Vol. 41(4):265–274
http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2019.41.4.265

Ocean and Polar Research

December 2019

Article

남극 로스해 대륙주변부 중앙분지의 점토광물 조성을 통한 기원 추적

하상범[1] · 김부근[1*] · Ester Colizza[2] · Federico Giglio[3] · 구효진[4,5] · 조현구[4,5]

[1]부산대학교 자연과학대학 해양학과
(46241) 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2
[2]Department of Mathematics and Geosciences, College of Technology and Science,
University of Trieste, Trieste 34127, Italy
[3]National Research Council-Institute of Polar Science,
Bologna 40129, Italy
[4]경상대학교 자연과학대학 지질과학과
[5]경상대학교 기초과학연구소
(52828) 경상남도 진주시 가좌대로

Estimation of Sediment Provenance Using Clay Mineral Composition in the Central Basin of the Ross Sea Continental Margin, Antarctica

Sangbeom Ha[1], Boo-Keun Khim[1*], Ester Colizza[2], Federico Giglio[3], Hyojin Koo[4,5], and Hyen Goo Cho[4,5]

[1]Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Pusan National University
Busan 46241, Korea
[2]Department of Mathematics and Geosciences, College of Technology and Science
University of Trieste, Trieste 34127, Italy
[3]National Research Council-Institute of Polar Science
Bologna 40129, Italy
[4]Department of Geology, College of Natural Sciences, Gyeongsang National University
[5]Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University
Jinju 52828, Korea

Abstract : To trace the provenance of fine-grained sediments in response to the growth and retreat of glaciers (i.e., Ross Ice Sheet) that affects the depositional process, various kinds of analyses including magnetic susceptibility, granulometry, and clay mineral composition with AMS ^{14}C age dating were carried out using a gravity core KI-13-GC2 obtained from the Central Basin of the Ross Sea continental margin. The sediments mostly consist of silty mud to sand with ice-rafted debris, the sediment colors alternate repeatedly between light brown and gray, and the sedimentary structures are almost bioturbated with some faint laminations. Among the fine-grained clay mineral compositions, illite is highest (59.1–76.2%), followed by chlorite (12.4–21.4%), kaolinite (4.1–11.6%), and smectite (1.2–22.6%). Illite and chlorite originated from the Transantarctic mountains (metamorphic rocks and granitic rocks) situated to the south of the Ross Sea. Kaolinite might be supplied from the sedimentary rocks of Antarctic continent underneath the ice sheet. The provenance of smectite was considered as McMurdo volcanic group around the Victoria

*Corresponding author. E-mail : bkkhim@pusan.ac.kr

Land in the western part of the Ross Sea. Chlorite content was higher and smectite content was lower during the glacial periods, although illite and kaolinite contents are almost consistent between the glacial and interglacial periods. The glacial increase of chlorite content may be due to more supply of the reworked continental shelf sediments deposited during the interglacial periods to the Central Basin. On the contrary, the glacial decrease of smectite content may be attributed to less transport from the McMurdo volcanic group to the Central Basin due to the advanced ice sheet. Although the source areas of the clay minerals in the Central Basin have not changed significantly between the interglacial and glacial periods, the transport pathways and delivery mechanism of the clay minerals were different between the glacial and interglacial periods in response to the growth and retreat of Ross Ice Sheet in the Ross Sea.

Key words : clay mineral, sediment provenance, ice sheet, Ross Sea

1. 서 론

해양퇴적물 내의 점토광물은 해양환경에서 자생적으로 생성되기도 하지만 대부분 육상 암석의 물리적·화학적 풍화에 의하여 생성되어 해양으로 유입되기 때문에 점토광물의 조성과 함량은 기원지 모암의 특성에 따라 결정된다(예, Chamley 1989). 또한 암석의 풍화는 육상의 기후 조건에 민감하게 반응하므로, 해양퇴적물의 점토광물 조성은 퇴적물의 기원지 연구뿐만 아니라 고기후 연구에도 유용하게 사용된다(Robert and Maillot 1990; Hambrey et al. 1991; Ehrmann and Mackensen 1992; Ehrmann et al. 1992, 2005). 김 등 (2011)은 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum) 동안 베링해의 점토광물 조성은 해수면의 변화에 따른 퇴적물 기원지의 변화를 반영한다고 보고하였다. 베링해에서 세립 퇴적물의 기원지는 빙하기동안 해수면의 하강과 해빙의 형성에 의해 남쪽으로 이동하였고, 해수면이 급격히 상승한 홀로세 전기에는 베링해 북쪽 지역이 주요한 퇴적물 기원지로 작용했다고 해석하였다. 한편 Liu et al. (2003)은 플라이스토세동안 남중국해 심해퇴적물에서 점토광물의 급격한 조성 변화는 아시아 몬순 변화에 의해 대륙 암석의 침식 정도가 변화했기 때문이며 간빙기에는 화학적 풍화가 우세하여 스멕타이트가 증가하고 빙하기에는 물리적 풍화가 우세하여 일라이트와 녹니석이 증가한다고 보고하였다.

남극해 대륙주변부의 점토광물 공급은 에오세 이후에 형성된 남극 빙상으로 인한 화학적 풍화보다 물리적 풍화에 의한 것으로 여겨진다(Griffin et al. 1968; Robert and Mailot 1990; Ehrmann et al. 1992; Grobe and Mackensen 1992). 남극해 대륙주변부에는 일라이트와 녹니석이 광역적으로 분포하는데, 이 두 점토광물들은 주로 빙하세굴(glacial scour)에 의해 특히 동남극 대륙에 넓게 분포하는 결정질암의 물리적 풍화에 의해 생성된다(Ehrmann et al. 1992, 2005; Fagel 2007). 한편 카올리나이트는 빙하 환경에서는 생성되지 않기 때문에, 카올리나이트가 높게 분포하는 남극해 대륙주변부는 카올리나이트를 포함한 오래된 퇴적물의 물리적 풍화나 고토양의 침식에 의해 생성되어 운반된 것으로 보고되었다(Hambrey et al. 1991; Ehrmann et al. 1992). 남극해 대륙주변부의 스멕타이트는 남극대륙에서 정확한 기원지에 대한 연구가 부족하지만, 일반적으로 화산기원 물질의 풍화에 의해 형성되는 것으로 알려졌다(Robert and Mailot 1990; Ehrmann et al. 1992).

현재 남극대륙은 빙하로 덮여있기 때문에, 일반적으로 자생 기원 점토광물은 형성되기 어렵고 물리적 풍화에 의해 점토광물이 우세하게 형성된다(Griffin et al. 1968; Robert and Mailot 1990; Ehrmann et al. 1992; Grobe and Mackensen 1992; Petschick et al. 1996; Fagel 2007). 따라서, 남극해 대륙주변부 퇴적물의 점토광물 함량 변화는 퇴적물의 기원지와 이동경로를 추적하는 데 유용하게 사용되었다(Hillenbrand and Ehrmann 2001; Hillenbrand et al. 2009; Ehrmann et al. 2011). Lucchi et al. (2002)은 남극반도의 아문젠해 대륙주변부에서 점토광물 조성 변화를 고기후 변화에 따른 퇴적물의 이동경로 변화로 설명하였다. 빙하기에는 저탁류와 등수심류(contour current)가 우세하여 남극반도로부터 일라이트와 녹니석이 주로 공급되지만, 간빙기에는 저탁류와 등수심류가 약화되어 일라이트와 녹니석의 공급이 줄어들었기 때문에 아문젠해 대륙주변부에는 상대적으로 스멕타이트와 카올리나이트의 함량이 증가한다. 한편 남극해 대륙주변부에서 일반적으로 일라이트와 녹니석이 우세하게 분포하지만, 퇴적물의 기원지에 따라 지역적으로 점토광물의 분포와 함량의 차이가 뚜렷하게 나타난다(Ehrmann et al. 1992). 예를 들어, 벨링스하우젠해 동쪽 대륙붕에는 베토벤(Beethoven) 반도로부터 풍부한 스멕타이트가 공급되는 반면, 서쪽 대륙붕에는 엘타닌만(Eltanin Bay)로부터 일라이트가 풍부하게 공급되기 때문에 대륙붕의 동쪽과 서쪽은 점토광물의 분포가 다르다(Hillenbrand et al. 2009).

로스해에서 수행된 대부분의 점토광물 연구는 대륙붕 지역에 제한되어 있다. 기존연구의 결과에 의하면 로스해 맥머도만에 분포하는 높은 함량의 일라이트와 녹니석은

로스해 남쪽의 대륙으로부터 빙상의 물리적 풍화에 의해 공급되었으며, 높은 함량의 스멕타이트는 로스해 남서쪽의 맥머도 화산군(McMurdo volcanic group)의 화산체에서 공급된 것으로 보고되었다(예, Ehrmann et al. 1992). 또한 기존에 수행된 점토광물에 관한 연구들은 대부분 로스해 대륙붕의 남서쪽에 위치한 맥머도만 지역에서 국한되어 있다(Ehrmann et al. 1992, 2005; Ehrmann 1998; Setti et al. 2000; Giorgetti et al. 2009; Franke and Ehrmann 2010). 특히 로스해의 대륙사면과 대륙대를 포함한 대륙주변부에서 수행된 점토광물 연구는 매우 부족하다. 최근에 하 등 (2018)은 로스해 동쪽 대륙사면의 점토광물의 기원지 연구를 통하여 빙하기동안 전진한 빙상에 의해 남극종단산맥에서부터 융빙수에 의하여 높은 함량의 일라이트가 공급되었고, 간빙기에 증가한 스멕타이트와 카올리나이트는 빙상이 후퇴하여 남극종단산맥의 영향이 줄어들고 남극사면류(Antarctic Slope Current)가 남하하여 로스해 동쪽의 에드워드 7세 반도로부터 공급되었을 것이라고 해석하였다. 이번 연구의 목적은 로스해 대륙주변부의 서쪽 대륙사면에 위치한 중앙분지에서 획득한 코어의 점토광물 조성 변화를 통해 세립질 퇴적물의 기원지를 확인하는 것이다. 더불어 빙하기-간빙기 사이 로스 빙상(Ross Ice Sheet)의 발달과 소멸에 따른 로스해 대륙주변부의 서쪽과 동쪽 지역의 점토광물 기원지를 비교하는 것이다.

2. 연구지역

로스해에는 세계에서 제일 큰 규모의 빙붕인 로스빙붕(Ross Ice Shelf)이 남쪽에 발달하고 빙붕의 북쪽으로는 대륙붕이 넓게 펼쳐져 있다(Fig. 1). 현재 빙붕으로부터 얼음의 공급은 동남극빙상에서는 분출빙하의 형태이지만, 대부분은 서남극빙상의 직접적인 빙하류의 형태이다(Bindschadler 1998; Denton and Hughes 2002). 로스 빙상은 기후 변화에 따라 성장과 후퇴를 반복하였으며, 과거 마지막 최대 빙하기에 74°S까지 성장하였다(Licht et al. 1996; Shipp et al. 1999; Howat and Domack 2003). 기후 변화에 따른 로스 빙상의 성장과 후퇴는 로스해 대륙붕의 퇴적환경에 크게 영향을 미쳤으며, 괴상의 다이어믹타이트와 덜 고화된 사질-니질의 자갈층이 로스해 대륙붕의 여러 지역에서 광범위하게 발견되어 빙하기 동안 빙상의 존재가 확인되었다(Domack et al. 1999; Bonaccorsi et al. 2000; Salvi et al. 2006).

로스해 대륙붕은 빙하에 의한 침식으로 수심이 대륙방향으로 깊어지고, 북-북동 방향의 긴 타원 형태의 골(trough)과 퇴(bank)가 다수 분포하며, 대륙붕단이 뚜렷하게 발달되어 있다(Anderson et al. 1984). 로스해의 대륙붕은 180°를 경계로 동쪽과 서쪽으로 나뉘며, 동쪽은 상대적으로 넓은 골과 낮은 퇴가 나타나고, 서쪽은 주로 좁은 골과 높은 퇴가 나타난다(Davey 1981). 로스해 대륙사면은

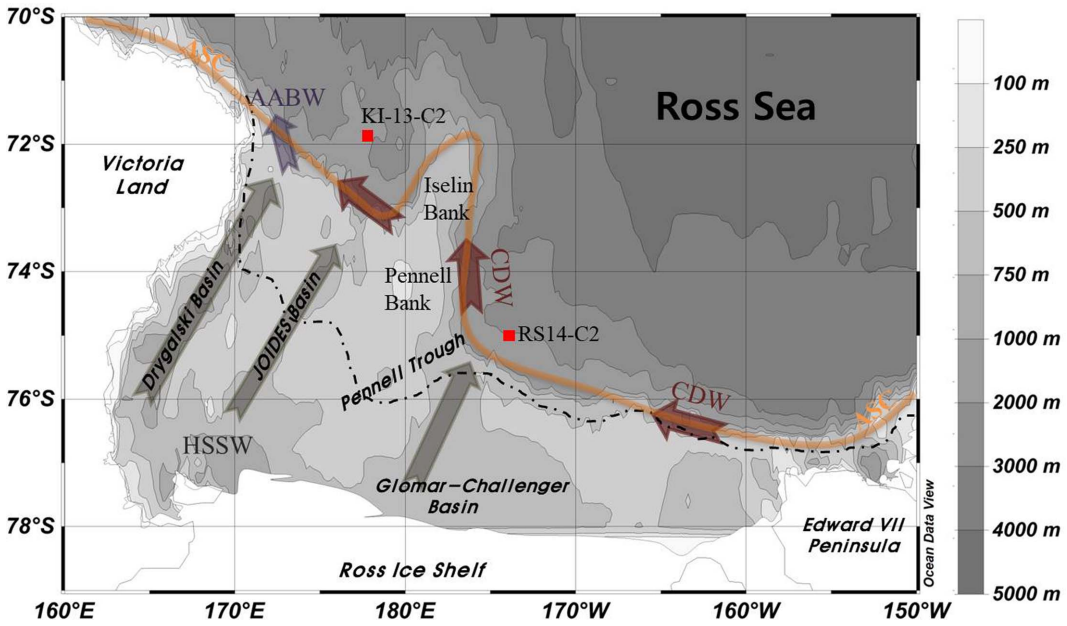

Fig. 1. Physiography of the Ross Sea. A gravity core (KI-13-GC2) was collected at site KI-13-C2 (71°52'S, 177°48'E, depth 1800 m) located in the Central Basin at the western continental margin of the Ross Sea. Dotted line indicate the LGM grounding line as determined by Shipp et al. (1999). Core RS14-C2 located at the eastern continental margin of the Ross Sea was studied by Ha et al. (2018). (AABW: Antarctic Bottom Water, CDW: Circumpolar Deep Wate, HSSW: High Salinity Shelf Water)

이셀린(Iselin) 퇴를 경계로 하여, 동쪽 대륙사면은 경사가 급하고 해저 협곡이 드물게 나타나는 반면, 서쪽 대륙사면은 경사는 완만하지만 많은 해저 협곡이 나타나는 형태를 보인다(Davey 1981).

로스해의 심해역은 동쪽으로는 로스해 환류를 포함하고, 북쪽으로는 겨울에 해빙이 형성되는 곳까지 해당된다(Budillon et al. 2011). 로스해의 수괴는 크게 남극표층수(Antarctic Surface Water), 순환심층수(Circumpolar Deep Water), 남극저층수(Antarctic Bottom Water) 및 대륙붕수(Shelf Water)로 구성된다(Jacobs 1991). 로스해의 대륙사면을 따라 서쪽으로 흐르는 남극사면류가 발달하고, 이를 따라 흐르던 고온-고염의 순환심층수가 로스해의 대륙붕으로 유입되어 대륙붕수 또는 남극표층수와 혼합된다(Fig. 1; Jacobs 2004; Orsi and Wiederwohl 2009). 대륙붕수는 빙붕에 의해 냉각되어 빙붕 아래로 침강한 뒤 로스해의 북서쪽 대륙사면을 통해 빠져나가 해저에 도달하는 남극저층수를 형성한다(Orsi et al. 1999).

로스해 대륙붕의 표층퇴적물은 주로 규조 연니와 빙해양 잔류퇴적물로 구성된다(Langone et al. 1998). 빙해양 잔류퇴적물은 저층 해류에 의해 해저 퇴의 퇴적물들이 재이동하여 퇴적된다(Anderson et al. 1991). 규조 연니는 표층해수에 형성되는 폴리냐(polynya)와 계절적인 해빙에 의한 식물플랑크톤의 번성에 의하여 퇴적된다(Arrigo and van Dijken 2004). 겨울동안 로스해의 표층은 대부분 해빙으로 덮여 있고 극히 적은 면적의 폴리냐에서 생물의 생산에 의한 퇴적물이 공급된다(Arrigo et al. 1998). 봄과 여름에 해빙이 소멸하기 시작하면서 로스해의 서쪽에서 식물플랑크톤(*Phaeocystis antarctica*)이 번성하고, 해빙이 완전히 소멸하면 규조류(*Nitzschia curta*)가 번성하여 많은 생물 기원 퇴적물이 공급된다(Smith and Nelson 1985; Arrigo et al. 1998; Arrigo and van Dijken 2004).

3. 시료 및 분석

코어캐쳐를 포함한 길이 241 cm의 중력코어 KI-13-GC2를 로스해의 이젤린 퇴 서쪽에 위치한 중앙분지의 정점 KI-13-C2(71°52.5'S, 177°48.1'W, 수심 1,800 m)에서 2013년 아라온호를 이용한 남극탐사(ANA03B)동안 채취하였다(Fig. 1). 이탈리아 트리에스테대학 실험실에서 코어를 절개하였고, 실험을 위해 2 cm 간격으로 퇴적물 부시료를 채취하였다.

대자율(magnetic susceptibility; MS)은 이탈리아 국립연구협회- 해양과학연구센터(CNR-ISMAR)에서 Bartington 사의 MS-2C 대자율 측정기를 사용하여 2 cm 간격으로 측정하였다. 입도분석은 이탈리아의 트리에스테대학에서 8 cm 간격으로 진행되었으며, 과산화수소를 사용하여 유기물질을 제거한 뒤 남은 퇴적물을 2 mm 체를 사용하여 분리하였다. 이후, Malvern Mastersizer Laser Analyzer를 이용하여 2 mm 이하 퇴적물의 입도를 측정하였다. 모래와 실트, 점토의 분류는 Friedman and Sanders (1978)의 방식을 사용하였다.

세립질 퇴적물에서 총 24개의 시료를 채취한 후 경상대학교에서 점토광물 조성을 분석하였다. 먼저 12%의 과산화수소를 이용하여 유기물을 제거한 이후 63 μm 체를 사용한 습식체질을 통해 사질 퇴적물을 분리하였다. 63 μm 이하의 입자에 확산제인 2% 칼곤(Calgon, sodium hexametaphosphate) 용액을 50 ml 넣어준 뒤 증류수를 500 ml까지 채운 후, Stokes' law를 이용하여 2 μm 이하의 입자를 추출하였다. 추출한 입자는 원심분리기로 농축시킨 후 Stokke and Carson (1973)의 슬라이드 글라스 위에 얇게 도포하는 방식(smear on slide)으로 방향성 시료를 제작하여 자연건조시켰다. 건조된 슬라이드와 함께 60°C에서 24시간 동안 에틸렌글리콜(Ethylene glycol) 처리된 슬라이드를 X-선 회절분석기(Siemens/Brucker D5005)를 이용하여 점토광물을 동정하고 반정량적 함량을 분석하였다. X-선 회절분석은 흑연 단색화된 파장(CuKα = 1.5406Å)을 사용하여 35 mA, 40 kV 조건 아래에서 발산슬릿은 1.0°, 수광슬릿은 0.6°로 3–30° 2θ 범위를 분석하였다. 점토광물의 동정은 자연건조 슬라이드와 에틸렌글리콜 처리된 슬라이드의 X-선 회절분석도 상에서 17Å의 피크를 스멕타이트, 10Å의 피크를 일라이트 그리고 7Å의 피크를 녹니석+카올리나이트로 확인하고 각각의 면적을 구했다. 피크의 면적은 바탕선(base line) 상에서 피크의 양 끝 지점을 이어서 설정한 뒤, 구적계(Digitizing Area-liner MT-10S, ±0.1%)를 사용하여 계산하였다. 피크 면적에 일정한 가중치(weighting factor; 스멕타이트 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 회절분석도 상에서 카올리나이트의 3.58Å 피크와 녹니석의 3.54Å 피크의 면적의 비를 통해서 계산되었다.

4. 결 과

KI-13-GC2의 퇴적물은 빙운퇴적물(ice-rafted debris: IRD)을 포함하며 점토에서 모래 크기의 입자로 구성되어 있다(Fig. 2). 코어 상부에서 밝은 갈색의 퇴적물이 나타나며, 아래로 회색의 퇴적물과 밝은 갈색 퇴적물이 교호하며 나타난다. 모래 입자의 함량은 일반적으로 회색 퇴적물에서 높게 나타나며, 갈색 퇴적물 구간의 상부인 10 cm와 90 cm에서 급격하게 증가한다. 대자율은 모래 입자를 포

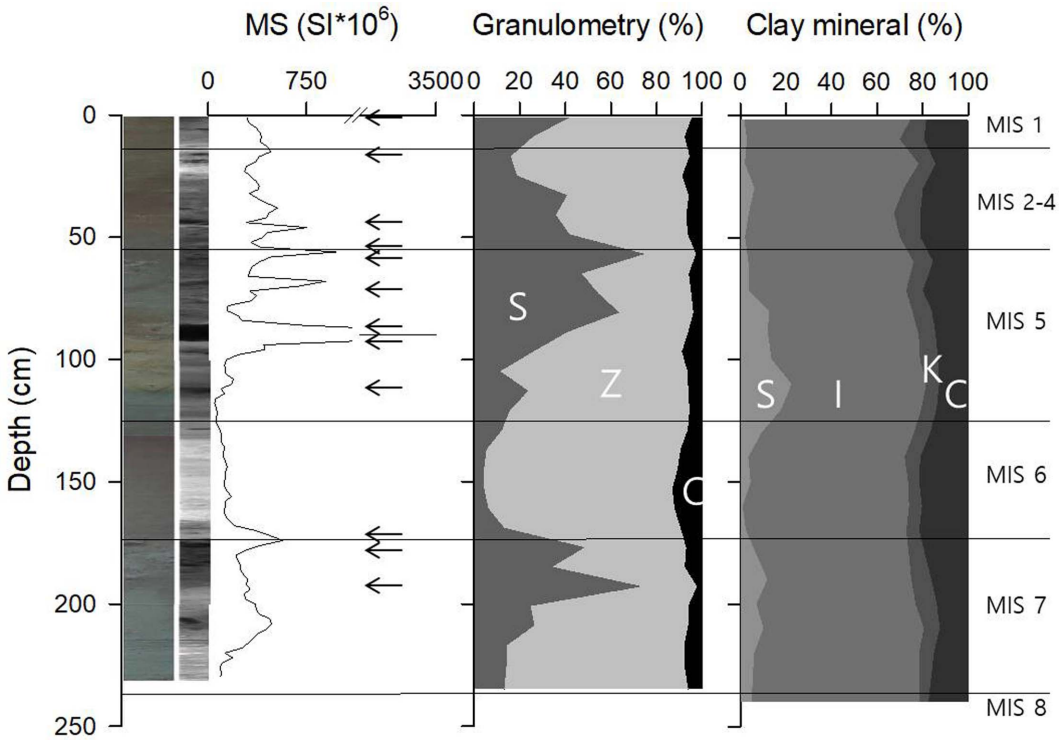

Fig. 2. Photograph of gravity core KI-13-GC2 with downcore variation of magnetic susceptibility, granulometry, and clay mineral compositions. Arrows represent the occurrence of IRD (ice-rafted debris). (MS: magnetic susceptibility, S: sand, Z: silt, C: clay, S: smectite, I: illite, K: kaolinite, C: chlorite)

함한 조립질 퇴적물의 함량 변화와 비슷하게 변동하지만 최상부와 190 cm 부근에서 모래 입자의 함량은 증가하지만 대자율은 증가하지 않는다. 대자율의 큰 이상값이 나타나는 90 cm 부근에서 수 cm 크기의 빙운퇴적물들이 확인되었다. 전체적으로 간빙기 퇴적물에서 빙하기보다 모래 입자와 빙운퇴적물의 함량과 대자율이 높게 나타난다. 회색의 빙하기 퇴적물에는 희미한 층리도 관찰된다.

KI-13-GC2의 점토광물 함량은 일라이트(59.1–76.2%)가 가장 우세하며, 녹니석(12.4–21.4%), 카올리나이트(4.1–11.6%), 스멕타이트(1.2–22.6%)의 순서로 나타났다(Fig. 2). 일라이트는 15% 이상의 큰 변화를 보이지만, 코어 전체적으로 빙하기-간빙기에 따른 변화는 뚜렷하지 않다. 녹니석의 경우 170–140 cm 및 70 cm에서 최상부까지 평균에 비해 상대적으로 높은 값(19.2%)이 나타나고 이외에는 상대적으로 낮은 값(14.6%)을 보인다(Table 1). 스멕타이트는 210–190 cm에서 상대적으로 높은 함량(9.9%)이 나타나고 이후 140 cm에서 급격하게 증가하여 80 cm까지 높은 함량(14.9%)을 보이지만, 대부분의 구간에서는 낮은 함량(3.6%)이 나타난다. 카올리나이트는 일라이트와 마찬가지로 다른 점토광물에 비해 코어 전체적으로 일정한 값(7.5%)을 유지한다.

Table 1. Average content of clay mineral composition between the interglacial and glacial periods in comparison to all periods (unit: %)

	Smectite	Illite	Kaolinite	Chlorite
Interglacial	9.9	67.5	7.9	15.3
Glacial	4.1	68.7	7.0	19.3
All	7.4	68.1	7.5	17.0

KI-13-GC2의 빙하기 퇴적물의 점토광물 평균 함량은 스멕타이트(4.1%), 일라이트(68.7%), 카올리나이트(7.0%), 그리고 녹니석(19.3%)으로 나타나는 반면, 간빙기 퇴적물의 평균 함량은 스멕타이트(9.9%), 일라이트(67.5%), 카올리나이트(7.9%), 그리고 녹니석(15.3%)으로 나타났다. 따라서 간빙기 퇴적물은 빙하기 퇴적물에 비하여 스멕타이트 함량이 약 6% 증가하고 녹니석의 함량이 약 4% 감소하는 특징을 보인다. 그러나 이러한 차이는 점토광물의 반정량 분석의 오차범위에 가깝기 때문에 실제로 함량의 변화가 나타나는 지는 주의 깊게 해석해야 한다.

5. 토 의

중력코어 KI-13-GC2의 상부는 박스코어와 지화학 자료의 비교에 의해 코아의 최상부가 손실된 것을 확인하였

다(Khim et al. 2017). 탄산염이 부족하여 퇴적물의 유기물을 이용하여 측정된 KI-13-GC2의 코아 최상부의 AMS ^{14}C 연대는 7,109 yr BP으로 코어 상부는 홀로세 퇴적물을 보존한다(Khim et al. 2017). 일반적으로 로스해 표층 퇴적물의 유기탄소로 측정된 AMS ^{14}C 연대는 2,000에서 3,000 yr BP 사이로 측정되며, 퇴적률이 낮은 대륙사면의 퇴적물에서는 5,000에서 10,000 yr BP까지도 측정된다(Domack et al. 1999; Licht et al. 1996). 남극해에서 해양 탄산염 각질의 저장고 효과에 대한 보정은 1,200에서 1,300년이지만, 이 연구에서 측정된 산불용성 유기탄소의 AMS ^{14}C 연대는 지역적인 불확실성과 높은 변동성(1,900–3,000년) 때문에 연대보정을 하지 않았다(Andrews et al. 1999). Khim et al. (2017)은 AMS ^{14}C 연대와 코어 퇴적물의 지화학 분석자료를 이용하여 총유기탄소와 생규소 함량이 뚜렷한 증감의 반복을 확인하고 KI-13-GC2의 층서를 빙하기-간빙기로 구분하였다.

로스해 대륙붕에서 일반적으로 암설류나 저탁류에 의해 운반된 쇄설성 퇴적물의 대자율은 비교적 높은 값을 보이며, 후빙기 또는 간빙기에 빙운퇴적물을 포함하고 모래 입자의 함량이 50% 이상인 퇴적물에서도 대자율이 높게 측정된다(Licht et al. 1999). 로스해 대륙붕의 현생 퇴적물은 전체적으로 실트 입자가 주를 이루며 빙운퇴적물의 함량이 낮고 대자율이 낮다(Licht et al. 1999; Salvi et al. 2006). 후빙기와 간빙기에 온난한 기온과 해수면의 상승으로 인한 활발한 빙하 분리(calving)는 많은 빙산을 생성하여 조립한 빙운퇴적물이 남극의 대륙주변부에 많이 운반하고 퇴적된다(Grobe and Mackensen 1992). 코어 KI-13-GC2에서 상대적으로 모래입자와 대자율이 간빙기 퇴적물에서 증가하며(Fig. 2), 간빙기에 활발해진 빙하 분리에 의하여 많은 빙운퇴적물이 중앙분지 지역으로 공급된 것으로 해석된다.

해양퇴적물에 포함된 스멕타이트는 자생 및 쇄설기원으로 구분되며, 일반적으로 해저에서 발생하는 화산유리나 화산암의 화학적 변질작용(halmyrolysis)을 통하여 자생적 스멕타이트가 생성되는 것으로 알려져 있다(Chamley 1989; Robert and Chanmley 1991). 반면, 쇄설성 스멕타이트는 온난 습윤한 환경에서 화성암의 화학적 풍화에 의해 생성되고 해양으로 유입된다(Chamley 1989). 남극 대륙에서는 남극 빙상의 형성 이후 화학적 풍화보다 물리적 풍화가 우세하게 나타나기 때문에, 남극종단산맥에서 화학적 풍화를 통한 스멕타이트의 공급은 거의 없으며 주로 화산암의 풍화 및 침식에 의한 것으로 알려져 있다(Ehrmann et al. 1992; Ehrmann 1998). 일라이트는 남극종단산맥에 분포하는 비콘 누층군(Beacon Supergroup)에서 화성암과 운모군(mica group)을 포함한 암석 또는 남극종단산맥의 노출된 결정질암의 물리적 풍화작용에 의해서 주로 공급된다(Chamley 1989; Ehrmann et al. 2005, 2011; Fagel 2007). 카올리나이트의 경우, 온대나 열대에서 습한 기후에 의한 화학적 풍화작용에 의하여 생성되는 것으로 알려져 있기 때문에 극지 환경에서는 거의 생성되지 않는다. 남극해의 대륙주변부로 공급되는 카올리나이트는 남극빙하가 출현하기 이전에 화학적 풍화가 활발했던 올리고세 초기에 형성되어 현재 빙하에 의한 물리적 풍화를 통해 공급된다(Ehrmann et al. 1992; Dingle and Lavelle 1998; Forsberg et al. 2008; Welke et al. 2016). 녹니석은 일반적으로 남극 대륙의 녹니석을 포함하고 있는 변성암과 염기성암에서 저에너지의 물리적 풍화에 의해 공급된다(Chamley 1989; Ehrmann et al. 2011).

남극 대륙에서 점토광물의 기원지 모암에 대한 연구는 두꺼운 대륙빙상으로 인하여 수행이 거의 불가능하며 제한적으로 수행되었다. 또한, 남극의 두꺼운 빙상은 화학적 풍화를 방해하는 요인으로 주로 물리적 풍화가 점토광물의 기원지 변화를 일으키는 주요한 역할을 한다(Salvi et al. 2006; Hillenbrand et al. 2009; Ehrmann et al. 2011). Ehrmann et al. (2011)은 남극반도의 아문젠해 대륙주변부에 분포하는 퇴적물의 점토광물 조성의 차이에 관한 연구에서 카올리나이트는 주로 남극빙상에 덮인 버드빙저분지(Byrd Subglacial Basin)와 마리버드랜드(Marie Byrd Land)에 분포하는 카올리나이트를 포함한 퇴적암으로부터 아문젠해의 서쪽과 중앙 지역으로 공급되고, 일라이트는 벤틀리 빙저골(Bentley Subglacial Trench)에서 그리고 스멕타이트는 동쪽의 엘스워스랜드(Ellsworth Land)의 아봇빙붕(Abbot Ice Shelf)과 코스그로브빙붕(Cosgrove Ice Shelf)에서 융빙수에 의해 각각 아문젠해의 동쪽 지역으로 공급되며, 녹니석은 아문젠해의 대륙주변부에서 전체적으로 비슷한 함량이 분포하며, 남극 대륙의 기반암에서 빙하에 의해 대륙주변부로 공급되는 것으로 보고하였다.

로스해 중앙분지에서 채취한 코어 KI-13-GC2의 점토광물은 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 그리고 스멕타이트로 구성된다(Fig. 2). 기존 연구 결과에 따르면 로스해 대륙붕으로 공급되는 스멕타이트는 빅토리아 연안에 올리고세에 형성된 맥머도 화산군에서 공급되는 것으로 보고되었다(Kyle 1990; Ehrmann et al. 1992; Setti et al. 1998, 2000). 일라이트와 녹니석은 주로 남극빙상 아래의 남극종단산맥의 기반암이나 퇴적암에서 융빙수를 통해 로스해 대륙붕으로 공급되는 것으로 추정된다(Smellie 1998; Ehrmann et al. 2005). 카올리나이트의 경우, 로스해에서의 기원지에 대한 연구는 부족한 실정이지만, 카올리나이트를 함유하고 있는 남극빙상 아래의 고토양 또는 퇴적암에서 공급되는 것으로 생각된다. 따라서 로스해 대륙주변부에 위치한 중앙분지의 점토광물들도 대부분 남극빙상 아래의 남극종단산맥의 기반암이나 퇴적암 그리고 맥

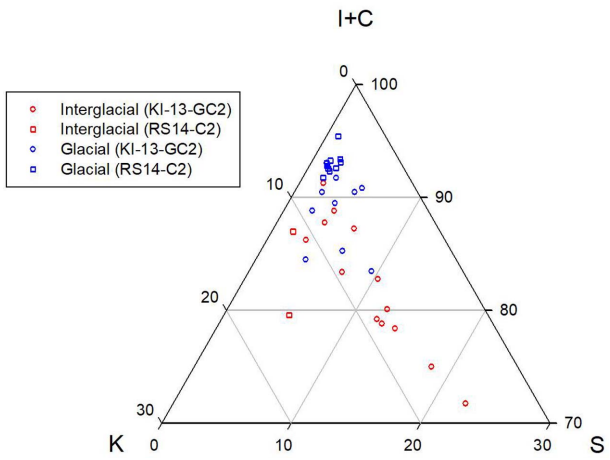

Fig. 3. Ternary diagram showing the difference of clay mineral compositions between the glacial and interglacial periods of cores KI-13-GC2 located at the western continental margin and RS14-C2 located at the eastern continental margin, respectively (I: illite, C: chlorite. K: kaolinite, S: smectite)

머도 화산군이 세립퇴적물의 기원으로 해석된다.

KI-13-GC2의 점토광물 조성 중에서 일라이트와 카올리나이트는 간빙기와 빙하기 사이에 큰 변화가 나타나지 않지만, 그러나 스멕타이트 함량은 빙하기에 감소하며, 녹니석의 함량은 증가한다(Fig. 3, Table 1). 그러나 코아 상부의 홀로세(MIS 1) 구간은 코아 최상부의 손실로 인하여 이러한 특성이 뚜렷하게 관찰되지 않는다. 스멕타이트는 간빙기에 빙상의 후퇴로 인해 로스해 대륙붕 서쪽의 빅토리아 연안에 위치한 맥머도 화산군에서 기원한다(Fig. 4a). 로스해의 대륙붕에서 대륙사면을 지나 외해로 빠져나가는 해류에 의해 스멕타이트가 중앙분지로 공급된다(Orsi et al. 1999). 한편 빙하기동안 빙상의 전진으로 인해 로스해의 대륙붕에서 대륙사면을 지나 외해로 흐르는 해류가 약화되어 중앙분지로 운반되는 스멕타이트 함량이 감소되었을 것이다(Fig. 4b). 중앙분지에서 빙하기동안 증가된 함량을 보이는 녹니석의 경우, 페넬(Pennell) 골에서 발표된 Salvi et al. (2006)의 결과와 유사하다. 이들의 연구결과를 고려하면 빙하기에 대륙붕으로 진출한 로스 빙상에 의하여 남극종단산맥으로부터 녹니석의 공급이 로스해 대륙붕으로 더 많이 공급되었으며, 중앙분지 역시 그 영향이 증가된 것으로 추정된다. 전체적으로 가장 높은 함량을 보이는 일라이트는 남극 대륙의 남극종단산맥의 기반암이 빙하의 침식과 융빙수에 의하여 로스해의 중앙분지로 꾸준하게 공급되기 때문인 것으로 해석된다. 카올리나이트 역시 로스해 남쪽에 위치한 것으로 추정되는 카올리나이트를 포함한 퇴적암에서 지속적으로 공급된 것으로 추정된다. 따라서 로스해 중앙분지로 공급되는 점토광물의 기원지는 전체적으로 빙하기와 간빙기에 큰 변화가 없으며 남극종단산맥으로부터 로스해 외해로 점토광물이 운반되는 기작에 의하여 점토광물의 조성이 변화하는 것으로 제안된다(Fig. 4).

하 등 (2018)은 로스해 대륙주변부의 동쪽 대륙사면 퇴적물의 점토광물 조성연구에서 로스해 서쪽 대륙주변부의 중앙분지와 마찬가지로 동쪽 대륙주변부에서도 일라이트(61.8–76.7%)가 가장 우세하고, 녹니석(15.7–21.3%), 카올리나이트(3.6–15.4%), 스멕타이트(0.9–5.1%)로 보고하

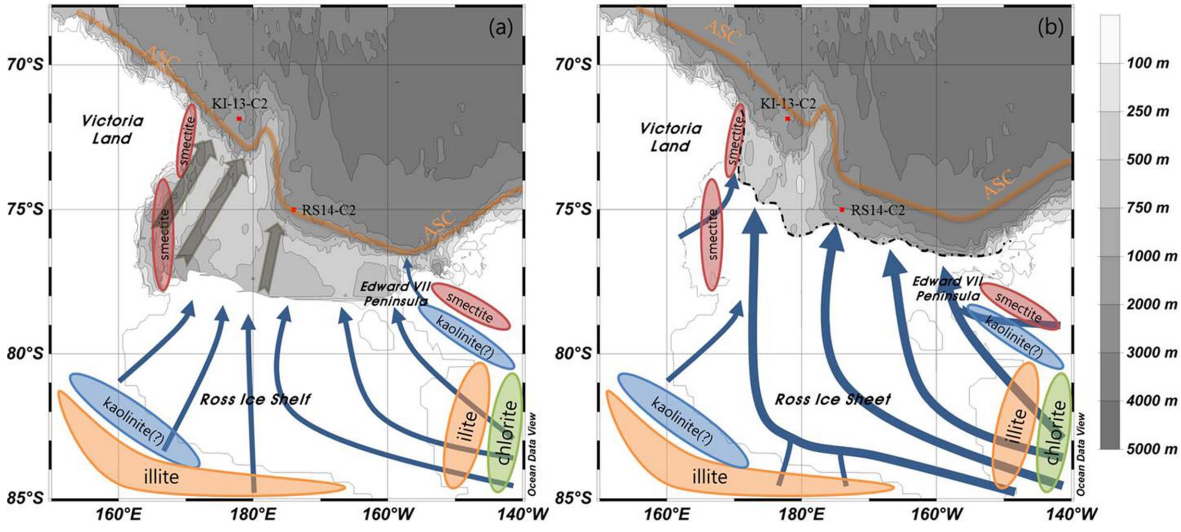

Fig. 4. A schematic model showing transport pathways of the clay minerals in the Ross Sea. (a) interglacial period and (b) glacial period

였다. 간빙기에 점토광물 함량은 대륙주변부 동쪽과 서쪽에서 공통적으로 스멕타이트가 증가한다(Fig. 3). 로스해 동쪽 대륙주변부에서 스멕타이트 함량의 증가는 로스해 동쪽의 마리버드랜드에서 공급되어 남극사면류를 따라 운반되었으며(하 등, 2018), 서쪽 대륙주변부에서 스멕타이트 함량의 증가는 로스해 서쪽의 맥머도 화산군에서 공급되어 내대륙붕에서 외해로 흘러나가는 해류에 의해 운반된 것으로 추정된다(Fig. 4a). 따라서 스멕타이트의 기원지는 지역적으로 다르게 나타난다. 반면, 빙하기에는 동쪽과 서쪽 대륙주변부 모두 녹니석의 함량이 증가한다(Fig. 3). 이는 빙하기에 대륙붕까지 진출한 로스 빙상의 영향에 의하여 남극종단산맥으로부터 대륙주변부로 녹니석의 운반이 증가한 것으로 추정된다(Fig. 4b). 더불어 간빙기에 대륙붕에 퇴적된 녹니석이 풍부한 퇴적물들이 빙상의 발달에 의해 침식과 재동되어 중앙분지로 운반되어 재퇴적되었을 것이다.

6. 결 론

로스해 서쪽 대륙주변부에 위치한 중앙분지에서 획득된 중력코어 KI-13-GC2에서 대자율, 입도분석, 그리고 점토광물 조성을 통해 빙하기와 간빙기의 세립 퇴적물 기원지 변화를 파악하고, 로스해 동쪽 대륙주변부와 점토광물 조성의 차이를 통해 동쪽과 서쪽의 기원지를 확인하였다. 로스해 중앙분지 퇴적물의 점토광물 함량은 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트의 순서로 나타난다. 일라이트와 카올리나이트 함량은 빙하기-간빙기의 차이가 보이지 않지만, 빙하기에 녹니석 함량은 증가하고 스멕타이트 함량은 감소한다. 이러한 차이는 빙하기에 남극종단산맥의 기반암으로부터 대륙붕까지 진출한 빙상에 의해 녹니석의 공급이 상대적으로 증가한 것을 지시한다. 더불어, 빙상의 발달로 인해 로스해 서쪽에 위치한 맥머도 화산군에서 외해로 흐르는 해류에 의해 중앙분지로 스멕타이트의 운반이 감소했기 때문이다. 로스해 서쪽 대륙주변부에 위치한 중앙분지에 퇴적되는 점토광물의 기원지는 전체적으로 빙하기와 간빙기에 큰 변화가 없으며 빙하기-간빙기에 성장과 후퇴를 반복하는 빙상에 의해 점토광물의 운반기작이 변화되어 함량 차이가 발생한다. 로스해 서쪽과 동쪽의 대륙주변부에서 일라이트의 함량이 공통적으로 우세하며, 이는 두 지역 모두 남극종단산맥에서 일라이트가 공급된 것을 지시한다. 반면, 간빙기에 증가하는 스멕타이트는 동쪽 대륙주변부에서는 남극사면류에 의해 로스해 동쪽의 마리버드랜드에서 운반되고, 서쪽 대륙주변부에서는 맥머도 화산군에서 공급되어 대륙붕에서 외해로 흐르는 해류에 의해 운반되기 때문에 서로 다른 기원지에 의해 조절된다.

사 사

코어퇴적물 획득에 도움을 주신 한국극지연구소 아라온호 승조원들과 문흥수 기술원께 감사드립니다. 논문을 세심히 심사해 주신 두 분의 심사위원들께 감사를 드립니다. 이 연구는 한국연구재단 국제화기반조성사업(한-이태리 협력기반조성사업; 2019K1A3A1A25000116)과 한국극지연구소(PE19030)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

김성한, 조현구, 김부근 (2011) 마지막 빙하기 동안 베링해 알류샨 분지 북부 지역의 점토광물 조성 변화. 한국광물학회지 **24**:19–29

하상범, 김부근, 조현구, 에스터 콜리자 (2018) 남극 로스해 펜넬-이젤린 퇴 동쪽 대륙사면의 코어 RS14-GC2의 점토광물의 기원지 연구. 한국광물학회지 **31**:1–12

Anderson JB, Brake CF, Myers NC (1984) Sedimentation on the Ross Sea continental shelf, Antarctica. Mar Geol **57**:295–333

Andrews JT, Cunningham WL, Domack EW, Jennings AE, Jull AT, Leventer A, Licht KJ (1999) Problems and possible solutions concerning radiocarbon dating of surface marine sediments, Ross Sea, Antarctica. Quaternary Res **52**:206–216

Arrigo KR, van Dijken GL (2004) Annual changes in sea-ice, chlorophyll a, and primary production in the Ross Sea, Antarctica. Deep-Sea Res Pt II **51**:117–138

Arrigo KR, Weiss AM, Smith Jr WO (1998) Physical forcing of phytoplankton dynamics in the southwestern Ross Sea. J Geophys Res-Oceans **103**:1007–1021

Bindschadler R (1998) Monitoring ice sheet behavior from space. Rev Geophys **36**:79–104

Biscaye PE (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. Geol Soc Am Bull **76**:803–832

Bonaccorsi R, Brambati A, Busetti M, Fanzutti GP (2000) Relationship among X-ray lithofacies, magnetic susceptibility, P-Wave velocity and bulk density in core ANTA95-89C (Ross Sea, Antarctica): First results. Terra Ant Rept **4**:185–198

Budillon G, Castagno P, Aliani S, Spezie G, Padman L (2011) Thermohaline variability and Antarctic bottom water formation at the Ross Sea shelf break. Deep-Sea Res Pt I **58**:1002–1018

Chamley H (1989) Clay sedimentology. Springer, Berlin, 623 p

Davey FJ (1981) Geophysical studies in the Ross Sea region. J Roy Soc New Zeal **11**:465–479

Denton GH, Hughes TJ (2002) Reconstructing the Antarctic ice sheet at the Last Glacial Maximum. Quaternary Sci Rev **21**:193–202

Dingle RV, Lavelle M (1998) Antarctic Peninsular cryosphere: Early Oligocene (c. 30 Ma) initiation and a revised glacial chronology. J Geol Soc London **155**:433–437

Domack EW, Jacobson EA, Shipp S, Anderson JB (1999) Late Pleistocene-Holocene retreat of the West Antarctic Ice-Sheet system in the Ross Sea: Part 2—sedimentologic and stratigraphic signature. Geol Soc Am Bull **111**:1517–1536

Ehrmann WU (1998) Implications of late Eocene to early Miocene clay mineral assemblages in McMurdo Sound (Ross Sea, Antarctica) on paleoclimate and ice dynamics. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol **139**:213–231

Ehrmann WU, Mackensen A (1992) Sedimentological evidence for the formation of an East Antarctic ice sheet in Eocene/Oligocene time. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol **93**:85–112

Ehrmann WU, Graham AG, Hillenbrand CD, Kuhn G, Larter RD, Smith JA (2011) Provenance changes between recent and glacial-time sediments in the Amundsen Sea embayment, West Antarctica: Clay mineral assemblage evidence. Ant Sci **23**:471–486

Ehrmann WU, Melles M, Kuhn G, Grobe H (1992) Significance of clay mineral assemblages in the Antarctic Ocean. Mar Geol **107**:249–273

Ehrmann WU, Setti M, Marinono L (2005) Clay minerals in Cenozoic sediments off Cape Roberts (McMurdo Sound, Antarctica) reveal palaeoclimatic history. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol **229**:187–211

Fagel N (2007) Chapter four clay minerals, deep circulation and climate. Develop Mar Geol **1**:139–184

Forsberg CF, Florindo F, Gruetzner J, Venuti A, 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. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol **260**: 184–201

Franke D, Ehrmann WU (2010) Neogene clay mineral assemblages in the AND-2A drill core (McMurdo Sound, Antarctica) and their implications for environmental change. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol **286**:55–65

Friedman GM, Sanders JE (1978) Principles of sedimentology. Wiley, New York, 792 p

Giorgetti G, Talarico F, Sandroni S, Zeoli A (2009) Provenance of Pleistocene sediments in the ANDRILL AND-1B drillcore: Clay and heavy mineral data. Global Planet Change **69**:94–102

Griffin JJ, Windom H, Goldberg ED (1968) The distribution of clay minerals in the world ocean. Deep-Sea Res **15**:433–459

Grobe H, Mackensen A (1992) Late Quaternary climatic cycles as recorded in sediments from the Antarctic continental margin. Ant Res Ser **56**:349–376

Hambrey MJ, Ehrmann WU, Larsen B (1991) Cenozoic glacial record of the Prydz Bay continental shelf, East Antarctica. In: Barron J, Larsen B (eds) Proceedings of Ocean Drilling Program, pp 77–132

Hillenbrand CD, Ehrmannnn W, Larter RD, Benetti S, Dowdeswell JA, Cofaigh CÓ, Graham AGC, Grobe H (2009) Clay mineral provenance of sediments in the southern Bellingshausen Sea reveals drainage changes of the West Antarctic Ice Sheet during the Late Quaternary. Mar Geol **265**:1–18

Hillenbrand CD, Ehrmann WU (2001) Distribution of clay minerals in drift sediments on the continental rise west ofthe Antarctic Peninsula, ODP Leg 178, Sites 1095 and 1096. In: Barker PF, Camerlenghi A, Acton GD, Ramsay ATS (eds) Proceedings of Ocean Drilling Program, pp 1–29

Howat IM, Domack EW (2003) Reconstructions of western Ross Sea palaeo-ice-stream grounding zones from high-resolution acoustic stratigraphy. Boreas **32**:56–75

Jacobs SS (1991) On the nature and significance of the Antarctic Slope Front. Mar Chem **35**:9–24

Jacobs SS (2004) Bottom water production and its links with the thermohaline circulation. Ant Sci **16**:427–437

Khim BK, Colizza E, Hong JK (2017) Paleoceanographic changes in the continental slope in the Central Basin of the Ross Sea since the last glacial. In: Abstract of Past Antarctic Ice Sheet Dynamics (PAIS) Conference, Trieste, 10–15 Sept 2017

Kyle PR (1990) A McMurdo volcanic group western Ross embayment. In: LeMasurier WE, Thompson JW, Baker PE, Kyle PR, Rowley PD, Smellie JL, Verwoerd WJ (eds) Volcanoes of the Antarctic Plate and Southern Oceans. pp 18–145

Langone L, Frignani M, Labbrozzi L, Ravaioli M (1998) Present-day biosiliceous sedimentation in the northwestern Ross Sea, Antarctica. J Mar Syst **17**:459–470

Licht KJ, Andrews JT, Dunbar NW, Jennings AE (1999) Distinguishing subglacial till and glacial marine diamictons in the western Ross Sea, Antarctica: Implications for a last glacial maximum grounding line. Geol Soc Am Bull **111**:91–103

Licht KJ, Andrews JT, Jennings AE, Williams KM (1996) Chronology of late Wisconsin ice retreat from the western Ross Sea, Antarctica. Geology **24**:223–226

Liu Z, Trentesaux A, Clemens SC, Colin C, Wang P, Huang B, Boulay S (2003) Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: Implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years. Mar Geol **201**:133−146

Lucchi RG, Rebesco M, Camerlenghi A, Busetti M, Tomadin L, Villa G, Persico D, Morigi C, Bonci MC, Giorgetti G (2002) Mid-late Pleistocene glacimarine sedimentary processes of a high-latitude, deep-sea sediment drift (Antarctic Peninsula Pacific margin). Mar Geol **189**:343−370

Orsi, AH, Bullister, JL, Johnson GC (1999) Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water. Prog Oceanogr **43**:55−109

Orsi AH, Wiederwohl CL (2009) A recount of Ross Sea waters. Deep-Sea Res Pt II **56**:778−795

Petschick R, Kuhn G, Gingele F (1996) Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography. Mar Geol **130**:203−229

Robert C, Chamley H (1991) Development of early Eocene warm climates, as inferred from clay mineral variations in oceanic sediments. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol **89**:315−331

Robert C, 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 of Ocean Drilling Program, pp 51−66

Salvi C, Busetti M, Marinoni L, Brambati A (2006) Late Quaternary glacial marine to marine sedimentation in the Pennell Trough (Ross Sea, Antarctica). Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol **231**:199−214

Setti M, Marinoni L, López-Galindo A, Aboud AB (1998) TEM observations and trace element analysis on the clay minerals of the CRP-1 Core (Ross Sea, Antarctica). Terra Ant **5**:621−626

Setti M, Marinoni L, López-Galindo A, Delgado-Hubertas A (2000) Compositional and morphological features of the smectites of the sediments of CRP-2/2A, Victoria Land Basin, Antarctica. Terra Ant **7**:581−587

Shipp S, Anderson JB, Domack EW (1999) Seismic signature of the Late Pleistocene fluctuation of the West Antarctic Ice Sheet system in Ross Sea: A new perspective, Part I. Geol Soc Am Bull **111**:1486−1516

Smith WO, Nelson DM (1985) Phytoplankton bloom produced by a receding ice edge in the Ross Sea: spatial coherence with the density field. Science **227**:163−166

Smellie JL (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 Ant **5**:579−587

Stokke PR, Carson B (1973) Variation in clay mineral X-ray diffraction results with the quantity of sample mounted. J Sediment Petrol **43**:957−964

Welke B, Licht K, Hennessy A, Hemming S, Pierce Davis E, Kassab C (2016) Applications of detrital geochronology and thermochronology from glacial deposits to the Paleozoic and Mesozoic thermal history of the Ross Embayment, Antarctica. Geochem Geophy Geosy **17**:2762−2780

국문참고자료의 영문표기

English translation / Romanization of references originally written in Korean

Kim SH, Jo HG, Khim BK (2011) Changes of clay mineral assemblages in the Northern part of the Aleutian Basin in the Bering Sea during the last Glacial Period. J Miner Soc Kor **24**:19−29

Ha SB, Khim BK, Jo HG, Colizza E (2018) 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. J Miner Soc Kor **31**:1−12

Author's Information

Sangbeom Ha
Ph.D Student, Pusan National University

Boo-Keun Khim
Professor, Pusan National University

Ester Colizza
Professor, University of Trieste

Federico Giglio
Research Scientist, National Research Council-Institute of Polar Science

Hyojin Koo
Ph.D Student, Gyeongsang National University

Hyen Goo Cho
Professor, Gyeongsang National University

Received Aug. 9, 2019
Revised Oct. 4, 2019
Accepted Oct. 4, 2019