

척치해 및 로스해에서 활용 가능한
고해빙 프록시 개발 및 검증

Paleo-sea ice proxy development and validation
in the Chukchi Sea and the Ross Sea



한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “척치해 및 로스해에서 활용 가능한 고해빙 프록시 개발 및 검증” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 7. 14.



연구책임자 : 김정현
참여연구원 : 남승일
극지연구소 : 갈종구
“ : 박광규
“ : 손영주
“ : 아사히
“ : 조영진
“ : 주영지

보고서 초록

과제관리번호	PE16490	해당단계 연구기간	2016.12.15. - 2017.05.31		단계 구분	1단계 / 1단계	
연구사업명	중 사 업 명	기본연구사업(정책지원사업)					
	세부사업명	기본연구사업(정책지원사업)					
연구과제명	중 과 제 명						
	세부(단위)과제명	척치해 및 로스해에서 활용 가능한 고해빙 프록시 개발 및 검증					
연구책임자	김정현	해당단계 참여연구원수	총 : 8 명 내부 : 2 명 외부 : 6 명		해당단계 연구비	정부: 39,970 천원 기업: 천원 계: 천원	
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소		참여기업명				
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :				
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)						보고서 면수	27
1. 현 해양환경에서의 지질생체지표 분포 특성 연구 - 인천-놈-서북극 이동 항해 구간해역의 해빙조류 기원 지질생체지표 분포 특성 연구 - 인천-놈-서북극 이동 항해 구간해역의 부유 식물플랑크톤 기원 지질생체지표 분포 특성 연구 2. 서북극 해역에서 지질생체지표를 이용한 고환경 복원 연구 - 퇴적물 시료의 연대 결정 - HBIs 분석을 통한 해빙 변화 복원 - Sterols 분석을 통한 부유 식물플랑크톤의 변화 복원 3. 국제 공동 연구 수행 - 로스해 및 척치해의 HBIs 및 sterols 분포 연구 (영국 플리머스대학) - 척치해 코어 퇴적물에서 지질생체지표 연구 (미국 버드극지연구센터) - 북대서양 코어 퇴적물에서 지질생체지표 연구 (프랑스 보르도대학) - 남극 코어 퇴적물에서 지질생체지표 연구 (프랑스 보르도대학) 4. 국제 워크숍 개최 (2017년 5월) - 일시 : 2017년 5월 - 장소 : KOPRI, 북극곰 세미나실 - 연사 : Jung Hyun Kim (KOPRI, Korea) Lukas Smik (Plymouth University, UK) Jong-Ku Gal (KOPRI/Hanyang University, Korea) Carne Huguet (Los Andes University, Colombia) 5. 국내/국제 학술지 투고 - 국내 학술지 (총2편) : accepted (1편), 투고 완료 (1편) - 국제 학술지 (총2편) : in preparation (2편)							
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	해빙 복원, HBIs, OH-GDGTs, 스테롤, 지질생체지표					
	영 어	Reconstruction of sea ice, HBIs, OH-GDGTs, Sterols, Lipid biomarkers					

요 약 문

I. 제 목

- 척치해 및 로스해에서 활용 가능한 고해빙 프록시 개발 및 검증

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 본 과제는 1) 현 환경에서의 해빙 프록시와 관련된 지질생체지표 분포 특성 연구와 2) 해빙 프록시의 과거 해빙 변화 복원 활용 가능성 검증을 그 주요 연구 목표로 하였음
- 과거 해빙 변화 복원은 미래 해빙 변화 예측의 중요한 기본 자료를 제공할 수 있음
- 최근 해빙 기원의 지질생체지표 및 부유 식물플랑크톤 기원의 지질생체지표를 활용하여 정량적으로 과거 해빙 변화를 복원하는 연구가 진행되고 있음

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 수층 입자성 부유물질 및 표층 퇴적물을 이용하여 HBIs, sterols 및 OH-GDGTs 중점적으로 분석
- 코어 퇴적물을 이용한 척치해역에서 고해빙 기록 복원

IV. 연구개발결과

- 2015 아라온 이동 항해 구간에서 채집한 입자성 부유물질 연구를 통해 PIP25 index에 brassicasterol, dinosterol 및 HBI triene의 부유 식물플랑크톤 생체지표를 사용할 경우 서로 다른 경향성을 나타낼 수 있음을 확인
- 척치해에서 획득한 물티코어 퇴적물에 해빙관련 지질생체지표를 활용한 과거 150년간 해빙 변화 복원
- 2015 아라온 이동항해 구간에서 채집한 입자성 부유물질 연구를 통해 새로운 표층 영양염 프록시 개발
- 척치해 및 로스해 퇴적물에서 OH-GDGTs 검출됨을 확인하였고, 이를 바탕으로 고수온 복원에도 활용될 수 있는 근거를 마련하였음
- 국제공동연구 돌출

V. 연구개발결과의 활용계획

- 다양한 극지 환경에서 과거 해빙 복원 연구 가능
- 다양한 해양 환경에서 과거 표층 영양염 변화 연구 가능

S U M M A R Y

I. Title

- Paleo-sea ice proxy development and validation in the Chukchi Sea and the Ross Sea

II. Purpose and Necessity of R&D

- The main objectives of this project is 1) investigating the spacial distribution patterns of sea-ice proxy related lipid biomarkers in the modern marine settings and 2) assessing the applicability of the sea-ice proxy for the reconstruction of past sea-ice changes.
- The reconstruction of paleo sea ice changes provides an important baseline information on forecasting future sea ice changes.
- Recent sea-ice related studies attempt to quantitatively reconstruct past sea-ice changes based on sea-ice derived and ice-free derived phytoplankton biomarkers.

III. Contents and Extent of R&D

- Analyzing suspended particulate matter and surface sediments focusing on HBIs, sterols and OH-GDGTs
- Reconstruction of past sea-ice changes in the Chukchi Sea by analysing a sediment core

IV. R&D Results

- The investigation of suspended particulate matter samples collected along a transect from the East Sea to the Bering Sea during the 2015 R/V Araon cruise revealed that the use of brassicasterol, dinosterol, or HBI triene, as strict phytoplankton markers for use with the PIP₂₅ index, might result in misleading outcomes.
- Based on the sea-ice related lipid biomarkers, the sea-ice changes for the last 150 years were reconstructed using a multicore collected in the Chukchi Sea.
- A new surface water nutrient proxy was developed based on long chain diols using suspended particulate matter samples collected along a transect from the East Sea to the Bering Sea during the 2015 R/V Araon cruise.
- OH-GDGTs were detected in the sediments collected in the Chukchi Sea as well as Ross Sea, which hints that these compounds can be used for reconstructing sea surface temperature changes in the Polar Oceans..
- Joint international research projects were developed.

V. Application Plans of R&D Results

- Past sea-ice reconstructions are possible in various polar regions based on the lipid biomarker techniques.
- Past sea surface nutrient reconstructions are possible in various oceanic settings based on the lipid biomarker techniques.

C O N T E N T S

Chapter 1	Introduction	7
Chapter 2	Current R&D Status in Korea and Other Nations	9
Chapter 3	R&D Implementation Contents and Results	10
Chapter 4	Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute	22
Chapter 5	Application Plans of R&D Results	23
Chapter 6	International scientific information obtained during the project ·	25
Chapter 7	References	26

목 차

제 1 장	서론	7
제 2 장	국내외 기술개발 현황	9
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	10
제 4장	연구개발목표 달성도 및 대외기여도	22
제 5 장	연구개발결과의 활용계획	23
제 6 장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	25
제 7 장	참고문헌	26



제 1 장 서론

전 지구적인 기후 변동은 극지 해역에서 해빙의 변화와 밀접한 관계를 가진다. 해빙의 변화는 알베도, 해양-대기 열 교환, 지구 복사 평형을 제어하는 중요한 요인이기 때문이다 (IPCC, 2013). 해빙의 기록은 1980년대 이후부터 위성자료를 통해 획득된 고해상도 자료가 있다. 이 관측결과에 의하면 최근 북극의 해빙은 급격한 변화를 겪고 있다. 하지만 이러한 기록은 지구 기후 변화에 비해 상대적으로 매우 짧은 기간에 해당하기 때문에 지질학적 기록 복원을 위한 기초자료로서는 제약이 따른다. 따라서 극지 해역에서 지질학적 규모의 장기간 해빙의 범위의 정량적인 복원은 기후 변화 기작을 이해하는데 매우 중요하다.

해빙 부착 조류는 해빙의 아래로 투과되는 빛을 이용하여 성장한다. 특히 북극 해양에서 봄철 해빙의 용융이 시작되는 시기에 충분한 광 조건과 영양염 증가 등의 영향으로 인해 대번식을 이룬다. 이들 해빙 부착 조류는 해빙이 용융하고 난 후 빠르게 퇴적되어 해양퇴적물에 해빙의 범위에 대한 기록을 보존하게 된다. 과거 해빙의 기록을 복원하는 방법으로 현미경을 통한 퇴적물 내의 조류 화석을 분석 방법이 있다(예: Gersonde and Zielinski, 2000). 하지만 이들 조류 화석의 퇴적 과정에서 발생하는 분해 및 퇴적물에서 온전한 화석으로 보존되지 못한 경우 현미경 분석이 어렵게 된다.

최근 Belt 등(2007)은 새로운 해빙 프록시를 제안하였다. IP₂₅(Ice proxy with 25 carbon atoms)로 명명된 이 유기분자 생체지표는 highly branched isoprenoid alkenes(HBI)의 하나로 특정위치에 하나의 이중결합을 가진다(그림 1). 이들 IP₂₅의 분포는 해빙이 없는 대양의 식물플랑크톤에서는 검출되지 않았으나 해빙 부착조류 및 해빙이 분포되어 있는 해역의 표층 퇴적물에서는 검출되었다. 이는 북극 해역에서 IP₂₅가 과거 해빙의 기록을 반영 할 수 있음을 말해준다. 이후 IP₂₅ 연구를 통한 과거 해빙 기록 복원 연구가 수행되어 왔다(Massé et al., 2008; Fahl and Stein, 2012; Stein et al., 2012). 하지만 IP₂₅의 농도의 결과를 이용한 과거 해빙의 기록을 복원의 한계가 제시되었다. 최근 Muller 등(2011)은 부유 식물플랑크톤의 생체지표와 IP₂₅의 상대비를 이용한 PIP₂₅ 인덱스를 제시하였다(식 1). 영구 해빙에서는 해빙으로 덮힌 해역임에도 불구하고 IP₂₅의 농도는 매우 낮게 관측된다. PIP₂₅를 활용한 결과는 봄철 해빙의 농도와 상관관계를 나타냈으며 이는 해빙의 분포를 정량적으로 평가 할 수 있음을 말해준다. PIP₂₅ 인덱스에 활용되는 대표적인 부유 식물플랑크톤의 생체지표는 HBI triene, brassicasterol 그리고 dinosterol 등이 있다. 하지만 IP₂₅를 비롯한 부유식물플랑크톤의 생체지표가 해양환경에서 어떠한 분포 특성을 보이는지 이들의 분포를 조절하는 환경적 조절 인자가 어떠한 것인지에 대한 연구는 아직 부족하다.

$$PIP_{25} = \frac{IP_{25}}{IP_{25} + (\text{phytoplankton biomarker} \times c)} \quad (\text{식 1})$$

$$c = \frac{\text{mean IP}_{25} \text{ concentration}}{\text{mean phytoplankton biomarker concentration}}$$

최근 Liu 등(2012)에 의해 처음 보고되었던 hydroxyl glycerol dialkyl glycerol tetraethers(OH-GDGTs)는 고위도 해역에서 다른 GDGTs에 비해 높은 상대비를 보인다 (Huguet et al., 2013). 또한 극지해역에서 OH-GDGTs를 이용한 인덱스가 극지 해역의 수온의 변화를 반영 할 수 있음이 제시 되었으나 극지 해역에서 이를 활용한 연구는 아직 부족한 실정이다(Huguet et al., 2013; Fietz et al., 2013).

본 연구는 북극 및 남극에서 과거 해빙의 기록 및 수온 복원 연구를 위해 해빙 부착 미세조류와 부유 식물플랑크톤의 생체지표 분포 특성을 파악하고 과거 해빙의 변화 기록을 복원을 주요 목적으로 하였다. 또한 극지 해역에서 OH-GDGTs의 해빙 관련 생체지표로서 활용 가능성을 파악하고자 하였다.

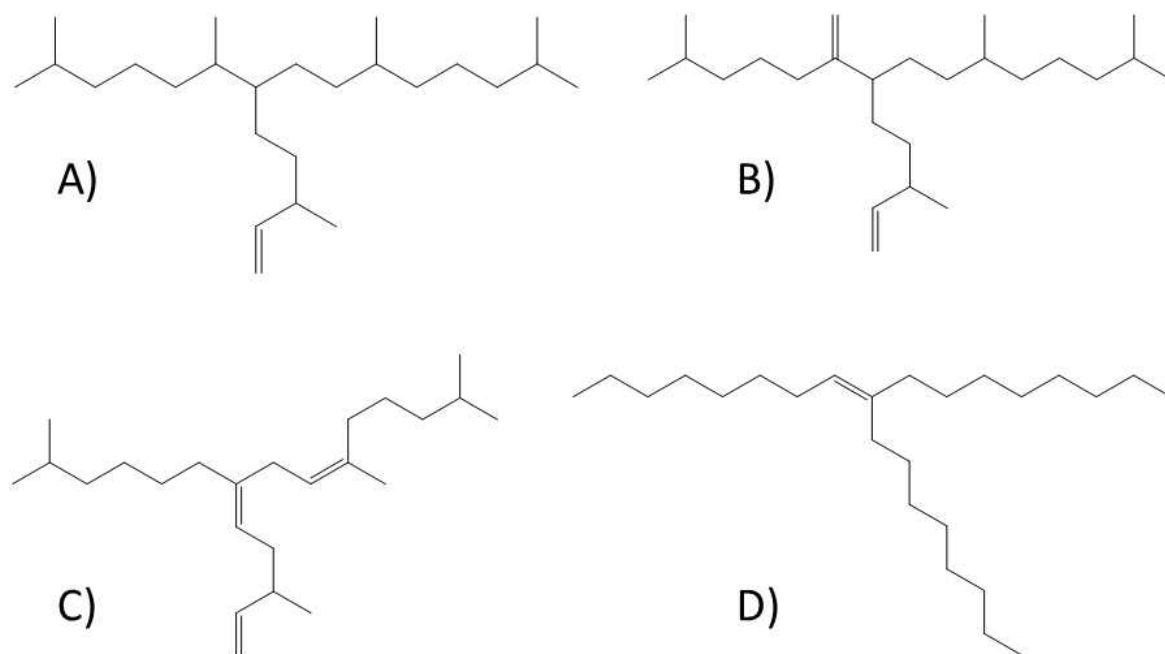


그림 1. HBIs의 화학구조 (A) IP25, (B) HBI diene, (C) HBI triene, (D) 9-OHD (internal standard).

제 2 장 국내외 기술개발 현황

해양 고수온 복원 연구에 수십 년간 활용 되어 온 alkenone의 경우 국내의 지질생체지표 연구 인력의 부족으로 인해 활발한 연구 수행이 어려운 실정이다. 따라서 국내의 연구는 고환경 복원 연구에 직접적인 활용 보다는 연구 기법 개발 및 해양 환경에서의 변동과의 상관성 연구 등이 선행되어야 한다. 특히 최근에 해빙 기록 복원 연구 활용의 가능성이 밝혀진 IP25의 경우 국내에서 연구 사례는 극지연구소의 지원으로 수행된 단 1건의 연구에 불과하다.

동위원소 분석 기법 개발로 인해 분자 수준의 동위원소 연구는 최근 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나이다. 이를 활용하여 해양 유기물 기원의 변화 연구 및 생물의 대사 작용에 대한 메커니즘 연구, 환경 내 유기물 순환 연구 등 다양한 분야에 활용됨으로써 그 활용 가치는 점점 증가하고 있다. 유기분자 생체지표 연구 분야에서 동위원소 연구는 유기물 순환 및 그 메커니즘을 밝히는데 결정적인 증거를 제시해 주고 있다. 그럼에도 불구하고 국내에 이러한 연구 기술의 보유 및 연구 인력이 확보된 연구팀이 매우 부족하기 때문에 아직까지 분자 단위위의 동위원소비를 활용한 연구 사례 또한 극히 드물다.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

가. 현 해양환경에서 유기분자생체지표의 분포특성 파악

1. 입자성 부유물질 조사

A. 해빙 프록시(Sea ice proxy)

쇄빙선 아라온의 이동항해 구간에서 유기분자 생체지표의 분포특성을 파악하기 위해 입자성 부유물질을 채집하였다(그림 2). 남-북 방향의 이동항해 구간에서 위도 약 2도 간격으로 입자성 부유물질 채집을 실시하였다. 약 5 m 깊이에서 채수 펌프를 이용하여 50-100 L의 해수를 여과 하였다. 여과된 시료는 알루미늄 호일에 싼 후 냉동 보관 후 실험실로 운반하였다.

실험실로 운반된 시료는 동결건조 하여 Dichloromethane(DCM)과 methanol 2:1(v/v) 혼합 용액을 넣은 후 초음파 파쇄기에 넣어 15분간 반응 하였다. 추출된 지질은 silica gel glass pipette column을 이용하여 극성에 따라 apolar fraction 과 polar fraction으로 분리하여 생체지표 분석을 실시하였다(그림 3).

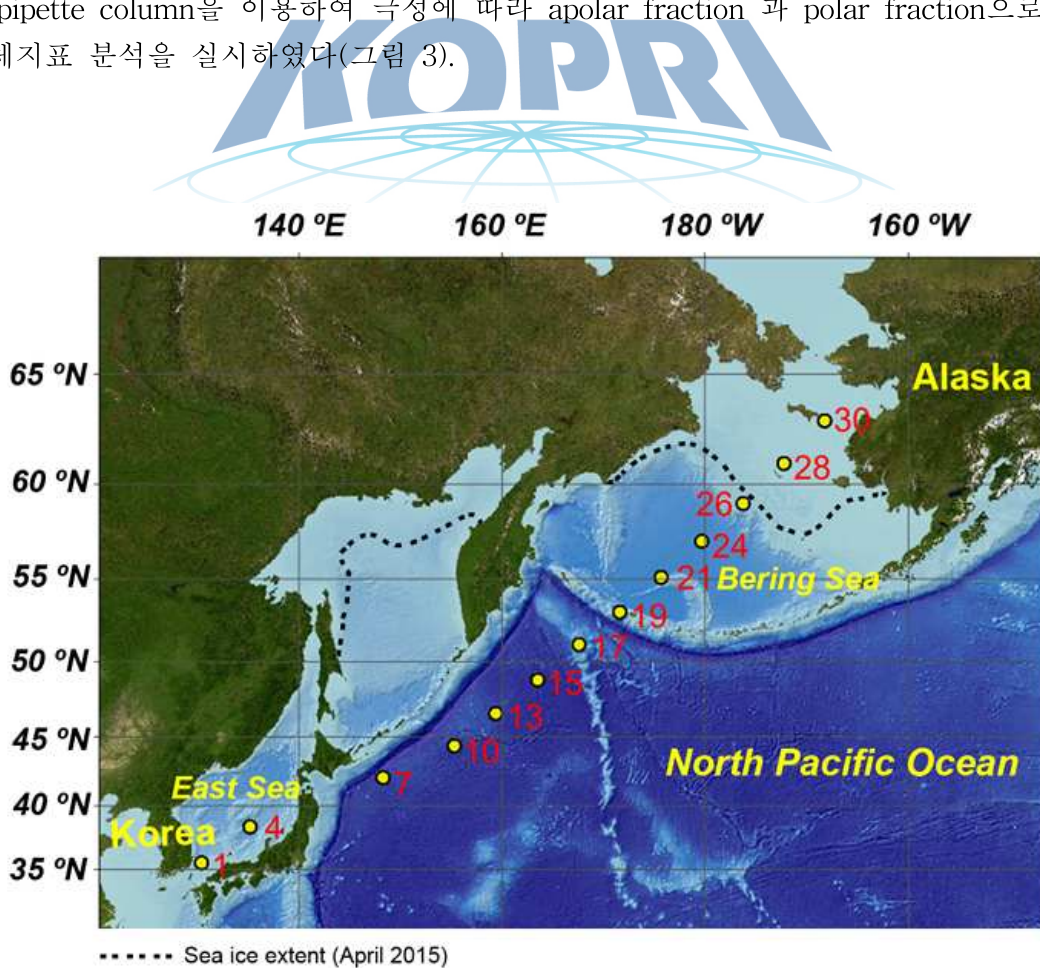


그림 2. 2015년 아라온호 이동 항해 구간에서 채집한 부유성 입자시료 정점.

GC/MS 분석에는 Agilent 7890A GC 와 연결된 5975C mass spectrometer detector (MSD) (Plymouth University)을 이용하여 분석 하였다. Agilent HP-5ms column (30 m × 0.25 mm × 0.25 mm)를 이용하였으며 GC 승온은 40 ~ 300°C 까지 분당 10°C의 비율로 승 온 후 10분간 유지하였다.

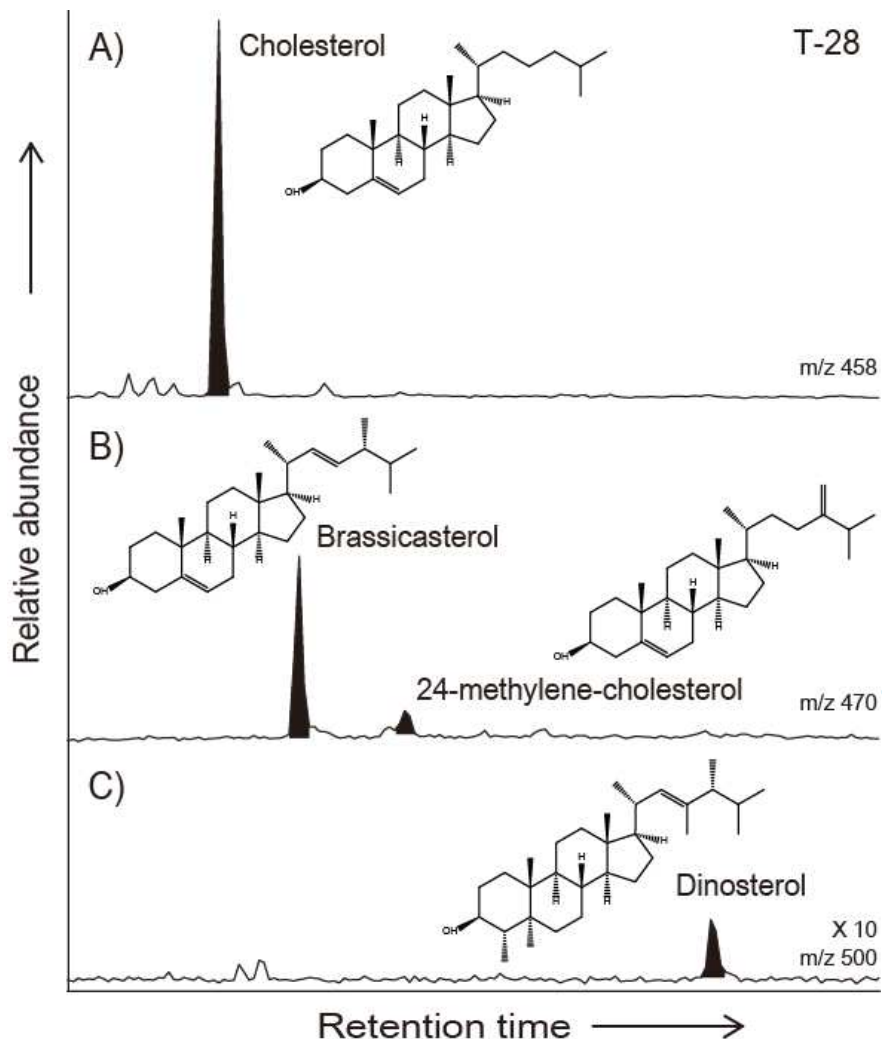


그림 3. T-28 정점에서 검출된 스테롤 크로마토그램 예.

이동 항해 정점에서 IP₂₅는 검출되지 않았다(그림 4). 이는 연구가 수행된 시기가 7월에 수행되었기 때문에 이미 해빙이 후퇴하고 난 후이기 때문인 것으로 판단된다. 해빙의 용융이 일어나는 봄철에 해빙 미세조류는 대발생을 일으킨다. 이후 해빙이 용융이 되면 해빙 부착조류는 해저에 퇴적되기 때문이다. 이에 반해 HBI triene은 이동항해 일부 구간에서만 검출이 확인 되었다. 이는 HBI triene이 대양의 부유성 식물플랑크톤에 의해 생성됨을 말해 준다. 반면 모든 연구 정점에서 brassicasterol과 dinosterol이 검출되었다. 분석된 스테롤 중에서는 brassicasterol이 가장 높은 농도를 보였다.

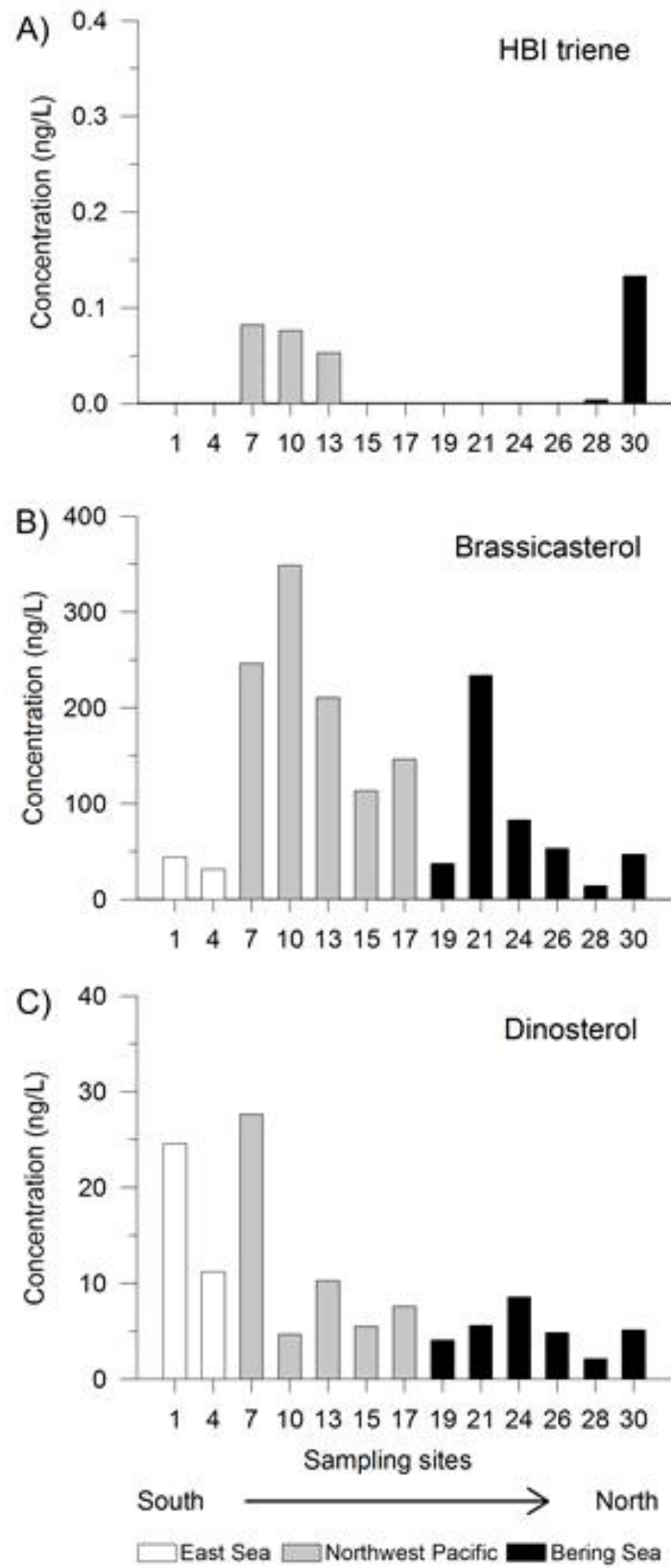


그림 4. 이동항해 구간에서 채집한 부유성 입자물질에서 검출된 HBI triene과 스테롤 분포도.

분석된 스테롤 중 brassicasterol과 cholesterol, 24-methylenecholesterol은 높은 양의 상관관계를 나타냈으나 dinosterol 및 HBI triene 과는 다른 경향을 나타냈다(그림 5). PIP₂₅ 인덱스에 사용되는 부유 식물플랑크톤 생체지표들이 해양 환경에서 각각 다른 분포 경향을 나타내는 것은 PIP₂₅ 인덱스 사용시 영향을 줄 수 있음을 암시한다. 때문에 이들 생체지표의 분포 특성이 해양환경에서 어떠한 요인들에 의해 조절되는지는 추가적인 연구가 필요하다.

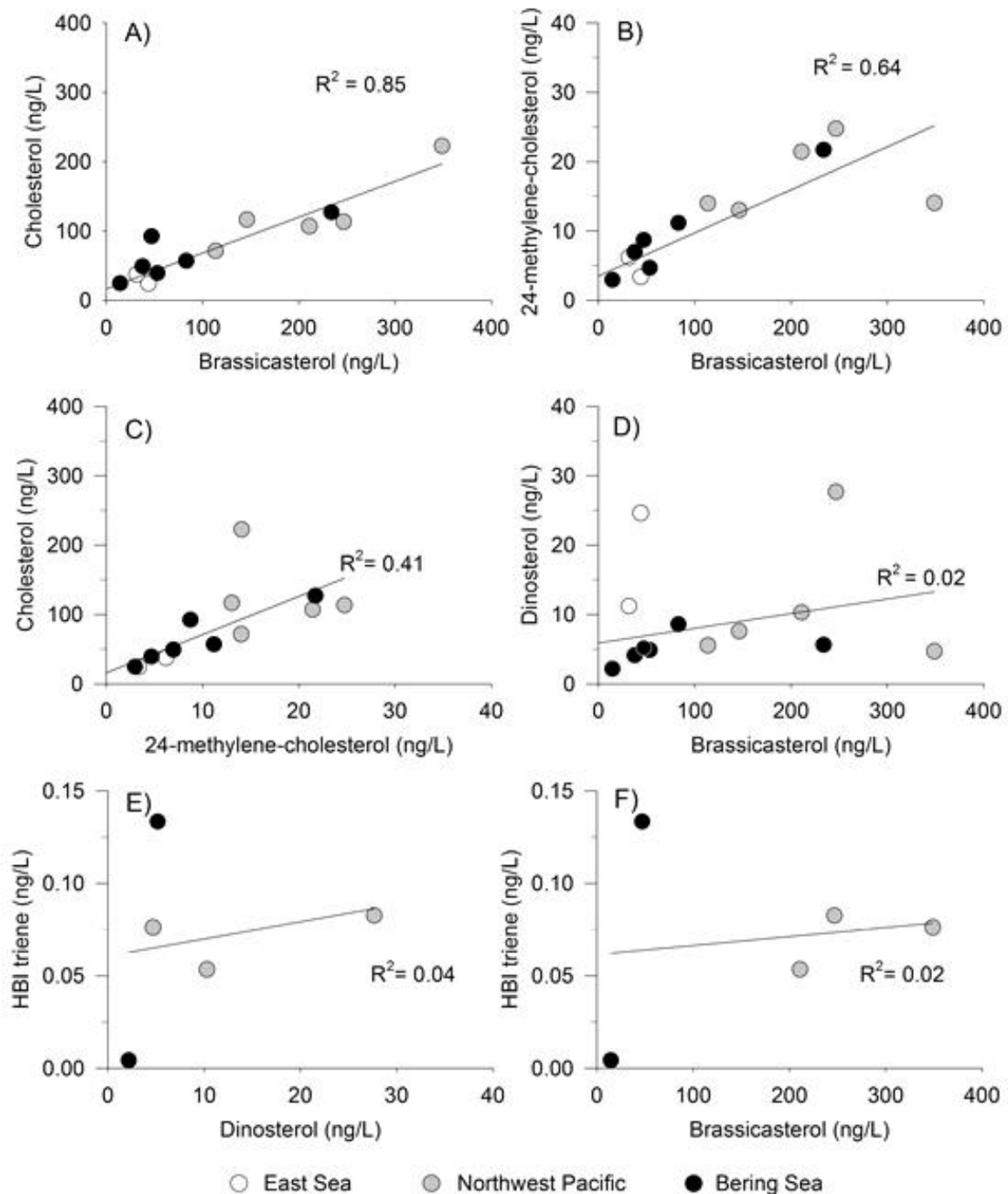


그림 5. 이동항해 구간에서 채집한 부유성 입자물질에서의 HBI triene 및 스테롤의 상관관계.

B. 영양염 프록시(nutrient proxy)

이동항해 구간에서 또 다른 부유 식물플랑크톤의 생체지표 중의 하나인 장족형 다이올의 분석을 실시하였다(그림 6). 표층 퇴적물에서 분석된 장족형 다이올 중 C28, C30 1,14-diol은 해양의 용승 혹은 높은 영양염을 지시한다(Rampen et al., 2014). 이동항해 구간에서는 북서태평양해역의 표층 부유입자시료에서 높은 1,14-diol의 분포를 확인 하였다. 이는 북서태평양이 바람과 지형적 특성으로 인해 용승이 발달한 해역이고 그 결과 높은 영양염 농도 및 높은 생산력을 보이는 특징과 잘 일치한다(그림 7). 하지만 본 연구에서 확인된 1,14-diols의 분포는 C28 1,14-diol과 C30 1,14-diol이 서로 다른 종으로부터 생성되었을 가능성을 확인하였고 이러한 접근 방법을 토대로 기존의 문헌에서 보고된 표층 퇴적물 분석 결과를 바탕으로 새로운 인덱스를 제안하였다. 새로운 영양염 인덱스는 다음의 식으로 표현된다.

$$\text{A new nutrient diol index} = \frac{[\text{C28:1 1,14} + \text{C28 1,14}]}{[\text{C28:1 1,14} + \text{C28 1,14}] + [\text{C30:1 1,14} + \text{C30 1,14}] + [\text{C28 1,13} + \text{C30 1,13} + \text{C30 1,15}]}$$

본 연구에서 제시된 새로운 영양염 인덱스는 표층 퇴적물에서 획득된 결과와 해양 표층에서의 질산염과 인산염의 농도의 분포를 잘 설명하는 것으로 나타났다.

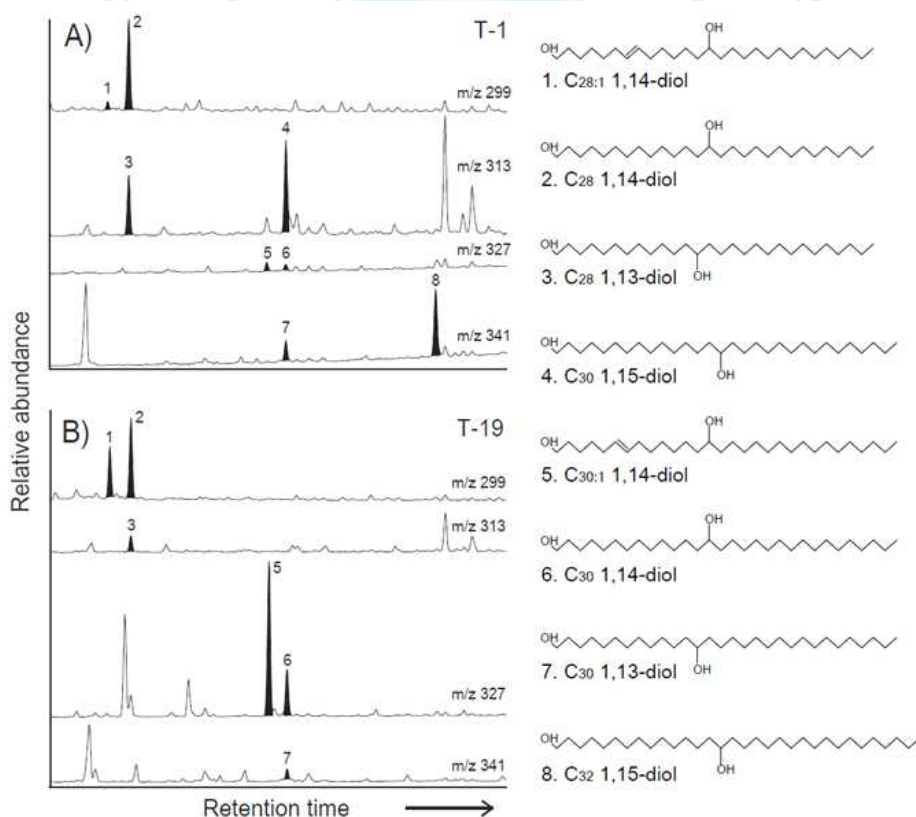


그림 6. 이동항해 구간에서 분석된 장족형 다이올의 크로마토그램 및 분자구조.

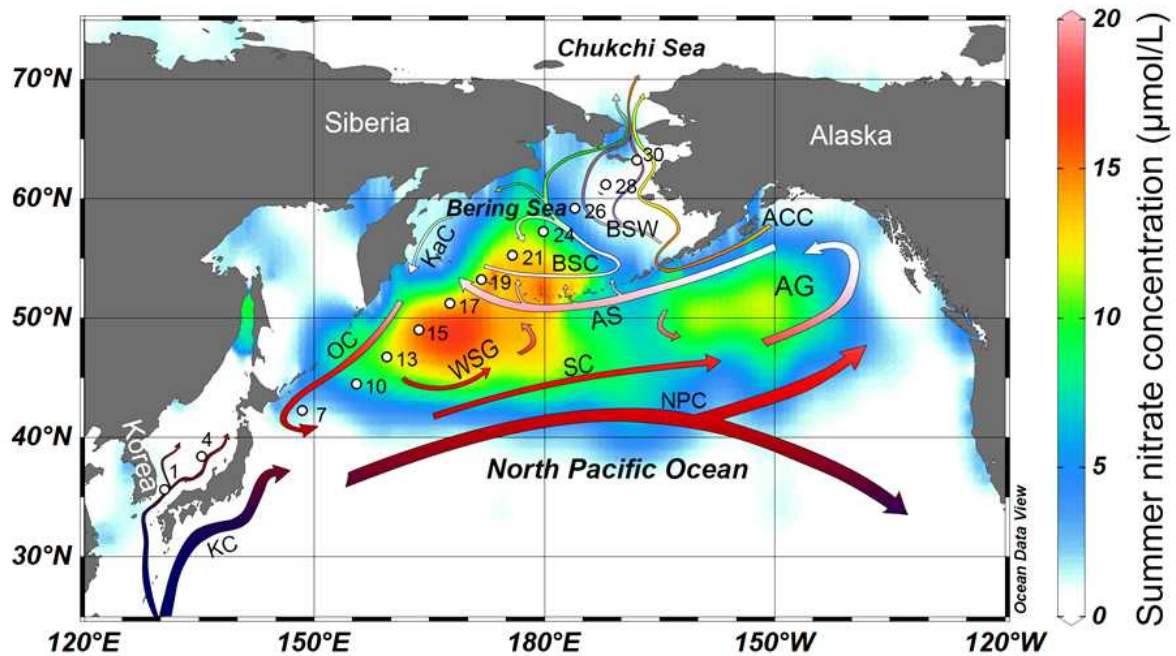


그림 7. 이동항해 구간에서 장죽형 다이올 분석 정점 및 질산염 농도 분포.

2. 남극 로스해 표층 퇴적물 조사

남극 로스해 표층 퇴적물에서 OH-GDGTs를 분석한 결과 검출을 확인할 수 있었다 (그림 8). OH-GDGT-O는 분석한 대부분의 시료에서 정량적 분석이 가능하였으나 다른 OH-GDGTs, 즉 OH-GDGT-1, OH-GDGT-2, 그리고 2OH-GDGT-0는 검출이 되지 않은 경우가 많았다. 이는 분석 시료량이 약 1g이었음을 감안할 때 좀 더 많은 양의 퇴적물 분석이 필요함을 시사하였다.

OH-GDGT-O와 다른 해빙 관련 지질생체지표의 분포도를 비교하였다(그림 9). 남극 해역에서 해빙의 생체지표로 사용되는 diene의 농도 분포는 triene과 brassicasterol과 다소 유사한 경향을 보였다. 그에 반해 고세균의 생체지표인 GDGT 0과 crenarchaeol은 조금 다른 경향을 보였다. 분석된 농도 결과만을 봤을 때 OH-GDGT0의 분포가 다른 GDGT와는 조금 다른 경향을 보였고 오히려 HBI와 brassicasterol과 좀 더 유사한 분포를 보였다. 이것은 OH-GDGT가 해빙 분포와 연관이 있을 가능성을 말해 준다.

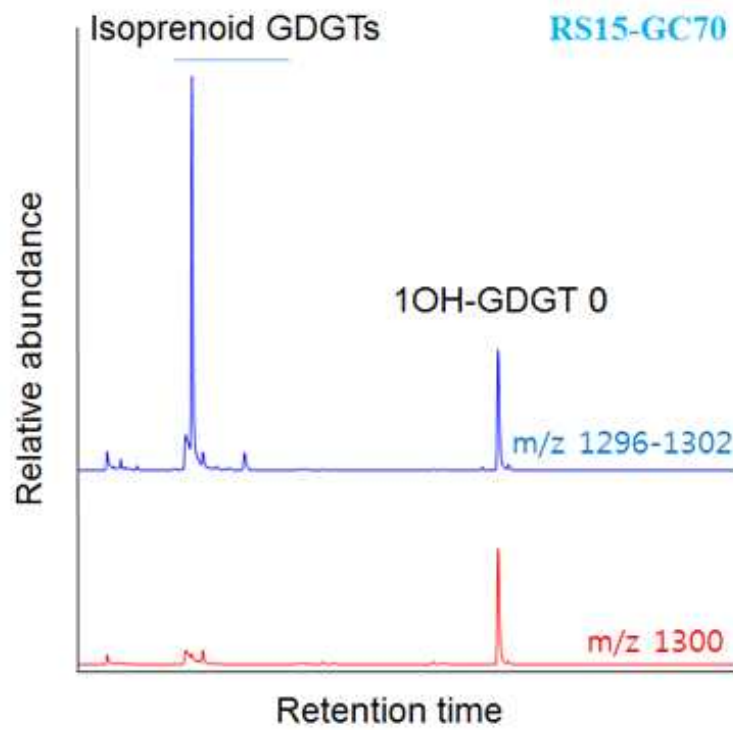


그림 8. 로스해 표층 퇴적물에서 얻은 OH-GDGTs의 HPLC-MS chromatogram 예.

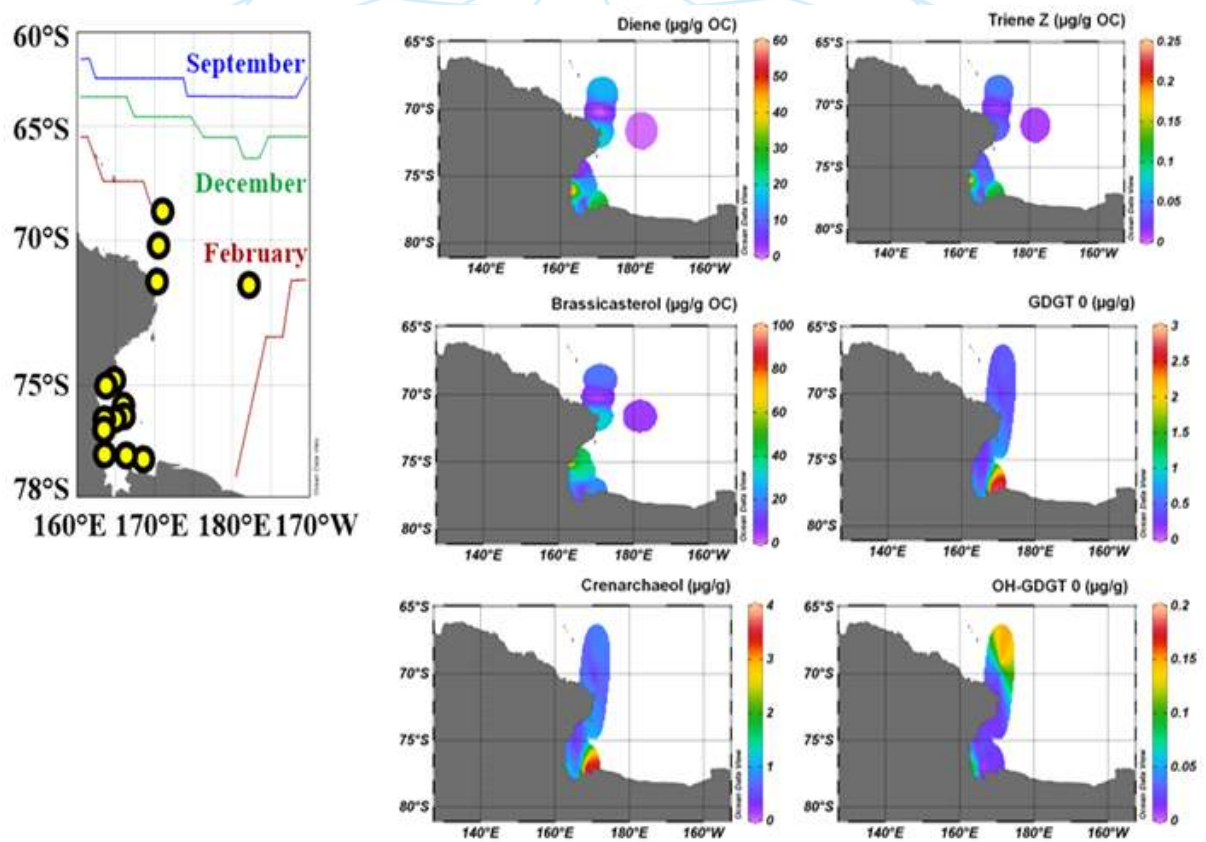


그림 9. 로스해에서 채집된 표층 퇴적물 정점 및 지질생체지표 분포도.

나. 극지 해역 코어 퇴적물에서 해빙 변화 복원

1. 척치해 멀티 코어 퇴적물에서 해빙 변화 복원

서북극 척치해역에서 획득된 코어 퇴적물(ARA01B-03MUC-05)에서 과거 150년간의 고기후 복원 기록 복원을 실시하였다(그림 10). 북극 퇴적물 코어에서 IP_{25} 및 부유 식물플랑크톤의 생체지표 분석 결과를 그림 11에서 보여준다. 해빙기원 지질생체지표인 IP_{25} 는 1860년에서 1960년까지 큰 변화 없는 결과를 보였다. 1980년 이후 농도가 증가하였다. HBI triene 및 brassicasterol, dinoserol을 이용하여 PIP_{25} 인덱스를 구하였다. 하지만 각각의 PIP_{25} 인덱스는 서로 다른 경향을 나타냈다. 이는 이동항해에서 부유식물플랑크톤의 생체지표의 결과에서 언급하였듯이 이들 생체지표가 해양환경에서 각기 다른 분포를 보이기 때문에 PIP_{25} 인덱스 결과에 영향을 준 것으로 판단된다. 특히 북극의 해빙의 기록과 비교하였을 때 PIP_{25} 인덱스의 결과보다는 IP_{25} 의 농도가 해빙의 변화를 더욱 잘 반영하는 것으로 사료된다. 주목할 점은 북극해빙의 감소가 위성으로 기록되기 전인 1979년 이전부터 시작되었다는 점이다. 하지만 이러한 결과에 대한 정확한 해석을 위해서는 서북극 해역에서 생체지표의 분포 특성에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

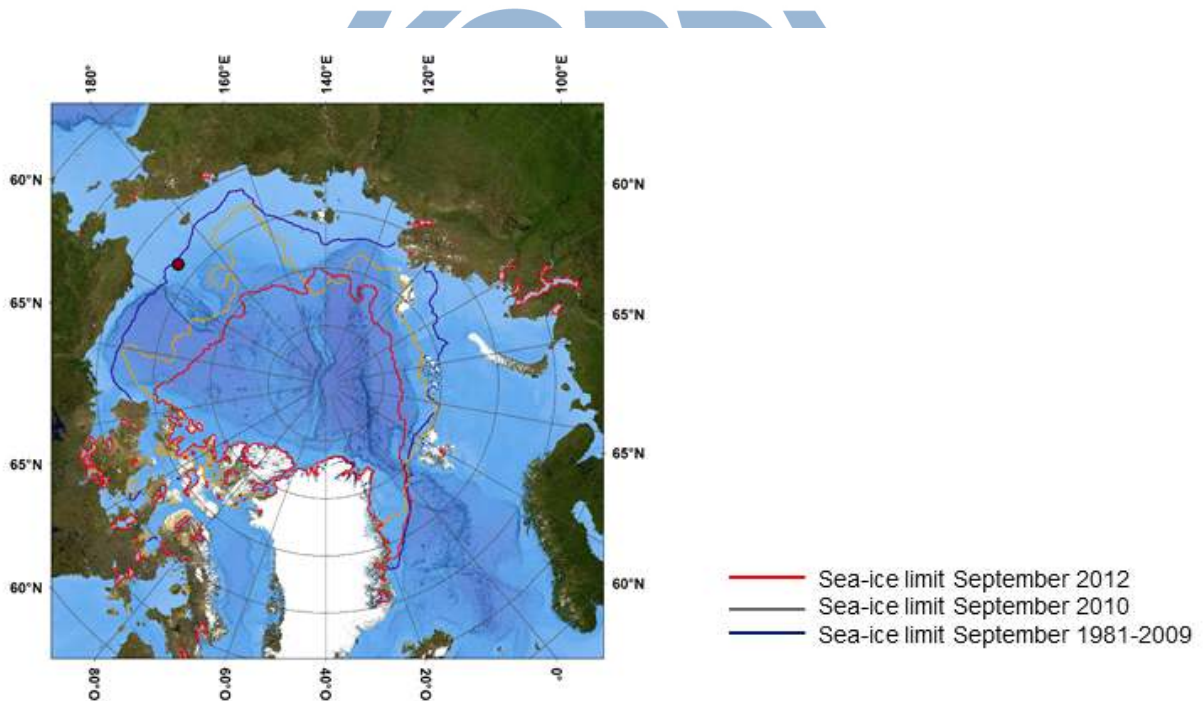


그림 10. 서북극 멀티 코어 퇴적물 시료 채집 정점 및 연 평균 해빙 분포도.

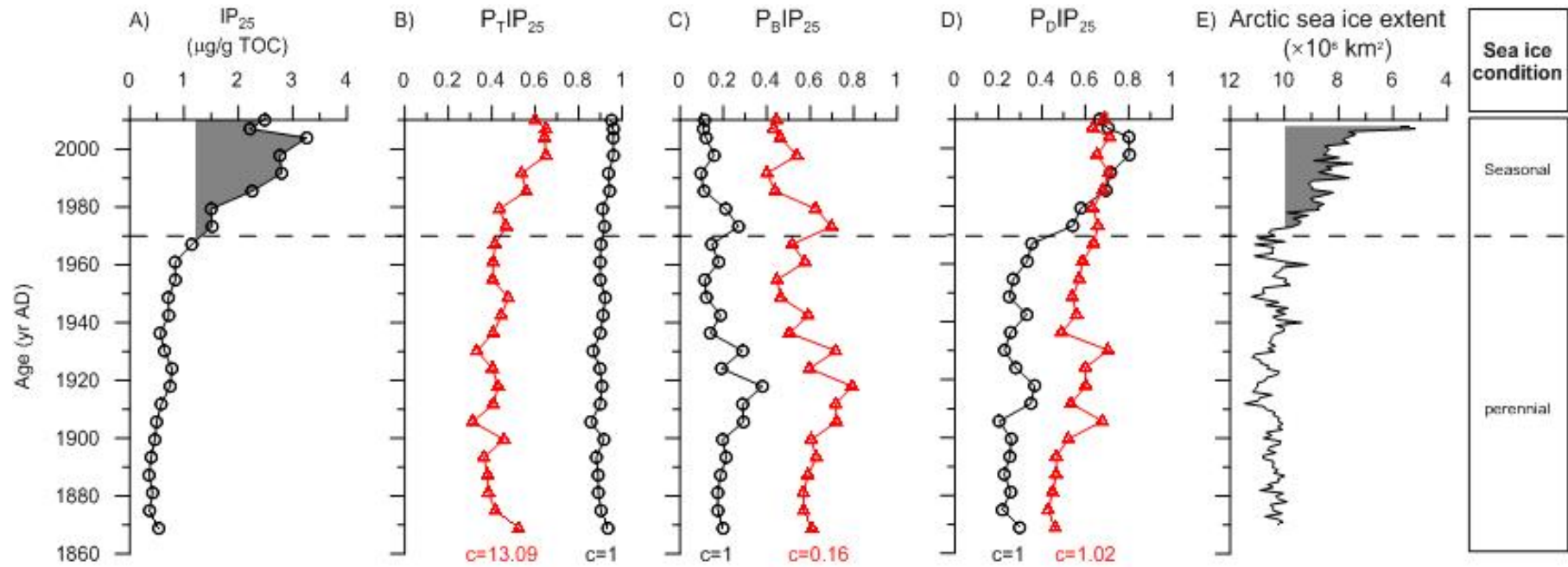


그림 11. 척치해 멀티 코어 퇴적물에서 복원된 IP_{25} 및 PIP_{25} 기록들과 육상 프록시 데이터를 바탕으로 유추해 낸 북극 해빙분포 기록(Kinnard et al. 2011)과의 비교.

본 연구는 극지 해역에서 OH-GDGTs가 해빙과 직접적으로 관련이 있는지는 자료 부족으로 정확히 밝힐 수는 없었다. 이는 북극해에서 좀 더 많은 부유성 입자물질 및 표층퇴적물을 조사해 그 관계를 좀 더 명확히 규명해야 할 것이다. 그러나 본 연구 결과는 OH-GDGTs가 표층수온과 관계가 있을 수 있음을 시사하였다. 서북극 척치해역에서 획득된 코어 퇴적물(ARA01B-03MUC-05)에 OH-GDGTs를 이용한 고수온 인덱스 RI-OH'를 적용해 보았다(그림 12). 복원된 표층 수온 기록은 표층 대기 온도의 변화(Brohan et al., 2006) 양상과 유사함을 보였다. 이는 극지 해양에서 수온 복원에 OH-GDGTs를 사용할 수 있는 가능성을 보여준 세계적으로도 최초의 결과라 할 수 있다. 차후 RI-OH'의 전지구적 calibration 연구와 코어 퇴적물을 이용한 검증 연구가 다양한 각도에서 이루어져야 할 것이다.

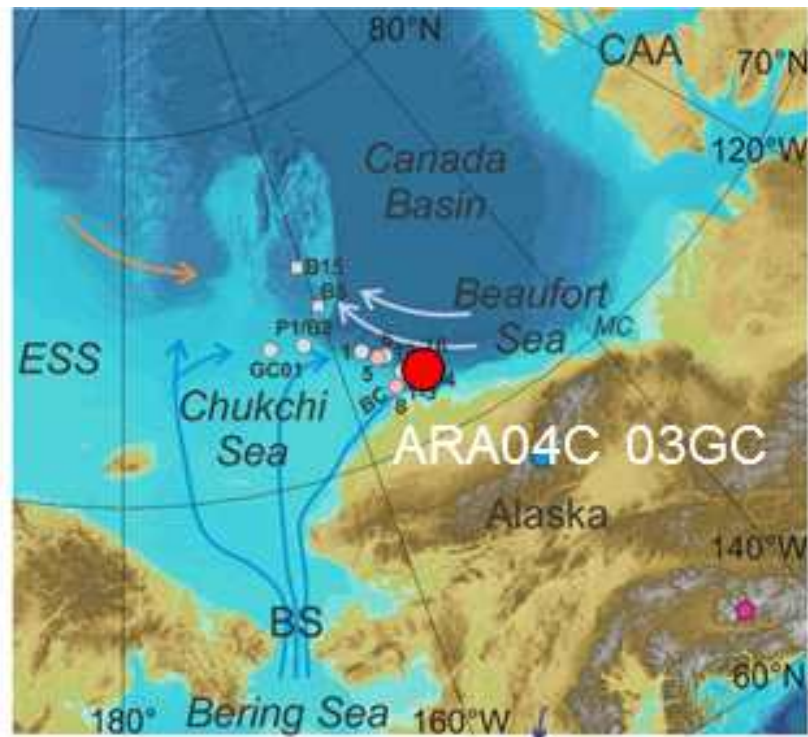


(Brohan et al., 2006)

그림 12. 서북극 척치해 멀티 코어 퇴적물에서 획득한 RI-OH' 및 RI-OH' SST 기록과 표층 대기 온도 기록(Brohan et al., 2006)과의 비교.

다. 국제 공동 연구 수행

본 과제를 바탕으로 해빙 기원 지질생체지표 및 부유식물플랑크톤 지질생체지표의 분석 기법을 활용해 극지 해역에서 고해빙 및 고환경 복원 연구를 수행하기 위한 국제 공동 연구 기반을 다질 수 있었다. 서북극 척치해 ARA04C 03GC 코어를 이용해 과거 2000년 동안의 해빙 변화 복원을 위해 미국 Byrd Polar Research Center의 Polyak 박사 및 일본 호카이도 대학의 Yamamoto 교수와 공동연구를 추진하고 있다(그림 13). 남극 로스해에서는 ANTA99-CJ5 코어 퇴적물을 이용한 홀로세 고해빙 복원 연구를 위해 프랑스 보르도 대학 EPOC 연구자들과 공동 연구를 수행하고 있다(그림 14). 또한 북대서양에서 획득된 MD95-2009 코어에서 과거 2.8-3.5 만년의 고해양 변화 복원 및 남극 베델해에서 획득한 JPC38 코어 퇴적물에서 홀로세 동안의 고해양 변화 복원을 프랑스 보르도 대학 EPOC 연구자들과 공동 연구를 지속적은 진행 중에 있다(그림 15).



(450 cm core length, 1000 m depth)

그림 13. 미국 Byrd Polar Research Center의 Polyak 박사 및 일본 호카이도 대학의 Yamamoto 교수와 공동으로 북극 척치해에서 과거 2000년 해빙 기록 복원 연구.

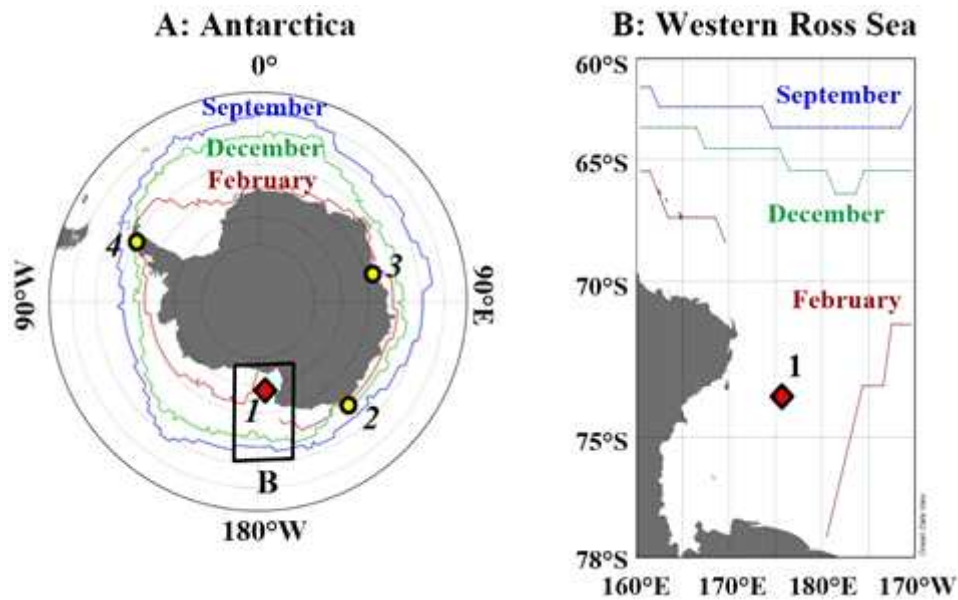


그림 14. 프랑스 보르도 대학 EPOC 연구자들과 공동으로 남극 로스해에서 홀로세 해빙 기록 복원 연구.

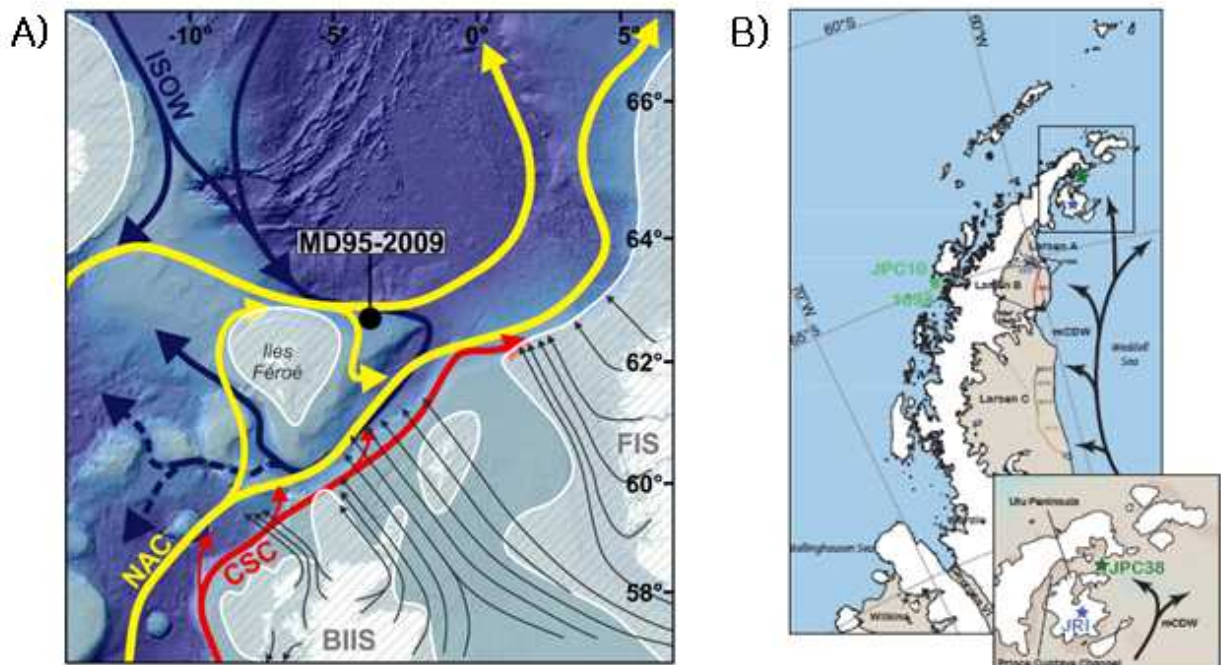


그림 15. 프랑스 보르도 대학 EPOC 연구자들과 공동으로 북대서양 및 베텔해에서 고해양 변화 복원 연구.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 과제 수행을 통해 달성한 연구 성과는 아래와 같다. 이러한 연구 성과들은 향후 극지 연구에 활용 가능한 생체지표 연구 및 국제 공동 연구의 기반이 될 수 있다.

1. 국제 공동 연구 및 국제 워크숍 개최

1) 한국-프랑스 워크숍 참가

일시 : 2017년 2월 10일

장소 : 프랑스 보르도 대학교

내용 : 지중해 국제 협력 연구 결과 회의

2) 국제 공동 워크숍 개최

일시 : 2017년 5월 15일

장소 : 극지연구소

주제 및 내용 : 국제 워크숍 개최 및 연구 결과 토의

1. Lukas Smik, Plymouth Univ., UK, Source-specific diatom lipid biomarkers as proxies for Arctic and Antarctic sea ice.
2. Jong-Ku Gal, Hanyang Univ., Korea, Distribution of phytoplakton lipids along a transform the East Sea to the Bering Sea: implication for past sea-ice reconstructions.
3. Carme Huguet, Los Andes Univ., Colombia, Traditional and new archaeal lipid biomarkers in biogeochemistry perspective of past oceanic temperature reconstructions.

2. 과제 수행을 통한 연구 성과

가. 국제 학술지 투고

- 1) Gal et al., Distribution of long chain diols along a South-North transect of the Northwest Pacific region (in prep)
- 2) Kim et al., Reconstruction of paleo-sea ice records in the Chukchi Sea sediment (in prep)

나. 국내 학술지 투고

- 1) 갈종구, 김정현, 남승일, 신경훈. 특성이 다른 GC 컬럼이 long chain alkyl diols (LCDs)의 정량 분석에 미치는 영향. 22 (2) 해양학회지 바다. 2017.
- 2) 갈종구 외. 동해-베링해 횡단구간 식물플랑크톤 기원의 유기분자생체지표 분포: PIP₂₅ 인덱스에 사용 시 대양 환경 지시자로서의 적합성 검토. 지질학회지, in revision, 2017.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구 결과에서 보여 주듯이 해빙의 정량적 기록 복원을 위해 사용되는 PIP₂₅ 인덱스는 어떤 부유 식물플랑크톤 지질생체지표를 사용하는 야에 따라 각각 다른 경향성을 보여 줄 수 있다. 하지만 현 해양 환경에서의 PIP₂₅ 인덱스 관련 유기분자생체지표의 분포 특성과 이를 조절하는 환경 요인에 대한 연구는 아직 부족한 상황이다. 따라서 좀 더 많은 연구가 현 해양환경에서 채집한 부유성 입자물질 및 표층 퇴적물을 이용해 수행 되어야 할 것이다.

해빙 프록시 외에 본 과제에서 세계 최초로 개발한 표층 영양염 프록시는 과거 일차생산 변화와 관련된 연구에 매우 중요한 정보를 줄 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구에서 세계 최초로 획득한 연구 결과인 극지해역에서 OH-GDGTs를 이용한 고수온 복원 가능성은 OH-GDGTs가 앞으로 극지지역에서의 고해양 및 고기후 연구에 매우 중요한 지질생체지표로 사용될 수 있음을 시사한다. OH-GDGTs에 관한 연구는 아직 시작 단계에 있으므로 우리가 이 부분을 좀 더 체계적으로 다양한 접근 방법, 즉 생물학-지질학-유기생지화학간의 협업을 통해 연구한다면 전 세계적으로 우리가 극지지역 고해양 및 고기후 분야에서 선도적 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

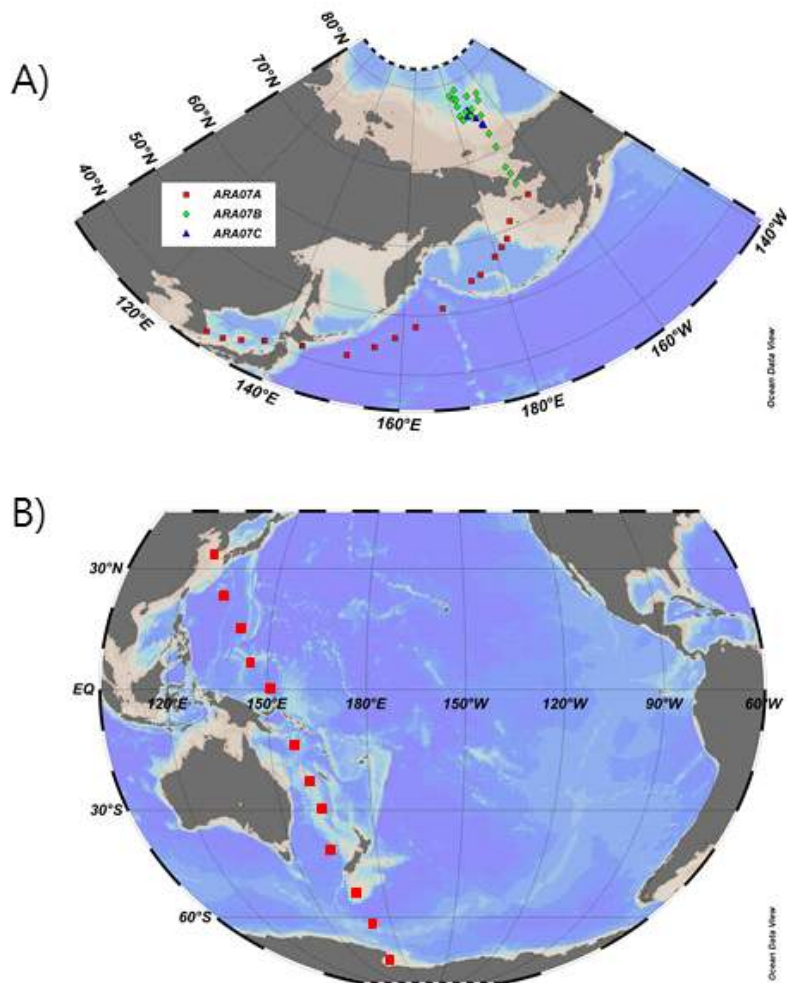


그림 16. 아라온호 이동 항차를 활용한 부유성 입자물질 채집: A) 인천-척치해 그리고 B) 인천-로스해.

본 과제에서 획득한 해빙 프록시, 표층 영양염 프록시 그리고 표층 수온 프록시에 관한 연구결과는 현 환경에서의 부유성 입자물질 (그림 16) 및 표층퇴적물 그리고 코어 퇴적물을 활용한 검증 및 활용에 대한 다음 단계 사업 개발(그림 17)에 활용될 수 있을 것이다.

	1차년도	2차년도	3차년도
추진 전략	• 현 해양환경에서의 프록시 관련 유기분자생체지표 분포 특성 조사	• 현 해양환경에서의 프록시 관련 유기분자생체지표 분포 특성 조사	• 과거 표층 수온 및 표층 영양염 변화 복원
연구 방법	• 인천-척치해 구간의 부유성 입자 물질 및 표층 퇴적물 채집 • 프록시 관련 유기분자생체지표 분석 • 획득한 자료 분석 및 해석	• 인천-로스해 구간의 부유성 입자 물질 및 표층 퇴적물 • 프록시 관련 유기분자생체지표 분석 • 획득한 자료 분석 및 해석	• 척치해 코어 퇴적물 분석 • 로스해의 코어 퇴적물 분석 • 획득한 자료 분석 및 해석

그림 17. 다음 단계 연구 과제 추진 체계.



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

Belt 등 (2007)에 의해 북극 해역의 해빙 기록 복원 프록시로서 IP_{25} 가 처음으로 제시된 이후 IP_{25} 는 북극 해역에서 해빙기록 복원 연구 및 고해양 환경 복원 연구에 활발히 사용되고 있다. 하지만 남극의 수층 환경 및 퇴적 환경에서 이들은 관측되지 않는다. 최근 남극 해역에서 HBI diene 이 남극 해역의 해빙 변화를 반영할 수 있음이 확인 되었다(Belt et al., 2016). 양극해양 환경에서 IP_{25} 를 비롯한 $IPSO_{25}$, HBI triene 등의 분포 특성에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다(Lukas et al., 2016). 또한 HBIs 및 다른 부유 식물플랑크톤 생체지표들의 과거 해빙 기록 복원 연구 활용에 관한 검증 연구가 지속적으로 이루어지고 있다 (Belt et al., 2013 and references therein; Belt et al., 2015; Polyak et al., 2016; Stein et al., 2016).

그 동안의 연구들에서 HBIs는 해빙(Belt et al., 2007, 2013; Brown et al., 2011)을 비롯하여 해양 퇴적물(Brown et al., 2011; Lukas et al., 2016), 저서동물 (Brown and Belt, 2012)등 다양한 극지 환경 물질에서 확인되었다. 이렇게 다양한 해양환경에서 해빙 조류가 극지의 일차생산자로서의 역할이 재조명됨에 따라 극지 해역의 유기물 순환에 있어서 이들의 중요성 또한 관심 받고 있다(Brown et al., 2013). 최근 해빙 부착 조류를 기반으로 한 탄소 순환의 관점에서 HBIs를 해양 생태계 내의 유기물 순환의 관점에서의 접근하는 시도도 진행되고 있다(Brown et al., 2014; Brown and Belt, 2017).



제 7 장 참고문헌

- Belt, S.T. Smik L., Brown T. A., Kim J., Rowland S. J., Allen C. S., Gal J., Shin K., Lee J. I. and Taylor K. W. R. (2016) Source identification and distribution reveals the potential of the geochemical Antarctic sea ice proxy IPSO25. *Nat. Commun.* 7, 1 - 10.
- Belt S. T., Massé G., Rowland S. J., Poulin M., Michel C. and LeBlanc B. (2007) A novel chemical fossil of palaeo sea ice: IP25. *Org. Geochem.* 38, 16 - 27.
- Belt S. T. and Müller J. (2013) The Arctic sea ice biomarker IP25: A review of current understanding, recommendations for future research and applications in palaeo sea ice reconstructions. *Quat. Sci. Rev.* 79, 9 - 25.
- Brown T. A., Belt S. T., Ferguson S. H., Yurkowski D. J., Davison N. J., Barnett J. E. F. and Jepson P. D. (2013) Identification of the sea ice diatom biomarker IP25 and related lipids in marine mammals: A potential method for investigating regional variations in dietary sources within higher trophic level marine systems. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 441, 99 - 104.
- Brown T. A., Yurkowski D. J., Ferguson S. H., Alexander C. and Belt S. T. (2014) H-Print: a new chemical fingerprinting approach for distinguishing primary production sources in Arctic ecosystems. *Environ. Chem. Lett.*, 1 - 6.
- Brown T. a. and Belt S. T. (2012) Identification of the sea ice diatom biomarker IP25 in Arctic benthic macrofauna: direct evidence for a sea ice diatom diet in Arctic heterotrophs. *Polar Biol.* 35, 131 - 137.
- Brown T. A. and Belt S. T. (2017) Biomarker-based H-Print quantifies the composition of mixed sympagic and pelagic algae consumed by *Artemia* sp. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 488, 32 - 37.
- Fahl K. and Stein R. (2012) Modern seasonal variability and deglacial/Holocene change of central Arctic Ocean sea-ice cover: New insights from biomarker proxy records. *Earth Planet. Sci. Lett.* 351 - 352, 123 - 133.
- Fietz S., Huguet C., Rueda G., Hambach B., Rosell-Melé A. and *, Carme Huguet, Gemma Rueda , Bastian Hambach A. R.-M. (2013) Hydroxylated isoprenoidal GDGTs in the Nordic Seas. *Mar. Chem.* 152, 1 - 10.
- Gersonde R. and Zielinski U. (2000) The reconstruction of late Quaternary Antarctic sea-ice distribution - the use of diatoms as a proxy for sea-ice. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 162, 263 - 286.
- Huguet C., Fietz S. and Rosell-Melé a. (2013) Global distribution patterns of hydroxy glycerol dialkyl glycerol tetraethers. *Org. Geochem.* 57, 107 - 118.
- Ipcc (2013) Summary for Policymakers. *Clim. Chang.* 2013 Phys. Sci. Basis. Contrib. Work. Gr. I to Fifth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Chang., 33.
- Kinnard C., Zdanowicz C. M., Fisher D. a, Isaksson E., de Vernal A. and Thompson L. G. (2011) Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years. *Nature* 479, 509 - 12.
- Liu X.-L., Lipp J. S., Simpson J. H., Lin Y.-S., Summons R. E. and Hinrichs K.-U. (2012) Mono- and dihydroxyl glycerol dibiphytanyl glycerol tetraethers in marine sediments: Identification of both core and intact polar lipid forms. *Geochim. Cosmochim. Acta* 89, 102 - 115.
- Massé G., Rowland S. J., Sicre M.-A., Jacob J., Jansen E. and Belt S. T. (2008) Abrupt climate changes for Iceland during the last millennium: Evidence from high resolution sea ice reconstructions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 269, 565 - 569.
- Müller J., Wagner A., Fahl K., Stein R., Prange M. and Lohmann G. (2011) Towards quantitative

sea ice reconstructions in the northern North Atlantic: A combined biomarker and numerical modelling approach. *Earth Planet. Sci. Lett.* 306, 137 - 148.

Polyak L., Belt S. T., Cabedo-Sanz P., Yamamoto M. and Park Y.-H. (2016) Holocene sea-ice conditions and circulation at the Chukchi-Alaskan margin, Arctic Ocean, inferred from biomarker proxies. *The Holocene* 26, 1810 - 1821.

Smik L., Belt S. T., Lieser J. L., Armand L. K. and Leventer A. (2016) Distributions of highly branched isoprenoid alkenes and other algal lipids in surface waters from East Antarctica : further insights for biomarker-based paleo sea-ice reconstruction. *Org. Geochem.* 95, 71 - 80.

Stein R., Fahl K. and Müller J. (2012) Proxy reconstruction of Cenozoic Arctic Ocean sea-ice history - From IRD to IP25-. *Polarforschung* 82, 37 - 71.

Stein R., Fahl K., Schreck M., Knorr G., Niessen F., Forwick M., Gebhardt C., Jensen L., Kaminski M., Kopf A., Matthiessen J., Jokat W. and Lohmann G. (2016) Evidence for ice-free summers in the late Miocene central Arctic Ocean. *Nat. Commun.* 7, 11148.

