BSPE9969A-11786-1

KIOST 해양환경 및 생태계 장기 모니터링 시스템 구축

KIOST long-term monitoring system of the marine environment and ecosystem

2019. 02. 28

한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “KIOST 해양환경 및 생태계 장기 모니터링 시스템 구축” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019년 2월 28일

연구책임자 : 김동선
참여연구원 : 강동진, 김경태, 김동성, 김석현, 김 성, 김인태, 김충곤, 나공태, 노재훈, 박근하, 백승호, 송규민, 이 석, 이은경, 이지민, 장민철, 최동한, 최상화, 김종국, 김찬영, 백 훈, 이승용, 정혜령, 최재호

보고서 초록

<table>
<tr><td>과제고유
번호</td><td>PE9969A</td><td>해당단계
연구기간</td><td>2018. 08. 01 ~
12. 31.</td><td>단계 구분</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">주요사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">KIOST 해양환경 및 생태계 장기 모니터링 시스템 구축</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">김동선</td><td>해당단계
참여연구원수</td><td>총 : 23 명
내부: 23명
외부: 0명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부: 50,000천원
기업: 0천원
계 : 50,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참여연구원수</td><td>총 : 23명
내부: 23명
외부: 0명</td><td>총
연구비</td><td>정부: 50,000천원
기업: 0천원
계 : 50,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명
및
소속부서명</td><td colspan="2">한국해양과학기술원
해양환경연구센터</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서
면수</td><td>106</td></tr>
</table>

○ 최종 연구목표는 KIOST 장기 모니터링 시스템을 구축하여 동해와 남해에서 대기/물리/화학/생물 시계열 자료를 생산하여 해수 물리특성 변화, 대기 유입물질 증가 경향, 해양산성화 경향, 해양유해물질(방사능, 미세플라스틱, 중금속) 증가 경향, 해양생물 종조성 및 생물량 변화, 유해 외래생물 유입 여부 등을 파악하는 것임

○ 주요 연구내용은 국내외 해양환경/생태계 장기 모니터링 연구개발 현황과 기술동향을 파악하고, 장기 모니터링을 위한 연구해역, 관측항목, 자동측정장비, 시료채집 방법, 분석방법을 설정하고, 관측 시스템 유지 보수, 점진적 확대 및 안정적이고 장기적인 운용안을 마련하고, 해양환경/생태계 장기 모니터링의 경제성 분석을 수행하는 것임

○ 예상되는 연구성과는 해양환경 및 생태계 장기 관측을 위한 효율적인 모니터링 시스템을 구축하고, 동해와 남해에서 해양환경/생태계 장기 시계열자료를 확보하는 것임

○ 활용계획 및 기대효과는 기후/지구환경변화에 따른 해양환경/생태계 변화를 파악 가능하고, 동해와 남해 해양산성화 경향을 파악 가능하고, 해양유해물질 증가 및 유해 외래생물 유입 여부를 파악 가능하며, 부산 신항만 구축 및 운영에 필요한 환경오염 및 환경 평가의 기초자료로 활용하고, 지구환경변화에 의한 주요 해양생물자원량 변화 예측을 위한 기초자료로 활용하는 것임

색인어 (각 5개 이상)	한 글	해양환경변화, 해양생태계변화, 모니터링, 장기관측, 기후변화
	영 어	marine environmental changes, marine ecosystem changes, monitoring, long-term observation, climate changes

요 약 문

Ⅰ. 제 목

○ KIOST 해양환경 및 생태계 장기 모니터링 시스템 구축

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

○ KIOST 모니터링 시스템을 구축하여 동해와 남해에서 장기 대기/물리/화학/생물 시계열 자료를 생산하여 해수 물리특성 변화, 대기 유입물질 증가 경향, 해양산성화 경향, 해양유해물질(방사능, 미세플라스틱, 중금속) 증가 경향, 해양생물 종조성 및 생물량 변화 파악, 유해 외래생물 유입 경향 등을 파악함

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

○ 국내외 해양환경 및 생태계 장기 모니터링 연구개발 현황 및 기술동향 분석
○ 장기 모니터링을 위한 연구해역, 관측항목, 자동측정장비, 시료채집 방법, 분석방법 검토 및 설정
○ 관측 시스템 유지 보수, 점진적 확대 및 안정적이고 장기적인 운용안 마련
○ 장기 모니터링 시스템의 경제성 분석

Ⅳ. 연구개발결과

○ 해수물리특성 모니터링
○ 일반수질 및 미량원소 모니터링
○ 무기탄소 인자 모니터링
○ 해양 이산화탄소 분압 시계열 모니터링
○ 대기 침적 모니터링
○ 대기 분진 방사능 모니터링
○ 미소플랑크톤 모니터링
○ 동물플랑크톤 모니터링
○ 플랑크톤 주요 우점종 모니터링
○ 부유성 알 모니터링

○ 저서동물 모니터링

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

○ 부산 신항만 구축 및 운영에 필요한 환경오염 및 환경 평가의 기초자료로 활용
○ 지구환경변화에 의한 주요 해양생물자원량 변화 예측을 위한 기초자료로 활용
○ 기후/지구환경변화에 따른 해양환경/생태계 변화 파악 가능
○ 동해와 남해 해양산성화 경향 파악 가능
○ 해양유해물질 증가 및 유해 외래생물 유입 여부 파악 가능

S U M M A R Y

Ⅰ. Title

○ KIOST long-term monitoring of marine environment and ecosystem

Ⅱ. Objectives and Necessity

○ Find out the changes of the seawater physical characteristics, atmospheric input, ocean acidification, toxic material input (radionuclide, micro-plastics. heavy metals), the changes of marine organism species by using the physical/chemical/biological/ time-series data obtained in the East and South Seas

Ⅲ. Content and Scope

○ Analyze the status of the long-term monitoring techniques in the domestic and foreign countries
○ Determine the study area, monitoring items, sampling methods, analytical methods
○ Find out the maintenance methods for the long-term monitoring systems
○ Economic analysis of the long-term monitoring systems

Ⅳ. Results

○ Monitoring method for the seawater physical characteristics
○ Monitoring method for the nutrients and trace elements
○ Monitoring method for the carbonate parameters
○ Monitoring method for the seawater CO_2 partial pressure
○ Monitoring method for the atmospheric deposition
○ Monitoring method for the atmospheric radionuclide deposition
○ Monitoring method for the phytoplankton composition and biomass
○ Monitoring method for the zooplankton compos
ition and biomass

○ Monitoring method for the fish egg

○ Monitoring method for the benthos

Ⅴ. Applications

○ Use the basic data for evaluating marine pollution in the Busan new port

○ Use the basic data for predicting the variations of marine biological resources due to the global environmental changes

○ Find out the changes of marine environment and ecosystem by climate and environmental changes

○ Find out the trends of the ocean acidification in the East and South Seas

○ Find out the trends of the marine toxic material input

목 차

제 1 장 서론 ····· 1

제 2 장 국내·외 기술개발 현황 ····· 9
제 1 절 해양.대기 모니터링 기술개발 현황 ····· 9
1. 해수물리특성 분야 ····· 9
2. 일반수질 및 미량원소 ····· 11
3. 무기탄소 인자 모니터링 ····· 13
4. 해양 이산화탄소 분압 시계열 모니터링 ····· 17
5. 대기 침적 모니터링 ····· 20
6. 대기 분진 방사능 모니터링 ····· 27
제 2 절 해양생태계 모니터링 기술개발 현황 ····· 28
1. 미소플랑크톤 모니터링 ····· 28
2. 동물플랑크톤 모니터링 ····· 34
3. 플랑크톤 주요 우점종 출현변동 예측 ····· 39
4. 부유성 알 모니터링 ····· 47
5. 저서동물 모니터링 ····· 49

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 53
제 1 절 연구최종목표 ····· 53
제 2 절 연구내용 및 범위 ····· 54
제 3 절 연구방법 ····· 58
제 4 절 경제성 평가 ····· 80

제 4 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 96

제 5 장 참고문헌 ····· 100

제 1 장 서론

○ 해양환경을 분석하기 위한 관측자료는 그 목적에 따라 시간과 공간의 범위 및 해상도가 다르게 요구됨. 기후변화에 의한 해양환경의 반응을 파악하기 위해서는 기본적으로 완만하고 장기간에 걸쳐 나타나는 기후변화의 시간 범위를 포함할 수 있어야 함으로 수십 년 이상의 연속적인 자료가 필요함. 그런데 기후 변화의 효과는 평균치의 장기변화로만 나타는 것이 아니며 극한치의 변화 또는 단기 변동성의 강화로 나타나므로 분석의 목적에 부합하는 시간해상도에 대한 엄밀한 검토가 요구됨. 따라서 장기 모니터링 자료가 다양한 분석에 활용되기 위해서는 1시간 미만의 짧은 시간 해상도 자료가 필요하며 자동관측 시스템의 운용이 요구됨.

○ 장기 해양환경의 변동성을 모니터링하기 위해서는 해양환경특성을 반영할 수 있는 관측 항목, 관측기술, 자료의 품질 관리 및 활용방안 등의 사전에 검토하여 효율적인 모니터링 체계를 구축하는 것이 장기모니터링의 지속을 위해 필수적으로 요구됨.

○ 장기모니터링은 그 시대의 최신의 도전적인 기술보다는 가장 안정적이고 효율적인 관측기술을 적용하는 것이 일반적임. 그러나 과학기술의 혁신은 기술개발의 주기를 점차 짧게 하고 눈부신 효율성의 개선을 수반하고 있음. 해양관측 장비 관련 사업의 활성화를 위해서는 장기모니터링의 수행을 통해 해양환경의 특수성을 고려한 신기술개발의 수요를 창출하고 현장적용이 필요함.

○ 해양연구 전문기관으로서의 우리기관 위상에 부합하는 장기모니터링 체계의 구축과 활용에서 다른 기관들과의 차별화를 위해서는 최상을 자료 품질을 유지하기 위한 안정적인 체계의 구축이 필요함.

○ 우리나라 해양상태를 신속하게 탐지하고 인간활동, 기후 등에 따른 환경변화를 적시에 예측하여 해양의 효율적인 관리와 지속가능한 이용을 위해 목적지향적인 다양한 해양조사 수행중임.

○ 신뢰도가 높은 해양관측·조사자료가 확보되어야만 기후변화 예측과 대응, 연안 이용계획 수립, 해양오염 저감대책 마련, 생태계 복원계획수립, 수산식품 안정성 평가, 생태계 위해도 평가 등 각 분야에서 정확한 예측을 통해 합리적인 의사결정과 정보제공이 가능함.

○ 수많은 모니터링 연구가 수행되었거나 수행되고 있으나, 단기간의 연구과제 수행 및 장기적 전략의 부재로 인하여 각종 환경문제 해결 및 관리정책 수립에 필요한 지속적인 기초자료 확보가 되지 않음.

○ KIOST 부산 이전에 따라 주변 항만오염 등의 환경문제 해결에 대한 기여할 수 있도록 체계적이며 과학적인 자료생산이 가능한 장기 모니터링 프로젝트가 필요함.

○ 대부분의 연안환경 연구는 일반수질 항목에 집중되어 있음. 도시화 및 산업화에 따라 해역과 육역에서 발생하여 최종적으로 해양에 유입된 미량원소 연구는 현재의 spot 연구로는 이들의 물질순환 및 생물이용성에 대한 이해가 실질적으로 불가능한 수준임.

○ 연안 지역은 대양보다 훨씬 복잡한 환경으로 이루어져있고, 지역에 따른 변동특성이 존재함. 연안 지역은 탄소 순환에 있어서 매우 중요한 역할을 하지만 복잡성과 변동성 때문에 각 프로세스들의 영향 크기나 방향은 정립되어 있지 않으며 관련 연구가 부족함. 또한 지역적 변동성이 큰 지역이기 때문에 작은 규모에서 지역적으로 연구될 필요가 있음.

○ 대기로 방출된 많은 양의 이산화탄소를 해양이 흡수함으로서 생기는 해수의 화학적 변화를 해양 산성화라 부르며, 특히 탄산칼슘 껍질을 만드는 생물에 치명적인 것으로 알려져 있음. 연안 지역의 해양 산성화는 대양에 비해 다양한 요인에 의해 그 크기가 변할 수 있기 때문에 장기 관측을 통한 변화 메커니즘 연구가 필요함.

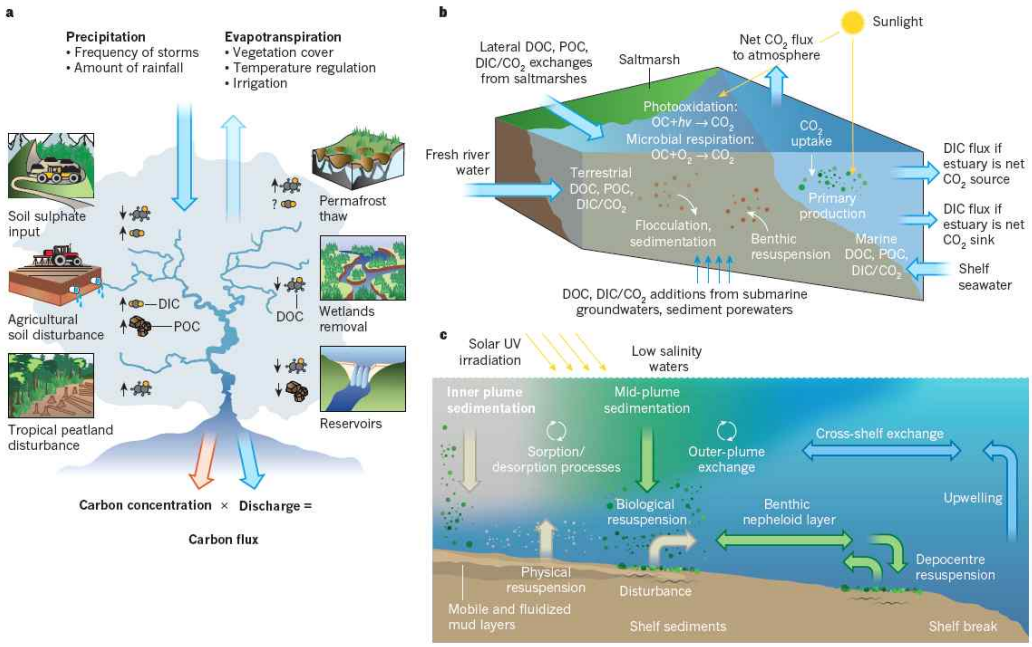


그림 1. 주요 연안 해양 시스템에서 유·무기 탄소 순환과 플럭스에 영향을 주는 프로세스들 (Bauer et al., 2013)

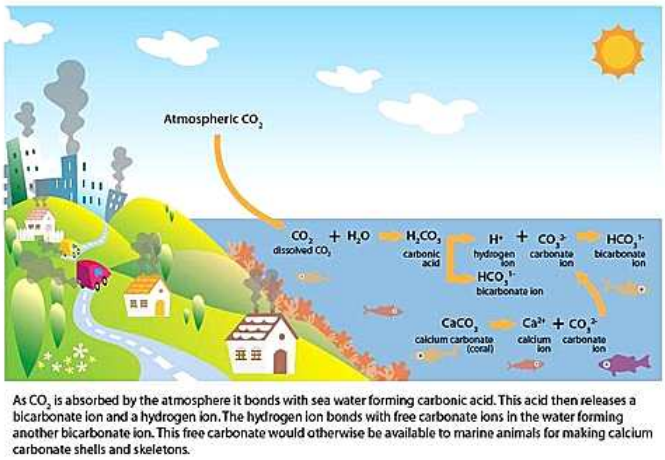


그림 2. 해양 산성화를 초래하는 해수와 이산화탄소의 화학 반응식

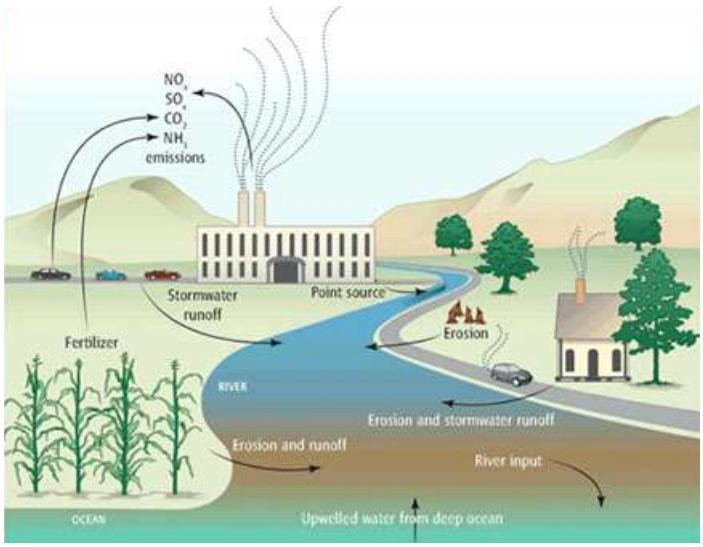


그림 3. 연안 산성화에 영향을 주는 물질의 다양한 배출원 (Kelly et al., 2011)

○ 우리바다의 이산화탄소 흡수력 추정의 품질을 높이기 위해서는 해양-대기 이산화탄소 교환량을 보다 정확히 산정해야 하며 이를 위해서는 표층 해수의 이산화탄소 분압의 시공간적인 분포를 정확히 파악하는 것이 필수적임.

○ 해양-대기 이산화탄소 교환량은 해양-대기 경계면에서의 이산화탄소 분압 차이와 표층해수의 수온, 염분에 따라 결정되는 이산화탄소 용해도, 풍속에 의해 결정됨. 해표면 상층 대기에서의 풍속은 기상관측 부이나 인공위성 등을 통한 관측 및 추정자료의 활용이 가능함. 해양-대기 경계면에서의 이산화탄소 분압 차이는 해수와 해양 대기 각 층의 이산화탄소 분압에 따라 결정되는데 대기는 혼합과 순환이 빨라 이산화탄소 분압을 포함한 해양 대기의 대기질은 시공간

적으로 균일한 반면 표층 해수의 물리.화학적 성분 분포는 비균질성이 강한 특성이 있음. 따라서 해양-대기 이산화탄소 교환량 추정의 품위 제고를 위해서는 표층 해수 이산화탄소 분압의 시공간적인 분포를 정확히 파악하는 것이 필수적임.

○ 특히 고정 관측점에서 표층 해수 이산화탄소 분압에 대한 연속관측을 수행하는 경우, 관측점에서 신뢰도 높은 해양-대기 이산화탄소 교환량 추정이 가능할 뿐만 아니라 동시에 관측한 표층 해수의 수온, 염분 등 물리적 특성과의 상관관계 분석을 통해 해수의 물리적 특성이 파악된 주변해역의 해수 이산화탄소 분압 분포를 공간적으로 확장해 추정하는 데에 활용할 수 있음.

○ 인간 활동으로 인한 환경오염 및 기후변화로 인하여, 대양뿐만 아니라 연안지역에서도 점진적으로 그 영향이 나타나고 있으며, 따라서 이런 변화의 원인을 이해하고 사전에 대비하기 위해 장기 모니터링이 필요함.

○ 해양과 대기는 열, 물질 등을 주고받으면서 전 지구적 기후를 조절하는 역할을 함. 하지만, 해양과 대기의 물질교환에 대해 충분한 연구가 진행되지 못하고 있는 실정임. 특히, 해양 관측의 어려움으로 인해, 인위적 혹은 자연적으로 대기로 배출되고 해양으로 침적되는 물질들(질소화합물, 총인, 철 등)에 대한 연구 자료가 매우 부족함.

○ 대기를 통해 연안으로의 대기 오염물질 유입은 심각한 수준이며, 침적을 통해 해양 생산력에 영향을 미치는 다양한 성분들이 연안으로 유입됨. 따라서 장기 모니터링을 통해 대기 침적량 및 조성 변화를 살펴보고 이들이 해양 생태계 및 물질 순환에 미치는 영향을 연구할 필요가 있음.

○ 미세먼지, 에어로졸 등 대기 오염 물질의 배출량 및 오염 지수가 해마다 증가함에 따라, 최근 미세 먼지 등 대기 질 및 대기 오염에 대한 국민적 관심 증대

○ 역시 이러한 대기 환경문제의 관심 증대에도 불구, 대기 분진 등 대기 입자의 그 주 기원이 중국발 황사, 혹은 산업화의 영향인지, 혹은 자동차 매연이나 생활환경 물질 배출 등 국내 기원인지는 아직 명확히 밝혀지지 않음

○ 또한, 미세 먼지 등 다양한 대기 오염인자들의 환경 모니터링이 상시 전국 각지에서 수행되고 있음에도 불구, 육상에서 기인한 대기 분진 등 대기 입자 물질의 해양 유입(입자 물질의 기원, 유입량, 및 해양 표층의 영향 등)에 대한 연구 역시 거의 이루어지지 않음

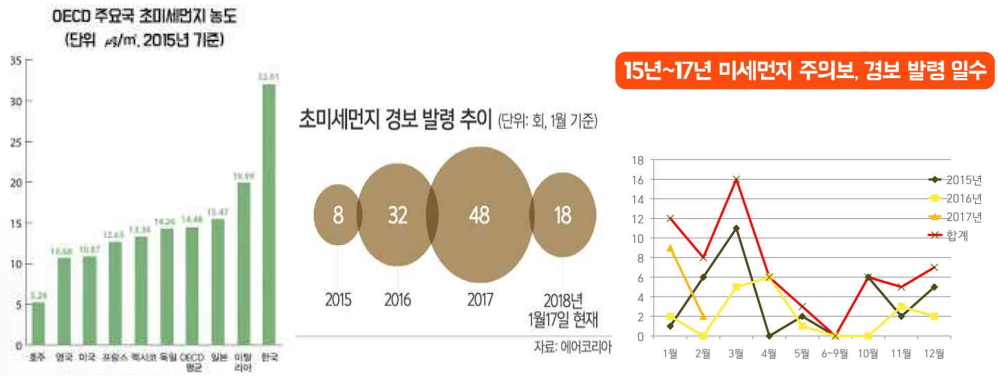


그림 4. 최근 3년간 한국의 (초)미세먼지에 따른 오염 위험 지수 현황

○ 자연 방사성 동위원소인 Be-7($t_{1/2}$=53.3 day, cosmogenic) Pb-210($t_{1/2}$=22 year, continental origin), Po-210($t_{1/2}$=138 day)은 서로 다른 유입기원을 이용하여 대기 물질의 기원, 에어로졸, 대기 분진 등의 이동(transit)이나 대류권에서의 체류시간(residence time), 및 그에 따른 침강 속도 (deposition velocities), 강우에 의한 육상(해양) 침강, 또한 그에 따른 각종 화학 성분의 순환(fate) 등 대기 환경에의 process를 밝히는 추적자로 이용되어 왔음

○ 차년도(2019) 본 연구원 해양환경연구센터에 도입 예정인 미세먼지(/대기분진) 자동채취 모니터링 기기의 적극 활용 가능한 연구 과제로 본 연구가 필요함

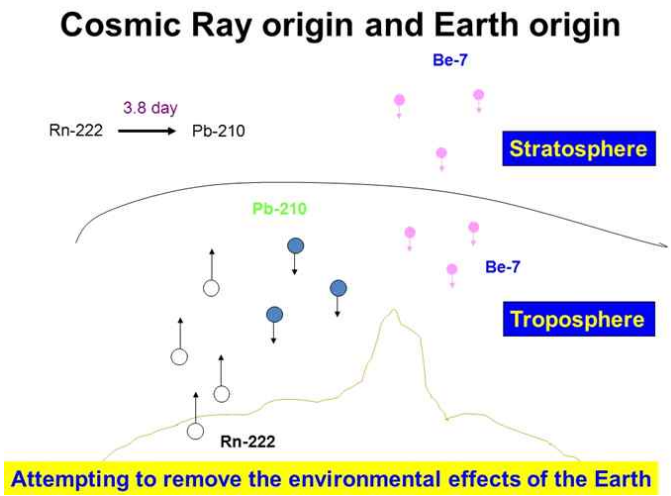


그림 5. Be-7, Pb-210의 서로 다른 기원 및 육상 유입 모식도 (Hirohisa Sakurai, Yamagata University)

○ 2018년 현재, 중국 본토에는 38개의 원자력 발전소가 가동 중에 있으며, 향후 '2014-2020 에너지 발전 전략 실행 계획'에 따라 20여개의 원자력 발전소가

2025년까지 동부 연안에 추가적으로 계획 및 현재 건설 중에 있음 (아래 그림)

○ 일본 역시 십여개의 원자력 발전소가 가동 중으로 통계적으로 10년에 한번꼴로 발생하는 원자력 발전소 사고의 우려와 동시에 북한의 핵실험 결과 잔여 방사능 물질 배출 등으로 동아시아는 인공 방사능 물질 유입의 큰 위험지역으로 부상되고 있음

○ 대기를 통해서는 중국발 황사 및 대기 물질(대기 분진 및 미세먼지)의 유입에 따른 인공 방사능 물질 유입이, 해양을 통해서는 지난 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 추가적인 해양 유입의 가능성 있음. 따라서, 꾸준히 해양의 인공 방사능 바탕농도의 환경 모니터링이 수행되어야 함

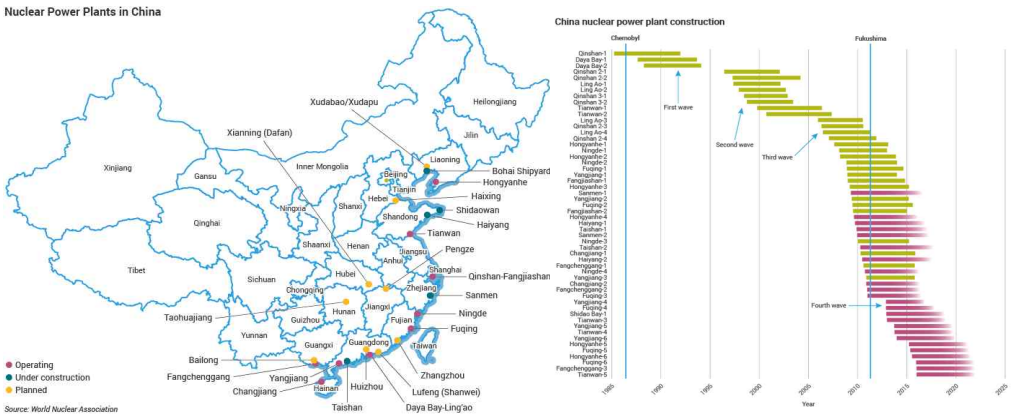


그림 6. 2018년 3월 현재 중국 원자력 발전소 현황 (왼쪽) 및, 2025년 내 향후 추가 건설 계획 현황(2018년)(http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx)

○ 또한, 현재 방사능 오염물질 유입이 진행되지 않고 있다 하더라도 언제 발생할지 모르는 원전 사고에 따른 방사능 오염 확산 사고 대비, 대기 및 해양에서 인공 방사능 바탕농도의 환경 모니터링이 수행되어야 함

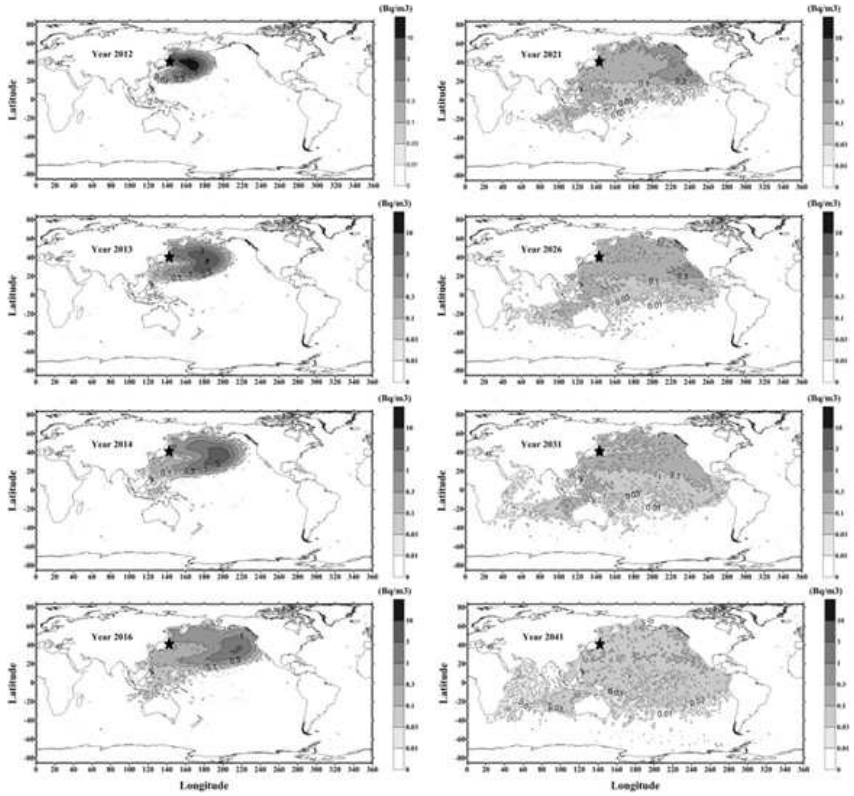


그림 7. 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후 30년 내 인공 방사능 물질인 Cs-137의 해양 표층 전파 모델 예상 결과 (2012-2041) (Nakano and Povinec, 2012)

○ 해양생태계에서 미소플랑크톤(식물플랑크톤, 박테리아)은 일차생산자 및 분해자로서 유기물의 생성, 먹이망 유지, 물질순환 등 해양 생태계의 주요 기능을 담당하고 있음. 그러나 지역적 및 전지구적인 환경 변화는 국내 연안의 식물플랑크톤의 군집 및 다양성 변화의 외력으로 작용하며 궁극적으로 해양생태계의 구조 및 기능의 연동된 변화가 나타날 것으로 예측됨. 해양과학기술원의 연구 거점을 중심으로 동해와 남해에서 장기모니터링 기반 구축 및 식물플랑크톤의 생체량, 군집구조 및 다양성의 시계열 자료 생산을 통해 식물플랑크톤 생태계의 구조 및 기능을 이해하고 관련 연구의 지원 및 미래 변화에 대응하기 위한 연구 역량을 제고해야 함.

○ 해양생태계의 다양성, 군집구조 및 기능적 역할(먹이망, 물질순환 등)의 변화를 효율적으로 모니터링 할 수 있는 기술 개발이 필요

○ 국제 관측망 자료의 공동생산과 활용이 가능한 기술적 수준을 갖춘 지속가능한 관측체계 구축 및 활용 기술이 필요

○ 해양생태계 예측모델 개발에 효과적인 자료생산이 가능한 관측체계 구축

○ 식물플랑크톤은 해양생태계의 구조와 기능을 결정하는 주요 요소로서, 현재 해양의 생태계 구조와 기능에 대한 이해를 높이고 이해하며 미래변화에 대응

하기 위한 다양성 기초정보 구축이 필요

○ 환경/기후변화에 따른 생태계 변화를 관리하며 미래 변화에 대응하기 위해, 해양생태계 주요 구성원인 식물플랑크톤의 구조 및 기능의 시계열 자료의 적절한 생산 기술의 확립과 DB 구축이 필요

○ 최근 빠르게 발전한 차세대염기서열 분석방법과 HPLC, Flow cytometry, FlowCAM 등 다양한 식물플랑크톤 분석방법을 활용 객관적이며 검증 가능한 자료의 대량 생산을 통해 생태계 연구의 수월성 제공이 필요

○ 해양 온난화, 산성화 등 우리나라 주변해 주요 환경변화에 따라 난류로 이동되는 식물플랑크톤 계절별 분포 특성과 적응 가능한 내성 범위에 근거한 아열대화 지표종 선정 및 지속적인 모니터링이 요구 됨

○ 난분류성 PFTs(기능유형별 식물플랑크톤)의 다양성 분석을 위해 초미소 식물플랑크톤, 은편모조류, 착편모조류 및 질소고정자의 다양성 분석을 위한 분자 마커의 개발과 활용기술이 필요

○ 해양식물플랑크톤은 유기물합성과 에너지 및 물질순환의 핵심기능을 하는 기능그룹으로써, 생태변동 모델화를 위한 핵심정보를 제공

○ 미소플랑크톤 분야 장기 모니터링을 통해 생물생산과 기후변화 조절 능력의 변화를 파악 기후변화 대응을 위한 사회적 비용을 줄이는데 기여

○ IPCC 제5차 종합보고서(2014) 등 앞으로 더욱 심화될 환경변화의 경고에 대응하여 구체적이며 과학적인 예측가능한 생태계변동 정보를 제공하여 대안수립의 사회적 공감대 형성에 필요

○ 기후변화가 진행됨에 따라 북서태평양 및 한반도 해역에서도 해양환경의 급격한 변화가 관찰되고 있으며(그림 8), 이를 진단 및 예측하기 위하여 해양-대기 상호작용, 해양대기물질순환, 엘니뇨와 라니뇨의 확장범위, 극지방 빙하 감소 등 다양한 각도의 연구가 중요함.

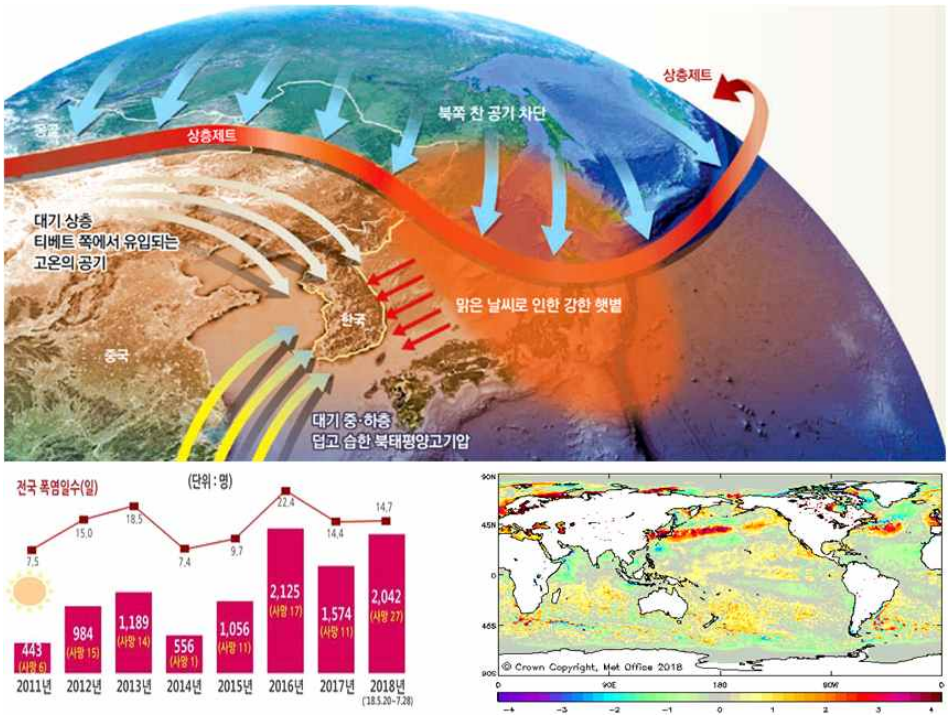


그림 8. 기후변화에 따른 한반도 주변해역의 이상기후 및 고수온환경

○ 식물플랑크톤은 1차생산자로 담수 및 해양의 먹이망구조에 지대한 영향을 미치며, 해양환경 변화를 감지할 수 있는 기후변화 지표종으로 활용 가능함. 또한 전 지구적 규모 산소생성의 절반을 담당하고, 매일 1 억 톤의 이산화탄소를 고정하여 탄소 순환에서 핵심적인 역할을 함.

○ 하지만, 우리나라에서는 1970년대 이후 산업 발달과 함께 연안부영양화로 유해적조(HABs; Harmful Algal Blooms)의 발생빈도가 증가하여, 연안 생태계의 교란과 심각한 경제적 손실을 야기함(그림 9).

○ 국내 유해적조 원인 생물인 Cochlodinium polykrikoides은 70년대 초반 출현하여, 거의 매년 대규모 적조가 발생함. 현재까지 누적 경제적 피해금액은 양식어장 치어기준으로 산정할 경우 1500억에 달하는 것으로 추정됨.

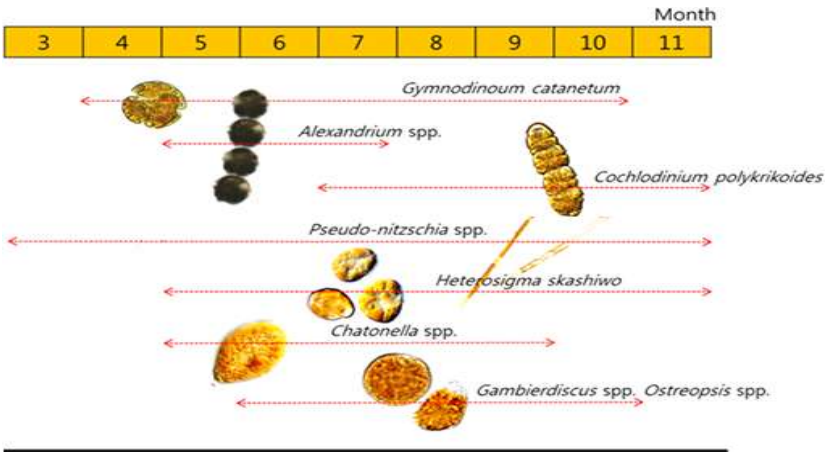


그림 9. 한국 연안환경에서 출현하는 다양한 유해적조 원인 종과 출현 시기

○ 세계자연보전연맹(IUCN)에 의하면, 외래해양생물종의 생태계교란 및 경제적인 피해액은 전 세계적으로 매년 수천억 달러에 달하는 것으로 추정함. (예시: 모나코 수족관에서 빠져나간 녹조류로 인해 지중해 토종 서식처의 97% 파괴됨. 하와이에서는 91종 이상의 외래유입생물(IMP)가 유입되어 진주만 생태계 교란됨, 미국 샌프란시스코만에서는 아시아산 홍합이 유입되어 토착서식지의 황폐화 및 수산자원 치명적 타격)

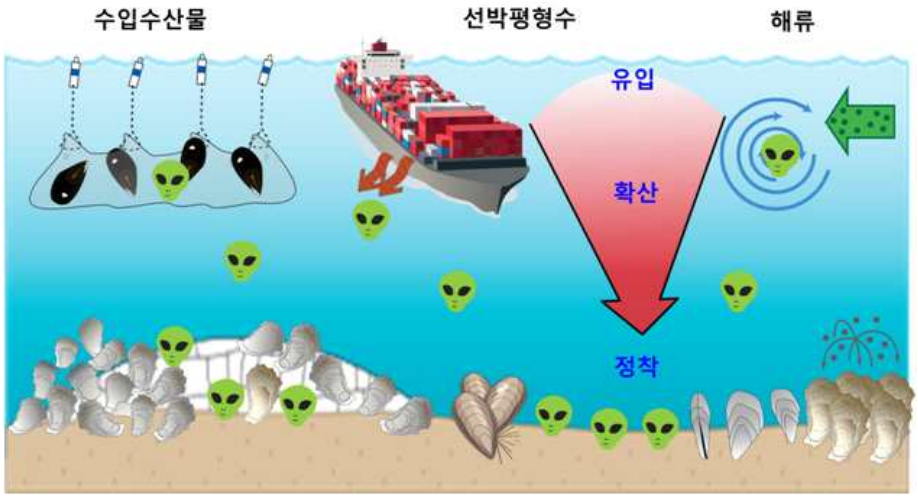


그림 10. 기후변화 및 인위적인 교란에 의한 외래생물 유입, 확산, 정착 기작

○ 최근 한반도 인근 해역에서, 지구온난화 및 기후변화의 가속화로 아열대기후 북방한계선의 북상으로 해양생태계의 regime shift가 가속화되고 있음. 따라서 열대 및 아열대 기원 생물종의 유입가능성이 매우 높은 해역(제주도, 남해안,

동해안)을 중심으로 지속가능한 모니터링 체계의 구축이 적실함. 특히, 중간 기착지 역할에 중요한 남해안은 9월부터 쿠로시오 해류기원 대마난류 영향을 강하게 받고 있어, 외래기원 유해생물의 유입에 대한 정기적/장기적인 모니터링시스템이 필요함.

○ 해양 및 연안 환경에서 인위적 오염 및 교란과 함께 기상이변에 따른 지구온난화 및 자연재해는 앞으로 수십 년 동안 가속화 될 것으로 예상됨(그림 11). 이에 대응하는 차원에서 국가재난방제 대응책과 함께 해양 환경 변화에 따른 해양생물상의 변동특성을 시계열모니터링과 상호작용에 근거한 연안생태계 관리 및 대응방안이 절실히 요구됨.

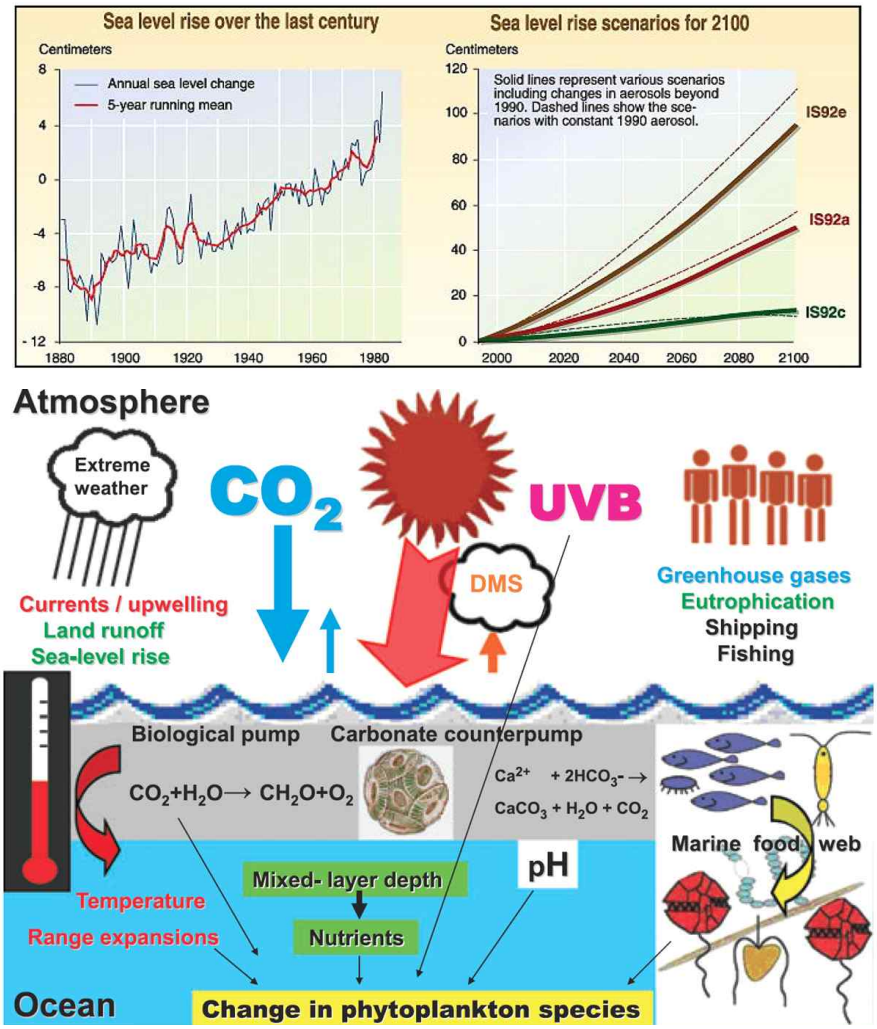


그림 11. 물리화학적 기후변화와 식물플랑크톤 군집구조와의 상호작용에 관한 모식도

○ 기후 및 환경변화에 따른 한국 주변해역 해양생태계 변화 감시 및 진단이 필

요

○ 중형동물플랑크톤의 생태 특성은 해양환경 변화에 민감하기 때문에 해양생태계 변화를 진단하고 예측하기 위해 이들에 대한 시계열 자료 축적이 필요

○ 부산항은 KIOST 연구원이 위치한 인접 해역으로서 부산 지역 사회의 해양 및 수산분야의 발전과 현안 문제 대응을 위하여 KIOST 중심의 부산항 해양생태계의 과학적 자료 축적이 필요함

○ 중형동물플랑크톤은 기초생산자인 식물플랑크톤을 섭식하여 보다 상위영양소비자에 속하는 어류, 해파리 등에 에너지를 전달함으로써 해양생태계를 유지하는 중요한 중간 고리 역할을 담당하고 있음.

○ 성장, 사망, 분포, 다양도 등을 포함하는 중형동물플랑크톤의 개체(population) 및 군집(community) 변동은 해양생태계 구조에 영향을 미치고 있음. 또한, 이들의 연간 변동은 수문기후(hydroclimate) 영향력에 대한 해양생태계의 통합 반응을 빈번하게 반영하기 때문에 전 지구적 온난화와 연관된 환경 변화의 중요한 지시자로 인식되어 있음 (Heys et al., 2005).

○ 중형동물플랑크톤의 연간 변동에 대한 장기모니터링은 환경변화와 해양생태계 간의 상호작용을 이해하기 위한 유용한 정보를 제공하고 있음(Beaugrand, 2003; Perry et al., 2004; Hays et al., 2005; Chiba et al., 2006; Richardson, 2008; Mackas and Beaugrand, 2010). 이러한 주요한 요인은 1) 해양생태 먹이망 내에서의 중요한 중간고리 역할 수행, 2) 전 세계 해역에서 개체수가 풍부하고 상호비교 가능한 샘플링방법에 의해 정량화가 가능, 3) 짧은 생활사(<1년)로 인해 해양생태계 연간 변화 분석에 유용, 4) 기후 및 해양환경 변화에 비교적 빠르게 반응, 5) 어류의 주요한 먹이 자원으로 상업적 어류자원의 변동성 이해 가능 등을 둘 수 있음.

○ 연안역에서의 중형동물플랑크톤 변동은 수괴 자체의 무생물적 및 생물적 요인의 영향을 받음과 동시에 river flow, pollution, hypoxia, blooming, overfishing, eutrophication 등과 같은 지역적인 요인들(local factors)의 영향을 받고 있다. 또한, 기후변화 요인 (warming, acidification, sea-level rise 등)들의 영향도 동시에 받고 있음(그림 12). 일반적으로 지역적인 요인들과 기후변화 요인들이 중첩되어서 영향을 주기 때문에 연안생태계 변동의 원인을 찾기가 매우 어려운 상태임(Turner et al., 2011).

○ 생태적, 경제적, 사회적 가치가 높은 연안역은 지난 수십 년 동안 전 세계 다양한 지역에서 주요한 관심을 받아왔으며, 여러 장기모니터링 프로그램(>10년)을 통해 변동성 높은 연안생태계 변화를 진단 및 예측하고 있음. 그러나 국내에는 중형동물플랑크톤의 생활사를 고려한 단주기적 장기모니터링 프로그램이 절대적으로 부족한 실정임. 따라서 한반도 연안역의 생태계 변화를 진단 및 예측하고, 효율적인 생태계 관리를 위한 장기모니터링 프로그램의 필요성이 대두됨.

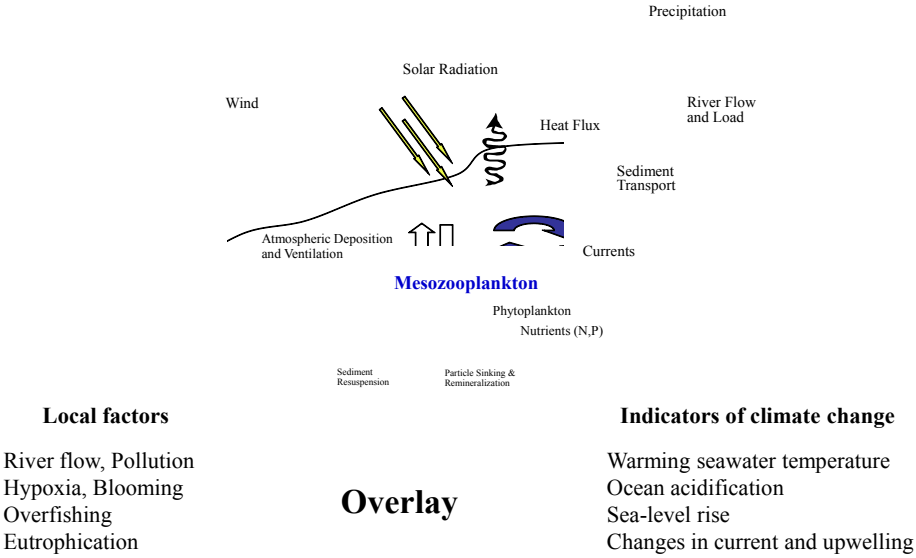


그림 12. 연안역에서 중형동물플랑크톤 변동에 영향을 미치는 다원적 환경 요인

○ 해양생태계에 대한 분석과 이해는 그 구성원 간의 먹이사슬 관계, 먹이단계에 따른 에너지 흐름 정도, 영양염과 탄소 순환량, 생물량/자원량 평가 등 기능적 관점의 접근과 특정 시기에 출현하는 생물의 종류와 그 상대적 빈도를 평가하는 구조적 관점의 접근이 있음. 장기 모니터링은 특히 생태계를 구성하는 생물들에 대한 장기 시계열자료를 확보함으로써 이 종들의 출현여부와 그 빈도의 변동과정을 파악하여 향후 그 변화를 예측하기 위해 실시함.

○ 그동안 대부분의 생태계 연구가 기능적 관점에서 실시되어 먹이단계에 따른 에너지 흐름을 모사하는 Ecopath/Ecosim 모델 등이 개발되어 널리 이용되고 있으나 생태계구조의 관점에서 개발된 모델은 거의 없음: 이에 따라, 본 연구에서는 우리나라 연안의 특정 정점에서 출현하는 동·식물플랑크톤과 환경요소에 대한 장기 모니터링을 통해 1) 동·식물플랑크톤 출현종 정보와 환경요소에 대한 객관적인 시계열자료를 확보하고, 2) 이 자료를 다차원 빅데이터 분석, 확률과정과 기계학습(딥러닝) 모형 분석을 통해 각 생물종의 종출현빈도모델(Species Occurrence and Abundance Model, SOAM)을 개발하며, 3) 우점종들의 SOAM을 통합하여 모니터링 해역의 생태계구조변동모델(Ecosystem Structure Model, ESM)을 개발하고자 함.

○ 해양생태계에서 출현하는 식물플랑크톤의 종조성과 우점도를 결정하는 주요 요소로는 수온, 영양염, 일사량, 종간 경쟁, 해류와 조석, 장기적 요인으로 기후변화 등을 들 수 있으며, 동물플랑크톤의 경우는 수온, 식물플랑크톤의 종조성과 우점도, 종간 경쟁, 해류와 조석, 기후변화 등이라 할 수 있음.

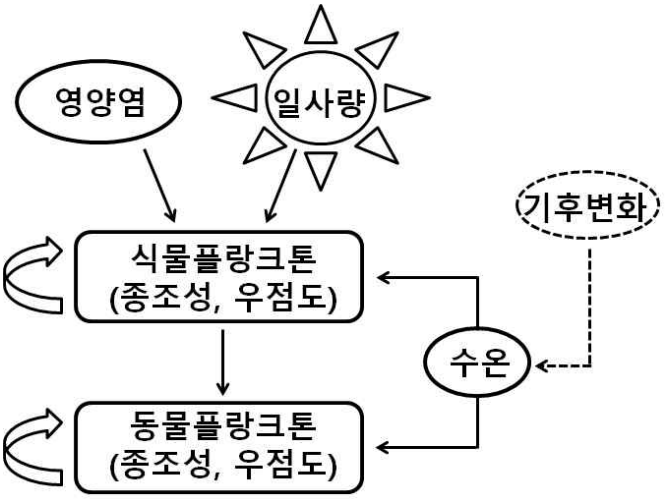


그림 13. 해양생태계 출현 동·식물플랑크톤의 종조성과 우점도를 결정하는 요소 간 연관도

○ 우리 연구원은 2013년부터 통영기지 주변 해역의 한 정점에서 매 2주마다 동·식물플랑크톤을 채집하여 DNA바코드 분석을 실시함으로써 출현종에 대한 객관적인 종동정 정보를 확보해 왔으며, 생태환경 구성요소(수온, 영양염, 일사량 등)에 대한 시계열 자료를 모아오고 있음. 이러한 연구경험과 노하우를 전국 연안으로 확대하여 수 개의 정점에서 장기 모니터링을 실시하면, 기후변화나 연안오염 등 우리나라가 직면한 해양환경 문제가 해양생태계 전반에 미치는 영향과 이에 따른 생태계구조 변동을 파악하고 향후 변화해 가는 방향을 예측할 수 있음.

○ 본 연구의 성과물과 활용성으로는 아직 개발되지 않은 해양생태계 구조 측면의 모델로서생태계를 구성하는 생물종 각 각에 초점을 맞춘 종출현빈도모델(SOAMs)과 생태계구조모델(ESM)을 개발하여, 이를 바탕으로 우리나라 연안생태계의 지표생물과 수산생물종, 동·식물플랑크톤 각 각의 출현시기와 우점도 및 산란시기를 예측하는 것임.

○ 본 연구의 중요성을 정리하면 다음과 같음:

- 기술적 중요성: 객관적 종분류 기술인 DNA메타바코딩을 활용하여 출현하는 동·식물플랑크톤의 종정보에 대한 신뢰성 있는 정밀 시계열자료를 확보하고, 이를 빅데이터 분석 기법을 이용하여 다차원적으로 해석하고 확률과정모형과 기계학습(딥러닝)모형을 적용하여 새로운 모델을 수립하며, 개발된 모델에 대한 검증을 거쳐 특정 시점 기준 1개월 후(단기 예측) 및 3개월 후(중기 예측) 해양생태계 동·식물플랑크톤의 출현종과 빈도, 생태계 구조를 예측하는 기술을 최초로 개발함.
- 경제·사회적 중요성: 개발되는 종출현빈도모델(SOAMs)과 생태계구조모델(ESM)을 통해 연안생태계 지표생물과 수산생물종의 출현시기와 우점도 및

산란시기를 예측하며, 환경오염에 의한 해양생태계 영향과 향후 변화방향 예측, 기후변화에 따른 수온 상승과 아열대생물종 출현의 변화 등을 예측하는 것임.

○ 온대 해역에 위치한 한반도의 주변 해양은 계절적 변화를 반복함. 이러한 해양 환경 변화에 적응한 어류와 대형 해양 동물은 계절적 회유를 하거나, 번식에 적합한 종 고유의 산란시기가 있음. 이와 같은 생태적 발현은 동일종이라도 동해, 서해, 남해 등 해역에 따라 변화함. 따라서 한반도 주변해역에서 해양생물자원의 지속적 이용과 관리를 위해서는 어류를 포함한 대형 해양 동물의 산란생태는 물론, 이들의 계절적 천이의 역동성 규명은 필수불가결한 연구주제임.

○ 한반도 주변해역에서 해양생태계의 역동성 규명은 조사 빈도가 높은 장기 시계열 관측이 절대적임. 이와 함께 종 동정의 정확성은 물론 사후 검정이 가능해야 함. 형태형질 기반의 전통적인 생물종 분석의 정확성은 전문가의 숙련도에 따라 차이가 발생할 수 있기 때문임. 사실 형태형질 기반의 종 동정 오류를 찾는 것은 매우 어려운 것이 현실임.

○ 해양 동물의 산란시기와 산란장을 찾는데 사용하는 주요 지표는 성체의 생식소 발달정도, 알이나 부화 유생의 분포와 출현 시기, 자치어의 이석 등이며, 이 중에서 알은 산란장과 산란시기를 말해주는 직접적인 증거임. 그런데 대부분의 알은 구형이고, 이들의 난경도 1 mm 전후로 유사함. 이와 같은 알의 형태적 유사성 때문에 소수의 종을 제외한 대부분은 종 수준으로 동정하는 것은 매우 어려움(Oh and Kim, 2015; Choi et al., 2018). 알의 대안으로 가장 널리 사용하는 것은 성체의 생식소 발달 분석과 유생의 출현시기와 분포 조사임.

○ 어류를 포함한 대형 해양 동물의 표본 수집은 이들의 유영능력과 서식지와 같은 생태적 특성을 고려해야함. 이들의 생태적 특성 때문에 한 가지 방법으로 연구대상 생물 모두를 채집하는 것은 매우 어려움. 다시 말해서 연구 대상종이 생태적 특성에 차이가 많을 수 록 표본 수집 비용이 상승하고, 이와 동시에 많은 실험동물의 희생이 수반됨.

○ 어류를 포함한 대형 해양 동물상 변화를 장기간 관찰할 때 실험동물의 희생을 최소화해야함. 이를 해결할 수 있는 방법은 해수의 environmental DNA(eDNA)를 분석하거나(Bohmann et al., 2014), eDNA함께 BRUVS(Baited Remote Underwater Video System)와 UVC(Underwater Visual Census)를 이용하는 것임(Boussarie et al., 2018). eDNA는 살아있는 생물 유래의 분변, 분비물, 비늘 등 일종의 삶의 흔적임(Bohmann et al., 2014). 해수에 남아 있는 eDNA 분석을 통해 살아있는 표본을 수집하지 않고도 이들의 출현 유무를 파악할 수 있음(Baker et al., 2017; Lafferty et al., 2018). eDNA를 이용하여 동정한 결과는 생물 종 고유의 유전적 특징과 종간 차이를 활용하기 때문에 분석자간 차이가 적음. 연구대상 분류군에 특화된 분자마커를 이용할 경우 분

석의 정확도가 높아지며, 분석 자료는 사후 검증을 위한 재사용이 가능함. 이와 더불어 수중 카메라를 이용한 BRUVS와 UVC는 eDNA 분석의 한계도 보완할 수 있음(Bohmann et al., 2014).

○ 최근 분자생물학 기술의 비약적인 발전으로 인해 개별 어란의 종 분석이 가능함(Oh and Kim, 2015; Choi et al., 2018). 대량의 혼합 표본 분석에 사용하는 metabarcoding(Djurhuus et al., 2018)은 대량의 혼합어란 종 분석은 물론 다양한 대형 해양 동물의 알 분석에 가장 적합한 방법으로 판단됨. 알을 이용한 산란생태 연구 방법은 성체를 희생시킬 필요가 없으며 표본 수집이 편리하고 분석 비용도 저렴함.

○ 온대해역에서 해양 동물의 출현시기와 산란생태 모니터링은 필연적으로 표본 수집의 강도가 높음. 이와 함께 많은 표본 분석이 필요하고, 분석한 종의 정확성은 연구자간 편차가 적어야 함. 실험에 따른 실험동물의 희생과 고통도 고려해야 함. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 어류 및 대형 해양동물상 조사에 eDNA/RBUVS/UVC를, 이들의 산란생태연구에 분자마커를 이용한 알 분석이 가장 적합한 방법의 하나로 판단됨.

○ 해양환경 변화로 인한 해양생태계 영향은 표영생태계뿐 아니라 비교적 안정적인 환경을 구성하고 있는 저서생태계에도 영향을 줄 것으로 예상되지만, 이에 대한 체계적이고 지속적인 국내 연구는 부족한 실정임.

○ 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity, CBD)에서의 정의한 생물다양성은 종(종간)다양성은 물론이고 하천, 갯벌, 산호초 등의 생태계 다양성도 포함되어 서식지 보전의 중요성도 증대 되면서 급격한 해양환경변화에 따른 해양 생태계의 변동 관측, 예측, 관리의 필요성이 대두됨

○ 삼면이 바다인 한반도의 연근해 해양환경변화가 해양생태계에 미치는 양상을 파악, 규명하여 미래 해양생태계를 체계적 관리 방안을 마련하기 위해서는 장기적인 시계열적 해양관측 조사연구를 통한 과학적 평가가 필요함

○ 우리나라 연안은 사계절 변화가 뚜렷하고 한난류의 교차로 아열대에서부터 한대까지 다양한 생물들이 출현하며, 하천수의 해양 유입과 같이 대륙과 대양의 접점지대에 위치한 특성으로 인해 단위면적당 세계 최고 수준의 해양생물 다양성을 나타내고 있지만 지역별, 시계열별 변동에 대한 연구가 매우 부족한 상황임

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

제 1 절 해양·대기 모니터링 기술개발 현황

1. 해수물리특성 분야

○ 국내에서 해양환경 관련 장기 모니터링을 수행하는 주요기관으로는 해양수산부 산하의 정부기관인 국립해양조사원과 국립수산과학원이 있음. 두 기관은 모두 해양환경의 관측, 관련 정보의 생산과 서비스를 고유 임무에 포함하고 있는 현업 기관으로 국내에서는 50년 이상의 장기모니터링 실적을 보유하고 있으며 2000년대 이후 관측 정점과 항목을 지속적으로 확대하고 있음.

○ 국립해양조사원

- 국립해양조사원은 국가의 수로, 수문 관련 관측과 정보의 생산을 주 임무로 하고 있으며 이의 기초가 되는 조석 관측을 위한 조위관측소 46개소를 운영하고 있으며 실시간 조위 정보 및 조석예보 자료를 제공하고 있음.

그림 14. 국립해양조사원의 실시간해양정보시스템

- 이와 함께 해양관측소 3개소, 해양관측기지 3개소에서 종합적인 해양환경 모니터링을 수행하고 있으며 해양관측부이 35개소에서 생산되는 기본 기상 및

해양환경 정보를 수집, 관리 서비스하고 있음. 또한 10개의 해수유동관측에서 해류를 관측하여 조류와 평균해류를 분석하고 있음.

- 현재 위의 관측 체계들은 대부분 실시간 자동관측체계로 운영되고 있으며 관측자료들은 인터넷을 통한 자료 제공 서비스와 주기별 (분기, 반기, 연간) 분석 결과의 제공 서비스를 병행하고 있음.

○ 국립수산과학원 - 한국해양자료센터(KODC)

- 국립수산과학원은 수산에 관한 조사, 시험, 연구, 지원 등을 주 임무로 하는 현업기관으로 우리나라 해양수산 전반의 기초자료가 되는 정선해양관측 자료의 생산함. 25개 정선의 207 정점에서 격월로 관측되는 수온, 염분 등의 기본 해양자료는 수십 년의 기간이 축적되어 귀중한 모니터링 자료이지만 최근에 들어서는 자료의 한계에 대한 보완이 요구되고 있는 실정임. 현재 연구 추세에서는 보다 높은 시간 해상도와 연직 공간 해상도가 요구되고 있는데 표준수심에서만 제공되는 관측 정보를 필요에 따라 1 m 간격의 수심으로 제공하는 것이 대표적인 요구임. 이 외에도 연안의 43개소에서 일반 기상, 수온, 염분, 해류 등의 자료를 30분 간격으로 제공하기도 함.

그림 15. 국립수산과학원의 한국해양자료센터 홈페이지

2. 일반수질 및 미량원소

○ 해양환경관리법 제9조에 따라 우리나라 연근해의 해양환경 상태 및 오염원의 측정·조사 등을 위하여 해양환경측정망을 구성하고 정기적인 해양환경을 조사하고 있음.

○ 해양환경측정망의 기본구성은 ① 항만환경측정망, ② 연근해환경측정망, ③ 환경관리해역환경측정망, ④ 하구역환경측정망, ⑤ 해양대기환경측정망. ⑥ 오염우심해역 수질자동측정망으로 되어있으며, 계절조사가 수행되고 있음.

○ 항만환경측정망은 전국 무역항(36개 정점), 연안항(8개 정점), 국가어항(6개 정점)에서의 해수, 퇴적물, 해양생물에 대한 조사가 수행되고 있으며, 조사항목 및 시기는 표 1에 나타냄.

○ 부산연안에서의 항만환경측정망은 부산연안 5개, 부산신항 1개정점에서 연간 2회의 조사가 수행되고 있으며, KIOST가 위치한 영도에서의 관측 정점은 존재하지 않음(표 2, 그림 16)

○ 부산 연안 정점을 포함하고 있는 연근해 환경측정망 내 일반수질항목은 연 4회 조사를 수행하기 때문에 계절에 따른 차이 혹은 연변화는 제시할 수 있으나, 이들 수질의 변동요인 파악은 현실적으로 불가능함.

표 1. 해양환경관리법에 따른 항만환경측정망 조사항목 및 시기

구분		조사항목	조사시기	조사정점
해수	일반항목(16)	수온, 염분, pH, DO, COD, TN, DIN (NO_2-N, NH_4-N, NO_3-N), TP, DIP(PO_4-P), SiO_2-Si, SPM, 투명도, Chlorophyll-*a*	2, 8월	50개 정점
		유분	2, 8월	50개 정점
	미량금속(8)	Cu, Pb, Zn, Cd, Cr^{6+}, 총수은, As, CN	2월	26개 정점
해저 퇴적물	일반항목(4)	입도, 강열감량, 황화물, COD	2월	26개 정점
	미량금속(13)	Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, 총수은, As, Ni, Co, Al, Li, Fe, Mn	2월	26개 정점
해양 생물	미량금속(7)	Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, 총수은, As	2월	23개 정점

<비고>
- 해수는 표·저층을 조사하며, 단, 유분, 미량금속은 표층조사
- 유분은 항만 모든 정점에서 조사실시하며, 미량금속의 조사정점은 [7. 측정망별 조사정점] 참조
- 미량금속 조사정점과 퇴적물 조사정점 동일
- 해양생물은 진주담치 및 굴 체내의 미량금속 농도를 추정하여 해양 환경 오염 상태를 진단

표 2. 항만환경측정망 중 부산연안 정점 정보

해역구분	연안명칭 (Code)	정점	북 위	동 경	개략위치 설명	비 고
대한해협 생태구	부산연안 (04)	H04	35° 07′ 24"	129° 03′ 50"	북항동방	미량, 유분
		H05	35° 06′ 13"	129° 02′ 54"	북항서방	미량, 유분
		H06	35° 05′ 35"	129° 01′ 46"	영도대교부근	미량, 유분
		H07	35° 04′ 52"	128° 59′ 44"	감천항 안쪽	미량, 유분
		H08	35° 03′ 17"	128° 58′ 54"	다대포항	미량, 유분
	부산신항	H01	35° 04′ 28"	128° 48′ 05"	부산신항 중앙부	미량, 유분

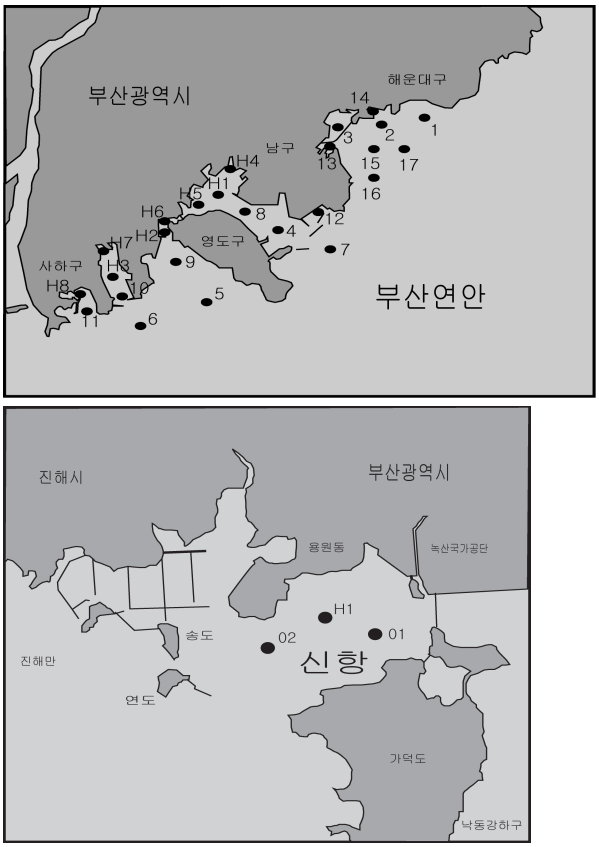


그림 16. 부산 지역 측정망 위치 정보(H표기 정점이 항만환경측정망)

3. 무기탄소 인자 모니터링

○ 국내 연안에서의 이산화탄소 흡수량 변동에 관한 연구는 거의 찾아볼 수 없고, 해양 산성화 연구는 일부 진행된 바 있음.

- 진해만에서 4계절 수층 탐사를 통해서 계절에 따른 해양 산성화 경향 변화를 연구함(Kim et al., 2013). 특히 여름철 저층해수의 탄산칼슘(aragonite와 calcite)에 대한 포화도가 매우 낮아 불포화된 지역이 관측되었으며, 이때 pH 농도도 매우 낮았음. 이는 봄철에 표층의 식물플랑크톤 번성으로 생긴 유기물의 저층 산화와 여름철 성층화의 복합 영향인 것으로 밝혀짐.

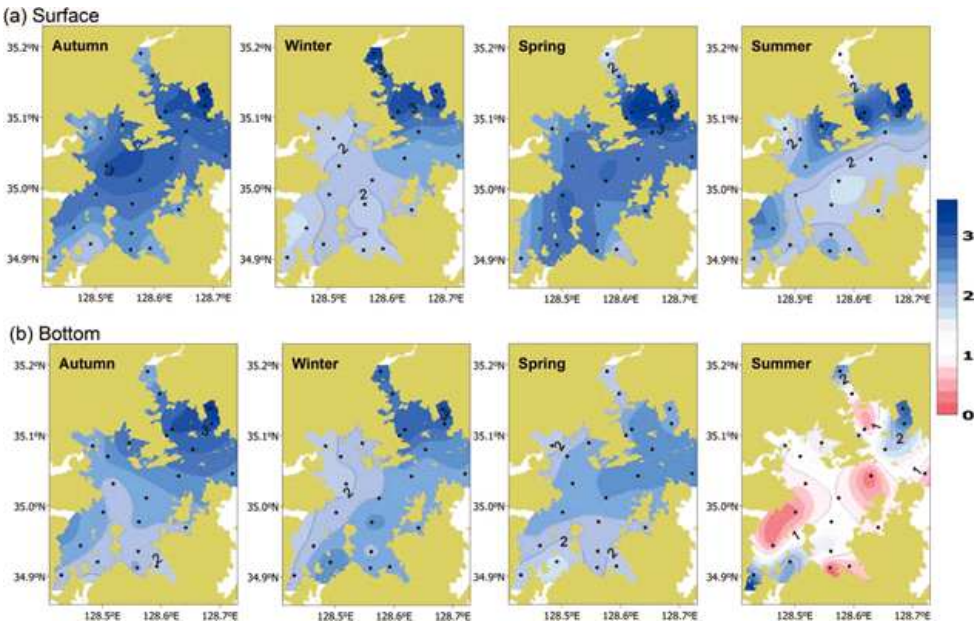


그림 17. 진해만 표층과 저층 해수의 탄산칼슘(aragonite) 포화도. 1 이하 불포화 상태(Kim et al., 2013)

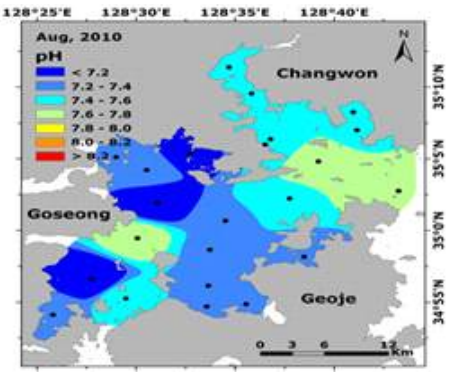


그림 18. 여름철 저층 pH 분포도(Kim et al., 2013)

- 광양만의 경우 진해만과 마찬가지로 봄, 가을, 겨울에는 표층과 저층해수가

탄산칼슘(aragonite와 calcite)에 대해 과포화상태인 반면, 여름에는 진해만과 달리 표층과 저층 해수 모두 탄산칼슘(aragonite와 calcite)에 대해 불포화되어 있었음.

○ 국외에서는 연안에서의 이산화탄소 흡수량 변동과 해양 산성화 연구가 활발히 진행되고 있음.

- 벨기에 연안 지역에서의 탄소 인자 모니터링 결과 계절 변동뿐만 아니라 연변동도 큰 것으로 나타남(Borges et al., 2008).

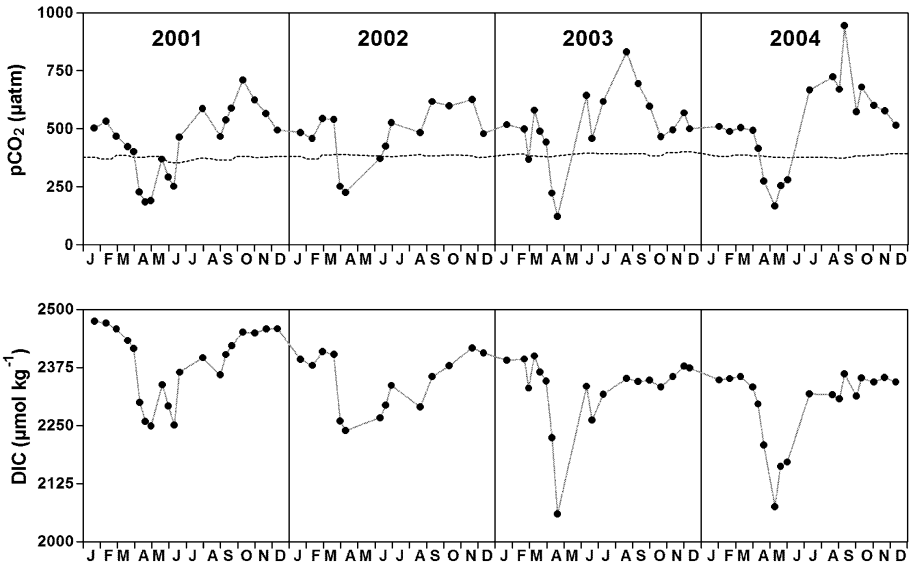


그림 19. 벨기에 연안 지역(Scheldt)에서의 해양 표층 이산화탄소 분압 및 총 용존 무기탄소의 시계열 변화(Borges et al., 2008)

- 캐나다 서부 연안에서 관측된 바에 따르면 연안 지역에 따라 해양-대기 이산화탄소 교환량이 크게 다르게 나타났으며 지역과 계절에 따른 변동이 매우 큰 것으로 보고되었음(Evans et al., 2012)

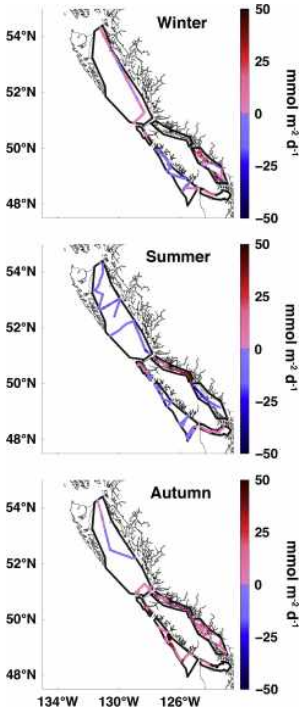


그림 20. 계절에 따른 해양-대기 이산화탄소 교환량 분포
(Evans et al., 2012)

- 미 해양 대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서는 미 연안에서 부이를 이용한 해양 산성화 장기 모니터링을 수행 중이며, 주요 자료는 실시간으로 홈페이지에 표출되어 값 변동을 살펴볼 수 있도록 하였음.

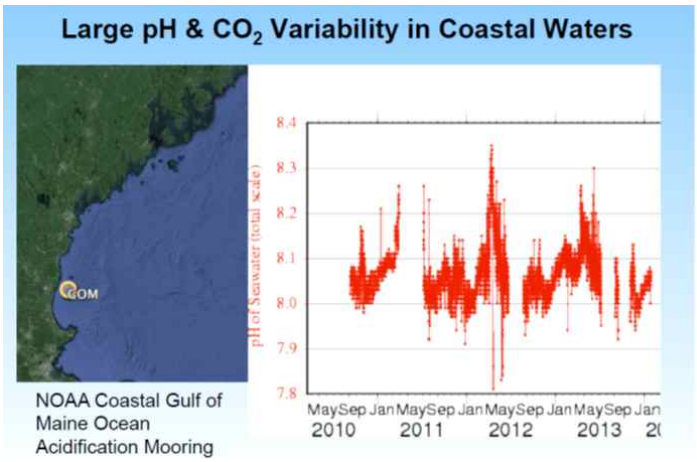


그림 21. NOAA가 Gulf of Maine에서 운용 중인 해양 산성화 부이의 실시간 관측 자료
(http://www.pmel.noaa.gov/co2/story/GOM)

- 부영양화 등으로 수층으로의 유기물 공급이 높은 연안 지역에서는 수층에 산성을 띄는 유기물 분해산물이 축적됨에 따라 해양 산성화가 촉진되며, 특히 산소가 결핍되기 때문에 이곳에 서식하는 해양생물은 이중고를 겪게 됨. Cai et al. (2011)은 미국 멕시코만의 총 용존 무기탄소와 총 알칼리도 자료를 분석하여 이와 같은 현상을 밝힘. 유기물 분해로 발생한 산성 물질이 해수의 pH 변화 완충능력을 감소시켜 해양 산성화를 가속화시키는 것으로 나타남.

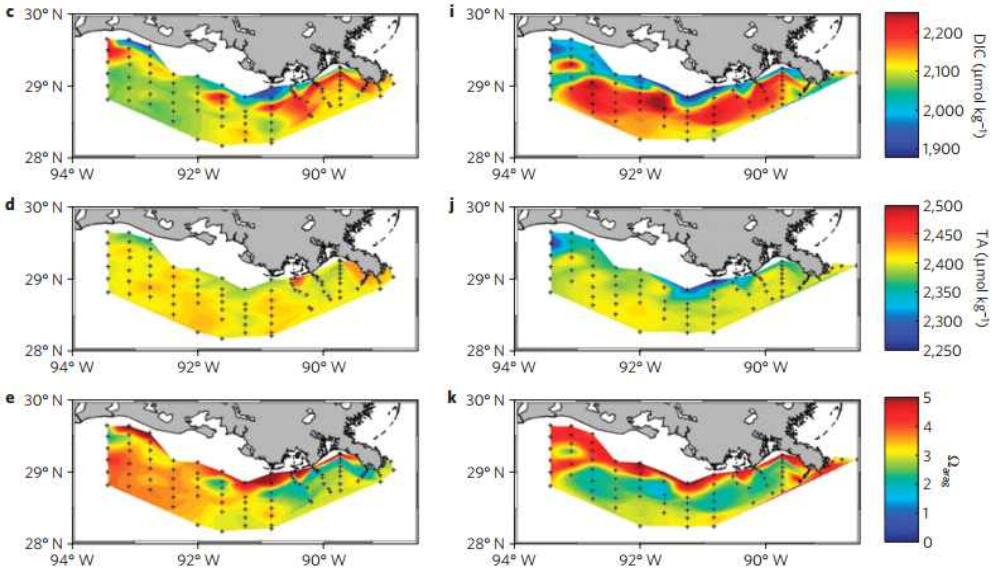


그림 22. 유기물 분해에 의해 해양산성화가 가속화되고 있는 미국 멕시코만의 총 무기탄소, 알칼리도, 아라고나이트 포화도 분포(Cai et al., 2011)

- 미국 서부 도시와 인접한 연안에서 해양 산성화 관측이 진행된 바 있으며, 담수와 해수간의 혼합, 오염에 의한 유기물 부하 증가와 수층에서의 재무기화 등이 해양 산성화에 복합적인 영향을 미치고 있는 것으로 드러남.

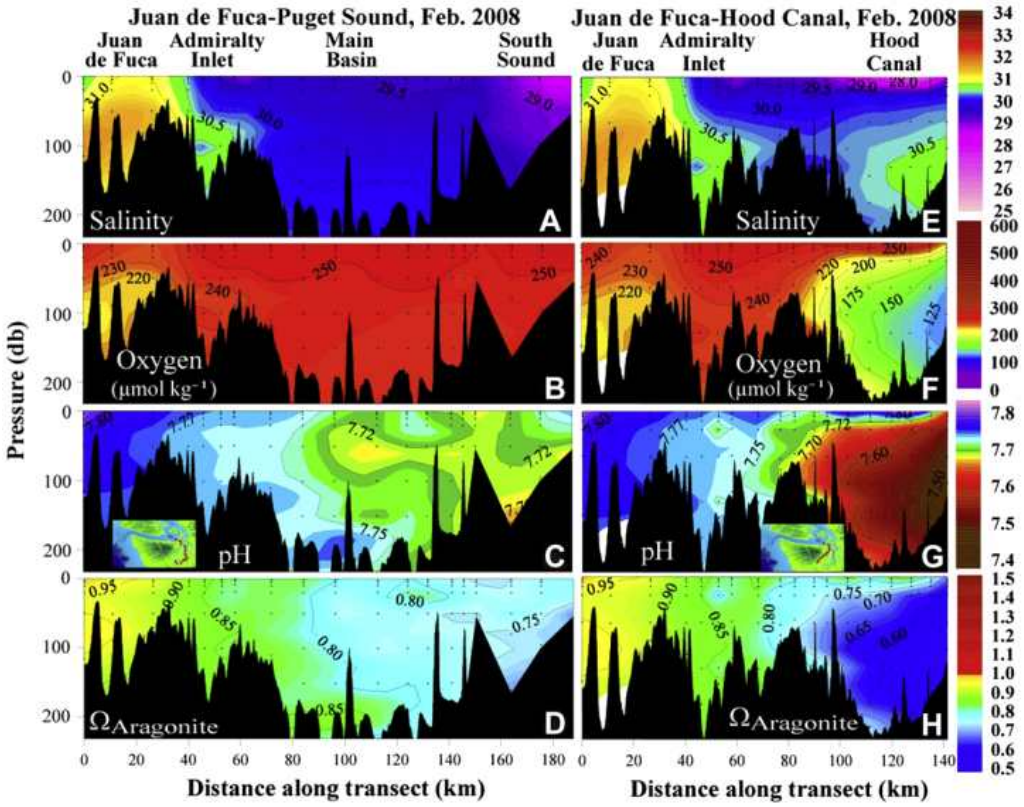


그림 23. 미국 서부의 Juan de Fuca 해협에서 Puget Sound 해역의 염분, 산소, pH, 아라고나이트 분포도(Feely et al., 2010). 담수와 유기물분해에 의한 아라고나이트 포화도 변화를 엿볼 수 있음.

4. 해양 이산화탄소 분압 시계열 모니터링

○ 해수 이산화탄소 분압 측정 연구는 90년대 중반 시작되었으나 선상에 설치된 underway 시스템을 이용해 항적에 따른 표층 해수와 해양 대기 이산화탄소 분압 관측과 수층 시료의 용존무기탄소와 총알칼리도 분석 위주로 수행되었음.

○ 이어도 해양과학기지와 제주도 연안에서 수중계류형 해수 이산화탄소 분압 측정을 시도해 일부 관측을 수행하였으나 관측 지속기간이 상대적으로 짧았으며, 수중계류형 장비 특성상 기기의 검·보정이 어려운 단점이 있었음.

○ 우리원의 태평양해양과학기지에서는 2011년부터 NOAA PMEL과 공동으로 Chuuk의 atoll 내에서 산호초해역 관측시스템인 Chuuk K1을 운영하고 있음.

그림 24. 2011년부터 NOAA PMEL과 공동운영중인 Chuuk K1

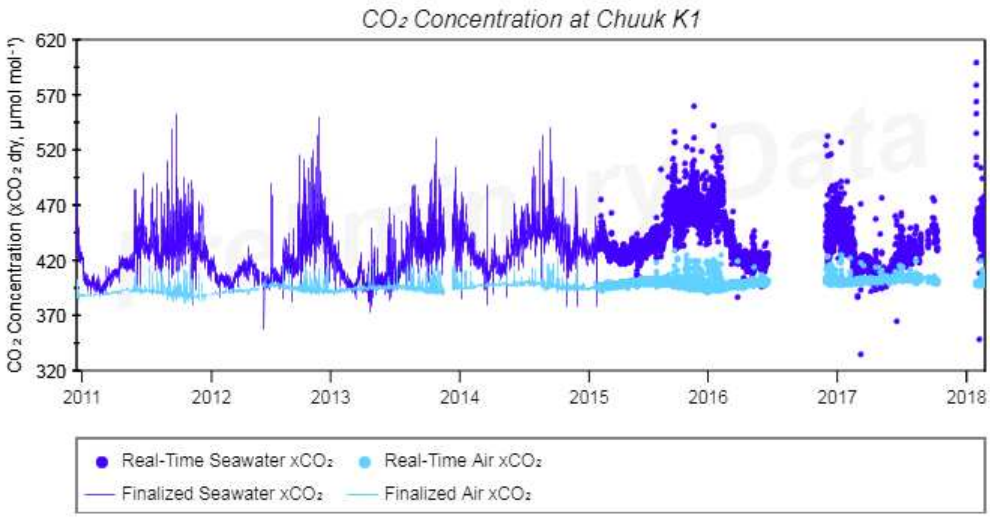


그림 25. Chuuk K1의 관측결과

○ 소청초 과학기지 해역에서 MAPCO2 시스템 운영을 시도하였으나 시스템 분실로 운영이 중단되었으며, 현재 재설치를 위한 준비를 진행중임.

○ 통영해양과학기지 인근에서 2017년 7월부터 18개월간 MAPCO2가 장착된 표층 부이를 운영을 통해 표층 해수와 해양 대기의 이산화탄소 분압 시계열 모니터링 자료를 획득함. 어로활동이 제한된 보호수면 내에 위치해 분실·파손의 위험 없이 안정적으로 모니터링을 진행할 수 있는 공간적 장점이 있음.

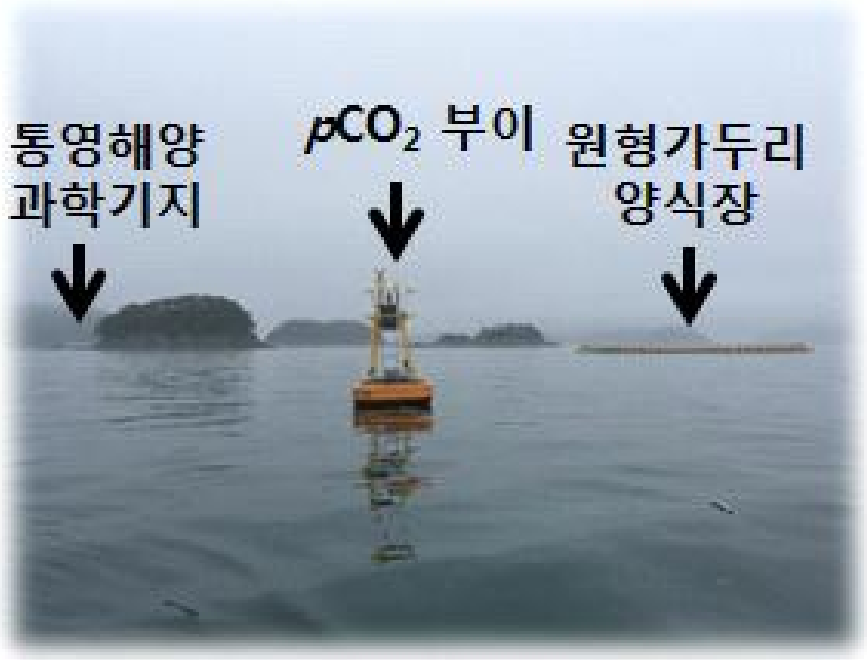


그림 26. 통영해양과학기지 인근에 설치한 pCO2 관측 부이

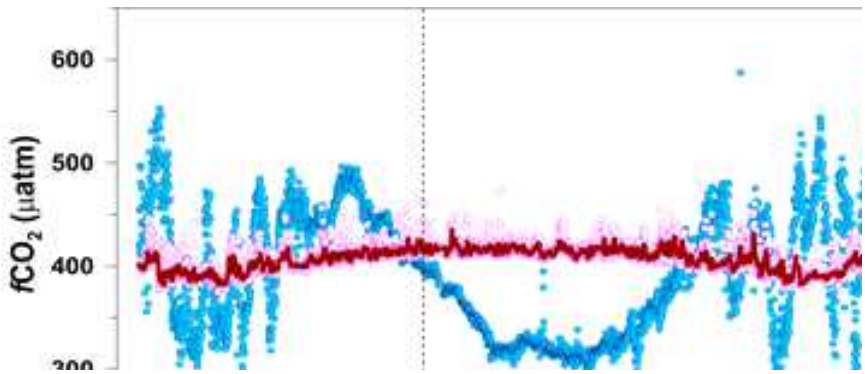


그림 27. pCO_2 부이에서 관측한 표층 해수와 해양 대기 이산화탄소 분압 시계열 모니터링 결과

○ 해수 이산화탄소 분압의 시계열 모니터링은 초기 underway 시스템을 연안 인접시설에 설치한 뒤 주변해수를 끌어들여 측정을 진행하였으나, 2004년부터 미국 해양기상청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration) 태평양해양환경연구실(PMEL, Pacific Marine Environmental Laboratory)에서 전지구 해양 관측 시스템(GOOS, Global Ocean Observing System)의 일부로 이산화탄소 분압 계류관측을 시작하게 되었음. MAPCO2 (PMEL moored pCO2 system)라 불리는 시스템은 2009년 관측기기제작사로 기술이전되어 상용화 되었음.

○ 현재 NOAA PMEL에서는 미국 동부와 서부 연안해역에 16개, 대양에는

TAO (Tropical Atmosphere Ocean) Array로 7개, WHOTS (WHOI Hawaii Ocean Time-series Stations) 등 11개, 열대 산호초해역에 11개의 이산화탄소 계류관측을 진행하고 있음.

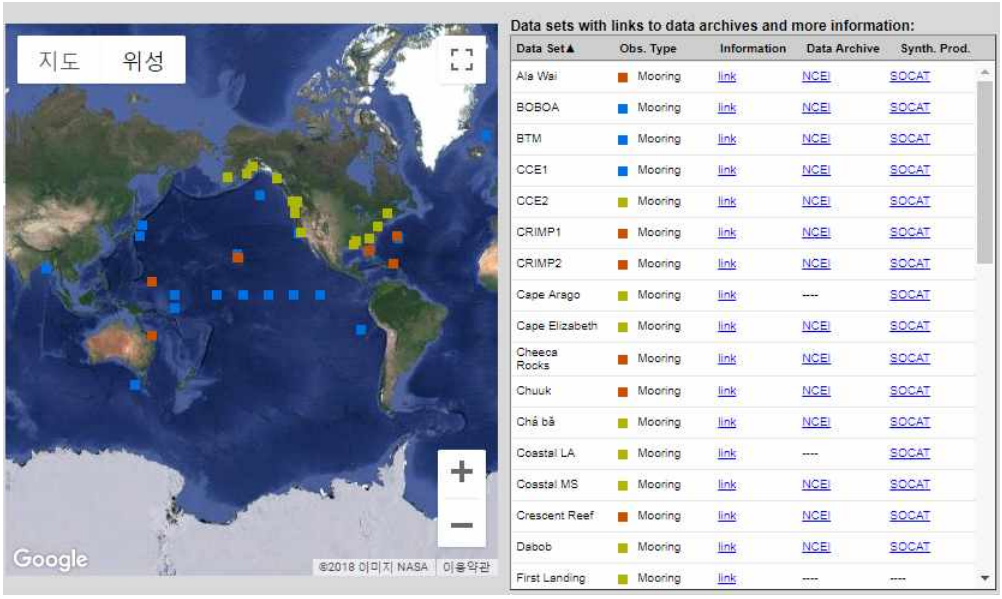


그림 28. NOAA PMEL에서 운영중인 이산화탄소 계류 측정소 분포도

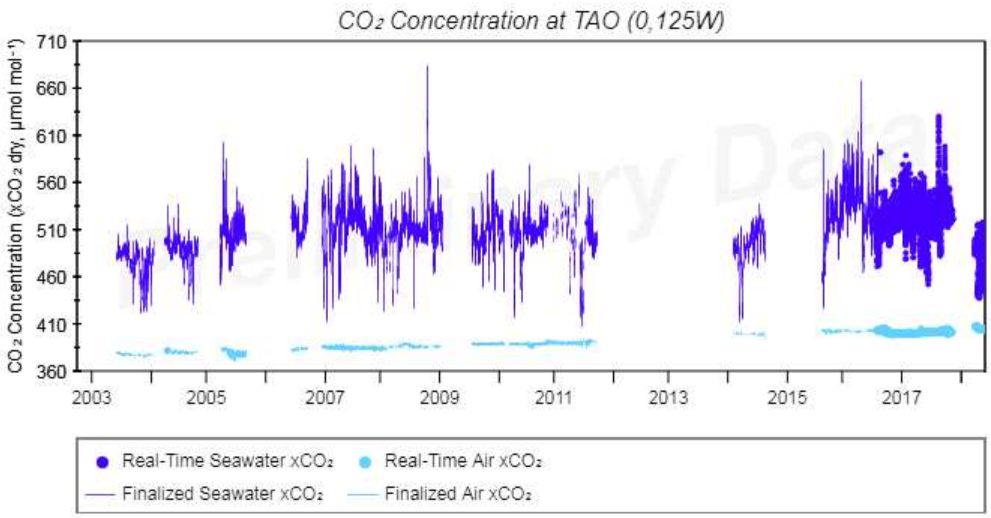


그림 29. NOAA PMEL에서 태평양 적도에서 운영중인 TAO 계류장비 관측결과 예

5. 대기 침적 모니터링

○ 충남대, 서울대 등의 연구진은 강원도 동해시 및 동해 해상에서 관측한 자료

를 통해서 대기를 통해 바다로 유입되는 물질공급량이 유의미함을 밝혔고, 특히 질소의 경우에는 해양 신생산력의 10% 정도를 차지하는 것으로 추정하였음(Kang et al., 2009, 2010, 2011).

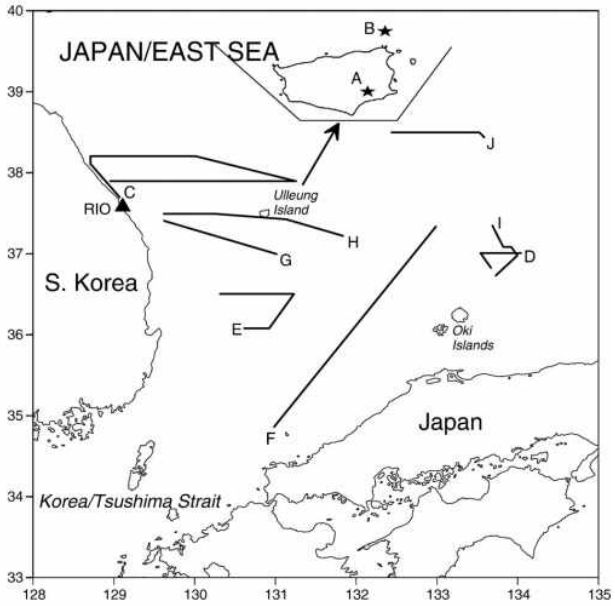


그림 30. 동해 해상 및 육상 대기침적 관측 지역
(Kang et al., 2009)

○ 과거 수십 년간 측정된 자료를 바탕으로, 동아시아 기원의 오염물질이 태평양 해역으로 이동하여, 해양의 질산염 농도를 변화시켰다는 연구결과가 국내 연구진에 의해 연달아 Science 저널에 발표되었음(Kim et al., 2011, Kim et al., 2014, 방송 및 일간지 보도 다수)

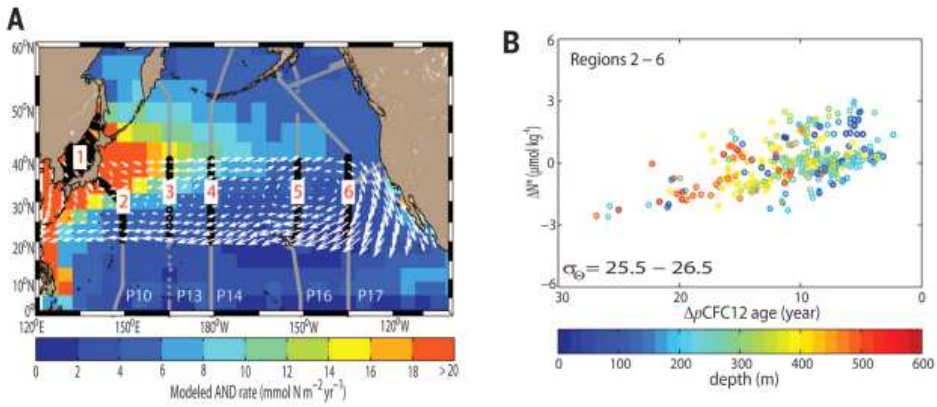


그림 31. (A) 북태평양의 대기침적량 모형결과, (B) CFC-12로 추정한 해수의 생성연대와 N*(인산염에 대한 질산염의 상대적 양)간의 관계

○ 위성자료와 에어로졸 인덱스를 분석하여 황사시기에 습식침적을 통한 철을 포함한 영양염의 공급이 동해의 봄철 대번성을 앞당기는 것으로 밝혀짐 (Jo et al., 2007).

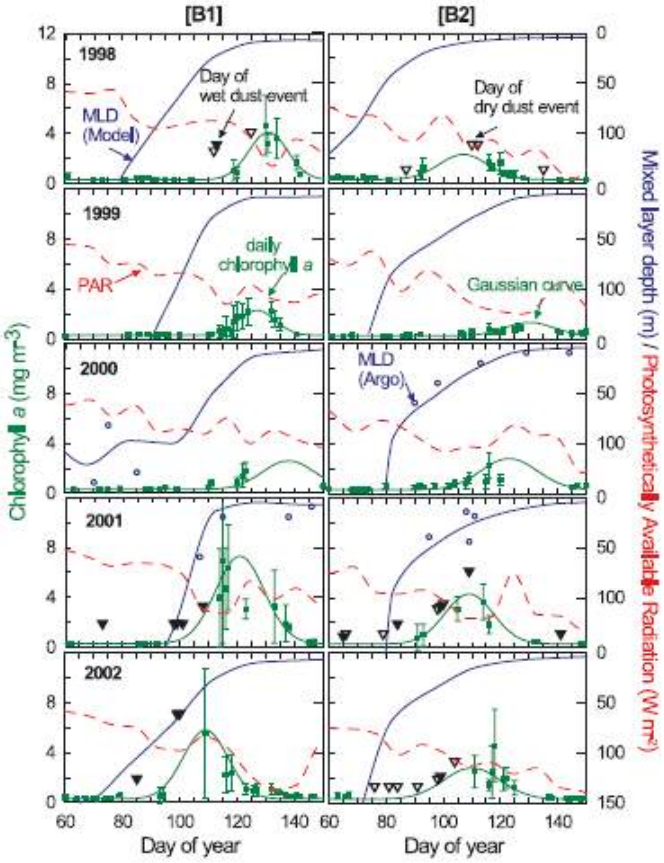


그림 32. 황사 이벤트에 따른 클로로필-a, 혼합 깊이, PAR 변동

○ 극지연구소 연구팀은 2016년 2월에 발표한 논문을 통해서 극지역의 얼음의 의한 요오드 화합물(I2, I3-) 발생 기작을 최초로 밝혔음. 이는 비생물학적인 요오드 화합물 배출 매커니즘을 새롭게 발굴했다는 점에서 의의가 큼(Kim et al., 2016, 방송 및 다수의 국내일간지 보도)

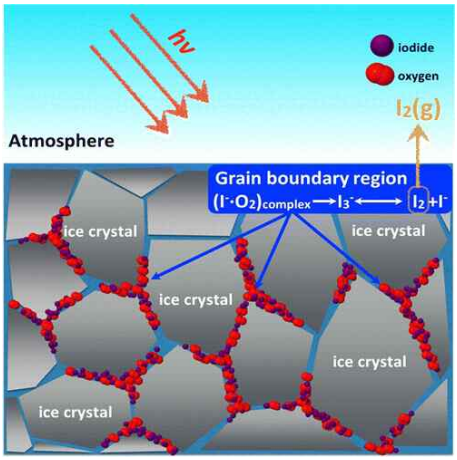


그림 33. 극지역에서 얼음 형성에 의한 요오도 화합물의 대기배출 과정 모식도 (Kim et al., 2016)

○ 최근에 와서, 관련 연구가 본격화되었기 때문에, 국외에서도 해양에서의 관측 연구가 충분하지 못한 실정임. 현재는 GEOTRACES와 같은 국제협력프로그램 및 SOLAS (Surface Ocean Lower Atmosphere Study)와 같은 과학자 모임에서 중요한 연구주제로 선정하여 그 중요성을 강조하고 있으며, 동시에 연구자들의 관심도 유도하고 있음. 향후 지속적인 연구 확대가 예상됨.

○ SOLAS에서는 2015-2025년 기간 동안의 미래 10년 연구계획에서 대기침적이 해양생지화학에 미치는 영향, 해양-대기 에어로졸에 관련된 연구를 핵심연구 테마로 선정하여 발표하였음.

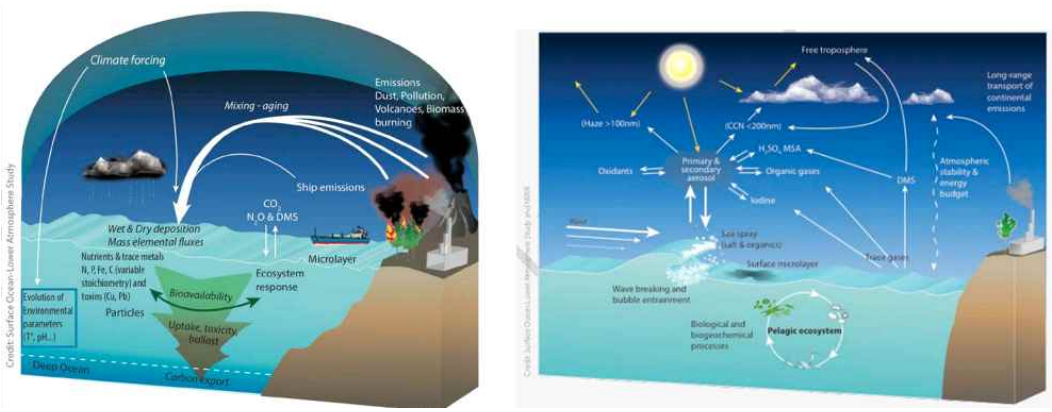


그림 34. SOLAS에 제시한 해양-대기 물질교환 프로세스 (좌) 대기침적, (우) 해양 배출물질(요오도 포함)에 의한 대기 에어로졸에 미치는 영향 (http://www.solas-int.org/)

○ GEOTRACES는 해양의 미량원소와 동위원소비율에 초점을 맞추고 진행되는 국제협력프로그램으로, 해양-대기 물질교환을 통해 유입되는 철과 같은 미량

원소들을 연구하는 것이 핵심 연구주제 중에 하나임.

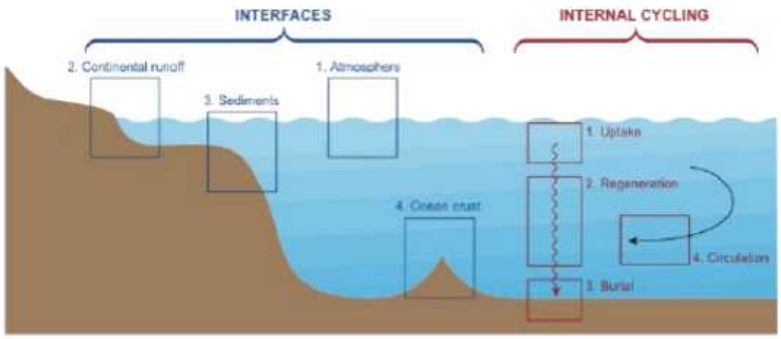


그림 35. GEOTRACES 연구테마 (www.geotraces.org)

○ SOLAS와 COST (European Cooperation in Science and Technology)는 해양 습식 및 건식 침적 자료를 취합하여 공개하는 활동을 주도적으로 진행하고 있음. 에어로졸 분야의 경우에는 특히 GEOTRACES와 유기적으로 협력하고 있음.

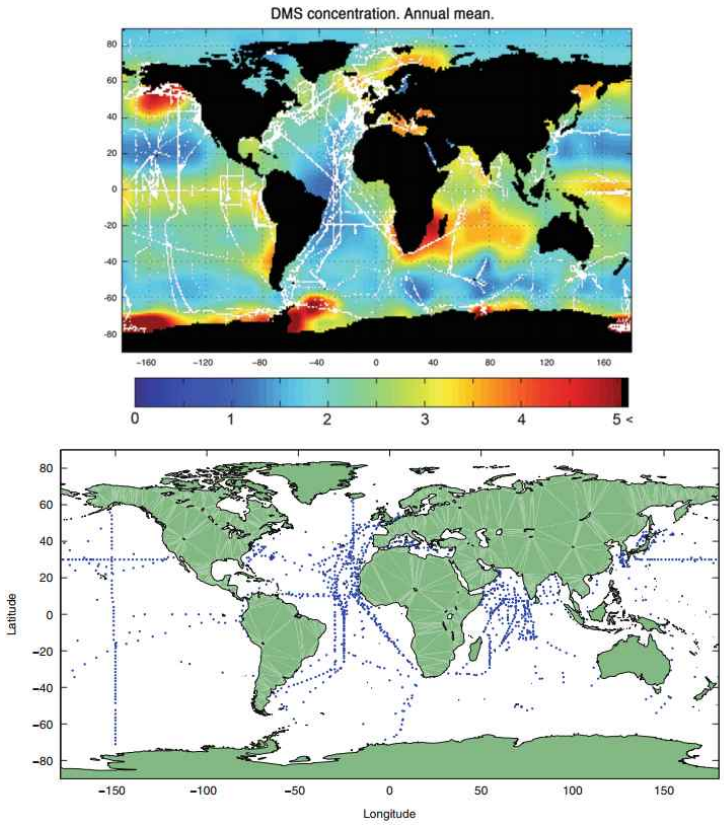


그림 36. SOLAS와 COST가 주도하고 있는 (상) DMS 및 (하) 에어로졸 데이터 베이스의 자료 현황

○ 독일의 GEOMAR 연구소는 SOLAS와 COST의 지원 아래 “Halocarbons in the Ocean and Atmosphere (HalOcAt) database project”를 진행 중에 있음. 이 프로젝트를 통해서 해양의 요오드 관련 화합물 측정 정보를 수집하고 있음.

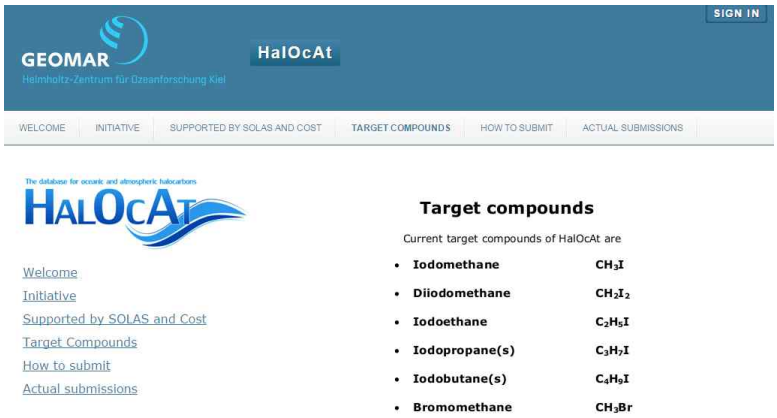


그림 37. HalOcAt 홈페이지 및 목표 물질 리스트 일부분

○ Mahowald et al. (2008)는 질소와 함께 해양 생지화학에서 중심적인 역할을 하는 인(Phosphorus)의 해양 측정 자료를 취합하여 발표하였음. 전 세계적으로 측정 자료가 매우 부족한 상황이고, 그 중에서도 태평양은 대서양에 비해서 관측의 빈도가 매우 낮은 상황임.

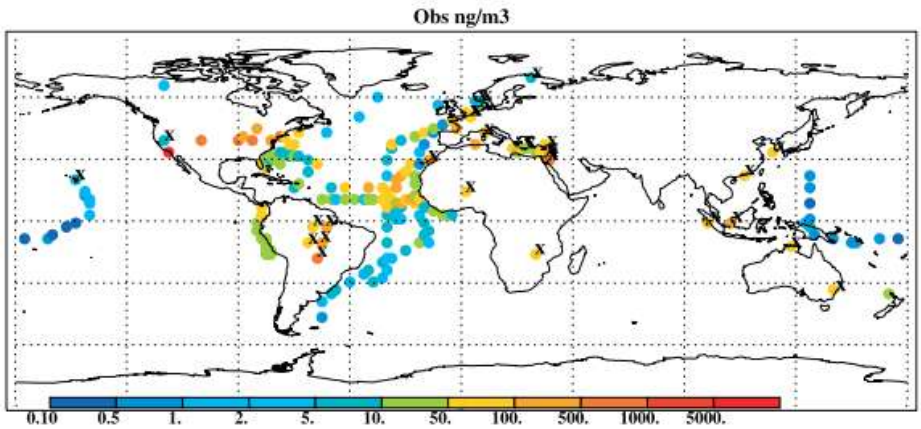


그림 38. 대기 중 총인(total phosphorus)의 관측 자료 분포 및 농도

○ Martino et al., (2014)는 서태평양에서 질소, 인, 철의 침적이 질소고정을 촉진하여 이 해역에서의 생물생산력을 증가시킬 수 있다고 밝혔음. 이 연구 그룹(University of East Anglia의 Baker and Jickells)은 지난 10여년 이상의 기

간 동안 대서양에서 대기 침적량 관련 연구를 선도적으로 이끌어 왔으며, 그 중요성을 밝힌 다양한 연구결과를 발표하였음 (Spokes et al., 2001, Baker et al., 2003, 2006a, 2006b, Baker et al., 2007 등)

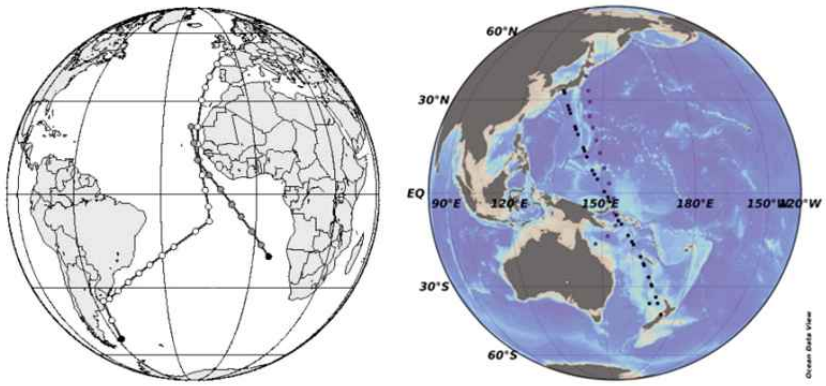


그림 39. (좌) Baker et al., (2003)의 대서양 연구 지역 및 (우) Martino et al., (2014)의 태평양 연구지역

○ University of Maiamid의 Propspero 교수의 연구그룹은 태평양 및 대서양의 질소, 황 화합물의 기원과 농도변화 연구 등을 1980년대 후반부터 진행해왔음 (Prospero et al., 2003 등 다수 논문).

○ 일본의 Uematsu 연구 그룹은 동중국해에서 대기 침적으로 인한 해양으로의 질소공급량이 양쯔강에 의한 공급량보다 크다는 연구결과를 발표했으며 (Nakamura et al., 2005), 이후에도 북서태평양 및 태평양을 횡단하는 연구를 통해서 대기를 통한 해양으로 물질 플럭스에 대한 연구결과를 다수 발표하였음 (Jung et al., 2011 and 2013).

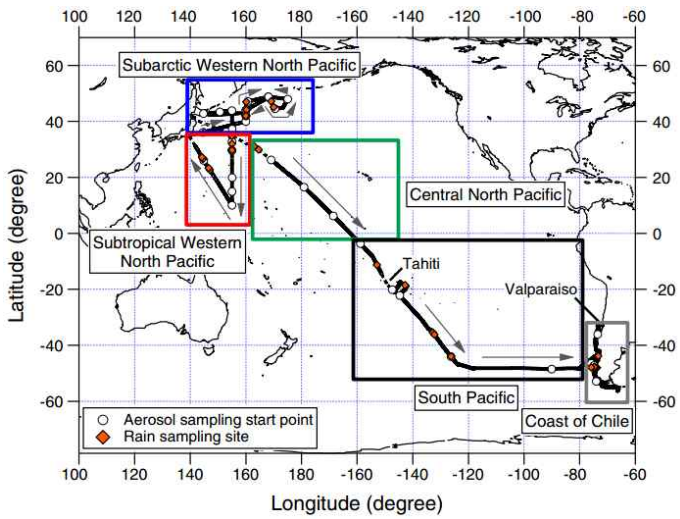


그림 40. Jung et al. (2011)의 연구지역

6. 대기 분진 방사능 모니터링

○ 국내에서는 S-35와 B-7 추적자를 이용한 강우 기원 황 유입 및 순환에 관련된 연구(Kim 등. 2005; Cho 등, 2011)가 수행되었으나 강우시료에만 한정되었고, 최근 동해 연안 원전 (Chae와 Kim, 2018) 주변 대기 중 H-3 (트리튬) 분포와 제거에 관련된 연구가 수행되었으나 역시 water vapor와 강우시료만을 대상으로 하고 에어로졸 및 대기 분진에 대하여 대기 기원 자연 방사능 추적자에 관련된 연구가 거의 이루어지지 않았음.

○ 최근 Pb-210의 딸 핵종인 Po-210을 대도시의 (서울) 강수 중 측정하여 인위적 기원의 화석연료 (coal burning) 방출과 기원을 밝혀낸 연구가 국내에서 수행되었으나 (Kim 등 2005; Yan 등, 2012) 역시 해양에서 에어로졸 및 대기 분진을 대상으로 Be-7이나 Pb-210을 측정한 연구는 아직 없음.

○ 인공 방사능 유입의 경우 한국원자력 안전 기술원(KINS)에서 매년 15개 시, 지방에서 월 단위로 대기 중 인공방사능 Cs 핵종을 정기 모니터링하고 있으나 학술지 논문에 발표된 사례는 아직 없음.

○ 지난 1970년대부터 Be-7, Pb-210(+ Po-210 쌍) 이용한 대기 분진 및 강우 등 대기 환경 물질의 유입량, 대기 체류시간 및 에어로졸 크기에 따른 거동에 관련된 연구는 지난 수십 년간 일본, 미국, 인도, 대만, 유럽(영국, 스페인, 프랑스, 스위스, 스웨덴 등) 등지에서 활발히 이루어졌으나 국내에서는 발표된 연구 결과가 없음.

○ Be-7, Pb-210 자연 방사성 추적자 이용한 에어로졸의 체류시간 및 표층 유입에 관련된 연구는 육상에서 주로 활발히 이루어졌으나, 해양유입에 관련된 연구는 2011년 서지중해 연안과 미국 Chesapeake Bay에서 측정된 (Dueñas 등, 2005; Kim 등 2010; Dueñas 등 , 2011; Lozano 등, 2011)결과와 일부 대양(북대서양 및 북태평양)에서의 Pb-210 결과 (Cochran 등, 1990; Arimoto 등 1999) 뿐임.

제 2 절 해양생태계 모니터링 기술개발 현황

1. 미소플랑크톤 모니터링

○ 국립수산과학원에서는 1961년부터 현재까지 한반도 주변해의 25개선 207개 정점의 14개 표준수심에서 격월로 물리, 화학, 동물플랑크톤 조사를 수행중임. 오랜 조사에도 불구하고 최신 연구 장비 및 기법을 이용한 연구 방법의 적용이 미비하며, 해양 기후변화 대응 기반 자료로는 매우 부족한 실정임.

○ 국립수산과학원은 2018-2022년 5년 계획의 기후변화와 관련된 연구를 시작하였으며 기초생태계 특성 부분은 대학이 협력연구를 통해 진행하고 있음.

○ 한국해양공단은 해양수산부로부터 위임받아 연안생태계 기본조사를 장기간 수행 하고 있으며 실제 연구는 대학과 해양관련 산업체에서 많은 부분이 수행되고 있음. 사업내용은 연안, 갯벌, 해양보호구역 등이 포함되고 있으며 화학적 분석과 현태분류기반의 생물 다양성 연구가 많은 부분을 차지함.

○ 국립해양조사원은 이어도, 소청초, 가거초 과학기지를 운영을 통해 해양 및 기상 자료를 생산하고 있으며 한국해양과학기술원은 과학기지 활용연구를 통해 물리, 화학, 생물, 기상 부분의 세부항목에 대한 연구를 수행 중임.

○ '장기해양생태계연구' 는 2011~2021년 연구기간 동안 지역별 생지화학 순환, 생태계 구조와 기능, 생태구성 요소 간의 상호작용을 분석하여 생태계 변화추이 및 원인 파악을 수행중임.

○ 해양환경공단은 법정 조사인 '해양생태계 종합조사'를 2005년부터 우리나라 주변 해역의 조사를 진행중이나, 주로 조사 정점이 연안에 집중되어 있으며 미세조류의 연구도 전통적인 형태 분류에 근거하여 연구되고 있는 한계가 있음.

○ KIOST는 미소생물의 형태 (현미경, flow cytometry, FlowCAM), 생화학 (HPLC) 및 분자생물학 (PCR 등)적 다양성 연구를 위한 분석 기술 및 장비를 이미 구축하여 활발히 연구를 수행하고 있음. 우리나라 해양수산부에서는 코클로디니움, 슈도니치아 등 HABs의 원인 종을 포함하는 13종의 해양생물을 유해해양생물로 지정하여 관리하고 있고, 최근 기후변화 등으로 유입된 외래종의 개체수가 급증하면서 갯줄풀, 영국갯끈풀 등 2종을 유해해양생물로 지정한 사례가 있음. 특히 "해양생태계 교란생물 조사관리 연구(2008-2013)" 과제 등을 통해 다수의 해양 외래종이 이미 국내에 정착하고 있는 것을 보고함 (표 1).

○ 국립수산과학원에서는 적조에 의한 수산피해를 최소화하는데 목적을 두고 적조 모니터링 시스템을 향상시키고, 적조생물의 생리생태를 파악하고, 그리고 이 적조생물을 방제할 수 있는 연구에 집중하고 있음. 또한, 심각한 적조로부

터 수산피해를 최소화하기 위하여 적조에 대한 모니터링 시스템을 구축하고, 적조발생시 신속한 정보수집, 통보 및 대응을 위한 적조상황실의 구축하여 적조예보를 발령하고 있음. 아울러, 전국 연안 및 주요 양식어장 주변 해역의 정기적 해양환경 모니터링을 통하여 해양환경의 상황을 파악하고, 양식어장의 지속적 활용을 위한 체계적인 환경관리 정책 수립을 위한 기초자료를 수집함.

○ 장기적 해양환경의 관측과 HABs 원인생물을 포함하는 플랑크톤의 조사를 통한 해양환경과 생물상의 변화와의 관계를 분석 및 이해하고 향후 가속화될 인위/자연적 기후변화에 따른 외래 유입종에 따른 생태계 교란 등, 거시적 생태계 변화에 초점을 맞춘 연구는 거의 진행되고 있지 않음.

표 3. 해양수산부 지정 유해해양생물 13종 리스터

유해 생물명	사 진	주 요 특 징
① 노무라입깃해파리		• 우리나라 출현 해파리 중 크고 독성이 강한 종, 수산업 그물 파손 및 촉수에 접촉 시 위험
② 작은부레관해파리		• 촉수에 물고기나 사람이 접촉하여 물리적 자극이 가해지면 독소 주입, 열대·아열대 종으로 인간에 치명적
③ 보름달물해파리		• 보름달물해파리들은 대량 발생·집단 서식 수산물을 어획하는 과정에서 그물을 가득 메워 수산업에 피해
④ 코클로디니움		• 극동해역에서 유해 적조를 일으키는 대표적인 식물 플랑크톤으로 물고기의 아가미에 달라붙어 물고기의 호흡곤란 유발
⑤ 차토넬라		• 1960년대 일본 연안에서 적조발생 원인, 물고기에 달라붙어 심장박동을 느리게 만들고, 산소공급 부족으로 물고기 치사
⑥ 세방가시이끼벌레		• 군체성 동물, 물속 바위표면을 점유하면, 다른 부착성 무척추동물이나 해조류 등은 삶의 터전 상실
⑦ 관막이끼벌레		• 매우 작은 크기의 개체들이 군체를 형성하여 패각 표면을 덮어 버리거나, 해조류 표면을 습격하여 해조류의 광합성 방해
⑧ 자주빛이끼벌레		• 전세계적으로 분포된 전형적인 부착 오손생물, 암반표면이나 단단한 물체의 표면을 덮으면서 성장하므로 다른 부착생물 부착 불가능
⑨ 아므르불가사리		• 바다의 해적생물, 포식자로 이동능력이 뛰어나 해양생태계 교란행위 자행하며 양식장에 피해 발생
⑩ 별불가사리		• 굴, 진복, 조개 등 연안어업 및 양식업에 피해발생, 하지만 황폐한 바다 속에서 유기물을 섭식하므로 바다의 청소부 역할도 수행
⑪ 알렉산드륨		• 신경독소인 마비성패독 보유, 독성이 축적된 조개류를 먹게 되면, 혀, 입술, 손발 등에 경련이나 마비현상 초래, 최악의 경우 사망
⑫ 디니파이시스		• 연안의 조개류 등 물속의 플랑크톤을 먹이로 하는 저서생물이 디니파이시스를 먹으면 복통, 설사 및 위장장애 등을 유발
⑬ 슈도니츠시아		• 사람이 섭취하면 경련, 설사, 위의 통증, 심한 경우에는 방향감각 상실 및 기억 상실증 유발

○ 전 지구적 기후변화에 의한 해양의 생지화학적 순환 및 생태계 변동연구는 IGBP와 SCOR의 주도 또는 승인 하에 국제협력연구 프로그램들이 진행되고 있음.

- 현재 진행되고 있는 프로그램으로는 CLIVAR와 같은 해양 관측 프로그램이 있으며, 대양규모의 생지화학적 순환과 생태계에 초점을 맞춘 연구로는 IMBER, SOLAS, GEOTRACES, BIO-GEOTRACES 등이 있음.

○ 통합적 해양 생지화학 및 생태계 연구(Integrated Maine Biogeochemistry & Ecosystem Research, IMBER) 의 목표는 해양의 주요 생지화학적 순환, 생태계 그리고 이들의 상호관계가 전 지구적 변화에 미치는 영향 및 해양 생지화학과 생태계가 기후 조절에서의 역할 등을 이해하는 것임.

○ C-MORE (Center for microbial oceanography: research and education) 프로그램은 2006년 8월에 미국 국립과학재단의 지원받아 과학기술센터 프로그램으로 시작됨. 이 프로그램의 목적은 해양의 기반역할을 주도하고 있는 해양미세생물들의 다양한 군집에 대한 이해를 향상시키는데 기여하고 촉진하고자 하는 것임. 연구범위는 물질대사 조절 및 환경조절의 유전/분자학적 발현 등을 포함한 유전/분자학을 기초로 한 해양미세생물의 생지화학분야에서부터 역할 등이 포함됨. 즉 짧게 표현한다면 C-MORE는 게놈을 지구시스템으로 연결하는 연구를 수행하는 것을 주 임무로 한다고 할 수 있음.

○ 전 지구 해양관측시스템(GOOS) 및 우리나라, 중국, 러시아, 일본이 참여하는 지역별 네트워크인 nearGOOS는 국제협력 관측시스템 구축의 필요성을 나타냄.

○ 21세기에 접어들면서 해양 생태계는 지구의 생지화학적 순환과 기후의 조절에 결정적인 역할을 한다는 인식하에 해양 생물의 다양성 (구조, 진화와 dynamics)에 대한 전지구적 규모의 국제적 프로그램이 진행되었음. 2000년에 창립된 Census of Marine Life (CoML) 프로그램을 통해 80여개국 2,700여명의 과학자가 10여년 에 걸쳐 540회 이상의 탐사를 통해 획득한 결과물이 2010년에 발표되어 해양 생물이 25만여 종에 이르는 것으로 추산되었으며, 각 해양 생물의 지구적 분포에 대한 웹 데이터베이스 및 DNA 바코딩 정보를 제공하고 있음.

○ 프랑스를 포함한 35개국 126명의 과학자가 참여한 Tara Ocean Expedition (그림 5)은 2009년부터 현재까지 대규모 해양 탐사를 통해 부유생태계 및 산호초 생태계의 생물 다양성 시료를 채취 분석하여, 생물 진화, 생태계 이해 및 기후 변화에 의한 생태계 영향 예측 등에 활용하고 있음.

○ 해양질소순환에서 중요한 역할을 보이는 질소고정자와 같은 기능유형별 식물플랑크톤의 다양성 연구는 UCSC (University of California, Santa Cruz)의 Jonathan Zehr 그룹에 의해 1990년경부터 다양한 해역에서 많은 연구가 진행되었음.

○ 해외 선진 연구 그룹에서는 질소고정, 대번성, 적조, 해양산성화 등 생태계의 기능 유지에 중요하거나 환경 변화에 민감한 기능 그룹의 다양성 및 생태적 특성을 연구하기 위한 연구기법을 개발하여 활발히 연구를 수행하였거나 수행

중에 있음. 미국 Bigelow 연구소의 'Single Cell Genomics Center'에서는 전통적인 방법으로는 분리하기 어려운 배양되지 않은 미생물의 다양성 및 유전적 특성을 규명하기 위한 연구 기법을 개발하여 전세계 연구자에게 서비스하고 있음.

○ 해양질소순환에서 중요한 역할을 보이는 질소고정자와 같은 기능유형별 식물플랑크톤의 다양성 연구는 UCSC (University of California, Santa Cruz)의 Jonathan Zehr 그룹에 의해 1990년경부터 다양한 해역에서 많은 연구가 진행되었음.

○ 비교적 최근에 plastid-encoded 16S rRNA 유전자 시퀀싱 방법으로 광합성 식물플랑크톤의 다양성을 연구할 수 있는 기법이 개발되어, 지구적 규모에서 식물플랑크톤 다양성의 분포에 대한 연구 결과를 얻었음(Kirkham et al. 2013).

○ 전 세계 주요 각국은 장기적인 기후변화 및 환경의 변화에 따른 해양의 변화를 이해하고, 연안환경의 다양한 교란인자(유해적조 및 해양오염)로부터 피해를 저감하기 위한 효과적 대책을 마련하기 위한 수단으로 수질 및 생물상의 장기 모니터링을 수행하고 있음.

○ 북대서양과 북해 지역에서 수행된 세계에서 가장 큰 규모의 모니터링 사업 중 하나인 CPR (Continuous Plankton Recorder) 조사는 해양의 자연적/인위적 변화를 이해하기위해 1931년부터 수행되어 오고 있음(그림 41) (Richardson et al., 2005).

○ 미국은 1974년부터 본격적으로 HABs 연구 프로젝트에 착수하여, HABs의 생태적 거동 및 발생기작에 대한 원인 생물의 생리적, 생화학적, 유전적, 행동적 특징을 밝히기 위해 연간 백만 달러의 예산을 들여 ECOHAB (The Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms)의 프로젝트를 운영 중임.

○ MERHAB (The Monitoring and Event Response for Harmful Algal Blooms) 프로젝트는 HABs 모니터링을 통해 HABs로 인한 당국의 연안환경, 조개류 및 해양 동물의 피해를 파악하고, 과학적 정보에 입각 한 주요 정책을 수립하기 위한 목적으로 운영되고 있음.

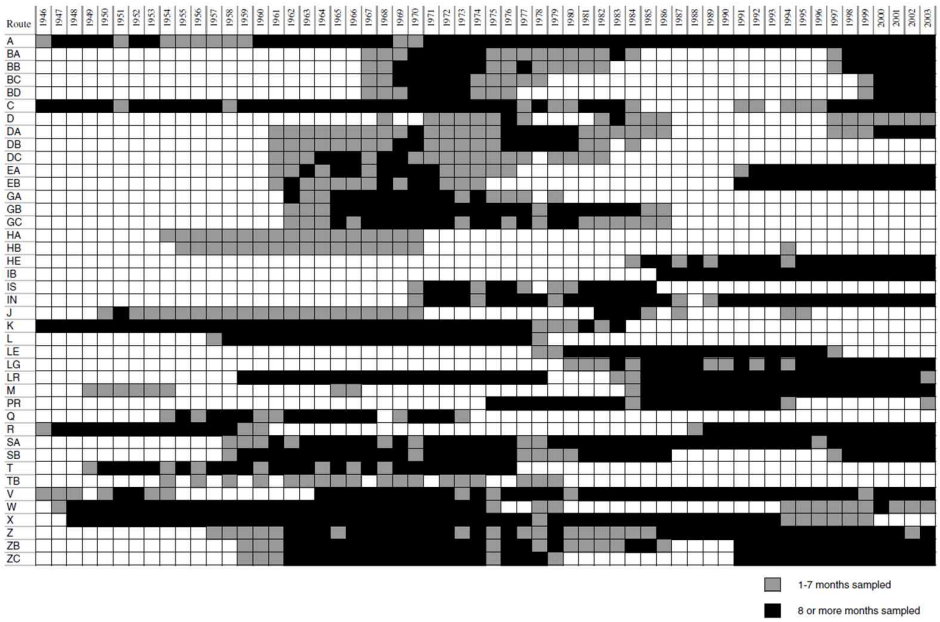


그림 41. 1946-2003년 Continuous Plankton Recorder (CPR) survey 의 조사 정점 및 시기

○ 일본 어패류 양식장이 밀집된 세토내만에서는 1960년 산업발달 이후, 부영양화 된 연안환경으로 인해 빈번하게 발생하는 HABs로부터 어패류 양식장의 피해를 저감 하고 연안환경을 보전하는 목적으로 1973년부터 장기적 HABs 모니터링을 수행 중하고 있음(그림7 ->그림 42).

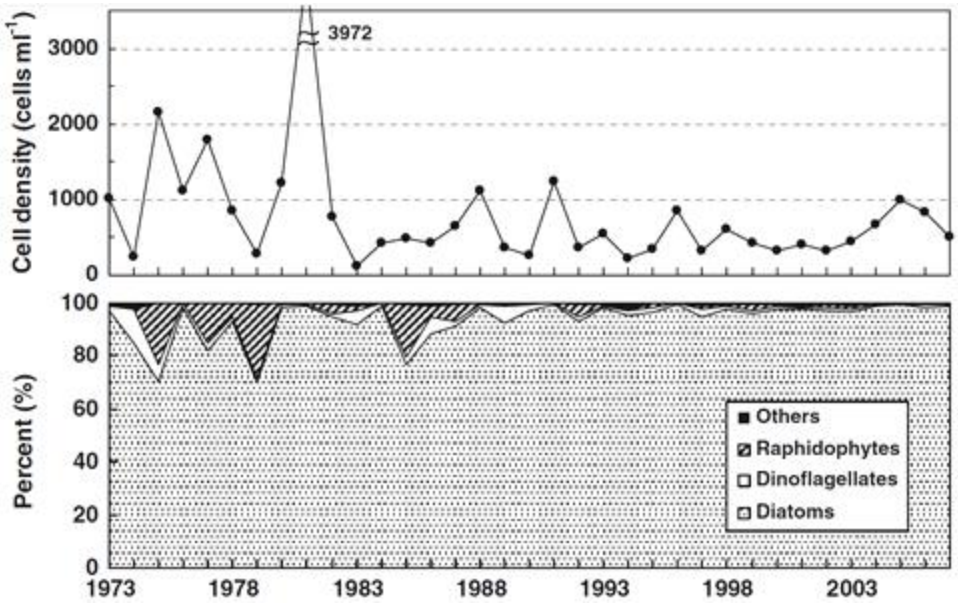


그림 42. 1973-2007년 일본 세토만 조사에 따른 HABs의 생물량 및 종 조성

2. 동물플랑크톤 모니터링

○ 국립수산과학원은 한국 연근해에서 1961년부터 격월 정선관측을 실시하고 있으며, 물리, 화학 및 플랑크톤 조사를 수행하고 있으며, 동물플랑크톤의 경우 습중량과 4개 분류군(요각류, 화살벌레, 단각류, 크릴)의 개체수를 중심으로 분석을 하고 있음.

○ KIOST는 통영 MRC 고정 정점에서 2011년부터 현재까지 매월 중형동물플랑크톤 군집 구조를 모니터링하고 있으며, 2011년부터 2014년까지 연구결과가 논문으로 출판되었음(예, Kim et al. (2017)).

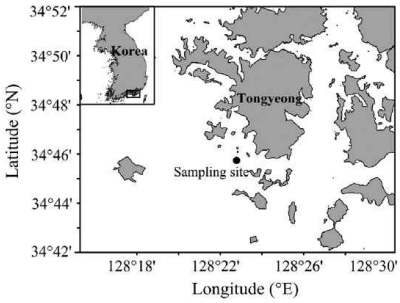


그림 43. 통영 고정 정점 중형동물플랑크톤 모니터링 정점 (Kim et al. 2017)

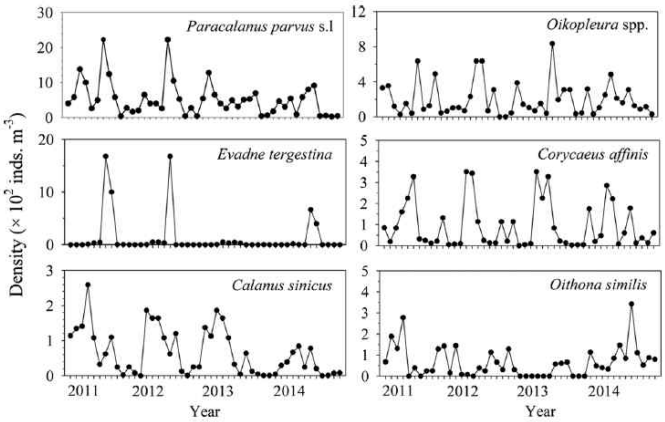


그림 44. 통영 고정 정점 우점 동물플랑크톤 개체수 변화 (Kim et al. 2017)

○ KIOST의 동물플랑크톤 생리/생태 연구팀(강형구 박사팀)은 KIOST 연구원에 인접한 부산항 주변 수변공간 시설물의 고정 정점에서 2018년 1월부터 매월 중형동물플랑크톤 모니터링을 하고 있음.

○ L4 station 플랑크톤 모니터링 프로그램:

- 영국의 Plymouth Marine Laboratory에서 1988년부터 서부영국해협(Western

English Channel)의 L4 station에서 매주 플랑크톤 중심의 장기모니터링 프로그램을 운영하고 있음(Ducklow et al. 2009).

- 물리, 화학 및 생물(식물플랑크톤, 동물플랑크톤), 요각류 알 생산력 등을 조사항목에 포함하고 있음.
- 요각류 알 생산력과 개체군 변동 연구는 우점 요각류인 Calanus spp.를 중심으로 하고 있음.

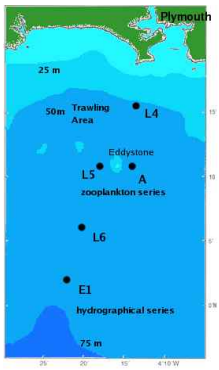


그림 45. 영국 PML의 서부 영국해협의 L4 station

그림 46. 영국 PML의 L4 station의 플랑크톤 모니터링 프로그램 웹페이지

○ 미국 스크립스해양연구소 Pier 샘플링

- 미국 스크립스해양연구소(SIO)는 연구소 Pier 시설을 이용하여 수십 년 전부터 식물플랑크톤 채수 또는 네트 시료를 확보하였으며, 식물플랑크톤 가운데 규조류의 장기 시계열 시료에 대하여, 기후변화에 대한 관심이 고조된 시기에 이 시료 분석을 목적으로 하는 박사 후 과정 공고를 낸 바가 있음.
- Pier 시설을 이용한 채집이지만, 장기 시계열 자료를 손쉽게 확보하여 기후변화에 대한 식물플랑크톤 종 조성의 변화를 연구하고자 하였음.

○ 국립수산과학원은 1965년부터 정선관측 프로그램을 실시하고 있으며, 격월로

동물플랑크톤 조사를 수행하고 있음. 그러나 수산자원의 먹이생물 변동 관점에 치우쳐 있으며, 종수준의 동정이 되지 않아 환경 변화에 대한 해양생태계 변동 분석을 위한 자료 활용성에 한계가 있음.

○ 해양환경관리공단의 '해양생태계 종합조사' 및 해수부 국가개발연구사업 '장기해양생태계 연구'등에서 동물플랑크톤 조사가 진행되고 있으나, 해역별 조사시기의 차이 및 생활사를 고려하지 않은 조사간격 등으로 동물플랑크톤의 구조와 기능 변화를 종합적으로 파악하는데 제한이 있음.

○ 한국해양과학기술원 남해연구소는 2001년부터 현재까지 주(weekly) 간격으로 진해만 장목항의 고정점에서 물리, 화학, 동·식물플랑크톤을 장기 모니터링 중에 있음. 장기 변동 자료를 분석하여 외부 환경변화가 젤란틴질 동물플랑크톤 증가 및 종 다양성, 개체군 변동에 유의한 영향을 미치고 있음을 보고한 바 있음(그림 2, Jang et al., 2013; Jang, 2014).

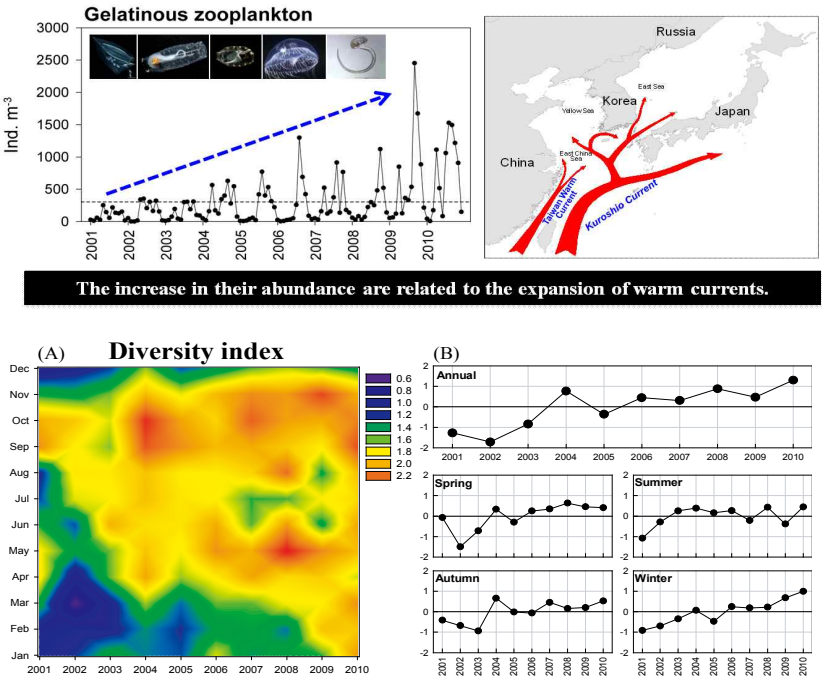


그림 47. 진해만 고정점 중형동물플랑크톤 장기모니터링 주요 결과

○ 해양생태계 및 수산자원의 미래 상태를 예측하기 위해, 태평양과 대서양의 연안 및 대양 해역에서 동물플랑크톤에 대한 장기모니터링(>10년)이 실시되었거나 진행 중에 있음(표 4).

표 4. 중형동물플랑크톤 장기 모니터링 국외 현황

Program	Start and end year	Location
North Pacific		
CalCOFI	1949-continuing(seasonal)	California
Station PAPA	1956-continuing(3 times per year)	North Pacific,50°N 145°W
Newport,OR,USA	Intermittentsince1969, continuous since1996(5 times per year)	Offshore transect at 44° 39.1′N(Oregon)
Vancouver Island Shelf	1985-continuing(annual)	South west shelf of Vancouver Island
Odate plankton time-series	1951-continuing(monthly)	Western North Pacific (Kuroshio,Oyashio,and transition region east of Japan)
Hokkaido University,Oshoro-Maru time-series	1953-2001(annual)	Western and central Subarctic North Pacific,and Bering Sea(mostly along180°E)
Japan Meteorological Agency(JMA)	1967,1972-continuing(seasonal)	Several transects in western North Pacific (all around Japanese waters)
National Research Institute of Fisheries Science(Japan), fish egg and larvae survey	1971-continuing(annual)	Western subtropical North Pacific(including Kuroshio region)
Hokkaido National Institute of Fisheries, A line monitoring	1987-continuing(5-8 times per year)	Western Subarctic North Pacific (Oyashio region)
South Pacific		
IMARPE zooplankton sampling	1964-continuing(seasonal)	Peru coast and continental shelf
Antofagasta zooplankton sampling	1991-2003	Northern Chile coast
IFOP zooplankton sampling	1985-continuing(seasonal)	Northern Chile shelf
North Atlantic		
Continuous Plankton Recorder(CPR)	1931-continuing(monthly)	North Atlantic
Helgoland Roads	1974-continuing(daily to weekly)	Southern NorthSea
Dove Marine Laboratory	1968-continuing	Central-west North Sea
Stazione Zoologica Anton Dohrn; Station MC	1984-continuing(weekly to bi-weekly sampling)	Gulf of Naples
Station C,western Mediterranean	1985-1995(weekly)	Gulf of Tigullio,Ligurian Sea, western Mediterranean
Plymouth Marine Laboratory, Station L4	1988-continuing(weekly)	Western English Channel
Icelandic Monitoring Programme	1961-continuing(annual)	Transect sradiating from Iceland
Emerald Basin	1984-continuing(twice per year)	Scotian Shelf, NW Atlantic
MARMAP and Follow-up Programme	1977-continuing(quarterly)	NE United States continental shelf
Station 2	1972-1997; 2002-continuing(weekly)	Lower Narragansett Bay, RI, USA
South Atlantic		
Cape Routine Area Monitoring Programme,expanded in1961 to Southern Routine Area Monitoring Programme	1951-1961(monthly), 1961-1967(monthly)	Western Cape coast of South Africa, South western Cape coast of South Africa
Pelagic Fish Stock Assessment surveys	1983-continuing(3 times per year)	Most of South Africa's west and south coasts
Walvis Bay Routine Area Monitoring Programme	1957-1965(monthly)	Namibian coast, vicinity of Walvis Bay
SWAPELS Programme	1972-1989(monthly)	Namibian coast
Elephant Island	1977-continuing	Elephant Island region of the Antarctic Peninsula

○ 미국의 스크립스 해양연구소가 1949년부터 조사하는 있는 CalCOFI(California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations)가 북태평양의 대표적인 장기모니터링 프로그램임(그림 3). 이 프로그램에서는 계절별(연 4회)에 걸쳐 캘리포니아 해류역에 대한 물리, 화학, 플랑크톤, 어란 등에 대한 장기모니터링을 실시하고 있음.

○ 영국은 Plymouth Marine Laboratory에서 Western English Channel의 고정

점(Station L4)을 대상으로 1988년부터 동물플랑크톤에 대한 장기 모니터링을 주 간격으로 실시하는 하고 있음(그림 48). 특히, 이 프로그램은 자국 및 지중해의 연안역 고정점 모니터링 프로그램들과 중형동물플랑크톤의 분석 자료를 정례적으로 상호 비교・검토하고 있음(그림 49).

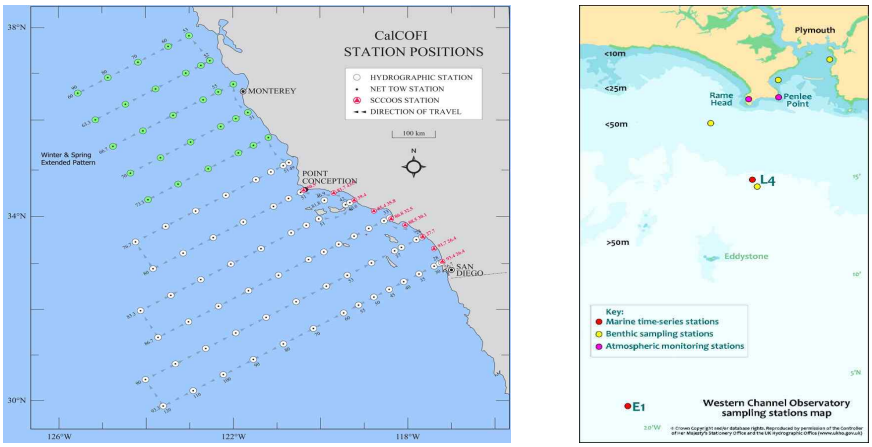


그림 48. 미국 CalCOFI (왼쪽) 및 영국 Plymoth L4 (오른쪽) 장기 모니터링 정점

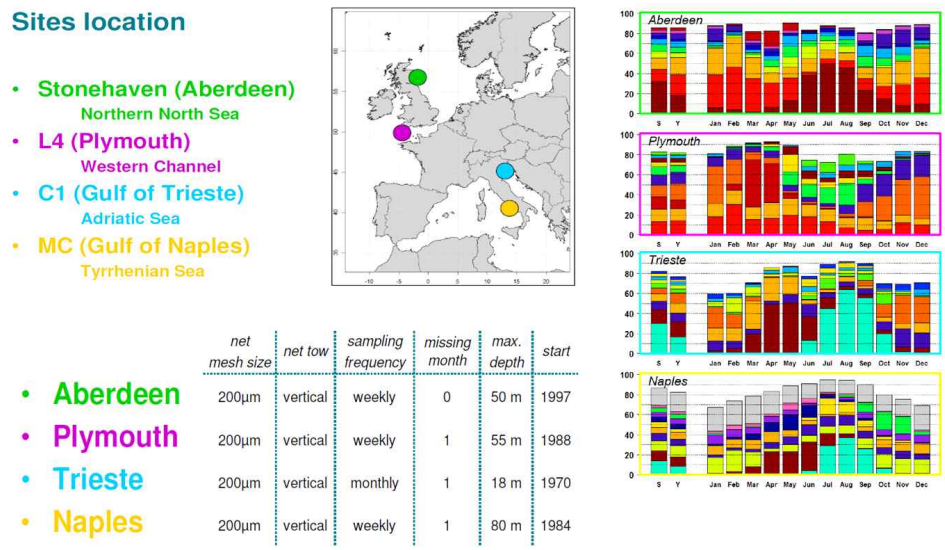


그림 49. 영국 및 지중해 연안 고정점들 간의 동물플랑크톤 자료 상호 비교

○ Continuous Plankton Recorder(CPR)을 이용한 동물플랑크톤 장기모니터링 1931년부터 월 간격으로 북대서양과 북해에서 집중적으로 실시되고 있으며(그림 50), 현재까지 CPR 자료를 이용한 논문이 100편 이상 발간되었음.

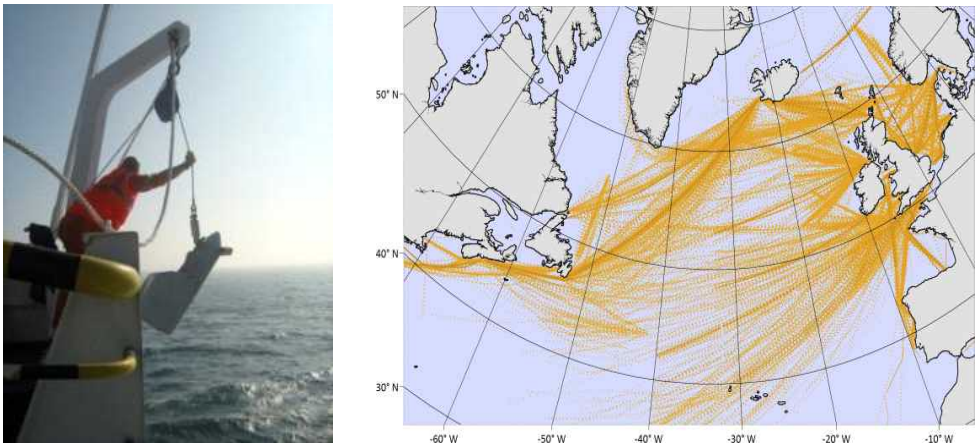


그림 50. Continuous Plankton Recorder(CPR)를 이용한 집중 조사해역

○ 일본은 해양기상청 및 국립수산연구원 주관 하에 북서태평양 인근해역과 홋카이도 남쪽해역(A line)에서 각각 1972년과 1987년부터 물리, 화학 및 플랑크톤에 대한 장기모니터링을 수행하고 있음(그림 51).

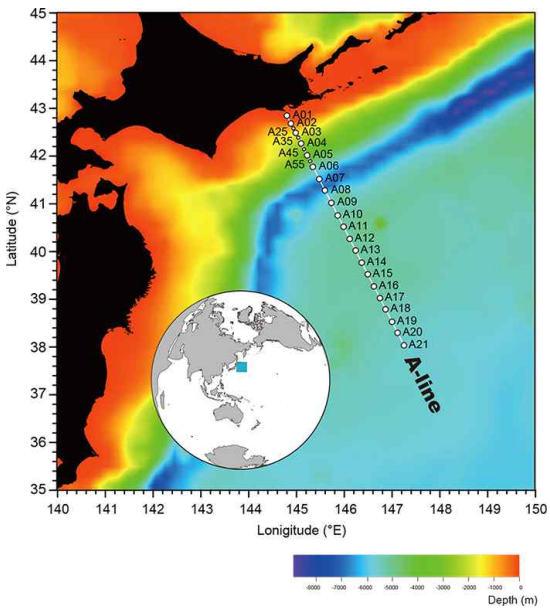


그림 51. 일본 국립수산연구원에서 1987년부터 조사한 홋카이도 A line 정점

3. 플랑크톤 주요 우점종 출현변동 예측

○ 해양생태계 연구의 핵심 과제는 첫째로 먹이사슬을 통해 이루어지는 에너지 흐름의 양을 파악하여 각 먹이단계의 생물량 혹은 유용 수산생물의 생물량을

예측하는 것이며, 둘째는 특정해역에 어떤 생물이 언제 얼마나 출현하는가를 예측하는 것임.

○ 첫째 과제의 해답을 찾기 위해 Ecopath, Ecopath with Ecosim모델이 개발됨 (Christensen and Pauly 1992(1), Christensen and Lai 2007(2)). 또한, 플랑크톤을 주 구성요소로 하는 표영생태계 모델도 제안됨 (Moore et al. 2002)(3).

- 이러한 해양생태계 모델은 먹이사슬을 기반으로 한 생태계 기능 중심 모델임.
- 이 모델들은 (수산)자원량 평가, 자원관리, 생태계 보전 등에 널리 활용되고 있으나, 해양생태계 구성생물 간의 먹이사슬 관계가 복잡하여 정량화하기 어렵고, 구성생물종 각 각에 대한 생물량을 독립적으로 예측하기는 어렵다는 단점이 있음.

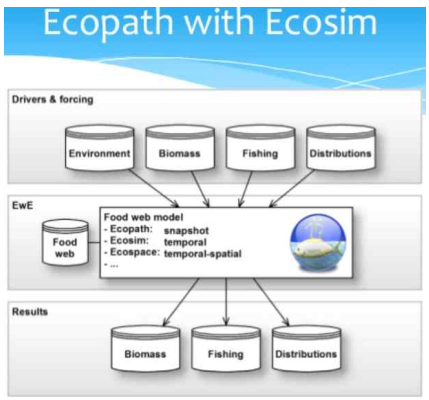


그림 52. Ecopath with Ecosim 모델 개요

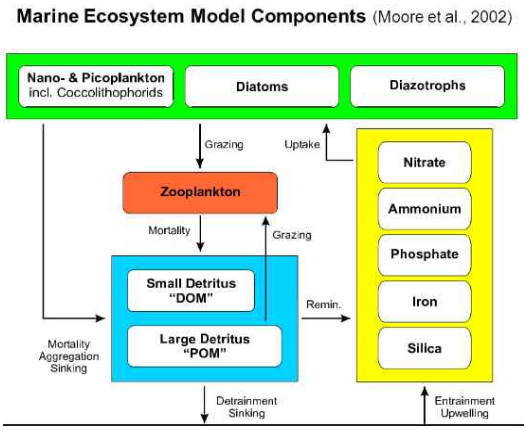


그림 53 해양 표영생태계 모델 구성도

○ 두 번째 과제는 해양생태계의 구조와 이를 구성하는 생물종 각 각에 초점을 맞춘 구조 중심의 연구로서 아직 예측모델이 개발되지 못함.

- 이 과제가 그동안 발전되지 못한 원인의 근본 바탕은 해양생물의 대부분을

차지하는 플랑크톤이 작고 형태 형질이 뚜렷하지 않아 객관적 종분류가 어렵다는 것임.

- 최근 들어 DNA를 종분류 지표로 사용하는 DNA메타바코딩 기술이 접목되면서 동·식물플랑크톤의 종을 객관적으로 분류하고 생태계 구조 중심의 연구가 활발해 짐 (Casas et al. 2017(4), Penna et al. 2017(5), Yang et al. 2017(6), Djurhuus et al. 2018(7)).
- 국내 연안생태계에서도 요각류 94종의 DNA바코드가 최근 보고됨(Baek et al. 2016)(8).

○ 한편 육상생태계에서는 보전생물학적 관점에서 종분포모델(Species Distribution Model, SDM)이 개발되어 서식지 변화, 산란지 예측, 보호구역 설정 등에 활용되고 있음(Elith & Leathwick 2009(9), Jean-Christian et al. 2011(10), Gomes et al. 2018(11)).

- SDM은 육상생물과 같이 서식지 범위가 명확하고, 환경과 생물종간의 관계가 뚜렷한 경우에 적용 가능하여 아직 해양생물에 적용된 사례는 없음.
- SDM의 단점은 생태계 구성 종간의 상관관계가 무시되거나 소홀히 취급된다는 점임.

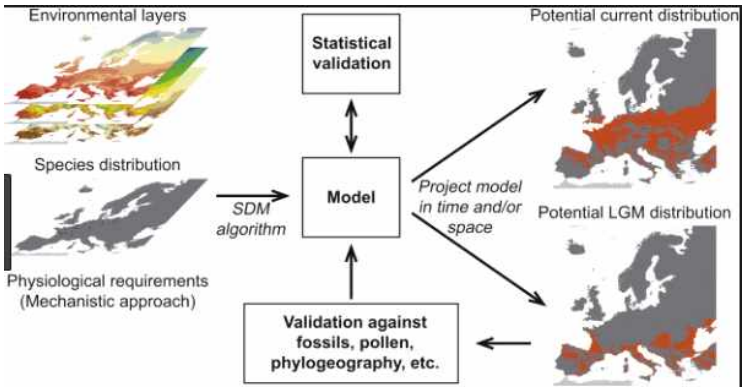


그림 54. 종분포모델을 이용한 과거와 현재의 서식지 변화 비교 분석 모형

○ 한편, 최근 빅데이터분석과 기계학습(딥러닝) 기술이 발달하면서 생태학, 지구과학분야에도 이 기술이 접목되면서 산란지 변화에 대한 연구, 생태환경에 대한 예측 등에서 새로운 분석과 이해가 가능해지고 있음(Hellgren et al. 2016(12), Thessen 2016(13)): 종분포모델(SDM)과 기계학습의 접목 (Han et al. 2017(14))며, DNA 메타바코딩과 기계학습의 접목이 시도되고 있음(Cordier et al. 2017(15)).

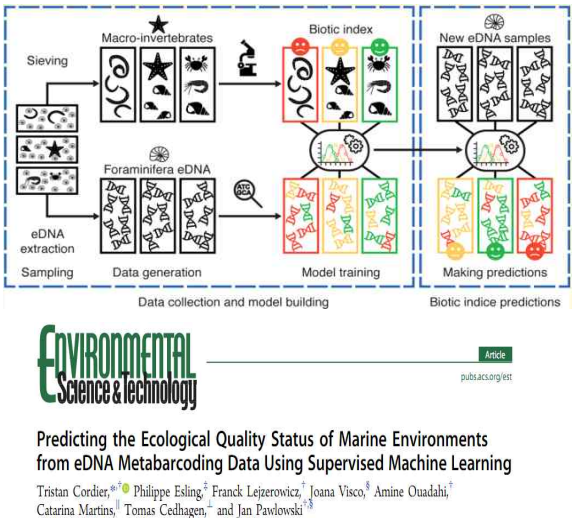


그림 55. DNA 메타바코딩과 기계학습 기술을 이용한 해양환경 상태 예측 모형과 참고문헌

○ 한편, 미국의 우즈홀연구소는 마샤즈빈야드에 연안관측소 MVCO를 설치하여 장기모티터링을 실시하고 있으며, 영국 Plymouth Marine Laboratory(PML)는 영국채널 서편 연안에 4개의 정점을 정하여 장기간 모니터링을 실시해 오고 있음.

그림 56. 미국 우즈홀해양연구소가 운영 중인 MVCO 장기모니터링 개념도

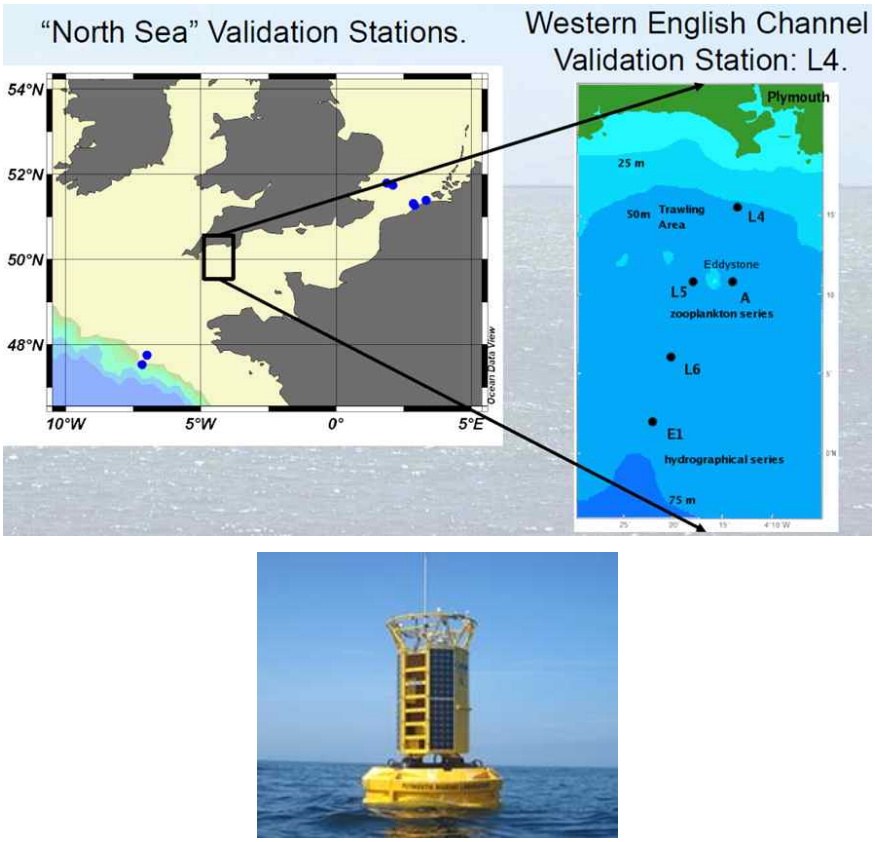


그림 57. 영국 PML이 운영하고 있는 영국해협 서안의 장기모니터링 정점도

○ 우리 연구원에 의한 해양생태계 장기 모니터링 위치 및 내용

- 통영기지 주변해역 정점에서 '13.03.14 이후 현재까지 매 2주 간격 시계열 자료 확보
- 관측정점: 34°45.74~76'N, 128°22.56~33'E
- 관측요소: 수온, 염분, 영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤

※ 일사량 자료는 진주/부산 기상대 자료를 보정하여 사용 가능

그림 58. 통영기지 주변 관측정점

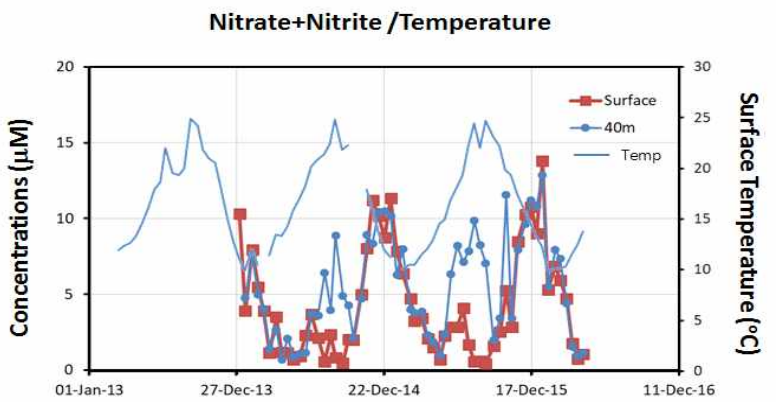


그림 59. 질산염/아질산염 및 수온 분포

○ 영양염 분석 결과

- 겨울철에는 표층과 40 m수심의 영양염 농도가 유사하나, 여름에는 표층해수의 성층화로 인해 저층의 영양염이 표층보다 높음.
- 겨울철 표층과 저층의 혼합으로 인한 저층으로부터 표층으로 영양염 공급이 중요함.

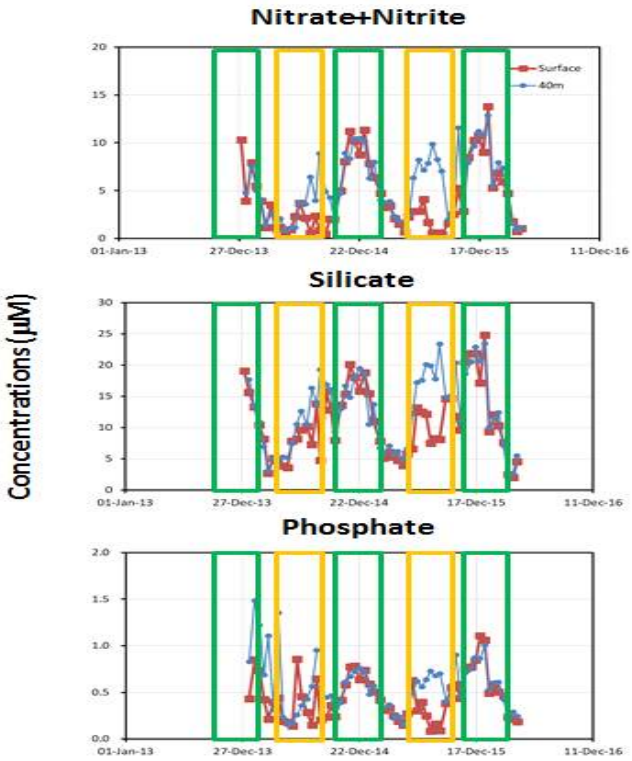


그림 60. 표층과 40m저층의 영양염 분포(질산염/아질산염, 규산염 및 인산염)

○ 식물플랑크톤 종조성 변화 분석 결과

- ‘13.03.14-’18.05.30까지 매 2주 간격 시료에서 총 258종이 확인됨: 규조류가 191종 차지
- 각 시기별 출현 종목록과 우점도 자료 확보

단위	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L	Cells/L
지역명	통영	통영	통영	통영	통영	통영	통영	통영	통영	통영	통영	통영	통영
정점명	MRC	MRC	MRC	MRC	MRC	MRC	MRC	MRC	MRC	MRC	MRC	MRC	MRC
채집날짜	20130313	20130324	20130411	20130425	20130511	20130525	20130610	20130624	20130706	20130723	20130808	20130822	20130906
관찰날짜													
수층	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Bacillariophyta	**54,526**	**75,976**	**57,974**	**82,329**	**47,395**	**26,083**	**24,000**	**82,759**	**115,508**	**68,785**	**21,886**	**427,856**	**326,882**
Bacteriastrum varians													
Cerataulina dentata													
Cerataulina pelagica													2,151
Chaetoceros affinis	2,158	801	1,906	1,707	3,006	4,035	2,667	29,916	5,169	2,617	1,684	12,024	
Chaetoceros borealis													
Chaetoceros brevis								3,448					
Chaetoceros compressus								1,771			5,892	34,068	
Chaetoceros constrictus								2,703	3,102				
Chaetoceros contortus													
Chaetoceros convoltus									1,786	467			
Chaetoceros costatus								2,516	1,974	4,579		49,098	
Chaetoceros curvisetus	3,263			1,606	1,102	1,870	1,619	4,101	23,402	15,234		35,070	
Chaetoceros diadema													
Chaetoceros danicus													
Chaetoceros debilis	14,079			1,506	4,008	1,476	2,000	7,549	43,421	24,019		90,180	4,301
Chaetoceros decipiens				703	1,804	2,165		3,914	6,015	3,178	2,525	18,036	
Chaetoceros densus	368			201	200	394	190	1,305	2,538	935		4,008	
Chaetoceros didymus	263	100		402	902	1,378		4,380	4,041	374		15,030	3,226
Chaetoceros distans										841			
Chaetoceros diversus													
Chaetoceros eibenii													
Chaetoceros lanciniosus								3,169	3,665			24,048	
Chaetoceros lauderi													
Chaetoceros lorenzianus	737	1,101		602	2,104	787	857	3,635	4,323			7,014	
Chaetoceros messanensis													
Chaetoceros mitra													
Chaetoceros pendulus													
Chaetoceros peruvianus			100		200	98			376			1,002	
Chaetoceros protuberans													

그림 61. ‘13.03.14 이후 매 2주 식물플랑크톤 종조성과 출현빈도 자료 매트릭스 예

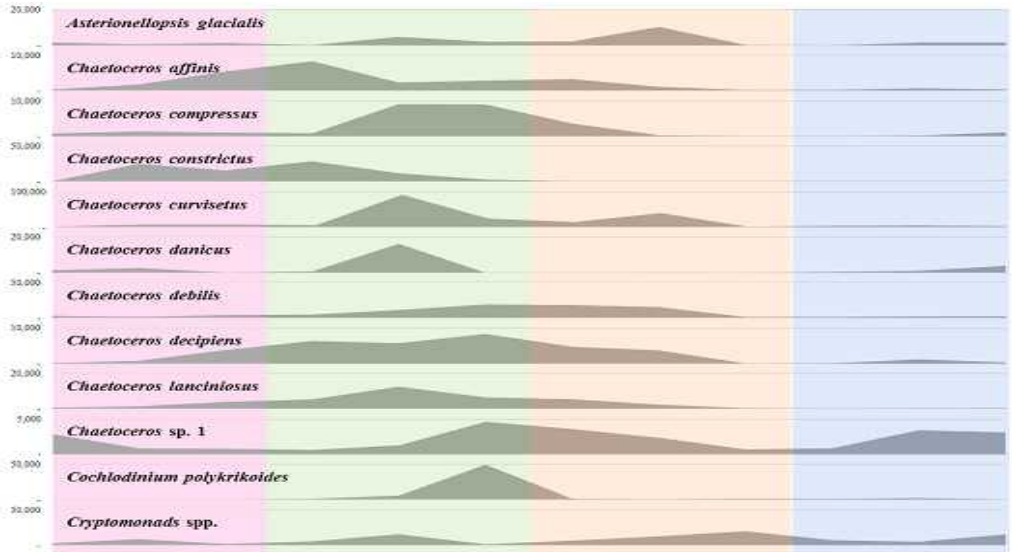


그림 62. 통영 연안해역에 우점하는 식물플랑크톤의 계절적 출현량 변화 예

○ 동물플랑크톤 종조성 변화 분석 결과

- ‘13.03.14~’16.04.21까지 매 2주 간격 시료에서 총 472종이 확인됨.

- 각 시기별 출현 종목록과 우점도 자료 확보
- 우점종들의 계절적 출현양상 변화 패턴 분석: 연중 출현종, 봄-여름 출현종, 가을 출현종, 겨울 출현종들로 구분됨.

그림 63. 통영해역에 우점하는 동물플랑크톤의 계절적 출현빈도 변화

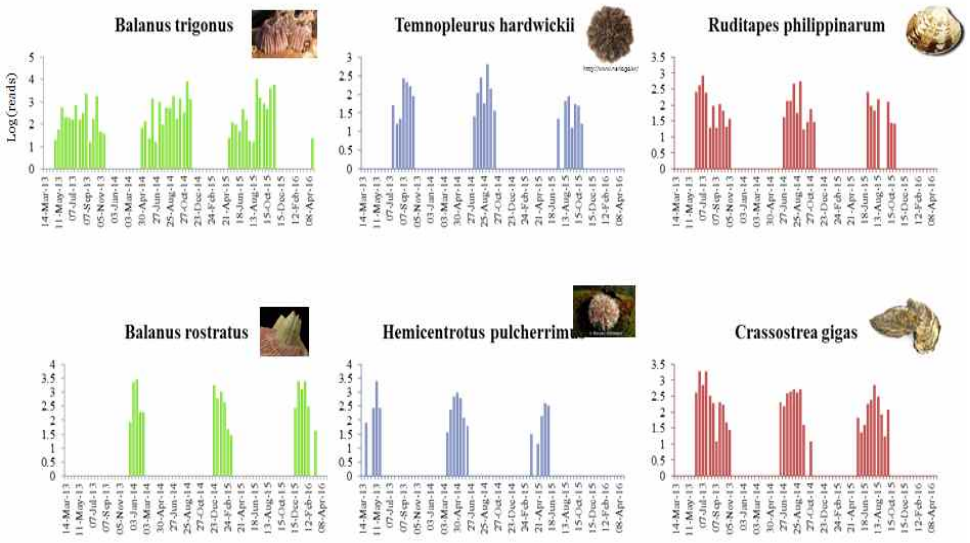


그림 64. '13~'16자료에서 드러난 일부 저서생물의 유생출현 시기

- 일부 저서생물의 유생출현 시기 (산란시기) 자료 확보
- 일부 종간의 출현양상의 상관성 분석: 아래와 가같은 확률과정 분석에서 Centropages abdominalis와 상관관계가 가장 높은 종은 Acartia omorii로

(r=0.535) 나타남;

예측 모형의 예,

$$\log(p_t/(1-p_t)) = 0.16 + 11.17 \times x_{t-1}$$

p_t : t시점 Centropages_abdominalis 출현빈도율 예측확률

x_{t-1} : $t-1$시점 Acartia_omorii 출현빈도율

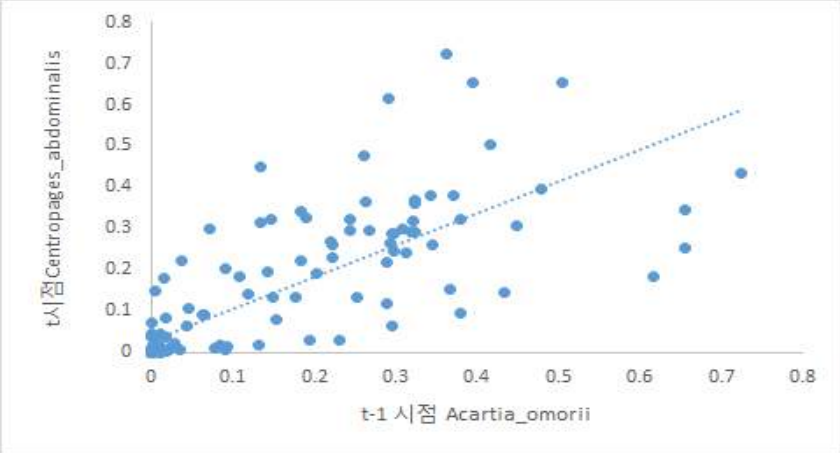


그림 65. Centropages abdominalis와 Acartia omorii 출현의 상관관계 (r=0.535)

4. 부유성 알 모니터링

○ eDNA 분석 사례

- eDNA로 분석한 이어도 해양과학기지 주변의 어류 다양성 탐색(표 1)
- eDNA로 분석한 이어도 해양과학기지 주변의 대형 무척추 동물의 다양성 탐색(표 2)
- eDNA를 이용한 상어의 다양성 연구(Boussarie et al., 2018)
- eDNA를 이용한 캘리포니아의 백상아리 탐색(Lafferty et al., 2018)
- eDNA를 이용한 열대해역의 상어의 다양성 조사(Bakker et al., 2017).

○ 분자마커를 이용한 어란 종 동정 사례

- 분자마커를 이용한 어란 종 탐색 모니터링(Lewis et al., 2015).
- 어란의 분자동정을 통한 캘리포니아 해양보호구역의 어류의 산란활동 모니터링(Harada et al., 2015)
- 어란의 분자동정을 통한 한반도 주변해역의 뱀장어목 어류 산란장 탐색(Choi et al., 2018)

- 분자마커를 이용한 대만해협의 어란 동정(Bingpeng et al., 2018)
- 통영해양생물자원기지 어류의 종별 산란시기 분석을 위한 분자마커기반의 어란 종 동정(그림 1).

표 5. eDNA로 분석한 이어도해양과학기지 주변의 어류상(한국해양과학기술원 미발표자료)

Scientific name 한국명	2014			2015	
	May	July	October	June	July
Acanthopagrus sivicolus 남방감성돔	0	0	0	1	1
Arctoscopus japonicus 도루묵	1	1	0	0	0
Callionymus beniteguri	0	1	0	0	0
Citharoides macrolepidotus 플넙치	0	1	0	1	1
Cubiceps whiteleggii	1	1	0	0	0
Cynoglossus interruptus 칠서대	0	0	0	1	1
Diaphus garmani	1	1	1	0	0
Diaphus sp.	1	1	1	0	0
Encrasicholina punctifer	1	0	0	0	0
Engraulis japonicus 멸치	1	1	1	1	1
Epinephelus areolatus 대문바리	1	1	0	0	0
Epinephelus merra	1	0	0	0	0
Epinephelus septemfasciatus 능성어	1	0	0	1	0
Erisphex pottii 풀미역치	1	1	1	0	0
Halichoeres hartzfeldii	1	0	0	0	0
Hexagrammos agrammus 노래미	1	1	1	0	0
Hexagrammos otakii 쥐노래미	1	1	0	1	0
Hoplolatilus chlupatyi	1	1	0	0	0
Konosirus punctatus 전어	0	0	0	1	1

Scientific name 한국명	2014			2015	
	May	July	October	June	July
Larimichthys polyactis 참조기	1	0	1	1	1
Lateolabrax maculatus 점농어	1	0	0	0	0
Lestrolepis intermedia	1	1	1	0	0
Maurolicus japonicus 앨퉁이	1	1	0	0	0
Naso hexacanthus	1	0	0	0	0
Oplegnathus fasciatus 돌돔	0	1	0	0	1
Pagrus major 참돔	0	0	0	1	1
Parajulis poecilepterus 용치놀래기	1	1	0	1	1
Parapercis multifasciata 열쌍동가리	0	0	0	1	1
Parupeneus heptacanthus 점촉수	0	1	0	0	0
Psenopsis anomala 샛돔	1	0	0	0	0
Pteragogus flagellifer 어렝놀래기	0	0	0	1	1
Scomber japonicus 고등어	0	0	0	1	0
Sebastes schlegelii 조피볼락	1	0	0	1	0
Sillago japonica 청보리멸	0	0	0	1	1
Sphyraena pinguis 꼬치고기	0	1	0	1	0
Tanakius kitaharae 갈자미	0	0	0	1	0
Tenualosa ilisha	0	1	0	0	0
Trachurus japonicus 전갱이	1	0	0	1	1

표 6. eDNA로 분석한 이어도해양과학기지 주변의 대형 무척추 동물상(한국해양과학기술원 미발표자료)

Scientific name 한국명	2014						2015			
	May		July		October		June		July	
	Occurrence (%)									
Anadara kagoshimensis	0	(0.0)	1	(7.1)	0	(0.0)	0	(0.0)	1	(50.0)
Architeuthis dux 대왕오징어	7	(46.7)	4	(28.6)	0	(0.0)	0	(0.0)	0	(0.0)
Atrina pectinata 키조개	0	(0.0)	0	(0.0)	0	(0.0)	0	(0.0)	2	(100.0)
Crassostrea gigas 참굴	1	(6.7)	2	(14.3)	0	(0.0)	0	(0.0)	0	(0.0)
Crenomytilus grayanus 동해담치	1	(6.7)	1	(7.1)	1	(14.3)	3	(42.9)	1	(50.0)
Crepidula sp.	1	(6.7)	1	(7.1)	0	(0.0)	0	(0.0)	0	(0.0)
Creseis virgula	13	(86.7)	13	(92.9)	6	(85.7)	1	(14.3)	0	(0.0)
Firoloida sp.	0	(0.0)	4	(28.6)	0	(0.0)	0	(0.0)	0	(0.0)
Mytilus coruscus 홍합	0	(0.0)	1	(7.1)	0	(0.0)	0	(0.0)	0	(0.0)
Placida sp.	0	(0.0)	0	(0.0)	0	(0.0)	1	(14.3)	0	(0.0)
Quoyula sp.	2	(13.3)	5	(35.7)	2	(28.6)	0	(0.0)	0	(0.0)
Sakuraeolis sp.	0	(0.0)	0	(0.0)	0	(0.0)	2	(28.6)	0	(0.0)
Todarodes pacificus 살오징어	7	(46.7)	2	(14.3)	1	(14.3)	0	(0.0)	0	(0.0)
Total reads	35435		7299		3491		26		36	
No. of samples	15		14		7		7		2	
No. of species	7		10		4		4		3	

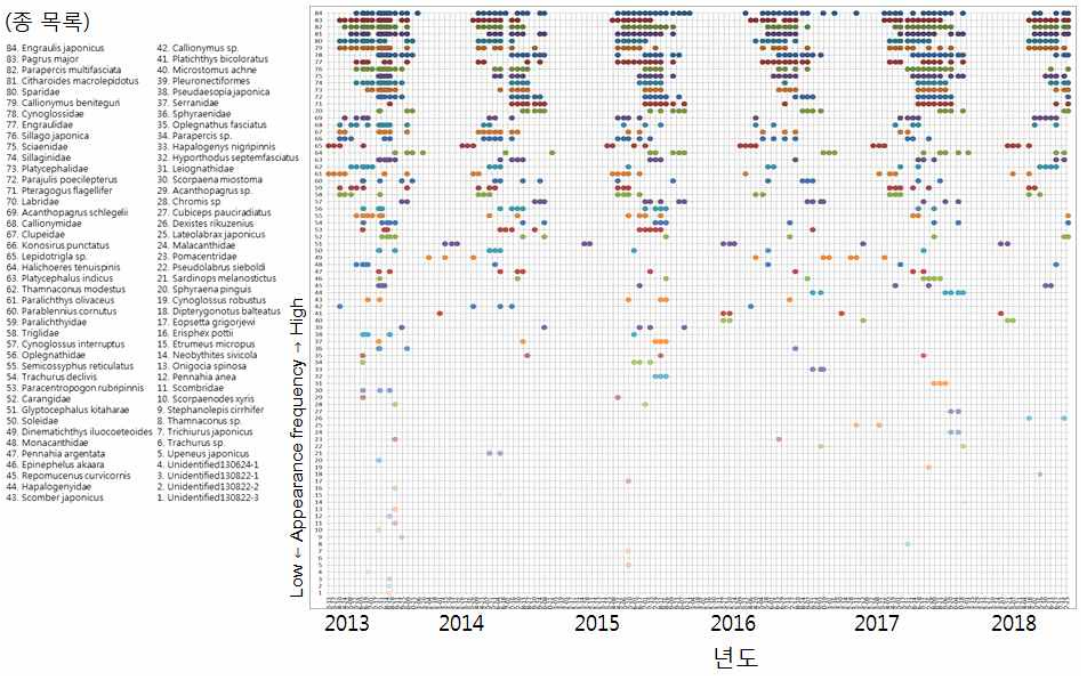


그림 66. 분자마커로 동정한 통영해양생물자원기지 어란의 종별 출현시기(좌, 어란 종 목록; 우, 종별 어란 출현 시기; 한국해양과학기술원 미발표자료).

5. 저서동물 모니터링

○ 국가 해양생태계 장기모니터링 연구

- 해양수산부는 “해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률의 제10조(국가해양생태계종합조사 등), 제11조(정밀조사 및 해양생태계의 변화관찰 등), 제12조(해양생태도의 작성)에 의해 수행”을 위하여, 2006년부터 우리나라 전 해역에 대한 해양생태계 모니터링을 수행하였으며, 2015년 그간 추진해오던 4개 법정조사(해양생태계기본조사, 연안습지기초조사, 해양보호구역조사·관찰 등)를 ‘국가해양생태계 종합조사’로 통합하고 2개 권역으로 구분하여 갯벌·연안·근해·암반생태계에 대해 격년 주기의 모니터링을 통해 시계열 자료를 수집·분석 중임.
- 국가 해양생태계 종합조사 지역의 기본 연안역은 소해구(10분 단위)로 구분하여, 연 2회(5월, 8월) 조사를 실시하고 있으며, 핵심공간 연안역 조사는 특정해역(예, 낙동강 하구)에서 계절조사(2월, 5월, 8월, 11월)를 수행중임.
- 조사항목: 해양환경(수질/퇴적), 부유생물(미생물, 식물/동물플랑크톤, 어란/자치어), 저서생물(중형/대형저서동물, 해조류), 유영동물(어류, 갑각류, 두족류, 기타수산자원, 바닷새가 포함됨.
- 낙동강 하구를 제외한 부산연안특별관리해역[1]('82년에 지정)에 속하는 조사 정

1) 부산연안특별관리해역은 1982년 지정된 이후, 제1, 2차 부산연안 특벽관리해역 관리계획수립('09.12, '14.12)되었으며, 비전은 “자연과 공존하는 자연생태도시” 이며, 환경목표는 다음과 같음

점은 단 1개(오륙도 인근 정점 S46)가 포함되어있어, 부산 연안의 해양생태계 관리에는 매우 미흡함.

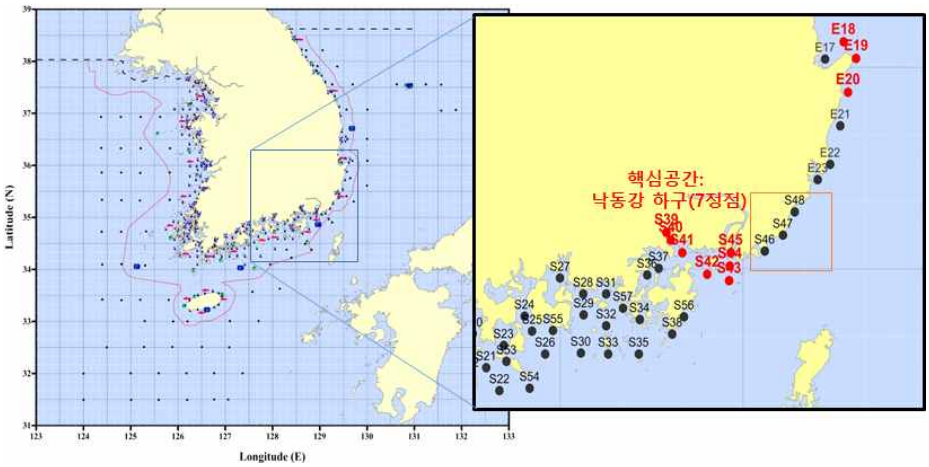


그림 67. 국가 해양생태계 종합조사로 수행중인 부산 연안 조사 정점

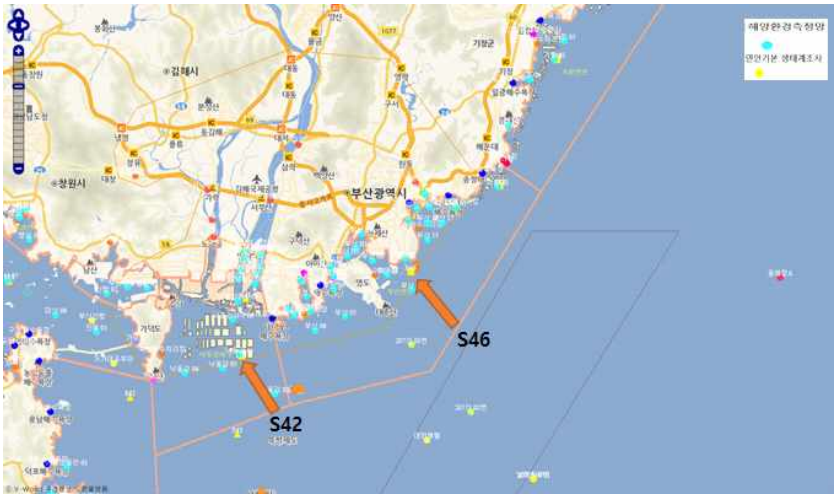


그림 68. 부산연안특별관리해역 범위에 속하는 해양생태계종합조사 정점

○ 해양수산부의 R&D로 수행중인 “장기해양생태계 연구(LTMER)”는 기후 및 해양 환경요인 변화에 따른 해양생태계 구조 및 기능의 장기변동추세 관측 및 예측 목적을 위하여 2011년에 시작하여 2021년까지 총 11년간 수행하고 있음.

○ 국립수산과학원은 해양환경 및 생태계현황 조사를 위해 정선해양관측을 수행해오고 있는데 이때의 생태계는 수층생태계만을 대상으로 하고 있고 저서생태계 조사는 수행하고 있지 않음.

○ 국립공원연구원은 자연공원법, 습지보전법, 야생생물보호법 등의 규정에 의거

수영만권역 : WQI 하계 2등급 이하 80% 유지, COD 농도 1.0ppm 이하
부산항권역 : WQI 하계 2등급 이하 80% 유지,Cu, Zn 관리기준 이하, Pb, Hg 주의기준 이하
낙동강하구 : WQI 하계 3등급 이하 80% 유지

국립공원의 연안, 도서 등에 대한 해양 환경, 생물에 대한 조사연구 수행

표 7. 환경부와 해수부의 대표적 국가 해양생태계 장기 모니터링 사업

구분	환경부(국립공원관리공단)	해수부(해양환경관리공단)
목적	해양생태계 현황과 변화를 파악→해양생태계 종합·체계적 보전·관리	
범위	해상·해안국립공원 해양구역	우리나라 영해
대상	갯벌, 연안(2,753.7㎢)	갯벌, 연안, 근해(443,838㎢)
주요 사업명	국립공원 해양생태축 조사	국가해양생태계 종합조사 (해양생태계 기본조사)
정점 수	96	161(공원구역 정점 19개 포함)
연간 소요예산	2.5억원/년 ※ 자체사업 추진	20억원/년 ※ 외부 용역 추진
조사분야 /시기	11개 분야/계절별	16개 분야/연2회 ※11개 분야 외에 미생물, 중형저서동물, 갑각류, 두족류, 염생식물 등 포함
조사주기	매년	10년→2년
조사시작	2015년~(매년, 계절조사(4회))	1단계: 2006년~2014년(10년 주기) 2단계: 2015년~ (2년 주기, 연2회)

○ 국립공원연구원은 해상・해안국립공원의 보전관리를 위해 ‘국립공원 해양생태축 기본조사’와 ‘HS호 유류유출 사고에 따른 생태계 영향 장기모니터링’ 사업을 진행

- 국립공원내 장기 모니터링은 환경오염과 해양생태계 변화에 대한 상관성 규명하기 위함
- 시계열분석, 원인분석, 다변량 분석 등을 통한 해양생물 분포에 영향을 미치는 중요 환경인자(수온, 부영양화, 빈산소 수괴 등) 파악
- 생물 vs. 환경, 생물 vs. 생물간의 영향을 파악하여 중요 생태계 구성인자 파악과 상관성 분석(상관계수)을 통한 건강성 평가
- 인공신경망, Individual Based Model(IBM) 등의 해양생태계 변동모델 활용 등

표 8. 국립공원연구원의 해양생태계 장기 모니터링 사업

구분	국립공원 해양생태축 기본조사	HS호 유류유출 사고에 따른 생태계 영향 장기모니터링
목적	생태계 건강성과 환경변화를 포함한 기후변화에 의한 생태계 변동 파악	유류사고 이후 생태계 회복 정도 파악
범위	해상·해안국립공원 해양구역	태안 해안국립공원
대상	해양공원 전체(2,753.7㎢)	태안 해안(352.8㎢)
정점 수	96(공원 내 62, 공원 밖 34)	공원 내 15
분야/시기	11개 분야/연4회	20개 분야/연4회
조사시작	2015년~	2009년~2018년

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구최종목표

○ KIOST가 위치한 항만 인근에서 해수 수질을 장기적으로 모니터링 함으로써 이들 원소에 대한 환경변화 기초자료 제공
○ 실시간 모니터링을 통해 연구대상 지역의 이산화탄소 흡·방출 변동을 파악하고 변동요인을 살펴봄.
○ 장기 모니터링을 통해 해양 산성화 경향 및 주요 영향 인자 파악
○ 표층해수와 해양대기 이산화탄소 분압 시계열 모니터링을 통한 고품질 해양-대기 이산화탄소 교환량 산정
○ 대기 침적 (wet/dry deposition)으로 연안에 유입되는 물질 및 그 양을 파악하고 시계열 변동을 살피며 해양 환경에 미치는 잠재적 영향 파악
○ 정기/장기적 모니터링시스템을 구축하여 1) 인위적/자연적 해양환경의 거시적 변화를 이해하며, 2) 유해 적조생물을 포함한 남방기원 아열대생물의 유입 및 생태 거동을 과학적으로 진단하여, 연안생태계의 체계적 관리방안을 도출함.
○ 부산 항만 연안에서 자연 방사성 추적자 Be-7, Pb-210을 이용한 대기 입자물질 (대기 분진 및 에어로졸)의 기원, 거동 및 영향 평가
○ 방사성 동위원소 추적자와 결합하여 대기 분진 기원 각종 화학성분 (중금속 오염 등) 부산 연안에서 유입 및 거동 평가
○ 부산 항만 연안에서 대기 분진의 인공 방사능 핵종 (Cs-137 등)의 모니터링 및 해양 유입 가능성 평가
○ KIOST 장기 모니터링 시스템을 구축하여 동해와 남해에서 미소플랑크톤의 생체량, 군집구조 및 다양성의 시계열 자료 생산을 통해 식물플랑크톤 생태계의 구조 및 기능을 이해하고 관련 연구의 지원 및 미래 변화에 대응하기 위한 기반 역량 제고
○ 부산항의 영도 수변시설 주변의 중형동물플랑크톤 군집구조의 계절 변동성 및 연간 변동성 분석
○ 중형동물플랑크톤 장기변동 모니터링을 통한 (연안)생태계 변화 진단 및 예측
○ 우리나라 동·서·남해 연안생태계를 구성하는 동·식물플랑크톤의 종출현빈도모델 (Species Occurrence and Abundance Models, SOAMs)과 생태계구조모델 (Ecosystem Structure Model, ESM) 개발 및 동·식물플랑크톤 주요 우점종의 출현변동 예측(1개월/3개월 단위)
○ 알과 유생을 이용한 어류 및 대형 해양 동물의 종별 평균 산란시기 모형
○ eDNA, BRUVS, UVC 등을 이용한 어류 및 대형 해양 동물의 종별 평균 계절천이 모형
○ 해양환경변화에 따른 장기적, 시계열적인 저서생태계의 자료 획득을 위한 해

양생태계 모니터링 체계 구축

제 2 절 연구내용 및 범위

1. 해양/대기 환경 모니터링

○ 부산만 내 KIOST 인근 정점에서 주 1회-월 1회 해수 중 일반수질 및 미량원소 항목에 대한 변동 특성 파악
○ 이산화탄소 흡·방출 변동
- 이산화탄소 인자 실시간 모니터링
- 월별, 계절별, 연별 변동 파악
- 변동 인자 파악 및 영향 정량화
○ 해양 산성화
- 산성화 경향 파악
- 산성화 주요 영향 인자 파악
- 산성화 메커니즘 연구
○ 표층해수와 해양대기 이산화탄소 분압 관측장비의 표층 계류를 통한 시계열 모니터링 자료 획득
○ 해수 이산화탄소 분압의 변동 특성 파악
○ 고품질 해양-대기 이산화탄소 교환량 산정
○ 에어로졸 및 대기 화학 인자의 연속 관측
○ 강우 및 미세입자 시료 획득 및 화학 성분 분석
○ 오염 기원 및 광물기원 물질의 습식 및 건식 침적량 파악
○ 계절 및 연별 변동과 이를 조절하는 인자 파악
○ 분석 자료를 이용한 기원지 추정
○ 대기 침적물질이 해양 생지화학에 미치는 잠재적 영향 파악
○ 방사성 동위원소 이용한 부산 항만 인근 대기 오염 물질 해양 유입 추적 연구
○ 연구원 내 연구동 옥상에 대기 환경 모니터링 장비 및 대기 분진 채취기를 설비하여 대기 분진 등 대기 입자 물질 중 방사성 동위원소 (Be-7, Pb-210) 추적자를 이용하여 대기 오염물질의 해양 유입량 및 거동 평가
○ 대기 분진 시료중 인공 방사능 동위원소 (Cs-137 등) 농도 상시 정기 (2주, 월 주기) 모니터링

2. 해양생태계 모니터링

○ 남해와 동해 연구거점의 미소플랑크톤 생체량 분석
- HPLC 분석을 통한 식물플랑크톤 생체량의 시계열 변화 파악
- 집중 조사시기에 형광센서를 이용한 엽록소 형광 연속관측
○ 남해와 동해 연구거점의 미소플랑크톤 다양성 현황 파악
- 다양한 조합의 분석기술 (microscopy, flow cytometry, FlowCAM, HPLC)을 이용한 분류군별 미세조류 다양성 분석
- 차세대 염기서열 분석기술 (NGS)을 이용한 다양성 자료 대량 생산
- 다양한 분류군으로 NGS 기술 이용 확대
- 연구거점별 미세플랑크톤 종 목록 작성
○ 미소플랑크톤 군집구조의 시공간적 변화 특성 이해
- 식물플랑크톤 우점종 서식지별 계절변화 특성 파악
- 크기별 식물플랑크톤 생체량 기여율의 서식지별 계절변화 특성 파악
- HPLC를 이용한 지시색의 시계열 변화 및 생체량기여도 분석 CHEMTAX 적용 기법 개발
○ 기능 유형별 식물플랑크톤 (PFTs) 다양성 현황 파악
- 기능 유전자를 이용한 PFTs 다양성 분석
- 기능유형별 식물플랑크톤 (PFTs)의 다양성 현황 모니터링을 통해 주요 기능그룹 변화 연구를 위한 기반 환경 제공
- 난류 기원 아열대화 지표종의 선정 및 분포 특성 파악
○ 중형동물플랑크톤 군집구조 및 다양성 장기변동 모니터링
○ 해양환경 변화를 지시하는 중형동물플랑크톤 지표종 탐색 및 발굴
○ 중형동물플랑크톤 개체군 변동과 환경요인과의 상관성 규명
- 단계별 연구내용
○ 통영기지 주변해역 정점 및 거제 남해연구소 주변 해역, 여수 돌산도 인근 해역, 부산 본원 주변 해역의 각 1개 정점에서 매 2주 환경요소 측정과 동·식물플랑크톤 시료 채집
- 통영 관측정점 예: 34o45.74~76‘N, 128o22.56~33‘E
- 환경요소 관측: 수온, 염분, 영양염, 일사량(여수/진주/부산 기상대 자료를 사용)
- 동·식물플랑크톤 채집
○ 동·식물플랑크톤 시료 DNA 메타바코딩
- 미토콘드리아 COI 유전자 이용
- ‘13-’16 분석결과 검토 및 ‘16-’18 채집 시료 분석
○ 종출현빈도모델(SOAM) 시범 도출
- 통영해역에서 우점하는 동·식물플랑크톤 대상
- 확률과정모형, 특히 상태공간모형을 활용하여 시범 분석
- 기계학습모형, 특히 RNN기법의 적용 가능성 분석

○ 어류 및 대형 해양 동물의 종별 평균 산란시기 분석
- 어류 및 대형 해양 동물의 알 수집
- 분자마커를 이용한 개별 알의 형태형질 분석 및 종 동정
- Metabarcoding을 이용한 혼합 알의 종 동정
- 종별 산란시기와 지속시간 년 변화 분석
○ 해역별 어류의 종별 평균 산란모형과 종별 금어시기 비교 분석
○ eDNA, BRUVS, UVC 등을 이용한 어류 및 대형 해양 동물의 종별 계절천이
- 해수의 eDNA 수집
- eDNA를 metabarcoding으로 출현종 종 판별
- BRVUS와 UVC를 이용한 출현시기와 출현 빈도 분석
- eDNA, BRVUS, UVC 분석결과 비교 분석
○ eDNA, BRUVS, UVC 기반의 어류 및 대형 해양 동물의 종별 계절 천이와 어란 기간의 종 별 산란시기 및 지속기간에 대한 상관성 분석
○ 저서생태계 조사 표준화 구축
- 저서생태계 모니터링 표준화 구축을 위한 대상 동물군은 중형저서동물과 대형저서동물을 대상으로 함
- 모니터링 표준화 항목 및 세부 내용 선정
·필수항목: 동물 채집/시료 처리 방법, 종 분석 방법, 자료 분석 방법
·추가항목: 환경요인과의 연관분석 방법, 환경요인 측정 및 분석 방법
·세부내용: 저서동물 채집을 위한 장비나 시료의 전처리 방법, 종 분석시 모니터링 해역에 출현하는 종 분석 지침서와 출현종들에 대한 코드화, 환경요인 및 자료분석의 항목 선정
○ 저서생태계 조사 및 내용
- 저서생태계 조사 대상동물은 중형저서동물과 대형저서동물임
- 조사 항목
·필수항목: 종조성, 서식밀도, 생물량
·추가항목: 채집지역의 지리정보, 퇴적물 특성(유기물, 입도), 중금속 등
·조사 주기: 계절별 1회 또는 최소 연간 2회의 계절 조사 필요
·조사 지역: 타 분야 조사 지역과 연계하여 선정함. 또한 해양과기원의 본원이 있는 부산 연안해와 분원인 제주, 남해, 울진, 울릉도/독도를 활용한 연안해역을 조사지역으로 선정할 수 있음
- 조사 정점 선정
·저서생태계의 특성상 patch 분포를 고려하여야 하며, 조사해역의 범위와 정점간의 거리, 조사 지역의 퇴적상, 수심 등을 고려하여 선정
·서식특성 환경에 맞게 대조구와 실험구를 선정해서 정점수를 선정
- 조사 방법
·해양 저서 퇴적물 확보를 위하여 그랩(Smith-McIntyre grab, 0.1 m2),

·Multipler corer(MC), Box Corer(BC)를 활용

- 해양저서동물 장기 모니터링 분석 내용:

·저서동물 다양성 분석과 출현 변동

·외래종 유입/기후변화 민감종 현황 분석

·자연과정, 종 서식밀도, 군집구조와 변화 분석(계절별, 연간 변화, 장기 변화)

·저서생태계(분류군 별) 평가지수(건강도지수)

·영양염, 오염물질(중금속) 또는 인간의 간섭이 저서동물 군집에 미치는 영향

·타분야 자료(영양염, 식물플랑크톤, 해수내 오염물질, 퇴적물 등)와의 연관분석

제 3 절 연구방법

1. 해수물리특성 분야

가. 기존 모니터링 자료 분석

○ KIOST는 지역거점의 적극적인 활용과 고유의 관측선 또는 관측정점의 구축의 목적으로 'KIOST 지역거점 실시간 관측 시스템 구축과 자료표출시스템의 개발' 사업을 수행하였음. 이 사업을 통해 부산 본원과 4곳의 임해연구 인프라(동해연구소, 남해연구소, 제주연구소, 울릉도·독도해양연구기지)에 기초적인 물리특성을 모니터링 할 수 있는 장비를 설치하고 관측자료를 실시간 가시화하는 체계를 구축하였음. 관측항목은 수온, 염분, 조위를 기본으로 하며 바람(풍향과 풍속)을 추가로 포함한 시스템으로 구성되었음.

○ 자료표출시스템은 실시간 관측자료를 수집하여 전처리 과정을 거쳐 각 관측 시스템의 기초적인 해양환경정보 (소온, 염분, 조위, 파랑 등) 및 기상 정보 (기온, 풍향, 풍속 등)을 표출하며 관측자료의 데이터베이스 구축

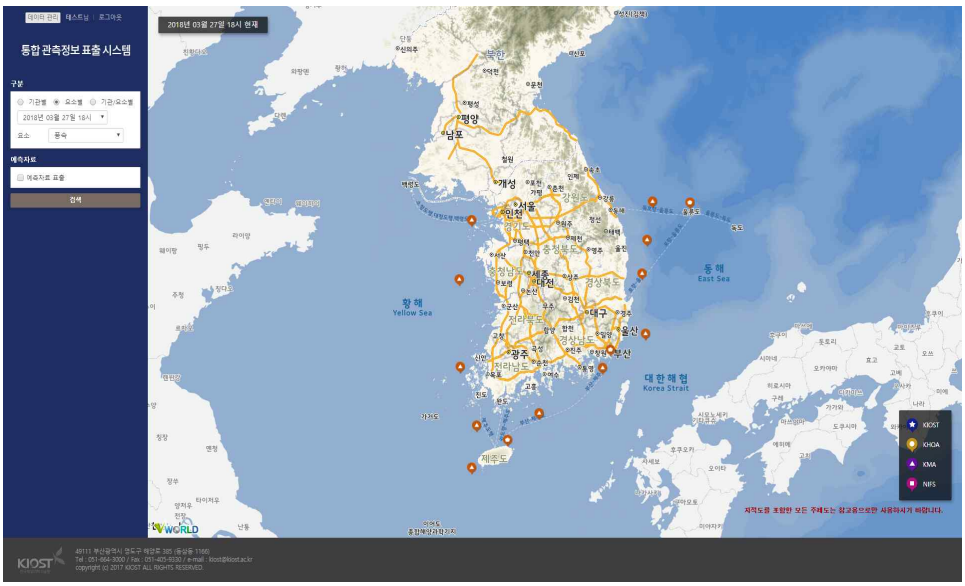


그림 69. KIOST 통합관측정보 표출시스템 초기화면

○ 그런데 현재 구축되어 있는 실시간 모니터링 체계로 획득되는 자료가 실제로 성과로 이어지기 위해서는 아직도 보완해야 할 과정이 남아있는 것으로 판단됨. 가장 시급하게 보완하여야 할 과정은 관측자료의 신뢰성을 구축하고 유지하기 위한 품질관리 과정임.

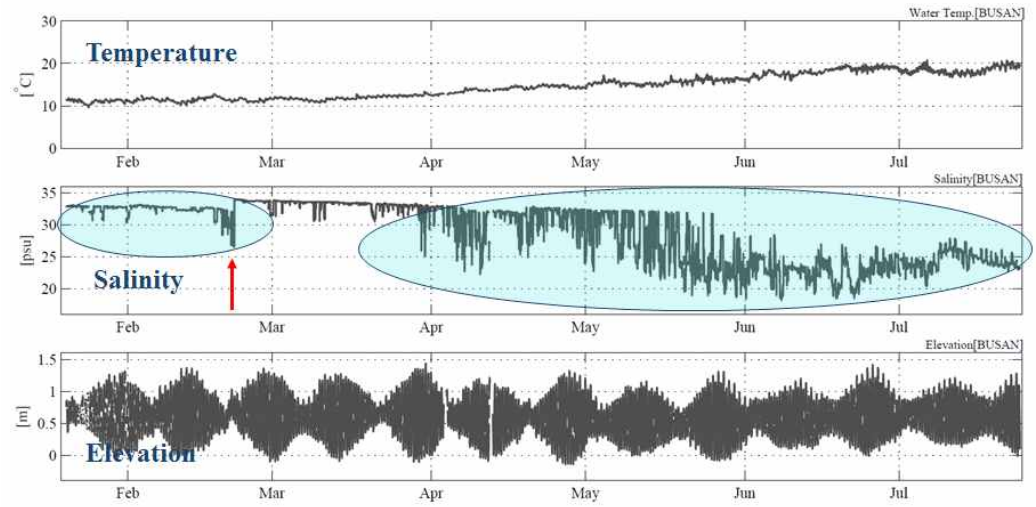


그림 70. 부산 본원의 수온, 염분, 조석의 모니터링 결과 (예시)

○ 먼저 부산 본원의 모니터링 자료 시계열 특성을 보면 2월 하순 부근 (그림에서 붉은 화살표)에 2 psu 정도의 급격한 염분 상승이 보임. 이는 장비가 해수 중에 계속 잠겨있어야 하는 특성 때문에 설치 이후 센서부의 생물학적인 오염으로 관측오차가 발생하게 되는데 이 시기 장비의 점검이 이루어진 것으로 설치후 약 1개월이 경과한 이후 오차가 크게 증가하는 특성을 보여줌. 생물오염에 의한 오차는 수온이나 조위보다는 염분에 두드러지는데 이는 conductivity cell 내부가 특히 생물학적인 오염에 민감하기 때문임. 보통 생물에 의한 피막이 형성되는 경우 관측치가 낮아지는 특성을 보이고 내부에 고형의 이물질이 형성되는 경우 단주기 변동이 증가하는 경향을 보임. 자료에서는 2월 하순 장비의 점검으로 센서부의 오염이 제거되어 오차가 해소된 것으로 판단됨. 그런데 4월 이후에는 짧은 주기의 변동이 크게 증가하는 것으로 보아 conductivity cell 내부에 고형의 이물질과 생물 피막이 형성되어 복합된 영향을 주고 있는 것으로 판단됨.

○ 결론적으로 모니터링 체계의 구축도 중요하지만 장비와 센서의 적절한 유지관리가 관측자료의 신뢰성 확보에 매우 중요하다는 것을 알 수 있음. 따라서 주로 생물생산성이 높은 연안에 관측 장비들이 설치된 것을 고려할 때 최소한 1 개월에 1 회 정도의 장비와 전도도 센서의 점검이 필요하며 여름철에는 2 주에 1 회 정도의 점검이 필요할 것으로 판단됨.

나. 관측 항목, 장비, 설치 운영 방식

○ 물리분야에서 가장 기초적인 모니터링 항목은 수온과 염분으로 현재 구축되어 있는 지역거점 모니터링 시스템에 이미 포함되어 있음. 현재 시스템의 유

지관의 측면에서 수온의 경우 매우 안정적으로 판단되지만 앞에서 언급한 바와 같이 염분의 경우 보다 세심한 주의와 현장 관리가 필요함. 향후 우리 기관의 대표 관측자료로 활용되기 위해서는 염분 관측자료의 신뢰도 확보가 매우 중요하게 고려되어야 함.

○ 해류의 관측은 목적에 따라 그 방식도 매우 다양하며 더욱 신중한 접근이 필요함. 해류는 수온/염분 또는 조석에 비하여 공간적인 변동이 크기 때문에 관측 정점이 그 대상 해역을 대표하는지에 대한 검토가 필요함. 예를 들어 부산 본원과 동해연구소의 경우 비교적 정온도가 유지되고 있는 항내에 모니터링 시스템이 설치되어 있어 실제 유속이 크지 않으며 지역적인 대표성을 가지지 않음. 제주연구소와 울릉도·독도해양과학기지의 경우도 비교적 열려진 정점에 모니터링 시스템이 설치되어 있지만 육지와 가까이 있기 외측의 해류와는 전혀 다른 특성을 보일 가능성이 높음. 만약 해역을 대표하는 해수유동을 관측할 목적이라면 연안에서 비교적 거리를 둔 외해에 해류계가 설치되어야 하며 해양관측부이 또는 해저계류 시스템이 필요하며 이 경우 안전성 확보와 장기 유지를 위해서는 매우 큰 경비와 노력이 필요함. 따라서 효율성의 측면에서 해류 관측과 유지의 타당성은 크지 않는 것으로 판단됨.

○ 우리나라 서해안과 동해안에서 해양환경을 분석하기 위해서는 조석 정보가 필수적임. 그런데 조석의 경우 공간변동성이 다른 항목들에 비해 작은 반면 국립해양조사원에서 비교적 세밀하게 조석관측소를 운영하고 있어 추가의 모니터링 시스템 없이도 조석 정보를 획득하는 것은 어렵지 않음. 다만, 최근 기후 변화에 따라 빈번해 지고 있는 이상 해수면의 발생은 지역적으로 편차가 있어 이미 구축된 모니터링 시스템의 자료가 보조적으로 활용 가능함. 따라서 이미 구축된 조석 관측은 현재 상태로 유지하는 것이 타당할 것으로 보임.

다. 장기 모니터링 체계로의 발전 전략

○ 물리분야의 실시간 관측시스템이 장기 모니터링 체계로 안정화되기 위해서는 이 시스템의 기후변화에 따른 해양환경 반응의 모니터링이라는 효용이 검증되었다는 가정 하에 기관의 제도적으로 정비를 통해 안정적인 기술의 확립과 효율적인 인력, 제원의 투입 계획의 수립이 필요함.

○ 먼저 종합 해양연구기관으로서 장기 모니터링 체계의 구축과 운영이 우리 기관의 임무로 명문화할 필요가 있으며 이에 따른 임무분장의 지정이 필요함. 기본적으로 장기 모니터링 체계의 운영과 유지 관리를 위해서는 장비/센서의 유지관리 업무, 실시간 자료의 수집과 1차 품질관리 업무, 신뢰성 제고를 위한 2차 품질관리 업무, 자료의 재분석 및 서비스 업무 등이 필요함. 이와 관련된 우리 원내의 조직은 해양기기개발·운영센터와 해양과학데이터운영실이 있음. 다만 자료의 2차 품질관리 및 재분석을 위해서는 해당 자료의 분석에 전문성이 있는 연구인력의 지원이 필요함. 다만, 아직 모니터링 체계 기술의 안정화

에는 아직 보완할 사항들이 남아있기에 1단계 2년 동안 기술의 보완과 안정화를 추진하고 2단계 2년 동안 모니터링 업무를 기관 인프라 업무로 이관하여 상시 업무로의 전환 과정을 거치는 것이 적절할 것으로 판단됨.

■ 1 단계 (2019-2020): 장기모니터링 기술의 안정화

○ 1차년도 (2019): 관측자료의 품질 기술 수립
- 기존 관측자료의 이상원인 정밀분석
- 장비/센서의 점검 방법의 주기 분석
- 생물학적 오염 영향 최소화 방안 수립
- 1, 2차 품질관리 방식 및 양식 수립
- 장기모니터링 체계 운영 지침 검토

○ 2차년도 (2020): 장기모니터링 체계 안정화
- 장비/센서의 최적 관리 방안 수립
- 모니터링 자료의 서비스 개발
- 장기모니터링 체계 운영 기술 확립

■ 2 단계 (2021-2022): 상시 모니터링 운영체계 확립

○ 3차년도 (2021): 상시 모니터링 시스템의 이관
- 상시 운영인력의 교육 훈련
- 상시 모니터링 업무 메뉴얼 확정
- 상시 모니터링 자료 서비스 시험 운영

○ 4차년도 (2022): 상시 운영체계 보완
- 상시 모니터링 자료 서비스 활용도 분석
- 상시 모니터링 자료 품질관리 모니터링 체계 확립

2. 일반수질 및 미량원소

○ 일반수질
- KIOST 인근 1개 정점에서 수질을 주 1회 혹은 2주 1회로 Niskin 채수기를 이용하여 표층수를 채취함.
- 채취된 해수는 미리 태운 유리섬유여과지(GF/F)로 여과하여 영양염 5개 항목을 영양염 분석기로 분석하며,
- 우리나라 수질평가지수 계산의 평가항목인 저층 DO(다항목 측정기, YSI 6600), Chl-a(여과후 여과지를 90% 아세톤으로 추출하여 turner로 측정), 투명

도(secchi disc)를 분석함.

○ 미량원소
- 미량원소 분석용 해수 시료는 월 1회 PVC 장대에 산세척된 1L HDPE bottle을 이용하여 채취한 뒤 산세척되어 무게가 측정된 폴리카보네이크 막 여과지로 용존상과 입자상을 분리함.
- 용존상 시료는 초고순도 질산을 가해 pH를 1-2로 맞춘뒤 해수극미량원소 자동분석기(seaFAST sp3 (ESI), ICP-MS(NexION 2000, Perkin Elmer))로 분석을 하며,
- 입자성물질을 고순도 불산, 질산으로 완전분해 시켜 원소에 따라 적절히 희석하여 ICP-MS(iCAPQ, Thermo Scientific)로 분석함

3. 무기탄소 인자 모니터링

○ Discrete sampling
- 총 용존 무기탄소, 총 알칼리도 측정을 위한 샘플을 주1회 채취하여 분석함.
- 샘플 채취 빈도는 관측된 이산화탄소 분압 변동에 따라 조정하며, 일주기 변동을 제거하기 위해 반드시 같은 시간에 샘플링을 실시함.

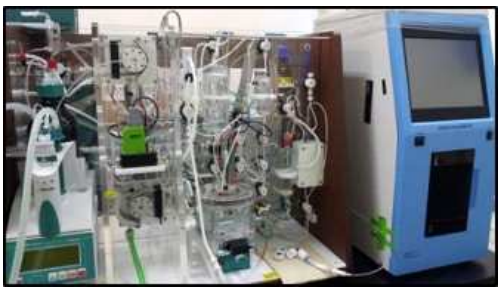


그림 71. 총 용존 무기탄소 및 총 알칼리도 측정 장비

○ 측정이 필요한 다른 인자들
- 수온, 염분, 용존산소, 영양염, 클로로필, 풍속, 대기압 등의 측정도 병행되어야 함.

4. 해양 이산화탄소 분압 시계열 모니터링

○ 표층해수와 해양대기 이산화탄소 분압 관측장비의 표층 계류를 통한 시계열 모니터링 자료 획득

○ 해수 이산화탄소 분압의 변동 특성 파악
○ 고품질 해양-대기 이산화탄소 교환량 산정
○ 실시간 모니터링
- pH: pH sensor나 dye를 이용한 실시간 관측 장비를 이용하여 측정
- 이산화탄소 분압(pCO2): 부이나 underway 관측 장비를 이용하여 실시간 모니터링 함.

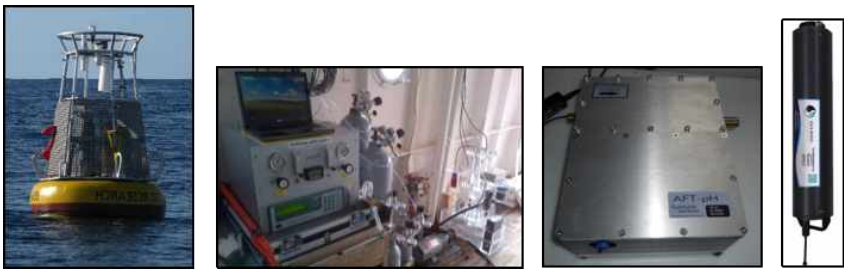


그림 72. 실시간 모니터링 장비 예 (좌측 2기:pCO2용, 우측 2기:pH용)

5. 대기 침적 모니터링

○ 강우 모니터링 (wet deposition)
- 자동강우시료 채취기를 이용하여 주1회 간격으로 강우 시료를 채취함.
○ 건침적 모니터링 (dry deposition)
- 총 대기입자 분진 샘플을 대용량 대기입자 샘플러 (high volume air sampler)로 채집하여 3~4일 간격으로 시료를 채취함. 침적량에 따라 시료 채취간격 변경 필요.
○ 성분 분석
- 주요 이온: NO_3^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, F^-, Cl^- 등
- 미량금속을 포함한 주요 금속: Fe, Al, Pb, Cu, As 등
- 탄소 및 질소 동위원소
- 총 알칼리도 및 pH

6. 대기 분진 방사능 모니터링

○ 샘플링
- 차년도 2019년 본 연구원의 해양환경 연구센터에 대기 분진 (PM10 또는 TSP) 연속 자동 채취기가 도입 예정이며, 함께 대용량 대기 분진 채취기 (PM10, (분당 ~1 m^3)도 도입 예정이며 1연구동 옥상 등 연구원 내 설치 예정임.

- 위 대용량 대기 분진 채취기를 이용, (입자 크기 ≤10 μm) 100 x PTFE 200mm x 250mm Pallflex Filters 여과지에 약 수일-수 주간의 대기 분진 대용량 샘플을 통해 (>1,000 ~ 2,000 m^3) 자연/인공 방사능 계수(counting)용 시료를 획득할 예정
- 또한, 대기 분진 (PM10) 연속 자동 채취기를 통해 (47 μm) 소형 필터지에 주-수 주간의 샘플링을 통해 중금속 등 기타 인위적 기원 화학 성분들의 함량을 측정 예정

그림 73. 2019년 상반기 연구원에 도입 예정인 대기분진 모니터(및 자동채취기) (왼쪽)과 자연/인공방사능 핵종 측정 시료 획득 위한 대용량 대기 분진 (분당 ~1 m^3) 채취기 (오른쪽)

○ 시료 분석

- 자연 방사능 핵종인 Be-7, Pb-210과 인공 방사능 핵종인 Cs-137은 해양환경연구센터에 설비된 감마핵종 계수기 (γ-counter)를 이용하여 1주일 이상 계수를 통해 신뢰도 높은 값을 측정 예정에 있음
- 동일 시료는 감마 핵종 계수 이후, 향후 위 여과지 시료를 전처리를 통해 Po-210, Pu 동위원소 등 알파핵종 원소들 역시 이후 알파 계수기 이용 (α-counter) 측정 예정에 있음
- 일반 대기 분진 여과 시료는 해양환경연구센터 내 협업 연구를 통해 전처리 및 질량분석기를 이용 중금속 등 인위적 기원 화학 성분 측정 예정

그림 74. 해양환경연구센터 실험실에 설비된 감마핵종 계수기 (왼쪽)와 알파핵종 계수기 (오른쪽)

7. 미소플랑크톤 모니터링

가. 시료채집 및 보관

○ 조사정점은 제주도, 거제도, 부산항, 울릉도로 선정하고, 주간 관측을 통하여 얻은 식물플랑크톤 시료를 분석함.

○ 시료의 채취: Niskin 이나 표층 시료 채취용 용기를 이용하여 채수 후 바로 실험실로 이동하여 시료를 처리함. 시료 채취 후에는 현장 수온에서 크게 낮아지거나 높아지지 않게 유의하여야 함.

○ 식물플랑크톤 생물량 (Chl a): 현장에서 해수 300~500 ml을 GF/F (25 mm 지름) 여과지에 여과 후 1.5 ml cryovial에 넣어 -70℃의 초저온냉동고에 보관함. 시료의 이동시에는 드라이아이스에 넣어 이동함.

○ 식물플랑크톤 및 원핵생물 개체수: 채수한 해수 27 ml를 멸균된 50 ml conical tube에 넣고, 냉동고정용 시약 (파라포름알데하이드 10%, 글루타르알데하이드 0.05%, Marie et al., 1996)을 3 ml 넣어 고정함. 실온에 약 10분간 방치한 후 -70℃의 초저온냉동고에 보관함.

○ 식물플랑크톤 및 원핵생물 군집조성: 채수한 시료 1~2 L를 0.2 ㎛의 Supor 여과지(47mm, Gelman)에 여과함. 여과된 여과지를 멸균된 1.5 ml cryovial에 넣고, 1 ml의 STE (NaCl-Tris-EDTA buffer) 버퍼를 넣은 후 -70℃의 초저온냉동고에 보관함.

○ 식물플랑크톤 색소: 채수한 시료 2 L를 GF/F 여과지 (47 mm 지름)에 여과한 후, 1.5 ml cryovial에 넣어 -70℃의 초저온냉동고에 보관함

나. 분석 방법

○ 식물플랑크톤 생물량

- 엽록소 a의 측정은 형광법을 이용하여 측정함(Parsons et al., 1984). 90%의 아세톤을 넣어 24시간 추출 한 후 형광계(Turner 10AU)를 이용하여 측정함. 이 때 형광계는 엽록소 a 표준용액을 사용하여 잘 calibration된 기기를 사용하여야 함.

○ 식물플랑크톤 개체수

- 식물플랑크톤에는 Synechococcus, Prochlorococcus, 광합성초미소진핵생물, nanoflagellates, Cryptophytes 등이 포함됨. 시료는 현미경, flowcytometer 및 flowCAM 을 이용하여 계수함(Campbell and Vaulot, 1993).

○ 식물플랑크톤 군집조성 (DNA 분석)

- 식물플랑크톤의 다양성은 분류군에 따라 적합한 분자마커를 이용하며(그림1), MiSeq 플랫폼을 이용하여 분석(그림 1). DNA 정제, PCR, 염기서열 분석 및 자료처리는 Choi et al. (2016)의 방법에 따라 수행함.

○ 식물플랑크톤 색소

- 식물플랑크톤의 지시색소는 C8 Column을 이용한 Reverse-phase HPLC 방법을 사용하여 측정함 (Zapata et al. 2000). 95% 아세톤을 넣고 24시간 추출 후 0.2μm hydrophobic PTFE 필터로 거름. 여과액 1ml을 0.4ml의 순수한 물과 섞어 HPLC (색소의 극성을 극대화하여 column에 대한 분리능 높임) 시스템에 injection 함. Column을 지나 분리된 색소는 diode-array detector를 통하여 시간에 따른 440nm대의 흡광도를 측정하여 peak의 모양으로 나타냄. 측정된 peak 정보는 검출된 시간 및 면적을 통하여 색소의 종류 및 농도로 변환함.

○ 원핵생물 개체수

- 원핵생물의 개체수는 냉동고정된 시료를 녹인 후, 시료 1 ml에 100X SYBR green I을 10㎕ 넣어 5분간 염색 한 후 flowcytometer를 이용하여 계수하는 방법을 따름(Marie et al., 1997).

○ 원핵생물 군집조성 (DNA 분석)

- 원핵생물의 군집조성은 MiSeq을 이용하여 16S rDNA 염기서열을 분석하여 파악함. DNA 정제, PCR, 염기서열 분석 및 자료처리는 Choi et al. (2018)의 방법에 따라 수행함.

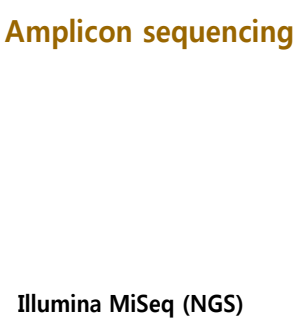


그림 75. 식물플랑크톤 다양성 분석을 위한 다양한 접근방법

○ 장목 및 제주 식물플랑크톤 정성/정량

- 식물플랑크톤의 채집방법은 정성과 정량을 동시에 평가하는 것이 중요함.
- 식물플랑크톤의 종조성과 현존량 분석을 위하여 표층시료 500 mL 샘플을 Lugol's solution을 이용하여 최종 농도 1%로 고정함.
- 식물플랑크톤의 종조성을 위한 계수는 10-50 mL로 농축된 시료를

Sedgewick-Rafter counting chamber 에 100~300 μL분주하여 광학현미경하(100~400배 배율)에서 분석함.

- 정성분석은 망목 20 μm의 식물플랑크톤 네트로 수직으로 예인하여 200 mL 채수병에 넣고 Lugol's solution을 최종 농도 2-3%로 고정하여, 현미경으로 검경함.

8. 동물플랑크톤 모니터링

가. 부산항 중형동물플랑크톤 군집 구조

○ 부산항에 위치한 KIOST 연구원의 인접 수변공간 시설물 앞의 고정 정점(아래 그림 참조)에서 월 2회 격주(조사 정점의 수심이 최대가 되는 대조기 만조시 채집; 수심 7-8 m 내외) 현장 조사를 실시함.

○ 중형동물플랑크톤 채집은 원추형 네트(직경 50 cm, 망목 200 μm)를 사용하여 시설물의 데크 끝에서 바다 쪽으로 네트를 내린 후 수직채집을 2-3회 반복 실시하며(시료의 양이 충분히 확보될 때까지), 채집 후 시료를 중성포르말린으로 고정함.

○ 실험실에서 현미경(해부현미경과 고배율현미경)을 사용하여 전체 시료 또는 분할 시료로부터 중형동물플랑크톤을 형태학적으로 종 동정하여 종별 출현 개체수(개체 m-3)를 파악함.

○ 중형동물플랑크톤 가운데 요각류는 가능하면 종 수준까지 분석하고, 다른 분류군은 보다 상위분류군까지 분석하며, 야광충류는 중형동물플랑크톤 개체수에서 제외함.

○ 중형동물플랑크톤 군집 개체수 자료를 근거로 군집분석 프로그램을 활용(예, Primer 또는 PC-ORD)하여 계절별 또는 연별 군집 구조 특성을 비교함.

그림 76. 중형동물플랑크톤 모니터링을 위한 부산항
주변 수변공간 시설물의 고정 정점

나. 장목 및 제주 동물플랑크톤 군집 구조

○ 샘플링 간격

- 중형동물플랑크톤 개체수와 종조성의 시·공간적인 변화는 물리적 요인(수온, 염분, 성층, 해류 등)과 생물적 요인(먹이, 포식, 경쟁 등)의 영향을 받으며, 일반적으로 두 요인이 서로 조합(combination)되어 작용함(Beyst et al., 2001). 그러나 여러 요인들이 다원적인 관련성(multifactorial relationship)을 가지고 작용하기 때문에 동물플랑크톤의 변동성을 특정 환경요인과 연관하여 설명하는 것은 많은 어려움이 있음(David et al., 2005).
- 이러한 어려움을 최소화하기 위한 방편으로 기존 연구자들은 해역의 특성을 고려하여 중형동물플랑크톤의 조사시기와 간격(term)의 중요성을 강조하였음(Fromentin and Ibanez, 1994; Omorii and Ikeda, 1984). Omorii and Ikeda (1984)는 지각류와 요각류의 생활사를 고려한 연구에서 개체수 변화를 정량적으로 기술하기 위해서는 일주일에 최소한 한·두 번은 채집이 필요하다고 하였으며, 장 등 (2010)은 환경의 변화가 복잡한 해역에서 동물플랑크톤 군집의 변화를 보다 정확히 이해하기 위해서는 단주기적 샘플링이 요구된다 하였음. 또한, 박 (1995)은 중형동물플랑크톤의 주요 구성원인 요각류의 생활주기를 고려했을 때, 연안자원 이용 및 관리라는 목적하에 실시된 기존의 계절단위의 조사는 편중된 정보를 제공할 수 있다고 지적한 바 있음.
- 결론적으로, 중형동물플랑크톤 군집의 연 변동의 특성과 군집에 대한 환경요인과의 관계를 보다 명확하게 밝히기 위해서는 1-2주 간격의 단주기적 조사를 통한 분석이 타당하다 할 수 있음.

○ 샘플링 및 시료 처리

- 만, 하구, 육지와 인접한 지역의 경우 조석을 고려한 샘플링 시간을 선정하여 모든 고정점 및 조사기간에 동일하게 적용함.
- 수심 20 m 이내의 연안지역에서는 원추형 네트(망구 45 cm, 망목 200 ㎛)를

이용하여 채집함. 네트를 통과한 해수의 양을 계산하기 위해 네트 입구 1/3 위치에 유량계(예: Hydro-Bios model 438115)를 부착함.

- 채집방법은 수직채집을 적용하며, 네트를 해저 수심 약 1 m 위까지 내린 후 약 1 m sec-1 속도로 표층까지 예인. 예인 횟수는 충분한 시료 양을 확보하기 위해 3회 반복 실시함.
- 표층으로 예인된 네트는 미리 준비된 해수로 충분히 세척하여 네트에 달린 채집통(cod-end bucket)에 시료가 모일 수 있도록 한 후 네트 채집통을 충분히 세척하여 500-1000 mL 용량의 폴리에틸렌 채집병에 시료를 조심스럽게 담음.
- 채집된 시료는 미리 준비된 중성포린말린 원액을 첨가하여 최종농도가 4%가 되도록 고정. 만약, 채집병의 용량이 500 mL 이고, 시료가 포함된 해수의 용량이 480 mL 이면 20 mL의 중성포르말린 원액을 첨가하면 최종농도 4%가 됨.

※ 중성포르말린: 포름알데하이드 1 L에 30g의 borax(sodium tetraborate)를 첨가하여 잘 섞은 후 borax를 충분히 침전시키는 방식으로 제조하며, 침전물을 제외한 상등액을 사용함.

- 최종적으로 채집병에 정점, 날짜, 예인횟수, 유량계 회전수 등을 라벨링하고, 별도의 야장에는 채집병의 정보를 중복기재 함과 동시에 날씨, 채집자, 채집시간, 특이사항 등을 기록함.
- 채집이 끝난 네트와 유량계는 다음 채집을 위해 담수로 충분히 세척하여 건조시킨 후 보관. 네트 수명과 현장 채집시의 돌발 상황을 감안하여 여분의 네트와 유량계 준비

○ 시료 분석

- 채집된 중형동물플랑크톤 시료는 실험실에서 우점종의 개체수가 200개체 이상 계수될 정도의 부차시료(subsample)를 취하여 계수판에서 분류한다. 동일 해역의 시료는 분류의 일관성을 위해 1 인이 지속적으로 관찰하는 것이 바람직함.
- 동정은 해부 및 광학현미경을 이용하여 가급적 종 수준(특히, 요각류와 지각류)까지 하여야 함(그림 7). 동정이 어려운 분류군은 해당 전문가에게 의뢰하거나, 전문가 부재 시 최대한 상위 단계까지 표기함.

그림 77. 중형동물플랑크톤의 주요 분류군

- 동정 및 계수 자료는 네트 여과량(유량계 회전수)과 시료 분할비를 이용하여 단위체적 당 개체수(indiv. m^{-3})로 환산
- 동정이 완료된 시료는 추후 검정을 위해 밀폐된 시료병에 담아 통풍이 원활한 암실에 보관하고, 장기 보관 시에는 주기적으로 중성포르말린을 첨가

○ 통계기법 적용

- 중형동물플랑크톤 군집의 구조, 출현양상, 경향성, 환경인자와의 상관성 등을 파악하기 위해서는 적절한 통계기법 적용이 필수적임.
- 적용 가능한 통계기법

· 장기 모니터링을 통해 수집된 방대한 원시자료(raw data)는 통계기법 적용에 앞서 자료의 균질성 및 대표성을 확보하기 위해 평균값 또는 log 값으로 변환

· 중형동물플랑크톤의 구조, 출현양상, 경향성을 분석하기 위해 다양도 지수(species diversity index), 집괴분석(cluster analysis), k-Dominance curve, Cumulative sum, Trend analysis, 주성분분석(PCA, Principal Component Analysis) 등의 통계기법을 적용할 수 있음(그림 8).

· 중형동물플랑크톤의 장기 변동과 환경요인 간의 상호 연관성을 파악하기 위한 통계기법은 중복분석(RDA, Redundancy Analysis)이 가장 대표적임. 이 분석법은 대상종의 개체수 자료에 근거해 유사성 거리를 계산하여 배열함으로써 출현 양상을 표현함과 동시에 환경요인과의 상관관계 모형을 도면화함으로써 상호간의 관계를 이해하는데 적절하며, 도면의 중심으로부터 화살 길이와 방향, 그리고 기울기에 따라 각 출현종과 의 상관성 정도가 결정됨.

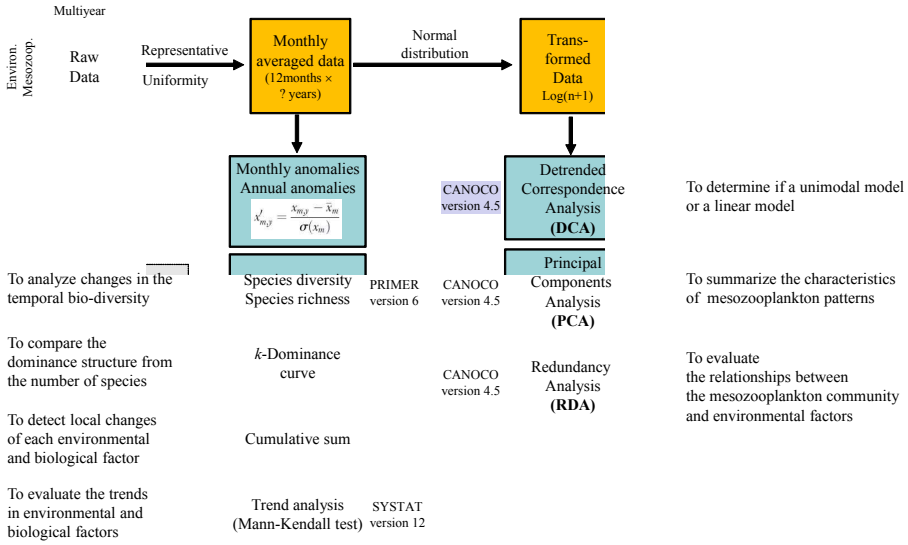


그림 78. 중형동물플랑크톤 장기모니터링 자료에 적용 가능한 통계기법

9. 플랑크톤 주요 우점종 출현변동 예측

○ KIOST 인프라 활용과 부서간 협력을 통한 융합연구 실현

- 시료채집과 환경요소 관측에는 통영해양생물자원기지, 부산본원, 남해연구소, 동해연구소, 울릉도/독도 기지, 제주연구소 등 KIOST인프라를 적극 활용
- 채집된 동·식물플랑크톤 시료의 관리와 종동정에는 해양시료도서관을 활용
- 영양염 분석은 해양기기개발운영센터 전문가에 의뢰
- 환경요소 관측데이터 및 시료분석 DNA 바코드 정보는 데이터운영실과 협력하여 관리
- SOAM과 ESM 모델개발에는 데이터운영실, 해양순환기후연구센터의 해당분야 전문가와 협력하여 최적의 모델을 도출

○ 용존 영양염 분석

- 시료채취: 표층과 저층에서 채수하여 2um PES여과지로 여과한 후 15ml 튜브에 담아 냉동보관
- 분석: 질산염, 아질산염, 암모늄, 인산염, 규산염 농도를 SEAL사 QuAAtro 영양염자동분석기로 분석
- 품질관리: 시료 분석 시에 KIOST가 자체 개발한 영양염 표준물질과 KRMs과 일본 KANSO사의 영양염 표준물질을 동시에 분석하여 표준물질의 특성값과 분석값의 차이가 부정확도 범위를 벗어날 경우 분석값을 표준물질 특성값에 대해 보정함

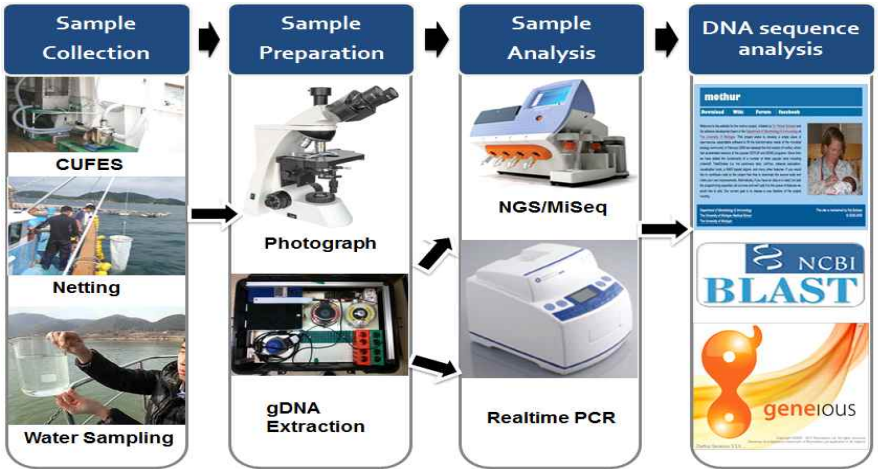


그림 79. 동·식물플랑크톤 채집 및 분석과정 예시

○ 식물플랑크톤 분석

- 표층과 저층에서 채수한 후 바닷물 1L에 루골고정액을 넣어 즉시 식물플랑크톤을 고정하고 고정된 시료는 농축시켜 현미경으로 관찰
- 정량화: 단위 부피당 식물플랑크톤을 계수하여 확인
- 현미경으로 분류가 어려운 종은 주사전자현미경 이용: 18SrDNA V9지역의 메타바코딩 분석

○ 동물플랑크톤 분석

- 미토콘드리아 COI 유전자를 이용 DNA바코딩으로 동물플랑크톤 출현종 및 빈도 확인
- 분류전문가를 활용하여 DNA메타바코드 결과를 확인하여 data cleaning 실시

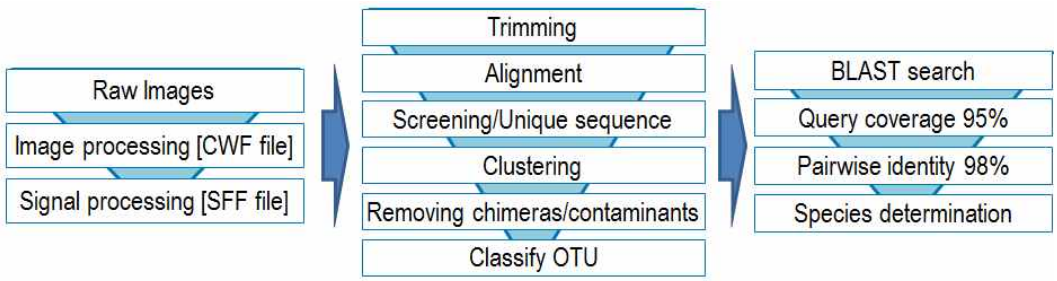


그림 80. DNA메타바코드 분석과정 흐름도

○ 데이터 구성

- 동·식물플랑크톤 데이터를 Mongo DB를 이용하여 통합 데이터 저장소 구축
- 데이터 Cleansing, 변환, 통합을 실시하고 다차원 분석이 가능한 Data Cube 형식 구성

○ 모델 구축

- 환경요소와 동·식물플랑크톤 출현의 상관성, 식물플랑크톤 종간의 경쟁, 동물플랑크톤 종간의 상관성을 분석하여 모델 구축
- 확률과정모형과 기계학습모형의 2가지 접근법을 사용한 후 검정을 통해 최적 모델 선정

· 확률 기반 예측 모델: 상태공간모형(State-space Model)에 Kalman Filter와 베이시안 Markov Chain Monte Carlo 결합 적용

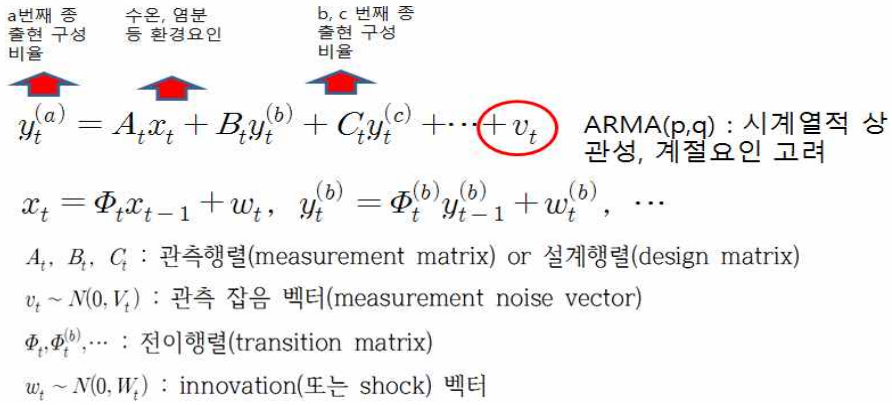


그림 81. 상태공간 모형에 의한 시계열적 상관성 분석 방법 예시

· 다변량(multi-variate) 시계열 모형(time-series model) 구성 및 과적합(over-fitting)과 빈적합(under-fitting) 상황을 고려하여 모형의 성능평가를 실시

· 머신러닝 기반 예측 모델: 딥러닝 기법 중에서 시계열 데이터의 예측에 적용 가능한 RNN (Recurrent Neural Network) 혹은 개선된 LSTM을 사용: 실제 구현은 Google의 TensorFlow를 활용

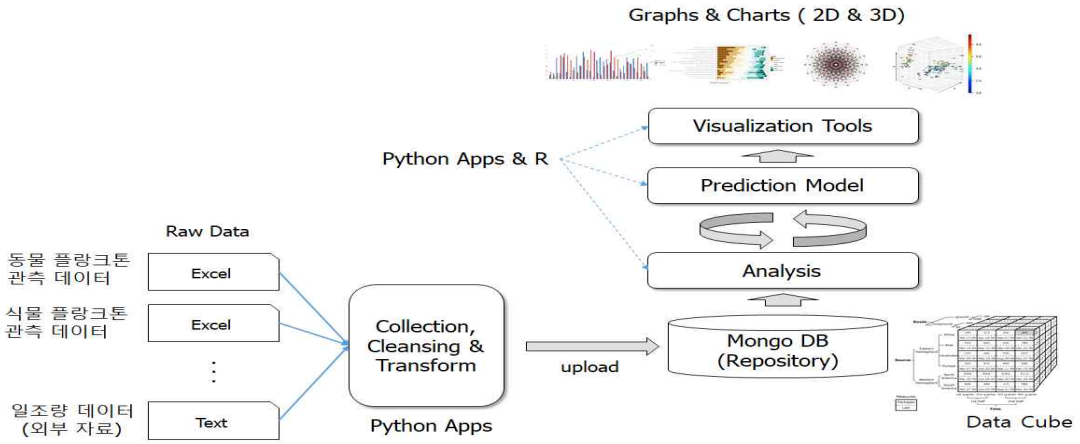


그림 82. 자료 분석 및 예측시스템 구축 과정 예시

· 기 확보된 데이터 중에서 80%는 학습세트(training set)로 사용하고 20%는

테스트용으로 활용

· 적용 소프트웨어로서 Python, MongoDB, R, Tensorflow를 이용

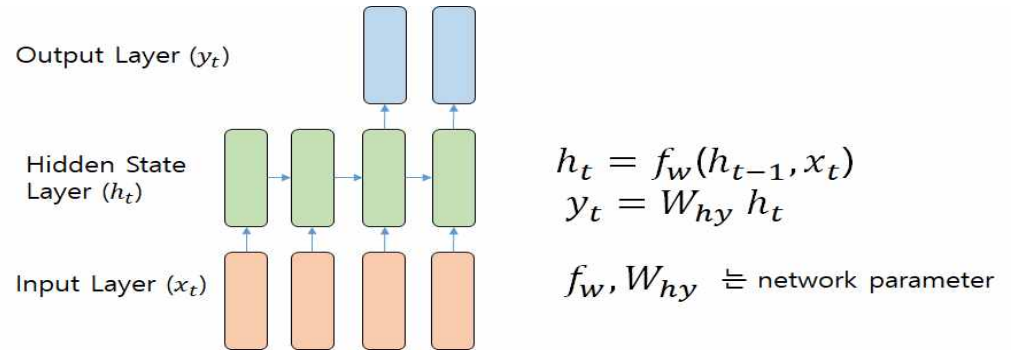


그림 83. LSTM을 사용한 딥러닝 모델 예시

10. 부유성 알 모니터링

○ 장기 모니터링 정점
- 한국해양과학기술원(부산 본원) 주변(부산항), 통영해양생물자원기지, 동해연구소 해안, 울릉도독도기지 앞, 제주연구소 해변 등

○ 조사 주기
- 1-2회/2주

○ 표본의 종류
- 분리 부성난과 유생
- eDNA
- 수중영상

○ 해양동물의 알과 유생 및 eDNA 분석
- 표본 수집
  분리 부성난과 유생: 해수펌프 또는 네트(200um)로 해수를 20-80m3/회/일 여과
  eDNA: 4L의 해수를 0.45um 필터로 여과하여 확보
  알과 유생 및 eDNA 표본에서 gDNA 추출
  gDNA를 PCR 후 NGS로 대량의 염기서열 확보
- 종판별
  대량의 COI, 12S, 16S, 18S 등의 염기서열을 reference library와 비교하여 종결정

○ Reference library 작성
- 어류 및 대형 해양 동물의 분류군별 COI, 12S, 16S, 18S 등의 reference library 작성
- Reference library 작성 대상 분류군: 포유류, 경골어류, 연골어류, 갑각류, 연체동물, 극피동물 등

○ BRUVS/UVC
- 해양 동물을 미끼로 유인하여 수중카메라로 촬영, 야간에 빛으로 유도하여 해양 동물 촬영
- 촬영한 해양 동물의 영상 자료 분석

11. 저서동물 모니터링

가. 대형저서동물

○ 조사 지역
- 대형저서동물 장기모니터링 조사 범위는 타 분야 조사 지역과 연계하여 선정

하나 우선적으로 부산 연근해 지역을 조사 지역으로 선정하였을 때 저서동물의 서식특성에 영향을 주는 동일한 퇴적상 및 수심(< 50m) 등 고려하여, 최소 7개 정점(대조구 3정점을 포함)을 선정

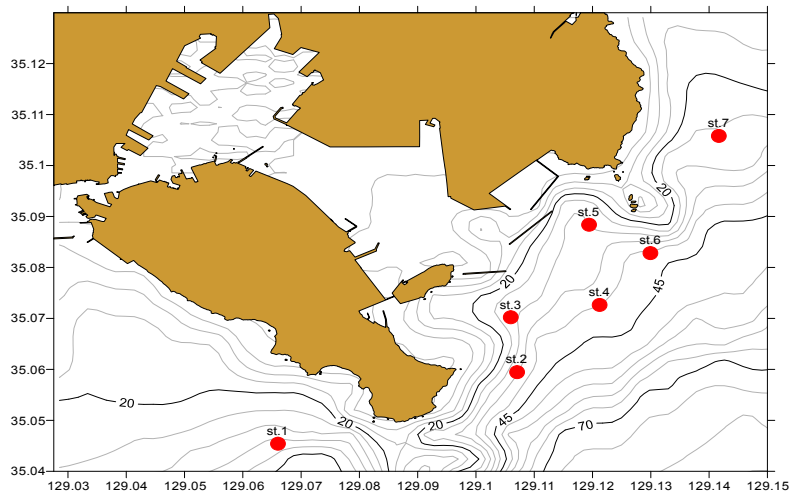


그림 84. 부산 연안의 저서생태계 조사 정점(안)

○ 조사 시기

- 대형저서동물 조사는 최소 2계절(봄, 가을) 조사를 원칙으로 하지만, 일반적으로 계절별 1회 조사 수행

○ 조사 방법

- 대형저서동물은 표준크기의 Smith-McIntyre grab(0.1m2)을 이용하여, 각 정점에서 최소 2회 이상 채집. 채집된 퇴적물은 현장에서 1mm 크기의 체(직경: 45cm)에 거른 후, 체에 남아있는 퇴적물(생물 포함)을 시료 보관병에 담은 후, 10% 중성 해수포르말린으로 고정. 생물 채집과 동시에, 퇴적물의 표층(1cm 깊이)온도를 측정하고, 일정량의 퇴적물은 바로 급속 냉동. 냉동된 시료는 실험실에서 퇴적물의 입도, 유기물 함량, 유분(총석유계탄화수소) 함량 분석 실시.

그림 85. 연안역 대형저서동물 채집 장비: Smith-McIntyre 그랩(좌), 1mm 크기의 체(우)

○ 생물 분석

- 생물이 포함된 퇴적물에서 생물 시료 선별을 위하여, 포르말린으로 고정된 퇴적물은 담수로 세척하여 포르말린을 제거하며, 이때 생물이 유실되는 것을 방지하기 위하여 1mm 크기의 체를 이용하여 반복 세척. 세척된 퇴적물은 흰색 바탕의 트레이에 일정 시간(최소 5시간 이상) 보관한 후, 유리 샬레를 이용하여 육안으로 생물을 선별.
- 생물 선별 범위는 주요 분류군(환형동물, 연체동물, 절지동물, 극피동물)의 경우 강(class) 수준까지, 그 밖의 동물군에 대해서는 문(Phylum) 수준까지 선별함.
- 선별된 주요 분류군들은 즉시 습중량(최소 단위: 0.01g)을 측정하여, 종 동정이 이루어지기까지 70-80% 에틸알코올과 함께 표본병에 보관. 표본병에는 시료 채집 일자와 장소 그리고 주요 분류군에 대한 정보 기록.
- 채집된 생물의 종 동정은 주요 분류군의 경우 종 수준까지 동정하여야 하며, 그 밖의 동물군은 분류 가능한 수준(과, 속)까지 동정한다. 종 동정 후 각 종의 개체수를 계수.
- 분석 범위: 정점별 출현 종수, 단위면적당 밀도, 단위면적당 생체량, 종 다양도 지수, 주요 우점종(전체 출현 개체수의 1-5% 이상) 목록 및 분포, 군집분석(집괴분석과 다변량분석) 수행
- 분석 자료의 신뢰성 확보를 위해 주요 분류군에 대한 분류 전문가가 시료 동정을 하여야 하며, 저서동물에 전반에 대한 생태학적 지식을 갖춘 연구자가 시료 분석 실시. 분석 자료의 검증을 위하여 각 정점의 저서동물 종 목록(밀도 포함) 자료를 부록으로 만들어야 하며, 모든 시료를 보관.

○ 환경 분석

- 퇴적물의 입도와 총 유기탄소 함량 등은 해양환경공정시험방법으로 분석을 실시. 단, 최신의 분석 방법에 따라 분석을 실시한 경우 검증된 분석 방법 자료 제시
- 퇴적물의 입도는 5g의 퇴적물에 10% 과산화수소로 유기물과 0.1 염산으로 탄산염을 제거한 후 습식체질에 의해 4ø 이하와 이상으로 분리. 4ø 이하의 조립한 퇴적물은 건식체질(또는 Ro-tap sieve shaker)하여 입도 등급별 무게 백분율을 구하며, 4ø 이상의 세립 퇴적물은 습식체질에 의해 분리된 혼탁액을 피펫팅하거나 퇴적물 2g에 0.1% calgon 용액을 넣고 교반시킨 후 X-선 자동입도 분석기인 Sedigraph 5000D를 이용하여 입도무게 백분율을 구한 후 분석을 실시.
- 퇴적물의 총 유기탄소는 50℃에서 48시간 건조시킨 다음 1 g씩 채취하여 10%의 과산화수소로 유기물과 0.1 N 염산으로 탄산염을 제거한 후 CHN 분석기를 통해 측정

○ 분석내용

- 대형저서동물의 종 조성, 서식밀도, 생체량, 종 다양도, 군집구조
- 대형저서동물의 섭식유형별 서식밀도 및 생물량
- 저층환경요인(퇴적물 입도, 유기물, 용존산소, pH 등)

나. 중형저서동물

○ 조사 지역

- 대형저서동물 등 타 분야 조사 지역과 연계하여 장기 모니터링 지역을 선정하며, 격자 또는 일정간격으로 정점 선정

○ 조사 시기

- 중형저서동물의 조사는 계절별 1회 조사를 원칙으로 하지만 최소 2계절(봄, 가을) 조사 수행

○ 조사 방법

- 중형저서동물은 Smith McIntyre Grab을 사용하여 각 정점 당 3회 퇴적물 시료 채집. 채집된 퇴적물은 정량분석을 위해 직경 3.6 cm 크기의 아크릴로 된 튜브(Acrylic tube)를 사용하여 표층 깊이 5 cm까지 채취하는데 이런 부시료들을 3개씩 반복하여 확보. 나머지 퇴적물은 정성분석을 위해 표본병에 담아 처리. 퇴적물의 표층, 수온, Do 등 환경자료를 확보.

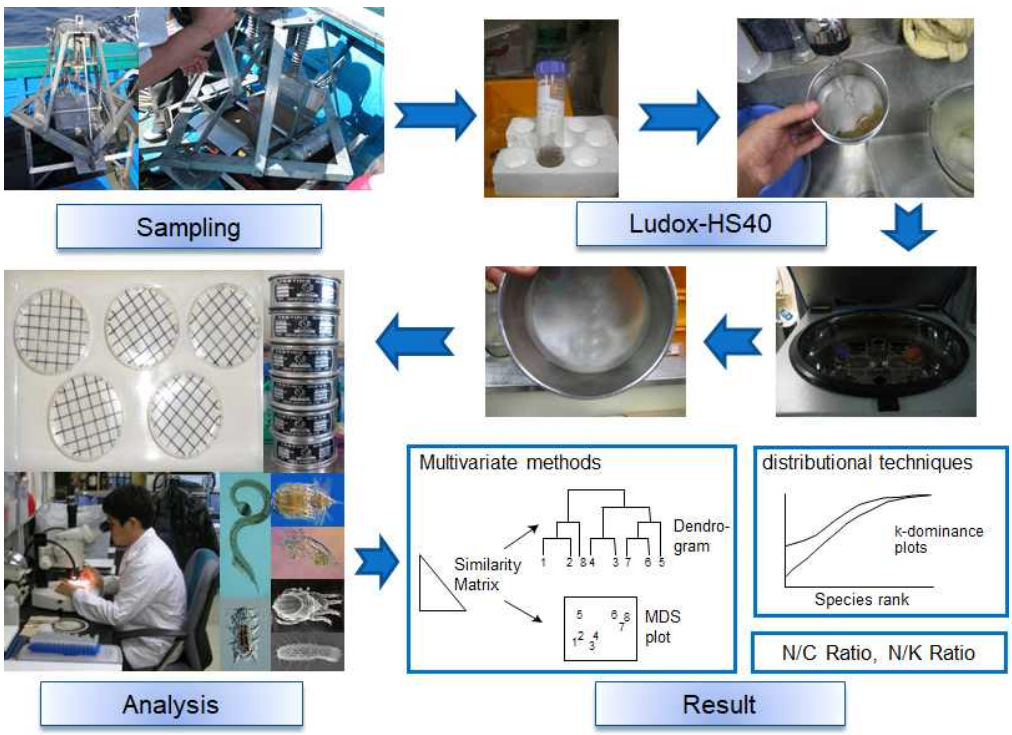


그림 86. 중형저서동물 채집 및 분석 처리 방법

○ 생물 분석

- 정량분석을 위한 Acrylic tube로 채집된 퇴적물은 표층으로부터 깊이 5 cm까지 각각 1 cm 간격으로 자른 뒤 50 ml tube에 옮김. Tube에 옮겨진 퇴적물 시료는 현장에서 즉각 로즈벵갈(rose bengal)을 혼합한 5% 중성 포르말린으로 고정하여 연구실로 운반. 정성분석을 위해서 퇴적물에 7% $MgCl_2$로 마취한 뒤 10% 중성 포르말린으로 고정하여 연구실로 운반
- 연구실에서 중형저서동물들을 퇴적물 시료와 분리하기 위해서 Sieve size 1mm를 통과시키고 37㎛에 걸려 남겨진 시료들을 Silica-gel Ludox HS-40에 넣어 원심분리 하는데, 이것은 밀도차이에 의해서 퇴적물과 중형저서동물을 분리하는 방법임(Robert Burgess, 2001).
- 퇴적물과 분리된 중형저서동물은 각 크기의 체(500 ㎛, 250 ㎛, 125 ㎛, 63 ㎛, 37 ㎛)로 크기별로 걸러내어 해부현미경 하에서 계수 후 분석
- 종 다양성 분석을 위해 선별된 중형저서동물은 종별 해부 및 슬라이드 제작을 통해 동정, 분류

○ 분석 내용
- 중형저서동물의 종 조성, 서식밀도, 우점 분류군, 다양성, 생태지수 분석
- 중형저서동물 군집 분석을 위해 Shannon and wiener(1963)의 다양도 분석법을 이용한 분류군 다양도 지수, 정점간의 군집의 유사도를 이용한 Cluster 분석으로 군집 특성 분석 수행

표 9. 중형저서동물 군집특성을 활용한 주요 생태지수 분석.

구 분	기본개념	특징
N/C ratio (Nematodes/ Harpacticoids)	- 오염원에 반응하는 분류군 비를 이용한 평가	- 선충류는 오염(특히 빈 산소)에 대한 내성이 강하고 저서성요각류는 오염에 민감함 N/C = Nematodes / Harpacticoid
ITD (Index of Trophic Diversity)	- 선충류의 섭식유형을 이용한 종 다양성 평가	- 선충류를 4개의 섭식유형으로 구분 (범위: 0.25-1.0) - 값이 높아지면 오염도 증가
MPI (Meiobnethic Pollution Index)	- 중형저서동물 그룹 중 높은 서식밀도로 출현하는 분류군을 이용한 평가	- 선충류, 저서성요각류, 다모류의 서식밀도를 통해 각 지역별로 상대 비교하여 오염지역과 비 오염지역을 구분
MI (Maturity Index)	- 중형저서동물 그룹 중 선충류의 분류를 이용한 저서생태계 평가	- 선충류를 5개의 그룹으로 구분 (C-p values 적용) - 값이 높아지면 환경오염 감소

제 4 절 경제성 평가

1. 평가대상 사업에 대한 개요

가. 연구목표

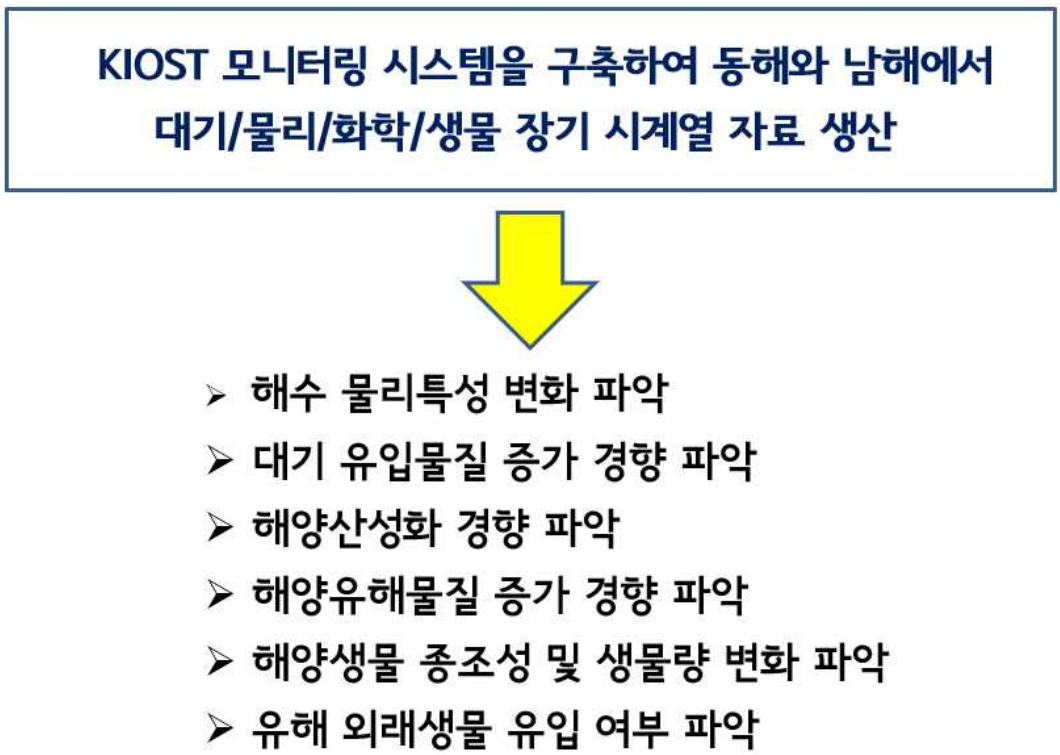
○ KIOST 모니터링 시스템 구축을 통해 동해, 남해에서의 대기/물리/화학/생물 장기 시계열 자료 생산

○ 확보된 시계열 자료를 통해, 해수 물리특성 변화, 대기 유입물질 증가 경향, 해양산성화 경향, 해양유해물질 증가 경향, 해양생물 종조성 및 생물량 변화, 유해 외래생물 유입 여부 등을 파악하고자 함

○모티터링하고자 하는 항목은 다음과 같음

- (해양환경) 수온, 염분, 해양/대기 이산화탄소, 용존무기탄소, 알칼리도, 영양염, 용존/입자태 유기탄소, 미량원소, 안정/방사성 동위원소, 대기분진

- (해양생태계) 식물/동물플랑크톤, 원생동물, 어란



2. 편익 추정 방법론

가. 편익 추정 기본 원칙

○ 편익 추정의 단위는 개별 사업이고 평가 대상의 장단점을 합리적으로 분석하여 평가결과를 도출

○ 편익 추정은 사업 전후(before and after)가 아닌 시행 유무(with or without) 비교를 통하여 사회 후생의 차이를 분석해야 함

○ 사전적으로 편익(benefit)이란 (+)의 사업효과를 의미하며 연구개발사업의 편익이란 연구개발사업의 수행으로 인해 발생할 것으로 기대되는 (+)의 결과물을 의미

○ 미시경제학적으로 연구개발사업의 편익은 추가적으로 발생하는 소비자 잉여의 증가분 또는 생산자 잉여 증가분 등으로 정의 가능

나. 연구개발활동의 파급효과 분류

○ KISTEP(2011)에 따르면, 연구개발 활동은 과학기술 지식, 민간의 수익, 파급효과 등의 관점에서 정의할 수 있는데, 이를 파급효과의 관점에서 다시 정의하면, 지식파급효과, 시장파급효과, 네트워크 파급효과 등으로 구분 가능

○ 지식파급효과는 지식의 창출자와 사용자가 다른 경우 발생

○ 시장파급효과는 시장기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는 것을 의미

○ 네트워크 파급효과는 관련 기술들의 집적을 통해 기능 향상을 가능케 하는 것을 의미

○ 예비타당성조사에서 반영하는 효과는 지식파급효과와 시장파급효과에 한정

○ 지식파급효과와 시장파급효과는 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 효과 분석에 반영

표 10. 연구개발활동 파급효과 개요

구분	정의 및 특성	예비타당성조사 반영 여부
지식 파급 (knowledge spillovers)	- 지식의 창출자와 사용자가 다른 경우발생 - 역설계, 발간, 특허공개, 연구자 이동 등을 통해 발생 - 일부 계측 가능 - 화폐환산 불가	- 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 효과 분석에 반영
시장 파급 (Market spillovers)	- 시장 기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는것 - 추가기능의 구비, 가격의 인하, 저렴한 제품 및 서비스 제공 등으로 발생 - 계측 가능 - 화폐환산 가능	- 사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 편익 분석에 반영
네트워크 파급 (Networ spillovers)	- 관련기술들의 집적을 통해 기능 향상을 가능케 함 - 각각 기술들의 개발 주체가 분산되어 있어서 개별 주체별로 투자를 망설임 - 계측 불가, 화폐환산 불가	- 경제적 타당성에서 미반영 - 정책적 타당성의 특수평가항목에서 반영 가능

다. 연구개발사업의 편익 추정 장애 요소

○ 연구개발사업은 대표적인 비투자 재정사업이자 비정형 사업에 해당

○ 이에 연구개발사업의 경제적 가치 평가는, 기술적 불확실성이 높고 가시적 효과를 정량적으로 추정하기 어려우므로, KISTEP(2011)과 OECD(2007)[2]은 다음과 같이 편익 추정의 어려움을 진단

- 생산의 관점에서 살펴보면, 투자 및 성과간의 직접적 인과관계가 불투명하고 편익을 누리는 대상 확정이 어려울 뿐만 아니라 편익을 누리는 대상을 명확히 구분하고 식별하는 것 또한 어려움
- 연구개발 과정의 관점에서 살펴보면, 연구개발에 따른 파급효과의 전달경로가 다양하고 파급효과 역시 시차를 두고 시현하는 과정도 발생하여 편익 추정이 쉽지 않음
- 가치평가 관점에서 살펴보면, 편익 추정을 위한 평가지표 및 경제지표 등을 쉽게 산정할 수 없고, 편익 역시 다양한 이유로 화폐환산화가 어려움

2) OECD(2007), 『Accessing the Socio-Economic Impact of Framework Programme』, OECD DSTI Report

라. 연구개발사업의 경제성 분석 방향

○ 연구개발사업의 경제성 분석은 시장 수요 진단 가능성, 대리시장 존재 가능성 등을 종합적으로 판단하여 비용효과분석 또는 비용편익분석으로 나누어 분석

○ (비용편익분석) 사업목표에 따른 기대효과가 경제적으로 시현되면서 계량화 가능성이 높고 경제학적 선호 방법론에 따라 적용가능하면 비용편익분석을 수행

○ (비용효과분석) 연구개발사업의 편익 항목은 식별되나 계량화 가능성이 낮거나 이를 대체 평가할 대리시장 역시 부족할 경우, 연구개발사업의 정책 타당성 측면에서 타당성을 확인하고 연구비 투입의 효과성을 검토하는 비용효과분석을 수행

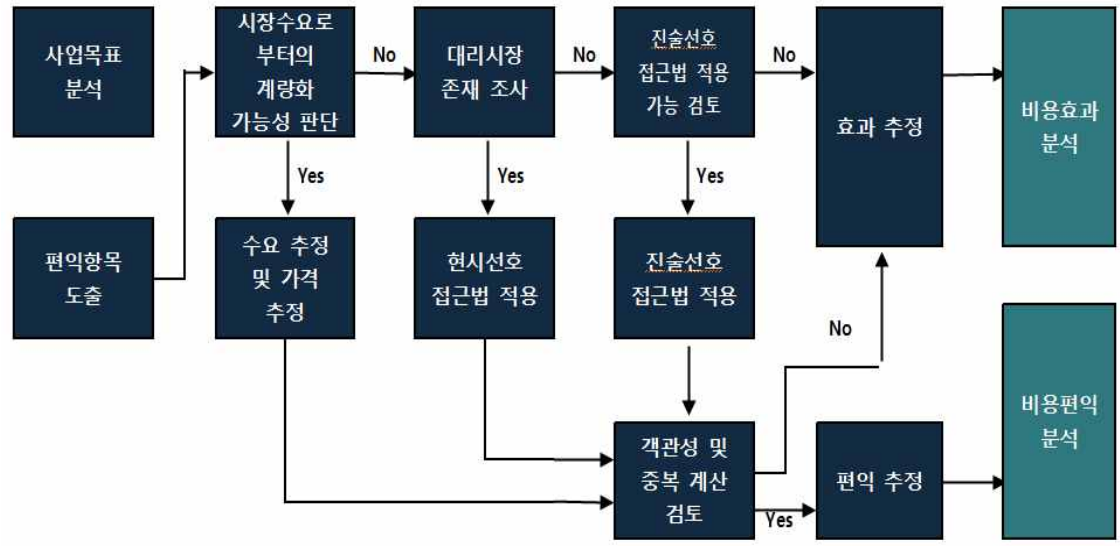


그림 87. 경제성 분석 방향

○ 연구개발사업의 경제성 분석은 연구개발 내용 검토, 편익구도 수립, 경제성 분석 수행 순으로 이루어지며 무엇보다도 사업 내용의 특징 분석과 최종적인 기대효과를 명확히 식별하는 것이 중요

○ 특히 연구개발사업의 기술트리 구조 및 핵심기술 현황 검토를 통해 기대효과를 명확히 분석하고 계량화 가능성을 충분히 판단하여 편익구도를 추정해야함

○ 이와 함께 예비타당성조사 최신 일반지침과 가이드라인, 최신 예비타당성조사 적용 사례 등을 검토하여 경제성분석의 신뢰성을 담보해야 함

마. 편익분석을 위한 베이스라인 분석

○ 연구개발사업의 사업 시행 효과를 분석하기 위해서는 사업 유무에 다라 각각에

대한 분석을 하여 그 차이를 비교하는데, 이를 위해 합리적인 기준선(Baseline) 분석이 중요(KISTEP, 2011)

- 첫째, 사업 추진을 통해 해결되는 문제를 중심으로 현재와 미래의 상태에 관련된 경제사회적 변수들을 구체적이고 명료하게 제시해야 함
- 둘째, 분석을 위한 모든 변수들을 구분하여 정량값을 제시해야 함
- 셋째, 기준선 구체화를 위한 노력 수준을 적절히 결정해야 함
- 넷째, 기준선의 상태를 구체화하기 위한 모든 가정들을 명시하고 구체적으로 설명할 필요가 있음
- 다섯째, 시간 기준으로 기준선을 설정하는 시점과 종료시점을 구체적으로 제시할 필요
- 여섯째, 기준선 설정의 과정에서 불확실한 모든 요인에 대해 상세히 기술해야 함
- 마지막으로, 분석 대상사업의 경제적 타당성 분석 과정에서 기준선에 적용된 가정들을 준용해야 함

○ 기준선 분석은 현재 상태 및 미래에 대한 예측분석이므로 확보가 어려운 사항과 관계에 대한 가정이 필수적으로 수반될 필요

○ 타당성조사 주체는 분석에 적용된 가정의 목록을 제시하고 값들을 명시함으로써 기준선 분석결과의 재현성을 확보도 고민

○ 이와 함께 기준선 분석 시 적용된 가정과 더불어 경쟁기술의 발전 추이, 해당 기술의 요소 중 불확실한 부분 등과 같이 논의를 통해 제외되는 가정도 있게 되는데 제외의 이유를 구체적으로 보고서에 명시할 필요가 있음

바. 연구개발사업의 일반적 편익 항목

○ KISTEP(2016)[3]은 연구개발부문 예비타당성조사의 일반적 편익항목을 가치창출편익과 비용저감편익 등으로 구분하여 제시

○ 가치창출편익은 크게 소비자 중심 편익과 생산자 중심 편익으로 대별

○ (소비자 중심 편익) 연구개발사업의 경제적 효과가 소비자에게 영향을 주는 경우를 의미

○ (생산자 중심 편익) 연구개발사업의 경제적 효과가 생산자에게 영향을 주는 경우를 의미

○ 비용저감편익은 생산비용 저감 편익과 피해비용저감 편익으로 구분

○ (생산비용 편익) 자원비용, 공정비용, 저감 연구장비 사용비용 등의 각종 생산비용 저감의 가치를 의미

3) 한국과학기술기획평가원(2016), 『연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(2-1판)』, 연구보고서

○ (피해비용 저감 편익) 재난 및 재해, 사고, 질병 등으로 인해 발생하는 피해비용의 저감을 의미

○ 연구개발활동을 통해 발생하는 과학기술 지식의 증대 및 관련 파급효과는 가치창출 요소로 분석될 수 있으나 실제 예비타당성조사시에는 반영하지 않는 것으로 규정

표 11. 가치창출편익과 비용절감편익

<table>
<tr><th>구분</th><th>예비타당성조사시 반영되는 편익</th><th colspan="2">예비타당성조사시 반영되지 않는 편익</th></tr>
<tr><td rowspan="2">가치
창출
편익</td><td>(소비자 중심 편익)
연구개발사업의 효과가 소비자에게 영향을 주는 경우 (후생경제학에 근거)</td><td rowspan="2">과학기술 지식
(논문, 특허 등)
과학기술자의 교육훈련
지역개발효과
지역산업구조 개편</td><td rowspan="2">생산유발효과
부가가치 유발효과
고용 유발효과
수입 유발효과
수출 유발효과
소득 분배효과</td></tr>
<tr><td>(생산자 중심 편익)
연구개발사업의 효과가 생산자에게 영향을 주는 경우 (i.e. 시장수요 접근법)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">비용
절감
편익</td><td>(생산비용저감 편익)
자원비용, 공정비용, 연구장비 사용비용, 출장비용 등 각종 생산비용의 저감</td><td colspan="2" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>(피해비용저감 편익)
재난·재해, 사고, 질병 등으로 인해 발생하는 피해비용의 저감</td></tr>
</table>

출처 : KISTEP(2011), 연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침연구(제1판)

사. 해양수산분야 예비타당성조사 사례

○ 해양수산 분야 예비타당성조사는 인프라 사업의 경우 한국개발연구원, 연구개발 사업의 경우 한국과학기술기획평가원에서 수행

표 12. 예비타당성조사 사례 분석 개요

예비타당성조사 사례	편익 항목	주요 내용
미래해양개발을 위한 수중건설로봇 개발사업 (KISTEP, 2012)	부가가치 창출 편익	수중건설로봇 개발이 해양 구조물 시공 등에 활용됨으로써 시장에서 창출되는 부가가치
심해해양공학수조 기반구축사업 (KDI, 2013)	해외시설 이용대체 편익	해외 (심해)해양공학수조의 이용수요 대체
	수수료 절감편익	해외 (심해)해양공학수조보다 저렴한 수수료
	R&D 편익	심해해양공학수조를 이용한 연구개발 사업에서 발생하는 경제적 가치
대형 해양과학연구선 사업 (KDI, 2009)	비시장재가치 편익 (과학기술편익 등)	대형 해양과학연구선 건조 관련, 컨조인트 방법론 활용, 비시장재가치 평가 분석, 이를 바탕으로 과학기술 편익 반영
지속가능한 수산자원 관리 및 이용기술개발사업(KISTEP, 2015)	부가가치 창출 편익	어업자원의 효과적인 관리를 통해 회복되는 어업자원량으로부터 창출되는 부가가치 증대 편익
IMO 차세대 해양안전통합관리체계 기술개발사업(KISTEP, 2015)	위험감소 편익	e-Navi의 개발·구축을 통해 해양사고 감소에 기여함으로서 창출되는 편익
해양 융복합소재 산업화사업 (KISTEP, 2015)	부가가치 창출 편익	5대 분야 14개 전략사업에서 개발된 해양 융복합 소재 기술이 해당 품목에 활용됨으로써 시장에서 창출되는 부가가치의 합의 정의
	장비 사용비용 절감 및 출장비용 절감 편익	국내 수요기업이 해외의 장비를 활용하지 않고도 국내에서 구축되는 장비를 활용하여 업무를 수행함으로써 절감되는 편익
ICT융합 Industry4.0s(조선해양) 사업 (KISTEP, 2015)	부가가치 창출 편익	조선 ICT 융합관련 HW와 SW시장을 고려하여 산출물로부터 창출되는 부가가치 증대 편익

○ 해양수산분야 예비타당성조사 사례를 분석하면, 해당 시장이 명확히 식별되고 정량화 가능한 자료가 신뢰성 있게 존재하면 연구개발사업으로 인한 부가가치 창출편익을 주로 반영

- 즉, 해당 사업이 성공적으로 안착되어 미래 시장에서 발생할 수 있는 부가가치 증대분이 명확할 경우, 그 기여분을 생산자 관점에서 추정

○ 연구개발사업이 사회적으로 또는 공공적으로 위험 감소 효과가 발생한 경우에는 위험 감소 편익을, 생산과정에서 비용 절감 효과가 발생하면 비용 절감 편익을 적용하여 추정

○ 연구개발사업의 효과가 관련 시장에서 거래되지 않으나 그 경제적 효과가 명확하게 발생하는 사업의 경우 비시장재가치평가법을 활용

아. 해양수산분야 예비타당성조사 주요 사례 분석

○ 『대형 해양과학연구선 사업 예비타당성조사』 사례

- (편익 추정 구도) 실제 존재하지 않는 재화에 대한 비시장적 가치를 산정하기 위해 KDI(2009) 연구는, 다속성 평가 방법론인 컨조인트 방법론을 활용

- 대형 해양과학연구선 건조에 따른 효과가 다양한 속성으로 분류된다고 판단하고, 다수의 대안에 대한 응답으로부터 효용함수를 추정하여 가치 측정 재화의 속성에 대한 화폐적 가치를 추정할 수 있는 컨조인트 방법론을 활용

- (선택실험법) 선택실험법은 임의의 재화가 특정 속성들의 결합으로 이루어졌다고 가정하여, 각 속성들의 조합으로부터 재화를 나타내는 가상의 대안집합을 구성하는 것으로부터 출발

- 대안집합이 구성되면 다음으로 설문을 통해 각각의 대안에 대한 응답자의 선호자료를 얻게 되며, 이후 얻어진 응답자의 선호 자료는 효용이론에 근거한 이산선택모형을 이용하여 추정하고, 추정을 통해 도출된 효용 정보는 각 속성별 WTP처럼 속성의 가치를 추정하는데 활용

- (대형 해양과학연구선 건조사업의 속성과 수준) 편익 반영 속성으로는, 연구선의 규모, 수행연구, 연구선의 외부 활용계획, 연구선 활용을 통한 연구 성과, 사업추진비용 등으로 구분

- 연구선 규모는 건조되는 해양과학연구선의 규모를 나타내며 수준은 2,500톤과 5,000톤으로 구분

- 수행 연구는 해양과학연구선이 추가적으로 활용되는 연구 분야를 의미하며, 해양관측 및 기후변화 연구, 선진 대양해군 지원사업, 국제공동연구 등을 고려

- 연구선 외부 활용 계획은, 건조되는 해양과학선이 귀속된 특정기관의 외의, 다른 연구기관이나 대학 등이 독자적으로 연구선을 활용할 수 있는 최소 기간을 의미하며 수준은 0개월, 1개월, 3개월, 6개월 정도로 구분

- 연구선 활용을 통한 연구 성과는, 건조되는 연구선을 이용하여 연구를 수행한 결과로 1년

동안 발생하는 논문 성과와 지적재산권 성과로 식별

○ 『지속가능한 수산자원 관리 및 이용 기술개발사업 예비타당성조사』 사례

- (편익 추정 구도) 본 연구개발사업에 따라 제기된 경제적 효과는 어업자원의 효과적 관리를 통한 사회경제적 효과, 한일 어업협상력 제고 효과, 한중어업협상을 통한 불법어획량 감소 효과 등으로 요약

- 계량화 가능성 부족, 정치적 협상에 따라 변하는 경제적 효과의 논리적 근거 미약 등의 이유로 어업협상을 통한 편익은 인정되지 않음

- (부가가치 창출 접근법) 어업자원 관리에 따라 연근해 어업자원의 자원회복은 최대지속가능어획량에서 현재 전체 어획량의 차이만큼이 회복되며 그 회복 정도는 현재 회복가능분에서 매년 10%씩 증가한다고 가정

- 이러한 회복에 따른 시장규모의 변화가 추가적 부가가치로 판단하고 편익산정기간 7년, 사업기여율 등을 적용하여 최종 편익으로 산정

○ 『해양 융복합소재 산업화 사업 예비타당성조사』 사례

- (편익 추정 구도) 본 사례는, 부가가치 창출편익과 비용절감 편익이 모두 적용된 사례

- 부가가치 창출 편익은 연구개발사업으로 인해 융복합소재 품목의 부가가치 증가하는 효과를 편익으로 식별하였으며, 비용절감 편익은 해외시설 장비 이용 비용이 절감되는 경제적 가치와 해외출장을 가지 않음으로써 발생되는 시간비용 절감의 경제적 가치를 모두 식별

- (부가가치 창출 접근법) 해양 융복합 소재 관련 품목을 5대 분야별 14개 품목으로 산정하고 이의 시장 전망을 별도로 추정한 이후 사업기여율, 사업화 성공률, 부가가치율, R&D 기여율 등을 적용하여 부가가치 창출 편익 산정

- (비용 절감 편익) 장비 사용비용 절감 편익은 해외에서의 장비사용료와 국내에서의 장비사용료의 차이를 편익으로 산정하고 이를 계산

- 출장비용 절감 편익은 해양 출장비와 국내 출장비의 차이와 해외출장을 가지 않으므로 인한 시간절감분을 편익으로 산정하고 장비 가동률이 100% 넘지 않는 선에서 편익 추정치를 계산

3. 편익 추종 개요

가. 연구개발사업의 개요

○ KIOST 내부 고유사업으로서 지속적인 해양관측 및 예측을 통해 해양수산 기초연구 자료 생성

○ KIOST 모니터링 시스템을 통하여 동해, 남해에서 대기, 물리, 화학, 생물 분야

장기 시계열 자료생산

- 해수 물리 특성 변화 파악
- 대기 유입물질 증가 경향 파악
- 해양산성화 경향 파악
- 해양생물 종조성 및 생물량 변화 파악
- 유해 외래생물 유입 여부 파악

나. 연구 기대 효과

○ 본 연구개발사업은 전문적 역량 토대 위에서 지속적 해양 모니터링 자료를 생산하고 이를 통해 향후 해양 및 기후연구의 기초 과학기술역량이 증대될 것으로 기대

○ 특히 정기적인 해양 모니터링 사업 수행과 해양 분야 전문 연구진의 과학적으로 검증된 자료 데이터가 축적되어 이를 활용하는 해양 관측, 해양 기후 등 해양 연구 및 기후 연구에서 다양하게 활용가능한 시계열 데이터가 될 것으로 판단

다. 해양 및 기후 연구 편익

○ 본 연구개발사업은 해양 및 기후 연구에 과학기술적 역량을 증대하여 기초 과학 연구 토대 마련에 큰 역할을 할 것으로 기대

○ 이에 본 연구개발사업에 따른 편익은 “해양 및 기후 연구 편익”으로서 과학기술적 가치를 반영하는 것이 타당할 것으로 판단

라. 해양 및 기후 연구 편익 추정 개요

○ 해양 및 기후 연구 편익은, 비시장재 가치가 담긴 편익으로서 연구성과 활용 효과의 범위와 규모를 규정하고 이를 추정하는 것은 별도의 설문조사가 필요

○ 이에 본 연구는 예비타당성조사에서 제안하고 있는 편익이전 기법을 활용

- 『대형해양연구선 조성사업 예비타당성조사』(한국개발연구원, 2009)에서는 컨조인트 분석법을 활용하여 해양 및 기후연구의 과학기술적 편익을 추정한바 있음
- 전문가 대상 컨조인트 분석법을 적용, 해양 및 기후 연구의 과학기술적 편익을 하루 연구수행 가치로 일당 0.592억원으로 추정

표 13. 과학기술적 편익 가치 추정 연구 결과

수행연구	연구수행 과학기술적 편익(일당)	활용일수 고려한 과학기술 총편익
해양 및 기후연구	0.592억원	1,035.2억원
선진 대양해군 지원사업	0.136억원	170.5억원
국제공동연구	0.142억원	176.9억원

출처 : 한국개발연구원(2009), 대형해양안구선 조성사업 예비타당성조사

○ 해당 편익 원단위를 활용하여 사업규모와 성격에 맞게 편익 원단위 보정

- 본 연구 사업비(총 18억원 예정)와 대양해양연구선 조성사업 사업비(총 934억원 예정)는 차이가 나므로 해양 및 기후연구 편익 원단위는 사업비 규모로 보정
- 이와 함께 컨조인트 분석법은 진술선호기반 분석법으로서 거시경제 환경에 다소 영향을 받는 점을 감안, 해양 및 기후연구 편익 원단위는 소비자 물가지수(2017년 기준 총지수 102.93, 2009년 기준 총지수 88.452)로 보정
- 해양 및 기후 연구 편익 원단위는 보정후 484.5백만원(연간)으로 추정

해양 및 기후 연구 편익 원단위(484.5백만원/연간) = 보정전 편익원단위(59.2백만원) × 365일 × 사업비 보정(18억원/934억원) × 물가지수 보정(102.93/88.45)

표 14. 편익 이전기법을 활용한 편익 원단위 추정

해양 및 기후 연구 편익 원단위 (보정전)	사업비 보정	물가지수 보정	해양 및 기후 연구 편익 원단위 (보정후)
59.2백만원/일당	연구사례 사업비(934억원) 본 사업비(18억원)	2017년 물가지수 (총지수 102.93) 2009년물가지수 (총지수 88.45)	484.5백만원/연간

마. 해양 및 기후 연구 편익 추정 원칙

○ 편익 추정 요소 적용

- 본 연구개발사업은 KIOST 내부 고유사업으로서 장기적으로 수행될 사업으로 예정되어 있고 사업 성격상 기초 과학 연구 데이터 축적 및 활용에 있기 때문에 연구개발사업의 성패가 확률적으로 정의되는 사업이 아니므로 편익이전기법을 활용한 원단위 그대로 사용함

- 다만, 기초과학연구 성격임을 감안하여 편익 회임기간은 적용
- 이에 편익 회임기간은 3년으로 가정

○ 기술수명주기

- 기술수명주기는 편익 발생기간과 연동되는 항목으로서 연구개발사업이 추진되는 기술들의 특허분석을 통해 산정 가능
- 특허분석의 기술순환주기(TCT) 분석은, 연구개발사업 추진 기술 중 중분류 기술의 특허의 등록연도, 인용특허 등록연도 등을 기초로 분석
- 본 연구는 물리적 여건상, 유사 연구 사례를 준용하여 적용
- 최근 수행된 『빅데이터 기반 해양변동 예측 기술개발사업 예비타당성조사 기획연구』(KIMST, 2018)에서는 해양 관측 및 예측의 총 기술 순환주기는 10년(평균값 9.64년)으로 가정

4. 경제성 분석

가. 경제성 분석 방법

○ 경제적 타당성에 관한 분석은 일단 그 사업이 어느 정도의 경제적 가치가 있는 사업인지를 파악할 수 있도록 함으로써 사업에 대한 이해를 돕는 기능

○ 경제적 타당성을 평가하는 분석기법으로는 편익/비용 비율(B/C ratio), 순현재가치(NPV, Net Present Value), 내부수익률(IRR, Internal Rate of Return,) 등이 있는데, 일반적으로 이해가 용이하고, 사업규모의 고려가 가능한 B/C 분석 기법을 많이 사용

나. 경제성 분석 기법 비교

○ 편익/비용 비율 : 사업 운영 후 연도별 발생하는 편익과 투입되는 비용(사업비 및 유지관리비)을 적정 할인율로 할인하여 기준년도 가격으로 환산한 금액의 비율을 말하며, 일반적으로 (편익/비용 비율)≥1이면 경제성이 있다고 판단

$$\text{편익·비용비율}(B/C) = \sum_{t=0}^{n}\frac{B_t}{(1+r)^t} / \sum_{t=0}^{n}\frac{C_t}{(1+r)^t}$$

여기서, B_t : 편익의 당해 연도 값

C_t : 비용의 당해 연도 값

r : 할인율(이자율)

n : 내구년도(분석년도)

○ 내부수익률 : 내부수익률이란 현재가치로 환산한 편익과 비용의 값이 같아지는 할인율 r을 구하는 방법으로 일반적으로 내부수익률이 사회적 할인율보다 크면 경제성이 있다고 판단

$$\text{내부수익률}(IRR) : \sum_{t=0}^{n}\frac{B_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^{n}\frac{C_t}{(1+r)^t}$$

○ 순현재가치 : 순현재가치란 사업에 수반된 모든 비용과 편익을 기준년도의 현재가치로 할인하여 총 편익에서 총 비용을 제한 값이며 (순현재가치) ≥ 0 이면 경제성이 있다고 판단

$$\text{순현재가치}(NPV) = \sum_{t=0}^{n}\frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^{n}\frac{C_t}{(1+r)^t}$$

다. 경제성 분석 시 고려 사항

○ 경제성 분석에 있어 비용과 편익은 모두 사회적 비용 및 편익으로 간주할 수 있는데 일반적으로 공공투자시설의 경우 비용은 실질적으로 투자되어 사용된 비용을 계상하는 반면 편익은 회수방법을 통한 실제수익이 아닌 사회적 편익을 기준으로 함

○ 본 사업이 추진되면, 4년의 연구기간(2019년~2022년)이 소요될 것으로 예상됨에 따라 단계별 연구기간 완료 후, 가술수명주기 및 편익회임기간 등에 따라 2026년부터 편익이 순차적으로 발생하는 것으로 가정

○ 연구개발 사업은, 그 성격상 비용이 초기에 집중 발생하는 반면, 편익은 연구개발사업 후 장기간 동안 발생하기 때문에 분석기간 동안 예상되는 비용과 편익에 사회적 할인율을 적용하여 현재가치로 환산하여 평가

라. 경제성 분석 시 전제

○ 사회적 할인율

- 비용과 편익의 미래 흐름을 비교하기 위하여 사용되는 할인율은 자원의 기회비용, 즉 투자사업에 사용된 자본이 다른 투자사업에 사용되었을 경우 얻을 수 있는 수익을 추정하게 할 뿐 아니라 사람에 따라 혹은 사회에 따라 그리고 시대에 따라 다를 수 있는 시간의 객관적인 가치를 나타냄
- 할인율 개념의 적용에 있어서는 많은 이견이 있으나 특정 건설사업이 정부에 의해 주도되는 경우에는 사회적 할인율의 개념을 적용하고 민간자본에 의해 추진되는 경우에는 시장이자율에 근거한 재무적 할인율을 적용하는 것이 일반적
- 사회적 할인율은 통상 시장이자율보다 낮은 수준으로 책정되는데 그 이유는 사회적 할인율을 사용하여 사업타당성을 평가하는 주체가 주로 정부이며 정부로서는 미래사업의 중요성이 더 높게 평가되어야 하기 때문임
- 대부분의 국가는 투자사업의 특성에 따른 할인율을 자국의 경제성장률, 물가상승률, 경제적 잠재능력 등을 고려하여 개괄적인 방법으로 정부가 추정하여 사용하고 있어 데 본 연구에서의 사회적 할인율은 기획재정부가 2017년 8월에 발표한 「예비타당성조사제도 개편안」에 의거하여 4.5% 적용

○ 편익 기간

- 기술수명주기 분석에 따라 본 연구개발사업의 편익 기간은 10년으로 가정

o 경제성 분석시 고려사항

- 분석 시점 : 본 분석 직전연도 2017년 기준으로 현재가치화
- 비용 : 본 연구개발사업 단계별 예산안
- 편익 기간 : 평균 기술순환주기(TCT) 분석 결과에 따라 연구개발사업 종료 후 편익 회임기간 3년 후인 2026년 이후부터 10년간
- 할인율 : 최근 개정된 기획재정부 방침(2017년 8월)에 근거하여 4.5% 적용

마. 비용편익분석 결과

○ 비용편분석 결과 편익-비용비율은 1.75로서 본 연구개발사업은 경제적으로 타당한 것으로 분석

○ 추후 본 연구개발사업을 통해 해양 및 기후 연구의 기초과학적 연구 성과가 확산되고 시계열 해양 모니터링 데이터가 쌓이면서 추후 산업적으로 활용되면 본 편익-비용비율은 더욱 긍정적으로 변화될 수 있음

○ 본 연구개발사업의 내부수익율은 10.8%로서 통상적인 은행이자율을 훨씬 상회하는 수치이며 적용할인율보다 높은 값을 시현, 재무적 수익성도 일정정도 확보한 것으로 판단

- 본 연구개발사업의 순현재가치는 1,151.1백만원인 것으로 분석

표 15. 경제성 분석 결과

구 분	분석 결과
총 편익의 현재가치 (백만원)	2,696.0
총 비용의 현재가치 (백만원)	1,544.9
순현재가치 (백만원)	1,151.1
편익-비용 비율	1.75
내부수익률(IRR)	10.8%

○ 편익-비용의 흐름을 연도별로 살펴보면, 편익의 현재가치는 2,696.0백만원, 비용의 현재가치는 1,554.9백만원인 것으로 분석

표 16. 편익-비용 분석 흐름 (단위 : 백만원)

연도	비용	비용의 현재가치	편익	편익의 현재가치	순편익	순 현재가치
2019	450	412		0	-450	-412
2020	450	394		0	-450	-394
2021	450	377		0	-450	-377
2022	450	361		0	-450	-361
2023				0	0	0
2024				0	0	0
2025				0	0	0
2026			485	326	485	326
2027			485	312	485	312
2028			485	299	485	299
2029			485	286	485	286
2030			485	273	485	273
2031			485	262	485	262
2032			485	250	485	250
2033			485	240	485	240
2034			485	229	485	229
2035			485	219	485	219
합계	1,800	1,545	4,845	2,696	3,045	1,151

바. 민감도 분석

○ 사업 추진에 있어 사업비가 변경되거나 편익 추정치가 변화할 수 있는 점을 감안하여 (예비)타당성조사는 경제성 분석 수행 후 민감도 분석 시행을 제안

○ 편익 및 비용 변화에 대한 민감도 분석을 위해서 편익과 비용을 ±20%까지 10%p씩 변화시킴

○ 편익 및 비용의 변화에 따라 경제적 타당성 확보 정도는 변하는 것으로 분석되나 편익과 비용 ±10% 선까지는 경제적 타당성을 확보하는 것으로 평가

표 17. 민감도 분석

구 분	변화율 (%)	총편익의 현재가치 (백만원)	총비용의 현재가치 (백만원)	순현재가치 (백만원)	B/C
편익의 변화	-20%	2,156.79	1,544.87	611.93	1.396
	-10%	2,426.39	1,544.87	881.53	1.571
	0%	2,695.99	1,544.87	1,151.13	1.745
	10%	2,965.59	1,544.87	1,420.72	1.920
	20%	3,235.19	1,544.87	1,690.32	2.094
비용의 변화	-20%	2,695.99	1,235.89	1,460.10	2.181
	-10%	2,695.99	1,390.38	1,305.61	1.939
	0%	2,695.99	1,544.87	1,151.13	1.745
	10%	2,695.99	1,699.35	996.64	1.586
	20%	2,695.99	1,853.84	842.15	1.454

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

○ 부산 신항만 구축 및 운영에 필요한 환경오염 및 환경 평가의 기초자료로 활용
○ 부산 항만 환경오염 등 지역사회 현안에 정책지원 자료로 활용
○ 지구환경변화에 의한 주요 해양생물자원량 변화 예측을 위한 기초자료로 활용
○ 지구온난화에 따른 해양 환경변화를 예측하는 생지화학 모델의 기초 입력자료로 활용
○ 장기 모니터링 자료의 필요성에 비해 아직 기후 변화에 따른 해양환경 반응을 분석할 수 있는 정도의 장기 모니터링 자료는 많지 않음. 본 연구의 성공적인 수행은 신뢰성 높은 우리나라 주변해의 장기 모니터링 자료 확보에 기여하여 전지구 해양환경 변화 분석에 활용될 수 있을 것임.
○ 기후변화 및 해양산성화 연구를 위한 장기 해양환경/생태계 변화 자료 확보
○ 효율적이고 지속가능한 장기 모니터링 시스템 구축 노하우 확보
○ 상시 모니터링을 통한 종합적 환경 변화 이해 및 예측 가능
○ 향후 국내 전국 연안에 적용 가능한 기술적 수월성 확보
○ 기후변화/환경변화에 따른 해역별/환경특성별 연안 환경/생태계 변동성 평가, 관리방안 및 국가정책 수립에 기여
○ 국내에서 해양환경의 장기 모니터링을 수행하기 여러 기관에서는 각자 특화된 임무를 부여 받아 업무를 수행하고 있으며 자료의 품질관리 또는 정도관리를 위해 절차를 수립하여 운영하고 있음. 그러나 아직도 많은 자료들이 신뢰할 수 있는 수준에 미치지 못하고 있는 것이 현실임. 본 연구를 통해 개별 항목별 최적의 효율적 모니터링 기술을 확립하고 자료의 품질관리 체계가 확립될 수 있을 것으로 기대됨.
○ 부산 항만 인근에서의 오염물질, 유입원, 이동경로, 거동 등에 대한 상시모니터링을 통한 과학적인 해양환경자료 제공
○ 항만 인근 환경오염문제 관련 환경 정책 지원
○ 연안 무기탄소 모니터링 방법 확립
○ 주요 모니터링 인자 선별
○ 연안 탄소 모델 정립의 초기 자료 제공
○ 산성화 진행에 영향을 미치는 인자 파악 및 프로세스 이해를 통한 대처로 산성화 진행 억제 가능
○ 생물영향예측 실험에 이산화탄소 농도 및 pH 변화뿐만 아니라 다양한 환경변화 인자에 대한 자료 제공 가능
○ 연안 산성화 경향 및 주요 변동 인자 파악으로 산성화 진행 예측 모델 개발

을 위한 기초 자료 확립

○ 고정 관측점에서 생산된 이산화탄소 분압 시계열 모니터링 자료는 해수의 수온, 염분 등 해양환경변수와의 상관관계 분석 등을 통해 해양 이산화탄소 분포 결정 요인 연구에 활용될 수 있으며, 해수의 물리·화학적 환경특성이 파악된 주변해역의 해수 이산화탄소 분압 분포를 공간적으로 확장해 추정하는 데에 활용할 수 있음.

○ 대기 침적 물질이 연안 환경에 미치는 잠재적 영향 평가

○ 오염물질 저감 및 지역 현안 대응을 위한 근거 자료 제시

○ 차년도 (2019) 본 센터에 도입되는 미세먼지 자동 채취기/대기 모니터링 측정 장비의 적극 활용 위한 연구 아이템

○ '과학을 통한 바다 알기'를 통해 해양 과기원의 존립 목적에 따른 첫 임해 연구소로서의 역할 수행을 위한 발돋움 필요

○ 인공방사능 물질의 육상 및 해양 유입에 대한 국민 우려 불식을 위한 정기적인 인공 방사능 물질의 대기/해양 모니터링 통한 기초 정보 제공

○ 부산 혁신도시 조성 사업 이후의 부산 연안/항만의 해양 환경 모니터링을 통한 해양 환경 통합 평가 및 관련 정책 결정에의 기초 정보 제공

○ 다양한 대기 환경 인자의 정점 상시 모니터링을 통한 대기 환경 이해와 예측 가능

○ 본 연구원의 부산 신청사 이전과 동시에, 대기 오염 및 항만 환경 평가 등 지역사회 현안의 해양 과기원의 기여 증대

○ 해양생태계를 효율적이고 지속가능한 관리방안 제공

○ 기후변화 대응 정책수립 시 활용 가능한 기초자료 제공

○ 해양 환경 및 생산성 변동 예측을 위한 기반 자료를 제공함으로써, 기후변화에 의한 수산업, 해양레저산업 등의 영향 파악과 대책 수립을 통해 경제적 안정을 도모

○ 주요 해양 생물 종에 대한 정보를 확보하여 경제적으로 중요한 해양생물의 관리 및 보존에 활용함으로써 관련 산업의 매출 증대에 기여

○ 우리나라 주변해의 광합성 미세생물 다양성 정보에 대한 체계적인 기초자료를 확보함

○ 주요 기능 미세조류 그룹의 다양성 분석 기법을 개발함으로써, 관련 분야의 다양성 연구의 질적 발전과 연구 활성화에 기여함

○ 본 연구결과는 해양생태계의 현황을 파악하는데 활용되며, 미래에 나타날 해양생태계 변화를 이해하고 대응할 수 있는 기반을 제공할 것으로 기대됨

○ 주요 기능 미세조류 그룹의 다양성 분석 기법을 개발함으로써, 관련 분야의 다양성 연구의 질적 발전과 연구 활성화에 기여함

○ 해양 산성화 등 변화하는 해양 환경에서 미세생물 군집의 기능적 변동을 평가하고 예측하기 위한 기반 자료를 제공함으로써, 해양 생태계의 보존과 지속

가능한 개발을 위한 과학적 근거를 제시함

○ 지구 온난화에 의한 우리나라 주변해 아열대화 여부의 논쟁에 대한 체계적이고 과학적인 판단을 위한 근거 자료를 제공

○ 주요 미세조류 그룹의 생물지리적 분포, 환경적 요인과의 연관성 및 계절적 천이 특성을 파악함으로써 주변해의 기초생태계 이해 증진

○ 식물플랑크톤 군집 및 기능 그룹의 다양성 분포에 대한 정보는 주변해의 생지화학적 과정을 파악하고 생태계의 먹이망과 기능 연구에 활용될 수 있음

○ 기후 온난화에 따른 장기적 해양생태계 변화의 정성 및 정량적 데이터 구축

○ 해양생물자원 및 수산자원의 효율적 관리 위한 장기적 예측기술개발

○ 외래 유입 유해생물의 기원과 유입경로의 파악을 통한 국제협약 및 정책적 대응에 필요한 학술적 근거자료 확보

○ 부산항의 해양생태계 변수에서 중요한 중형동물플랑크톤 생태 특성에 대한 장기 자료 축적은 부산 해역의 해양 및 수산분야의 현안 문제를 해결하는데 활용될 수 있으며, 기후 및 환경변화에 따른 부산항 및 부산 연근해의 해양생태계 변동을 이해하는데도 활용될 수 있음

○ 연안생태계 변동을 파악하기 위한 중형동물플랑크톤 장기자료 축적 및 분석 기술 확보

○ 장기모니터링 운영 노하우 습득 및 분석체계 구축을 통한 미래 연안생태계 예측 기술 확보

○ 미래 연안생태계 변화에 대응 및 관리할 수 있는 과학적 근거자료 확보

○ 환경변화에 대한 연안생태계 변동을 진단 및 예측할 수 있는 과학적 정보 제공

○ 장기모니터링을 통해 환경변화에 대한 연안생태계 변동을 진단 및 예측함으로써, 생물 다양성 보전과 유용 수산자원의 효율적인 이용과 관리를 위한 국가 대응정책 수립을 위한 자료 제공

○ 객관적 종분류 기술인 DNA메타바코딩을 활용한 신뢰성 있는 정밀 시계열자료를 확보

○ 빅데이터 분석과 기계학습(딥러닝) 기술의 해양생태계 분야 적용 기술 확보

○ 개발되는 종출현빈도모델(SOAMs)과 생태계구조모델(ESM)을 통해 동·서·남해 연안생태계 지표생물과 수산생물종의 출현시기와 우점도 및 산란시기 예측 가능

○ 개발 모델 원천기술에 대한 지적재산권 확보

○ 오염에 의한 해양생태계 영향 분석, 기후변화에 따른 수온 상승과 아열대생물종 출현 변화 등 우리나라 연안생태계 환경변화에 의한 생태계 구조의 변화 예측

○ 해양과학기술분야에 빅데이터 분석과 기계학습(딥러닝) 전문인력 양성과 확보

○ 어류 및 대형 무척추 동물의 알과 유생을 이용한 종별 평균 산란 시기와 지

속 모형

○ 해양 동물의 산란생태 모형을 이용한 기후변화에 따른 생태계 반응

○ 어류의 종별 평균 산란생태 모형에 근거한 과학적 금어기 설정 기준 제시

○ eDNA, BRUVS, UVC를 이용한 어류 및 대형 해양 동물의 계절별 평균 천이 모형

○ 기후 변화에 따른 어류 및 대형 해양 동물의 계절 천이 반응

제 5 장 참고문헌

Arimoto, R., Snow, J. A., Graustein, W. C., Moody, J. L., Ray, B. J., Duce, R. A., ... & Maring, H. B. (1999). Influences of atmospheric transport pathways on radionuclide activities in aerosol particles from over the North Atlantic. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 104(D17), 21301-21316.

Baek, S. Y., Jang, K. H., Choi, E. H., Ryu, S. H., Kim, S. K., Lee, J. H., ... & Lee, Y. S. (2016). DNA barcoding of metazoan zooplankton copepods from South Korea. PloS one, 11(7), e0157307.

Baker, A. R., et al. (2003). "Atmospheric deposition of nutrients to the Atlantic Ocean." Geophysical Research Letters 30(24): OCE 11-11 - OCE 11-14.

Baker, A. R., et al. (2006a). "Nutrients in atmospheric aerosol particles along the Atlantic Meridional Transect." Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 53(14 - 16): 1706-1719.

Baker, A. R., et al. (2006b). "Trends in the solubility of iron, aluminium, manganese and phosphorus in aerosol collected over the Atlantic Ocean." Marine Chemistry 98(1): 43-58.

Baker, A. R., et al. (2007). "Dry and wet deposition of nutrients from the tropical Atlantic atmosphere: Links to primary productivity and nitrogen fixation." Deep-Sea Research Part I 54(10): 1704-1720.

Bakker J, Wangensteen OS, Chapman DD, Boussarie G, Buddo D, Guttridge TL, Hertler H, Mouillot D, Vigliola L, Mariani S. (2017). Environmental DNA reveals tropical shark diversity in contrasting levels of anthropogenic impact. Scientific Reports 7: 16886, DOI:10.1038/s41598-017-17150-2.

Bauer J. E., et al. (2013). "The changing carbon cycle of the coastal ocean." Nature 504: 61

Bingpeng X, Heshan L, Zhilan Z, Chunguang W, Yanguo W, JianjunW(2018) DNA barcoding for identification of fish species in the Taiwan Strait. PLoS ONE 13(6): e0198109. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198109.

Bohmann K, Evans A, Gilbert MTP, Carvalho GR, Creer S, Knapp M, Yu DW, de Bruyn M. (2014). Environmental DNA for wildlife biology and biodiversity monitoring. Trends in Ecology & Evolution, 29(6): 358 - 367. doi:10.1016/j.tree.2014.04.003.

Borges A. V., et al. (2008). "Net ecosystem production and carbon dioxide fluxes in the Scheldt estuarine plume." BMC Ecology 8(1): 15

Boussarie G, Bakker J, Wangensteen OS, Mariani S, Bonnin L, Juhel J-B, Kiszka JJ, Kulbicki M, Manel S, Robbins WD, Vigliola L, Mouillot D. (2018). Environmental DNA illuminates the dark diversity of sharks. Science Advances, 4(5), eaap9661, DOI: 10.1126/sciadv.aap9661.

Cai W.-J., et al. (2011). "Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication." Nature Geoscience 4: 766

Campbell L, Vaulot D (1993) Photosynthetic picoplankton community structure in the subtropical North Pacific Ocean near Hawaii (station ALOHA). Deep-Sea Res 40: 2043-2060

Casas, L., Pearman, J. K., & Irigoien, X. (2017). Metabarcoding reveals seasonal and temperature-dependent succession of zooplankton communities in the Red Sea. Frontiers in Marine Science, 4, 241.

Cho, H. M., Hong, Y. L., & Kim, G. (2011). Atmospheric depositional fluxes of cosmogenic 35S and 7Be: Implications for the turnover rate of sulfur through the biosphere. Atmospheric environment, 45(25), 4230-4234.

Choi DH, An SM, Chun S, Yang EC, Selph KE, Lee CM & Noh JH (2016) Dynamic changes in the composition of photosynthetic picoeukaryotes in the northwestern Pacific Ocean revealed by high-throughput tag sequencing of plastid 16S rRNA genes. FEMS Microbiol Ecol 92: fiv170.

Choi DH, An SM, Yang EC, Lee H, Shim J, Jeong J & Noh JH (2018) Daily variation in the prokaryotic community during a spring bloom in shelf waters of the East China Sea. FEMS Microbiol Ecol 94: fiy134.

Choi HY, Oh J, Kim S. (2018) Genetic identification of eggs from four species of Ophichthidae and Congridae (Anguilliformes) in the northern East China Sea. PLoS ONE 13(4): e0195382. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195382.

Christensen, V. and Lai, S., (2007). Ecopath with Ecosim 6: the sequel. The Sea Around Us Project Newsletter, 43:1-4 (September - October).

Christensen, V. and Pauly, D., (1992). Ecopath II - a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics. Ecological Modelling, 61:169-185.

Cochran, J. K., McKibbin-Vaughan, T., Dornblaser, M. M., Hirschberg, D., Livingston, H. D., & Buesseler, K. O. (1990). 210Pb scavenging in the North Atlantic and North Pacific oceans. Earth and Planetary Science Letters, 97(3-4), 332-352.

Cordier, T., Esling, P., Lejzerowicz, F., Visco, J., Ouadahi, A., Martins, C., ... & Pawlowski, J. (2017). Predicting the ecological quality status of marine

environments from eDNA metabarcoding data using supervised machine learning. Environmental science & technology, 51(16), 9118-9126.

Djurhuus A, Pitz K, Sawaya NA, Rojas-Marquez J, Michaud B, Montes E, Muller-Karger F, Breitbart M. (2018). Evaluation of marine zooplankton community structure through environmental DNA metabarcoding. Limnology and Oceanography: Methods, 16: 209-221, doi: 10.1002/lom3.10237.

Djurhuus A., Pitz K., Sawaya N.A. et al. (2018). Evaluation of marine Zooplankton community structure through environmental DNA metabarcoding. Limnol. Oceanogr. Methods 16: 209-221.

Ducklow HW, Doney SC, Steinberg DK (2009) Contribution of long-term research and time-series observations to marine ecology and biogeochemistry. Annu Rev Mar Sci 1: 279-302

Dueñas, C., Fernández, M. C., Carretero, J., Liger, E., & Cañete, S. (2005). Deposition velocities and washout ratios on a coastal site (southeastern Spain) calculated from 7Be and 210Pb measurements. Atmospheric Environment, 39(36), 6897-6908.

Dueñas, C., Orza, J. A. G., Cabello, M., Fernández, M. C., Cañete, S., Pérez, M., & Gordo, E. (2011). Air mass origin and its influence on radionuclide activities (7Be and 210Pb) in aerosol particles at a coastal site in the western Mediterranean. Atmospheric Research, 101(1-2), 205-214.

Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. Annual review of ecology, evolution, and systematics, 40, 677-697.

Evans W., et al. (2012). "Sea-air CO_2 fluxes in the western Canadian coastal ocean." Progress in Oceanography 101(1): 78-91

Feely R. A., et al. (2010). "The combined effects of ocean acidification, mixing, and respiration on pH and carbonate saturation in an urbanized estuary." Estuarine, Coastal and Shelf Science 88(4): 442-449

Gomes, V. H., IJff, S. D., Raes, N., Amaral, I. L., Salomão, R. P., Coelho, L. S., ... & Guevara, J. E. (2018). Species Distribution Modelling: Contrasting presence-only models with plot abundance data. Scientific reports, 8(1), 1003.

Hallgren, W., Beaumont, L., Bowness, A., Chambers, L., Graham, E., Holewa, H., ... & Vanderwal, J. (2016). The biodiversity and climate change virtual laboratory: where ecology meets big data. Environmental Modelling & Software, 76, 182-186.

Han, X., Guo, Y., Mi, C., Huettmann, F., & Wen, L. (2017). machine learning model analysis of breeding habitats for the black-necked crane in Central Asian Uplands under anthropogenic pressures. Scientific Reports, 7(1), 6114.

Harada AE, Lindgren EA, Hermsmeier MC, Rogowski PA, Terrill E, Burton RS. (2015) Monitoring spawning activity in a Southern California marine protected area using molecular identification of fish eggs. PLoS ONE 10(8): e0134647. doi:10.1371/journal.pone.0134647.

Hong, Y. L., & Kim, G. (2005). Measurement of cosmogenic 35S activity in rainwater and lake water. Analytical chemistry, 77(10), 3390-3393.

J. Keith Moorea,*, Scott C. Doneya, Joanie A. Kleypasa, David M. Gloverb, Inez Y. Fungc (2002). An intermediate complexity marine ecosystem model for the global domain Deep-Sea Research II 49: 403.462

Jens-Christian Svenning, Camilla Fløjgaard, Katharine A. Marske, David Nogues-Bravo, Signe Normand, (2011). Applications of species distribution modeling to paleobiology. Quaternary Science 30(21-22): 2930-2947.

Jo C. O., et al. (2007). "Asian dust initiated early spring bloom in the northern East/Japan Sea." Geophysical Research Letters 34(5)

Jung, J., et al. (2011). "Atmospheric inorganic nitrogen in marine aerosol and precipitation and its deposition to the North and South Pacific Oceans." Journal of Atmospheric Chemistry 68(2): 157-181.

Jung, J., et al. (2013). "Atmospheric inorganic nitrogen input via dry, wet, and sea fog deposition to the subarctic western North Pacific Ocean." Atmospheric Chemistry and Physics 13(1): 411-428.

Kang, J., et al. (2009). "Atmospheric metal and phosphorus concentrations, inputs, and their biogeochemical significances in the Japan/East Sea." Science of the Total Environment 407(7): 2270-2284.

Kang, J., et al. (2010). "Atmospheric transport of water-soluble ions (NO_3^-, NH_4^+ and nss-SO_4^{2-}) to the southern East Sea (Sea of Japan)." Science of the Total Environment 408(11): 2369-2377.

Kang, J., et al. (2011). "A five-year observation of atmospheric metals on Ulleung Island in the East/Japan Sea: Temporal variability and source identification." Atmospheric Environment 45(25): 4252-4262.

Kelly R. P., et al. (2011). "Mitigating Local Causes of Ocean Acidification with Existing Laws." Science 332: 1036-1037

Kim D., et al. (2013). "Biologically Mediated Seasonality of Aragonite Saturation States in Jinhae Bay, Korea." Journal of Coastal Research: 1420-1426

Kim G, Kang HK, Myoung JG (2017) Seasonal and interannual variation in mesozooplankton community structure off Tongyeong, southeastern coast of Korea, from 2011 to 2014. Ocean Sci J 52: 113-125

Kim, G., Hong, Y. L., Jang, J., Lee, I., Hwang, D. W., & Yang, H. S. (2005). Evidence for anthropogenic 210Po in the urban atmosphere of Seoul, Korea. Environmental science & technology, 39(6), 1519-1522.

Kim, G., Hussain, N., Scudlark, J. R., & Church, T. M. (2000). Factors influencing the atmospheric depositional fluxes of stable Pb, 210Pb, and 7Be into Chesapeake Bay. Journal of Atmospheric Chemistry, 36(1), 65-79.

Kim, I.-N., et al. (2014). "Increasing anthropogenic nitrogen in the North Pacific Ocean." Science 346(6213): 1102-1106.

Kim, K., et al. (2016). "Production of Molecular Iodine and Tri-iodide in the Frozen Solution of Iodide: Implication for Polar Atmosphere." Environmental Science & Technology 50(3): 1280-1287.

Kim, T.-W., et al. (2011). "Increasing N abundance in the northwestern Pacific Ocean due to atmospheric nitrogen deposition." Science 334(6055): 505-509.

Kirkham AR, Lepere C, Jardillier LE, Not F, Bouman H, Mead A, Scanlan DJ (2013) A global perspective on marine photosynthetic picoeukaryote community structure. ISME J 7(5):922.

Lafferty KD, Benesh KC, Mahon AR, Jerde CL, Lowe CG. (2018). Detecting southern California's white sharks with eEnvironmental DNA. Frontiers in Marine Science, 5:355, doi: 10.3389/fmars.2018.00355.

Lewis LA, Richardson DE, Zakharov EV, Hanner R. (2015). Integrating DNA barcoding of fish eggs into ichthyoplankton monitoring programs. Fishery Bulletin, 114:153 - 165, doi: 10.7755/FB.114.2.3.

Lozano, R. L., San Miguel, E. G., Bolívar, J. P., & Baskaran, M. (2011). Depositional fluxes and concentrations of 7Be and 210Pb in bulk precipitation and aerosols at the interface of Atlantic and Mediterranean coasts in Spain. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116(D18).

Mahowald, N., et al. (2008). "Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts." Global Biogeochemical Cycles 22(4).

Marie D, Vaulot D & Partensky F (1996) Application of the novel nucleic acid dyes YOYO-1, YO-PRO-1, and PicoGreen for flow cytometric analysis of marine prokaryotes. Appl Environ Microbiol 62: 1649-1655.

Marie D, Partensky F, Jacquet S & Vaulot D (1997) Enumeration and cell

cycle analysis of natural populations of marine picoplankton by flow cytometry using the nucleic acid stain SYBR Green I. Appl Environ Microbiol 63: 186-193.

Martino, M., et al. (2014). "Western Pacific atmospheric nutrient deposition fluxes, their impact on surface ocean productivity." Global Biogeochemical Cycles 28(7): 2013GB004794.

Nakamura, T., et al. (2005). "Chemical characteristics of aerosols transported from Asia to the East China Sea: An evaluation of anthropogenic combined nitrogen deposition in autumn." Atmospheric Environment 39(9): 1749-1758.

Nakano, M., & Povinec, P. P. (2012). Long-term simulations of the 1 37 Cs dispersion from the Fukushima accident in the world ocean. Journal of environmental radioactivity, 111, 109-115.

Oh J, Kim S. (2015). Morphological and molecular characterization of separated pelagic eggs from Lophius litulon (Lophiiformes; Lophiidae). Journal of Fish Biology, 86: 1887-1891, doi:10.1111/jfb.12701.

Parsons TR, Maita Y & Lalli CM (1984) A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon, Amsterdam.

Penna, A., Casabianca, S., Guerra, A. F., Vernesi, C., & Scardi, M. (2017). Analysis of phytoplankton assemblage structure in the Mediterranean Sea based on high-throughput sequencing of partial 18S rRNA sequences. Marine genomics, 36, 49-55.

Prospero, J. M., et al. (2003). "Long-term record of nss-sulfate and nitrate in aerosols on Midway Island, 1981 - 2000: Evidence of increased (now decreasing?) anthropogenic emissions from Asia." Journal of Geophysical Research: Atmospheres 108(D1): 4019.

Spokes, L., et al. (2001). "Atmospheric inputs of trace metals to the northeast Atlantic Ocean: The importance of southeasterly flow." Marine Chemistry 76(4): 319-330.

Thessen, A. (2016). Adoption of machine learning techniques in ecology and earth science. One Ecosystem, 1, e8621.

Yan, G., Cho, H. M., Lee, I., & Kim, G. (2012). Significant emissions of 210Po by coal burning into the urban atmosphere of Seoul, Korea. Atmospheric environment, 54, 80-85.

Yang, J., Zhang, X., Xie, Y., Song, C., Zhang, Y., Yu, H., & Burton, G. A. (2017). Zooplankton community profiling in a eutrophic freshwater ecosystem-lake tai basin by DNA metabarcoding. Scientific reports, 7(1), 1773.

Zapata M, Rodriguez F, Garrido JL (2000) Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phase. Mar Ecol Prog Ser 195: 29-45.

뒷 면

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.