

기본연구 최종보고서

① 부처사업명(대)	기초연구사업	보안등급(보안, 일반)	일반					
② 사 업 명(중)	기본연구	공개가능여부(공개, 비공개)	공개					
③ 세부사업명(소)	기본연구							
④ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초	④-1 실용화 대상여부(실용화, 비실용화)	비실용화					
⑤ 연구개발과제명	국 문	북극 스발바르 피오르드 연안 산성화에 의한 메틸수은 생물농축 영향규명						
	영 문	Influence of coastal ocean acidification on methylated Hg bioaccumulation in the Arctic Svalbard fjords						
⑥ 주관연구개발기관	한국해양과학기술원							
⑦ 연구책임자	성 명	김하련	선임연구원					
	소속부서	동해환경연구센터	전 공					
⑧ 연구개발비 및 참여연구원수 (단위: 천원, M·Y)								
연 도	정부지원 연구개발비 (A)	기업체부담금			정부외 출연금 (B)	상대국 부담금 (F)	합계 G=(A+B+E)	참여 연구원수
		현금 (C)	현물 (D)	소계 E=(C+D)				
1년차	37,500			0			37,500	4
2년차	50,000			0			50,000	8
3년차	50,000			0			50,000	4
4년차				0			0	
5년차				0			0	
합계	137,500	0	0	0	0	0	137,500	16
⑨ 총연구개발기간	2019. 06. 01 ~ 2022. 02. 28 (33개월)							

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022년 03월 22일

연구책임자 : 김하련

주관연구개발기관의 장 : 김웅서

과학기술정보통신부장관 귀하

※ 전자접수이므로 연구책임자 및 주관연구개발기관의 장 서명(인, 직인)은 생략

〈 연구결과 요약문 〉

연구개요	<p>CO₂ 증가와 저온 환경으로 인하여 해양산성화가 뚜렷하게 나타나고 있는 지역이 바로 북극 지역임. 최근 온난화로 인하여 빙하의 해빙이 가속화되고 있고, 이로 인한 빙하 응용수의 증가는 동토층 및 빙하에 축적되어 있는 유기물과 중금속 등을 연안 환경으로 유입시키는 역할을 진행하고 있음. 이러한 근거를 바탕으로, 본 연구에서는 (1) 북극의 스발바르 피오르드 연안 환경에서의 산성화의 특성을 파악하고, 이것이 북극의 동식물 플랑크톤에 축적되어 있는 수은 함량에 미치는 영향을 진단 하였음. 동시에 (2) 실내 실험을 통해, 국내 연안에 광범위하게 서식하는 구멍갈파래가 산성화 조건에서 수은 흡수에 어떠한 영향을 받는지에 대한 연구도 함께 수행 하였음. 추가적으로 Covid-19로 인한 북극 탐사가 취소됨으로써 대체 연구로 (3) 서남극해의 동식물 플랑크톤 시료를 확보하여, 광범위한 환경 조건에서 생체 내 축적되어 있는 수은 농도의 경향을 위도별로 분석하였음</p>					
연구 목표대비 연구결과	<p>(1) 산성화가 진행되고 있는 북극 피오르드 연안의 생물농축 수은 경향성 파악 - 퇴적물의 경우 해빙의 강도가 높은 호르존드 피오르드에서 높은 수은의 함량이 관찰되었으며, 동시에 이 지역의 육상과 가까이 위치한 내측의 피오르드에서 높은 동물성 플랑크톤의 체내 수은 농도가 관찰되었음. 그러나 이러한 현상은 북극의 산성화에 따른 영향보다는 온난화로 인한 해빙의 강화가 육상 및 빙하에 존재하는 유기물의 유출을 증가시키고 이로 인해 이들 유기물과 결합된 수은의 양이 증가함으로써, 퇴적 환경 및 동물성 플랑크톤 내 높은 수은 농도를 견인하였을 것으로 판단됨</p> <p>(2) 산성화 실내 실험을 통한 구멍갈파래 내 생물농축 수은량 경향성 파악 - CO₂ 구배를 통한(350ppm vs 850ppm) pH(pH 8.0 vs 7.5) 조절 실내 실험을 활용하여, 연안에 서식하는 구멍갈파래(<i>Ulva pertusa L.</i>)에 축적된 총 수은량을 측정 한 결과, 국내 연안 수계 환경의 배경농도 수준에서의 수은(100ppb)에서는 산성화에 따라 구멍갈파래 내 수은 흡수율의 변화가 나타나지는 않았음. 단, ppm 수준의 높은 농도의 수은에 장기간 노출되었을 시, 구멍갈파래의 광합성양 감소와 생태적 변형이 관찰되었음</p> <p>(3) 위도에 따른 (서해·적도·남극 지역) 수은 생물농축 경향 파악 - 남극의 로스 해역에서 식물플랑크톤 내 높은 수은 축적량을 보였으며, 이는 이 지역에 영양염의 농도가 높고 이로 인해 다른 해역과 달리 1차 생산력이 견인되어 식물플랑크톤의 성장을 촉진시킴으로써, 이로 인한 수은의 농축 경향이 역시 높아진 것으로 해석할 수 있으나, 좀 더 명확한 결과를 알아보기 위해서는 추가적인 조사와 연구가 필요할 것으로 판단됨. 동물 플랑크톤 경우는 예외적으로 높은 2사이트를 제외하고는 위도별 경향성이 나타나지는 않았음</p>					
연구개발성과의 활용 계획 및 기대효과 (연구개발결과의 중요성)	<p>(1) 북극에서 나타나는 높은 농도의 수은 생물 농축의 메카니즘 규명 연구에 활용 (2) 서남극해 위도별 동식물 플랑크톤의 수은 농도 자료 제시를 통해 향후 광범위한 해양 지역에서의 수은생물농축 경향성에 대한 파악 및 메카니즘 연구에 활용 (3) 본 과제를 통해 구축한 산성화 메조코즘 시스템을 활용하여 향후 수은의 생물농축 실험뿐만 아니라 다양항 생지화학적 순환에 관한 연구에 활용될 것으로 판단됨</p>					
중심어	국문	수은	생물농축	산성화	북극	서남극
중심어	영문	Mercury	Bioaccumulation	Acidification	Arctic	Antarctic

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	04
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용	04
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	11
4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도	13
5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	13
6. 참고문헌	13
<붙임1 세부 정량적 연구개발성과>	15
<붙임2 연구책임자 대표적 연구실적 및 증빙(요약문 및 사본)>	17
<붙임3 연구개발성과 활용계획서>	20

1. 연구개발과제의 개요

(1) 연구배경 및 연구동향

- 최근 화석연료 사용에서 배출된 CO₂ 중 1/4이 해양으로 흡수되고, 이로 인해 대기과 해양 사이의 CO₂ 교환으로 해수의 pH 조성을 낮춘다는 의미의 해양산성화(Ocean acidification) 문제가 심각하게 대두되고 있음. 특히 북극은 해수온이 중고위도 지역보다 낮기 때문에 CO₂ 용해율이 높아져 해양산성화의 영향이 뚜렷할 것으로 예상하고 있음(Wallace et al., 2014)
- 해수 내 존재하는 수은(Hg²⁺)은 유기물과 강한 착화합물을 형성하여 퇴적물에 가라앉아 해수 내에서 제거되는 기작을 거치는데, 혐기 조건에서 서식하는 황환원 및 메탄 생성 세균에 의하여 해수 내 Hg²⁺이 메틸화 과정을 거쳐 생물이 흡수하기 쉬운 형태인 메틸수은(CH₃Hg)으로 전환(수은메틸화; Mercury Methylation) 생체 내에 축적되고, 먹이단계를 거쳐 상위 포식자에게 독성을 띤 생물농축(Bioaccumulation) 과정을 거치게 됨
- 해빙의 응용과정을 통해 상당량의 육상 유기물이 유입되고 CO₂ 증가로 인하여 해양산성화가 가속되고 있는 피오르드의 연안 환경 내에서 생물 농축된 수은의 축적량에 대한 연구는 북극 지역 원주민의 생체 내에서 과다하게 보고되고 있는 수은 농도의 원인에 대한 단서를 제공할 수 있음

(2) 연구 변경사항 및 최종연구 목표

- [연구변경 사항] 1차 년도 결과를 바탕으로 2차 년도 북극 스발바르 탐사를 통해 북극 산성화가 뚜렷한 지역의 동·식물 플랑크톤 및 해수 시료를 확보하려 하였으나, Covid-19 발생으로 인하여 모든 해외 출장이 취소됨으로써 불가피한 연구 변경사항이 발생하였고 이에 따라 연차년도의 연구 목표가 수정되어 진행되었음
- [연구최종 목표] 북극 스발바르 피오르드 연안산성화에 의한 수은 생물농축 영향규명

(3) 주요 연구내용

- 현장 탐사를 통해 산성화가 진행되고 있는 피오르드 연안의 생물농축 수은 경향성 파악
 - 북극 연안 피오르드의 퇴적물 및 수계의 수은 경향성 파악
 - 동식물 플랑크톤 수은의 생물 농축양 분석 및 경향 파악
- 산성화 실내 실험을 통한 해조류 내 생물농축 총 수은량 경향성 규명
 - CO₂ 구배를 통한(350ppm vs 850ppm) pH 구배별(pH 8.0 vs 7.5) 실내 실험 모사를 통해 연안에 주로 서식하는 구멍갈파래(*Ulva pertusa* L.)에 축적된 총 수은량 측정
- 위도에 따른 (서해·적도·남극 지역) 수은 생물농축 경향 파악
 - 서해·적도·남극 로스 해역에서의 화학적 특성 파악
 - 동식물 플랑크톤 내 수은 생물 농축양 측정

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

- 1차 년도 연구 목표 -

1차년도(2019) 내용: 연구지역 선정 및 스발바르 피오르드 연안산성화 특성 파악

○ 북극 스발바르 피오르드 퇴적물 내 수은 경향성 파악

- 해빙으로 인해 연안산성화가 뚜렷할 것으로 예상되는 호르존드, 광산 활동으로 인해 인근 인위적인 수은 유입이 상당할 것으로 예상되는 이스 피오르드, 해빙 퇴각율이 현격하게 나타나고 있는 반미에르 피오르드 지역, 10개 정점에 대하여 8월 탐사를 실시하였으며, 깊이별 해수 및 퇴적물, 해수 및 생물 시료를 확보하였음 (그림1)

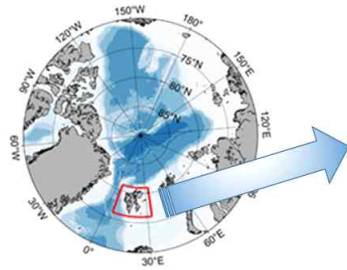


그림 1. 2019년 스발바르 피오르드 탐사지역 (이스, 반미에르, 호르존드 지역)

- 퇴적물에서의 중금속 농도는 모두 노르웨이 해양퇴적물 환경 기준값 이하로 측정되었으나, 타 피오르드 지역에 비해 빙하 퇴각을 및 연간 빙하 손실 면적이 가장 높은 호르존드 지역에서 퇴적물 내 총수은 및 5가지 중금속(비소, 구리, 니켈, 아연, 크롬) 농도가 가장 높게 나타났음(그림 2)

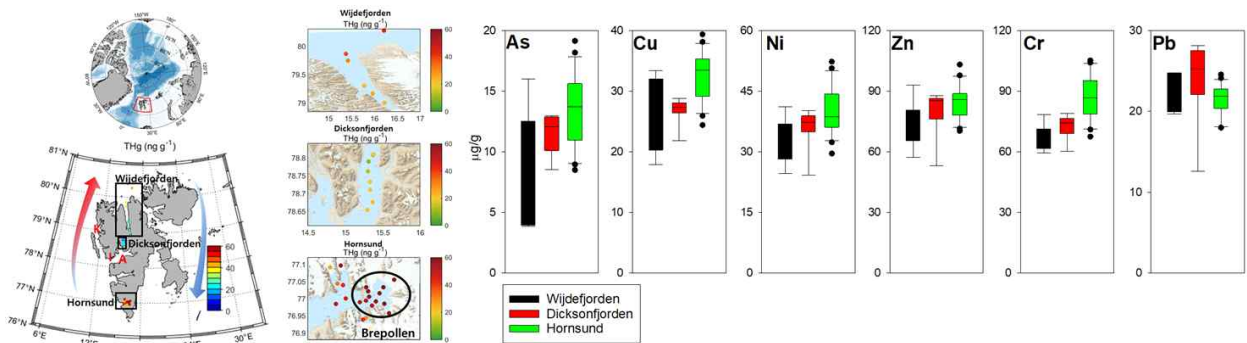


그림 2. 북극 스발바르 비데, 딕슨, 호르존드 피오르드 퇴적물 내 수은 및 6가지 중금속 농도 경향

- 유기물 기원을 분석하기 위하여, 탄소·황에 대한 동위원소 분석을 진행하였으며, 탄소 및 질소 비율 및 동위원소 End-member 값을 이용하여 육상 유기물의 기원을 계산한 결과, 호르존드 지역에서 약 67%의 유기물이 육상에서 유입된 것으로 나타났음.
- 이는, 해빙으로 인하여 피오르드 연안으로 유기물이 유입되어, 유기물에 부착된 수은 및 빙하에 축적된 수은 등이 연안으로 유출되고 있음을 알 수 있음
- 선행 연구 결과를 바탕으로 해빙이 강한 호르존드 지역에서 유기물 유입으로 인한 연안 산성화가 강하게 나타날 것이며, 유기물과 함께 흡착된 수은이 수계 및 생물에 농축될 가능성이 높을 것으로 판단됨

○ 북극 스발바르 피오르드의 해수 특성 파악

2.1. 북극 스발바르 피오르드 내 해빙 영향으로 인해 연안산성화가 강한 지역의 해수 시료 확보

- 10개 지역에서 해수의 염분, 알칼리니티, 총수은을 분석하였으며, 이들 간의 상관관계를 고찰한 결과, 육상 유기물 유입이 강하게 보이는 반미에르 연안에서 담수 유입으로 인하여 낮은 염분 농도가 기록되었으며, 그에 따라 산성화를 완충할 수 있는 알칼리니티 농도가 낮게 나타났음. 이로 인해 이 지역에 담수 및 육상 유기물 유입으로 인하여 알칼리니티가 감소하고 그에 따른 연안 산성화가 형성될 것으로 판단됨(그림 3)

- 해수의 총수은 농도 분석 결과 염분 및 알칼리니티 농도가 낮은 지역에서 총수은 농도가 높게 관측됨으로써, 향후 이 지역에서의 수은 생물 농축 현상 연구가 의미 있을 것으로 판단됨

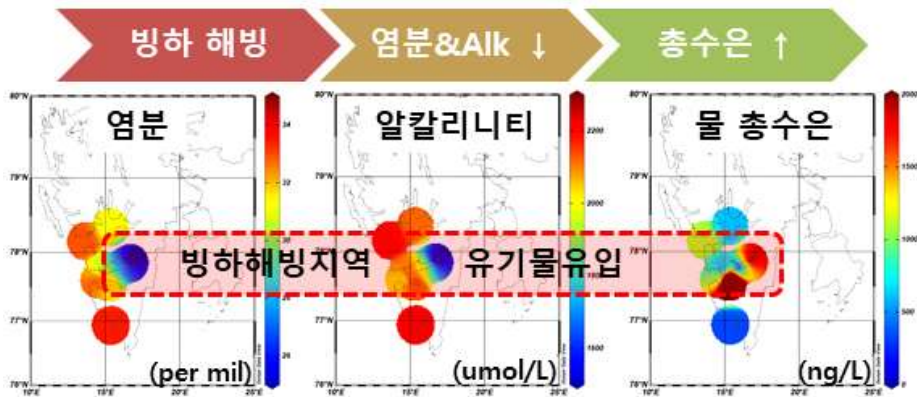


그림 3. 스발바르 이스, 반미에르, 호르존드 지역의 해수내 염분, 알칼리니티, 총수은 농도 경향

○ 북극 스발바르 내 입자성유기물(POM)과 동물플랑크톤의 수은 농축 분석

- 입자성 유기물 내 수은 농도의 범위는 1.63~30.56 ng/L의 넓은 분포를 보였으나, 반미에르와 호르존드 지역의 내측 피오르드에서 높은 농도가 나타났음(그림 4(a))
- 물에서의 총수은 농도 역시 이 두 지역에서 높게 나타는 것이 관찰되었으며, 따라서 수계의 상태에 영향을 받는 입자성 유기물이 해수에서 높은 수은 농도가 영향을 미쳤음을 알 수 있음
- 동물성플랑크톤의 농도 범위는 호르존드의 내측을 제외하고 약 10.4~25.7ng/g의 범위가 나타났으며, 호르존드의 내측 피오르드에서 103.3 ng/g의 높은 농도가 관측되었음(그림 4(b))
- 퇴적물에서의 수은 농도 역시 이 지역에서 가장 높에 나타났음. 따라서 이 지역에 우점종으로 나타났던 *Oithona similis*는 유기물과 식물플랑크톤을 모두 섭식하는 잡식성의 특성을 가지고 있으므로, 이 우점종의 특성이 동물플랑크톤에서 높은 수은량에 영향을 미쳤을 것으로 판단됨
- 특히 빙하의 해빙이 높은 호르존드 내측에서 육상으로부터 공급되는 유기물이 수은과 결합하여 퇴적물과 입자성 유기물의 수은 농도를 증가시키고, 이 지역에 잡식성의 특징을 가지는 동물플랑크톤이 이들을 섭식함으로써, 생물농축이 강화된 수은의 경향을 확인할 수 있었음
- 따라서 해빙에 의해 육상에 공급되는 수은의 양 역시 중요하지만, 좀 더 면밀한 동물플랑크톤의 종구성과 이들의 섭식 특성을 파악하여, 상위단계로 갈수록 수은이 어떻게 축적되는지에 대한 경향 연구가 필요할 것으로 판단됨

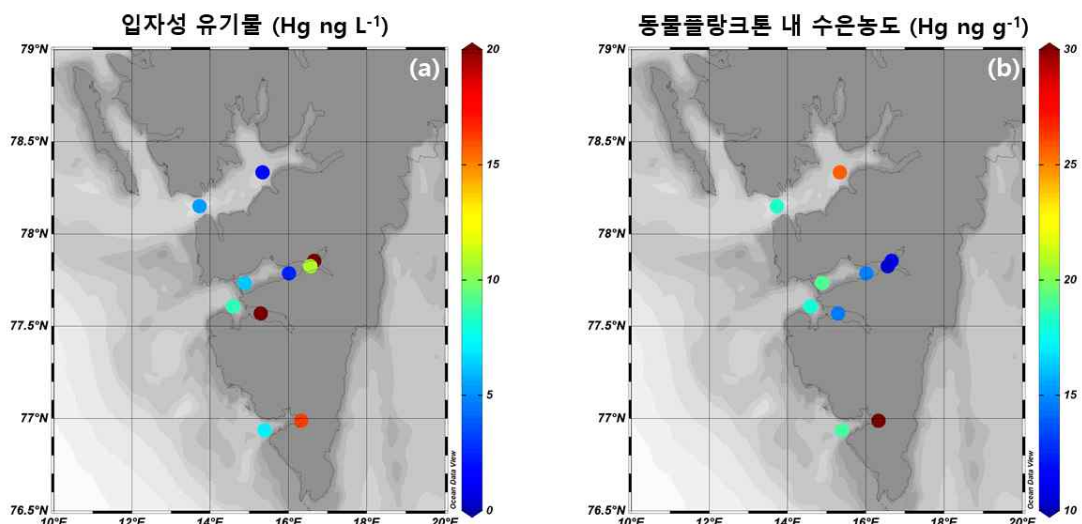


그림 4. 식물플랑크톤을 포함한 입자성유기물(a; ng L⁻¹)과 동물플랑크톤(b; ug kg⁻¹)의 총수은 농도

○ 북극 스발바르 식물 플랑크톤 군집 구조 특성 파악

- 이스, 반미에르, 호르존드 지역 10개 정점에서 수직 네트를 이용하여 식물 플랑크톤 채집
- 식물 플랑크톤에 대한 종조성, 현존량, 우점종 및 생태지수에 대한 분석을 진행하였음

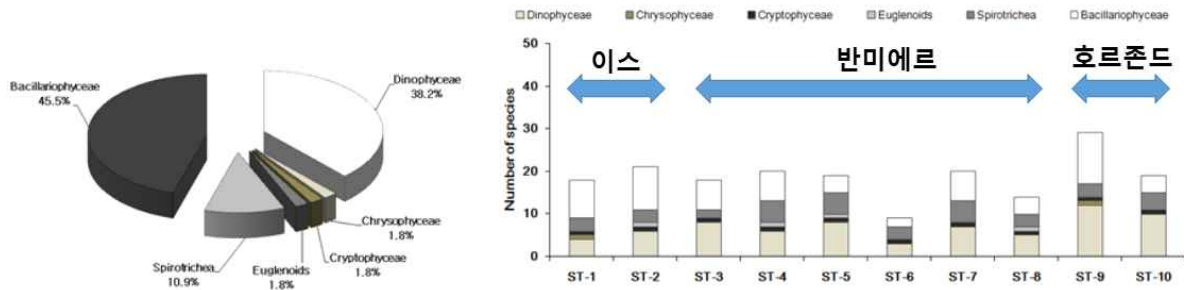


그림 5. 스발바르 이스, 반미에르, 호르존드 지역의 식물플랑크톤 종조성 및 출현종수

- 2019년 8월 조사에서 식물플랑크톤은 총 42속 55종 출현하였음. 분류군별로 규조류 (Bacillariophyceae)가 21속 25종, 와편모조류(Dinoflagellate) 14속 21종, 섬모충류 (Spirotrichea) 4속 6종, 황색편모조류(Chrysophyceae), 은편모조류(Cryptophyceae), 유글레나류(Euglenoids)가 1속 1종 출현하여 규조류에 의한 점유율이 45.5%로 가장 높았고, 와편모조류 38.2%, 섬모충류 10.9%, 황색편모조류, 은편모조류, 유글레나류가 1.8%로 조사되었음
- 정점 간 공간적 분포차이는 전반적으로 균일하였지만, 스발바르제도 중앙부 반미에르 해역 입구 정점에서 출현종수가 낮았고, 남부 호르존드 해역에 위치한 정점에서는 출현종수가 현저히 높았는데, 이는 남부 호르존드 해역이 저수온, 고염분, 고광량의 대양성 특성이 뚜렷하여 이에 따른 해양성 규조류 및 와편모조류의 출현종이 상대적으로 증가한 결과로 평가됨 (그림 5)

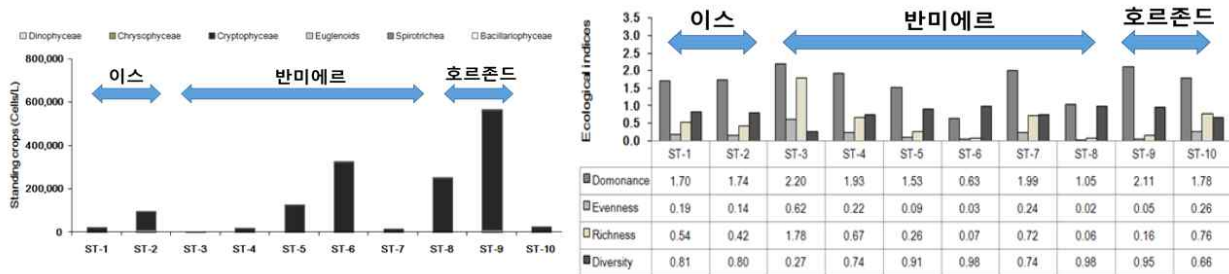


그림 6. 스발바르 이스, 반미에르, 호르존드 지역의 식물플랑크톤 현존량 및 생태지수

- 공통적으로 스발바르제도 피오르드 내측 정점에서 현저히 낮은 현존량을 보이는 것으로 분석되었음. 전 정점간 은편모조류 *Cryptomonas* spp.가 현존량의 평균 89.7%의 점유율을 나타내며 해역을 지배하는 공통특성을 보이는 가운데, 낮은 현존량을 나타낸 정점들간의 섬모충류 점유율이 상대적으로 높은 양상을 나타내었음 (그림 6)
- 우점도지수 산출 결과 평균 1.67, 최소 0.63 ~ 최대 2.20의 범위로 조사되었음

- 2차년도 연구 목표 -

2차년도(2020) 내용: 산성화에 따른 해조류의 수온 생물농축 실내실험

○ 산성화 구배에 따른 수온생물농축 실내 실험을 위한 메조코즘 시스템 구축

1. 산성화 실험 시스템 구성요소와 구조

- 대조군 (현재 CO₂ 농도 400~450ppm & pH 8.0)과 실험군(2100년도 CO₂ 농도 850~900ppm & pH7.5)으로 나누어 시스템을 구성하였음(그림 5)
- 농축된 이산화탄소(100%) 소량을 해수에 주입하여 850~900ppm(2100년 예상농도; IPCC

- Report) 농도를 설정한 후, 이산화탄소 증가에 따라 pH7.5의 산성화 조건으로 시스템을 구축
- 대상식물군은 국내에 가장 흔하게 서식하는 해조류 종인 구멍갈파래(*Ulva pertusa* L.)를 이용하였음. 구멍갈파래는 국내에 가장 다양한 환경에 서식하고 있으며, 특히 오염물질 유입이 높은 연안 환경에 우점하는 특징을 갖고 있음
 - 일주일간 대조군과 실험군에 구멍갈파래를 넣어 이산화탄소가 구배된 조건에서 적응 시킨 후, 1ppm 농도의 염화수은(Hg_2Cl)을 시스템에 가하여, 구멍갈파래의 성장 속도 및 체내 흡수된 생물 농축 수은의 농도를 측정함
 - 잠재적인 수은에 대한 오염을 방지하기 위하여 모든 시스템은 가능한 유리로 제작하여 시스템을 구축하였음

표1. 산성화 실내 실험 조건 구성표

수은 농도 CO ₂ 농도	현재 조건	산성화 조건
현재 조건	350~450ppm & No addition of Hg	850~900ppm & No addition of Hg
수은 오염조건	350~450ppm & Hg addition	850~900ppm & Hg Addition



그림 5. 산성화 실험 실내 실험 시스템(좌)과 CO₂ 농도 검측기 및 농축 CO₂ 조절 유량계(우)

2. 산성화 실험 시스템에 대한 사전 실험 결과

- 서해 군산 비응항에 위치한 콘트리트 구조물에서 저조시기에 채집을 한 구멍갈파래를 실험실로 옮겨와 현장 조건과 유사한 환경에서 1차 배양을 시도하였음
- 실험에 사용될 수은 농도의 탐색을 위하여 7개의 염화수은 농도를 설정하여(3, 6, 12, 25, 50, 100, 200 μ M) 구멍갈파래의 반응 실험을 진행하였음
- 7개의 농도 구배를 가진 해수에 구멍갈파래를 3일간 노출시켰으며, 노출 후 3일간 엽록소 형광분 석장비(PAM)를 이용하여 최대 양자수율 측정하였음

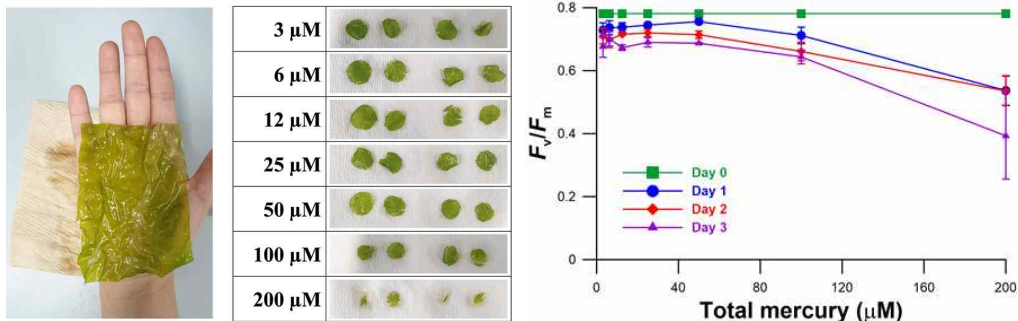


그림 6. 3일간 수은 노출실험 후 농도에 따른 구멍갈파래의 형태적 특성(좌) 및 수은 농도별 최대양자수율(F_v/F_m)의 변화(우)

- 7개의 농도에 대한 수은 노출 후 3일 이후에는 고농도에 대한 수은 환경에서 광합성률이 감소하는 것을 확인할 수 있었음(그림 6)
- 광합성률의 감소에도 불구하고, 최대 양자수율의 결과를 바탕으로 고농도인 200 μM 의 조건에서도 광합성 능력이 남아있는 것을 확인할 수 있었으며, 외관상 엽체의 대부분이 색소를 잃어 탈색이 된 것이 관찰되었음 (그림 2). 즉 탈색이 되어 유실된 부분을 제외하고 남아 있는 엽체에서 광합성률을 유지되는 것으로 예상됨
- 엽체의 탈색 후 유실된 부분은 수은 농도가 높아질수록 강도가 높아지는 것을 알 수 있었으며, 실험 초기에 비해 시간이 지날수록 점차적으로 최대 양자수율의 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었음(그림 6)

○ 메조코즘 실험을 이용한 산성화 조건에 따른 구멍갈파래의 수은 농축 경향성 분석

1. 수은 및 산성화 조건에서의 구멍갈파래의 수은농축 실험 조건

- 본 실험에서는 현장에서의 현실적인 수은농도를 고려하여 문헌을 바탕으로 100ppb(50nM)의 수은 농도를 첨가하여 실험을 진행하였음
- 산성화조건은 사전실험과 동일한 조건인 350~400ppm CO_2 (pH8.02)와 산성화 조건인 850~900ppm(pH.7.78)에 실험을 진행하였으며, 초기 성장을 고려하여 영양염을 첨가하였음
- 산성화와 대조군 환경에서 구멍갈파래가 적응 할 수 있도록 실험 시작전 3일 동안 사전 배양을 진행하였으며, 3일 후 수은을 첨가하여 4일 동안 실험을 진행하였음
- 배양실험 종료와 해수 채수하여 총수은과 영양염 농도를 측정하였으며, 구멍갈파래 역시 동결 건조 후 총수은 농도를 측정하였음

2. 수은 및 산성화 조건에서의 구멍갈파래의 수은농축 실험 결과

- 수은 첨가로 인하여 산성화 조건과 상관없이 모든 결과에서 구멍갈파래가 흡수한 수은의 농도를 급격하게 증가시켰음(그림 7)
- 산성화 조건에서의 구멍갈파래의 수은농축 농도가 더 높았으나, 통계적으로 수은만 넣은 실험군과는 차이가 나타나지 않았으며, 사전 실험의 고농도 수은 첨가때와는 달리 환경 농도 조건에서의 수은을 첨가하였을 시 구멍갈파래의 외관상의 조직 파괴는 관찰되지 않았음

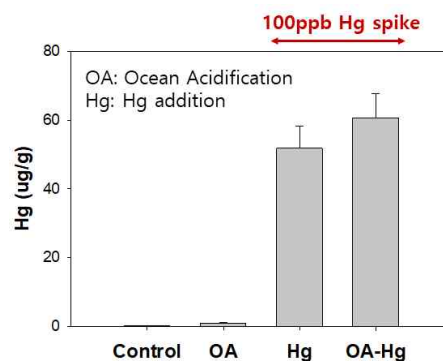


그림 7. 산성화 조건에서 구멍 갈파래가 흡수하는 수은의 농축 경향성 실험 결과

- 성장을 위해 첨가된 영양염은 실험이 종료하였을 때 구멍갈파래의 소비에 의해 물에서 측정된 농도가 0에 가까운 값을 보였음
- 따라서, 실험군내 구멍갈파래는 성장과 함께 영양염을 소비하였으며, 영양염 소비와 함께 물에 첨가된 수은을 상당부분 흡수한 것으로 판단되며, 산성화에 따른 수은 흡수에 관한 큰 차이는 나타나지 않았음. 본 실험은 한 종에 대하여 수은 농도를 한가지로 놓고 실험한 것이기 때문에 향후 사전실험과 같이 다양한 농도의 수은을 처리하여 추가적인 실험을 진행해야 할 것으로 판단됨

3차년도(2021) 내용: 서남극해의 위도에 따른 동식물 플랑크톤의 생물농축 경향성 파악

○ 서남극해의 위도에 따른 수은 생물농축 경향 파악을 위한 화학자료 분석

- 40개 지역 표층 수온의 변화는 0~30℃ 중간 값 2.5℃로 광범위한 온도 분포 조건을 보여주었으며, 적도 인근에서 높은 온도를 보였고, 남극해로 갈수록 수온은 0℃까지 떨어지는 경향을 보였음
- pH 범위는 5.67~10.24 값을 보였으며, 중간값 8.3 연안과 남극해 일부 지역을 제외하고 대부분 대양의 값인 pH 8.0 범위의 값을 보여주었음 (그림 8)

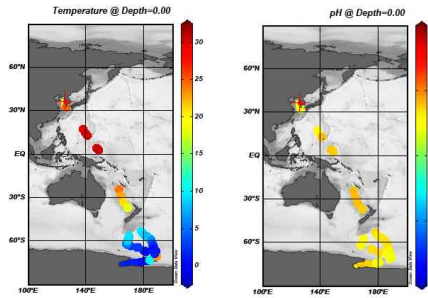


그림 8. 서해적도남극해의 온도(좌) 및 pH(우) 분포

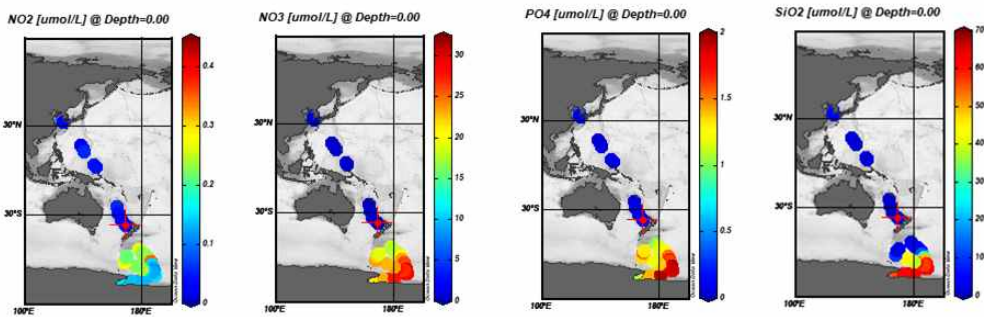


그림 9. 서해적도남극해의 영양염류(아질산염, 질산염, 인산염, 규산염) 농도 분포

- 모든 영양염류의 분포 결과는 서해·적도 보다 남극해의 농도가 높게 나타났으며, 이는 기존 연구 결과와 일치하는 경향임(그림 9)
- 남극해의 질산염 고농도로 인하여 남극해의 경우 인 limitation 경향이 관찰되었음

○ 서남극해 위도에 따른 동식물 플랑크톤의 수은 생물농축 경향성 분석

- 사전 연구 결과 서남극해의 광범위한 온도 변이, 영양염 구배에 따라 환경의 차이가 생물에 농축되는 수은의 양에 영향을 미칠 것으로 예상하였음
- 식물플랑크톤의 경우 평균적으로 241±21 ng/g(range 90-540 ng/g) 으로 북극보다는 높은 값을 기록하였으며, 특히 남극의 로스 해역과 적도 인근의 해역에서 높은 농도를 기록하였음
- 남극의 로스 해역에서 높은 수은 축적량을 보인 이유는 이 지역에 영양염의 농도가 높고 이로 인해 다른 해역과 달리 1차 생산력이 견인되어 식물의 성장을 촉진시킴으로써, 이로 인한 수은의 농축 경향이 역시 높아진 것으로 해석할 수 있으나, 좀 더 명확한 결과를 알아보기 위해서는 추가적인 조사와 연구가 필요할 것으로 판단됨
- 동물 플랑크톤 경우 예외적으로 높은 2사이트를 제외하고, 평균값은 134±11 ng/g(range 54-350ng/g)으로 나타났으며, 북극 피오르드 지역과 비교하였을 때 약 10배 정도 높은 값을 보여주었음. 동물 플랑크톤의 경우 식물플랑크톤과는 달리 위도별 경향성이 나타나지는 않았음

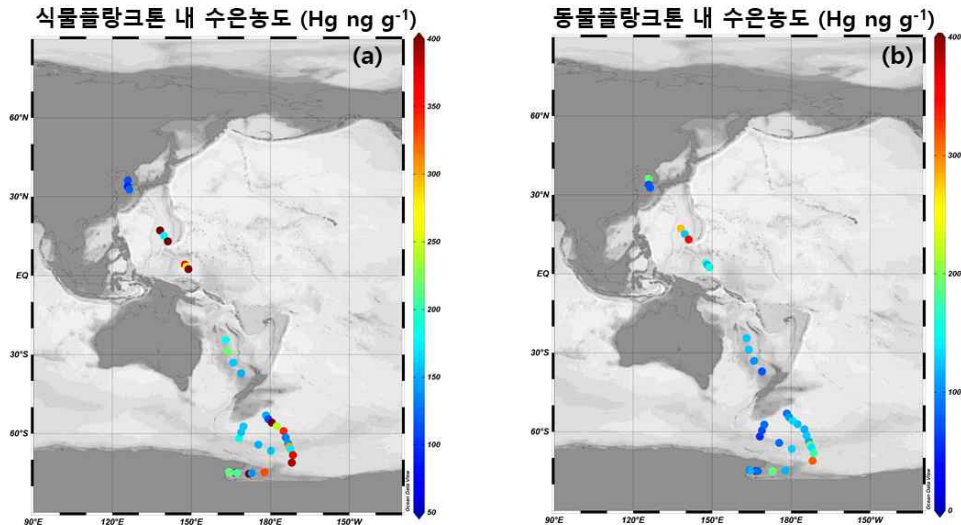


그림 10. 서해적도남극해의 식물(a) 및 동물(b) 플랑크톤 내 축적되어 있는 총수은의 농도

○ 서남극해 위도에 따른 식물플랑크톤 종조성 분석

- 식물플랑크톤의 경우 총 183개 종이 출현하였으며, 가장 우점종으로 나타난 종은 Silicoflagellate(1,542,928 cell L-1)와 Blue-Green Algae(763,651 cell L-1), Dinoflagellates(753,467 cell L-1) 순으로 나타났음 (그림 11)
- 남극 주변 해역의 시료에는 규조류(centric and pennate diatoms) 및 소형 무각 와편모조류(naked dinoflagellates) 등이 매우 다양하게 출현하고 있었으며, 해역에 따라서는 섬모충 등 micro-zooplankton인 원생동물이 매우 높은 세포밀도로 출현하고 있었음

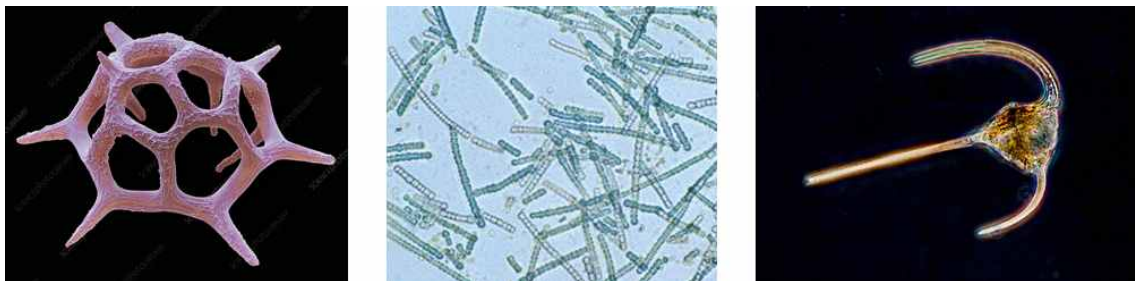


그림 11. 우점종으로 출현한 Silicoflagellate(좌) Blue-Green Algae(중) Dinoflagellates(우)

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 수준

1) 정성적 연구개발성과(연구개발결과)

연차	정성적 성과
1차년도	<p>[북극 산성화와 생물농축 수은간의 상관관계 분석완료]</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기후 온난화로 인하여 해빙이 강화된 피오르드에서 퇴적물 내 수은 농도가 다른 피오르드에 비해 높은 값을 가지고 있음을 관찰되었으며, 이에 따라 동물플랑크톤 역시 체내 수은 농도가 높게 나타나고 있음을 관찰하였음. 그러나 산성화 경향과 플랑크톤 내 수은 농도간의 유의미한 상관관계가 나타나지 않은 것으로 보아, 산성화 영향 보다는 온난화로 인한 해빙과 육상 기원의 유기물이 피오르드 환경(퇴적물과 동물플랑크톤)의 수은 농도를 증가시키는 것으로 판단될 수 있음 <p>[북극 스발바르 피오르드 지역의 식물플랑크톤 종조성 분석 완료]</p> <ul style="list-style-type: none"> - 이전의 보고된 결과와는 달리 스발바르 피오르드 내 은편모조류가 대부분의 종조성과 균

연차	정성적 성과
	집을 차지하고 있었으며, 이는 해빙 강화로 인한 유기물의 유입에 따라 Mixotrophic mechanisms를 가지고 있는 은편모조류가 생존하기에 유리하였을 것으로 판단됨. 따라서 온난화 강화로 인한 피오르드 내 유기물 유입의 증가는 환경 내 수은농도 증가 뿐만 아니라 식물플랑크톤의 종조성 변동에도 영향을 미쳤을 것으로 판단됨
2차년도	[실내 실험을 통한 산성화의 수은생물농축 영향 분석완료] - 실내 실험을 통해 산성화 조건에서의 구멍갈파래의 수은 흡수율을 측정한 결과, 환경 배경 정도의 수은 농도에서는 산성화에 따른 구멍갈파래의 수은 흡수율이 영향을 받지 않았음. 그러나 높은 수은 농도에서 장기간 노출된 구멍갈파래는 형태적인 조직 소실과 광합성량 감소가 관찰되었음
3차년도	[서남극해 위도에 따른 동식물플랑크톤의 생물농축 수은경향성 파악 완료] - 서남극해 위도에 따라 식물플랑크톤의 수은 농도는 남극해 로스해에서 높은 농도를 보였으나, 동물플랑크톤의 경우는 이러한 경향이 나타나지 않았음. 주목할 점은 북극해 보다 남극해의 생체내 축적된 수은의 농도가 상당히 높게 나타났으며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단됨

2) 세부 정량적 연구개발성과: [붙임1] 참조

번호	구분 (논문)	논문명/발표명	소속기관명	역할	논문게재지/특허등록국가	논문게재일/특허등록일	특기사항 (I.F. 등)
1	논문	Input of terrestrial organic matter linked to deglaciation increased mercury transport to the Svalbard fjords	국립해양생물자원관	제1저자	Scientific Report	2020.02.01	IF 4.38
2	논문	Mercury proxy for hydrothermal and submarine volcanic activities in the sediment cores of Central Indian Ridge	국립해양생물자원관	교신저자	Marine Pollution Bulletin	2020.10.01	IF 5.553
3	논문	Extracellular enzyme activities in the solar saltern sediments	국립해양생물자원관	교신/제1저자	Korean Journal of Microbiology	2020.06.30	-

3) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 현장 탐사를 통해 산성화가 진행되고 있는 피오르드 연안의 생물농축 수은 경향성 파악	○ 북극 피오르드 탐사를 통해 해수 및 동식물 시료를 확보하여 수은 분석 및 산성화 경향 분석을 완료하였으며, 이를 통해 산성화 보다는 온난화에 따른 해빙의 강화, 이로 인한 유기물 유입 증가가 퇴적물 및 동물플랑크톤 내 수은 농도를 증가시킨 것으로 판단됨	100%
○ 산성화 실내 실험을 통한 해조류 내 생물농축 총 수은량 경향성 규명	○ 구멍갈파래를 대상으로 실험을 진행한 결과 산성화에 따라 수은 생물농축이 영향을 받지 않았으나, 장기간의 고농도 수은 노출은 구멍갈파래의 형태적 조직에 영향을 주는 것으로 관찰되었음	100%

○ 위도에 따른 (서해·적도·남극 지역) 수은 생물농축 경향 파악	○ 서남극해 위도에 따른 동식물 플랑크톤내 수은 농도 분석을 완료하였으며, 남극해의 높은 생산력으로 인해 동식물 플랑크톤의 수은 농도가 높게 나타나는 것을 관측하였음	100%
--------------------------------------	--	------

4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도(연구개발결과의 중요성)

○ 북극 연안 산성화 현황 및 영향에 대한 이해 증진

- 본 연구결과를 통해 온난화로 인하여 해빙이 육상 유기물을 연안으로 내보냄으로써, 이로 인해 연안의 염분농도와 알칼리니티가 감소하는 것이 관측되었으며, 향후 이 지역에 산성화 경향이 뚜렷해질 것으로 판단됨. 따라서 북극 연안 산성화로 인하여 물질 순환 변동 및 패각류의 생물들이 어떠한 영향을 받을 수 있는지에 대한 연구에 있어 본 연구 결과가 기여를 할 것으로 판단됨

○ 서남극해 위도별 동식물 플랑크톤의 수은 농도 데이터 제시

- 육상 생태계에서는 위도별로 먹이단계에 따라 농축되는 수은경향을 파악하는 연구가 활발하게 진행되나, 해양에서는 이에 대한 접근이 부족한 실정. 따라서 인천에서부터 시작하여 로스해를 잇는 서남극해의 동식물 플랑크톤 내 수은 농도 분석을 향후 위도에 따른 먹이망의 변화, 환경 조건의 변화가 생물농축의 수은 변화에 어떠한 영향을 주는지에 대한 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대됨

5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

○ 북극 생물의 수은농축 메카니즘 규명에 대한 연구에 활용

- 본 연구 결과 북극의 연안 산성화 보다는 온난화로 인한 해빙의 강화 및 유기물 유입의 증가가 퇴적물과 동물플랑크톤의 수은 농도를 증가시킨 것으로 판단되는 바, 향후 북극에서 나타나는 높은 농도의 생물 농축 수은에 대한 메카니즘 연구에 본 연구 결과가 활용될 것으로 판단됨

○ 산성화 메조코즘 실험 시스템의 활용

- 본 과제를 통해 구축한 산성화 메조코즘 시스템을 활용하여 향후 수은의 생물농축 실험 뿐만 아니라 다양항 생지화학적 순환에 관한 연구에 활용될 것으로 판단됨

6. 참고문헌

Wallace, R.B., Baumann, H., Grear, J., Aller, R.C., Gobler, C.J. 2014. Coastal ocean acidification: The other eutrophication problem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 148:1-13

Lindqvist, O. and Rodhe, H. 1985. Atmospheric mercury—a review. 1985. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 37:136-156

Steffen, A., Douglas, T., Amyot, M., Ariya, P., Aspmo, K., Berg, T., Bottenheim, J., Brooks, S., Cobbett, F., Dastoor, A., Dommergue, A., Ebinghaus, R., Ferrari, C., Gardfeldt, K., Goodsite, M.E., Lean, D., Poulain, A.J., Scherz, C., Skov, H., Sommar, J., Temme, C. 2008. A synthesis of atmospheric mercury depletion event chemistry in the atmosphere and snow. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 8:1445-1482.

Gilmour, C.C., Henry, E.A. 1991. Mercury methylation in aquatic systems affected by acid deposition. *Environmental Pollution*. 71:131-169.

- Steffen, R.K., Korthals, E.T., Winfrey, M.R. 1988. Effects of acidification on mercury methylation, demethylation, and volatilization in sediments from an acid-susceptible lake. *Applied Environmental Microbiology*. 54:2003–2009.
- Ward, D.M., Nislow, K.H., Folt, C.L. 2010. Bioaccumulation syndrome: Identifying factors that make some stream food webs prone to elevated mercury bioaccumulation. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1195: 62–83.
- Paranjape, A.R., Hall, B.D. 2017. Recent advances in the study of mercury methylation in aquatic systems. *FACETS*. 2:85–119.
- AMAP. 2018. AMAP Assessment 2018: Arctic Ocean Acidification, Arctic Monitoring and Assessment Programme, Tromsø, Norway. vi 187pp
- Schuster, P.F., Schaefer, K.M., Aiken, G.R., Antweiler, R.C., Dewild, J.F., Gryziec, J.D., Gusmeroli, A., Hugelius, G., Jafarov, E., Krabbenhoft, D.P., Liu, L., Herman–Mercer, N., Mu, C., Roth, D.A., Schaefer, T., Striegl, R.G., Wickland, K.P., Zhang, T. 2018. Permafrost Stores a Globally Significant Amount of Mercury *Geophysical Research Letter*. 45:1463–1471
- Mostofa, K.M., Liu, C.Q., Zhai, W.D., Minella, M., Vione, D., Gao, K., Minakata, D., Arakaki, T., Yoshioka, T., Hayakawa, K., Konohira, E., Tanoue, E., Akhand, A., Chanda, A., Wang, B., Sakugawa, H. 2016. Review and Syntheses: Ocean acidification and its potential impacts on marine ecosystems. *Biogeosciences*. 13:1767–1786.
- Macdonald, R.W., T. Harner, J. Fyfe, H. Loeng and T. Weingartner. 2003. AMAP Assessment 2002: The Influence of Global Change on Contaminant Pathways to, within, and from the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xii+65 pp.
- Kirk, J.L., Lehnher, I., Andersson, M., Braune, B.M., Chan, L., Dastoor, A.P., Durnford, D., Gleason, A. L., Loseto, L.L., Steffen, A., St.Louis, V.L. 2012. Mercury in Arctic marine ecosystems: Sources, pathways, and exposure. *Environmental Research*. 119:64–87.

[붙임1] 세부 정량적 연구개발성과

과학기술/학술적 연구성과(단위 :7건)													
전문학술지 논문게재				초청 강연 실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상 실적	출판실적	
국내논문		국외논문			국내	국제	출원		등록			저역서	보고서
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국외	국내	국외			
			3		3	1							

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제 번호	게재 연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci 여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2019R1 F1A105 9106	2020. 02	Input of terrestrial organic matter linked to deglaciation increased mercury transport to the Svalbard fjords	Kim, Haryun; Kwon, Sae Yun; Lee, Kitack; Lim, Dhongil; Han, Seunghee; Kim, Tae-Wook; Joo, Young Ji; Lim, Jaesoo; Kang, Moo-Hee; Nam, Seung-II;	SCI	SCIENTIFIC REPORTS	10(0)	국외	SCI 등재	3.998	아니오	50
2019R1 F1A105 9106	2020. 06	Extracellular enzyme activities in the solar saltern sediments	Dawoon Chung Haryun Kim Hyo-Seon Park Hye Seon Kim Dongwoo Yang and Jong Gwan Kim	SCI	Korean Journal of Microbiology	56(2)	국외	SCI 등재	0.168	아니오	10
2019R1 F1A105 9106	2020. 10	Mercury proxy for hydrothermal and submarine volcanic activities in the sediment cores of Central Indian Ridge	Lim, Dhongil; Kim, Haryun; Kim, Jihun; Jeong, Dohyun; Kim, Dongsung;	SCI	MARINE POLLUTION BULLETIN	159(0)	국외	SCI 등재	4.049	예	50

학술대회 논문발표 성과정보							
과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2019R1F1A105 9106	2019.10	2019년 추계 한국해양학회	김하련, 정다운, 박효선, 김혜선, 양동우, 김종관	Extracellular enzyme activities in the solar saltern sediments	국내학술대회	대한민국	
2019R1F1A105 9106	2020.10	한국해양학회	김하련, 김태욱, 한승희, 김혜선	Atmospheric nitrogen and mercury depositions of the Gum River estuary	국내학술대회	대한민국	
2019R1F1A105 9106	2020.10	한국해양학회	배성준, 김하련, 남승일, 김혜선	Phytoplankton compositions of Svlbard fjords in the European Arctic Ocean	국내학술대회	대한민국	
2019R1F1A105 9106	2021.08	35th Congress of the International Society of Limnology	Haryun Kim	Atmospheric nitrogen and mercury depositions in the coastal areas of the Yellow Sea in the Northwestern Pacific Ocean	국제학술대회	대한민국	○

언론보도성과			
과제번호	2019R1F1A1059106		
보도게재일자	2020.03.18	보도및게재처	헬로우 디디, 의학신문, 세종 충청뉴스
기사제목	국립해양생물자원관 외, 지구온난화로 인한 북극 피오르드의 수은 증가현상 밝혀		
관련연구업적	북극 스발바르 지역의 퇴적물 내 수은 농도 경향성 파악		
과제번호	2019R1F1A1059106		
보도게재일자	2020.06.01	보도및게재처	극지와 사람
기사제목	북극 스발바르군도 피오르드 표층퇴적물에 분포하는 수은이 전해주는 지구온난화 이야기		
관련연구업적	북극 스발바르 수은 오염		

[붙임2-1] 연구책임자 대표적 연구실적

○ 논문 및 특허 실적(최대 5개 작성)

번호	구분 (논문/특허)	논문명/특허명	소속기관명	역할	논문게재지/ 특허등록국가	논문게재일 /특허등록일	특기사항 (I.F. 등)
1	논문	Input of terrestrial organic matter linked to deglaciation increased mercury transport to the Svalbard fjords	국립해양생물자원관	제1저자	Scientific Report	2020.02.01	IF 3.998
2	논문	Mercury proxy for hydrothermal and submarine volcanic activities in the sediment cores of Central Indian Ridge	국립해양생물자원관	교신저자	Marine Pollution Bulletin	2020.10.01	IF 4.049
3	논문	Extracellular enzyme activities in the solar saltern sediments	국립해양생물자원관	교신/제1저자	Korean Journal of Microbiology	2020.06.30	-

○ 기타 실적(논문 및 특허 외 기타 실적 입력)

(1) 학술대회 발표 및 심사 中 논문

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국
2019R1F1A1059106	2020.10	한국해양학회	배성준, 김하련, 남승일, 김혜선	Phytoplankton compositions of Svalbard fjords in the European Arctic Ocean	국내학술대회	대한민국
발표 논문 초록						
<p>In the Svalbard fjords of the European Arctic, the glacier melting and massive spring bloom caused by global warming have significantly altered environmental conditions. These phenomena included reduced salinity, stratification of the water column, increased turbidity, nutrient limitation, reduced light penetration, and release of organic matter, which could lead to the change in the structure and composition of the primary producer such as phytoplankton. Our study conducted in Isfjorden, van Mijenfjorden/Bellsund, and Hornsund of Svalbard in early August 2019 observed the dominance of cryptophytes in the phytoplankton composition after spring bloom. Our results show a different trend from the previous diatoms/dinoflagellates dominance in the late 1970s and early 2020s. The change in phytoplankton composition can be explained by (1) the nutrient limitation after spring bloom and the water column stratification caused by glacier melting, (2) the ability of cryptophytes to live in a wide range of the salinity, and (3) the mixotrophic metabolism of cryptophytes made it advantages to survive. Therefore, the dynamic environmental conditions after enhanced spring bloom and glacier melting will further alter the phytoplankton compositions in the European Arctic fjord ecosystems.</p>						
기타사항						
본 논문은 현재 Estuaries, Coastal and Shelf Science에 제출되어 심사 중에 있음						

[붙임2-2] 주관연구책임자 대표적 논문·특허실적 요약문

연구실적 유형		논문(○) 특허()		
연구책임자 성명		김하련		
논문/특허명		Input of terrestrial organic matter linked to deglaciation increased mercury transport to the Svalbard fjords		
논문실적정보 <input type="checkbox"/>	게재지(저널명)	Scientific Report		
	SCI 등재 여부	등재	Impact Factor 및 인용횟수(SCI)	4.38(6)
	SCOPUS 등재 여부	-	인용횟수(SCOPUS)	-
	ISSN	2045-2322	게재년월	2020.02
	역할(제1, 교신, 참여)	제1저자	참여자수	10명

요약문

2002년 북극 모니터링 보고서(Arctic Monitoring and Assessment Programme; AMAP)에 따르면 수은은 대기를 통해 북극까지 이동할 수 있을 뿐만 아니라, 해류를 통해 아시아와 북미, 그린란드, 노르웨이 등 북극 지역까지 이동할 수 있다는 연구가 보고된 바 있다. 최근에는 미국 지질조사국(USGS) 연구가들에 의해 북극 동토 층에 쌓여 있던 수은들이 해빙 과정과 함께 토양에 축적되어 있던 수은이 연안의 바다로 유출되고 있다는 사실이 밝혀졌다. 따라서 본 연구는 2015년부터 2017년까지 북극 스발바르 3개의 피오르드(협만(峽灣)); 빙하활동에 의해 형성된 좁고 깊은 만을 위미)에서 해저 퇴적물 시료를 채취하여 수은과 탄소 및 황 동위원소 기법을 이용하여 수은 농도 분포화 유기물 기원에 관한 연구를 진행하였다. 연구 결과, 100년 동안 조수 빙하후퇴가 가장 빠르게 나타나는 스발바르 군도 최남단 호르준드 피오르드에서 퇴적물 내 수은 농도가 가장 높게 나타났다. 특히 수은 농도뿐만 아니라 비소, 구리, 니켈, 아연, 크롬과 같은 중금속 농도 역시 빙하후퇴 속도가 가장 높은 호르준드 피오르드 해저 퇴적물에서 높게 나타나고 있음을 확인하였다. 또한, 유기물의 탄소와 황 동위원소비 분석을 통해 호르준드 퇴적물 내 유기물이 육상성 기원을 가지고 있는 동위원소비의 End-member 값과 일치하는 것을 규명하였으며, 따라서 이들 유기물 기원이 육상성에서 기원하였음을 알 수 있었다. 이는 지구 온난화로 인하여 용빙의 과정에서 얼어있던 육상 토양과 과거 빙하에 갇혀 있던 유기물들이 피오르드 해수로 흘러 들어가면서, 이들 유기물과 수은 및 중금속들이 결합하여 피오르드 연안 해저 퇴적물에 수은이 쌓이고 있다는 사실을 밝혀낸 것이다. 본 결과는 동토층 생태계 뿐만 아니라, 피오르드의 북극 해양생태계 역시 지구 온난화로 인한 수은 방출의 영향에 취약하다라는 것을 보여주었다. 따라서 향후 피오르드 연안에 배출된 수은이 생물의 먹이 사슬을 통해 최상위 포식자에게 흡수되어 영향을 줄 수 있을 것으로 예견하였다.

본 연구 결과는 공동사서로써, 연구재단과제(2019R1F1A1059106, 2015M1A5A1037243) 와 부분적으로 국립해양생물자원관의 기관고유사업(2020M00300), 중견과제(2018R1A2A1A19019281), GRL(2013K1A1A2A02078278) 및 극지산학연 지원 과제(PD16010)의 도움을 받아 작성되었음.

연구 목표 및 연구내용과의 연관성	기대성과 및 파급 효과
북극 스발바르 지역에 수은 농도가 높은 지역에 대한 환경 정보를 제공하며, 퇴적물에서 높은 수은 농도는 동식물플랑크톤의 생물농축 수은의 농도 증가를 야기할 수 있음	북극 퇴적환경의 높은 수은 농도가 온난화에 따른 해빙의 가속화와 관련이 있음을 보여줌으로써, 향후 기후변화에 따른 생물농축 수은의 메커니즘 규명 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대됨

OPEN **Input of terrestrial organic matter linked to deglaciation increased mercury transport to the Svalbard fjords**

Haryun Kim¹, Sae Yun Kwon², Kitack Lee², Dhongil Lim³, Seunghee Han⁴, Tae-Wook Kim⁵, Young Ji Joo⁶, Jaesoo Lim⁷, Moo-Hee Kang⁸ & Seung-Il Nam^{6*}

Deglaciation has accelerated the transport of minerals as well as modern and ancient organic matter from land to fjord sediments in Spitsbergen, Svalbard, in the European Arctic Ocean. Consequently, such sediments may contain significant levels of total mercury (THg) bound to terrestrial organic matter. The present study compared THg contents in surface sediments from three fjord settings in Spitsbergen: Hornsund in the southern Spitsbergen, which has high annual volume of loss glacier and receives sediment from multiple tidewater glaciers, Dicksonfjorden in the central Spitsbergen, which receives sediment from glacialfluvial rivers, and Wijdefjorden in the northern Spitsbergen, which receive sediments from a mixture of tidewater glaciers and glacialfluvial rivers. Our results showed that the THg ($52 \pm 15 \text{ ng g}^{-1}$) bound to organic matter (OM) was the highest in the Hornsund surface sediments, where the glacier loss ($0.44 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) and organic carbon accumulation rates ($9.3 - 49.4 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) were elevated compared to other fjords. Furthermore, the $\delta^{13}\text{C}$ ($-27 - -24\%$) and $\delta^{34}\text{S}$ values ($-10 - 15\%$) of OM indicated that most of OM were originated from terrestrial sources. Thus, the temperature-driven glacial melting could release more OM originating from the meltwater or terrestrial materials, which are available for THg binding in the European Arctic fjord ecosystems.

Increasing temporal trends of total mercury (THg) concentration in the sediments of the Arctic continental shelves and lakes have recently been reported^{1,2}. These increasing levels have been proposed to be caused by the long-distance transport of anthropogenic mercury (Hg) from industrialized countries to the Arctic, given its long atmospheric lifetime of 0.3 to 2 years^{3,4}. In addition, it has been shown that 'Atmospheric Mercury Depletion Events' (AMDE) in the spring can lead to high Hg deposition in the Arctic Ocean. Reactive Hg (Hg^{2+}) is rapidly formed through *in situ* oxidation of gaseous Hg⁰ by halogens (i.e., atomic Br and radical BrO), which are generated by solar irradiation through O₃ destruction^{5,7}. However, previous measurements of atmospheric Hg deposition in the Arctic regions have revealed relatively low deposition rates of $< 5 \mu\text{g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ⁸. Recent studies have suggested that natural processes governing Hg release via riverine transport⁹, soil runoff, and/or discharge of water coming from thawing permafrost¹⁰ could be important sources of Hg to the Arctic environments.

Fjords on Svalbard, the main island of the Svalbard archipelago, is among the most studied fjord systems in the world¹¹. Previous studies have focused on the effects of local and/or long-range transport, oceanic currents, and long-term sediment deposition rates (i.e., geological and chemical processes that control Hg distribution in surface and core sediments)¹²⁻¹⁷ on spatial distribution and the extent of accumulation of Hg in the fjord sediment. Recent studies have shown that fjords are effective sequesters of organic carbon among other marine

¹Fundamental Research Division, National Marine Biodiversity Institute of Korea, 33662, Janghang, South Korea.

²Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, 37673, Pohang, South Korea. ³South Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 53201, Geoje, South Korea. ⁴School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), 61005, Gwangju, South Korea. ⁵Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, 02841, Seoul, South Korea. ⁶Division of Polar Paleoenvironment, Korea Polar Research Institute, 21990, Incheon, South Korea. ⁷Geological Research Division, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, 34132, Daejeon, South Korea. ⁸Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 34132, Daejeon, South Korea. *email: sinam@kopri.re.kr

Acknowledgements

This work is primarily supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grants (2015M1A5A1037243, PN20090 and 2019R1F1A1059106) funded by the Ministry of Science and ICT (MOIT) of Korean Government. Partial supports were provided by the National Marine Biodiversity Institute of Korea Research Program (No. 2020M00300), by Mid-Career Researcher Program (No. 2018R1A2A1A19019281), by Global Research Laboratory Program (No. 2013K1A1A2A02078278) of the NRF, by Polar Academic Program (No. PD16010). Finally, we kindly acknowledge Dr. Witold Szczuciński and Dr. Matthias Forwick for providing samples and sincere comments and the help of the captains and crews of R.V. Helmer Hanssen, as well as the scientific parties on board.

[붙임3] 연구개발성과 활용계획서

연구개발성과 활용계획서

1. 연구성과 및 활용 현황

가. 과학기술/학술적 연구성과

(단위: 건)

전문학술지 논문게재				초청 강연 실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상 실적	출판실적	
국내논문		국외논문			국내	국제	출원		등록			저역서	보고서
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국외	국내	국외			
		3			3	1							

나. 전문학술지 논문게재 성과 정보

과제 번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	SCI 여부	IF	국제공동연구 논문여부	기여도
2019R1 F1A105 9106	2020.02	Input of terrestrial organic matter linked to deglaciation increased mercury transport to the Svalbard fjords	Kim, Haryun; Kwon, Sae Yun; Lee, Kitack; Lim, Dhongil; Han, Seunghee; Kim, Tae-Wook ; Joo, Young Ji; Lim, Jaesoo; Kang, Moo-Hee; Nam, Seung-II;	SCI	SCIENTIFIC REPORTS	10(0)	국외	SCI등재	3.998	아니오	50
2019R1 F1A105 9106	2020.06	Extracellular enzyme activities in the solar saltern sediments	Dawoon Chung Haryun Kim Hyo-Seon Park Hye Seon Kim Dongwoo Yang and Jong Gwan Kim	SCI	Korean Journal of Microbiology	56(2)	국외	SCI등재	0.168	아니오	10
2019R1 F1A105 9106	2020.10	Mercury proxy for hydrothermal and submarine	Lim, Dhongil; Kim,	SCI	MARINE POLLUTION BULLETIN	159(0)	국외	SCI등재	4.049	예	50

		volcanic activities in the sediment cores of Central Indian Ridge	Haryun; Kim, Jihun; Jeong, Dohyun; Kim, Dongsung;								
--	--	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--

다. 지식재산권 성과 정보

과제 번호	출원등록 연월	재산권 구분	출원등록 구분	발명제목	출원 등록인	출원 등록국	발명자명	출원등록번호	활용형태	기여도

라. 산업지원 및 연구성과 활용

(단위: 건)

기술확산			연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)		
기술실시계약체결	기술지도	기술평가	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료

마. 국내외 기술료 징수 현황 (기업화 완료 또는 기술실시계약 체결 시 기재)

징 수 조 건	
징 수 현 황	백만 원(전년도말 현재)

바. 기업화 성과 (기업화 완료 또는 추진 중인 경우 반드시 기재)

업 체 명		기업화 완료[] 기업화 예정[]	년 월 일
제 품 명		제 품 용 도	
기업화이용유형 중 택일	신제품개발[], 기존제품 개선[], 신공정개발[], 기존공정개선[], 기타[]		

사. 경제적 파급 효과 (지난 1년간 실적)

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원수)	그 밖의 효과

아. 향후 경제적 기대 효과

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원수)	그 밖의 효과

2. 연구개발성과 활용 계획 (해당항목에 “○” 표시)

기술이전	기업화	후속연구 추진	타 사업 활용	그 밖의 목적 활용	연구결과 활용중단
			○		

가. 당해연도 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

- 한국해양과학기술원에서 수행하고 있는 「기후변화에 따른 동해 연안 갯녹음 유발요인 검증 원천기술 개발」 사업에 활용하고자 함
- 본 사업은 동해연안에 서식하는 해조류 및 잘피류의 서식처가 파괴되고 이들의 생존이 위협받은 결과 동해 연안에 가속화되고 있는 갯녹음의 원인 규명을 위한 원천기술 확보를 목표로 하고 있음
- 연안에서 유입되는 수은 독성 물질이 해조류의 성장을 저해하고, 먹이 그물망을 연결하는 생태계에 영향을 줌으로써, 갯녹음 원인 인자로 작용할 수 있음. 따라서 본 연구 방법과 개념을 활용하여 연안에 유입되는 수은 오염물질에 의한 해조류의 광합성 및 성장 속도를 측정하는 연구에 활용하고자 함

나. 활용방법

- 본 과제에서 제작했던 실내 메조코즘 시스템을 활용하여 연안에서 유입되는 수은의 농도 구배를 조절하고, 동시에 빈산소 및 온도변화 조건을 구성하여, 수은 유입에 따른 해조류의 광합성량 및 성장속도 변화에 관한 연구를 수행하고자 함

다. 차년도 이후 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

- 실내 메조코즘 시스템을 야외 시설로 확대하여 중규모의 메조코즘 시스템을 구성하고, 다양한 해조류 종을 바탕으로 기후 온난화 환경 조건 속에서 해조류의 수은 흡수율 변화에 관한 연구를 수행하고자 함

3. 기대효과

- 실내 메조코즘 시스템을 활용한 기후변화에 따른 수은생물축 기작 연구에 기여할 수 있음
- 기후 온난화가 강화되고 있는 북극 생태계에서 높은 수은농도를 보이고 있는 원인 규명 연구에 대한 기초 자료 제시
- 서남극해의 광범위한 해역에서 생물 시료 내 축적하고 있는 수은의 농도값을 제시함으로써 향후 환경변화에 따른 위도별 수은 독성에 관한 연구에 기본적인 자료로 활용 될 수 있음

4. 문제점 및 건의사항

- 해당사항 없음