제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구에 관한 연구” 과제의 위탁연구 “서남극 코어퇴적물에서 규조를 이용한 생층서 및 고환경 변화 연구” 과제의 단계보고서로 제출합니다.

2023. 1.

(본과제) 총괄연구책임자 : 유 규 철

위탁연구기관명 : 전북대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 박 영 숙

위탁참여연구원 : 신 문 상

편집순서 3

보고서 초록

위탁연구과제명	서남극 코어퇴적물에서 규조를 이용한 생층서 및 고환경 변화 연구				
위탁연구책임자	박 영 숙	해당단계 참여연구원수	2	해당단계 연구비	50,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	전북대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	

◉서남극 지역으로부터 채취한 BS17-GC18, RS19-GC09와 AP18-LC06코어퇴적물 분석

◉BS17-GC18: 22속 54종, 규조 개체수 농도 0.01 ~ 9.25 $\times 10^7$/g

규조 군집대 4개: I (700-839 ㎝), II (500-700 ㎝), III (231-500 ㎝), IV (40-231 ㎝)

◉RS19-GC09: 27속 57종, 규조 개체수 농도 0.01 ~ 28.75 $\times 10^7$/g

규조 군집대 4개: I (190-330 ㎝), II (130-190 ㎝), III (70-130 ㎝), IV (0-70 ㎝)

◉AP18-LC06: 34속 82종, 규조 개체수 농도 1.2 ~ 5.9 $\times 10^7$/g

각 우점 종들의 산출이 계속적으로 나타나며 증감을 반복하는 경향

◉ 고환경 해석

◎BS17-GC18: Glacial-Deglacial-Interglacial-Glacial의 순으로 연구지역의 고환경 변화

◎RS19-GC09: Glacial-Deglacial-Interglacial-Glacial로 고환경 변화

◎RS15-GC67: *Chaetoceros* resting spores와 규조 절대 개체수 농도가 상대적으로 풍부한 1200 ㎝층준의 하부가 상부보다 온난하였음 (warm period-cold period)

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	서남극, 코어 퇴적물, 규조, 군집대, 고환경
	영 어	West Antarctica, core sediment, diatom, assemblage zone, paleoenvironment

요 약 문

Ⅰ. 제 목

서남극 코어퇴적물에서 규조를 이용한 생층서 및 고환경 변화 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

◎ 목적

본 연구는 서남극해 인근 지역에서 기후변화에 따른 규조 군집의 변화를 체계적으로 연구하여 해빙 및 빙상의 분포 변화를 파악하는 데 목적이 있다.

◎ 필요성

- 서남극반도에서 규조 군집은 sea-ice, 영양염류 공급, 성층화 및 ice-mass의 변화를 알려 주기 때문에 종 조성에 대한 연구는 과거 온난기에 대한 기록을 가장 반영하고 있다.

- 과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구이라는 본과제의 목표에 맞추어서 규조의 연구결과를 이용하여 과거 온난기의 서남극 빙상 규모 변화를 복원하고자 한다.

- 남극지역의 지구 온난화가 일어나고 있는 원인을 알아내기 위해서는 미고생물학적인 연구 수행이 필요하며, 국제적인 연구 동향(환경지시자개발, 기후변화예측)에 맞추어 나가기 위해서는 서남극지역에서의 규조 연구의 수행이 필요하다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1단계 3개년동안 수행된 연구 범위는 서남극 지역에 위치한 크리스탈 사운드지역(BS17-GC18), 로스해 McMurdo Sound 지역(RS19-GC09), Joinville Islands 지역(AP18-LC06)에 해당된다. 각 연구 코어로부터 규조 분석을 통하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

-시대 지시종에 따른 퇴적연대 및 생층서 설정

규조의 산출분포를 이용하여 군집 분석에 의한 생층서대설정

-환경 지시종에 따른 퇴적환경의 변화 해석

산출된 규조 군집의 생층서적 연구로서 규조의 산출양상과 군집분석을 실시하고, 산출되는 규조의 종별 산출빈도와 생태별 정량분석을 통하여 기초 데이터를 형성하였다. sea-ice species와 open water species, *Chaetoceros* resting spore와 같은 환경 지시종에 의해서 시추코어 퇴적물의 퇴적당시 고환경을 해석하였다.

Ⅳ. 연구개발결과

서남극 지역에 위치한 크리스탈 사운드, McMurdo Sound, Joinville Islands 지역으로부터 BS17-GC18, RS19-GC09, AP18-LC06코어를 채취하여 규조를 분석하였다.

○ BS17-GC18

- 총 22속 54종 감정
- 4개의 규조 군집대를 설정

규조 군집대 I (700-839 ㎝), 규조 군집대 II (500-700 ㎝), 규조 군집대 III (231-500 ㎝), 규조 군집대 IV (700-231 ㎝)

- *Thalassiosira antarctica*의 cold type과 warm type, *Eucampia antarctica* var. *recta*와 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*의 산출비교 및 환경지시종의 분포에 따라 고환경 변화 해석

Glacial-Deglacial-Interglacial-Glacial의 순으로 연구지역의 고환경 변화

○ RS19-GC09

- 총 27속 57종 감정
- 4개의 규조 군집대를 설정

규조 군집대 I (190-330 ㎝), 규조 군집대 II (130-190 ㎝), 규조 군집대 III (70-130

㎝), 규조 군집대 IV (0-70 ㎝)

- 공해종(TW)과 해빙종(TC)의 산출 분포를 TW/TW+TC의 비와 비교하여 TD값을 나타내었고, 그에 따라 RS19-GC09의 퇴적 동안 4번의 기후 변화를 파악 Glacial-Deglacial-Interglacial-Glacial의 순으로 연구지역의 고환경 변화

○ AP18-LC06

- 총 34속 82종 감정
- 우점종들의 산출이 계속적으로 나타나며 증감을 반복하는 경향을 보임
- 약 4000년 이후에 퇴적되었으며 Open water종과 Sea-ice종의 산출 분포를 비교한 결과, open water종과 sea-ice종의 산출이 계속적으로 나타나면서 sea-ice종의 산출이 상대적으로 높게 나타난다. 따라서 꾸준한 seasonal open water의 시기가 있었으며, 601 ㎝, 800 ㎝, 900-1050 ㎝, 1801 cm, 2001 cm구간에서는 *F. kerguelensis*의 산출이 나타나는 것으로 보아 따뜻한 해수가 유입되었음

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

남극에서의 규조연구는 1990년대 후반에 시작되어 2023년 현재까지 약 30여 년동안의 연구가 수행되었다.

그러나 남극 해양퇴적물에서의 규조 연구에 전문 연구 인력이 매우 적고, 현미경 관찰을 통해 연구 데이터를 확보하는 데에는 장기간의 시간이 소요된다.

따라서, 빠른 시간에 선진국의 연구 성과를 따라가기에는 매우 어려움이 있다.

더불어 국제수준의 질적 논문을 발표하기 위해서는 학연간 협동연구가 계속되어야 한다. 퇴적학적, 지화학적 연구와 보완을 통해서 고환경의 변화를 해석해 나가는 장기적인 연구 수행이 필요하다.

남극 해양퇴적물로 부터 습득된 규조의 기초 데이터는 고기후 변화 연구를 위한 지질과학 및 극지 고해양 분야에 응용될 수 있다.

또한, 기후변화에 대응하기 위해서는 첨단 기술의 개발 뿐만 아니라 미래 기후 예측을 위한 선도적인 연구 활동이 선행되어야 하며 본 연구 결과는 기후변화 예측을 위한 밑거름이 될 수 있다.

S U M M A R Y
(영 문 요 약 문)

I. Title

Research on the biostratigraphy and paleoenvironmental change using diatoms from core sediments in the West Anartica

II. Purpose and Necessity of R&D

◎ Purpose

The purpose of this study is to identify changes in the distribution of sea ice and ice sheets by systematically studying the changes in diatoms due to climate change in the region near the West Antarctic Sea.

◎ Necessity

- Since the diatom assemblages in the West Antarctic Peninsula informs changes in sea-ice, nutrient supply, stratification, and ice-mass, studies on species composition most closely reflect the record of the past warm period.

-In accordance with the goal of this project, which is the study of the West Antarctic ice sheet retreat and ocean circulation changes during the past warm period, the changes in the size of the West Antarctic ice sheet during the past warm period will be restored using the results of diatom research.

- In order to find out the cause of global warming in the Antarctic region, it is necessary to carry out micropaleontological research, and to keep up with international research trends (development of environmental indicators, climate change prediction), diatom research in the West Antarctic region is necessary.

III. Contents and Extent of R&D

The scope of the research conducted for three years is the Crystal Sound region (BS17-GC18), the McMurdo Sound region of the Ross Sea (RS19-GC09), and the Joinville Islands region (AP18-LC06) located in West Antarctica. Through diatom analysis from each research core, the following studies were conducted.

KOPRI 극지연구소

- Establishment of sedimentary age and biostratigraphy according to the age indicators

Establishment of biostratigraphy by assemblage analysis using the distribution of diatoms

- Analysis of changes in sedimentary paleoenvironment according to environmental indicators

As a biostratigraphic study of the occurred diatoms, the distribution pattern and cluster analysis of diatoms were conducted, and basic data were formed through quantitative analysis of the production frequency of diatoms. The paleoenvironment at the time of deposition of the core sediment was analyzed by environmental indicators such as sea-ice species, open water species, and *Chaetoceros* resting spores.

Ⅳ. R&D Results

Diatom analysis of BS17-GC18, RS19-GC09, and AP18-LC06 cores from Crystal Sound, McMurdo Sound, and Joinville Islands, in West Antarctica.

○ BS17-GC18

- A total of 22 genera and 54 species

- 4 diatom assemblage zones

Diatom assemblage zone I (700-839 cm), Diatom assemblage zone II (500-700 cm), Diatom assemblage zone III (231-500 cm), Diatom assemblage zone IV (700-231 cm)

- The distribution of cold and warm type of *Thalassiosira antarctica*, *Eucampia antarctica* var. *recta* and *Eucampia antarctica* var. *antarctica.*

Analysis of paleoenvironmental changes according to the distribution of environmental indicator species.

Paleo-environmental changes in the study area in the order of Glacial – Deglacial

– Interglacial - Glacial

○ RS19-GC09

- A total of 27 genera and 57 species

- 4 diatom assemblage zones

Diatom assemblage zone I (190-330 cm), Diatom assemblage zone II (130-190 cm), Diatom assemblage zone III (70-130 cm), Diatom assemblage zone IV (0-70 cm)

- TD values were shown by comparing the calculated distributions of sea ice species (TW) and sea ice species (TC) with the ratio of TW/TW+TC, and thus identified four climate changes during the deposition of RS19-GC09.

Paleo-environmental changes in the study area in the order of Glacial - Deglacial – Interglacial - Glacial

○ AP18-LC06

- A total of 34 genera and 82 species

- The occurrence of dominant species appears continuously and shows a tendency to repeat increase and decrease.

- As a result of comparing the yield distribution of open water species and sea-ice species, the occur of open water species and sea-ice species continued to appear, but the occur of sea-ice species was relatively high. Therefore, there was a period of steady seasonal open marine, and in the sections of 601 cm, 800 cm, 900-1050 cm, 1801 cm, and 2001 cm, *F. kerguelensis* was produced, indicating that warm seawater was introduced.

V. Application Plans of R&D Results

Diatom research in Antarctica began in the late 1990s and has been conducted for about 30 years until 2023.

However, there are very few professional researchers in the study of diatoms in

Antarctic marine sediments, and it takes a long time to obtain research data through microscopic observation.

Therefore, it is very difficult to keep up with the research achievements of developed countries in a short period of time.

In addition, in order to publish qualitative papers at the international level, collaborative research between academics and institutions must continue. It is necessary to carry out long-term research that interprets changes in the paleoenvironment through sedimentological and geochemical research and supplementation.

The basic data of diatoms obtained from Antarctic marine sediments can be applied to geological science and polar paleocean fields for studying palaeoclimatic changes.

In addition, in order to respond to climate change, not only the development of advanced technology, but also leading research activities for future climate prediction must be preceded, and the results of this study can serve as a basis for predicting climate change.

KOPRI
극지연구소

목 차

제 1 장 서론 ····· 11
1-1절 연구개발의 목적 ····· 11
1-2절 연구의 필요성 ····· 11
1-3절 연구의 범위 ····· 14

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 17
2-1절 국·내외 관련분야에 대한 기술개발현황 ····· 17
2-2절 연구결과가 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치 ····· 20

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 21
3-1절 연구 방법 ····· 21
3-2절 연구 내용 ····· 23
3-3절 연구 결과 ····· 25

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ····· 40
4-1절 연구 개발목표 달성도 ····· 40
4-2절 대외기여도 ····· 41

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 42

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 43

제 7 장 참고문헌 ····· 44

KOPRI 극지연구소

제 1 장 서론

1-1절. 연구개발의 목적

본 연구는 서남극해 인근 지역에서 기후변화에 따른 규조 군집의 변화를 체계적으로 연구하여 해빙 및 빙상의 분포 변화를 파악하는 데 목적이 있다. 서남극반도에서 규조 군집은 sea-ice, 영양염류 공급, 성층화 및 ice-mass의 변화를 알려 주기 때문에 종 조성에 대한 연구는 과거 온난기에 대한 기록을 가장 반영하고 있다. 과거 43만년 동안 빙기-간빙기의 주기는 10만년이라는 큰 진폭의 주기를 가지고 있으며(Hays et al., 1976), 로스해에서 수행된 국내 규조 연구에서도 10만년을 주기로 변화함이 확인 되었다(박영숙 외, 2021). 과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구이라는 본과제의 목표에 맞추어서 규조의 연구결과를 이용하여 과거 온난기의 서남극 빙상 규모 변화를 복원하고자 한다.

1-2절. 연구의 필요성

현재까지 전 세계적으로 다양한 형태를 가진 1250속 100,000종 이상의 규조류가 서식하고 있으며, 이러한 규조류의 대번성은 다른 단세포 조류보다 영양소와 햇빛을 효율적으로 활용하기 위한 세포적으로 개선과정을 거쳤음을 시사한다. 규조류는 실리카로된 골격을 가지고 있어 보존에 용이하며 1차 생산력이 풍부하여 현대 및 고 해양학적 상태를 지시해 주는 역할을 한다(Stoermer and Smol 1999). 특히, 고위도와 연안지역에서 고환경적 지시자로서 유용하다(Sancetta 1999). 로스해와 남극해에는 로스빙붕과 서남극 빙상의 안정성에 대해 풀어야 할 숙제들이 남아 있다. 서남극 빙상의 많은 부분이 해수면 아래에 있기 때문에 해양 열 플럭스들의 변화에 매우 민감하며, 서남극 대륙붕 가장자리의 움푹하게 깊어진 형태와 관련해서 해양 빙상 불안정을 유발한다(Golledge et al., 2012; Pollard and DeConto, 2009; Thomas and Bentley, 1978; Bollen et al., 2022).

또한, 서남극 빙상으로부터 유발된 로스빙붕은 대륙빙상 상류를 지지하는 역할을 한다. 남극해는 현재 따뜻해지고 염도가 약해지고 있으며 그 결과 차갑고 염도가 높은 남극저층수의 유입량이 감소하는 것으로 보고 되었다(Gille, 2002; Menezes et al., 2017; Meredith et al., 2014; Purkey and Johnson, 2010; Williams et al., 2016; Bollen et al., 2022). 더불어 대륙붕으로 따뜻한 물의 유입은 로스해, 아문젠해, 남극반도지역 등 남극주변부를 따라 직접적으로 기록되었다(Castagno et al., 2017; Hillenbrand et al., 2017; Morrison et al., 2020; Smith et al., 1999;

Wåhlin et al., 2010; Bollen et al., 2022). 따뜻한 Circum-polar Deep Water가 빙하표면으로 전달되면 융빙의 속도가 증가하여 빙붕 후퇴 및 붕괴를 일으키는 것으로 생각된다(Dinniman et al., 2011; Pritchard et al., 2012; Bollen et al., 2022).

따라서, 서남극 지역의 빙붕 및 빙상의 전진과 후퇴에 따른 고환경 변화 기록을 연구하여 현재 일어나고 있는 지구온난화 및 해수면 상승에 대한 변화를 예측하기 위해 필요하다.

남극지역의 지구 온난화가 일어나고 있는 원인을 알아내기 위해서는 미고생물학적인 연구 수행이 필요하며, 국제적인 연구 동향(환경지시자개발, 기후변화예측)에 맞추어 나가기 위해서는 서남극지역에서의 규조 연구의 수행이 선행되어야 한다(Fig. 1).

과거 온난기의 고환경 변화를 복원함으로써 지구온난화에 의해 야기될 환경변화를 예측하고 대응책을 마련하는데 기초 자료로서 필요하며, 특히 선진국보다 뒤늦게 출발한 미고생물학적인 남극 연구를 위해서는 연구 인력의 확보와 전문성을 발전시켜야 할 필요가 있다.

KOPRI
극지연구소

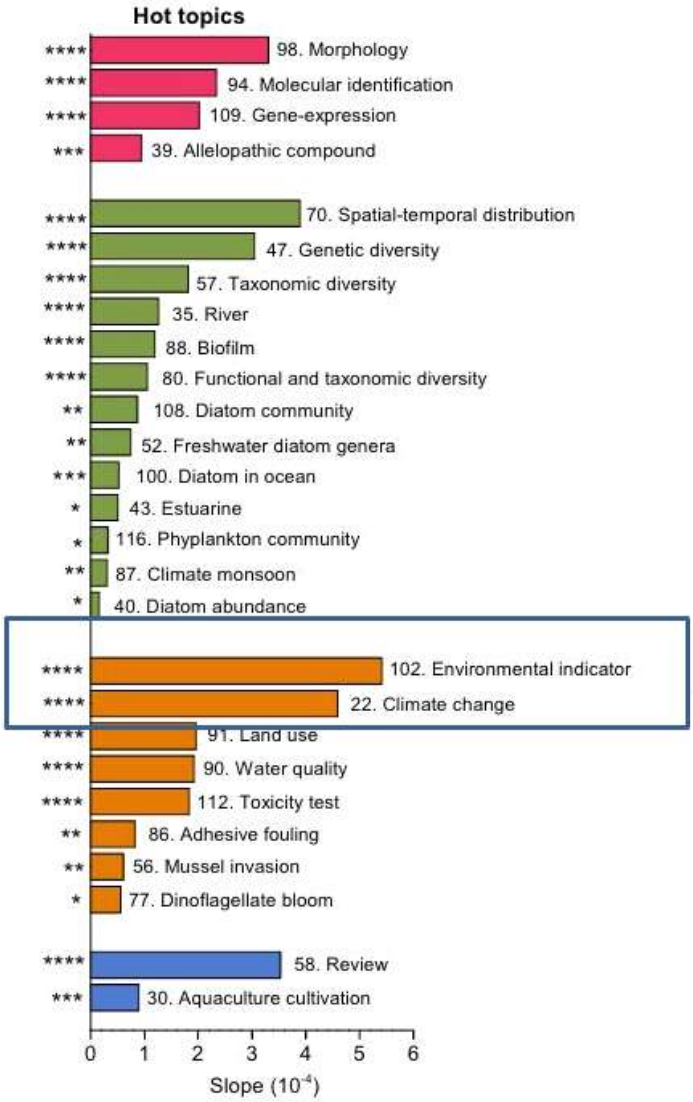
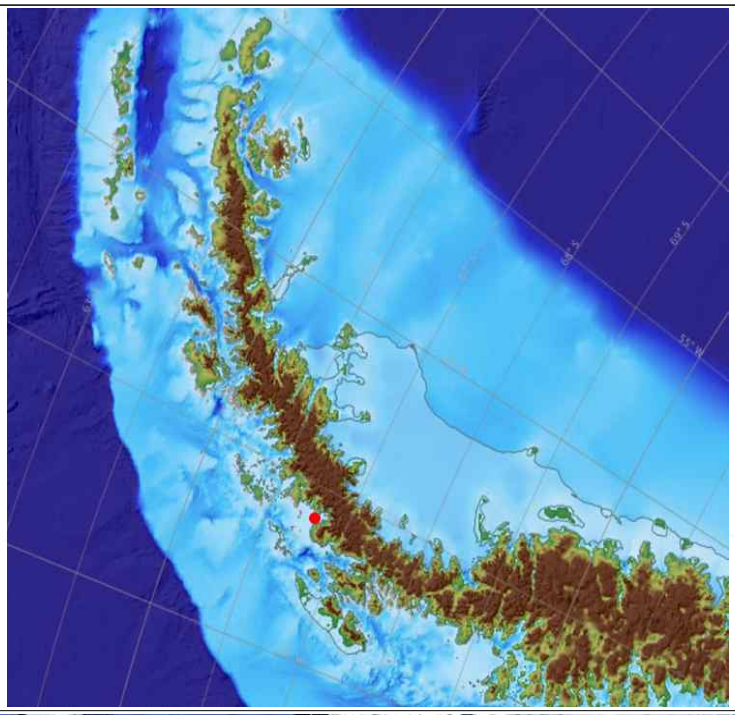


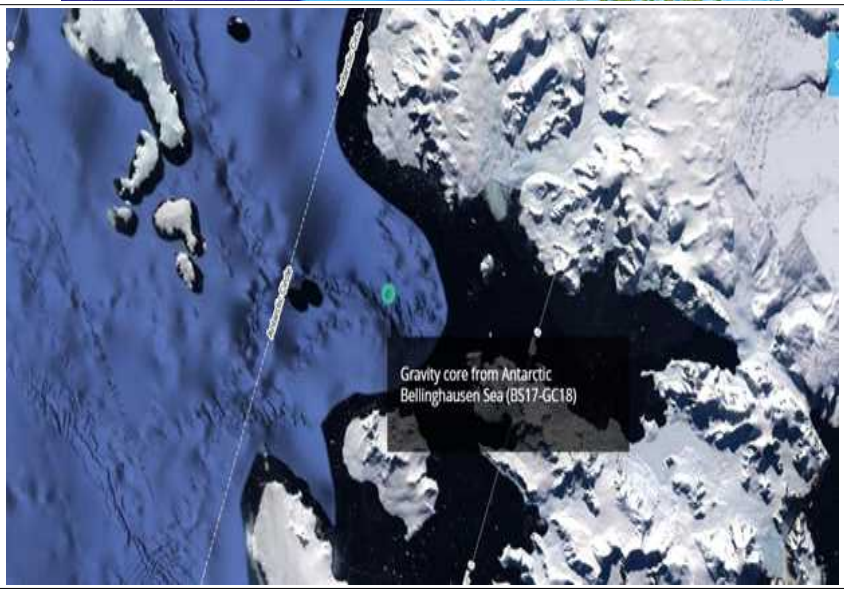
Fig. 1. 1991년-2018년까지의 세계적인 규조 논문 주제 (Zhang et al., 2019)

1-3절. 연구의 범위

1단계 3개년동안 수행된 연구 범위는 서남극 지역에 위치한 크리스탈 사운드지역(BS17-GC18), 로스해 McMurdo Sound 지역(RS19-GC09), Joinville Islands 지역(AP18-LC06)에 해당된다. 각 연구 코어로부터 규조 분석을 통하여 연구지역의 고환경 변화를 해석한다.

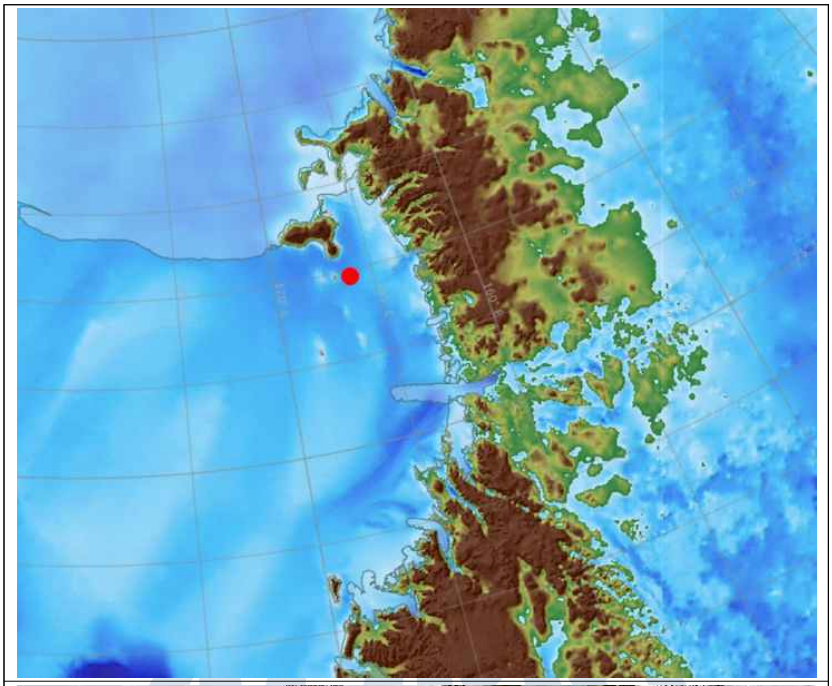
1차년도: 크리스탈 사운드 지역

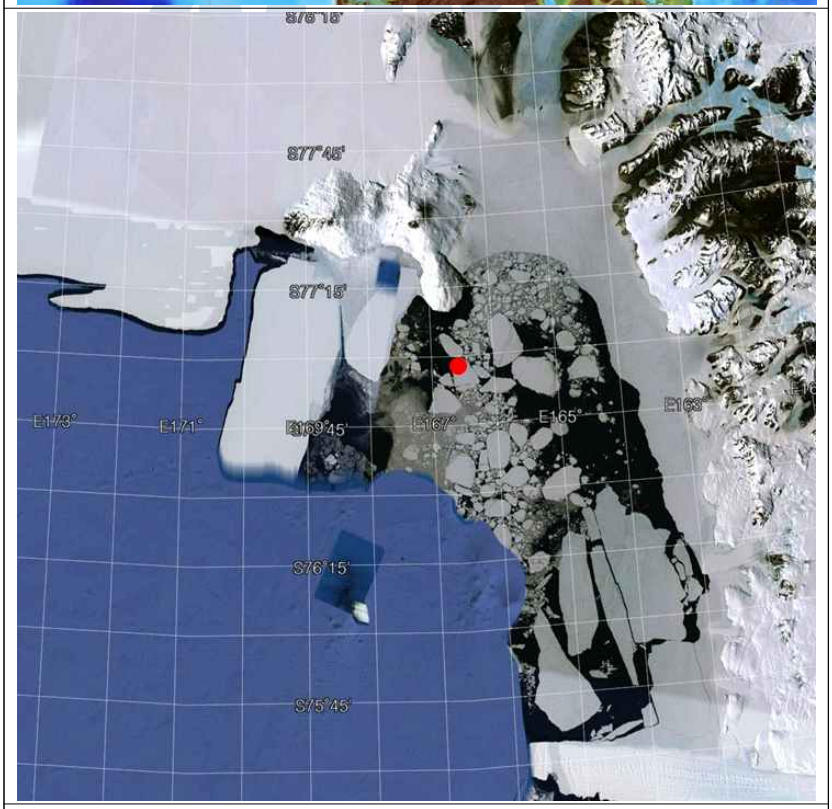




BS17-GC18

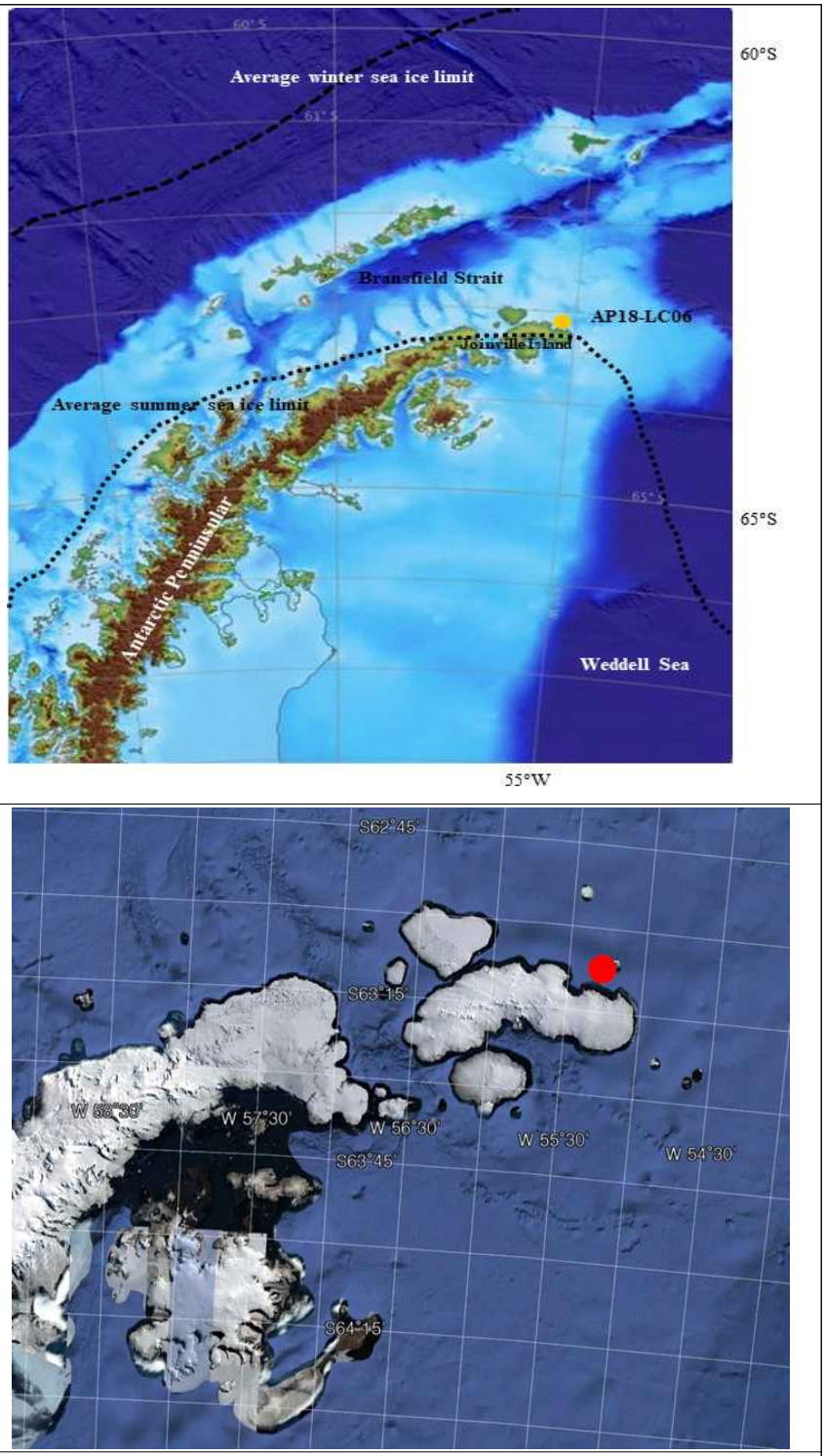
2차년도: McMurdo Sound 지역





RS19-GC09

3차년도: Joinville Islands 지역



AP18-LC06

제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1절 국·내외 관련분야에 대한 기술개발현황

규조류(Class Bacillariophyceae)는 담수 및 해양 생태계의 거의 모든 유형의 서식지에서 발견되는 실리카 성분의 각을 가진 단세포, 광합성 및 진핵생물로서 규조류의 개개의 크기는 일반적으로 작지만(200μm 미만), 이들은 함께 이산화탄소를 고정하고 탄수화물을 합성하는 데 중요한 역할을 하여 전 세계 1차 생산량의 20% 이상을 차지한다. 규조류는 관련 환경 연구 및 고환경 복원에 폭넓게 응용될 가능성이 있습니다. 첫째, 규조류는 환경에 대한 민감성과 보존성으로 인해 환경변화의 지표가 될 수 있다. 예를 들어, 규조류는 종조성의 해석을 통하여 환경 변화(예: 기후 및 염도)를 알 수 있다. 둘째, 규조류의 실리카 껍질은 쉽게 보존되며 화석 연구에 있어 유용한 지시자이다. 따라서 규조류의 연구는 환경에 적용함에 있어서 과거 동향과 향후 방향을 파악하는 두 가지 목적을 갖기 때문에 미래 발전과 글로벌 지속 가능성에 기여할 수 있다. 1991년에서 2018년 까지 발표된 규조류 논문은 109개 지역에서 발표가 되었으며, 미국, 캐나다, 영국, 프랑스, 중국, 독일의 순으로 다량의 논문을 보고하였다(Fig. 2).

이들 국가에서 출판물 전체의 70.73%를 차지하며, 전체 출판물의 비중은 유럽과 북미가 각각 45.43%와 28.42%를 차지했으며 그 뒤를 이어 아시아(15.32%), 오세아니아(4.86%), 남미(4.24%) 순이다. 일본, 스페인, 호주, 네덜란드의 규조류 관련 출판물은 1991년부터 21세기 초까지는 증가했지만 지난 10년 동안 감소하였다(Fig. 3).

우리나라에서는 남극 해양퇴적물에서의 규조 연구는 브랜스필드 해협; 이영길 (1996), 박영숙 외 (2001, 2007a, 2009, 2011, 2015), 드레이크 해협; 박영숙 외(2002, 2003, 2010, 2014), 맥스웰만; 박영숙 외(2004), 사우스 오크니제도; 박영숙 외(2007b) 스코티아해; Bak *et al.* (2007), 아문젠해: Bak et al. (2018), 로스해: 박영숙 외 (2021)의 연구 등이 있다.

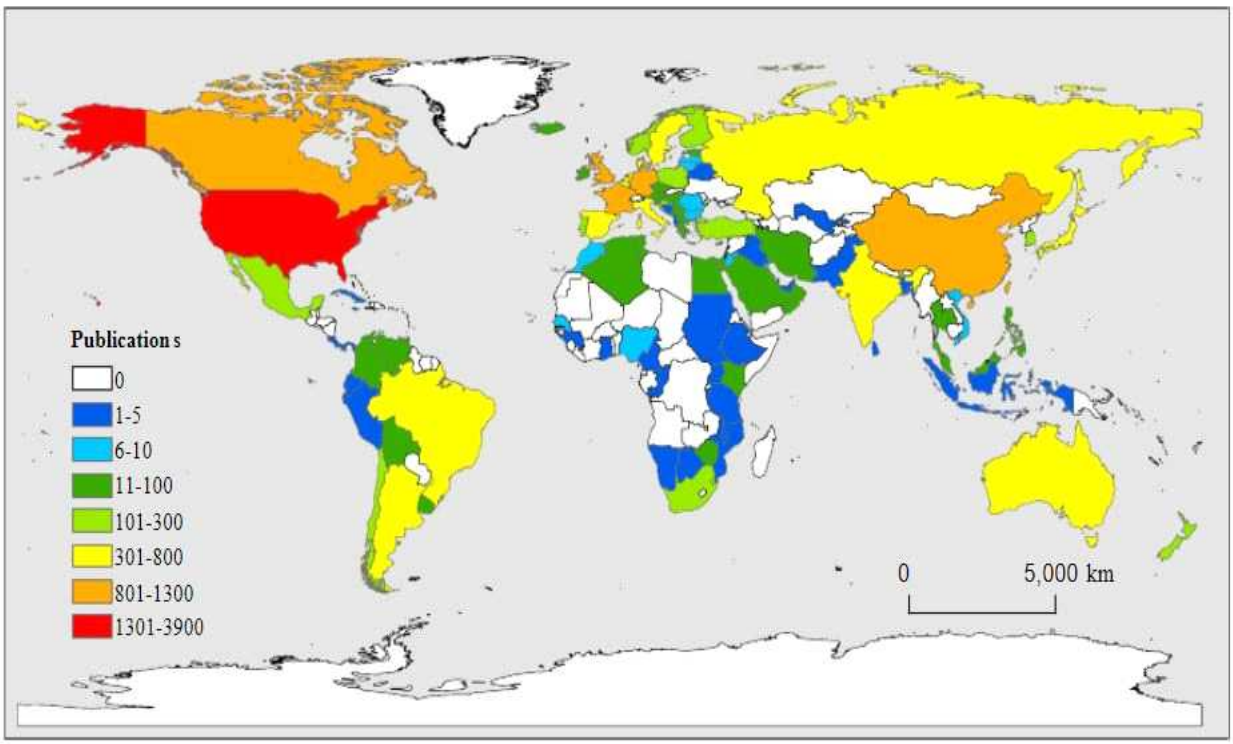


Fig. 2. Distribution map of worldwide research on diatom from 1991 to 2018 based on number of publications (Zhang et al. 2019).

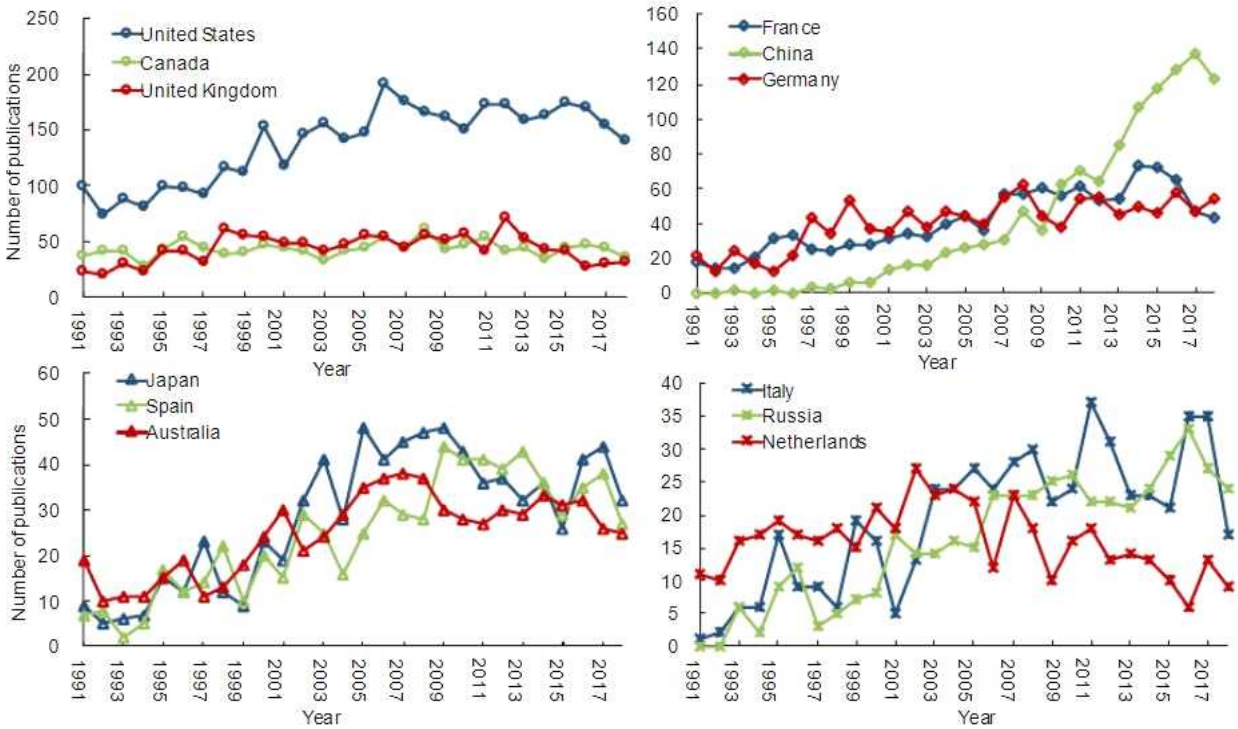


Fig. 3. The top 12 countries with most publications related to diatom in title, abstract and keywords during 1991-2018 on web of science (Zhang et al. 2019).

2-2절 연구결과가 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

본 연구의 결과는 규조류를 사용하여 고환경 변화를 알아내거나 복원하는 연구하는 전세계적인 연구 경향에 발 맞추어 나아가기 위한 기초 단계로서, 국제적으로 발표되고 있는 논문들의 질적, 양적 수준을 따라가기 위해서는 보다 많은 연구 인력과 연구기간을 통한 연구 업적의 배출이 필요하다. 지난 수십 여 년 동안 세종기지와 장보고기지를 구축하고 아라온호를 이용한 연구의 결과물들이 계속적으로 축적되고 있는 상황이지만 국제적인 수준으로 발돋음하기 위한 노력이 필요하다. 남극 빙상은 현재 빠르게 변화하고 있으며 서남극 및 동남극 일부의 해양분지에서 나타나는 빙상의 질량 손실이 해수면의 상승 속도에 영향을 미칠 위험에 대한 연구 결과와 대비책이 마련되지 않은 실정이다. 따라서, 이를 위한 연구가 우선되어야 하며 향후 빙상이 손실되고 있는 해양구역과 고기후 기록에 대한 연구 결과를 확보하는 것이 국내 기술개발에서 가장 시급하다.

KOPRI
극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1절 연구 방법

연구 지역에서 채취된 코어 퇴적물 BS17-GC18, RS19-GC09, AP18-LC06로부터 규조를 추출하고 현미경 관찰을 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다.

1. 규조 추출 실험

시료 2 g에 묽은 염산 (10%) 20 ㎖와 과산화수소수 20 ㎖를 첨가한 후 hot plate위에서 3시간 이상 가열한다. 묽은 염산과 과산화수소수 20 ㎖를 재첨가하여 2시간 이상 끓여준다. 반응이 모두 끝난 비이커는 24시간정도 놓아 둔 후 증류수를 부어준다. 화학약품과 부유성 물질들을 제거하기 위해서 윗물을 따라내고 세척과정을 여러번 반복하여 산이나 부유성 물질들을 모두 제거한다. 남은 잔유물을 60 ㎖ 병에 담고, 그 중 부표본을 취하여 슬라이드글라스가 장치된 settling container에 넣어 저온의 건조기(약 50℃) 안에서 건조시킨다. 건조된 슬라이드에 접착제를 이용하여 커버글라스로 고정시킨다.

1. 비이커에 시료를 2g씩 담는다	2. 염산 (HCl)과 과산화수소수 (H_2O_2)를 20㎖씩 첨가한다.	3. Hotplate 위에서 반응을 시키면서 1시간 이상 가열한다. 2번과 3번의 과정을 2번 반복한다.
4. 반응이 모두 끝난 침전물을 24시간 놓아 둔다.	5. 침전물을 세척하기 위해서 증류수를 부어서 약 4시간 이상 가라 앉힌다.	6. 5번 과정을 세 번 이상 되풀이 한 후 60㎖ 시약병에 담는다.

2. 현미경 관찰

규조류의 동정은 주로 400 ~ 1000 배의 광학 현미경하에서 행하며 규조각의 산정 시 중심 규조목은 중심부를 포함한 규조각의 2/3 이상이 보존되어 있을 경우 1개체로, 우상 규조목은 규조각이 1/2이상 남아서 감정이 가능하고 정축부가 나타나면 1개체로 산정하였다.
규조의 절대개체수 산정(Scherer, 1994)은 다음과 같은 공식으로 하였다.
Abundance = ((A×B)/(C×D))/E (A=number of specimens counted; B=area of settling chamber; C=number of field of view in microscope; D=area of field of view; E=mass of sample)

3. 군집 분석 및 고환경 해석

-시대 지시종에 따른 퇴적연대 및 생층서 설정
규조의 산출분포를 이용하여 군집 분석에 의한 생층서대설정
-환경 지시종에 따른 퇴적환경의 변화 해석
산출된 규조 군집의 생층서적 연구로서 규조의 산출양상과 군집분석을 실시하고, 산출되는 규조의 종별 산출빈도와 생태별 정량분석을 통하여 기초 데이터를 형성하였다. sea-ice species와 open water species, *Chaetoceros* resting spore와 같은 환경 지시종에 의해서 시추코어 퇴적물의 퇴적당시 고환경을 해석하였다.

KOPRI 극지연구소

3-2절 연구 내용

동남극과 서남극의 빙상은 전세계 담수의 약 90%를 차지하며, 지구적 기후 시스템을 규제하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 남극 표면 대기 온도가 1950년대 이후 10년에 0.1℃씩 증가했으며, 앞으로 더 온난화가 지속될 것으로 생각된다. 그러므로 동남극과 서남극의 빙상 안정성은 미래 기후 변화 예측을 위한 중요한 정보가 된다. 서남극지역의 빙상이 급격한 붕괴를 보이게 되면 해수면이 3m를 초과하여 상승하게 된다. 남극에서 빙하의 감소가 급속하게 나타나는 것은 대기와 해양의 순환이 변화하기 때문이며 남극반도와 벨링스하우젠해, 아문젠해와 로스해 부근에서 온난화의 경향이 뚜렷하게 나타난다. 로스 해는 대규모의 저층수가 형성되는 지역으로서, 로스 해 지역의 해빙의 분포 변화 및 해양학적 특성의 변화를 연구하는 것이 전지구적 기후 변화에 대비하는데 있어 매우 중요한 데이터가 된다. 로스해는 전 지구적 기후 변화의 결과로 심층수의 형성 속도가 달라져 염분농도가 감소하고 있으며, 이는 서남극 빙상의 융빙과 해수 순환에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

1996년부터 2006년 사이에 서남극에서 아문젠 해와 벨링스하우젠 해의 연안을 따라 ice mass의 손실이 59%정도 증가하였으며(Rignot et al., 2008), 아문젠 해 지역에서 감소된 ice mass의 총량은 81±17㎞3/년으로 나타났다(Rignot et al., 2004). 빙하가 얇아지고 후퇴의 속도는 가속되었으며, 서남극빙상(WAIS)의 안정성에 중요한 변화를 일으키고 있다(Joughin and Alley, 2011). 이 지역에 분포하는 Pine Island Glacier(PIG)은 서남극빙상의 유출을 억제하는 버팀목 역할을 해주고 있으나 현재의 유출 속도를 볼 때, 약 100년 이내에 안정성을 잃고 해수면을 3.3-5m 상승시키게 할 수 있다고 보고되었다. Morlighem et al., 2019의 연구에서는 스웨이츠 빙하가 녹으면 PIG의 경우와 마찬가지로 서남극 지역 빙상 전체의 붕괴를 유발하여 5.3m의 급격한 해수면 상승을 일으킬 수 있다고도 하였다. 특히, 남대양의 다른 지역과 달리 아문젠 해는 낮은 밀도의 대륙붕과 저층수괴가 형성되어 성층구조가 매우 단순하다. 즉, Antarctic zone과 Subpolar zone에서 cold (-1.5℃)하고 low-salinity한 Antarctic Surface Water (AASW)가 Warm (>2℃)하고 high-salinity한 Circumpolar Deep Water의 위에 놓인다 (Jacobs and Comiso, 1997; Smith et al., 1999). 또한, 아문젠 해 만의 연안까지 CDW가 유입되는 것은 대륙사면과 대륙붕의 지형학적 특징에 의한 것이다 (Walker et al., 2007). 이러한 특징을 가진 아문젠 해 만에서 Hillenbrand et al. (2017)은 채취한 5개의 코어퇴적물로부터 grounding-line에 인접하는 facies 위에 직접 놓인 순수한 규조연니를 발견하였고, 12,000-12,700cal yr BP전에는 내륙붕 (inner shelf) 이 빙하로부터 자유로웠음을 제시하였다. 로스해와 남극해, 특히 로스 빙붕 (Ross Ice Shelf)와 서남극 빙상 (West Antarctic Ice Sheet)의 안정성과 관련하여 수많은 연구들이 수행되고 있다. 로스해는 남빙양에서 가장 생산적인 지역 중 하나이며 폴리냐, marginal ice zones, 연안 및 근해 지역과 같은 다양한 해양 하위 시스템을 포함한다(Bolinesi

et al., 2020; Saggiomo et al., 1998). 이러한 하위 시스템 덕분에 로스해 지역은 남극해의 생물학적 및 생태학적 특징에 대한 기후 변화의 잠재적 영향을 조사하기에 적합하다.

최근 논문(Dinniman et al., 2018)에 따르면 로스해의 해빙 분포는 지난 몇 년 동안 증가하여 여름동안 ice-free 기간이 감소했다고 한다. 해빙이나 빙하가 녹아 유입되는 담수는 봄-여름 시즌 동안 상부 해수 층을 안정화시키는 주요 요인으로 인식되어 왔다(Ackley and Sullivan, 1994; Saggiomo et al., 2002). 해빙 분포와 크기의 변화는 상부 mixed layer depth와 euphotic layer의 감소를 유도하여 해빙에 갇힌 영양염류의 가용성을 변화시킨다(Park et al., 2018).

남극에서의 규조는 19세기 중반부터 식물성플랑크톤 군집의 우점 분류군으로서 연구 되어 왔으며, 남극해 일차 생산량의 약 75%를 차지하고 남극 먹이사슬에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 남극 해양에서 일어나고 있는 해빙의 분포와 크기의 변화는 로스해에서 식물성 플랑크톤에 중요한 영향을 미치고 종 변화에 영향을 준다(Mangoni et al., 2017). 따라서, 본 연구는 서남극 3개의 지역(Crystal Sound, McMurdo Sound와 Joinville Islands)의 코어퇴적물을 대상으로 규조를 추출하고 규조 종감정 및 생산성을 파악하여 과거 온난기의 해빙의 전진과 후퇴, 해빙의 지속 기간 등을 추적하였다.

KOPRI
극지연구소

3-3절 연구 결과

1. BS17-GC18 규조 군집대 및 고환경 해석

크리스탈 사운드 지역에서 채취한 BS17-GC18 코어 퇴적물 (66°44.2629′S, 66°56.0963′W, water depth: 1218 m, length: 890 cm)로부터 총 19개의 시료를 채취하였다. 규조를 분석한 결과 총 22속 54종이 감정되었으며, 규조 절대 개체수 농도의 범위는 0.01 ~ 9.25 ×10^7/g의 범위를 차지하였다. 산출된 규조 종 중에서 *Thalassiosira antarctica*가 26.8%로 가장 풍부하게 산출되었으며 수반되는 종으로 *Fragilariopsis kerguelensis* 15.7%, *Frafgilariopsis curta* 9.3%, *Eucampia antarctica var. recta* 8.8%, *Odontella weissflogii* 3.2%가 상대적으로 다량 산출되었다(Fig. 4).

선택 규조종의 수직분포를 토대로 4개의 규조 생층서대를 설정하였다 (Fig. 5)

규조 군집대 I: 700~839 ㎝

valve abundance가 매우 낮고 *Chaetoceros* RS의 산출이 거의 없어 Ice의 영향을 많이 받은 glacial시기에 해당된다.

규조 군집대 II: 500~700 ㎝

공해종인 *F. kerguelensis*와 *T. antarcia*의 산출이 풍부해지며, 이와 더불어 ice-edge종인 *E. antarcica*와 해빙종인 *F. curta, F. lineata, F. ritscheri*의 산출도 풍부하다. valve abundance와 *Chaetoceros* RS의 산출이 40점점 증가하는 경향을 보인다. 따라서, 이시기는 계절적인 해빙의 영향을 많이 받는 deglacial시기로 생각된다.

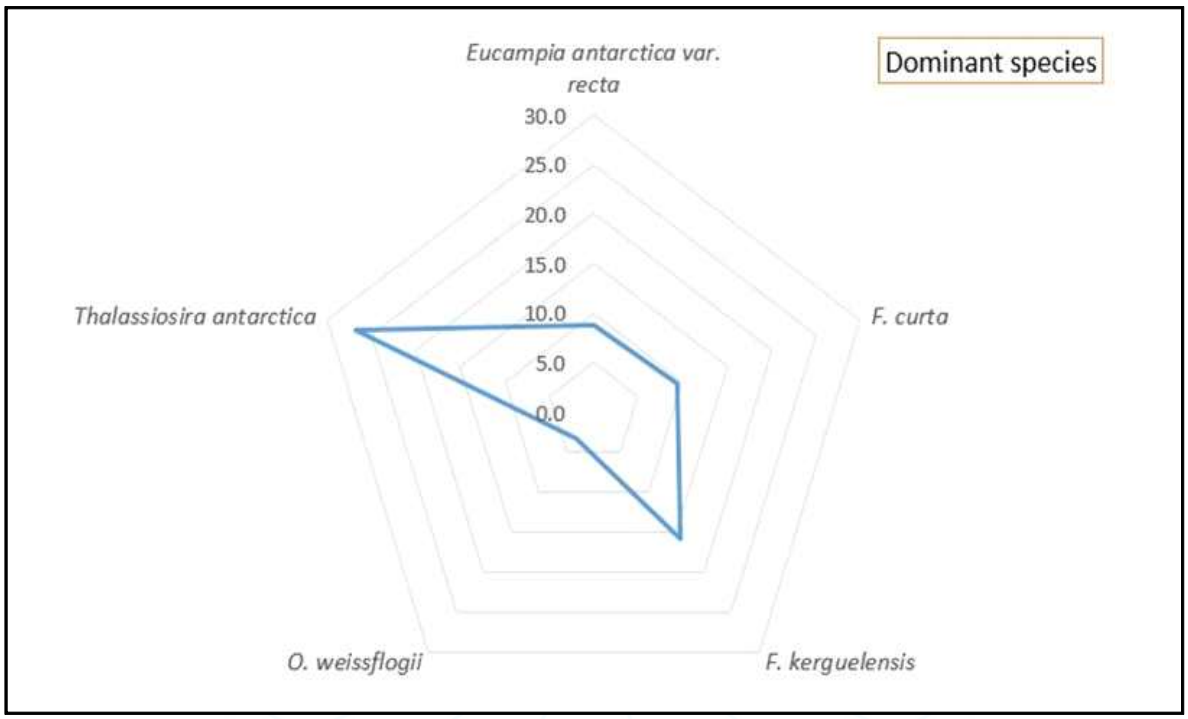
규조 군집대 III: 231~500 ㎝

*F. kerguelensis*가 증가하고 *F. curta, F. lineata, F. ritscheri*의 산출이 감소하며, *Chaetoceros* RS의 산출도 감소한다. 그러나 valve abundance의 산출은 계속적으로 증가하는 경향을 보인다. 그러므로, 군집대 III는 해빙의 영향을 적게 받는 open marine환경 이었다.

규조 군집대 IV: 40~231 ㎝

*E. antarcica, F. kerguelensis*와 valve abundance의 산출이 상대적으로 줄어 드는 것으로 보아 군집대 III보다는 cold한 glacial 시기로 생각된다.

KOPRI 극지연구소



극지연구소

Species	percent
Eucampia antarctica var. *recta*	8.8
F. curta	9.3
F. kerguelensis	15.7
O. weissflogii	3.2
Thalassiosira antarctica	26.8

Fig. 4. BS17-GC18에서 산출된 우세종의 비율

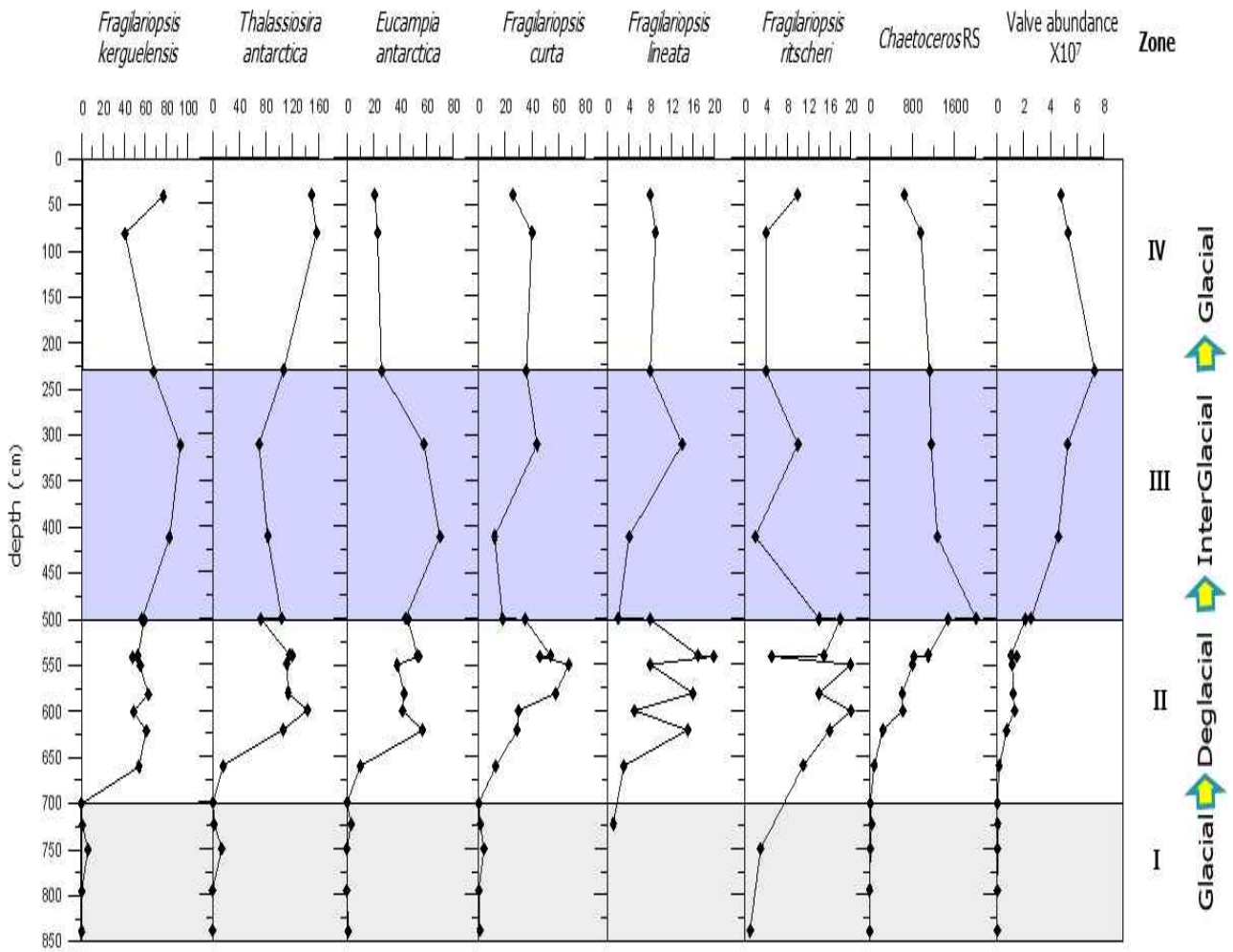


Fig. 5. BS17-GC18 코어로부터 선택된 지시종들의 수직산출 분포와 규조 군집대

*Thalassiosira antarctica*의 cold type과 warm type, *Eucampia antarctica* var. *recta*와 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*의 산출을 비교한 결과 700 ㎝층준 이하에서는 cold종 warm종의 산출이 거의 없으며 231 ㎝층준 이상에서는 cold 종인 *Thalassiosira antarctica*의 cold type과 *Eucampia antarctica* var. *recta*의 산출이 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 6). 따라서, 규조 분대 I과 IV에 해당되는 시기에는 glacial한 시기 였음을 알수 있으며 규조분대 II에서는 공해종인 *Thalassiosira antarctica*가 증가하고 *Eucampia antarctica* var. *recta*도 증가하는 것으로 보아 deglacial 시기로 생각된다. 규조 분대 III에서는 *Thalassiosira antarctica*의 warm type의 산출이 상대적으로 풍부하고 *Eucampia antarctica*의 산출량이 풍부한 것으로 보아 계절적인 해빙이 나타나는 open marine상태임을 알 수 있다.

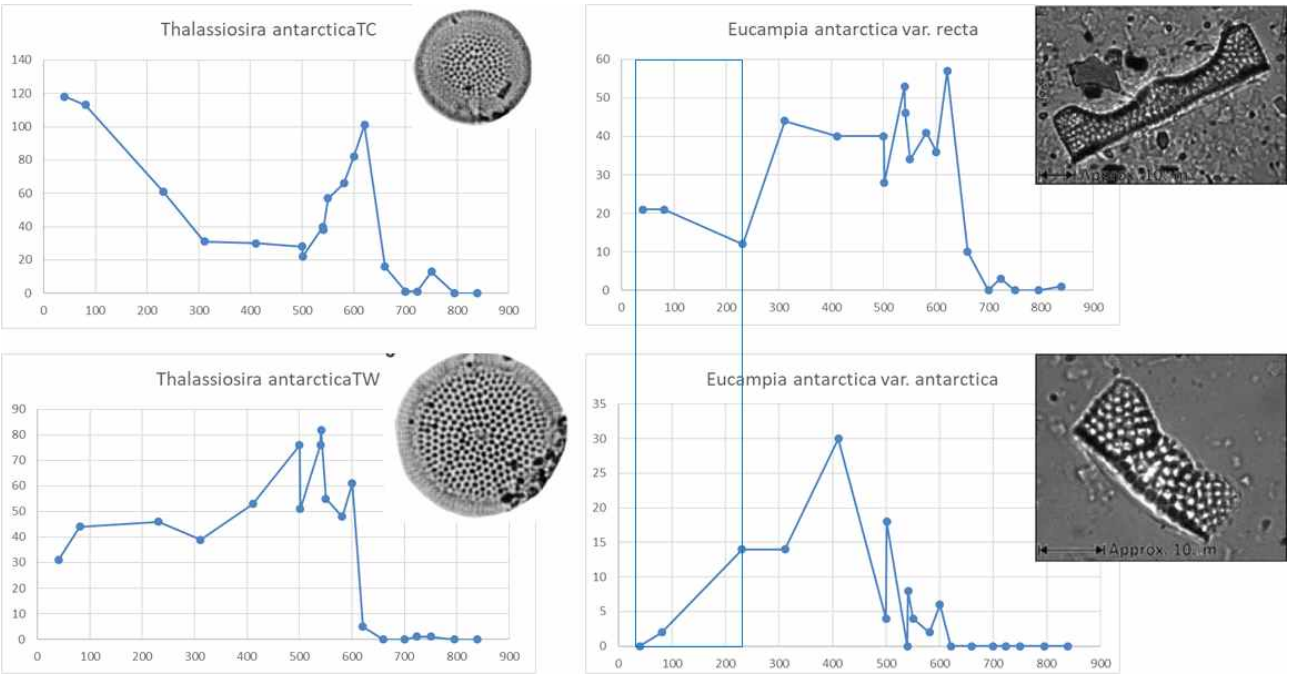


Fig. 6. *Thalassiosira antarctica*의 cold type과 warm type, *Eucampia antarctica* var. *recta*와 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*의 산출 비교

2. RS19-GC09 규조 군집대 및 고환경 해석

McMurdo Sound인근에서 채취한 RS19-GC09코어 퇴적물로부터 규조 연구를 위해 10㎝ 간격으로 총 34개의 시료를 분석한 결과 총 27속 57종이 감정되었다(Fig. 7).

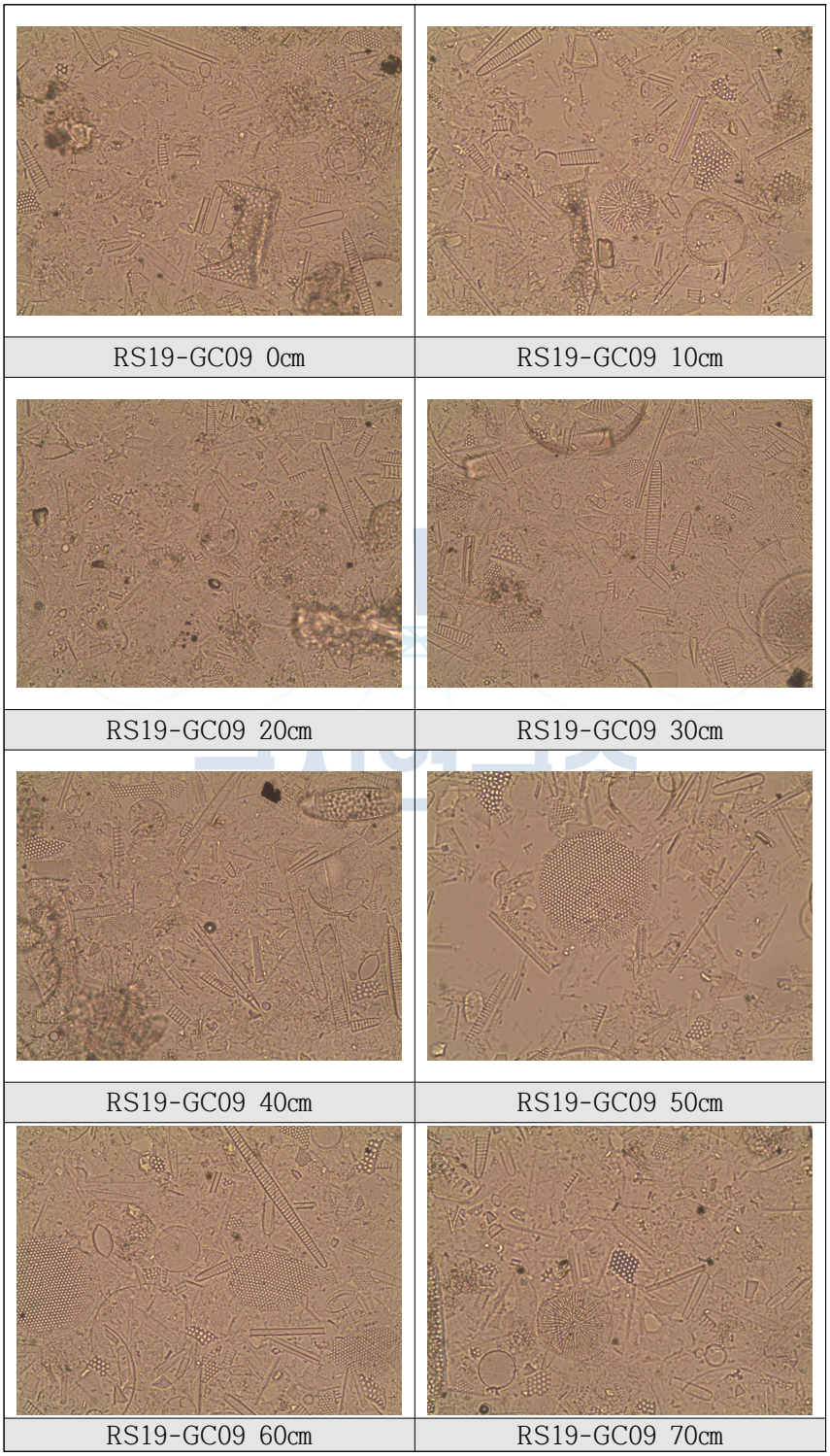


Fig. 7. RS19-GC09 코어에서 규조가 가장 풍부하게 산출된 구간의 층준별(0-70 ㎝) 사진

정량분석의 결과 절대 개체수 농도가 0.01 ~ 28.75 ×10^7/g 범위로 나타났으며, *Fragilariopsis curta* (32.3%), *Thalassiosira antarctica* (16.2%), *Eucampia antarctica* var. *recta* (8.4%), *F. obliquecostata* (6.7%), *F. sublineata* (5.7%)가 상대적으로 우세하게 산출되었다(Fig. 8).

산출된 규조의 군집 분포 양상에 따라 4개의 군집대를 설정하였다(Fig. 9).

규조 군집대 I: 190-330㎝

규조의 산출이 매우 적은 구간으로서 규조 개체수 농도가 0.01~0.32 ×10^7/g의 범위에 해당된다. 해빙종인 *Eucampia antarctica* var. *recta*와 *Fragilariopsis curta*, *F. obliquecostata*, *F. sublinearis*가 산출되며, 공해종인 *F. kerguelensis, Thalassiosira antarctica, Rhizosolenia styliformis*의 산출이 소량 나타난다.

규조 군집대 II: 130-190㎝

규조 개체수 농도가 증가하는 구간으로서 3.11~13.25 ×10^7/g의 범위로 나타난다. 해빙종인 *Eucampia antarctica* var. *recta*와 *Fragilariopsis curta*, *F. obliquecostata*, *F. sublinearis*의 산출이 증가하며 *Actinocyclus actinochilus*와 *F. turgiduloides*의 산출이 나타난다. 공해종인 *Thalassiosira antarctica*의 산출도 증가하며 *Chaetoceros* RS의 산출도 증가하는 구간이다.

규조 군집대 III: 70-130㎝

규조 개체수 농도가 10.94~22.43 ×10^7/g의 범위에 속하며 규조 군집대 II에서 보다는 상대적으로 풍부하게 나타난다. *Fragilariopsis curta*의 산출이 규조 군집대 II에서 보다 감소하며 반대로 *Thalassiosira antarctica*의 산출은 규조 군집대 II에서 보다 증가하여 나타난다.

규조 군집대 IV: 0-70㎝

규조 개체수 농도가 16.32~28.75 ×10^7/g의 범위로 전 층준에서 가장 풍부하게 산출되는 구간이며 *Actinocyclus actinochilus, Eucampia antarctica* var. *recta*와 *Fragilariopsis curta*의 산출이 상대적으로 증가하고 공해종인 *Thalassiosira antarctica*의 산출은 규조 군집대 III에서 보다 대폭 감소한다. 그러나, 같은 공해 종인 *F. kerguelensis*의 산출은 풍부하게 나타난다.

공해종(TW)과 해빙종(TC)의 산출 분포를 TW/TW+TC의 비와 비교하여 TD값을 나타내었고, 그에 따라 RS19-GC09의 퇴적 동안 4번의 기후 변화를 파악하였다. 190㎝ 층준을 기준으로 하부에서는 cold종과 warm종의 산출이 매우 적게 나타나고, 상대적인 Td값은 개체수가 매우 부족한 이유로 TW의 값이 높게 나타났으나, 이시기는 온난했다고 해석되기 보다는 규조가 살기

어려운 한랭한 시기(glacial)로 생각된다(Fig. 10).

이를 뒷받침하는 것으로 재이동 규조각인 *Stephanopxis turris* (LAD: 2.96-3.08 Ma)가 180-200 ㎝에서 *Paralia sulcata*가 190 ㎝ 이하 층준에서 산출된다. 또한, 시대 지시종의 산출은 *Thalassiosira vulnifica* (LAD: 2.15-2.19 Ma)와 *Thalassiosira inura* (LAD: 2.53-2.55 Ma)가 220 ㎝ 층준 하부에서 같이 산출이 되어 육원성 퇴적물로부터 유입된 것으로 생각된다(Fig. 11). 규조 군집대 II에서는 cold종과 warm종의 산출이 증가하여 계절적인 변화를 나타내며(deglacial), 규조 군집대 III에서는 warm종의 산출이 상대적으로 증가하는 것으로 보아 규조 군집대 II에서 보다 온난화가 진행되었고(interglacial), 규조 군집대 IV에서는 다시 상대적으로 cold종의 산출이 증가하여 규조 군집대 III보다 한랭화(glacial) 되었음을 나타낸다.

KOPRI
극지연구소

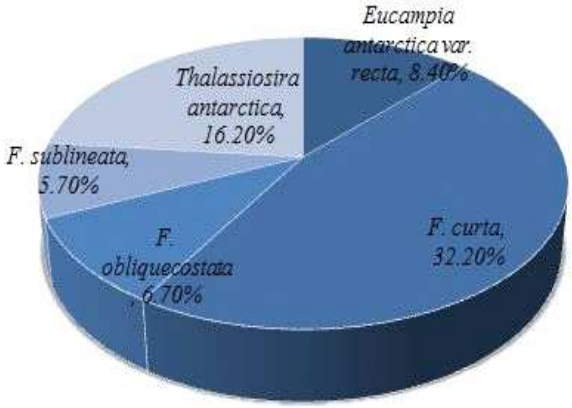


Fig. 8. RS19-GC09 에서 산출된 우세 종의 비율

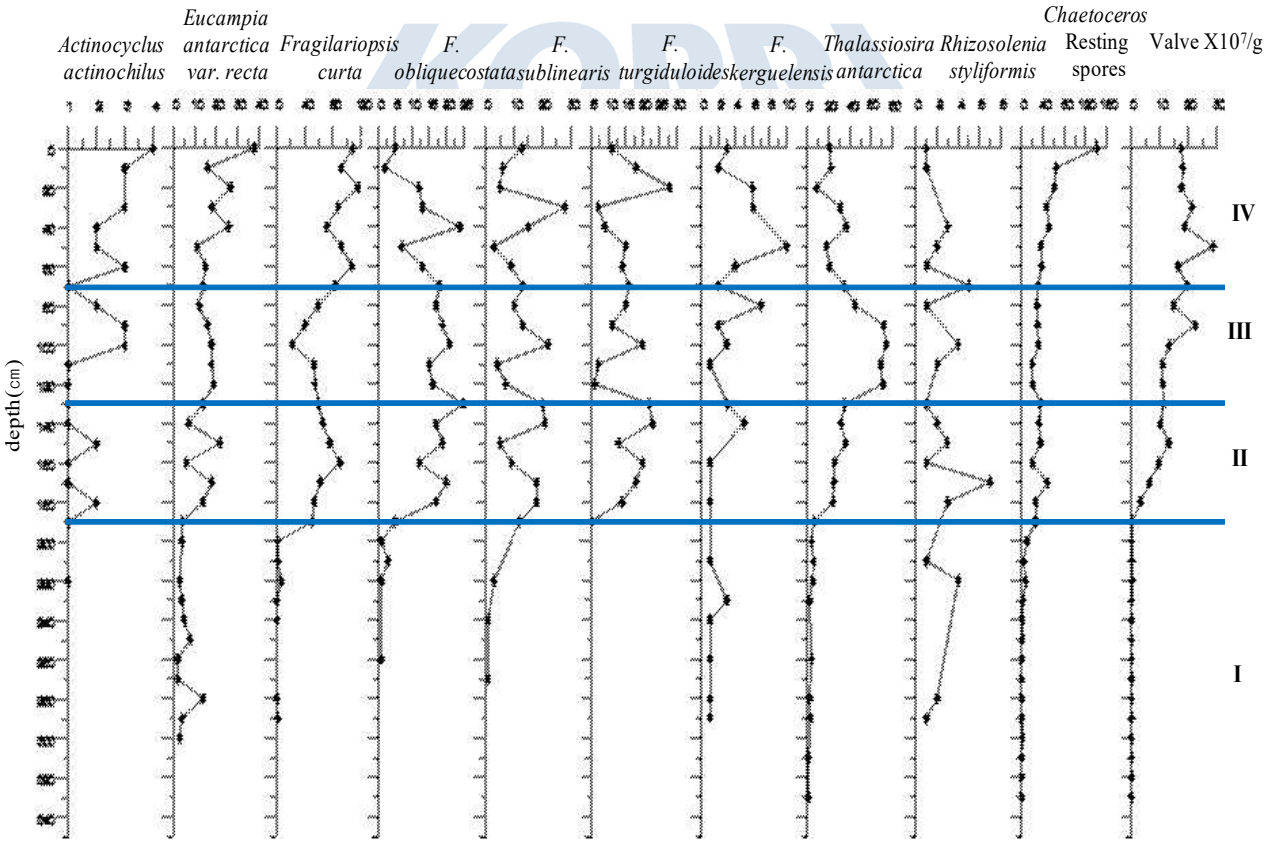


Fig. 9. RS19-GC09 코어로부터 선택된 지시종들의 수직산출 분포와 규조 군집대

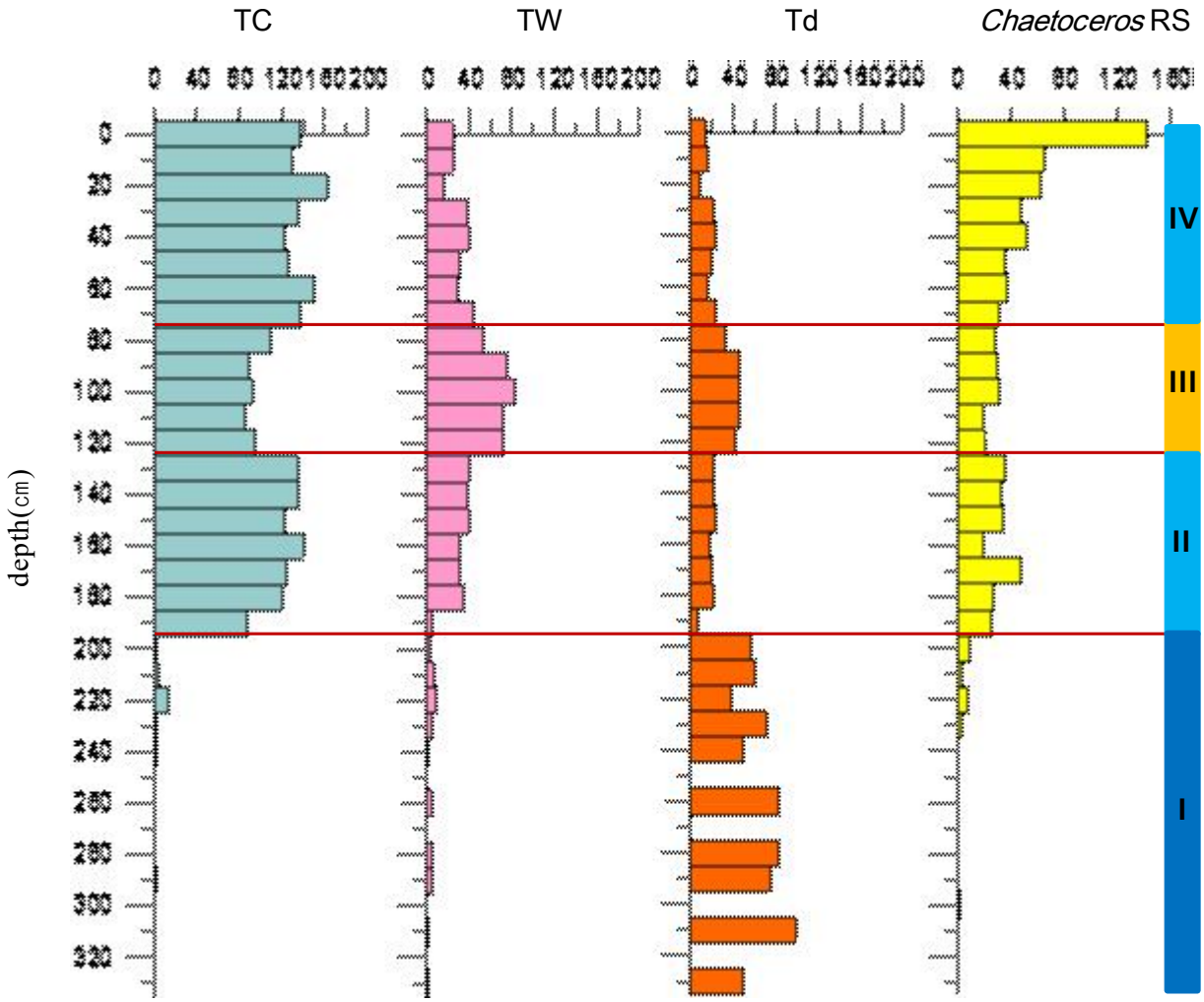


Fig. 10. RS19-GC09에서 산출된 Cold종과 Warm종의 비와 *Chaetoceros* RS값의 비교

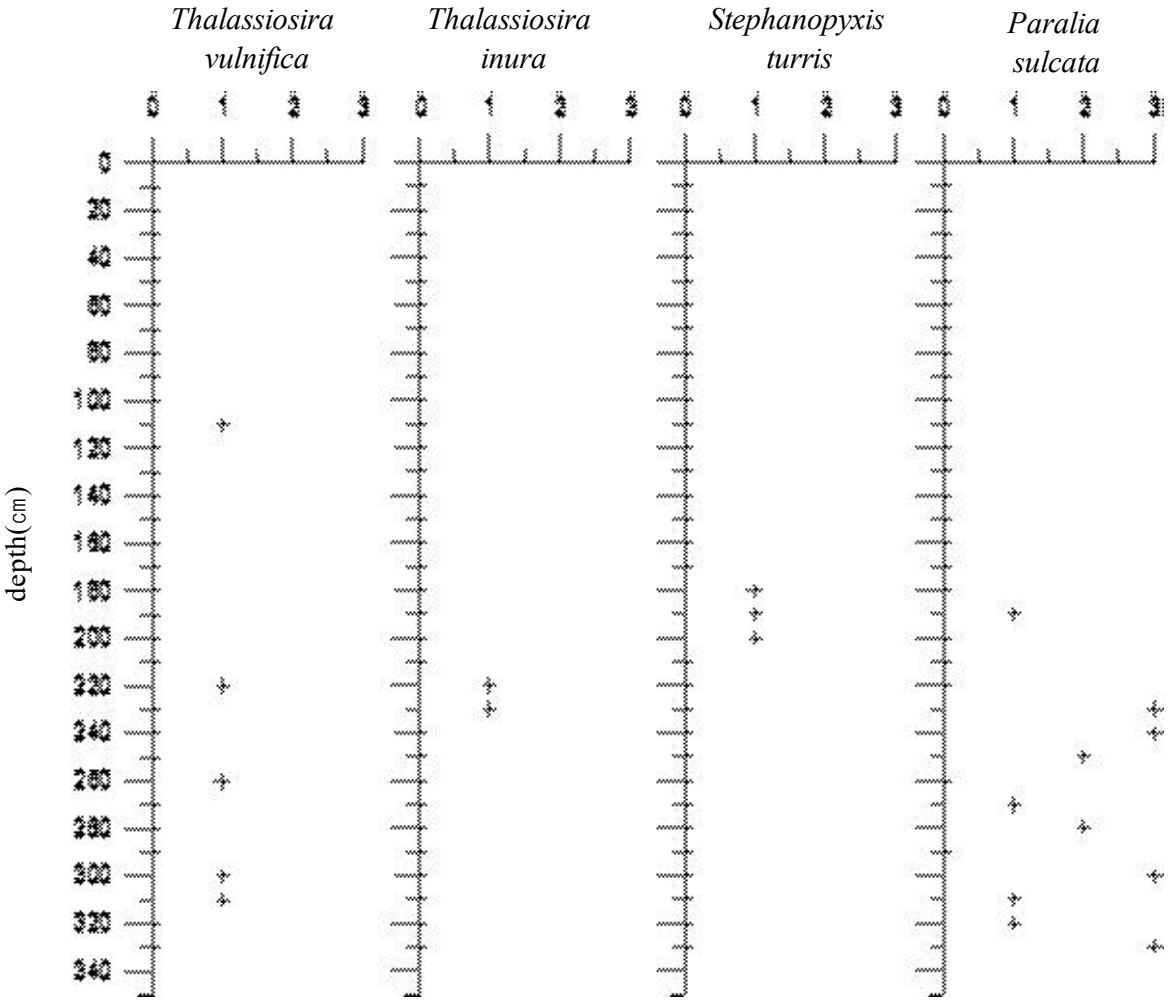


Fig. 11. RS19-GC09에서 산출된 재이동 규조각의 산출분포

3. AP18-LC06 규조 및 고환경 해석

AP18-LC06 코어 퇴적물로부터 50cm 간격으로 총 64개의 시료를 채취하여 종감정을 실시한 결과, 총 34속 82종의 규조가 산출되었으며 규조의 개체수 농도가 낮고 산출상태는 양호하지 못한 편이다.

Chaetoceros resting spores의 산출은 각 층준에서 매우 풍부하게 나타났다. 산출량이 너무 많아서 수직 산출 분포 변화를 알아보기 위해서는 5개의 viewfield를 대상으로 산정하였다. 규조 절대 개체수는 1.2 ~ 5.9 $\times 10^7$/g 의 범위로 산출이 되었다.

AP18-LC06 코어퇴적물로부터 가장 풍부하게 산출된 종은 *Fragilariopsis curta* (22.2%)와 *Thalassiosira antarctica* (24.3%)이며, *F. linearis* (7.3%), *Cocconeis costata* (5.8%), *F. cylindrus* (4.9%), *Actinocyclus actinochilus* (3.4%)와 *Odontella weissflogii* (2.7%)등이 산출되었다(Fig. 12).

시대 지시종은 산출되지 않았으며, 재이동을 지시해주는 규조의 산출도 *Deticulopsis*에 속하는 것들이 1-2개정도 나타났다. 극지 연구소에서 수행한 동위원소 연대 측정값에 의하면 연구 코어는 약 4,252 yr BP (3197 cm) 이후에 퇴적되었다(Table 1).

Table 1. AP18-LC06의 연대측정 값

depth (cm)	Age (yr BP)	Standard Deviation
247	475	24
912	1357	33
1638	2185	62
2197	2730	21
2506	3261	53
2767	3541	43
3197	4252	60

AP18-LC06에서 산출된 규조의 수직 산출 분포를 살펴보면, 각 우점 종들(*Actinocyclus actinochilus, Cocconeis costata, Eucampia antarctica* var. *recta, Fragilariopsis curta, F. cylindrus, F. linearis, F. obliquecostata, Odontella weissflogii, Thalassiosira antarctica*)의 산출이 계속적으로 나타나며 증감을 반복하는 경향을 보인다. 그러나, *Corethron criophillum*은 300㎝ 층준에서 다량 산출되며 100㎝에서도 풍부하다. *Odontella weissflogii*의 산출이 2450 ㎝부근에서 가장 풍부하게 산출된다. 특이할 만한 것은 *F. kerguelensis*의 산출이 601 ㎝, 800 ㎝, 900-1050 ㎝, 1801 cm, 2001 cm구간에서 나타난다(Fig. 13).

산출된 *Chaetoceros* resting spores와 절대 개체수 농도의 산출 분포를 비교해 보면 두 그래프 모두에서 1200㎝ 층준을 기준으로 하부에서 보다 상부에서 감소하는 것을 알 수 있다. *Chaetoceros* RS는 영양염류 결핍의 결과로 spring bloom동안 풍부하게 산출이 되는 것으로

알려져 있으며, 영양염류의 결핍은 저염의 meltwater의 유입이나 수괴의 성층화에서 기인된다. 따라서, *Chaetoceros* resting spores와 규조 절대 개체수 농도가 상대적으로 풍부한 1200 ㎝층 준의 하부가 상부보다 온난하였음을 알 수 있다(Fig. 14).

연구 코어는 약 4000년 이후에 퇴적되었으며 Open water종과 Sea-ice종의 산출 분포를 비교한 결과, open water종과 sea-ice종의 산출이 계속적으로 나타나면서 sea-ice종의 산출이 상대적으로 높게 나타난다(Fig. 15). 따라서 꾸준한 seasonal open water의 시기가 있었으며, 601 ㎝, 800 ㎝, 900-1050 ㎝, 1801 cm, 2001 cm구간에서는 *F. kerguelensis*의 산출이 나타나는 것으로 보아 따뜻한 해수가 유입되었음을 알 수 있다.

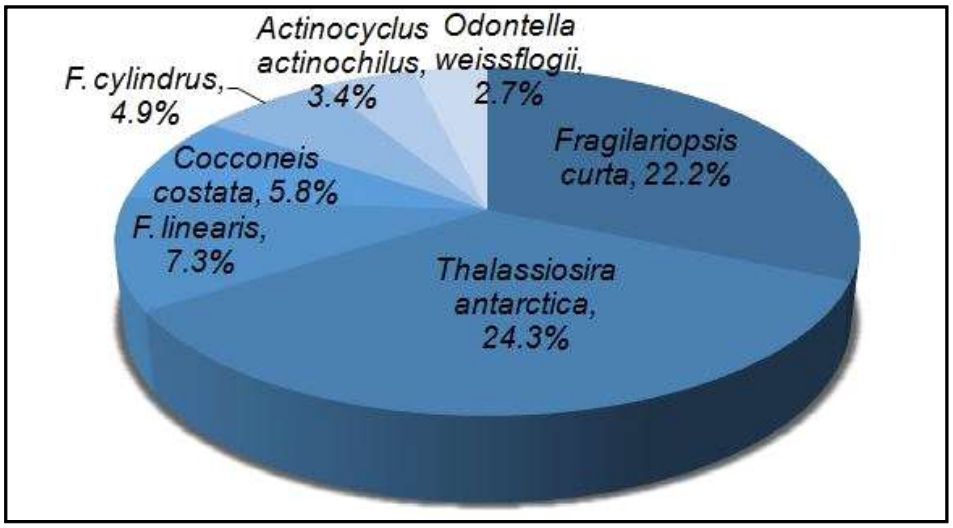


Fig. 12. AP18-LC06 에서 산출된 우세 종의 비율

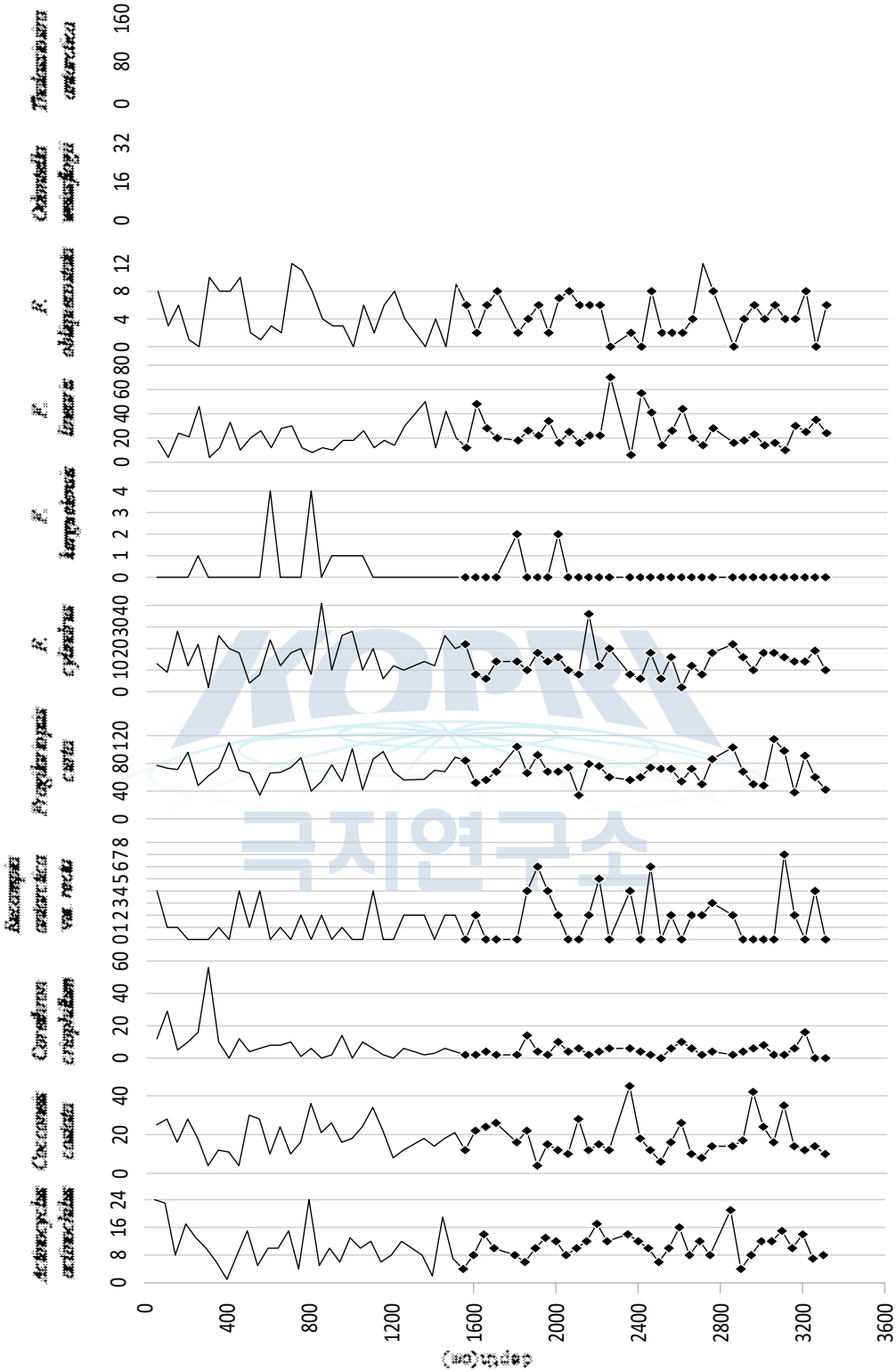


Fig. 13. AP18-LC06 코어로부터 선택된 지시종들의 수직산출 분포

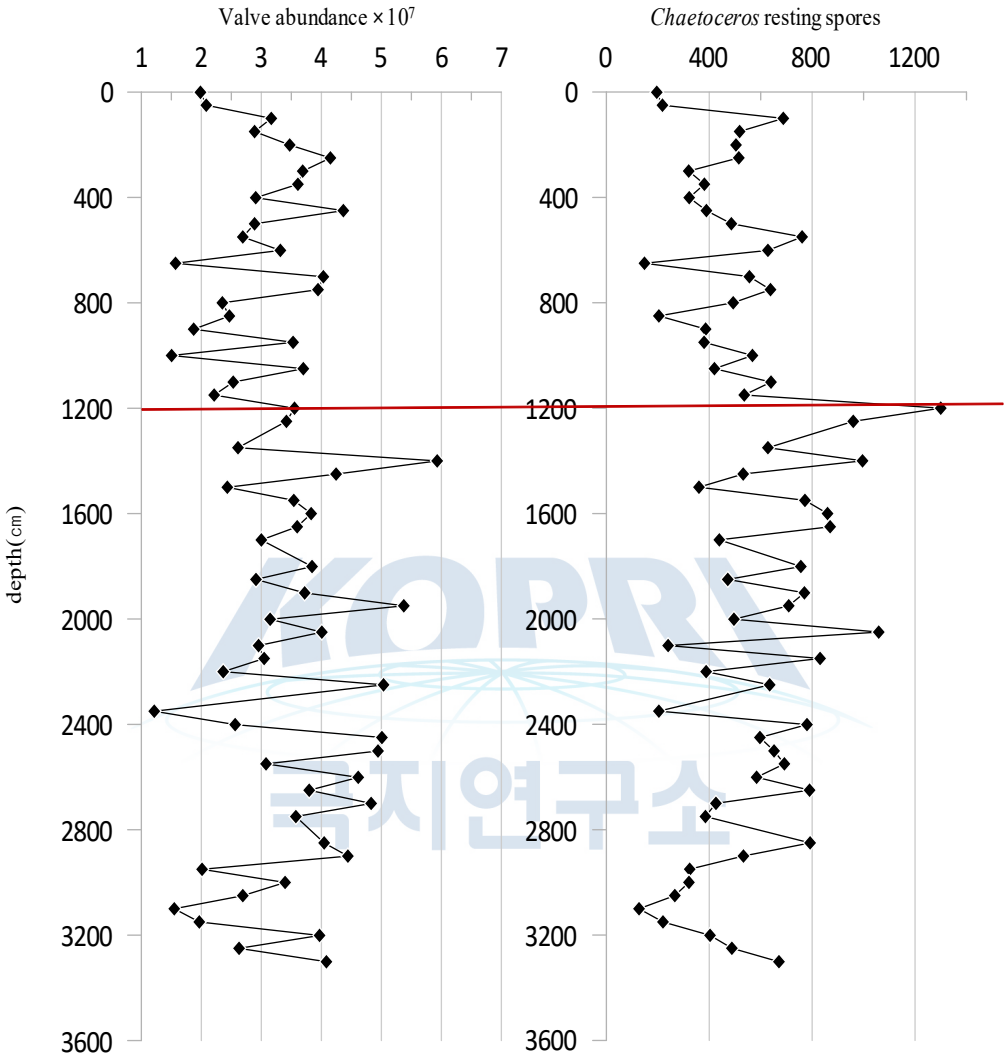


Fig. 14. 규조 개체수 농도와 *Chaetoceros* resting spores의 산출 분포

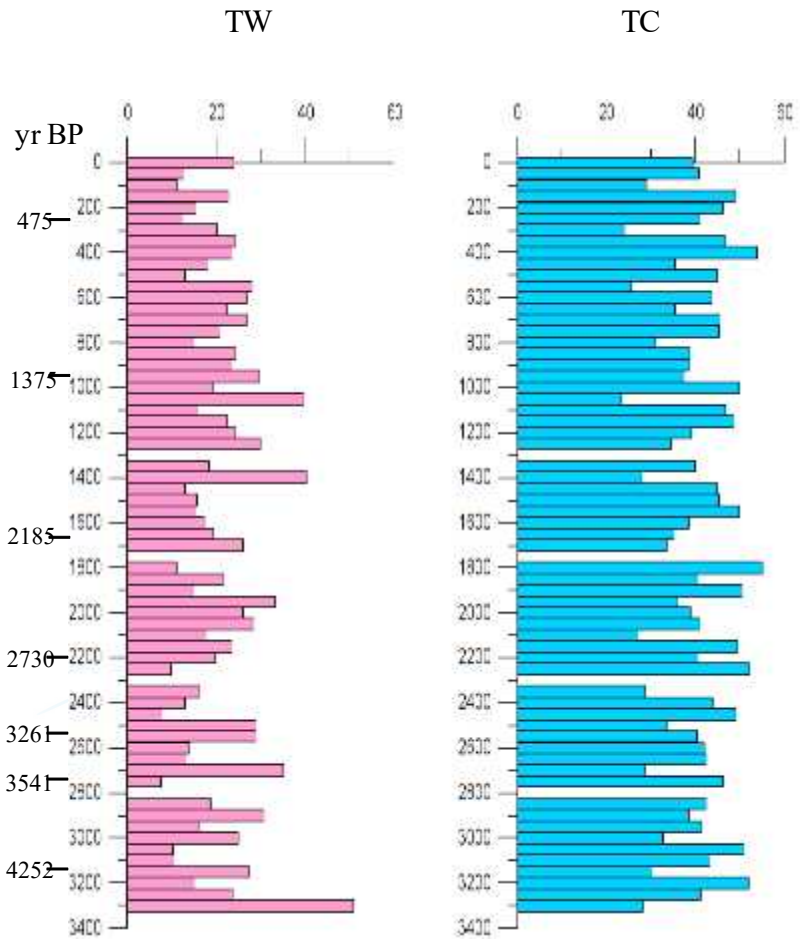


Fig. 15. Open water(TW)종과 sea-ice(TC)종의 산출 분포

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4-1절 연구 개발목표 달성도

연도	연구목표	연구내용	평가착안점	달성도 (%)
2020 년도	1지역 서남극 코어퇴적물로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석	시료채취	BS17-GC18 코어퇴적물에서 총 19개의 시료 채취	100
		규조분석	규조 관찰 결과 22속 54종 감정	100
		생층서대 설정	4개의 규조 군집대 설정	100
		환경지시종 분석	대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적	100
		고환경 변화	glacial-deglacial-interglacial- glacial로 고환경 변화	100
2021 년도	2지역 서남극 코어퇴적물로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석	시료채취	RS19-GC09 코어퇴적물에서 총 34개의 시료 채취	100
		규조분석	규조 관찰 결과 27속 57종 감정	100
		생층서대 설정	4개의 규조 군집대 설정	100
		환경지시종 분석	대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적	100
		고환경 변화	glacial-deglacial-interglacial- glacial로 고환경 변화	100
2022 년도	3지역 서남극 코어퇴적물로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석	시료채취	AP18-LC06코어퇴적물에서 총 64개의 시료 채취	100
		규조분석	규조 관찰 결과 34속 82종 감정	100
		생층서대 설정	우점종에 의한 분포 변화	100
		환경지시종 분석	대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적	100
		고환경 변화	1200㎝ 층준을 기준으로 하부 층준은 warm periods, 상부 층준은 cold periods	100

KOPRI 극지연구소

4-2절 대외기여도

가. 학술적 파급효과

서남극 지역에서의 빙하의 후퇴가 최근 수십년동안 가속화 되고 있어서 로스 해 지역에 대한 연구는 홀로세 기후 변화의 메카니즘을 이해하는데 중요한 정보를 제공하고, 기후 온난화에 남극의 역할을 규명하는데 기여할 수 있다. 선진국 과학자들에 의해 남극 반도 일원에서 지난 수천년 ~ 50년동안 일어났던 고기후 및 고해양 변화에 대한 새로운 사실이 밝혀지고 있다. 우리나라의 경우, 로스 해 인근 지역에 대한 규조연구가 최근에야 이루어지고 있어, 계속적인 연구는 그동안 축적되지 않았던 지역에서 규조 연구데이타를 제공해 줄 수 있으며, 특히, 국내에서의 규조 연구결과의 축적이라는 면에서 학술적으로 의미가 있다.

우리나라에서 서남극 지역의 규조를 이용한 고환경 변화 연구는 선진국들의 연구 수준과 비교해 보면 연구 인력 및 연구 실적에 있어서 매우 낮은 실정이다. 서남극 지역에 대한 규조 연구는 우리나라의 극지해양과학기술의 한 분야인 미고생물학적 분야를 국제적 수준으로 끌어올리기 위한 밑거름이 될 수 있다.

나. 경제적 파급효과

서남극 지역은 기후 온난화를 직접적으로 반영하고 있어 해빙과 육상 빙하의 감소가 빠르게 일어나고 있다. 따라서, 이 지역에서의 고환경 변화 연구는 기후 시스템에 대한 이해를 증진시켜 미래의 기후변화를 예측하고 대응 방안을 마련하는데 중요한 자료가 된다. 또한 기후 온난화로 인하여 국내에서도 산업 활동에 대한 환경규제 방안의 확립이 필요하고, 국제적으로도 규제가 점차 강화되고 있다. 주요국들은 극지 연구를 위해 막대한 자본과 인력을 투자하고 있어 여러 분야에서 극지 인프라를 구축하고 있다. 그러므로, 우리나라도 극지 해양을 활용한 기후 변화 대응, 미래 에너지 및 자원개발 등을 위한 경쟁력을 확보하기 위해서는 남극 여러 지역에서의 과학적인 연구가 이루어지면 국가 경제적인 정책을 수립하는데 있어 중요한 기반이 될 수 있다.

KOPRI 극지연구소

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

남극에서의 규조연구는 1990년대 후반에 시작되어 2023년 현재에 이르기 까지 약 30여년동안의 연구가 수행되었다. 그러나 남극 해양퇴적물에서의 규조 연구를 할 수 있는 전문 연구인력이 매우 부족하고, 현미경 관찰을 통해 연구 데이터를 확보하는 데에는 장기간의 시간이 소요되기 때문에 단기간에 선진국의 연구 성과를 따라가기에는 매우 어려움이 있다. 더불어 국제수준의 질적 논문을 발표하기 위해서는 학연간 협동연구가 계속되어야 하고 퇴적학적, 지화학적 연구 결과와 상호 보완을 통해서 고환경의 변화를 해석해 나가는 장기적인 노력이 필요하다.

남극 해양퇴적물에서 산출된 규조의 기초 데이터는 고해양환경 변화를 해석하기 위한 지질과학 및 극지 고해양 연구분야에 응용될 수 있다.

또한, 기후변화에 대응하기 위해서는 첨단 기술을 개발 뿐만 아니라 미래 기후 예측을 위한 선도적인 연구 활동이 선행되어야 하며 본 연구 결과는 이를 위한 밑거름이 될 수 있다.

KOPRI
극지연구소

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

규조류는 수역의 환경변화에 빠르고 민감하게 반응하고 퇴적물에 보존이 잘 되기 때문에 전 세계 수생 생태계의 연구에서 매우 중요한 생물이다. 실리카로 만들어진 골격 때문에 오랜 시간동안 퇴적물 및 여러 수성 환경에 남아 있어 고생태와 지질학적인 분야에서 연구 가치가 매우 높다. 해수면 상승 및 물 부족과 관련된 현재와 미래에 올 위협에 대한 장기 모니터링 데이터를 구축함에 있어 규조류의 고생태적인 응용 가치는 환경 및 복원 정책을 마련하는데 있어 중요 하다.

최근, 남극 반도를 둘러싼 코어 퇴적물에 대한 고해상도 다중 프록시 연구가 홀로세(즉, 10000년)퇴적물에서 이루어 졌고 홀로세 중기 기후 온난기(Mid-Holocene Climatic Optimum)와 신빙기(Neoglacial)에 대한 기후 event를 정의하는 연구가 성공적으로 수행되었다(Leventer et al. 1996, Shevenell et al. 1996, Pudsey & Evans 2001, Taylor et al. 2001, Yoon et al. 2002, Domack et al. 2003, 2005, Bentley et al. 2005, Pudsey et al. 2006).

또한 해양시추프로그램 에서도 climatic event와 little ice age와 late deglacial periods등을 세부적으로 정의할 정도로 정확도가 높아 졌다 (Domack et al. 2001, Sjunneskog & Taylor 2002, Taylor & Sjunneskog 2002, Brachfeld et al. 2002, Warner & Domack 2002)

남극 반도의 동쪽에서 발생한 빙붕 붕괴 사건으로 12,000km^2 이상의 연안에 선상 접근이 가능해졌으며, 환경적 이슈와는 별개로 과학자들은 이전에는 접근할 수 없었던 이 지역의 해양학과 고해양학을 탐험할 수 있는 독특한 기회를 갖게 되었다. 빙붕 후퇴로 일어나는 중요한 결과의 하나는 빙붕 아래에서는 일어나지 못했던 광합성을 하는 규조류의 일차생산성이 상부 성층에서 풍부해 진 것이다. 따라서 남극 반도 동쪽에 있는 weddell Sea에서의 규조연구는 빙붕 손실로 인한 해양 생태계의 변화를 알 수 있는 자료를 제공 할 수 있다.

새로운 연구 분야로서 가장 최근에는 유전체학, 전사체학 및 단백질체학과 같은 분자 기술을 포함하여 다양한 기술의 적용이 시도 되고 있다(Berges et al., 2022). 이러한 분자적 접근법으로 상당한 연구 결과를 얻을 수 있다고 생각이 되며, 이러한 연구결과를 생태계 및 미화석에 대한 연구까지 확장 시키려면 실험적인 시도들이 다양하게 수행되어야 한다.

제 7 장 참고문헌

박영숙, 이종덕, 윤혜수, 윤호일, 2001, 남극 브랜스필드 해협 퇴적물에서 산출된 규조류에 의한 고환경 연구. 고생물학회지, 17(2), 99-111.

박영숙, 이종덕, 윤호일, 윤혜수, 김효정, 2002, 드레이크해협 남부 코어퇴적물에서 산출된 제4기 규조화석 연구. 지구과학회지, 23(5), 442-453.

박영숙, 이종덕, 윤호일, 윤혜수, 2003, 남극 드레이크해협 극전선 부근 시추코어퇴적물(DP00-02)에서 규조화석을 이용한 고환경 연구. 지질학회지, 39(3), 337-346.

박영숙, 이종덕, 윤호일, 윤혜수, 2004, 서남극 맥스웰만에서 산출된 홀로세 규조 연구. 지질학회지, 40(4), 455-468.

박영숙, 이종덕, 윤호일, 이재일, 2007a, 남극 사우스오크니 제도 서부 해역의 코어퇴적물에서 산출된 규조 군집. 지질학회지, 43(1), 33-42.

박영숙, 이종덕, 윤호일, 유규철, 2007b. 서남극 브랜스필드 해협 동부분지 내 규조군집과 홀로세 말기 기후변동 연구. 지질학회지, 43(3), 345-352.

박영숙, 유규철, 이종덕, 윤호일, 2009. 남극 브랜스필드 해협 코어퇴적물의 고해상 규조 분석. 지질학회지, 45(1), 1-8.

박영숙, 윤호일, 유규철, 이영엽, 2015, 남극 엽층리 퇴적물로부터 규조 종을 이용한 고기후 변화 연구. 한국 지구과학회지, 36(2), 190-197.

박영숙, 김성한, 이재일, 유규철, 이민경, 2021. 로스해 Iselin Bank에서 규조를 이용한 고해양 환경변화 해석. 한국지구과학회지, 42(6), 667-687.

박영숙, 이종덕, 윤호일, 유규철, 이성주, 2010, 남극반도 엘레판트 섬 주변지역에서 규조를 이용한 홀로세 고기후 변화. 지질학회지, 46(2), 111-117.

박영숙, 유규철, 이종덕, 윤호일, 이재일, 김향주, 이성주, 2011, 남 쉐틀랜드 군도 북동쪽 대륙대 코어퇴적물에 나타나는 해빙기에 대한 고해상 규조 분석 연구. 지질학회지, 47(4), 363-369.

이영길, 1996, 남극 브랜스필드 해협 코아 퇴적물의 미고생물(규조)학적 연구. 고생물학회지, 12(1), 1-21.

Ackley, S.F., Sullivan, C.W. 1994. Physical controls on the development and characteristics of Antarctic sea ice biological communities— a review and synthesis. 41(10), 1583-1604.

Bentley, M.J., Hodgson, D.A., Sugden, D.E., Roberts, S.J., Smith, J.A., Leng, M.J. & Bryant, C. 2005. Early Holocene retreat of the George VI Ice Shelf Antarctic Peninsula. Geology,

33, 173 - 176.

Bolinesi, F., Saggiomo, M., Ardini, F., Castagno, P., Cordone, A., Fusco, G., Rivaro, P., Saggiomo, V., Mangoni, O. 2020. Spatial-Related Community Structure and Dynamics in Phytoplankton of the Ross Sea, Antarctica. Frontiers in Marine Science, 7, 574963.

Bollen, M., Riesselman, C.R., Ohneiser C., Albot, O., McKay, R., Lee, M.K., Yoo, K-Y., Kim, S., Lee, J.I., Levy, R. 2022. Pleistocene oceanographic variability in the Ross Sea: A multiproxy approach to age model development and paleoenvironmental analyses. Global and Planetary Change 216,103901.

Brachfeld, S.A., Banerjee, S.K., Guyodo, Y. & Acton, G.D. 2002. A 13,200 year history of century to millennial-scale paleoenvironmental change magnetically recorded in the Palmer Deep, western Antarctic Peninsula. Earth and Planetary Science Letters, 194, 311 - 326.

Castagno, P., Falco, P., Dinniman, M.S., Spezie, G., Budillon, G. 2017. Temporal variability of the Circumpolar Deep Water inflow onto the Ross Sea continental shelf. J. Mar. Syst. 166, 37 - 49.

Dinniman, M.S., Klinck, J.M., Smith Jr., W.O. 2011. A model study of Circumpolar Deep Water on the West Antarctic Peninsula and Ross Sea continental shelves. Deep-Sea Res. II Top. Stud. Oceanogr. 58 (13 - 16), 1508 - 1523.

Dinniman, M.S., Klinck, J.M., Hofmann, E.E., Smith Jr., W.O. 2014. Effects of Projected Changes in Wind, Atmospheric Temperature, and Freshwater Inflow on the Ross Sea. Journal of climate, 31(4), 1619-1635.

Domack, E.W., Leventer, A., Dunbar, R., Taylor, F., Brachfeld, S., Sjunneskog, C. & ODP Leg 178 Scientific Party. 2001. Chronology of the Palmer Deep site, Antarctic Peninsula: a Holocene palaeoenvironmental reference for the circum-Antarctic. The Holocene, 11, 1 - 9.

Domack, E.W., Leventer, A., Root, S., Ring, J., Williams, E., Carlson, D., Hirshorn, E., Wright, W., Gilbert, R. & Burr, G. 2003. Marine sedimentary record of natural environmental variability and recent warming in the Antarctic Peninsula. Antarctic Research Series, 79, 205 - 224.

Domack, E.W., Duran, D., Leventer, A., Ishman, S., Doane, S., Mccallum, S., Amblas, D., Ring, J., Gilbert, R. & Prentice, M. 2005. Stability of the Larsen B ice shelf on the Antarctic Peninsula during the Holocene epoch. Nature, 436, 681 - 685.

Gille, S.T. 2002. Warming of the Southern Ocean since the 1950s. Science 295 (5558), 1275 - 1277.

Golledge, N.R., Fogwill, C.J., Mackintosh, A.N., Buckley, K.M., 2012. Dynamics of the last glacial maximum Antarctic ice-sheet and its response to ocean forcing. Proc.Natl. Acad. Sci. 109 (40), 16052 - 16056.

Hays, J.D., Imbrie, J. and Shackleton, N.J. 1976. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. Science, 194(4270), 121-1132.

Hillenbrand, C.D., Smith, J.A., Hodell, D.A., Greaves, M., Poole, C.R., Kender, S., Williams, M., Andersen, T.J., Jernas, P.E., Elderfield, H., Klages, J.P., Roberts, S.J., Gohl, K., Larter, R.D., Kuhn, G. 2017. West Antarctic Ice Sheet retreat driven by Holocene warm water incursions. Nature 547 (7661), 43 - 48. https://doi.org/ 10.1038/nature 22995.

Jacobs, S.S., Comiso, J.C. 1997. Climate variability in the Amundsen and Bellingshausen Seas. J. Clim. 10, 697-709.

Joughin, I., Alley, R.B. 2011. Stability of the West Antarctic ice sheet in a warming world. Nature Geoscience 4(8):506-513.

Leventer, A., Domack, E.W., Ishman, S.E., Brachfeld, S., Mcclennen, C.E. & Manley, P. 1996. Productivity cycles of 200 - 300 years in the Antarctic Peninsula region: understanding linkages among the sun, atmosphere, oceans, sea ice, and biota. Geological Society of America Bulletin, 108, 1626 - 1644.

Mangoni, O., Saggiomo, V., Bolinesi, F., Margiotta, F., Budilon, G., Cotroneo, Y., Misic, C., Rivaro, P., Saggiomo, M. 2017. Phytoplankton blooms during austral summer in the Ross Sea, Antarctica: Driving factors and trophic implications. PLoS ONE 12(4): e0176033. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176033

Menezes, V.V., Macdonald, A.M., Schatzman, C. 2017. Accelerated freshening of Antarctic Bottom Water over the last decade in the Southern Indian Ocean. Science Advances 3 (1). https://doi.org/10.1126/SCIADV.1601426/ SUPPL_FILE/ 1601426_ SM.PDF.

Meredith, M.P., Jullion, L., Brown, P.J., Naveira Garabato, A.C., Couldrey, M.P. 2014.Dense waters of the Weddell and Scotia Seas: recent changes in properties and circulation. Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 372 (2019), 20130041.

Morlighem, M., Wood, M., Seroussi, H., Choi, Y., Rignot, E. 2019. Modeling the response of northwest Greenland to enhanced ocean thermal forcing and subglacial discharge. The Cryosphere, 13, 723 - 734.

Morrison, A.K., Hogg, A.M., England, M.H., Spence, P. 2020. Warm Circumpolar Deep Water transport toward Antarctica driven by local dense water export in canyons. Science Advances 6 (18), eaav 2516.

Park, H-S., Kim, S-J., Seo, K-H., Stewart, A.L., Kim S-Y., Son, S-W. 2018. The impact of Arctic sea ice loss on mid-Holocene climate. Nature Communications volume, 9, 4571.

Pollard, D., DeConto, R.M., 2009. Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. Nature 458 (7236), 329 - 332.

Pritchard, H., Ligtenberg, S.R., Fricker, H.A., Vaughan, D.G., van den Broeke, M.R., Padman, L. 2012. Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. Nature 484 (7395), 502 - 505.

Pudsey, C.J. & Evans, J. 2001. First survey of Antarctic sub-ice shelf sediments reveals mid-Holocene ice shelf retreat. Geology, 29, 787 - 790.

Pudsey, C.J., Murray, J.W., Appleby, P. & Evans, J. 2006. Ice shelf history from petrographic and foraminiferal evidence, northeast Antarctic Peninsula. Quaternary Science Reviews, 25, 2357 - 2379.

Purkey, S.G., Johnson, G.C. 2010. Warming of global abyssal and deep Southern Ocean waters between the 1990s and 2000s: contributions to global heat and sea level rise budgets. J. Clim. 23 (23), 6336 - 6351.

Rignot, E., Box, J.E., Burgess, E., Hanna, E. 2008. Mass balance of the Greenland ice sheet from 1958 to 2007, Geophys. Res. Lett., 35, L20502, doi:10.1029/2008GL035417.

Rignot, E., et al. 2004. Improved estimation of the mass balance of glaciers draining into the Amundsen Sea sector of West Antarctica from the CECS/NASA 2002 campaign, Ann. Glaciol., 39.

Saggiomo, V., Carrada, G.C., Mangoni, O., Ribera d'Alcalà, M., Russo, A. 1998. Spatial and temporal variability of size-fractionated biomass and ž/ primary production in the Ross Sea Antarctica during austral spring and summer. Journal of Marine Systems 17, 115 - 127.

Saggiomo, V., Catalano, G., Mangoni, O., Budilon, G., Carrada, G.C. 2002. Primary production processes in ice-free waters of the Ross Sea (Antarctica) during the austral summer 1996. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 49(9-10), 1787-1801.

Sancetta, C. 1999. Diatoms and marine paleoceanography.In: (E. F. Stoermer and J. P. Smol, eds) The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences.Cambridge University Press, Cambridge. pp. 374 - 386.

Scherer, R.P. 1994. A new method for the determination of absolute abundance of diatoms and other silt-sized sedimentary particles. Journal of Paleolimnology, 12, 171 - 179.

Shevenell, A.E., Domack, E.W., Kernan, G.M. 1996. Record of Holocene paleoclimate change along the Antarctic Peninsula: evidence from glacial marine sediments, Lallemand Fjord. Papers and Proceedings of the Royal Society of Tasmania, 130, 55 - 64.

Sjunneskog, C., Taylor, F. 2002. Postglacial marine diatom record of the Palmer Deep, Antarctic Peninsula (ODP Leg 178, Site 1098) 1. Total diatom abundance. Paleoceanography, 17, art. no. 8003.

Smith, D.A., Hofmann, E.E., Klinck, J.M., Lascara, C.M. 1999. Hydrography and circulation of the west Antarctic Peninsula continental shelf. Deep-Sea Res. I Oceanogr. Res. Pap. 46 (6), 925 - 949.

Stoermer, E. F. and J. P. Smol. 1999. The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 469.

Taylor, F., Sjunneskog, C. 2002. Postglacial marine diatom record of the Palmer Deep, Antarctic Peninsula (ODP Leg 178, Site 1098). Paleoceanography, 17, art. no. 1026.

Taylor, F., Whitehead, J., Domack, E.W. 2001. Holocene paleoclimate change in the Antarctic Peninsula: evidence from the diatom, sedimentary and geochemical record. Marine Micropaleontology, 41, 25 - 43.

Thomas, R.H., Bentley, C.R., 1978. A model for Holocene retreat of the West Antarctic ice sheet. Quat. Res. 10 (2), 150 - 170.

Wåhlin, A.K., Yuan, X., Björk, G., Nohr, C. 2010. Inflow of warm Circumpolar Deep Water in the central Amundsen shelf. J. Phys. Oceanogr. 40 (6), 1427 - 1434.

Walker, D.P., Brandon, M.A., Jenkins, A., Allen, J.T., Dowdeswell, J.A., Evans, J. 2007. Oceanic heat transport onto the Amundsen Sea shelf through a submarine glacial trough. Geophys. Res. Lett. 34. doi:10.1029/2006GL028154

Warner, N.R., Domack, E.W. 2002. Millennial- to decadal-scale paleoenvironmental change during the Holocene in the Palmer Deep, Antarctica, as recorded to particle size analysis. Paleoceanography, 17, art. 8004.

Williams, G.D., Herraiz-Borreguero, L., Roquet, F., Tamura, T., Ohshima, K.I., Fukamachi, Y., Fraser, A.D., Gao, L., Chen, H., McMahon, C.R., Harcourt, R., Hindell, M. 2016. The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay. Nat. Commun. 7 (1), 12577. https://doi.org/10.1038/ ncomms 12577.

Yoon, H.I., Park, B.K., Kim, Y., Kan, C.Y. 2002. Glaciomarine sedimentation and its Paleoclimatic implications on the Antarctic Peninsula shelf over the last 15000 years. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 185, 235 - 254.

KOPRI 극지연구소

Zhang, Y., Tao, J., Wang, J., Ding, L., Ding, C., Li, Y., Zhou, Q., Li, D., Zhang, H. 2019. Trends in Diatom Research Since 1991 Based on Topic Modeling. microorganisms, 7, 213; doi:10.3390/microorganisms 7080213

KOPRI
극지연구소