

남극 엽층리 퇴적물로부터 구조 종을 이용한 고기후 변화 연구

박영숙^{1,*} · 윤호일² · 유규철² · 이영업¹

¹전북대학교 자연과학대학 지구환경과학과, 561-756, 전주시 덕진구 백제대로 567

²한국해양연구원 부설 극지연구소 극지기후연구센터, 406-840, 인천광역시 연수구 송도미래로 26

Diatom Succession Representing the Paleoclimatic Change from Laminated Sediments around Antarctica

Young-Suk Bak^{1,*}, Ho Il Yoon², Kyu-Cheul Yoo², and Young-Up Lee¹

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 561-856, Korea

²Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea.

Abstract: This study investigated the paleoclimatic change using diatoms that were extracted from the high-resolution laminated layers of diatom ooze sediment cores GC08-EB01 in the eastern basin of the Bransfield Strait, Antarctica. The range of diatom valves per gram of dry sediment was from 0.4 to $4.2 \times 10^8 \text{ g}^{-1}$ in quantitative diatom assemblage analysis. Laminations are classified using visually dominant diatom species and terrigenous content. Biogenic diatom ooze laminae characterised by bloom of *Corethron crilophilum*, *Eucampia antarctica*, *Fragilariopsis curta*, *F. kerguelensis*, *Odontella weissflogii*, *Proboscia inermis*, *R. styliformis*, *Thalassiosira antarctica*, and *Chaetoceros* resting spores. Terrigenous laminae characterised by mixed diatom assemblage. The ratio of (*Fragilariopsis curta*+*F. cylindrus*)/*Thalassiosira antarctica* increase in horizons, suggesting increased sea-ice cover in the study area during the late Holocene (cold events). As a result, five cold events are identified on the basis of frequency of the critical taxa throughout the section.

Keywords: Diatom, Bransfield Strait, Biogenic diatom laminae, Terrigenous laminae, cold events

요약: 남극 브랜스필드 해협 동부분지로부터 획득한 GC08-EB01 코어퇴적물의 고해상도 엽층리로부터 구조를 이용하여 고기후변화를 연구하였다. 구조 정량 분석의 결과 구조 개체수 농도는 $0.4\text{-}4.2 \times 10^8 \text{ g}^{-1}$ 로 매우 풍부하게 산출되었으며, 엽층리는 생물기원의 구조가 풍부한 층과 육성기원 퇴적물이 풍부한 층으로 구분된다. 구조 엽층리는 *Corethron crilophilum*, *Eucampia antarctica*, *Fragilariopsis curta*, *F. kerguelensis*, *Odontella weissflogii*, *Proboscia inermis*, *R. styliformis*, *Thalassiosira antarctica*와 *Chaetoceros* resting spores 등의 번성이 특징적이며, 육원성 엽층리에서는 구조 군집이 혼합되어 나타나는 것이 특징이다. 홀로세 후기 동안 (*Fragilariopsis curta*+*F. cylindrus*)/*Thalassiosira antarctica*의 산출 수직 분포비가 급격히 증가하는 구간은 해빙의 확장을 지시하며, 연구 코어 GC08-EB01 코어퇴적물이 퇴적되는 동안 적어도 5번의 한랭기가 있었음을 알려준다.

주요어: 구조, 브랜스필드 해협, 생물기원 구조 엽층리, 육원성 엽층리, 한랭기

*Corresponding author: sydin@jbnu.ac.kr
Tel: 82-10-9740-8804
Fax: 82-63-270-3399

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

엽층리성 해양 퇴적물은 표층수로부터 계속적으로 유입된 고해상 기록을 가지고 있다(Grimm et al., 1997; Kemp et al., 1998). 엽층리성(laminated sediments) 해양 퇴적물의 보존은 연안의 용승류 아래나 분지의 가장자리에서 산소가 적고 생물 교란을 받지 않는 환경에서 잘 형성되는 것으로 알려져 있으나 지난

수십년간 동태평양 적도부근과 북대서양의 심해에서도 엽층리성 구조 연니가 발견되었다. 심해에서 엽층리의 보존은 저층수의 혐기성 때문이 아니라 오히려 단단한 구조의 활발한 대량 유입 때문으로 생각된다 (Brodie and Kemp, 1994; Bodén and Backman, 1996; Bull et al., 2000; Kemp et al., 1995; King et al., 1995). 남극 반도의 해양 생태계는 연안, 대륙붕대와 계절적인 해빙대로 특징지워지는데 여름철 최소 해빙대와 겨울철 최대 해빙대의 사이인 경계지역 (marginal ice zone)에서는 빙하가 녹는 동안과 여름철에 1차 생산자인 식물성플랑크톤의 대증식이 일어난다. 또한, 여름동안의 일차 생산력은 빈영양 상태에서부터 높은 클로로필 농도를 가진 용승류에 이르기까지 다양한 해수 환경의 영향을 받는다 (Holm-Hansen and Mitchell, 1991; Basterretxea and Artistegui, 1999; Figueiras et al., 1999).

구조는 남대양에서 1차 생산자의 약 75%를 차지하고 구조와 탄소의 지구적 순환에 매우 중요한 역할을 하고 있으며 (Treguer et al., 1995), 일차 생산력에서의 변화는 주로 해빙의 변화와 표층수의 안정성 및 성층화에 의해 일어난다. 브랜스필드 해협 (Bransfield Strait)은 기후와 해양의 변화에 매우 민감하며, 지난 수천년 동안 이 지역에서의 일차생산력은 일반적으로 감소하는 경향을 보였다 (Bárcena et al., 1998). 또한, 브랜스필드 해협에서 구조 생산량의 변화는 약 250년 주기를 가진 대자율, 유기탄소등의 변화와 일치한다 (Leventer et al., 1996; Bárcena et al., 1998). 남극 브랜스필드 해협의 엽층리성 해양 퇴적물로부터 구조를 연구하는 것은 과거의 기후 변화 동안 기후와 해양의 변화 양상에 대한 정보를 상세히 얻는데 매우 중요한 자료가 된다. 본 연구는 브랜스필드 해협 동부부분지에서 채취한 중력코어퇴적물 (GC08-EB01)에서 구조가 풍부한 생물기원과 육원성 퇴적물 기원의 엽층리로부터 구조를 관찰하여 구조 군집의 변화를 알아보고, 기후변화와 구조종의 변화를 대비하여 보고자 한다.

연구 지역 및 방법

연구 지역

브랜스필드 해협은 남북으로 남극반도와 남쉐틀랜드 군도사이에 위치하는 반폐쇄성 분지(semi-enclosed basin)이다. 브랜스필드 분지는 세 개의 소분지로 나

뉘진다. 연구 지역은 동부 소분지로서 남동쪽으로 연장되어 있으며, 중앙 소분지보다 좁고, 약 2,500 m 깊이에 달한다 (Bárcena et al., 2002). 브랜스필드 해협에서 표층수 순환은 벨링스하우젠해 (Bellingshausen Sea)와 웨델해 (Weddell Sea)로부터 유입되며, 벨링스하우젠 해수는 비교적 따뜻하고 저염인 반면에 웨델 해수는 차갑고 고염의 특성을 가진다 (García et al., 2002). 브랜스필드 해협에서 계절적인 해빙(sea-ice)의 분포는 매우 복잡한 양상을 가지며, 겨울철 해빙의 최대 크기가 남극반도의 57°S의 범위까지 확장되나 여름철에는 완전히 해빙의 영향을 벗어난다. 해빙의 영향을 벗어난 공해 (open-water)환경의 시기동안 규질의 유기물들이 대량 유입되는 반면에, 해빙으로 덮여 있는 동안에는 유입되는 규질 유기물의 양이 매우 적다 (Abelmann and Gersonde, 1991).

연구 방법

연구에 사용한 코어퇴적물 GC08-EB01은 62°02.0'S, 56°13.0'W의 위치에서 채취하였으며 (Fig. 1), 총 길이 796 cm의 엽층리상 퇴적물에서 밝은 색의 구조연니층과 어두운 색의 퇴적물로부터 총 97개의 시료를 획득하였다. 구조 분석을 위해 각 시료당 2 g을 취하여 박영숙 외(2007)의 시료처리과정을 토대로 실험하였다. 또한, 구조의 정량분석을 위한 슬라이드 준비를 위해서 Scherer (1994)의 연구 방법을 사용하였고, 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)에 의해 절대 개체수 농도를 계산하였다.

*Chaetoceros resting spores*의 경우, 다량 산출되는 층수가 많아서 각 view field에서 전체 개체수를 산정하였고 각 시료의 개체 수에는 포함시키지 않았으나, 특정 층수에서 폭발적으로 산출되는 구조종의 경우에는 전체 산출 개체수에 포함시켰다.

연구 코어퇴적물의 퇴적시기를 알아보기 위하여 한국해양연구원 극지기후연구센터에서 측정된 탄소동위원소 절대연령은 다음과 같다 (Table 1).

결 과

구조 군집

브랜스필드 해협 동부 소분지에서 채취한 GC08-

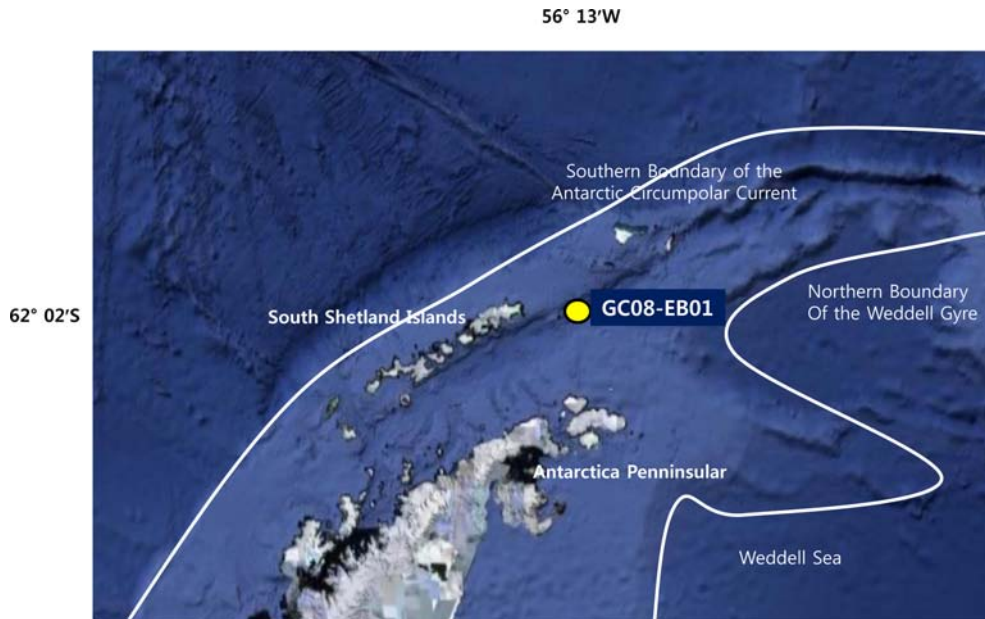


Fig. 1. Locality map of core sediment, GC08-EB01, in Antarctica. White lines show fronts and boundaries of the ocean current systems: southern boundary of the Antarctic Circumpolar Current, northern boundary of the Weddell Gyre (Orsi et al., 1993, 1995; Whitworth et al., 1994).

Table 1. Results of AMS ^{14}C datings of core GC08-EB01

Depth (cm)	Age ($^{14}\text{CyrB.P.}$)		Material	Lab code
	Uncorrected	Corrected ^a		
83	1,790±20	490±20	shell	UGAMS#344
443	3,950±25	650±25	shell	UGAMS#7347

^aA 1300-yr correction was applied to all ages of core GC08-EB01. This correction is also based upon the fact that the Antarctic marine reservoir effect averages 1,300 yr (Berkman et al., 1998)

EB01 코어퇴적물의 전체 층준에서 규조화석이 매우 풍부하게 산출되었으며 총 23속 59종의 규조 화석이 감정되었다. 특히, 생물기원의 엽층리에서 특정 종의 출현이 폭발적으로 증가하는 경향을 보였고, 육원성 엽층리에서는 폭발적인 증가 보다는 여러 종들이 고루 산출되었다. 규조 개체수 농도의 범위는 $0.4\text{-}4.2 \times 10^8 \text{ g}^{-1}$ 으로 매우 풍부하게 산출되었다. 규조 화석 군집 조성을 살펴보면 *Fragilariopsis curta*가 전체 산출의 16.1%, *F. kerguelensis* 10.6%, *Proboscia inermis* 12.3%, *Rhizosolenia styliformis* 9.6%와 *Thalassiosira antarctica* 12.9%가 우세하게 산출되었으며 전체의 61.5%를 차지한다.

규조 번성종

연구 코어퇴적물 GC08-EB01로부터 산출된 종들

중 *Corethron crilophilum*, *Eucampia antarctica*, *Fragilariopsis curta*, *F. kerguelensis*, *Odontella weissflogii*, *Proboscia inermis*, *Rhizosolenia styliformis*, *Thalassiosira antarctica*와 *Chaetoceros resting spores*는 특정한 층준에서 폭발적으로 개체수가 증가하는 경향을 보인다(Fig. 2).

*Corethron crilophilum*은 웨델해의 늦겨울에 해빙의 가장자리 부근에 나타나는 식물성 플랑크톤 군집의 중요한 구성원으로서(Marra and Boardman, 1984), 336 cm 층준에서 다량 산출된다.

Eucampia antarctica var. *recta*는 해빙과 관계가 있는 종(Fryxell and Prasad, 1990; Fryxell, 1991)으로 모든 층준에서 꾸준히 산출되며 167 cm 층준에서 산출량은 증가한다. 공해환경을 지시하는 *E. antarctica*

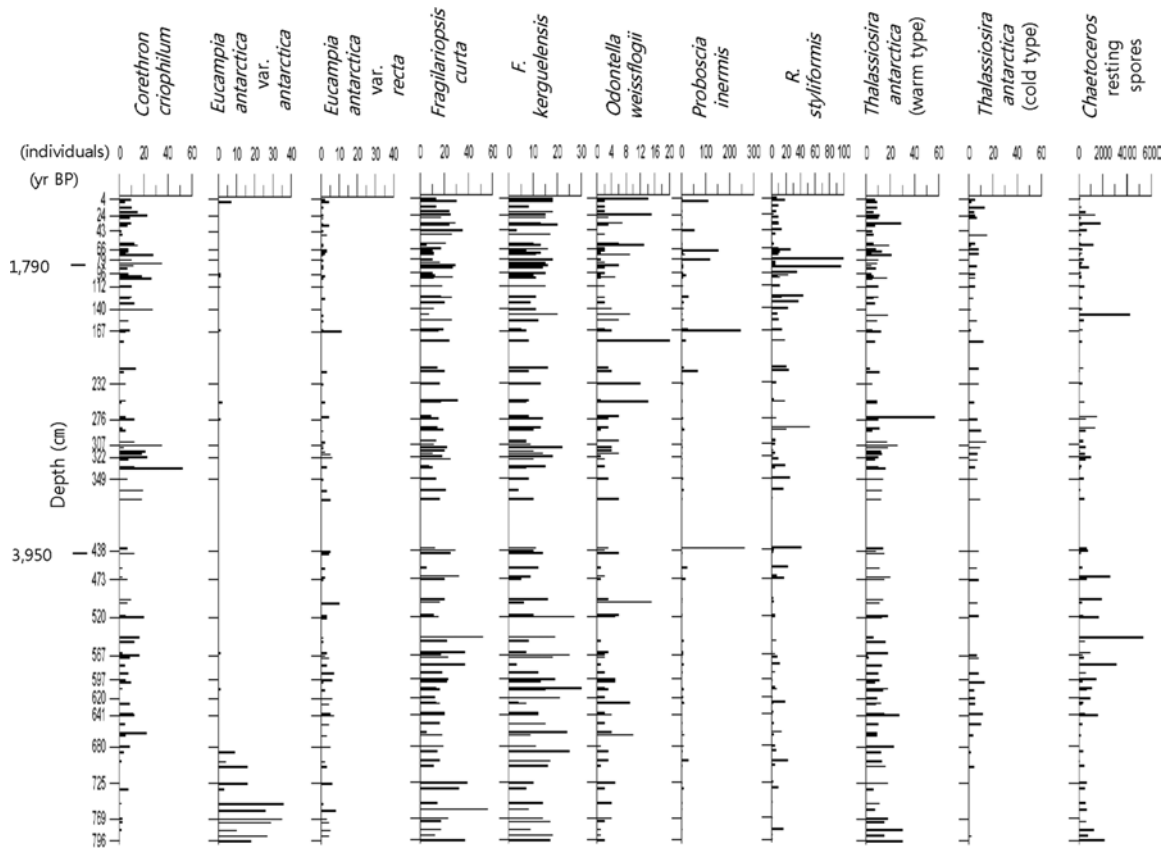


Fig. 2. Down-core variations of relative abundance of the characteristic species (*Corethron criophilum*, *Eucampia antarctica* var. *antarctica*, *Eucampia antarctica* var. *recta*, *Fragilariopsis curta*, *F. kerguelensis*, *Odontella weissflogii*, *Proboscia inermis*, *R. styliformis*, *Thalassiosira antarctica* (warm type), *Thalassiosira antarctica* (cold type) and *Chaetoceros* resting spores. ^{uc}yr BP : Uncorrected Age.

var. *antarctica*는 하부 층준인 686-790 cm 구간에서 매우 풍부하다.

*Fragilariopsis curta*는 해빙의 하부에서 나타나는 주요 해빙 종으로서(Hendey, 1981), 전체적으로 풍부하게 산출되는 경향을 보이며, 545, 758 cm 층준에서 가장 풍부하게 산출된다.

*F. kerguelensis*는 브랜스필드 분지 서쪽에 분포하는 남극 순환수(Antarctic circumpolar current)나 벨링스하우젠해로부터 따뜻한 해류의 유입을 지시하며(Zielinski and Gersonde, 1997), 전체적으로 고루 산출되나 특히 520, 567, 608, 686 cm 층준에서 풍부하게 산출된다.

*Odontella weissflogii*는 전형적인 여름철 남극종(Pike et al., 2008)으로서 4, 24, 61, 180, 232, 255, 502, 666 cm 층준에서 상대적으로 풍부하게 산출된다.

*Proboscia inermis*와 *Rhizosolenia styliformis*는 해

빙환경과는 연관이 없이 공해 환경에서 풍부한 종들이다(Zielinski and Gersonde, 1997). 이들의 산출은 435 cm 이하의 층준에서는 상대적으로 산출이 적고 *P. inermis*는 167, 435 cm 층준에서, *R. styliformis*는 79, 89, 287 cm에서 다량 산출된다.

*Thalassiosira antarctica*는 여름과 가을철에 대번성하는 종으로 알려져 있다. 남극반도 주변에서 초여름 식물성 플랑크톤의 주 구성원이며(Sommer, 1991), 성층화되지 않거나 약하게 형성된 남극 표층수에서 대번성을 일으키는 주 구성원이다(Cremer et al., 2003). 연구지역에서는 *T. antarctica* cold type과 *T. antarctica* warm type (Buffen et al., 2007)이 전 층준에 걸쳐 꾸준히 산출되며, 특히 *T. antarctica* warm type이 273 cm 층준에서 급증한다.

Chaetoceros resting spores의 산출빈도는 용빙수의 유입에 의해 이루어진 안정되고 성층화된 해수에

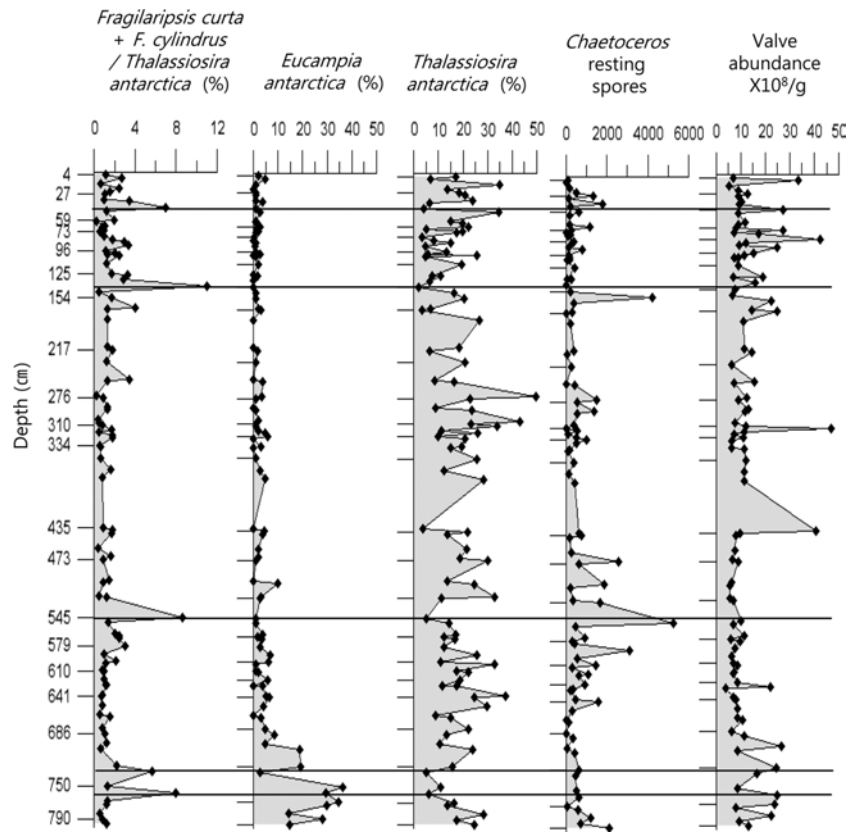


Fig. 3. Ratio of (*Fragilariopsis curta*+*F. cylindrus*)/*Thalassiosira antarctica* and down-core variations relative abundances of *Eucampia antarctica* (%), *Thalassiosira antarctica* (%), *Chaetoceros* resting spores, and number of valves per gram of sediment.

서 풍부하며, 해빙단(sea-ice edge) 부근에서 엽층이나 질소의 부족으로 인하여 휴면포자를 형성하게 된다(Leventer, 1991, 1992; Crosta et al., 1997). 연구코어 퇴적물에서의 휴면포자의 산출은 하부에서 상부층준까지 꾸준하며, 특히 폭발적으로 급증하는 구간은 147, 545, 579 cm 층준이다.

고환경 해석

GC08-EB01 코어퇴적물에서 폭발적인 변성을 나타낸 층들의 계절적인 특징을 살펴 보면 *Chaetoceros* resting spores와 *Corethron criophilum*은 특별히 초봄에 대변성을 일으키며(Stickley et al., 2005), 공해에서는 늦봄과 여름에 해저로 유입되는 규소가 풍부해지기 때문에 성층의 파괴가 일어나서 혼합양상을 보인다. *Chaetoceros* spp.은 해빙이 녹고 표층수가 성층화 되는 봄 동안에 우세하게 나타나는 반면 *F.curta*와 *F. cylindrus*는 초봄에 해빙이 존재할 때 나타난다(Denis et al., 2006; Maddison et al., 2005, 2006). *F.*

*keruelensis*는 해빙이 후퇴하고 표층수가 따뜻한 여름동안에 지속되며, *Thalassiosira antarctica*는 여름/가을 시기에 풍부하게 산출된다(Crosta et al., 2008). 남극반도에서 홀로세 후기에 나타나는 *Rhizosolenia* spp.가 풍부한 엽층리는 대변성 후에 빠른 침전으로 인해 형성된 것이며(Leventer and Dunbar, 1996), 늦은 봄에서 초여름까지 전이기간동안 *Rhizosolenia* spp.가 풍부하게 산출된다. *Rhizosolenia* spp.과 *Proboscia* spp.의 대변성은 여름철 표층수가 강하게 성층화된 동안에 수온약층의 아래에서 나타나며 이들의 대량 퇴적은 가을철에 수온약층이 약해져서 혼합될 때 일어난다.

연구코어의 686-796 cm 구간에서는 따뜻한 공해환경을 지시하는 *Eucampia antarctica* var. *antarctica*가 풍부하게 산출되며, 520-686 cm 구간에서는 초봄 해빙을 지시해주는 *Fragilariopsis curta*와 용빙수의 유입을 지시하는 *Chaetoceros* resting spores가 상부로 갈수록 증가한다. 349-520 cm 구간에서는 가을철에

대량 퇴적되는 *Proboscia inermis*, 232-349 cm 구간에서는 초봄 지시종인 *Corethron criophilum*, 여름 지시종인 *Thalassiosira antarctica* (warm type), *Odontella weissflogii*의 순으로 번성한다. 99-232 cm 구간에서는 여름 지시종인 *Odontella weissflogii*, *Proboscia inermis*, 초봄 지시종인 *Chaetoceros resting spores*의 순으로 번성한다. 최상부 층준인 4-99 cm 구간에서는 최하부에 *Rhizosolenia styliformis*, *Odontella weissflogii* 순으로 공해종이 번성한다. 이들의 산출양상은 전반적으로 장기간동안의 해빙의 영향이 매우 적은 환경에서 퇴적되었음을 시사하며, 좀 더 세밀하게는 계절적인 해빙의 확장과 축소로 인한 규모 군집의 변화가 잘 나타나 있음을 알 수 있다.

엽층리상 퇴적층은 해빙의 계절적인 후퇴와 순환에 의해서 일어나는 생물학적, 퇴적학적과정에 의해서 형성된다. 각각의 엽층리는 규모의 생산적 변화를 나타내며 간빙기동안에 형성된다(Domack et al., 2003). 엽층리상 퇴적물은 해빙에서의 계절적인 변화를 뚜렷이 반영한다. *Fragilariopsis curta*+*F. cylindrus*/*Thalassiosira antarctica*의 수직분포비는 추운 기후를 의미한다. 또한, 공해 환경에서 *Fragilariopsis curta*가 다량 나타나는 것은 해빙이 빠르게 확장되고 있음을 의미한다(Burckle et al., 1987; Pichon et al., 1992). 연구코어에서 *Fragilariopsis curta*+*F. cylindrus*/*Thalassiosira antarctica*의 수직분포비를 조사한 결과, 연구지역은 전반적인 경향이 공해환경이 주를 이루면서 계절적인 해빙의 영향 하에 놓여 있었으나, GC08-EB01 코어퇴적물이 퇴적되는 동안 각 43, 140, 545, 732, 758 cm 층준에서 최소 5번의 한랭기가 있었음을 알 수 있다(Fig. 3).

결론

GC08-EB01 코어퇴적물로부터 총 23속 59종의 규모 화석이 감정되었으며, 규모 개체수 농도의 범위는 $0.4\text{-}4.2 \times 10^8 \text{ g}^{-1}$ 으로 매우 풍부하게 산출되었다. 특히, 생물기원의 엽층리에서 특징종의 출현이 폭발적으로 증가하는 경향을 보였고, 육원성 엽층리에서는 폭발적인 증가보다는 혼합된 양상을 보였다. 특징종은 *Corethron criophilum*, *Eucampia antarctica*, *Fragilariopsis curta*, *F. kerguelensis*, *Odontella weissflogii*, *Proboscia inermis*, *Rhizosolenia styliformis*, *Thalassiosira antarctica*와 *Chaetoceros resting spores*이다. 특징 종들의 폭발

적인 대변성은 계절적인 변화에 의한 표층수의 성층화 때문에 특정 규모종이 엽층리를 형성하는 것으로 생각된다. GC08-EB01 퇴적물이 퇴적되는 동안, 전체적인 퇴적환경은 공해환경이 주를 이루면서 계절적인 해빙의 분포 변화가 있었다. 또한, 기후변화를 지시해주는 *Fragilariopsis curta*+*F. cylindrus*/*Thalassiosira antarctica*의 상대적인 수직분포비에 의하면 퇴적되는 동안 적어도 5번 정도의 한랭기가 있었음을 알 수 있다.

사 사

이 논문은 한국해양연구원 부설 극지연구소의 “서남극 빙봉 변화 관측시스템 구축 및 제4기 해빙사복원기술 개발(PP14010)” 연구사업과 2014년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다 (NRF-2012R1A1A2003814). 논문심사과정에서 값진 조언을 해 주신 두 분 심사위원께 깊은 감사를 드립니다.

References

- 박영숙, 이종덕, 윤혜수, 윤호일, 김향숙, 2001, 서남극 브랜스필드 동부 분지내 코어 퇴적물(A9-EB01)의 방산층. 한국지구과학회지, 22(2), 130-137.
- 박영숙, 이종덕, 윤호일, 이재일, 2007, 남극 사우스오크니 제도 서부 해역의 코어퇴적물에서 산출된 규모 군집. 지질학회지, 43(1), 33-42.
- Abelmann, A. and Gersonde, R., 1991, Biosiliceous particle flux in the Southern Ocean. Marine Chemistry, 35, 503-536.
- Bárcena, M.Á., Gersonde, R., Ledesma, S., Fabres, J., Calafat, A. M., Canals, M., Sierro, F.J. and Flores, J. A., 1998, Record of Holocene glacial oscillations in Bransfield Basin as revealed by siliceous microfossil assemblages. Antarctic Science, 10(3), 269-285.
- Bárcena, M.Á., Isla, E., Plaza, A., Flores, J.A., Sierro, F.J., Masque, P., Sanchez-Cabeza, J.A. and Palanques, A., 2002, Bioaccumulation record and its relation with paleoclimatic evolution in the western Bransfield Strait. Deep-Sea Reserch II, 49(4-5), 935-950.
- Basterrexea, G. and Aristegui, J., 1999, Phytoplankton biomass and production during late austral spring (1991) and summer (1993) in the Bransfield Strait. Polar Biology, 21, 11-22.
- Berkman, P.A., Andrew, J.T., Bjorck, S., Colhoun, E.A., Emslis, S., Goodwin, I.D., Hall, B.L., Hart, C.P., Hirakawa, K., Igarashi, A., Ingolfson, O., Lopez-

- Martínez, J., Lyons, W.B., Mabin, M.C.G., Quilty, P.G., Taviani, M. and Yoshida, Y., 1998, Circum-Antarctic coastal environmental shifts during the Late Quaternary reflected by emerged marine deposits. *Antarctic Science* 10, 345-362.
- Bóden, P. and Backman, J., 1996. A laminated sediment sequence from northern North Atlantic Ocean and its climatic record. *Geology*, 24, 507-510.
- Brodie, I. and Kemp, A.E.S., 1994. Pelletal structures in Peruvian upwelling sediments. *Journal of the Geological Society*, 15(1), 141-150.
- 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.
- Bull, D., Kemp, A.E.S., Weedon, G.P., 2000. A 160-k.y.-old record of El Niño-Southern Oscillation in marine production and coastal runoff from Santa Barbara Basin, California, USA. *Geology*, 28 (11), 1007-1011.
- 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.
- Cremer M, Kupper K, Wagler B, Wizelman L, von Hase J, Weiland Y, Kreja L, Diebold J, Speicher MR, Cremer T., 2003, Inheritance of gene density-related higher order chromatin arrangements in normal and tumor cell nuclei. *Journal of Cell Biology*, 162, 809-820.
- Crosta, X., J.-J. Pichon and M. Labracherie, 1997, Distribution of *Chaetoceros* resting spores in modern peri-Antarctic sediments. *Marine Micropaleontology*, 29, 283-299.
- Crosta, X., Denis, D. and Ther, O., 2008, Sea ice seasonality during the Holocene, Adélie Land, East Antarctica. 66, 222-232.
- Denis, D., Crosta, X., Zaragosi, S., Romero, O., Martin, B. and Mas, V., 2006, Seasonal and subseasonal climate changes recorded in laminated diatom ooze sediments, Adélie Land, East Antarctica. *The Holocene*, 16(8), 1137-1147.
- 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. In: Domack, E., Leventer, A., Burnett, A., Bindschadler, R., Convey, P., Kirby, M. (Eds.), *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives*. American Geophysical Union, Washington, D.C., 205-224.
- Figueiras, F.G, Arbones, B and Estrada, M, 1999, Implications of bio-optical modelling of phytoplankton in Antarctic waters: further evidence of no light limitation in the Bransfield Strait. *Limnology and Oceanography*, 44, 1599-1608.
- 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), 675-685.
- 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, 27-38.
- García, M.A., Castro, C.G., Rios, A.F., Doval, M.D., Roson, G., Gomis, D. and Lopez, O., 2002, Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96. *Deep-Sea Research II*, 49, 585-602.
- Grimm, K.A., Lange, C.B. and Gill, A.S., 1997, Self-sedimentation of phytoplankton blooms in the geologic record. *Sedimentary Geology*, 110, 151-161.
- 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.
- Holm-Hansen, O. and Mitchell, B.G., 1991, Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region. *Deep Sea Research*, 38, 961-9811.
- Kemp, A.E.S., Baldauf, J.G., Pearce, R.B., 1995. Origins and paleoceanographic significance of laminated diatom ooze from the eastern equatorial Pacific Ocean. *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results*, 138, 641-645.
- Kemp, A.E.S., Pearce, R.B., Pike, J., Marshall, J.E.A., 1998, Microfabric and microcompositional studies of Pliocene and Quaternary sapropels from the Eastern Mediterranean. In: Robertson, A.H.F., Emeis, K.-C., Richter, C., Camerlenghi, A. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 160, 333-348.
- King, S.C., Kemp, A.E.S., Murray, J.W., 1995. Benthic foraminifera assemblages in Neogene laminated diatom ooze deposits in the east equatorial Pacific Ocean (Site 844). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Leg 138*, 665 p.
- Leventer, A., 1991, Sediment trap diatom assemblages from the northern Antarctica Peninsula region. *Deep Sea Research*, 38, 1127-1143.
- Leventer, A., 1992, Modern distribution of diatoms in sediments from the George V Coast, Antarctica. *Marine Micropaleontology*, 19, 315-332.

- Leventer, A. and Dunbar, R., 1996, Factors influencing the distribution of diatoms and other algae in the Ross Sea. *Journal of Geophysical Research*, 101, 18489-18500.
- Maddison, E.J., Pike, J., Leventer, A. and Domack, E.W., 2005, Deglacial seasonal and sub-seasonal diatom record from Palmer Deep, Antarctica. *Journal of Quaternary Science*, 20, 435-446.
- 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.
- Marra, J. and Boardman, D.C., 1984, Late winter chlorophyll a distributions in the Weddell Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 19, 197-205.
- 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 Research*, 42, 641-673.
- Sommer, U., 1991. Comparative nutrient status and competitive interactions of two Antarctic diatoms (*Corethron criophilum* and *Thalassiosira antarctica*). *Journal of Plankton Research*, 13, 61-75.
- Pichon, J.J., Labeyrie, L.D., Baille, 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.
- Pike, J., Allen, C.S., Leventer, A., Stickley, C.E. and Pudsey, C.J., 2008, Comparison of contemporary and fossil diatom assemblages from the western Antarctic Peninsula shelf. *Marine Micropaleontology*, 67, 274-287.
- 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
- Stickley, C.E., Pike, J., Leventer, A., Dunbar, R., Domack, E.W., Brachfeld, S., Manley, P. and McClennen, C., 2005, Deglacial ocean and climate seasonality in laminated diatom sediments, Mac. Robertson Shelf, Antarctica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 227, 290-310.
- 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.
- 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.

Manuscript received: April 13, 2015

Revised manuscript received: April 20, 2015

Manuscript accepted: April 28, 2015