서 투표하는 유형 등과 유사한 양분선택형 질문법("예-아니오" 형태, "가(可)-부(不)" 형태 등)을 통해 지불의사를 유도하였음
 - 예를 들어, 지불하고자 하는 재화의 가격이 100원일 때, 소비자가 해당 재화를 사용함으로써 얻게 될 효용이 100원보다 크거나 같다면 해당 재화를 구매할 것이고("예"), 그렇지 않다면 구매하지 않음("아니오")을 이용
- 제시금액은 각 응답자에게 배정되며, 그 금액에 대한 지불의사를 직접적으로 질문하며, 응답자들은 "예"와 "아니오" 둘 중 하나의 응답만 가능함
 - 응답자는 본인의 지불의사액이 제시금액보다 높으면 "예"라고 대답하고, 제시금액보다 낮으면 "아니오"라고 응답하게 됨
 - "예"와 "아니오"로 얻어진 자료를 이용하여, 제시금액에 대해 지불의사가 있다고 응답한 응답자의 비율을 분석하여 평균 지불의사액을 추정하게 됨
- 양분선택형 질문법에는 단일경계, 이중경계 등의 방식이 있으며, 본 연구에서는 이중경계형 양분선택형 질문법을 이용하였음
 - 단일경계 방식은 제시금액에 대한 지불의사를 단 1회에 걸쳐 질문
 - 이중경계 방식은 제시금액에 대해 "예"라고 응답할 경우 2배의 금액을, "아니오"라고 응답할 경우 1/2배의 금액을 추가적으로 질문
 - 예비타당성조사 일반지침에서는 이중경계 방식을 사용하더라도 첫 번째 질문에 대한 응답결과만 활용해 추정하는 것을 제안하고 있음
 - ※ 이중경계 모형이 효율성은 높으나 편의가 클 수 있기 때문
- 설문조사 전문 업체와의 피드백을 통해 응답자들이 쉽고 명료하게 이해할 수 있도록 압축된 형태의 설문조사지를 설계하였음

6) Double Bounded Dichotomous Choice

제5절. 제시금액 및 표본 설계

□ 제시금액 설계

- 제시금액은 최종적으로 얻고자 하는 지불의사액에 중요한 영향을 미치므로, 세심한 주의를 기울여 결정할 필요가 있음
- 100명을 대상으로 사전 웹 설문조사를 수행하여 지불의사액 범위를 구한 후, 이를 바탕으로 10개의 제시금액을 결정하였음
 - 200원, 400원, 600원, 800원, 1,000원, 1,200원, 1,400원, 1,600원, 1,800원, 2,000원 중 1개를 응답자에게 무작위로 배정하였음
 - 주어진 제시금액을 지불할 의사가 있다고 응답할 경우 제시금액의 2배의 금액을, 없다고 응답할 경우 1/2배의 금액을 지불할 의사가 있는지 추가적으로 질문하였음

□ 표본 설계

- 실제 소득세를 납부하고 있는 응답자의 의견에 대한 정보를 도출하기 위해, 조사대상은 만 20세 이상 69세 이하의 세대주 및 배우자로 한정하였음
- 설문조사 대상지역은 전국으로, 표본의 대표성을 확보하고 있음
- 각 지역의 전체 인구를 대상으로 임의표본을 도출하기 위하여, 각 지역 내의 연령대 비율을 고려하여 각 비율에 맞게 표본 수를 할당하였음
 - 성별, 연령대, 거주지역에 따른 층화추출
- 응답자 전략적 행위를 방지하기 위하여, 현재 해양 환경, 해양생물 및 생태계 등에 관련된 연구를 하고 있는지 사전에 질문하여, 해당 연구를 수행하고 있지 않는 응답자만 대상으로 조사를 진행하였음
- 설문은 개인이 아닌 가구 단위로 진행하였으므로, 총 1,000가구의 설문 응답 결과를 확보하였음

제4장. 지불의사액 추정 방법론

제1절. 효용격차모형(Utility Difference Model)

□ Hanemann(1984)의 효용격차모형에 기반하여 CVM 수행

- 먼저, 제시된 금액에 대한 지불의사를 질문하여, 이에 대한 응답결과를 모형화 함
 - “예” 또는 “아니오”의 응답을 모형화한 후, 최우추정법을 통해 관련 모수를 추정하여 분포의 성격과 평균값 정의를 이용하여 평균 WTP를 추정
- 응답자가 자신의 효용함수를 정확하게 알고, 소득(M), 사회경제학적 특성(S)에 근거하여 비시장재화의 상태(j)에 대해 느끼는 효용(Utility)은 다음과 같이 간접효용함수 u 로 나타낼 수 있음

$$u = u(j, M; S), \quad j = 0, 1 \quad (1)$$

- 이때, 응답자가 해당 재화의 상태 변화를 선택/거부 하는 데에 있어서 관측되지 않는 부분이 존재하므로, 간접효용함수는 확정적인 부분과 확률적인 부분으로 구성될 수 있음

$$u(j, M; S) = v(j, M; S) + \epsilon_j \quad (2)$$

- 식(2)의 확률적인 부분 ϵ_j 는 j 에 상관없이 동일한 분포를 갖는(IID⁷⁾) 변수이므로, 평균은 0임
- 응답자가 주어진 제시금액(A)에 대한 지불의사를 표출하기 위해 “예”라고 대답함으로써 효용을 최대화하게 되며, 이 때의 간접효용함수는 다음과 같음

$$v(1, M - A; S) + \epsilon_1 \geq v(0, M; S) + \epsilon_0 \quad (3)$$

- 식(3)을 재배치하면 다음과 같음

$$\Delta v \equiv v(1, M - A; S) - v(0, M; S) \geq \epsilon_0 - \epsilon_1 \quad (4)$$

- 식(4)에서 $\epsilon_0 - \epsilon_1$ 를 η 로 놓으면, 응답자가 제시금액에 대해 “예”라고 대답할

7) Independently and Identically Distributed

확률은 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$\Pr\{\text{“예”}\} = \Pr\{\Delta v(A) \geq \eta\} = F_\eta[\Delta v(A)] \quad (5)$$

- $F_\eta(\cdot)$ 는 η 의 누적분포함수(cumulative distribution function, cdf)를 의미

- 제시금액보다 크거나 같은 WTP를 가지는 응답자(앞으로 C로 표기)의 cdf는 $G_C(A)$ 로 나타낼 수 있으며, 이들이 “예”라고 응답할 확률은 다음과 같음

$$\Pr\{\text{“예”}\} = \Pr\{C \geq A\} \equiv 1 - G_C(A) \quad (6)$$

- $G(\cdot)$ 는 C의 누적분포함수를 의미함

- 따라서, 식(5)와 식(6)을 통해 다음의 관계식을 도출할 수 있음

$$F_\eta[\Delta v(A)] \equiv 1 - G_C(A) \quad (7)$$

- 단일경계 모형을 예로 들면, 제시금액에 따른 응답 종류는 2가지로 나타낼 수 있으며, i번째 응답자에 대한 응답결과는 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$I^Y = 1(\text{i번째 응답자의 응답이 “예”})$$

$$I^N = 1(\text{i번째 응답자의 응답이 “아니오”}) \quad (8)$$

- 다음으로, 효용 극대화를 추구하는 N명의 응답자들에 대한 로그우도함수를 다음과 같이 구성할 수 있음

$$\ln(L) = \sum_{i=1}^N \{I_i^Y \ln [1 - G_C(A)] + I_i^N \ln G_C(A)\} \quad (9)$$

- 응답자들의 WTP는 로지스틱 cdf를 따르는 것으로 가정하면 $G_C(A)$ 는 다음과 같은 함수 형태로 나타낼 수 있음

$$G_C(A) = [1 + \exp(a - bA)]^{-1} \quad (10)$$

- 또한, 평균 WTP(mWTP)는 다음과 같이 계산할 수 있음

$$mWTP = \int_0^\infty [1 - G_C(A)] dA - \int_{-\infty}^0 G_C(A) dA \equiv a/b \quad (11)$$

제2절. 0의 지불의사 처리

□ 음(-)또는 0의 지불의사 추정 관련 문제의 처리방식 결정

- 지불의사가 0인 지불거부자들이 분석에 반영되었을 때 발생할 수 있는 문제를 처리하기 위한 방법론은 여러 가지가 있음
- (Kristrom(1997)에서 제안한 스파이크 모형)
 - 스파이크 모형은 모형의 우도함수를 직접 극대화하도록 추정 파라미터를 구하여 분석
 - 지불거부율이 높을 경우에는 중앙값 추정치가 0이 되어 공공사업평가에 반영하기 어려운 문제가 발생할 수 있음
- (Haab and McConnell(2002)에서 제안한 지불거부자 제외 모형)
 - 지불의사가 0이라고 밝힌 응답자들의 응답 결과는 제외하고 지불의사함수를 추정하는 방법론을 제안
 - 어떤 형태의 지불의사함수도 회귀분석을 통해 간단히 추정할 수 있음
 - 다만, 이때 가구당 평균지불의사 계산 시 모형에서 추정된 지불의사액에 (1-지불거부율)을 곱해주어야 함
- (Turnbull 추정법)
 - 일종의 비모수적 추정법으로, 모형의 특성상 음(-)의 추정치가 발생하는 문제를 해결할 수 있음
 - 어떤 형태의 지불의사함수도 임의로 가정하지 않아도 됨
 - 최근 비모수적 추정법이 개인 특성 변수를 반영할 수 있도록 개선되고 있는 바, 앞으로 그 유용성이 크게 증가할 것임을 지적인 예가 있음
- 본 연구에서는 KDI 예비타당성조사 지침에 따라 Haab and McConnell(2002)의 방법론을 적용하여 0의 지불의사를 처리하였음
 - 예비타당성조사에 반영하기에 적합하다고 판단하였으며, 지수형 지불의사함수 형태를 감안

제5장. 편익 추정 결과

제1절. 응답 결과

□ 지역, 성별, 연령대별 층화 추출하여 1,000명 응답 표본을 확보

<표 5-1> 응답자 지역, 성별, 연령대별 분포 결과

지역	성별	연령					합계
		20~29	30~39	40~49	50~59	60~69	
서울특별시	남	21	23	24	22	9	99
	여	21	23	24	23	10	101
부산광역시	남	7	7	8	8	4	34
	여	6	7	8	9	4	34
대구광역시	남	5	5	6	6	2	24
	여	4	5	6	6	2	23
인천광역시	남	6	7	7	7	3	30
	여	6	6	7	7	3	29
광주광역시	남	3	3	4	3	1	14
	여	3	3	4	3	1	14
대전광역시	남	3	3	4	3	1	14
	여	3	3	4	3	1	14
울산광역시	남	3	3	3	3	1	13
	여	2	2	3	3	1	11
경기도	남	26	29	34	31	10	130
	여	24	27	33	29	10	123
강원도	남	3	3	4	4	2	16
	여	2	3	3	4	2	14
충청북도	남	3	3	4	4	2	16
	여	3	3	4	4	2	16
충청남도 (세종포함)	남	4	5	5	5	2	21
	여	3	4	5	5	2	19
전라북도	남	3	3	4	4	2	16
	여	3	3	4	4	2	16
전라남도	남	3	3	4	5	2	17
	여	3	3	4	4	2	16
경상북도	남	5	5	6	7	3	26
	여	4	5	6	7	3	25
경상남도	남	6	7	8	8	3	32
	여	5	6	8	8	3	30
제주도	남	1	1	2	2	1	7
	여	1	1	2	1	1	6
합계	남	102	110	127	122	48	509
	여	93	104	125	120	49	491

□ 지불의사액 질문에 대한 응답 결과

- 본 연구는 본 사업의 편익을 추정하기 위하여 이중경계 양분선택형 모형을 적용하였으며, 4가지 응답 경우의 수 존재하게 됨
- (응답 경우의 수) “예-예”, “예-아니오”, “아니오-예”, “아니오-아니오”
 - 응답자의 44.9%가 제시금액의 2배 금액 이상의 WTP를 나타냄
 - 응답자의 28.2%가 제시금액의 1배~2배 금액 사이의 WTP를 나타냄
 - 응답자의 6.9%가 제시금액의 1/2배~1배 금액 사이의 WTP를 나타냄
 - 응답자의 20.0%가 제시금액의 1/2배 미만의 WTP를 나타냄
- 응답자의 73.1%가 처음 주어진 제시금액에 대해 지불할 의사가 있다고 응답하였음 (“예-예”, “예-아니오”)
 - 이는 기존 유사 연구들의 결과와 비교하였을 때, 상당히 높은 비중임
 - 제시금액이 매우 낮았거나, 해당 사업의 시급성 및 필요성에 대해 응답자들이 크게 체감하고 있는 경우, 지불 동의율이 일반적으로 높게 도출됨
 - 본 조사에 앞서 파일럿 조사와 유사 사례 조사를 통해 제시금액을 설정하였으나, 분석 결과(편익)가 과소 추정되었을 가능성을 배제할 수는 없음

<표 5-2> WTP 응답 분포

제시금액 (원)	예-예	예-아니오	아니오-예	아니오-아니오	계
200	62	16	3	19	100
400	63	18	5	14	100
600	55	27	6	12	100
800	36	35	6	23	100
1,000	46	27	6	21	100
1,200	40	34	5	21	100
1,400	40	27	8	25	100
1,600	41	33	11	15	100
1,800	38	27	11	24	100
2,000	28	38	8	26	100
계	449	282	69	200	1,000

□ 지불거부 응답 처리

- 본 사업은 일반 국민들에게는 매우 생소할 수 있으며, 본 사업의 시행을 위해 본인의 소비세에서 매년 5년 간 추가 금액을 지출해야 한다는 것에 대해 거절의 의사를 가지고 있는 사람들을 분석에 반영할 필요가 있음
 - 따라서, 지불거부 응답을 처리하기 위해 설문지를 설계할 필요가 있음
- 본 연구의 설문에서는 지불거부 응답자를 판별하기 위해 추가 질문을 수행
 - 제시금액의 1/2배 금액에 대한 지불의사도 없다고 응답한 응답자들을 대상으로, 지불의사액이 없는지, 1원~제시금액의 1/2배 금액 사이인지 질문
 - 추가 질문을 통하여, 지불의사가 없다고 응답한 자료는 0의 WTP와 0 초과 제시금액의 1/배 금액 미만의 WTP를 가진 자료로 분류할 수 있음
- 지불거부 응답을 판별한 결과는 자료와의 일관성 확보를 위하여 편익 추정을 위한 분석에 명백하게 반영해야 함
- 본 사업의 추진을 위한 지불의사가 전혀 없는(0의 지불의사액) 응답자 수는 137명으로, 총 응답자 수(1,000명)의 13.7%를 차지하였음

<표 5-3> 지불거부 응답 분포

제시금액 (원)	아니오-아니오-예 (1원~제시금액의 1/2배)		아니오-아니오-아니오 (지불 거부)		계
	응답자 수	비율	응답자 수	비율	
200	6	31.6%	13	68.4%	19
400	3	21.4%	11	78.6%	14
600	2	16.7%	10	83.3%	12
800	12	52.2%	11	47.8%	23
1,000	4	19.0%	17	81.0%	21
1,200	5	23.8%	16	76.2%	21
1,400	9	36.0%	16	64.0%	25
1,600	7	46.7%	8	53.3%	15
1,800	9	37.5%	15	62.5%	24
2,000	6	23.1%	20	76.9%	26
계	63		137		200

□ **지불거부 사유**

- 기존 연구들의 지불거부율은 일반적으로 50% 내외이며, 지불거부율이 70% 이상인 연구들도 많이 존재함(권영주 외, 2014; Lee and Cho, 2018)
- 본 연구의 지불거부율은 13.7%로, 기존 연구들에 비해 상대적으로 낮은 편이지만, 분석 결과 해석 시 지불거부 사유에 대한 파악이 필요함
- 0의 지불의사액 응답자들을 대상으로 지불 거부에 대한 사유를 추가적으로 질문하였음
- 지불거부 사유 중, “현재 납부하고 있는 소득세 내에서 충당되어야 한다고 생각”한다고 응답한 비중이 35.0%로 가장 높았음
 - 이는 현재 소득세를 과다하게 납부하고 있다고 생각하고 있거나, 제시금액이 과다하게 높게 제시된 경우에 해당함
- 또한, “우선순위를 둘 만큼 중요한 사업이라고 생각하지 않아서”, “해당 내용은 내 관심의 대상이 아니어서”라고 응답한 비중이 각각 2.2%, 2.9%로 가장 낮았음
 - 따라서, 지불거부 응답자들도 본 사업의 중요성 및 필요성에 대해서는 부정적으로 생각하지 않는다고 판단할 수 있음

<표 5-4> 지불거부 사유

지불거부 사유		응답자 수	비율
1	추가로 납부할만한 경제적인 여유가 없어서	18	13.1%
2	현재 납부하고 있는 소득세 내에서 충당되어야 한다고 생각	48	35.0%
3	판단할 만한 충분한 정보가 주어져 있지 않아서	10	7.3%
4	우선순위를 둘 만큼 중요한 사업이라고 생각하지 않아서	3	2.2%
5	추가적인 세금이 명시된 연구를 위해 쓰이지 않을 것이라 생각	25	18.2%
6	제시된 정부의 사업계획을 믿을 수 없어서	22	16.1%
7	해당 내용은 내 관심의 대상이 아니어서	4	2.9%
8	기타	7	5.1%
계		137	

제2절. WTP 추정 결과

□ 이중경계 양분선택형 모형을 이용하여 평균 WTP 추정

- KDI 예비타당성조사 지침에서는 분석자의 주관을 최대한 제거하기 위하여, 단일경계 양분선택형 모형을 사용하여 분석하도록 제안하고 있음
- 그러나, 본 조사의 응답 결과 전체 응답자의 86.3%가 지불의사액이 0보다 크게 나타났으므로, 첫 번째 제시금액만으로 분석을 수행하게 될 시, 제시금액 설정에 따른 과소추정 또는 과대추정의 위험이 발생하기 쉬움
- 따라서 본 연구에서는 이중경계 양분선택형 모형을 이용하여 평균 WTP를 추정하였으며, 지불거부 응답자 역시 분석에 반영하여 분석자 주관과 편의를 최소화하였음
- 지불거부 응답은 Haab and Mcconnell(2002)에서 제시된 방법론을 이용하여 처리하였음
 - 추정된 가구당 평균 지불의사액에 (1-지불거부율)를 곱하여 반영
 - ※ WTP 추정 예시
 - 본조사: 1,000가구, 지불의향자: 700가구, 지불거부자: 300가구
 - 지불의향자의 가구당 평균 WTP가 2,000원으로 추정
 - 가구당 WTP= 2,000 * (1-(300/1,000)) = 1,400원
- 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE) 적용 시 전역적 최대값(global maximum value) 을 찾는 데 용이하도록 제시금액의 단위를 1,000원으로 하여 규모 조정
- 응답자 특성에 따른 응답 차이를 확인하기 위하여 성별, 연령, 학력, 소득, 지출 등을 공변량(covariates)으로 정하여 분석에 반영하였음
- 예비타당성 조사지침에서는 경제성 분석을 수행할 때, 공변량을 제외한 분석 결과를 이용하여 분석할 것을 제안하고 있음
 - 따라서, 본 연구에서 지불의사액 추정 결과에 대한 해석 및 시사점은 공변량을 포함한 분석 결과를 이용하여 수행하되, 경제성 분석은 공변량을 제외한 분석 결과를 바탕으로 수행하였음

□ 지불의사액 추정에 사용된 변수

<표 5-5> 지불의사액 추정에 사용된 변수

구분	변수명	정의	자료형식	데이터 형식
인구통계 변수	β	상수항	-	-
	Sex	성별	더미변수	1. 남자 2. 여자
	Age	연령	-	만 나이 (정수)
	Education	학력	-	1. 초졸 이하 ~ 3. 고졸 ~ 5. 대재/대졸 이상
	Income	월 가구소득	10단계 구분	1. 99만원 이하 ~ 5. 250~299만원 이하 ~ 10. 1,000만원 이상
	Expense	월 가구지출	10단계 구분	1. 49만원 이하 ~ 5. 250~299만원 이하 ~ 10. 500만원 이상
본 사업에 대한 수용도	Knowledge	사전지식	5점 척도	1. 전혀 몰랐다 ~ 5. 매우 잘 알고 있었다
	Ecn1	경제적 기대효과1 (사회적 비용 책정)	5점 척도	1. 전혀 효과적이지 않다 ~ 5. 매우 효과적이다
	Ecn2	경제적 기대효과2 (신산업 창출로 인한 파급효과)	5점 척도	
	Env1	환경적 기대효과1 (오염물질 유입량 불확실성 개선)	5점 척도	
	Env2	환경적 기대효과2 (예보 및 측정을 통한 피해 최소화)	5점 척도	
	Plc1	정책적 기대효과1 (대외 외교정책 기본자료 제공)	5점 척도	
	Plc2	정책적 기대효과2 (대기오염 저감대책 수립)	5점 척도	

□ 계수 추정 결과

- Wald 통계량을 통해, 추정된 방정식들이 모두 통계적으로 유의하게 0이 아닌 값을 나타냄을 확인
 - 응답자들이 CVM 방식으로 구성된 본 사업에 대한 조건부 시장을 받아들였음을 확인할 수 있음
 - ※ Wald 통계량에 대한 귀무가설: 모든 추정계수의 값은 0이다.
- 분석에 사용된 변수 중, 인구통계변수는 통계적으로 유의하지 않는 것으로 분석되었음
- 본 사업에 대한 수용도 중, 경제적 기대효과, 환경적 기대효과1, 정책적 기대효과2는 95% 유의수준에서 통계적으로 유의미하게 변화되고 있음
 - 제시한 기대효과들이 효과적일 것이라고 응답한 응답자일수록 지불의사액이 큰 것으로 나타났음
 - 기대효과 중 “경제적 기대효과1: 대기분진 물질 저감에 따르는 사회적 비용 책정”에 대한 지불의사액 차이가 가장 큰 것으로 나타났음

<표 5-6> 계수 추정 결과

구분	변수명	계수 추정치	t-통계량
	β	-4.1851	-5.29***
인구 통계 변수	Sex	0.2432	0.18
	Age	-0.0049	-0.86
	Education	0.1799	1.47
	Income	0.0496	1.01
	Expense	-0.0469	-1.19
본 사업에 대한 수용도	Knowledge	-0.0933	-1.06
	Ecn1	0.6319	5.51***
	Ecn2	0.3807	3.82***
	Env1	0.3359	3.00***
	Env2	0.1387	1.21
	Plc1	0.2618	2.53**
	Plc2	-0.0167	-0.21
	σ	1.7607	24.03***
Wald 통계량		207.77	p-value: 0.000

□ 지불의사액 추정 결과

- 추정한 계수들을 바탕으로 표본의 평균 지불의사액을 추정하였음
- 추정 결과, 해역 대기분진 플릭스 및 해양거동 규명 사업의 추진을 위한 연간 지불의사액의 조건부 평균값은 2,115.6원
 - ※ 분석 수행 시, 제시금액을 천원 단위로 조정하였음
- 본 조사의 지불거부율(13.7%)을 반영하면, 평균 지불의사액은 1825.8원/년으로 도출되었음
 - 95% 신뢰구간을 반영하면 연간 1,708.7원에서 1,942.8원으로 나타났음

<표 5-7> 지불의사액 추정 결과

WTP	계수	t-통계량	95% 신뢰구간	
지불거부율 반영 전	2.1156	30.58***	1.9800	2.2512
지불거부율 반영	1.8258	-	1.7087	1.9428
공변량 제외 분석결과	1.8182		1.6984	1.9579

- 경제성 분석의 편익 자료로 CVM 분석 결과를 활용하기 위해서는 공변량들을 제외한 분석 결과를 이용해야 함
 - 따라서, 인구통계학적 특성과 사업에 대한 수용도 등의 공변량을 제외하고 지불의사액을 추정하였음
- 공변량 제외 분석 결과, 평균 지불의사액은 1818.2원/년으로 도출되었음
 - 95% 신뢰구간을 반영하면 연간 1,698.4원에서 1,957.9원으로 나타났음
 - 해당 분석결과를 본 사업의 편익으로 간주하여 경제성 분석을 수행하였음

□ **공변량 제외 지불의사액의 확장**

- 추정된 평균 지불의사액을 확장하여 해당 지역 전체의 WTP 및 편익을 추정하는 것이 CVM 연구를 수행하는 중요한 목적 중의 하나임
- 본 연구는 본 사업의 국가적 편익 추정을 위하여, 1,000가구의 전국 표본을 통해 도출한 지불의사액을 모집단 전체 단위로 확장하는 작업을 수행
- 앞서 설명하였듯이, 본 연구는 지역, 성별, 연령 별 층화추출을 통해 표본의 대표성을 확보하였으며, 설문대상자도 가구 내 의사결정권이 있다고 판단할 수 있는 만 20대~60대 이하의 세대주 및 배우자만으로 한정하였음
- 따라서, 가상의 시장을 구성했다 하더라도 대표성 있는 정보를 도출했다고 할 수 있으며, 표본의 정보를 모집단으로 확장하는 데 무리가 없음
- 통계청에서 2018년 2월 기준 가장 최근에 발표한 2016년 가구 수⁸⁾는 16,697,858명
 - 이를 활용하여, 해역 대기분진 플릭스 및 해양거동 규명 사업으로 인한 국가적 편익을 약 30,360백만원으로 추정할 수 있음
 - 아울러, 본 조사에서는 향후 5년간 매년 1회 소득세에서 추가적으로 납부하는 것으로 지불의사를 질문하였으며, 예타지침에 따라 사회적 할인율 5.5%를 적용하여 총 편익의 현재가치를 **121,104백만원**으로 도출하였음
- 예타지침에서는 소비자물가지수를 이용하여 설문조사 수행시점과 분석 수행시점 간의 시차를 보정할 것을 제안하고 있으나, 본 연구의 설문조사와 분석의 수행시점은 각각 2018년 1월과 2월로 거의 일치하여 시차보정은 생략

<표 5-8> 지불의사액 추정 결과의 확장

2016년 가구 수 (명)	가구당 연간 지불의사액 (원/년)	연간 편익 (백만원/년)
16,697,858	1,818.2	30,360

8) 본 조사의 응답자 표본의 대표성 유지를 위하여 만20대~60대 이하의 구성원이 존재하는 가구 수만 추계

제6장. 간접적 경제적 편익 도출

제1절. 본 사업과 관련된 산업의 범위 설정

□ 간접적 편익 도출을 위해 본 사업 관련 산업의 범위 설정

- 한국은행 산업연관표에서 분류하고 있는 161개의 소분류에 의거하여 본 사업과 관련된 산업의 범위를 설정하였음
- 해양생물자원이 활용될 수 있는 산업을 산업연관표의 소분류로부터 8개로 도출하여 연구대상의 범위를 설정하였음

<표 6-1> 소분류에 근거한 본 사업 관련 산업의 정의

부문	산업부문내용	부문	산업부문내용
007	수산물	106	폐기물처리
008	농림어업서비스	144	연구개발
014	수산가공품	148	기타 과학기술서비스
105	폐수처리	154	의료 및 보건

□ 본 사업의 외생화를 통해 산업부문 재분류

- 분석 시점인 2018년 2월 기준 가장 최근에 발표된 2016년도 산업연관표 상의 30부문 대분류를 기준으로 할 때, 해양생물자원 산업은 31번째 부문으로 재구성 할 수 있음
- 본 연구에서는 재구성된 산업연관표를 이용하여 생산유발효과, 부가가치 유발효과, 취업유발효과를 분석함
- 본 사업이 타 산업에 미치는 파급효과를 구하고, 간접적 경제적 편익을 도출
- 본 사업의 외생화를 통해 자신의 부문에 미치는 영향을 배제함으로써 다른 부문에 미치는 파급효과를 보다 정확히 분석할 수 있음
- 특정 관심대상 부문을 대상으로 한 연구를 위해 해당 부문을 별도의 부문으로 다루는 것은 산업연관분석에서 흔히 취하는 접근방식임 (한국은행, 1987)

<표 6-2> 재분류된 31부문 산업부문표

부문	산업부문내용	부문	산업부문내용	부문	산업부문내용
01	농림수산물	11	기계 및 장비	21	음식점 및 숙박서비스
02	광산품	12	전기 및 전자기기	22	정보통신 및 방송 서비스
03	음식료품	13	정밀기기	23	금융 및 보험 서비스
04	섬유 및 가죽제품	14	운송장비	24	부동산 및 임대
05	목재 및 종이, 인쇄	15	기타 제조업 제품 및 임가공	25	전문, 과학 및 기술 서비스
06	석탄 및 석유제품	16	전력, 가스 및 증기	26	사업지원서비스
07	화학제품	17	수도, 폐기물 및 재활용서비스	27	공공행정 및 국방
08	비금속광물제품	18	건설	28	교육서비스
09	1차 금속제품	19	도소매서비스	29	보건 및 사회복지서비스
10	금속제품	20	운송서비스	30	문화 및 기타 서비스
				31	해역 대기분진 사업

제2절. 산업연관분석 개요 및 방법론

1. 산업연관분석의 개요

- 산업연관분석을 통해 생산유발효과, 부가가치유발효과, 취업유발효과 분석
- 산업연관분석(Inter-industry Analysis)은 투입산출분석(Input-output Analysis)이라고도 일컬으며, 생산활동을 통하여 이루어지는 산업간의 상호연관관계를 수량적으로 파악하는 분석방법임
- 국가 경제하에서 각 산업은 재화 및 서비스를 구입하고, 생산한 상품을 다른 산업들에게 판매하는 과정을 통해 상호연관관계를 맺게 됨
- 산업연관표를 이용하여 이러한 상호연관관계를 수량적으로 분석함
 - 산업연관표는 1년동안 산업간 거래 관계를 일정한 원칙에 따라 행렬 형식으로 기록한 통계표이며, 우리나라의 경우 한국은행에서 발간
 - 산업연관분석은 거시적 분석이 미치지 못하는 산업과 산업간의 연관관계까지도 분석이 가능하여 세부적인 경제구조를 분석하는 데에 널리 사용되고 있음 (Wu & Chen, 1990; 유승훈, 2007)
- 본 사업과 관련된 산업을 중심으로 살펴보기 위해서는 해당 산업 부문의 외생화(exogenous specification)를 통한 산업연관분석이 필요함
 - 최종수요 중심의 통상적인 접근법으로는 본 사업 관련 산업 부문 변동시 자기 부문 외의 다른 부문들이 받는 영향을 고찰할 수 없음
 - 이에 따라 본 사업 관련 산업의 최종수요가 증가하면 산업의 산출물이 가장 크게 증가하는 것으로 도출되기 때문에, 논리적으로 문제가 발생
- 산업연관분석에서는 내생변수와 외생변수가 혼합되어 있는 경우, 외생적인 힘이 될 변수를 따로 빼내어 그 변수가 내생적인 경제부문에 미치는 영향을 살펴볼 수 있으며, 이러한 과정을 외생화라고 일컫음 (Miller & Blair, 2009)
 - 외생화를 통해 총수요가 아닌 특정 산업 부문의 산출물이 미치는 영향과 그 산출물이 다른 산업에 유발하는 효과를 명확히 파악할 수 있음

- 본 사업 관련 산업은 국민경제의 기초산업부문으로서 다른 산업 부문들의 산출물을 중간재로 수요하게 됨
 - 다시말해, 생산활동을 위해서 여러 산업 부문의 산출활동을 필요로 하며, 다른 산업 부문 생산활동에 직간접적인 영향을 미침
- 특히 본 사업의 투자는 다른 산업 부문에 미치는 파급효과가 클 수 있음
 - 이 파급효과는 생산유발효과, 부가가치 유발효과, 취업유발효과의 3개 관점에서 살펴볼 수 있음

2. 생산유발효과

□ 본 사업 관련 산업의 총 산출 및 투자로 인한 파급효과 도출

- 본 소절에서 생산유발효과란 본 사업 관련 산업에서의 생산이 1원 만큼 증가하였을 때, 본 사업 관련 산업 부문을 제외한 타 산업에서 생산이 몇 원 만큼 유발되는지를 일컫음
- 일반적인 수요유도형 모형에서 분석대상인 본 사업 부문 (이하 K부문)을 외생화한 행렬에 상첨자 'e'를 붙여 생산유발효과를 식으로 정리하면 다음과 같음⁹⁾
 - $$\Delta X^e = (I - A^e)^{-1} (A_K^e \Delta X_K)$$
 (1)
 - ΔX^e 는 분석대상인 본 사업 관련 산업 부문을 제외한 타 산업 부문의 산출량으로서 본 사업 관련 산업 부문의 산출에 영향을 받은 다른 산업 부문의 산출 증감량을 나타냄
 - $(I - A^e)^{-1}$ 는 투입계수행렬 A에서 본 사업 부문이 포함된 행과 열을 제외시켜 작성한 레온티에프(Leontief) 역행렬을 나타냄
 - A_K^e 는 투입계수행렬에서 본 사업 부문을 나타내는 열벡터 중에서 본 사업 부문 원소를 제외한 열벡터를 나타냄
 - ΔX_K 는 본 사업 부문의 산출액 변화량을 나타냄
- 식 (1)을 통해 본 사업 관련 산업 부문을 중심으로 한 생산유발효과를 도출할 수 있으며, 본 사업 부문의 산출이 경제 내 타 부문의 산출에 미치는 직

9) 자세한 유도과정은 Yoo & Yang (1999) 및 2014년 산업연관표 (2016) 등을 참고 바람

간접적인 효과를 살펴볼 수 있음

- 또한, 식 (1)을 통해 본 사업 부문의 총 산출 및 투자로 인한 파급효과들을 구할 수 있음
 - 본 사업 부문에 대한 투자는 그 자체로서의 산출효과에 그치는 것이 아니라 연관 효과를 통해 다른 산업 부문의 생산을 유발시켜 전체 산업의 생산을 촉진시키기 때문임

3. 부가가치 유발효과

□ 본 사업 부문의 산출액 증가에 따른 부가가치 유발효과 도출

- 최종수요 발생이 국내 생산을 유발하고, 생산활동에 의해서 부가가치가 창출되어 결과적으로 최종수요의 발생이 부가가치 창출을 유발하게 됨
- 부가가치 유발효과는 최종수요의 한 단위 변화가 부가가치 부문의 증감에 미치는 파급효과를 일컫음
- 본 사업 관련 산업 부문의 산출 증가가 다른 산업 부문에 미치는 부가가치 유발효과를 도출하기 위해, 최종수요의 변동이 없다는 가정 하에 본 사업 관련 산업 부문을 외생화하면 다음과 같은 식으로 유도됨

$$- \Delta W^e = \widehat{A}^{v^e} (I - A^e)^{-1} (A_K^e \Delta X_K) \quad (2)$$

- \widehat{A}^{v^e} 는 부가가치계수의 대각행렬에서 본 사업 부문의 행과 열을 제외시킨 행렬을 나타냄
- 식 (2)을 통해 본 사업 부문의 산출액 증가에 따른 부가가치 유발효과를 도출할 수 있음

4. 취업유발효과

□ 본 사업 부문에 대한 투입에 따른 취업 및 고용 유발효과 도출

- 최종수요로 인해 유발되는 생산은 다시 노동수요를 유발하므로, 최종수요와 노동수요 유발을 연결시킴으로써 취업유발효과를 구할 수 있음
- 이를 위해 취업계수와 생산유발계수를 기초로 취업유발계수를 도출함

- 취업계수(n_i)란 일정기간동안 생산활동에 투입된 노동량(N_i)을 총 산출액(X_i)으로 나눈 계수($n_i = N_i/X_i$)임
 - 생산활동의 한 단위 증가에 직접 소요된 노동량을 일컬음
- 여기서 본 사업 관련 산업 부문을 외생화하면 다음과 같은 식으로 표현됨
 - $\Delta N^e = \hat{n}^e (I - A^e)^{-1} (A_K \Delta X_K)$ (3)
 - ΔN^e 는 본 사업 관련 산업 부문을 제외한 각 산업 부문별 취업자수의 변동량을 나타냄
 - \hat{n}^e 는 취업계수의 대각행렬에서 본 사업 부문의 행과 열을 제외시킨 행렬을 나타냄

제3절. 본 사업의 간접적 경제적 편익 도출

1. 분석 결과

□ 산업연관표의 투입산출표를 이용하여 산업연관분석 수행

- 본 연구에서 사용한 자료는 한국은행에서 2016년에 발간한 『2014년 산업연관표』임
- 해양생물자원 산업의 생산유발효과, 부가가치 유발효과, 취업유발효과를 추정 한 결과는 다음과 같음

<표 6-3> 본 사업의 경제적 파급효과 분석 결과

부문	부문명	생산유발효과 (단위 : 원)	순위	부가가치 유발효과 (단위 : 원)	순위	취업유발효과 (단위 : 명/억원)	순위
1	농림수산물	0.0175	24	0.0101	14	0.0493	24
2	광산품	0.1140	3	0.0643	1	0.0358	3
3	음식료품	0.0286	13	0.0046	24	0.0082	13
4	섬유 및 가죽제품	0.0204	22	0.0048	23	0.0090	22
5	목재 및 종이, 인쇄	0.0254	16	0.0069	20	0.0123	16
6	석탄 및 석유제품	0.0921	4	0.0060	21	0.0008	4
7	화학제품	0.2145	1	0.0424	3	0.0317	1
8	비금속광물제품	0.0085	25	0.0024	27	0.0021	25
9	1차 금속제품	0.1316	2	0.0181	7	0.0158	2
10	금속제품	0.0246	18	0.0075	18	0.0064	18
11	기계 및 장비	0.0283	14	0.0080	17	0.0096	14
12	전기 및 전자기기	0.0612	8	0.0167	9	0.0099	8
13	정밀기기	0.0261	15	0.0075	18	0.0094	15
14	운송장비	0.0252	17	0.0056	22	0.0051	17
15	기타 제조업 제품 및 임가공	0.0232	19	0.0098	16	0.0165	19
16	전력 가스 및 증기	0.0639	7	0.0171	8	0.0049	7

17	수도 폐기물 및 재활용 서비스	0.0085	25	0.0040	25	0.0034	25
18	건설	0.0046	28	0.0016	28	0.0037	28
19	도소매서비스	0.0898	5	0.0455	2	0.1259	5
20	운송서비스	0.0655	6	0.0234	6	0.0711	6
21	음식점 및 숙박 서비스	0.0368	12	0.0139	12	0.0626	12
22	정보통신 및 방송 서비스	0.0378	11	0.0165	10	0.0209	11
23	금융 및 보험 서비스	0.0507	9	0.0269	5	0.0273	9
24	부동산 및 임대	0.0389	10	0.0290	4	0.0142	10
25	전문 과학 및 기술 서비스	0.0207	21	0.0110	13	0.0300	21
26	사업지원서비스	0.0225	20	0.0151	11	0.0543	20
27	공공행정 및 국방	0.0052	27	0.0039	26	0.0041	27
28	교육서비스	0.0005	29	0.0004	29	0.0008	29
29	보건 및 사회복지 서비스	0.0000	30	0.0000	30	0.0000	30
30	문화 및 기타 서비스	0.0202	23	0.0100	15	0.0383	23
계		1.3066		0.4329		0.6834	

□ 본 사업 관련 산업의 1원 증가 당 타 부문에서 1.3066원의 생산을 유발

- 생산유발효과에 대한 분석 결과, 본 사업 관련 사업에서의 1원 생산 증가는 타 산업 부문에서 1.3066원의 생산을 유발시키는 것으로 분석되었음
- 산업 부문별 분석결과를 보면, 본 사업은 [7. 화학제품]의 생산유발효과가 가장 크며, [9. 1차 금속제품]가 두 번째로 큼
 - 이는 본 사업의 주요 요소 기술인 해양 독성 평가 기술, 유전자 정보 분석 기술, 미세먼지 생성기작 분석 기술 등에 따른 유발효과일 것으로 판단됨
- 반면, 본 사업과 관련성이 적은 [28. 교육서비스] 및 [29. 보건 및 사회복지 서비스] 부문의 생산유발효과가 가장 낮은 것으로 도출되었음

□ 본 사업 관련 산업 1원 증가 당 타 부문에서 0.4329원의 부가가치 유발

- 부가가치유발효과에 대한 분석 결과, 본 사업 관련 사업에서의 1원 생산 증가는 타 산업 부문에서 0.4329원의 부가가치를 유발시키는 것으로 분석됨
- 산업 부문별 분석결과를 보면, 본 사업은 [2. 광산품]의 부가가치유발효과가 가장 크며, [19. 도소매서비스]가 두 번째로 큰 것으로 나타남
 - [2. 광산품]의 경우, 광물자원은 해역 대기분진 플릭스 연구와 관련된 산업의 중간재로 많이 투입되기 때문에, 많은 부가가치를 유발하는 것으로 판단됨
 - [19. 도소매서비스]의 경우, 본 사업 수행 및 결과에 따른 시료, 생물 등의 운송 및 유통 등에 직접적으로 관련되기 때문에 이에 대한 부가가치가 많이 유발되는 것으로 판단됨
- 반면, 본 사업과 관련성이 적은 [28. 교육서비스] 및 [29. 보건 및 사회복지서비스] 부문의 생산유발효과가 가장 낮은 것으로 도출되었음

□ 본 사업 관련 산업에서의 1억 원 증가 당 타 부문에서 0.6834명의 취업 유발

- 취업유발효과에 대한 분석 결과, 본 사업 관련 사업에서의 1억 원 생산 증가는 타 산업 부문에서 0.6834명의 취업을 유발시키는 것으로 분석되었음
- 산업 부문별 분석결과를 보면, 본 사업은 [7. 화학제품]의 취업유발효과가 가장 크며, [9. 1차 금속제품]이 두 번째로 큰 것으로 나타남
 - 이는 생산유발효과에 대한 결과와 동일하며, 본 사업의 주요 요소 기술인 해양 독성 평가 기술, 유전자 정보 분석 기술, 미세먼지 생성기작 분석 기술 등에 따른 유발효과일 것으로 판단됨
- 반면, 본 사업과 관련성이 적은 [28. 교육서비스] 및 [29. 보건 및 사회복지서비스] 부문의 생산유발효과가 가장 낮은 것으로 도출되었음

2. 분석 결과의 확장

□ 단위 당 파급효과 결과를 이용하여 본 사업의 총 파급효과 도출

- 직접적 경제적 편익을 도출하기 위해 조건부 가치측정법을 이용한 결과, 5년간 총 지불의사액은 1,211억원으로 도출되었음
 - 지불수단은 5년간 연간 소득세에서 납부하는 것으로 설정
- 편익 추정치를 이용하여 본 사업으로 인한 경제적 파급효과를 확장하였음
 - 생산유발효과는 직접적 효과 1,211억원과 간접적 효과 1,582억원을 합하여 총 2,793억원으로 도출됨
 - 부가가치 유발효과는 직접적 효과 639억원과 간접적 효과 524억원을 합하여 총 1,163억원으로 도출됨
 - 취업유발효과는 직접적 효과 1,041명과 간접적 효과 828명을 합하여 총 1,870명으로 도출됨

	직접적 효과		간접적 효과		총 효과
생산 유발효과	1원당 1.0000원 총 1,211억원	+	1원당 1.3066원 총 1,582억원	=	1원당 2.3066원 총 2,793억원
	↓		↓		↓
부가가치 유발효과	1원당 0.5273원 총 639억원	+	1원당 0.4329원 총 524억원	=	1원당 0.9602원 총 1,163억원
	↓		↓		↓
취업 유발효과	1억원당 0.8594명 총 1,041명	+	1억원당 0.6834명 총 828명	=	1억원당 1.5428명 총 1,870명
	↓		↓		↓

[그림 4] 본 사업의 경제적 파급효과

제7장. 본 사업의 경제성 분석

제1절. 경제성 분석의 개요

□ 경제성 분석을 통해 사업에 투입되는 재원의 투자 적합성 판단

- 경제성 분석은 공공투자 사업의 시행으로 인한 경제적 효율성과 타당성을 사업 미 시행 경우와 비교하여 분석함
- 해당 사업에 투입되는 정부 및 민간 재원의 투자 적합성을 판단하는 데 활용
- 경제성 분석 방법에는 일반적으로 비용-편익분석(Cost-benefit analysis), 비용-효과분석(Cost-effectiveness analysis), 대차대조표 접근법(balance sheet approach) 등을 활용함
 - 본 연구에서는 국가 연구개발 사업의 경제성 분석 및 예비타당성조사에 일반적으로 사용되는 비용-편익분석을 사용하였음
- 비용-편익분석을 위해서는 본 사업의 수행에 필요한 비용과 해당 사업으로 인하여 예산되는 경제적 편익 자료가 필요함
 - 본 연구에서는 한국해양과학기술원에서 본 사업 추진을 위해 계획한 비용(총 150억 원)을 적절하다고 가정하고, 본 사업 시행으로 인해 예상되는 편익을 추정하여 경제성 분석을 수행하였음

<표 7-1> 본 사업의 연도별 연구비 예산

	1단계			2단계				
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
목표	연구기반 구축, 기초 연구자료 확보 및 월경성 대기분진 추적			월경성 대기분진 정량화, 미세먼지 해양기여도, 물질순환, 해양생물/생태계 영향 종합 평가				
예산 (억원)	150							
	60			90				
	20	20	20	20	20	15	15	20

□ NPV, B/C 비율, IRR 산출을 통해 경제적 타당성 분석

- 일반적으로 경제성 분석을 위해 사용되는 정량적 분석기법은 순현재가치(Net Present Value, NPV), 비용/편익 비율(B/C ratio), 내부수익률(Internal Rate of Return, IRR) 등이 있음
- 순현재가치(NPV): 사업을 통해 기대되는 경제적 편익의 현재가치에서 투입된 비용의 현재가치를 차감한 값
 - 일반적으로 NPV 값이 0보다 크거나 같을 경우 경제적 타당성이 있다고 판단함
 - 투자의 순 가치를 직접적으로 표시하며, 장래 발생 편익의 현재가치를 제시하므로, 대안 선택 시 명확한 기준을 제시한다는 장점 존재
 - 여러 대안들에 대해 이들의 우선순위를 결정하는 데에 활용하기에는 부적절하며, 이는 과제 규모가 클수록 NPV 값이 크게 나타나며 투자의 효율성이 드러나지 않기 때문임
- 비용/편익 비율(B/C ratio): 현 시점으로 할인된 총 편익과 총 비용의 비율로, 일반적으로 B/C ratio가 1보다 크거나 같을 때 경제적 타당성이 있다고 판단함
 - B/C ratio를 이용할 경우, 사업 규모의 차이를 고려할 수 있으며 투자 규모와 편익의 비율로 간단하게 나타낼 수 있어 평가 대상 사업의 경제성을 쉽게 이해할 수 있는 장점 존재
 - 투자 규모가 작은 사업의 수익성이 과장되기 쉽고, 비용과 편익의 구분이 명확하지 않은 경우에는 B/C ratio가 적절한 평가 지표가 되기 어려움
- 내부수익률(IRR): 과제가 원만히 진행된다는 전제하에 기대되는 예상수익률로, 전 기간에 걸쳐 발생하는 NPV가 0이 되게 하는 할인율을 의미
 - 일반적으로 도출된 예상수익률이 사회적 할인율보다 크면 사업이 경제적 타당성을 확보한다고 할 수 있음
 - IRR을 통해 사업의 수익성 측정이 가능하고 타 대안과 비교가 용이하며, 평가 과정과 결과에 대한 이해가 용이함
 - 사업의 절대적 규모를 고려하지 않아 투자 규모가 작은 사업의 수익성이 과장되기 쉬움

□ 본 사업의 편익발생기간 동안의 편익 추정

- 본 사업의 편익 발생기간은 기술수명주기를 반영하여 9년으로 산정하였으며, 사업종료 후 회임기간 5년을 반영하여 2031년부터 2039년까지로 가정¹⁰⁾
- 2031년부터 2039년까지의 9년간 해당연도별 편익을 현재가치와 함께 도출하여 경제성 분석 수행 시 편익 값의 흐름에 대한 정보로 활용하였음
 - 사회적 할인율을 이용하여 당해연도 가치를 현재가치로 환산하였음
 - * 현재가치 기점은 연구개발비 투자시점 이전 해인 2017년 12월

<표 7-2> 본 사업의 편익 발생기간 동안의 연도별 편익 추정치

연도	편익 (백만원)	
	당해연도	현재가치
2031	13,456	6,709
2032	13,456	6,359
2033	13,456	6,027
2034	13,456	5,713
2035	13,456	5,415
2036	13,456	5,133
2037	13,456	4,865
2038	13,456	4,612
2039	13,456	4,371
합계	121,104	46,640

10) 편익 발생기간과 회임기간 결정은 제1장 제1절의 내용을 참고.

제2절. 경제성 및 민감도 분석

□ NPV, B/C ratio, IRR를 모두 분석하여 경제적 타당성 분석

- NPV, B/C ratio, IRR은 각 기법마다 장단점을 가지고 있어, 어느 한 기법만을 선택하여 사업의 경제적 타당성을 분석하기에는 한계가 있을 수 있음
- 따라서 본 연구에서는 NPV, B/C ratio, IRR을 모두 분석하여 본 사업의 경제적 타당성을 분석하였음
- 경제성 분석에서 $NPV \geq 0$, $B/C \geq 1$, $IRR \geq$ 사회적할인율인 경우 각각 경제성이 있다고 판단함
- 또한, 경제적 타당성을 보다 정확하기 평가하기 위하여 추가적으로 사업비용과 경제적 편익의 변화를 고려하여 민감도 분석을 수행하였음
- 경제성 분석을 위한 비용 자료는 한국해양과학기술원의 『우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명』 기획연구 보고서에 제시된 2018년부터 2025년까지의 예상 연구비 정보를 활용하였음

<표 7-3> 본 사업의 편익 발생기간 동안의 연도별 비용

연도	비용 (백만원)	
	당해연도	현재가치
2018	2,000	1,896
2019	2,000	1,797
2020	2,000	1,703
2021	2,000	1,614
2022	2,000	1,148
2023	1,500	1,088
2024	1,500	1,031
2025	2,000	1,303
합계	15,000	11,963

□ 분석 결과, 본 사업은 경제적 타당성 확보 기준을 상회

- 순현재가치(NPV)는 37,967백만원으로 0보다 큰 값을 가짐
- 비용편익 비율(B/C ratio)은 4.17로 1.0을 초과함
- 내부수익률(IRR)은 29.0%로, 사회적 할인율을 초과함
- 따라서 본 사업은 경제적으로 타당성을 확보함

<표 7-4> 본 사업의 비용 및 편익 흐름 (단위: 백만원)

연도	비용		편익		순 편익	
	당해연도	현재가치	당해연도	현재가치	당해연도	현재가치
2018	2,000	1,896			-2,000	-18,96
2019	2,000	1,797			-2,000	-17,97
2020	2,000	1,703			-2,000	-17,03
2021	2,000	1,614			-2,000	-16,14
2022	2,000	1,530			-2,000	-15,30
2023	1,500	1,088			-1,500	-10,88
2024	1,500	1,031			-1,500	-10,31
2025	2,000	1,303			-2,000	-13,03
2026						
2027						
2028						
2029						
2030						
2031			14,405	6,807	14,405	68,07
2032			14,405	6,453	14,405	64,53
2033			14,405	6,116	14,405	61,16
2034			14,405	5,797	14,405	57,97
2035			14,405	5,495	14,405	54,95
2036			14,405	5,209	14,405	52,09
2037			14,405	4,937	14,405	49,37
2038			14,405	4,680	14,405	46,80
2039			14,405	4,436	14,405	44,36
계	15,000	11,963	129,646	49,929	114,646	37,967

<표 7-5> 본 사업의 경제성 분석 결과

현재가치 (백만원)		NPV (백만원)	B/C ratio	IRR (%)
편익	비용			
49,929	11,963	37,967	4.17	29.0

제3절. 민감도 분석

□ 편익 및 비용의 변화에도 여전히 경제적 타당성 확보

- 경제적 타당성을 평가하기 위한 비용과 편익 추정에는 많은 불확실성이 내포되어 있을 수 있음
- 불확실성에 대처하기 위하여 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하였음
 - － 민감도 분석은 경제성 분석의 기본 가정에 변화가 발생할 경우 이러한 변화가 분석 결과에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보는 방법임
- 본 연구에 내재되어 있는 불확실성을 고려하기 위하여 추가적으로 편익, 비용 변화에 대한 민감도 분석을 추가적으로 수행하였음
 - － 비용 및 편익 변화를 각각 20% 감소/증가, 10% 감소/증가 시킨 경우에 대한 민감도 분석 수행
- 민감도 분석 결과, 본 사업의 B/C ratio는 **3.34 ~ 5.22**로 도출되었음
- 편익을 감소시키거나 비용을 증가시키는 경우에도 B/C ratio는 1.0을 초과하는 값을 가지는 바, 여전히 본 사업은 경제적 타당성을 확보한다고 판단할 수 있음

<표 7-6> 편익 및 비용의 변화에 따른 민감도 분석 결과 (B/C ratio)

	변화율				
	-20%	-10%	0%	+10%	+20%
편익 변화	3.34	3.76	4.17	4.59	5.01
비용 변화	5.22	4.64	4.17	3.79	3.48

제8장. 결론

- 비용-편익 분석을 통해 본 사업의 경제적 타당성 확보 확인
 - 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 위해서는 체계적이고 국가 차원의 연구가 필요함에도 불구하고, 현재까지의 국내 연구는 거의 전무한 실정임
 - 본 사업은 해양 대기분진 특성 규명, 해양생물/생태계 영향 평가 등의 연구를 수행하면서 경제적, 환경적, 정책적 효과를 기대할 수 있음
 - 이에 본 연구에서는 본 사업의 추진 여부를 판단하기 위하여 경제적 타당성 분석을 수행하였음
 - 본 사업의 경제적 편익을 추정하기 위해 조건부 가치측정법을 적용하여 가구당 연간 지불의사액을 추정하여 국가 단위로 확장하였음
 - － 평균 지불의사액은 가구당 연간 30,360백만원으로 추정되었으며, 통계적으로 유의함을 확인하였음
 - 산업연관분석을 이용하여 본 사업의 간접적 경제적 편익을 추정하였음
 - － 생산유발효과: 2,793억원
 - － 부가가치유발효과: 1,163억원
 - － 취업유발효과: 1,870명
 - 경제성 분석 결과, 총 비용의 현재가치는 11,963백만원, 총 편익의 현재가치는 49,929백만원으로 분석되었으며, NPV는 37,967백만원으로 경제성 분석을 통과함
 - － NPV, B/C ratio, IRR 모두 경제성 분석 통과 기준을 상회하였음
 - 민감도 분석을 통해 본 사업의 비용과 편익을 감소·증가시켰을 때의 B/C ratio를 분석한 결과, 3.34 ~ 5.22의 값을 도출하였음
 - － 따라서 본 사업은 민감도 분석 결과에도 여전히 경제적 타당성을 확보하는 바, 본 사업의 추진은 경제·사회적으로 바람직하다고 할 수 있음

참고문헌

- 강희용, 정승진, 김규한, & 편종근. (2006). 환경저감화 시설에 대한 비용편익분석: 광양만 사례연구. 대한토목학회논문집 B, 26(2B), 217-223.
- 국회예산정책처. (2008). 「연구개발 사업 예비타당성조사에 대한 메타평가」
- 권영주, 임슬예, 유승훈. (2014). 차세대 해양생물 유전체 사업의 경제적 타당성 분석. 한국혁신학회지, 9(2), 117-138.
- 김수엽, & 이건우. (2014). CVM 을 이용한 해상교통안전시설 투자 편익 분석. 한국항해항만학회 학술대회논문집, 73-75.
- 김지현. (2005). 해양심층수개발의 비용편익분석. 환경정책, 13(2), 169-187.
- 박선영, 남정호, & 유승훈. (2013). 해양환경 위해성 평가 및 관리 기술개발사업의 경제성 분석. 기술혁신학회지, 16(1), 20-40.
- 배정환, 정해영, & 김미정. (2015). 해조류 바이오매스 에너지화 사업의 경제적 타당성과 파급효과 분석. 신재생에너지, 11(2), 29-38.
- 안소은, 배현주, 곽소윤, 임연희, 김명희, & 김진산. (2015). 빅데이터를 이용한 대기오염의 건강영향 평가 및 피해비용 추정. 사업보고서, 2015(단일호), 2137-2228.
- 유승훈. (2007). 산업연관분석을 이용한 해양심층수 산업화의 국민경제적 파급효과 분석. 산업경제연구, 20(4), 1345-1357
- 이민규, 조소희, 이수영, 최건우, & 유승훈. (2012). 마리나항만 개발·운영의 경제적 타당성 분석 연구. 연구보고서, 1-150.
- 중소기업청. (2013). 「에너지자원활용 산업[시장] 분석」
- 한국개발연구원. (2008a). 「경남 로봇랜드 조성사업 예비타당성조사 보고서」
- _____ . (2008b). 「인천 로봇랜드 조성사업 예비타당성조사 보고서」
- _____ . (2008c). 「대형 해양과학연구선 건조사업」
- _____ . (2008d). 「예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완

연구(제5판)」

한국과학기술기획평가원(KISTEP). (2006). 「대형광학망원경 개발사업 사전타당성
조사 보고서」

_____. (2011). 「연구개발사업 예비타당성조사 표준지침(제
1판)」

_____. (2016) 「연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준
지침 (제2-1판)」

해양수산과학기술진흥원. (2017). 「해양생물자원 기탁등록보존기관 연구계획
서」

이명선, 「미세먼지 관련 정부 정책동향」, NICE 제35권 제5호, 2017

Griliches Z. (1958). Research Costs and Social Returns: Hybrid Corn and
Related Innovations, *Journal of Political Economy*, 66(5), 419-431

Mansfield, E. (1991). Academic research and industrial innovation. *Research
policy*, 20(1), 1-12.

Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-output analysis: foundations and
extensions*. Cambridge University Press.

Lee, J., & Cho, Y. (2018). Inconvenience cost of mobile communication failure:
The case of South Korea. *Telecommunications Policy*.

Wu, R. H., & Chen, C. Y. (1990). On the application of input-output analysis to
energy issues. *Energy Economics*, 12(1), 71-76.

한국은행 경제통계시스템(<http://ecos.bok.or.kr>)

통계청 국가통계포털(<http://kosis.kr/index/index.do>)

[별첨] CVM 설문조사지

우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명으로 인한 사회적 편익 추정

안녕하십니까?

(주)날리지웍스에서는 한국해양과학기술원의 연구과제로 일반국민 여러분을 대상으로 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명으로 인한 사회적 편익 추정을 위한 조사를 진행하고 있습니다. 본 연구과제는, 국외에서 유입되거나 국내에서 발생하는 미세먼지나 황사 등이 우리나라 바다에서 이동하는 흐름, 해양생태계에 미치는 영향 등을 분석하는 연구입니다. 귀하께서 응답해 주신 내용은 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명에 관련된 정책 및 기술 개발 전략 수립에 중요한 자료로서 활용될 예정입니다.

본 질문에는 맞고 틀리는 답이 없으며, 응답결과에 대한 통계학적 및 경제학적 분석을 수행하는 데에만 사용될 예정이고, 그 외의 목적에는 절대로 사용되지 않으니 평소 생각대로 응답해 주시면 됩니다. 또한, 귀하께서 응답해 주신 내용은 통계법(제33조)에 따라 통계목적으로만 사용되며, 귀하의 의견이 철저히 보호됨을 약속드립니다.

바쁘시겠지만, 귀하의 적극적인 협조를 부탁드립니다.
감사합니다.

2018년 1월
(주)날리지웍스

응답자 선정 질문

- SQ1. 응답자 성별 : 1. 남자 2. 여자
- SQ2. 실례지만, 귀하의 현재 연령대는 만으로 어떻게 되세요? → **만 20~60대(2~6번) 대상 조사진행**
- | | | | |
|-------|-------|----------|-------|
| 1.10대 | 2.20대 | 3.30대 | 4.40대 |
| 5.50대 | 6.60대 | 7.70대 이상 | |
- SQ3. 현재 귀하 본인이나 가족 중에 해양 환경, 해양생물·생태계 등에 관련된 연구를 하는 분이 계신가요?
1. 예 → **조사종료**
2. 아니오
- SQ4. 귀하의 거주지역은 어떻게 되세요?
- | | | | |
|---------|---------|---------|---------|
| 1.서울 | 2.부산 | 3.대구 | 4.인천 |
| 5.광주 | 6.대전 | 7.울산 | 8.세종 |
| 9.경기도 | 10.강원도 | 11.충청북도 | 12.충청남도 |
| 13.전라북도 | 14.전라남도 | 15.경상북도 | 16.경상남도 |
| 17.제주도 | | | |

응답 작성시 유의사항

1. 질문지는 순서대로 응답해 주십시오. 특별한 언급이 없다면, 모든 질문에 빠짐없이 응답해 주시기 바랍니다.
2. 질문에 응답하시기 전에 질문 앞에 제시된 설명문을 잘 읽고, 숙지하신 후 응답해 주시기 바랍니다.
3. 질문은 주관식과 객관식으로 구성되어 있습니다. 주관식 질문 응답은 답란에 직접 적어주시고, 객관식 질문은 제시된 보기 번호에 체크 해 주시기 바랍니다. 또한, 질문 항목별로 특별한 언급이 없는 한 가장 최근을 기준으로 응답해 주시면 됩니다.

▣ 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 연구에 대한 설명문

한국해양과학기술원(KIOST)에서는 『우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명』 연구에 관한 경제적 타당성 분석 연구를 수행하고 있습니다. 본 설문을 통해 해당 연구의 대국민 편익을 추정하여 경제적 타당성 분석을 수행할 예정이므로, 아래의 설명을 잘 읽으시고 이해하신 후, 다음 페이지의 설명에 대해서 응답해주시기 바랍니다.

<p>해역 대기분진 플럭스란?</p>	<p>해역 대기분진 플럭스(Flux)란 미세먼지, 황사 등과 같은 대기분진이 해양으로 유입되어 해양 생태계와 환경에 악영향을 미치는 물질을 의미합니다. 2016년 <Nature>에 따르면, 국내 대표 항만인 부산항은 중국 7개 항만, 두바이, 싱가포르와 함께 ‘세계 10대 초미세먼지 오염항만’으로 선정되었으며, 해역 대기분진 플럭스는 해양 오염의 주요 원인 중 하나로, 대책마련이 시급한 상황입니다.</p>																																																					
<p>연구의 배경 및 필요성</p>	<p>1. 대기분진 연구에 대한 국민적 공감대 형성 미세먼지 개선에 대한 국민적 관심이 그 어느 때보다 높으며, 정책적 해결책 마련을 위해서는 미세먼지와 황사와 같은 대기 분진에 대한 연구수행이 시급합니다. 특히 육상의 오염원에 의한 2차 오염 영향이 적은 해양에서의 연구는 국가간의 경계를 넘나드는 월경성 대기분진 특성 규명이 가능하여 국내 유입 미세먼지에 대한 보다 명확한 발생 및 기원에 대한 정보를 제공할 수 있습니다.</p> <p>2. 해양에서의 대기분진 연구 미흡 해양이 대기 기원 오염물질의 저장소로 인식되고 있으나 해양과 대기의 상호작용을 통한 오염물질 순환에 대한 연구는 미진한 상황이며, 대기분진의 침적에 관한 정보뿐만 아니라 해양유입에 의한 물질순환, 해양생물, 생태계, 환경 변화 등에 대한 연구는 매우 부족한 상황입니다. 해양에서의 대기분진 연구가 중요함에도 불구하고 체계적·광역적으로 수행된 적이 없고, 공공적인 성격이 높은 연구인만큼, 국가차원의 연구 지원이 필요한 상황입니다.</p>																																																					
<p>연구 계획 및 주요 결과물</p>	<p>『우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명』 연구의 총괄 기술로드맵</p> <table border="1" data-bbox="271 985 1468 1568"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">1단계</th> <th colspan="5">2단계</th> </tr> <tr> <th>2018</th> <th>2019</th> <th>2020</th> <th>2021</th> <th>2022</th> <th>2023</th> <th>2024</th> <th>2025</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>단계별 목표</td> <td colspan="3">연구기반 구축, 기초 연구자료 확보 및 월경성 대기분진 추적</td> <td colspan="5">월경성 대기분진 정량화, 미세먼지 해양기여도, 물질순환, 해양생물/생태계 영향에 대한 종합 평가</td> </tr> <tr> <td>예산 (억원)</td> <td colspan="3">60</td> <td colspan="5">90</td> </tr> <tr> <td></td> <td>20</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>15</td> <td>15</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>주요 결과물</td> <td colspan="3"> <ul style="list-style-type: none"> 대기분진 영상 분석 알고리즘 시기별 해석영상 자료 유기·무기화합물, 중금속 해양거동 2단계 연구를 위한 기초자료 </td> <td colspan="5"> <ul style="list-style-type: none"> 국외 기원 대기분진 정량화 주요 항구 선박기원 미세먼지 기여도 대기분진 안정동위원소 분석기술 영양염 해양 유입에 의한 생산력 변화 물질 순환에 의한 해양환경 변화 예측 인덱스 생물 유전자 지도 해양생태계 영향 평가 기법 생물영향 종합 평가지침 </td> </tr> </tbody> </table>		1단계			2단계					2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	단계별 목표	연구기반 구축, 기초 연구자료 확보 및 월경성 대기분진 추적			월경성 대기분진 정량화, 미세먼지 해양기여도, 물질순환, 해양생물/생태계 영향에 대한 종합 평가					예산 (억원)	60			90						20	20	20	20	20	15	15	20	주요 결과물	<ul style="list-style-type: none"> 대기분진 영상 분석 알고리즘 시기별 해석영상 자료 유기·무기화합물, 중금속 해양거동 2단계 연구를 위한 기초자료 			<ul style="list-style-type: none"> 국외 기원 대기분진 정량화 주요 항구 선박기원 미세먼지 기여도 대기분진 안정동위원소 분석기술 영양염 해양 유입에 의한 생산력 변화 물질 순환에 의한 해양환경 변화 예측 인덱스 생물 유전자 지도 해양생태계 영향 평가 기법 생물영향 종합 평가지침 				
	1단계			2단계																																																		
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025																																														
단계별 목표	연구기반 구축, 기초 연구자료 확보 및 월경성 대기분진 추적			월경성 대기분진 정량화, 미세먼지 해양기여도, 물질순환, 해양생물/생태계 영향에 대한 종합 평가																																																		
예산 (억원)	60			90																																																		
	20	20	20	20	20	15	15	20																																														
주요 결과물	<ul style="list-style-type: none"> 대기분진 영상 분석 알고리즘 시기별 해석영상 자료 유기·무기화합물, 중금속 해양거동 2단계 연구를 위한 기초자료 			<ul style="list-style-type: none"> 국외 기원 대기분진 정량화 주요 항구 선박기원 미세먼지 기여도 대기분진 안정동위원소 분석기술 영양염 해양 유입에 의한 생산력 변화 물질 순환에 의한 해양환경 변화 예측 인덱스 생물 유전자 지도 해양생태계 영향 평가 기법 생물영향 종합 평가지침 																																																		
<p>연구의 기대효과</p>	<p>1. 경제적 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> 대기분진 구성 물질 별 정량화를 통한 대기분진 영향 및 저감에 따르는 사회적 비용 책정 관련 산업 육성 및 환경 관련 분야 신산업 창출로 산업 확장 및 고용창출 효과 <p>2. 환경적 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> 해양에서의 미세먼지 정량화를 통한 대기오염물질 유입량 및 배출량 불확실성 개선 선박 배출가스의 미세먼지 오염기여도 산정을 통한 효율적인 미세먼지 저감대책 수립 및 지역주민 노출 피해 최소화 <p>3. 정책적 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> 정책적 대기분진 저감 방안 및 배출 기준 마련에 기여하여 대외 외교정책 기본자료로 제공 국내 선박 특성에 맞는 배출가스 배출계수 산정을 통한 효율적인 온실가스, 대기오염물질, 미세먼지 저감대책 수립 																																																					
<p>조사의 목적</p>	<p>본 설문은 우리나라 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명을 위해 우리나라 국민들이 지불할 수 있는 금액을 산출하고, 이를 정부와 관련 기업의 정책 및 계획 수립에 중요한 자료로 활용하는 데 그 목적이 있습니다. 본 사업을 시행하기 위해서는 많은 비용이 소요되며, 이 비용 중 일부는 각종 세금으로 충당될 수 있습니다. 만약 많은 사람들이 그 비용을 지불하지 않는다면, 본 사업의 추진은 어렵습니다.</p>																																																					

다음은 앞서 설명 드린 우리나라 해역 대기분진 플렉스 및 해양거동 규명을 위해 귀하의 가정에서 향후 5년간 매년 지불할 의향이 있는 사용료 수준을 묻는 질문입니다.

- ① 제시된 금액을 귀하의 택에서 지불하지 않는다면, 해역 대기분진 플렉스 및 해양거동 규명을 위한 연구의 수행은 어렵습니다.
- ② 귀하의 가정의 소득은 제한되어 있으며, 여러 용도로 지출되어야 한다는 사실을 고려하신 후, 질문에 응답해 주시기 바랍니다.
- ③ 사전 조사 결과, 예상되는 지불의사액은 매년 가구당 [제시금액]원 이라고 합니다.

문1. 귀하의 가정에서는 우리나라 해역 대기분진 플렉스 및 해양거동 규명 연구 추진을 위해 귀하의 가정에서 납부하는 소득세에서 향후 5년간 한시적으로 매년 [제시금액]원을 추가로 납부하실 의향이 있으십니까?

- 1. 있다 —————▶ **문2로**
- 2. 없다 —————▶ **문3으로**

문2. 그럼, 귀하의 가정에서는 [제시금액의 2배]원을 추가로 납부하실 의향이 있으십니까?

- 1. 있다 —————▶ **다음페이지로**
- 2. 없다 —————▶ **다음페이지로**

문3. 그럼, 귀하의 가정에서는 [제시금액의 1/2배]원을 추가로 납부하실 의향이 있으십니까?

- 1. 있다 —————▶ **다음페이지로**
- 2. 없다 —————▶ **문4로**

문4. 그렇다면, 귀하의 가정에서는 적어도 1원 이상은 추가로 납부하실 의향이 있으십니까?

- 1. 있다 —————▶ **다음페이지로**
- 2. 없다 —————▶ **문5로**

문5. 귀하의 가정에서 우리나라 해역 대기분진 플렉스 및 해양거동 규명을 위해 단 1원도 추가로 납부하실 의사가 없으신 가장 큰 이유는 무엇입니까? 가장 중요한 이유 하나만 응답해 주십시오. (단답)

- 1. 추가로 납부할만한 경제적인 여유가 없어서
- 2. 현재 납부하고 있는 소득세 내에서 충당되어야 한다고 생각해서
- 3. 판단할 만한 충분한 정보가 주어져 있지 않아서
- 4. 우선순위를 둘 만큼 중요하다고 생각하지 않아서
- 5. 추가적인 세금 또는 재원이 명시된 연구를 위해 쓰이지 않을 것이라 생각해서
- 6. 제시된 정부의 사업계획을 믿을 수 없어서
- 7. 해당 내용은 내 관심의 대상이 아니어서
- 8. 기타(구체적으로 응답해 주십시오: _____)

다음은, 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명 연구에 대한 귀하의 일반적인 의견을 여쭙는 질문입니다.

P1. 귀하께서는 오늘 이전에 해역 대기분진 플럭스에 대해서 어느 정도 알고 계셨습니까?

전혀 몰랐다	모르는 편이었다	보통이었다	잘 아는 편이었다	매우 잘 알고 있었다
1	2	3	4	5

P2. 다음은 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명의 효과에 대한 질문입니다. 제시한 6개의 효과는 앞서 설명문에서 설명드린 본 연구의 주요 결과물 및 기대효과들입니다. 제시한 6개의 효과가 어느 정도 효과적일 것이라고 생각하시는지 귀하의 생각에 가장 가까운 번호에 응답해 주십시오.

전혀 효과적이지 않다	효과적이지 않은 편이다	보통이다	효과적인 편이다	매우 효과적이다
1	2	3	4	5

정

1. (경제) 대기분진 물질 저감에 따르는 사회적비용 책
2. (경제) 환경분야 신산업 창출로 인한 파급효과
3. (환경) 대기오염물질 유입·배출량 불확실성 개선
4. (환경) 대기분진 예보 및 측정을 통해 피해 최소화 ..
5. (정책) 대기분진 관련 대외 외교정책 기본자료 제공
6. (정책) 온실가스 및 대기오염 저감대책 수립

1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5
1	2	3	4	5

P3. 그럼, 귀하께서 생각하시기에, 해역 대기분진 플럭스 및 해양거동 규명의 가장 중요한 효과는 무엇일까요? (단답)

1. (경제적 기대효과) 대기분진 물질 저감에 따르는 사회적비용 책정
2. (경제적 기대효과) 환경분야 신산업 창출로 인한 경제적 파급효과
3. (환경적 기대효과) 대기오염물질 유입·배출량 불확실성 개선
4. (환경적 기대효과) 대기분진 예보 및 측정을 통해 지역주민 노출피해 최소화
5. (정책적 기대효과) 대기분진 관련 대외 외교정책 기본자료 제공
6. (정책적 기대효과) 온실가스 및 대기오염 저감대책 수립
7. 기타 (구체적으로 응답해 주십시오 :

응답자 특성 (자료분류용 질문)

아래 질문들은 귀 닥의 소득과 지출구조에 따른 (앞서 응답하신) 해역 대기분진 플렉스 및 해양거동 규명과 관련한 지출의향에 대해 분석하기 위한 질문으로, 다른 용도로는 절대 사용되지 않으니, 잘 모르시더라도 대략적으로라도 응답 부탁드립니다.

D1. 실례지만, 귀하의 직업은 무엇입니까?

1. 자영업 (종업원 9명 이하 소규모 업소 주인/가족종사자)
2. 판매/서비스직 (상점점원, 세일즈맨 등)
3. 기능/숙련공 (운전사, 선반/목공, 숙련공 등)
4. 일반직업직 (토목 현장작업/청소/수위/육체노동 등)
5. 사무/기술직 (일반회사 사무직/기술직, 교사 등)
6. 경영/관리직 (5급 이상 공무원/기업체 부장 이상 등)
7. 전문/자유직 (대학교수/의사/변호사/예술가/종교인 등)
8. 전업주부
9. 학생
10. 무직
11. 기타 (구체적으로

응답해

주십시오

:

D2. 실례지만, 귀하께서는 학교를 어디까지 마치셨습니까?

- | | | |
|---------------|-----------------|------------|
| 1. 초등학교 졸업 이하 | 2. 중학교 졸업 | 3. 고등학교 졸업 |
| 4. 대학 재학/졸업 | 5. 대학원 재학/졸업 이상 | |

D3. 현재 귀 닥의 월평균 소득 수준은 얼마나 됩니까? 세금은 제외한 보너스, 이자수입 등 모든 수입을 합해서 응답해 주십시오.

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1. 99만원 이하 | 2. 100만원~149만원 이하 |
| 3. 150만원~199만원 이하 | 4. 200만원~249만원 이하 |
| 5. 250만원~299만원 이하 | 6. 300만원~399만원 이하 |
| 7. 400만원~499만원 이하 | 8. 500만원~699만원 이하 |
| 9. 700만원~999만원 이하 | 10. 1,000만원 이상 |

D4. 현재 귀 닥의 월평균 지출 수준은 얼마나 됩니까? 보너스, 저축은 제외한 순수한 지출 수준을 다음 보기 중 응답해 주십시오.

- | | |
|-------------------|-------------------|
| 1. 49만원 이하 | 2. 100만원~149만원 이하 |
| 3. 150만원~199만원 이하 | 4. 200만원~249만원 이하 |
| 5. 250만원~299만원 이하 | 6. 300만원~349만원 이하 |
| 7. 350만원~399만원 이하 | 8. 400만원~449만원 이하 |
| 9. 450만원~499만원 이하 | 10. 500만원 이상 |

★ 끝까지 응답해 주셔서 대단히 감사합니다 ★