

서남극 코어퇴적물에서 규조를 이용한 생층서 및 고환경
변화 연구

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



전북대학교 산학협력단

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
최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 유 규 철

위탁연구기관명 : 전북대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 박 영 속

위탁참여연구원 : 신 문 상

보고서 초록

위탁연구과제명	서남극 코어퇴적물에서 규조를 이용한 생층서 및 고환경 변화 연구				
위탁연구책임자	박 영 숙	해당단계 참여연구원수	1	해당단계 연구비	100,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	전북대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	
■서남극 지역으로부터 채취한 BS17-GC18, RS19-GC09, AP18-LC06, AM22-GC10B, RS19-GC16 코어퇴적물 분석 및 생층서 ●BS17-GC18: 26속 61종, 규조 개체수 농도 $0.01 \sim 9.25 \times 10^7/g$ 규조 군집대 : I (660-839 cm), II (311-660 cm), III (10-311 cm) ●RS19-GC09: 27속 57종, 규조 개체수 농도 $0.01 \sim 28.75 \times 10^7/g$ 규조 군집대 : I (190-330 cm), II (130-190 cm), III (70-130 cm), IV (0-70 cm) ●AP18-LC06: 34속 82종, 규조 개체수 농도 $1.2 \sim 5.9 \times 10^7/g$ 규조 군집대: I (1050-3301 cm), II (0-1050 cm) ●AM22-GC10B: 22속 50종, 규조 개체수 농도 $0.5 \sim 8.3 \times 10^7/g$ 규조 군집대 : I (260-500 cm), II (160-260 cm), III (0-160 cm) ●RS19-GC16: 25속 62종, 규조 개체수 농도 $6 \sim 60.9 \times 10/g$ 규조 군집대: I (350-408 cm), II (170-350 cm), III (110-170 cm), IV (0-110 cm) ■ 고환경 해석 ●BS17-GC18: Glacial→Deglacial→Interglacial의 순으로 연구지역의 고환경 변화 ●RS19-GC09: Heavy Sea-ice condition→Sea-ice>>open water→Sea-ice<<open water→Sea-ice>>open water로 고환경 변화 ●AP18-LC06: Warm Interval→Open sea로 변화 ●AM22-GC10B: Glacial→Deglacial→Interglacial로 변화 ●RS19-GC16: Seasonal sea ice<Open water → Seasonal sea ice<<Open water → Seasonal sea ice>>Open water → Seasonal sea ice<Open water					
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 코어퇴적물로 부터 규조 군집의 변화기록을 복원하여 퇴적층의 생층서를 확립하고 해빙 및 빙상의 분포 변화를 파악하는 데 목적이 있다.

◎ 필요성

- 규조는 남극 해양 생태계에서 주요한 일차 생산자로서 해빙의 유무, 영양염류 공급, 수온에 민감하게 반응하여 기후의 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.
- 규조는 환경 변화에 빠르게 반응하기 때문에 지구의 경고 시스템 역할을 한다. 남극지역의 과거 기후변화의 기록을 알아내고 지구 온난화의 원인을 파악하여 국제적인 연구 동향(환경지시자개발, 기후변화예측)에 맞추어 나가기 위해서는 규조 연구의 수행이 필수적이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

연구 수행기간 동안 1단계 3년동안 서남극 지역에 위치한 크리스탈 사운드지역 (BS17-GC18) 1차, 로스해 McMurdo Sound 지역(RS19-GC09), Joinville Islands 지역 (AP18-LC06), 2단계 3년동안 크리스탈 사운드지역(BS17-GC18) 2차, 아문젠 해 Getz 'A' Ice Shelf 지역(AM22-GC10B), 로스해 Cape Adare 지역(RS19-GC16)을 대상으로 연구하였다. 각 연구 코어로부터 규조 분석을 통하여 아래와 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

● BS17-GC18

- 총 26속 61종 감정

- 3개의 규조 군집대를 설정

규조 군집대 I (660-839 cm), 규조 군집대 II (311-660 cm), 규조 군집대 III (10-311 cm)

- *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 → Interglacial의 순으로 연구지역의 고환경 변화

● RS19-GC09

- 총 27속 57종 감정

- 4개의 규조 군집대를 설정

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

cm), 규조 군집대 IV (0-70 cm)

- 공해종(TW)과 해빙종(TC)의 산출 분포를 비교하여, 그에 따라 RS19-GC09의 퇴적 동안 4번의 기후 변화를 파악

Heavy Sea-ice condition → Sea-ice>>open water → Sea-ice<<open water → Sea-ice>>open water의 순으로 연구지역의 고환경 변화

● AP18-LC06

- 총 34속 82종 감정
- 3개의 규조 군집대 설정

규조 군집대 I (1050-3301 cm), 규조 군집대 II (0-1050 cm)

- 약 4000년 이후에 퇴적되었으며 Open water종과 Sea-ice종의 산출 분포를 비교한 결과, Warm Interval → Open sea로 고환경 변화

● AM22-GC10B

- 총 22속 50종 감정
- 3개의 규조 군집대를 설정

규조 군집대 I (260-500 cm), 규조 군집대 II (160-260 cm), 규조 군집대 III (0-160 cm)

- 규조 군집의 해빙종과 공해종의 산출 분포 양상 및 대자율값에 의하여 AM22-GC10B의 퇴적 동안 3번의 기후 변화를 파악

빙하하부(subglacial) 환경→ 계절적으로 해빙이 줄어드는 빙하해(glaciomarine) 환경→ 계절적으로 개방된 해양(open marine) 으로 나타남.

● RS19-GC16

- 총 25속 62종 감정
- 4개의 규조 군집대 설정

규조 군집대 I (350-408 cm), 규조 군집대 II (170-350 cm), 규조 군집대 III (110-170 cm), 규조 군집대 IV (0-110 cm)

- open water종들의 분포에 근거하여 Seasonal sea ice< Open water → Seasonal sea ice<<Open water → Seasonal sea ice>>Open water → Seasonal sea ice<Open water

V. 연구개발결과의 활용계획

지난 30여 년 동안의 꾸준히 이루어진 남극에서의 규조 연구 결과는 과거의 기후 변화의 양상을 밝혀 주고 있으며, 퇴적 시기에 따른 빙상의 전진과 후퇴 및 해빙의 분포 변화에 대한 연구 기록은 빙하의 변화 시기를 파악하는데 매우 중요하다. 이러한 기록은 기온변화, 온실가스 농도, 대기 구성을 포함한 지구 기후 시스템을 이해 하는데 기여하고 있으며, 현재와 미래의 지구환경변화를 모니터링하는데 활용 할수 있다.

- 차세대 고해양 복원 및 모델 검증 활용

규조 군집으로 복원한 과거 온난기의 해빙의 분포는 물리적 빙상-해양 결합 모델의 정확도를 검증하는 핵심 데이터로 활용될 수 있다. 또한, 빙상이 급격히 후퇴하기 시작한 과거 특정 시점의 규조기록은 현재 온난화 속도에서 서남극 빙상이 붕괴되는 임계 온도를 예측하는데도 활용 할 수 있다.

- 한반도 해수면 변동 예측

서남극 퇴적물에서 규조 기록이 알려주는 빙상 후퇴 시기의 정보를 바탕으로, 한반도 주변 해수면 상승 시뮬레이션을 설정할 때 기초 데이터로 활용 할 수 있으며, 더 나아가서는 국가차원의 연안 방재 전략 수립에 활용될 수 있다.



S U M M A R Y

I. Title

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

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

- Diatoms are key primary producers in the Antarctic marine ecosystem. They respond sensitively to sea ice cover, nutrient supply, and water temperature, providing valuable insights into climate change. Therefore, research on their species composition provides the most reliable proxy for recording past warm periods.

- In line with this project's objective to study West Antarctic Ice Sheet (WAIS) retreat and ocean circulation changes during past warm periods, we will use diatom research findings to reconstruct changes in the extent of the West Antarctic Ice Sheet during past warm periods.

-Diatoms respond rapidly to environmental changes, serving as a warning system for the Earth. Conducting diatom research is essential to uncovering past climatic records in Antarctica, identifying the drivers of global warming, and aligning with international research trends such as the development of environmental indicators and climate change prediction.

III. Contents and Extent of R&D

During the research period, Phase 1, a three-year study, focused on the Crystal Sound site (BS17-GC18), McMurdo Sound in the Ross Sea (RS19-GC09), and the Joinville Islands area (AP18-LC06) in West Antarctica. Phase 2, a three-year study, focused on the Crystal Sound site (BS17-GC18), the Getz 'A' Ice Shelf in the Amundsen Sea (AM22-GC10B), and the Cape Adare area in the Ross Sea (RS19-GC16). Diatom analyses from each core were conducted, as follows:

- Establishment of sedimentary chronology and biostratigraphy based on indicator species

Establishment of biostratigraphic zones based on community analysis using diatom occurrence distribution

Interpretation of changes in sedimentary environments based on environmental indicator species

Biostratigraphic studies of the identified diatoms included occurrence patterns and assemblage analysis. Quantitative analyses of the occurrence frequency and ecological characteristics of each species were conducted to establish basic data. Paleoenvironments were interpreted based on environmental indicator species such as sea-ice species, open-water species, and *Chaetoceros* resting spores.

IV. R&D Results

● BS17-GC18 (Crystal Sound)

Identified 61 species from 26 genera.

Established three Diatom Assemblage Zones (DAZs): DAZ I (660-839 cm), DAZ II (311-660 cm), and DAZ III (10-311 cm).

Paleoenvironmental changes were interpreted by comparing occurrences of *Thalassiosira Antarctica* (cold and warm types) and *Eucampia Antarctica* (var. *recta* vs. var. *Antarctica*).

Result: Glacial → Deglacial → Interglacial conditions.

● RS19-GC09 (McMurdo Sound, Ross Sea)

Identified 57 species from 27 genera.

Established four DAZs: DAZ I (190-330 cm), DAZ II (130-190 cm), DAZ III (70-130 cm), and DAZ IV (0-70 cm).

By comparing the occurrence distributions of open-sea (TW) and sea-ice (TC) species, four climatic shifts during the deposition of RS19-GC09 were identified.

Result: Heavy Sea-ice condition → Sea-ice>>open water → Sea-ice<<open water → Sea-ice>>open water

● AP18-LC06 (Joinville Islands)

Identified 82 species from 34 genera.

Established three DAZs: DAZ I (1050-3301 cm), and DAZ II (0-1050 cm)

Deposited approximately 4,000 years ago, comparing the occurrence distributions of open-water and sea-ice species.

Result: warm interval → open sea.

● AM22-GC10B (Getz 'A' Ice Shelf, Amundsen Sea)

Identified 50 species from 22 genera.

Established three DAZs: DAZ I (260-500 cm), DAZ II (160-260 cm), and DAZ III (0-160 cm).

Identified three climatic shifts based on the distribution of sea ice/open water

species and magnetic susceptibility values.

Result: Subglacial environment → Glaciomarine environment → Open Marine

● RS19-GC16 (Cape Adare, Ross Sea)

Identified 62 species from 25 genera.

Established four DAZs: DAZ I (350-408 cm), DAZ II (170-350 cm), DAZ III (110-170 cm), and DAZ IV (0-110 cm).

Based on open water species distribution, the environment fluctuated as follows:

Result: Seasonal Sea Ice < Open Water → Seasonal Sea Ice ≪ Open Water → Seasonal Sea Ice ≫ Open Water → Seasonal Sea Ice < Open Water.

V. Application Plans of R&D Results

Over the last 30 years, research on Antarctic diatoms has been key to reconstructing past climate change patterns. The records help pinpoint the timing of ice sheet advance and retreat and changes in sea ice distribution. This data is vital for understanding the global climate system and monitoring future environmental changes

- Utilization for Next-Generation Paleo-Oceanographic Reconstruction and Model Verification

The reconstructed sea ice distribution from past warm periods using diatom assemblages can be used as core data to verify the accuracy of physical ice sheet-ocean coupled models. Furthermore, diatom records from specific past moments when the ice sheet began to retreat rapidly can be utilized to predict the critical temperature threshold at which the West Antarctic Ice Sheet might collapse under the current rate of global warming.

- Prediction of Sea-Level Fluctuations around the Korean Peninsula

Based on the information about ice sheet retreat periods provided by diatom records in Antarctic sediments, this data can serve as foundational input when establishing sea-level rise simulations for the Korean Peninsula's surrounding waters,

and furthermore, can be leveraged for establishing national-level coastal disaster prevention strategies.



목 차

제 1 장 서론	13
1-1절 연구개발의 목적	13
1-2절 연구의 필요성	13
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	18
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	20
3-1절 연구 방법	20
3-2절 연구 내용	21
3-3절 연구 결과	23
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	42
4-1절 연구 개발목표 달성도	42
4-2절 대외기여도	44
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	45
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	47
제 7 장 참고문헌	48

제 1 장 서론

1-1절. 연구개발의 목적

규조는 해빙의 유무와 수온 변화에 매우 민감하게 반응하므로, 해양 퇴적물 속 규조 화석 군집을 분석하여 과거 특정 시기에 빙상이 어느 지점까지 존재했는지, 혹은 언제 급격히 붕괴되었는지를 확인하고 .빙상의 전진과 후퇴 시점을 파악하는데 목적이 있다. 또한, 인류의 관측 기록이 없는 수만 년 전의 해수온, 염분, 해빙의 분포 범위를 복원함으로써, 현재 진행 중인 지구 온난화가 빙상의 안정성에 어떠한 영향을 미칠 것인지 판단할 수 있도록 과거 온난기의 고해양 환경변화를 복원하고자 한다.

과거 43만년 동안 빙기-간빙기의 주기는 10만년이라는 큰 진폭의 주기를 가지고 있으며(Hays et al., 1976), 로스해에서 수행된 국내 규조 연구에서도 10만년을 주기로 변화함이 확인되었다(박영숙 외, 2021). 과거 온난기의 서남극 빙상 후퇴 및 해양 순환 변화 연구이라는 본 과제의 목표에 맞추어서 규조의 연구결과를 이용하여 과거 온난기의 서남극 빙상 규모 변화를 복원하고자 한다.



1-2절. 연구의 필요성

남극 빙상 주변 해양 순환은 기후 변화의 영향으로 변화하고 있다(Pritchard et al., 2009; Depoorter et al., 2013; Alley et al., 2015; Silvano et al., 2018; Rignot et al., 2019; Minowa et al., 2021). 대기-해양-빙상 상호작용 시스템에서 중요한 두 가지 변수는 계절 해빙의 지속 기간과 범위, 그리고 해양의 열염순환이다. 국지적으로, 계절에 따른 변화는 빙붕에 영향을 미쳐 해양 가장자리에서의 용해를 증가시키고(Massom et al., 2018), 궁극적으로 빙상을 불안정하게 만들 수 있습니다(Pritchard et al., 2012). 또한, 계절에 따른 빙붕의 팽창과 수축은 빛의 양을 제한하여 생산성을 감소시키는 등 1차 생산성에 영향을 미치지만, 용빙수는 식물성 플랑크톤의 대량 증식을 촉진하기도 합니다(Knox, 2006). 기후에 영향을 미치는 두 번째 중요한 변수는 해양의 열염순환입니다. 남극 대륙 가장자리에서는 남극 저층수(AABW)의 형성과 환극 심층수(CDW)의 용승에 의해 이러한 순환이 발생합니다. 최근 관측 결과에 따르면 남극 빙상 용해 속도는 심층수(CDW)의 용승 증가와 함께 증가하며(Pritchard et al., 2012; Rignot et al., 2019; Minowa et al., 2021), 이는 남극 심층수(AABW) 생성량 감소를 초래하고(Williams et al., 2016; Silvano et al., 2018), 결과적으로 빙상 용해에 더욱 영향을 미칠 수 있다(Silvano et al., 2018). 특히 과거 기후 변화 시기와 마지막 간빙기인 MIS 5e와 같이 현재보다 따뜻했던

간빙기 동안 남극 인근 해빙 및 해양학적 변화를 이해하는 것은 대기-해양-빙상 상호작용 메커니즘에 대한 더 깊은 통찰력을 제공하고, 미래 변화를 예측하며, 온난화 기후 하에서의 미래 결과를 예측하는 데 도움이 될 수 있다(Masson-Delmotte et al., 2013). 해양 퇴적물에서 얻은 규조류 군집 연구는 계절별 해빙의 범위와 지속 기간, 표층 해양 순환, 생산성을 포함한 과거 해양 환경을 재구성하는 데 사용될 수 있다(Cooke and Hays, 1982; Pichon et al., 1992; Taylor and McMinn, 2001; Crosta et al., 2004; Gersonde et al., 2005; Armand et al., 2005). 간빙기, 특히 홀로세 시기의 남극 대륙붕에서 규조류를 기반으로 한 연구가 많이 진행되었다(McMinn, 2000; Taylor and McMinn, 2001; Leventer et al., 2006; Crosta et al., 2007; Maddison et al., 2012; Peck et al., 2015; Mezgec et al., 2017; Torricella et al., 2021). 그러나 과거 빙하기의 확장된 빙상이나 영구 해빙은 남극 대륙붕에서 규조류 생산성을 저해하고 대륙 사면에서 생산성을 감소시켰다(Pudsey, 1992; Lucchi et al., 2002; Hartman et al., 2021). 또한, 전진하는 빙상은 대륙붕에서 빙하 퇴적물의 대부분을 제거했을 것입니다(Domack, 1982; Escutia et al., 2003). 이는 남극 대륙 근해에서 빙하기 및 마지막 빙하기 동안의 규조류 군집 구성을 자세히 다룬 연구가 매우 적은 이유 중 하나이다(Caburlotto et al., 2010; Holder et al., 2020; Hartman et al., 2021; Li et al., 2021; Chadwick et al., 2022). 따라서, 서남극 지역의 빙 붕 및 빙상의 전진과 후퇴에 따른 고환경 변화 기록을 연구하여 현재 일어나고 있는 지구온난화 및 해수면 상승에 대한 변화를 예측하기 위해서는 규조 데이터를 활용해야 하며, 국제적인 연구 동향(환경지시자개발, 기후변화예측)에 맞추어 나가기 위해서는 서남극지역에서의 규조 연구의 수행이 선행되어야 한다.

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.

1-3절. 연구의 범위

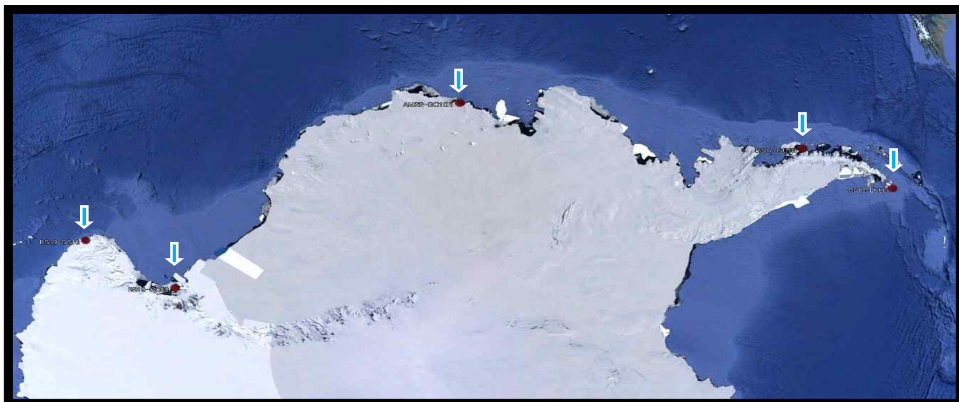
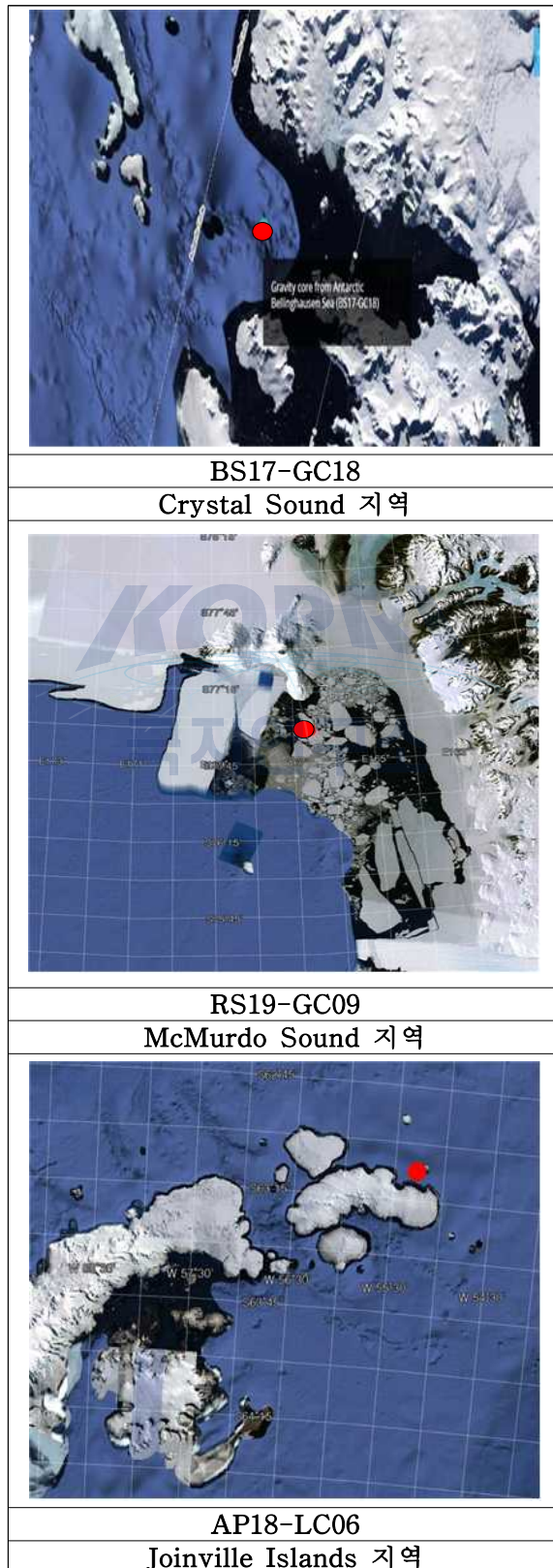
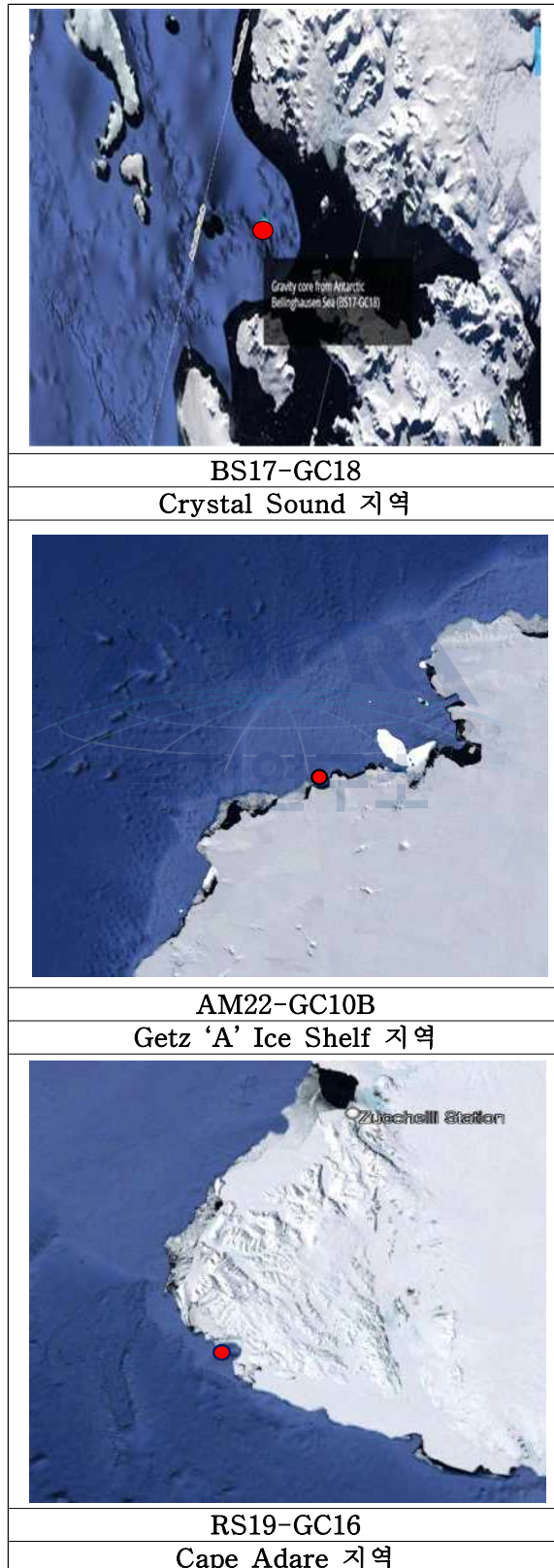


Fig. 1. 연구지역의 범위 및 위치

1단계 3개년동안 수행된 연구 범위는 서남극 지역에 위치한 Crystal Sound 지역 (BS17-GC18) 1차, 로스해 McMurdo Sound 지역(RS19-GC09), Joinville Islands 지역 (AP18-LC06)에 해당된다(Fig. 1).



2단계 3개년동안 수행된 연구 범위는 Crystal Sound 지역(BS17-GC18) 2차, 아문젠 해 Getz 'A' Ice Shelf 지역(AM22-GC10B), 로스해 Cape Adare 지역(RS19-GC16)에 해당된다. 각 연구 코어로부터 구조 분석을 통하여 연구 지역의 고환경 변화를 해석한다(Fig. 1).



제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1절 국·내외 관련분야에 대한 기술개발현황

Scopus 데이터베이스를 이용하여 규조류를 고환경 복원의 주요 지표로 활용한 7,091편의 논문(1979~2023년)을 분석한 결과 (Fontana and Nascimento, 2023), 최근 수십 년 동안 1980 년대에 논문 발표 건수가 급증했고, 2000년 이후에는 더욱 크게 증가하는 변화가 있었다(Fig. 2). 이러한 연구 증가 추세는 고생태학 및 환경과학 분야에서 규조류 연구의 중요성에 대한 관심과 인식이 높아지고 있음을 반영한다. 2011년 이후에는 연구 주제가 역사적, 지질학적 복원에서 생태학적, 인위적, 기후적 상호작용으로 전환되는 양상을 보였으며, Smol J.P., Leng M.J. 과 Birks H.J.B. 등의 주요 연구자들이 국제 공동 연구를 주도해 왔다.

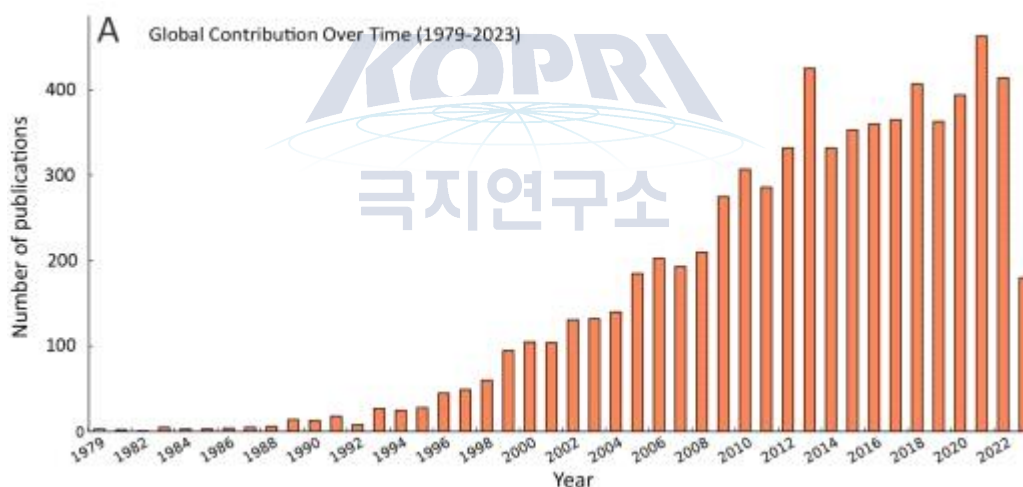


Fig. 2. 전 세계 출판물의 시간적 분포 (1979-2023)

규조류는 전 지구적 수생 생태계에 널리 분포하는 단세포 생물로, 200 μ m 미만의 미세한 크기에도 불구하고 전 세계 1차 생산량의 20% 이상을 점유하며 이산화탄소 저감 및 유기물 합성에 중추적인 역할을 수행한다. 최근에는 규조의 실리카 껍질에 포함된 산소동위원소를 분석과 유기 지화학적 프록시를 적용하여 과거 해수의 온도 및 퇴적물에서의 고환경 변화를 복원화하는 방법이 표준화 되고 있다. 따라서, 규조류는 관련 환경 연구 및 고환경 복원에 폭넓게 응용될 수 있으며, 또한 환경에 대한 민감성과 보존성으로 인해 기후변화 지표종으로 활용될 수 있다. 화석화된 규조류의 실리카 껍질은 과거의 환경 정보를 간직한 유용한 지시자로서, 미래의 해양 산성화 속도나 탄소 흡수원의 변동을 정교하게 예측하는 도구로도 사용될 수 있다.

따라서 규조류의 연구는 환경에 적용함에 있어서 과거 동향과 향후 방향을 파악하는 두 가지 목적을 갖기 때문에 미래 발전과 글로벌 지속 가능성에 기여할 수 있다. 2025년 현재 우리나라를 포함한 주요국들은 규조류를 이용한 미세조류기반의 원천기술 확보를 위해 기후 및 환경 연구 개발 사업에 대규모 투자를 하고 있다.

우리나라에서는 남극 해양퇴적물에서의 규조 연구는 브랜스필드 해협; 이영길 (1996), 박영숙 외 (2001, 2007a, 2009, 2011, 2015), Kim et al. (2025), 드레이크 해협; 박영숙 외(2002, 2003, 2010, 2014), 맥스웰만; 박영숙 외(2004), 사우스 오크니제도; 박영숙 외(2007b) 스코티아해; Bak et al. (2007), Kim et al. (2024), 아문젠해: Bak et al. (2018), Kim et al. (2023), 박영숙 외 (2025b) 로스해: 박영숙 외 (2021, 2025a), 의 연구 등이 있다.

이러한 연구의 결과는 규조류를 이용한 고환경 복원 및 온난화 감시, 기후 지표종 모니터링과 같은 기초적인 연구 및 연구 결과의 활용을 위한 발전 단계로서, 국제적으로 발표되고 있는 논문들의 질적, 양적 수준을 높이기 위해 다년간 연구를 수행하고 있다. 그러나, 지난 수십 여 년 동안 세종기지와 장보고기지를 구축하고 아라온호를 이용한 연구의 결과물들이 계속적으로 축적되고 있는 상황이지만 국제적인 수준으로 발돋움하기 위해서는 전문 인력의 집중적인 양성 과 규조 연구를 통해 얻은 국지적인 지점 데이터와 수치 기후모델을 결합하여 전 지구적 기후 시스템을 이해하기 위한 기술적인 노력이 필요하다. 남극 빙상은 현재 빠르게 변화하고 있으며 서남극 및 동남극 일부의 해양분지에서 나타나는 빙상의 질량 손실이 해수면의 상승 속도에 영향을 미칠 위험에 대한 연구와 대비책 마련을 위해서는 향후 빙상이 손실되고 있는 해양구역과 고기후 기록에 대한 연구 결과를 확보하여 국내 기술개발의 여러 분야에서 활용되어야 한다.

2-2절 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

규조류의 산소동위원소 및 지화학 프록시를 활용한 환경 복원은 현재 NOAA(미국 해양대기청)나 PAGES(과거 글로벌 변화 연구) 등 국제 연구 기구에서 표준으로 채택하는 기술이다. 본 연구의 결과는 규조류를 사용하여 고환경 변화를 알아내거나 복원하는 연구하는 전세계적인 연구 경향에 발 맞추어 나아가기 위한 기초 단계로서, 단순히 과거를 보는 데 그치지 않고 홀로세 이전의 장기 주기를 복원함으로써 서구권 중심의 고기후 데이터베이스에 아시아 및 남극 지역의 세밀한 공백을 메우는 전략적 위치를 차지하고자 한다. 국제적으로 발표되고 있는 논문들의 질적, 양적 수준을 따라가기 위해서는 보다 많은 연구 인력과 연구기간을 통한 연구업적의 배출이 필요하다. 지난 수십 여 년 동안 세종기지와 장보고기지를 구축하고 아라온호를 이용한 연구의 결과물들이 계속적으로 축적되고 있는 상황이지만 국제적인 수준으로 발돋움하기 위한 노력이 필요하다. 생물학적 종조성 분석과 화학적 동위원소 분석을 결합한 다중 프록

시(Multi-proxy) 접근법은 국내 해양 환경 공학 및 기후학 분야에서 선도적인 위치를 점하고 있다. 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.

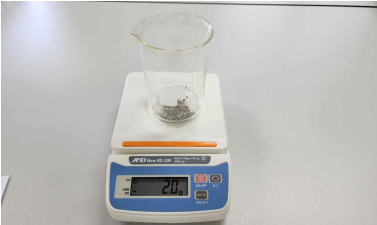


제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1절 연구 방법

1. 규조 추출 실험

연구 지역에서 채취된 코어 퇴적물 BS17-GC18, RS19-GC09, AP18-LC06, AM22-GC10B와 RS19-GC16으로부터 규조를 추출하기 위한 실험은 Bak and Lee (2017), 정량분석을 위한 실험은 Scharer(1994)의 방법을 사용하였다.

	
건조 시료 2 g을 비이커에 담는다.	묽은 염산 (10%) 20 ml와 과산화수소수 20 ml를 첨가한 후 hot plate위에서 3시간 이상 가열한다.
	
화학약품과 부유성 물질들을 제거하기 위해서 윗물을 따라내고 세척과정을 여러번 반복하여 산이나 부유성 물질들을 모두 제거한다.	잔유물 중 부표본을 취하여 장치된 settling container에 넣고 저온의 건조기(약 50℃) 안에서 건조시킨다.
	
건조된 슬라이드에 접착제를 이용하여 커버글라스로 고정시킨다.	완성된 규조 관찰용 슬라이드

2. 현미경 관찰

규조류의 동정은 주로 Zeiss 광학현미경을 이용하여 400 ~ 1000 배로 각 슬라이드당 300개체 이상의 규조 중 동정을 수행하였으며, 규조각의 산정 시 중심 규조목은 중심부를 포함한 규조각의 2/3 이상이 보존되어 있을 경우 1개체로, 우상 규조목은 규조각이 1/2이상 남아서 감정이 가능하고 정측부가 나타나면 1개체로 산정하였다. 단 개체수가 매우 적은 슬라이드에서는 viewfield를 300개를 확인 하였으며, *Chaetoceros resting spores*가 다량 산출 되는 시료는 총 개체수에서 제외하고 계산하였다.

규조의 절대개체수 산정은 Scherer(1994)의 공식을 사용하였으며, 계산식은 다음과 같다.

Abundance = $((A \times B) / (C \times D)) / E$ (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 spore*와 같은 환경 지시종에 의해서 시추코어 퇴적물의 퇴적당시 고환경을 해석하였다.

3-2절 연구 내용

남극 빙상은 지구에서 가장 큰 대륙 빙하로 전세계 해수면을 약 58m 상승 시킬 수 있는 담수량을 보유하고 있다 (Morlighem et al., 2020). 따라서 작은 부피 변화 조차도 전세계 해수면과 기후에 상당한 영향을 미친다(Noble et al., 2020). 최근 해양관측 및 고해상도 시뮬레이션에 의하면, 외해에서 유입되는 따뜻한 남극 심층수(CDW)가 주로 서남극에서 빙봉 아래의 융해를 증가 시키고 있으며, 동남극 일부지역에서도 영향을 미치고 있다(Jacobs et al., 1996; Hirana et al., 2020; Pritchard et al., 2012). 남극 표면 대기 온도가 1950년대 이후 10년에 0.1℃씩 증가 했으며, 앞으로 더 온난화가 지속될 것으로 생각된다. 그러므로 동남극과 서남극의

빙상 안정성은 미래 기후 변화 예측을 위한 중요한 정보가 된다. 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.

로스 빙붕 (Ross Ice Shelf)와 서남극 빙상 (West Antarctic Ice Sheet)의 안정성과 된 연구가 계속적으로 수행되고 있으며, 폴리나, marginal ice zones, 연안 및 근해 지역과 같은 다양한 해양 하위 시스템을 포함(Bolinesi et al., 2020; Saggiomo et al., 1998) 하기 때문에, 로스해 지역은 고생물학적 및 고생태학적 특징을 파악하여 기후 변화의 잠재적 영향을 조사하기에 적합하다. 아문젠해는 남극 주변을 돌고 있는 순환심층수가 유입되어 빙붕이 빠르게 녹아내리고 있는지역으로 빙붕의 융빙에 의해 봄철과 여름철에 식물 플랑크톤의 번성이 활발하기 때문에 규조 군집변화를 이용한 퇴적기록을 이용하기에 좋은 지역이다. Hillenbrand et al. (2010)은 내대륙붕(inner shelf)에 12,000-12,700 cal yr BP이전에는 얼음이 없었다고 제시하였다.

지난 80만년동안 지구의 기후의 빙기와 간빙기를 여러 차례 겪었으며, 과거의 간빙기 중 일부는 현재 보다 따뜻했다. 최신 모델링과 규조 증거를 통합한 결과, 해수 온도가 현재보다 0.25°C만 상승해도 서남극 빙상의 붕괴가 시작될 수 있다는 경고가 나오고 있다. 규조 화석 기록은 과거 약 12만 년 전(마지막 간빙기)에도 현재와 유사한 온도 조건에서 빙상이 붕괴했음을 보여주며, 이는 미래 해수면 상승 예측의 핵심 근거가 된다(Chandler et al., 2025).

따라서, 본 연구는 서남극지역(Crystal Sound, McMurdo Sound, Joinville Islands, Getz 'A' Ice Shelf와 Cape Adare 지역)의 로스해와 아문젠해 지역을 포함한 코어퇴적물을 대상으로 규조를 추출하고 규조 종동정 및 1차생산성을 파악하고 군집 분석을 통하여 과거 온난기의 해빙의 전진과 후퇴시기 등을 연구하였다.

3-3 절 연구 결과

1. BS17-GC18 규조 군집대 및 고환경 해석(1차+2차)

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 39개의 시료를 채취하였다. 규조를 분석한 결과 총 26속 31종이 감정되었으며, 규조 절대 개체수 농도의 범위는 $0.01 \sim 9.25 \times 10^7/\text{g}$ 의 범위를 차지하였다(Fig. 3). 산출된 규조 종 중에서 *Thalassiosira antarctica*가 26.8%로 가장 풍부하게 산출되었으며 수반되는 종으로 *Fragilariopsis kerguelensis* 15.7%, *Fragilariopsis curta* 9.3%, *Eucampia antarctica* var. *recta* 8.8%, *Odontella weissflogii* 3.2%가 상대적으로 다량 산출되었다(Fig. 4).

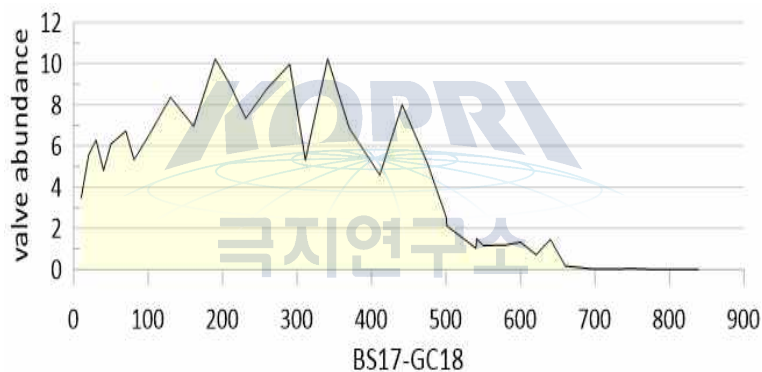


Fig. 3. BS17-GC18에서 산출된 규조 개체수 농도

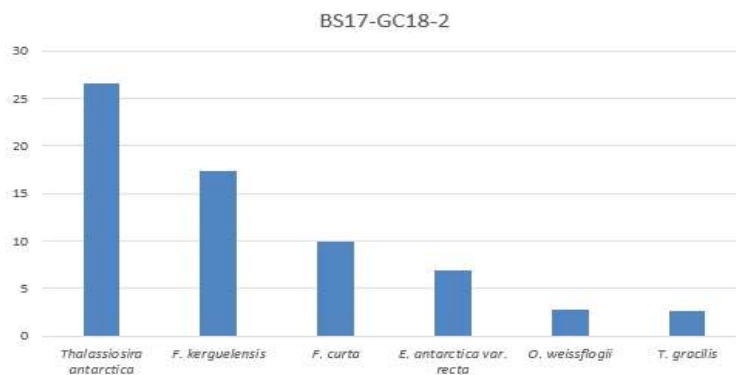


Fig. 4. BS17-GC18에서 산출된 우세종의 비율

선택 규조종의 수직분포를 토대로 3개의 규조 생층서대를 설정하였다 (Fig. 5)

규조 군집대 I: 660~839 cm

개체수 농도가 매우 낮고 *Chaetoceros* RS의 산출이 거의 없으며, 해빙종(*F. spp.*)의 산출이 공해종인 *F. kerguelensis*보다 높게 나타나는 것으로 보아 Ice의 영향을 많이 받은 glacial시기에 해당된다(Fig. 6).

규조 군집대 II: 311~660 cm

공해종인 *T. antarctica*의 산출이 풍부해지며, 이와 더불어 ice-edge종인 *E. antarctica*와 해빙종인 *F. curta*, *F. lineata*, *F. ritscheri*의 산출도 풍부하다. 그러나 상부에서는 *E. antarctica* var. *antarctica*의 산출, 개체수 농도와 *Chaetoceros* RS의 산출이 점점 증가하는 경향을 보인다. 따라서, 이시기는 계절적인 해빙의 영향을 많이 받는 deglacial시기로 생각된다(Fig. 6).

규조 군집대 III: 10~311 cm

*F. kerguelensis*가 증가하고 *F. curta*, *F. lineata*, *F. ritscheri* (*F. spp.*)의 산출이 감소하며, *Chaetoceros* RS의 산출도 감소한다. 그러나 개체수 농도의 산출은 계속적으로 증가하는 경향을 보인다. 그러므로, 군집대 III는 해빙의 영향을 적게 받는 open marine환경 이었다(Fig. 6).

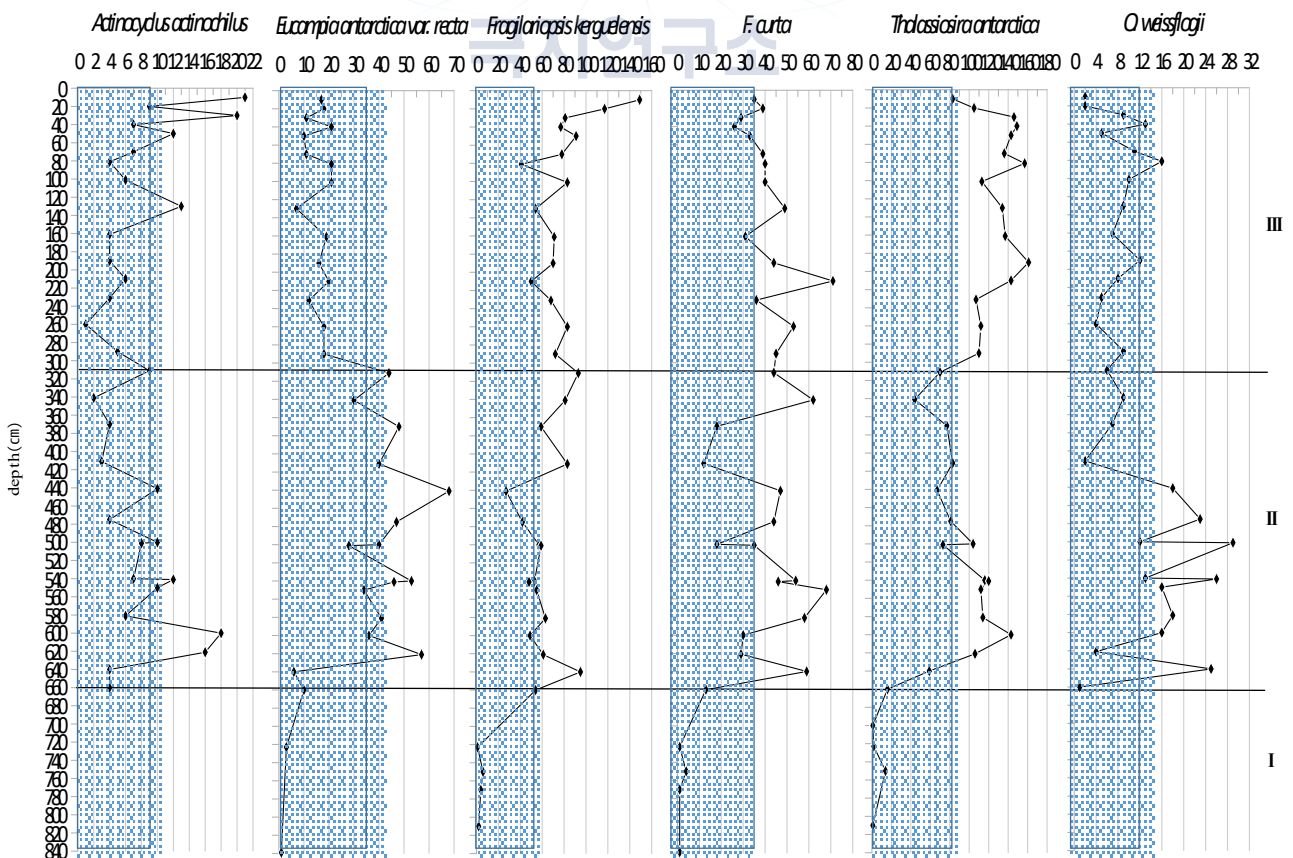


Fig. 5. BS17-GC18 에서 산출된 규조 군집에 의한 생층서대

2. RS19-GC09 규조 군집대 및 고환경 해석

McMurdo Sound 인근에서 채취한 RS19-GC09 코어 퇴적물로부터 규조 연구를 위해 10cm 간격으로 총 34개의 시료를 분석한 결과 총 27속 57종이 감정되었다(Fig. 7).

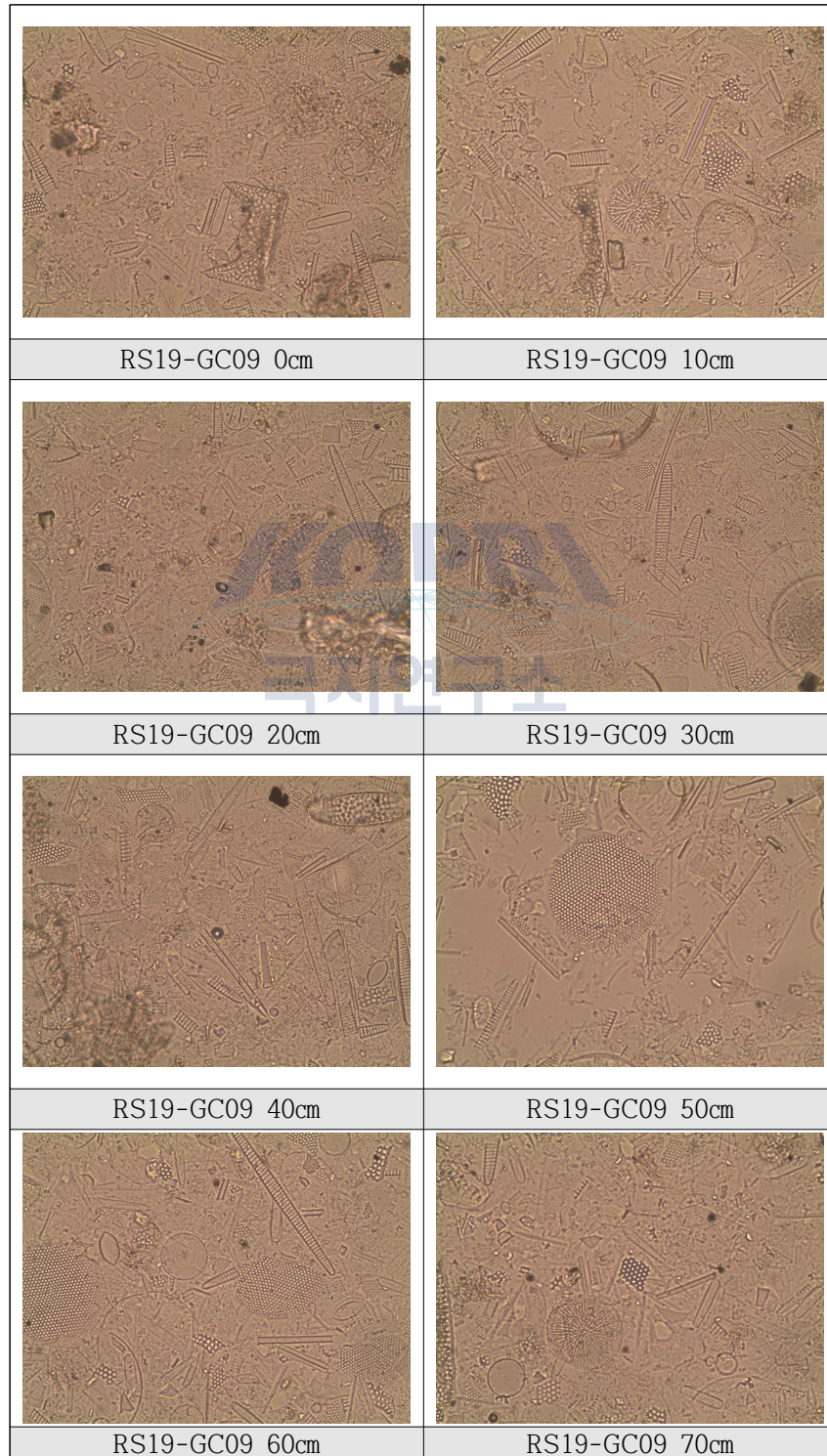


Fig. 7. RS19-GC09 코어에서 규조가 가장 풍부하게 산출된 구간의 층준별(0-70 cm) 사진

정량분석의 결과 절대 개체수 농도가 $0.01 \sim 28.75 \times 10^7/\text{g}$ 범위로 나타났으며(Fig. 8), *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. 9). 연구지역에서 재이동 규조라 할 수 있는 *Stephanopxis turris*는 180-200 cm, *Paralia sulcata*는 190 cm 이하 층에서 산출된다.

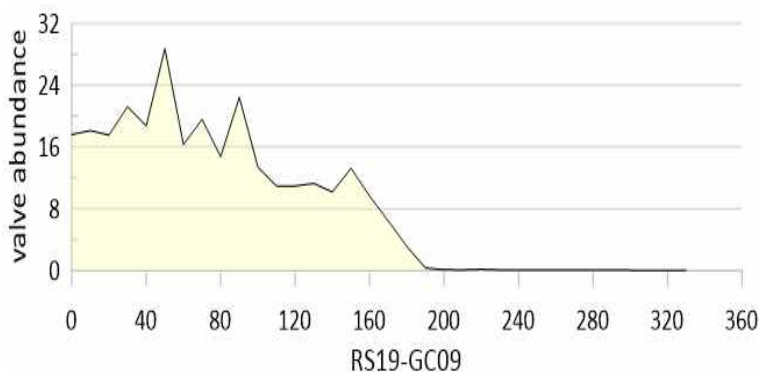


Fig. 8. RS19-GC09에서 산출된 규조 개체수 농도

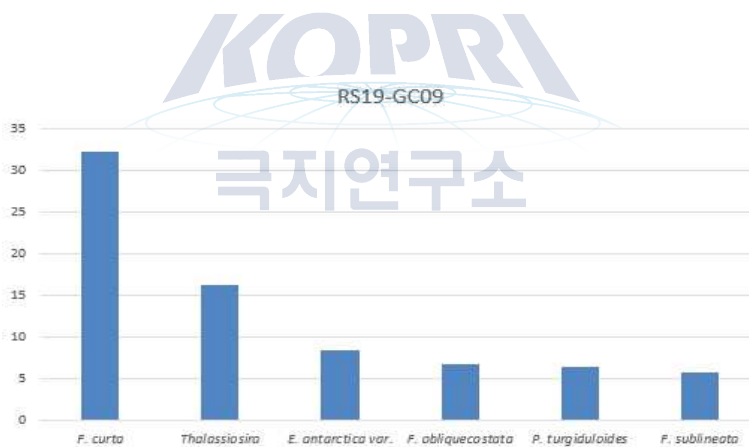


Fig. 9. RS19-GC09에서 산출된 우세종의 비율

산출된 규조의 군집 분포 양상에 따라 4개의 군집대를 설정하였다(Fig. 10).

규조 군집대 I: 190-330cm

규조 개체수 농도가 매우 낮은 구간으로 $0.01 \sim 0.32 \times 10^7/\text{g}$ 에 해당된다. *E. antarctica* var. *recta*가 상대적으로 많이 나타나지만 전체적인 산출량이 매우 적다. *A. actinochilus*의 산출이 시작이 되며, *F. curta*, *F. obliquecostata*와 *F. sublinearis*도 나타난다.

규조 군집대 II: 130-190cm

규조 개체수 농도는 $3.11 \sim 13.25 \times 10^7/\text{g}$ 에 해당되며, 군집대 I에서 보다 증가한다. *F. curta*, *F. obliquecostata*, *F. sublinearis*와 *F. turgiduloides*의 산출이 증가하고, *T. antarctica* cold type의 산출도 증가한다. 이와 더불어, *Chaetoceros* RS의 산출도 증가한다.

규조 군집대 III: 70-130cm

규조 개체수 농도는 $10.94 \sim 22.43 \times 10^7/\text{g}$ 에 해당되며, 군집대 II에서 보다 증가하는 경향을 보인다. *F. curta*, *F. obliquecostata*, *F. sublinearis*와 *F. turgiduloides*의 산출이 약간 감소하며, *T. antarctica* (cold type)의 산출은 군집대 II에서 보다 급증한다.

규조 군집대 IV: 0-70cm

규조 개체수 농도는 $16.32 \sim 28.75 \times 10^7/\text{g}$ 로 전기간에 걸쳐 가장 높은 구간이다 *F. kerguelensis*의 산출이 가장 높게 나타나며, *F. curta*의 산출이 다시 증가하고 *A. actinochilus*와 *E. antarctica* var. *recta*의 산출도 증가한다. 군집대 III에서 풍부하게 나타났던 *T. antarctica* (cold type)의 산출은 감소한다.

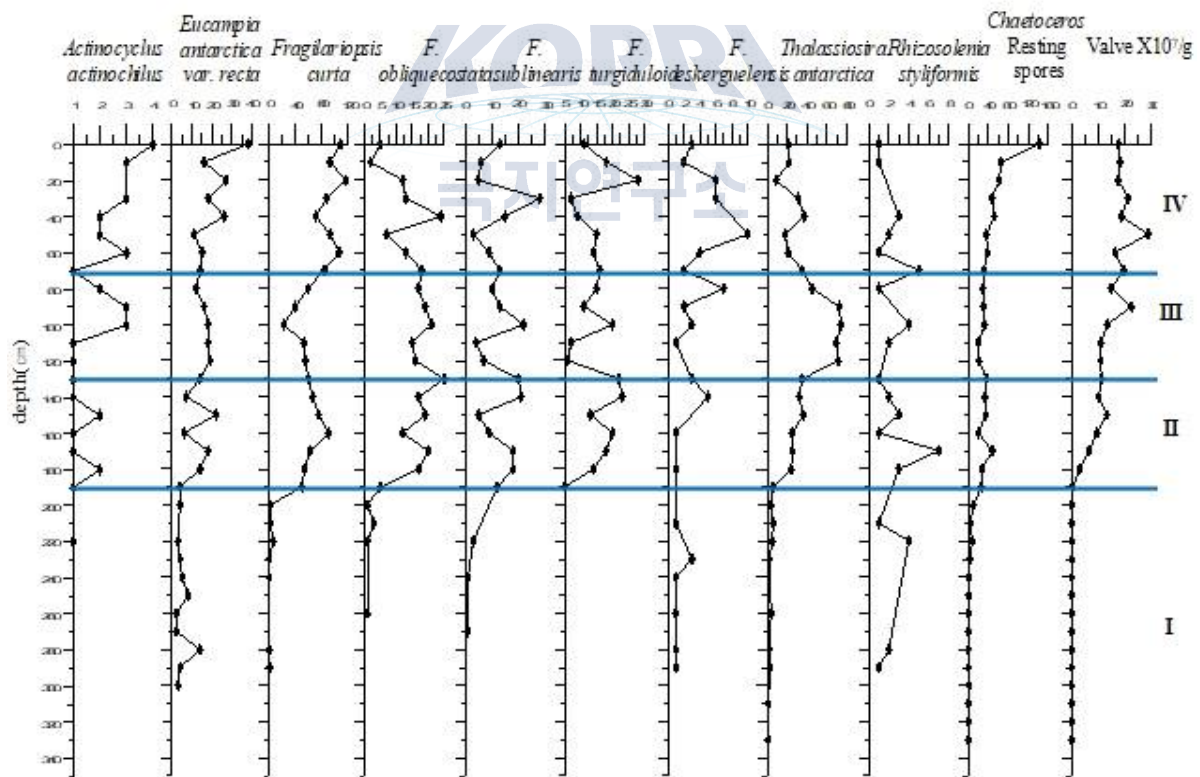


Fig. 10. RS19-GC09에서 산출된 규조 군집에 의한 생층서대

RS19-GC09코어 퇴적물의 퇴적상은 317-330 cm 구간에서는 olive gray mud, 251-317 cm에서는 muddy diamicton, 208-251 cm에서는 다시 olive gray mud, 204-208 cm에서 gravelly sand, 197-204 cm에서는 bioturbated mud, 180-197 cm에서 bluish gray mud, 180 cm 이상의 층준에

서는 bioturbated diatom mud로 구성되어 있다. RS19-GC09에서 산출되는 시대 지시종으로는 *Proboscia barboi* (LAD: 1.6–1.73 Ma), *Thalassiosira vulnifica* (LAD: 2.15–2.19 Ma), *Thalassiosira inura* (LAD: 2.53–2.55 Ma)와 *Denticulopsis lauta* (LAD: 12.46–13.73 Ma)등이 산출되었으며(Cody et al., 2008), 이들의 산출은 190 cm이하의 층준에서 나타났다. 앞에서 언급된 바와 같이, 190 cm 이하의 층준은 muddy diamicton과 gravelly sand층준을 포함하여 전반적으로 gray mud로 구성되어 있고 이러한 퇴적물에서의 규조 산출은 미약하다.

군집대 I (330–190 cm)에서 시대 지시종의 대부분이 산출 되고 있으며, 이들의 시기가 Miocene에서 Pleistocene에 해당되는 것으로 연구지역의 퇴적 시기를 반영하는 것으로 볼 수 없다. 왜냐하면, 이시기는 규조의 산출이 매우 적고, 대자율(MS)값이 높게 나타나는 것으로 보아 일차 생산성이 낮으면서, 후퇴하는 grounded ice로부터 육원성 퇴적물들이 공급된 것으로 보이며 생물학적 파편들도 희석된 것으로 생각된다. 또한, 연안 및 내대륙붕에서 과거에 퇴적된 것이 ice-rafted debris에 의해 유입되는 (Melis et al., 2021) *Paralia sulcata*의 산출이 풍부하게 나타난다. Marian Cove지역에서는 glacier의 후퇴를 지시하는 것으로 알려져 있으며 (Ha et al., 2019), 각이 단단하여 빙하 운반에서도 보존이 용이하기 때문에 Ross Sea에서는 제3기지층으로부터 재이동 되었음을 지시해준다(Sjunneskog and Scherer, 2005). 따라서, 시대 지시종들은 재이동 되었음이 확실하며, 이와 더불어 이시기에 공해중(TW)과 해빙중(TC)의 산출, 총유기탄소(TOC)및 규조 개체수 농도가 매우 낮기 때문에 군집대 I이 퇴적될 당시 연구지역이 grounded ice sheet와 근접해 두꺼운 얼음으로 덮혀 있었던 환경이었음을 나타낸다(Fig. 11).

군집대 II (190–130 cm)에서는 대자율(MS) 값이 서서히 감소하고, 총유기탄소값(TOC)이 증가하기 시작한다. 규조의 공해중(TW)과 해빙중(TC)의 산출및 규조 개체수 농도가 증가하는 경향을 보이며, 이러한 데이터는 군집대 I에서 나타났던 빙하 환경에서 Ice melt가 수반된 계절적인 해빙 환경으로 변화 하였음을 나타낸다. 또한, 이시기에 산출되기 시작하는 *P. inermis*는 따뜻하고 빈영양수의 유입 (Stickley et al. 2005)과 계절적인 해빙대 (Maddison et al. 2006)와 관계된 종이다. 따라서, 이시기는 따뜻한 해수가 유입이 되는 계절적인 해빙환경으로 나타난다 (Fig. 11).

Terra Nova Bay지역에서는 7–12.1 ka 사이에 deglaciation이 일어났다고 제안되었으며 (Baroni and Orombelli, 1991; 1994), 빙상이 6–7 ka에 현재의 위치로 후퇴했다고 보고 되었다 (Thomas and Bentley, 1978; Denton et al., 1989; Licht et al., 1996).

Amundsen과 Wilkes Land지역에 분포하는 grounding line은 홀로세가 시작될 무렵부터 자리 잡았지만 (Hillenbrand et al., 2013; Mackintosh et al., 2014), Ross Sea에서는 빙하의 후퇴가 계속되는 것으로 보이며 8.6 cal. Kyr B.P.전에 Ross Island 근처에서 처음으로 open marine의 증거가 나타났다 (Mckay et al., 2015)고 보고되어 있다. 따라서, 군집대 II의 시작 시기는 Mckay 등(2015)에 의한 연구결과와 대비해 볼 수 있다. 그러나, 정확한 퇴적시기를 알기 위해

서는 연대측정을 위한 연구가 수행되어야 한다.

군집대 III (130-70 cm)에서는 대자울값(MS)가 군집대 II에서 보다 아주 약간 감소하는 경향을 보이며, 총 유기탄소값(TOC)은 좀더 증가하는 경향을 보인다. 해빙종(TC)의 산출이 군집대 II에서 보다 감소하는 반면 공해종(TW)의 산출은 증가한다. 규조 개체수의 농도도 군집대 II에서보다 증가하는 경향을 나타낸다. 즉, 해빙과 관련된 *F. curta*가 감소하다가 증가하는 경향을 보이고, *F. turgiduloides*의 산출이 감소 하면서 cold water 종인 *T. antarctica*의 cold type의 산출이 증가한다. 따라서, 군집대 II에서 계절적인 해빙환경으로 변화 한 후, 좀 더 온난한 환경으로서 해빙(Sea-ice)으로 덮힌 환경보다 공해(open water)환경의 지속 기간이 더 긴 것으로 나타난다(Fig. 11).

군집대 IV (70-0 cm)에서는 대자울(MS)값이 상부로 갈수록 약간 증가하는 경향을 보이고 총 유기탄소(TOC)값은 군집대 III와 비슷하지만 대자울 값과 마찬가지로 상부에서 미약한 증가를 보인다. 해빙종의 산출은 군집대 III에서 보다 증가하여 군집대 II와 비슷하게 나타나며, 이와 반대로 공해종의 경우는 군집대 III에서 보다 감소하여 군집대 II와 비슷하게 나타나나 상부에서는 약간 감소한다. 규조의 절대 개체수는 상대적으로 가장 높은 구간이다. 따라서, 이시기는 군집대 III시기보다는 더 1)추운 환경이었음을 나타낸다(Fig. 11).



1) RS19-GC09의 연구 결과는 한국지구과학회지 46(2)호에 발표됨.

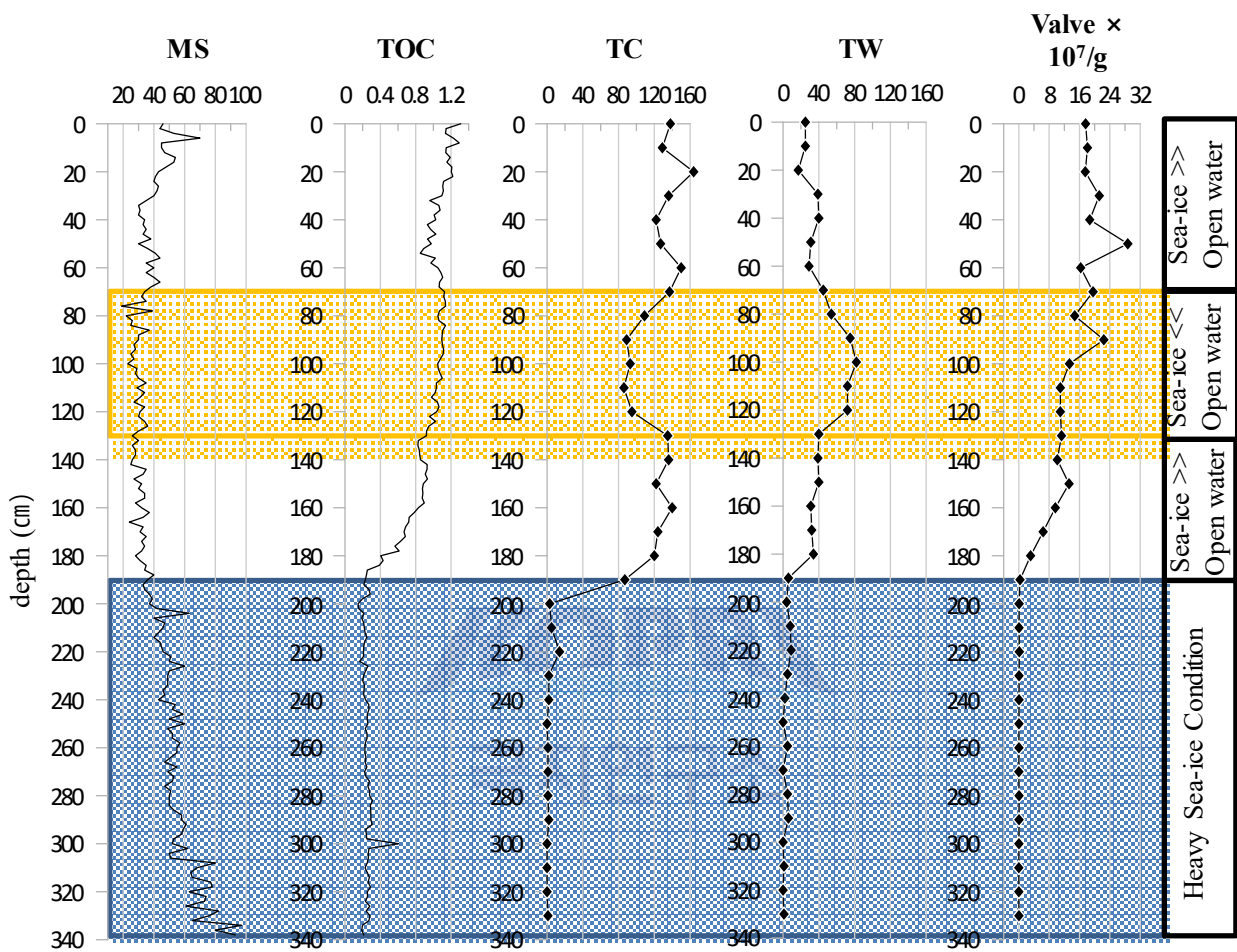


Fig. 11. RS19-GC09에서 산출된 해빙종과 공해종, 대자율값, 유기탄소의 양, 개체수농도비교에 의한 고환경

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 $1.2 \sim 5.9 \times 10^7/\text{g}$ 의 범위로 산출이 되었다(Fig. 12).

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. 13).

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).

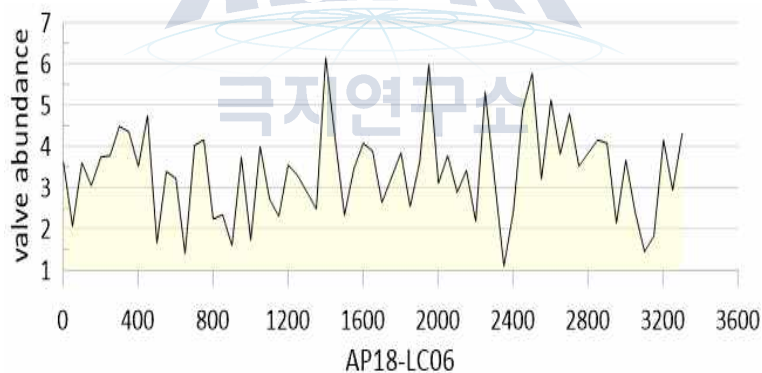


Fig. 12. AP18-LC06에서 산출된 규조 개체수 농도

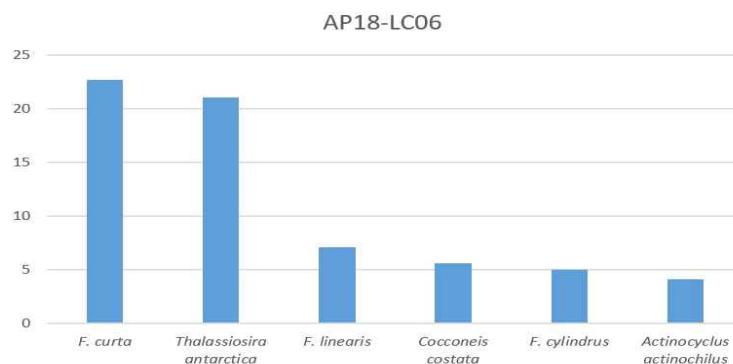


Fig. 13. AP18-LC06에서 산출된 우세종의 비율

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. 규조 군집대 I (1050–3301 cm)에서는 우점종들이 풍부하게 나타나며 규조 개체수 농도에도 큰 변화가 없다. 규조 군집대 II (0–1050 cm)에서도 군집대 I에서와 마찬가지로 우점종들이 산출이 꾸준히 나타나고, 공해종인 *F. kerguelensis*가 산출되기 시작한다. 이는 *Chaetoceros* RS가 줄어들기 시작하는 시기로 용빙 수 유입시기가 끝나고 안정적인 공해환경이 되었음을 의미한다(Fig. 14, 15).

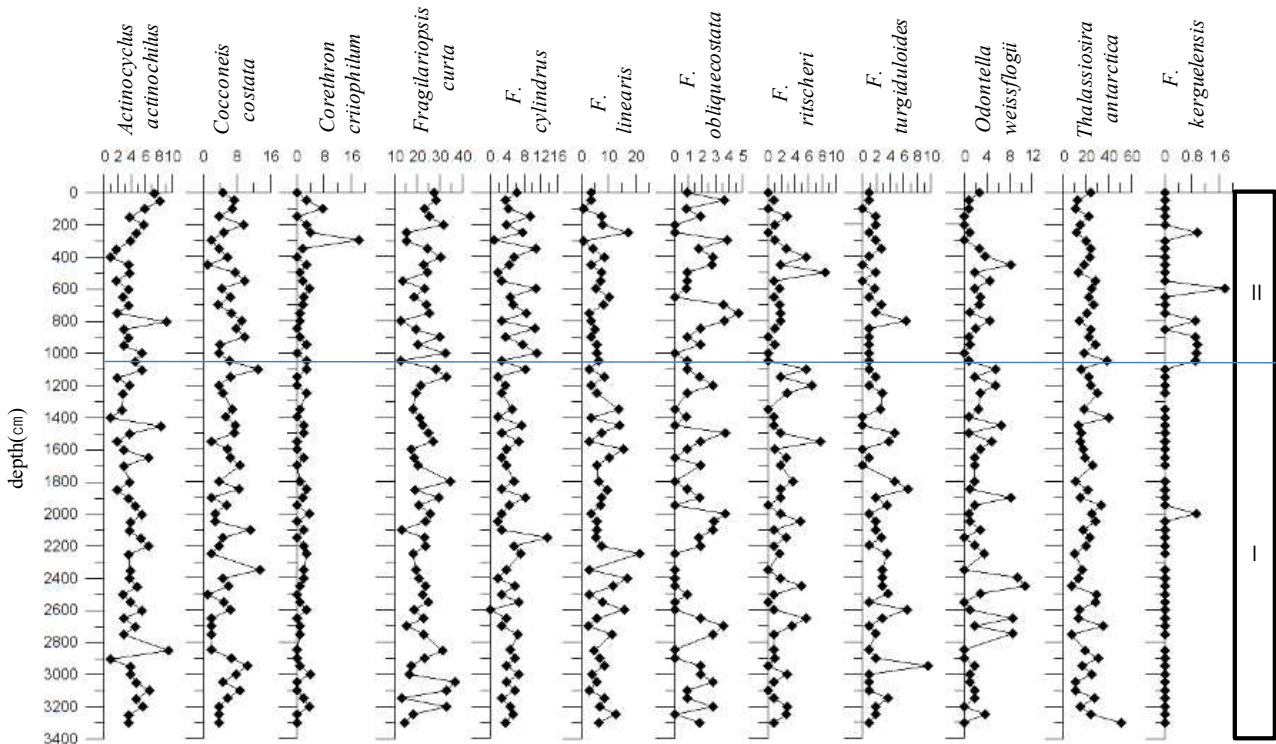


Fig. 14. AP18-LC06에서 산출된 규조 군집에 의한 생층서대

산출된 *Chaetoceros* resting spores와 절대 개체수 농도의 산출 분포를 비교해 보면 두 그래프 모두에서 1200cm 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 1050 cm층준의 하부가 상부보다 온난하였음을 알 수 있다(Fig. 14, 15).

연구 코어는 약 4000년 이후에 퇴적되었으며 공해종과 해빙종의 산출이 계속적으로 나타나기 때문에 꾸준한 seasonal open water의 시기가 있었으며, 601 cm, 800 cm, 900-1050 cm, 1801 cm, 2001 cm구간에서는 *F. kerguelensis*의 산출이 나타나는 것으로 보아 따뜻한 해수가 유입되었음을 알 수 있다(Fig. 14, 15).

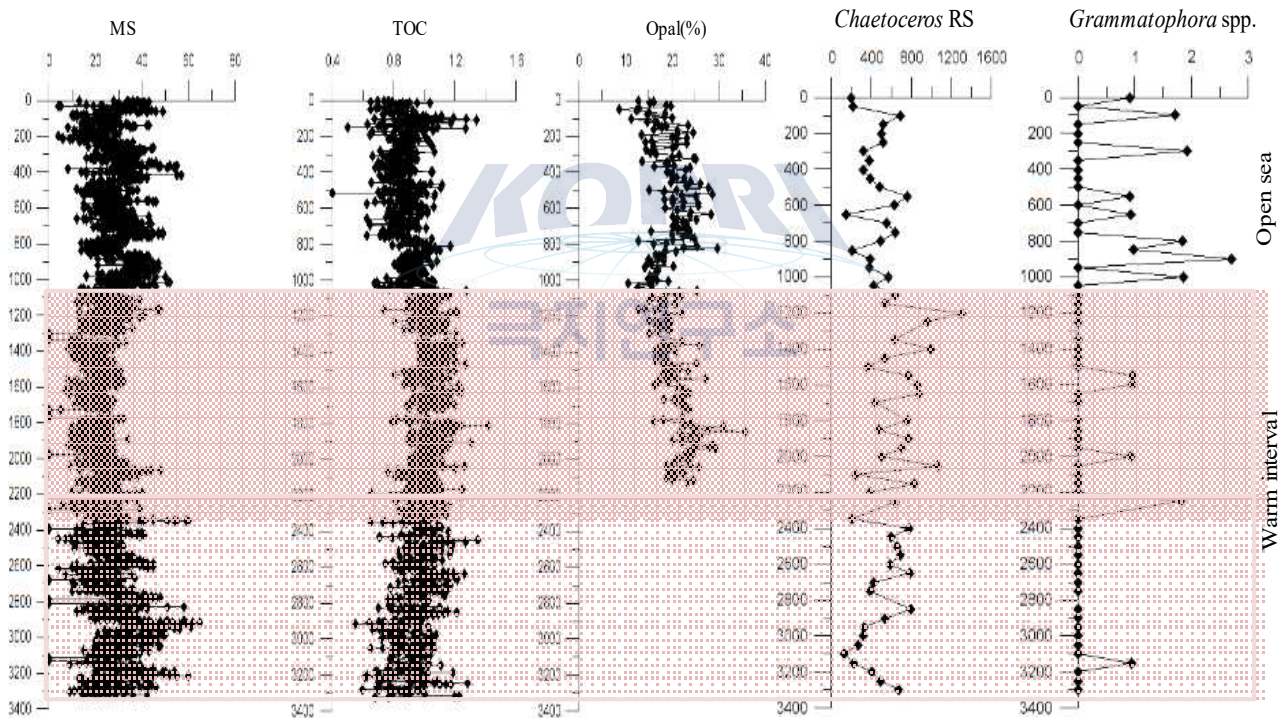


Fig. 15. AP18-LC06 코어로부터 선택된 지시종들의 수직산출 분포와 규조 군집대 및 고환경

4. AM22-GC10B 규조 및 고환경 해석

AM22-GC10B의 각 층으로부터 총 31개의 시료를 분석한 결과 총 22속 50종의 규조가 동정되었으며, 정량 분석의 결과로 규조 개체수 농도가 $0.5 \sim 8.3 \times 10^7/\text{g}$ 범위로 나타났다(Fig. 16). 산출된 규조 군집에서 가장 다량으로 산출된 종은 *Fragilariopsis curta* (34.2 %)이며, *Eucampia antarctica* var. *recta* (18.4 %), *Shionodiscus gracilis* (4.5 %), *Fragilariopsis ritscheri* (4.4 %), *Fragilariopsis vanheurckii* (4 %)순으로 산출되었고 나머지 종들의 산출률은 매우 적고 보존 상태가 불량하였다(Fig. 17).

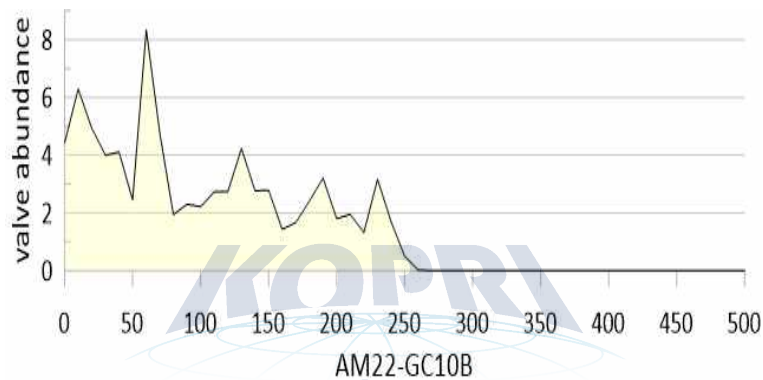


Fig. 16. AM22-GC10B에서 산출된 규조 개체수 농도

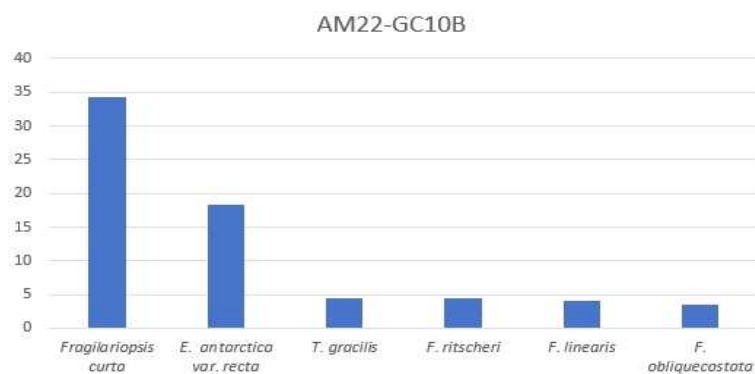


Fig. 17. AM22-GC10B에서 산출된 우세종의 비율

연구 코어 AM22-GC10B로부터 산출된 주요 종들의 산출 분포를 근거로 3개의 군집대를 설정하였다(Fig. 18).

규조군집대 I: 260~500 cm

규조 군집대 I은 산출이 거의 없는 구간으로서 규조의 생존 및 보존이 어려운 기저빙하의 영향이 우세한 환경조건을 지시한다.

규조군집대 II: 160~260 cm

이 구간에서는 해빙종인 *F. curta*, *F. vanheurckii*, *Fragilariopsis obliquecostata*, *F. ritscheri*, *Fragilariopsis turgiduloides* 및 *Stellarima microtrias*의 산출이 상대적으로 풍부하게 나타난다. 또한, 공해종으로서 *Fragilariopsis kerguelensis*, *Odontella weissflogii*의 산출도 상대적으로 높게 나타나는 구간이다(Fig. 18). 해빙종이 공해종보다 풍부하게 나타나는 혼합 규조 조성을 보여준다.

규조군집대 III: 0~160 cm

규조 군집대 II에서 풍부하게 나타났던 해빙종인 *F. vanheurckii*의 산출이 점진적으로 줄어들며, *F. obliquecostata*, *F. ritscheri*의 산출도 감소하는 경향을 보인다(Fig. 18). 이와 대조적으로 해빙의 가장자리에서 번성하는 것으로 알려진 *E. antarctica* var. *recta*와 함께 공해종인 *Thalassiosira antarctica*와 *Shionodiscus gracilis*의 산출이 규조 군집대 II에 비하여 상대적으로 증가하는 양상을 보인다(Fig. 18).

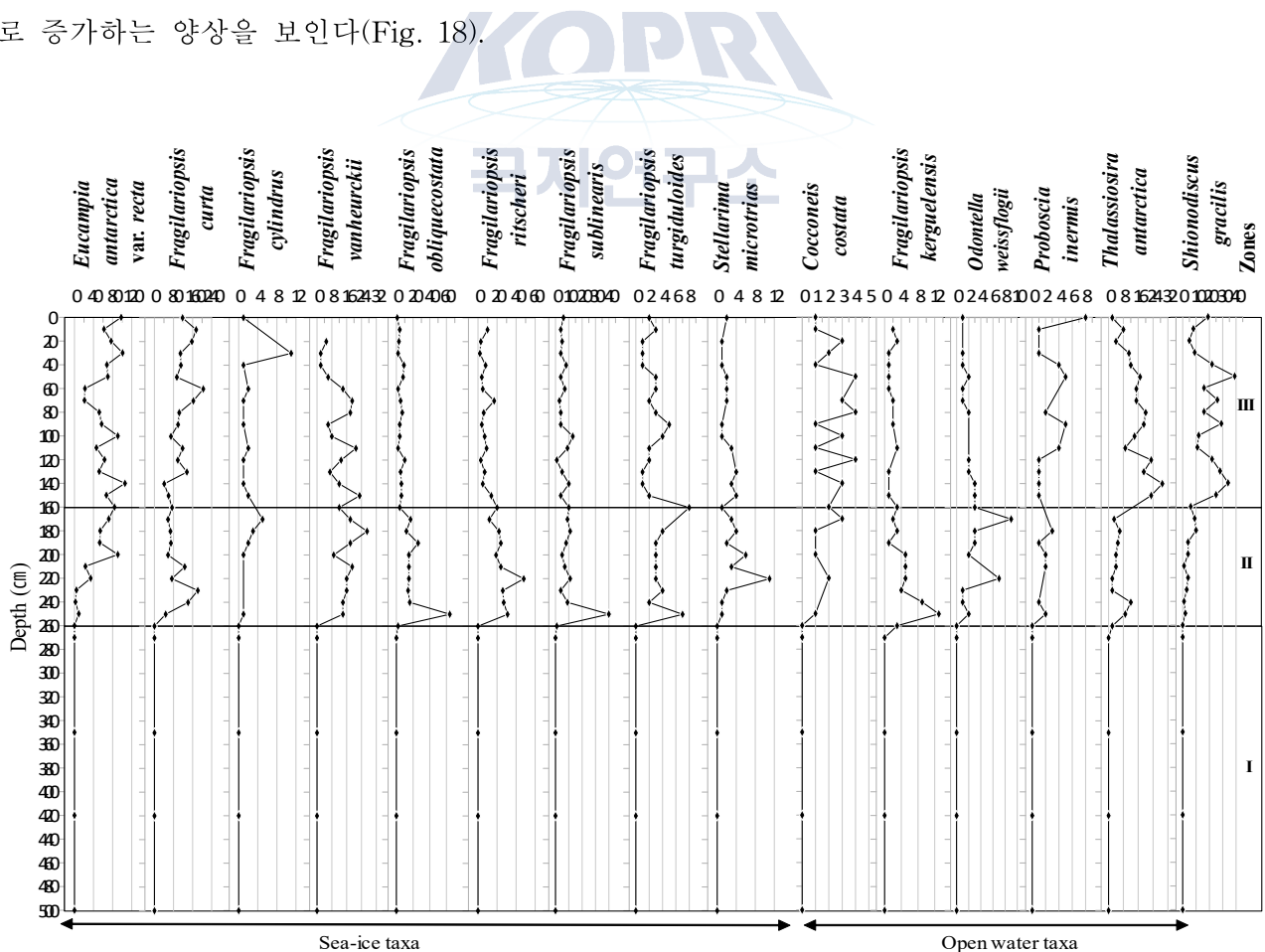


Fig. 18. AM22-GC10B에서 산출된 규조 군집에 의한 생층서대

AM22-GC10B코어 퇴적물에서는 시대 지시종 및 채이동 규조각의 산출이 거의 나타나지 않는다. 군집대 I에서는 규조의 산출이 거의 없고, 대자울 값이 높게 나타나는 것으로 보아 규조의 일차 생산성이 매우 낮은 환경으로 생각된다(Fig. 4). Smith *et al.* (2011)은 본 연구코어와 인접한 곳에서 획득한 VC415에서 해저에 접지된 기저 빙상(grounded ice sheet) 환경으로부터 해빙이 없는 환경(open marine)으로 전이되기까지 빙하하부(facies 3; subglacial), 근위 접지선(facies 2; proximal grounding line), 계절적으로 개방된 해양(facies 1; seasonal open marine)에서 퇴적된 세가지 퇴적상을 식별하였다. 따라서, 군집대 I은 규조가 거의 산출되지 않는 것으로 보아 빙상으로 덮여 있었던 빙하하부 환경에서 퇴적된 것으로 해석된다. 군집대 II는 규조의 절대 개체수는 $0.5 \sim 3.2 \times 10^7/\text{g}$ 범위에 해당하고, 대자울 값이 급감하는 구간이다(Fig. 4). 이 구간에서는 해빙종(*F. curta*, *F. vanheurckii*, *F. obliquecostata*, *F. ritscheri*, *F. turgiduloides* 및 *S. microtria*)과, 공해종인 *F. kerguelensis*와 *O. weissflogii*의 산출이 높게 나타난다(Fig. 3). 또한, 휴면포자(*Chaetoceros* RS)의 산출이 증가한다(Fig. 4). 따라서, 군집대 I(260~500 cm)은 규조가 살기 어려운 빙하하부(subglacial) 환경에서 퇴적된 시기에 해당되며, 군집대 II(160~260 cm)는 군집대 I보다 온난한 시기이나 해빙종들의 산출이 우세하게 나타나는 것으로 보아 빙하하부 환경의 영향 아래에서 계절적으로 해빙이 줄어들어 빙해양(glaciomarine) 환경에서 형성된 것으로 해석된다. 군집대 III(0~160 cm)는 해빙종의 산출이 줄어들고 공해종의 산출이 증가하며, 휴면포자의 산출이 풍부한 것으로 보아 계절적으로 개방된 해양(open marine) 환경에서 퇴적되었다.

2)

2) AM22-GC10B의 연구 결과는 지질학회지 61(3)호에 발표됨.

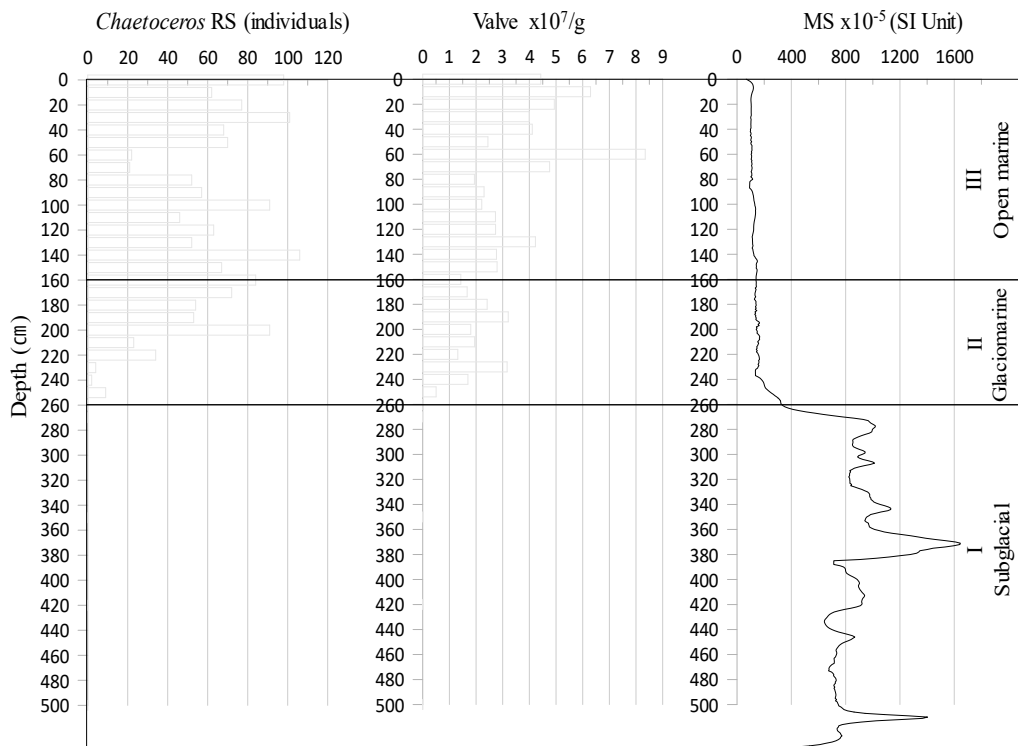


Fig. 19. AM22-GC10B 코어로부터 선택된 지시종들의 수직산출 분포와 고환경

5. RS19-GC16 규조 및 고환경 해석

RS19-GC16의 각 층준으로부터 총 58개의 시료를 분석한 결과 총 25속 62종의 규조가 동정되었으며, 정량 분석의 결과로 규조 개체수 농도가 6~60.9 $\times 10^7/g$ 범위로 나타났다(Fig. 20). 산출된 규조 군집에서 가장 다량으로 산출된 종은 *Fragilariopsis curta* (34.2 %)이며, *Eucampia antarctica* var. *recta* (18.4 %), *Shionodiscus gracilis* (4.5 %), *Fragilariopsis ritscheri* (4.4 %), *Fragilariopsis vanheurckii* (4 %)순으로 산출되었고 나머지 종들의 산출률은 매우 적고 보존 상태가 불량하였다(Fig. 21).

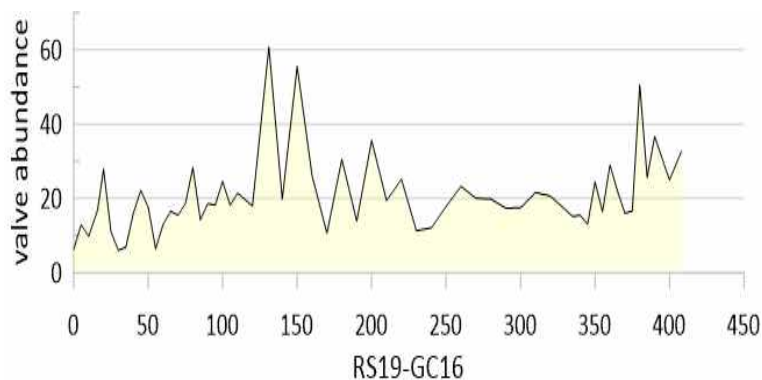


Fig. 20. RS19-GC16에서 산출된 규조 개체수 농도

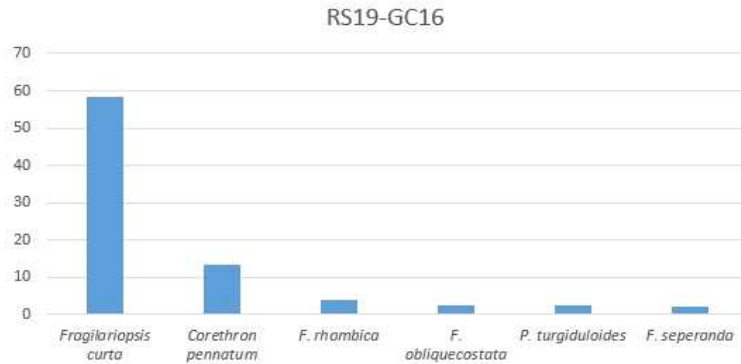


Fig. 21. RS19-GC16에서 산출된 우세종의 비율

연구 코어 RS19-GC16로부터 산출된 주요 종들의 산출 분포를 근거로 4개의 군집대를 설정하였다(Fig. 22).

규조군집대 I: 350~408 cm

Corethron pinnatum, *Fragilariopsis curta*와 *Pseudo-nitzschia turgiduloides*의 산출이 상대적으로 많이 나타나며, 규조 개체수 농도가 $16 \sim 50.6 \times 10^6/g$ 까지 다양한 폭으로 산출되는 구간이다.

규조군집대 II: 180~350 cm

*Corethron pinnatum*의 산출이 하부에서 상부로 갈수록 감소하며, *F. curta*의 산출이 상부로 갈수록 증가한다. *Chaetoceros* RS의 산출이 급증하면서 규조 개체수 농도가 $11.3 \sim 35.7 \times 10^6/g$ 범위에 해당한다.

규조군집대 III: 110~180 cm

*F. curta*의 산출이 증가하는 반면 *Pseudo-nitzschia turgiduloides*의 산출이 감소하는 경향을 보이며, *Chaetoceros* RS의 산출이 급감하면서 규조 개체수 농도는 $18 \sim 60.9 \times 10^6/g$ 범위로 증가한다.

규조군집대 IV: 0~110 cm

*F. curta*는 군집대 III와 비슷한 산출 경향을 보이나 *F. cylindrus*의 산출이 군집대 IV의 하부에서 급증하다가 상부로 갈수록 급감한다. *Chaetoceros* RS와 규조 개체수 농도가 감소하는 구간으로 개체수 농도 범위는 $6 \sim 28.3 \times 10^6/g$ 범위에 해당된다.

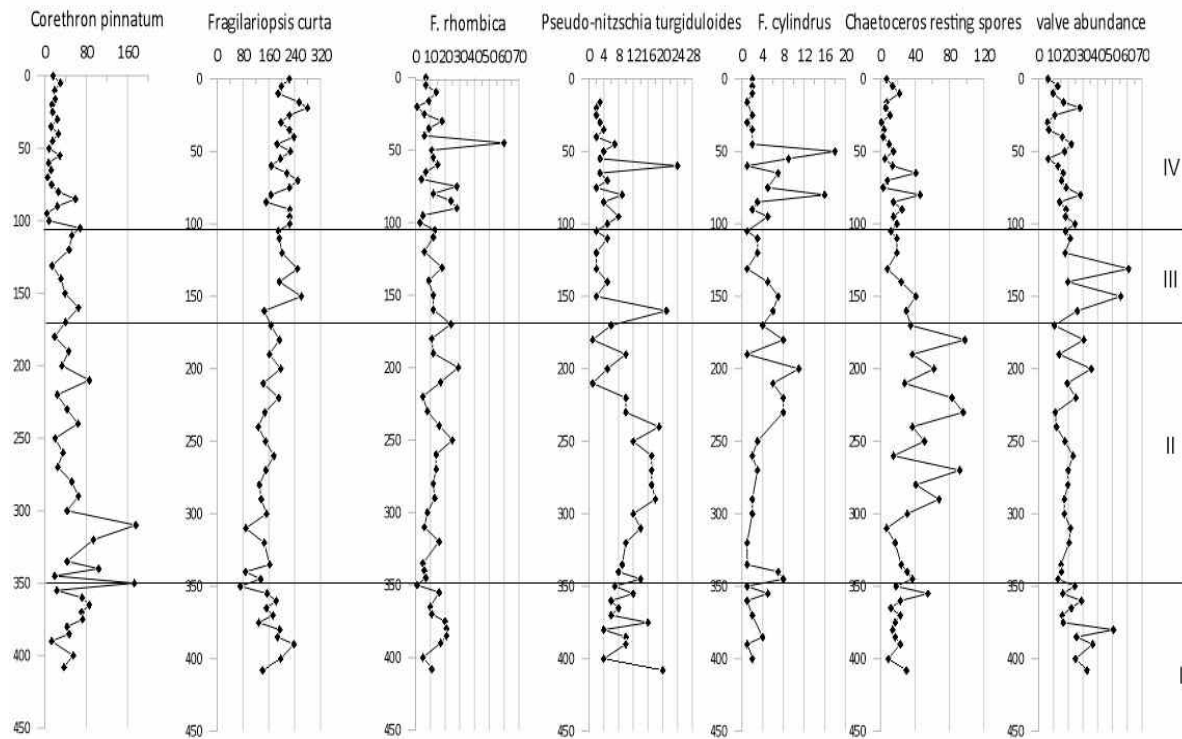


Fig. 22. RS19-GC16에서 산출된 규조 군집에 의한 생층서대

공해종인 *F. kerguelensis*, *Proboscia alata*, *F. seperanda* 등의 산출 수직 분포변화에 의해 고환경 변화를 해석해 보았다. *F. seperanda*는 해빙과 관계가 있으나 두꺼운 해빙 아래보다는 해빙이 녹기 시작하는 가장자리나 봄철 해빙이 녹는 시기에 대량 번식을 하는 특징이 있다. 이 종이 다량 산출되는 것은 해빙이 존재했거나 인근에 빙하 용빙수가 풍부했음을 지시한다.

따라서, 규조 군집대 I과 II에서 *F. seperanda*가 상대적으로 풍부한 것은 계절적인 해빙에 놓여 있었거나 용빙수가 유입되는 약간 온난한 환경이었음을 의미한다(Fig. 23). 특히 규조 군집대 II에서 다량 산출되는 공해종인 *F. kerguelensis*의 산출은 이시기에 따뜻한 해수의 유입이 있었음을 의미한다. 또한, *Proboscia alata*도 용승지역과 성층화된 수괴에서 풍부하고 따뜻한 해수의 유입을 지시해준다. 그러므로 군집대 I은 계절적인 해빙에 놓여 있었고 군집대 II는 용빙수가 유입되는 온난한 환경이었다. 군집대 III에서는 *F. kerguelensis*, *Proboscia alata*, *F. seperanda* 등의 산출이 줄어든 것으로 보아 추운 해빙 환경이었다. 군집대 IV에서는 다시 *F. kerguelensis*, *Proboscia alata*, *F. seperanda* 등의 산출이 증가하는 경향을 나타내어 온난한 환경으로 바뀌었음을 나타낸다(Fig. 23).

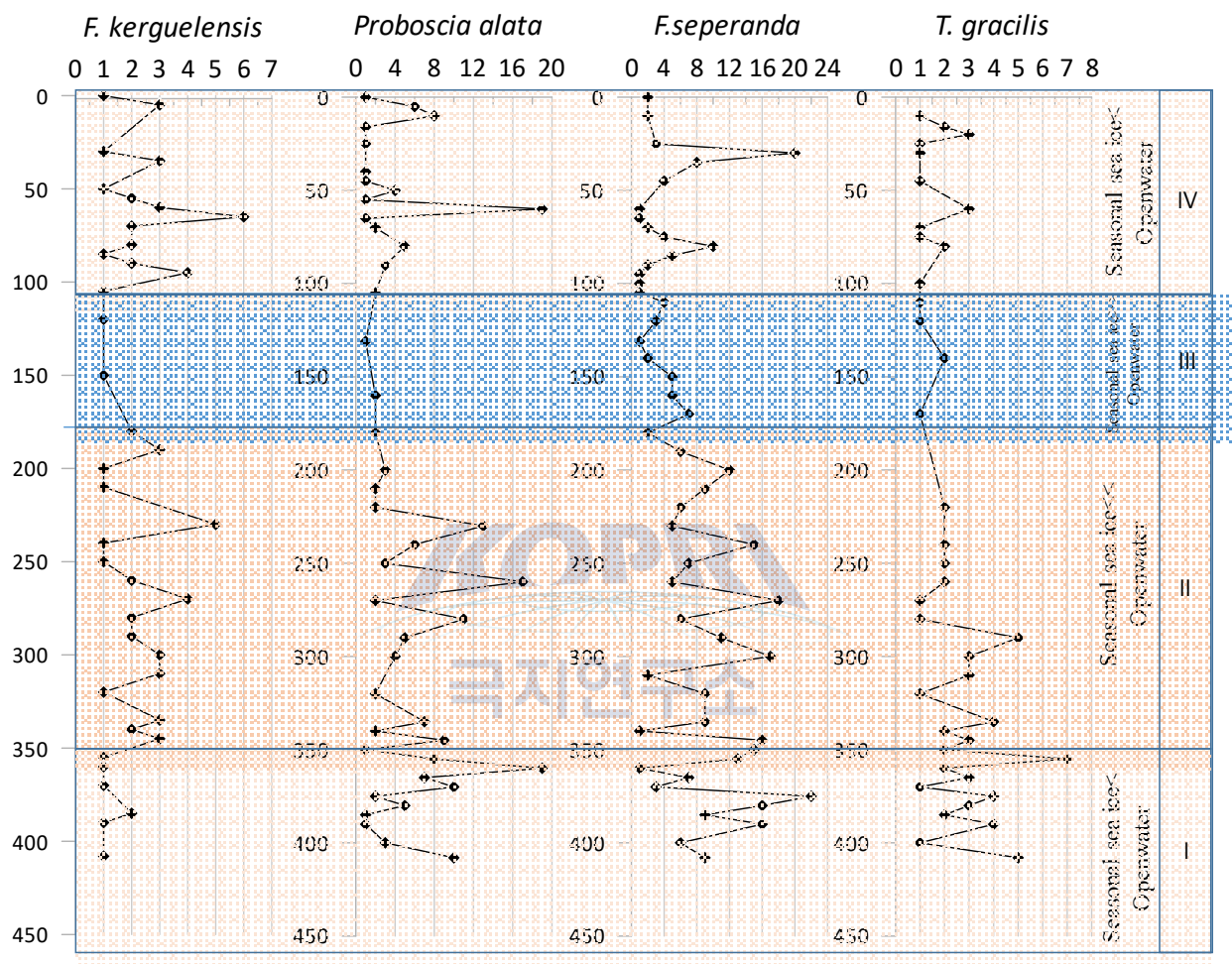


Fig. 23. RS19-GC16 코어로부터 선택된 지시종들의 수직산출 분포와 고환경

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

4-1 절 연구개발목표의 달성도

연도	연구목표	연구내용	평가착안점	달성도 (%)
2020 년도	1지역 서남극 코어퇴적물 로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석	시료채취	BS17-GC18 코어퇴적물에서 총 19개의 1차시료 채취	100
		규조분석	규조 관찰 결과 22속 54종 감정	100
		생층서대 설정	4개의 규조 군집대 설정	100
		환경지시 종 분석	대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적	100
		고환경 변화	glacial→deglacial→interglacial로 고환경 변화	100
2021 년도	2지역 서남극 코어퇴적물 로부터 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
		환경지시 종 분석	대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적	100
		고환경 변화	Heavy Sea-ice condition → Sea-ice>>open water → Sea-ice<<open water → Sea-ice>>open water로 고환경 변화	100
2022 년도	3지역 서남극 코어퇴적물 로부터 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
		환경지시 종 분석	대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적	100
		고환경 변화	Warm Interval → Open sea로 고환경 변화	100

연도	연구목표	연구내용	평가착안점	달성도 (%)
2023 년도	1지역 서남극 코어퇴적물 로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석	시료채취	BS17-GC18 코어퇴적물에서 총 20개의 2차시료 채취	100
		규조분석	규조 관찰 결과 26속 61종 감정	100
		생층서대 설정	3개의 규조 군집대 설정	100
		환경지시 종 분석	대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적	100
		고환경 변화	glacial→deglacial→interglacial로 고환경 변화	100
2024 년도	2지역 서남극 코어퇴적물 로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석	시료채취	AM22-GC10B 코어퇴적물에서 총 31개의 시료 채취	100
		규조분석	규조 관찰 결과 22속 50종 감정	100
		생층서대 설정	3개의 규조 군집대 설정	100
		환경지시 종 분석	대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적	100
		고환경 변화	Subglacial environment → Glaciomarine → Open marine으로 고환경 변화	100
2025 년도	3지역 서남극 코어퇴적물 로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석	시료채취	RS19-GC16 코어퇴적물에서 총 58개의 시료 채취	100
		규조분석	규조 관찰 결과 25속 62종 감정	100
		생층서대 설정	3개의 규조 군집대 설정	100
		환경지시 종 분석	대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적	100
		고환경 변화	Seasonal sea ice>> Open water → Seasonal sea ice<<Open water → Seasonal sea ice>>Open water → Seasonal sea ice>Open water로 고환경 변화	100

4-2절 대외기여도

가. 학술적 파급효과

서남극 빙상(WAIS)은 지반이 해수면 보다 낮은 해양 기반 빙상 (Marine-based ice sheet)으로, 붕괴시 전지구 해수면을 약 3 ~ 5m 상승 시킬 수도 있다. 규모 분석을 통해 복원된 과거 온난기의 빙상 후퇴 속도는 미래 해수면 상승 시나리오를 정교화하는 수치모델의 검증 데이터로 활용될 수 있다. 선진국 과학자들에 의해 남극 반도 일원에서 지난 수천년 ~ 50년동안 일어났던 고기후 및 고해양 변화에 대한 새로운 사실이 밝혀지고 있다. 규모 기반 고환경 복원 결과는 IPCC 보고서의 핵심 인용 자료가 되며, 해빙 확장 한계선과 용빙수 유입시기 데이터는 기후 민감도를 평가하는 척도가 되어 정책적으로도 활용될 수 있다. 우리나라의 경우, 로스 해 및 아문젠 해 인근 지역에 대한 규모 연구가 최근에야 이루어지고 있으며 지속적인 연구결과와 축적이 필요하다. 또한, 다중 프록시(규모, 지화학, 퇴적학, 안정동위원소)를 이용한 통합적인 연구는 연구결과와 국제적 신뢰도를 더 높일 수 있다. 따라서, 서남극 지역에 대한 규모 연구는 우리나라의 극지해양과학기술의 한 분야인 미고생물학적 분야를 국제적 수준으로 끌어올리기 위한 밑거름이 될 수 있다.



나. 경제적 파급효과

규모를 이용한 남극지역에서의 연구 성과는 국제 남극 조약 체제 내에서 한국의 과학적 위상을 높이고, 남극 자원 활용 및 환경 규제 논의에서 국가의 영향력을 확대하는 데 기여한다. 이는 장기적으로 국가의 경제적 이익을 보호하고 국제 사회에서의 리더십을 강화하는 기반이 된다. 특히, 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. 연구 성과를 바탕으로 국제 기후 정책 수립 과정에 참여 함으로써, 탄소 중립 및 환경 규제 논의에서 국가적 경제 이익을 보호 할 수 있다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

-서남극 지역에 대한 규조 연구는 우리나라의 극지 해양과학기술의 한 분야인 미고생물학적 분야를 국제적 수준으로 끌어올리기 위한 밑거름이 될 수 있으며 계속 적인 연구는 국내에서의 규조 연구 결과의 양적 축적과 기초과학 발전이라는 면에서도 의미가 있다.

-규조는 해양 생물량 생산의 40%이상을 차지하는 중요한 일차 생산자로서 수백 만년동안 해양 생태계에서 중요한 역할을 하고 있다. 서남극 해양 퇴적물로부터 규조를 활용한 연구는 1990년대 후반에 시작되어 2025년 현재에 이르기까지 꾸준히 수행되고 있으며, 브랜스필드 해협, 벨링스하우젠해, 로스해, 아문젠해등 여러 지역의 규조 데이터가 축적되어 가고 있는중이다.

-지속적인 연구지원에 힘입어 최고 기술 보유국과의 기술 격차가 점차 감소하는 성과를 내고 있으며, 차세대 인재들에게 미화석연구의 중요성에 대한 관심을 불러일으켜 미래의 극지 연구자 양성을 위해서도 중요하다.

- 남극 해양퇴적물에서의 규조 연구를 할 수 있는 전문 연구 인력이 매우 부족하고, 현미경 관찰을 통해 연구 데이터를 확보하는 데에는 장기간의 시간이 소요되기 때문에 단기간에 선진국의 연구 성과와 발 맞추기에는 어려움이 있다. 따라서, 극지연구에서 규조 데이터를 축적하고 글로벌한 연구 성과를 내기 위해서는 학연간 협동연구가 계속되어야 하고 퇴적학적, 지화학적 연구 결과와 상호 보완을 통한 다중 프록시를 활용하여 고환경의 변화를 해석해 나가는 장기적인 연구 수행이 필요하다.

-지난 30여 년 동안의 꾸준히 이루어진 남극에서의 규조 연구 결과는 과거의 기후 변화의 양상을 밝혀 주고 있으며, 퇴적 시기에 따른 빙상의 전진과 후퇴 및 해빙의 분포 변화에 대한 연구 기록은 빙하의 변화 시기를 파악하는데 매우 중요하다. 이러한 기록은 기온변화, 온실가스 농도, 대기 구성을 포함한 지구 기후 시스템을 이해 하는데 기여하고 있으며, 현재와 미래의 지구환경변화를 모니터링하는데 활용할 수 있다.

-이들 연구의 성과를 토대로 우리나라도 극지 해양을 활용한 기후 변화 대응, 미래 에너지 및 자원개발 등을 위한 경쟁력을 확보할 수 있고, 남극 과학연구의 기여도에 따른 국가별 개발 기준설정에 대비하여 선진국들과의 협상력을 높일 수 있다. 또한, 현재의 기후 온난화에 대한

대책마련을 위한 국가 경제적인 정책을 수립하는데 있어 중요한 자료가 될 수 있다.

-규조의 연구는 오염감지, 생물학적 복원, 해안 지층 시퀀스에서 일어나는 현상에 대한 규명 등과 같은 환경 모니터링에도 응용될 수 있으며, 석유 및 가스 탐사에도 활용된다. 특히, 지질 시대 동안의 규조 생물 군집의 변화, 빙기 및 간빙기와 같은 고기후의 변화, 해수면 및 고해양의 변화와 같은 고환경의 복원을 통해서 미래의 기후변화 시나리오를 예측할 수 있다.

-규조 군집으로 복원한 과거 온난기의 해빙의 분포는 물리적 빙상-해양 결합 모델의 정확도를 검증하는 핵심 데이터로 활용될 수 있다. 또한, 빙상이 급격히 후퇴하기 시작한 과거 특정 시점의 규조기록은 현재 온난화 속도에서 서남극 빙상이 붕괴되는 임계 온도를 예측하는데도 활용 할 수 있다.

-서남극 퇴적물에서 규조 기록이 알려주는 빙상 후퇴 시기의 정보를 바탕으로, 한반도 주변 해수면 상승 시뮬레이션을 설정할 때 기초 데이터로 활용 할 수 있으며, 더 나아가서는 국가차원의 연안 방재 전략 수립에 활용될 수 있다.



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해양에 기반을 둔 서남극 빙상(WAIS)은 현재 바람에 의해 발생하는 해류의 변화로 인해 후퇴하고 있다. 이 해류는 따뜻한 해수를 빙상 가장자리로 운반하여 빙봉의 두께 감소와 서남극 빙상의 질량 손실을 가속화시킨다. 남극 대륙 경계면에서 수행된 이전 지질 시추 연구 결과는 신생대 후기와 제4기 동안 해양 기반 빙상의 범위에 상당한 변동성이 있었음을 보여준다.

과거 빙상 변동성에 대한 증거는 주변부에서 수집되었지만, 과거 빙상 변동성의 범위와 관련된 해양 강제력 및 피드백을 평가하기 위해서는 외대륙붕의 퇴적학적 시퀀스도 필요하기 때문에 국제 해양 탐사 프로그램(IODP) 374차 탐사대는 로스해 동부의 외대륙붕에서 해저까지 5개 시추 지점에서 위도 및 수심을 따라 시추 작업을 수행하였다.

이 탐사는 최적의 데이터-모델 통합을 위해 설계되었으며, 현재보다 따뜻했던 기후(예: 플라이스토세, 중기 플리오세, 초기 및 중기 마이오세) 동안 남극 빙상(AIS) 질량 균형의 민감도를 더 잘 이해할 수 있도록 할 것이다. 또한, 동부 로스해의 고해저 지형을 재구성하여 해저 지형, 빙상 안정성/불안정성, 그리고 지구 기후 간의 관계도 조사할 예정이다.

이러한 목표를 달성하기 위해 사용할 과학기술은 데이터와 모델을 활용하여 신생대 및 제4기 남극 빙하 최대 확장 시기와 원거리 해수면 변동 기록을 일치시키고 다중 프록시 접근법을 사용하여 과거 해양 및 대기 온도 변화를 재구성 하는 것이다.

규조류는 수역의 환경 변화에 빠르고 민감하게 반응하고 퇴적물에 보존이 잘 되기 때문에 현재와 미래에 올 위협에 대한 장기 모니터링 데이터를 구축함에 있어 규조류의 고생태적인 응용 가치는 환경 및 복원 정책을 마련하는 데 있어 중요하다. 남극 반도를 둘러싼 홀로세 코어 퇴적물에서 고해상도 다중 프록시 연구가 이루어졌고 홀로세 중기 기후 온난기(Mid-Holocene Climatic Optimum)와 신빙기(Neoglacial)의 기후 변화에 대한 연구가 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).

더 나아가서는 퇴적물 내 규조의 DNA를 분석하여 현미경을 통한 형태학적 분류와 데이터를 결합하여 고해상도 생물 다양성 데이터를 확보하려는 새로운 연구 방법들이 시도 되고 있다. (Armbrecht et al., 2022)

제 7 장 참고문헌

- 박영숙, 유규철, 이종덕, 윤호일, 2009. 남극 브랜스필드 해협 코어퇴적물의 고해상 규모 분석. 지질학회지, 45(1), 1-8.
- 박영숙, 윤호일, 유규철, 이영엽, 2015, 남극 엽층리 퇴적물로부터 규모 종을 이용한 고기후 변화 연구. 한국 지구과학회지, 36(2), 190-197.
- 박영숙, 이종덕, 윤혜수, 윤호일, 2001, 남극 브랜스필드 해협 퇴적물에서 산출된 규모류에 의한 고환경 연구. 고생물학회지, 17(2), 99-111.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 윤혜수, 김효정, 2002, 드레이크해협 남부 코어퇴적물에서 산출된 제4기 규모화석 연구. 지구과학회지, 23(5), 442-453.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 윤혜수, 2003, 남극 드레이크해협 극전선 부근 시추코어퇴적물(DP00-02)에서 규모화석을 이용한 고환경 연구. 지질학회지, 39(3), 337-346.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 윤혜수, 2004, 서남극 맥스웰만에서 산출된 홀로세 규모 연구. 지질학회지, 40(4), 455-468.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 이재일, 2007a, 남극 사우스오크니 제도 서부 해역의 코어퇴적물에서 산출된 규모 군집. 지질학회지, 43(1), 33-42.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 유규철, 2007b. 서남극 브랜스필드 해협 동부분지 내 규모군집과 홀로세 말기 기후변동 연구. 지질학회지, 43(3), 345-352.
- 박영숙, 김성한, 이재일, 유규철, 이민경, 2021. 로스해 Iselin Bank에서 규모를 이용한 고해양 환경변화 해석. 한국지구과학회지, 42(6), 667-687.
- 박영숙, 이재일, 유규철, 김성한, 이민경, 2025a. 남극 로스해 보퍼트 섬 인근에서 고해양 환경 변화 해석을 위한 규모 연구. 한국 지구과학회지, 46(2), 107-114.
- 박영숙, 김성한, 유규철, 이재일, 이민경, 하상범, 2025b. 남극 아문젠해에서 규모군집을 이용한 고환경 변화 기록, 지질학회지, 61(3), 263-270.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 유규철, 이성주, 2010, 남극반도 엘레판트 섬 주변지역에서 규모를 이용한 홀로세 고기후 변화. 지질학회지, 46(2), 111-117.
- 박영숙, 유규철, 이종덕, 윤호일, 이재일, 김향주, 이성주, 2011, 남 쉘랜드 군도 북동쪽 대륙대 코어퇴적물에 나타나는 해빙기에 대한 고해상 규모 분석 연구. 지질학회지, 47(4), 363-369.
- 이영길, 1996, 남극 브랜스필드 해협 코아 퇴적물의 미고생물(규모)학적 연구. 고생물학회지,

12(1), 1–21.

- Alley, R. B., Anandakrishnan, S., Christianson, K., Horgan, H. J., Muto, A., Parizek, B. R., Pollard, D., and Walker, R. T., 2015. Oceanic forcing of ice-sheet retreat: West Antarctica and more, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 43, 207 - 231.
- Armbrecht, L., Weber, M. E., Raymo, M. E., Peck, V. L., Williams, T., Warnock, J., Kato, Y., Hernandez-Almeida, I., Hoem, F., Reilly, B., Hemming, S., Bailey, I., Martos, Y. M., Gutjahr, M., Percuoco, V., Allen, C., Brachfeld, S., Cardillo, F. G., Du, Z., ... Zheng, X., 2022. Ancient marine sediment DNA reveals diatom transition in Antarctica. *Nature Communications*, 13(1), Article 5787. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33494-4>.
- Baroni, C. and Orombelli, G., 1991, Holocene raised beaches at Terra Nova Bay, Victoria Land, Antarctica. *Quaternary Research*, 36, 157–177.
- Baroni, C. and Orombelli, G., 1994, Holocene glacier variations in the Terra Nova Bay area (Victoria Land, Antarctica). *Antarctic Science*, 6(4), 497–505.
- Bentley, M.J., Hodgson, D.A., Sugden, D.E., Roberts, S.J., Smith, J.A., Leng, M.J. and 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.
- Caburlotto, A., Lucchi, R. G., De Santis, L., Macri, P., and Tolotti, R., 2010. Sedimentary processes on the Wilkes Land continental rise reflect changes in glacial dynamic and bottom water flow, *Int. J. Earth Sci.*, 99, 909 - 926.
- Chadwick, M., Crosta, X., Esper, O., Thöle, L., and Kohfeld, K. E., 2022. Compilation of Southern Ocean sea-ice records covering the last glacial-interglacial cycle (12 - 130ka), *Clim. Past*, 18, 18151829, <https://doi.org/10.5194/cp-18-1815-2022>. *communications earth & environment*, 6, 420, <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02366-2>.
- Chandler, D.M., Langebroek, P.M., Reese, R., Albrecht, T., Garbe, J and Winkelmann, R., 2025.
- Cody, R.D., Levy, R.H., Harwood, D.M., and Sadler, P.M., 2008, Thinking outside the zone: high-resolution quantitative biochronology for the Antarctic Neogene. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 260, 92–121.
- Cooke, D. W. and Hayes, J. D., 1982. Estimates of Antarctic Ocean seasonal sea-ice cover during glacial intervals, *Antarct. Geosci.*, 131, 1017 - 1025.

- Crosta, X., Debret, M., Denis, D., Courty, M. A., and Ther, O., 2007. Holocene long- and short-term climate changes off Adélie Land, East Antarctica, *Geochem. Geophys. Geosy.*, 8, Q11009, <https://doi.org/10.1029/2007GC001718>.
- Denton, G.H., Bockheim, J.G., Wilson, S.C., and Stuiver, M., 1989, Late Wisconsin and Early Holocene glacial history, Inner Ross Embayment, Antarctica. *Quaternary Research*, 31, 151-82.
- Depoorter, M. A., Bamber, J., Griggs, J., Lenaerts, J. T., Ligtenberg, S. R., van den Broeke, M. R., and Moholdt, G., 2013. Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves, *Nature*, 502, 89 - 92.
- Domack, E. W., 1982. Sedimentology of glacial and glacial marine deposits on the George V-Adelie continental shelf, East Antarctica, *Boreas*, 11, 79 - 97.
- Domack, E.W., Leventer, A., Root, S., Ring, J., Williams, E., Carlson, D., Hirshorn, E., Wright, W., Gilbert, R. and 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. and Prentice, M., 2005. Stability of the Larsen B ice shelf on the Antarctic Peninsula during the Holocene epoch. *Nature*, 436, 681-685.
- Escutia, C., Warnke, D., Acton, G. D., Barcena, A., Burckle, L., Canals, M., and Frazee, C. S., 2003. Sediment distribution and sedimentary processes across the Antarctic Wilkes Land margin during the Quaternary, *Deep-Sea Res. Pt. II*, 50, 1481 - 1508.
- Fontana, L. and Nascimento, M.D.N., 2023. Diatom-Based Paleoenvironmental Research: Global Trends, Regional disparities and the evolving role of South America. *Derbyana, Sao Paulo*, 44: e803.
- Ha, S.-Y., Ahn, I.-Y., Moon, H.-W., Choi, B., and Shin, K.-H., 2019, Tight trophic association between benthic diatom blooms and shallow-water megabenthic communities in a rapidly deglaciated Antarctic fjord. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 218, 258-267.
- Hartman, J. D., Sangiorgi, F., Barcena, M. A., Tateo, F., Giglio, F., Albertazzi, S., Trincardi, F., Bijl, P. K., Langone, L., and Asioli, A., 2021. Sea-ice, primary productivity and ocean temperatures at the Antarctic marginal zone during late Pleistocene, *Quaternary Sci. Rev.*, 266, 497 - 506, <https://doi.org/10.1017 /S0954102007000697>.
- 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., et al., 2013, Grounding-line retreat of the West Antarctic Ice Sheet from inner Pine Island Bay: *Geology*, v. 41, p. 35 – 38, doi:10.1130 /G33469.1.
- 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/nature22995>.
- Hirano, D., Tamura, T., Kusahara, K. et al., 2020. Strong ice-ocean interaction beneath Shirase Glacier Tongue in East Antarctica. *Nat. Commun.* 11, 4221.
- Holder, L., Duffy, M., Opdyke, B., Leventer, A., Post, A., O'Brien, P., and Armand, L. K., 2020. Controls since the mid-Pleistocene transition on sedimentation and primary productivity downslope of Totten Glacier, East Antarctica, *Paleoceanogr. Paleocl.*, 35, e2020PA003981, <https://doi.org/10.1029/2020PA003981>.
- Jacobs, S. S., Hellmer, H. H. and Jenkins, A., 1996. Antarctic ice sheet melting in the southeast Pacific. *Geophys. Res. Lett.* 23, 957–960.
- Kim, S., Bak, Y.-S., Prebble, J.G., Kang M.-I., Kim, S., Park, J., Lee, M.K., Lee, J.I., Yoo, K.-C. and Moon, H.S., 2023. Glacial-interglacial changes in oceanic conditions and depositional process in the continental rise in response to ice sheet (shelf) variation in Bellingshausen Sea, Antarctica. *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1183516>.
- Kim, S., Kim, B.K., Yoo, K.-C., Lee, M.K., Lee, J.I., Kim, S. and Bak, Y.-S., 2024. Incorporation of Multi-Elements Into Diatom Frustules in the Scotia Sea, Antarctica, Since the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, <https://doi.org/10.1029/2023PA004790>.
- Kim, S., Bak, Y.-S., Yoo, K.-C., Lee, M.K., Lee, J.I., Kim, S., park, J., Kim, S.-Y., Moon, H.S., Kang, M.-I. and Kim, H.J., 2025. Paleooceanographic condition changes in the Eastern Bransfield Basin, Antarctic Peninsula, since the late glacial interval and its implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 669, 112934.
- Knox, G. A., 2006. *Biology of the Southern Ocean*, in: 2nd Edn., Marine Biology Series, edited by: Lutz, P. L., CRC Press, Taylor and Francis Group, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 531pp., ISBN 0849333946.
- 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.
- Leventer, A., Domack, E., Dunbar, R., Pike, J., Stickley, C., Maddison, E., Brachfeld, S., Manley, P., and McClennen, C., 2006. Marine sediment record from the East Antarctic margin reveals dynamics of ice sheet recession, *GSA Today*, 16, 4, <https://doi.org/10.1130/GSAT01612A.1>.
- Li, Q., Xiao, W., Wang, R., and Chen, Z., 2021. Diatom based reconstruction of climate evolution through the Last Glacial Maximum to Holocene in the Cosmonaut Sea, East Antarctica, *Deep-Sea Res. Pt II*, 194, 104960, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2021.104960>.
- Licht, K.J., Jennings, A.E., Andrews, J.T., and Williams, K.M., 1996, Chronology of late Wisconsin ice retreat from the western Ross Sea, Antarctica. *Geology*, 24(3), 223 - 26.
- Lucchi, R. G., Rebesco, M., Camerlenghi, A., Buseti, M., Tomadin, L., Villa, G., Persico, D., Morigi, C., Bonci, M. C., and Giorgetti, G., 2002. Mid-late Pleistocene glacimarine sedimentary processes of a high-latitude, deep-sea sediment drift (Antarctic Peninsula Pacific margin), *Mar. Geol.*, 189, 343 - 370.
- Mackintosh, A.N., et al., 2014, Retreat history of the East Antarctic Ice Sheet since the Last Glacial Maximum: *Quaternary Science Reviews*, 100, 10 - 30, doi:10.1016/j.quascirev.2013.07.024.
- Maddison, E. J., Pike, J., and Dunbar, R., 2012. Seasonally laminated diatom-rich sediments from Dumont d'Urville Trough, East Antarctic margin: Late-Holocene neoglacial sea-ice conditions, *Holocene*, 22, 857 - 875.
- Maddison, E.J., Pike, J., Leventer, A., Dunbar, R., Brachfeld, S., Domack, E.W., Manley, P. and McClennen, C., 2006, Post-glacial seasonal diatom record of the Mertz Glacier Polynya, East Antarctica. *Marine Micropaleontology*, 60, 66 - 88.
- Massom, R. A., Scambos, T. A., Bennetts, L. G., Reid, P., Squire, V. A., and Stammerjohn, S. E., 2018. Antarctic ice shelf disintegration triggered by sea ice loss and ocean swell, *Nature*, 558, 383 - 389.
- Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J. F., Jansen, E., Lambeck, K., Luterbacher, J., Naish, T., Osborn, T., Otto-Bliesner, B., Quinn, T., Ramesh, R., Rojas, M., Sha, X., and Timmermann A., 2013. Information from Paleoclimate Archives, in: *Climate change 2013: the physical science basis*, Cambridge University Press, 383464, <https://doi.org/10.1017/CB9781107415324.013>.
- McKay, R., Golledge, N.R., Maas, S., Naish, T., Levy, R., Dunbar, G. and Kuhn, G. 2015,

- Antarctic marine ice-sheet retreat in the Ross Sea during the early Holocene. *Geology*, doi:10.1130/G37315.1.
- Melis, R., Capotondi, L., Torricella, F., Ferretti, P., Geniram, A., Hong, J.K., Kuhn, G., Khim, B-K., Kim, S., Malinverno, E., Yoo, K.C., and Colizza, E., 2021, Last Glacial Maximum to Holocene paleoceanography of the northwestern Ross Sea inferred from sediment coregeochemistry and micropaleontology at Hallett Ridge. *Journal of Micropalaeontology*, 40, 15-35.
- Mezgec, K., Stenni, B., Crosta, X., Masson-Delmotte, V., Baroni, C., Braida, M., Ciardini, V., Colizza, E., Melis, R., Salvatore, M.C., and Severi, M., 2017. Holocene sea ice variability driven by wind and polynya efficiency in the Ross Sea, *Nat. Commun.*, 8, 1 - 12.
- Minowa, M., Sugiyama, S., Ito, M., Yamane, S., and Aoki, S., 2021. Thermohaline structure and circulation beneath the Langhovde Glacier ice shelf in East Antarctica, *Nat. Commun.*, 12, 1 - 9.
- Morlighem, M., Rignot, E., Binder, T. et al., 2020. Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet. *Nat. Geosci.* 13, 132-137.
- Noble, T.L., Rohling, E.J., Aitken, R.A. et al., 2020. The sensitivity of the Antarctic ice sheet to a changing climate: past, present, and future. *Rev. Geophys.* 58, e2019RG000663.
- Peck, V. L., Allen, C. S., Kender, S., McClymont, E. L., and Hodgson, D. A., 2015. Oceanographic variability on the West Antarctic Peninsula during the Holocene and the influence of upper circumpolar deep water, *Quaternary Sci. Rev.*, 119, 54 - 65.
- Pichon, J. J., Bareille, G., Labracherie, M., Labeyrie, L. D., Baudrimont, A., and Turon, J. L., 1992. Quantification of the biogenic silica dissolution in Southern Ocean sediments, *Quatern. Res.*, 37, 361 - 378.
- Pritchard, H., Ligtenberg, S. R., Fricker, H. A., Vaughan, D. G., van den Broeke, M. R., and Padman, L., 2012. Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves, *Nature*, 484, 502 - 505.
- Pritchard, H. D., Arthern, R. J., Vaughan, D. G., and Edwards, L. A., 2009. Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets, *Nature*, 461, 971 - 975.
- Pudsey, C. J., 1992. Late Quaternary changes in Antarctic Bottom Water velocity inferred from sediment grain size in the northern Weddell Sea, *Mar. Geol.*, 107, 9 - 33.
- Pudsey, C.J., Murray, J.W., Appleby, P. and Evans, J., 2006. Ice shelf history from

- petrographic and foraminiferal evidence, northeast Antarctic Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2357–2379.
- Pudsey, C.J. and Evans, J., 2001. First survey of Antarctic sub-ice shelf sediments reveals mid-Holocene ice shelf retreat. *Geology*, 29, 787–790.
- Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., Van Den Broeke, M., Van Wessem, M.J., and Morlighem, M., 2019. Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979 – 2017, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 116, 1095 – 1103.
- Saggiomo, V., Carrada, G.C., Mangoni, O., Ribera d'Alcala, M., Russo, A. 1998. Spatial and temporal variability of size-fractionated biomass and primary production in the Ross Sea Antarctica during austral spring and summer. *Journal of Marine Systems* 17, 115–127.
- 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.
- Silvano, A., Rintoul, S. R., Peña-Molino, B., Hobbs, W. R., van Wijk, E., Aoki, S., Tamura, T., and Williams, G. D., 2018. Freshening by glacial meltwater enhances melting of ice shelves and reduces formation of Antarctic Bottom Water, *Sci. Adv.*, 4, eaap9467, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9467>.
- Sjunneskog C.M. and Scherer R.P., 2005, Mixed Diatom Assemblages in Ross Sea (Antarctica) Glacigenic Facies. *Palaeogeography Palaeoclimate Palaeoecology*, 218, 287–300.
- Smith, J.A., Hillenbrand, C.-D., Kuhn, G., Larter, R.D., Graham, A.G.C., Ehrmann, W., Moreton, S.G. and Forwick, M., 2011, Deglacial history of the West Antarctic Ice Sheet in the western Amundsen Sea Embayment. *Quaternary Science Reviews*, 30, 488–505.
- Stickley, C.E., Pike, J., Leventer, A., Dunbar, R., Domack, E.W., Brachfeld, S., Manley, P. and McClennan, C., 2005, Deglacial ocean and climate seasonality in laminated diatom sediments, Mac.Robertson Shelf, Antarctica. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 227, 290 – 310.
- Taylor, F. and McMinn, A., 2001. Evidence from diatoms for Holocene climate fluctuation along the East Antarctic margin, *Holocene*, 11, 455 – 466.
- Taylor, F., Whitehead, J. and 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. and Bentley, C.R., 1978, A model for Holocene retreat of the West Antarctic

Ice Sheet. *Quaternary Research*, 10, 150–170.

Torricella, F., Melis, R., Malinverno, E., Fontolan, G., Bussi, M., Capotondi, L., Del Carlo, P., Di Roberto, A., Geniram, A., Kuhn, G., and Khim, B. K., 2021. Environmental and Oceanographic Conditions at the Continental Margin of the Central Basin, Northwestern Ross Sea(Antarctica) Since the Last Glacial Maximum, *Geosciences*, 11, 155, <https://doi.org/10.3390/geosciences11040155>.

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

Williams, G., Herraiz-Borreguero, L., Roquet, F., Tamura, T., Ohshima, K., Fukamachi, Y., Fraser, A., Gao, L., Chen, H., and McMahon, C., 2016. The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay, *Nat. Commun.*, 7, 12577, <https://doi.org/10.1038/ncomms12577>.

Yoon, H.I., Park, B.K., Kim, Y. and 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.



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.