한국광물학회지 제 19 권 제 3 호 (2006년 9월)
J. Miner. Soc. Korea, 19(3), 163-169 (September, 2006)

남극 드레이크해협 극전선 남부 해산 퇴적물 코어의 점토광물 및 지구화학적 특성

Clay Mineralogy and Geochemistry of a Sediment Core from the Seamount to the South of Antarctic Polar Front, Drake Passage

정 기 영 (Gi Young Jeong)*

안동대학교 지구환경과학과
(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

요약 : 남극 드레이크해협 극전선 남쪽 해산(수심 2710 m) 퇴적물코어(DP00-02, 코아길이 284 cm)의 화학조성과 점토광물분석을 실시하여 빙기-간빙기 순환과 관련된 고해양학적 분석을 실시하였다. 구성 점토광물은 전반적으로 스멕타이트가 우세하고 일라이트와 녹니석이 보다 적은 양으로 함유되어 있었다. 그러나 캐올리나이트는 거의 검출되지 않았다. 최하부에서 Marine Isotope Stage (MIS) 4와 5의 경계에 해당하는 170 cm 정도까지의 구간에서 상부로 갈수록 스멕타이트의 함량이 10% 정도 서서히 감소하는 경향을 보이고, 그 이상에서는 함량이 거의 일정하다. 점토광물 조성의 일정성에 비하여 SiO_2, Zr, Cs, Th, REE, K_2O, Al_2O_3는 $CaCO_3$와 상호 대조적이면서 큰 변화를 보인다. 24, 136, 176 cm 깊이에서 SiO_2의 급격한 증가와 $CaCO_3$의 급격한 감소가 관찰되는데, 이 시기에 기원지로 생각되는 남극대륙 빙붕으로부터 ice-rafted debris (IRD)가 다량 공급된 것으로 판단된다. 기타 주원소들, 미량원소, REE의 변화경향은 SiO_2와 유사하지만, Ni, Cu, Ba은 SiO_2와 상관성이 상대적으로 매우 낮은데, 이는 쇄설성 외에 속성과정에서의 재동 또는 해양생산성이 높았던 시기의 규조와 같은 생물기원 쇄설물의 축적과 관련이 있는 것으로 추정된다. 특히 Ba의 경우, SiO_2보다 10~20 cm 정도 지연되어 증가하는 특이한 경향을 보이는데, 이는 빙하후퇴에 이은 생산성의 빠른 증가와 관련된 것으로 보인다.

주요어 : 남극, 퇴적물, 점토광물, 지구화학, 극전선

ABSTRACT :Mineralogy and geochemistry of the sediment core from the seamount (2710 m below the sea level) just south of the Antarctic Polar Front were examined to draw paleoceanographic information in glacial-interglacial cycles. Smectite was most abundant clay mineral associated with illite and chlorite. Its content was slightly higher below 170 cm, suggesting a boundary between isotope stage 4 and 5. Si, Zr, Cs, Th, REE, K_2O, and Al_2O_3 show complete antithetical distribution with respect to $CaCO_3$ through the core. SiO_2 maxima and $CaCO_3$ minima at depths of 24, 136, and 176 cm are probably correlated with massive influx of ice-rafted debris during the advance of

*교신저자: jearth@andong.ac.kr

Antarctic ice shelves. Ni, Cu, and Ba show rather little correlation with SiO_2, suggesting their relation to biogenic debris, precipitation from seawater, or hydrothermal input. Particularly, Ba maxima tend to lag 10～20 cm after SiO_2 maxima, probably due to rapid increase of productivity following deglaciation.

Key words : Antarctica, sediments, clay minerals, geochemistry, polar front

서 론

남극 극전선(polar front)은 차가운 남극수와 상대적으로 따뜻한 아남극수의 경계로서 빙기-간빙기 순환동안 남극 지역의 고기후 및 고해양 환경변화를 이해함에 있어서 매우 중요한 지역이다(Bae *et al.*, 2002, 2003a, 2003b). 빙기-간빙기 기후변동은 극전선의 변동, 즉 남극수의 북쪽 또는 남쪽으로의 이동을 유발하며, 이러한 변화는 그 지역 해양퇴적물에 잘 기록되어 있을 것이다. 코어 DP00-02는 드레이크 해협 60°59.8′S, 65°21.4′W의 수심 2710 m의 해산에서 2000/2001 KARP (Korea Antarctic Research Program) 기간중 R/V Yuzhmorgeologiya 탐사항해 기간 중에 채취되었다. 코어는 차갑고 영양분이 풍부한 남쪽의 남극표층수와 보다 따뜻하고 영양분이 부족한 북쪽의 아남극 표층수를 분리하는 경계인 극전선 직남부에 위치하고 있다(Bae *et al.*, 2003a, 2003b; Pudsey and Howe, 1998). 따라서 코어 채취지점의 퇴적물은 과거 극전선의 위치와 강도의 변화를 기록하고 있다고 볼 수 있다. 이 코아에 대한 고생물학적, 안정동위원소, 지구연대학적 연구(Bae *et al.*, 2003a, 2003b)는 이미 수행된 바 있으므로, 본 연구에서는 주로 광물학적 및 지구화학적 결과를 소개하고자 한다.

시료 및 방법

시료기재

코어 DP00-02는 286 cm 길이의 gravity core로서 170 cm를 경계로 상부의 조립질 IRD가 흔한 회색 또는 암회색(5Y 5/2) 사질니와 그 하부의 IRD가 적은 암갈색 생물교란 괴상니로 크게 구분된다. 최상위 10 cm는 IRD가 적은 점토이다. 자갈 크기의 IRD는 특히 93～98, 125～131, 228～238 cm 구간에서 발견된다. 육안적 관찰에 의하면 퇴적의 불연속면이나 퇴적후 교란작용은 관찰되지 않았다. 부유성 유공충인 N. *pachyderma* (sin.)의 ^{14}C 연대는 0 cm 4566±70, 4 cm 7532±65, 10 cm 10670±100, 35 cm 23430±310로 측정되었다(Bae *et al.*, 2003). 연대측정 결과에 근거하여 MIS1 (0～10 cm), MIS2 (10～35 cm), MIS3 (35～80 cm), MIS4 (80～168 cm), MIS5 (168～284 cm)가 정의된 바 있다 (Bae *et al.*, 2003a, 200b).

연구방법

4 cm 간격으로 채취한 시료들을 50℃에서 24 h 건조한 후, 아게이트 유발에서 광물입자나 암편들이 부서지지 않는 정도로 약하게 휘저어 입자들을 분리시킨 후에 50 mesh 체에 통과시켰다. 통과한 시료 분말은 2 g 정도를 Li-metaborate로 분해한 후, ICP-OES와 ICP-MS로 주원소와 REE를 포함한 미량원소의 화학분석을 실시하였다. 시료에 함유된 $CaCO_3$ 함량측정과 점토광물 분석을 위하여 2 g의 시료를 50 mL PPCO 원심분리관에서 10% 아세트산으로 2번 반복하여 $CaCO_3$를 용해시킨 후, 증류수로 3번 세척하였다. 시료는 50℃에서 건조한 후 무게를 측정하였다. $CaCO_3$를 제거한 시료에서 2 μm 이하의 시료를 분리하여 유리판 위에 정향시편을 준비한 후, Rigaku RINT 2000 기기로 2～35° 범위에서 X-선 회절분석을 실시하였다. 캐올리나이트는 거의 검출되지 않았으므로 스멕타이트, 일라이트, 녹니석의 상대적 함량을 Biscaye (1965)의 방법을 이용하여 반정량분석하였다.

점토광물조성변화

퇴적물내 점토광물로서 스멕타이트가 50～60% 정도로 가장 풍부하게 함유되어 있고, 일라이트가 25～30%, 녹니석이 15～20% 정도 함유되어 있었다(그림 1). 극지역 해양퇴적물의 주요 점토광물은 녹니석이나 일라이트이므로(Cham-

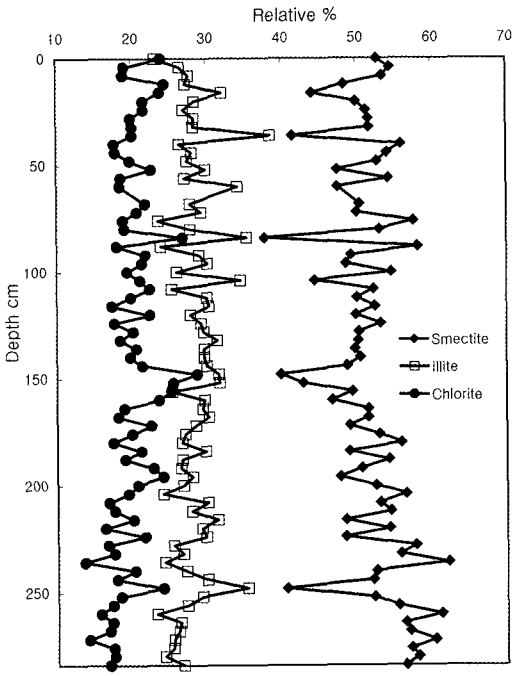

Fig. 1. Vertical variation of the relative abundance of clay minerals (smectite, illite, and chlorite) in the < 2 μm fraction of sediments.

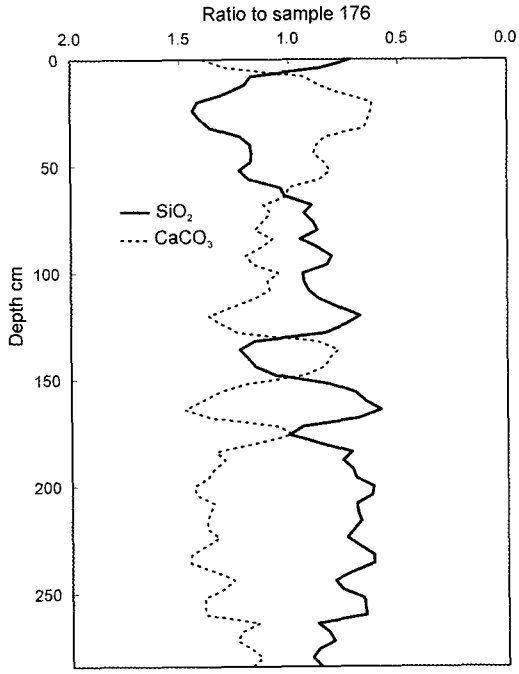

Fig. 2. Vertical variation of $CaCO_3$ and SiO_2 contents. The contents were normalized to the $CaCO_3$ and SiO_2 contents of the sample at depth 176 cm.

ley, 1989; Weaver, 1989), DP00-02 코어의 주요 점토광물이 스멕타이트라는 사실은 이 지역의 해저환경과 관련된 것으로 사료된다. 이 코어는 과거 해령이었던 곳에 형성되어 있는 해산으로 대부분 현무암질 화산암으로 형성되어 있을 것으로 생각된다. 따라서 스멕타이트의 다량 생성은 일차적으로는 해산을 구성하는 화산쇄설물의 변질작용과 관련있는 것으로 사료된다. 그러나 사우스세틀랜드 제도의 점토광물 연구에 의하면, 이 제도의 기반암 및 토양에 다량의 스멕타이트가 생성되어 있음이 밝혀진 진바 있고, 주변 해저 퇴적물에도 스멕타이트가 다량 함유되어 있었다(Jeong and Yoon, 2001; Jeong *et al.*, 2004). 이는 광역적으로 남극반도 북부의 브랜스필드 해협 지역의 활발한 화산활동 및 사우스세틀랜드 제도의 3기 현무암질 화산암류의 속성변질 작용과 관련있는 것으로 판단된다(정기영과 윤호일, 2000, 2001, 2002, Jeong *et al.*, 2004). 따라서 해산 퇴적물의 일부 스멕타이트는 남극반도 북단으로 생각되는 기원지에서 화산암의 변질로 생성된 후에 유입되었거나(Zhou and Fyfe, 1989), 퇴적한 화산유리의 속성작용으로 생성되었을 가능성도 있다(Michalopoulos and Aller, 1995; Michalopoulos *et al.*, 2000).

점토광물 상대적 함량의 수직적 변화는 미약하지만 최하부에서 약 170 cm 정도까지는 스멕타이트의 양이 60%에서 50%로 약간 감소하고, 반대로 일라이트의 양은 25%에서 30%로, 그리고 녹니석의 양은 15%에서 20%로 약간 증가하는 경향을 보인다. 그러나 그 이상의 구간에서 점토광물의 상대적 함량에 큰 변화가 보이지 않는다. 코어의 최하부에서 170 cm 까지는 점토가 풍부한 구간이다. 그 이상의 구간은 IRD가 풍부한 사질점토층이다. 스멕타이트의 감소는 IRD의 전반적인 증가로 인한 양적 희석 때문으로 생각되며, 상대적으로 일라이트와 녹니석의 함량이 증가함은 IRD와 함께 운반되어 퇴적된 기원지 암석기원 점토의 증가를 의미하는 것으로 추정된다. 기존 동위원소 연구에서 170 cm를 경계로 하부의 MIS 5와 상부의 MIS 1, 2, 3, 4로 구분된다. 전반적으로 MIS 2, 3, 4는 MIS 5 보다 추운 시기로 IRD가 상대적으로 다

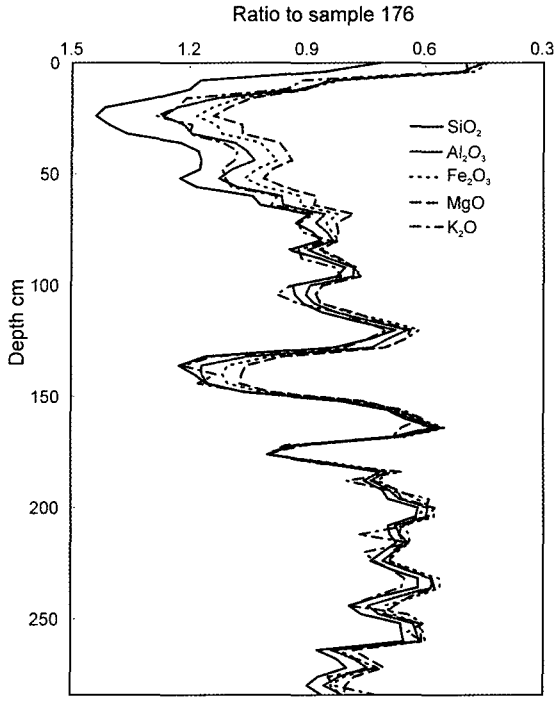

Fig. 3. Vertical variation of the abundance of major element oxides in the sediment core DP00-02. Oxide weight percentages were normalized to the sample at depth 176 cm.

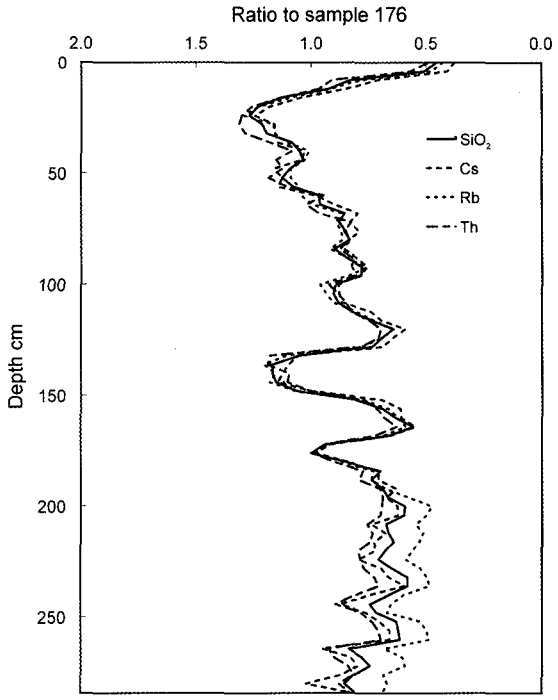

Fig. 4. Vertical variation of the abundance of trace elements (Cs, Rb, Th, and Zn) in the sediment core. Element contents in ppm were normalized to those of the sample at depth 176 cm.

량 공급되었을 것이다. 따라서 점토광물에서 변성암 또는 화성암에 주로 수반되는 일라이트나 녹니석의 함량이 풍화작용, 초기속성작용, 열수변질작용 등의 다양한 과정에 의하여 생성되는 MIS 5보다 높을 것이다. 따라서 점토광물조성 변화에 근거하면 170 cm 깊이는 전반적으로 추운 시기와 따뜻한 시기를 구분하는 중요한 경계이며 기존연구의 MIS 구분과도 부합된다. 그러나 점토광물 조성이 빙기와 간빙기의 변화를 반영하지만 빙하기 내의 세부적인 변화는 반영하지 못하는 것으로 보인다.

화학조성변화

대부분 유공충껍질인 $CaCO_3$의 함량은 29~70 % 사이에서 깊이에 따라 심하게 변화한다. 24, 136, 176 cm에서 각각 뚜렷한 최소값을 보이는데 이 시기에 고환경의 큰 변화가 있었음을 보여주고 있다(그림 2). 이러한 $CaCO_3$ 함량변화는 SiO_2 함량변화와 정확히 반대의 경향을 보이고 있어서 규산염광물로 이루어진 IRD의 증가와 이로 인한 $CaCO_3$의 상대적 함량감소가 원인인 것으로 보인다(그림 2). 대부분의 주원소 및 미량원소들(Zr, Cs, Th, REE, K_2O, Al_2O_3)이 SiO_2와 유사한 변화경향을 보이고 있지만(그림 3, 4, 5), Ba, Cu, Ni은 SiO_2의 변화경향과 잘 일치하지 않는다(그림 6). Ba는 paleoproductivity를 지시하는 원소로 알려져 있다(Fischer and Wefer, 1999). 그림에서 Ba와 SiO_2 사이의 관계를 잘 관찰하여 보면 Ba의 최대값들이 SiO_2의 최대값들보다 10~20 cm 정도 코어 상부에 위치하는 경향이 있다. 패턴을 좀더 자세히 비교분석해보면 SiO_2가 최대값에서 감소하기 시작하면서 Ba가 증가하기 시작하여 최대값에 이르렀다가 감소하는 경향을 보이고 있다. 퇴적물내 Ba가 paleoproductivity를 반영한다면 이러한 규칙성은 빙하의 후퇴와 IRD의 감소가 paleoproductivity의 갑작스런 증가를 유발한 현상일 가능성이 있으므로 향후 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 예상된다. $CaCO_3$ 함량이 높은 시기와 낮

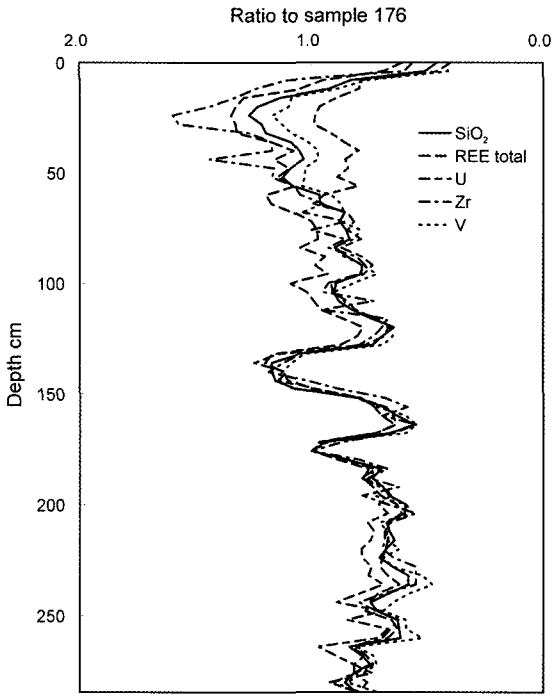

Fig. 5. Vertical variation of the abundance of trace elements (Y, U, Zr, V, Mn, and REE-total) in the sediment core. Element contents in ppm were normalized to the sample at depth 176 cm.

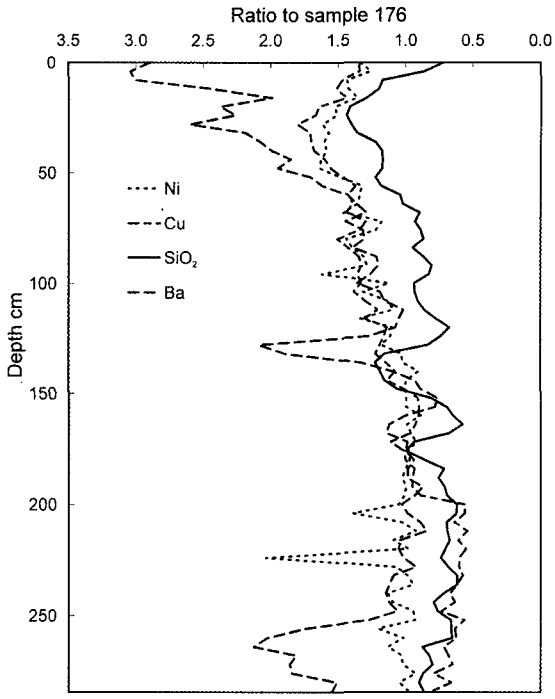

Fig. 6. Vertical variation of the abundance of trace elements (Ni, Cu, and Ba) in the sediment core. Element contents in ppm were normalized to the sample at depth 176 cm. Note poor matching of distribution curve with that of SiO_2.

은 시기의 REE 패턴을 비교하여 보면 $CaCO_3$ 함량이 높은 시료에서 Ce anomaly가 나타나는 것을 제외하면 큰 차이를 보이지는 않는다. Ce anomaly는 해수의 REE 특성으로서 해수로부터 침전된 $CaCO_3$의 REE 특성을 반영하는 것으로 보인다. REE 패턴은 IRD의 규산염광물들의 기원지가 코어를 통틀어 크게 변화하지 않았음을 의미하는 것으로 보인다.

토 의

동일 시료에 대한 산소동위원소 분석에 의하면 빙기중 상대적으로 따뜻한 시기였던 isotope stage 3에서 $\delta^{18}O$이 비정상적으로 작은 값을 가지는 것이 발견되었다(Bae *et al.*, 2003). Bae *et al.* (2003a, 2003b)은 이러한 현상이 이 시기의 비정상적으로 따뜻한 해수온도를 반영하는 것이 아니라 salinity의 감소로 해석하였다. 그리고 그 감소는 보다 따뜻한 Circumpolar DeepWater의 용승으로 인한 남극빙붕으로부터 융빙수의 방출과 관계있는 것으로 해석하였으며, 이 기간 중 IRD의 증가를 남극빙붕들의 급격한 융빙의 증거로 제시하였다. 그러나 본 연구에서 화학분석에 의하면 MIS 2의 24 cm 깊이에서 육성쇄설물함량의 최대, 그리고 $CaCO_3$ 함량의 최소값이 기록된 다음, MIS 4의 120 cm 까지 서서히 감소 또는 증가하는 추세를 보인다. 그리고 MIS 3에서 Bae *et al.* (2003a, 2003b)이 관찰한 산소동위원소 anomaly에 관계되는 육성쇄설물과 $CaCO_3$ 함량의 anomaly는 관찰되지 않았다.

Bae *et al.* (2003a, 2003b)에 의하면 최대 빙하기인 MIS 2기간의 퇴적률이 1.6 cm/1000 yr 인데 반하여, MIS 4의 퇴적률이 5.9 cm/1000 yr에 이르고 있다. 동일 위치의 빙하기 퇴적률이 이와같은 큰 차이를 보이는 원인이 무엇인지에 대해서는 적절한 해석이 부족한 것으로 보인다. 웨델해 대륙연변부의 퇴적물 연구에 의하면 (Grobe *et al.*, 1990), 빙기에는 낮은 생산성과 빙산형성으로 퇴적률이 매우 낮은 수준으

로 유지되다가 간빙기 초기에 해수면이 상승하면서 빙붕의 급격한 파괴로 인한 IRD의 대량발생과 급격한 생산성 증가로 퇴적률이 크게 증가하는 것으로 알려져 있다. 그러나 $CaCO_3$ 함량과 쇄설성광물의 함량이 정확히 상호 부의 관계를 가지고 있으므로 IRD는 빙하후퇴기의 융빙보다는 빙하의 확장과 관계가 있는 것으로 보인다.

결 론

전반적으로 스멕타이트가 상대적으로 가장 우세하며 일라이트와 녹니석의 순서로 함유되어 있고, 캐올리나이트는 거의 검출되지 않았다. 퇴적물에 높게 함유된 스멕타이트는 해산을 구성하는 현무암질 화산암의 변질작용 또는 남극반도 북단의 화산활동과 관련된 것으로 보인다. 코아 최하부에서 170 cm 정도까지의 구간이 상부보다 스멕타이트의 함량이 높고, 일라이트와 녹니석의 함량이 작아서, 170 cm 깊이는 산소동위원소곡선과 비교하여 MIS 4와 5의 경계로 해석된다. SiO_2, Zr, Cs, Th, REE, K_2O, Al_2O_3과 $CaCO_3$는 정확히 상호 반대되는 경향을 보이므로, 시료의 전체조성은 $CaCO_3$와 쇄설성 규산염광물의 혼합비율에 의하여 결정된다. 24, 136, 176 cm 깊이에서 SiO_2의 급격한 증가와 $CaCO_3$의 급격한 감소가 관찰되는데, 이 시기에 기원지로부터 IRD의 다량 공급된 것으로 판단된다. Ni, Cu, Ba은 SiO_2와 관련성이 상대적으로 매우 낮아서 속성과정에서의 재동, 해수로부터의 침전, 또는 규조 등의 생물성 퇴적물의 유입과 관련이 있는 것으로 보인다. 특히 Ba의 경우, SiO_2보다 10~20 cm 정도 지연되어 증가하는 매우 특이한 경향을 보이는데, 간빙기가 시작되는 시기에 해양생산성의 급격한 증가와 관계있는 것으로 추정된다.

사 사

불비한 원고를 심사하여 주시고 귀중한 조언을 하여 주신 이승엽 박사님과 최헌수 박사님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

정기영, 윤호일 (2000) 남극 사우스셰틀란드 해양퇴적물내 스멕타이트의 특성과 기원. 극지환경특성 및 보존에 관한 연구. 한국해양연구원 연구보고서 BSPP 00001-05- 1329-7, p. 402-430.

정기영, 윤호일 (2001) 남극 사우스셰틀란드 해양퇴적물내 점토입자의 화학조성 및 투과전자현미경적 미세구조. 21세기 기후변화협약 대응책 마련을 위한 남극권 고기후 고해양 변동 연구, 한국해양연구원 연구보고서 BSPP 001-A6-1395-7, p. 430-451.

정기영, 윤호일 (2002) 남극 사우스셰틀란드 해양퇴적물내 스멕타이트의 광물학적 특성과 기원. 한국광물학회지, 15, p. 22-32.

Bae, S.H., Yoon, H.I., Park, B.-K. and Kang C.Y. (2002) Stable isotope record and depositional environments in the Antarctic Polar Front of Drake Passage, Western Antarctica. Geociences Journal, v. 6, p. 117-123.

Bae, S.H., Yoon, H.I. Park, B.-K. and Kim, Y. (2003a) Late Quaternary stable isotope record and meltwater discharge anomaly events to the south of the Antarctic Polar Front, Drake Passage. Geo-Marine Letters, v. 23, p. 110-116.

Bae, S.H., Yoon, H.I. Park, B.-K., Kim, Y., Bahk, J.J. and Seo, H.S. (2003b) Meltwater discharge anomalies in marine isotope stage 3 from a sediment core in the south of Antarctic Polar Front, Drake Passage. Geosciences Journal, v. 7, p. 73-79.

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, v. 76, 803-832.

Chamley, H. (1989) Clay sedimentology. Heidelberg, Springer-Verlag, 623 p.

Fischer, G. and Wefer, G. (1999) Use of Proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic. Springer-Verlag, 735 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. Geological history of the Polar Ocean: Arctic versus Antarctic, U. Bleil and J. Thiede, eds. NATO ASI Series C. Mathematical and Physical Sciences, v. 308. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, p. 539-572.

Jeong, G.Y. and Yoon, H.I. (2001) The origin of clay minerals in soils of King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica and its implication to the clay mineral compositions of marine Sediments. Journal of Sedimentary Research, v. 71, p. 833-842.

Jeong, G.Y., Yoon, H.I. and Lee, S.Y. (2004) Chemistry and microstructures of clay particles in smectite-rich shelf sediments, South Shetland Islands, Antarctica. Marine Geology 209, 19-30.

Michalopoulos, P. and Aller, R.C. (1995) Rapid clay formation in Amazon delta sediments: Reverse weathering and oceanic elemental cycles. Science 270, p. 614-617.

Michalopoulos, P., Aller, R.C. and Reeder, R.J. (2000) Conversion of diatoms to clays during early diagenesis in tropical, continental shelf muds. Geology 28, p. 1095-1098.

Pudsey, C.J. and Howe, J.A. (1998) Quaternary history of the Antarctic Circumpolar Current: evidence from the Scotia Sea. Marine Geology, v. 83, p. 83-112.

Weaver, C.E. (1989) Clays, muds, and shales. Elsevier, Amsterdam, 819 p.

Zhou, Z. and Fyfe, W.S. (1989) Palagonitization of basaltic glass of DSDP site 335, Leg 37. Textures, chemical composition, and mechanism of formation. American Mineralogist, 74: 1045-1053.

2006년 8월 28일 원고접수, 2006년 9월 22일 게재승인.