

TSPE19030-026-12

남극 코어퇴적물에서 규조 지시자를 이용한
고환경 변화 연구

Research of paleoenvironmental change using
diatom indicator from core sediments in
Antarctica



전북대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “퇴적물을 활용한 지난 5백만년간의 남극 고환경 변화 복원에 관한 연구” 과제의 위탁연구 “남극 코어퇴적물에서 규조 지시자를 이용한 고환경 변화연구에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2020 . 1 .

(본과제) 총괄연구책임자: 이 재 일

위탁연구기관명: 전북대학교 산학협력단

위탁연구책임자: 박 영 속

위탁참여연구원: 신 문 상

요 약 문

I. 제 목

남극 코어퇴적물에서 규조 지시자를 이용한 고환경 변화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

◎ 목적

-남극 제 4기 코어퇴적물에서 규조 분석을 통하여 규조군집의 변화에 따른 생층서 확립 및 규조 환경 지시종의 산출양상에 따른 수직분포 변화를 추적하여 고환경의 변화 해석

◎ 필요성

-남극의 코어퇴적물에 보존되어 있는 과거 환경에 대한 정보는 최근 진행된 기후변화에 대한 이해를 돕는데 매우 중요한 자료이다. 또한, 남극 해양 코어퇴적물로부터 년 단위에서 백만년 단위의 연대범위까지 고환경 변화의 패턴을 파악 할 수 있기 때문에 더욱 연구가 필요하다.

-선진국에서는 지난 10 여년동안 기온 변화에 대단히 민감하게 반응하는 남극권의 해양퇴적물과 빙하시추 시료를 대상으로 고기후의 변동에 대한 연구를 활발히 수행해 왔다. 범세계적인 기후변화에 따른 수권과 생물권의 반응을 정확히 규명하기 위해서 남극 반도에 위치하는 고기의 퇴적층, 호수퇴적물, 연안퇴적물을 대상으로 연구된 규조 군집은 그 지역 수괴의 물리적 화학적 특징과 고해양학적 변화(해빙의 확장, 일차생산력과 수괴의 변화)를 나타내므로 규조에 의한 표층 퇴적 군집과 해양 환경 사이의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

-로스해 인근 퇴적물로부터 규조를 이용한 고환경변화 연구는 퇴적물을 활용한 지난 5백만년간의 남극 고환경 변화 복원이라는 본과제의 목표에

맞추어서 지역의 고환경변화를 이해하는데 기여할 수 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

◎ 연구개발의 내용

- 최근 복원된 남극 해양 코어퇴적물은 서남극 빙상이 기후 변화에 민감하였으며 지난 5백만년에 걸쳐 여러번 붕괴 되었다는 점을 시사 하였다. 서남극 지역의 빙하는 빙붕이 유지될 수 있는 '연평균 기온 -9°C 선'이 남쪽으로 후퇴하면서 최근 크고 작은 빙붕들이 후퇴하거나 소멸하는 현상이 빠르게 진행되고 있다. 또한, 로스해 연안지역에서의 연구는 남극 북빅토리아랜드 지역에 대한 해빙의 분포에 대한 정보를 획득할 수 있는 기회이며, 지구시스템에서의 남극의 역할을 규명하는데 필요한 기초 데이터를 확보한다.

- 극 빙하의 분포 변화는 제 1차 생산자인 규조의 생태에 매우 중요한 영향을 미치기 때문에 해양 코어퇴적물에서 규조는 고환경 변화를 민감하게 반영하고 있다. 로스해 인근지역에서 규조를 연구함으로써 고기후 변화 및 해빙의 분포 변화를 추적하여 전지구적 기후변화에 대한 역사를 복원한다.

▶ 시료 입수 및 문헌수집 ▶ 시추공 퇴적물내 규조류 추출실험 및 현미경관찰 ▶ 시추공 퇴적물내 규조류 종분류 및 종 조성 분석 ▶ High-resolution 규조 데이터를 이용한 고환경 분석 ▶ High-resolution 규조 데이터를 이용한 Bioevent 분석 ▶ 종합 해석

IV. 연구개발결과

Victoria Land의 북쪽에 위치한 Columan island 인근에서부터 Scott Seamount에 이르는 지역으로부터 RS15-LC108, RS15-GC41, RS15-GC67 코어를 채취하여 규조를 분석한 결과, RS15-LC108로부터 3개의 군집대, RS15-GC41로부터 4개의 군집대 및 RS15-GC67으로부터 4개의 군집대를 설정하였다. 이들의 퇴적연대는 ^{14}C 값 측정에 의해서 2.56 Ma에서 17.8 ka에 대비된다. 연구지역에서 산출된 종들 중에서 sea-ice종과 open ocean

종의 산출 분포, *Paralia sulcata* 및 *Stephanopyxis turris*와 같은 reworking 종들의 산출분포를 비교하여 고환경을 해석하였다. 각 age에 따른 glacial-interglacial의 변화는 세부적인 age dating의 결과와 비교를 해야 정확한 시기를 결정할 수 있으며, 규조의 연구 결과로는 변화의 순서만을 나열할 수 있다. 규조의 연구결과에 의하여 연구지역은 Late Pleistocene에서 Holocene에 이르기까지 glacial - deglacial - interglacial - glacial - deglacial - interglacial - transition to glacial - interglacial - transition to glacial - glacial - transition to interglacial periods의 순으로 고환경이 변화하였음을 알 수 있다. 또한, *Paralia sulcata*와 *Stephanopyxis turris*의 산출이 풍부한 구간들은 grounded ice sheet의 근접함과 관계있다. 특히, 과거 43만년 동안 빙기-간빙기의 주기는 10만년이라는 큰 진폭의 주기를 가진다고 보고되어 있으며, 연구 지역에서도 40만년동안 10만년을 주기로 규조 군집이 변화하였음을 알 수 있다.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 규조는 남극 해양의 1차 생산자로서 매우 중요하며, 규조 종의 변화를 이용하면 고기후 변화를 추적할 수 있기 때문에 본 연구는 기후 변화 예측 기술 개발하는데 중요한 기초 데이터를 보급할 수 있다.
- 온난화가 급격히 진행되고 있는 로스해 지역에서의 규조 연구가 국내에서는 처음으로 이루어졌기 때문에 새로운 지역의 연구 데이터가 축적된다.
- 기후 온난화로 인하여 국제적으로 산업 활동에 대한 환경규제가 점차 강화되고 있기 때문에 남극에서의 고환경변화에 대한 과학적 지식은 국가 정책을 수립하는 데에도 방향을 제시해 줄 수 있다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Research of paleoenvironmental change using diatom indicator from core sediments in Antarctica

II. Purpose and Necessity of R&D

◎ Purpose

-Analyze the change of paleoenvironment according to the occurrence pattern of indicator diatoms and diatom assemblages in Quaternary sediment of Antarctica.

◎ Necessity

-The information on the past environment preserved in Antarctic core sediments is a very important resource for understanding the recent progress in climate change. In addition, further studies are needed because they can identify patterns of paleoenvironmental changes from the Antarctic marine sediments to ranging from years to millions of years.

-Developed countries have been actively studying paleoclimatic fluctuations in Antarctic marine sediment and ice drilling samples that have been extremely sensitive to temperature changes over the past decade. Diatoms studied on fjord sediments, lake sediments, and coastal sediments located in the Antarctic Peninsula to accurately characterize

the response of the water and biosphere to global climate change have been developed. Because of the change (expansion of sea ice, changes in primary productivity and water masses), research is being actively conducted between surface sedimentary clusters by the diatom and the marine environment.

-Paleoenvironmental change research using diatoms from sediments near the Ross Sea can contribute to understanding paleoclimatic changes in the region, consistent with the objectives of reconstructing Antarctic paleoenvironmental change over the past five million years.

III. Contents and Extent of R&D

-Recently reconstructed Antarctic marine core sediments suggest that the West Antarctic ice sheet is sensitive to climate change and has collapsed several times over the last five million years. Glaciers in the West Antarctic region have recently receded or disappeared, with large and small ice shelves retreating southward, with the annual average temperature of -9°C , where ice shelves can be maintained. In addition, research on the coast of the Ross Sea is an opportunity to obtain information about the distribution of sea ice in the Antarctic North Victoria Land region, and has the basic data necessary to identify the role of Antarctica in the Earth system.

-Diatoms in marine sediments are sensitive to changes in paleoenvironment because marine polar glacier have a very important impact on the ecology of diatoms. The study of diatoms in the vicinity of the Ross Sea tracks paleoclimatic changes and changes in sea ice distribution, restoring a history of global climate change.

▶ Samples and literature collection ▶ Diatom extraction experiment and microscopic observation in core sediment ▶ Diatom classification and species analysis in core sediment ▶ Paleoenvironment analysis

using high-resolution diatom data ► Bioevent analysis using high-resolution diatom data ► Comprehensive analysis

IV. R&D Results

Diatom analysis of RS15-LC108, RS15-GC41 and RS15-GC67 cores from Columan Island to Scott Seamount, in the north of Victoria Land. Three diatom assemblage zones from RS15-LC108, four diatom assemblage zones from RS15-GC41 and four diatom assemblage zones from RS15-GC67 were identified. Their sedimentation age is compared to 17.8 ka at 2.56 Ma by ^{14}C AMS age dating. The change of paleoenvironment was analyzed by comparing the yield distribution of sea-ice and open ocean species, and the distribution of reworking species such as *Paralia sulcata* and *Stephanopyxis turris* among the species occurred in the study area. The change of glacial-interglacial according to age can be determined by comparing with the result of detailed ^{14}C age dating, and the order of change can be listed as the result of diatom research. According to the results of diatoms, the research area is changed from Pleistocene to Holocene in the order of glacial - deglacial - interglacial - glacial - deglacial - interglacial - transition to glacial. Also, yield-rich sections of *Paralia sulcata* and *Stephanopyxis turris* are related to the proximity of grounded ice sheets. In particular, the period of glacial-interglacial has been reported to have a large amplitude cycle of 100,000 years in the past 430,000 years, and the diatom assemblages changed in 100,000 years for 400,000 years in the study area.

V. Application Plans of R&D Results

-Diatoms are very important as the primary producers of the Antarctic ocean, and the changes in diatom species can be used to track paleoclimatic changes, so this study can disseminate basic data

important for developing climate change prediction techniques.

-Diatoms research in the Ross Sea region, where warming is fast-paced, was performed for the first time in Korea.

-Due to climate warming, environmental regulations for industrial activities are increasingly strengthened internationally. Therefore, scientific knowledge of paleoenvironmental change in Antarctica can also guide the establishment of national policies.



목 차

| | |
|----------------------------------|----|
| 제 1 장 서론----- | 11 |
| 제 2 장 국내외 기술개발 현황----- | 13 |
| 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과----- | 14 |
| 1절 연구지역----- | 14 |
| 2절 시료채취 및 연구방법----- | 15 |
| 3절 연구결과 및 토의----- | 16 |
| 1. 규모 군집----- | 16 |
| 2. 고환경해석 및 토의----- | 23 |
| 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도----- | 30 |
| 1절 연구개발목표 달성도----- | 30 |
| 2절 대외기여도----- | 31 |
| 제 5 장 연구개발결과의 활용계획----- | 32 |
| 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보----- | 33 |
| 제 7 장 참고문헌----- | 34 |

제 1 장 서론

로스 해는 대규모의 저층수가 형성되는 지역으로서, 로스 해에서 보고되는 해류 순환의 변화가 지구 기후 변화에 어떤 영향을 미치는지 알아 볼 수 있는 중요한 지역이다. 따라서, 로스 해 지역의 해빙의 분포 변화 및 해양학적 특성의 변화를 추적하는 것이 지구 기후 변화에 대비해 연구하는데 있어 매우 중요한 데이터가 된다. 전 지구적 기후 변화의 결과로 심층수의 형성 속도가 달라져 현재 가장 빠르게 염분농도가 낮아지고 있는 지역으로서 대표 되는 로스 해의 염분 감소는 전 지구 규모 해수순환에 큰 영향을 미칠 것으로 예측되며, 서남극 빙상의 용빙도 그 원인 중의 하나로 주목 된다.

본 연구는 로스 해 연안지역에서 남극 환경 변화에 따른 규모 균집양상의 변화에 대한 추적을 함으로써, 로스 해 인근의 퇴적환경의 변화와 해양생태계의 변화를 밝혀내고 기후변화에 따른 규모 균집의 변화를 체계적으로 연구하는데 목적이 있다. 심해퇴적물(Lisiecki and Raymo, 2005)과 퇴스층(Ding et al., 2002)은 수백만년을 포함하는 일련의 빙기-간빙기 주기가 기록되어 있다. 기록이 가장 잘 보존되어 있는 과거 43만년 동안 빙기-간빙기의 주기는 10만년이라는 큰 진폭의 주기를 가지고 이러한 주기는 다른 궤도주기와 일치한다 (Hays et al., 1976).

남극의 코어퇴적물에 보존되어 있는 과거 환경에 대한 정보는 최근 진행된 기후변화에 대한 이해를 돕는데 매우 중요한 자료이다. 또한, 남극 해양 코어퇴적물로부터 년 단위에서 백만년 단위의 연대범위까지 고환경 변화의 패턴을 파악 할 수 있기 때문에 더욱 연구가 필요하다.

최근 복원된 해양 코어퇴적물은 서남극 빙상이 기후 변화에 민감하였으며 지난 5백만년에 걸쳐 여러번 붕괴 되었다는 점을 시사 하였다. 서남극 지역의 빙하는 빙붕이 유지될 수 있는 ‘연평균 기온 -9°C 선’이 남쪽으로 후퇴하면서 최근 크고 작은 빙붕들이 후퇴하거나 소멸하는 현상이 빠르게 진행되고 있다(Bentley et al., 2005; Domack et al., 2005; Pudsey and Evans, 2001).

이러한 남극 빙하에서의 변화는 제 1차 생산자인 규모의 생태에도 중요한 영향을 미친다. 특히 빙하퇴적물에서 규모토의 두께는 shelf전반에 걸쳐 매우 다양하게 나타나며, 이는 graounding-line의 퇴각률, biogenic sediment의 생성 및 보존율, 퇴적물의 reworking에 대해 차이를 의미한다.

따라서, 코어퇴적물에서 규조는 고환경 변화를 매우 민감하게 나타낼 수 있기 때문에, 본 연구는 로스해 인근 Victoria Land의 북쪽의 해양 퇴적물로부터 빙기-간빙기의 고환경변화를 밝혀내고자 한다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

1957년 미국이 지리적 남극점에 아문센-스콧기지, 남극점에 러시아가 보스토르크기지를 설치한 이래로 세계 여러 국가들이 남극 연구 활동을 목적으로 과학기지를 설치하였다.

우리나라는 1988년 2월에 세종기지 설치, 2014년에 제2의 장보고과학기지를 설치하여 남극지역의 기후 변화연구를 지속적으로 하고 있다. 장보고 기지가 위치한 로스해는 대규모의 저층해류가 형성되는 지역으로서 해류순환의 변화가 전 지구적인 기후 변화에 미치는 영향에 대한 연구가 중점적으로 진행되고 있는 지역이다.

이미 로스해 주변에는 미국 맥머도기지, 뉴질랜드의 스콧기지, 이탈리아의 오쥬켈리 기지와 독일의 곤드와나 기지등이 분포하고 있으며, 이들 국가들과 긴밀한 유대관계를 구축하여 남극 연구에 박차를 가하고 있다. 로스해에서의 고해상 지진, 미화석 및 퇴적 연구들이 수행되어 LGM동안의 서남극 빙상의 분포를 연구하였으며, 방사성동위원소의 분석에 의해 deglaciation의 시기와 ice의 retreat의 시기를 알아내었다.

로스해 연안과 대륙붕지역에서의 규조 연구는 표층수의 온도, Sea-ice의 분포와 수괴의 안정성등과 같은 해양 고환경 변화를 밝혀 내는 데 있어서, 매우 중요한 역할을 할 수 있으며, 시간이 지남에 따라 극지방의 규조류에 대한 해석은 규조 군집과 해빙, 해양, 대기사이의 상호관계를 이해하는데 있어 매우 필요하다. 이들 간의 상호작용을 이해하는 것은 고해상의 고기후 기록을 복원하는데 중요하기 때문에, 미국, 독일, 일본 등에서는 남극에서의 기초과학 육성을 위하여 국가차원에서 많은 연구가 수행되고 있다.

국내에서 규조 연구는 1996년 이후에 처음 연구가 시작되었으며, 2019년 현재까지 보고된 규조 결과물은 다음과 같다: 브렌스필드 해협; 이영길 (1996), 박영숙 외 (2001, 2007a, 2009, 2015), 드레이크 해협; 박영숙 외(2002, 2003, 2010, 2011), Bak *et al.* (2014), 맥스웰만; 박영숙 외(2004), 사우스 오크니제도; 박영숙 외(2007b), Lee *et al.* (2009), 스코티아해; Bak *et al.* (2007), Yoon *et al.* (2010), Bigo Bay:Kim *et al.*(2018), 포웰분지:Bak *et al.* (2018)의 연구 등이 있다.

최근 까지 남극에서의 규조 연구는 주로 서남극 반도 인근에서 이루어 졌으며, 이번 연구는 장보고 기지를 기반으로 한 로스해 주변에서 시도한 규조 연구로 국내에서는 처음 수행되었다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 연구지역

연구지역은 Victoria Land의 북쪽에 위치한 Columan island인근에서 Scott Seamount에 이르기까지 로스해의 북서쪽에 위치하고 있다 (Fig.1). 로스해의 대륙붕은 깊고 울퉁불퉁한 지세를 가진 전형적인 Antarctic shelf이다 (Dunbar et al., 1985). 해류는 동쪽으로부터 로스해로 들어오고 Victoria Land연안에 인접한 strip을 따라서 나간다. 최근 고해상으로 seismic, microfossil과 퇴적학에서 연구된 내용은 LGM동안 서남극빙상이 Coulman Island 근처 대륙붕 중간에 기반을 두었다고 제안하였다 (Taviani and Anderson, 1995; Shipp and Anderson, 1995; Domack et al., 1995; Licht, 1995; Licht et al., 1995; Licht et al., 1996).

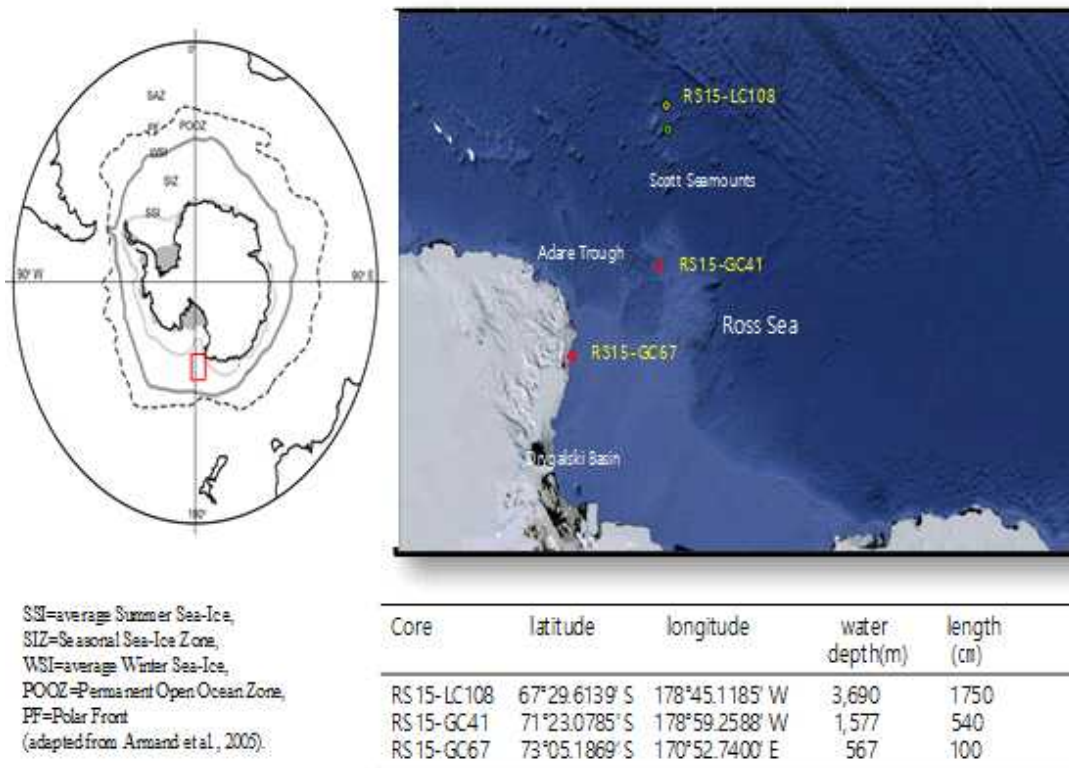


Fig. 1. 로스해 북서쪽에 위치한 연구코어의 위치 및 Sea-ice의 분포

Baroni and Orombelli (1991; 1994)는 Terra Nova Bay지역이 7-12.14 kyr BP. 사이에 deglaciation이 일어났다고 제안하였으며, Thomas and Bentley (1978), Denton et al., (1989)와 Licht et al., (1996)는 ice가 6-7 kyr BP.에 현재의 위치로 후퇴했다고 제안했다. 빙하기와 간빙기 남극 빙상의 크기와 구성을 이해하는 것은 과거 해수면 변동의 재구성에 중요하다. 연구지역에서 구조를 연구함으로써 빙기-간빙기의 주기 및 sea-ice의 분포 변화를 알아보고자 한다.

제 2절 연구방법

로스해에서 채취된 4개의 코어퇴적물, RS15-LC108, RS15-GC41과 RS15-GC67로부터 구조 추출을 하기 위하여 다음과 같이 시료처리방법을 사용 하였다. 건조 시료 2 g에 묽은 염산 (10%) 20 ml와 과산화수소수 20 ml를 첨가한 후 Hotplate위에서 1시간 이상 가열한다. 24시간 동안 놓아둔 후 다시 묽은 염산과 과산화수소수 15 ml를 첨가하여 1시간 이상 끓여 준 후 증류수를 부어 가라앉을 때까지 기다린다. 화학약품과 부유성 물질들을 제거하기 위해서 윗물을 따라내고 다시 증류수를 채운다. 이러한 decant과정을 세 번이상 반복하여 산이나 부유성 물질들을 모두 제거한다. 슬라이드글라스가 장치된 settling container에 넣고 저온의 건조기 안에서 건조 시킨 후 커버글라스를 덮는다.

산출된 구조 군집을 400배-1000배율의 광학현미경을 이용하여 관찰하고 동정하여 count한다. 구조각의 산정 시 중심 구조목은 중심부를 포함한 구조각의 2/3 이상이 보존되어 있을 경우 1개체로, 우상 구조목은 구조각이 1/2이상 남아서 감정이 가능하고 정측부가 나타나면 1개체로 산정한다. 생층서 확립을 위해서 산출되는 구조의 종별 산출빈도와 층준별 정량분석을 통하여 구조 군집대를 설정한다. 구조의 층준별 정량분석을 위해서는 계산식 $Abundance = ((A \times B) / (C \times D)) / E$ (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)를 사용 한다 (Scherer, 1994).

구조 종의 감정은 Heiden and Kolbe (1928), Hustedt (1930-1966, 1958), Johansen and Fryxell (1985), Manguin (1957, 1960), Medlin and Priddle (1990),

Peragallo (1921) 및 Simonsen(1992)의 문헌을 참고 하였다.

제 3절 연구 결과 및 토의

1. 연구 결과

가. RS15-LC108

로스해 바깥쪽 심해 Scott Seamounts 부근에 위치하고 있는 RS15-LC108코어로 부터 총 35개의 시료를 채취하였습니다. 이 코어는 수심 3690m, 코어 총길이는 17.5m입니다. 분석 결과 21속 48종의 규조를 감정 하였고, 개체수 농도는 $4.61 \times 10 \sim 48.68 \times 10^6$ g로 매우 적게 산출 되었습니다. 규조의 보존상태가 매우 불량하고 깨진 조각들이 많이 산출되었습니다. 산출된 규조 중 *Paralia sulcata*가 22.3%로 가장 많이 산출되었으며, 상대적으로 *Fragilariopsis kerguelensis* (9.5%), *Actinocyclus actinochilus* (9.2%), *A. octonarius* (8%), *Thalassionema nitzschioides* (7.4%)등이 풍부하게 나타난다 (Fig. 2).

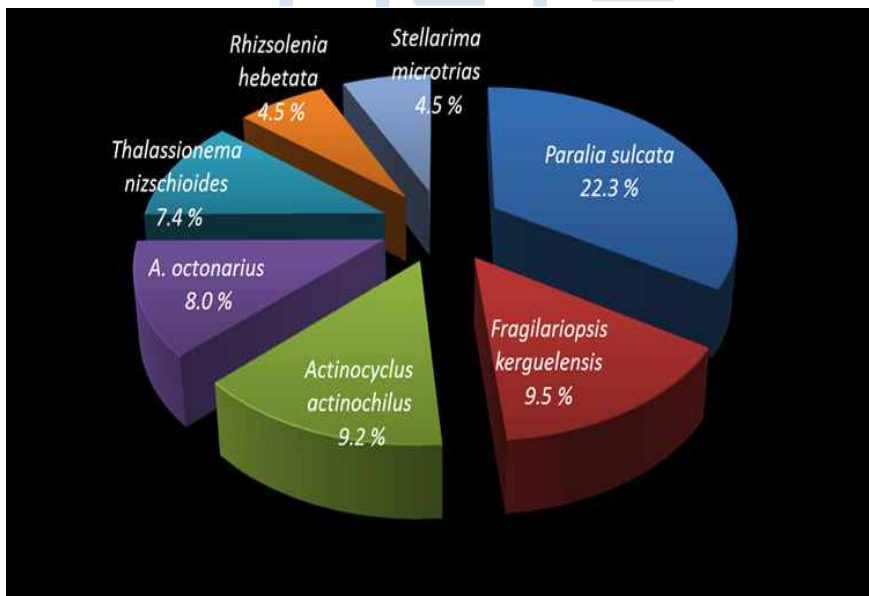


Fig. 2. RS15-LC108 에서 산출된 우세 종의 비율

규조 군집의 분포 변화에 따라서 3개의 군집대를 설정하였다 (Fig. 3).

규조 군집대 I (1700-1400cm): 규조 개체수 농도가 가장 높은 구간으로서 *Actinocyclus actinochilus*, *Eucampia antarctica*, *F. obliquecostata*, *Stellarima microtrias*와 *Thalassiosira gracilis*의 산출이 풍부하게 나타난다.

규조 군집대 II (1400-200cm): 군집대 I에서 풍부하게 나타나던 *Actinocyclus actinochilus*, *Eucampia antarctica*, *F. obliquecostata*, *Thalassiosira gracilis*의 산출이 급격하게 줄어 들고, *Stellarima microtrias*는 서서히 감소한다. 이와 반대로 *Dactyliosolen antarcticus*, *Rhizosolenia styliformis*의 산출이 증가하고, *Paralia sulcata*와 *Thalassionema nitzschioides*의 산출은 서서히 증가한다.

규조 군집대 III (200-0cm): 군집대 II에서 서서히 증가하던 *Paralia sulcata*와 *Thalassionema nitzschioides*의 산출이 감소하고, *Fragilariopsis kerguelensis*의 산출이 증가한다.

KOPRI
극지연구소

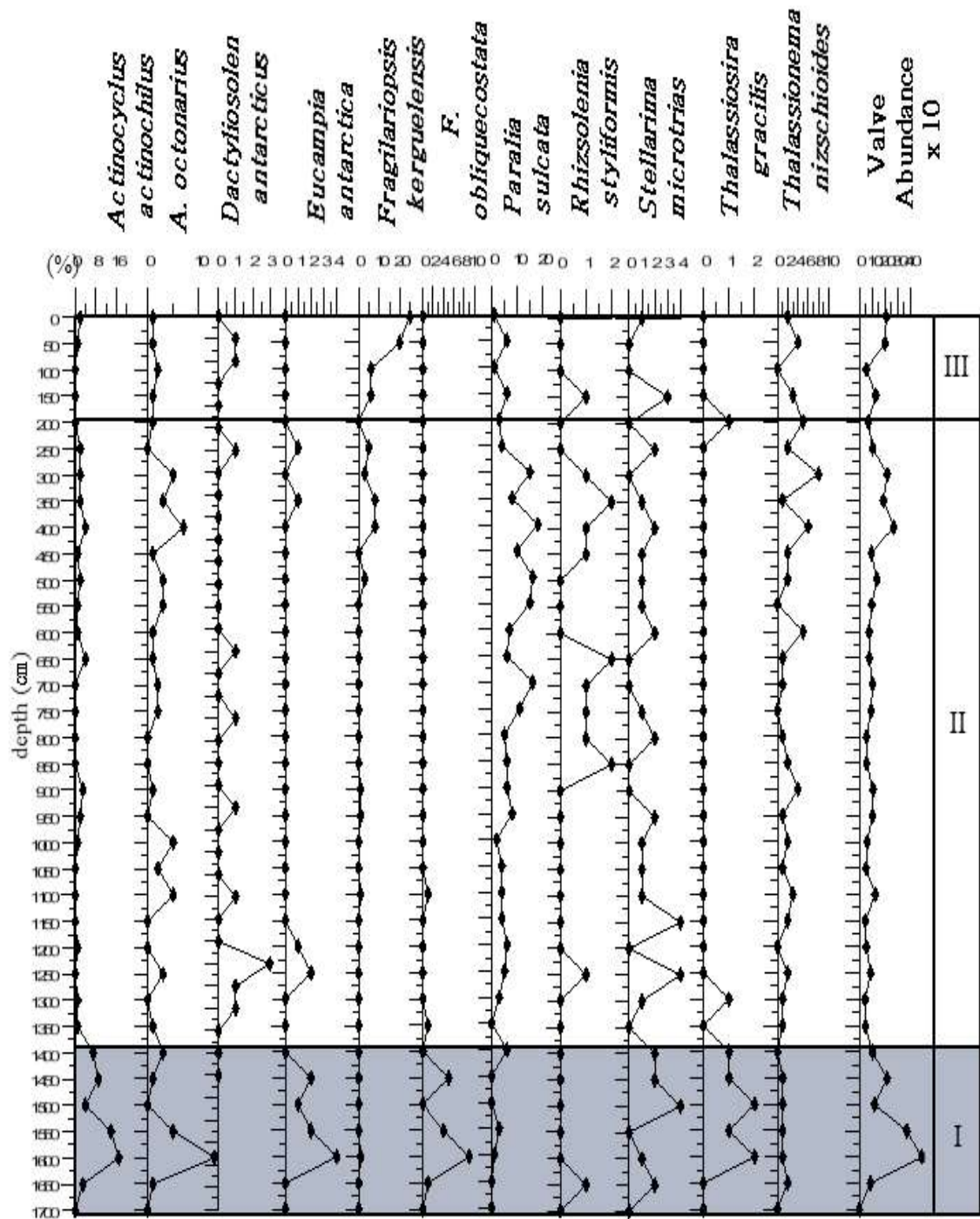


Fig. 3. RS15-LC108 코어로부터 선택된 지시종들의 수직산출 분포와 규조 군집대

나. RS15-GC41

RS15-GC41 코어는 총 길이 540 cm로 총 31개의 시료로부터 24속 56종의 규조를 감정하였다. 산출된 규조 절대 개체수 농도 범위는 $0.2 - 28.6 \times 10^6/\text{g}$ 로 전체적으로는 규조의 산출이 풍부하지는 않으나 95 cm층준에서 $28.6 \times 10^6/\text{g}$ 로 가장 풍부하게 산출되었다. 가장 풍부하게 산출된 종으로는 *Paralia sulcata* (28.4%)이며, 뒤를 이어 *Eucampia antarctica* var. *recta* (9.5%), *Actinocyclus octonarius* (2.8%), *Stephanopyxis turris* (2.8%)등으로 나타났다 (Fig. 4).

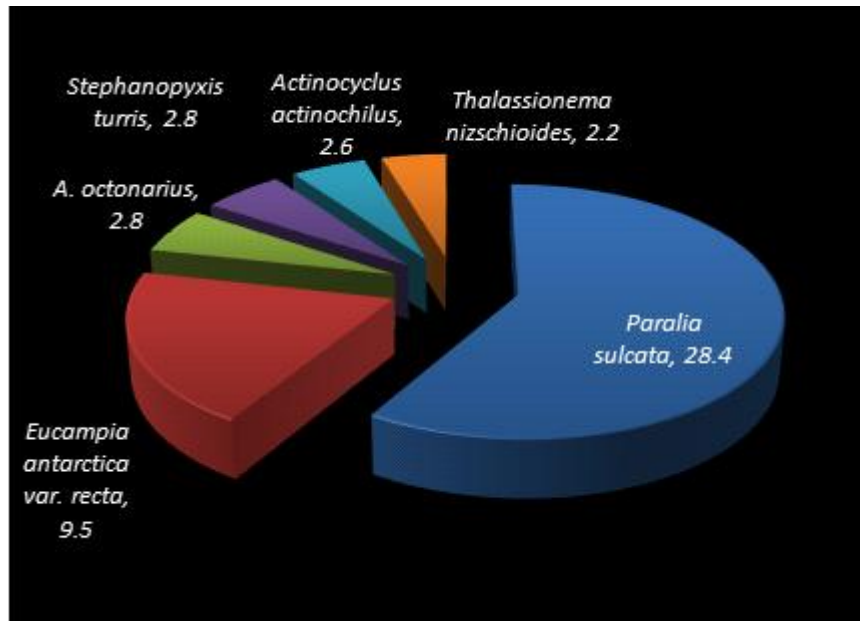


Fig. 4. RS15-GC41 에서 산출된 우세 종의 비율

규조 종의 수직 산출분포의 변화에 의해서 4개의 군집대를 설정하였다 (Fig. 5).

규조 군집대 I (530-345cm): Reworking을 지시해 주는 *Paralia sulcata*와 *Stephanopyxis turris*의 산출이 풍부하며, 연안지역에서 upwelling을 지시해 주는 *Thalassionema nitzschioides*도 점점 풍부하게 산출된다.

규조 군집대 II (345-171cm): sea-ice와 관계되는 종인 *Actinocyclus actinochilus*, *Eucampia antarctica* var. *recta*와 *Fragilariopsis sublinearis*가 산출된다.

규조 균집대 III (171-70cm): 규조 개체수 농도가 최대가 되며 sea-ice종과 더불어 open water 종인 *F. Kerguelensis*와 *T. lentiginosa*의 산출이 상대적으로 증가한다. 그리고, 규조 균집대 I에서 풍부하던 *Paralia sulcata*, *Stephanopyxis turris*, *Thalassionema nitzschioides*의 산출이 거의 없다. 또한 melt water condition을 선호하는 *F. ritscheri*의 산출이 풍부해진다.

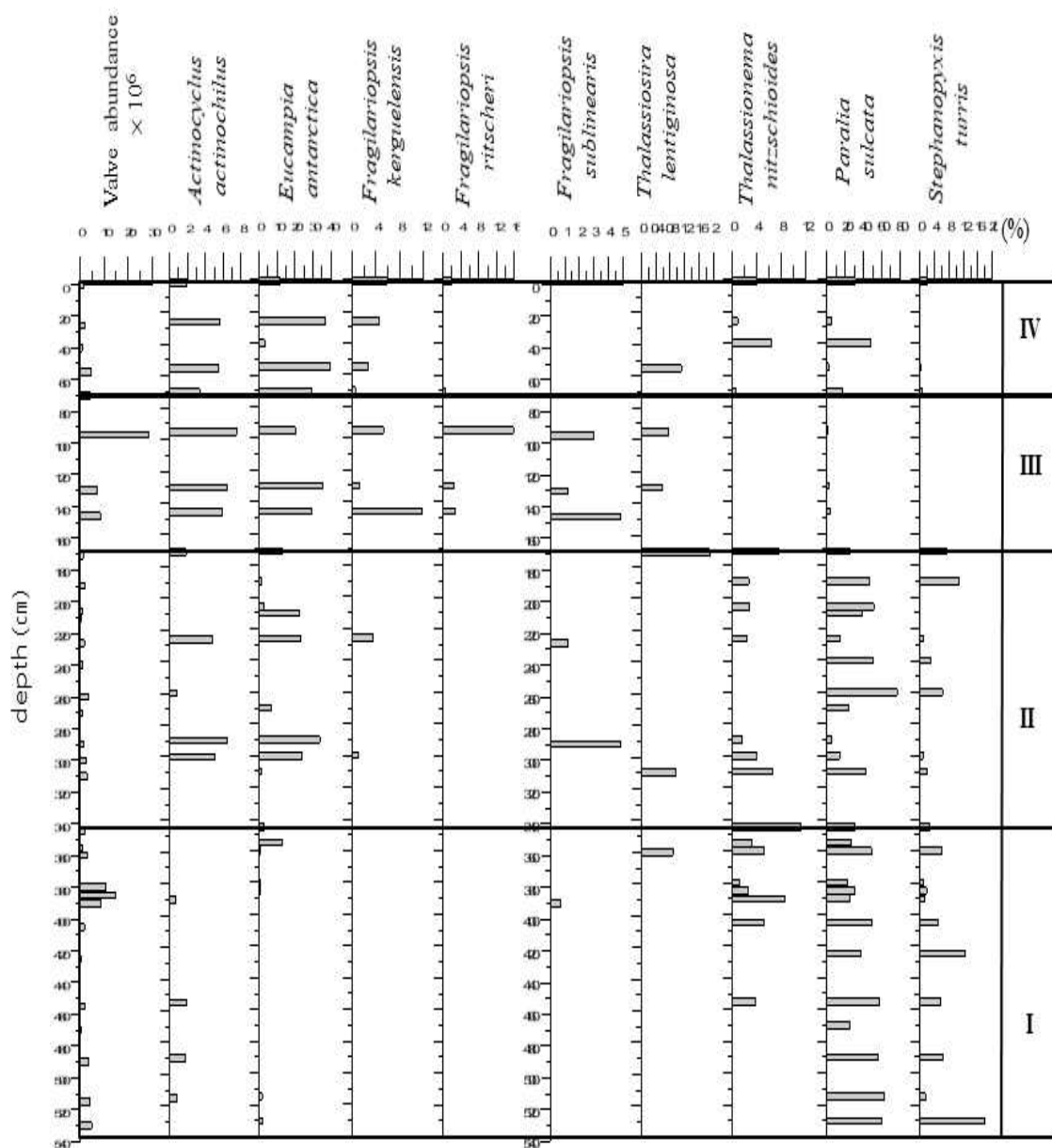


Fig. 5. RS15-GC41 코어로부터 선택된 지시종들의 수직산출 분포와 규조 균집대

규조 균집대 IV (70-0cm): 규조 개체수 농도가 다시 적어지며, sea-ice종인 *Actinocyclus actinochilus*, *Eucampia antarctica* var. *recta*가 꾸준히 산출되고 *F. ritscheri*가 다시 감소하고 *Paralia sulacata* 와 *Thalassionema nitzschioides*의 산출이 증가한다.

다. RS15-GC67

RS15-GC67 코어퇴적물은 총 길이 100cm이며, 각 5cm 간격으로 시료를 채취하여 규조를 분석하였다. 산출된 규조는 총 22속 46종이 감정되었으며, 가장 풍부하게 산출된 종은 *Eucampia antarctica* var. *recta*로서 36.1%를 차지하였다. 뒤를 이어 *Fragilariopsis curta* (18.9%), *F. ritscheri* (9.7%), *F. sublinearis* (8%), *Actinocyclus actinochilus* (4.2%)등이 산출되었다 (Fig. 6). RS15-GC67 코어에서 산출된 규조의 절대 개체수 농도는 $1.6 \sim 7.6 \times 10^7/g$ 범위를 나타낸다.



Fig. 6. RS15-GC67 에서 산출된 우세 종의 비율

RS15-GC67로부터 4개의 규조 균집대를 설정하였다 (Fig. 7).

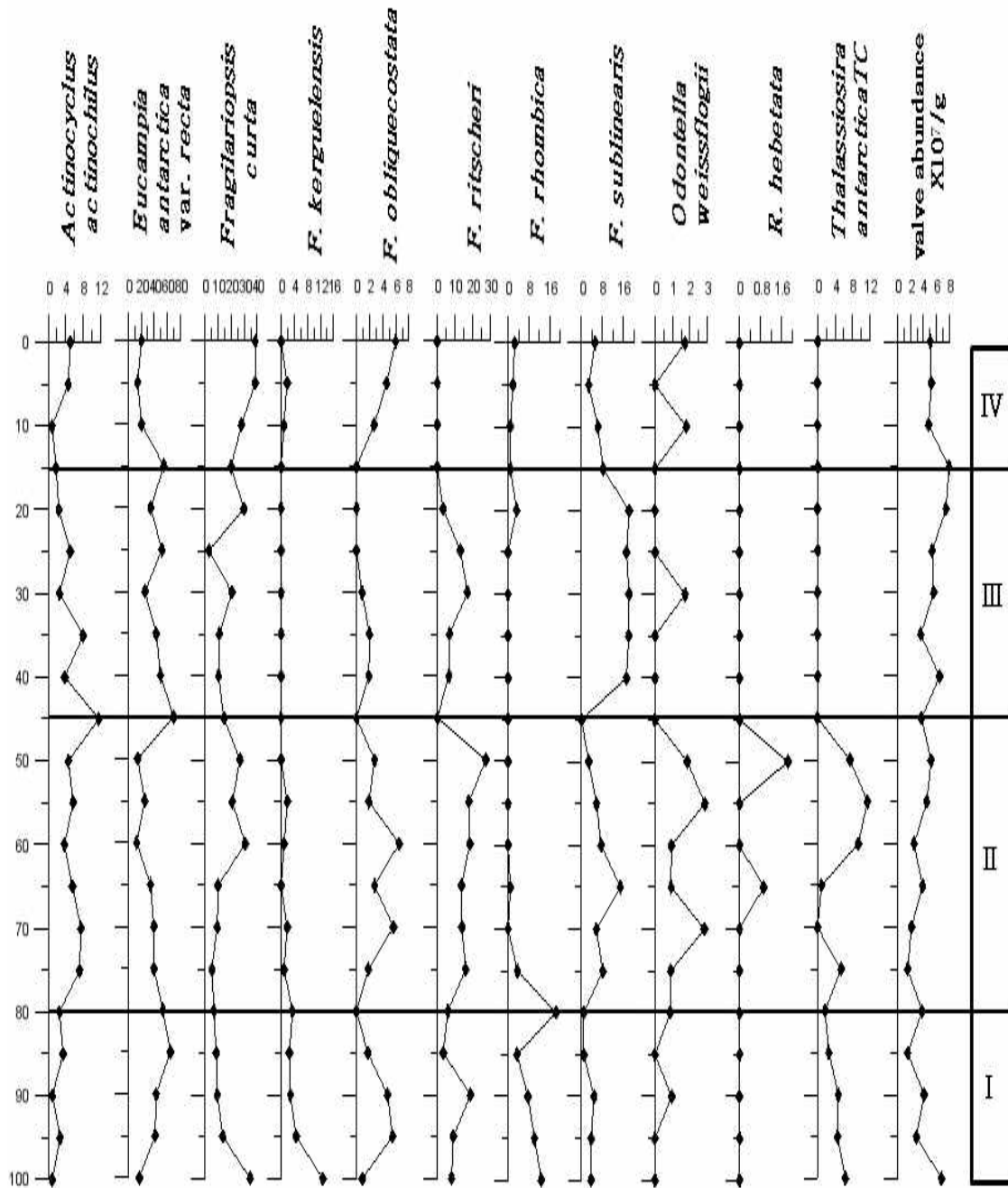


Fig. 7. RS15-GC67 코어로부터 선택된 지시종들의 수직산출 분포와 규모 균집대

규조 군집대 I (100 - 80cm): *Eucampia antarctica* var. *recta*와 *Fragilariopsis obliquecostata*, *F. rhombica*, *Thalassiosira antarctica* cold type의 산출이 풍부하게 나타난다.

규조 군집대 II (80 - 45cm): *Actinocyclus actinochilus*, *Fragilatiopsis cirta*, *F. obliquecostata*, *F. ritscheri*, *F. sublinearis*와 같은 sea-ice나 sea-ice관계종의 산출이 증가하면서, 동시에 *Odontella weissflogii*, *Rhizosolenia hebetata*와 *Thalassiosira antarctica*도 증가하는 혼합된 양상을 보이는 구간이다.

규조 군집대 III (45-15cm): 군집대 II에서 증가하던 *Odontella weissflogii*, *Rhizosolenia hebetata*와 *Thalassiosira antarctica*의 산출이 거의 없으며, *Chaetoceros resting spore*의 산출이 군집대 I과 II에서 보다 감소하였다. *Eucampia antarctica* var. *recta*와 *F. sublinearis*의 산출이 풍부하다.

규조 군집대 IV (15-0cm): 군집대 III에서 풍부했던 *Eucampia antarctica* var. *recta*와 *F. sublinearis*의 산출이 감소하고, sea-ice종인 *Fragilatiopsis cirta*, *F. obliquecostata*가 증가한다.

2. 교환경 해석 및 토의

가. RS15-LC108

RS15-LC108의 퇴적연대는 table 1에서 나타난 것과 같이 482cm에서 0.78Ma, 1418 cm에서 1.95Ma에 해당된다. 규조 시대 지시 종으로 *Actinocyclus ingen*는 LAD (last appearance datum)가 0.5-0.57 Ma에 해당되는데 RS15-LC108의 50cm에서 마지막으로 나타난다. 또한, *Fragilariopsis obliquecostata*의 FAD (First appearance datum)가 3.49-3.58 Ma에 해당되는데 이 코어의 1650 cm에서 첫 출현한다 (Fig. 8). 이와 같은 결과를 동위원소 연대와 비교해 보면 연구 코어의 하부가 3.39-3.58 Ma 이후에 퇴적이 되었으며 1418 cm에서는 1.95 Ma에 대비된다. 482 cm 층준이 동위원소 연대로 0.7 Ma 에 해당되며 최상부인 50 cm 층준은 0.5-0.57 Ma 이전에 퇴적되었음을 알 수 있다.

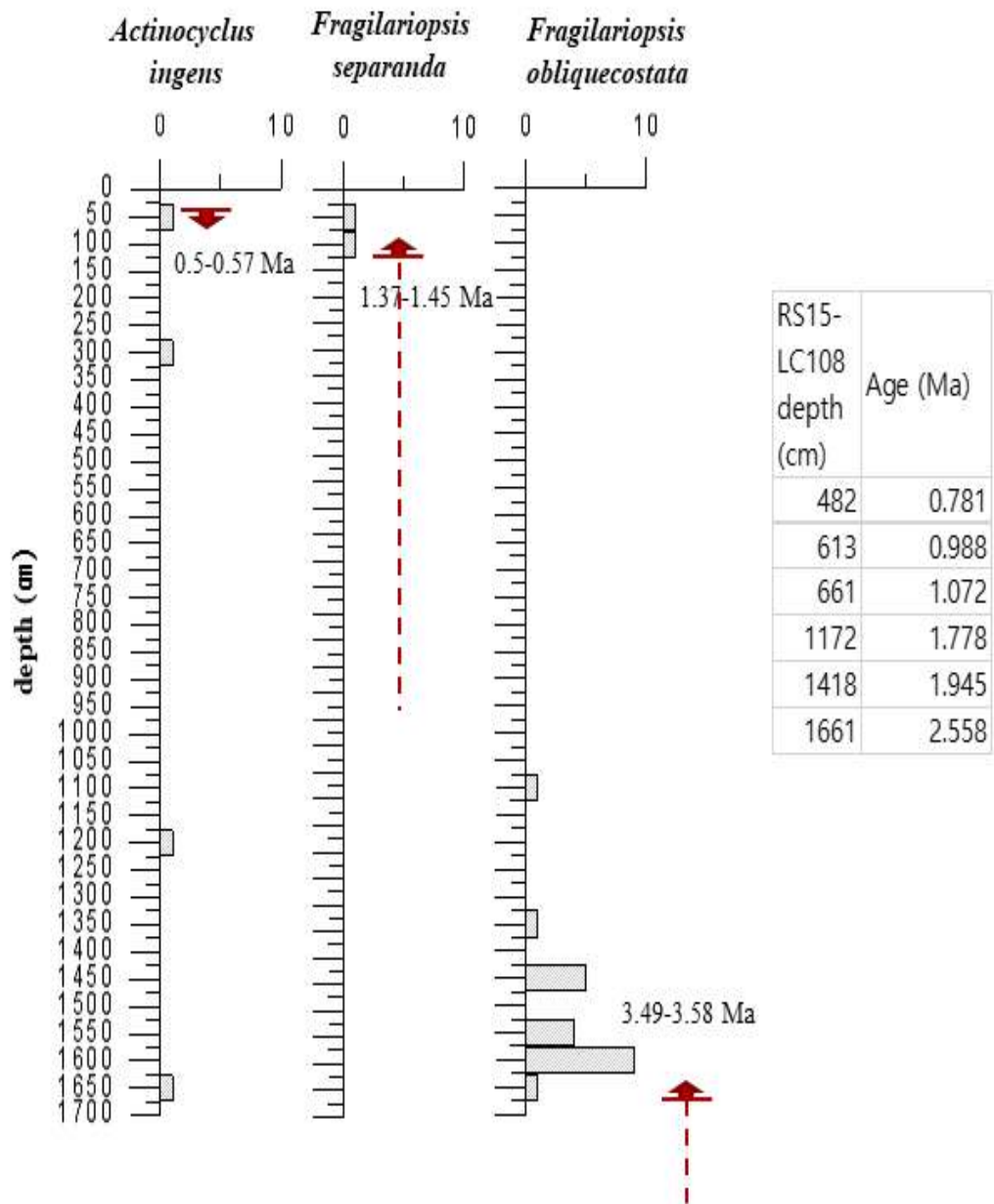


Fig. 8. RS15-LC108에서 시대 지시종을 이용한 퇴적시기 및 ^{14}C 절대연령 값의 비교

이를 토대로 산출된 규조 종들을 open ocean/sea-ice+open ocean종의 비를 그래프로 나타내 보면 Zone I에서는 sea-ice종이 우세하고 *Paralia sulcata*의 산출이 적게 나타나고, Zone II에서는 Sea-ice와 open ocean 종의 산출이 거의 비슷하나 상부로 갈수록 open ocean종이 증가하면서 *Paralia sulcata*의 산출도 증가하는 경향을 보인다. zone III에서는 open ocean종의 산출이 우세하면서, *Paralia sulcata*의 산출이 대폭 감소한다. *Paralia sulcata* 같은 long range종들은 일반적으로 단단해서 glacial transport에 살아남기 유리하기 때문에 Ross sea에서 reworking을 지시해 주는 종으로서 deglacial ice stream이 유입되는 지역에서 나타나는데, 이들의 산출이 zone II의 200-1000 cm 층준에 풍부하게 나타난다.

따라서, 이들을 종합해 보면 zone I은 glacial시기, zone II는 deglacial시기, zone III는 interglacial시기에 대비된다 (Fig. 9).

나. RS15-GC41

RS15-GC41코어의 퇴적연대는 1 cm에서 4 ka, 530 cm에서 411 ka에 대비되며, RS15-LC108의 퇴적물보다 더 젊은 층준으로 구성되어 있다. 규조 군집대와 age를 대비해 보면, 규조 군집의 조성이 10만년을 주기로 변화함을 알 수 있다. (Fig. 10). RS15-GC41에서는 *Paralia sulcata*와 *Stephanopyxis turris*의 산출이 zone I과 II에서 풍부하게 산출이 된다. 특히 zone I에서는 이 두종 외에도 *Denticulopsis maccollumii*의 산출이 360 -390 cm 구간에서 다량 산출된다. *Denticulopsis maccollumii*는 FAD가 16.34-16.91 Ma, LAD가 12.32-14.36 Ma에 해당되어 reworking되었음을 알 수 있다. 따라서, Zone I의 퇴적환경은 glacial 시기에 해당되며 zone II는 *Paralia sulcata*와 *Stephanopyxis turris*의 산출과 더불어 sea-ice와 open water 환경이 계절적으로 변화하는 지역에서 풍부한 *Actinocyclus actinochilus*가 증가한다. 또한 zone I의 최상부 부근에서부터 open water 종인 *Fragilariopsis kerguelensis*와 *Thalassiosira lentiginosa*의 산출도 적게 나타난다. 이러한 양상으로 보면 zone II는 아직까지는 sea-ice의 영향을 많이 받는 deglacial환경으로 생각된다. zone III에서는 *Paralia sulcata*와 *Stephanopyxis turris*의 산출이 거의 없어 reworking이 매우 적게 일어나는 환경으로 개체수가 가장 풍부하고 *Fragilariopsis kerguelensis*와 *Thalassiosira lentiginosa*의 산출이 zone II에서보다 많이 증가하고 sea-ice종의

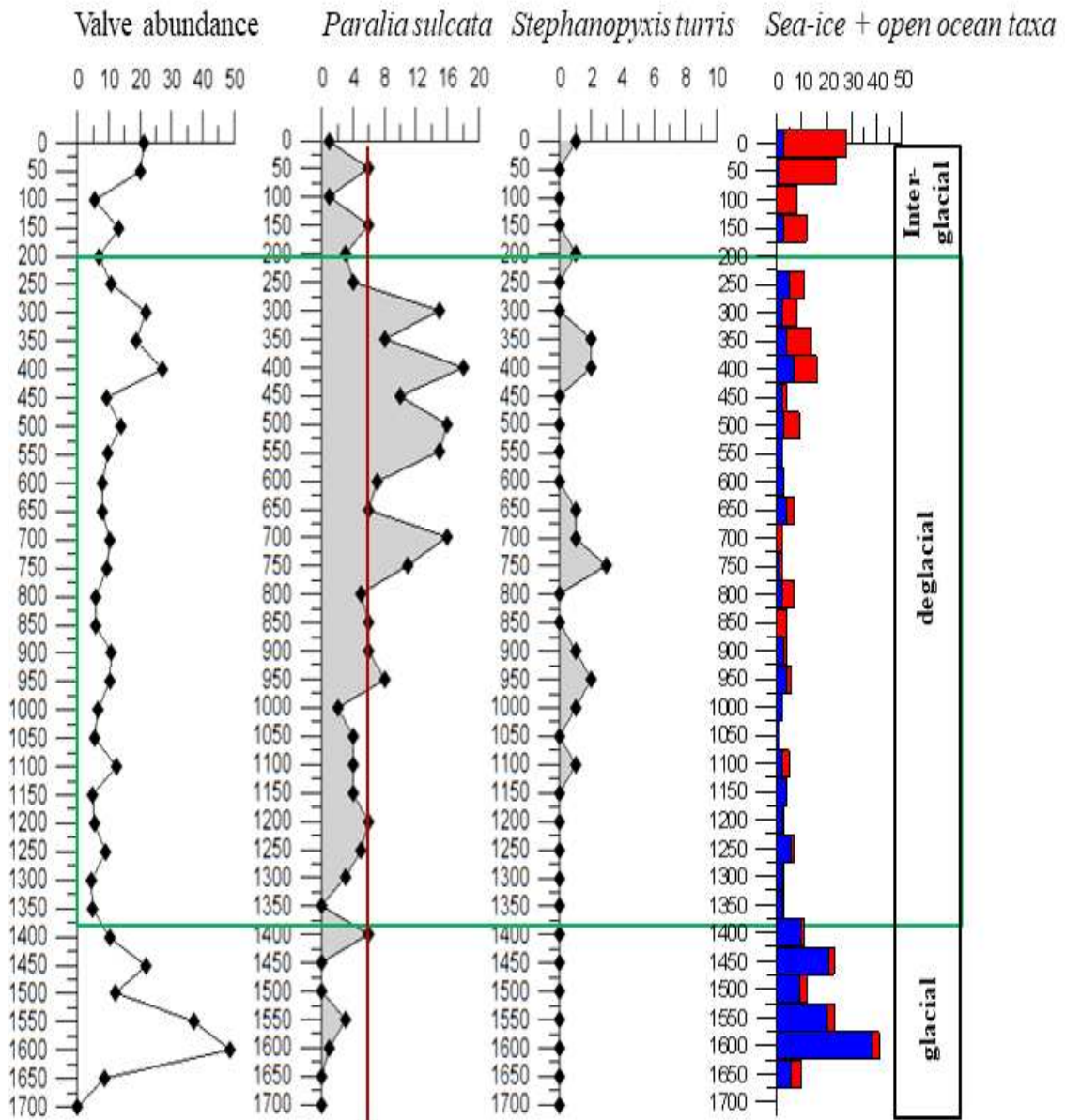


Fig. 9. RS15-LC108코어에서 sea-ice와 open ocean 종의 비교와 재이동 규모 *Paralia sulcata* 및 *Stephanopyxis turris*의 분포를 이용한 기후 변화

산출도 풍부한 것으로 보아 seasonal sea-ice의 영향을 받는 interglacial환경으로 생각된다. zone IV는 개체수가 급감하고 open ocean종의 산출이 줄어들고 다시 *Paralia sulcata*가 증가하는 것은 zone III에서보다 더 cold한 것으로 glacial로 transition되는 환경으로 생각된다. 규조의 데이터를 해석하면 위와 같은 해석을 할 수 있으나, 이를 지화학적, 퇴적학적 데이터에 의한 MIS연대와 비교를 해보면 약 10만 년을 주기로 데이터가 잘 맞는 것으로 나타난다 (Fig. 10).

다. RS15-GC67

RS15-GC67의 퇴적연대는 약 10 cm에서 17.8 ka, 95 cm에서 36.8 ka로 세 코어 중에서 가장 연대가 적은 젊은 층준이다. RS15-GC67에서 산출된 규조 중 open water environment의 지시자인 *Fragilariopsis kerguelensis*와 *Thalassiosira antarctica*의 산출과 sea-ice와 관계된 종으로서 *Actinocyclus actinochilus*, *Fragilariopsis curta*, *F. ritscheri*, *F. sublinearis* 등의 산출 분포에 의해 연구된 코어의 퇴적 환경은 군집대 I과 II는 겨울철에는 sea-ice의 영향을 받고 여름에는 open ocean환경인 interglacial시기였으며, 군집대 III은 주로 sea-ice 환경상태가 길어지면서 군집대 I과 II보다는 cold한 glacial 시기이며, 군집대 IV로 가면서 다량의 sea-ice종이 나타나면서 *F. kerguelensis*가 다시 산출되기 시작하는 것은 군집대 III보다 더 온난해지는 것으로 interglacial 시기로 다시 변화함을 나타낸다(Fig. 7).

RS15-GC67코어로부터 분석된 Opal값, TN, TC, TOC, CN치를 규조 데이터와 비교하여 보면 규조 군집대 I에서는 CN값이 높은 반면 규조 개체수 농도는 낮으며, 군집대 II에서는 opal값이 급증하고, TN, TC, TOC값이 점점 증가하는데 규조 개체수 농도도 점점 증가한다. 규조 군집대 III에서는 30 cm층준을 경계로 TN, TC, TOC값이 감소하는 반면 Opal값과 CN값이 증가하며 규조 개체수 농도도 증가한다. 규조 군집대 IV에서는 TN, TC, TOC값이 상대적으로 낮은 값을 보이며 규조 개체수 농도도 약간 감소한다. 지화학 데이터와 비교해 본 결과 TN, TC와 TOC 값의 변화가 규조 개체수 농도 값의 변화와 잘 일치하는 것으로 보인다(Fig. 11).

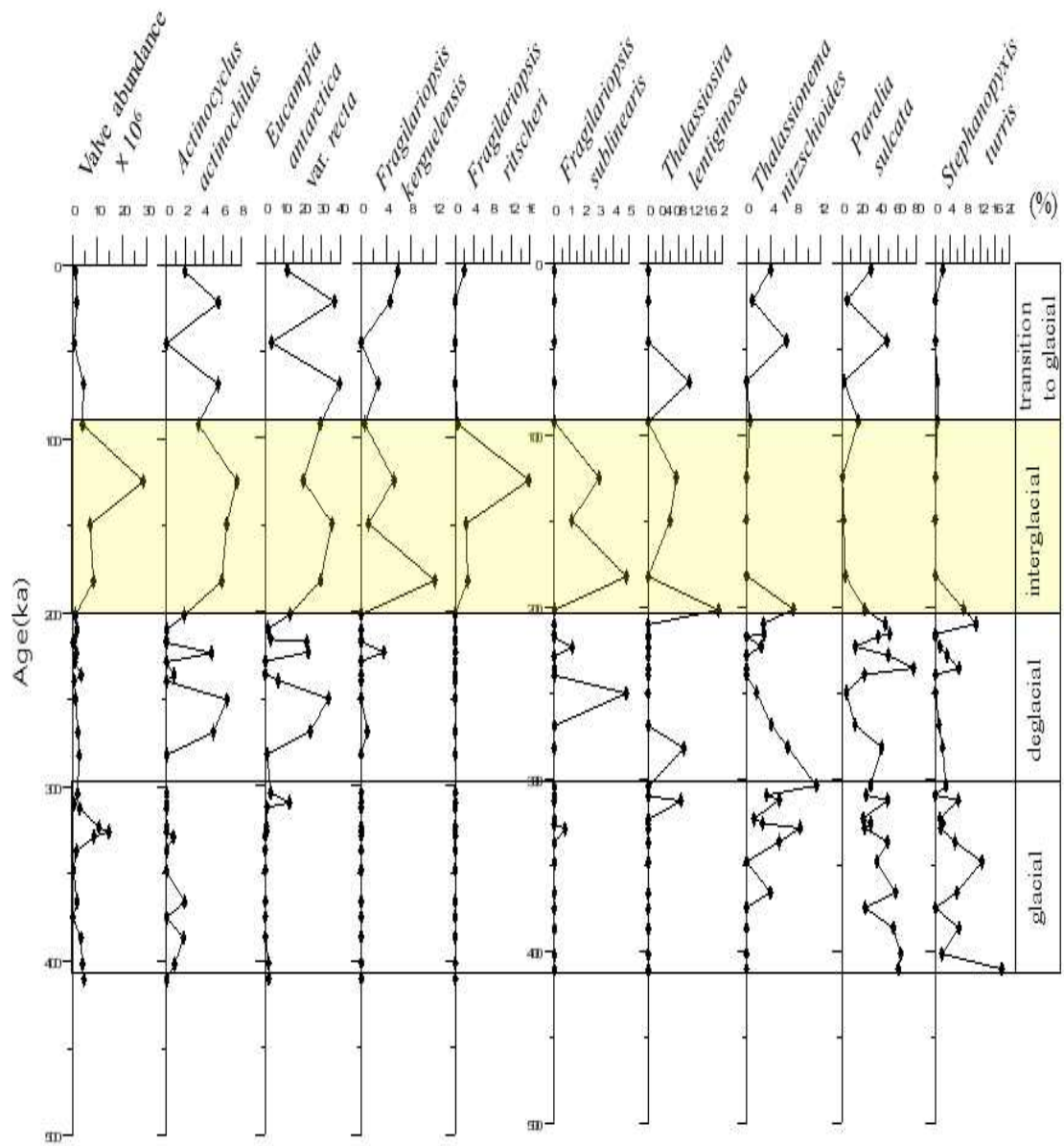


Fig. 10. RS15-GC41코어에서 age에 따른 규조 군집조성의 변화와 고기후 변화

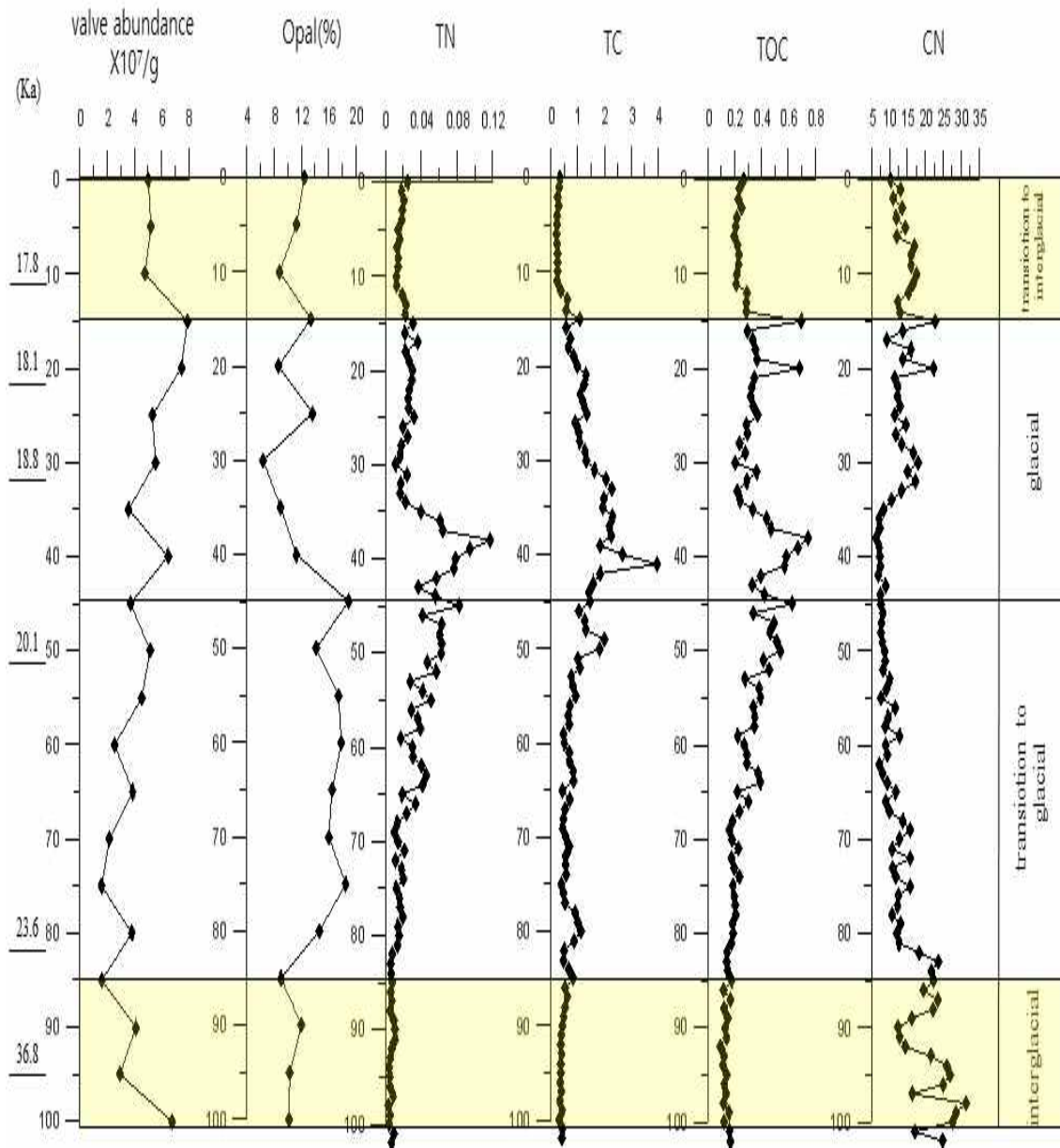


Fig. 11. RS15-GC67코어에서 규조 개체수 농도와 Opal, TN, TC, TOC와 CN의 값 비교 그래프와 age를 대비한 고기후 변화

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1절 연구개발목표의 달성도

| 연도 | 연구목표 | 연구내용 | 평가착안점 | 달성도 (%) |
|------------|--|----------|---|---------|
| 2017 년도 | 1지역 남극 코어퇴적물 로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석 | 시료'채취 | RS15-LC108코어퇴적물에서 총 35개의 시료 채취 | 100 |
| | | 규조분석 | 규조 관찰 결과 21속 48종 감정 | 100 |
| | | 생층서대설정 | 3개의 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-interglacial로 고기후가 변화 | 100 |
| 2018 년도 | 2지역 남극 코어퇴적물 로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석 | 시료'채취 | RS15-GC41 코어퇴적물에서 총 31개의 시료 채취 | 100 |
| | | 규조분석 | 규조 관찰 결과 24속 56종 감정 | 100 |
| | | 생층서대설정 | 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-transition to glacial로 고기후가 변화 | 100 |
| 2019 년도 | 3지역 남극 코어퇴적물 로부터 규조 생층서분대 확립 및 고환경 해석 | 시료'채취 | RS15-GC67코어퇴적물에서 총 21개의 시료 채취 | 100 |
| | | 규조분석 | 규조 관찰 결과 22속 46종 감정 | 100 |
| | | 생층서대설정 | 4개의 규조 분대 설정 | 100 |
| | | 환경지시종 분석 | 대자율 값 및 탄소 동위원소 절대 연령 값을 비교한 결과 홀로세 기후 변화 추적 | 100 |
| | | 고환경 변화 | interglacial-transition to glacial-glacial-transition to interglacial으로 고기후가 변화 | 100 |

제 2절 대외 기여도

로스해 인근에서의 국내 규모 연구가 아직까지 활발하게 이루어지지 못하고 있었으며, 그 동안에는 세종기지가 위치해 있는 서남극반도 주변을 위주로 수행되어 왔다. 이번 연구 결과는 국내의 연구로 로스해 인근의 1차 생산자인 규조에 대한 데이터를 축적하면서, 퇴적, 지화학적 연구결과와 상호 보완하여 로스해 인근의 빙기-간빙기에 대한 고기후 변화 및 해빙의 분포변화에 대한 연구 결과물을 발표할 수 있는 기틀을 마련하였다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

로스해는 아델리 펭귄, C형 범고래, 남극 밍크고래, 웨델 바다표범, 이빨고기와 같은 해양 생물들의 주요 서식지로서, 조업활동과 기후 변화 등에 의해 위협에 직면해 있다. 따라서, 5년간의 협의 끝에 2016년 제 35차 카밀라 총회에서 남극 로스해에 세계 최대 면적의 해양보호구역지정을 하였다. 전지구적 기후 변화로 인하여 로스해는 염분의 농도가 빠르게 낮아지고 있는 지역으로서 해수 순환에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

지난 34년간의 위성기록 중 남극의연해빙면적은 10년당 약 1.5%씩 증가했다. 그러나 벨링스하우젠 해(Bellingshausen sea)와 아문센 해(Amundsen sea)해에서 나타난 감소 경향과는 다르게 지역적 차이가 있지만, 로스 해에서 해빙면적이 더 크게 증가하기도 하였다.

남극 서부 얼음 유출의 대부분은 로스와 룬-필히너 빙봉을 키우는 빙하류를 통해 일어나지만, 현재는 얼음을 얇게 만드는 어떤 기작도 관측되지 않으며, 오히려 두꺼워지거나 평형을 이루고 있다.

따라서, 로스해 인근에서의 1차 생산자인 규조의 연구는 남극 시스템에서 기후 변화에 대한 1차 생산력의 변화와 이들을 이용한 빙기-간빙기의 고환경 변화를 해석하는데 매우 중요하며, 이들 데이터의 축적은 남극 로스해 인근에서 기후 변화 연구에 연구기반을 제공할 수 있다.

그러므로, 장보고 기지를 기반으로 수행될 연구 프로그램의 하나로 로스해 인근의 규조류에 대한 연구가 매우 필요하며, 아라온호를 활용하여 기후변화의 복원 연구를 수행 할 수 있다.

지구환경변화와 생태계의 변화를 연구하는데 있어서 세계적인 연구 역량을 추격하려면 퇴적학적 및 지화학적 연구와의 연계성은 매우 중요하며 데이터의 상호 보완으로 보다 정밀한 고환경 변화 양상을 이끌어 낼 수 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

남극 대륙에서의 얼음의 이동은 강력한 겨울바람에 의해서 일년의 주기를 가진다. 이러한 변동이 가장 규칙적인 곳은 로스해, 아문젠해와 벨링스하우젠해로 약 3-6년의 주기를 갖는다(Venegas et al., 2001).

GRACE 위성 중력 자료의 해석에 따르면 남극반도, 작은 빙하 그리고 근처의 빙모를 포함해서 2002년 4월부터 2005년 7월 사이에 연간 139 ± 73 Gt이 유실되었다(Velicogna and Wahr, 2006). Ramillien et al.(2006)은 독립적인 분석을 통하여 2002년 7월부터 2005년 5월동안 동남극은 연간 67 ± 28 Gt의 증가, 서남극은 연간 107 ± 23 Gt의 축소, 남극전체는 연간 40 ± 36 Gt의 순 손실을 발견하였다.

아문젠해와 남극반도에 있는 작은 빙봉에서 연간 1m 또는 국지적으로 5m이상 빠르게 얇아지고 있는 현상이 1992년부터 2001년 사이 많이 발견되었으며, 라센 B 빙봉의 대부분이 붕괴되기 5주 이전에 약 연간 1m의 얇아지는 현상이 나타났다(Shepherd et al., 2003; Zwally et al., 2006; Scambos et al., 2003). 또한, 라센 B 빙봉 붕괴 전에 지난 50년 동안 국지적으로 온도가 1.5°C 이상 증가하였고(Vaughan et al., 2003), 이로 인해 빙봉 위에서 여름철 용해 및 용해수에 의한 넓은 연못의 생성이 증가하였다.

로스해와 로스 빙봉 근처에서 지난 40년간 염분 감소가 관측이 되었으며(Jacobs et al., 2002), 오스트레일리아-남극 분지에 존재하는 로스 빙봉 하류에서 AABW 또한 차가워졌고, 염분이 낮아 졌다(Aoki et al., 2005). Jacobs et al. (2002)은 이러한 저염화가 강수량증가와 해빙 생성의 감소 및 서남극 빙상의 해빙 용해의 증가 등에서 기인된 것으로 보았다.

따라서, 전지구적인 기후 변화의 양상을 구체적으로 관측하고 원인을 규명하기 위해서는 빙봉 및 빙상의 규모, 해빙의 두께 및 크기 변화와 같은 자료들의 축적으로 고기후 및 고해양 변화에 대한 활발한 연구가 이루어져야 한다. 과거 43만년동안 빙기-간빙기의 주기는 10만년이라는 큰 진폭을 주기를 가지며, 이와 같은 사실은 연구코어 RS15-GC41,코어의 결과에서도 확인되었다.

제 7 장 참고문헌

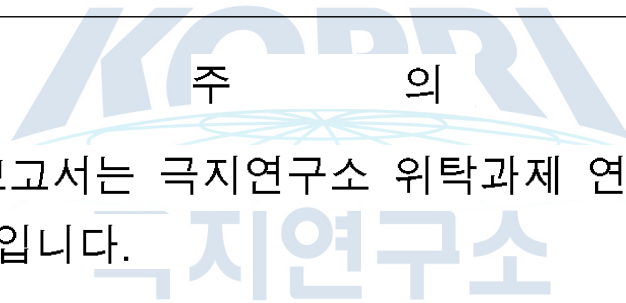
- 박영숙, 이종덕, 윤혜수, 윤호일, 2001, 남극 브랜스필드 해협 퇴적물에서 산출된 규조류에 의한 고환경 연구. 고생물학회지, 17(2), 99-111.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 윤혜수, 김효정, 2002, 드레이크해협 남부 코어퇴적물에서 산출된 제4기 규조화석 연구. 지구과학회지, 23(5), 442-453.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 윤혜수, 2003, 남극 드레이크해협 극전선 부근 시추코어퇴적물(DP00-02)에서 규조화석을 이용한 고환경 연구. 지질학회지, 39(3), 337-346.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 윤혜수, 2004, 서남극 맥스웰만에서 산출된 홀로세 규조 연구. 지질학회지, 40(4), 455-468.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 이재일, 2007a, 남극 사우스오크니 제도 서부 해역의 코어 퇴적물에서 산출된 규조 군집. 지질학회지, 43(1), 33-42.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 유규철, 2007b, 서남극 브랜스필드 해협 동부분지 내 규조 군집과 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, 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 쉘랜드 군도 북동쪽 대륙대 코어퇴적물에 나타나는 해빙기에 대한 고해상 규조 분석 연구. 지질학회지, 47(4), 363-369.
- 이영길, 1996, 남극 브랜스필드 해협 코어 퇴적물의 미고생물(규조)학적 연구. 고생물학회지, 12(1), 1-21.
- Aoki, S., Rintoul, S.R., Ushio, S., Watanabe, S., 2005: Freshening of the Adeie Land bottom water near 140° E. Geophys. Res. Lett., 32, L23601.
- Bak, Y.S., Yoo, K.C., Yoon, H.I., Lee, J.D., Yun, H., 2007, Diatom evidence for Holocene paleoclimatic change in the South Scotia Sea, West Antarctica. Geosciences Journal, 11(1), 11-23.
- Bak, Y.S., Yoo, K.C., Yoon, H.I. 2014, Late Quaternary climate changes around

- the Elephant Islands, Antarctic Peninsula. 18(4), 495-501.
- Bak, Y.S., Yoo, K.C., Lee, J.I., Yoon, H.I., 2018. Glacial-interglacial records from sediments in Powell Basin, Antarctica. *Antarctic Science*, 30(6), 371-378.
- 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., Fogwill, C.J., Kubik, P.W. and Sugden, D.E. 2006. Geomorphological evidence and cosmogenic $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ exposure ages for the Last Glacial Maximum and deglaciation of the Antarctic Peninsula Ice Sheet. *Geological Society of America Bulletin*, 118, 1149 - 1159.
- 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.
- Ding, G., Novak, J.M., Herbert, S. and Xing, B. 2002. Long-term tillage effects on soil metolachlor sorption and desorption behavior. *Chemosphere*, 48(9), 897-904.
- Domack, E.W., Hilfinger, M., Franceschini, J., Licht, K., Jennings, A., Andrews, J.T., Shipp, S. and Anderson, J.B. 1995. New stratigraphic evidence from the Ross Sea continental shelf for instability of the West Antarctic ice sheet during the late Pleistocene. In *First Congress on Sedimentary Geology*, St. Pete Beach, Florida, Tulsa, Oklahoma: SEPM
- Domack, E.W., Jacobson, E.A., Shipp, S. and Anderson, J.B. 1999. Late Pleistocene - Holocene retreat of the West Antarctic Ice Sheet system in the Ross Sea: Part 2 - Sedimentologic and stratigraphic signature. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 1517 - 1536.
- Dunbar, R.B., Anderson, J.B., Domack, E.W. and Jacobs, S.S. 1985. Oceanographic influences on sedimentation along the Antarctic continental shelf. *Antarctic Research Series*, 43, 291-312.
- 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.
- Jacobs, S.S., Giulivi, C.F. and Mele, P.A., 2002: Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science*, 297(5580), 386-389.
- Kim, S.H., Yoo, K.C., Lee, J.I., Khim, B.K., Bak, Y.S., Lee, M.K., Lee, J.M., Domack, E.W., Christ, A.J., Yoon, H.I. 2018. Holocene paleoceanography of Bigo Bay, west Antarctic Peninsula: Connections between surface water productivity and nutrient utilization and its implication for surface-deep water mass exchange. *Quaternary Science Reviews*, 192, 59-70.
- Licht, K.J. 1995. Marine sedimentary record of ice extent and late Wisconsin deglaciation in the western Ross Sea, Antarctica. MS thesis, Boulder, University of Colorado, 144 pp.
- Licht, K.J., Hilfinger, M.F., Franceschini, J.M., Domack, E.W., Jennings, A.E. and Andrews, J.T. 1995. New marine stratigraphic evidence for glaciation across the Ross Sea continental shelf: ice sheet or ice shelf? In VII International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Siena, Italy.
- 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.
- Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography*, 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- Pudsey, C.J. and Evans, J. 2001. First survey of Antarctic sub-ice shelf sediments reveals mid-Holocene ice shelf retreat. *Geology*, 29(9), 787-790.
- Ramillien, G. et al., 2006: Interannual variations of the mass balance of the Antarctica and Greenland ice sheets from GRACE. *Global Planet. Change*, 53, 198-208.
- Scambos, T., Hulbe, C. and Fahnestock, M., 2003: Climate-induced ice shelf disintegration in the Antarctic Peninsula. In: *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives* [Domack, E., et al. (eds.)]. Antarctic Research Series 79, American Geophysical Union,

Washington, DC, 79-92.

- 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.
- Shepherd, A., Wingham, D., Payne, T. and Skvarca, P., 2003: Larsen Ice Shelf has progressively thinned. *Science*, 302, 856-859.
- Shipp, S. and Anderson, J.B. 1995. Late Quaternary deglacial history of Ross Sea, Antarctica: results from recent seismic investigation. In VII International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Siena, Italy.
- Taviani, M. and Anderson, J. 1995. Response of biogenic carbonate factories to ice sheet and ice shelf dynamics: a largely deglaciaded Ross Sea since isotope stage 3? In VII International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Siena, Italy
- Thomas, R.H. and Bentley, C.R. 1978. A model for Holocene retreat of the West Antarctic Ice Sheet. *Quaternary Research* 10, 150 - 70.
- Vaughan, D.G., et al., 2003: Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Clim. Change*, 60, 243-274.
- Velicogna, I. and Wahr, J., 2006: Measurements of time variable gravity show mass loss in Antarctica. *Science*, 311(5768), 1754-1756.
- Venegas, S.A., Drinkwater, M.R. and Shaffer, G., 2001: Coupled oscillations in Antarctic sea ice and atmosphere in the South Pacific sector. *Geophys. Res. Lett.*, 28(17), 3301-3304.
- Yoon, H.I., Yoo, K.-C., Bak, Y.S., Lim, H.S., Kim, Y. and Lee, J.I., 2010, Late Holocene cyclic glaciomarine sedimentation in a subpolar fjord of the South Shetland Islands, Antarctica, and its paleoceanographic significance: Sedimentological, geochemical, and paleontological evidence. *Geological Society of America Bulletin* 122, 1298-1307.
- Zwally, H.J., et al., 2006: Mass changes of the Greenland and Antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea level rise:1992-2002. *J. Glaciol.*, 51, 509-527.



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.