

해빙 분포의 시공간적 고해상도
변화기록 복원을 위한 프록시 개발

Development of proxies for
reconstruction of high resolution
records of sea ice extent



한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “해빙분포의 시공간적 고해상도 변화기록 복원을 위한 프록시 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.



2018. 2. 28

연구책임자 : 이 강 현

참여연구원 : 허 순 도
박 지 수
이 승 미
고 은 호

보고서 초록

과제관리번호	BSPE18270-006-13	해당단계 연구기간	2018.03.01 ~ 2018.12.31	단계 구분	(1단계) / (총 1단계)
연구사업명	중 사 업 명	창의연구사업			
	세부사업명	신진연구원 지원사업			
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	해빙분포의 시공간적 고해상도 변화기록 복원을 위한 프록시 개발			
연구책임자	이 강 현	해당단계 참여연구원수	총 : 5명 내부 : 2명 외부 : 3명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지해양과학연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
					40
☐ 북극해의 해빙분포는 전 지구적인 기후 변화에 중요한 역할을 담당할 뿐 아니라 최근 북극항로 개척 가능성이 제시되면서 과학 분야 뿐 아니라 경제적 사회적으로도 관심이 집중되고 있음 ☐ 현재까지 북극해 해빙변화를 야기하는 기작이 명확하게 규명되지 않은 바, 과거의 해빙변화 복원 기록을 통해 이를 통해 해빙변화 메커니즘을 규명하기 위한 다양한 연구가 시도되고 있음 ☐ 극지역에서 시추한 빙설시료에서는 Na^+, Cl^- 등의 해염 성분과 MSA, Br, I 등 해양생물 기원 물질을 대상으로 해빙변화와의 연관성을 파악하려는 연구가 수행되고 있음 ☐ 현재까지의 연구 결과를 보면, 지역에 따라 빙설시료의 해양프록시 변화와 해빙분포변화 사이에 편차가 있는 것으로 확인됨 ☐ 본 과제에서는 북극해를 8개 해역으로 나누어 그린란드 북서부와 북동부에서 각각 채취한 주상 눈 시료의 해양 프록시와 해역별 환경 변화 간의 연관성을 조사함 ☐ 그린란드 북서부 NEEM 주상 눈 시료의 해양 프록시 중 MSA는 척치해의 해빙 변화와, I는 그린란드 해의 해빙 변화와 밀접하게 연관이 있는 것으로 확인 됨 ☐ 그린란드 북동부 EGRIP 주상 눈 시료의 해양 프록시 중 Cl^-는 레브라도 해와 척치해, MSA는 그린란드 해, Br과 I는 각각 그린란드 해와 척치 해의 해빙 변화와 연관성을 보임					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극해 해빙, 그린란드 주상 눈 시료, 해빙 프록시, 해양 염분, 할로겐 원소			
	영 어	Arctic sea ice, Greenland snow pit, Sea ice proxy, Sea salt, Halogen			

요 약 문

I. 제 목

해빙분포의 시공간적 고해상도 변화기록 복원을 위한 프록시 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 목적

그린란드 주상 눈 시료로부터 기존의 해양 환경 프록시와 셀레늄, 할로젠 원소 등 해양 환경 변화와 연관이 있는 것으로 알려진 물질을 분석하고, 이들 원소의 계절 변화 및 연 변화를 그린란드 주변 해역의 지역별 위성 자료와 비교하여 해빙 분포의 시공간적 고해상도 변화기록을 복원할 수 있는 프록시 활용 가능성 타진

2. 필요성

- ☐ 북극해의 해빙 분포가 전 지구적 기후변화에 중요한 역할을 담당한다는 것이 밝혀지면서 기후 변화와 관련하여 북극해 해빙 분포가 중요한 변수로 대두 됨
- ☐ 극 지역의 해빙 분포를 복원하기 위한 연구가 남, 북극의 다양한 시료를 대상으로 시도되고 있으나 연구 지역에 따라 해빙 프록시 자료와 실제 해빙 변화 사이에 편차를 보임
- ☐ 최근 위성관측을 통해 극지역의 해역별로 해빙 분포가 각각 다르게 나타난다는 사실이 확인된 바, 프록시 자료를 활용한 과거 해빙분포 변화 연구도 프록시 자료가 지시하는 해역에 한정지어 해빙 분포를 복원하고 이를 통합하는 연구가 필요함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- ☐ 그린란드 NEEM 캠프와 그린란드 EGRIP 캠프의 주상 눈 시료 및 빙하코어

연구자료 확보 및 다양한 빙설 프록시 분석

- ☐ 위성자료를 이용한 북극해 해역별 해빙분포, 표층 수온, 1차 생산성 관측 자료 수집 및 정리
- ☐ 그린란드 주상 눈 시료의 해양 프록시와 북극해 해역별 해빙분포 교차 비교를 통해 각각의 주상 눈 시료 프록시 자료가 지시하는 해역 파악

IV. 연구개발결과

- ☐ 그린란드 주상 눈 시료의 Na^+ 과 Cl^- 는 주로 겨울~봄 철에 농도가 증가하는 반면, MSA는 여름~가을철에 농도가 증가하며 Br과 I는 봄~여름 철에 농도 피크가 나타남.
- ☐ 그린란드 북동부의 EGRIP 주상 눈 시료에서 프록시의 계절변화가 NEEM 주상 눈 시료에 비해 더욱 뚜렷하게 나타나며, 이는 EGRIP 캠프가 NEEM 캠프에 비해 북 아메리카 대륙으로부터 멀리 위치하고 있기 때문으로 사료됨.
- ☐ 북극해 해역별 해빙 변화를 보면, 중앙 북극해 캐나다 해역을 제외하고는 모두 과거 30년간 해빙이 감소하고 있으나 감소 추세는 해역에 따라 편차가 크게 나타남.
- ☐ 그린란드 주상 눈 시료의 해양 프록시는 원소 및 연구 지역에 따라 프록시가 지시하는 해역이 다르게 나타남.

V. 연구개발결과의 활용계획

- ☐ 본 과제에서 확보한 EGRIP 편 코어 시료를 통해 위성 자료 기록 전반에 걸친 해양 프록시 비교 심화 연구 수행
- ☐ 향후 여타 북극권 지역에서 시추하는 빙하코어 시료의 해양 프록시 분석 시, 비교 자료로써 해양 환경 변화 위성 자료 활용

S U M M A R Y

I. Subject

Development of proxies for reconstruction of high resolution records of sea ice extent

II. Objectives and Necessities

1. Objectives

Investigation for possibility of Greenland snow/ice records of sea-salts, MSA, selenium and halogen to reconstruct spatial high-resolution records of sea ice extents in Arctic area

2. Necessities

- ☐ The sea ice extent in Arctic area plays important role in global climate change and thus it has become one of essential variables to forecast future climate change
- ☐ The sea ice extent reconstructions using polar snow and ice core samples have revealed the relationship between snow and ice core proxies and sea ice extent are different from site to site.
- ☐ According to the satellite data, the sea ice extents in Arctic area are different between the sectors of Arctic sea, and thus the reconstruction of sea ice extent using archive samples should be focused on the sector properly assigned to the archive samples.

III. Contents and Scopes

- ☐ Acquirement of Greenland NEEM and EGRIP snow and ice core samples

and analysis of all probable sea ice proxies such as Na^+ , Cl^- , MSA, Se, Br and I from those samples

- ☐ Investigation of satellite data for the marine environment such as sea ice extent, sea surface temperature and primary production in various sectors of Arctic Sea.
- ☐ Intercomparison between sea ice extent in various sectors and the probable sea ice proxies determined from Greenland NEEM and EGRIP snow pit samples.

IV. Results

- ☐ Na^+ and Cl^- in Greenland snow pit samples show increase in the concentrations from winter to spring, while MSA concentration and Br and I concentrations increase during summer to fall and spring to summer, respectively
- ☐ The sea ice proxies in EGRIP snow pit samples show clearer seasonal changes than those in NEEM snow pit samples, probably due to the proximity to the continent
- ☐ The sea ice extent in various sectors have decreased for last 30 years except one sector of central Arctic Canadian Arctic, but the extents of sea ice decrease appear to be different depending on the sectors.
- ☐ Each of the probable sea ice proxies in NEEM and EGRIP snow pit samples shows different correlations with the sea ice extent in various sectors

V. Application Plans

- ☐ Further study of comparison between the satellite data and sea ice proxies records extending the period to the last 30 years using EGRIP firm core recovered in this project

- ☐ Use of satellite data as the basic marine environment information for the research of Arctic snow and ice core records recovered in the future



C O N T E N T S

Cover.....	1
Abstract.....	2
Summary(Korean).....	3
Summary.....	5
Contents.....	8
Contents (Korean).....	9
Chapter 1 Introduction.....	10
Section 1 Objectives.....	10
Section 2 Necessity.....	11
1. Technical necessity.....	11
2. Economic/Industrial necessity.....	12
3. Scientific necessity.....	13
4. Societal/cultural necessity.....	14
Section 3 Contents and Scope.....	15
Chapter 2 Domestic/Overseas Status of Technological Development.....	16
Section 1 Overseas Status.....	16
Section 2 Domestic Status.....	21
Chapter 3 Contents and Results.....	22
Section 1 Materials and Methods.....	22
1. Greenland snow pit samples collection.....	22
2. Analysis of environmental proxies in snow pit samples.....	24
3. Satellite data	26
Section 2 Results.....	28
1. The changes in the chemical proxies of Greenland snow pit	28
2. The changes in marine conditions around Greenland.....	31
3. The comparison between the satellite data and proxies records.....	35
Chapter 4 Achievement of Goals and External Contributions.....	37
Section 1 Achievement of Goals.....	37
Section 2 External Contributions.....	37
Chapter 5 Application of Research Results.....	38
Chapter 6 References.....	39

목 차

제출문.....	1
보고서 초록.....	2
요약문.....	3
영문요약문.....	5
영문목차.....	8
목차.....	9
제 1 장 서론.....	10
제 1 절 연구개발의 목적.....	10
제 2 절 연구개발의 필요성.....	11
1. 기술적 측면.....	11
2. 경제·산업적 측면.....	12
3. 과학적 측면.....	13
4. 사회·문화적 측면.....	14
제 3 절 연구의 내용 및 범위.....	15
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	16
제 1 절 국외 수준.....	16
제 2 절 국내 수준.....	21
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과.....	12
제 1 절 연구 방법.....	22
1. 그린란드 주상 눈 시료 채집.....	22
2. 그린란드 주상 눈 시료의 빙설프록시 분석.....	24
3. 그린란드 주변해역 해양환경 위성 자료 수집.....	26
제 2 절 연구 결과.....	28
1. 그린란드 주상 눈 시료의 빙설프록시 변화 특성.....	28
2. 그린란드 주변 해역 별 과거 해양환경 변화.....	31
3. 빙설 프록시와 해양환경 변화 기록 비교.....	35
제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도.....	37
제 1 절 목표달성도.....	37
제 2 절 관련분야에의 기여도.....	37
제 5 장 연구개발 결과 활용계획.....	38
제 6 장 참고문헌.....	39

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적

북극해의 해빙분포는 북반구 해양의 알베도, 해양-대기 간의 열, 수분 및 온실 기체 등의 교환 작용에 영향을 미치는 등 전 지구적인 기후 변화 메커니즘에 있어 중요한 역할을 담당하는 것으로 알려져 있다 (IPCC, 2013). 따라서, 최근 진행되고 있는 지구온난화에 의한 급격한 북극해 해빙 감소가 앞으로의 기후 변화 및 생태계에 미칠 영향과 그에 대비한 정책 마련 등에 대한 관심이 높아지고 있다 (IPCC, 2013). 또한, 해빙 감소로 인해 북극 항로 활용 가능성이 제시되면서 북극해의 해빙분포는 과학 분야 뿐 아니라 경제, 산업 분야에서도 많은 관심을 기울이고 있다.

그러나 아직까지 북극해 해빙분포를 변화시키는 요인들이 명확하게 파악되지 않아 해빙분포 변화를 예측하는 데에 한계가 있다. 따라서 해빙분포의 변화를 정확하게 예측하기 위해서는 먼저 과거 기후변화에 따른 해빙분포 변화 양상을 복원하여 이로부터 정확한 해빙분포 변화 기작을 파악하는 연구가 필요하다.

현재, 북극해의 해빙분포는 인공위성의 passive microwave 등의 센서를 이용하여 꾸준히 관측되고 있다. 그러나 이러한 인공위성 자료로는 불과 지난 30년간의 기록만을 확인할 수 있기 때문에 그 이전의 해빙분포 변화를 알기 위해서는 퇴적물이나 빙하, 종유석 등의 다양한 아카이브 시료로부터 해양환경 프록시를 이용하여 과거의 해빙 변화 기록을 복원하여야 한다.

이 중, 북극 그린란드 등에서 시추한 빙하코어에는 해빙분포 변화에 따른 대기 환경 변화가 직접적으로 나타나 있기 때문에 빙하코어 시료의 다양한 해양 기원 원소를 활용하여 과거의 해빙분포 변화를 복원하려는 노력이 진행되고 있다 (Legrand et al., 1997; Mayewski et al., 1997; Fischer et al., 2007; Kinnard et al., 2011). 그러나 Fischer et al. (1998)에 따르면 그린란드 내에서도 빙하코어 시추 위치에 따라 과거의 기후변화 기록이 각기 다르게 나타나는 것으로 알려졌다. 또한, 최근에는 해빙분포의 변화가 북극해 해역별로 각각 다르게 나타난다는 것이 확인되었다 (Koenigk et al., 2016). 이러한 지역적인 편차로 인해 하나의 빙하코어에서 분석한 해양 프록시 변화 기록을 통해 북극해 전반의 해빙 분포를 복원하는 것은 무리가 있다.

본 과제에서는 다수의 그린란드 빙설시료로부터 해양환경 프록시로 활용되고 있는 해염성분 원소 (Na^+ , Cl^-)와 MSA, 그리고 최근 해빙 프록시 활용 가능성이 제시되고 있는 브롬 (Br), 요오드 (I) 등의 할로젠 원소를 분석하여 각 프록시의 변화 기록을 비교해 보고자 한다. 또한, 지난 30년간 위성으로 관측한 해빙분포 자료를 총 8개 해역별로 나누어 수집·정리하여 그린란드 빙설시료의 프록시 기록과 비교함으로써, 각 빙설시료의 해양환경 프록시 변화를 주도하는 해역을 특정하고 향후 그린란드 빙하코어로부터 북극해 해빙분포 연구를 수행하기 위한 기초 자료를 제공하고 자 한다.

제 2 절 연구개발의 필요성

1. 기술적 측면

- 극지 빙설시료는 과거 지구의 기후, 환경 변화를 고해상도로 복원할 수 있는 아카이브 시료로써 과거의 기온, 강수량, 대기 순환 등 인간활동에 의한 대기 오염 등 다양한 환경 변화 요인에 대한 프록시 자료를 제공함.
- 극 지역의 해빙분포 변화가 전 지구적인 기후 변화에 영향을 미치는 것이 알려지면서 극지 빙설시료로부터 해양환경의 변화를 복원하려는 연구가 다양한 지역에서 진행되어 왔으나 주로 남극 지역에서 집중적으로 이루어졌으며, 상대적으로 북극 지역에서는 적은 수의 연구가 진행됨.
- 남극 지역은 남극점을 중심으로 동심원 형태로 해빙이 분포하고 있어 해빙분포의 변화가 위도에 따라 1차원적으로 나타나는데 비해, 북극 지역에서는 해빙분포가 지역적인 편차를 보이는 2차원적 변화 양상을 보이기 때문에 빙설시료 프록시와의 연관성을 파악하기 어려움.
- 최근 남극 지역에서도 해양환경 프록시로 주로 활용되는 Na^+ , Cl^- , MSA 등의 변화와 해빙분포 변화의 상관관계가 지역적인 특성에 따라 다르게 나타나는 것으로 확인 됨.
- 따라서 북극 지역 빙설시료로부터 해양환경 변화를 정확하게 복원하기 위해서는 지역별 해양환경 변화와 빙설시료의 해양환경 프록시 변화를 비교하여 각 빙설시료가 지시하는 해역을 특정하고 아울러 기존의 빙설시료 프록시를 보

완할 수 있는 추가적인 프록시 개발이 필요함.

2. 경제·산업적 측면

- 지구 온난화에 따른 북극해 해빙의 감소에 따라 북극해를 통과하는 항로의 가능성이 제시되면서 지난 10여 년간 북극 항로 개척은 전 세계적인 물류 이동에 있어 큰 이슈로 대두 됨.
- 그러나 북극항로를 통상적으로 이용하기 위해서는 북극해의 해빙분포에 대한 예측과 대책이 필수적으로 요구됨.
- 그린란드는 현재 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 북극 항로의 대서양 방면 중앙에 위치하고 있어 북동항로 (Northern sea route)와 북서항로 (Northwest passage), 북극 다리 항로 (Arctic Bridge) 등 3개 북극항로를 모두 인접하고 있음 (그림 1).

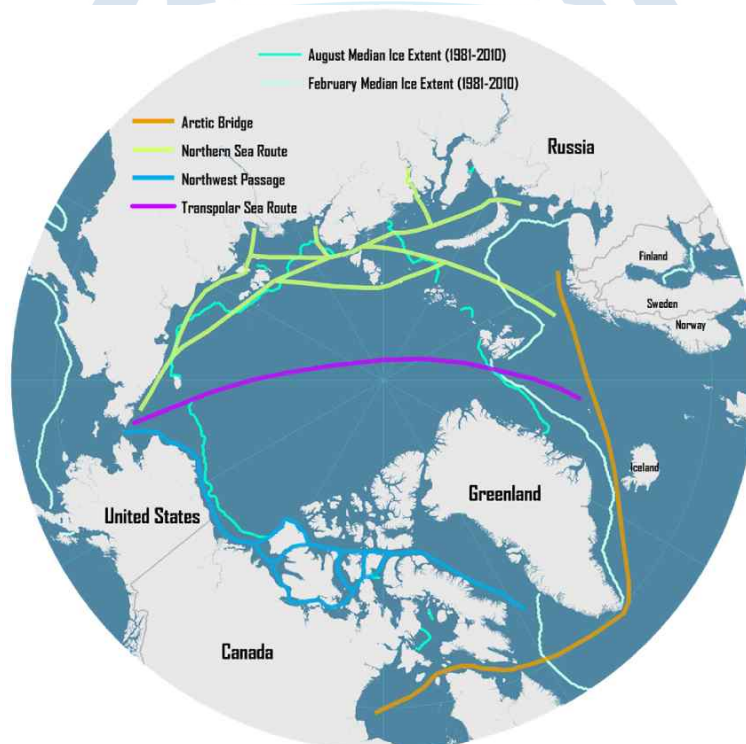


그림 2. Arctic shipping route (source: <http://transportgeography.org>)

- 그린란드에서 시추한 빙설시료로부터 프록시 자료를 통해 복원한 지역별 과거 해빙분포 변화 기록은 정확한 해빙분포 변화를 예측할 수 있는 기초 자료

로 활용할 수 있을 것으로 기대됨.

3. 과학적 측면

- 지난 30여 년간 북극 지역 빙설시료의 해양환경 프록시 연구는 주로 Na^+ , Cl^- 등의 해염 성분과 해양생물기원 물질인 MSA를 이용하여 북극해 전반의 해양환경 변화기록을 복원하는데 집중됨.
- 북극지역의 해빙은 남극과 달리 다년생 얼음의 분포가 크기 때문에 해염 성분인 Na^+ , Cl^- 의 주요 기원으로 알려진 frost flower 혹은 saline snow 등의 발달이 미약하고, 해양 뿐 아니라 주변 대륙의 지각면지에서도 기원하여 유입되기 때문에 그린란드 빙설시료의 해염 성분만으로는 과거의 해양환경 변화를 복원하는데 한계가 있음.
- 해양생물 기원 물질인 MSA (methane sulfonic acid)는 특정 지역의 특정 시기별 해빙분포에 대해 해염 성분에 비해 상대적으로 높은 연관성을 보이나, 대기 중에서 발생하는 화학반응에 의해서도 MSA의 농도가 좌우되기 때문에 이를 보완할 추가적인 해양생물 기원 프록시가 필요함 (그림 2).

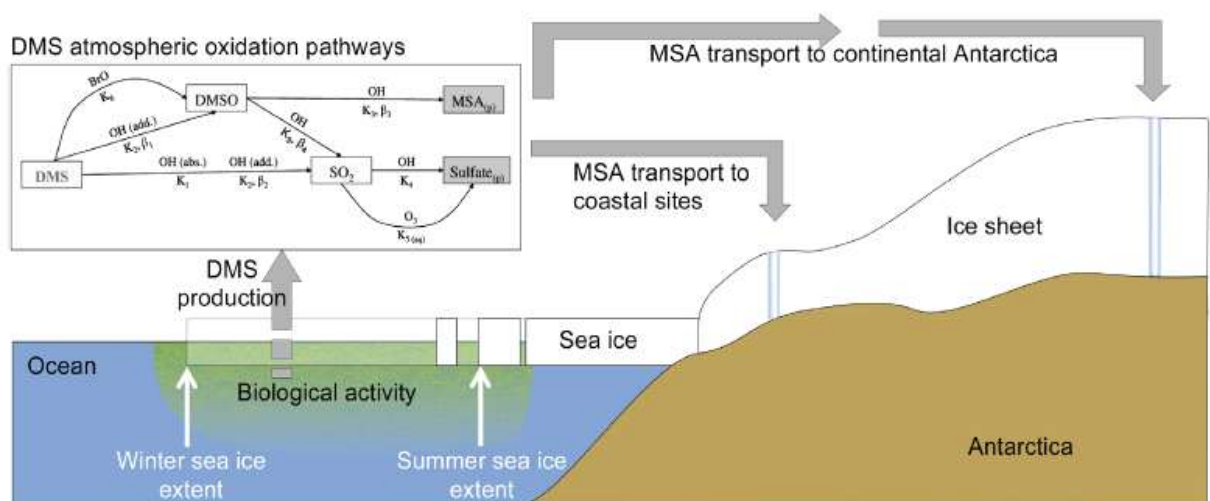


그림 3. Schematic of biogeochemical cycle of MSA at polar region (Abram *et al.*, 2013)

- 최신 연구에 따르면 지난 30 여 년간 북극해 해빙분포 변화의 지역적 편차가 나타나는 것으로 확인되었으며 (그림 3), 따라서 빙설시료를 이용한 해양환경

변화기록 복원 연구를 효율적으로 수행하기 위해서는 지역적인 해양환경 변화와의 비교를 통해 각 빙설시료가 지시하는 해역을 파악하는 것이 선행되어야 할 것으로 사료됨.

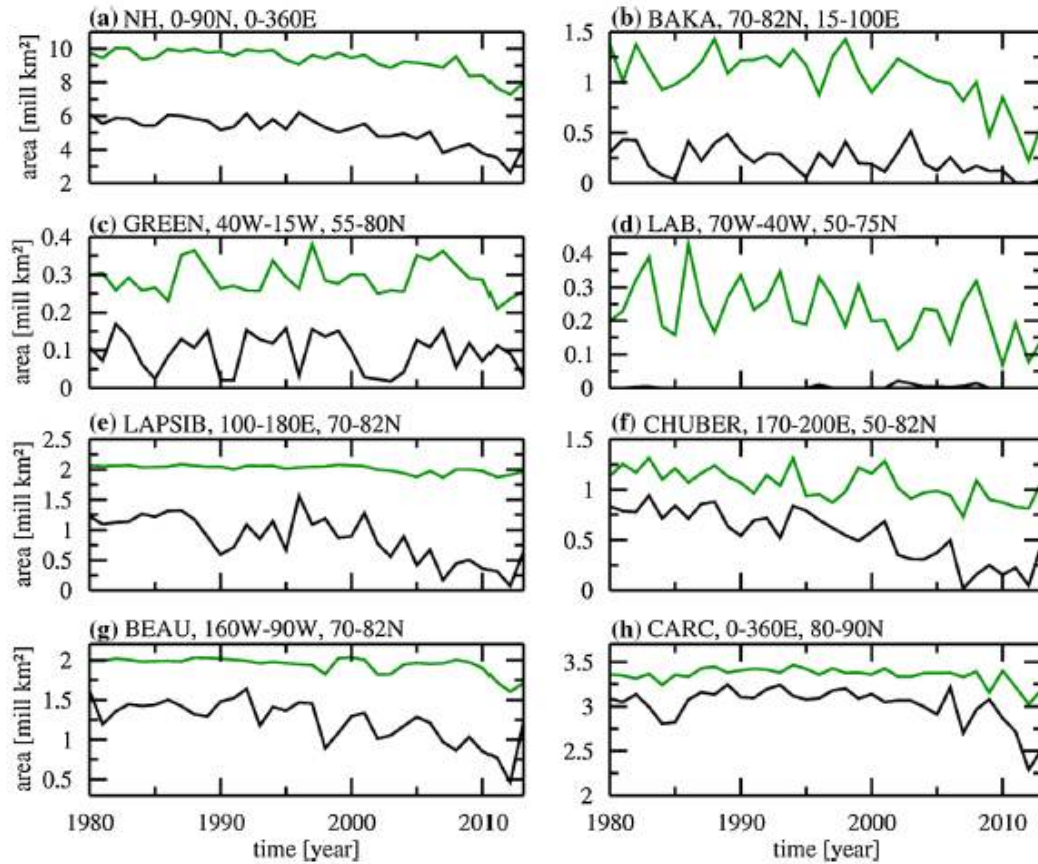


그림 4. September (black) and November (green) area of regional Arctic sea ice (Koenigk *et al.*, 2016)

4. 사회 · 문화적 측면

- 최근 국내에서 동절기 혹한 현상이 빈번하게 발생하면서 이러한 기상현상을 야기하는 북극 지역의 환경 변화에 대한 국민들의 관심이 증가하고 있음.
- 최신 연구에서 북극 지역의 가을철 해빙분포가 주변 지역의 동절기 기상조건과 밀접한 연관성을 보이는 것으로 확인되면서, 유럽 북미 등에서는 이를 활용하여 기상 예측기술을 향상시키려는 연구가 수행됨.

- 과거 북극 지역의 해빙분포 기록 복원은 북극해 해양환경과 기후변화 간의 상호 작용 기작을 규명하기 위한 기초 자료를 제공함으로써 단기적인 기상 변화와 장기적인 기후 변화 예측의 정확도를 향상시키고 경제, 사회, 문화적인 문제에 대한 대책을 제시하는데 도움이 될 것으로 사료됨.

제 3 절 연구의 내용 및 범위

1. Se 및 할로겐 원소 극미량 분석기술 확보

☐ 분석 시스템 구축

- 극지 빙설시료의 극미량 셀레늄 및 할로겐 원소 분석 기술 확보

2. 그린란드 주상 눈 시료 분석

☐ 그린란드 NEEM 주상 눈 시료 및 EGRIP 주상 눈시료 빙설 프록시 분석

- 물 안정 동위원소 비 분석을 통한 시료 연대추정
- MSA, Na^+ , Cl^- , 셀레늄 및 할로겐 원소의 해양환경 프록시 분석
- 미량금속원소 분석을 통해 인간 활동이 해양환경 프록시에 미치는 영향 파악

3. 위성자료와 빙설시료 프록시 자료 비교 분석

☐ 위성 자료를 이용한 그린란드 주변 해역 해양환경 변화 파악 및 그린란드 빙설 시료와의 비교 분석

- 그린란드 주변 해역의 지역별 수온, 1차 생산성 및 해빙분포에 대한 월/연 단위 위성 자료 정리
- 그린란드 빙설시료 프록시 분석 자료와 위성 자료 교차 비교

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외 수준

2000년대 이후, 극 지역의 해빙 분포가 기후 변화 기작에 있어 중요한 역할을 담당한다는 사실이 밝혀지면서 남극과 북극에서 시추한 다양한 빙설시료로부터 과거 해빙 변화의 기록을 복원하고 이를 통해 해빙 변화와 기후 변화 간의 상호 작용을 파악하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다 (그림 4). 이러한 연구에서는 주로 Na^+ 이나 Cl^- 등의 대표적인 해염 성분이나 해양 플랑크톤에서 방출되는 MSA 등이 해빙 분포 변화를 복원하는 지시자로 활용되고 있다. 먼저 남극과 북극에서 시추한 빙하코어의 해염성분 변화기록을 살펴보면, 빙하기-간빙기의 장주기 기후 변화 동안 기온변화와 해염 성분의 변화가 서로 상반되는 변화 양상을 보이는 것으로 확인되었다 (Wolff et al., 2010; Mayewski et al., 1997). 이는 빙하기에 해빙이 증가함에 따라 해양과 대기의 상호작용이 감소하여 해염 성분이 감소할 것이라는 일반적인 생각과는 달리 대기 중의 해염 성분이 오히려 증가한다는 것을 의미한다.

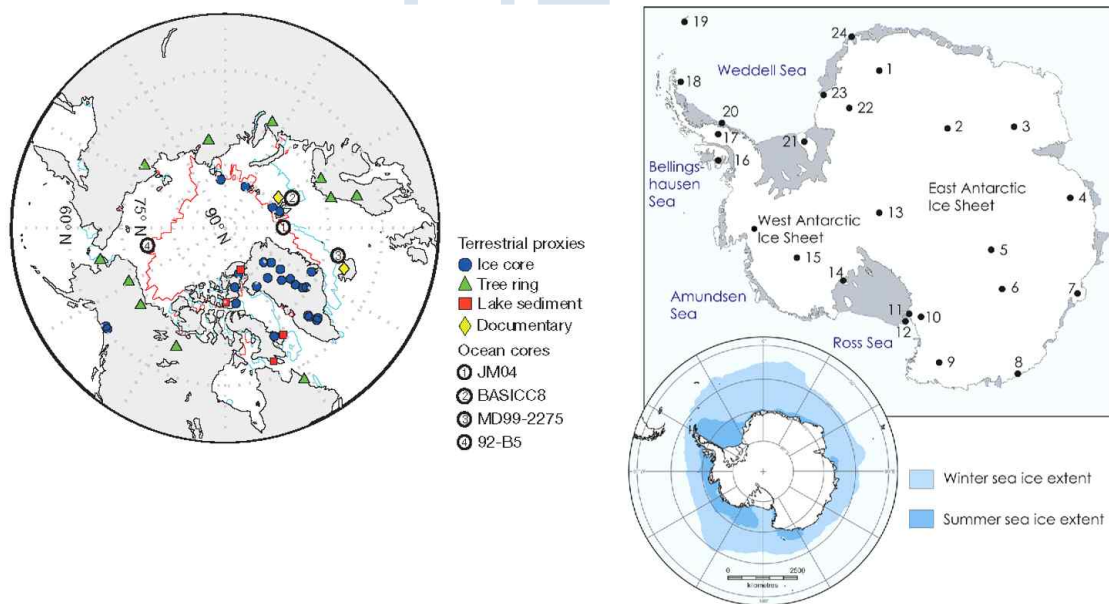


그림 5. 해빙분포 복원 연구를 위한 남, 북극 빙설코어 시추 지점 (Kinnard et al., 2011; Abram et al., 2013)

Rankin et al. (2003)에 따르면, 이러한 해빙 면적과 빙하코어 내 해염 성분의 양의 상관관계는 극 지역에서 해빙이 최초로 결빙될 때 형성되는 프로스트 플라워 (frost flower)에 의해 해수 내 해염 성분이 해빙 표층에 응집되고 바람에 의해 날리면서 극지역의 빙원으로 이동하기 때문인 것으로 보고되었다. 따라서 남극의 다양한 지역에서 이러한 기원 특성을 이용하여 해염 성분을 이용한 해빙 복원 연구가 진행되고 있다 (Iizuka et al., 2008; Schüpbach et al., 2013; Severi et al., 2017).

Iizuka et al. (2008)은 남극 Dome Fuji 빙하코어로부터 12,000년 전 빙하기가 끝나고 간빙기로 들어서면서 Na^+ 유입량이 감소한 반면, 5,400년 전의 한랭기에는 증가하는 양상을 보였으며, 특히 해빙 분포의 연 변화가 한랭기에 더욱 크게 변화한다는 사실을 확인하였다 (그림 5).

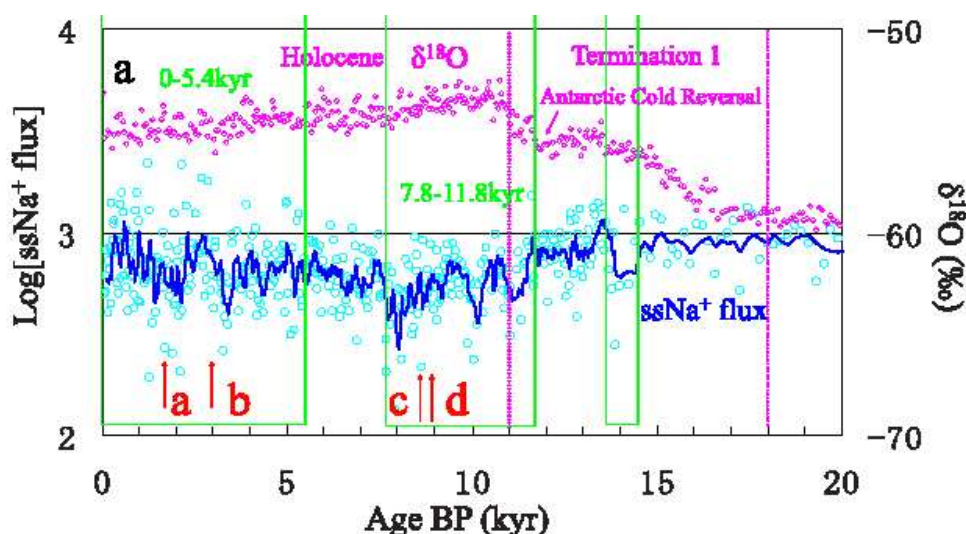


그림 6. Dome Fuji 빙하코어의 기후 변화 및 해염 변화 기록

한편, Schüpbach et al (2013)에 따르면, EPICA Dome C, EPICA Dronning Maud land, Talos Dome 빙하코어 기록을 통해 홀로세 이전의 간빙기 동안 남극의 해빙 분포가 대서양 및 인도양 해역에서는 현재의 절반 수준밖에 되지 않은 반면 로스 해에서는 현재와 유사한 수준이었던 것으로 나타났다 (그림 6).

최근에는 빙하기-간빙기의 장주기 기후 변화 뿐 아니라 Talos Dome 빙하코어로부터 Na^+ 의 유입량 변화를 이용하여 과거 100년 년간 로스 해 및 남빙양 태평양 해역의 해빙 분포 변화 기록을 복원하는 연구가 진행되었으며, 이를 통해 1960년대 이전까지는 겨울철의 해빙 면적이 비교적 일정하게 유지되었으나 1960년대 이후 해

빙 면적의 변화가 증가하였다는 사실이 밝혀진 바 있다 (Severi et al., 2017; 그림 7).

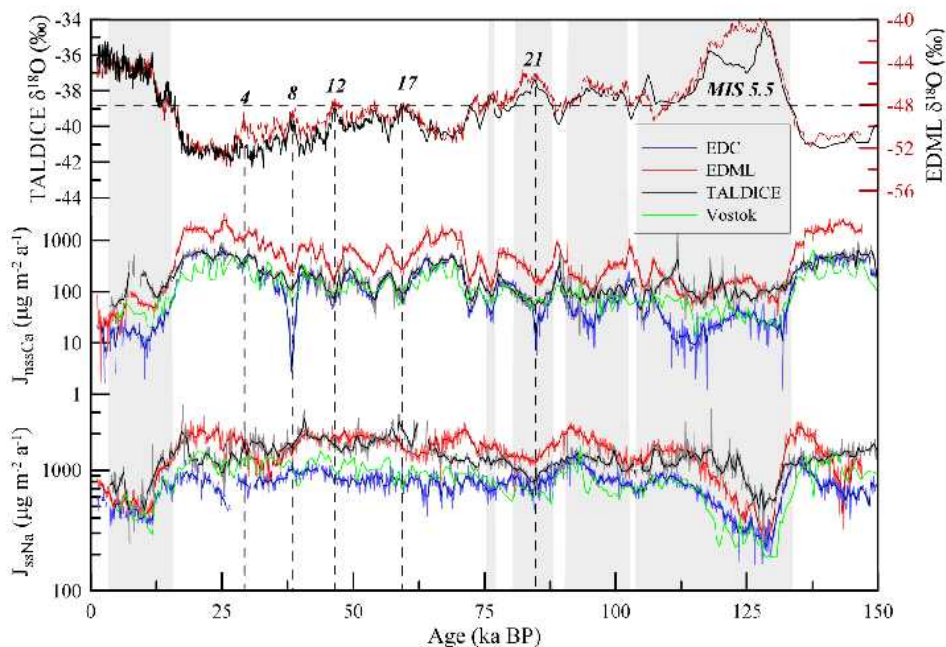


그림 7. 남극 빙하코어에서 복원한 과거 15만년 간의 기후 및 해염 변화 기록

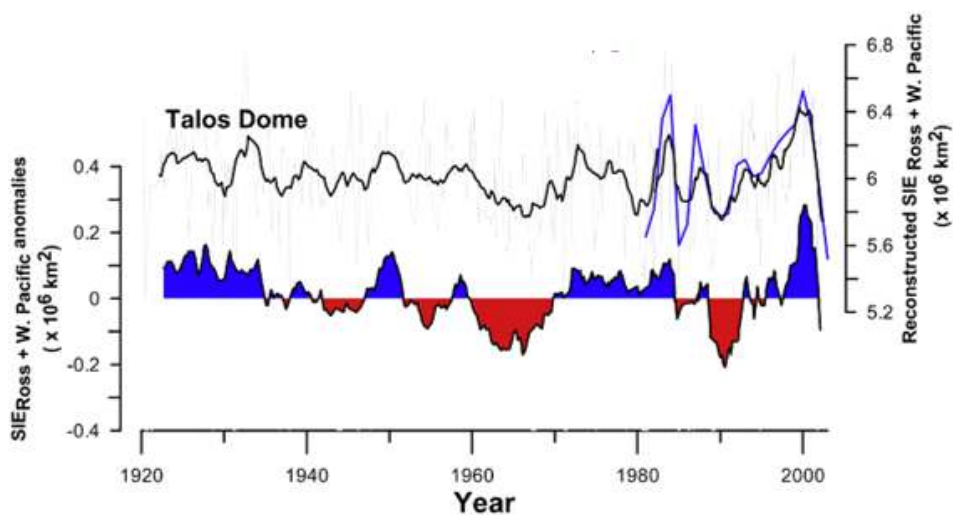


그림 8. Talos Dome 빙하코어에서 복원한 1920~2003년 동안의 로스 해 및 남빙양 태평양 해역의 해빙 변화 기록

이상에서와 같이 남극 빙하코어의 해염성분 변화는 주변 해역의 해빙 변화와 대체로 잘 일치하고 있으나, 여전히 지역에 따라 해염성분과 해빙분포와의 상관관계가

상이하게 나타나고 있어 해빙 분포 프록시로 활용하기 위해서는 보다 다양한 지역의 빙하코어 자료가 필요한 상황이다 (Souney et al., 2002; Udisti et al., 2012).

반면, 북극의 경우에는 남극과는 달리 빙하코어의 해염성분 변화가 해빙 분포 보다 는 대기 순환과 밀접한 영향을 갖는 것으로 알려져 있어 해염성분을 이용한 해빙 분포 복원에 한계가 있다 (Fischer, 2001; Hutterli et al., 2007).

빙하코어 시료에서 또 다른 해빙분포 프록시로 활용되는 MSA는 해양 플랑크톤에 의해 방출되는 Dimethylsulphide (DMS)가 대기 중에서 산화되어 생성되는 물질로 써, 극 지역의 해빙 지역에서 높은 농도로 존재하는 것으로 알려져 있다. 특히, MSA는 해양생물에서 방출되는 것 이외의 기원이 없기 때문에 해빙 경계 부근에서의 생산성 변화와 연계하여 해빙 분포를 복원하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다 (Kreutz et al., 2000; Meyerson et al., 2002; Curran et al., 2003; Foster et al., 2006; Fundel et al., 2006; Abram et al., 2007; Becagli et al., 2009; Rhodes et al., 2012; Criscitiello et al., 2013). 그러나, 이전의 연구 결과에 따르면 남극 빙하코어의 MSA 변화가 겨울철의 해빙 면적, 여름철의 해빙 소멸 및 MSA 의 이동 기작 등 지역에 따라 각각 다른 요소에 의해 좌우되며 이로 인해 지역적인 편차가 상반되게 나타나는 것으로 확인되었다 (Abram et al., 2013).

이러한 지역적인 편차는 북극 그린란드에서도 동일하게 나타난다. Jonsell et al. (2007) 에 따르면 NGRIP 그린란드 빙하코어에서는 MSA 농도와 기온 간에 음의 상관관계를 보이는 반면, GISP2 빙하코어에서는 이러한 상관성이 나타나지 않았는데, 이는 그린란드 지역에 따라 MSA 이동 과정에서 발생하는 대기 화학적 기작에 차이에 기인하는 것으로 파악되었다 (그림 8).

이상에서 살펴본 바와 같이 빙하코어의 해염과 MSA 프록시가 해빙 분포를 복원하는데 한계가 있다는 것이 확인되면서 최근 새로운 해빙 분포 프록시를 개발하려는 다양한 연구가 수행되고 있다. 특히, 북극 지역에서는 이태리 베니스 대학교를 중심으로 요오드 (I)나 브롬 (Br)과 같은 할로젠 원소를 이용하여 해빙 분포를 복원하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Spolaor et al., 2013, 2016a, b).

할로젠 원소는 해빙 아래 서식하는 해조류에 의해 주로 생성되며, 봄철에 해빙이 감소하면서 대기 중으로 방출된 할로젠 원소에 의해 극 지역에서 급격한 농도 증가가 일어나는 것으로 알려져 있다. 따라서 빙하코어 내의 할로젠 원소 농도 변화는 해빙 면적의 계절변화와 밀접한 연관을 갖고 있다 (Spolaor et al., 2013).

특히, Spolaor et al. (2016a)에 따르면 러시아 북극해 지역에서 시추한 빙하코어의 Br과 I의 농도 변화가 각각 봄철과 여름철의 해빙 면적과 상관관계를 보이고 있어 해빙분포의 계절별 변화까지도 확인할 수 있는 프록시로 제시되고 있다 (그림 9).

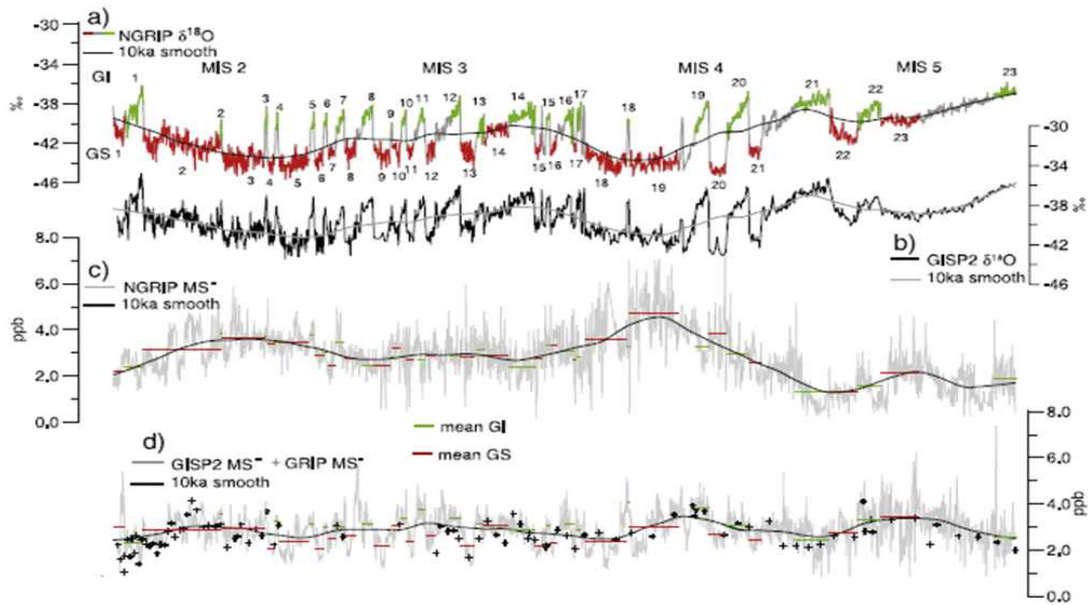


그림 8. 그린란드 NGRIP 및 GISP2 빙하코어의 $\delta^{18}\text{O}$ 와 MSA 변화기록

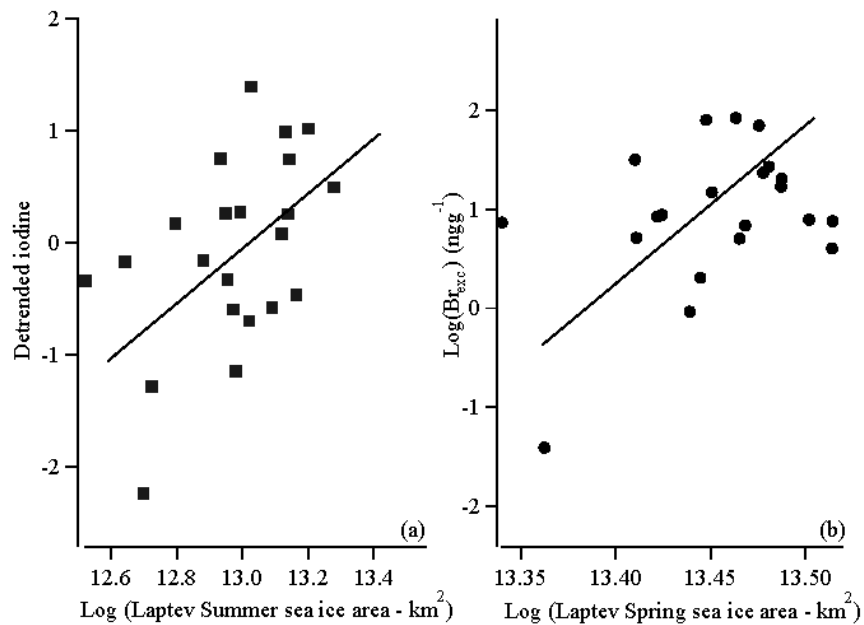


그림 10. 러시아 북극해 지역 빙하코어의 I 농도 및 Br 농축지수와 Laptev 해 해빙 분포의 상관관계

제 2 절 국내 수준

국내의 극지 빙설시료를 이용한 해양환경 변화 연구는 주로 남극 장보고 기지를 기반으로 한 빅토리아랜드 빙하코어를 대상으로 빙설시료의 Na^+ , MSA 등의 해양환경 프록시 변화와 주변 해역의 해빙분포 변화에 대한 비교 연구가 수행되고 있다. 이 연구 결과에 따르면 빅토리아랜드 빙하코어의 MSA 농도와 로스 해 외해의 과거 30 년간 해빙 면적 사이에 유의미한 상관성이 있는 것으로 확인되었다 (그림 10).

또한, 북극 지역에서도 그린란드 북서부 빙하지대에서 국제 공동 연구로 수행된 NEEM 프로젝트의 빙설 시료로부터 Na^+ , Cl^- , MSA 등의 해양 환경 프록시와 해빙 분포와의 상관성에 대한 연구가 진행되었다 (Kang et al., 2015).

Kang et al. (2015)에 따르면, 그린란드 NEEM 캠프에서 시추한 주상 눈 시료의 해양 염분 농도가 주로 겨울철과 봄철에 증가하는 양상을 보이고 있으며, 이전 연구에서 확인된 바와 같이 북대서양의 저기압 발달과 연관이 있는 것으로 확인되었다. 반면 여름철에는 주변 지역에서 배출되는 오염물질과의 화학 반응에 영향을 받는 것으로 확인되었다.

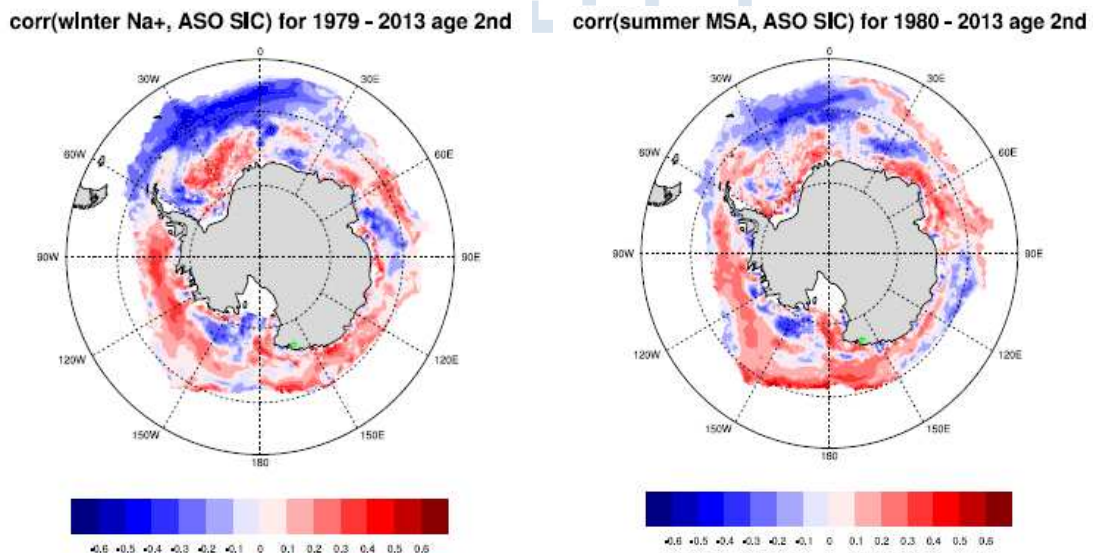


그림 10. 남극 GV7 빙하코어의 Na^+ 및 MSA 농도변화와 해역별 해빙면적간 상관관계

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 연구 방법

1. 그린란드 주상 눈 시료 채집

본 과제에서는 그린란드 북서부 (77.45°N, 51.07°W, 2450 m asl)의 North Greenland Eemian Ice drilling 캠프 (이하 NEEM 캠프)와 그린란드 북동부 (75.63°N, 35.94°W, 2700 m asl)의 Northeast Greenland Ice Stream 지대에 위치한 East Greenland Ice-Core Project 캠프 (이하 EGRIP 캠프)에서 시추한 주상 눈 시료를 대상으로 연구를 수행하였다 (그림 11). 시료 채취 지점의 연 평균 적설량은 각각 0.22 m i.e. (NEEM 캠프)와 0.11 m i.e. (EGRIP 캠프) 였다.



그림 12. 그린란드 주상 눈시료 채취지점

NEEM 캠프에서 시추한 주상 눈 시료 (이하 NEEM 주상 눈 시료)는 지난 2009년 7월, 캠프에서 3.5 km 떨어진 지점에서 채취하였다. 주상 눈 시료 채집 작업은 먼저 알루미늄 삽을 이용하여 3.2 m 깊이의 눈 구덩이를 파내려간 후, 바람 방향의 설벽

에서 테프론 끌개를 이용하여 5 cm의 표면을 추가로 제거하였으며, 이 벽면에서 테프론 재질의 원통형 주상 눈 시료 시추기를 이용하여 4.6 cm 간격으로 총 70개의 시료를 1L LDPE 용기에 채집하였다 (그림 12). 채취 과정에서 발생할 수 있는 시료의 오염을 최소화하기 위해 시료 알루미늄 삽을 제외한 모든 채집 도구는 청정실험 규정에 따라 산세척을 하여 준비하였으며, 현장에서 시료 채취 시, 채집자는 청정 실험복과 비닐장갑을 착용하고 시료채취를 수행하였다 (그림 13).

EGRIP 캠프에서 시추한 주상 눈 시료 (이하 EGRIP 주상 눈 시료)는 2017년 7월, 캠프에서 500 m 떨어진 지점에서 NEEM 주상 눈 시료와 동일한 방법으로 1.9 m 깊이의 눈 구덩이를 파고 5 cm 간격으로 총 38개의 시료를 채취하였다.

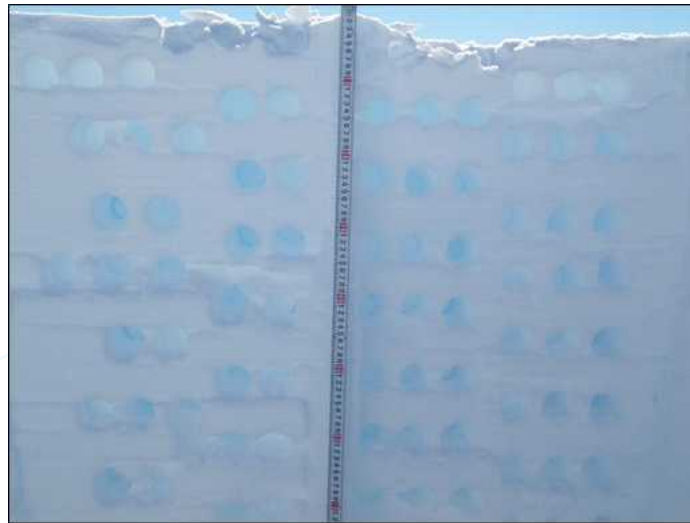


그림 13. NEEM 캠프 주상 눈 시료 채집



그림 14. EGRIP 캠프 주상 눈 시료 채집 작업

2. 그린란드 주상 눈 시료의 빙설 프록시 분석

그린란드 주상 눈시료의 빙설 프록시 중 물 안정 동위원소 비 ($\delta^{18}\text{O}$)는 0.45 μm PVDF 시린지 필터를 이용하여 입자물질을 제거한 후 2 mL의 분석 시료를 극지연구소의 L1102-i Cavity Ring-Down Spectroscopy (Piccaro Inc., USA)를 이용하여 분석하였으며, VSMOW2, SLAP2 등의 표준물질을 이용하여 분석 편차를 보정하였다 (그림 14).

Na^+ , Cl^- , MSA 등의 이온 화학종 해양 프록시는 극지연구소의 Dionex ICS-2000과 ICS-2100 이온 크로마토그래피 (Thermo Fisher Scientific Inc., USA)를 이용하여 분석하였다 (그림 15). 양이온 분석조건은 CS 12A 컬럼에 20mM MSA 용리액을 사용하여 분석하였으며, 음이온 분석조건은 AS 15 컬럼에 KOH 용리액을 6-55 mM로 농도를 변화시켜가며 분석하였다.



그림 15. CRDS 물안정 동위원소 분석기



그림 16. Dionex 이온 크로마토그래피

Ba, Se 등의 미량금속원소는 극지연구소의 Element 2 유도결합플라즈마 질량분석기 (ICP-SF-MS, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany)를 이용하여 분석하였다 (그림 16). 시료 분석 시, 저농도 극지 빙설시료의 분석 정확도를 향상시키기 위해 ICP-SF-MS에 Apex HF 및 ACM 모듈 (Elemental Scientific Inc., Omaha, NE, USA)을 시료 도입부에 연결하여 장비의 분석 감도를 최대한 확보하였다 (그림 17). 각 미량금속원소의 검출 한계는 0.11 pg/g (Ba), 6.9 pg/g (Se) 이었으며, 분석 오차는 5-17% 수준이었다. Se 분석의 경우, 극지 빙설시료의 농도 수준이 검출한계보다 약간 높은 수준으로 나타났다. 따라서 일반 환경시료의 Se 분석에 사용되는 MP2 Hydride generator (Elemental Scientific Inc., Omaha, NE, USA)를 도입하여 검출한계를 낮추고 분석 정밀/정확도를 향상시키고자 하였다 (그림 18). 그러

나 장비 도입 시기가 늦어져서 사용 전 충분한 세척이 불가능 했으며 이로 인해 장비를 활용할 때 오히려 ICP-SF-MS 배경 값이 증가하는 양상을 보였다. 본 장비는 향후 충분한 세척기간을 거친 후 빙하코어 시료의 Se 및 수은 (Hg) 분석에 활용할 예정이다.

Br 및 I의 할로겐 원소는 현재 세계에서 유일하게 극지 빙설시료의 할로겐 원소 분석기술을 보유하고 있는 이태리 베니스 대학교에서의 연수를 통해 첨단 분석기술을 확보하고 이를 통해 해양환경 변화에 대한 할로겐 프록시를 개발하려 하였다. 그러나 베니스 대학교의 내부 상황으로 인해 직접 방문하여 할로겐 분석법에 대한 연수 및 시료 분석이 불가능하게 되었으며, 따라서 시료만을 보내 Cyclonic Peltier-cooled spray chamber가 장착된 Element2 ICP-SF-MS를 이용하여 분석하였다. 베니스 대학교에서 분석한 할로겐 원소의 검출한계는 각각 50 pg/g (Br)과 2 pg/g (I) 이며, 분석 오차는 2-10% 이내였다. 분석과정에서 시료의 교차 오염을 최소화하기 위해 시료와 시료 사이에 2% 질산으로 90초간 세척을 진행하였다.



그림 17. Element2 ICP-SF-MS

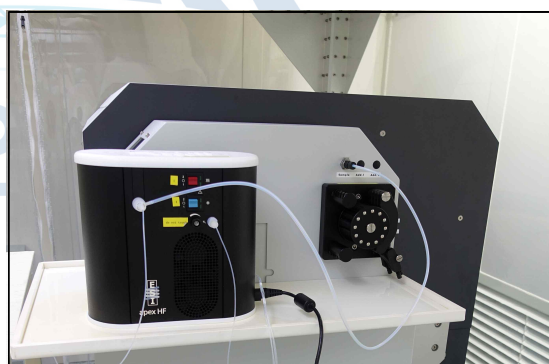


그림 18. Apex-ACM 모듈



그림 19. MP2 Hydride generator

3. 그린란드 주변 해역 해양환경 위성자료 수집

본 과제에서는 그린란드 주상 눈 시료의 빙설 프록시와 그린란드 주변 해역의 해양 환경의 비교 연구를 위해 북극해를 Koenigk et al. (2016)에서 제시된 바와 같이 바렌츠/카라 해 (Barents/ Kara Seas), 그린란드 해 (Greenland Sea), 래브라도 해/ 배핀 만 (Labrador Sea/ Baffin Bay), 랍테브/ 동 시베리아 해 (Laptev/ East Siberian Seas), 중앙 북극해 대서양 해역 (Central Arctic Atlantic sector), 중앙 북극해 태평양 해역 (Central Arctic Pacific sector), 중앙 북극해 캐나다 해 (Central Arctic Canadian Arctic) 등 총 8개의 해역으로 구분하고 각 해역의 해빙 농도, 표층 수온 및 엽록소 (Chlorophyll-a) 변화를 파악하였다 (표 1, 그림 19).

해빙 농도의 경우, National Sea Ice Data Center (<http://nsidc.org/data>)에서 제공하는 Nimbus-7 SMMR MSP and SSM/I-SSMIS Passive Microwave 자료를 표 1에 제시된 해역 위경도에 따라 수집, 정리하였다 (Cavalieri et al., 1996). 해빙 농도 자료의 수집 기간은 1979년 1월부터 2018년 5월까지이며, 공간 해상도는 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ 이다. 표층 수온 자료는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)의 Optimal Interpolation V2 자료 (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data>)를 사용하여 정리하였다. 자료 수집 기간은 1981년 12월부터 2018년 5월까지이며 공간 해상도는 $1/4$ 도이다.

엽록소 농도 자료는 유럽항공 우주국 (European Space Agency)의 GlobColour project를 통해 생산된 다중 위성 자료를 병합한 엽록소 농도 자료 (<http://hermes.acri.fr>)를 사용하였다. 다중 위성 자료에는 SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field of View Sensor), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), VIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 자료가 포함되어 있으며, 이 자료들은 Garver-Siegel-Maritorena 알고리즘을 통해서 병합되었다 (Maritorena et al., 2010). 자료의 수집 기간은 1997년 8월부터 2018년 5월까지이며 공간 해상도는 $25\text{ km} \times 25\text{ km}$ 이다.

표 1. 북극해 해양 환경 변화의 고해상도 복원을 위한 해역 구분

Region	Area	number
Barents/Kara Seas	70-82N, 15E-100E	R1
Greenland Sea	50-75N, 40W-15E	R2
Labrador Sea/Baffin Bay	55-80N, 70W-40W	R3
Laptev/East Siberian seas	70-82N, 100E-180E	R4
Chukchi/Bering Seas	70-82N, 160W-90W	R5
Central Arctic Atlantic sector	80-90N, 10W-135E	R6
Central Arctic Pacific sector	80-90N, 135E-130W	R7
Central Arctic Canadian Arctic	80-90N, 130W-10W	R8

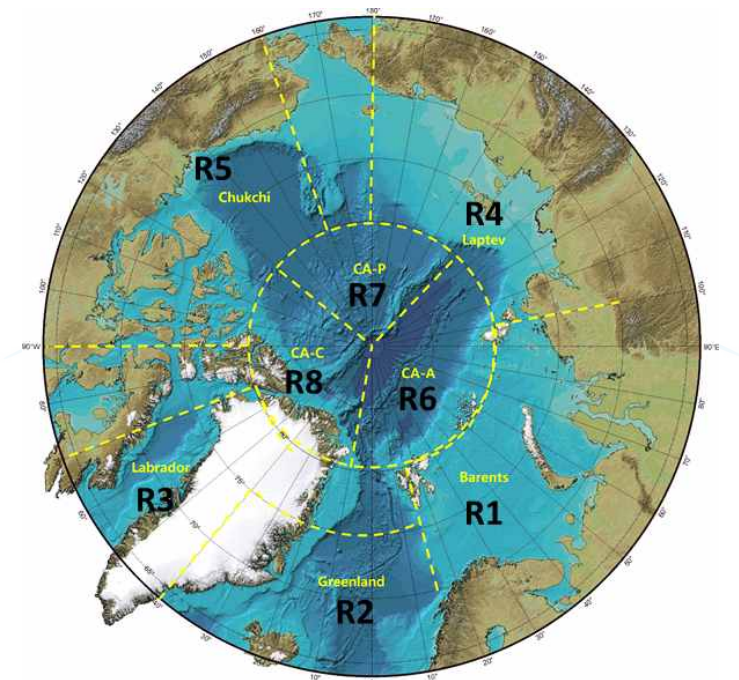


그림 20. 북극해 해역 구분

제 2 절 연구 결과

1. 그린란드 주상 눈시료 빙설 프록시 변화 특성

그린란드 주상 눈 시료의 연대는 시료 채취 시점인 표층 시료의 연대로부터 $\delta^{18}\text{O}$ 의 계절 변화와 대표적인 지각 기원 원소인 Ba의 봄철 피크를 이용하여 추정하였다. 연대 추정 결과, 3.2 m 깊이의 NEEM 주상 눈 시료와 1.9 m 깊이의 EGRIP 주상 눈 시료가 각각 2003년~2009년과 2012년~2017년의 기간에 해당하는 것을 확인할 수 있었다 (그림 20, 21).

NEEM 주상 눈 시료에서 분석한 해양 프록시의 계절 변화 특성을 살펴보면, 먼저 Na^+ 와 Cl^- 의 경우, 대체로 겨울철에서 봄철 사이에 농도 피크가 나타났다 (그림 20). Kang et al. (2015)에 따르면 해염 성분의 농도 피크가 겨울철에서 봄철 사이에 나타나는 것은 이 시기에 북대서양의 저기압이 발달하면서 해염 성분 원소의 유입량을 증가시키기 때문인 것으로 보고되었다. 반면, MSA는 주로 여름과 가을에 농도 피크가 나타났는데, 이는 이전 연구에서 보고된 그린란드 대기 중 MSA 농도 변화와 잘 일치하고 있다. 이러한 MSA의 농도 변화는 봄철과 여름철에 해양 생물에서 방출된 dimethylsulfide (DMS)가 대기 중에서 산화되면서 MSA가 형성되기 때문인 것으로 확인된 바 있다 (Legrand and Mayewski, 1997). Se은 Na^+ , Cl^- 와 유사하게 겨울철에서 봄철에 농도 피크가 나타났다 (표 2, 그림 19). Se이 주로 해양 생물로부터 방출되는 원소임에도 불구하고 해염 성분 원소와 유사한 계절 변화를 보이는 것은 Se이 이동 과정에서 주로 입자 물질에 흡착되어 이동하기 때문에 겨울철과 봄철에 북대서양의 저기압이 발달할 때, 입자 물질의 유입량이 증가함에 따라 Se의 유입량 역시 증가하기 때문인 것으로 알려져 있다 (Lee et al., 2015).

표 2. NEEM 주상 눈 시료 빙설 프록시 간 상관 관계 (r)

	Cl^-	MSA	Se	Br	I
Na^+	0.54	0.09	0.45	0.14	-0.09
Cl^-		-0.07	0.48	0.09	-0.15
MSA			0.18	0.32	0.17
Se				0.18	-0.28
Br					0.40

NEEM 주상 눈시료의 Br은 주로 봄철과 여름철에 농도가 증가하는 양상을 보이고 있다 (그림 20). 이는 Br이 극지역의 태양광 조건 변화에 따라 봄철과 늦은 여름철에 급격하게 농도가 증가하기 때문인 것으로 알려져 있다 (Spolaor et al., 2014). I도 Br과 유사하게 여름철에 농도가 증가하는 양상을 보이며 (그림 19), 이는 Spolaor et al. (2014)에 의해 보고된 바와 같이 여름철에 해빙이 감소하면서 해양 식물 플랑크톤에 의한 배출량이 증가하기 때문인 것으로 보인다.

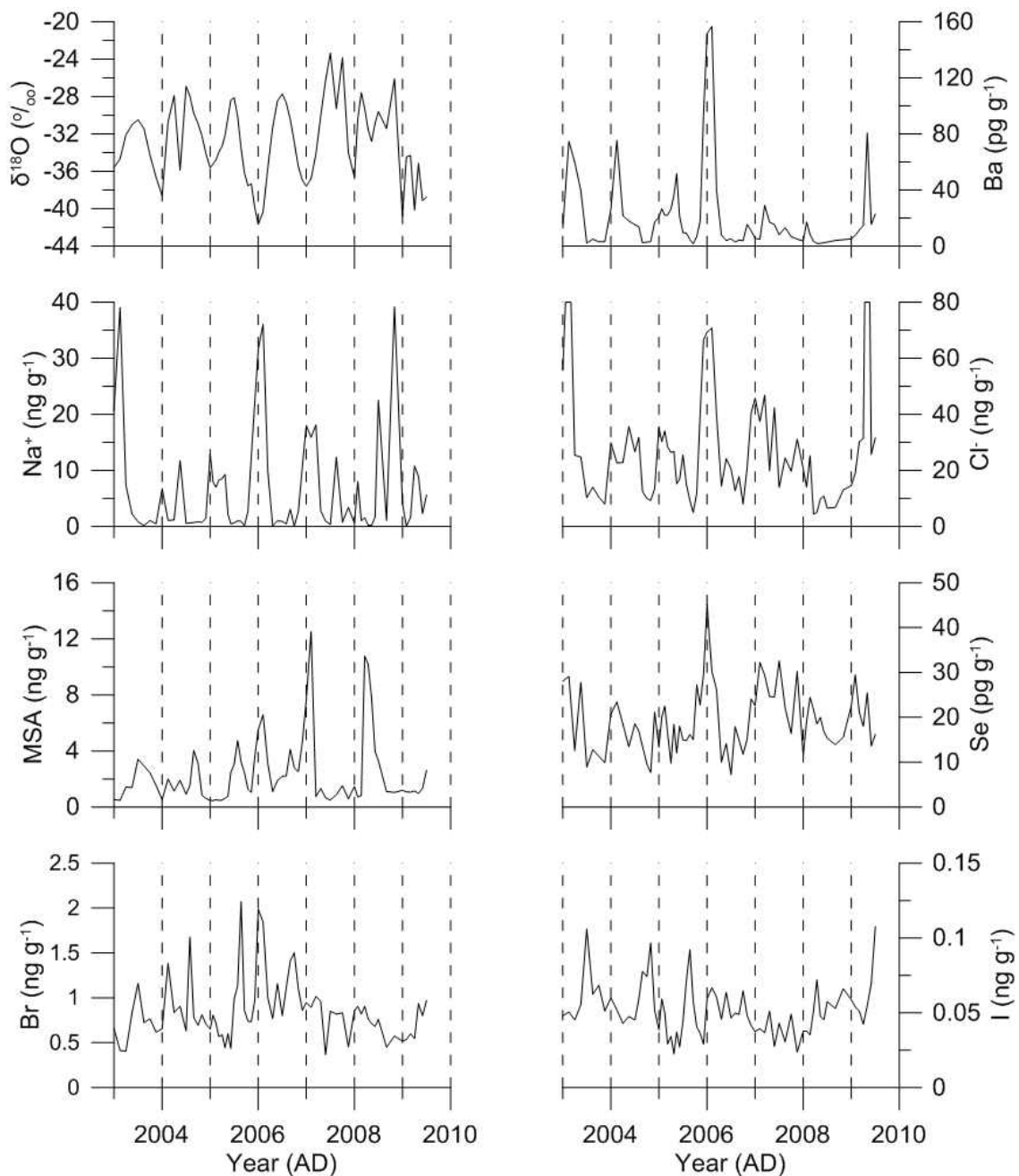


그림 21. NEEM 주상 눈 시료의 $\delta^{18}\text{O}$, Ba 및 해양 프록시 변화

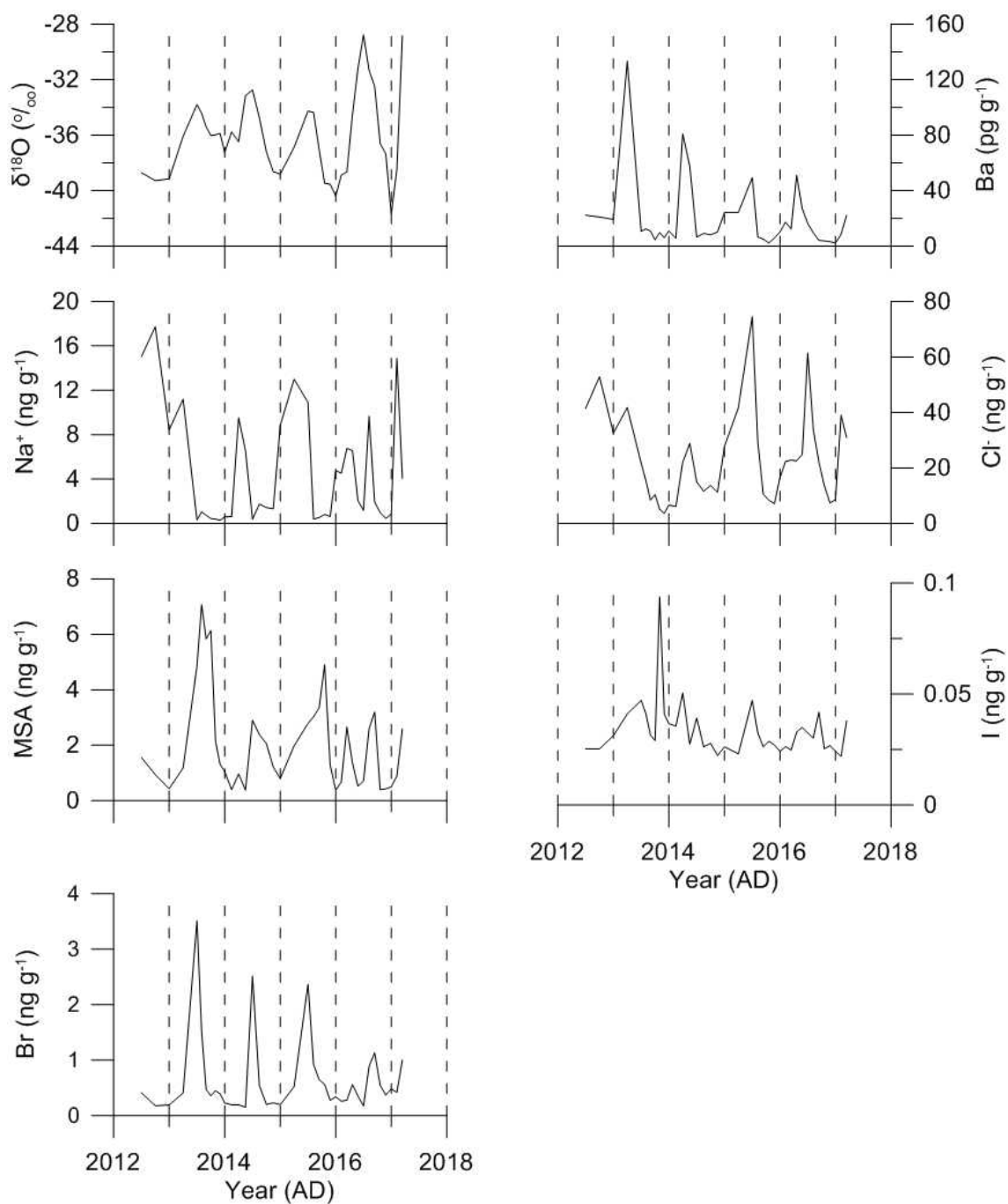


그림 22. EGRIP 주상 눈 시료의 $\delta^{18}\text{O}$, Ba 및 해양 프록시 변화

EGRIP 주상 눈 시료의 해양 프록시 변화를 살펴보면, 비록 프록시들의 농도는 상대적으로 낮지만, NEEM 주상 눈 시료에서 나타난 각 원소의 계절변화 특성이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다 (그림 21). 특히, Br의 경우, 봄철과 여름철에 나타나는 것으로 알려진 Bromine explosion 현상에 의한 농도 피크가 매우 뚜렷

하게 나타나고 있다. 또한, Na^+ 와 Cl^- , MSA와 Br 등 동일 기원으로 알려져 있는 해양 프록시 간의 상관관계가 NEEM 주상 눈 시료보다 더욱 높은 값을 보이고 있다 (표 3). 이는 그린란드 북서부에 위치한 NEEM 캠프의 경우, 그린란드 서쪽의 북 아메리카 대륙으로부터 지각에서 기원한 동일 성분의 영향을 어느 정도 받는 반면, 대서양 연안 쪽에 위치한 EGRIP 캠프는 대륙의 영향을 상대적으로 적게 받기 때문인 것으로 사료 된다 (그림 11).

표 3. EGRIP 주상 눈 시료의 해양 프록시 간 상관 관계

	Cl	MSA	Br	I
Na^+	0.72	-0.31	-0.15	-0.20
Cl^-		-0.16	0.16	-0.07
MSA			0.49	0.18
Br				0.30

2. 그린란드 주변 해역의 해양환경 변화

위성 자료를 통해 확인한 그린란드 주변 해역의 과거 30년간 해양 환경 변화를 살펴보면 중양 북극해 캐나다 해역 (R8)을 제외하면 모두 해빙 농도가 감소하는 양상을 보이고 있다 (그림 22). 해빙 농도의 감소 추세를 해역별로 보면, 조금씩 차이를 보이고 있다 (그림 22). 바렌츠/카라 해 (R1)가 연 0.6%로 가장 빠르게 해빙이 감소하고 있는 것으로 나타났으며, 라테브 해 (R4), 척치/베링 해 (R5), 래브라도 해/배핀 만 (R3) 등이 각각 매년 0.39, 0.25, 0.19% 씩 감소하는 것으로 확인되었다. 반면 그린란드 해 (R2)와 중양 북극해 대서양 해역 (R6)은 연 0.04% 씩 감소하며, 중양 북극해 캐나다 해역 (R8)은 연 0.03%씩 증가하는 것으로 나타났다 (그림 22). 이러한 해역별 해빙분포 변화의 차이는 그린란드 빙설시료의 해양 프록시 복원 시 해양 프록시 기원지에 대한 조사가 병행되어야만 보다 정확한 해빙분포 변화기록을 복원할 수 있음을 시사하고 있다.

대부분의 해역에서 지속적으로 감소하는 양상을 보이는 해빙분포와는 달리 1차 생산성은 중양 북극해 해역 (R6~R8)과 라테브 해 (R4), 척치/베링 해 (R5)에서는 감소하는 양상을 보인 반면, 바렌츠/카라 해 (R1), 그린란드 해 (R2), 래브라도 해/ 배핀 만 (R3)에서는 해마다 다른 변화 양상을 보이고 있다 (그림 23).

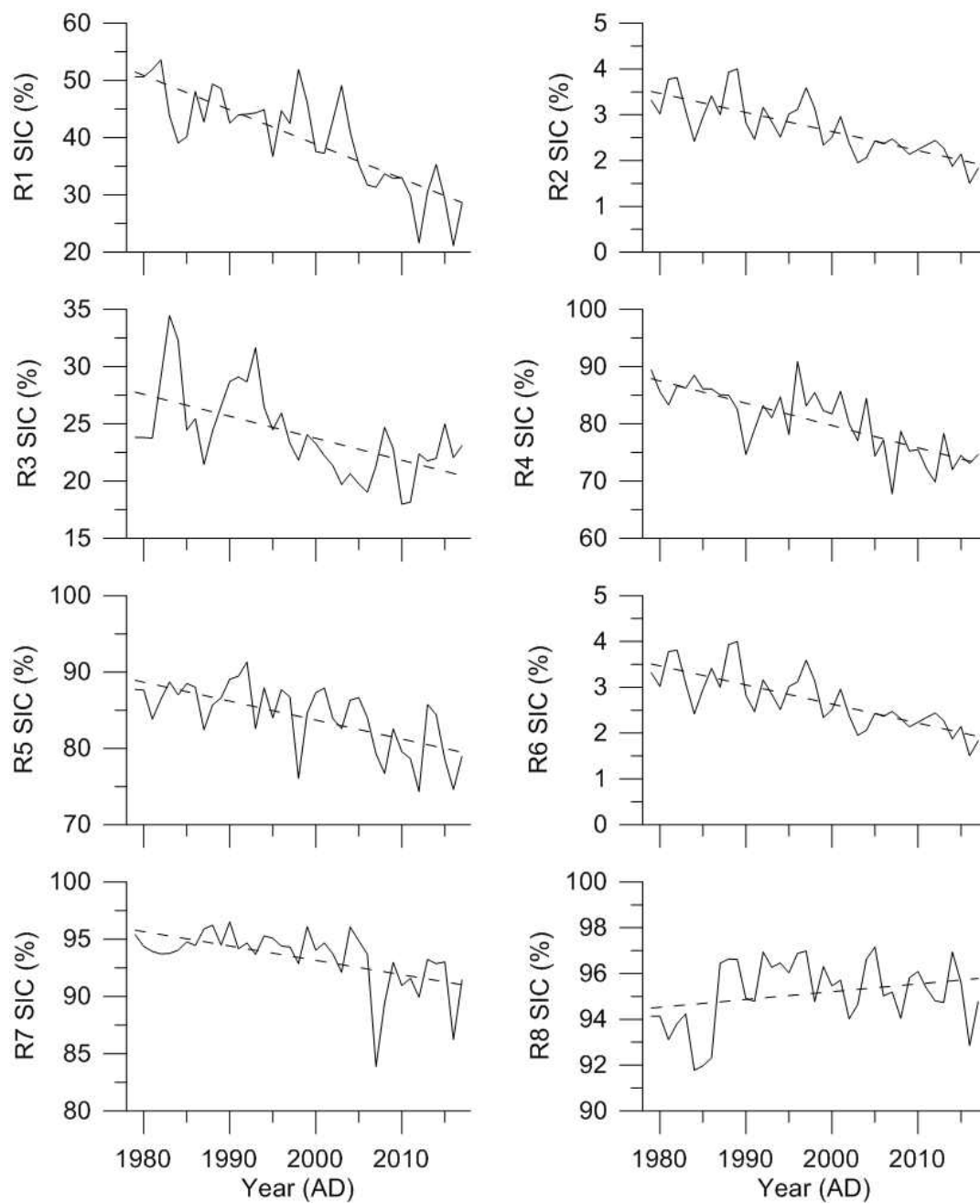


그림 23. 해역 별 연 평균 해빙 농도 변화

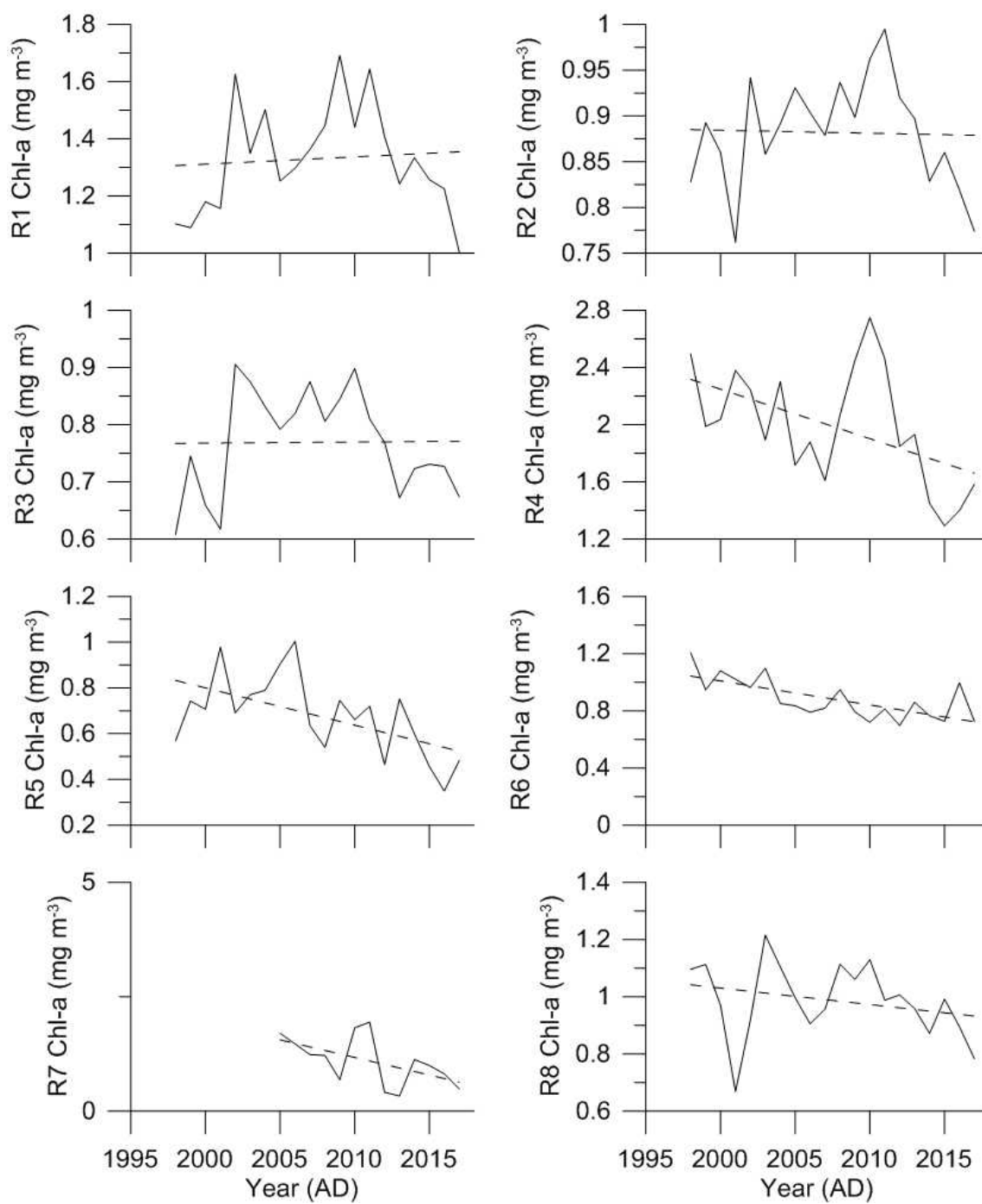


그림 24. 해역별 1차 생산성 (엽록소) 변화

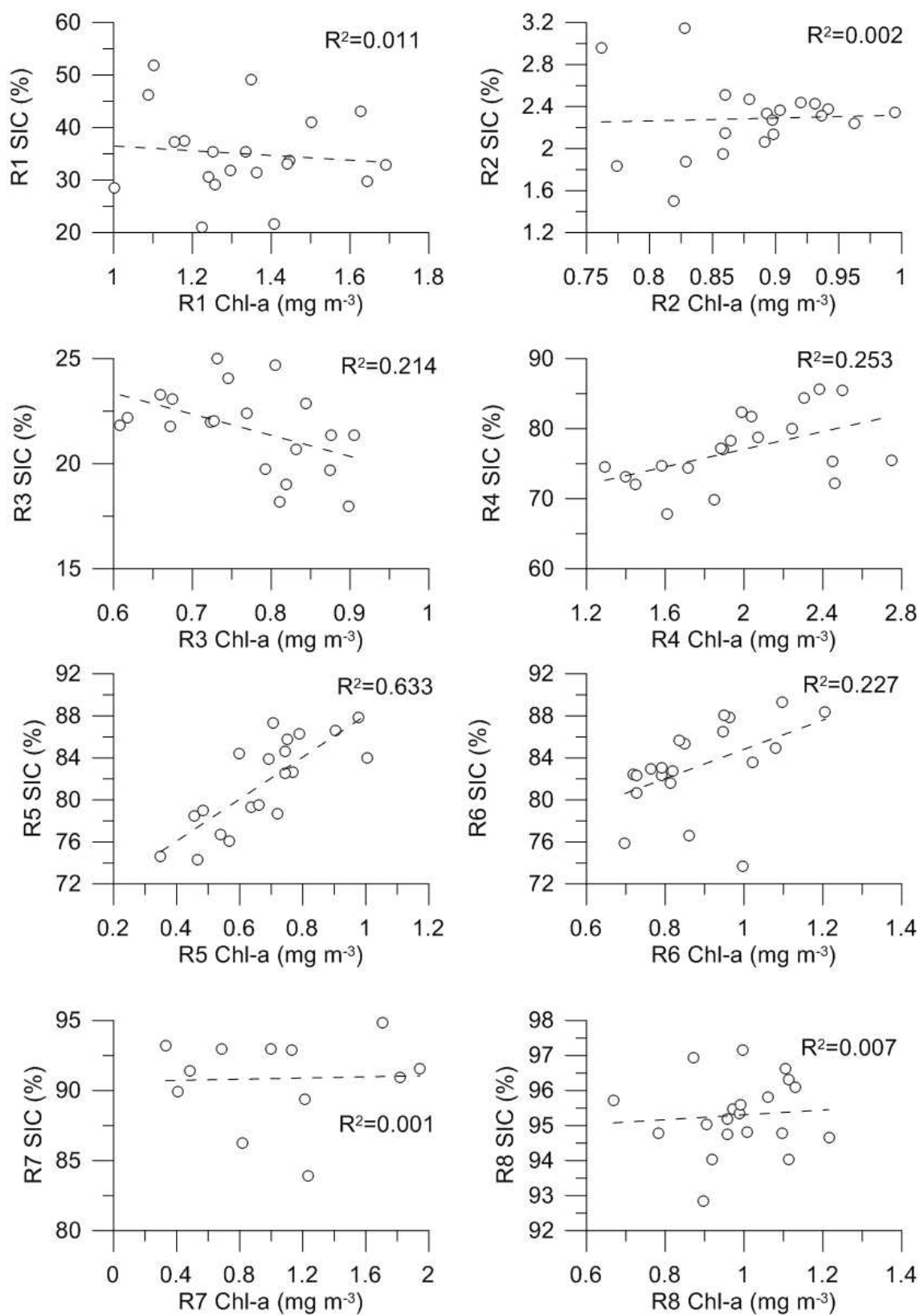


그림 25. 해역별 연 평균 해빙 농도와 1차 생산성 상관관계

그림 24를 보면 해역별로 해빙분포와 해양 생태계 1차 생산성과의 연관성이 각각 다르게 나타나고 있다 (그림 24). 척치/베링 해 (R5)에서는 해빙분포와 1차 생산성 간에 $r^2 = 0.633$ 의 상관도를 보여 연관성이 가장 높게 나타났으며, 래브라도 해/배핀만 (R3), 라테브/동 시베리아 해 (R4), 중앙 북극해 대서양 해역 (R6) 등에서도 각각 $r^2 = 0.214, 0.253, 0.227$ 등으로 높게 나타났다 (그림 22). 반면, 중앙 북극해의 태평양 해역 (R7)과 캐나다 해역 (R8), 바렌츠/카라 해 (R1), 그린란드 해 (R2) 등에서는 해빙분포와 1차 생산성 간의 상관도가 $r^2 < 0.01$ 로 서로 연관성이 없는 것으로 나타났다 (그림 22). 따라서 해빙 프록시 중 해양생물 기원 원소의 경우, 각 프록시가 지시하는 기원지에 대한 조사가 수행되어야 정확한 해빙분포 변화기록을 복원할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 그린란드 주상 눈 시료 빙설 프록시와 해역별 해양환경 변화 비교

NEEM 주상 눈 시료의 빙설 프록시와 해역별 해양환경 간의 상관관계를 살펴보면 MSA와 I가 주변 해역의 해빙 농도와 높은 연관성을 보이는 것으로 나타났다 (표 4). MSA는 척치/베링 해, 중앙 북극해 캐나다 해역과 각각 $r = -0.71, r = -0.70$ 의 상관관계를 보이며, I는 그린란드 해, 라테브/동 시베리아 해의 해빙 농도와 각각 $r = -0.88, r = 0.71$ 의 상관관계수 값을 보이고 있다. MSA와 I는 모두 해양 플랑크톤에 의해 대기 중으로 방출되는 원소라는 점을 고려할 때, 이들 원소가 관련 해역의 해빙 농도와 음의 상관 관계를 보이는 것은 해빙이 감소하면서 식물 플랑크톤에서 대기 중으로 방출되는 I가 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

표 4. NEEM 주상 눈 시료 빙설 프록시와 해역별 연 평균 해빙 농도와 상관관계수

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Na ⁺	-0.01	0.31	-0.19	-0.52	-0.46	0.17	-0.50	-0.67
Cl ⁻	-0.05	-0.20	-0.24	-0.40	0.24	-0.49	0.03	0.18
MSA	-0.46	0.53	0.37	-0.11	-0.71	0.01	-0.51	-0.70
Br	-0.32	0.32	-0.54	0.20	0.36	-0.52	0.30	0.07
I	0.52	-0.88	-0.02	0.71	0.31	0.23	0.65	-0.02

반면, 라테브/ 동 시베리아 해의 해빙 농도와 NEEM 주상 눈 시료의 I가 양의 상관관계를 보이고 있다. Golden et al. (1998)에 따르면 해빙이 생성될 때 하부

에 집적되어 있던 요오드가 해빙의 온도가 상승하면서 해빙 내에 생성되는 수로를 통해 대기 중으로 방출되면서 대기 중 요오드의 농도가 증가하는 것으로 보고된 바 있다. 또한, 남극의 다양한 지역에서 MSA와 같은 생물기원 해빙 프록시가 겨울철 해빙의 면적과 비례하는 양상을 보이는 것으로 확인된 바 있다 (Abram et al., 2013). 이로 미루어 볼 때, 라테브/ 동 시베리아 해의 해빙 농도와 NEEM 주상 눈시료의 요오드 농도가 양의 상관 관계를 보이는 것은 겨울철 해빙 면적과 연관이 있는 것으로 추측된다.

생물기원 해빙 프록시와 해빙 농도 간 양의 상관관계는 EGRIP 주상 눈 시료에서 더욱 뚜렷하게 나타난다 (표 5). EGRIP 주상 눈 시료의 프록시 변화를 살펴보면, MSA, Br, I 모두 라테브/ 동 시베리아 해의 해빙 농도와 각각 $r=0.87$, $r=0.90$, $r=0.75$ 의 높은 양의 상관관계를 보인다 (표 5). 한 가지 특이한 것은 NEEM 주상 눈 시료에서 요오드의 농도 변화가 그린란드 해 해빙 농도와 음의 상관관계를 보인 것과는 달리 EGRIP 주상 눈 시료에서는 MSA와 Br이 그린란드 해 해빙 농도와 높은 양의 상관관계를 보이고 있다는 점이다. 이러한 지역적인 편차는 해빙 프록시가 연구 지역으로 이동하는 기작과 연관이 있는 것으로 추측되며, 이에 대한 연구가 추가로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 그린란드 북부에서 시추한 주상 눈시료의 해빙 프록시는 주로 그린란드 해와 라테브/ 동 시베리아 해의 해빙 분포를 잘 지시하고 있는 것으로 확인되었다. 그러나 본 과제에서 4~5년의 단기적인 자료만을 비교 분석하였기 때문에 보다 정확한 연관성을 파악하기 위해서는 위성 자료 전반을 비교할 수 있는 빙하 프록시 기록 복원 연구가 추가되어야 할 것이다.

표 5. EGRIP 주상 눈 시료 빙설 프록시와 해역별 연 평균 해빙 농도와의 상관계수

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Na ⁺	-0.29	-0.16	0.61	-0.05	-0.55	0.23	-0.08	-0.19
Cl ⁻	-0.63	-0.19	0.75	-0.04	-0.81	-0.05	-0.32	-0.46
MSA	0.23	0.88	0.08	0.87	0.55	-0.10	0.55	0.08
Br	0.27	0.93	0.25	0.90	0.50	0.06	0.65	0.13
I	0.33	0.65	-0.49	0.75	0.77	-0.27	0.41	0.09

제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 목표달성도

- ☐ 현재까지 이루어진 남, 북극 빙설시료의 해빙분포 변화기록 복원을 위한 프록시 개발 현황, 연구 동향 및 각 프록시의 특성을 파악
- ☐ 그린란드 빙설시료 내 해양 프록시의 지역적 편차 확인을 위해 EGRIP 심부빙하 코어 시추 캠프에서 3.2m 주상 눈 시료 및 9m 편 코어 시료 확보
- ☐ NEEM 주상 눈 시료와 EGRIP 주상 눈 시료의 연대 추정 및 Na^+ , Cl^- , MSA, Br, I 등 현재까지 알려진 해양 프록시 변화 기록 복원
- ☐ 바렌츠/카라 해, 그린란드 해, 래브라도 해/배핀 만, 라테브/동 시베리아 해, 척치/베링 해, 중앙 북극해 대서양, 태평양, 캐나다 해역 등 북극해의 해역별 과거 30년간 해빙 분포, 표층 수온 및 1차 생산성 변화 등의 해양 환경변화 위성 자료 확보
- ☐ 그린란드 주상 눈 시료의 해양 프록시 기록과 해역별 위성자료 간의 교차 비교를 통해 각 주상 눈 시료의 해양 프록시와 해역별 해양 환경변화 연관성 파악

제 2 절 관련분야에의 기여도

- ☐ 북극해 해빙 예측의 정확도 향상을 위해 북극해 해빙 분포 연구 시 해역별 변화 기록 복원 및 통합을 통한 공간적 고해상도 연구의 필요성 시사
- ☐ 현재 국제 공동 연구로 수행되고 있는 그린란드 NEEM, EGRIP 빙하코어 시추 및 연구 프로젝트의 빙하 프록시 자료 해석을 위한 보조 자료 제공
- ☐ 그린란드 내 지역적 편차에 따른 빙설 시료의 프록시 변화 양상 확인 및 다수의 빙설코어 연구를 통한 북극해 전반에 걸쳐 대기/해양 환경 변화 기록 복원 연구의 필요성 제시

제 5 장 연구개발 결과 활용계획

- 본 과제에서 확보한 EGRIP 편 코어 시료를 그린란드 NEEM 천부 빙하코어 시료와 연계하여 과거 30년간의 위성 자료 전반에 걸친 해역별 변화 기록과 그린란드 빙설 시료 내 해양 프록시 변화기록의 비교 심화 연구를 수행하고 황 동위원소 비, 셀레늄 동위원소 비 등 신규 동위원소 빙설 프록시 개발 연구에 활용
- 본 과제에서 파악한 그린란드 주상 눈 시료 해양 프록시와 해역별 해양 환경 연관성을 현재 극지연구소에서 수행하고 있는 그린란드 빙하코어를 이용한 과거 환경변화 기록 복원 연구의 해양 환경 프록시 자료 해석을 위한 보조 자료로 활용
- 향후, 북극 지역에서 빙설 시료를 추가로 확보하여 북극해 전반에 걸친 시공간적 고해상도 변화 기록 복원 시 비교 자료로 활용



제 6 장 참고문헌

- Abram, N.J., Mulvaney, R., Wolff, E.W., Mudelsee, M., 2007, Ice core records as sea ice proxies: an evaluation from the Weddell Sea region of Antarctica. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112, D15101.
- Abram, N.J., Wolff, E.W., Curran M.A.J., 2013, A review of sea ice proxy information from polar ice cores. *Quaternary Science Reviews*, 79, 168-183.
- Becagli, S., Castellano, E., Cerri, O., Curran, M., Frezzotti, M., Marino, F., Morganti, A., Proposito, M., Severi, M., Traversi, R., Udisti, R., 2009, Methanesulphonic acid (MSA) stratigraphy from a Talos Dome ice core as a tool in depicting sea ice changes and southern atmospheric circulation over the previous 140 years. *Atmospheric Environment*, 43 (5), 1051-1058.
- Cavalieri, D.J., Parkinson, C.L., Gloersen, P., Zwally, H.J., 1996, updated yearly, Sea ice concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado, USA, NASA National Snow and ice Data Center Distributed Active Archive Center.
- Criscitiello, A.S., Das, S.B., Evans, M.J., Frey, K.E., Conway, H., Joughin, I., Medley, B., Steig, E.J., 2013, Ice-sheet record of recent sea-ice behaviour and polynya variability in the Amundsen Sea, West Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1-13.
- Curran, M.A.J., van Ommen, T.D., Morgan, V.I., Phillips, K.L., Palmer, A.S., 2003, Ice core evidence for Antarctic sea ice decline since the 1950s. *Science*, 302, 1203-1206.
- Fischer, H., Werner, M., Wagenbach, D., Schwager, M., Thorsteinsson, T., Wilhelms, F., Kipfstuhl, J., Sommer, S., 1998, Little ice age clearly recorded in northern Greenland ice cores. *Geophysical Research Letters*, 25 (10), 1749-1752.
- Fischer, H., 2001, Imprint of large-scale atmospheric transport patterns on

- sea-salt records in northern Greenland ice cores. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 106 (D20), 23977-23984.
- Fischer, H., Siggaard-Andersen, M.-L., Ruth, U., Rothlisberger, R., Wolff, E., 2007, Glacial/interglacial changes in mineral dust and sea-salt records in polar ice cores: sources, transport, and deposition. *Reviews of Geophysics*, 45 (1), Rg1002.
- Foster, A.F.M., Curran, M.A.J., Smith, B.T., van Ommen, T.D., Morgan, V.I., 2006, Covariation of sea ice and methanesulphonic acid in Wilhelm II Land, East Antarctica. *Annals of Glaciology*, 44, 429-432.
- Fundel, F., Fischer, H., Weller, R., Traufetter, F., Oeter, H., Miller, H., 2006, Influence of large-scale teleconnection patterns on methane sulfonate ice core records in Dronning Maud Land. *Journal of Geophysical Research*, 111, D04103.
- Golden, K.M., Ackey, S.F., Lytle, V.I., 1998, The percolation phase transition in sea ice, *Science*, 282, 2238-2241.
- Hutterli, M.A., Crueger, T., Fischer, H., Andersen, K.K., Raible, C.C., Stocker, T.F., Siggaard-Andersen, M.L., McConnell, J.R., Bales, R.C., Burkhardt, J.F., 2007, The influence of regional circulation patterns on wet and dry mineral dust and sea salt deposition over Greenland. *Climate Dynamics*, 28 (6), 635-647.
- Iizuka, Y., Hondoh, T., Fujii, Y., 2008, Antarctic sea ice extent during the Holocene reconstructed from inland ice core evidence. *Journal of Geophysical Research*, 113 (D15114), 1-8.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Ed) Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen S.K., Boschung, J.B., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 1535 pp.
- Jonsell, U., Hansson, M.E., Siggaard-Andersen, M.-L., Steffensen, J.P., 2007,

- Comparison of northern and central Greenland ice core records of methanesulfonate covering the last glacial period. *Journal of Geophysical Research*, 112, D14313.
- Kang, J.-H., Hwang, H., Hong, S.B., Hur, S.D., Choi, S.-D., Lee, J., Hong, S., 2015, Mineral dust and major ion concentrations in snowpit samples from the NEEM site, Greenland, 120, 137-143.
- Kinnard, C., Zdanowicz, C.M., Fisher, D.A., Isaksson, E., de Vernal, A., Thompson, L.G., 2011, Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years. *Nature*, 479 (7374), 509-U231.
- Koenigk, T., Caian, M., Nikulin, G., Schimanke, S., 2016, Regional Arctic sea ice variations as predictor for winter climate conditions. *Climate Dynamics*, 46, 317-337.
- Kreutz, K.J., Mayewski, P.A., Pittalwala, I.I., Meeker, L.D., Twickler, M.S., Whitlow, S.I., 2000, Sea level pressure variability in the Amundsen Sea region inferred from a West Antarctic glaciochemical record. *Journal of Geophysical Research*, 105 (D3), 4047-4059.
- Lee, K., Hong, S.-B., Lee, J., Chung J., Hur, S.-D., Hong S., 2015, Seasonal variation in the input of atmospheric selenium to northwestern Greenland snow. *Science of the Total Environment*, 526, 49-57.
- Legrand, M., Mayewski, P., 1997, Glaciochemistry of polar ice cores: a review. *Reviews of Geophysics*, 35, 219-243.
- Maritorena, S., d'Andon, O.H.F., Mangin, A., Siegel, D.A., 2010, Merged stellite ocean color data products using a bio-optical model: Characteristics, benefits and issues. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1791-1804.
- Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Twickler, M.S., Whitlow, S., Yang, Q.Z., Lyons, W.B., Prentice, M., 1997, Major features and forcing of high-latitude northern hemisphere atmospheric circulation using a 110,000-year-long glaciochemical series. *Journal of Geophysical Research-Ocean*, 102 (C12), 26345-26366.
- Meyerson, E.A., Mayewski, P.A., Kreutz, K.J., Meeker, D., Whitlow, S.I.

- Twickler, M.S., 2002, The polar expression of ENSO and sea-ice variability as recorded in a South Pole ice core. *Annals of Glaciology*, 35, 430–436.
- Rankin, A.M., Wolff, E.W., Martin, S., 2002, Frost flowers: Implications for tropospheric chemistry and ice core interpretation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107 (D23), 4683.
- Rhodes, R.H., Bertler, N.A.N., Baker, J.A., Steen-Larsen, H.C., Sneed, S.B., Morgenstern, U., Johnsen, S.J., 2012, Little ice age climate and oceanic conditions of the Ross sea, Antarctica from a coastal ice core record. *Climate of the Past*, 8, 1223–1238.
- Schüpbach, S., Federer, U., Kaufmann, P.R., Albani, S., Barbante, c., Stocker, T.F., Fischer, H., 2013, High-resolution mineral dust and sea ice proxy records from the Talos Dome ice core. *Climate of the Past*, 9, 2789–2807.
- Severi, M., Becagli, S., Caiazzo, L., Ciardini, V., Colizza, E., Giardi, F., Mezgec, K., Scarchilli, C., Stenni, B., Thomas, E.R., Traversi, R., Udisti, R., 2017, Sea salt sodium record from Talos Dome (East Antarctica) as a potential proxy of the Antarctic past sea ice extent. *Chemosphere*, 177, 266–274.
- Souney, J.M., Mayewski, P.A., Goodwin, I.D., Meeker, L.D., Morgan, V., Curran, M.A.J., van Ommen, T.D., Palmer, A.s., 2002, A 700-year record of atmospheric circulation developed from the Law Dome ice core, East Antarctica. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107 (D22), 4608.
- Spolaor, A., Gabrieli, J., Martma, T., Kohler, J., Björkman, M.B., Isaksson, E., Varin, C., Vallelonga, P., Plane, J.M.C., Barbante, C., 2013, Sea ice dynamics influence halogen deposition to Svalbard. *The Cryosphere*, 7, 1645–1658.
- Spolaor, A., Vallelonga, P., Gabrieli, J., Martma, T., Björkman, M.P., Isaksson, E., Cozzi, G., Turetta, C., Kjær, H.A., Curran, M.A.J., Moy, A.D., Schönhardt, A., Blechschmidt, A.-M., Burrows, J.P., Plane, J.M.C., Barbante, C., 2014, Seasonality of halogen deposition in polar snow and ice, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 9613–9622.
- Spolaor, A., Open T., McConnell, J.R., Maselli, O.J., Spreen, G., Varin, C., Kirchgeorg, T., Fritzsche, D., Saiz-Lopez, A., Vallelonga, P., 2016a,

- Halogen-based reconstruction of Russian Arctic sea ice area from the Akademii Nauk ice core (Severnaya Zemlya). *The cryosphere*, 10, 245–266.
- Spolaor, A., Vallelonga, P., Turetta, C., Maffezzoli, N., Cozzi, G., Gabrieli, J., Barbante, C., Goto-Azuma, K., Saiz-Lopez, A., Cuevas, C.A., Dahl-Jensen, D., 2016b, Canadian Arctic sea ice reconstructed from bromine in the Greenland NEEM ice core.
- Udisti, R., Dayan, U., Becagli, S., Busetto, M., Frosini, D., Legrand, M., Lucarelli, F., Preunkert, S., Severi, M., Traversi, R., Vitale, V., 2012, Sea spray aerosol in central Antarctica. Present atmospheric behaviour and implications for paleoclimatic reconstructions. *Atmospheric Environment*, 52, 109–120.
- Wolff, E.W., Fischer, H., Fundel, F., Ruth, U., Twarloh, B., Littot, G.C., Mulvaney, R., Rothlisberger, R., de Angelis, M., Boutron, C.F., Hansson, M., Jonsell, U., Hutterli, M.A., Lambert, F., Kaufmann, P., Stauffer, B., Stocker, T.F., Steffensen, J.P., Bigler, M., Siggaard-Andersen, M.L., Udisti, R., Becagli, S., Castellano, E., Severi, M., Wagenbach, D., Barbante, C., Gabrieli, P., Gaspari, V., 2006, Southern Ocean sea-ice extent, productivity and iron flux over the past eight glacial cycles. *Nature*, 440 (7083), 491–496.

발표자	평가의견
이강현 선임연구원	○ 성과활용 방안 및 기대효과 - 프록시가 제대로 개발된다면 의미있는 연구를 위한 수단으로 활용될 것으로 기대함 - 그린란드 빙설 시료의 해양 프록시 분석 및 위성자료와의 비교분석을 통해 북극권 해빙분포 예측의 정확도를 향상시키고 고해상도의 비교 분석 연구의 기초 자료로 활용 가능할 것으로 기대됨 - 관측 이전 시기의 해빙자료 복원에 유용할 것으로 보임 ○ 최종 보고서에 반영할 내용 - 연구개발 목표중 하나인 ‘신규 프록시 분석기술 확보’ 달성율이 낮음. 주요 연구 변경 사유를 최종보고서에 제시 필요 - 단순한 상관관계수에 근거한 해석을 지정한 것 이외에 그에 대한 해석 필요 - 권역을 분할하지 않고 전체 북극해 해빙 농도, 클로로필 농도와의 관계 분석 필요 - 프록시의 미개발 사유에 대한 보다 명확한 설명 필요 - 본 연구과제에서 얻어진 자료로 해석된 해빙자료 표현 필요 ○ 기타 종합의견 - 의도한 연구목표인 과거의 해빙분포를 파악하기 위한 프록시를 개발 하려는 시도가 제대로 이루어지지 않은 것으로 판단됨. 추후 개선된 방법으로 연구필요 - 시공간적 과거 해빙분포를 이해하기 위해한 사전 조사로 북극해빙예측사업단과의 협업이 필요할 것으로 생각됨 - 빙설 시료로 수행할 수 있는 연구 범위를 넘어선 연구로 판단됨(연구 목적의 정확한 설명 부족) - 재분석 자료를 이용한 그린란드 지역 대기 순환에 대한 분석 필요 - 연구 목표와 연구 결과의 일치성 부족

연구·정책지원사업 최종 결과보고서 평가의견 반영사항

창의연구사업 구분	신진연구원 지원과제		
과제명	해빙 분포의 시공간적 고해상도 변화 기록 복원을 위한 프록시 개발(계정번호:PE18270)	연구기간	2018.3.1.~2018.12.31.
연구책임자	이강현 선임연구원	연구비(직접비)	30백만원
과제개요, 연구성과 및 최종 결과보고서 평가의견 반영 사항			
(1) 과제목적 - 본 과제의 주요 목적이 북극의 빙설 프록시가 북극해의 특정 해역에 대한 변화를 지시하는지를 확인하는 것이었던 바, 과제명이 부적절하였다고 사료됨. (2) 최종성과 - 본 연구의 성과는 그린란드 빙설시료가 특정 해역에 대해 보다 명확한 상관성을 보인다는 것을 확인하였으며, 이러한 상관관계에 대한 메커니즘 규명을 위한 후속 연구가 필요한 것으로 사료됨. (3) 성과의 향후 연구소 활용방안 또는 기대효과 - 본 연구를 통해 그린란드 빙설시료의 프록시가 북극해의 특정 해역의 해빙변화를 지시하는 것으로 확인된 바, 향후 그린란드 빙하코어로부터 해당 해역의 장주기에 걸친 해빙변화를 복원할 수 있을 것으로 기대함. (4) 최종 결과보고서에 평가의견 반영 사항			
평가의견		반영사항	비고
연구개발 목표중 하나인 '신규 프록시 분석기술 확보' 달성율이 낮음. 주요 연구 변경 사유 기술		제3장 1절 연구방법에서 신규 프록시 분석기술을 확보하는데 실패한 사유와 향후 계획에 대해 기술함.	연구보고서 p.24-25 참조
단순 상관계수에 근거한 해역을 지정한 것 이외에 그에 대한 해석 필요		제3장 2절 연구결과에서 빙설시료의 해양 프록시와 해역별 변화의 상관 관계에 대한 해석을 제시함.	연구보고서 p.35-36 참조
권역을 분할하지 않고 전체 북극해 해빙 농도, 클로로필 농도와와의 관계 분석 필요		현재 북극해 전반에 걸친 환경요소 변화는 주요기본과제 (PE19170, 연구책임자: 하선용)로 수행되고 있는 바, 상기 연구 결과가 도출 되는대로 비교 연구를 수행할 예정임.	
프록시 미개발 사유에 대한 보다 명확한 설명 필요		제3장 1절 연구방법에서 신규 프록시 분석기술을 확보하는데 실패한 사유와 향후 계획에 대해 기술함.	연구보고서 p.24-25 참조
본 연구과제에서 얻어진 자료로 해석된 해빙자료 표현 필요		본 연구의 결과가 수년간의 단기간 자료인 바, 추후 위성자료 전반에 걸친 후속연구를 통해 빙하코어를 이용한 해빙자료 복원 추진 예정임.	연구보고서 p.36 참조

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

극지연구소