

남극 킹 조지 섬 에드미럴티 만과 맥스웰 만 시추 퇴적물의 홀로세 후기 고해양환경 연구

박병권¹ · 윤호일¹ · 우한준² · 이광식³ · 박은주⁴ · 존 써우든⁵

¹한국해양연구소 극지연구소

²한국해양연구소 해양지질연구그룹

³기초과학지원연구소 동위원소그룹

⁴기초과학지원연구소 지구과학분석실

⁵미국 국립 리버모어연구소 AMS센터

Late Holocene Paleoceanography from Core Sediments in the Admiralty Bay and Maxwell Bay, King George Island, Antarctica

BYONG-KWON PARK¹, HO IL YOON¹, HAN JUN WOO², KWANG SIK LEE³,
EUN-JOO BARG⁴ AND JOHN SOUTHON⁵

¹Polar Research Center, Korea Ocean Research & Development Inst., Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Marine Geology Research Group, Korea Ocean Research & Development Inst., Ansan P.O. Box 29,
Seoul 425-600, Korea

³Isotope Research Group, Korea Basic Science Inst., Yusung P.O. Box 41, Taejeon 305-600, Korea

⁴Earth Science Analytical Facility, Korea Basic Science Inst., Sungbuk-Ku, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

⁵Center for AMS, Lawrence Livermore National Lab., P.O. Box 808, Livermore CA 94551-9900, U.S.A.

홀로세 후기 킹 조지 섬 주변 해역의 고해양학적 변화와 기후변화를 파악하기 위하여 킹 조지 섬 주변의 맥스웰 만과 에드미럴티 만에서 채취한 2개의 해양 퇴적물의 지화학적 특성, 퇴적률 측정, 유공충의 분포 및 유공충의 각을 구성하고 있는 산소 및 탄소 동위원소비를 분석하였다. 유기탄소 함량은 대체로 시추 퇴적물의 하부층에서 상부층으로 갈수록 증가하고, 탄산염 함량은 그 반대로 하부층으로 갈수록 증가하였다. 유공충은 총 27종이 감별되었으며 비교적 우세한 종은 *Globocassidurina biora*이다. 유공충을 이용한 ¹⁴C 연대 측정치를 기준으로 계산한 퇴적률은 24 cm/kyr에서 237 cm/kyr 범위이나 상부층으로 갈수록 급격히 증가한다. 대표적 유공충인 *G. biora*의 산소 및 탄소 동위원소비는 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 경우 0.3%에서 6.2% 범위이고 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -3.0%에서 0.0% 범위이다. 시추 퇴적물의 지질연대는 시추심 S-2의 최하부층인 깊이 128 cm에서 3,100±60 yr B.P.이고, 시추심 S-19의 최하부층인 깊이 230 cm에서 7,460±70 yr B.P.이다.

본 연구에서 사용된 시추 퇴적물의 분석 결과에 의하면 연구지역의 고기후와 고해양환경은 온난-한랭한 7,500~6,500 yr B.P., 한랭한 6,500~3,600yr B.P., 한랭-온난한 3,600~2,770 yr B.P., 온난한 2,770~2,380 yr B.P. 및 한랭-온난한 2,380~2,100 yr B.P.의 5개 시기로 구분된다.

The geochemical properties, sedimentation rates, foraminiferal distributions, and oxygen and carbon isotope records of sediment from Cores S-2 and S-19 were studied to investigate late Holocene paleoceanographic and paleoclimatic changes of the Admiralty and Maxwell Bay, King George Island, Antarctica. Total organic carbon contents increased from the lower part to the upper part of Cores S-2 and S-19, whereas calcium carbonate contents decreased from the lower part to the upper part of Cores S-2 and S-19. Twenty-seven foraminiferal species were identified, and *Globocassidurina biora* was mostly abundant in sediment samples. The sedimentation rates ranged from 24 cm/kyr to 237 cm/kyr based on ¹⁴C-

age dating of *G. bitor*. The sedimentation rates increased rapidly in the upper part of the Cores. $\delta^{18}\text{O}$ values ranged from 0.3% to 6.2% and $\delta^{13}\text{C}$ values ranged from -3.0‰ to 0.0‰ with several fluctuations of the values. The lowest part of Core S-2, at 128 cmbsf in depth, had a ^{14}C -age of $3,100 \pm 60$ yr B.P. and the lowest part of Core S-19, at 230 cmbsf in depth, of $7,460 \pm 70$ yr B.P.

The results of geochemical and sedimentological analyses of the core sediments suggested five stages of paleoceanographic and paleoclimatic changes as follows: warm-cold stage of 7,500~6,500 yr B.P., cold stage of 6,500~3,600 yr B.P., cold-warm stage of 3,600~2,770 yr B.P., warm stage of 2,770~2,380 yr B.P. and cold-warm stage of 2,380~2,100 yr B.P.

서론

인류가 지구상에서 언제까지 생존할 수 있는가에 대한 문제는 우리 인류가 풀어야 할 대단히 중요한 과제이다. 따라서 인류 생존의 문제가 걸려있는 지구환경 변화를 감지하고 예측하는 일은 지구계(earth system) 연구에 중요한 부분이다. 만약 지구계 변화가 인류가 적응할 수 없을 정도로 빨리 진행된다면 지금까지 인류가 구축해 온 사회 경제적 체계는 대 변화를 감수하여야 할 것이다. 지구계의 환경 변화는 대륙빙하의 증감으로 나타나며, 이는 해양에서 형성된 탄산염내 안정 동위원소비에 잘 반영되어 있다(Emiliani, 1954; Shackleton and Opdyke, 1973). 그동안 많은 연구자들(Hays *et al.*, 1976; Shackleton, 1977; Imbrie *et al.*, 1984; Pisias *et al.*, 1984; Prell *et al.*, 1986; Martinson *et al.*, 1987; Williams *et al.*, 1988)이 심해저 굴착사업으로 획득한 시추 퇴적물내 미고생물 연구와 유공충의 각을 구성하고 있는 탄산염의 산소 및 탄소 동위원소비를 분석하여 심해 시추 퇴적물에 대한 정밀한 층서대비와 거시적 지구규모의 기후변화를 연구해 왔다.

그러나 앞으로 100년 혹은 10,000년 이내의 지구환경 변화를 정확히 예측하기 위해서는 지난 10,000년, 즉 홀로세(Holocene)의 미시적 변화를 정확히 이해하여야 한다. 이를 위해서는 대륙의 빙하 시추 표품이나 해저 시추 퇴적물을 이용하여 고정밀(high resolution) 지구변화의 기록을 밝혀야 한다. 이러한 목적에 가장 적합한 접근방법은 시추 퇴적물에 함유되어 있는 유공충의 각을 구성하고 있는 탄산염을 분석하는 것으로, 탄산염의 산소 및 탄소 동위원소비를 측정하고 또한 탄산염을 이용하여 정확한 연대를 측정하므로써 시간에 따른 지구변화를 정확히 파악할 수 있다.

지난 홀로세는 지구의 마지막 빙하기가 끝나고 기온이 상승하여 빙하가 해빙되는 기간이다. 지금까지

의 거시적 지구변화 예측에서는 지난 10,000년 동안은 비교적 안정적인 시기로 알려져 있으나, 홀로세 기간중에도 우리 인류의 생존에 영향을 줄 수 있는 많은 변화가 있었다. 예를 들면, 홀로세 기간중 해수면은 6 m 가량 상승하였으며(Thomas, 1979), 지구 지표면의 평균기온이 1세기에 0.5°C 씩 상승하고 있다(Stouffer *et al.*, 1994). 또한 19세기 중반기 이후 지구의 평균기온이 0.5°C 상승되었으며, 지구기온이 65~70년 간격으로 주기적 변화를 보여주고 있다(Schlesinger and Ramankutty, 1994). 유럽에서는 지난 10,000~11,000 yr B.P.에 영거 드라이아스(Younger Dryas) 기간이 있었으며 A.D. 1,600~1,860년 사이에는 소빙하기(Little Ice Age)가 있었다.

남극은 지구의 환경변화에 매우 민감하며, 특히 남극반도 주변은 남극대륙과 남극해를 연결하고 있어서 우리나라 세종기지가 위치하고 있는 남 셰틀랜드 열도(South Shetland Islands) 주변지역은 홀로세 기간의 정밀한 지구환경 변화를 연구하는데 최적지이다. 그동안 남극지역에서 홀로세 기간중의 고정밀 기후변화와 고해양환경 변화에 관한 연구의 필요성은 오랫동안 강조되어 왔으나(Mackensen *et al.*, 1989; Björck *et al.*, 1991a; Domack and Scott, 1993), 해양-빙하 퇴적작용의 복잡성과 해저 퇴적물의 시추 표품 부족으로 충분한 연구가 시행되지 못해왔다. 다만 남극해 여러 지역에서 산발적으로 시추 퇴적물에 포함되어 있는 유공충의 각을 구성하고 있는 탄산염의 산소 및 탄소 동위원소비를 분석하여 시추 퇴적물의 정밀한 층서대비(high-resolution stratigraphic correlation)에 이용하고자 하는 연구가 있었으나(Hays *et al.*, 1976; Shackleton, 1977; Imbrie *et al.*, 1984; Pisias *et al.*, 1984; Prell *et al.*, 1986; Martinson *et al.*, 1987; Williams *et al.*, 1988), 남극주변 해저 퇴적물내에 석회질 유공충이 충분히 함유되어 있지 않거나 아주 소량 함유되어 있어서 이에 관한 연구는 아직 미진한 형편이다. 그러나 최근 심해저

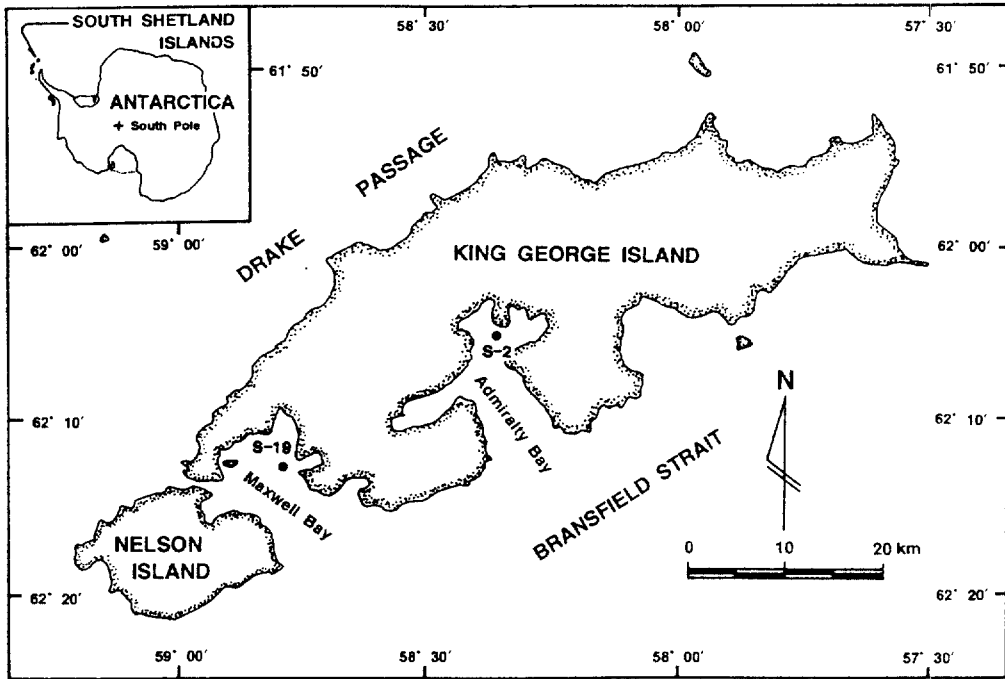


Fig. 1 Location map of Cores S-2 and S-19 from Admiralty and Maxwell Bays, King George Island.

굴착사업과 더불어 해저 퇴적물의 시추 시료가 증가되면서 남극 및 남극반도 주변 해저 퇴적물을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Grobe, 1986; Ledbetter and Gesielski, 1986; Burckle and Abrams, 1987; Fütterer *et al.*, 1988; Pudsey *et al.*, 1988).

본 연구에서는 남극 남 셰틀랜드 열도의 일부인 킹 조지 섬(King George Island) 주변의 맥스웰 만(Maxwell Bay)과 에드미럴티 만(Admiralty Bay)에 퇴적된 해양-빙하 퇴적물의 시추 표품을 분석하여 퇴적물의 지화학적 특성, 퇴적율 및 유공충의 분포를 연구하였다. 또한 유공충의 각을 구성하고 있는 탄산염에 대한 산소 및 탄소 동위원소비를 분석하여 홀로세 기간 중 킹 조지 섬 주변해역의 고해양학적 변화와 지구규모의 기후변화를 분석 검토하였다.

일반지질

남 셰틀랜드 열도는 남극반도에서 북동방향으로 약 100 km 지점에 위치하고 있다. 킹 조지 섬을 위시한 남 셰틀랜드 열도의 대부분 섬들은 주라기 말에서 백악기 초에 남서방향으로 형성되기 시작하여 제

3기에 와서는 현재의 모습을 갖추게 되었다(Hobbs, 1968; Smellie, 1983; Smellie *et al.*, 1984).

에드미럴티 만은 남 셰틀랜드 열도에서 가장 큰 섬인 킹 조지 섬의 남동쪽에 위치하며 브랜스필드 해협(Bransfield Strait)과 연결되어 있다(Fig. 1). 에드미럴티 만은 입구의 폭 약 8 km, 길이 24 km, 평균 수심 약 400 m의 작은 만으로, 빙식작용에 의하여 형성된 전형적인 피요르드(fjord)이다. 해저 퇴적층의 두께는 약 70 m로써, 만의 내부에서 외부로 갈수록 퇴적층의 두께가 얇아진다(Griffith and Anderson, 1989). 표층 퇴적물은 대체로 펄질 모래, 사질 펄 그리고 다이아미타이트(diamictite)로 구성되어 있으며(Domack and Scott, 1993), 퇴적물 내부에는 층리가 희미하게 발달되어 있다. 이 만의 표층퇴적물들은, 남극의 다른 만에 비해 유기기원 탄소와 IRD(ice-rafted debris)의 함량이 대단히 낮으며 생물교란 퇴적구조가 발견되지 않는다(Domack and Scott, 1993). IRD들은 1 cm 내외가 주를 이루며 시추 퇴적물 분석에 의하면 십여 cm 두께의 점이층도 발달되어 있다.

맥스웰 만 역시 킹 조지 섬과 넬슨 섬(Nelson Island) 사이에 발달한 빙식작용에 의해 형성된 전형적

Table 1. Records for each sample of Core S-2 from Admiralty Bay include sample depth (cmbsf), total organic carbon (TOC), calcium carbonate (CaCO₃), ¹⁴C-dated age, δ¹⁸O and δ¹³C values in benthic foraminifera, *G. bitor*, and number of foraminiferal specimens per gram (specimens/gr).

Depth (cmbsf)	TOC (%)	CaCO ₃ (%)	¹⁴ C-age (yr)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ¹³ C (‰)	specimens/gr			
3	0.3507	0.2319	2160	1.5	0.0	4.42			
5	0.1858	0.3616							
7									
10	0.2407	0.2459							
15	0.1742	0.3532							
18.5							1.1	-0.4	1.25
20	0.1757	0.4053							
25	0.1604	0.4320							
28							1.9	-0.2	3.76
30	0.2225	0.3129							
35	0.2078	0.4226	2460	1.5	-0.7	1.86			
37	0.2359	0.3844							
38									
40	0.2046	0.4741							
45	0.1969	0.3436							
48							2.1	-0.5	4.00
50	0.1292	0.4066							
55	0.2025	0.3130							
58							2.5	-0.6	
60	0.2886	0.2755							
65	0.2750	0.2268	2820	0.3	-1.6	4.47			
68	0.2368	0.2536							
70	0.2368	0.2536							
75	0.1340	0.3058							
78							1.4	-1.2	11.11
80	0.1184	0.3159							
85	0.1132	0.3844							
88							2.2	-1.1	8.51
90	0.1107	0.3831							
95	0.1071	0.3697							
98			2.6	-1.1	6.16				
100	0.1209	0.3167	3100	4.2	-0.6	7.18			
105	0.1222	0.3417							
108									
110	0.1218	0.3380							
115	0.0871	0.4692							
118							3.3	-1.2	10.57
120	0.1156	0.4229							
125	0.1048	0.4248							
128							4.3	-0.8	5.93
130	0.0502	0.5821							
135	0.0605	0.7104	4.9	-0.7	1.06				
138									
140	0.0571	0.6833							
Average	0.1660	0.3789				-	-	-	5.41

인 피요르드로써, 해저에는 최근까지 계속된 단층작용의 흔적이 남아있다(Kim and Nam, 1991). 이 만은 폭이 약 8 km 이고 길이는 15 km 이며 평균수심은 약 470 m이다. 맥스웰 만의 북동쪽에는 평균수심이 100 m, 폭 1.5 km, 길이 3.5 km 크기의 마리안 소만

(Marian Cove)이 위치하고 있다(Fig. 1). 만의 기반암은 빙하의 침식작용으로 험준한 지형을 이루고 있으며, 그 위에 약 70 m 두께의 니질 퇴적물이 피복되어 있다(Griffith and Anderson, 1989; Choi *et al.*, 1990). 만의 표층 퇴적물은 만 내부에서는 함력 니질 퇴적

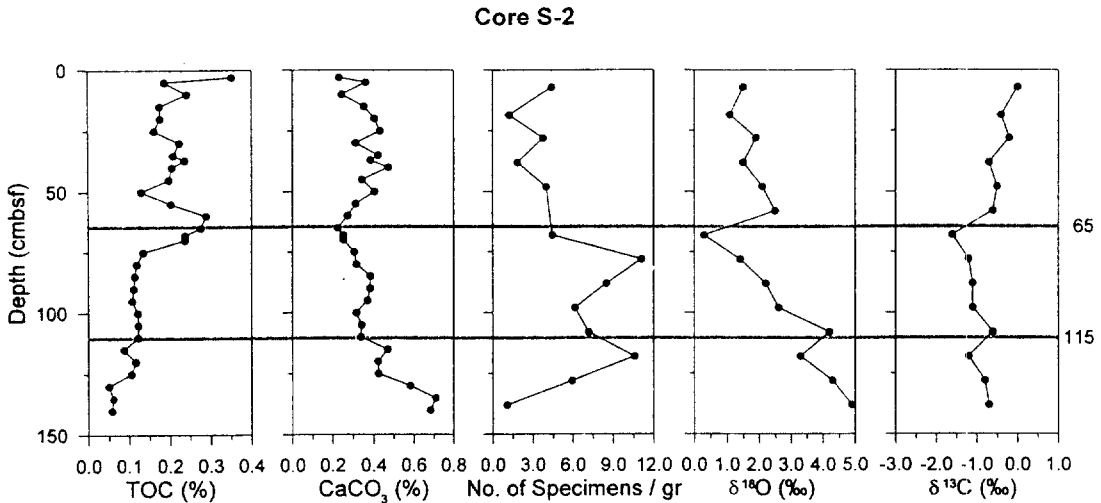


Fig. 2. Downcore variations in total organic carbon (TOC), calcium carbonate (CaCO₃), number of foraminiferal specimens per gram, δ¹⁸O and δ¹³C values in benthic foraminifera, *G. bionia*, from Core S-2 from Admiralty Bay.

물이 분포하고 있으나 외부로 가면서 력질 암설은 감소하고 니질 및 사질 퇴적물이 증가한다(Yoon *et al.*, 1989).

두 만의 니질 퇴적물에 포함되어 있는 주요 점토 광물로는 일라이트(illite; 평균 35.7%), 스멕타이트(smectite; 평균 21.1%), 크로라이트(chlorite; 평균 23.1%), 카오리나이트(kaolinite; 평균 8.5%) 등이다(Yoon *et al.*, 1993).

연구재료 및 분석방법

본 연구에서는 대한민국 남극해계연구단(1991년)에 의해 채취된 2개의 시추 퇴적물 시료가 사용되었다(Fig. 1). 한 시추심(Core S-2)은 에드미럴티 만 입구 수심 42 m 해역(위도 62° 04' 94.22" S; 경도 58° 22' 32.64" W)에서 채취하였으며, 시추심의 길이는 157 cm이다. 퇴적물은 대체로 회색으로 괴상의 사질 펄로 구성되어 있으며 간혹 암편이 산재한다. 다른 시추심(Core S-19)은 맥스웰 만 내부 수심 110 m 해역(위도 62° 12' 78.80" S; 경도 58° 46' 57.00" W)에서 채취하였으며 퇴적물의 길이는 250 cm이다. 퇴적물은 대체로 회색으로 사질 펄로 구성되어 있으며 간혹 암편과 패각편이 포함된다(Yoon *et al.*, 1993).

퇴적물의 지화학적 특성을 분석하기 위하여 시추 퇴적물 내에서 5 cm 간격으로 시료를 채취하여 동결 건조시켜 잘게 부수었다. 그후 8% H₂SO₄로 시료내의

탄산염(CaCO₃)을 제거하고 유기탄소(TOC, Total Organic Carbon)를 측정하였으며, 이때 제거된 CaCO₃의 양을 탄산염 함량으로 계산하였다. 유기탄소의 측정에는 원소분석기(Elemental Analyser)를 사용하였다.

퇴적물의 연대를 측정하고 퇴적율을 계산하기 위하여 시추심 S-2에서 4개, 시추심 S-19에서 5개 등 총 9개 시료를 선택하여 각 시료로부터 우세한 유공충 종인 *Globocassidulina bionia*를 100마리 이상 추출하거나 염기성 용매로 퇴적물 시료를 용해시킨 후 그 잔류물을 측정하였다. 이들은 미국 국립 리버모어 연구소(Lawrence Livermore National Lab.)의 가속질량분석기(AMS: Accelerator Mass Spectrometer)를 이용하여 분석, ¹⁴C 연대를 측정하였다.

해수의 온도변화와 연구지역의 기후변화를 파악하기 위하여 유공충의 각을 구성하고 있는 탄산염의 산소 및 탄소 동위원소비를 분석하였다. 이를 위하여 각 시추심 공히 10 cm 간격으로 시료를 채취하였으며, 전 시료에서 가장 우세하게 산출되는 저서성 석회질 유공충인 *Globocassidulina bionia*를 선택하여 산소 및 탄소 동위원소 성분비를 분석하였다. 동위원소 분석은 Shackleton and Opdyke(1973)에 의거, 기초과학지원센터의 VG Isotech사의 PRISM II을 이용하여 Park and Lee(1994)의 방법에 따라 실시하였으며, 이때 분석 값의 정밀도는 ±2%이다. 측정 값들은 Craig(1957)의 방법에 따라 ¹⁸O에 의한 동위원소 간

Table 2. Records for each sample of Core S-19 from Maxwell Bay include sample depth (cmbsf) total organic carbon (TOC), calcium carbonate (CaCO₃), ¹⁴C-dated age, δ¹⁸O and δ¹³C values in benthic foraminifera, *G. bitora*, and number of foraminiferal specimens per gram (specimens/gr).

Depth (cmbsf)	TOC (%)	CaCO ₃ (%)	¹⁴ C-age (yr)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ¹³ C (‰)	specimens/gr
0	0.2689	0.0304				
3.5				5.3	-1.7	0.53
5	0.2207	0.1152				
10	0.2643	0.1299				
15	0.2880	0.1125		3.0	-3.0	1.16
20	0.2836	0.1036	2408			
25	0.2897	0.0977				
26.5				4.1	-2.3	0.63
30	0.2780	0.1168				
35	0.2749	0.1229				
35.5						0.42
40	0.2966	0.0846				
44				4.7	-1.2	2.96
45	0.3008	0.0959				
50	0.3556	0.0663				
55	0.3177	0.0881				0.22
60	0.2878	0.0884				
64						0.06
65	0.2301	0.0737				
70	0.3243	0.0983				
75	0.2905	0.1066				
80	0.2898	0.0824				
84						5.27
85	0.3046	0.0901	3405			
90	0.2975	0.0823				
95	0.2744	0.0761		5.3	-0.8	1.63
100	0.2378	0.0766				
105	0.2635	0.0771		4.9	-1.9	1.38
110	0.2598	0.0589				
114				5.3	-1.7	0.26
115	0.1591	0.0831				
120	0.2047	0.0400				
125	0.1244	0.1414		5.2	-1.0	
130	0.1342	0.1241				
134						0.80
135	0.0768	0.1792				
140	0.0849	0.1630	4616			
144				4.8	-1.4	0.63
145	0.0873	0.1024				
150	0.0779	0.1405				
154				5.6	-1.0	0.50
155	0.0706	0.1692				
160	0.0650	0.1966				
164.5	0.0744	0.1804		4.6	-1.7	0.47
165	0.0744	0.1804				
170	0.0726	0.2014				
175	0.0660	0.1879		4.9	-1.3	0.44
180	0.0593	0.2041				
185	0.0568	0.2204				
187.5				5.8	-1.1	0.37
190	0.0659	0.3923	6145			
194				5.7	-1.2	0.54
195	0.0502	0.1837				
200	0.0476	0.1222				

Table 2. Continued

Depth (cmbsf)	TOC (%)	CaCO ₃ (%)	¹⁴ C-age (yr)	δ ¹⁸ O (‰)	δ ¹³ C (‰)	specimens/gr
205	0.4410	0.1002	7559	6.2	-1.2	0.17
210	0.0459	0.1192		6.2	-1.5	0.31
215	0.0870	0.0975		6.2	-2.0	0.54
215.5				6.2	-2.0	0.54
220	0.0700	0.1204		6.2	-2.6	0.43
224				6.2	-2.6	0.43
225	0.0646	0.1189		6.2	-	-
230	0.0751	0.1054		6.2	-	-
234.5				6.2	-	-
235	0.0679	0.1393		6.2	-	-
Average	0.1756	0.1263	-	-	-	0.90

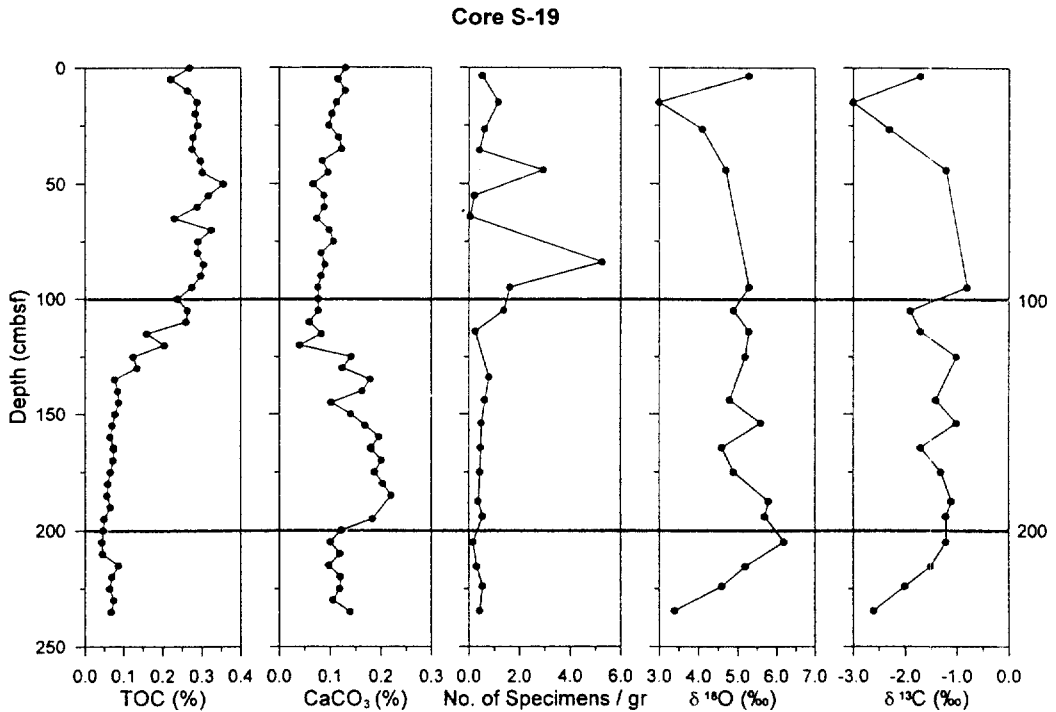


Fig. 3. Downcore variations in total organic carbon (TOC), calcium carbonate (CaCO₃), number of foraminiferal specimens per gram, δ¹⁸O and δ¹³C values in benthic foraminifera, *G. bitor*, from Core S-19 from Maxwell Bay.

섭효과를 보정하였다.

결과 및 토의

1. 유기탄소 및 탄산염 함량

유기탄소(TOC) 함량은 에드미럴티 만과 멕스웰 만 공히 하부층에서 상부층으로 갈수록 증가하고 있

다. 시추심 S-2 시료에서는 최소 0.05%에서 최대 0.35%이며 평균 0.17%이다(Table 1). 최하부 140 cm에서 110 cm까지는 증가하고, 110 cm에서 70 cm까지는 변화가 없다가 70 cm에서 60 cm 사이에서 급속히 증가하며 60 cm 상부에서는 증가-감소가 반복되나 대체로 하부층에 비해 증가하고 최상부층에서 최대 값을 보여주고 있다(Fig. 2). 시추심 S-19 시료에서는

최소 0.05%에서 최대 0.36%이며 평균 0.18%이다 (Table 2). 최하부 235 cm 에서 215 cm까지는 변화가 없으나 그 위의 200 cm에서 약간 감소되고 130 cm까지는 완만히 증가한다. 130 cm에서 90 cm까지는 비교적 급속히 증가하고 다시 90 cm에서 최상부층까지는 증가-감소의 기복이 있으나 뚜렷한 변화는 없고 최상부층에 가까울수록 감소되는 경향을 보인다 (Fig. 3).

본 연구에서 측정된 유기탄소 값은 Domack and Scott(1993)이 에드미럴티 만의 표층퇴적물에서 측정된 값 0.1-0.4%에 비해 낮은 값을 보여주고 있다. 일반적으로 현생퇴적물에 함유되어 있는 유기탄소 값은 해수중에 함유되어 있는 유기탄소의 수직 플럭스 (vertical flux) 양과 비례하고, 육성기원 퇴적물의 공급량과 해저 퇴적물의 재동작용의 크기 그리고 용빙수의 양과는 반비례한다. 그런데 본 연구에서 분석한 시추 시료의 퇴적물은 하부층에서 상부층으로 갈수록 증가하거나 일정한 비율을 유지하는데 비해 유기탄소 값이 전체적으로 보아 증가하는 것은 본 연구 해역에서 생산력의 증가와 유기기원 탄소 공급의 증가에 따라 수직 플럭스가 증가된 결과로 해석된다.

탄산염 함량은 본 연구에서 분석한 전 시료에서 1% 이하이다. 시추심 S-2 시료에서는 최소 0.23%에서 최대 0.71%이며 평균 0.38%이다 (Table 1). 최하부층 140~135 cm에서 최대값을 보여주며 65 cm까지는 감소하고 그 상부층으로 갈수록 다시 증가한 후 최상부층에서 다시 감소하여 최저값에 가까워 진다 (Fig. 2). 시추심 S-19 시료에서는 최소 0.03%에서 최대 0.39%이며 평균 0.13%이다 (Table 2). 최하부층 235 cm에서 195 cm까지는 대체로 일정하나 그 상부층에서 급속히 증가하여 190 cm에서 최대값을 보인 후 120 cm까지 서서히 감소하여 최소값을 보인다. 그 상부층에서는 큰 변화는 없으나 완만히 증가한다 (Fig. 3). 본 연구지역에서 탄산염 함량이 1% 이하로 매우 낮은 것은 남극 해수의 낮은 온도와 킹 조지 섬 주변으로부터 유빙의 유입으로 해수의 온도가 매우 낮아져 탄산염의 용해작용이 지속적으로 작용한 결과로 해석된다.

2. 유공충

유공충에 관한 연구는 유공충의 각을 구성하고 있는 탄산염의 산소 및 탄소 동위원소 분석과 ^{14}C 연대 측정을 위하여 시추 시료에서 유공충을 분리 감별하

는 범위로 한정하였다. 시추심 S-2 시료에서는 총 27종의 유공충이 감별되었으며 그중 1종의 부유성 종을 제외하고는 모두 저서성 유공충이다. 시추심 S-2의 전 층에서 비교적 널리 산출되는 저서성 석회질 (clacareous) 유공충으로는 *Globocassidurina biora*, *Cassidurinoides parkeriana*, *Stainforthia fusiformis*이고, 사질 (arenaceous) 종으로는 *Miliammina arenacea*, *Trochammina antarctica*가 산출된다. 부유성 유공충 종으로는 *Globigerina bulloides*가 소량 산출된다 (Table 3). 한 시료에서 산출되는 종은 Table 3에서 보는 바와 같이 최소 3종에서 최대 12종이며, 시료 1 gr당 유공충의 개체수는 평균 5.4개체이다. 시추심 S-2에서 1 gr 당 유공충 개체수는 최하부 140 cm에서 110 cm까지 증가한 후 70 cm까지는 대체로 높은 값을 보이며 다시 상부층으로 갈수록 대체로 감소한다 (Fig. 2).

시추심 S-19 시료에서는 총 10종이 감별되었으며 모두가 저서성 유공충이다. 시추심 S-19에서 비교적 우세하게 산출되는 석회질 종으로는 *G. biora*, *C. parkeriana*이고, 사질 종으로는 *T. antarctica*, *M. arenacea*가 산출된다 (Table 3). 한 시료에서 감별되는 종은 1종에서 최대 5종이고 평균 0.9종이다. 시료 1 gr 당 유공충 개체수는 최하부 240 cm에서 110 cm까지는 1개체 미만으로 유사한 값을 보여주며 그 상부층에서는 증가-감소가 반복되나 전체적으로는 상부층에서 증가된 값을 보인다 (Fig. 3)

3. 퇴적율

저서성 석회질 유공충 *G. biora*를 이용한 ^{14}C 연대 측정결과는 Table 4에서 보는 바와 같다.

시추심 S-2의 최하부층의 연대는 깊이 128 cm에서 $3,100 \pm 60$ yr B.P. 이고 시추심 S-19의 최하부층의 연대는 깊이 230 cm에서 $7,460 \pm 70$ yr B.P.이다. 시추심 S-2의 퇴적율은 Fig. 4에서 보는 회기방정식으로 표시할 수 있다. 시추심 S-2의 퇴적율은 최하부 128 cm에서 118 cm까지는 36 cm/kyr 이고 그 상부층 78 cm까지는 111 cm/kyr 이며, 상부층에서는 237 cm/kyr 이다. 전체적으로 하부층에서 상부층으로 올라 갈수록 퇴적율이 증가하고 있다. 시추심 S-19의 연대는 깊이 230 cm에서 $7,460 \pm 70$ yr B.P.이다. 시추심 S-19의 퇴적율은 최하부 230 cm에서 140 cm까지는 39 cm/kyr 이고, 그 상부층 85 cm까지는 24 cm/kyr 이며 다시 그 상부층에서는 232 cm/kyr 이다.

Table 3. Continued

Core	S-19											
	2-5	14-16	25-28	34-37	43-45	54-56	63-65	83-85	94-96	104-106	113-115	133-135
Depth in core (cmbsf)	18.76	20.73	20.62	16.74	19.6	22.84	17.42	19.92	26.94	28.27	22.96	24.82
Sample weight (gr)	18.76	20.73	20.62	16.74	19.6	22.84	17.42	19.92	26.94	28.27	22.96	24.82
No. of species	4	4	3	3	4	2	1	4	4	5	1	1
No. of specimens	10	24	13	7	58	5	1	105	44	39	6	2
Extrapolated no. of specimens per 70 gr	37	81	44	29	207	15	4	369	114	97	18	6
No. of specimens per 1 gr	0.53	1.16	0.63	0.42	2.96	0.22	0.06	5.27	1.63	1.38	0.26	0.08
<i>Astronion echolsi</i>												
<i>Cassidulinoides parkerina</i>	1		1	1				3	4			
<i>Cibicides refulgens</i>	1											
<i>Elphidium incertum</i>					1							
<i>Globocassidulina biora</i>	6	10	6	3	47	1	1	90	33	6	6	2
<i>Miliammina arenacea</i>	2	12	6	3	8	4		10	3	18		
<i>Portatrochammina eltaninae</i>										1		
<i>Reophax ovicula</i>		1										
<i>Spiroplectammina biformis</i>										1		
<i>Trochammina antarctica</i>		1			2			2	4	13		

Core	S-19										Average
	143-146	153-155	163-166	174-176	185-190	193-195	204-206	214-216	223-225	233-236	
Depth in core (cmbsf)	143-146	153-155	163-166	174-176	185-190	193-195	204-206	214-216	223-225	233-236	
Sample weight (gr)	35	45.77	44.57	45.36	50.69	44.72	63.54	45.05	49.77	49.17	
No. of species	4	3	2	2	1	2	2	2	1	2	2.64
No. of specimens	22	23	21	20	19	24	11	14	27	21	
Extrapolated no. of specimens per 70 gr	44	35	33	31	26	38	12	22	38	30	60.45
No. of specimens per 1 gr	0.63	0.50	0.47	0.44	0.37	0.54	0.17	0.31	0.54	0.43	0.86
<i>Astronion echolsi</i>	1										
<i>Cassidulinoides parkerina</i>	1	1	1								
<i>Cibicides refulgens</i>								1			
<i>Elphidium incertum</i>										1	
<i>Globocassidulina biora</i>	17	20	20	17	19	23	10	13	27	20	
<i>Miliammina arenacea</i>	3	2		3		1					
<i>Portatrochammina eltaninae</i>											
<i>Reophax ovicula</i>											
<i>Spiroplectammina biformis</i>											
<i>Trochammina antarctica</i>											

Domack and Scott(1993)에 의하면, 에드미럴티 만 지역에서의 퇴적율은 평균 31 cm/kyr이고 그 범위는 23~52 cm/kyr로써, 본 연구에서 사용한 시추 퇴적물의 하부에서의 퇴적율과 유사하나 상부층의 퇴적율 보다는 낮은 값이다. Kim(1989)에 의하면, 맥스웰 만 입구에서 채취한 표층 퇴적물에서 방사성 핵종 함량 측정방법에 의해 측정된 퇴적율은 170 cm/kyr로써 본 연구 결과와 대체로 유사하다. 그 외에 브랜스필드 해협에서는 260~270 cm/kyr로 보고된 바 있고 (Suess *et al.*, 1985; Venkatesan and Kaplan, 1987),

Gerlache 해협에서는 1~8 cm/kyr로 보고된 바 있다 (Harden *et al.*, 1992).

시추심 S-19의 깊이 85 cm 상부층의 퇴적율은 232 cm/kyr로 시추심 S-2 상부 퇴적층의 퇴적율 237cm/kyr과 유사하다. 따라서 두 시추심의 퇴적율은 하부에서 상부로 갈수록 증가하고 있다. 또한 시추심 S-2의 연대(3,100 yr B.P.)가 대체로 시추심 S-19(7,460 yr B.P.) 상부에 해당되는 것으로 보아 이 지역에서의 퇴적율은 퇴적층의 연대가 젊어질수록 증가한다고 할 수 있다. 이러한 퇴적율의 증가는 퇴적분지에 퇴

Table 4. The AMS ^{14}C -ages dated on benthic foraminifera, *G. biora*, and base-extracted residues. Depth are given in centimeters below sea floor (cmbsf).

Core S-2			Core S-10		
Depth (cmbsf)	^{14}C -age (yr)	Remarks	Depth (cmbsf)	^{14}C -age (yr)	Remarks
7	2,160±60	Foraminifera	20	2,580±60	Base-extracted Residue
78	2,460±50	"	85	2,860±60	"
118	2,820±50	"	140	5,150±80	"
128	3,100±60	"	190	6,130±120	"
			230	7,460±70	"

적물의 공급이 증가함을 의미하며, 이는 기온의 상승으로 빙하와 빙봉들이 용해되어 퇴적물의 공급이 증가되었기 때문이라 할 수 있다.

본 연구에서 시추심 S-2의 깊이 7 cm에서 연령이 2,160 yr B.P. 이나 시추심 S-19 퇴적물의 경우에는 깊이 20 cm에서 2,580 yr B.P.로 나타난 것으로 보아 이 지역의 표층퇴적물의 상당부분이 손실되었다고 할 수 있다. 즉, 시추시 해저 표층퇴적물의 상당부분이 손실되었거나 혹은 저서동물의 생물교란작용으로 퇴적물들이 혼합된 결과로 해석된다.

일반적으로 퇴적물의 퇴적율과 저서성 유공충의 함량은 밀접한 관계가 있다. 즉, 퇴적율이 증가하면 회석작용에 의해 퇴적물내 유공충의 함량이 감소하고 단위 gr 당 개체수도 감소하게 된다. 이러한 현상은 시추공 S-2에서 뚜렷하게 나타나 퇴적층 하부에서 상부로 갈수록 퇴적율이 증가하는 반면 퇴적물내 단위 gr 당 유공충 개체수가 감소한다. 그러나 시추심 S-19의 퇴적율은 비교적 일정하거나 혹은 상부에서 증가하는데 유공충의 개체수도 증가하고 있다. 이는 유공충의 번식에 유리한 해양환경이 조성되었음을, 즉 해수 온도가 상승되었음을 의미한다. 따라서 퇴적물의 퇴적율과 유공충의 함량변화를 종합해 볼 때, 퇴적층의 상부가 퇴적될 당시에는 해수의 온도가 상승하였다고 할 수 있다.

4. 산소 및 탄소 동위원소 비

산소 및 탄소 동위원소 비의 분석에 이용한 유공충 *G. biora*는 Crespin(1960)이 남극에서 처음 기재한 후 로스 해(Ross Sea)와 브랜스필드 해협 등에서 보고되는 종이다(Fillon, 1974; Kellogg and Thuesdale, 1979a; 1979b; Osterman and Kellogg, 1979; Milam and Anderson, 1981; Finger and Lipps, 1981; Nomura, 1983). 이 종은 대체로 해양의 저층수 온도가 -1.4°C 내지 2°C 되는 환경에서 산출된다(Fingger

and Lipps, 1981).

일반적으로 유공충중 저서성 유공충은 사후 그 자리에 퇴적되는 특성을 갖고 있어 유공충 각의 안정 동위원소비의 값은 지구규모의 대륙빙하의 부피 변화를 반영하는 반면, 부유성 유공충은 해수의 이동에 따라 운반 이동하는 특성을 갖고 있어서 각의 안정 동위원소비는 지구규모 변화뿐만 아니라 지역해수의 국지적 변화, 즉 빙봉이나 빙산에 의한 유빙수의 영향을 반영하고 있다(Mackensen *et al.*, 1989). 따라서 본 연구에 이용한 저서성 유공충의 산소 및 탄소 동위원소비의 값은 지구규모의 변화, 즉 지구규모의 기후변화의 영향을 반영하고 있다고 할 수 있다.

시추심 S-2에 함유되어있는 유공충 *G. biora*의 산소 및 탄소 동위원소비의 변화는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. $\delta^{18}\text{O}$ 값은 0.3%에서 4.9% 범위 내에서 변화한다. 최하부인 깊이 140 cm에서 $\delta^{18}\text{O}$ 값 4.9%이 깊이 110 cm에서 3.3%까지 감소한 후 그 상부층에서 갑자기 증가하여 4.2%가 된다. 그 후 깊이 70 cm까지는 감소하여 0.3%에 이른다. 깊이 70 cm 상부층에서는 2.5%로 증가한 후 상부로 올라갈수록 점진적으로 감소한다. 따라서 최하부층인 깊이 140 cm, 깊이 110 cm와 60 cm을 기점으로 상부로 갈수록 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 3단계에 걸쳐 감소하고 있다. $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -1.6%에서 0.0%의 범위에서 변화하며 최하부인 깊이 140 cm에서 -0.7% 내지 -0.8%이 깊이 110 cm에서는 -1.2%로 감소한다. 깊이 110 cm 직 상부에서 -0.6%으로 증가한 후 깊이 60 cm까지 다시 감소하며, 깊이 60 cm에서 상부로 올라가면 값은 서서히 증가하여 0.0%에 이른다.

시추심 S-19에서는 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 3.0%에서 6.2% 범위 내에서 변한다(Fig. 3). 최하부인 깊이 240 cm에서 3.4%이고 깊이 200 cm까지 상부로 갈수록 증가하여 6.2%가 된다. 깊이 200 cm에서 깊이 90 cm까지는 상부로 갈수록 소폭의 변동(감소-증가-감소-증가)을 보

이며, 깊이 90 cm 최상부까지는 비교적 큰 폭의 변동(감소-증가-감소-증가)을 보인다. 따라서 깊이 200 cm와 90 cm를 기점으로 최하부에서 깊이 200 cm까지는 급속한 증가, 깊이 200 cm에서 깊이 90 cm까지는 완만한 감소, 그리고 깊이 90 cm에서 최상부까지는 큰폭으로 변화하면서 감소-증가한다. $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -3.0%에서 -0.8%의 범위에서 변화하며 최하부에서 깊이 200 cm까지는 증가하고, 깊이 200 cm에서 깊이 90 cm까지는 소폭으로 감소-증가를 반복하나 전체적으로는 큰 변화가 없고, 깊이 90 cm에서 최상부로 갈수록 비교적 큰 폭의 변동을 보인다. 시추심 S-2의 지질연대가 시추심 S-19의 상부층에 해당되므로 산소 및 탄소 동위원소비의 변화는 본 연구지역에서 시추심 S-19의 하부층, 중부층, 그리고 시추심 S-2의 하부층, 중부층, 상부층의 5개 단계로 구분된다.

유공충 각을 구성하는 탄산염의 산소 및 탄소 동위원소비를 분석하기 위하여는 20 μg 내지 60 μg 의 시료가 필요하며, 이는 유공충의 크기에 따라 다르나 대체로 5~30마리에 해당된다. 동위원소 분석시 이같이 소량의 탄산염을 분석하게 되므로 분석시료의 선택, 유공충의 선별 및 분석결과의 해석시에 고려해야 할 많은 요인이 있다. 그 주요 요인으로는; 1) 유공충 종간의 차이와 동일종 내에서도 개체간의 차이, 2) 생리적 효과(vital effect), 3) 크기에 따른 차이, 4) 종간의 차이, 5) 고퇴적환경의 복잡성, 6) 공극수의 영향, 7) 시료의 생물교란 영향, 8) 대기내 동위원소 비율의 차이, 9) 시료 채취시의 과오, 10) 측정시의 오차 등이다. 따라서 유공충의 산소 및 탄소 동위원소비를 연구하기 위하여는 시료의 채취에서부터 유공충의 분리, 유공충의 선별 및 동위원소 값의 측정단계에 이르기 까지 세심한 주의가 요구된다(D'Hondt and Zachos, 1993; Duplessy et al., 1993).

일반적으로 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 증-감은 해수의 수온변화를 반영하며, $\delta^{18}\text{O}$ 값의 감소는 해수의 온도가 상승한 결과이고 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 증가는 온도가 낮아진 결과이다. 그러나 유공충의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 세계 해수의 평균 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 지역해수의 온도, 그리고 지역해의 증발-강수량의 영향을 받고 있으므로 지구규모 기온변화와 연결시켜 검토하여야 한다. 또한 대기중의 CO_2 함량이 증가하면 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 감소하나, $\delta^{18}\text{O}$ 값은 대기중의 산소 동위원소들의 분별작용의 결과로 형성되므로 대기 기온 상승시기와 간빙기때의 융빙 시기와는 항상 차이가 있다. 즉, 대기중의 CO_2 함량 증가 시점과 대륙

빙하가 감소하는 간빙기가 시작되는 시기와는 약 4,000~7,000년의 차이가 있다고 한다(Sower et al., 1991).

남극환경에서 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 지구규모의 해양 생산력이 변하거나 저층수의 분포형태에 따라 영향을 받는다(Curry et al., 1988; Duplessy et al., 1988; Samthein et al., 1988). 일반적으로 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 간빙기에 증가하고 빙하가 전진했을때 감소한다. 또한 해양에서 일차 생산력이 증가하여 유기탄소의 퇴적율이 높아지면 부유성 유공충의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 증가하고 저서성 유공충의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 감소한다. 이는 대기와 평형을 이루어 산소가 풍부한 표층수가 심층에 도달하게 되면, 용존산소는 침강하는 유기물의 산화를 촉진시켜 그 결과 가벼운 동위원소인 ^{12}C 가 심층수에 추가하게 되어 결국 심층수에는 무거운 $\delta^{13}\text{C}$ 동위원소는 상대적으로 감소되는 결과가 되기 때문이다.

시추심 S-2와 S-19 시료중의 유공충의 탄산염을 분석한 산소 및 탄소 동위원소비의 증-감 현상은 위에서 언급한대로 기온이 상승하여 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 감소하면 $\delta^{13}\text{C}$ 값도 감소하고, 반면에 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 증가하면 $\delta^{13}\text{C}$ 값도 증가하는 저서성 유공충의 일반적인 경향을 잘 반영하고 있다.

Grobe et al.(1990)은 웨델 해(Weddell Sea)에서 저서성 유공충 *Epistominella exigua*의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 변화는 최후 빙기와 홀로세 말기의 간빙기 사이에 0.9%의 차이가 있다고 보고하였다. 본 연구에서의 시추심 S-2에서 최대값과 최소값의 차이는 1.6%이고 시추심 S-19의 최대값과 최소값의 차이는 2.2%이다. 이는 본 연구에서 분석한 퇴적물이 퇴적되는 기간에도 지구규모의 기온변화가 있었음을 시사한다.

5. ^{14}C 연대측정

시추심 S-2와 S-19의 ^{14}C 연대측정 결과는 Table 4에서 보는 바와 같다. 시추심 S-2의 깊이 128 cm에서 $3,100 \pm 60$ yr B.P., 깊이 118 cm에서 $2,820 \pm 50$ yr B.P., 깊이 78 cm에서 $2,460 \pm 50$ yr B.P. 및 깊이 7 cm에서 $2,160 \pm 50$ yr B.P.의 값이 측정되었다. 시추심 S-19에서는 깊이 230 cm에서 $7,460 \pm 70$ yr B.P., 깊이 190 cm에서 $6,130 \pm 120$ yr B.P., 깊이 140 cm에서 $5,150 \pm 80$ yr B.P., 깊이 85 cm에서 $2,860 \pm 60$ yr B.P., 깊이 20 cm에서 $2,580 \pm 60$ yr B.P.의 값이 측정되었다.

해양환경하에서 유기기원으로 형성된 탄산염을

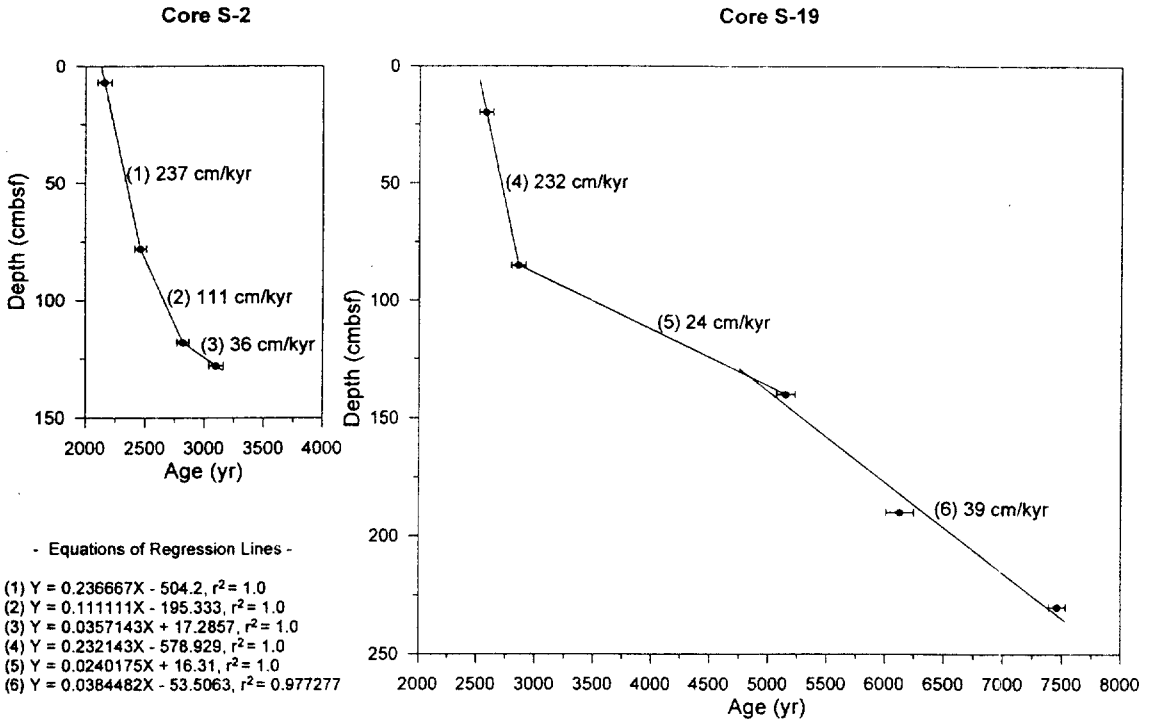


Fig. 4. ¹⁴C age versus depth profiles for Cores S-2 from Admiralty Bay and S-19 from Maxwell Bay. Curves are based on ¹⁴C-dates in Table 4. Dots indicate the dated sediment depth(cmbsf)

이용하여 측정된 ¹⁴C 연령은 나무테를 이용하여 설정한 세계 평균값과는 차이가 있다. 이는 대기와 해양 사이에 평형을 이루는데 상당한 시간이 필요하기 때문이며, 또한 복잡한 해양환경하에서 다른 요인에 의해 ¹⁴C 값이 영향을 받을 수 있기 때문이다. 따라서 해양의 평균 보정공식을 도출하는데 많은 어려움이 있으며, 또한 연구해역마다 해수의 수직 및 수평운동이 다르고 생산력도 달라 평균 보정공식을 적용하기가 어렵다. 특히 남극 주변해역은 강한 남극순환류의 영향으로 다른 해수와 혼화작용이 원활히 이루어지기 어렵다. 또한 용빙수의 공급으로 해양의 특성이 특이하며, 더구나 본 연구지역은 육지에 인접한 환경이므로 더욱 그러하다. 따라서 본 연구에서는 시료에서 측정된 ¹⁴C 연령값을 보정하지 않은 원시값을 그대로 사용하였다.

6. 기후변화의 시기

시추심 S-2의 δ¹⁸O, δ¹³C, 단위 gr 당 유기총 개체수, 유기탄소 및 탄산염 함량은 시추심의 깊이 115 cm

전후와 깊이 65 cm 전후에서 뚜렷한 변화가 있다. 연대추정 곡선에서 깊이 115 cm 전후는 2,770 yr B.P., 그리고 깊이 65 cm 전후는 2,380 yr B.P. 이다(Figs. 4 and 5). 시추심 S-19에서는 이들 값들이 깊이 200 cm 전후와 100 cm 전후에서 변화가 나타난다. 깊이 200 cm 전후는 연대추정곡선에서 약 6,500 yr B.P. 이고, 깊이 100 cm 전후는 약 3,600 yr B.P. 이다(Figs. 4 and 5). 따라서 변화의 시기는 두 시추 퇴적물에서는 6,500 yr B.P., 3,600 yr B.P., 2,770 yr B.P. 와 2,380 yr B.P.이며, 이를 시기적으로 구분하면; (1) 7,500~6,500 yr B.P., (2) 6,500~3,600 yr B.P., (3) 3,600~2,770 yr B.P., (4) 2,770~2,380 yr B.P., (5) 2,380~2,100 yr B.P. 이다.

본 연구에서 이용된 시추퇴적물의 최하부층의 연령은 약 8,000 yr B.P.로 추정된다. δ¹⁸O 값에 의하면 6,500 yr B.P. 이전은 비교적 해수의 온도가 높은 시기가 있었으며 어느 시점에서부터 6,500 yr B.P.까지는 해수의 온도가 하강하는 시기였던 것으로 해석된다. Fairbanks(1989)에 의하면 지구규모의 용빙은 13,

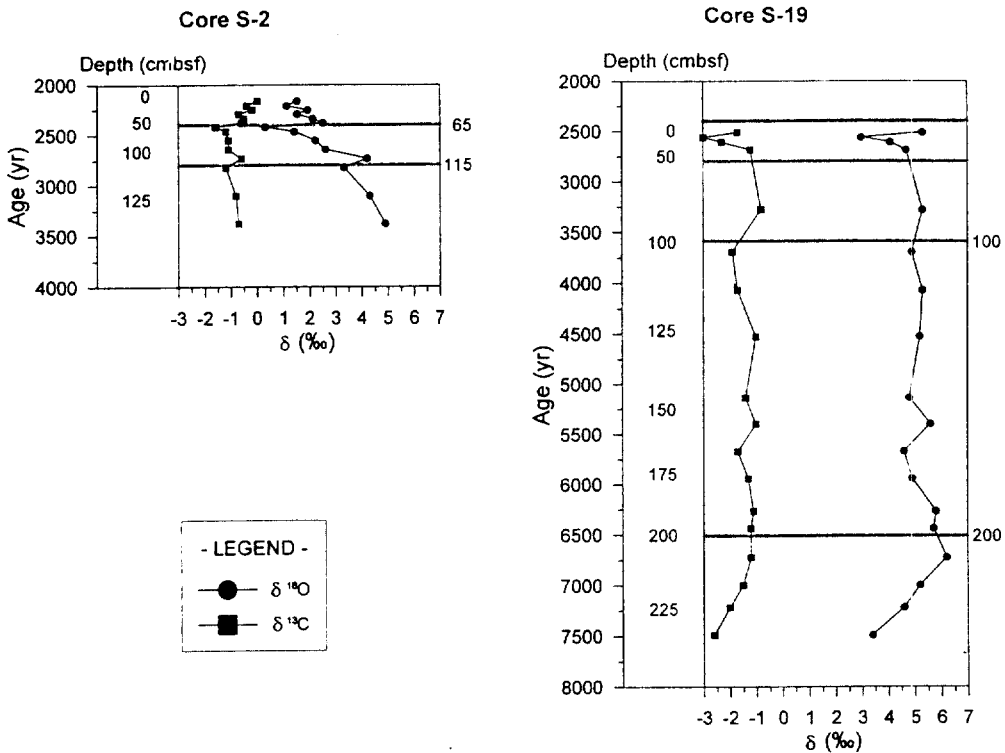


Fig. 5. Downcore variation of $\delta^{13}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values in benthic foraminifera, *G. bitor*, versus ages of Cores S-2 from Admiralty Bay and S-19 from Maxwell Bay. Ages are calculated using equations of regression lines of Fig. 4.

000 yr B.P., 11,000 yr B.P., 10,000 yr B.P.와 7,000 yr B.P.에 있었으며 이때에 해수면의 상승이 있었다. 또한 Dawson(1992)에 의하면 미국 허드슨 만 (Hudson Bay) 부근의 로렌타이드 빙상(Laurentide Ice Sheet)이 8,000 yr B.P.에 최대의 융빙이 있었다. 남극반도의 남 셰틀랜드 열도와 킹 조지 섬 지역에서는 10,000 yr B.P. 에서 9,500 yr B.P. 사이에 간빙기가 시작되었다는 보고가 있다(John, 1972; Clapperton and Sugden, 1980, 1982; Sugden and Clapperton, 1986). Payne *et al.*(1989)에 의하면 남극반도 주변의 빙하는 14,000 yr B.P.부터 감소되기 시작하여 10,000 yr B.P. 이후는 급격히 감소되었으며 비교적 안정된 상태에 달한 것은 6,500 yr B.P.이다. 또한 보스톡(Vostok)의 시추빙하를 분석한 결과에 따르면, 9,900 yr B.P.와 5,000 yr B.P. 때 기온이 가장 높았었다(Jouzel *et al.*, 1987). 따라서 본 연구에서 기온 변화가 있었던 6,500 yr B.P. 이전에는 비교적 기온이 높았던 시점에서 점차 하강하는 시기에 해당된다고 할 수 있다. 6,500 yr B.P.에서 3,600 yr B.P. 기간에는

해수의 온도가 상승-하강-상승-하강되었으나, 대체로 균일한 온도를 유지한 평온한 시기였다고 할 수 있다. 3,600 yr B.P.에서 2,800 yr B.P. 기간에는 온도가 상승하였으며 그후 2,800 yr B.P. 에서 2,400 yr B.P. 기간에는 기온이 급격히 상승하여 최고에 달하였다. 그후 2,400 yr B.P. 이후는 소규모의 상승-하강이 있었으나 그전 보다는 변동폭이 낮았던 것으로 보인다.

Björck *et al.*(1991b)은 리빙스톤 섬(Livingstone Island)의 호수 퇴적물을 분석한 결과 4,000 yr B.P. 이후 빙하가 후퇴하였다고 보고하였으며, 3,200~2,700 yr B.P. 사이에는 퇴적물과 해조류 및 규조류 등의 분포상에 큰 변화가 있었다고 한다. Barsch and Mäusbacher(1986)에 의하면 소규모의 빙하의 전진, 즉 기온의 하강이 남 셰틀랜드 열도지역에 있으며, Clapperton *et al.*(1989)에 의하면 신빙하기가 3,000~2,000 yr B.P.에 있었다고 한다. 그린랜드 빙하 시추자료를 이용하여 홀로세 간빙기 기간의 기후변화를 연구한 결과(GRIP Members, 1993)에 의하면 간빙기 기간내에서도 여러차례의 한랭한 기후가 내

습하여 수십 내지 수백년간 지속되었으며, 또한 한 때는 현재 지구기온보다 온난한 기간도 있었다고 한다.

기온 변화에 영향을 미치는 요인들은 국지적(local), 지역적(regional), 남-북반구(hemisphere) 및 지구규모(global)의 요인들이 복합적으로 상호 영향을 미치므로 기후변화에 관한 자료를 해석할 때에는 많은 주의가 요구된다. 예를 들면, 해수의 온도변화는 빙기-간빙기의 기온변화, 대륙빙하의 증감, 해수면의 변화 등과 밀접한 관계가 있다.

7. 퇴적상

시추심 S-2는 깊이 115 cm 전후와 깊이 65 cm 전후를 기준으로 3개의 퇴적상으로 구분된다. 깊이 115 cm는 2,800 yr B.P.이고 깊이 65 cm는 2,400 yr B.P.에 해당된다. 본 연구에서는 편의상 3개의 퇴적상을 깊이에 따라 115 cm 이하는 하부층, 65~115 cm 사이를 중부층, 그리고 65 cm 이상은 상부층으로 구분하였다. 하부층에서는 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 감소하고 단위 gr 당 유공충 개체수와 유기탄소는 증가하고, 탄산염 함량은 감소한다. 중부층에서는 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 하부층에 비해 비교적 크게 감소하고, 단위 gr 당 유공충 개체수는 감소-증가 현상을 보이며, 유기탄소는 완만히 증가하고 탄산염 함량은 감소-증가-감소의 현상을 보인다. 상부층에서는 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 감소하고 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 증가하며, 단위 gr 당 유공충 개체수는 전체적으로 감소하고 유기탄소는 감소-증가가 반복되나 전체적으로는 증가한다.

시추심 S-19도 깊이 200 cm 전후와 깊이 100 cm 전후를 기준으로 3개의 퇴적상으로 구분된다. 깊이 200 cm는 6,500 yr B.P. 이고 깊이 100 cm 전후는 3,600 yr B.P.에 해당된다. 편의상 200 cm 이하는 하부층, 100~200 cm 사이를 중부층, 그리고 100 cm 이상은 상부층으로 구분하였다. 시추심 S-19의 상부층의 연령이 3,600 yr B.P. 이후 이므로 시추심 S-2는 모두 시추심 S-19의 상부층에 해당된다. 그러므로 본 연구지역의 시추 퇴적물을 지질연대를 기준으로 구분하면 시추심 S-19의 하부층, 시추심 S-19의 중부층, 시추심 S-19의 상부층, 시추심 S-2의 하부층, 시추심 S-2의 중부층, 시추심 S-2의 상부층 순으로 구분된다.

시추심 S-19의 하부층에서는 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 증가하나 단위 gr 당 유공충 개체수와 유기탄소 및

탄산염 함량은 거의 변동이 없다. 중부층에서는 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 감소-증가-감소-증가를 반복하며, 단위 gr 당 유공충 개체수는 변동이 없으나 유기탄소는 증가하고 탄산염 함량은 전체적으로는 감소한다. 상부층에서는 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 증가-감소-증가를 보이거나 전체적으로는 감소한다. 단위 gr 당 유공충 개체수는 증가-감소-증가-감소를 반복하며, 유기탄소와 탄산염 함량은 전체적으로 약간 증가한다.

결 론

1. 유기탄소 함량은 대체로 시추 퇴적물의 하부층에서 상부층으로 갈수록 증가하고, 탄산염 함량은 대체로 하부층에서 상부층으로 갈수록 감소한다. 이러한 현상은 연구해역에서의 생산력의 증가, 유기기원 탄소 공급의 증가 및 유빙의 유입으로 해수 온도가 낮아져 탄산염의 용해작용이 지속된 결과로 해석된다.

2. 유공충은 연구해역에서 총 27종이 감별되었으며, 비교적 우세하게 산출되는 종은 *Globocassidurina biora*이며, 1 gr 당 유공충 개체수는 대체로 상부층에서 증가된 값을 보인다. 이 유공충 종을 이용한 ^{14}C 연대 측정치를 기준으로 퇴적물을 계산하면, 퇴적율은 24 cm/kyr 에서 237 cm/kyr 범위이나 상부층으로 갈수록 급격히 증가한다.

3. 두 시추심에서 공히 대체로 우세하게 산출되는 유공충인 *G. biora*의 각을 구성하고 있는 탄산염 성분내 산소 및 탄소 동위원소비의 분석 결과 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 0.3%에서 6.2% 범위내에서 변하며, $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -3.0%에서 0.0% 범위내에서 변한다. 동위원소비의 변화 양상으로부터 본 연구지역의 시추 퇴적물들은 5단계로 구분된다.

4. 시추 퇴적물의 지질연대를 ^{14}C 연대측정 방법에 의해 측정한 결과, 시추심 S-2의 최하부층인 깊이 128 cm에서의 연령은 $3,100 \pm 60$ yr B.P. 이고, 시추심 S-19의 최하부층인 깊이 230 cm에서 $7,460 \pm 70$ yr B.P.이다.

5. 시추 퇴적물의 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값, 단위 gr 당 유공충 개체수, 유기탄소 및 CaCO_3 함량의 변화를 종합하여 연구지역의 해수 및 기후 변화 시기를 구분하면; (1) 온난-한랭한 7,500~6,500 yr B.P., (2) 한랭한 6,500~3,600 yr B.P., (3) 한랭-온난한 3,600~2,770 yr B.P., (4) 온난한 2,770~2,380 yr B.P., (5) 한랭-온

난한 2,380~2,100 yr B.P.의 5개 시기로 구분된다. 또한 시추 퇴적물의 퇴적상도 5개로 구분되며, 퇴적물의 깊이와 지질연대는 해수 및 기후변화 시기와 대체로 일치한다.

사 사

본 논문의 자료와 원고를 정리해준 한국해양연구소 극지연구센터의 장현도씨에게 감사드리며, 이 논문을 읽고 건설적인 의견을 주신 강원대학교 우경식 교수에게 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

- Barsch, D. and Mäusbacher, R., 1986. New data on the relief development of the South Shetland Islands, *Antarctica. Interdiscip. Sci. Rev.*, **11**(2): 211-218.
- Björck, S., Sandgren, P. and Zale, R., 1991a. Late Holocene tephrochronology of the Northern Antarctic Peninsula. *Quaternary Res.*, **36**: 322-328.
- Björck, S., Håkansson, H., Zale, R., Karlen, W. and Jönsson, L., 1991b. A late Holocene lake sediment sequence from Livingstone Island, South Shetland Islands, with paleoclimatic implications. *Antarctic Sci.*, **3**(1): 61-72.
- Burckle, L. H. and Abrams, 1987. Regional Pliocene - early Pleistocene hiatuses in the Southern Ocean - Diatom evidence. *Mar. Geol.*, **77**: 207-218.
- Choi, D. L., Nam, S. H. and Oh, J. K., 1990. Marine geology of the Maxwell Bay in King George Island by using 3.5 kHz seismic profiles. *Korean J. Polar Res.*, **1**(1): 19-26.
- Clapperton, C. M. and Sugden, D. E., 1980. Geomorphology of the St. Andrews Bay-Royal Bay area, South Georgia. *Brit. Antarctic Surv. Miscell. Map Ser.*, Sheet 1.
- Clapperton, C. M. and Sugden, D. E., 1982. Late Quaternary glacial history of George VI Sound area, West Antarctica. *Quaternary Res.*, **18**: 243-267.
- Clapperton, C. M., Sugden, D. E., Birnie, J. and Wilson, M. J., 1989. Late-glacial and Holocene glacier fluctuations and environmental change on South Georgia, Southern Ocean. *Quaternary Res.*, **31**: 210-228.
- Craig, H., 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **12**: 133-149.
- Crespin, I., 1960. Some Recent foraminifera from Vestfold Hills, Antarctica. *Science Reports, Tohoku University, 2nd Ser. (Geol.)*, Spec. Vol. No. 4, 19-31.
- Curry, W. B., Duplessy, J. -C., Labeyrie, L. D. and Shackleton, N. J., 1988. Changes in the distribution for $\delta^{13}\text{C}$ of deep water CO_2 between the late glaciation and the Holocene. *Paleoceanography*, **3**: 317-341.
- Dawson, A. G., 1992. *Ice Age Earth*. Routledge Inc., 293 p.
- D'Hondt, S. and Zachos, J. C., 1993. On stable isotopic variation and earliest Paleocene planktonic foraminifera. *Paleoceanography*, **8**(4): 527-547.
- Domack, E. W. and Scott, S., 1993. Oceanographic and physiographic controls on modern sedimentation within Antarctic fjords. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **105**: 1175-1189.
- Duplessy, J. C., Bard, E., Labeyrie, L., Duprat, J. and Moyes, J., 1993. Oxygen isotope records and salinity changes in the northeastern Atlantic Ocean during the last 18,000 years. *Paleoceanography*, **8**(3): 341-350.
- Duplessy, J. C., Shackleton, N. J., Fairbanks, R. G., Labeyrie, L. D., Oppo, D. W. and Kallel, N., 1988. Deepwater source variations during the last climatic cycle and their impact on the global deepwater circulation. *Paleoceanography*, **3**: 343-360.
- Emiliani, C., 1954. Depth habitats of some species of pelagic foraminifera as indicated by oxygen isotope ratios. *Am. J. Sci.*, **252**: 149-158.
- Fairbanks, R. G., 1989. A 17,000 year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, **342**: 637-642.
- Fillon, R. H., 1974. Late Cenozoic foraminiferal paleoecology of the Ross Sea, Antarctica. *Micropaleontology*, **20**(2): 129-151.
- Finger, K. L. and Lipps, J. H., 1981. Foraminiferal decimation and repopulation in an active volcanic caldera, Deception Island, Antarctica. *Micropaleontology*, **27**: 111-139.
- Fütterer, D. K., Grobe, H. and Grünig, S., 1988. Quaternary sediment patterns in the Weddell Sea: Relations and environmental conditions. *Paleoceanography*, **3**: 551-561.
- Greenland Ice-core Project (GRIP) Members, 1993. Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, **364**: 203-207.
- Griffith, T. W. and Anderson, J. B., 1989. Climatic control on sedimentation in bays and fjords of the northern Antarctic Peninsula. *Mar. Geol.*, **85**: 181-204.
- Grobe, H., 1986. Spätpleistozäne sedimentationsprozesse am antarktischen kontinentalhang vor Kapp Norvegia, östliche Weddell See. *Ber. Polarforschung*, **27**, 121 p.
- Grobe, H., Mackensen, A., Hubberten, H. -W., Spieß, V. and Fütterer, D. K., 1990. Stable isotope record and late Quaternary sedimentation rates at the Antarctic continental margin. In: Bleil, U. and Thiede, J. (eds), *Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*. Kluwer Academic Pub., 539-572.
- Harden, S. L., DeMaster, D. J. and Nitrouer, C. A., 1992. Developing sediment geochronologies for high-latitude continental shelf deposits: A radiochemical approach. *Mar. Geol.*, **103**: 69-97.
- Hays, J. D., Imbrie, J. and Shackleton, N. J., 1976. Vari-

- ations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, **194**: 1121-1132.
- Hobbs, G. J., 1968. The geology of the South Shetland Islands: IV. The geology of the Livingstone Island. *Brit. Antarctic Surv. Sci. Rep.* **47**: 34 pp.
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., McIntyre, A., Mix, A. C., Morley, J. J., Pisias, N. G., Prell, W. L. and Shackleton, N. J., 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record. In: Berger, A. L., Imbrie, J., Hays, J. D., Kukla, G. J. and Saitzman, B. (eds), *Milankovitch and Climate*. Reidel, Dordrecht, 269-305.
- John, B. S., 1972. Evidence from the South Shetland Islands towards a glacial history of West Antarctica. In: Sugden, D. E. and Price, R. J. (eds), *Polar Geomorphology*. Institute of British Geographers, 75-92.
- Jouzel, J., Lorius, C., Petit, J. R., Genthon, C., Barkov, N. I., Kotlyakov, V. M. and Petrov, V. M., 1987. Vostok ice core: A continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000). *Nature*, **329**: 403-408.
- Kellogg, T. B. and Thuesdale, R. S., 1979a. Ross Sea diatoms: Modern assemblage distributions and their relationship to ecology, oceanographic and sedimentary conditions-reply. *Mar. Micropaleontol.*, **4**: 401-404.
- Kellogg, T. B. and Thuesdale, R. S., 1979b. Comment and Reply on 'Quaternary extent of the West Antarctic ice sheet: New evidence from Ross Sea Cores'. *Geology*, **7**: 518-519.
- Kim, K. H., 1989. Measurement of radioactivity in sediments and estimation of sedimentation rates. In: A study on natural environment in the area around the Korean Antarctic Station, King George Island (II). Korea Ocean Research and Development Institute, BSPG 00081-246-7: 470-485.
- Kim, Y. D. and Nam, S. H., 1991. High resolution seismic survey of Maxwell Bay, King George Island: Glacial marine sedimentation and tectonics. *Korean J. Polar Res.*, **2**(1): 79-86.
- Ledbetter, M. T. and Gesielski, P. F., 1986. Post-Miocene disconformities and paleoceanography in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Palaeogeogr. Palaeoecol.*, **52**: 182-214.
- Mackensen, A., Grobe, H., Hubberten, H. -W., Spieß, V. and Fütterer, D. K., 1989. Stable isotope stratigraphy from the Antarctic continental margin during the last one million years. *Mar. Geol.*, **87**: 315-321.
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., Imbrie, J., Moore, Jr., T. C. and Shackleton, N. J., 1987. Age dating and the orbit theory of the Ice Ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-years chronostratigraphy. *Quaternary Res.*, **27**: 1-29.
- Milam, R. W. and Anderson, J. B., 1981. Distribution and ecology of recent benthonic foraminifera of the Adelle-George V continental shelf and slope, Antarctica. *Mar. Micropaleontol.*, **6**: 279-325.
- Nomura, R., 1983. Foraminifera from the raised beach deposits on the east coast of Luzow-Holm Bay, Antarctica. *Natl. Inst. Polar Res., Mem., Spec. Issue*, no. **28**: 219-228.
- Osterman, L. E. and Kellogg, T. B., 1979. Recent benthic foraminiferal distributions from the Ross Sea, Antarctica: Relations to ecologic and oceanographic conditions. *J. Foramin. Res.*, **9**: 250-269.
- Park, B. K. and Lee, K. S., 1994. Stable isotopic compositions of foraminifera of the tidal flat in the Gomsu Bay of the western coast of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **29**(2): 183-187.
- Payne, A. J., Sugden, D. E. and Clapperton, C. M., 1989. Modeling the growth and decay of the Antarctic Peninsula Ice Sheet. *Quaternary Res.*, **31**: 119-134.
- Pisias, N. G., Martinson, D. G., Moore, Jr., T. C., Shackleton, N. J., Prell, W. L., Hays, J. D. and Boden, G., 1984. High resolution stratigraphic correlation of benthic oxygen isotopic records spanning the last 300,000 years. *Mar. Geol.*, **56**: 119-136.
- Prell, W. L., Imbrie, J., Martinson, D. G., Morley, J. J., Pisias, N. G., Shackleton, N. J. and Streeter, H. F., 1986. Graphic correlation of oxygen isotope stratigraphy application to the late Quaternary. *Paleoceanography*, **1**: 137-162.
- Pudsey, C. J., Barker, P. F., Hamilton, N., 1988. Weddell Sea abyssal sediments: A record of Antarctic Bottom Water flow. *Mar. Geol.*, **81**: 289-314.
- Sarnthein, M., Winn, K., Duplessy, J. C. and Fontugne, M. R., 1988. Global variations of surface ocean productivity in low and mid latitudes: Influence on CO_2 reservoirs of the deep ocean and atmosphere during the last 21,000 years. *Paleoceanography*, **3**: 361-399.
- Schlesinger, M. E. and Ramankutty, N., 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, **367**: 723-726.
- Shackleton, N. J., 1977. The oxygen isotope stratigraphic record of the Late Pleistocene. *Phil. Trans. R. Soc. London* **280B**: 169-182.
- Shackleton, N. J. and Opdyke, N. D., 1973. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 105 and 106 year scale. *Quaternary Res.*, **3**: 39-55.
- Smellie, J. L., 1983. Syn-plutonic origin and Tertiary age for the (?) Precambrian False Bay Schists of Livingstone Island, South Shetland Island. *Brit. Antarctic Surv. Bull.*, **52**: 21-32.
- Smellie, J. L., Pankhurst, R. J., Thomson, M. R. A. and Davis R. E. S., 1984. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. *Brit. Antarctic Surv., Sci. Rep.*, **87**: 85 p.
- Sowers, T., Bender, M., Raynaud, D., Korotkevich, Y. S. and Orcharto, J., 1991. The $\delta^{18}\text{O}$ of atmospheric O_2 from air inclusions in the Vostok ice core: Timing of CO_2 and ice volume changes during the Penultimate deglaciation. *Paleoceanography*, **6**(6): 679-696.

- Stouffer, R. J., Manabe, S. and Vinnikov, K. Y., 1994. Model assessment of the role of natural variability in recent global warming. *Nature*, **367**: 634-636.
- Suess, E., Muller, P. J., Wefer, G. and Balzer, W., 1985. Quaternary sedimentation in the Bransfield Strait and Northern Weddell Sea. Unpublished manuscript.
- Sugden, D. E. and Clapperton, C. M., 1986. Glacial history of the Antarctic Peninsula and South Georgia. *S. Afr. J. Sci.*, **82**: 508-509.
- Thomas, R. H., 1979. West Antarctic Ice Sheet: Present-day thinning and Holocene retreat of the margins. *Science*, **205**: 1257-1258.
- Venkatesan, M. I. and Kaplan, I. R., 1987. The lipid geochemistry of Antarctic marine sediments, Bransfield Strait. *Mar. Chem.*, **21**: 347-375.
- Williams, D. F., Thunell, R. C., Tappa, E., Rio, D. and Raffi, I., 1988. Chronology of the Pleistocene oxygen isotope record: 0-1.88 m.y. B.P. *Palaeogeogr. Palaeoecol.*, **64**: 221-240.
- Yoon, H. I., Jang, S. G. and Han, M. W., 1989. Submarine physiography and sedimentary facies. In: A study on natural environment in the area around the Korean Antarctic station, King George Island (II). Korea Ocean Research and Development Institute, BSPG 00081-246-7: 405-442.
- Yoon, H. I., Choe, M. Y., Kang, C. Y., Yang, Y. S., Yoon, Y. J. and Park, B. K., 1993. Sedimentological properties of the sediments in Bransfield Strait and Maxwell and Admiralty Bays, Antarctica. In: The Research on Natural Environments and Resources of Antarctica. Korea Ocean Research and Development Institute, BSPN 00183-604-7: 751-790.

Accepted July 14, 1995