

남극 로스해 펜넬-이젤린 퇴 동쪽 대륙사면의 코어 RS14-GC2의 점토광물의 기원지 연구

Origin of Clay Minerals of Core RS14-GC2 in the Continental Slope to the East of the Pennell-Iselin Bank in the Ross Sea, Antarctica

하상범(Sangbeom Ha)¹ · 김부근(Boo-Keun Khim)^{1,*} ·
조현구(Hyen Goo Cho)² · 에스터 콜리자(Ester Colizza)³

¹부산대학교 해양학과

(Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 46241, Korea)

²경상대학교 지질학과

(Department of Geology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea)

³트리에스테 대학교 수학 및 지구과학과

(Department of Mathematics and Earth Sciences, University of Trieste, Italy)

요약 : 남극 로스해 펜넬-이젤린 퇴의 동쪽 대륙사면에 위치한 정점 RS14-C2에서 2014년 PNRA XXIX 탐사(Rosslope II Project) 동안 중력코어(RS14-GC2)를 획득하였다. 퇴적물의 기원지 추정을 위하여 대자율, 모래 입자 함량, 점토광물 조성을 분석하고 AMS ¹⁴C 연대를 측정하였다. 퇴적물은 주로 빙운쇄설물을 포함한 반원양성 사질 점토 또는 실트질 점토로 구성되어 있다. 코어의 최상부 연대는 현생 퇴적물과 홀로세 퇴적물을 지시한다. 방사성 탄소동위원소 연대와 퇴적물의 색, 대자율 및 모래 입자 함량을 이용하여 코어 퇴적물을 간빙기와 빙하기 퇴적물로 구분하였다. 간빙기의 갈색퇴적물은 대자율과 모래 입자 함량이 낮은 반면에 빙하기의 회색퇴적물은 대자율과 모래 입자 함량이 높다. 코어 퇴적물의 점토광물 조성은 전체적으로 일라이트(61.8~76.7%)가 가장 우세하며, 녹니석(15.7%~21.3%), 카올리나이트(3.6%~15.4%), 그리고 스�멕타이트(0.9~5.1%)의 순서로 나타나고, 간빙기와 빙하기/후빙기로 뚜렷하게 구분된다. 빙하기 동안 일라이트와 녹니석 함량이 우세한 것은 퇴적물의 기원지가 주로 로스해 빙상 하부에 위치한 남극중단산맥의 기반암을 지시하기 때문이다. 반면 빙상 후퇴에 의한 일라이트와 녹니석의 공급이 감소되어 간빙기 동안 상대적으로 스�멕타이트 함량이 약간 증가하며 카올리나이트 함량은 많이 증가한다. 더불어 간빙기 동안 로스해 서안의 빅토리아랜드 연안의 맥머도 화산군에서 북동쪽으로 흐르는 해류에 의해 스�멕타이트가 추가로 공급되며, 카올리나이트는 카올리나이트의 함량이 풍부한 퇴적암이 분포하는 에드워드 7세 반도에서 공급되고 대륙사면류에 의해 대륙사면으로 운반되었을 것으로 예상된다.

주요어 : 점토광물, 퇴적물 기원, 빙하기, 간빙기, 로스해

ABSTRACT : A gravity core (RS14-C2) was collected at site RS14-C2 in the continental slope to the east of Pennell-Iselin Bank of the Ross Sea (Antarctica) during PNRA XXIX (Rosslope II Project) Expedition. In order to trace the sediment source, magnetic susceptibility (MS), sand fraction, and clay mineral compositions were analyzed, and AMS ¹⁴C ages were dated. Core sediments consist mostly of

*Corresponding author: +82-51-510-2212, E-mail: bkkhim@pusan.ac.kr

hemipelagic sandy clay or silty clay including ice-rafted debris (IRD). AMS ^{14}C age of core-top indicates the modern and Holocene sediments. Based on AMS ^{14}C dating, sediment color, MS and sand fraction, core sediments are divided into interglacial and glacial intervals. The interglacial brown sediments are characterized by low MS and sand fraction, whereas the glacial gray sediments are characterized by high MS and sand fraction. Among clay mineral compositions of core sediments, illite is highest (61.8~76.7%), and chlorite (15.7~21.3%), kaolinite (3.6~15.4%), and smectite (0.9~5.1%) are in decreasing order, and these compositions are also divided into the interglacial and glacial/deglacial intervals. During the glacial period, the high content of illite and chlorite indicate sediment supply from the bedrocks of Transantarctic Mountains under the Ross Ice Sheet. In contrast, because of decreasing supply of illite and chlorite by the glacial retreat, smectite and kaolinite contents increased relatively during the interglacial period. During the interglacial period, smectite may be transported additionally by the northeastward flowing surface current from the coast of Victoria Land in the western Ross Sea. Kaolinite may be also supplied to the continental slope by the Antarctic Slope Current from the kaolin-rich metasedimentary rock outcropped on the Edward VII Peninsula.

Key words : clay mineral, sediment provenance, glacial, interglacial, Ross Sea

서 론

남극 대륙의 약 97%는 남극 빙상(Antarctic Ice Sheet)에 의해 덮여 있으며, 해양으로 공급되는 얼음의 주요 저장고 역할을 한다(Anderson *et al.*, 1984). 현재 남극 빙상은 1,360만 km^2 의 면적과 평균 2 km의 두께를 유지하고 있으며(Barker *et al.*, 1999), 남극중단산맥(Transantarctic Mountains)을 기준으로 서남극 빙상(WAIS)과 동남극 빙상(EAIS)으로 구분된다. 남극 빙상은 에오세-올리고세의 경계에서 형성된 이후 전 지구적으로 기후의 냉각과 함께 발달하였다(Franke and Ehrmann, 2010). 남극 빙상의 소멸은 빙산(iceberg)의 생성으로 인한 빙하 분리(calving)가 주요 원인이고 용빙수에 의한 소멸은 부차적인 원인이며 지역적으로 10~28%의 비율을 차지한다(Rignot *et al.*, 2013). 이러한 남극 빙상의 성장과 소멸은 전 지구적 해수면 변화, 대양 순환 그리고 심층수의 형성과 매우 밀접한 관계가 있을 뿐만 아니라 지구 기후를 조절하는 데 있어 가장 중요한 요인으로 작용한다(Abreu and Anderson, 1998; Barker *et al.*, 1999; Mackensen, 2004).

서남극 빙상은 해양성 빙상으로 일반적으로 기복이 심한 기반암 위에 놓여 있으며 빙상의 대부분은 해수면 아래에 잠겨 있다(Drewry, 1983). 빙상의 이동속도는 동남극 빙상보다 상대적으로 빠르며, 빙상의 이동은 대부분 빙하류(ice stream)의 형태로 나타난다(Anderson *et al.*, 2002). 동남극 빙상은 육성 빙상이며, 지역적으로 빙저 분지가 해수

면 아래에 위치하지만, 대부분은 해수면 위에 기반이 위치한다. 동남극 빙상은 고도가 최고 3200~4000 m로 서남극 빙상에 비해 높은 것이 특징이다(Drewry, 1983). 로스해(Ross Sea)에는 로스빙붕(Ross ice shelf)이 발달하고 빙붕의 북쪽으로 대륙붕이 넓게 펼쳐져 있다(Fig. 1). 로스해 대륙사면은 이젤린 퇴(Iselin Bank)를 경계로 동쪽과 서쪽으로 지형적 특징이 구분된다. 동쪽 대륙사면은 경사가 급하고 드물게 해저 협곡이 발달하는 반면, 서쪽 대륙사면은 경사는 완만하지만 많은 해저 협곡이 발달하는 복잡한 형태를 하고 있다(Davey, 1981). 로스해의 심해역 경계는 동쪽으로는 로스해 환류를 포함하는 지역까지 그리고 북쪽으로는 적어도 겨울에 형성되는 해빙의 가장자리까지로 정의된다(Budillon *et al.*, 2011). 로스해에는 웨델해 다음으로 기후변화에 중요한 역할을 하는 많은 양의 남극 저층수(Antarctic Bottom Water)가 형성된다(Budillon *et al.*, 2011).

로스 빙붕은 세계에서 가장 큰 규모이며, 빙붕의 얼음은 동남극 빙상이 로스해의 서쪽 주변부에서 분출빙하의 형태로 공급되지만(Denton and Hughes, 2002), 서남극 빙상에서 직접적인 빙하류의 형태가 가장 많은 얼음을 공급한다(Bindschadler, 1998). 로스 빙상(Ross Ice Sheet)은 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum)동안 74°S까지 성장한 뒤 현재의 위치까지 후퇴하였다(Licht *et al.*, 1996; Shipp *et al.*, 1999; Howat and Domack, 2003). 기후 변화에 따른 빙상의 성장과 후퇴는 로스해 대륙붕의 환경에 큰 영향을 끼쳤으며, 이에 따라 대

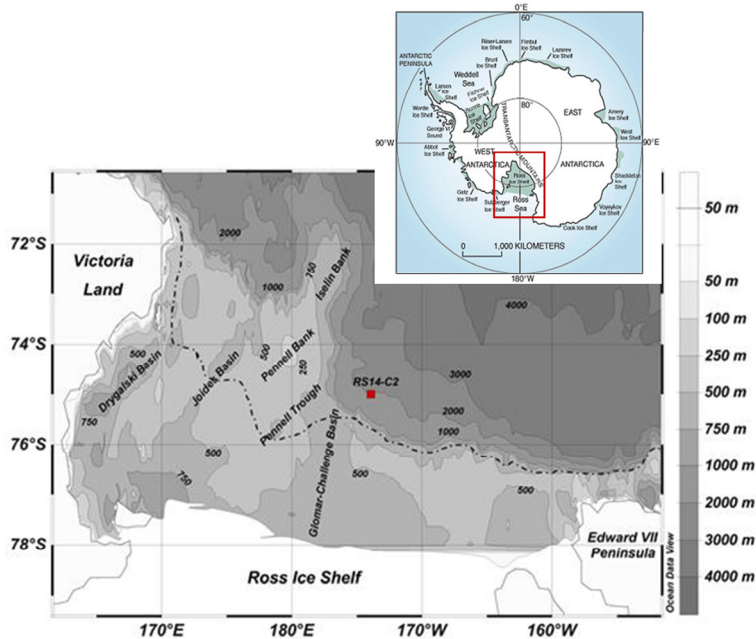


Fig. 1. Map of the Ross Sea. A gravity core (RS14-GC2) was collected from site RS14-C2 (75°00 S, 173°55 W, depth 1757 m) located in the continental slope of the Ross Sea. Dotted line indicate the LGM grounding line as determined by Shipp *et al.* (1999).

륙붕에서 발견되는 퇴적층들은 Domack *et al.* (1999)에 의해 다음과 같이 정리되었다. i) 빙저 환경(subglacial setting)을 지시하는 괴상의 다이아믹 타이트(diamictite), ii) 그라운딩 라인(grounding line)에서부터 빙상이 후퇴하기 시작할 때, 해저면에서 빙상이 떨어진 빙붕 아래의 환경을 반영하는 덜 다져진 사질-니질의 자갈로 구성된 퇴적층, iii) 그라운딩 라인의 해양쪽 퇴적환경을 지시하는 빙하-해양의 적색 이토층, iv) 기저 암석 부스러기(basal debris)의 영향을 받지 않는 빙붕 아래의 환경을 지시하는 실트질 점토층, v) 로스 빙붕의 분리 빙하가 떨어져 나오는 지점(calving front) 근처에서 빙산, 해빙 그리고 바람에 의해 운반된 쇄설물이 풍부하고 조립한 퇴적층, vi) 공해(open marine) 환경을 지시하는 규조 연니 퇴적층.

육상 환경에서 생성되어 해양으로 공급되는 점토 광물은 육지 암석의 물리적 또는 화학적인 풍화를 지시하기 때문에 점토광물 각각의 구성과 함량은 모암의 특성에 따른 기원지에 좌우된다(Chamley, 1989). 더불어 점토광물은 육상 환경의 기후 조건을 뚜렷하게 반영하므로 해양 퇴적물의 점토광물은 고기후 연구에 유용한 도구로 사용된다(Robert and

Maillot, 1990; Hambrey *et al.*, 1991; Ehrmann and Mackensen 1992; Ehrmann *et al.*, 1992). 현재의 남극 환경에서는 일반적으로 자생 기원의 점토광물의 형성이 부재하고 물리적 풍화가 우세하기 때문에(Petschick *et al.*, 1996; Fagel, 2007), 남극 대륙주변부 퇴적물의 점토광물 조성은 퇴적물의 주요 공급지와 이동경로를 추정하는 데 유용하다(Hillenbrand and Ehrmann, 2001; Hillenbrand *et al.*, 2009; Ehrmann *et al.*, 2011). 남극해 주변 해역의 일반적인 점토광물 분포는 일라이트와 녹니석이 우세하다(Ehrmann *et al.*, 1992). 지역적인 점토광물 연구에 의하면 아문젠해(Amundsen Sea)의 동쪽 대륙붕에서는 특징적으로 카올리나이트의 함량이 현재에 비해 빙하기 동안 높게 나타났다(Hillenbrand *et al.*, 2002, 2003). 이러한 차이는 아문젠해로 공급되는 퇴적물의 기원지가 현재와 빙하기에 달랐음을 지시한다(Ehrmann *et al.*, 2011). 벨링스하우젠해(Bellingshausen Sea)에서 수행된 점토광물 연구 결과에서도 빙하기 퇴적물과 현생 퇴적물의 점토광물 기원지가 서로 다른 것을 보여준다(Hillenbrand *et al.*, 2003). 로스해의 경우 주로 맥머도만(McMurdo Sound)에서 점토광물에 대한

연구 결과가 발표되었다(e.g. Ehrmann *et al.*, 2005; Giorgetti *et al.*, 2009; Frank and Ehrmann, 2010). 이 지역은 스펙타이트와 일라이트가 우세한데 일라이트는 남극중단산맥의 퇴적암과 기반암이 주요 기원지인 반면에, 스펙타이트는 맥머도 화산군이 주요 기원지로 작용한다(Frank and Ehrmann, 2010).

기후변화에 따른 로스 빙상의 발달과 후퇴와 관련된 퇴적환경 및 고환경 변화 연구들은 대부분 로스해의 대륙붕 지역에 제한되었고 대륙사면 지역의 연구는 매우 미비하다. 특히 퇴적물의 기원지를 추정하는 점토광물 자료는 로스해 대륙붕 남서쪽의 맥머도 화산군 주변부에만 제한적으로 발표되었고, 대륙붕의 다른 지역 및 대륙사면에서의 점토광물 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 이번 연구에서는 로스해의 동쪽 대륙사면에서 획득한 코어의 점토광물 조성 변화를 통해 로스 빙상의 전진과 후퇴에 의한 대륙사면의 퇴적물 특성과 기원지 변화를 복원하고자 한다.

재료 및 방법

로스해에는 빙하에 의한 침식으로 대륙붕단이 뚜렷하게 발달되었고, 대륙붕에 북-북동 방향의 긴 타원 형태로 골과 퇴가 다수 분포하며, 수심이 대륙쪽으로 향하면서 깊어지는 독특하고 복잡한 지형이 나타난다(Fig. 1; Anderson *et al.*, 1984; Langone *et al.*, 1998). 로스해 대륙붕의 평균 수심은 500 m이며, 퇴의 수심은 약 300 m이고 분지는 500 m 이상의 수심을 갖는다(Frigani *et al.*, 2003). 로스해의 대륙사면에는 남극사면류(Antarctic Slope Current)가 동쪽에서 서쪽으로 흐르며 남극사면전선(Antarctic Slope Front)이 위치한다(Jacobs, 1991; Orsi and Wiederwohl, 2009). 이 전선에서 로스환류(Ross Gyre)를 따라 흐르던 고온-고염의 순환심층수(Circumpolar Deep Water)가 대륙붕에 존재하는 저온-저염의 남극표층수(Antarctic Surface Water)와 만나서 혼합된다(Orsi *et al.*, 1995, 1999).

로스해의 펜넬(Pennell)-이젤린(Iselin) 퇴 동쪽에 위치한 대륙사면의 정점 RS14-C2 (75°00 S, 173°55W, 수심 1757 m)에서 2014년 XXIX PNRA 남극탐사(Rosslope II) 동안 중력코어(RS14-GC2, 길이 441 cm)를 채취하였다(Fig. 1). 코어 퇴적물은 빙운쇄설물(ice-rafted debris : IRD)을 간헐적으로 포함하고 있지만, 대부분 반원양성 실트질 점토로 구성되어 있다. 코어의 상부는 밝은 갈색을 띠

고 있으며 하부로 가면서 황록색 또는 회색으로 변하며, 최하부에 다시 밝은 갈색이 나타난다.

퇴적물의 대자율과 입도 측정은 이탈리아 국립 지구물리 및 화산학연구소(INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia)에서 수행되었다. 중력코어 RS14-GC2에서 Bartington사의 MS2C 대자율측정기를 이용하여 1 cm 간격으로 저자장 대자율(low-field magnetic susceptibility)을 측정하였다. 입도분석용 퇴적물 시료는 과산화수소 처리를 통해 유기물을 제거하고 2 mm 체를 사용하여 조립한 빙운쇄설물을 분리하였다. Malvern사의 Mastersizer에서 Laser를 사용하여 2 mm 이하의 입자 크기를 측정하였다. 입자 크기의 구분은 Friedman and Sanders (1978)의 기준을 이용하였고, 입도 변수는 Folk and Ward (1957)의 공식을 이용하였다.

중력코어 RS14-GC2에서 16개 퇴적물의 점토광물을 분석하였다. 12% 과산화수소수를 이용하여 퇴적물 내의 유기물을 제거한 후, 63 μm 체를 사용하여 습식체질을 통해 사질 퇴적물을 분리하였다. 남은 63 μm 이하의 입자에 확산제인 2% 칼곤(Calgon, sodium hexametaphosphate) 용액 50 mL를 넣고 증류수를 500 mL까지 채운 후, Stoke's law를 이용하여 2 μm 이하의 입자를 추출하였다. 추출된 입자는 원심분리기로 농축시킨 후, Stokke and Carson (1973)의 방법을 따라 슬라이드 글라스 위에 얇게 도포하는 방법인 "smear on slide" 방식으로 방향성 시료를 제작한 뒤 대기 중에서 자연건조하였다. 건조된 슬라이드와 더불어 60°C에서 24시간 동안 에틸렌글리콜(Ethylene glycol) 처리된 슬라이드를 경상대학교의 X-선 회절분석기(Siemens/Brucker D5005)를 이용하여 분석한 후 점토광물을 동정하고 반정량적 함량을 측정하였다. X-선 회절분석은 후연 단색화된 파장(CuK α = 1.5406 Å)을 사용하여 35 mA, 40 kV 조건 아래에서 발산슬릿은 1.0°, 수광슬릿은 0.6°로 3~30° 2 θ 범위를 분석하였다.

점토광물의 동정은 자연건조 슬라이드와 에틸렌글리콜 처리된 슬라이드의 X-선 회절분석도 상에서 17 Å의 피크를 스펙타이트, 10 Å의 피크를 일라이트 그리고 7 Å의 피크를 녹니석+카올리나이트로 확인하고 각각의 면적을 구하였다. 피크의 면적은 바탕선(base line) 상에서 피크의 양 끝 지점을 이어서 설정한 뒤, 구적계(Digitizing Area-liner MT-10S, \pm 0.1%)를 사용하여 계산하였다. 피크 면적에 일정한 가중치(weighting factor; 스펙타이

Table 1. AMS ¹⁴C dating of core RS14-GC2

Depth (cm)	AMS ¹⁴ C measured age (yr BP)	error (±)	*LCO corrected AMS ¹⁴ C age (yr BP)	calibrated AMS ¹⁴ C age (yr BP)	error (±)
0-1	9320	50	6145	5729	134
16-17	16660	140	13485	14349	343
48-49	26640	240	23465	26518	340

*Local Contamination Offset.

트 1, 일라이트 4, 녹니석과 카올리나이트의 합 2)를 곱하여 각 광물의 고유한 피크 강도 차를 보정하였다(Biscaye, 1965). 카올리나이트와 녹니석의 비율은 자연건조된 슬라이드의 X-선 회절분석도상에서 카올리나이트의 3.58 Å 피크와 녹니석의 3.54 Å 피크의 면적의 비를 통해서 계산되었다.

퇴적물의 연대는 벌크 퇴적물의 산불용성 유기탄소의 방사성 탄소를 질량가속기(Accelerator mass spectrometry, AMS)를 이용하여 측정하였다(Table 1). AMS 방사성 탄소연대 측정은 미국 우즈홀 해양연구소(Woods Hole Oceanographic Institute)의 NOSANS 실험실과 폴란드 아담 미츠키에비츠대학교(Adam Mickiewicz University in Poznań)의 포즈난 방사성탄소 실험실에서 수행되었다. 획득한 AMS 방사성 탄소연대는 다음과 같은 절차로 보정하였다. 남극해의 저장고효과(reservoir effect)에 해당하는 1.1 ± 0.12 ka를 박스코어의 최상부의 연대에서 뺀다(Hall *et al.*, 2010). 이는 오래된 유기물에 의한 오염 때문에 나타나는 지역적인 오염 보상값(Local Contamination Offset, LCO)을 고려하기 때문이다(Hillebrandt *et al.*, 2009).

결 과

Fig. 2는 코어 RS14-GC2에서 분석된 대자울과 모래 입자의 함량 변화를 보여준다. 대자울은 간헐적인 이상값을 제외하고 코어 전체적으로 회색의 퇴적물에서는 비교적 일정한 값을 보이지만, 밝은 갈색의 퇴적물이 나타나는 코어 상부 65 cm에서 감소한 이후 50 cm에서 다시 상승한다. 코어 RS14-GC2 모래 입자의 함량 변화는 대자울의 변화와 매우 유사하다(Fig. 2). 그러나 코어 최상부에서 대자울은 감소하지만 모래 함량은 계속 증가하는 경향이 나타난다. 코어의 암상은 대자울과 모래 입자의 함량이 일정한 구간에서는 회색의 사질-점토질 이토층 또는 실트질 이토층이 우세하게 나타

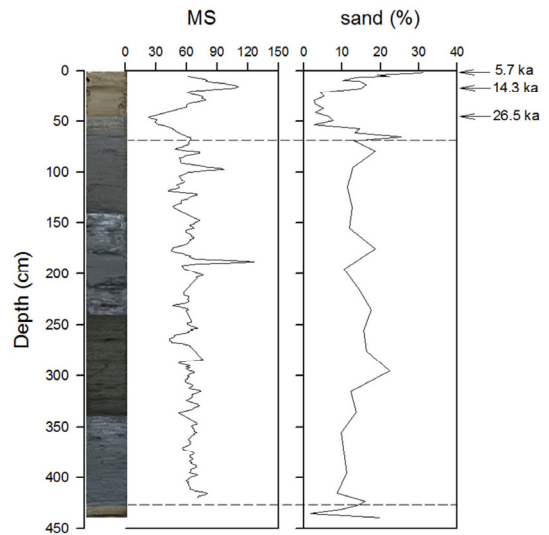


Fig. 2. Core photograph and downcore variation of magnetic susceptibility (MS) and sand content with AMS ¹⁴C dating of core RS14-GC2. The AMS ¹⁴C date is fairly high at the core-top because of old carbon, although core-top is preserved well.

나고, 대자울과 모래 입자의 함량이 변화하는 구간은 밝은 갈색의 사질-실트질 이토층으로 구성된다. 코어 RS14-GC2의 점토광물 함량은 일라이트가 61.8~76.7%로 가장 우세하며, 녹니석이 15.7~21.3%, 카올리나이트가 3.6~15.4%, 스펙타이트가 0.9~5.1%의 순서로 나타났다(Fig. 3). 코어 전체적으로 많은 부분을 차지하는 회색 퇴적물 구간에서 일라이트 함량은 평균 75.4%로 비교적 높은 값을 보이지만, 밝은 갈색 퇴적물 구간에서 평균 63.7%로 함량이 낮아진다. 반면에, 스펙타이트와 카올리나이트 함량은 회색 퇴적물 구간에서 각각 1.9%과 5.3%로 낮게 나타났지만, 밝은 갈색 퇴적물 구간에서는 3.2%과 14.0%으로 함량이 증가한다. 녹니석 함량은 코어의 상부에서 증가하는 경향을 보이

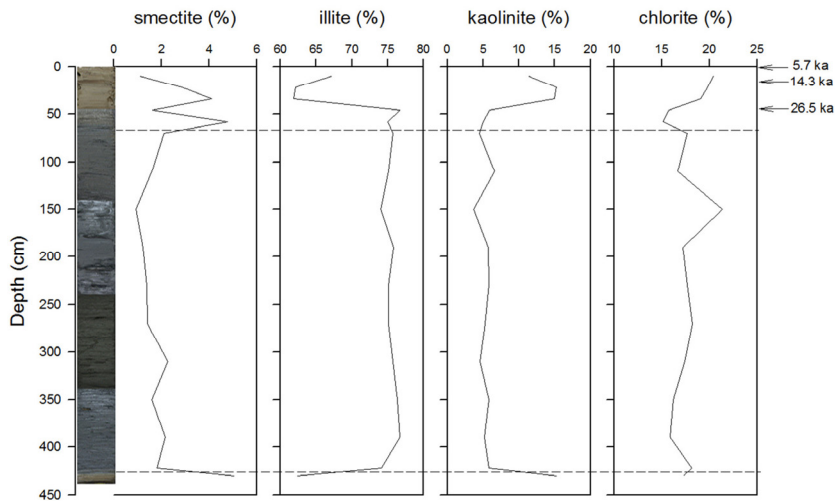


Fig. 3. Downcore variation of clay mineral compositions (smectite, illite, kaolinite and chlorite) with AMS ^{14}C dates of core RS14-GC2.

지만, 다른 점토광물들의 함량에 비해 전체적으로 일정한 값(17.8%)을 유지한다.

토 의

마지막 빙하기 이후 퇴적작용의 변화

마지막 빙하기 이후 로스해 대륙붕의 퇴적작용 및 퇴적환경 변화는 많은 연구들을 통해 비교적 잘 보고되었다(Anderson *et al.*, 1984, 2002; Licht *et al.*, 1999; Frigani *et al.*, 2003; Howat *et al.*, 2003; Salvi *et al.*, 2006). 로스해 대륙붕에서 퇴적작용 변화를 일으키는 가장 중요한 요인은 육상 로스빙하의 발달과 소멸이다. 육상빙하는 빙하기 동안 대륙붕단까지 성장 및 발달하여 과거에 퇴적되었던 대륙붕 퇴적물을 침식하고 운반 및 재퇴적시킨다. 빙하의 발달에 의한 침식작용으로 로스해 대륙붕은 내대륙붕의 수심이 더 깊은 특징적인 지형구조를 보인다(Fig. 1). 일반적으로 빙하기 동안 발달한 빙상에 의해 대륙붕에는 전체적으로 다이어믹타이트(diamictite)가 형성되며, 용빙수에 의해 분급이 불량한 병력토(till)가 외해까지 공급되며 빙산에 의해 많은 빙운쇄설물이 퇴적된다. 빙하기 대륙붕에 퇴적된 다이어믹타이트는 대자율이 상대적으로 낮은 것이 특징이고 점토부터 거력(boulder)의 입자가 뒤섞여있기 때문에 분급이 매우 불량하다

(Licht *et al.*, 1999).

기후가 온난해지는 후빙기 동안 빙하가 후퇴하고 대륙붕에 빙붕이 형성되어 빙상의 그라운드링 라인(grounding line)의 바로 앞에서 암설류와 저탁류에 의한 퇴적작용이 우세하게 일어난다. 기온이 계속 상승하면서 빙상과 빙붕은 대륙쪽으로 점점 후퇴하고 대륙붕에는 다년 또는 계절적인 해빙이 발달하는 환경으로 변화된다. 후빙기 동안 로스해 대륙붕에 발생한 암설류나 저탁류에 의해 운반된 퇴적물은 비교적 높은 대자율을 보이며, 특히 빙운쇄설물이 포함된 구간은 대자율이 매우 높으며, 입도 역시 평균적으로 조립하고 모래 입자의 함량이 50% 이상인 구간도 발견된다(Licht *et al.*, 1999). 이 시기에는 용빙수나 생물의 생산성에 의한 퇴적물의 공급이 극도로 감소한다. 이로 인해 후빙기와 현생 퇴적물 사이에 결층이 발견되는 경우도 있다(Licht *et al.*, 1996; Domack *et al.*, 1999). 현생의 로스해 대륙붕은 주로 계절적인 해빙의 생성과 소멸에 의한 공해(open marine) 환경으로 변화하여 표층해수의 생물생산성에 크게 의존하며, 빙붕의 아래에는 용빙수에 의해 공급된 세립질 퇴적물이 퇴적된다(Licht *et al.*, 1999). 로스해 대륙붕의 현생 퇴적물은 빙하기 또는 후빙기의 퇴적물보다 대자율이 낮으며, 입도는 전체적으로 실트 입자가 주를 이루고 빙운쇄설물의 공급도 감소한다(Licht *et al.*, 1999; Salvi *et al.*, 2006).

남극해에서 빙하기 동안 용빙수에 의해 공급되는 분급이 불량한 많은 양의 빙력토는 대륙붕단과 대륙사면 상부에 퇴적된 후 저탁류에 의해 대륙사면의 하부로 이동된다(Larter and Barker, 1991). 이 과정에서 대륙사면에 협곡이 형성되며, 이 협곡들을 따라 심해로 조립한 모래 크기의 입자가 운반된다. 이러한 운반 작용으로 웨델해에서는 대륙붕단에서 800 km 이상 떨어진 심해에서도 모래 입자가 포함된 점이층리가 발견되었다(Anderson *et al.*, 1986). 빙하기와 후빙기 동안 육상빙하에서 분리된 빙산에 의하여 대륙사면에 빙운쇄설물이 많이 운반되고 퇴적된다. 특히, 후빙기에 기온과 해수면의 급격한 상승으로 빙하분리가 활발하게 일어나기 때문에 빙운쇄설물의 공급이 증가한다(Grobe and Mackensen, 1992). 빙하가 후퇴하기 시작하면, 대륙붕과 마찬가지로 대륙사면에도 생물기원과 육성기원이 혼합된 원양성 또는 반원양성의 퇴적물이 퇴적되기 시작한다(Barker *et al.*, 1999). 온난한 간빙기 동안 대륙사면의 퇴적물은 일반적으로 육지에서 멀어질수록 낮아지고, 특히 간빙기가 시작되는 시점에 표층해수 일차생산성의 증가로 인해 생물기원(예, 규조각)의 입자들이 급격하게 증가하는 경향이 보고되었다(Grobe and Mackensen, 1992; Ceccaroni *et al.*, 1998).

코어 RS14-GC2에서 대자울과 모래 입자의 함량은 65 cm의 하부 회색 퇴적물이 나타나는 구간에서 상대적으로 높게 나타난다(Fig. 2). 이러한 높은 대자울과 모래 함량의 증가는 회색 퇴적물이 대륙붕단이나 대륙사면의 상부에서 발생한 저탁류에 의해 공급되었음을 지시하는 것으로 해석된다. 코어 깊이 65 cm에서 46 cm 사이에서 대자울과 모래 함량이 급격하게 감소하는 경향이 발견된다. 이 기간은 대륙빙상이 대륙붕단에서 후퇴하여 빙력토의 공급이 현저히 줄어들고, 대륙사면에 원양성 또는 반원양성의 퇴적물이 공급되기 시작했기 때문으로 해석된다. 한편 46 cm 상부의 갈색 퇴적물이 나타나는 구간은 일반적으로 대자울이 낮고 입도는 세립하다(Fig. 2). 코어 최상부에서 대자울과 모래 입자 함량의 증가는 빙운쇄설물의 증가 또는 현생퇴적물이 저탁류로 인해 대륙사면에 재퇴적된 것으로 해석된다. 이 구간 퇴적물의 방사성 탄소동위원소 연대가 약 14 ka로 높게 나타나는 것은 이러한 원인에 기인한다(Table 1). 코어 최상부(1 cm)의 방사성 탄소동위원소 연대는 5.7 ka로 측정된다(Fig. 2). 이러한 높은 연대는 방사성 탄소동위

원소 연대 측정에 사용되는 산불용성 유기탄소가 다양한 탄소 순환에 의해 재생산된 탄소를 포함하기 때문이다(Andrews *et al.*, 1999; Domack *et al.*, 1999; Licht and Andrews, 2002). 이는 남극해에서 보고되는 일반적인 현상이며 남극해 주변 해역의 많은 코어에서 측정된 코어 최상부의 연대(2~6 ka)와 큰 차이가 없다(Licht *et al.*, 1996; Pudsey *et al.*, 1994; Salvi *et al.*, 2006; Hall *et al.*, 2010). 코어 RS14-GC2의 상부의 갈색 퇴적물 구간은 간빙기인 현생 퇴적물로 해석되고 코어 하부의 회색 퇴적물은 빙하기와 후빙기의 퇴적물에 해당되는 것으로 판단된다. 그리고 대자울과 모래 함량이 급격하게 줄어들기 시작하는 65 cm에서 46 cm까지 아마도 후빙기 퇴적물로 해석된다. 코어 최하부에 다시 나타나는 갈색 퇴적물은 지난 마지막 빙하기 이전의 간빙기 퇴적물로 예상되지만 시료양이 매우 적어서 정확한 판단은 어렵다.

마지막 빙하기 이후 점토광물 기원지의 변화

해양 퇴적물을 구성하는 점토광물 중에서 스�멕타이트는 쇄설성 기원 또는 자생적 기원으로 구분된다. 자생적 기원의 스�멕타이트는 화산과 열수활동 또는 변성 작용에 의해 만들어진다(Chamley, 1989; Hillier, 1995). 예를 들어 해저에서 일어나는 화산유리나 화산암의 화학적 변질작용(halmyrolysis)이 자생적 기원의 스�멕타이트를 형성하는 가장 중요한 과정으로 알려지고 있다(Chamley, 1989; Robert and Chamley, 1991). 반면에, 쇄설성 스�멕타이트는 일반적으로 따뜻하고 습윤하거나 차고 건조한 기후환경에서 가수분해를 통한 화성암의 화학적 풍화에 의해 주로 생성된다(Ehrmann, 1998). 지질학적 시간 동안 남극중단산맥을 구성한 많은 모암들은 화학적 풍화과정에서 풍부한 스�멕타이트를 공급할 수 있지만 남극빙상의 형성 이후 물리적 풍화가 우세한 남극의 추운 기후에서 스�멕타이트의 형성은 주로 화산암의 풍화 및 침식에 의한 것으로 보고되었다(Ehrmann *et al.*, 1992; Ehrmann, 1998). 일라이트와 녹니석은 고위도 지역에서 물리적 풍화가 우세하게 일어나는 것을 지시하는 전형적인 점토광물이다(Ehrmann, 1998). 일라이트는 주로 화성암과 운모군(mica group)을 포함한 점토질 퇴적암에서 공급되며, 남극의 경우 비콘누층군(Beacon Supergroup)의 풍화에 의해서 주로 형성된다고 보고되었다(Ehrmann *et al.*, 2005). 또한 남

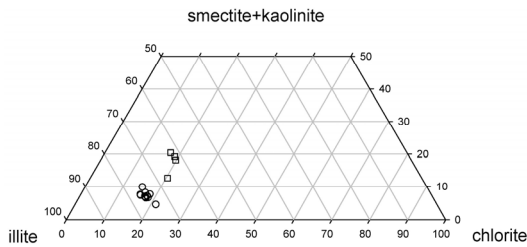


Fig. 4. Ternary diagram showing the difference of clay mineral compositions between the gray sediments and brownish sediments of core RS14-GC2. Open rectangles represent an interglacial period, whereas open circles represent a glacial/deglacial period.

극중단산맥에서 노출된 결정질암의 풍화작용에 의해서도 형성된다(Ehrmann *et al.*, 2011). 녹니석은 주로 이를 포함한 변성암과 염기성암에서 에너지가 낮은 물리적 풍화를 통해 형성된다(Ehrmann *et al.*, 2011). 카올리나이트는 온대와 열대의 습한 기후에서 화학적인 풍화에 의해 주로 형성되기 때문에 극지 환경에서는 거의 생성되지 않는다. 동남극에서 주로 공급되는 카올리나이트는 남극빙하가 형성되기 이전 화학적 풍화가 활발하게 일어난 올리고세 초기에 형성되어 현재 빙하에 의한 침식으로 해양에 공급된다(Ehrmann *et al.*, 1992, Dingle and Lavelle, 1998, Forsberg *et al.*, 2008). 다만, 물리적 풍화가 우세한 현재의 극지 환경에서 카올리나이트는 주로 카올리나이트를 함유하고 있는 고토양(paleosol), 퇴적물 또는 퇴적암의 재생산(recycling product)에 의해 공급된다(Ehrmann *et al.*, 2011).

남극 대륙은 지난 천만 년 이상 두꺼운 빙하로 덮여있었기 때문에, 화학적 풍화와 물리적 풍화의 변화보다는 주로 기원지 변화에 의해 해양퇴적물을 구성하는 점토광물의 조성이 변화된다(Salvi *et al.*, 2006; Hillenbrand *et al.*, 2009; Ehrmann *et al.*, 2011). 로스해 대륙붕으로 공급되는 점토광물들에 대한 모암들의 연구는 기반암들이 대륙빙상으로 대부분 덮여있기 때문에 거의 불가능한 상태이다. 기존의 연구결과에 의하면 스멕타이트 함량은 주로 제 4기 퇴적물에서 높게 나오는데, 이는 퇴적물의 기원지가 로스해 주변 대륙에 존재하는 염기성 화산암이 기원지로 작용했다는 것을 나타내며(Ehrmann *et al.*, 1992; Ehrmann, 1998), 주로 빅토리아 연안의 맥머도 화산군(McMurdo volcanic group)에서 공급

된다(Kyle, 1990). 일라이트와 녹니석은 남극중단산맥의 기반암이나 퇴적암이 기원지로 추정된다(Smellic, 1998; Ehermann *et al.*, 2005). 카올리나이트의 경우 로스해에서는 기원지에 대한 정보가 잘 보고되어 있지 않지만, 카올리나이트를 함유하고 있는 고토양 또는 퇴적암에서 공급되는 것으로 생각된다.

빙하기의 벨링스하우젠해 대륙붕에는 기원지에 따라서 점토광물의 조성이 다른 퇴적물이 융빙수나 저탁류에 의해 주로 운반되기 때문에 빙하 흐름의 변화를 파악할 수 있다(Hillenbrand *et al.*, 2009). 현재 벨링스하우젠해의 대륙붕에는 남극반도의 빙상이 후퇴하면서 동쪽에는 베토벤반도(Beethoven Peninsula)로부터 풍부한 스멕타이트가 공급되고, 서쪽은 엘타닌만(Eltanin Bay)에서 일라이트가 풍부한 퇴적물이 공급된다. 그러나 빙하기 벨링스하우젠해의 대륙붕에는 남극반도 빙상 아래의 토양에서 일라이트와 녹니석이 풍부하게 공급되었으며, 베토벤반도에서의 스멕타이트 공급은 빙상의 발달로 인하여 중단되었기 때문에, 스멕타이트의 공급은 백악기 동안 남극 대륙주변부에 퇴적되었던 빙해양(glaciomarine) 퇴적물이 주요한 기원지로 작용하였다(Hillenbrand and Ehrmann, 2002; Hillenbrand *et al.*, 2003). 벨링스하우젠해 대륙사면의 경우, 빙하기에는 주로 론만(Ronne Bay) 입구의 동쪽에 퇴적되었던 퇴적물이 재퇴적되어 스멕타이트가 풍부하게 나타나고, 현재 대륙사면에 운반되는 점토광물들은 해류와 빙산에 의해 론만 입구와 엘타닌만에서의 공급이 혼합되어 있다(Hillenbrand *et al.*, 2009).

코어 RS14-GC2에서 점토광물의 조성 변화는 빙하기/후빙기 퇴적물과 간빙기 퇴적물로 뚜렷하게 구분된다(Fig. 4). 빙하기에 해당하는 회색 퇴적물의 점토광물 조성은 스멕타이트(2.0%), 일라이트(75.4%), 녹니석(17.3%), 카올리나이트(5.4%)로 구성되는 반면에 간빙기에 해당되는 갈색 퇴적물의 점토광물 조성은 스멕타이트(3.2%), 일라이트(63.7%), 녹니석(19.1%), 카올리나이트(14.0%)로 구성된다. 빙하기에는 상대적으로 일라이트가 우세하고 간빙기에는 스멕타이트가 소량 증가하며 카올리나이트는 특징적으로 증가한다. 코어 RS14-GC2의 간빙기 점토광물 조성은 펜넬골(Pennell Trough)에서 보고된 점토광물 조성 결과와 유사하다(Salvi *et al.*, 2006). 이러한 변화는 빙하기동안 로스해의 동쪽 대륙붕단까지 진출한 빙상 아래에서 융빙수에 의해 남극중단산맥에서 기원한 일라이트와 녹니석

이 우세한 퇴적물로 해석된다.

간빙기 동안 빙하가 후퇴하기 때문에 일라이트와 녹니석의 공급이 감소하여 상대적으로 스�멕타이트와 카올리나이트의 함량이 증가한다(Fig. 4). 그러나, 코어 최상부에서 일라이트와 녹니석이 증가하는 것은 모래 입자의 함량 증가와 마찬가지로 저탁류에 의해 대륙붕단이나 상부 대륙사면의 퇴적물이 재퇴적되었기 때문으로 생각된다. 코어 RS14-GC2에서 간빙기의 갈색 퇴적물이 나타나는 상부 58 cm 이상의 구간과 하부 430 cm에서 스�멕타이트의 함량이 소량 증가하는 또 다른 원인은 대륙붕에 존재하던 빙상이 간빙기에 사라지고 로스해의 서쪽에 위치한 빅토리아랜드 연안의 맥머도 화산군에서 공급되는 스�멕타이트가 해류를 통해 로스해의 동쪽으로 공급된 것으로 해석된다. 로스해에서 표층해류는 맥머도만에서 시계방향으로 흐르며, 바람에 의해 북쪽 또는 북동쪽으로 흐른다(Dunbar *et al.*, 1989; Sturman and Anderson, 1986). 마리 버드랜드(Marie Byrd Land)의 서쪽 끝에 위치한 에드워드7세반도(Edward VII Peninsula)의 서남극 빙상 아래에는 올리고세 이전의 퇴적암이 넓게 분포한다(Passel, 1945; Wade, 1945; Pankhurst *et al.*, 1998). 아문젠해의 서쪽에 나타나는 높은 함량의 카올리나이트는 마리 버드 랜드의 에드워드 7세 반도의 빙상 아래에 분포한 퇴적암에서 기원한 것으로 알려져 있다(Hinllenbrand *et al.*, 2003; Ehrmann *et al.*, 2011). 남극 대륙주변부에는 대륙붕과 대양 사이를 서쪽으로 흐르는 남극사면류와 남극전선이 발달한다(Orsi and Wiederwohl, 2009). 따라서 간빙기 동안 로스해 대륙사면에 카올리나이트 함량이 증가하는 또 다른 원인으로 로스해 동쪽에 위치한 에드워드7세반도의 퇴적암에서 용빙수에 의한 공급으로 생각된다. 이 지역에서 공급된 카올리나이트는 대륙사면류를 통해 서쪽으로 운반되는 것으로 해석된다.

결 론

로스해 펜넬-이젤린 퇴의 동쪽 대륙사면에서 획득한 중력코어 RS14-GC2에서 대자울, 모래 입자 함량과 점토광물의 조성을 통해 빙하기와 간빙기 대륙사면의 퇴적환경과 퇴적물 기원지의 변화를 알아보았다.

빙하기의 회색퇴적물 구간에서는 대자울과 모래 입자 함량이 증가한다. 이는 빙하기 동안 대륙붕단

까지 진출한 빙상아래에서 용빙수 또는 저탁류에 의해 퇴적물의 공급이 주로 이루어졌음을 지시한다. 반면, 간빙기의 갈색퇴적물 구간에서는 대자울과 모래 입자 함량이 감소한다. 이는 간빙기 동안에는 빙하의 영향이 미약하고 주로 공해 환경에서 생물 기원에 의해 퇴적물이 주로 공급되는 것을 지시한다.

퇴적물의 점토광물 조성의 함량은 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스�멕타이트 순으로 나타난다. 빙하기의 회색퇴적물 구간에서는 일라이트와 녹니석이 상대적으로 우세하고, 이러한 증가는 빙하기 동안 퇴적물의 기원지가 로스해 빙상 하부의 남극 종단산맥 기반암을 지시한다. 반면, 간빙기의 갈색 퇴적물 구간에서는 상대적으로 스�멕타이트가 소량 증가하고 카올리나이트가 특히 많이 증가한다. 이는 빙상의 후퇴로 일라이트와 녹니석의 공급이 감소하고, 해류에 의해 스�멕타이트가 로스해 서쪽의 빅토리아랜드 연안에 위치한 맥머도 화산군에서 공급되었음을 지시한다. 또한 카올리나이트는 마리 버드랜드의 서쪽에 위치한 에드워드7세반도에서 용빙수로 공급되어 남극사면류에 의해 운반되었을 것으로 해석된다.

사 사

자료획득을 위해 실험실 분석에 함께 참여한 부산대학교 지질해양연구실 연구원들(이종민, 김지은)에게 감사드립니다. 원고를 세심하게 심사하시고 조언을 주신 두 분의 심사위원들께도 감사를 드립니다. 이 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)으로 수행되었다.

REFERENCES

- Abreu, V.S. and Anderson, J.B. (1998) Glacial eustasy during the Cenozoic: sequence stratigraphic implications. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 82, 1385-1400.
- Anderson, J.B., Brake, C.F., and Myers, N.C. (1984) Sedimentation on the Ross Sea continental shelf, Antarctica. *Marine Geology*, 57, 295-333.
- Anderson, J.B., Lowe, A.L., Mosola, A.B., Shipp, S.S., and Wellner, J.S. (2002) The Antarctic Ice Sheet during the Last Glacial Maximum and its subsequent retreat history: a review. *Quaternary Science Reviews*, 21, 49-70.
- Andrews, J.T., Cunningham, W.L., Domack, E.W.,

- Jennings, A.E., Jull, A.T., Leventer, A., and Licht, K.J. (1999) Problems and possible solutions concerning radiocarbon dating of surface marine sediments, Ross Sea, Antarctica. *Quaternary Research*, 52, 206-216.
- Barker, P.F., Barrett, P.J., Camerlenghi, A., Cooper, A.K., Davey, F.J., Domack, E.W., and O'Brien, P.E. (1998) Ice sheet history from Antarctic continental margin sediments: the ANTOSTRAT approach. *Terra Antarctica*, 5, 737-760.
- Barker, P.F., Barrett, P.J., Cooper, A.K., and Huybrechts, P. (1999) Antarctic glacial history from numerical models and continental margin sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 150, 247-267.
- Bindschadler, R. (1998) Monitoring ice sheet behavior from space. *Reviews of Geophysics*, 36, 79-104.
- Biscaye, P.E. (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin*, 76, 803-832.
- Budillon, G., Castagno, P., Aliani, S., Spezie, G., and Padman, L. (2011) Thermohaline variability and Antarctic bottom water formation at the Ross Sea shelf break. *Deep-Sea Research I*, 58, 1002-1018.
- Chamley, H. (1989). *Clay Sedimentology*. Springer, Berlin, 623.
- Ceccaroni, L., Frank, M., Frignani, M., Langone, L., Ravaioli, M., and Mangini, A. (1998) Late Quaternary fluctuations of biogenic component fluxes on the continental slope of the Ross Sea, Antarctica. *Journal of Marine Systems*, 17, 515-525.
- Davey, F.J. (1981) Geophysical studies in the Ross Sea region. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 11, 465-479.
- Denton, G.H. and Hughes, T.J. (2002) Reconstructing the Antarctic ice sheet at the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 21, 193-202.
- Dingle, R.V. and Lavelle, M. (1998) Antarctic Peninsular cryosphere: Early Oligocene (c. 30 Ma) initiation and a revised glacial chronology. *Journal of the Geological Society*, 155(3), 433-437.
- Domack, E.W., Jacobson, E.A., Shipp, S., and Anderson, J.B. (1999) Late Pleistocene-Holocene retreat of the West Antarctic Ice-Sheet system in the Ross Sea: Part 2-sedimentologic and stratigraphic signature. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 1517-1536.
- Drewry, D.J. (1983) The surface of the Antarctic ice-sheet, Antarctica: Glaciological and Geophysical Folio, Cambridge, University of Cambridge, Scott Polar Research Institute, Sheet 2.
- Dunbar, R.B., Leventer, A.R., and Stockton, W.L. (1989) Biogenic sedimentation in McMurdo Sound, Antarctica. *Marine Geology*, 85, 155-179.
- Ehrmann, W.U. (1998). Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 139, 213-231.
- Ehrmann, W.U. and Mackensen, A. (1992) Sedimentological evidence for the formation of an East Antarctic ice sheet in Eocene/Oligocene time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 93, 85-112.
- Ehrmann, W.U., Graham, A.G., Hillenbrand, C.D., Kuhn, G., Larter, R.D., and Smith, J.A. (2011) Provenance changes between recent and glacial-time sediments in the Amundsen Sea embayment, West Antarctica: clay mineral assemblage evidence. *Antarctic Science*, 23, 471-486.
- Ehrmann, W.U., Grobe, H., Kuhn, G., and Melles, M. (1992) Significance of clay mineral assemblages in the Antarctic Ocean. *Marine Geology*, 107, 249-273.
- Ehrmann, W.U., Marinoni, L., and Setti, M. (2005) Clay minerals in Cenozoic sediments off Cape Roberts (McMurdo Sound, Antarctica) reveal palaeoclimatic history. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229, 187-211.
- Fagel, N. (2007). Chapter four clay minerals, deep circulation and climate. *Developments in Marine Geology*, 1, 139-184.
- Folk, R.L. and Ward, W.C. (1957) Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27, 3-26.
- Forsberg, C.F., Florindo, F., Gruetzner, J., Venuti, A., and Solheim, A. (2008) Sedimentation and aspects of glacial dynamics from physical properties, mineralogy and magnetic properties at ODP Sites 1166 and 1167, Prydz Bay, Antarctica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 260, 184-201.
- Franke, D. and Ehrmann, W.U. (2010) Neogene clay mineral assemblages in the AND-2A drill core (McMurdo Sound, Antarctica) and their implications for environmental change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 286, 55-65.
- Friedman G.M. and Sanders J.E. (1978) *Principles of sedimentology*. Wiley, New York, 792.
- Frignani, M., Giglio, F., Accornero, A., Langone, L., and Ravaioli, M. (2003) Sediment characteristics at

- selected sites of the Ross Sea continental shelf: does the sedimentary record reflect water column fluxes? *Antarctic Science*, 15, 133-139.
- Giorgetti, G., Talarico, F., Sandroni, S., and Zeoli, A. (2009) Provenance of Pleistocene sediments in the ANDRILL AND-1B drillcore: Clay and heavy mineral data. *Global and Planetary Change*, 69, 94-102.
- Grobe, H. and Mackensen, A. (1992) Late Quaternary climatic cycles as recorded in sediments from the Antarctic continental margin. *The Antarctic Paleoenvironment: A Perspective on Global Change: Part One*, 349-376.
- Hall, B.L., Henderson, G.M., Baroni, C., and Kellogg, T.B. (2010) Constant Holocene Southern-Ocean 14 C reservoir ages and ice-shelf flow rates. *Earth and Planetary Science Letters*, 296, 115-123.
- Hambrey, M.J., Ehrmann, W.U., and Larsen, B. (1991) Cenozoic glacial record of the Prydz Bay continental shelf, East Antarctica. In: Barron, J; Larsen, B, *et al.*(eds.), *Proceedings ODP, Scientific Results*, 119, 77-132.
- Hillenbrand C.D. and Ehrmann W.U. (2001) Distribution of clay minerals in drift sediments on the continental rise west of the Antarctic Peninsula, ODP Leg 178, Sites 1095 and 1096. In: Barker PF, Camerlenghi A, Acton GD, Ramsay ATS (eds.), *Proceedings ODP, Scientific Results 178*, 1-29.
- Hillenbrand, C.D., Benetti, S., Cofaigh, C.Ó., Dowdeswell, J.A., Ehrmann, W.U., Grobe, H., and Larter, R.D. (2009) Clay mineral provenance of sediments in the southern Bellingshausen Sea reveals drainage changes of the West Antarctic Ice Sheet during the Late Quaternary. *Marine Geology*, 265, 1-18.
- Hillenbrand, C.D., Diekmann, B., Fütterer, D.K., Grobe, H., and Kuhn, G. (2003) Distribution of clay minerals and proxies for productivity in surface sediments of the Bellingshausen and Amundsen seas (West Antarctica)-Relation to modern environmental conditions. *Marine Geology*, 193, 253-271.
- Hillenbrand, C.D., Frederichs, T., Fütterer, D.K., and Grobe, H. (2002) No evidence for a Pleistocene collapse of the West Antarctic Ice Sheet from continental margin sediments recovered in the Amundsen Sea. *Geo-marine Letters*, 22, 51-59.
- Hillier S. (1995) Erosion, sedimentation, and sedimentary origin of clays. In *Origin and mineralogy of clays, clays and the environment*, edited by Velde B. Berlin: Springer-Verlag, 162-219.
- Howat, I.M. and Domack, E.W. (2003) Reconstructions of western Ross Sea palaeo-ice-stream grounding zones from high-resolution acoustic stratigraphy. *Boreas*, 32, 56-75.
- Jacobs, S.S. (1991) On the nature and significance of the Antarctic Slope Front. *Marine Chemistry*, 35, 9-24.
- Kyle, P.R. (1990) The McMurdo Volcanic Group-Western Ross Embayment, in LeMasurier, W.E., and Thomson, J.W., (eds.), *Volcanoes of the Antarctic plate and southern oceans: American Geophysical Union Antarctic Research Series*, vol 48, 19-134.
- Langone, L., Frignani, M., Labbrozzi, L., and Ravaioli, M. (1998) Present-day biosiliceous sedimentation in the northwestern Ross Sea, Antarctica. *Journal of Marine Systems*, 17, 459-470.
- Larter, R.D. and Barker, P.F. (1991) Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: forces on a young subducting plate. *Journal of Geophysical Research*, 96(B12), 19583-19607.
- Licht, K.J. and Andrews, J.T. (2002) The 14 C record of Late Pleistocene ice advance and retreat in the central Ross Sea, Antarctica. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 34, 324-333.
- Licht, K.J., Andrews, J.T., Dunbar, N.W., and Jennings, A.E. (1999) Distinguishing subglacial till and glacial marine diamictos in the western Ross Sea, Antarctica: Implications for a last glacial maximum grounding line. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 91-103.
- Licht, K.J., Andrews, J.T., Jennings, A.E., and Williams, K.M. (1996) Chronology of late Wisconsin ice retreat from the western Ross Sea, Antarctica. *Geology*, 24, 223-226.
- Mackensen, A. (2004) Changing Southern Ocean palaeocirculation and effects on global climate. *Antarctic Science*, 16, 369-386.
- Orsi, A.H. and Wiederwohl, C.L. (2009) A recount of Ross Sea waters. *Deep-Sea Research II*, 56, 778-795.
- Orsi, A.H., Bullister, J.L., and Johnson, G.C. (1999) Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water. *Progress in Oceanography*, 43, 55-109.
- Orsi, A.H., Nowlin, W.D., and Whitworth, T. (1995) On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Research I*, 42, 641-673.
- Pankhurst, R.J., Weaver, S.D., Bradshaw, J.D., Storey, B.C., and Ireland, T.R. (1998) Geochronology and

- geochemistry of pre-Jurassic superterranes in Marie Byrd Land, Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 103(B2), 2529-2547.
- Passel, C.F. (1945) Sedimentary Rocks of the Southern Edsel Ford Ranges, Marie Byrd Land, Antarctica. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89, 123-131.
- Petschick, R., Kuhn, G., and Gingele, F. (1996) Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography. *Marine Geology*, 130, 203-229.
- Pudsey, C.J., Barker, P.F., and Larter, R.D. (1994) Ice sheet retreat from the Antarctic Peninsula shelf. *Continental Shelf Research*, 14, 1647-1675.
- Rignot, E., Jacobs, S., Mouginot, J., and Scheuchl, B. (2013) Ice-shelf melting around Antarctica. *Science*, 341, 266-270.
- Robert, C. and Chamley, H. (1991) Development of early Eocene warm climates, as inferred from clay mineral variations in oceanic sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89, 315-331.
- Robert, C. and Maillot, H. (1990) Paleoenvironments in the Weddell Sea area and Antarctic climates, as deduced from clay mineral associations and geochemical data, ODP Leg 113. *Proceedings ODP, Scientific Results*, Vol. 113, 51-66.
- Salvi, C., Buseti, M., Marinoni, L., and Brambati, A. (2006) Late Quaternary glacial marine to marine sedimentation in the Pennell Trough (Ross Sea, Antarctica). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 231, 199-214.
- Shipp, S., Anderson, J.B., and Domack, E.W. (1999) Seismic signature of the Late Pleistocene fluctuation of the West Antarctic Ice Sheet system in Ross Sea: a new perspective, Part I. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 1486-1516.
- Smellie, J.L. (1998) Sand grain detrital modes in CRP-1: provenance variations and influence of Miocene eruptions on the marine record in the McMurdo Sound region. *Terra Antarctica*, 5, 579-587.
- Stokke, P.R. and Carson, B. (1973) Variation in clay mineral X-ray diffraction results with the quantity of sample mounted. *Journal of Sedimentary Research*, 43, 957-964.
- Sturman, A.P. and Anderson, M.R. (1986) On the sea-ice regime of the Ross Sea, Antarctica. *Journal of Glaciology*, 32, 54-59.

Received October 12, 2017, Revised October 30, 2017,
Accepted February 8, 2018, Associate Editor: Yul Roh