

남극반도 북부 남 스코티아 해의 제4기 후기 동안의 고해양 변동

윤호일¹ · 남상현¹ · 유규철^{1,*} · 박병권¹ · 김예동¹ · 오재경²

¹한국해양연구원 극지연구소

²인하대학교 해양학과

요 약

최근 남극반도에서 관찰된 온난화 현상과 그에 따른 환경 변화를 예측하기 위해서 과거에 일어났던 단주기의 기후변화에 대한 정보를 얻는 것은 매우 시급한 일이다. 남극반도 주변에서 일어난 제4기 후기의 고기후 및 고해양 정보를 얻기 위해 남 스코티아 해로부터 얻은 두 개의 중력 코어 퇴적물에 대하여 퇴적상 분석, 퇴적학 및 지화학적 특성 분석 그리고 방사선 탄소연대 자료를 분석한 결과 남 스코티아 해역은 후기 플라이스토세에서 홀로세 동안 세 차례의 고환경 변화를 겪은 것으로 보인다. Marine Isotope Stage (MIS) 3 (~22,500 yr B.P.) 동안 남 스코티아 해는 부분적으로 외양(open water) 환경이 조성되었으며, 이 때 해양의 생물생산력의 증가로 인해 퇴적물 내의 총유기탄소량이 다소 증가하였다. 마지막 최대빙하기(22,500 ~ 12,500 yr B.P.) 동안 연구 해역의 해빙(sea ice) 점유율은 높아졌으며, 그 결과 생물생산력이 줄어들어 퇴적물 내 총유기탄소량이 급격히 감소하였다. 반면에 웨델 해 기원의 남극 저층수의 영향이 증대되어 육성기원 퇴적물 공급이 활발해졌고, 그 결과 퇴적물 내에 실트엽층이 발달하였다. 최대 빙하기 동안 웨델 해의 폴리냐에서는 일시적으로 생물생산력이 증가하였으며, 이 때 생성된 심층수에 의해 남 스코티아 해는 일시적으로 유기물 공급을 받았다. 본격적인 해빙(deglaciation)은 12,500 yr B.P.경부터 시작되었으며 이 때 생물생산력은 점차 증대되어 퇴적물 내 총유기탄소량이 늘어난 반면에 육성기원 퇴적물의 공급은 줄어들었다. 이 시기에 연구 해역은 일시적으로 단주기의 냉각기(10,400~9,500 yr B.P.)를 경험하였으며, 이 때 해빙(sea ice) 점유율이 증가한 결과, 퇴적물 내 총유기탄소량이 줄어든 반면에 육성기원 물질의 양은 증가하였다. 남 스코티아 해역은 홀로세 중기 온난기(8,300~2,400 yr B.P.)가 되면서 전형적인 외양(open-water) 환경으로 변하여 해양으로부터 많은 양의 유기물 공급이 있었으며 그 결과 구조연기층을 형성하였다. 남 스코티아 해역은 약 2,400 yr B.P.경에 신빙하기(Neogacial)가 시작되면서 활발해진 웨델 해 기원의 저층류의 영향을 받아 육성기원 퇴적물의 공급이 다소 증가하였다.

주요어: 남극반도 북부, 남 스코티아 해, 후기 플라이스토세-홀로세, 고해양/고기후 변동

Ho Il Yoon, Sang Heon Nam, Kyu-Cheul Yoo, Byong-Kwon Park, Yeadong Kim and Jae-Kyung Oh, 2005, Late Quaternary paleoceanographic change in the South Scotia Sea, northern Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 41, no. 2, p. 211-226

ABSTRACT: It is getting urgent to obtain an increased knowledge of regional paleoclimatic trends in order to understand the recent warming observed on the Antarctic Peninsula and to predict the resultant environmental changes. High-resolution sedimentologic and geochemical analyses, aided by AMS ¹⁴C chronology of two gravity core sediments (core SS01 and SS02) obtained in the South Scotia Sea, represent the detailed record of late Pleistocene to Holocene climate change in Antarctic Peninsula region. The South Scotia Sea seems to have experienced occasionally open-water environment during MIS 3 (Marine Isotope Stage 3) (prior to 22,500 yr B.P.) with increased TOC (total organic carbon) content. During LGM (Last Glacial Maximum) the South Scotia Sea was considered to have been covered by prolonged sea-ice coverage, with reduced biological productivity in the surface ocean and strengthened bottom currents which originated from the Weddell Sea. At this time there must be intermittent formations of polynya which might cause

* Corresponding author: Tel. +82-31-400-6405, E-mail. kcyoo@kopri.re.kr

enhanced biological production and bottom water production as well. Major deglaciation of the South Scotia Sea is believed to have occurred at about 12,500 yr B.P. At this time there was an gradual increase in TOC content and a decrease in terrigenous sediment due to the decrease in sea-ice coverage. During this deglaciation the South Scotia Sea might have experienced short-term cold events around 10,400~9,500 yr B.P., accompanied by TOC decrease and increase in sand content. The deglaciation was followed by a period (mid-Holocene climatic optimum) of open marine conditions with variable extent of sea ice (variable TOC content) between 8,300 and 2,400 yr B.P. Around 2,400 yr B.P. the decrease in TOC content and increase in sand content reflects the formation of more extensive and seasonally persistent sea (fast) ice. The ice shelf in the Weddell Sea, now retreating from the shelf, advanced approximately towards the shelf edge with the bottom water production, transporting large amounts of terrigenous sediments into the South Scotia Sea.

Key words: late Pleistocene to Holocene, paleoclimate, South Scotia Sea, Antarctic Peninsula, glacial marine

(Ho Il Yoon, Sang Heon Nam, Kyu-Cheul Yoo, Byong-Kwon Park and Yeadong Kim, Korea Polar Research Institute, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan PO Box 29, Seoul, 425-600, Korea; Jae-Kyung Oh, Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea)

1. 서 론

남극해는 대양의 저층수를 공급하는 기원지 역할 뿐만 아니라 전 지구적 대양순환과 기후변화를 조절 하는데 중요한 역할을 한다(Foster and Middleton, 1980). 특히 남극해의 기후변화는 빙붕단(ice-shelf edge)의 움직임, 해빙(sea ice)의 분포 그리고 해양순환의 변동에 의한 생물생산력과 생물 잔해의 침강(flux)을 포함하는 생지화학적 과정에 커다란 영향을 주기 때문에 남극의 빙해양 퇴적환경은 고기후 및 고해양 변화의 중요한 기록자로 남게 된다(e.g., Yoon *et al.*, 2002).

지금까지 남극해에서 수행된 고기후 연구는 대부분이 수 만년 이상의 장주기 변화인 반면에 수 천년 단위의 단주기 변화에 대한 연구는 부족한 편이다(Cooper *et al.*, 1996; Thompson *et al.*, 1994). 남극 빙해양 퇴적환경으로부터 단주기의 고기후 연구에 적합한 코어 시료를 얻기 위해서는 빙산에 의한 침식과 해류에 의한 재동작용이 적은 대륙사면 하부나 심해평원 지역이 적합할 것으로 보인다. 이번 “남극해 고기후 연구사업”이 수행된 해역은 남 스코티아 해(South Scotia Sea)의 수심 4,000 m 이상의 심해분지로서 유빙과 용설수(drifting iceberg and meltwater)에 의한 육성기원 퇴적물의 영향이 적기 때문에 과거에 해양에서 일어났던 고생산력(paleo-productivity) 및 해빙 점유율(sea-ice coverage)과 관련한 고기후변화 연구를 위한 최적지로 판단된

다(Fig. 1). 남 스코티아 해역에는 남극순환해류(Antarctic Circumpolar Current)의 한 부분을 차지하는 고온·고염의 남극순환심층수(Circumpolar Deep Water: CDW)가 북동쪽을 향해 흐르고, 이것은 다시 북서 웨델 해의 빙붕에서 기원하는 저온·저염의 웨델해 빙붕수(Weddell Ice-Shelf Water)와 서로 만나 독특한 해양 전선(Scotia Front or Southern ACC Front)을 형성하기 때문에 남 스코티아 해역은 제 4기 후기 동안에 일어난 고기후 및 고해양 변화에 매우 민감한 지역이다(Fig. 1). 특히 이 해역은 시계 방향으로 흐르는 남극순환심층수와 웨델 해수 사이에 위치하고 있는 Weddell-Scotia Confluence 지역(수직적으로 잘 혼합된 저온·저염·고산소의 수층)과도 가깝기 때문에 Deacon (1937)은 이 지역이 갖는 독특한 수괴특성에 대해서 성층(stratification)이 매우 약한 혼합층이며 생물생산력이 매우 높은 해역으로 설명한 바 있다. 본 연구에서는 남 스코티아 해역 탐사에서 얻은 코어 퇴적물에 기록된 후기 플라이스토세에서 홀로세 동안의 고기후 및 고해양 변동에 대한 퇴적학 및 지화학적 특성을 이해하고, 이를 전 지구적 고기후 변화와 대비시킴으로써 남극반도 지역이 갖는 고기후적 중요성에 대해 토론하고자 한다.

2. 연구재료 및 분석방법

‘02/03 남극 해저지질조사사업’과 ‘남극 고해양 및 고기후 연구사업’의 일환으로 2002년 12월 21일

부터 12월 22일까지 남 스코티아 해의 사우스오크니섬(South Orkney Island) 북서쪽 심해분지의 수심 4,141~4,033 m 지점으로부터 두 개의 중력 시추 코어 시료를 얻었다(Fig. 1). 코어의 길이는 480~570 cm 정도이며 퇴적물의 회수율은 80% 이상이다. 코어 시료는 반으로 절개하여 한쪽 면은 퇴적물의 입도와 지화학적 특성을 분석하는데 사용하였으며, 다른 한쪽 면은 X-선 사진 촬영을 위한 슬랩을 만드는데 이용하였다. X-선 사진 상에서 퇴적상의 일차 퇴적 구조, 생물교란구조, 그리고 유빙운반역(IRD; ice-rafted debris)의 크기 변화 및 배열 상태를 퇴적층 심도에 따라 자세히 관찰하고 이를 기술하였다.

입도 분석을 위해 코어 절개 면을 따라 4 cm 간격으로 약 5 g의 퇴적물을 채취하였다. 30% H₂O₂와 0.1 N HCl을 이용하여 퇴적물 시료에 포함되어 있는 유기물과 탄산염을 모두 제거한 후, 습식 체질

(wet sieving) 방법으로 사질과 니질 퇴적물을 분리하였다. 사질시료는 양이 적어 소형(직경 약 7.6 cm) 체(sieve)를 이용, 5분 간 손으로 체질한 후 입도별 무게 백분율을 구하였다. 직경 62 μ m (4 ϕ) 보다 작은 입자들은 0.1% 확산제(calgon) 용액 내에서 균질분산시킨 후 세립자 분석기(Sedigraph 5000)를 이용하여 분석하였다. 입도 분류는 Folk and Ward (1957) 방법을 이용하였다. 지화학 분석을 위해 약 5 g의 퇴적물 시료를 2 cm 간격으로 채취한 후 60°C에서 24 시간 이상 건조시킨 후, 막자사발을 이용하여 균질하게 갈아 분말로 만들었다. 약 10 mg의 분말시료를 취하여 Carlo Erba NA-1500 Elemental Analyzer로 총탄소량(TC, total carbon), 총질소량(TN, total nitrogen), 그리고 총황량(TS, total sulfur) 등을 측정하였다. 약 0.5 g의 분말시료에 10% 염산을 첨가하여 무기탄소(IC, inorganic carbon)를 제거한 후,

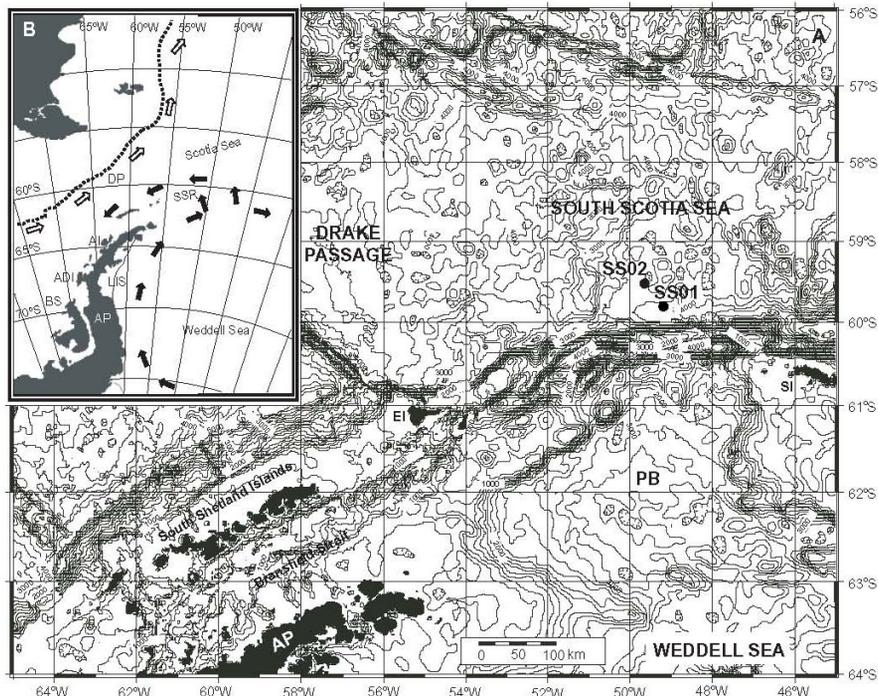


Fig. 1. (A) Bathymetry and core locations (black circle) around the South Scotia Sea. Contours in meters. EI=Elephant Island; PW=Powel Basin; SI=South Orkney Island. (B) Map showing the ocean circulation systems around the northern Antarctic Peninsula, Weddell Sea and South Scotia Sea. Note the Antarctic Circumpolar Current (open arrows) axis along the Polar Front (dashed line). Black arrows represent the Antarctic Deep Water and Weddell Gyre. AP=Antarctic Peninsula; ADI=Adelaide Island; AI=Anvers Island; BS=Bellingshausen Sea; DP=Drake Passage; LS=Larsen Ice Shelf; SSR=South Scotia Ridge.

약 10 mg의 분말시료를 취하여 총유기탄소량(TOC, total organic carbon)을 측정하였다. 함수량 측정을 위해 코어 절개 면을 따라 약 5 g의 퇴적물 시료를 4 cm 간격으로 주사기로 채취한 후 정확한 무게를 측정하였다. 무게를 측정한 시료는 냉동건조기에서 동결 건조시킨 후 다시 무게를 측정하였다(dry weight). 코어 퇴적물의 대자율 값은 미국 바팅톤(Bartington)사의 대자율 측정기를 이용하여 1 cm 간격으로 전 시료에 대해 측정하였다.

3. 남극반도 지형

서 남극에 위치하는 남극반도는 해발 2,000 m가 넘는 고원지대로서 곳곳에 빙하 침식 지형이 발달해 있다. 반도의 서쪽에 발달한 대륙붕 지역은 폭이 약 80 km이고 수심이 200~500 m의 넓은 평탄 대지로 구성되며, 수심이 700 m 이상의 소규모 골짜기가 앤버스 섬(Anvers Island)과 아델리 섬(Adelaide Island)에서 바다를 향해 발달해 있다(Fig. 1). 이 외에도 넓은 대륙붕 위에는 수심이 낮은 해저(shallow plateau)나 깊은 수렁(deep holes)과 같은 지형도 나타난다. 일반적으로 반도의 서부 대륙붕 지역은 연안을 향해 수심이 점차 깊어지는 전형적인 남극권의 대륙붕 지형을 보이며 이러한 특성은 연안에 발달한 수많은 섬들과 더불어 외해와 연안 사이의 퇴적물의 이동을 제한하는 역할을 하기도 한다. 남극반도 지역에서 빙붕이 발달한 지역은 웨델 해(Weddell Sea) 연안이 대표적이며 이곳에는 라르센 빙붕(Larsen Ice Shelf)이 발달해 있다. 남극반도 남서쪽의 벨링스하우젠 해 (Bellingshausen Sea) 주변에는 빙붕의 발달

이 미약한 편이며 대부분이 피오르드나 연안지역에서 빙하의 흐름이 멈춘다.

4. 퇴적물의 연대측정

코어퇴적물의 연대 결정을 위해 가속질량분석기(Accelerated Mass Spectrometer)를 이용한 방사선 탄소연대 측정법(AMS ^{14}C)이 사용되었다. 코어 퇴적물 내에는 탄산염 유공충이나 패각이 존재하지 않았기 때문에 코어 SS01의 5개 층준에서 퇴적물 시료(bulk sediments)를 얻어 총유기탄소 성분을 측정하는 방법(total organic carbon method)을 택하였으며 그 결과는 Table 1에 나타난다. 코어 SS01의 표층 나이는 8,200년으로 나타났다. 이 값은 남극반도에서 지금까지 알려진 표층 연대(1,200~1,300년)에 비해 훨씬 높은 값을 보이는데, 일반적으로 남극해 퇴적물의 나이가 예상보다 높게 나타나는 이유는 바닷물 속의 오래된 탄소를 섭취해서 성장한 생물의 사체를 함께 포함하고 있는 퇴적물을 대상으로 연대를 측정했기 때문이다. 그러나 실제로 남극해의 살아있는 생물을 대상으로 탄소연대를 측정해도 예상과는 다르게 1,200~1,300년의 연대를 보이게 된다(Gordon and Harkness, 1992). 따라서 일반적으로 남극해 퇴적물의 연대를 결정하게 위해서 많은 연구자들은 측정연대로부터 보정값인 1,200~1,300년을 소거한 나머지 값을 가지고 퇴적물의 연대를 결정한다. 그러나 최근의 연구에 의하면 남극해 표층 퇴적물의 나이도 지역에 따라 1,200~5,500년까지 그 변화폭이 큰 것으로 알려지면서 연대 결정을 위해 1,200~1,300년의 보정값을 남극해 퇴적물에 일률적으로 적용하

Table 1. Results of AMS ^{14}C dating of the examined core.

Core	Core Depth (cm)	Age (^{14}C yr B.P.)		Material
		Uncorrected	Corrected ^a	
Core SS01	0	8202±40	0±40	Bulk sediment
Core SS01	124	11508±50	3308±50	Bulk sediment
Core SS01	238	11666±55	3466±55	Bulk sediment
Core SS01	418	29890±360	21690±360	Bulk sediment
Core SS01	529	31420±370	23220±370	Bulk sediment

^a A 8200-yr correction was applied to all ages of core SS01. This correction appears to be justified because all of the radiocarbon ages in SS01 increase progressively down-core, suggesting that the amount of contaminations is systematic down-core.

기가 어렵게 되었다(Domack, 1992; Gordon and Harkness, 1992; Berkman and Foreman, 1996).

일반적으로 퇴적물의 측정 연대가 높게 나타나는 다른 원인은 오래 전에 쌓였던 퇴적물이나 퇴적암 속에 포함된 유기탄소 성분이 재동작용에 의해 바다로 유입되어 현생 퇴적물 속에 섞일 경우 측정연대가 실제보다 오래된 값을 보일 수 있다. 최근 남극반도 서부 대륙붕 코어와 동남극 빈센네스(Vincennes) 만 코어 퇴적물(Peter Harris, pers. com.)에서는 에오세(Eocene)와 마이오세(Miocene)에 퇴적된 와편모조류(dinoflagellate cysts) (Yoon *et al.*, 2002)가 발견됨에 따라서 남극권에서도 재동작용에 의한 오래된 유기탄소의 오염이 연대 결정에서 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 코어 SS01의 연대를 결정하기 위해 각 층준의 측정연대로부터 표층 연대(8,200년)를 소거하는 방법을 택하였다. 이렇게 한 이유는 첫째, 퇴적물 내에 재동된 것으로 보이는 마이오세의 유기물(Young-Suk Bak, pers. comm.)이 일관되게 산출된다는 점, 둘째, 각 측정 연대값이 코어 깊이에 따라서 반전되지 않으며 하부로 갈수록 오래된 값을 보인다는 점(재동된 유기물에 의한 오염이 일관되게 일어났음을 의미), 셋째, 만약 기존의 남극 퇴적물의 보정값(1,200~1,300년)을 적용할 경우 코어 SS01의 표층은 약 7,000년의 나이를 보여 표층에서의 퇴적율(38 cm/kyr)(Fig. 2)을 감안한다면 약 260 cm 두께의 표층 퇴적물이 시추작업 과정에서 손실되었거나 아니면 코어 해역의 빠른 유속 때문에 약 7,000년 동안 퇴적물이 집적되지 않았다는 것을 의미한다. 이러한 유추는 오히려 연대 결정에 커다란 모순을 가져 올 수 있어서 본 연구에서는 코어의 표층 연대를 측정 연대에서 소거하여 연대를 결정하였다.

5. 결과

5.1 탄소연대 및 퇴적율

보정된 탄소 연대에 의하면 코어 SS01 최하부의 연대는 약 23,000년을 나타내며 깊이에 따른 연대값의 역전현상이 없는 것으로 보아 퇴적물이 집적되는 동안에 재동작용이나 생물활동에 의한 교란작용(bioturbation)은 심하지 않았을 것으로 보인다(Table 1). 퇴적율은 코어 깊이에 따라 심한 편이어서 상부

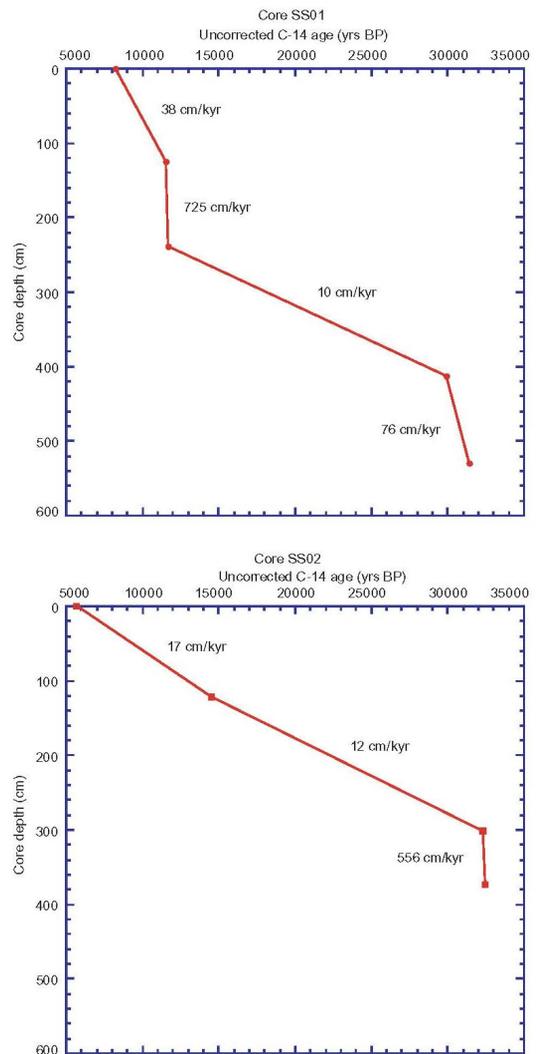


Fig. 2. Sediment depth versus AMS ^{14}C dating and sedimentation rates for core SS01. The core exhibits the variability in sedimentation rate, with high values in the upper and lower section and low values in the middle section of the core.

220 cm 구간에서 38~725 cm/kyr로 큰 폭의 퇴적율 변화를 보이는 반면 220~400 cm 구간에서는 10 cm/kyr로 급격하게 낮아지는 경향을 보인다(Fig. 2). 그 이후에 깊이 400 cm 아래에서 다시 퇴적율이 76 cm/kyr까지 높아진다. 코어 SS02의 연대는 퇴적상 및 지화학적 특성을 코어 SS02와 자세히 대비시켜 결정하였다.

5.2 퇴적상 및 지화학적 특성

5.2.1 코어 SS01

이 코어는 남 스코티아 해의 수심 4,141 m에서 얻었으며 길이는 약 570 cm이다(Figs. 1 and 3). 탄성 파 단면도 상에서 코어 지점은 비교적 평탄하며 내부적으로 뚜렷한 평행층리를 보이는 음향특성을 보인다(Lee *et al.*, 2003). X-선 사진 관찰, 사질 및 충유기

탄소량 변화에 대한 분석을 통해 코어는 크게 상부 퇴적상(0~90 cm), 중부 퇴적상(90~300 cm), 하부 퇴적상(300~565 cm)으로 구분된다(Fig. 3).

상부 퇴적상: 이 퇴적상은 두께가 약 100 cm인 암회색의 사질 니(sandy mud)로 구성되며 박층의 규조연니층(diatom ooze layer)을 포함한다(Fig. 3). 규조연니층의 경계면은 생물교란에 의한 영향이 작

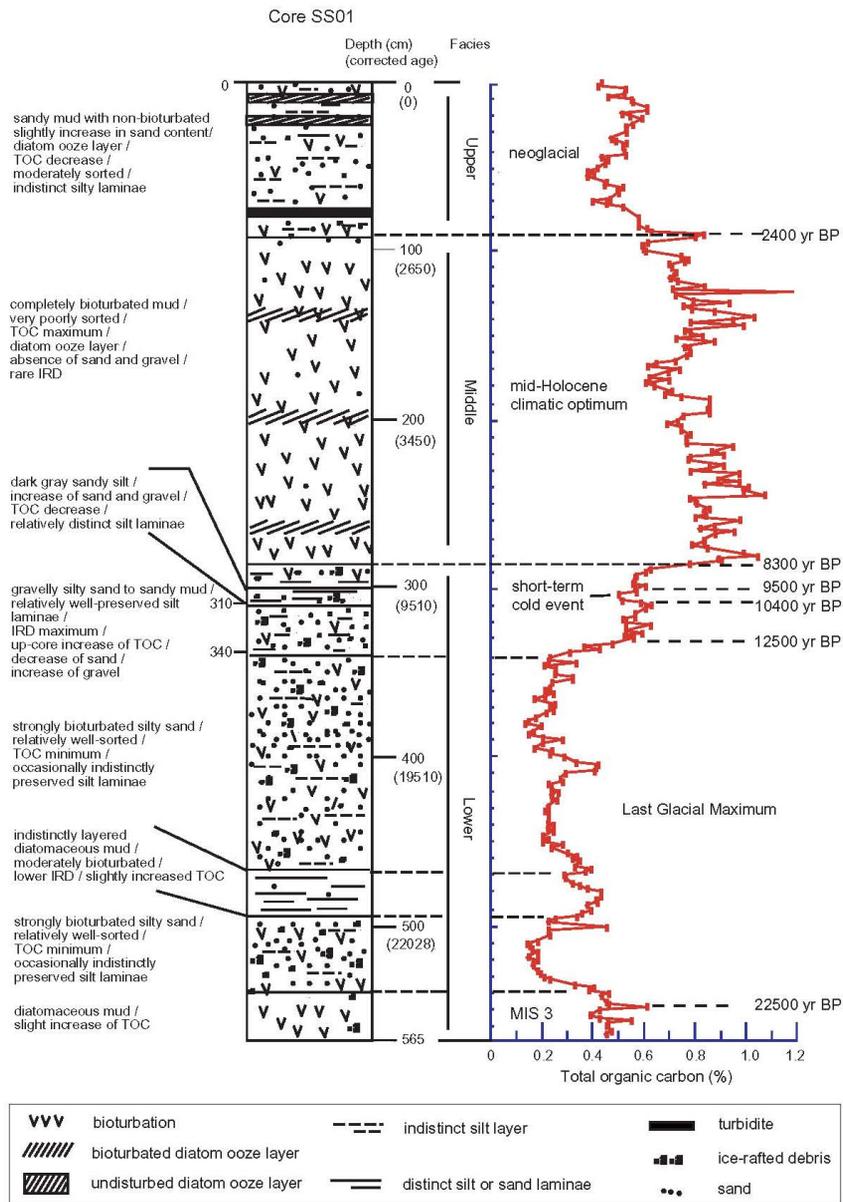


Fig. 3. Visual core log and TOC curve for core SS01.

아 바로 아래의 중부 퇴적상에 나타나는 구조연니층의 그것에 비해 뚜렷한 편이다(Fig. 4A). 사질량은 3~27%로 중부 퇴적상에 비해 높으며 총유기탄소량은 0.30~0.65%를 보여 상대적으로 낮은 편이다(Fig. 5). 평균입도(5.6~8.0 ϕ)와 분급도(2.0~2.7 ϕ)는 구조연니 퇴적상에 비해 조립하며 분급도는 양호한 편이다. 대자율 값(20~130 cgs)은 상대적으로 높게 나타나며 총유기탄소량과 반대의 경향을 보인다(Fig. 5). 함수량은 39~65%로서 구조연니 퇴적상과 별 차이를 보이지 않으며 역은 일부 깊이를 제외하고는 관찰되지 않는다(Fig. 5).

중부 퇴적상: 이 퇴적상은 두께 210 cm의 구조연니로 구성되며 두께 1~2 cm의 구조연니층이 발달해 있다(Fig. 3). 구조연니층의 상하 경계는 생물교란을 심하게 받아 상부 퇴적상에 나타나는 구조연니층에 비해 경계면의 발달이 뚜렷하지 않다(Fig. 4B). 사질량은 5% 이하로 다른 퇴적상에 비해 아주 낮으며 역들도 관찰되지 않는다(Fig. 5). 반면에 총유기탄소량은 0.6~1.2%로서 다른 퇴적상에 비해 훨씬 높은 편이다(Fig. 5). 대자율 값은 0~25 cgs로 상대적으로 매우 낮은 편이며 총유기탄소량과 반대의 경향을 보인다(Fig. 5). 평균입도와 분급도는 각각 7.7~9.0 ϕ 와

1.1~2.3 ϕ 를 보여 다른 퇴적상에 비해 세립하며 불량한 분급도를 보인다.

하부 퇴적상: 이 퇴적상은 두께 265 cm로서 암회색의 사질 니(sandy mud) 또는 실트질 사(silty sand)로 구성되며 실트 및 세립사 층리가 발달한다(Fig. 3). 특히 280~340 cm 구간은 바로 위의 중부 퇴적상과 연결되는 전이층(transitional bed)으로서 위로 갈수록 사질량이 감소하는 반면에 총유기탄소량(0.5~0.8%), 함수량 및 역 함량은 점차 증가하는 경향을 보인다(Figs. 3 and 5). 전이층 내에는 사질량이 증가하고 총유기탄소량이 감소하는 특정 구간(299~310 cm)이 나타나며 이 층에는 실트 엽리층(laminae)도 관찰된다(Figs. 4C and 5). 전이층 아래에는 하부 퇴적상의 대부분을 차지하는 실트질 사층(330~460 cm)이 나타난다(Fig. 3). 이 층에서는 사질량과 대자율 값이 각각 최대 30%와 200 cgs까지 높아지고 희미한 실트 엽리층도 관찰된다(Figs. 4D and 5). 실트 엽리층은 불연속적이며 두께는 불규칙한 모습을 보일 뿐만 아니라 총유기탄소량과 함수율은 각각 0.1~0.45%와 25~35%로서 극히 낮은 편이다(Fig. 5). 실트질 사층의 특정 구간(470~498 cm)에서는 일시적으로 총유기탄소량이 증가하고 사질

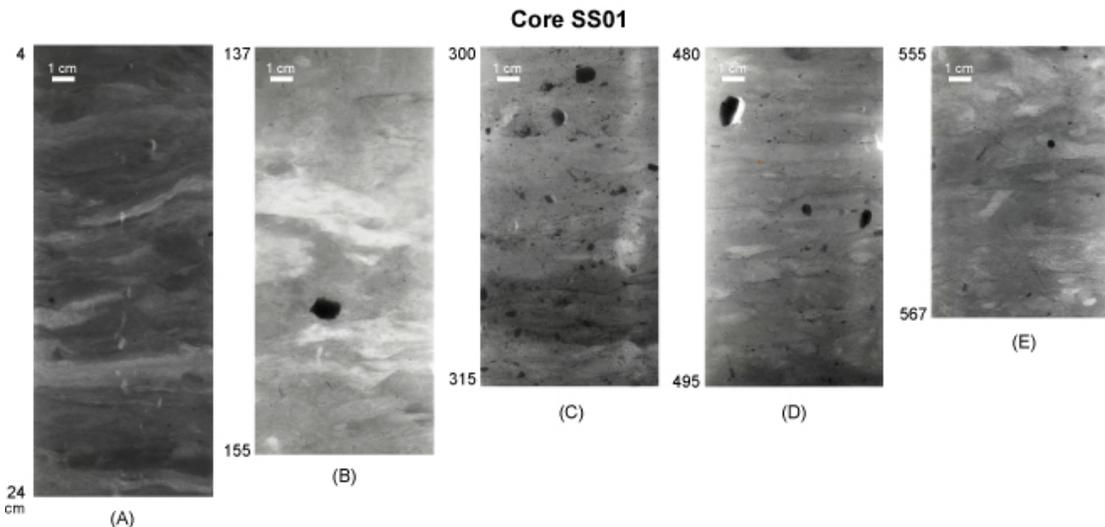


Fig. 4. X-radiograph of representative sections of core SS01. (A) Sandy mud showing indistinct diatom laminae (light part) (4~24 cm in core SS01); (B) Diatomaceous mud (137~155 cm) showing indistinctly-layered diatom ooze (light part); (C) Transitional bed with high ice-rafted debris (IRD) (300~315 cm). Note indistinctly-laminated silt layer in the lower part (short-term cold event); (D) Muddy sand with indistinct silt laminae interpreted as having been deposited during LGM (480~495 cm).

량이 감소하는 함규조 니질(diatomaceous mud)층이 나타나는데 이 층에서는 희미한 실트 엽리층도 관찰된다(Figs. 3 and 5). 이 퇴적상의 최하부(540~652 cm)는 바로 위의 실트질 사층에 비해 총유기탄소량이 다소 증가하고 분급도가 불량해지는 함규조 니층이 나타난다(Figs. 3 and 5). 이 층의 상부 경계면의 보정된 탄소연대는 약 22,500 yr B.P.를 보인다(Fig. 3).

5.2.2 코어 SS02

이 코어는 남 스코티아 해의 수심 4,033 m 해역에서 얻었으며 코어 길이는 480 cm이다(Figs. 1 and 6). X-선 사진 관찰, 사질량 및 총유기탄소량의 변화에 대한 분석을 통해 코어는 크게 세 개의 퇴적상 즉, 상부 퇴적상(0~15 cm), 중부 퇴적상(15~150 cm), 하부 퇴적상(140~480 cm)으로 구분된다(Fig. 6).

상부 퇴적상: 이 퇴적상은 두께가 5 cm이고 암회색 니질 사로 구성되며 X-선 사진에서 보면 화산 쇄설성 입자의 존재가 뚜렷하고 생물교란은 미약하게

나타난다(Figs. 6 and 7A). 사질량은 20~50%로서 바로 아래의 중부 퇴적상에 비해 훨씬 높은 편이며 위로 갈수록 점차 증가하는 경향을 보인다(Fig. 8). 평균입도와 분급도는 각각 5.8~6.7 ϕ 와 2.5~3.2 ϕ 로서 중부퇴적상의 그것에 비해 조립하고 분급도는 양호한 편이다(Fig. 8). 대자율 값은 상대적으로 높은 편이나(30~170 cgs) 변화가 심하고, 총유기탄소량은 0.2~0.6%로서 중부 퇴적상에 비해 낮다(Fig. 8). 역 함량은 최대 0.5%로서 중부 퇴적상에 비해 높다.

중부 퇴적상: 이 퇴적상은 두께 200 cm의 규조 니로 구성되며 그 안에는 두께 1~2 cm의 규조연니층이 발달해 있다(Fig. 6). 연니층의 경계면은 생물교란 작용에 의해 지워진 곳이 많아 육안으로 식별이 불가능한 곳이 많다(Fig. 7B). 사질량은 5% 이하로 다른 퇴적상에 비해 훨씬 낮고 평균입도와 분급도는 각각 8~9.5 ϕ 와 1.5~2.3 ϕ 로서 상대적으로 세립하며 불량한 편이다(Fig. 8). 총유기탄소량은 0.5~1.1%로서 다른 퇴적상에 비해 높고 값의 변화도 심한 편이다(Fig. 8). X-선 사진 상에서 역은 관찰되지 않으며 대

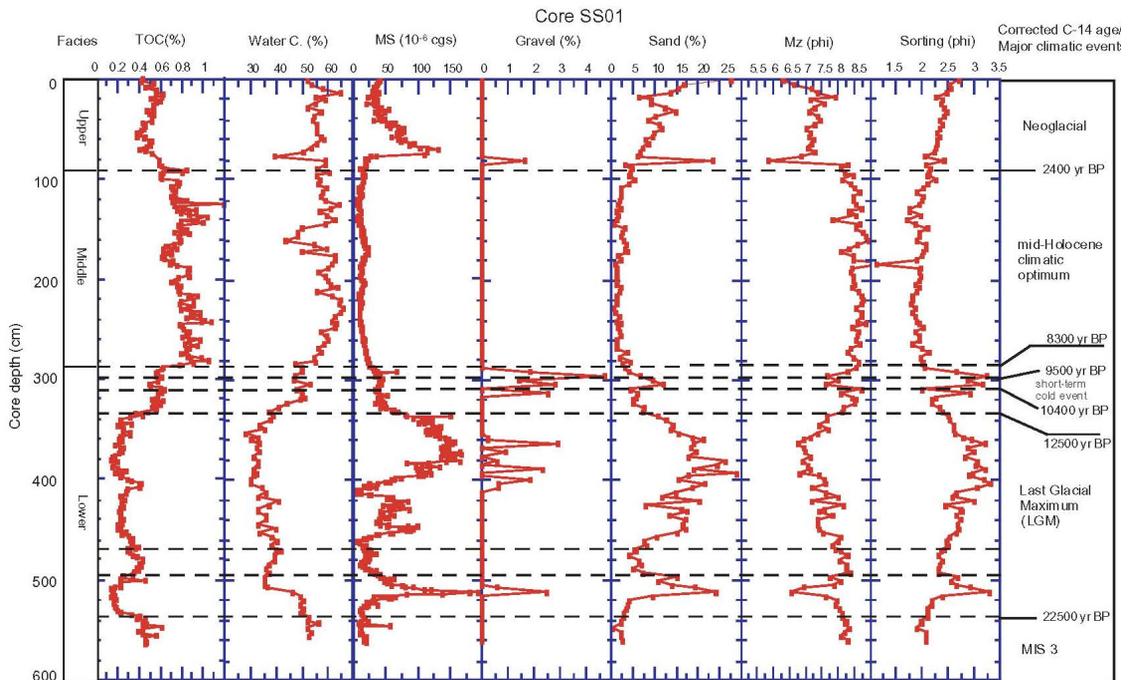


Fig. 5. Down-core variations of TOC (%), water content (%), MS (cgs), gravel (%), sand (%), mean grain size (ϕ), and sorting (ϕ) for core SS01, with a corrected radiocarbon ages (yr B.P.) derived from the interpolated sedimentation rate. Major climatic events during the Holocene are indicated.

자을 값은 20 cgs 이하로 상대적으로 낮고 그 변화도 작게 나타난다(Figs. 7B and 8).

하부 퇴적상: 이 퇴적상은 두께가 340 cm로서 암 회색의 희미한 층리를 포함하는 사질 니 또는 니질 사(indistinctly-laminated sandy mud or muddy sand)로 구성된다(Fig. 6). 희미한 층리는 사질 입자가 수평으로 배열되어 나타나거나 불연속적이고 뚜렷하지 않은 실트 엽층으로 나타나며 층의 두께도 일

정하지 않다(Fig. 7C). 이 퇴적상의 맨 위 구간(140~195 cm)은 급격한 환경 변화를 보이는 전이층으로 총 유기탄소량은 위로 갈수록 점차 증가(0.45~0.75%)하고 사질량은 반대로 감소(1~15%)하는 경향을 보인다(Figs. 6 and 8). 전이층 내에서는 실트 엽리층의 발달이 뚜렷하며 총유기탄소량이 감소하고 사질량이 증가하는 특정 구간(158~162 cm)이 나타난다(Figs. 7C and 8). 전이층의 평균입도는 7.5~8.7 ϕ 로

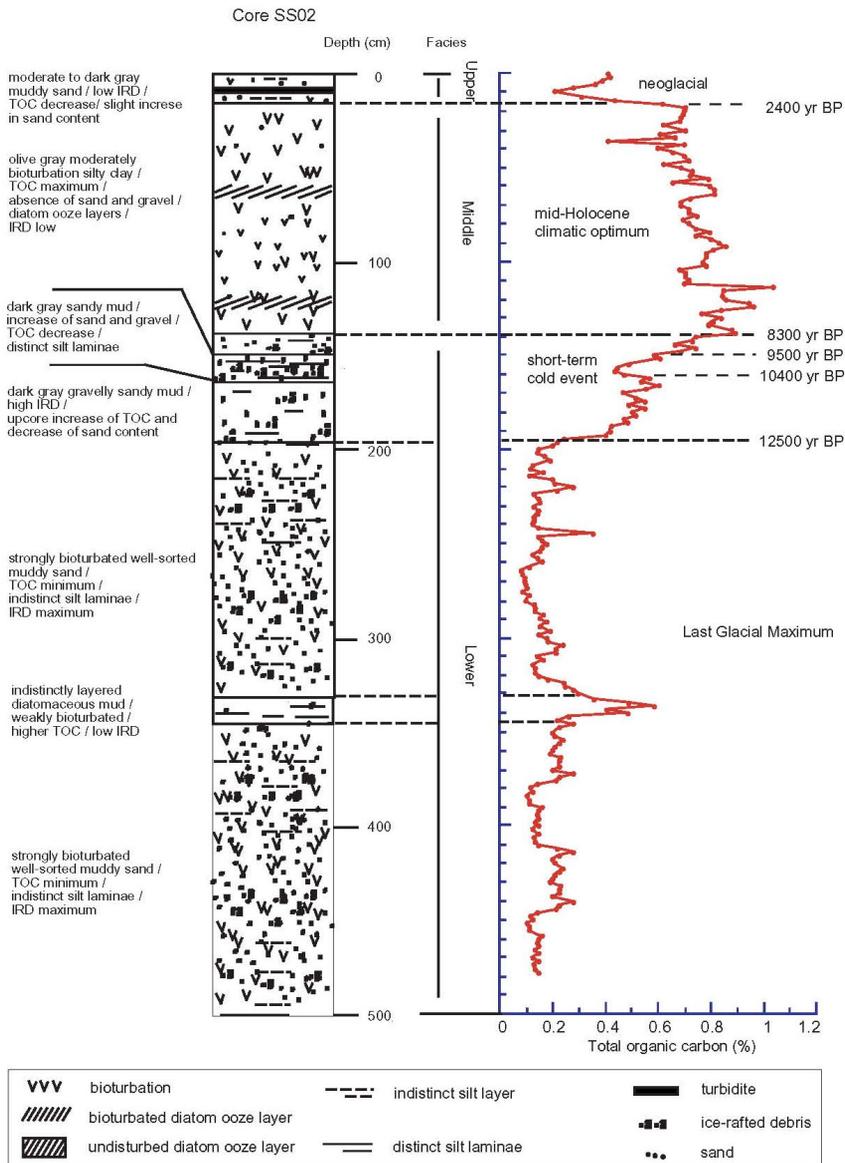


Fig. 6. Visual core log and TOC curve for core SS02.

서 큰 변화를 보이지 않지만 분급도는 1.8~2.8 ϕ 로서 특정 구간(158~162 cm)을 제외하고 위로 갈수록 상대적으로 불량해 진다(Fig. 8). 전이층의 대자율 값은 10~125 cgs로서 위로 가면서 점차 감소하나 특정 구간(158~162 cm)에서 일시적으로 증가한다(Fig. 8). 전이층 바로 아래에는 하부 퇴적상의 대부분을 차지하는 두께 285 cm의 니질 사층(195~480 cm)이 나타난다(Fig. 6). 이 층에는 희미한 실트 엽리층이 불연속적으로 나타나며 두께의 변화도 불규칙적이다(Fig. 7D). 총유기탄소량은 0.05~0.56%로서 다른 퇴적상에 비해 훨씬 낮지만 일부 구간(330~345 cm)에서 일시적으로 그 값이 증가하기도 한다(Figs. 6 and 8). 대자율 값은 1~270 cgs까지 변화폭이 매우 크며 코어 전체에서 가장 높은 값을 보인다. 역 함량과 사질량은 각각 0~5.5%와 0~95%로서 다른 퇴적상에 비해 훨씬 높고 그 변화폭도 크다(Fig. 8). 평균입도와 분급도는 각각 3.5~8.5 ϕ 와 1.6~3.5 ϕ 로서 상대적으로 값의 변화폭이 큰 편이며 전체적으로 다소 조립하며 분급도는 불량한 편이다(Fig. 8).

6. 퇴적환경

남 스코티아 해에서 얻은 두 개의 중력코어 퇴적물의 퇴적구조, 입도 및 지화학 특성, 가속질량분석기의 탄소연대(AMS ^{14}C) 자료를 분석한 결과 코어는 플라이스토세 후기부터 홀로세 동안 형성된 세계의 특징적인 퇴적상으로 구성된다. 즉 코어 하부와 중부에는 각각 니질 사 퇴적상과 구조연이층이 포함된 구조 니 퇴적상이 나타나며, 코어 상부는 사질 니 퇴적상이 나타난다(Figs. 3 and 6).

6.1 하부 퇴적상(Lower Facies)

하부 퇴적상의 맨 위에 나타나는 전이층은 유빙에 의해 운반된 것으로 보이는 역의 분포가 최대이며 일부 구간(299~310 cm)에서 실트 혹은 세립사로 구성된 불규칙한 층리를 보인다(Figs. 4C and 5). 층 내에서 위로 가면서 총유기탄소량이 점진적으로 증가하고 평균입도가 감소하는 경향은(Figs. 5 and 7) 연구해역이 두꺼운 해빙(sea ice)의 영향으로부터 벗어나

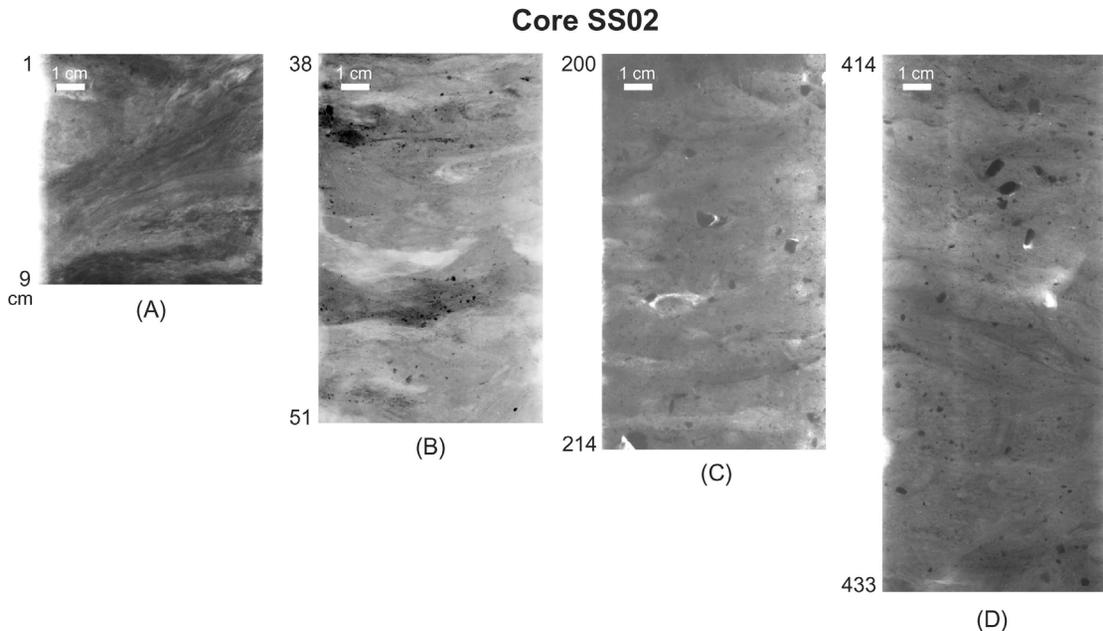


Fig. 7. X-radiograph of representative sections of core SS02. (A) Sandy mud showing indistinct diatom laminae (light part), destroyed strongly by bioturbation (1~9 cm in SS02); (B) Diatomaceous mud showing indistinct diatom ooze layer (light part) (43~56 cm); (C) Transitional bed with indistinct silt laminae (156~170 cm); (D) Muddy sand with indistinctly silt or silty sand laminae considered as having been deposited during LGM (350~364 cm).

점차 외양(open water) 환경으로 변화하는 과정에서 표층 해양에서 점진적으로 증가된 생물생산력에 의해 유기물질의 공급이 늘어난 결과로 볼 수 있다. 해빙의 영향이 줄어들면서 유기물과 유빙은반역의 공급이 활발해진 반면에 상대적으로 육성기원 쇄설물(사질)의 공급은 줄어든 것으로 보인다. 탄소연대에 의하면 전이층은 12,500~9,500 yr B.P.에 퇴적된 것으로 나타난다(Figs. 2 and 3). 이 시기는 남극 빙하에 기록된 본격적인 해빙(deglaciation) 시기(Cias *et al.*, 1991)와 일치할 뿐만 아니라 북극권에 위치한 그린란드(Greenland) 빙하에 기록된 북반구의 해빙 시기(O'Brien *et al.*, 1995)와도 잘 일치하고 있어, 이때의 해빙(deglaciation)은 전 지구적 규모의 기후변화였을 가능성을 보여준다. 또한 전이층 내의 특정 구간(299~310 cm)에서 보이는 총유기탄소량의 일시적인 감소와 불규칙한 실트질 엽층리의 형성은 (Figs. 3 and 6) 탄소연대가 10,400~9,500 yr B.P.에 해당하는 것으로 볼 때, 마지막 최대빙하기(LGM) 이후에 본격적인 해빙(deglaciation) 과정에서 일어났던 단주기의 냉각기(short-term cold event)로 볼

수 있다. 이러한 냉각기에 관한 기록은 최근에 남극반도의 파머 분지(Palmer Basin)에서 얻은 ODP (Ocean Drilling Project) 코어에 나타난 홀로세 초기의 기후 냉각기와 대략 일치하고 있으며(Domack, 1998), 이 시기에 남극반도 지역은 해빙(sea ice)의 점유율이 증가하여 해양의 생물생산력이 감소하였을 뿐 아니라 웨델 해 기원의 심층수 형성이 활발했던 것으로 알려져 있다. 웨델 해에서 생성되는 심층수의 영향이 오늘날 남 스코티아 해의 코어 지역까지 미친다는 사실로 미루어 볼 때(Garabato *et al.*, 2002), 홀로세 초기의 단주기 냉각기 동안에는 이 심층수의 영향이 더욱 컸을 것으로 보이며 그 결과 전이층 내의 특정 구간 내에 발달한 엽층리(Fig. 4C)의 발달에도 영향을 주었을 것으로 보인다.

전이층 아래에 나타나는 니질 사층은 일부 구간을 제외하고 총유기탄소량이 0.3% 이하로 매우 낮고 변화가 없는 특성을 보인다(Figs. 3, 5, 6 and 7). 일반적으로 남극해 대륙붕 퇴적물에서 총유기탄소량이 낮고 변화가 없는 경우는 LGM 동안 대륙붕까지 진출했던 기저빙하(grounding glacier) 밑에서 형성된

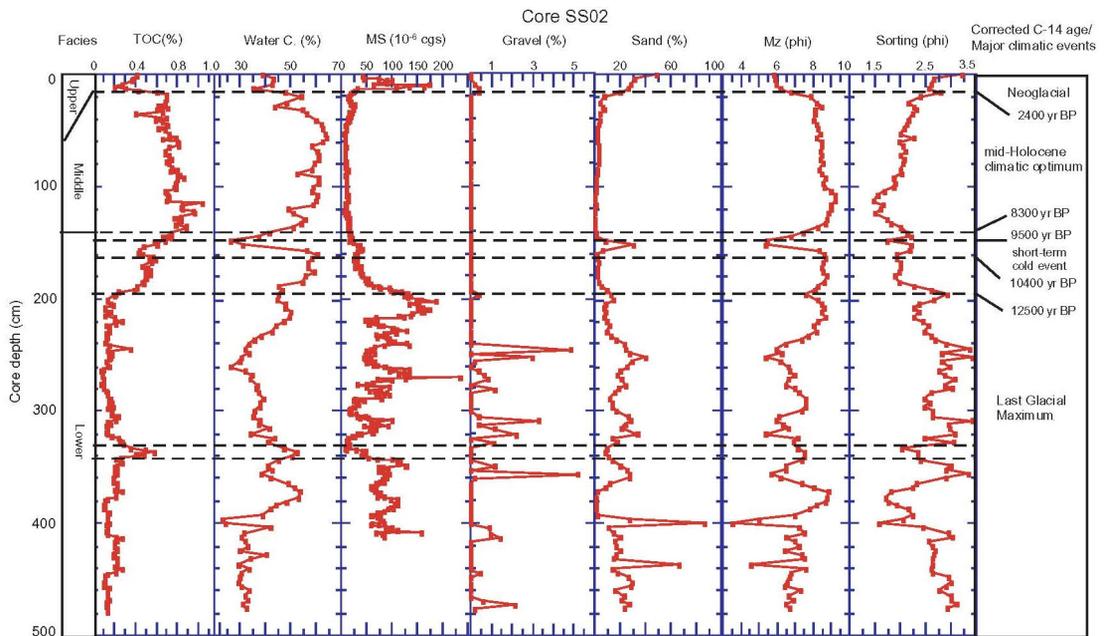


Fig. 8. Down-core variations of TOC (%), water content (%), MS (cgs), gravel (%), sand (%), mean grain size (ϕ), and sorting (ϕ) for core SS02. The correlation of SS02 with the other core is made on the base of sand content, organic carbon stratigraphy, four radiocarbon stratigraphy of core SS01. Major climatic events during the Holocene are indicated.

괴상의 다이아미크톤(massive diamicton)에서 볼 수 있다(Licht *et al.*, 1999). 그러나 코어 지역의 수심이 4,000 m 이상의 심해이고 퇴적물의 주성분이 니질 사인 점으로 보아 LGM 동안 기저빙하가 코어 지역까지 진출했을 가능성은 희박하다. 따라서 니질 사층이 기저빙하 밑에서 형성된 다이아미크톤으로 해석하기는 힘들다. 오히려 낮은 총유기탄소량과 미미한 변화로 미루어 볼 때, LGM 동안 코어지역의 해빙(sea ice) 점유율이 증가함에 따라 태양광선의 공급이 줄어들면서 생물생산력이 제한된 결과로 볼 수 있다. 그러나 니질 사층의 일부 구간(코어 SS01의 470 ~ 498 cm와 코어 SS02의 330 ~ 345 cm)에서 총유기탄소량이 일시적으로 증가하는 현상은(Figs. 3 and 6) 일시적인 유기물 공급에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 지금까지 알려진 바로는 남극반도 주변을 포함한 남 스코티아 해역은 LGM 동안 두꺼운 다년생 해빙(multi-year sea ice)의 점유율이 높았던 것으로 보이며 그 결과 해양의 생물생산력은 극히 낮았던 것으로 알려져 있다(Pudsey *et al.*, 1988). 따라서 니질 사층 내에 나타난 총유기탄소량의 일시적인 증가는 외양(open water)환경에서 일어난 결과이기 보다는 오히려 인접한 웨델 해의 대륙붕 지역에 넓게 발달했던 폴리냐(polynya)의 형성과 관련된 것으로 보인다. 일반적으로 LGM 동안 웨델 해에서는 폴리냐의 형성이 활발했던 것으로 보인다(Weber *et al.*, 1994). 폴리냐는 극지방의 해빙 또는 빙붕 지역에서 육지로부터 불어오는 바람(katabatic wind)과 조류(tidal current)의 움직임에 의해 해빙(sea ice) 한 가운데 형성되는 외양(open water)으로, 폴리냐가 대륙붕 지역에 형성되면 플랑크톤의 대번식(bloom)과 저층수(bottom water)의 형성이 일어날 수 있는데, 이 저층수에 의해 플랑크톤을 주 성분으로 하는 많은 양의 유기물이 일시적으로 주변의 심해 분지로 공급되기도 한다(Harris, 2000). 최근에 수행된 웨델해수의 기원에 관한 연구에 의하면 오늘날 웨델 해에서 형성되는 심층수의 대부분은 북상하여 포웰분지(Powel Basin)를 지나면서 하나는 북동쪽으로 이동하는 반면 다른 하나는 포웰분지 북쪽의 남 스코티아 융기대(South Scotia Ridge)를 지나 코어 지역까지 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 하부 퇴적상의 퇴적시기가 최소한 12,500 yr B.P. 이전인 점(Figs. 2 and 3)으로 미루어 볼 때 남극반도에서 일어난 LGM 시기와

일치하고 있다(Domack, 1998; Pudsey *et al.*, 1994). 따라서 이 시기에 웨델 해에 조성된 폴리냐로부터 많은 양의 식물플랑크톤이 일시적으로 남 스코티아 해까지 공급되었을 가능성이 크다. 하부 퇴적상 내에 발달한 희미한 실트 엽층리 층리는 대체로 불규칙적이며 불연속적인 특성을 보이고 생물교란작용을 심하게 받은 모습을 보인다(Figs. 4D and 7D). 일반적으로 이러한 특성을 보이는 심해 퇴적물은 저층류에 의해 느리지만 지속적으로 공급된 육성기원 퇴적물로 이루어진 저층류 퇴적상으로 해석할 수 있다(Stow, 1979; Stow and Holbrook, 1984; Chough and Hesse, 1985; Yoon and Chough, 1993). 오늘날 연구 해역은 웨델 해에서 기원한 남극 저층수의 영향이 매우 큰 해역으로 알려져 있다(Nowlin and Zenk, 1988; Camerlenghi *et al.*, 1997). Hollister and Elder (1969)는 최근에 웨델 해 저층수에 의해 생성된 것으로 보이는 혼탁한 저층수(murky bottom water)가 웨델 해 및 남 스코티아 해의 수심 2,000 m 이상 되는 지역에 존재한다고 발표한 바 있다. 따라서 중부 퇴적상이 형성된 LGM 시기는 오늘날에 비해 웨델 해 저층수의 영향이 훨씬 더 컸을 것으로 볼 수 있으며, 그 결과 다른 시기에 비해 저층류 퇴적상의 형성이 활발했던 것으로 보인다.

하부 퇴적상에서도 최하부에 나타나는 박층의 구조 니층은 바로 위의 니질 사층에 비해 총유기탄소량이 높고 구조류의 산출이 증가하지만 분급도가 상대적으로 불량하게 나타난다(Fig. 3). 탄소연대에 의하면 본 층의 퇴적 시기가 대략 22,500 yr B.P. 이전으로 나타나는데(Figs. 3 and 5). 이 시기는 인접한 드레이크 해협의 코어 퇴적물에 나타난 MIS 3 (22,000 ~ 59,000 yr B.P.)의 시기와 어느 정도 유사하게 나타난다(Bae *et al.*, 2002). 일반적으로 MIS 3 시기는 MIS 1 (홀로세) 및 MIS 5와 함께 간빙하기(interglacial)에 해당되는 시기로서, 특히 Bae *et al.* (2003)의 연구에 의하면 MIS 3 동안에 남극반도 주변 해역은 상대적으로 생물생산력이 증가하며 퇴적물 내 총유기탄소량이 증가했던 것으로 보고하였다.

6.2 중부 퇴적상(Middle Facies)

이 퇴적상은 코어 SS01과 SS02에서 각각 두께 200 cm와 120 cm의 주로 구조 니로 구성되며(Figs. 3 and 6), 다른 퇴적상에 비해 총유기탄소량과 함수량

이 높은 반면 대자율값과 사질량이 매우 낮은 것이 특징이다(Figs. 5 and 8). X-선 사진 상에서 보면 두께 1~3 cm의 구조연니층이 불규칙하게 나타나며 층의 경계면은 대부분이 생물교란작용을 심하게 받아 뚜렷하지 않은 편이다(Figs. 4B and 7B). 대체로 구조연니층이 밀집된 구간(코어 SS01의 120~155 cm와 219~281 cm 그리고 코어 SS02의 60~95 cm와 116~138 cm)에서 총유기탄소량이 높은 값을 나타낸다(Figs. 3 and 6). 남극해 퇴적물 내에서 유기물이 보존되는 경우는 해양의 생물생산력에 의해 공급된 유기물의 양과 육성기원 퇴적물의 공급량 사이의 상대적인 변화에 의해 결정된다(Domack and Ishman, 1993). 즉 해양기원의 유기물 공급이 일정하다고 해도 육성기원 퇴적물의 공급에 따라 퇴적물 내의 총유기탄소량이 변할 수 있다. 그러나 중부 퇴적상은 대자율과 사질량의 변화가 거의 없는 반면에 유기탄소의 변화는 상대적으로 심한 모습을 보인다(Figs. 5 and 8). 이것은 중부 퇴적상이 쌓이는 동안에 육성기원 퇴적물의 공급은 비교적 일정했던 반면에 생물생산력에 의한 유기물질의 공급에 변화가 있었음을 의미한다. 일반적으로 남극해에서 일어날 수 있는 유기물질 공급의 변화는 온난기에 육성으로부터 공급된 용설수(meltwater)의 유입으로 표층 해양에 성층(stratification)이 일어나면서 생물생산력 증가의 원인일 수 있다. 탄소연대에 의하면 중부 퇴적상이 형성된 시기는 2,400~8,700 yr B.P. 경으로 나타났다(Fig. 3). 일반적으로 이 시기는 홀로세 중기(mid-Holocene)에 해당되는 시기로서 지금까지 알려진 바에 의하면 오늘날에 비해 평균 기온이 약 2°C 까지 높았던 것으로 보인다(Imbrie and Imbrie, 1986). 홀로세 중기에 형성된 중부 퇴적상의 총유기탄소량이 오늘날에 해당하는 코어의 최상부의 그것에 비해 높게 나타나는 사실은 위의 사실을 잘 설명해 주고 있다(Figs. 3 and 6). 특히, 이 시기에 두 개의 총유기탄소량의 최대구간(Figs. 3 and 6)이 나타나는 것은 Shevenell *et al.* (1996)이 남극반도 남서쪽의 랄리먼드(Lallemant) 피오르드에서 보고한 현상과 아주 유사하며, 이들에 의하면 이 총유기탄소량의 최대 구간이 홀로세 중기에 가장 온난했던 시기로서 이 때 해양의 생물생산력이 최대로 일어났던 것으로 보고하였다.

6.3 상부 퇴적상(Upper Facies)

상부 퇴적상은 코어 SS01과 SS02에서 각각 두께 100 cm와 15 cm의 사질 니로 구성되며 부분적으로 구조연니층을 포함한다(Figs. 3 and 6). 이 퇴적상이 구조연니층을 포함한다는 점에서 중부 퇴적상과 마찬가지로 전형적인 외양(open water) 환경에서 형성된 것으로 볼 수 있으나 사질량과 대자율 값이 중부 퇴적상보다 높아진 점으로 미루어 볼 때, 상부 퇴적상의 형성 시기에는 상대적으로 육성기원 퇴적물의 공급이 증가했을 것으로 생각된다. 일반적으로 남극해로 유입되는 육성기원 퇴적물의 공급 방식은 크게 세 가지로 생각할 수 있다. 첫째는 대륙붕이나 대륙사면에서 유속이 빠른 해류나 저층류에 의해 재동(reworking)되어 퇴적물이 공급되는 경우(Singer and Anderson, 1984; Anderson and Kurtz, 1985), 둘째는 남극 피오르드에 발달한 조수빙하(tidewater glacier)에서 기원하는 혼탁한 용설수(sediment-laden meltwater)가 수층을 따라 먼 바다까지 이동되는 경우, 셋째는 주변 육성으로부터 강한 바람에 의해 풍성기원 퇴적물이 바다로 공급되는 경우이다. Stein (1992)은 남극반도 서부의 피오르드에서 얻은 코어 퇴적물의 상층에 나타난 사질량 증가에 대해 퇴적물의 분급도가 양호해진 사실을 들어서 이들이 풍성기원임을 주장한 바 있다. 그러나 코어 SS01과 SS02의 상부에 나타나는 니질 사 퇴적상은 바로 아래의 중부 퇴적상과 비교할 때 오히려 분급도가 불량해지는 경향을 보인다(Figs. 5 and 8). 따라서 상부 퇴적상에 나타난 사질의 증가는 풍성기원에 의한 것이 보다 오히려 기후 냉각으로 인해 웨델 해의 빙붕(ice shelf)에서 기원한 고밀도의 저층류(bottom current)가 사질 퇴적물을 운반한 결과로 볼 수 있다. 일반적으로 저층류에 의해 운반된 퇴적물은 층리의 발달이 미약한 편이며 반원양성(hemipelagic) 퇴적작용에 의한 유기물 공급도 함께 받기 때문에 총유기탄소량이 증가하거나 구조연니층이 형성될 수 있다. 저층류 기원의 가능성은 오늘날의 코어지역에서 관측된 저층수의 특성이 웨델 해 빙붕에서 기원하는 고밀도 냉각수와 동일하다는 최근의 관측 결과에서도 알 수 있다(Whitworth III *et al.*, 1994). 사질량 증가에 대한 다른 설명으로서 기후 냉각기로 접어들면서 코어지역에 인접한 사우스오크니 섬(South Orkney Island)의 피오르드에 발달한 조수빙하가 전진하게

된 결과 빙하 하부에서 기원하는 혼탁한 용빙수의 공급이 상대적으로 늘어난 결과로 볼 수도 있다. 그러나 최근에 남 쉐틀랜드 군도(South Shetland Islands) 피오르드에서 수행된 부유물질의 거동에 관한 연구 결과에 의하면 조수빙하로부터 기원하는 세립 퇴적물의 대부분이 피오르드 내에서 퇴적된다는 사실(Yoon *et al.*, 1998)로 미루어 볼 때, 조수빙하 기원의 육성기원 퇴적물이 용빙수에 의해 먼 바다까지 공급될 가능성은 희박하다. 탄소연대에 의하면 상부 퇴적상의 형성 시기는 2,400 yr B.P.부터 시작된 것으로 보인다(Fig. 3). 일반적으로 이 시기는 남극반도 지역이 홀로세 중기의 온난기를 끝내고 신빙하기(Neogacial)에 접어든 시기로 알려져 있다(Domack *et al.*, 2001; Leventer *et al.*, 1996, Yoon *et al.*, 2002). 이 시기에는 홀로세 중기에 비해 피오르드의 해빙(sea ice) 점유율이 증가한 결과 해양의 생물생산력이 줄어들게 되어 퇴적물 내의 총유기탄소량이 감소한 것으로 알려져 있다(Shevenell *et al.*, 1996; Leventer *et al.*, 1996). 신빙하기의 기록은 남극반도 육상의 호소퇴적물에서도 잘 나타나고 있다. Bjorck *et al.*(1991, 1996)은 남 쉐틀랜드 군도의 리빙스턴 섬(Livingston Island)과 남극반도 북동쪽에 위치한 로스 섬(Loss Island)의 호수 퇴적물에서 2,700 yr B.P. 경에 신빙하기의 기록을 보고한 바 있다. 특히, 남극반도에서 일어난 신빙하기의 시작은 그린란드 빙하에서 최근에 밝혀진 홀로세 동안의 북반구 냉각기(cold triple events: 3,000~2,000 yr B.P.)의 시작과 잘 일치하고 있어(O'Brien *et al.*, 1995) 코어 SS01과 SS02의 상부 퇴적상에 나타난 신빙하기의 증거는 전지구적 고기후 변화일 가능성을 시사한다.

6. 결론

1. 남 스코티아 해에서 얻은 코어 SS01과 SS02에 대하여 퇴적학 및 지화학적 특성 분석 그리고 퇴적물의 연대를 분석한 결과 남 스코티아 해역은 후기 플라이스토세부터 홀로세까지 세 번의 환경변화가 일어났으며 이들은 각각 특징적인 퇴적상을 나타낸다.
2. 하부 퇴적상은 주로 LGM 시기(22,500~12,400 yr B.P.)에 형성된 니질 사로 구성되며 이 때 남 스코티아 해역은 해빙(sea ice) 점유율이 급격하게 증가한 결과, 해양의 생물생산력이 감소하게 되었고 이것은 퇴적물 내의 총유기탄소량의 감소로 나타나게 되었다. 그러나 LGM 동안 인접한 웨델 해의 폴리냐에서 일어난 식물플랑크톤의 대번식과 심층수 형성으로 인해 많은 양의 유기물이 일시적으로 남 스코티아 해까지 운반되었으며, 그 결과 퇴적상 내에 총유기탄소량이 일시적으로 증가하는 현상을 초래하였다. 하부 퇴적상의 맨 위에 나타나는 전이층은 LGM 말기에 본격적인 해빙(deglaciation) 과정(12,500~8,300 yr B.P.)에서 형성된 퇴적층으로서 생물생산력이 점차 증가하여 유기물 공급이 늘어난 반면 상대적으로 육성기원 퇴적물의 영향이 줄어든 특성을 보인다. 전이층 내의 특정 시기(9,500~10,400 yr B.P.)에서 일시적으로 총유기탄소량이 감소하고 사질량이 증가하는 현상은 해빙(deglaciation) 과정에서 일어난 단주기 냉각기(short-term cold event)로 볼 수 있다. 퇴적상의 최하부에 나타나는 구조 니질층은 퇴적 시기가 22,500 yr B.P. 이전으로서 인접한 드레이크 해협 퇴적물에서 보고된 간빙하기 MIS 3와 일치하며 총유기탄소량의 증가는 이 때 일어난 일차생산력의 증가와 밀접한 관련이 있다.
3. 구조 니로 구성된 중부 퇴적상은 홀로세 중기 온난기(8,700~2,400 yr B.P.)에 형성되었으며 총유기탄소량이 상대적으로 풍부한 반면에 육성기원 퇴적물과 유빙운반역이 적어 해빙(sea ice)의 영향이 줄어든 전형적인 외양(open water) 환경의 특성을 보인다. 퇴적상 내에서 육성기원 물질의 변화가 없는 반면에 총유기탄소량의 상대적 변화가 큰 것은 생물생산력의 변화가 있었음을 시사한다.
4. 사질 니로 구성된 상부 퇴적상은 부분적으로 구조 연니층을 포함한다는 점에서 외양(open water) 환경의 특성을 보인다. 중부 퇴적상에 비해 상부 퇴적상의 사질량 증가는 상부 퇴적상 시기의 육성기원 퇴적물 공급이 중부 퇴적상에 비해 많았음을 말해준다. 이 퇴적상의 형성 시기(2,400 yr B.P.)가 남극반도의 신빙하기와 일치하는 것으로 볼 때 남 스코티아 해역이 웨델 해 빙봉에서 강화된 저층수의 영향을 받게 되면서 육성기원 퇴적물의 공급이 증가한 것으로 보인다. 또한 이 시기에 동 남극 빙하와 그린란드 빙하에서도 냉각기(cold triple event, 3,000~2,000 yr B.P.)가 기록된 것으로 볼

때, 2,400 yr B.P.의 고기후 변화는 전지구적 규모였을 가능성이 크다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 극지연구소가 해양수산부의 연구비를 받아 수행하고 있는 “남극해저지질 조사사업”과 해양연구원 극지연구소의 기관과유사업의 일환으로 수행하고 있는 “남극 고기후 및 고해양 연구사업(PP04106)”의 일환으로 이루어졌다. 또한 본 연구의 많은 부분은 과학기술부 국제공동연구사업(PN50200, PN50800)의 일환으로 수행되었음을 밝히고자 한다. 본 연구를 위해 실험실 분석을 해주신 실험실의 임인권과 임수연씨 그리고 그 외 실험실 식구들에게 감사드리며, 또한 논문을 읽고 건설적인 의견을 주신 세 분의 심사자들에게 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- Anderson, J.B. and Kurtz, D.D., 1985, The use of silt grain size parameters as a paleoveLOCITY gauge: a critical review and case study. *Geo-marine Letters*, 5, 55-59.
- Bae, S.H., Yoon, H.I., Park, B.-K. and Kang, C.Y., 2002, Stable isotope record and depositional environments in the Antarctic Polar Front of Drake Passage, West Antarctica. *Geosciences Journal*, 6 (2), 117-123.
- Bae, S.H., Yoon, H.I., Park, B.-K., Kim, Y. and Bahk, J.J., 2003, Meltwater discharge anomalies in marine isotope stage 3 from a sediment core in the south of Antarctic Polar Front, Drake Passage. *Geosciences Journal*, 7 (1), 73-79.
- Bjorck, S., Hakansson, H., Zale, R., Karlen, W. and Jonsson, B.L., 1991, A Late Holocene lake sediment sequence from Livingston Island, South Shetland Islands, with paleoclimatic implications. *Antarctic Science*, 3, 61-72.
- Bjorck, S., Olsson, S., Ellis-Svans, C., Hakansson, H., Humlum, O. and De Lirio, J.M., 1996, Late Holocene paleoclimatic records from lake sediments on James Ross Island, Antarctica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 121, 195-219.
- Berkman, P.A. and Foreman, S.L., 1996, Pre-bomb radiocarbon and the reservoir correction for calcareous marine species in the Southern Ocean. *Geophysical Research Letters*, 23, 363-366.
- Camerlenghi, A., Crise, A., Pudsey, C.J., Accerboni, E., Laterza, R. and Robesco, 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.
- Chough, S.K. and Hesse, R., 1985, Contourites from Eirik Ridge, south of Greenland. In: Hesse, R. (Ed.). *Sedimentology of Siltstone and Mudstone. Sedimentary Geology*, 41, 185-199.
- Cias, P., Petit, J.R., Lorius, C., Barkov, N.I., Lipenkov, V. and Nicolaiev, V., 1991, Evidence of an Early Holocene climatic optimum in the Antarctic deep ice-core record. *Climate Dynamics*, 6, 169-177.
- Cooper, A.K., Barker, P.F. and Brancolini, G., 1996, Geology and seismic stratigraphy of the Antarctic margin. *Antarctic Research Series*, 68, AGU, Washington, D.C.
- Deacon, G.E.R., 1937, The hydrology on the Southern Ocean. *Discovery Reports*, 9, 1-64.
- Domack, E.W., 1992, Modern carbon-14 ages and reservoir corrections for the Antarctic Peninsula and Gerlache Strait area. *Antarctic Journal of the United States*, 27, 63-64.
- Domack, E.W., 1998, Mysteries of the Palmer Deep revealed: ODP Leg 178 to the Antarctic Peninsula. *JOI/USSAC*, 11, 1-3.
- Domack, E.W. and Ishman, S.E., 1993, Oceanographic and physiographic controls on modern sedimentation within Antarctic fjords. *Geological Society of American Bulletin*, 105, 1190-1213.
- Domack, E.W., Leventer, A., Dunbar, R., Taylor, F., Brachfeld, S., Sjunneskog, C. and ODP Leg 178 Scientific Party, 2001, Chronology of the Palmer Deep site, Antarctic Peninsula: a Holocene paleoenvironmental reference for the circum-Antarctic. *Holocene*, 11, 1-9.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos River bars. A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Foster, T.D. and Middleton, J.H., 1980, Bottom water formation in the eastern Weddell Sea. *Deep-Sea Research*, 27A, 367-381.
- Garabato, A.C.N., Heywood, K.J. and Stevens, D.P., 2002, Modification and pathways of Southern Ocean Deep Waters in the Scotia Sea. *Deep-Sea Research*, 49, 681-705.
- Gordon, J.E. and Harkness, D.D., 1992, Magnitude and geographic variation of the radiocarbon content in Antarctic marine life: Implications for reservoir corrections in radiocarbon dating. *Quaternary Science Reviews*, 11, 696-708.
- Harris, P.T., 2000, Ripple cross-laminated sediments on

- the East Antarctic Shelf: evidence for episodic bottom water production during the Holocene? *Marine Geology*, 170, 317-330.
- Hollister, C.D. and Elder, R.B., 1969, Contour currents in the Weddell Sea. *Deep-Sea Research*, 16, 99-101.
- Imbrie, J. and Imbrie, K.P., 1986, *Ice ages: Solving the mystery*: Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 224 p.
- Lee, S.H., Jin, Y.K., Kim, K.J., Nam, S.H. and Kim, Y., 2003, High-resolution (3.5 kHz) echo characters of the northern South Shetland continental margin and the South Scotia Sea, Antarctica. *Ocean and Polar Research*, 25, 557-568.
- Leventer, A., Domack, E.W., Ishman, S.E., Brachfeld, S., McClennen, C.E. and Manley, P., 1996, Productivity cycles of 200-300 years in the Antarctic Peninsula region: Understanding linkages among the sun, atmosphere, oceans, sea ice, and biota. *Geological Society of America Bulletin*, 108, 1626-1644.
- Licht, K.J., Dunbar, N.W., Andrews, J.T. and Jennings, A.F., 1999, Distinguishing subglacial till and glacial marine diamictites in the western Ross Sea, Antarctica: Implications for a last glacial maximum grounding line. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 91-103.
- Nowlin, W.D. and Zenk, W., 1988, Westward bottom currents along the margin of the South Shetland Island Arc. *Deep-Sea Research*, 35, 269-301.
- O'Brien, S.R., Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Meese, D.A., Twickler, M.S. and Whitlow, S.I., 1995, Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. *Science*, 270, 1962-1964.
- Pudsey, C.J., Barker, P.E. and Larter, R.D., 1994, Ice sheet retreat from the Antarctic Peninsula shelf. *Continental Shelf Research*, 14, 1647-1675.
- Pudsey, C.J., Barker, P.F. and Hamilton, N., 1988, Weddell Sea abyssal sediments a record of Antarctic bottom water flow. *Marine Geology*, 81, 289-314.
- Shevenell, A., Domack, E.W. and Kernan, G.M., 1996, Record of Holocene paleoclimate change along the Antarctic Peninsula: evidence from glacial marine sediments, Lallemand Fjord. *Papers of Proceedings in Royal Society of Tasmania*, 130 (2), 55-64.
- Singer, J.K. and Anderson, J.B., 1984, Use of total grain-size distributions to define bed erosion and transport for poorly sorted sediment undergoing simulated bioturbation. *Marine Geology*, 57, 335-359.
- Stein, A.B., 1992, Growth of the Muller Ice Shelf during the later half of the Little Ice Age as documented by glacial marine sediments and radiogeochemistry. Unpublished BA thesis, Hamilton College, Clinton, NY, USA: 56 p.
- Stow, D.A.V., 1979, Distinguishing between fine-grained turbidites and contourites on the Nova Scotian deep water margin. *Sedimentology*, 26, 371-387.
- Stow, D.A.V. and Holbrook, J.A., 1984, North Atlantic contourites: an overview. In: Stow, D.A.V. and Piper, D.J.W. (eds.). *Fine-grained sediments: Deep-water processes and products*. Geological Society of London Special Publication, No 1, 245-256.
- Thompson, L.G., Peel, D.A., Mosley-Thompson, E., Mulvaney, R., Dai, J., Lin, P.N., Davis, M.E. and Raymond, C.F., 1994, Climate since AD 1510 on Dyer Plateau, Antarctic Peninsula: evidence for recent climatic change. *Annals of Glaciology*, 20, 420-426.
- Weber, M.E., Bonami, G. and Futterer, K.D., 1994, Sedimentation processes within channel-ridge systems, southeastern Weddell Sea, Antarctica. *Paleoceanography*, 9, 1027-1048.
- Whitworth III, T., Nowlin, 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*, 41, 629-641.
- Yoon, H.I., Park, B.-K., Domack, E.W. and Kim, Y., 1998, Distribution and dispersal pattern of suspended particulate matter in Maxwell Bay and its tributary, Marian Cove, in the South Shetland Islands, West Antarctica. *Marine Geology*, 152, 261-275.
- Yoon, H.I., Park, B.-Y., Kim, Y. and Kang, C.Y., 2002, Glaciomarine sedimentation and its paleoclimatic implications on the Antarctic Peninsula shelf over the last 15000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 185, 235-254.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1993, Sedimentary characteristics of Late Pleistocene bottom-current deposits. Barents Sea slope off northern Norway. *Sedimentary Geology*, 82, 33-45.

투 고 일 : 2004년 4월 1일

심 사 일 : 2004년 4월 2일

심사완료일 : 2005년 3월 26일