

TSP16010-052-12

홀로세 남극 퇴적물에서 구조를 이용한
고환경 연구



전북대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “서남극 빙붕변화 관측시스템 구축 및 제4기 해빙사 복원 기술 개발에 관한 연구” 과제의 위탁연구 “홀로세 남극 퇴적물에서 규조를 이용한 고환경 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2017 . 1 .

총괄연구책임자: 윤 호 일

위탁연구기관명: 전북대학교 산학협력단

위탁연구책임자: 박 영 속

위탁참여연구원: 신 문 상

요 약 문

I. 제 목

홀로세 남극 퇴적물에서 규조를 이용한 고환경 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

지구 평균 표면 온도는 과거 100년 (2005년까지)동안 0.74도 정도 증가하였으며 최근 50년동안의 온난화율은 과거보다 거의 2배정도 크다. 또한, 지구의 평균 해수면이 1993년부터 2003년까지 연평균 약 3.1mm의 상승을 보였고, 빙상의 내부에서 그린란드와 남극 내륙의 빙상의 유출속도가 증가하고 있다. 1960년대 이후로 빙하와 빙상, 해수면과 빙상(ice sheet)에 대한 포괄적인 관측이 가능해 졌으나 그 이전의 자료는 퇴적물에 보관되어 있다. 빙하코어는 지난 74만년의 고기후 기록(EPICA community members, 2004)이 보존되어 있고 심해퇴적물(Lisiecki and Raymo, 2005)과 퇴스층(Ding et al., 2002)은 수 백만년을 포함하는 일련의 빙기-간빙기 주기가 기록되어 있다. 규조는 남대양에서 일차 생산자의 75%이상을 차지하며 규산과 탄소의 전 지구적 순환에 매우 중요한 역할을 하고 있으며(Treguer et al., 1995), 특별한 환경에 제한되어 분포하는 환경 지시종들이 매우 풍부하고 다양하게 분포한다. 따라서 규조는 영양 염류의 유용성과 비(El-Sayed, 1971; Burckle et al., 1987), 표층수의 온도(Neori and Holm-Hansen, 1982), Sea-ice의 분포(Abelman and Gersonde, 1991)와 수괴의 안정성(Leventer, 1991)등과 같은 남대양의 해양학적 복원자료에 매우 중요한 지표가 되며(Crosta et al., 2004), 퇴적물에서 산출되는 규조 군집의 자료는 빙기-간빙기의 변화를 제시한다. 남극지역에서의 규조 연구는 19세기 중반이래로 꾸준히 연구되어 오고 있으며, 본 연구 개발의 목적은 규조 군집을 분석하여 규조 생층서대를 확립하고 홀로세 동안 일어난 고환경 변화를 해석하는데 있다. 이러한 연구 데이터는 극지 기후변화 기록을 복원하는데 기여하고, 아

직까지 미흡한 미고생물학적 극지 연구데이터를 축적하기 위해 매우 필요한 연구이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

과거 빙하기에 대한 고기록은 빙상이 온난화에 반응하여 축소되고 냉각화에 반응하여 성장하였음을 가리키며, 이 기록들은 축소가 성장보다 훨씬 빠를 수 있다는 것을 보여 줬다(Clark et al., 1999). 남극 반도를 따라 흐르는 빙하(Scambos et al., 2004), 서남극으로부터 (Thomas et al., 2004) Pine Island Bay와 Amundsen 해 근처로 유출되는 빙하, 그린란드의 Jakobshavn 빙하(Joughin et al., 2004)의 흐름속도와 증가에 주의를 집중할 필요가 있다. 20세기 동안 빙하는 일반적으로 1930년대와 1940년대, 그리고 1990년 이후 가장 크게 크기가 줄었다(Oerlemans, 2005). 몇몇 극빙하의 얇아짐과 쇠퇴 가속은(Thomas et al., 2004) 해양과 대기의 온난화에 의해 유도된 빙상의 분리라는 결과로 나타난다. 남극 빙상은 폭 넓은 표면을 녹이기에는 너무 추워서 그대로 유지될 것으로 보이나 빙상으로부터 얼음의 소실로 인하여 해양으로 빙하의 유출이 상당히 증가를 일으킬 것으로 보인다. 이러한 남극의 환경에서 과거 퇴적물 연구는 매우 중요하며 서남극 빙봉 변화 관측시스템 구축 및 제4기 해빙사(deglaciation history)복원 기술 개발이라는 본과제의 목표에 맞게 빙기와 간빙기의 기후변화를 추적하고 퇴적당시의 고해양 환경을 복원하기 위해서 남극 코어 퇴적물로부터 규조분석을 수행하였다.

연구 코어 WAP13-GC47은 Bigo Bay (65.612793 S, 64.758447 W, 673 m water deep)인근해역에서 획득하였으며, 총 길이 560 cm에서 각 20 cm 간격으로 29개의 시료를 채취하였다. 규조 화석 추출 실험을 하기 위하여 Scherer's (1994)의 시료처리 방법을 사용한다. 건조 시료 2 g에 묽은 염산 (10%) 20 ml와 30 % 과산화수소수 25 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 건조시킨후 Naphrax를 이용하여 커버글라

스를 덮는다. 현미경 관찰을 위해서 제작된 슬라이드 글라스를 Nikon E400 현미경을 이용하여 구조미화석을 관찰하고 사진 촬영한다. 구조의 층준별 정량분석을 위해서는 Scherer(1994)의 연구 방법을 사용하며 절대량의 계산은 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 사용한다.

IV. 연구개발결과

서남극 Bigo Bay 바깥쪽에서 채취한 코어퇴적물 WAP13-GC47로부터 각각 23속 48종의 구조 화석이 감정되었으며, 구조 개체 수 농도는 $2.7 \sim 7.5 \times 10^7/g$ 범위에 해당한다. Bigo Bay 인근에서의 구조 연구는 국내에서 처음 수행되는 것이며, 구조 화석 군집 구성을 살펴보면 주로 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*, *E. antarctica* var. *recta*, *Fragilariopsis kerguelensis*, *F. curta*, 와 *Thalassiosira antarctica* 등이 주로 산출되었다. 이들 구조 군집의 산출양상에 의해 3개의 구조 군집대를 설정하였다. 구조 군집대 I은 560-420 cm구간에 해당하며 전반적으로 온난한 시기(warm)에 퇴적되었고, 구조 군집대 II는 420-160 cm구간에 해당하며 온난한 시기(warm)에서 한랭한 시기(cold)로 변화한다. 또한, 280 -240 cm 구간에서는 한랭한 시기임에도 불구하고 공해종들의 산출이 증가하는데 이는 주변의 퇴적물들이 유입된 결과로 생각된다. 구조 군집대 III은 160-0 cm구간에 해당하며 한랭한 시기(cold)에 퇴적되었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

전지구 평균기온은 20세기 이후 꾸준히 상승하였으나, 전기간 동안 증가하는 경향을 나타낸 것은 아니다. 최근 15년(1998~2012년)에는 전지구 평균기온의 상승세가 매우 약해져, 온난화의 “중단(hiatus)”기간이라고까지 여겨지고 있다. 이 기간에 전지구 평균기온은 $0.04^{\circ}C/10년$ 정도의 상승경향을 나타냈는데, 이는 1951~2012년 기간의 상승률인 $0.11^{\circ}C/10년$ 의 1/3 정도에 지나지 않는다. 기후 시스템의 수십 년 주기 내부 변동성, 에어로졸의 영향, 극진동 및 엘니뇨와 같은 대규모 기후변동성과의 관련성 등이 그 원인으로 제시되었으나, 아직 그 명확한 원인은 밝혀지지 않고

있다. 구조 군집을 이용한 고기후 기록을 통해 더 폭넓은 과거 기후변동성 관점에서 대기조성, 해수면, 기후(가뭄 및 홍수와 같은 극한현상 포함)의 현재 변화에 대한 이해와 미래 전망이 가능해진다. 장기적으로 볼 때는 기후 시스템에 대한 이해를 증진시켜 미래의 기후변화에 올바르게 대처할 수 있는 바탕을 마련하는 효과가 있다.



S U M M A R Y

I. Title

Research of paleoenvironmental change using diatoms from Holocene core sediments in Antarctica

II. Purpose and Necessity of R&D

The average global surface temperature has increased by 0.74 °C over the past 100 years (until 2005), and the global warming rate during the last 50 years was twice. Also, the average global sea level has risen by an average of approximately 3.1 mm per year from 1993 to 2003 and the velocity of ice sheets in Greenland and Antarctic inland is increasing. Comprehensive observations of glaciers, ice sheets, sea level and ice sheets have been available since the 1960s, but previous data are kept in sediments. Glacial cores preserve the paleoclimatology data (EPICA community members, 2004) of the past 740 thousand years; deep-sea deposits (Lisiecki and Raymo, 2005) and loess layers (Ding et al., 2002) record millions of years of the series of glacial and interglacial cycles. Diatoms account for more than 75% of primary producers in the South Ocean and play a very important role in the global circulation of silicic acid and carbon (Treguer et al., 1995), the environmental indicator species, There are very rich and diverse distributions of environmental indicators that are restricted to specific environments. Therefore, diatoms are extremely important indicators in the reconstruction of the oceanographic data of the

Southern Ocean, such as utility and ratio of nutrient salts (El-Sayed, 1971; Burckle et al., 1987), surface water temperature (Neori and Holm-Hansen, 1982), sea-ice distribution (Abelman and Gersonde, 1991) and water mass stability (Leventer, 1991). Data from diatom assemblages derived from sediments suggest changes in glacial-interglacial periods. Diatoms in the Antarctic area has been studied consistently since the middle of the nineteenth century, and the purpose of this research is to analyze diatom assemblages to establish diatomic biostratigraphy and to interpret the environmental changes during the Holocene. These research data are very necessary to contribute to the reconstruction of the polar climate change records. the research is essential for the accumulation of the yet insufficient micropaleontological data on the polar region

III. Contents and Extent of R&D

Records of past glacial periods indicate that ice sheets have retreat in response to global warming and expansion in response to global cooling; they also show that ice sheets can retreat much faster than they grow (Peterson, 1994; P.U. Clark et al., 1999). It is important to pay attention to the flow rates and increases of glaciers flowing along the Antarctic Peninsula (Scambos et al., 2004), glaciers flowing from West Antarctica (Thomas et al., 2004) into the vicinity of Pine Island Bay and the Amundsen Sea, and Greenland's Jakobshavn Glacier (Joughin et al., 2004). During the 20th century, glaciers generally decreased in size in the 1930s and 1940s, and most since 1990 (Oerlemans, 2005). The acceleration in the thinning and the decline of some polar glaciers (Thomas et al., 2004) is the result of ice sheet separation induced by the oceanic and atmospheric warming. The Antarctic ice sheet is likely to remain intact because it is too cold to melt, there will be a significant increase in the amount of glaciers flowing into the ocean due to ice breaking off the ice sheet. In this Antarctic environment, the study of past sediments is very important, and it is necessary to trace the climate change of glacial and interglacial periods

in accordance with the goal of this task of constructing observation system of West Antarctic ice shelf change and developing technology to reconstruct the Quaternary deglaciation history. This diatom research was carried out from core deposits in the Antarctic to reconstruct the paleoenvironment at the time of the deposition.

Core WAP13-GC47 is located near the Bigo Bay(65.612793 S, 64.758447 W, 673 m water deep) For this study, a total of 29 core samples were taken at 20 cm intervals over a total length of 560 cm. To extract diatoms from the sampled sediments, we used the sample processing method of Scherer's (1994). The dry samples is placed in the beaker where 25 ml of 30% hydrogen peroxide (H₂O₂) had been added. 10% Hydrochloric acid (HCl) was then added to remove organic carbonate, and samples allowed to stand for another 24 h. Samples were washed in distilled water to remove chemical residue and salt crystals. Washed samples were prepared for quantitative diatom abundance analysis using conventional microscope slides according to the random settling method. All diatoms were counted up to a minimum of 100 specimens excluding resting spores of *Chaetoceros* spp. and identified under a Nikon E400 microscope at 400X and 1000X magnification.

The number of microfossils g⁻¹ was calculated as follows: Abundance = ((A × B)/(C × D))/E (A = number of specimens counted; B = area of the settling chamber; C = number of fields of view; D = area of field of view; E = mass of sample).

IV. R&D Results

The sediment core WAP13-GC47 was collected from near the Bigo Bay and contain and from them 48 species within 23 genera. The diatom valve abundance within this core ranged between 2.7 and 7.5 ×10⁷ g⁻¹. The diatom assemblages from here were dominated by *Eucampia antarctica* var. antarctica, *E. antarctica* var. recta, *Fragilariopsis kerguelensis*, *F. curta*, and *Thalassiosira*

antarctica. Three diatom assemblage zones were assigned to the WAP13-GC47 core.

The diatom assemblage I corresponds to the interval between 560 and 420cm and was deposited generally during a warm period. The diatom assemblage II corresponds to the 420–160 cm interval and indicates a shift from a warm period to a cold period. Additionally, the section between 240 and 280 centimeters shows an increase in the number of open water species despite the cold period, which is thought to be the result of an influx of surrounding deposits. The diatom assemblage III, corresponds to the 160–0 cm interval and deposited during a cold period.

V. Application Plans of R&D Results

The average global temperature has steadily increased since the turn of the 20th century, the trend has not always been upwards during the whole period. The upward trend in the average global temperature has notably weakened in recent 15 years (from 1998 through 2012) that it is considered a hiatus in global warming. During this period, the global average temperature showed an upward trend of $0.04\text{ }^{\circ}\text{C} / 10\text{ years}$, which is only about $1/3$ of the increase rate of $0.11\text{ }^{\circ}\text{C} / 10\text{ years}$ from 1951 to 2012. The decade-long internal volatility of the climate system, the effects of aerosols, and the relationship between extreme-earthquakes and large-scale climate variability, such as El Niño, have been suggested as the cause, but the exact cause has yet to be revealed. Paleoclimatic records derived from using diatoms, it will be possible to understand current changes and forecast the future in atmospheric composition, sea level and climate (including droughts, floods and other extreme phenomena) from an extensive perspective of past climate variability. In the long-term, it will enhance the understanding of the climate system, providing the basis of proper response to future global changes.

목 차

제 1 장 서론-----	12
제 2 장 국내외 기술개발 현황-----	13
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과-----	14
1절 연구지역-----	14
2절 시료채취 및 연구방법-----	16
3절 연구결과 및 토의-----	16
1. 규조 산출 -----	16
2. 규조 군집대 -----	17
3. 토의 -----	20
4절 결론-----	22
5절 사사-----	22
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도-----	23
제 5 장 연구개발결과의 활용계획-----	24
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보-----	25
제 7 장 참고문헌-----	26

제 1 장 서론

과거 빙하기에 대한 고기록은 빙상이 온난화에 반응하여 축소되고 냉각화에 반응하여 성장하였음을 가리키며, 이 기록들은 축소가 성장보다 훨씬 빠를 수 있다는 것을 보여 줬다(Peterson, 1994; P.U. Clark et al., 1999). 남극 반도를 따라 흐르는 빙하(Scambos et al., 2004), 서남극으로부터 (Thomas et al., 2004) Pine Island Bay와 Amundsen 해 근처로 유출되는 빙하, 그린란드의 Jakobshavn 빙하(Joughin et al., 2004)의 흐름속도와 증가에 주의를 집중할 필요가 있다. 20세기 동안 빙하는 일반적으로 1930년대와 1940년대, 그리고 1990년 이후 가장 크게 크기가 줄었다(Oerlemans, 2005). 몇몇 극빙하의 얹아짐과 쇠퇴 가속은(Thomas et al., 2004) 해양과 대기의 온난화에 의해 유도된 빙상의 분리라는 결과로 나타난다. 남극 빙상은 폭 넓은 표면을 녹이기에 너무 추워서 그대로 유지될 것으로 보이나 빙상으로부터 얼음의 소실로 인하여 해양으로 빙하의 유출이 상당히 증가를 일으킬 것으로 보인다. 남극 해빙면적은 대체로 계절에 따라 다르며, 평균두께는 9월에 최대면적에 이를 때 약 1 m 정도이다. 단지 소량의 빙하면적이 2월 하계최소기에 살아남으며, 2년 이상 유지되는 남극해빙은 극히 적다. 강설로 인한 눈 부하로 인해 얼음이 형성되고, 눈에서 얼음으로의 전환은 남극에서 빙하두께의 계절적 성장과 총 빙하부피에 기여한다. 눈-얼음 형성은 강수변화에 민감하기 때문에 지역기후의 변화에 민감하다. 규조의 고해상 기록은 빙기-간빙기(glacial-interglacial)의 전이(transition)와 관계된 지시자(biomarker)로서, 해빙기 동안에 환경적, 시기적 변화가 불명확할 경우 변화를 입증하는데 중요한 역할을 할 수가 있다 (Barbara et al., 2010; Bart et al., 2011; Tolotti et al., 2013). 표층의 생물학적 생산력은 해빙의 분포와 밀접한 관련이 있으므로, 대부분 규조류와 같은 생물 기원 입자의 퇴적은 직접적으로 계절적 해빙확장의 변화와 밀접하게 연관된다. 즉, 생물 입자 플럭스가 공해(open water) 기간에는 최대로 나타나며, 반대로 해빙이 덮여 있는 시기에는 표층에서 규조각 유기물의 수직 플럭스는 아주 낮게 나타난다(Abelmann and Gersonde, 1991). 따라서, 서남극 반도 Bigo Bay 인근 해양 퇴적물로부터 규조 균집을 연구하고 퇴적학적, 지화학적 정보를 종합하여 연구 코어퇴적물의 퇴적이후부터 현재까지의 고기후 변화를 해석한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

남극반도 주변 남대양의 고기후 및 고해양 환경 연구는 지구 온난화 문제를 이해하는데 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 1957년 미국이 지리적 남극점에 아문센-스콧기지, 자 남극점에 러시아가 보스토크기지를 설치한 이래로 세계 여러 국가들이 남극연구활동을 목적으로 과학기지를 설치하였다. 2개 이상의 상주기지를 운영하는 국가들은 우리나라를 비롯하여 미국, 러시아, 영국, 프랑스, 호주, 중국, 아르헨티나, 칠레 등이며, 각국들은 그 국가가 보유한 기술력을 세계에 알리고 남극연구에 박차를 가하고 있다. 우리나라는 1988년 2월 17일 세종기지를 설치하여 남극에 대해 본격적인 연구를 시작했다. 또한 최근에는 세종과학기지에 이어 남극 대륙 중심부로 진출하기 위하여 동남극 북빅토리아랜드(Northern Victoria Land) 테라노바만(Terra Nova Bay) 연안에 장보고기지를 건설하였다. 이로써, 우리나라는 세계에서 10번째로 남극에 두개 이상의 연구 기지를 보유한 국가가 되었다. 장보고과학기지는 남극 중심부와 해안으로의 접근성이 용이해 다양한 자료 확보와 특성화된 연구 수행이 가능하다. 남대양에서 규조는 일차 생산자의 75%이상을 차지하며 규산과 탄소의 전 지구적 순환에 매우 중요한 역할을 하고 있으며(Treguer et al., 1995) 특별한 환경에 제한되어 분포하는 환경 지시종들이 매우 풍부하고 다양하게 분포한다. 따라서 규조는 영양염류의 유용성과 비(El-Sayed, 1971; Burckle et al., 1987), 표층수의 온도(Neori and Holm-Hansen, 1982), Sea-ice의 분포(Abelman and Gersonde, 1991)와 수괴의 안정성(Leventer, 1991)등과 같은 남대양의 해양학적 복원자료에 매우 중요한 지표가 된다(Crosta et al., 2004). 미국, 독일, 일본 등에서는 남극에서의 기초과학 육성을 위하여 국가차원에서 많은 연구가 수행되고 있다. 국내에서 규조 연구는 세종기지가 완공된 지 수년 뒤인 1996년 이후에 처음 연구가 시작되었으며, 2016년 현재까지 보고된 규조 결과물은 다음과 같다: 브랜스필드 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)의 연구 등이 있다.

최근 까지 남극에서의 규조 연구는 브랜스필드 해협, 드레이크 해협, 스코티아 해 인근에서 집중적으로 수행되었으며, Bigo Bay 인근에서 수행되는 금번 연구는 처음으로 수행되는 것이다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 연구지역

남극반도는 지난 60년 동안 매우 빠른 온난화가 진행이 되었으며 Vernadsky station에서는 1951년 이래로 10년에 0.56 °C씩의 기온 상승을 기록하였다 (Vaughan et al., 2003; Turner et al., 2005). 또한 위성 관측에 의해서는 지난 20년동안 이지역의 해빙의 두께는 약 10년에 9.7%씩 감소하였다 (Parkinson, 2002; Zwally et al., 2002; Stammerjohn et al., 2008). 서 남극반도의 해양 생태계는 연안과 대륙붕지역으로 구성되며 매년 계절적인 해빙과 marginal ice zone에 의해 영향을 받는다(King, 1994; Stark, 1994; Smith et al., 1996; King and Harangozo, 1998; Smith and Stammerjohn, 2001; Vaughan et al., 2003). 따라서, 이 지역은 기후변화에 대한 생태학적 연구를 하는데 매우 중요한 지역이다(Ross et al., 1996; Smith et al., 1995, 1999, 2003; Domack et al., 2003). 연구지역에 유입되는 해류는 Antarctic circumpolar Current(ACC)와 Circumpolar Deep Water(CDW)로서 지속적으로 계절에 상관없이 유입되며, CDW의 유입은 서남극반도의 1차 생산력에 매우 중요한 역할을 한다(Prezelin et al., 2000, 2004). 연구코어퇴적물 WAP13-GC47은 수심 673 m인 Bigo Bay 바깥쪽 65.612793 S, 64.758447 W지점에서 채취되었으며, 총 길이 560 cm이다(Fig. 1).

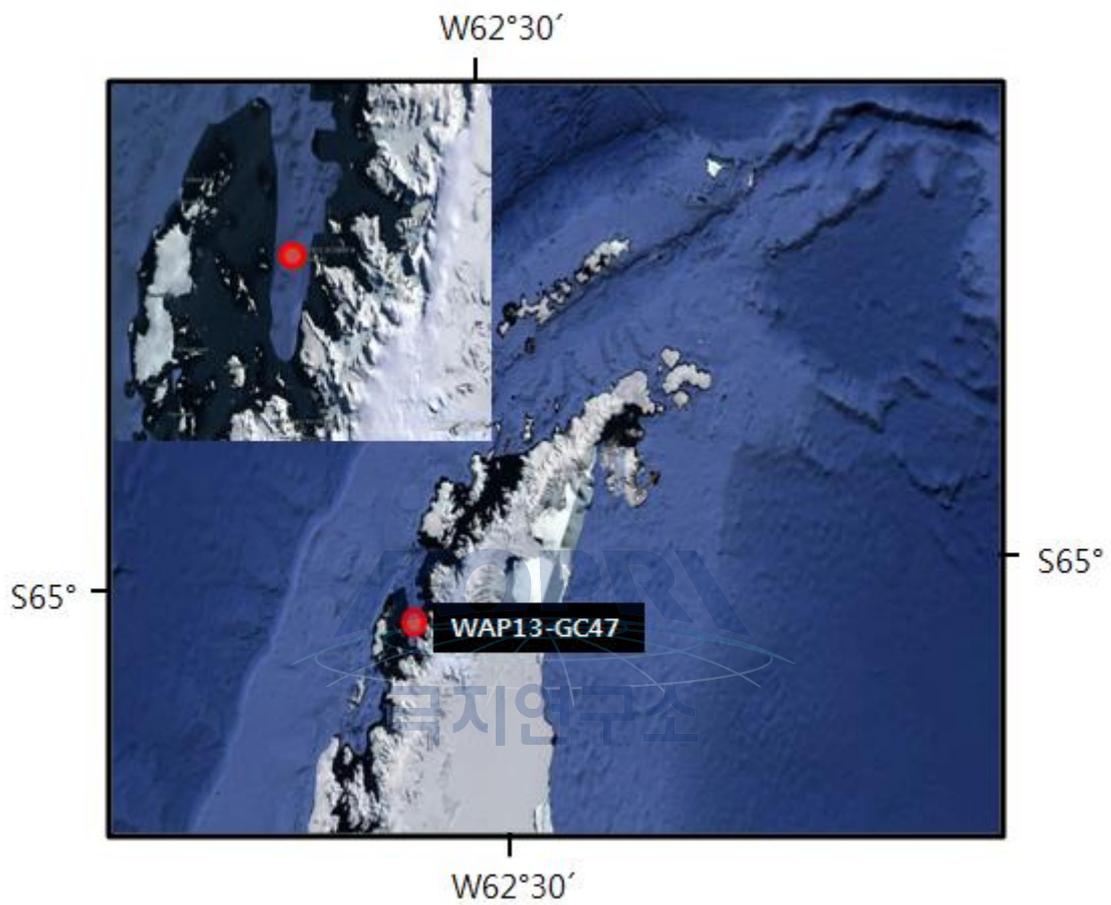


Fig. 1. Core locations map of the WAP13-GC47 core sediments in Antarctica (Google Earth).

제 2절 시료채취 및 연구방법

전체 코어 길이 560 cm 의 중력시추코어로서, 서남극 빙붕 변화 관측시스템 구축 및 제4기 해빙사(deglaciation history)복원 기술 개발이라는 본과제의 목표에 맞게 빙기와 간빙기의 기후변화를 추적하고 퇴적당시의 고해양 환경을 복원하기 위해서 남극 코어 퇴적물로부터 규조분석을 실시하였다. 시료처리를 위하여 4 cm 간격으로 총 140개의 시료를 채취하여 아래와 같은 시료처리방법을 사용하였다.

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 건조시킨후 접착제를 이용하여 커버글라스를 덮는다. 현미경 관찰을 위해서 제작된 슬라이드 글라스를 Nikon E400 현미경을 이용하여 규조미화석을 관찰하고 사진 촬영한다. 규조의 증준별 정량분석을 위해서는 Scherer(1994)의 연구 방법을 사용하며 절대량의 계산은 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 사용한다.

규조의 관찰을 위해 Nikon Y-IM 광학현미경을 이용하여 400-800배로 관찰하였으며 규조 종은 주로 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 토대로 감정하였다.

제 3절 연구결과 및 토의

1. 규조 산출

Bigo bay 바깥쪽에서 채취한 코어퇴적물 WAP13-GC47 로부터 23속 48종의 규조 화석이 감정되었으며, 규조 개체 수 농도는 $2.7 \sim 7.5 \times 10^7/g$ 범위에 해당한다. 개체

수 농도 범위가 크게 변화하지는 않으며 하부층준(560 - 420 cm)에서 상대적으로 풍부하게 산출된다. 규조의 산출은 하부층준에서 상부층준에 이르기 까지 계속적으로 산출이 되며 전체적으로는 점점 감소하는 추세를 보인다.

규조 화석 군집 조성을 살펴보면 우세하게 산출된 종으로서, *Fragilariopsis curta* 가 23.3 %로 가장 많이 산출되었다. 뒤를 이어 *Thalassiosira antarctica* (16.9 %), *F. kerguelensis* (13.1 %)등이 산출되었다(Fig. 2). 특히, *Chaetoceros resting spores*의 산출은 560 ~ 420 cm 구간에서는 점점 상승하는 경향을 나타내나 그 이후 층준에서는 점점 감소하는 추세를 보여준다.

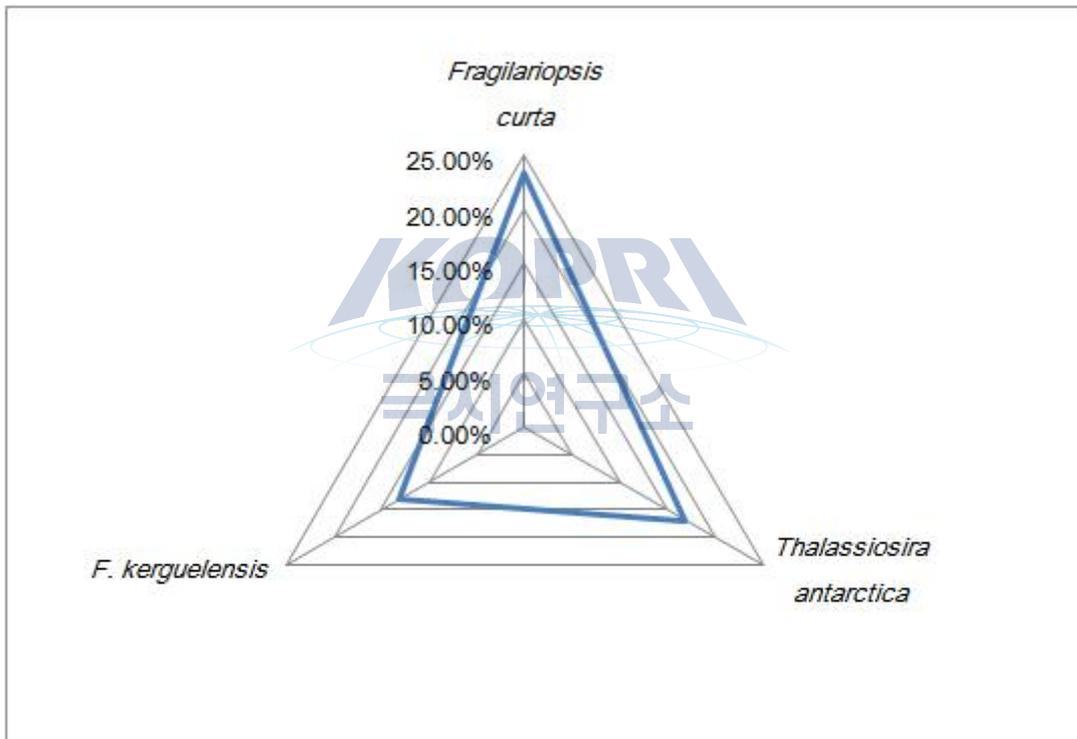


Fig. 2. Occurrence ratio of diatoms in the WAP13-GC47.

2. 규조 군집대

WAP13-GC47 코어퇴적물로부터 산출된 규조의 종조성과 선택 종들의 수직 산출 분포 변화에 따라 총 3개의 규조 군집대를 설정하였다 (Fig. 3).

가. 규조 군집대 I: 560 ~ 420 cm

규조 개체수 농도가 $3.4 - 8.1 \times 10^7/g$ 으로 상부 층준에 비하여 개체수 농도가 풍부하게 산출되는 구간이며, 공해종인 *F. kerguelensis*와가 상대적으로 다량 산출이 된다. *Eucampia antarctica* var. *antarctica*는 일반적으로 공해(open water)에서 산출이 되고, *Eucampia antarctica* var. *recta*는 해빙(sea-ice)과 관계가 있다(Fryxell and Prasad, 1990; Fryxell, 1991). 규조 군집대 I의 최하부 구간에서 공해에서 산출되는 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*의 산출이 상대적으로 풍부하게 나타난다. 또한 이 구간에서는 *Chaetoceros* RS의 산출이 점차 증가하는 경향을 보여 준다.

나. 규조 군집대 II: 420 ~ 160 cm

규조 개체수 농도가 $2.7 - 7 \times 10^7/g$ 으로 규조 군집대 I의 개체수 농도 보다 감소하였으며 220 cm 층준에서는 급감하는 경향을 보인다. 규조 군집대 II에서는 *F. curta*의 산출이 규조 군집대 I에서 보다 증가하며 해빙과 관계있는 *Eucampia antarctica* var. *recta*의 산출이 300 cm 층준에서 급증하는 경향을 보인다. 이에 반해 280 -240 cm 구간에서는 공해종인 *F. kerguelensis* 와 *Eucampia antarctica* var. *antarctica* 가 급격히 증가한다. 규조 군집대 I에서 점차 증가하던 *Chaetoceros* RS가 규조 군집대 II에서는 점차 감소하는 경향을 보인다.

다. 규조 군집대 III: 160 ~ 0 cm

규조 개체수 농도가 $3 - 5.7 \times 10^7/g$ 으로 규조 군집대 II에 비해서 좀 더 감소한 경향을 보여 준다. 규조 군집대 II에서 증가하던 *F. curta*의 산출이 감소하는 추세를 보이고 *Eucampia antarctica* var. *recta*의 산출도 매우 적게 나타난다. 또한 공해종인 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*의 산출이 거의 보이지 않는다. *F. kerguelensis*의 산출은 약간 감소한 상태에서 꾸준히 나타나며 *Chaetoceros* RS도 매우 적게 산출된다.

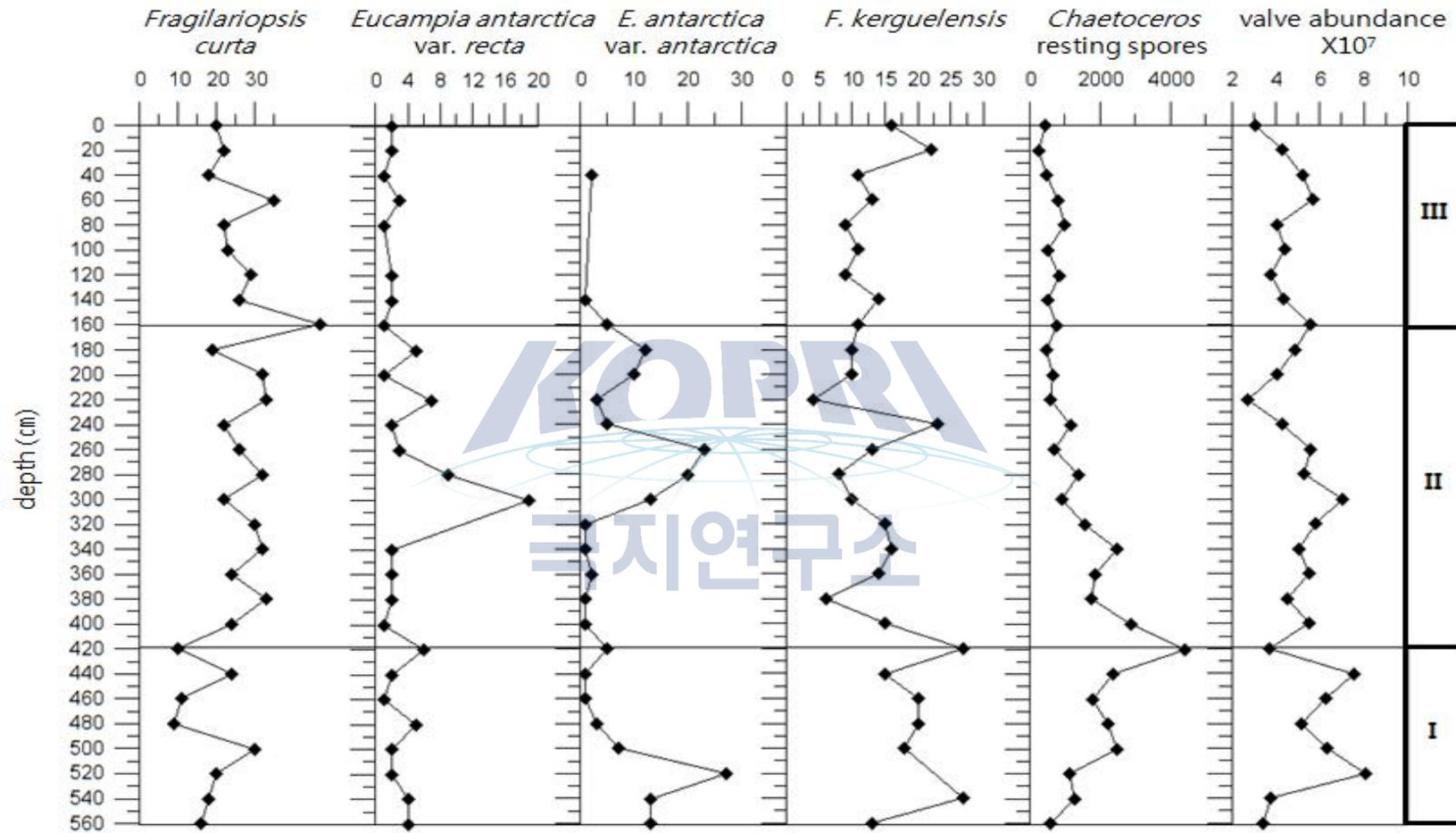


Fig. 3. Down-core variations of relative abundance of the characteristic species and diatom assemblage zones from WAP13-GC47.

3. 토의

WAP13-GC47 코어퇴적물의 퇴적 연대와 Magnetic susceptibility 값은 극지연 구소로부터 제공 받았으며, 이를 규조 연구 결과와 비교분석하여 고환경을 해석하였다(Fig. 4).

규조 군집 분석결과, 3개의 군집대를 설정하였다. 규조 군집대 I (560 ~ 420 cm)에서는 하부 층준에서 공해종인 *Eucampia antarctica* var. *antarctica* 와 *F. kerguelensis*의 산출이 매우 높은 구간이 존재하고, *F. kerguelensis*의 경우 규조 군집대 II와 규조 군집대 III에서는 상대적으로 규조 군집대 I보다 낮게 나타난다. 또한, *Chaetoceros* RS의 산출이 점차적으로 증가하는 경향을 보여주는데 이는 이 시기의 기온이 점차 따뜻해졌음을 의미한다. *Chaetoceros* RS의 경우 용빙수의 유입에 의해 성층화된 표층수에서 매우 풍부하기 때문에(Leventer et al., 1993; Leventer et al., 1996) 여름철에도 해빙으로 유지되는 시기 보다는 겨울철에는 해빙으로 여름철에는 용빙이 되는 지역에서 산출율이 높다. MS 값은 규조 군집대 I 전체에 걸쳐 매우 낮게 나타난다. 따라서, 규조 군집대 I의 퇴적시기는 WAP13-GC47이 퇴적되는 기간 중 가장 온난한 시기라 할 수 있다.

규조 군집대 II (420 ~ 160 cm)는 규조 군집대 I에서 보다 *F. kerguelensis* 와 *Eucampia antarctica* var. *antarctica* 산출이 적어지는 경향을 보이거나 280 -240 cm 구간에서는 급격히 증가한다. 그러나 *Chaetoceros* RS의 산출은 점점 감소하는 경향을 보여주며 280 -240 cm 구간에서도 큰 변화는 없다. MS값은 규조 군집대 II의 하부에서는 점차 증가하는 경향을 보이며 280 -240 cm 구간을 포함해서 320 cm 이상 상부 층준에서는 변화의 폭이 매우 크며, 220 cm 부근에서는 MS값이 매우 증가하는 경향을 보이고 다시 급감한다. 이는 이시기에 큰 기온의 변화를 나타내 주는 것으로 해석할 수 있으나, 이시기의 퇴적연대가 약 8000년경으로 나타남에 따라 연속적인 퇴적층준이라기 보다는 주변의 퇴적물이 대량 유입되어 나타나는 변화라고 할 수 있다. 약 8000년 경에는 온난한 시기 였기 때문에 이 부근에서 공해종의 산출이 급증하는 경향을 보인 것으로 생각된다. 이 층준을 제외하고는 전체적으로 규조 군집대 II는 I이 퇴적 될 때보다 기온이 점점 하강하여 추운시기로

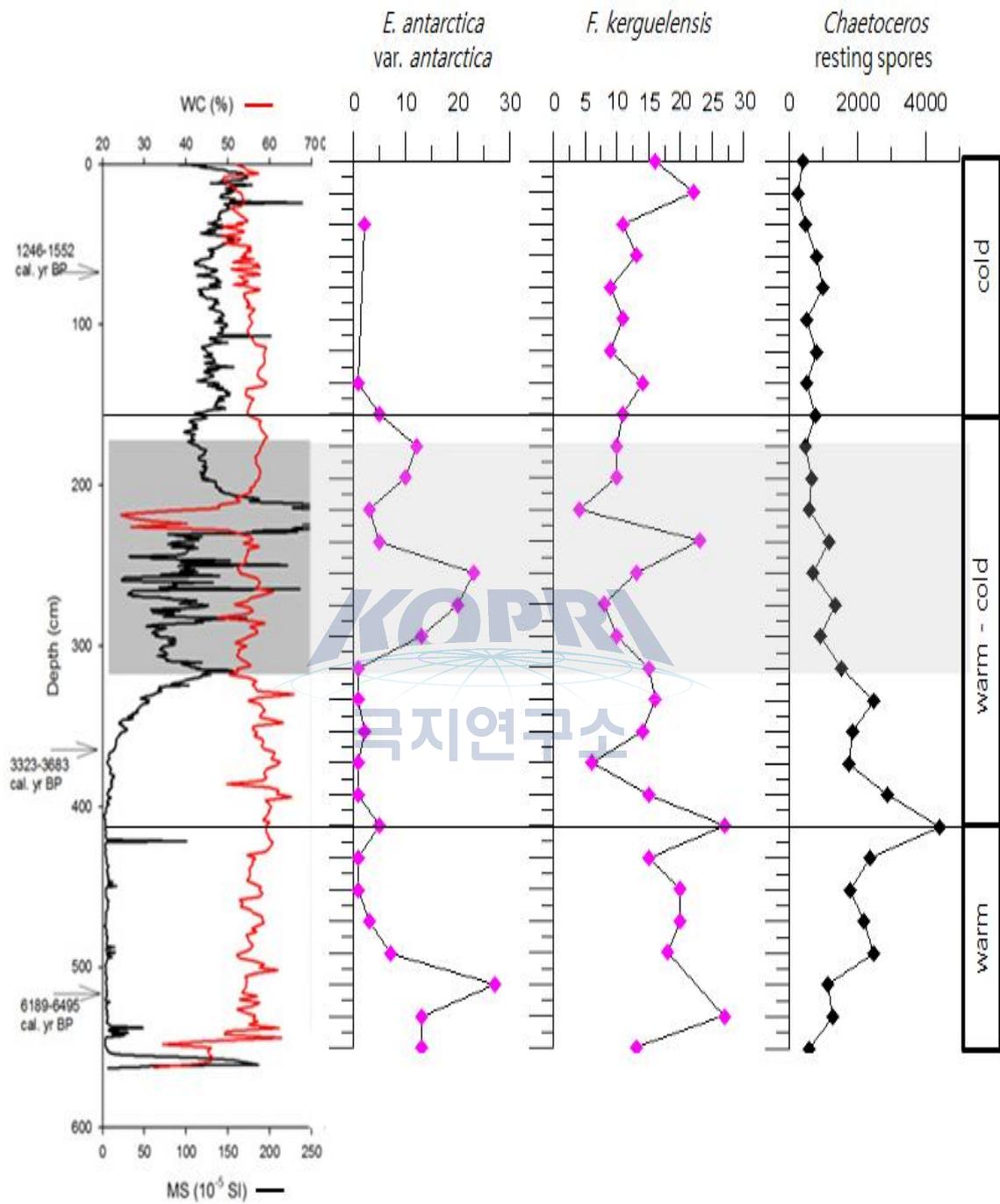


Fig.4. Comparative analysis of MS, Open water species and *Chaetoceros* resting spores for the WAP13-GC47.

생각된다.

규조 군집대 III (160 ~ 0 cm)은 규조 군집대 II와 마찬가지로 추운 시기를 유지하고 있는 것으로 보인다. *Eucampia antarctica* var. *antarctica* 산출이 거의 없고 *F. kerguelensis* 의 산출이 규조 군집대 II와 상대적으로 비슷한 경향을 보인다. *Chaetoceros* RS의 산출은 전층준에 걸쳐서 가장 적은 산출을 보이므로 규조 군집대 III은 규조 군집대 I과 II보다 더 추운 환경에서 퇴적되었음을 알 수 있다. 따라서, WAP13-IGC47 코어퇴적물이 퇴적되는 동안 온난 - 온난→한랭 - 한랭으로 고기후가 변화하였음을 알았다.

제 4절 결론

서남극 Bigo Bay 바깥쪽에서 채취한 코어퇴적물 WAP13-GC47로부터 각각 23속 48종의 규조 화석이 감정되었으며, 규조 개체 수 농도는 $2.7 \sim 7.5 \times 10^7/g$ 범위에 해당한다. Bigo Bay 인근에서의 규조 연구는 국내에서 처음 수행되는 것이며, 규조 화석 군집 조성을 살펴보면 주로 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*, *E. antarctica* var. *recta*, *Fragilariopsis kerguelensis*, *F. curta*, 와 *Thalassiosira antarctica*등이 주로 산출되었다. 이들 규조 군집의 산출양상에 의해 규조 군집대를 3개 설정하였다. 규조 군집대 I은 560-420 cm구간에 해당하며 전반적으로 온난한 시기(warm)에 퇴적되었고, 규조 군집대 II는 420-160 cm구간에 해당하며 온난한 시기(warm)에서 한랭한 시기(cold)로 변화한다. 또한, 280 -240 cm 구간에서는 한랭한 시기임에도 불구하고 공해종들의 산출이 증가하는데 이는 주변의 퇴적물들이 유입된 결과로 생각된다. 규조 군집대 III은 160-0 cm구간에 해당하며 한랭한 시기(cold)에 퇴적되었다.

제 5절 사 사

본 연구를 수행 할 수 있도록 시료와 재정적인 지원을 해 주신 한국 해양과학기술원 부설 극지 연구소에 감사드린다.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

홀로세 남극 퇴적물에서 규조를 이용한 고환경 연구의 본 과제인 서남극 빙붕 변화 관측시스템 구축 및 제4기 해빙사(deglaciation history) 복원 기술 개발에 관한 연구의 일환으로 수행되었다. 연구개발의 최종 목표가 첫째, 남극 퇴적물로부터 규조 군집분석을 실시하여 규조 생층서를 확립 둘째, 규조의 bioevent를 추적하여 퇴적물이 퇴적되는 동안에 일어난 고환경변화를 해석하는데 있다. 따라서, WAP13-GC47 코어퇴적물을 대상으로 규조 분석을 실시한 결과 규조 군집대 I: 560-420 cm, 규조 군집대 II: 420-160 cm, 규조 군집대 III: 160-0 cm로 총 3개의 규조 군집대를 설정하였다. 고환경 변화를 해석하기 위해 환경지시종을 분석한 결과 WAP13-GC47 코어 퇴적물이 퇴적되는 동안 적어도 3번의 기후변화의 시기가 있었음을 알 수 있었다. WAP13-GC47 코어 퇴적물의 퇴적시기가 약 6500년경 이후로 측정되었으나 규조 군집대 II에서 약 8000년경의 퇴적연대가 측정되었기 때문에 그 기간의 퇴적물은 주변에서 유입된 것으로 생각된다. 따라서, 이 구간의 변화를 배제하고 고환경변화를 분석하면 규조 종들의 분석에 의하여 warm - warm → cold - cold로 변화하였음을 알았다. 이상의 결과를 2017년 4월에 개최되는 대한지질학회 학술대회에서 발표할 것이며, 연구 세부목표는 100% 달성하였고 서남극 지역에서 일어난 제4기 해빙사를 복원하는데 있어 귀중한 자료로 활용될 수 있다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

그린란드와 남극대륙의 빙상은 해수면에 영향을 줄 수 있는 주요한 요인이다. 강설로 형성된 얼음은 중력에 의해 해안으로 확산되고, 그곳에서 녹거나 분리되어 바다로 유출되면서 빙산을 형성한다. 2001년 이후 빙봉의 붕괴속도가 빨라지고, 떠있는 빙하의 확산속도가 급속도로 변화함에 따라 남극지역에 대한 연구가 매우 중요해 졌다. 빙봉의 붕괴가 일어나는 지역과 해빙이 감소되는 지역의 해양 시추코어 퇴적물은 퇴적되는 동안 일어났던 기후의 변화를 더욱 뚜렷하게 기록하고 있는 곳이다.

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 해빙면적은 해마다, 대륙 주변의 장소마다 너무 많이 달라지기 때문에 남극 해빙면적이 종합적으로 더 적게 증가한 것이 기후의 지표로서 의미가 있는지 여부는 좀 더 연구가 진행되어야 할 것이다.

최근 연구결과는 빙하면적의 이 상반된 경향이 지역적 풍속과 바람 패턴의 경향 때문일 수 있음을 시사한다. 그러나 빙하두께와 빙하부피의 더 정확한 추정치 없이는 남극 해빙면적이 기후변화에 어떻게 반응 중인지 또는 어떤 기후 변수가 가장 영향력이 큰지 특징짓기 어렵다. 따라서, 지구환경의 변화양상을 구체적으로 관측하고 원인을 연구하기 위해서는 고기후 및 고해양 변화에 대한 활발한 연구가 필요하며 선진국 과학자들에 의해 남극 반도 일원에서 수 천년동안 일어났던 고기후 및 고해양 변화에 대한 새로운 사실이 밝혀지고 있다. 본 연구 역시 세계적인 연구추세에 발맞춰 서남극 반도의 고기후 변화에 대한 기초적인 연구 자료로서, 퇴적학적 및 지화학적 연구 자료, 대기 및 해양의 연구 자료와 종합적으로 연구한다면 보다 상세한 고환경변화양상을 이끌어 낼 수 있을 것으로 생각된다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

2000년 이후 남극 빙하 질량에 대한 추정치에 의하면, 가장자리에서 질량손실이 최대로 나타난다. 서쪽 대서양에서 떨어져 나와 부유하는 빙붕의 하부에 대한 관측을 분석한 결과, 이 지역의 해양온난화와 해양순환에 의한 열수송 증가가 빙하녹음 비율의 가속화에 큰 영향을 미쳤다. 남극 질량손실에 대한 관측 기록이 짧고 빙상의 내부변동성에 대한 이해가 부족하다. 접지면 후퇴는 빙붕 아래의 온난한 해양으로 인한 빙붕 쇠퇴에 의해 유발되어 해저 빙붕의 녹음 또는 빙붕 지표의 해빙수를 강화하고 빙붕 균열을 촉진할 수 있다. 빙상의 증가는 느린 과정이기 때문에, 그러한 변화는 여기서 채택한 정의에 따라 비가역적일 수 있다. 이는 주로 남극대륙의 서쪽과 동쪽, 그린란드 일부 지역에 적용된다.

현재보다 따뜻했던 지난 수백 만년 동안 그린란드와 남극의 서쪽의 빙상 규모가 감소했다는 사실의 신뢰도는 높다. 빙상모델 모의결과와 지질학적 자료에 의하면 남극 서쪽의 빙상은 아표층 온난화에 매우 민감하다. 기존의 증거에 의하면 임계값 이상의 전지구 온난화는 1000년 이상에 걸친 그린란드 빙상의 전소에 가까운 감소로 이어질 수 있으며, 이로 인해 전지구 평균 해수면이 약 7 m 상승할 수 있다. 그린란드 빙상이 완전히 사라지려면 1,000년 이상이 걸릴 수 있기 때문에 그린란드 빙상의 감소는 불가피한 것이 아니다. 빙상이 완전히 사라지기 전에 온도가 하강할 경우, 빙상이 재 성장할 수 있다. 따라서 남극에서의 고기후 및 고환경 변화를 추적 연구하는 것은 전 지구적인 온난화 현상의 원인을 알아내고자하는 국제적인 동향에 발맞추어 나갈 수 있는 귀중한 자료가 될 수 있다.

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 고해상도 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 웨틀랜드 군도 북동쪽 대륙대 코어퇴적물에 나타나는 해빙기에 대한 고해상도 규조 분석 연구. 지질학회지, 47(4), 363-369.
- 이영길, 1996, 남극 브랜스필드 해협 코어 퇴적물의 미고생물(규조)학적 연구. 고생물학회지, 12(1), 1-21.
- Abelmann, A. and Gersonde, R., 1991. Biosiliceous particle flux in the Southern Ocean. *Marine Chemistry*, 35, 503-536.
- Babara, L., Crosta, X., Masse, G. and Ther, O., 2010. Deglacial environments in eastern Prydz Bay, East Antarctica. *Quaternary Science Reviews*, 29, 2731-2740.
- 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.
- Bart, P.J., Sjunneskog, C. and Chow, J.M., 2011. Piston-core based biostratigraphic constrains on Pleistocene oscillations of the West Antarctic Ice Sheet in western Ross Sea between North Basin and AND-1B drill site. *Marine Geology*, 289, 86-99.
- Burckle. L.H., Jacobs, S.S. and McLaughlin, R.B., 1987, Late austral spring diatom distribution between New Zealand and the Ross Ice Shelf, Antarctica: Hydrographic and sediment correlations. *Micropaleontology*, 33, 74-81.
- Clark, M.P., Serreze, M.C. and Robinson, D.A., 1999. Atmospheric controls on Eurasian snow extent. *International Journal of Climatology*, 19, 27-40.
- Crosta, X., Sturm, A., Armand, L. and Pichon, J.J., 2004, Late quaternary sea ice history in the Indian sector of the Southern Ocean as recorded by diatom assemblages. *Marine Micropaleontology*, 50, 209-223.
- Ding, Z.L., Derbyshire, E., Yang, S.L., Yu, Z.W., Xiong, S.F. and Liu, T.S., 2002. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 17(3), 1033.
- Domack, E., Leventer, A., Burnett, A., Bindschadler, R., Convey, P., Kirby, M. (Eds.), 2003. *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspective*, 79. American Geophysical Union, Washington, DC.
- El-Sayed, S.Z., 1971, Dynamics of trophic relationships in the Southern Ocean. In: Quan, L.O. (ed.), *Research in the Antarctic*. American Association for the Advancement of Science, Washington, 73-91.
- EPICA community members, 2004, Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429(6992), 623-628.
- Fryxell, G.A., 1991, Comparison of winter and summer growth stages of the diatom *Eucampia antarctica* from the Kerguelen Convergence Zone. In: Barron, J.A. and Larsen, B. (eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program*,

- Scientific Results 119. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 675685.
- Fryxell, G.A. and Prasad, K.S.K., 1990. *Eucampia antarctica* var. *recta* (Mangin) stat. nov. (Biddulphiaceae, Bacillariophyceae): life stages at the Weddell Sea ice edge. *Phycologia* 29, 27-38.
- Heiden, H. and Kolbe, R.W., 1928, Die marinen Diatomeen der deutschen Siidpolar-Expedition 1901-1903. In: E. Drygalski (Editor), Deutsche Stidpolar-Expedition 1901-1903, Bd. 8. Botanik, Berlin, Leipzig, 450-715.
- Hustedt, F., 1930-1966. Die Kieselalgen Deutschlands, Oster reichs und der Schweiz. In: L. Rabenhorst's Kryptogamen - Flora, Bd. 7. Die Kieselalgen, V. 1: 920p. (1930): V. 2: 845p. (1959); V. 3: 816p. (1961-1966).
- Hustedt, F., 1958, Diatomeen aus der Antarktis und dem Sfidatlantik. Dtsch. Antarkt. ExpEditor 1938/39, 2, 103-191.
- Johansen, J.R. and Fryxell, G.A., 1985, The genus *Thalassiosira* (Bacillariophyceae): studies on species occurring south of the Antarctic Convergence Zone, *Phycologia*, 24, 155 - 179.
- Joughin, I., Abdalati, W. and Fahnestock, M., 2004. Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbrae glacier. *Nature*, 423, 608-610.
- King, J.C., 1994. Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula. *International Journal of Climatology* 14 (4), 357 - .369.
- King, J.C., Harangozo, S.A., 1998. Climate change in the western Antarctic Peninsula since 1945: observations and possible causes. *Annals of Glaciology* 27, 571 - 575.
- Leventer, A., 1991, Sediment trap diatom assemblages from the northern Antarctic Peninsula region. *Deep Sea Research*, 38, 1127-1143.
- Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E., A pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20, PA1003.
- Manguin, E., 1957, Premier Inventaire des Diatomées de la Terre Adélie Antarctique. Espèces nouvelles. *Revue Algologique*, 3, 111-134.
- Manguin, E., 1960, Les Diatomées de La Terre Adélie Campagne du "Commandant Charcot" 1949-1950. *Annales des Sciences Naturelles; Botanique*, 12, 225-363.

- Medlin, L. and Priddle, J., 1990, Polar Marine Diatoms. British Antarctic Survey, Cambridge, 214 p.
- Neori, A. and Holm-Hansen, O., 1982, Effect of temperature on rate of photosynthesis in Antarctic phytoplankton. *Polar Biology*, 1, 33-38.
- Oerlemans, J., 2005. Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science*, 308, 675-677.
- Parkinson, C.L., 2002. Trends in the length of the Southern Ocean sea ice season, 1979 - 1999. *Annals of Glaciology* 34, 435 - 440.
- Peragallo, M., 1921. Deuxième Expédition Antarctique Française 1908 - 1910 Commandé e par le Dr. Jean Charcot. Botanique. Diatomées d'eau douce et diatomé es d'eau salé e. Masson, Paris, 1-98.
- Pre'zelin, B.B., Hofmann, E.E., Mengelt, C., Klinck, J.M. 2000. The linkage between Upper Circumpolar Deep Water(UCDW) and phytoplankton assemblages on the west Antarctic Peninsula continental shelf. *Journal of Marine Research* 58, 165 - 202.
- Pre'zelin, B.B., Hofmann, E.E., Moline, M., Klinck, J.M., 2004. Physical forcing of phytoplankton community structure and primary production in continental shelf waters of the Western Antarctic Peninsula. *Journal of Marine Research* 62, 419 - 460.
- Ross, R.M., Hofmann, E.E., Quetin, L.B. (Eds.), 1996. Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula. Antarctic Research Series 70, vol. 70. American Geophysical Union, Washington, DC, 448 pp.
- Scambos, T., Hulbe, C., Fahnestock, M., 2004. Climate-induced ice-shelf disintegration in the Antarctic Peninsula. *Antarct. Res. Ser.* 79, 335 - 347.
- 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(2), 171-180.
- Simonsen, R., 1992. The diatom types of Heinrich Heiden in Heiden & Kolbe 1928. *Bibliotheca Diatomoologica*, 24, 1-99.
- Smith, R.C., Stammerjohn, S.E., 2001. Variations of surface air temperature and sea ice extent in the western Antarctic Peninsula (WAP) region. *Annals of*

- Glaciology 33, 493 - 500.
- Smith, R.C., Baker, K.S., Fraser, W.R., Hofmann, E.E., Karl, D.M., Klinck, J.M., Quetin, L.B., Prezelin, B.B., Ross, R.M., Trivelpiece, W.Z., Vernet, M., 1995. The Palmer LTER: a long-term ecological research program at Palmer Station, Antarctica. *Oceanography* 8 (3), 77 - 86.
- Smith, R.C., Stammerjohn, S.E., Baker, K.S., 1996. Surface air temperature variations in the western Antarctic peninsula region. In: Ross, R.M., Hofmann, E.E., Quetin, L.B. (Eds.), *Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula*. Antarctic Research Series 70. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 105 - 121.
- Smith, D.A., Hofmann, E.E., Klinck, J.M., Lascara, C.M., 1999. Hydrography and circulation of the West Antarctic Peninsula Continental Shelf. *Deep-Sea Res. Pt. I* 46, 925 - 949.
- Smith, R.C., Fraser, W.R., Stammerjohn, S.E., Vernet, M., 2003. Palmer long-term ecological research on the Antarctic marine ecosystem. In: Domack, E.W., Leventer, A., Burnett, A., Convey, P., Kirby, M., Bindschadler, R. (Eds.), *Antarctic Peninsula Climate Variability: a Historical and Paleoenvironmental Perspective*. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 131 - 144.
- Stammerjohn, S.E., Martinson, D.G., Smith, R.C., Iannuzzi, R.A., 2008. Sea ice in the Western Antarctic Peninsula region: spatio-temporal variability from ecological and climate change perspectives. *Deep-Sea Research II*, this issue [doi:10.1016/j.dsr2.2008.04.026].
- Stark, P., 1994. Climatic warming in the central Antarctic Peninsula area. *Weather* 49 (6), 215 - 220.
- Thomas, R., Rignot, E., Casassa, G., Kanagaratnam, P., Acuna, C., Akins, T., Brecher, H., Frederick, E., Gogineni, P., Krabill, W., Manizade, S., Ramamoorthy, H., Rivera, A., Russell, R., Sonntag, J., Swift, R., Yungel, J., Zwally, J., 2004. Accelerated sea-level rise from West Antarctica. *Science*, 306(5694), 255-258.
- Tolotti, R., Salvi, C., Salvi, G. and Bonci, M.C., 2013. Late Quaternary climate variability as recorded by micropaleontological diatom data and geochemical data in the western Ross Sea, Antarctica. *Antarctic Science* 25(6), 804-820.
- Treguer, P., Nelson, D.M., van Bennekom, A.J., DeMaster, D.J., Leynaert, A. and

- Queguiner, B., 1995, The silica balance in the world ocean: a re-estimate. *Science*, 268, 375-379.
- Turner, J., Colwell, S.R., Marshall, G.J., Lachlan-Cope, T.A., Carleton, A.M., Jones, P.D., Lagun, V., Reid, P.D., Iagovkina, S., 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.* 25, 279 - 294.
- 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.
- Vaughan, D.G., Marshall, G.J., Connolley, W.M., Parkinson, C., Mulvaney, R., Hodgson, D.A., King, J.C., Pudsey, C.J., Turner, J., 2003. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Clim. Change* 60, 243 - 274.
- Zwally, H.J., Comiso, J.C., Parkinson, C.L., Cavalieri, D.J., Gloersen, P., 2002. Variability of Antarctic sea ice 1979 - 1998. *Journal Geophysical Research, Oceans* 107 (C5).





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.