

# Sea ice algae 종조성 및 biomarker 기법 개발

Identification of sea ice algae and  
development of biomarker



한국해양과학기술원  
부설 극지연구소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “Sea ice algae 종조성 및 biomarker 기법 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 07. 31

연구책임자 : 하 선 용



보고서 초록

과제관리번호	PE16340	해당단계 연구기간	2016.06.01 ~ 2017.05.31	단계 구분	(1단계)/(총1단계)
연구사업명	중 사업명				
	세부사업명	기본연구사업(신진연구자)			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	Sea ice algae 종조성 및 biomarker 기법 개발			
연구책임자	하 선 용	해당단계 참여연구원수	총 : 1명 내부 : 1명 외부 : 0명	해당단계 연구비	정부: 48,000 천원 기업: 천원 계: 48,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지해양과학연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
					36
<p>○ 연구개발의 목적 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 목적 : 남·북극 해빙에 서식하는 sea ice algae 기원 물질 분석 및 물질순환 특성 이해</li> <li>- 필요성 : 기후변화에 따른 북극해의 해빙 거동은 sea ice algae 생장에 영향을 미치며, 해빙 감소는 sea ice algae 생산력 및 생지화학 물질 순환에도 영향을 미치고 있음. 북극해 물질 순환을 이해하기 위해서는 sea ice algae 기원 유기물의 공급 및 제거 기작에 관한 연구가 필요</li> </ul> <p>○ 연구개발의 내용 및 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 남·북극 해빙에 서식하는 sea ice algae의 생산력 및 이차 산물(biomarker) 분석</li> <li>- 북극 연안 해역에서의 landfast ice에 서식하는 sea ice algae 특성 및 이해</li> <li>- 환경인자(예: 수온, 염분, 해빙, 광투과율 등)와의 관계분석을 통해 sea ice algae의 생리 및 생지화학적 특성 이해</li> </ul> <p>○ 연구개발결과</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 남·북극 sea ice algae는 대부분 규조류가 절대 우점하고 있으며, 남·북극 우점종에서 차이를 보임</li> <li>- 남·북극 sea ice algae는 자외선 흡수 물질 및 보조색소 조성의 차이를 보이며, 거대분자 조성도 확연한 차이를 보이고 있음.</li> <li>- Bulk 탄소안정동위원소비 및 지방산 탄소안정동위원소비에서 북극 sea ice algae는 무거운 값을 보이는 반면, 남극 sea ice algae에서는 상대적으로 가벼운 값을 보이고 있음.</li> <li>- 향후 Sea ice algae의 생체지표(biomarker)로 개발 가능한 유기물 확인 및 지방산 탄소안정동위원소비를 이용한 생체지표 개발 가능성 확인</li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	해빙 미세조류, 유기물, 안정동위원소, 지방산, 생체지표			
	영 어	Sea ice algae, Organic matter, Stable isotope, Fatty acids, Biomarker			

# 요 약 문

## I. 제 목

- Sea ice algae 종조성 및 biomarker 기법 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 목적

- 남·북극해 해빙에 서식하는 sea ice algae 기원 물질 분석 및 물질순환 특성 이해

### 2. 필요성

- 기후변화에 따른 남·북극해의 해빙 거동은 sea ice algae 성장에 영향을 미치며, 해빙 감소는 sea ice algae 생산력 및 생지화학 물질 순환에 영향을 미치고 있음. 남·북극해 물질 순환을 이해하기 위해서 sea ice algae 기원 유기물의 공급 및 제거 기작에 관한 연구가 필요
- 남·북극 아라온호 연구 해역 및 북극 연안 landfast ice에 서식하는 sea ice algae 군집의 환경 변화(지구온난화에 따른 해빙의 감소, 오존층 파괴로 인한 자외선 노출)에 따른 생화학 물질의 생산 및 거동에 대한 연구가 필요
- 해석 위성 자료 해석에 필요한 parameter인 CDOM의 생성, 분포의 중요한 영향을 미치는 자외선 흡수 물질의 분석 결과는 남북극해 해빙 분포를 해석하는데 중요한 자료로 제공

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 남·북극해 해빙에 서식하는 sea ice algae의 생산력 및 이차 산물 (biomarker) 분석
- 북극 연안 해역에서의 landfast ice에 서식하는 sea ice algae 특성 및 이해
- 환경인자(예: 수온, 염분, 해빙, 광투과율 등)와의 관계분석을 통해 sea ice algae의 생리 및 생화학적 특성 이해

## IV. 연구개발결과

- 남·북극 sea ice algae는 대부분 규조류가 절대 우점하고 있으며, 남·북극 우점

종에서 차이를 보임

- 남·북극 sea ice algae는 자외선 흡수 물질 및 보조색소 조성의 차이를 보이며, 거대분자 조성도 확연한 차이를 보이고 있음.
- Bulk 탄소안정동위원소비 및 지방산 탄소안정원소비에서 북극 sea ice algae는 무거운 값을 보이는 반면, 남극 sea ice algae에서는 상대적으로 가벼운 값을 보이고 있음.
- 향후 Sea ice algae의 생체지표(biomarker)로 개발 가능한 유기물 확인 및 지방산 탄소 안정동위원소비를 이용한 생체지표 개발 가능성 확인

#### V. 연구개발결과의 활용계획

- 해양 유기물 순환에 있어 그동안 간과되었던 해빙 생태계의 중요성 및 생태적 위치를 고양시키며 향후 해빙 생태계에 대한 중요성에 대한 중요한 기본 자료를 제공
- 광범위한 지역과 다양한 시료 확보를 통하여 다양한 연구 주제 창출이 가능하며 다학제간 공동연구 활성화
- Sea ice algae 생체 지표 개발을 통하여 주변 해역 및 퇴적물을 통하여 해빙 거동에 대한 과거, 현재를 파악하고 미래를 예측할 수 있는 자료를 제공할 것으로 기대되며, 인공위성을 통한 해빙의 거동 연구와 연계하여 보다 정확한 자료 생산을 위한 보정 자료로서의 역할 기대



# S U M M A R Y

## I. Subject

- Identification of sea ice algae and development of biomarker

## II. Objectives and Necessities

### 1. Objectives

- To understand the characteristics of organic matter of sea ice algae and organic matter cycle in the Arctic and Antarctica sea ice ecosystem

### 2. Necessities

- Sea ice evolution on the Arctic and Antarctica affect the growth of sea ice algae and the retreat of sea ice will be change the productivity of sea ice algae and biogeochemical cycle
- To understand the organic matter circulation on Arctic and Antarctica ecosystem, it should be necessary the study on the supply and removal mechanism of organic matter from sea ice algae

## III. Contents and Scopes

- Production and secondary biomarker analysis of sea ice algae in the Arctic and Antarctica
- Characterization and understanding of sea ice algae on the landfast ice in the Arctic coastal region
- Understanding the physiological and biochemical characteristics of sea ice algae through analysis of relationship with environmental factors(eg. temperature, salinity, sea ice light transmittance etc.)

## IV. Results

- Most of the sea ice algae in the Arctic and Antarctica is dominated by diatoms and differs from the dominant species in the both region
- Sea ice algae on the Arctic and Antarctica show differences in UV-absorbing compounds and auxiliary pigments composition, and

macromolecular composition

- Bulk carbon stable isotope and fatty acids carbon stable isotope value of Arctic were heavier than that of sea ice algae on the Antarctica
- Identification of possible organic matter to be developed by biomarker of sea ice algae in the future and possibility of biomarker development using compounds specific stable isotope (fatty acids).

#### V. Application Plans

- Promote the significance and ecological position of sea ice ecosystem that has been neglected in the organic matter cycle on the polar ecosystem and provide base data on the importance of the future polar ecosystem
- It is possible to create various research project through wide area and various sea ice samples
- It is expected that the development of biomarker of sea ice algae will provide information on the past and present of sea ice behavior through the surrounding sea water and sediments and provide the data of modeling.



# C O N T E N T S

Cover	I
Abstract	II
Summary (Korean)	III
Summary	V
Contents	VII
Contents (Korean)	IX
Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Objectives	1
Section 2 Necessity	1
1. Technical necessity	1
2. Economic/Industrial necessity	2
3. Scientific necessity	2
4. Socio-cultural necessity	2
Section 3 Contents and Scope	3
Chapter 2 Domestic and Overseas Status of Technological Development	4
Section 1 Overseas Status	4
Section 2 Domestic Status	6
Chapter 3 Contents and Results	7
Section 1 Sea ice algae biomakre on the Arctic and Antarctica	7
1. Sea ice algae on the Arctic and Antarctica	7
2. Sampling and analytical method of biomarker	8
3. Results and discussion	15
Section 2 Sea ice algae on the Cambridge bay	30
1. in situ incubation on the Cambridge bay	30
Chapter 4 Achievement of Goals and External Contributions	32
Section 1 Achevement of Goals	32
Section 2 External Contributions	32
Chapter 5 Plans for Utilization of Results	33
Chapter 6 References	34



# 목 차

제출문 .....	I
보고서 초록 .....	II
요약문 .....	III
영문요약문 .....	V
영문목차 .....	VII
목차 .....	IX
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구개발의 목적 .....	1
제 2 절 연구개발의 필요성 .....	1
1. 기술적 필요성 .....	1
2. 경제·산업적 필요성 .....	2
3. 과학적 필요성 .....	2
4. 사회·문화적 필요성 .....	2
제 3 절 연구의 내용 및 범위 .....	3
제 2 장 국내외 연구개발 현황 .....	4
제 1 절 국제수준 .....	4
제 2 절 국내수준 .....	6
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과 .....	7
제 1 절 남·북극 sea ice algae의 생체지표(biomarker) .....	7
1. 남·북극 sea ice algae .....	7
2. 시료채취 및 생체지표(biomarker) 분석 방법 .....	8
3. 결과 및 토의 .....	15
제 2 절 케임브리지 베이의 sea ice algae .....	30
1. 케임브리지 베이의 sea ice algae 시료 채취 및 현장 배양실험 .....	30
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 .....	32
제 1 절 목표달성도 .....	32
제 2 절 관련분야에의 기여도 .....	32
제 5 장 연구개발 결과 활용 계획 .....	33
제 6 장 참고문헌 .....	34

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구개발의 목적

가. 남·북극해 해빙에 서식하는 sea ice algae 기원 물질 분석 및 물질 순환 특성 이해  
나.

## 제 2 절 연구개발의 필요성

### 1. 기술적 필요성

- 가. 기후 변화에 의한 남·북극해 해빙의 거동은 남·북극해 생화학 물질 순환에 있어서 중요한 역할을 하고 있다. 남·북극해 해빙에 서식하고 있는 sea ice algae의 생산력 및 이차 산물의 생성 및 분포는 남·북극해 전체 생지화학적 순환에 중요한 연결 고리 역할을 하며, 유기탄소와 유기질소화합물의 순환을 이해할 수 있다.
- 나. 남·북극해 해빙의 두께와 확장의 급격한 변화 양상 속에서 유기물 순환 고리를 이해 하는데 있어 아라온 연구해역과 북극 연안국의 연안 landfast ice의 sea ice algae를 비교 연구함으로써 북극해 생화학 물질을 이해하는 기본 자료를 확보할 뿐만 아니라 해석 위성의 검·보정 자료를 제공함으로써 남·북극해 해빙 거동에 대한 해석에 도움을 줄 수 있다.

### 2. 경제·산업적 필요성

- 가. 세계적으로 기후변화에 대한 국제적인 규약과 규제가 강화되고 있는 실정에 비취 기후변화에 따른 생태계 및 해빙에 의존하는 생태계 변화에 관한 연구는 장차 수산 자원 관리와 환경보존 등 해양생태계 부가가치 관리를 위해 필수적으로 요구되는 분야이다.

### 3. 과학적 필요성

- 가. 전 지구적인 해양의 해수면의 온도가 지난 112년 동안 1 °C 상승하는 동안 북극해의 평균 온도는 거의 2 °C 이상 증가하였다. 극지방의 큰 온도 변화와 해빙의 감소는 서로 피드백의 효과를 불러일으키고 있으며, 증가된 해수면 온도는 지난 1979년과 2000년 사이에 북극해 해빙 면적의 49 %를 감소시켰고, 녹는 시기와 해빙의 어는 시기가 각각 50일에서 한 달 이상의 시간이 증가하고 감소하는 결과를 보이고 있다(Häder et al., 2015). 또한 봄철 동안 북극해 해빙 밑단이나 안쪽까지 강한 빛의 노출이 증가함에 따라(Nicolaus et al., 2012), landfast ice 뿐만 아니라 아라온 연구 해역에서의 sea ice algae의 일차생산력 및 이차산물의 생산력이 증가된다. 본 연구를 통해 얻게 될 관측 결과 및 해석은 남·북극해 전체의 생지화학적 순환을 이해하는데 도움이 될 것으로 기대된다.
- 나. Sea ice algae 관한 연구는 북극해 연안국가(미국, 캐나다 등)를 중심으로 이루어짐에 따라 상대적으로 연구 예가 적다. 이에 연안국가(캐나다)와 국제 공동연구를 진행함으로써 선진 기술을 습득함과 동시에 국내 유일의 쇄빙선 아라온호를 통한 남·북극해 해빙 해역에서의 sea ice algae에 관한 비교 연구는 진일보한 연구가 될 것으로 예상된다. 또한 landfast ice와 북극해 해빙 해역 연구를 통해 극지해역에서의 생화학적 물질 특성을 파악한다면 극지역에서의 탄소 및 질소의 물질순환 연구부문을 선도할 수 있을 것으로 예상된다.

### 4. 사회·문화적 측면

- 가. 남·북극 해빙 해역의 환경 변화에 따른 sea ice algae의 생리 변화의 이해를 통해 국제저널에 연구논문을 출판하는 것은 극지연구소의 사회적 위상을 높이는데 기여할 것으로 사료된다.
- 나. 남·북극 해빙 해역에서 쇄빙선 아라온호를 활용하여, 연안국과의 국제 공동 연구를 수행함으로써 극지연구를 선도할 수 있는 기회가 되고 있을 뿐만 아니라 국제적으로 인정받는 활동과 성과창출로 국민적 자긍심과 한국의 브랜드 가치 제고의 기회가 될 것이다.

### 제 3 절 연구의 내용 및 범위

- 가. 남·북극해 해빙에 서식하는 sea ice algae의 생산력 및 이차산물 (biomarker) 분석
- 나. 북극 연안 해역에서의 landfast ice에 서식하는 sea ice algae 특성 및 이해
- 다. 환경인자(예: 수온, 염분, 해빙, 광투과율 등)와의 관계분석을 통해 sea ice algae의 생리 및 생화학적 특성 이해



## 제 2 장 국내외 연구개발 현황

### 제 1 절 국제수준

가. 극지 연안국 중심으로 해빙 미세조류에 대한 연구가 활발히 진행

캐나다의 경우, Polar Continental Shelf Program(PCSP) 프로그램 Arctic-ICE camp를 통해서 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 또한 미국의 경우, NASA에서는 Impacts of Climate on the Eco-Systems and Chemistry of the Arctic Pacific Environment(ICESCAPE) 프로그램을 2010년부터 실시하고 있다. 또한 1979년 Coastal Zone Color Scanner(CZCS) 해상센서를 시작으로 1997년 Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor(SeaWiFS)를 활용해 본격적으로 해양 표층 식물플랑크톤 관측에 위성자료가 광범위하게 쓰이고 있다.

University of Alaska Fairbanks(UAF)에서는 북극해 해빙변동성 관측을 위해 2005년부터 현재까지 Barrow Sea( $71^{\circ} 22' 25.36''$  N,  $156^{\circ} 32' 30.91''$  W)에서 해빙두께변동 및 온도와 기상자료를 관측하고 있으나 정확도가 상대적으로 낮아서 해빙 열적특성 연구에는 제한적이다. Norwegian young sea ICE (N-ICE2015) expedition 프로그램을 통해 북극 sea ice regime에 대한 연구가 진행 중에 있다.

나. 해빙 및 해양 생태계를 이해하기 위한 다양한 연구 진행

탄소안정동위원소비를 활용한 해빙 미세조류의 생산력 측정연구가 우리나라에서는 매우 제한적으로 진행되고 있는 반면(Lee et al., 2008) 극지 선진국에서는 매우 다양하게 보고되고 있다(Mock & Gradinger, 1999). 특히 안정동위원소 및 지방산 조성을 활용하여 동물플랑크톤에 대한 해빙 미세조류의 먹이기여도 및 저서 생태계에 대한 해빙 미세조류의 기여도에 대한 보고가 되었으며, 최근에는 분자단위 생체지표(아미노산)의 질소안정동위원소비를 활용한 해양생물의 영양단계 규명 연구에 대한 장점에 대하여 보고된 바 있다(Chikaraishi et al., 2009).

노르웨이 University of Bergen과 독일 Max Planck Institute for Meteorology는 해류의 흐름에 따른 결빙에 관한 연구를 위해 Ice Tank를 제작, 유속에 따른 결빙 연구를 진행하여 결빙 시 온도 및 염분도 변화를 확인하고 있다.



## 제 2 절 국내수준

가. 극지 해양 생태계에 대한 연구는 기존 극지해양연구관련 사업(‘양극해 환경변화 이해 및 활용연구’ 2011~2016, 해양수산부)에서 일부 수행되었으나 해빙 생태계만을 위한 국내 연구는 현재까지 전무하였다. 이제까지 극지연구소에서는 남극 및 북극 해양 종합관측연구가 다수 수행되었으며, 일부 과제에서는 해빙캠프 프로그램을 통하여 해빙 위 연구를 수행하였다. 그러나 연구기간 및 연구지역의 특수성으로 인하여 해빙미세조류 대상의 심도 있는 연구는 이루어지지 않았다. 인공위성을 활용한 해빙연구의 경우 한국과학기술원의 원격탐사센터에서 한반도 주변 및 동아시아 지역 관측을 수행할 수 있는 정지궤도 위성 활용 등의 연구가 이루어져 왔으나, 원격탐사 기반 극지연구는 국내에서 체계적으로 수행된 사례가 거의 없으며 최근에 들어서야 극지연구소 주요사업의 일환으로 남극해에 대한 연구가 진행된 사례가 있으며, 북극해는 아직 본격적인 연구가 수행된 바 없다.



## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제 1 절 남·북극 sea ice algae의 생체지표(biomarker)

#### 1. 남·북극 sea ice algae

남·북극 해역의 pack ice와 fast ice는 미세조류 군집에 독특한 서식환경을 제공한다(Arrigo, 2014). 특히, sea ice가 형성되고 성장함에 따라 미세조류 군집은 각 환경에 맞게 번성하게 되며, 빛과 영양염의 충분한 공급이 이루어지는 해빙 밑단부분에서 왕성하게 형성된다(Arrigo, 2017). 남·북극 해양 생태계에서 중요한 탄소 흡수원으로서의 역할을 sea ice algae가 담당하고 있으며, 비록 부유 미세조류에 비해 낮은 탄소흡수율을 보이지만, 해빙이 덮여 있는 해역에서는 유일한 탄소 흡수원으로서의 역할을 중요하게 하고 있다.

여름철, 북극해 다년생 해빙(multi-year ice)은  $4.5-9.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 의 면적을 보이는 반면, 남극해 다년생 해빙은  $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 의 면적을 보인다. 겨울철 북극 annual 해빙은  $7-12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 으로 약  $16 \times 10^4 \text{ km}^2$  증가하며, 남극의 경우 평균  $15.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 의 annual 해빙이 형성되고 전체 약  $19 \times 10^4 \text{ km}^2$ 의 해빙이 거대한 해빙 생태계가 남·북극 해역에 생성된다.

남·북극 해빙에 서식하는 sea ice algae는 형성된 해빙에 서식 형태의 차이를 보이고 있다. 그림 1의 (a)와 같이 해빙의 내부 layer에서 서식하는 해빙 미세조류는 다양한 환경 변화를 해빙 내에서 보인다(Lizotte & Sullivan 1991). 맥머도 기지 주변의 해빙의 경우, 해빙 위로부터 1.0 ~1.5m 사이의 brine channel의 염분은 173 psu, 온도는  $-16 \text{ }^\circ\text{C}$ 이하의 환경을 보이기도 한다(Kottmeier & Sullivan 1988). 그림 1의 (b) 경우와 같이, 해빙의 밑단에 붙어서 해수로 성장하는 경우는 대부분 북극 지역에서 확인할 수 있다(Johnsen & Hegseth 1991).



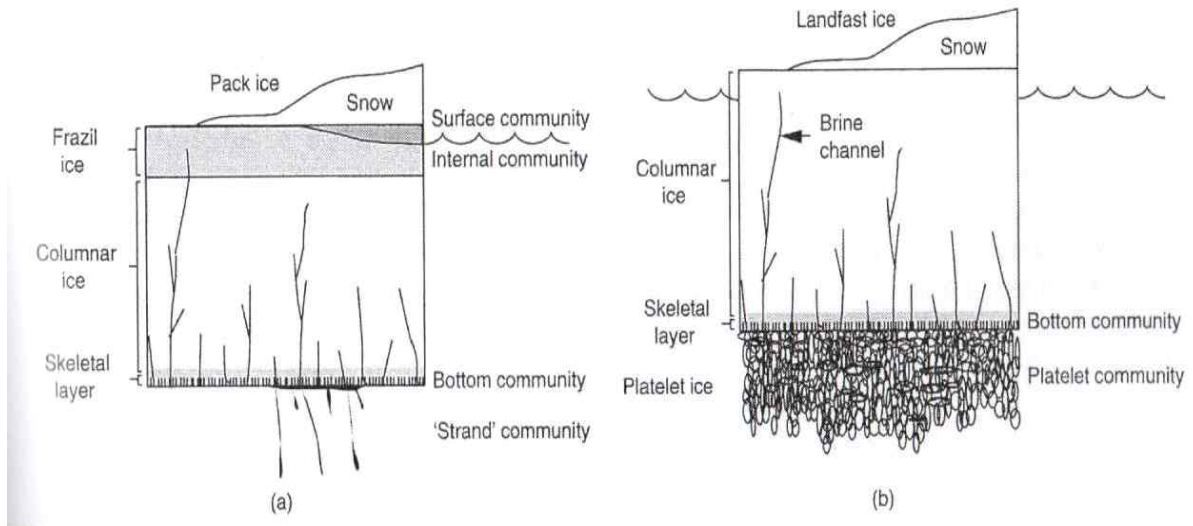


그림 1. Pack ice (a) 및 landfast ice (b) 해빙 생태계 모식도

생물체 기원 및 속성작용 및 분해 작용을 거쳐 남아 있는 유기물의 정보를 화학적 특성으로 환경을 이해하고 추정하는데 사용하는 것을 생체지표 또는 biomarker라 명명하고 있다(Meyers 2003). 생체지표(biomarker)는 퇴적물이나 암석, 또는 오일과 같은 환경에서 탄소, 수소와 이외의 원소로 이루어진 복합 유기물을 명명하며, 살아있는 생물체에서 기인한 화학적 구조가 쉽게 변하지 않는 유기물을 말한다(Hunt et al., 1996; Peters et al., 2005; Gaines et al., 2009). 이에 sea ice algae의 특정 유기물 조성을 조사함으로써 향후 해빙 주변 퇴적물 및 해역에서의 화학적 특성 및 sea ice algae 기원 유기화합물의 추적을 통하여 과거, 현재 해빙의 거동을 이해하고 미래를 예측할 수 있는 정보를 줄 수 있다. 본 연구를 통하여 sea ice algae의 생화학적 유기화합물의 조성 및 생체지표로서의 사용 가능한 유기물을 찾음과 동시에 환경에 따른 유기화합물의 변동성에 대하여 고찰하였다.

## 2. 시료채취 및 생체지표 (biomarker) 분석 방법

남극 sea ice algae는 2015/16년 아문젠 항해 기간 중 위도 73° 49.6003 S 경도 127° 49.3153 W 정점에서 pack ice의 일부를 채취했다(그림 2). 북극 sea ice algae는 2015년 북극 동시베리아 해역의 위도 79° 59.7692 N, 경도 172° 21.2697 E에서 massive

형태의 sea ice algae 시료를 확보하였다(그림 3).

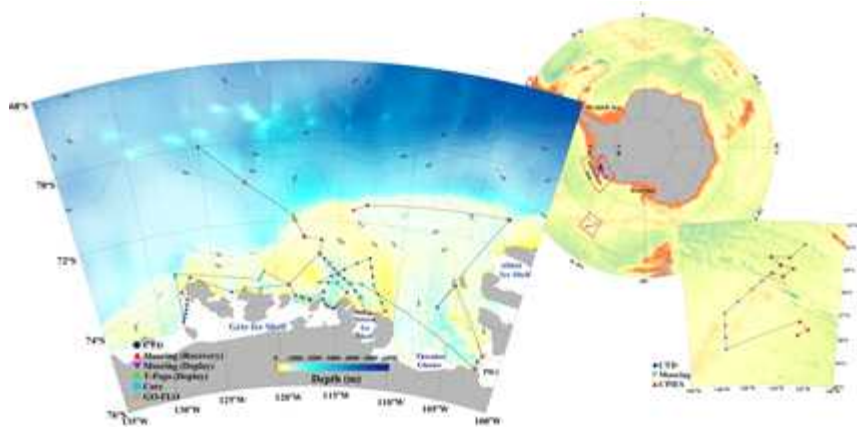


그림 2. 2015/16 남극 아문젠해

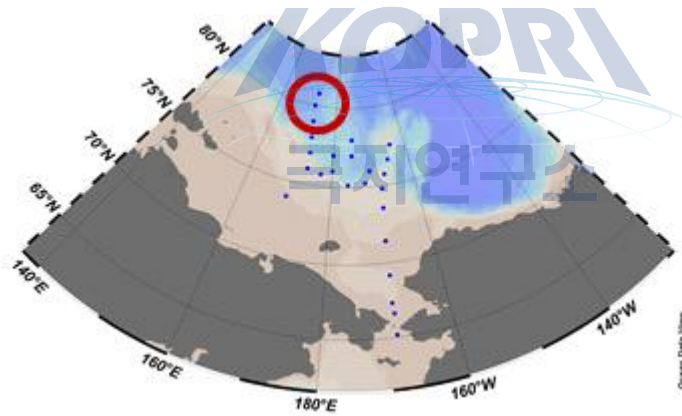


그림 3. 2015년 북극 동시베리아 해역

#### 가. sea ice algae 종조성

연구지역에서 해빙미세조류 종다양성 분석을 위하여 남극 및 북극 해빙에 서식하는 미세조류를 채집/분석을 실시하였다. 남극 및 북극에서 두께 1~2 m 해빙을 선정하여 아이스크어러(Mark II Ice Coring system, USA)를 사용하여 아이스크어를 획득한 후 밀 10 cm를 잘라내었다. 잘라낸 시료는 등량의 여과해수에서 완전히 녹인 뒤 glutaraldehyde로 고정(최종농도 4 %)하였다. 고정된 시료를 연구소로 운반하여 24시간 침강시켜 농축 시킨 뒤 광학현미경(BX53TR-32FB3F0 microscope, Olympus, Inc., Tokyo, Japan)을 통해 100배부터 1,000배 하에 정성분석을 실시하였다. 시료의 분류 및 동정에는 Cupp(1943), Brunel(1962), Hendey(1964), Simonsen(1974), Dodge(1982), Round et al.(1990), Hasle and Syvertsen(1996) 등의 참고문헌을 이용하였다.

#### 나. 입자상 유기탄소 및 안정동위원소 비, 거대분자(탄수화물, 단백질, 지질) 분석

입자상 유기탄소 및 안정동위원소비 측정을 위하여 남·북극 sea ice algae를 동결 건조기를 통하여 완전 건조 후 분말로 분쇄 후  $-80^{\circ}\text{C}$ 에 보관하였다. 동결건조기를 통하여 완전 건조 된 시료는 1 N HCl fume으로 over-night 해줌으로써 무기탄소를 제거하였다. 무기탄소 제거 후 NaOH fume으로 중화를 시켜 준 후 EA-irMS (EuroEA-Isoprime IRMS, GV Instruments, Cheadle Hulme Stockport, UK) 로  $^{13}\text{C}$  값을 측정하였다.

#### 거대분자조성 측정

단백질, 지질, 탄수화물 분석을 위해 시료를 분석하기 전까지  $-80^{\circ}\text{C}$ 에 보관하였고, 실험실로 들고 와서 즉시 분석하였다. 단백질은 건조된 샘플을 분쇄한 후 Lowry et al. (1951)의 방법을 수정 보완하여 사용하였고, 750 nm 파장에서 분광광도계로 측정한 뒤 Protein standard solution(SIGMA)을 이용하여 시료의 농도를 확인하였다. 지질의 경우, 건조된 샘플 분쇄 후 1 ml chloroform과 2 ml methanol을 이용하여 추출하였다(Blighr and Dyer, 1959; Marsh and Weinstein, 1966). 추출 용액의 농도를 확인하기 위해 360 nm의 파장에서 측정하였다. 탄수화물은 Dubois et al.(1956)의 방법을 수정 보완하

여 수행하였고, 건조된 샘플 분쇄 후 490 nm에서 측정 후 농도 확인하였다.

#### 다. 자외선 흡수 물질 분석

입자성 유기물 내 MAAs 분석을 위해 채취된 시료를 동결건조기를 통하여 완전히 건조하였다. 시료는 100% MeOH 3 ml를 넣어준 후 4 °C 냉장고에서 overnight 추출하였다. 추출 후 0.2 µm 주사기 필터(PTFE 0.20 µm Hydrophobic)를 이용하여 2 ml micro tube에 옮긴 후 spectrophotometer(Agilent Technologies; Cary 8457 UV-Vis)로 확인하였다.

#### 라. 보조 색소 추출 및 분석

시료 내 색소 추출은 시료를 테프론 병에 넣고 100 % 아세톤 3 ml 첨가하여 Ultrasonic sonicator(30 sec, 50 W)에서 추출 후 냉암소에서 24 시간 추출한다. 분쇄 시 손실을 보정하기 위하여 canthaxanthin(Internal Standard)을 50 µl을 첨가하였다. 추출된 색소는 주사기 필터(PTFE 0.20 µm Hydrophobic)를 이용하여 여과 후 1 ml를 취하여 Water packing(300 µl 3차 증류수 혼합)하여 High-Performance Liquid Chromatography(HPLC)(Agilent Technologies 1200 series)로 정량 분석을 실시하였다. 색소 분석은 Zapata et al.(2000)의 방법을 이용하였으며, 컬럼(Waters symmetry C8 column(150 × 4.6 mm, 3.5 µm))을 이용하였고, 이동상 용매 A(Methanol: 50 %, Acetonitrile: 25 %, Aqueous pyridine solution: 25 %)와 이동상 용매 B(Methanol: 20 %, Acetonitrile: 60 %, Acetone: 20 %)를 이용하여 분석하였으며, chromatogram의 봉우리(peak)에 대한 동정은 표준색소(DHI water & Environment, Hørsholm, Denmark)의 머무름 시간(retention time)과 비교 결정하였다. 표준색소의 농도는 Jeffrey의해 알려진 흡광계수(Jeffrey et al., 1997)를 이용하여 아래의 식(Park and Park, 1997)에 의해 계산하였다.

마. 지방산 분석 및 지방산 안정동위원소비

#### 지질추출 및 분리

sea ice algae의 지방산(fatty acid) 성분 분석을 위해 가속용매추출기(Accelerated solvent extractor, ASE 200, Dionex)를 이용하여, 1000 psi, 100 °C의 조건에서 혼합유기용매(DCM/MeOH(9:1, V/V))를 통해 sea ice algae 내 총 지질(total lipid) 성분을 추출하였다. 추출된 지질성분은 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 고체상 컬럼을 이용해 수분 제거를 수행하였다. 수분제거 완료된 총 지질 성분은 활성화된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 고체상 컬럼을 이용하여 비극성, 극성 성분을 분리하였으며, 이때 사용된 혼합유기용매는 hexane:DCM(9:1, v/v) 및 DCM:MeOH(1:1, v/v)이다. 분리된 극성성분은 지방산 분석을 위해 BF<sub>3</sub>-MeOH를 이용하여 60 °C에서 10분 동안 메틸화 반응을 수행하였다. 메틸기가 결합된 자유 지방산(free fatty acid) 성분들은 DCM를 이용하여 추출되었다. 자유 지방산 내 인지질-지방산 성분을 추출하기 위해 고체상 실리카 컬럼을 이용하여 인지질 성분을 분리하였으며, 이때 사용된 유기용매는 100 % MeOH이다. 분리된 성분은 질소가스를 이용해 농축시켰으며, 가스크로마토그램-질량분석기(GC-MS) 및 가스크로마토그램(GC) 분석을 위해 2 ml 바이알에 최종적으로 옮겨 담았다.

#### 가스크로마토그램(GC)

분리된 지방산 성분 분석을 위해 불꽃이온화검출기(FID)가 장착된 가스크로마토그램(Shimadzu)을 이용하였다. 피크(peak) 분리는 CP-sil 5 CB 실리카 컬럼을 이용하였으며, 운반기체로서 고순도 헬륨을 사용하였다. 가스크로마토그램 내 초기 온도조건은 70 °C이며 20 °C/min의 비율로 130 °C, 4 °C/min의 비율로 320 °C로 점차 올려주었으며, 최종적으로 15 분간 유지시켰다.

#### 가스크로마토그램-질량분석기(GC-MS)

지방산 피크의 분자량 분석을 위해 가스크로마토그램-질량분석기(Shimadzu, QP2010)를 이용하였다. m/z의 범위는 50 - 800이며, 컬럼 및 온도조건은 가스크로마토그램과 동일하게 설정해주었다.

### 가스크로마토그램-동위원소분석기(GC-IRMS)

지방산의 탄소 안정동위원소비( $\delta^{13}\text{C}$ ) 분석을 위해 가스크로마토그램-동위원소분석기(Isoprime, GV instruments)를 이용하였다. 컬럼 및 온도조건은 가스크로마토그램, 가스크로마토그램-질량분석기와 동일하게 설정해주었다. 탄소 안정동위원소비 분석을 위해 산화구리로 채워져 있는 유기용기를 850 °C가 유지되는 연소관에 장착하였다. 탄소안정동위원소비를 알고 있는 이산화탄소를 레퍼런스 가스로 사용하였으며, 분석 시작 전과 후에서 각각 2번씩 배출되도록 설정해 주었다. 탄소 안정동위원소비의 계산 및 분석 시 표준편차를 확인하기 위해 동위원소 값이 확인된 표준물질(alkane mixture type A6, Indiana University)을 이용하였으며, 시료 간에 확인된 표준편차는  $\pm 0.5\%$  이내로 분석되었다. 최종적으로 계산된 탄소 동위원소비는 Vienna Pee Dee Belemnite(VPDB)로 표현되었다.

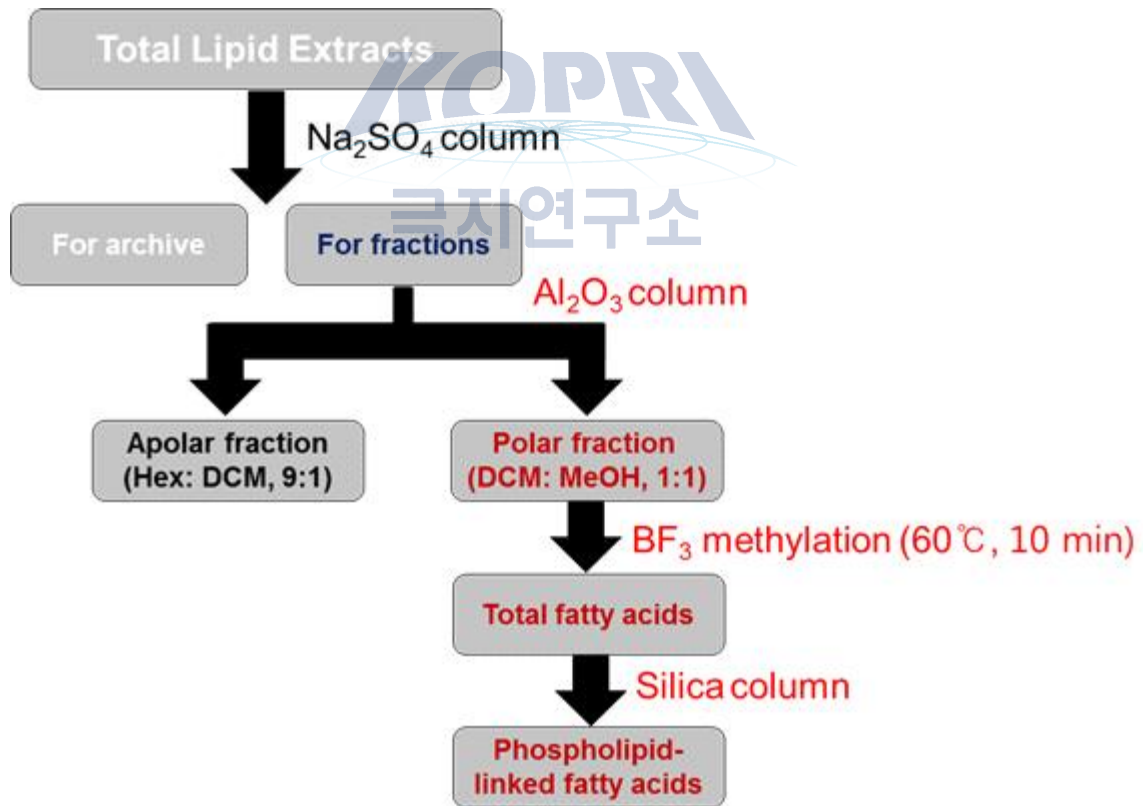


그림 4. 지방산 추출 과정 및 분석 흐름도

바. HBI 분석 방법

시료의 추출 및 GC/MS 분석은 Belt et al.(2012)의 방법을 따랐다. 먼저 시료에 내부표준 물질(9-OHD, 7-HND, 0.1 $\mu$ g)을 주입하고 DCM/MeOH 3 ml를 넣고 초음파 파쇄기로 15 분간 추출한 후 원심분리하여 상등액을 취하였다. 총 3 회 반복하여 총 지질을 추출하였다. 추출된 지질은 실리카 컬럼을 이용하여 비극성 지질과 극성 지질로 분리하였다.

각각의 분리된 지질은 GC/MS로 분석 하였다. 시료의 분리는 Agilent HP-5ms column (30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25 mm)가 사용 되었다. GC 승온은 40 ~ 300  $^{\circ}$ C 까지 분당 10  $^{\circ}$ C의 비율로 승온 후 10 분간 유지하였다. 정성 및 정량 분석을 위해 SCAN 모드와 SIM 모드로 동시 분석을 실시하였다.

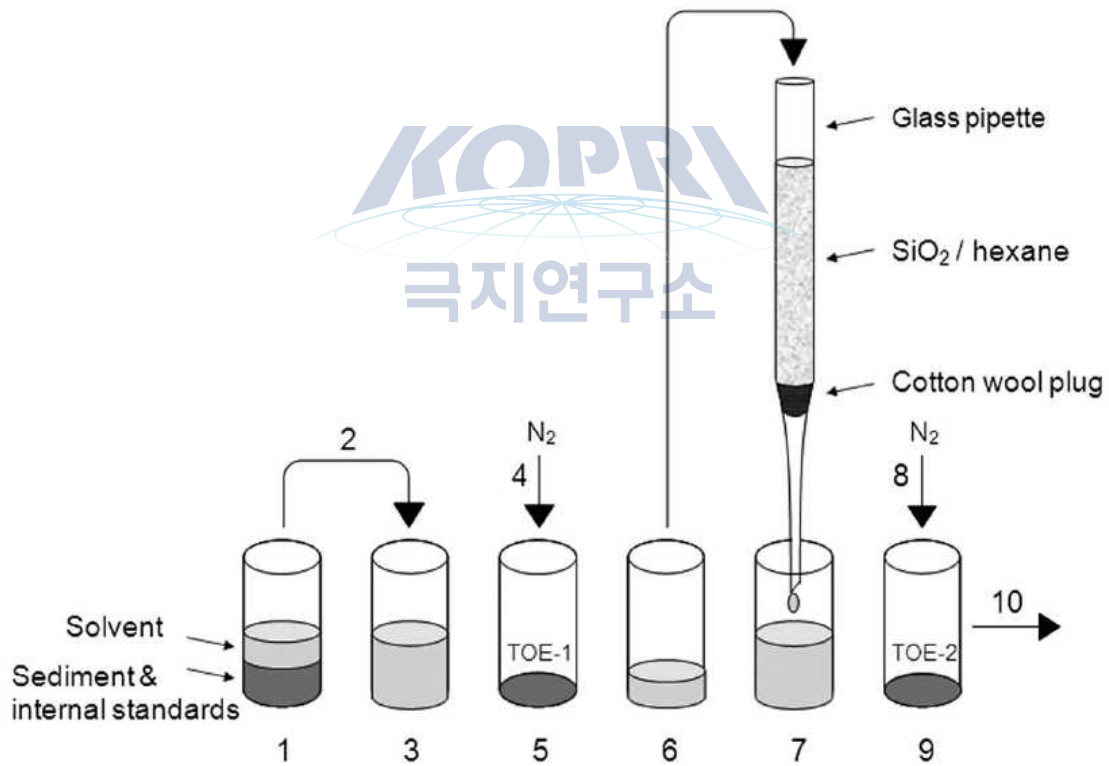


그림 5. HBIs 시료 전처리 방법 (Belt et al., 2012)

### 3. 결과 및 토의

#### 가. 남·북극 sea ice algae의 종조성

남·북극 sea ice algae의 종조성은 두 해역 모두 규조류가 절대 우점하고 있으나 서식환경의 차이에 의해 서로 다른 종조성을 보이고 있다. 최근 연구결과 및 Horner (1985)와 Garrison (1991)의 보고에 의하면, 광합성을 하는 미세조류의 군집 중 90% 이상이 대부분 규조류임을 밝히고 있다. 그러나 종분류 방법의 발전으로 편모조류 또한 해빙 생태계 내에서 발견되고 있다(Gast et al., 2006). 전체적으로 종 다양성은 남극보다는 북극 해빙에서 높게 보이고 있으며, 북극 해빙의 경우 태평양과 대서양과 인접하고 있으며, 북극해 주변 육상 기원 종의 유입으로 인하여 뚜렷한 종 다양성을 보였다(Arrigo, 2017). 본 연구의 결과에서도 남·북극 sea ice algae의 종조성은 규조류가 절대 우점하고 있다. 특히 북극 해빙에 서식하는 미세조류는 *Melosira artica* 와 *Navicula* spp.가 우점하고 있으며(그림 6), 남극 해빙에 서식하는 미세조류는 *Fragilariopsis* sp.가 우점하는 것을 볼 수 있다. 또한 남극 해빙에 서식하는 미세조류의 경우 heterotrophic한 dinoflagellate가 발견되었다(그림 7).

극지연구소



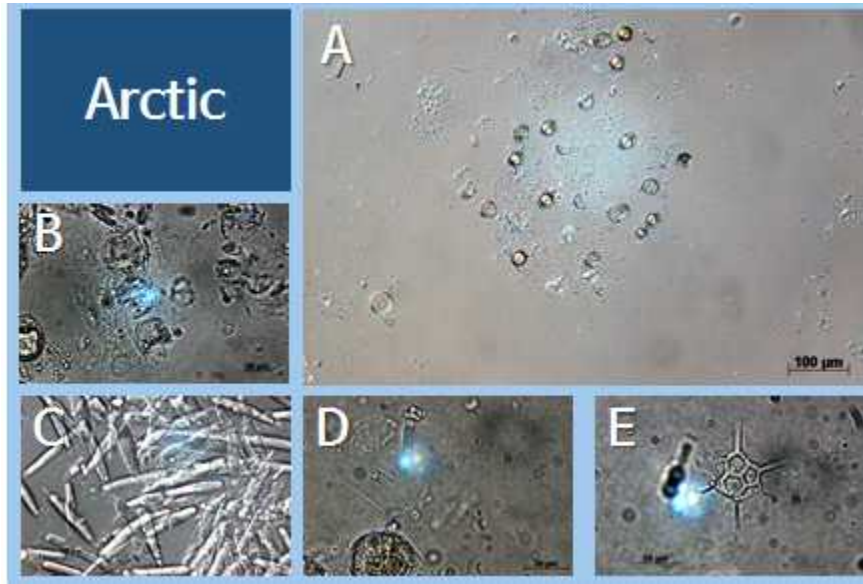


그림 6. 북극 해빙에 서식하는 미세조류. A: 전체 종조성; B: *Melosira arctica*; C: *Navicula* spp.; D: *Chaetoceros socialis*; E: *Dictyocha speculum*.

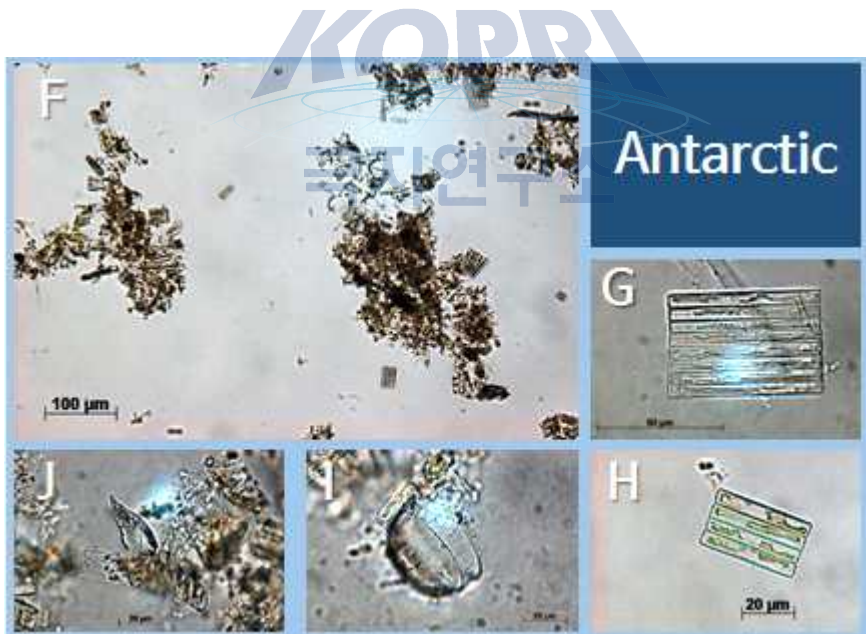


그림 7. 남극 해빙에 서식하는 미세조류. F: 전체 종조성; G: *Fragilariopsis* Type 1; H: *Fragilariopsis* sp. Type 2; I: *Centralis* diatom; J: Dinoflagellate (heterotrophic)

나. 남·북극 sea ice algae의 입자성 유기 탄소 및 안정동위원소 비 비교

남·북극 sea ice algae의 입자성 유기 탄소 및 질소, 안정동위원소 값은 표 1에 나타냈다. 북극 sea ice algae의 경우 식물플랑크톤이 군체를 이룬 massive 형태를 나타내기 때문에 탄소의 비율이 38.82 %, 질소의 비율은 0.55 %을 각각 나타냈다. 북극의 경우 질소 영양염류의 고갈로 인하여 질소의 비율이 상당히 낮은 것으로 보인다. 반면, 남극 sea ice algae는 탄소 21.2 %, 질소는 2.01 %로 북극 미세조류에 비해 높은 질소량을 함유하고 있는 것으로 보인다. 북극 sea ice algae는 상대적으로 무거운 탄소/질소 동위원소 값을 나타내고 있으며(탄소: -21.66 ‰, 질소: 8.2 ‰), 남극 sea ice algae는 탄소 24.69 ‰, 질소 5.37 ‰의 상대적으로 가벼운 동위원소 값을 보이고 있다. 특히 남극 sea ice algae가 가벼운 동위원소값을 보이고 있는 것은 해빙 내 sea ice algae의 높은 생물량에 의해서 dissolve inorganic carbon(DIC)가 상당히 고갈되어 있기 때문으로 보인다 (Rau et al., 1991; Kennedy et al., 2002; Arrigo et al., 2003).

표 1. 남·북극 sea ice algae의 입자성 유기 탄소 및 질소, 안정동위원소 값

name	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	C (%)	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	N (%)
Arctic sea ice algae	-21.66	38.85	8.20	0.55
Antarctic sea ice algae	-24.69	21.20	5.37	2.01

다. 거대분자조성

남·북극 sea ice algae의 거대분자조성의 경우 북극 sea ice algae는 지질(55.4 %)이 가장 큰 분포를 차지하고 있으며, 탄수화물(36.6 %), 단백질(8.0 %)이 각각 조성을 나타내고 있다. 남극 sea ice algae는 탄수화물(67.7 %)이 가장 큰 비중을 차지하고 있고, 지질(28.8 %), 단백질(3.5 %)의 조성을 나타내고 있다(그림 9).

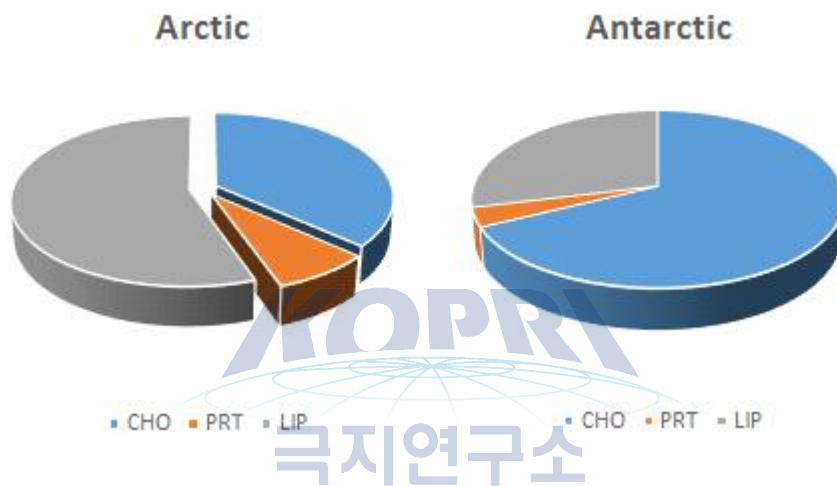


그림 9. 남·북극 sea ice algae의 거대분자 조성

라. 자외선 흡수 물질의 분포 및 흡광도

자외선 흡수 물질인 mycosporine-like amino acids(MAAs)는 흡광도 310 nm ~ 360 nm의 최대흡광도를 보이는 물질로 유해광(자외선)으로부터 세포 내 내부 기관을 보호하기 위한 물질로 널리 알려져 있다. 그러나 본 연구결과, 북극 sea ice algae는 massive 형태로 서식함으로써 군체를 이루기 때문에 자외선 흡수 물질의 분비가 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 남극 sea ice algae의 경우 해빙에 투과된 빛에 의해서 자외선 흡수 물질의 생성이 이루어진 것을 볼 수 있다(그림 10).

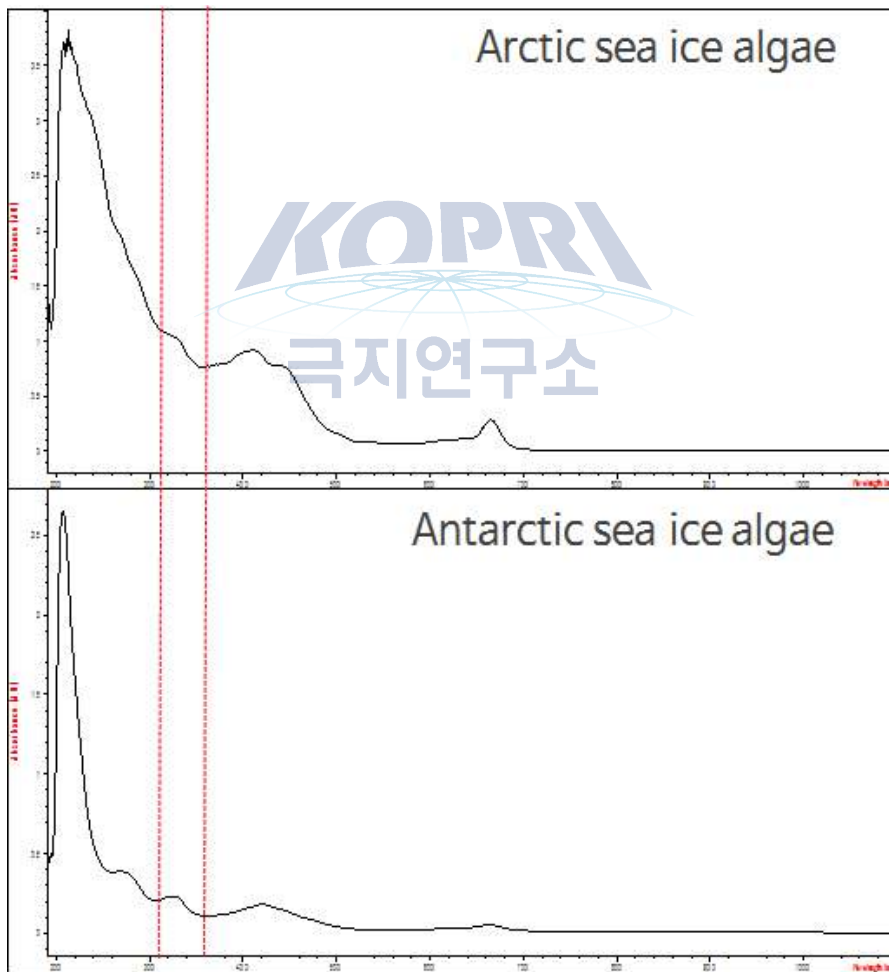


그림 10. 남·북극 sea ice algae의 자외선 흡수 물질의 분포

또한 세포 크기 또는 세포 당 더 많은 양의 색소를 함유함으로써 더 많은 양의 빛을 흡수할 수 있는 미세조류 흡수 스펙트럼(blue/red peak)을 통해서 광합수 효율을 알아볼 수 있다(Morel and Bricaud 1981). 해빙과 같은 극한 환경에서 자라는 해빙 미세조류는 해빙 표면 가까이에서 자라는 조류보다 더 큰 색소 함량을 보이게 되며, 해빙에 투과된 빛보다 군체를 형성하면서 self-shaded된 북극 sea ice algae에서 더 높은 색소를 함유하고 있는 것을 볼 수 있다. 북극 sea ice algae의 경우 blue/red peak가 4.57을 보이는 반면, 남극 sea ice algae의 경우 3.63으로 낮은 비율을 보이고 있다. 따라서 해빙 내 투과되는 광량이 북극 massive 군집을 이룬 식물플랑크톤보다 원활함으로 볼 수 있다.



마. 남·북극 sea ice algae의 보조 색소 조성

북극 sea ice algae의 chlorophyll a의 농도는  $84.54(\pm 0.32)$   $\mu\text{g/g}$ 으로 massive 군집을 이룬 값을 보이고 있는 반면, 남극 sea ice algae의 chlorophyll a의 농도는 상대적으로 낮은  $0.66(\pm 0.06)$   $\mu\text{g/g}$  값으로 해빙의 brine channel에 서식하고 있는 sea ice algae의 생물량을 보이고 있다. 남·북극 sea ice algae 모두 대부분 규조류로 규조류의 보조색소인 fucoxanthin의 농도가 가장 높게 나타났다. 북극 sea ice algae의 fucoxanthin의 농도는  $96.19(\pm 0.53)$   $\mu\text{g/g}$ 이며, 남극 sea ice algae는  $1.98(\pm 0.015)$   $\mu\text{g/g}$  농도를 각각 나타내고 있다. 남극 sea ice algae에 비해 비교적 다양한 보조색소 조성과 높은 농도를 보이고 있다(그림 11).

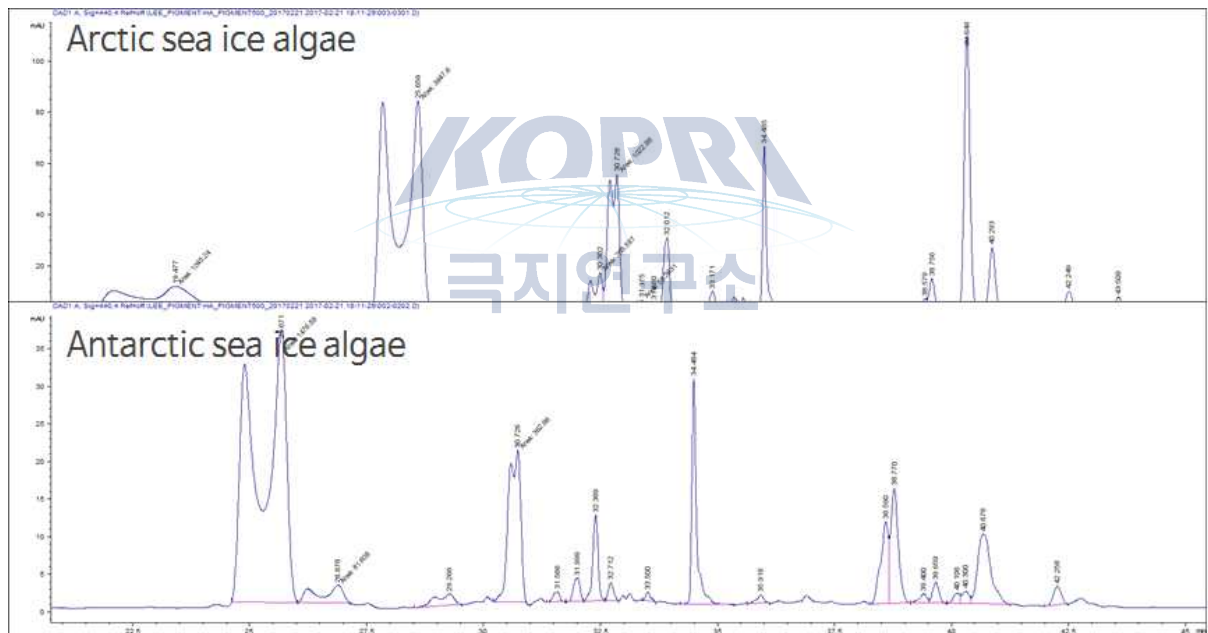


그림 11. 남·북극 sea ice algae의 보조 색소 조성 비교

바. 남·북극 sea ice algae의 지방산 농도 비교 및 지방산 안정동위원소 비

남·북극 sea ice algae의 지방산 농도는 표 2에 나타났다. 북극 sea ice algae의 지방산 조성에 비해 남극 sea ice algae의 지방산 조성이 상대적으로 다양한 것을 볼 수 있다. 특히 다중불포화지방산의 농도가 남극 sea ice algae의 경우 26.5 %로 북극 sea ice algae의 다중불포화지방산 비율 2.8 %에 비해 월등히 높은 것을 볼 수가 있다(그림 13). 북극 sea ice algae의 지방산 조성은 포화지방산과 단일 불포화지방산의 비율이 상대적으로 높은 것을 볼 수 있다.

표 2. 남·북극 sea ice algae의 지방산 농도 비교

	Antarctic	Arctic
<b>Saturated fatty acids (%)</b>		
C14	3.9	14.9
C15	0.7	0.5
C16	15.7	29.7
C18	12.0	8.7
C19	1.8	N.D.
C21	14.1	N.D.
<b>Monounsaturated fatty acids (%)</b>		
C15:1	17.1	41.1
C17:1	6.2	2.2
C21:1	2.1	N.D.
<b>Total polyunsaturated fatty acids (%)</b>		
	26.5	2.8
<b>Total Sum (%)</b>		
	100.0	100.0

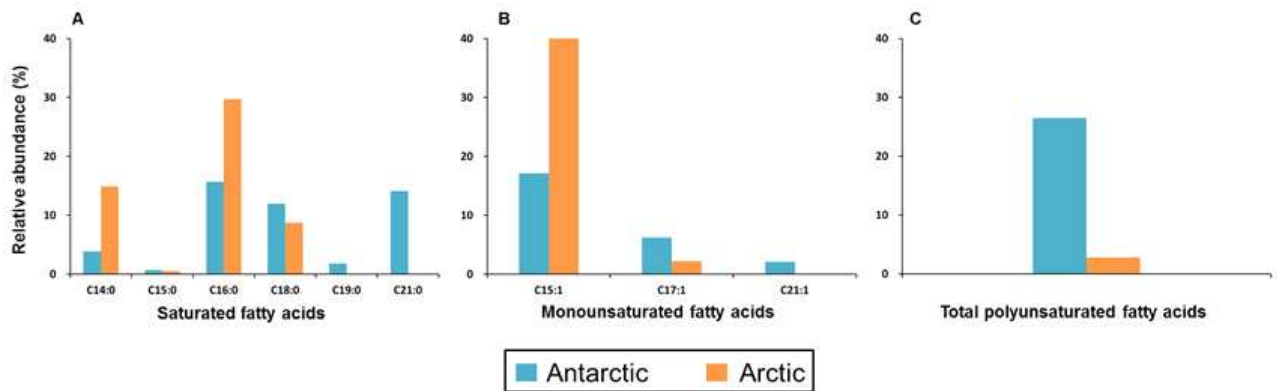


그림 13. 남·북극 sea ice algae의 지방산 조성 비교. A: 포화지방산 조성; B: 단일 불포화지방산 조성; C: 총 다중불포화지방산 비율



상대적으로 짧은 탄소사슬고리를 가지는 nC15, nC17, nC19의 경우 식물플랑크톤의 기원의 지질생체지표(biomarker)로 활용 가능하다. 지방산은 종에 따른 구조적 차이가 뚜렷하기 때문에 해양환경에서 유기물기원 파악에 널리 사용되는 생체지표 중 하나이다 (Harvey, 1994). 예를 들어 C14~C21 포화 지방산(saturated fatty acid)의 경우 해양의 수층 생산력을 나타내는 지표로 사용되고 있고 C22~C33 saturated fatty acid는 육상기원 유기물(vascular plant)의 지시자로 활용된다(Volkman et al., 1980). Monounsaturated fatty acid(MUFAs) 와 poly unsaturated fatty acids(PUFAs)는 모두 규조류와 같은 해양 조류 기원인 반면 dicarboxylic Acids(DCAs)는 육지기원 지시자로 사용된다.



### 남·북극 sea ice algae의 지방산 안정동위원소 비

Sea ice algae 지방산의 안정동위원소를 측정함으로써 특정 생체지표로서의 역할을 확인하였다. 북극 sea ice algae 지방산의 안정동위원소비는 C16:0는 -23.2 ‰의 값을 나타내고 있으며, C17:1은 -24.0 ‰, C18:0는 -21.9 ‰의 상대적으로 무거운 탄소안정동위원소비를 나타내고 있다. 특히 무거운 bulk 탄소안정동위원소비를 지방산 각 조성에서 반영하여 나타내고 있다(그림 14).

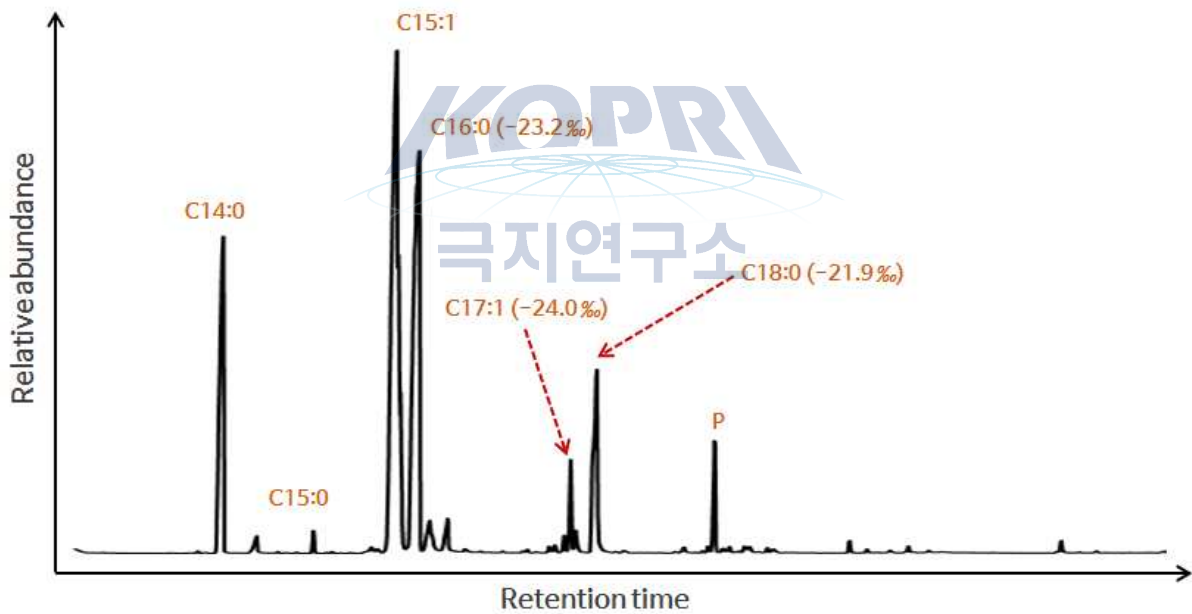


그림 14. 북극 sea ice algae의 지방산 탄소안정동위원소 비

남극 sea ice algae의 지방산 탄소안정동위원소비는 북극 sea ice algae에 비해 가벼운 값을 전체적으로 나타내고 있다. 남극 sea ice algae 지방산의 안정동위원소비는 C16:0는 -23.4 ‰의 값을 나타내고 있으며, C17:1은 -25.5 ‰, C18:0는 -25.5 ‰의 상대적으로 가벼운 탄소안정동위원소비를 나타내고 있다. 남극 sea ice algae 또한 가벼운 bulk 탄소안정동위원소비를 각 지방산 탄소안정동위원비에서도 나타내고 있다(그림 15). 각 지방산 탄소안정동위원소비는 bulk 탄소안정동위원소비를 반영하고 있다.

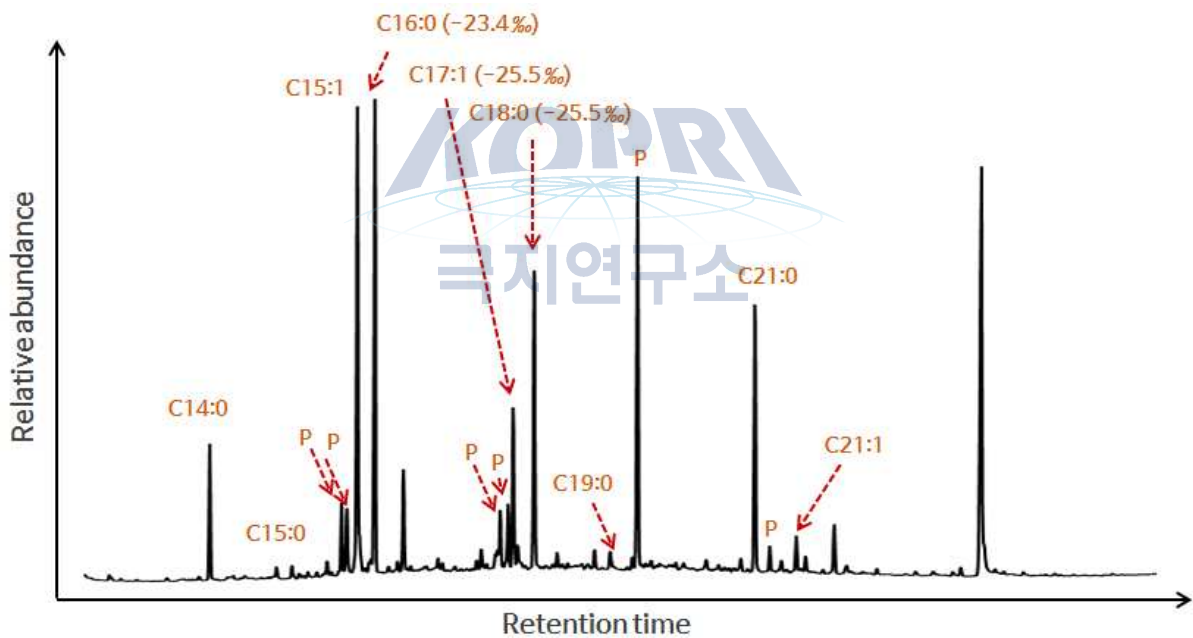


그림 15. 남극 sea ice algae 지방산 탄소안정동위원소비. P: Polyunsaturated fatty acids.

지방산 실험 시 GC 분석을 위해서  $\text{BF}_3$  methylation 과정은 필수적이다. 하지만 이 과정동안 한 개의 C가 첨가되며, C가 결합된다는 것은 실험과정 중에 동위원소 분별작용이 생기게 됨을 의미한다. 따라서 이 부분을 고려해줘야 정확한 지방산의  $\delta^{13}\text{C}$  값을 보정할 수 있다. 이 부분을 고려해주기 위해서 단일 표준물질( $\text{C}_{19}\text{-COOH}$ )을 각 농도별로 methylation을 시켜줘 얼마나 동위원소가 차이가 나는지를 확인하였다. 그 결과, 농도별로 동위원소 변화가 없다는 것을 확인하였고, methylation 과정 동안 생기는 동위원소 값을 보정하여 최종적인 polyunsaturated fatty acids의  $\delta^{13}\text{C}$  값을 제시하였다(그림 16).

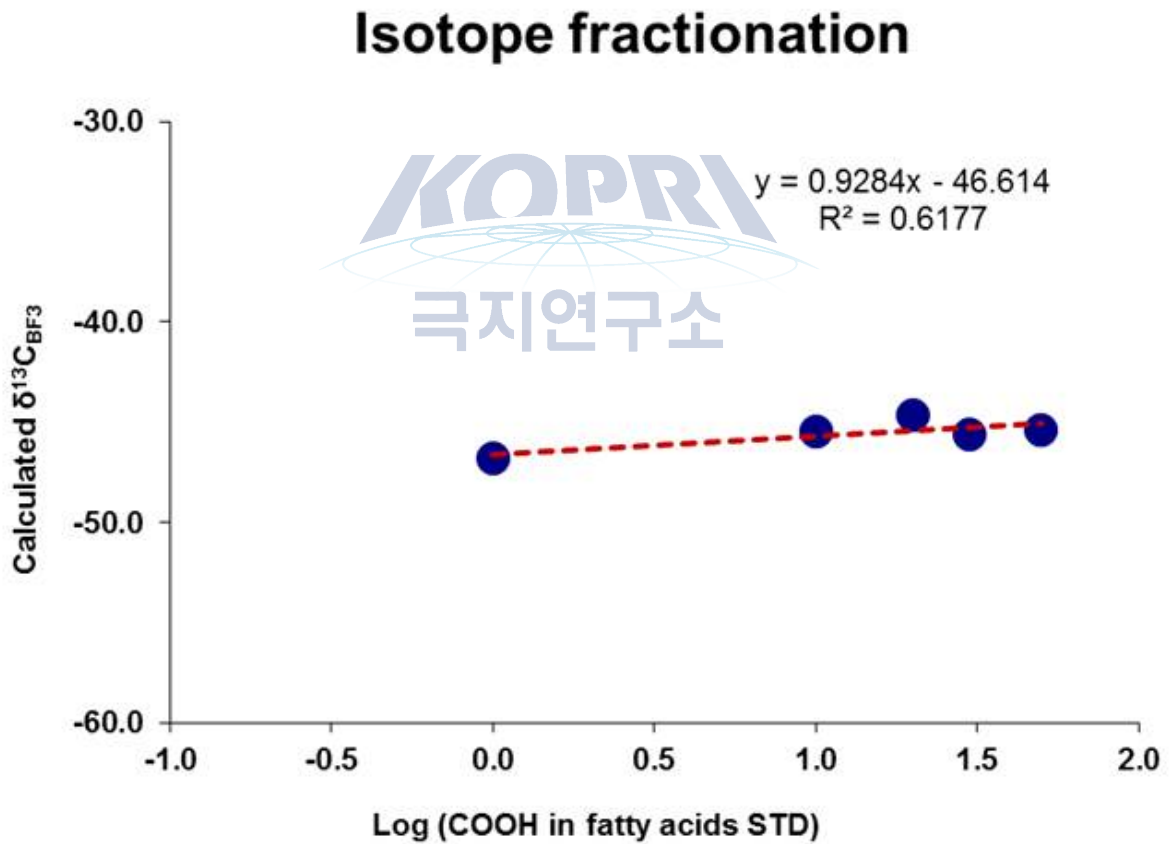


그림 16.  $\text{BF}_3$  methylation에 따른 동위원소 분별작용.

사. 남·북극 sea ice algae의 HBI 농도

단일-불포화 highly branched isoprenoid alkene(HBI)는 북반구에서 봄철 동안 특정 해빙 규조류에 의해 생산되고, 과거 해빙 기록을 복원하는데 사용되는 생체지표 이다 (Belt et al. 2007; Brown et al., 2011). Belt 등(2007)은 이 단일-불포화 HBI를 다른 HBI들과 구별하기 위해 IP25(IceProxywith25carbonatoms)라는 프록시로 명시하였다. 그 후, IP25는 해빙 규조류의 유기분자생체지표로서, 북극해역에서 과거 해빙 변화 복원을 위한 프록시로 널리 사용되고 있다(e.g. Massé et al., 2008; Belt et al., 2010, 2013; Fahl and Stein, 2012; Stein et al., 2012). IP25의 생산은 주로 해빙의 가장자리에서 활발하며 영구해빙구역이나 해빙이 없는 대양에서는 생산이 아주 미미하거나 없는 것으로 알려져 있다(e.g. Müller et al., 2011). 본 연구 결과, 북극 sea ice algae의 경우에서만 HBI가 검출되었다(그림 17). 북극 sea ice algae에서 IP25는 0.013  $\mu\text{g/g}$ , diene은 0.0193  $\mu\text{g/g}$  값을 각각 보였으나, triene은 검출되지 않았다.

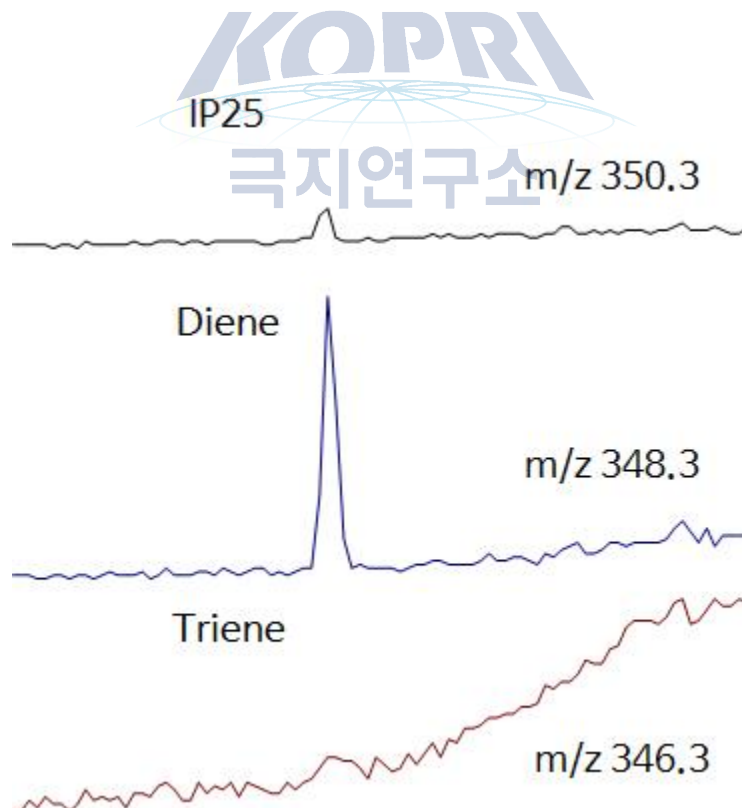
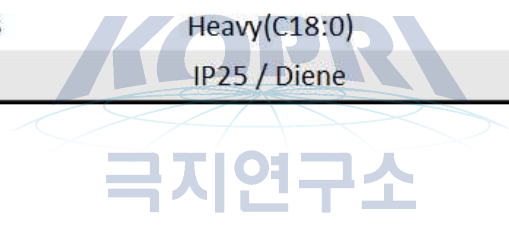


그림 17. 북극 sea ice algae의 HBI 스펙트럼.

남·북극 sea ice algae의 유기화합물 조성의 차이는 표 3에 정리하였다.

표 3. 남·북극 sea ice algae의 유기화합물 조성의 차이

	Arctic sea ice algae	Antarctic sea ice algae
서식 형태	Massive	Brain channel
우점종	<i>Melosira arctica</i>	<i>Fragilariopsis</i> sp.
POC	High	Low
PON	Low	High
$\delta^{13}\text{C}$ isotope	Heavy	Light
$\delta^{15}\text{N}$ isotope	Heavy	Light
Macro-composition	Lipid	Carbohydrate
Pigment	Photo-protective	Light-harvesting
Fatty acids (PUFA)	Low	High
Isotope of Fatty acids	Heavy(C18:0)	Light(C18:0)
HBI	IP25 / Diene	-



남·북극 sea ice algae의 가장 큰 차이점은 서식형태로 북극 sea ice algae는 해빙의 밑단부분에 붙어서 성장하여 거대한 군집을 이룬 형태를 이루고 있다. 반면 남극 sea ice algae는 해빙 내 brine channel에 서식함으로써 영양염과 빛의 제한을 상대적으로 많이 받은 것으로 보인다. 북극 sea ice algae의 대표 우점종은 규조류 중 *Melosira arctica*이며 높은 POC 농도, 낮은 PON 농도 및 무거운 탄소, 질소 안정동위원소비를 나타내고 있다. 반면, 남극 sea ice algae의 대표 우점종은 규조류 *Fragilariopsis* sp.로 상대적으로 낮은 POC 농도, 가벼운 탄소, 질소 안정동위원소비를 보이고 있으나, 상대적으로 높은 함량의 PON 값을 보이고 있다. 남·북극 sea ice algae의 거대 유기물 조성(탄수화물, 단백질, 지질)에서도 확연한 차이를 보이고 있으며, 북극 sea ice algae는 지질, 남극 sea ice algae는 탄수화물이 상대적인 함량에서 우세한 것을 볼 수 있다. 북극 sea ice algae는 거대한 군집을 이룸으로 광보호색소의 생성이 활발하며 HBI 생성 또한 남극 sea ice algae에 비해 두드러지는 것을 볼 수 있다. 그러나 높은 지질 함량에도 불구하고

다중불포화지방산의 농도는 남극 sea ice algae에 비해서 낮은 결과를 보이고 있으며, 지방산 탄소안정동위원소비는 bulk 탄소안정동위원소비를 값을 반영하여 무거운 동위원소비를 보이는 반면, 남극 sea ice algae의 지방산 탄소안정동위원소비는 가벼운 동위원소비를 보이고 있다. 향후 주변 해역 및 해빙 밑 퇴적물에서 지방산 탄소안정동위원소비와 같은 보다 다양한 정보를 통하여 과거 및 현재 해빙의 존재유무를 판단하는 자료를 제공할 것으로 기대된다.



## 제 2 절 케임브리지 베이의 sea ice algae

### 1. 케임브리지 베이의 sea ice algae 시료 채취 및 현장 배양 실험

국제 공동연구의 일환으로 Ice Covered Ecosystem-Cambridge bay Process Study(ICE-CAMPS)에 참여하여 북극 캐나다 케임브리지 베이에서 2017. 4. 22 ~ 5. 18 까지 landfast sea ice에 서식하는 sea ice algae를 채취하였다(그림 19).

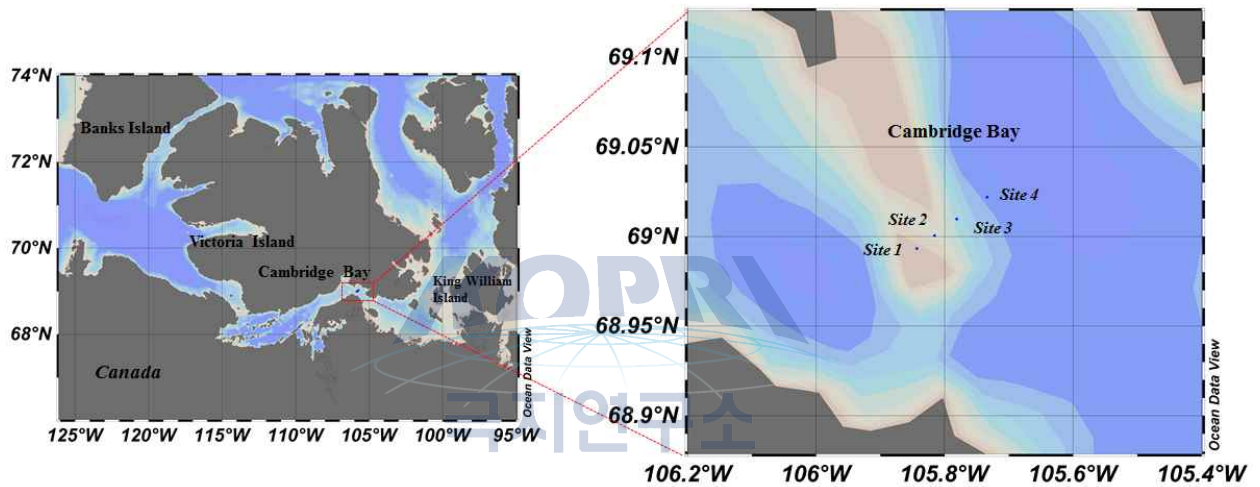


그림 19. 케임브리지 베이 시료 채취 정점

케임브리지 베이의 sea ice algae 시료를 확보 하였으며, 영양염 농도 분포에 따른 sea ice algae와 성장 시기에 따른 시료를 확보하였다(그림 20).



그림 20. 케임브리지 베이 해빙 아이스 코어 내 해빙 미세조류

또한 북극 sea ice algae의 생산력 측정을 위해 현장에서 배양을 실시하였으며, 안정동 위원소 추적자를 이용하여 생체지료 생산력 현장 배양실험을 실시하였다.

국제 협력(캐나다 매니토바 대학)의 일환으로 접근하기 어려운 캐나다 영해 내 sea ice algae의 생체량에 따른 시료를 채취하였으며, 북극 sea ice algae에 대한 연구 지속성을 위하여 캐나다 내 카운터 파트너와의 우호를 다질 수 있었던 계기가 되었다. 해빙에 대한 국내 연구가 미흡함으로서 선진 연구자들과의 공동 camp를 통하여 기술을 습득하고 이해하는 기회가 본 연구를 통하여 이루어졌다.

본 과제 연구기간 내 현장 조사가 늦어짐에 따라 현재 시료는 분석 중에 있으며, 국제적으로 유용한 자료를 생산할 것으로 기대된다.



## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제 1 절 목표달성도

○ 연구 개발 목표에 제시된 남·북극 해빙에 서식하는 sea ice algae 기원 물질 분석 및 물질 순환 특성을 조사하였다. 남·북극해 해빙에 서식하는 sea ice algae의 생산력 및 이차 산물(biomarker) 분석은 다양한 유기화합물을 분석함으로 기본 자료를 확보하였으며, 현재 배양실험을 통한 sea ice algae의 생산력을 측정하였으나 결과는 현재 분석 중에 있다. 또한 북극 연안 해역에서의 landfast ice에 서식하는 sea ice algae 특성 및 환경인자와의 관계 분석을 통한 생화학적 특성 이해는 도출된 자료를 통하여 논문화 작업을 진행하고 있다.



### 제 2 절 관련분야에의 기여도

○ 본 연구에서는 남·북극 sea ice algae의 서식 형태 및 성장 형태에 따른 유기화합물의 조성을 분석함으로써 sea ice algae에 대한 생체지표 가능한 유기화합물 자료를 제공하였다. 특히 남·북극 sea ice algae 유기물 조성에서 확인한 차이를 보이고 있으며, 보다 광범위한 지역에서 다양한 시료의 확보와 분석이 진행함으로써 데이터베이스를 구축할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 광범위한 지역 및 다양한 시료를 확보함으로써 다양한 연구 주제의 접근이 가능하며, 다학제간 연구를 향후 발굴, 추진할 것으로 예상된다.

## 제 5 장 연구개발 결과 활용 계획

○ 본 과제를 통해 제시된 남·북극 sea ice algae의 유기물 조성 및 종조성을 통하여 해양 유기물 순환을 이해하는데 해빙 생태계의 역할에 대해서 고찰할 수 있을 것으로 보인다. 해양 유기물 순환에 있어 그동안 간과되었던 해빙 생태계의 중요성 및 생태적 위치를 고양시키며 향후 해빙 생태계에 대한 중요성에 대한 중요한 기본 자료를 제공할 것으로 사료된다. 또한 광범위한 지역과 다양한 시료 확보를 통하여 다양한 연구 주제 창출이 가능하며 다학제간 공동연구가 활성화 될 것으로 보인다. sea ice algae 생체 지표 개발을 통하여 주변 해역 및 퇴적물을 통하여 해빙 거동에 대한 과거, 현재를 파악하고 미래를 예측할 수 있는 자료를 제공할 것으로 기대되며, 인공위성을 통한 해빙의 거동 연구와 연계하여 보다 정확한 자료 생산을 위한 보정 자료로서의 역할을 할 것으로 기대된다.



## 제 6 장 참고문헌

- Arrigo, K.R., 2014. Sea ice ecosystems. *Annual Reviews of Marine Science*, 6, 13.1-13.29.
- Arrigo, K.R., 2017, Sea ice as a habitat for primary producers. In: *Sea ice* (Ed, Thomas D.N), pp. 352-369. Wiley Blackwell.
- Belt, S.T., Massé, G., Rowland, S.J., Poulin, M., Michel, C., LeBlanc, B., 2007, A novel chemical fossil of palaeo sea ice: IP25. *Organic Geochemistry*, 38, 16 - 27.
- Belt, S.T., 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. *Quaternary Science Reviews*, 79, 9 - 25.
- Belt, S.T., Vare, L.L., Massé, G., Manners, H.R., Price, J.C., MacLachlan, S.E., Andrews, J.T., Schmidt, S., 2010, Striking similarities in temporal changes to spring sea ice occurrence across the central Canadian Arctic Archipelago over the last 7000 years. *Quaternary Science Reviews*, 29, 3489 - 3504.
- Bligh, E.G., Dyer, W.J., 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification, *Canadian. J. Biochem. Physiol.* 37, 911-917.
- Brown, T. A., Belt, S.T., Philippe, B., Mundy, C.J., Massé, G., Poulin, M., Gosselin, M., 2011, Temporal and vertical variations of lipid biomarkers during a bottom ice diatom bloom in the Canadian Beaufort Sea: Further evidence for the use of the IP25 biomarker as a proxy for spring Arctic sea ice. *Polar Biology*, 34, 1857 - 1868.
- Brunel, J., 1962. *Le phytoplankton de la Baie des Chaleurs*. Les Presses de L'Universite de Montreal., pp. 365
- Cupp, E. E., 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of north America. *Bull. Scripps Inst. of Oceanogr., Univ. Calif.* 5, 1-237.
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.* 28, 350-356.
- Fahl, K., Stein, R., 2012. Modern seasonal variability and deglacial/Holocene change

- of central Arctic Ocean sea-ice cover: New insights from biomarker proxy records. *Earth and Planetary Science Letters*, 351 - 352, 123 - 133.
- Gaines, S.M., Eglinton, G., Rullkolter, J., 2009. *Echoes of life-What fossil molecules reveal about earth history*. Oxford University Press, New York.
- Harvey, H. R., 1994. Fatty acids and sterols as source marker of organic matter in sediments of the North Carolina continental slope. *Deep Sea Research II* 41, 783-796.
- Hasle, G.R. and E.E. Syvertsen., 1996. Marine diatoms. C. R. Tomas ed. "Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates". Academic Press. pp. 838
- Hendey, N.J., 1964. An introductory account of the smaller algae of British coastal waters. V. Bacillariophyceae (Diatoms). pp. 317
- Hunt, J.H., 1996. *Petroleum geochemistry and geology*, 2<sup>nd</sup> ed. Freeman, New York.
- Johnsen, J., Hegseth, E.N., 1991. Photodaptation of sea ice microalgae in the Barents Sea. *Polar Biology*, 11, 179-184.
- Kottmeier, S.T., Sullivan, C.W., 1988. Sea ice microbial communities. IX. Effects of temperature and salinity on metabolism and growth of autotrophs and heterotrophs. *Polar Biology*, 8, 293-304.
- Lizotte, M.P., Sullivan, C.W., 1991. Photosynthesis-irradiance relationships in microalgae associated with Antarctic pack ice: evidence for in situ activity. *Marine Ecology Progress Series*, 71, 175-184.
- Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L., Randall, R.J., 1951. Protein measurement with the folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.* 193, 265-275.
- Nicolaus, M., Katlein, C., Maslanik, J., Hendricks, S., 2012. Changes in Arctic sea ice result in increasing light transmittance and absorption, *Geophysical Research Letters*, 39, L24501.
- Marsh, J.B., Weinstein, W.J., 1966. Simple charring method for determination of lipids. *J. Lipid Res.* 7, 574-576.
- Massé, G., Rowland, S.J., Sicre, M.-A., Jacob, J., Jansen, E., Belt, S.T., 2008, Abrupt climate changes for Iceland during the last millennium: Evidence from high resolution sea ice reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters*, 269,

565 - 569.

- Meyers, P.A., 2003. Application of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry* 34: 261-290.
- Müller, J., Wagner, A., Fahl, K., Stein, R., Prange, M., Lohmann, G., 2011, Towards quantitative sea ice reconstructions in the northern North Atlantic: A combined biomarker and numerical modelling approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 306, 137 - 148.
- Peters, K.E., Walters, C.C., Moldowan, J.M., 2005. *The biomarker guide*. 2<sup>nd</sup> ed.: Biomarkers and isotopes in petroleum systems and earth history. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Round, F.E., R.M. Crawford and D.G. Mann, 1990. *The Diatoms, Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge University Press.
- Simonsen, R., 1974. The diatom plankton of the Indian Ocean expedition, R/V "Meteor", 1964-1965. *Meteor Forsch.-Ergebnisse*. 19, 1-107.
- Stein, R., Fahl, K., Müller, J., 2012, Proxy reconstruction of Cenozoic Arctic Ocean sea-ice history - From IRD to IP25-. *Polarforschung*, 82, 37 - 71.
- Volkman, J. K., Johns, R. B., Gillan, F. T., Perry, G. J., 1980. Microbial lipids of an intertidal sediment-I. Fatty acids and hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 44, 1133-1143.

## 주 의

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