

## 남극 사우스 오크니 제도 서부 해역의 코어 퇴적물에서 산출된 규조 군집

박영숙<sup>1,\*</sup> · 이종덕<sup>1</sup> · 윤호일<sup>2</sup> · 이재일<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 자연과학대학 지구환경과학과

<sup>2</sup>한국해양연구원 부설극지연구소

### 요 약

남극 사우스 오크니 제도 서부 해역에서 채취한 코어 퇴적물 GC02-SOI03의 규조 미화석 분석을 통하여 규조 분대의 설정과 고환경 해석을 시도하였다. 규조의 군집조성에 대한 분석 결과, 규조 군집대 I(533 cm ~ 360 cm), 규조 군집대 II(352 cm ~ 240 cm), 규조 군집대 III(232 cm ~ 0 cm) 등 3개의 규조 분대가 설정되었다. 규조 군집대 I에서는 해빙종이 적고 공해종이 다량 산출되며, *Eucampia antarctica* var. *antarctica*가 산출하는 것으로 보아 초기 홀로세 동안은 비교적 따뜻한 공해환경이었던 것으로 해석된다. 규조 군집대 II에서는 해빙종이 증가하고 공해종이 감소하며, *Eucampia antarctica* var. *recta*가 산출하고 *Corethron criophilum*이 증가하는 것으로 보아서 약 5천년 전부터는 해빙이 약간 확장된 것으로 보인다. 규조 군집대 III에서는 해빙종이 풍부하고 *Corethron criophilum*이 감소하는데, 이는 후기 홀로세에 해빙이 규조 군집대 II에서보다 더 확장되었음을 시사한다.

**주요어:** 사우스 오크니 제도, 규조 군집대, 해빙종, 공해종

**Young-Suk Bak, Jong-Deock Lee, Ho Il Yoon and Jae Il Lee, 2007, Diatom assemblages from core sediments in the western sea area of the South Orkney Islands, Antarctica. Journal of the Geological Society of Korea. v. 43, no. 1, p. 33-42**

**ABSTRACT:** Holocene paleoenvironmental history in the western South Orkney Islands was reconstructed through the paleoecological analysis on the diatom taxa from sediment core GC02-SOI03. Three diatom zones are identified on the basis of frequency of the critical taxa throughout the section: diatom assemblage zone I (533 cm ~ 360 cm), diatom assemblage zone II (352 cm ~ 240 cm), and diatom assemblage zone III (232 cm ~ 0 cm). High concentration of open water species and *Eucampia antarctica* var. *antarctica* in the diatom assemblage zone I indicates open water environment with little sea-ice during the early Holocene. Sea-ice species and *Eucampia antarctica* var. *recta* increase in abundance in the diatom assemblage zone II, suggesting increased sea-ice cover in the study area since 5 ka. Even more extensive sea-ice coverage during the late Holocene is implied by abundant sea-ice species and decreased *Corethron criophilum* in the diatom assemblage zone III.

**Key words:** South Orkney Islands, diatom assemblage zone, sea-ice species, open water species

(Young-Suk Bak and Jong-Deock Lee, Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju, 561-756, Korea; Ho Il Yoon and Jae Il Lee, Korea Polar Research Institute, Songdo Techno Park, 7-50 Songdo-dong, Yeosu-gu, Incheon 406-840, Korea)

### 1. 서 론

지난 50년 동안 남극반도는 연평균 기온이 약 2.5°C 상승하였으며(Limbert, 1974; Schwerdtfeger, 1976; Morrison, 1990; Jones *et al.*, 1993; Stark,

1994) 남극 중층수의 온도는 과거 약 10년 동안 계속 상승하였다(Gille, 2002). 최근 남극반도 주변의 빙벽이 급격히 후퇴하는 현상과 연중 해빙의 규모가 감소하는 현상도 이와 연관이 있다(Jacobs and Comiso, 1993; Vaughan and Doake, 1996; Scambos *et al.*,

\* Corresponding author: Tel. +82-63-270-2804, E-mail. sydin@chonbuk.ac.kr

2003; Buffen *et al.*, 2007). 따라서 남극반도 주변 남대양의 고기후 및 고해양 환경 연구는 지구 온난화 문제를 이해하는데 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 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).

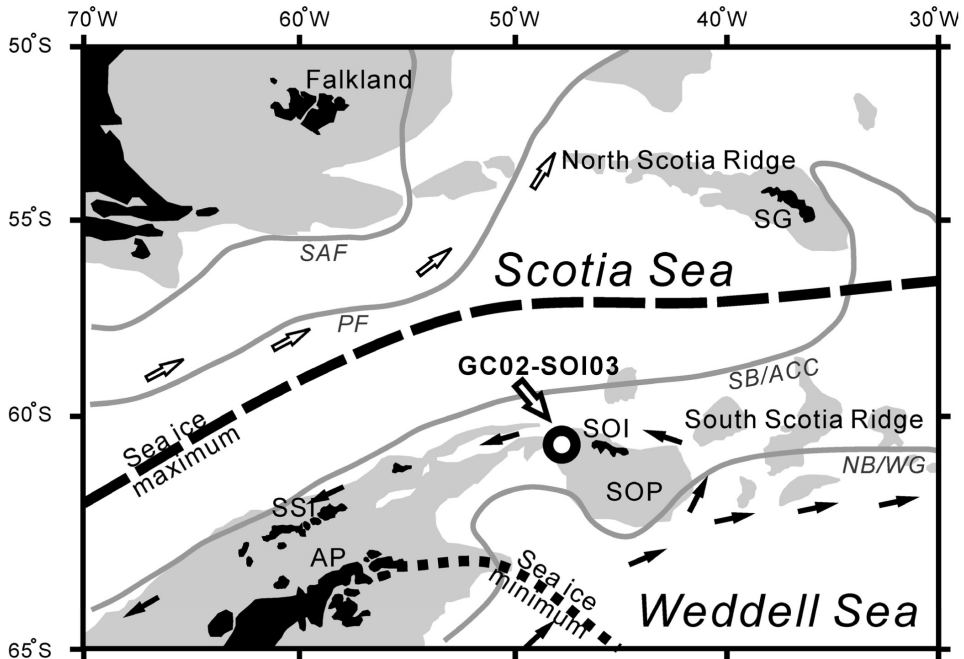
이 연구에서는 사우스 오크니 제도 서부지역에서 채취한 코어 퇴적물 GC02-SOI03에서 산출된 규조 미화석의 군집분석을 통하여 층수에 따른 화석군의 변화양상을 토대로 규조 군집대를 설정하고, 환경 지

시중의 분포에 의해서 연구지역의 고기후 변화를 알아보고자 한다.

## 2. 연구지역

연구지역인 사우스 오크니 제도가 속해있는 사우스 오크니 소대륙(South Orkney Microcontinent)은 사다리꼴 모양으로 약  $250 \times 350 \text{ km}^2$ 의 면적을 가지고 있으며, 남스코티아 해령(South Scotia Ridge)의 일부분으로서 ENE-WSW방향으로 놓여 있다(그림 1). 동쪽과 남쪽 대륙붕은 수심 500 m 이상이며 중심지역에서는 약 200-400 m의 수심을 가진다(King and Barker, 1988). 또한 사우스 오크니 소대륙은 대륙지각의 커다란 덩어리로서 고생대에서부터 중생대 백악기에 이르기 까지 형성된 저변성암으로 주로 구성되어 있다(Dalziel, 1984; Grunow *et al.*, 1992).

포웰분지의 북동쪽에 인접하고 있는 사우스 오크



**Fig. 1.** Location map of the study area. Sea-floor shallower than 2000 m is shaded. Shaded lines show boundaries of ocean current systems: SAF=Sub-Antarctic Front; PF=Polar Front; SB/ACC=southern boundary of the Antarctic Circumpolar Current; NB/WG=northern boundary of the Weddell Gyre (Orsi *et al.*, 1995; Whitworth *et al.*, 1994). Open arrows and filled arrows show directions of Antarctic Circumpolar Current and contour currents of Weddell Sea Deep Water (Camerlenghi *et al.*, 1997; Locarnini *et al.*, 1993; Nowlin and Zenk, 1988), respectively. Maximum and minimum sea ice limits from NOCD (1985). AP=Antarctic Peninsula; SG=South Georgia Island; SOI=South Orkney Islands; SOP=South Orkney Plateau; SSI=South Shetland Islands.

니 소대륙은 Weddell-Scotia Confluence 지역에 위치하고 있다(그림 1). 이 지역에 퇴적물은 남극 순환수(Antarctic Circumpolar Current)와 웨델 자이어(Weddell Gyre)의 순환에 의해서 유입이 된다. 특히, 남극 순환수는 전 대양에 열, 염과 영양 물질들을 공급해주며 기후에도 매우 중요한 영향을 끼친다(Nowlin and Klinck, 1986; Pudsey and Howe, 1998). 연구 지역의 수직적인 수괴 분포를 살펴보면, 표층에서 약 200 m 깊이까지는 차가운( $<0.1^{\circ}\text{C}$ ) 저염( $<34.6\%$ )의 남극 표층수(Antarctic Surface Water)가 존재하고(Carmack and Foster, 1975), 그 밑으로 200-800 m 깊이에는 남극 순환심층수(Circumpolar Deep Water;  $<0^{\circ}\text{C}$ ,  $<34.6\%$ ; Deacon, 1979)가 분포하며, 맨 아래인 800 m 이상의 깊이에는 밀도가 높은 웨델해 심층수(Weddell Sea Deep Water;  $-0.7^{\circ}\text{C}<T<0^{\circ}\text{C}$ )와 웨델해 저층수(Weddell Sea Bottom Water;  $<-0.7^{\circ}\text{C}$ )가 존재한다(Matano *et al.*, 2002; Orsi *et al.*, 1993). 저층수의 흐름은 스코티아해에서 해빙의 계절적 형성에 중요한 역할을 한다. 그림1은 연구지역에서의 약 10년 동안(1973년~1982년)의 평균적인 해빙 분포를 나타내는 그림으로서, 하한선은 3월 초에 측정된 것이며, 상한선은 8-9월경에 측정된 결과를 평균한 것이다(NOCD, 1985).

### 3. 연구방법

연구 코어인 GC02-SOI03 코어의 채취 지점은  $60^{\circ}22.884'S$ ,  $47^{\circ}00.303'W$ 이며, 사우스 오크니 제도의 북서쪽 수심 786 m에서 채취되었다. 전체 코어의 길이는 533 cm이며, 코어 퇴적물은 주로 밝은 올리브 회색의 diatomaceous mud로 구성되어 있고, 코어의 최하부인 5 m 이하 구간에서 수 개의 규조가 풍부한 엽층이 나타난다. 코어에서 산출되는 규조 화석을 고생물학적으로 연구하기 위하여 0~516 cm 구간에서는 8 cm 간격으로 65개, 규조가 풍부한 엽층이 나타나는 516~533 cm 구간에서는 약 1~2 cm 간격으로 10개의 시료를 채취하여 분석하였다.

코어 퇴적물로부터 규조화석을 추출하기 위하여 다음과 같은 시료 처리방법을 사용하였다. 건조 시료 2 g에 묽은 염산(10%) 25 mL와 과산화수소수 15 mL를 첨가한 후 hot plate 위에서 1시간 이상 가열한다. 24시간 동안 놓아둔 후 다시 묽은 염산과 과산화수소

수 15 mL를 첨가하여 1시간 이상 끓여 준 후 증류수를 부어 가라앉을 때까지 기다린다. 화학약품과 부유성 물질들을 제거하기 위해서 윗물을 따라내고 다시 증류수를 채운다. 이러한 세척과정을 여러 번 반복하여 산이나 부유성 물질들을 모두 제거한다. 남은 잔유물을 병에 담고, 그 중 부표본을 취하여 슬라이드 글라스가 장치된 settling container에 넣고 저온의 건조기(약  $50^{\circ}\text{C}$ ) 안에서 건조시킨 후 mount media와 커버 글라스로 고정시킨다.

현미경 관찰을 위해서 제작된 슬라이드를 Nikon E400 현미경을 이용하여 규조 미화석을 관찰하고 사진 촬영하였다. 또한 미세 표면 구조를 자세히 관찰하기 위해서는 Topcon ABT-32 전자주사현미경으로 strew sample을 만들어 관찰하였다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 규조 군집

사우스 오크니 제도 서부지역에서 채취한 코어 퇴적물(GC02-SOI03)에서 규조 미화석을 연구한 결과, 전 층준에 걸쳐서 규조 미화석이 매우 풍부하게 산출되었으며 보존 상태로 일반적으로 양호하였다. 해빙종, 공해종, 저서종 등이 혼합되는 양상으로 산출되었으며, 총 32속 65종의 규조화석이 감정되었다.

산출된 규조 미화석의 군집 조성을 살펴보면, *Chaetoceros resting spores*가 전체 층준에서 연속적으로 가장 풍부하게 산출되고 있다. 그 외의 우점종으로는 *Actinocyclus actinochilus*, *Corethron criophilum*, *Fragilariopsis curta*, *F. kerguelensis*, *Rhizosolenia styliformis*, *Thalassiosira antarctica* 등이 있으며, 이들은 *Chaetoceros resting spore*를 제외한 전체 산출량의 61.8%를 차지하고 있다. 이에 동반하여 산출되는 종으로서 *Eucampia antarctica*, *F. ritscheri*, *F. seperanda*, *Odontella weissflogii*, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiosira gracilis*, *T. lineata* 등이 전 층준에 걸쳐서 꾸준히 산출되고 있으며, 전체의 약 18.6%를 차지하고 있다.

### 4.2 규조 분대

GC02-SOI03 코어 퇴적물에서 산출된 규조 종들의 조성에 의하여 3개의 규조 군집대를 설정하였다(그림 2).

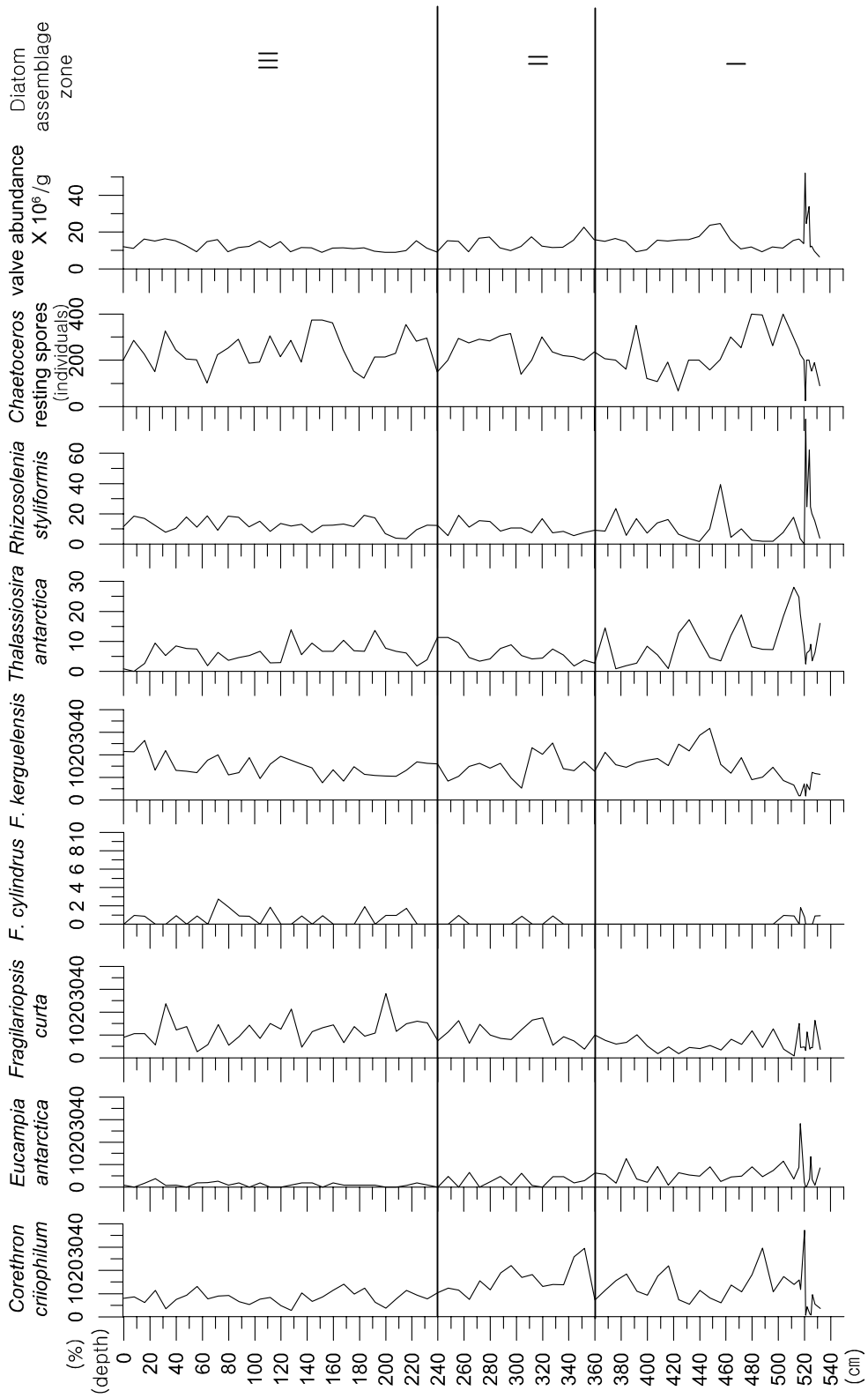


Fig. 2. Diatom zonation and relative abundance of dominant diatoms.

#### 4.2.1 규조 군집대 I (533 cm ~ 360 cm)

연구 코어 퇴적물의 하부 층중에 해당하는 규조 군집대 I은 상위 층중에서 인지되는 규조 군집대 II, III과 비교할 때, *Corethron criophilum*(1-37%), *Eucampia antarctica*(1-28%), *Fragilariopsis kerguelensis*(2-32%), *Thalassiosira antarctica*(1-28%) 등이 비교적 풍부하게 산출되는 반면에, *Fragilariopsis curta*(1-17%)와 *F. cylindrus*(2%)의 산출량은 상대적으로 적다. 규조 군집대 I의 하부 구간에서는 1 cm 미만의 두께로 단일종의 규조가 풍부한 엽층이 발견되는데, 이 엽층의 주 구성종은 *Rhizosolenia styliformis*(524~525 cm, 521~522 cm)와 *Corethron criophilum*(520~520.7 cm)이다.

#### 4.2.2 규조 군집대 II (352 cm ~ 240 cm)

코어의 중부 층중에 해당하는 규조 군집대 II에서는 규조 군집대 I에서 상대적으로 풍부하게 산출되었던 *Fragilariopsis kerguelensis*(5-25%), *Thalassiosira antarctica*(2-11%), *Eucampia antarctica*(1-6%) 등의 산출량이 감소하는 반면에, *F. curta*(4-18%)의 산출은 점점 증가하는 경향을 보이며, 빈약하지만 *F. cylindrus*의 산출도 나타난다.

#### 4.2.3 규조 군집대 III (232 cm ~ 0 cm)

규조 군집대 III은 코어의 상부 층중에 해당된다. 규조 군집대 I과 II에서 풍부하게 산출되었던 *Corethron criophilum*(3-13%)의 산출이 상부로 갈수록 줄어들며, 이와 더불어 *Eucampia antarctica*(1-4%)의 산출도 줄어든다. 규조 군집대 II에서 소폭 감소하였던 *Fragilariopsis kerguelensis*(8-27%)와 *Thalassiosira antarctica*(1-14%)는 규조 군집대 III에서도 II에서와 비슷한 산출양상을 보인다. 그러나 *F. curta*(3-28%)의 산출은 규조 군집대 II에서부터 III에 이르기 까지 점점 증가하는 경향을 보이며, 규조 군집대 I과 II에서는 없거나 매우 적게 나타난 *F. cylindrus*(1-3%)가 꾸준히 산출된다.

### 4.3 고환경 해석

연구지역의 고환경 해석을 위하여 *Corethron criophilum*, *Eucampia antarctica* (var. *antarctica*와 var. *recta*), 해빙종, 그리고 공해종의 수직 산출 분포를 상호 비교하여 보았다(그림 3, 4). 해빙종에는 *Fragilariopsis curta*와 *F. cylindrus*가 공해종에는 *F. kerguelensis*와

*Thalassiosira antarctica*가 포함된다. 먼저 *Corethron criophilum*은 웨델해의 늦겨울에 ice-edge 부근에 나타나는 식물성 플랑크톤 군집의 중요한 구성원으로서 (Marra and Boardman, 1984) 연구 코어 퇴적물의 규조 군집대 I과 II에서 상대적으로 풍부하게 나타난다. 연구지역은 그림 1에서 나타난 현재의 해빙의 분포로 살펴보면 봄철과 여름철에는 공해 환경이며 겨울철에는 해빙으로 덮여 있다. 따라서 규조 군집대 I에서 *Corethron criophilum*이 풍부하게 산출되는 것은 봄철이나 여름철에 해빙이 녹을 때 melt water의 유입에 의해 풍부하게 산출되는 것으로 보인다. 규조 군집대 III에서 *Corethron criophilum*이 상대적으로 산출량이 감소하는 것은 기후의 한랭화로 해빙이 확장하여 ice-edge가 연구지역을 지나 북쪽으로 이동하였기 때문인 것으로 보인다(Pudsey and Howe, 1998). 한편, 중부 층중인 규조 군집대 II에서 *Corethron criophilum*이 풍부하게 산출되는 것은 기후 냉각으로 확장 이동 하던 ice-edge가 규조 군집대 II의 시기에 이르러 연구 지역에 놓이게 됨으로써 형성된 것으로 생각된다.

*Eucampia antarctica*는 해빙종과 같이 산출되기도 하나(Leventer, 1998; Taylor et al., 2001) 전형적으로는 남극과 남극수렴대(Polar Front Zones)에서 풍부하다(Zielinski and Gersonde, 1997). 또한 *Eucampia antarctica*는 형태에 따라서 2가지 변종으로 나뉘어지며, 이 중 *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). 연구 코어의 규조 군집대 I에서는 warmer-water 환경을 나타내주는 *E. antarctica* var. *antarctica*가 산출이 되나 360 cm 층중 이상인 규조 군집대 II와 III에서는 산출이 거의 없다(그림 3). Colder-water 환경을 나타내주는 *Eucampia antarctica* var. *recta*는 규조 군집대 I에서 III으로 갈수록 산출량이 감소하기는 하지만 꾸준히 산출되고 있다(그림 3). 따라서 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*에 대한 *E. antarctica* var. *recta*의 상대적 함량은 규조 군집대 I보다 규조 군집대 II와 III에서 훨씬 높게 나타나며, 이로부터 규조 군집대 I보다 규조 군집대 II와 III이 더 추운 환경에서 퇴적되었다고 해석할 수 있다.

*Thalassiosira antarctica*는 웨델해와 스코티아해에서 해빙이 없는 공해 환경을 지시해주며(Abelmann and

Gersonde, 1991), *Fragilariopsis kerguelensis*는 남대양과 드레이크 해협에 표층 퇴적물에서 우세하게 산출되고 있어 남극 순환수의 영향을 강하게 지시한다 (Zielinski and Gersonde, 1997). 연구코어에서 이들은 전체적으로 풍부하게 산출되는 경향을 보이나, 수직적으로 규조 군집대 I에서 규조 군집대 II와 III으로 갈수록 약간 감소하는 경향을 보인다. 따라서 규조 군집대 I의 시기에 비해 규조 군집대 II와 III의 시기에 남극 순환수의 영향 하에 놓이는 기간이 짧아졌음을 알 수 있다.

*Fragilariopsis curta*는 *F. cylindrus*와 함께 해빙의 하

부에서 나타나는 주요 해빙종으로서(Hendey, 1981), 공해 환경에서 *Fragilariopsis curta*가 나타나는 것은 해빙이 빠르게 확장되고 있음을 의미한다(Burckle et al., 1987; Pichon et al., 1992). 따라서 이들의 분포가 규조 군집대 I에서 III으로 갈수록 상대적으로 풍부하게 산출되는 것은 연구지역에 분포하는 해빙이 규조 군집대 I에서 보다 상부 층으로 갈수록 더 확장되었음을 나타낸다.

규조 군집에 의한 연구 결과를 탄소동위원소 연대 측정결과와 비교하여 볼 때(표 1), 규조 군집대 I의

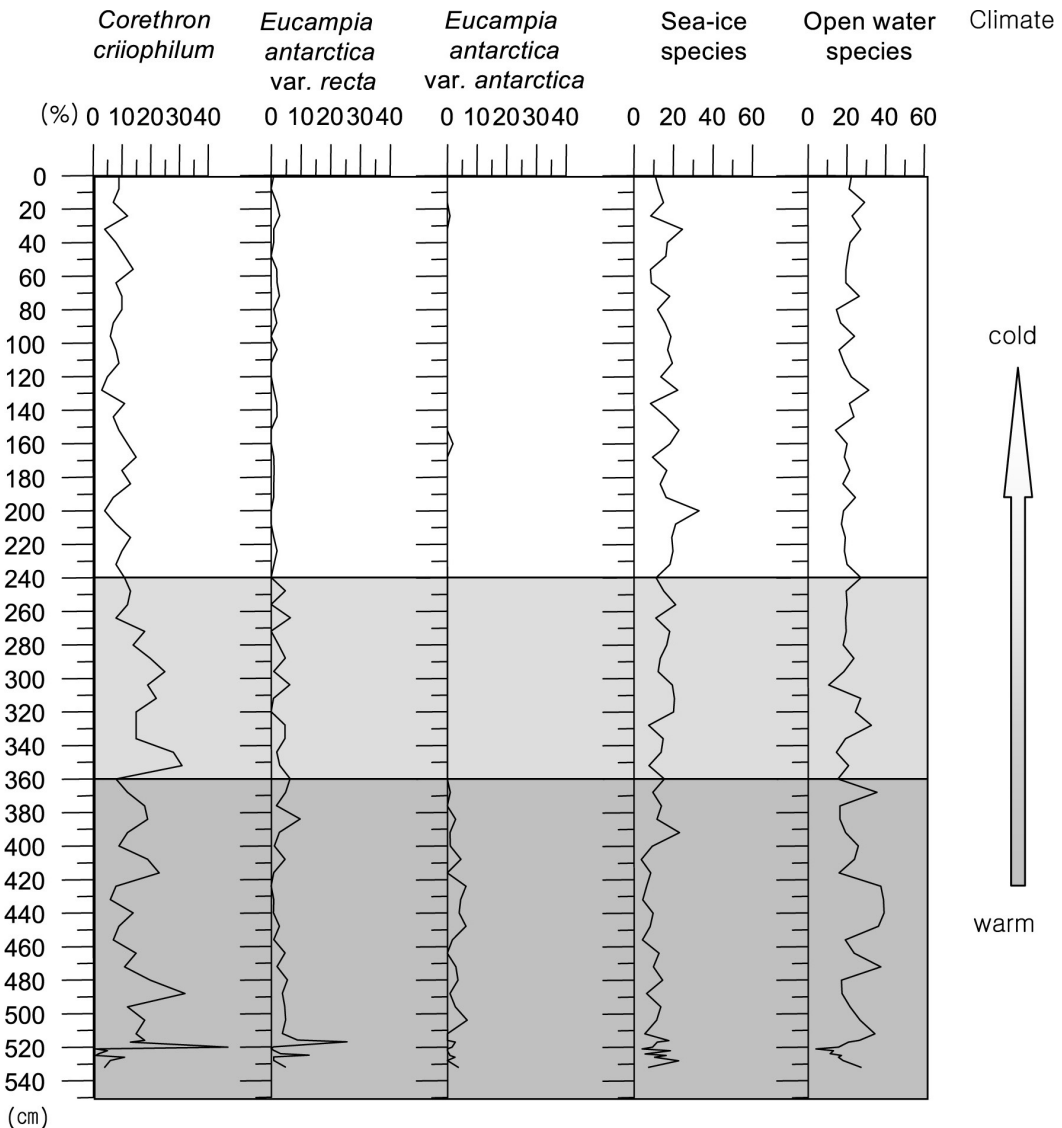
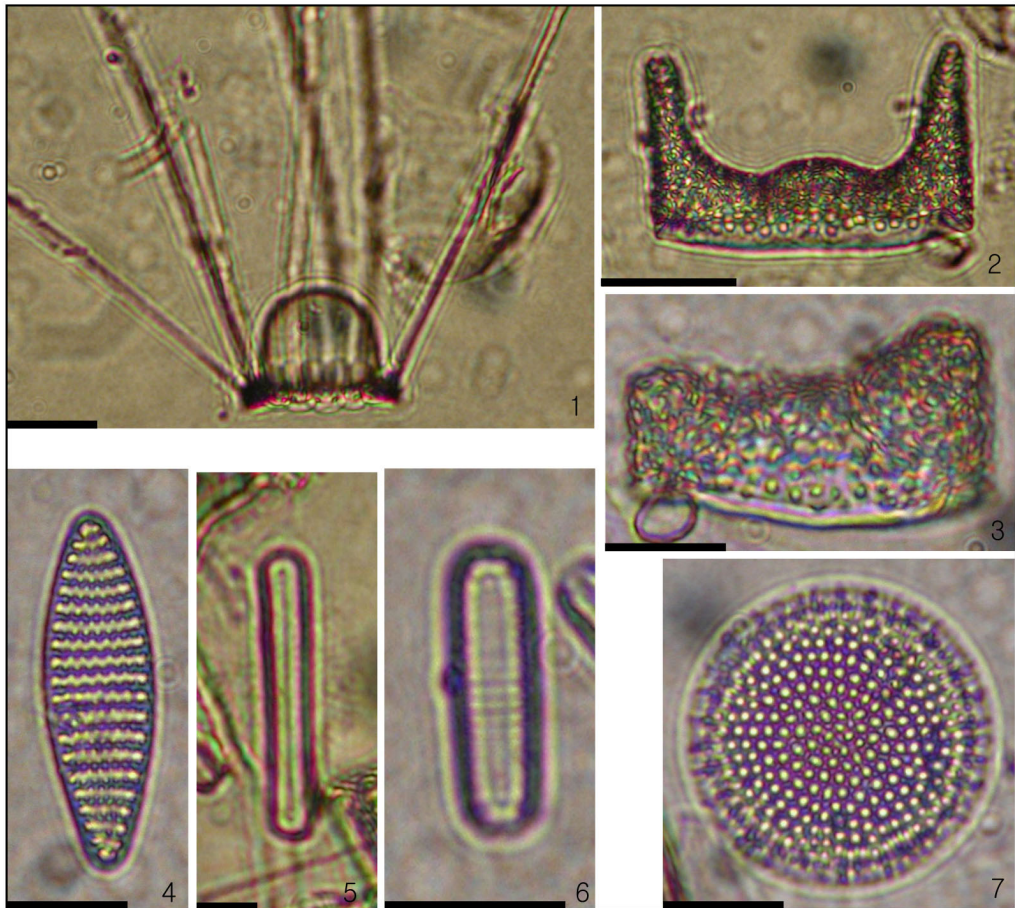


Fig. 3. Vertical distribution of diatom species indicating paleoclimate changes.

**Table 1.** Accelerator mass spectrometry  $^{14}\text{C}$  ages from core GC02-SOI03.

Depth (cmbsf)	$^{14}\text{C}$ age $\pm 1\sigma$ (yr BP)	Values used in age model*	Material
0	2909 $\pm$ 45	0	total organic carbon
102	4572 $\pm$ 40	1217	total organic carbon
202	5629 $\pm$ 45	2437	total organic carbon
302	6769 $\pm$ 55	3820	total organic carbon
402	8455 $\pm$ 55	5936	total organic carbon
502	10542 $\pm$ 70	8093	total organic carbon

\* Ages were calibrated using CALIB 5.0.1 (Stuiver and Reimer, 1993), assuming a constant reservoir age of 2909 yr.



**Fig. 4.** Light micrographs of the paleoenvironmental indicator (barscale: 3.1  $\mu\text{m}$ ). 1. *Corethron criophilum* Castracane: 296 cm; 2. *Eucampia antarctica* var. *recta* (Castracane) Mangin: 264 cm; 3. *E. antarctica* var. *antarctica* (Castracane) Mangin: 448 cm; 4. *Fragilariopsis kerguelensis* (O'Meara) Hustedt: 312 cm; 5. *F. cylindrus* (Grunow) Helmck and Krieger: 72 cm; 6. *F. curta* (V. Heurck) Hasle: 128 cm; 7. *Thalassiosira antarctica* Comber: 72 cm.

상한 시기인 약 5,000년 전에 따뜻한 시기(warm period)에서 추운 시기(cold period)로 변화하였음을 볼 수 있다. 이 시기 이후로는 계절적인 해빙이 확장되고 지속기간이 길어졌기 때문에 구조 군집대 II와 III에서 해빙종의 산출이 증가하는 원인이 되었다. 이는 일반적으로 홀로세 초기는 현재보다 따뜻한 기후였으며 약 5,000년 전경에 신빙기가 시작되면서 점차 추워지기 시작하였다는 기존의 연구 결과와도 일치한다(Porter and Denton, 1967; Denton and Karlen, 1973; Keigwin, 1996; Hodell *et al.*, 2001).

## 5. 결론

남극 사우스 오크니섬 서부지역에서 채취한 코어 퇴적물 GC02-SOI03으로부터 총 32속 65종의 구조 미화석을 감정하였으며, 군집의 조성을 분석하여 구조 군집대 I(533 cm~360 cm), 구조 군집대 II(352 cm~240 cm), 구조 군집대 III(232 cm~0 cm) 등 3개의 구조 군집대를 설정하였다. 산출된 구조 종중에서 해빙종인 *Fragilariopsis curta*, *F. cylindrus*와 공해종인 *T. antarctica*, *F. kerguelensis*의 산출 분포와 환경 지시종인 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*, *Eucampia antarctica* var. *recta*, *Corethron criophilum* 등의 수직 산출분포를 분석해 본 결과, 연구 층준의 하부에 해당하는 구조 군집대 I은 현재보다 따뜻한 환경에서 퇴적된 것으로 생각되며, 중부 층준인 구조 군집대 II가 퇴적되기 시작한 약 5천년 전에는 따뜻한 환경에서 추운 환경으로 변화한 것으로 보인다. 상부 층준인 구조 군집대 III은 하부와 중부에서보다 더 추운 환경에서 퇴적되었다.

## 사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 "지구온난화 대응책 마련을 위한 극지역 고기후 및 고해양 변화 복원기술 개발(PE07010)" 연구사업의 지원과 2002년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2002-070-C00087)에 의하여 연구되었습니다. 논문심사과정에서 세심하고 값진 조언을 해주신 충남대학교 윤희수 교수님과 서대문 자연사박물관 이의형 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Abelmann, A. and Gersonde, R., 1991, Biosiliceous particle flux in the Southern Ocean. *Marine Chemistry*, 35, 503-536.
- Buffen, A., Leventer, A., Rubin, A. and Hutchins, T., 2007, Diatom assemblages in surface sediments of the northwestern Weddell Sea, Antarctic Peninsula. *Marine Micropaleontology*, 62, 7-30.
- 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.
- Carmack, E.C. and T.D. Foster, 1975, On the flow of water out of the Weddell Sea. *Deep-Sea Research I*, 22, 711-724.
- Camerlenghi, A., Crise, A., Pudsey, C.J., Accerboni, E., Laterza, R. and Rebesco, M., 1997, Ten-month observation of the bottom current regime across a sediment drift of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula. *Antarctic Science*, 9, 426-433.
- 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.
- Dalziel, I.W.D., 1984, Tectonic evolution of a forearc terrane, southern Scotia Ridge, Antarctica. *Geological Society of America, special paper*, 200, 32pp.
- Deacon, G.R.E., 1979, The Weddell gyre. *Deep-Sea Research I*, 26, 981-995.
- Denton, G.H. and Karlen, W., 1973, Holocene climatic variations: their pattern and possible cause. *Quaternary Research* 3, 155-205.
- 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.
- 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, A.K.S.K., 1990, *Eucampia antarctica* var. *recta* (Mangin) stat. nov. (Biddulphiaceae, Bacillariophyceae): life stages at the Weddell Sea ice edge. *Phycologia*, 29, 2738.
- Gille, S., 2002, Warming of the Southern Ocean since the 1950s. *Science*, 295, 1275-1277.
- Grunow, A.M., Dalziel, I.W.D., Harrison, T.M. and



- Heizler, M.T., 1992, Structural geology and geochronology of subduction complexes along the margin of Gondwanaland: New data from the Antarctic Peninsula and southernmost Andes. *Geological Society of American Bulletin*, 104, 1497-1514.
- Hendey, Q.B. 1981. The geological succession at Langebaanweg, Cape Province, and global events of the late Tertiary. *South African Journal of Science* 77, 33-38.
- Hodell, D.A., Kanfoush, S.L., Shemesh, A., Crosta, X., Charles, C.D. and Guilderson, T.P., 2001, Abrupt cooling of Antarctic surface waters and sea ice expansion in the South Atlantic sector of the Southern Ocean at 5000 cal yr B.P. *Quaternary Research*, 56, 191-198.
- Jacobs, S.S. and Comiso, J.C., 1993, A recent sea-ice retreat west of the Antarctic Peninsula. *Geophysics Research Letters*, 20, 1171-1174.
- Jones, P.D., Marsh, R., Wigley, T.M.I. and Peel, D.A., 1993, Decadal timescale link between Antarctic Peninsula ice-core oxygen-18, deuterium and temperature. *Holocene*, 3, 14-26.
- Keigwin, L.D., 1996, The little ice age and medieval warm period in the Sargasso Sea. *Science*, 274, 1504-1508.
- King, E.C. and Barker, P.F., 1988, The margins of the South Orkney microcontinent. *Journal of Geological Society of London*, 145, 317-331.
- Leventer, A., 1991, Sediment trap diatom assemblages from the northern Antarctic Peninsula region. *Deep Sea Research*, 38, 1127-1143.
- Leventer A., 1998, The fate of Antarctic 'sea ice diatoms' and their use as paleoenvironment indicators. In: Lizotte, M.P. and Arrigo, K.R. (eds.), *Antarctic Sea Ice, Biological Processes, Interactions, and Variability*. Antarctic Research Series, 73, 121-117.
- Limbirt, D.W.S., 1974, Variations in the mean annual temperature for the Antarctic Peninsular, 1904-1972. *Polar research*, 17, 303-330.
- Locarnini, R.A., Whitworth III, T. and Nowlin Jr, W.D., 1993, The importance of the Scotia Sea on the outflow of Weddell Sea Deep Water. *Journal of Marine Research*, 51, 135-153.
- Marra, J. and Boardman, D.C., 1984, Late winter chlorophyll a distributions in the Weddell Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 19, 197-205.
- Matano, R.P., Gordon, A.L., Muench, R.D. and Palma, E.D., 2002, A numerical study of the circulation in the northwestern Weddell Sea. *Deep-Sea Research II*, 49, 4827-4841.
- Morrison, S.J., 1990, Warmest year on record on the Antarctic Peninsula. *Weather*, 454, 231-232.
- Neori, A. and Holm-Hansen, O., 1982, Effect of temperature on rate of photosynthesis in Antarctic phytoplankton. *Polar Biology*, 1, 33-38.
- NOCD (National Oceanography Command Detachment), 1985, *Sea Ice Climate Atlas*, Vol. 1, Antarctic. U.S. Navy NOCD, Asheville, North Carolina.
- Nowlin, W.D. and Klinck, J.M., 1986, The physics of the Antarctic Circumpolar Current. *Reviews of Geophysics*, 24, 469-491.
- Nowlin Jr, W.D. and Zenk, W., 1988, Westward bottom currents Ocean Drilling Program, College Station, TX, pp. 95-104. along the margin of the South Shetland Island arc. *Deep-Sea Research*, 35, 269-301.
- Orsi, A.H., Nowlin Jr, W.D. and Whitworth III, T., 1993, On the circulation and stratification of the Weddell Gyre. *Deep-Sea Research I*, 40, 169-203.
- Orsi, A.H., Whitworth III, T. and Nowlin Jr, W.D., 1995, On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Res*, 42, 641-673.
- Porter, S.C. and Denton, G.D., 1967, Chronology of Neoglaciation in the North America Cordillera. *American Journal of Science*, 265, 177-210.
- Pichon, J.J., Labeyrie, L.D., Bareille, G., Labracherie, M., Duprat, J. and Jouzel, J., 1992, Surface water temperature changes in the high latitudes of the southern hemisphere over the last glacial-interglacial cycle. *Paleoceanography*, 7, 289-318.
- Pudsey C.J. and Howe J.A. 1998, Quaternary history of the Antarctic Circumpolar. Current: evidence from the Scotia Sea. *Marine Geology*, 148, 83-112.
- Scambos, T.A., Hulbe, C. and Fahnestock, M., 2003, Climate-induced ice shelf disintegration in the Antarctic Peninsula. In: Domack, E., Burnett, A., Leventer, A., Conley, P., Kirby, M. and Bindschadler, R. (eds.), *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives*. Antarctic Research Series, 79, 79-92.
- Schwerdtfeger, W., 1976, Changes of temperature field and ice conditions in the area of the Antarctic Peninsula. *Monthly Weather Review*, 104, 1441-1443.
- Stark, P., 1994, Climatic warming in central Antarctic Peninsula area. *Weather*, 49, 215-220.
- Stuiver, M. and Reimer, P.J., 1993. Extended <sup>14</sup>C data base and revised CALIB 3.0 <sup>14</sup>C age calibration program. *Radiocarbon*, 35, 215-230.
- Taylor, F., Whitehead, J. and Domack, E., 2001, Holocene paleoclimate change in the Antarctic Peninsula: evidence from the diatom, sedimentary and geochemical record. *Marine Micropaleontology*, 41, 25-43.
- 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.  
Vaughan, D.G. and Doake, C.S.M., 1996, Recent atmospheric warming and retreat of ice shelves on the Antarctic Peninsula. *Nature*, 379, 328-350.  
Whitworth III, T., Nowlin Jr, W.D., Orsi, A.H., Locarnini, R.A. and Smith, S.G., 1994, Weddell Sea Shelf Water in the Bransfield Strait and Weddell-Scotia Confluence. *Deep-Sea Research I*, 41, 629-641.  
Zielinski, U. and Gersonde, R., 1997, Diatom distribution

in Southern Ocean surface sediments (Atlantic sector): implications for paleoenvironmental reconstructions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129, 213-250.

---

투 고 일 : 2007년 1월 31일  
심 사 일 : 2007년 2월 7일  
심사완료일 : 2007년 3월 21일