

남극 사우스셰틀란드 해양퇴적물내 스멕타이트의 광물학적 특성과 기원

Mineralogical Characteristics and Origins of Smectite in the Marine Sediments around South Shetland Islands, Antarctica

정 기 영 (Gi Young Jeong)* · 윤 호 일 (Ho Il Yoon)**

*안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea,
E-mail: jearth@andong.ac.kr)

**한국해양연구원 극지연구소

(Polar Sciences Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea)

요약 : 남극 해양 퇴적물내 점토광물의 분포와 성인을 조사하기 위하여 사우스셰틀란드(South Shetland) (NCS09)와 앤버스(Anberse)섬(GC98-2) 근해 해저퇴적물 코아(core)와 킹조지(King George)섬 피요르드(fjord)내 퇴적물 코아(A10-01)의 전암분말시료를 대상으로 X선회절분석과 전자현미분석을 실시하여 광물조성의 변화와 점토광물의 화학분석을 시도하였다. 그 결과 NCS09와 GC98-2 코아에서는 깊이별로 큰 변화없이 각각 평균 8.3%와 1.1%, 그리고 A10-01 코아에서는 상부에서 평균 4.7%, 하부에서 평균 1.5% 정도의 스멕타이트(smectite)가 함유되어 있었다. NCS09 코아의 박편관찰에 의하면 황색 또는 황록색의 둥근 점토입자들이 퇴적물내에 흔히 분산되어 있다. 전자현미분석에 의하면 이 점토에는 Fe_2O_3 와 K_2O 가 각각 평균 16.97%와 2.53% 함유되어 있으며, 조성상 함철바이델라이트(ferrian beidellite)에 해당한다. GC98-2의 스멕타이트는 NCS09와 유사한 특성을 갖는다. NCS09의 스멕타이트는 사우스셰틀란드 근해의 비교적 최근 현무암질 화산물질이 해수와 반응하여 생성된 후에 빙하침식이나 화산분화시 재동되어 퇴적한 것으로 판단된다. GC98-2는 채취지점이 보다 대륙에 가까워서 심성암류나 고기 화산암류의 영향을 많이 받아 전체적으로 스멕타이트의 양이 적은 것으로 보인다. A10-01내 스멕타이트의 상하함량 변화로부터 하부는 킹조지섬 내륙의 스멕타이트가 없는 고기 화산암의 빙하침식물이고, 상부는 빙하 후퇴 후에 드러난 바톤반도로부터 마리안소만으로 유입된 열수변질물을 포함한 육상퇴적물들과 풍성퇴적물들로 보인다. 스멕타이트내 높은 K 함량은 불규칙 스멕타이트-일라이트 혼합층 광물의 존재를 지지하므로 향후 TEM 격자상 관찰에 의한 미조직 관찰이 필요한 것으로 보인다.

주요어 : 남극, 해양퇴적물, 점토광물, 스멕타이트, 기원.

ABSTRACT : Mineral composition and chemistry of the clay minerals in the three cores from the continental shelves of South Shetland Islands (NCS09) and Anberse Island (GC98-2), and from the fjord of King George Island (A10-01) were determined by X-ray diffraction and electron microprobe analysis in search of the distributions and origin of the clay minerals in the Antarctic marine sediments. Smectite content is relatively high in NCS09 regardless of core depths (av. 8.3%), but low in GC98-2 (1.1%). In A10-01, smectite content is higher in the upper section than in the lower section. Kaolinite was not detected from all the cores in this study. Yellow to yellowish green clay granules were commonly scattered in the sediments of NCS09 cores. The clays contain 16.97% Fe_2O_3 and 2.53% K_2O . Average structural formula of the clay indicates ferrian beidellite. The (Fe, K)-rich smectite of NCS09 must have been derived from relatively young basaltic volcanics altered by reaction with seawater near South Shetland Islands by

glacial erosion or colian process related to volcanic eruption. GC98-2 nearer to Antarctic continent is very low in smectite content. In A10-01, the lower diamicton was deposited from the glacial erosion of smectite-free ancient volcanics in the interior of King George Island, while the upper section was derived from the smectite-bearing terrestrial debris and eolian materials after retreat of glaciers in Marian Cove and ice cover in Barton Peninsula. The high K contents of smectites suggest the interstratification of illite and smectite layers, which might be observed by future TEM lattice fringe imaging.

Key words : Antarctica, marine sediments, clay minerals, smectite, origin.

서 론

코아기재

남극대륙 연안퇴적층에 함유된 점토광물의 종류와 함량은 기원지의 추정, 고환경변화, 빙산과 해류의 이동에 관한 정보를 제공한다. 이 중에서 녹니석과 일라이트(illite)는 대부분 변성암이나 화성암에서 유래한 쇄설성 광물로 잘 알려져 있지만, 스멕타이트와 캐올리나이트(kalinite)의 기원에 관해서는 아직도 많은 의문점이 있다. 스멕타이트는 남극 대륙주변 퇴적물에서 보고되고 있기는 하지만 그 기원이 명확히 밝혀진 바는 없다 (Ehrmann et al., 1992). 정기영 외(1999)와 Jeong and Yoon (2001)은 킹조지섬 바톤반도 토양의 점토광물성인 연구에서 스멕타이트가 기반암의 열수변질 또는 화산재의 열수변질에 의하여 생성될 수 있음을 보였다. 캐올리나이트는 일부 남극 퇴적암에서 유래한 것으로 인정되고 있으나 (Melles et al., 1995), Jeong and Yoon (2001)은 서남극 킹조지섬 바톤(Barton)반도 토양점토광물 성인 연구에서, 이 지역 캐올리나이트의 대부분이 열수변질된 모암에서 유래되었음을 밝혔다. 정기영 외(1999)와 정기영과 윤호일(2000)은 화산재의 용탈작용, 황철석의 풍화작용과 같은 미약한 화학적 풍화작용들이 일어나고 있기는 하지만, 자생점토광물의 다량 생성에 관한 증거들을 발견하지는 못하였다. 대륙의 기반암이나 토양구성광물이 빙하나 유수에 의해서 운반되어 연안퇴적물의 주성분광물이 되므로 퇴적물내 점토광물의 기원에 관한 연구는, 대륙기원지와 퇴적지의 광물조성을 상호 비교분석함으로써 가능할 것이다. 이상의 관점에서 저자들은 최근의 육상 토양 광물조성에 대한 연구성과를 바탕으로 주변 해양퇴적물의 광물조성을 분석하여 스멕타이트의 광물학적 특성과 기원에 대하여 논의하고자 한다.

NCS09 코아는 사우스세틀랜드 제도의 리빙스턴섬 서쪽 6 km 지점 해역의 수심 417 m 외 대륙붕(outer shelf)에서 채취되었다(Fig. 1). X-선 라디오그래프(radiograph)와 입도에 근거하여, 이 코아는 두 개의 암층단위로 분류된다; 1) 상부 50 cm의 규조질사질점토(diatomaceous sandy mud, unit VII), 2) 하부의 규조질 점토(diatomaceous mud, unit VIII). VII 층에는 매우 얇은 규조층이 협재한다. VII층에서 총유기탄소(TOC)와 생물기원 Si의 함량은 코아 상부로 갈수록 각각 0.45%에서 0.32%, 13%에서 7%로 감소하는 반면, 자기감응도(magnetic susceptibility, MS)는 300 cgs에서 415 cgs로 증가한다. 수분함량은 TOC 함량과 유사한 경향을 보이며 45%에서 36%로 감소한다. 모래의 함량은 2%

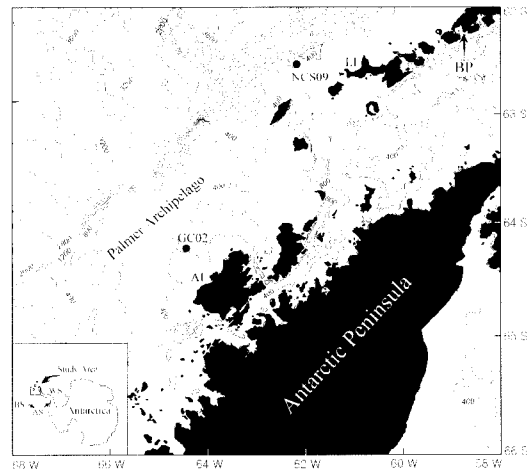


Fig. 1. Location of sediment cores. AI=Anserse Island, LI=Livingston Island, BP=Barton Peninsula. A10-02 core is located in the Marian Cove of Barton Peninsula.

에서 10%로 급격히 증가한다. 퇴적물의 분급도는 130 cm와 200~215 cm에서 가장 불량한데, 이 구간에서 육성기원물/생물기원물의 비가 감소하였음을 의미한다. 한편 140~195 cm, 220~245 cm 구간에서의 최소 TOC는 최대 MS와 일치한다.

코아 GC98-2는 앤버스섬 북서쪽 10 km 해역의 400 m 깊이의 중앙대륙붕에서 얻어졌다. 퇴적구조에 의하면, 코아는 3개의 암층단위로 나누어질 수 있다; 1) 최상위 16 cm의 부분적으로 얼룩이 있는 괴상의 갈색 구조질 사질점토 (unit I). TOC와 수분함량이 각각 0.6%와 50% 이하이며, MS 값은 120 cgs에서 200 cgs 사이이다. 2) 16 cm~75 cm 크기의 빙성자갈이 소량 분산되어 있고, 분급이 상당히 양호한 올리브회색의 구조질 점토 (단위 II). 구조가 풍부하며 TOC 함량은 0.4%~0.9%이다. 3) 사질점토기질을 소량 가지며 퇴적구조나 자갈의 정향배열이 없는 75 cm 이하의 암회색 역질 다이아미크톤(diamicton, unit III). 역들은 빙하로 긁히거나 평탄하게 각인 아원상의 크기 1~6 cm의 안산암, 석영섬록암, 안산암질 응회암 자갈들이다. 자기감응도는 900 cgs로 매우 높다. 구조함량이 매우 낮지만, 가끔 구조질 점토가 GC98-2 코아의 110~120 cm 구간의 다이아미크톤내에 협재되어 있다. 방사성연대에 의하면 제III층위의 I, II 층은 충적세에 집적되었으며 퇴적속도는 7.9 cm/kyr이다.

A10-01 코아는 킹조지섬 마리안 소만에서 채취하였다. 100 cm를 기준으로 하부는 주로 다이아미크톤이며 상부는 괴상점토층으로 이루어져 있다. 100 cm를 기준으로 총탄소와 총질소량이 증가한다. 하부와 상부 경계부의 방사선탄소연대를 김동선 등(1998)에 의한 용빙수와 남극생물체효과를 보정하면 약 4070년이다.

연구방법

각 코아마다 10 cm 간격으로 채취하여 풍건한 후, 분석을 위한 시료준비를 하였다. X선회절분석(X-ray diffraction, XRD)을 위한 시료는 모래크기 이하로 체질한 후 아게이트 유발에서 분쇄하여 준비하였다. 사용된 XRD기기는 회절빔 단색화장치가 부착된 Rigaku RAD3C 및 Rigaku RINT2200 장비였으며 40 kV/30 mA에서 발생한 Cu X-ray를 이용하였다. 퇴적물의 광

물조성은 각 광물의 구조자료로부터 회절강도를 계산하여 X선회절 패턴을 모사하는 SIROQUANT 프로그램으로 시행하였다. 이 방법에서는 정량분석 대상광물의 합을 100으로 계산한다. SIROQUANT 프로그램을 이용한 점토광물의 정량은 시료준비나 점토광물 구조의 다양성으로 인하여 반정량적인 분석으로 이해해야하겠으나, 분석이 표준화된 절차에 따라 시행되었다면 코아의 깊이별 증감의 경향이나 코아간 상대적 함량 비교에는 무리가 없을 것으로 판단된다. 동시에 점토광물의 정확한 감정을 위하여 원심분리기로 1 μm 이하의 점토를 분리하여 방향시료를 제작한 후에 원시료, 가열시료, 에틸렌 글리콜 처리한 시료에 대하여 각각 XRD 분석을 실시하였다. 퇴적물내 광물의 화학조성을 분석하기 위하여 원조적이 보존된 시료를 대상으로 Jeong and Kim (1993)의 절차에 따라 에폭시 수지로 굳힌 후, 연마박편을 제작하였다. 연마박편은 광학현미경을 이용하여 일차 관찰한 후, 광물의 원소조성을 서울대학교 기초과학공동기기원의 JEOL JXA8900R 전자현미분석기(electron probe microanalyser, EPMA)의 과장분산X선분광기로 가속전압 15 kV, 빔전류 10 nA, 빔직경 5 μm , 계수시간 20 s의 조건에서 시행하였다.

광물조성

GC98-2

코아 기재에 의하면 80 cm를 기준으로해서 그 상부와 하부가 입도, 분급, 총유기물함량, 자기감응도, 수분 함량 등에서 차이가 있으나, 광물 조성은 전 구간에 걸쳐서 뚜렷한 변화가 관찰되지 않는다(Table 1). 사장석(48.7%), 석영(18.6%), 운모(13.9%)가 주구성광물로 함유되어 있고, 그 외 각섬석(5.4%), 녹니석(5.4%), 암염(4.9%), 스멕타이트(1.1%), 불석(1.1%), 방해석(0.3%), 황철석(0.5%)이 소량 함유되어 있다. 운모는 일라이트라기보다는 박편상에서 흔히 관찰되는 화강암류의 백운모, 흑운모, 또는 사장석의 견운모로 생각된다. 암염(NaCl)은 시료 건조과정에서 공극수에서 정출한 것으로 생각되며 원래의 퇴적물내 광물조성은 아닐 것이다. 5% 이하의 광물을 제외하면 GC98-2 퇴적물은 전체적으로 사장석, 석영, 운모, 각섬석, 녹니석

Table 1. Mineral compositions of sediment core GC98-2 in wt%.

Depth(m)	Q	Pl	A	M	Ch	Sm	Z	Ca	Py	H
0	21.0	55.5	2.9	11.1	3.1	0.9	0.5	0.0	0.0	4.8
10	20.9	45.4	4.1	15.3	7.7	0.8	1.5	0.0	0.5	3.9
20	16.7	37.7	8.3	16.4	9.7	1.7	0.8	0.2	0.7	7.9
30	14.8	44.0	5.0	15.9	7.9	1.5	0.8	0.0	0.0	10.0
40	18.9	42.9	4.9	10.8	6.2	1.6	0.8	0.0	0.1	13.7
50	16.3	37.4	6.0	23.8	8.1	1.9	0.8	0.0	0.3	5.4
60	18.6	45.2	2.8	17.1	6.4	1.0	1.1	0.0	1.0	6.7
70	24.7	37.5	4.0	18.5	7.3	0.1	0.9	0.0	0.9	6.1
80	18.9	57.8	5.7	8.8	4.0	0.6	0.6	0.9	1.0	1.8
90	15.1	59.8	4.4	10.6	3.9	1.5	0.9	0.8	0.0	3.0
100	19.6	46.2	2.9	19.2	3.6	0.7	1.5	0.1	1.1	5.1
110	21.7	47.0	1.6	12.5	2.6	0.2	6.3	0.6	2.1	5.4
120	17.0	49.9	6.1	16.5	5.4	1.8	0.7	0.5	0.4	1.7
130	15.5	52.4	10.2	10.4	4.3	2.2	0.8	0.8	0.8	2.7
140	21.5	50.6	7.1	10.6	5.1	1.0	0.7	0.4	0.0	3.1
150	12.7	63.7	4.2	11.0	2.9	1.1	0.7	1.0	0.4	2.3
160	25.2	49.2	5.8	11.9	4.0	0.1	0.6	0.2	0.4	2.7
170	15.3	54.7	10.8	9.3	5.4	1.1	0.6	0.3	0.0	2.5
Average (±2σ)	18.6 (±1.1)	48.7 (±3.5)	5.4 (±1.1)	13.9 (±1.9)	5.4 (±1.0)	1.1 (±0.3)	1.1 (±0.6)	0.3 (±0.2)	0.5 (±0.3)	4.9 (±1.5)

Abbreviations: Q=quartz, Pl=plagioclase, A=amphibole, M=mica, Ch=chlorite, Sm=smectite, Z=zeolite, Ca=calcite, Py=pyrite, H=halite.

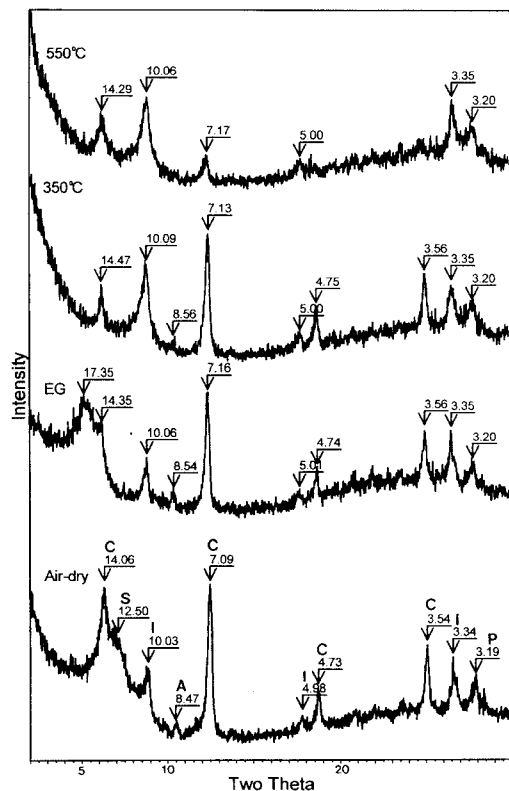


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of clay fraction of sediment at depth 130 m of GC98-2 core. A=amphibole, C=chlorite, I=illite, P=plagioclase, S=smectite, EG=ethylene glycol.

으로 구성되어 있다. 스멕타이트의 존재를 확인하기 위하여 시료를 분산시킨 다음, 세립질 입자들을 분리하여 간단한 가열실험과 에틸렌글리콜(Ethylene Glycol) 삼입실험을 시행하였다. 그 결과 미량이지만 스멕타이트의 존재를 확인할 수 있었다 (Fig. 2). 전시료에서 XRD 분석으로 검출할만한 정도의 캐올리나이트는 확인되지 않았다.

NCS09

코아 기재에 의하면 50 cm를 기준으로 상부의 규조질 사질점토와 하부의 규조질 점토로 구분되지만 광물조성의 명백한 변화는 관찰되지 않는다 (Table 2). 전체적으로 사장석(56.9%)과 석영(14.4%)이 주구성광물로 함유되어 있다. 그 외 스멕타이트(8.3%), 녹니석(7.0%), 운모(4.2%), 암염(3.7%), 각섬석(3.1%), 불석(1.7%), 탄산염(0.7%), 황철석(0.1%)이 소량 함유되어 있다. GC98-2와 비교하면 사장석, 녹니석, 스멕타이트, 불석의 양은 많고, 석영, 운모, 각섬석의 양은 적다. 특히 스멕타이트의 양이 많다. 5% 이상 함유된 광물만 고려하면 NCS09 퇴적물은 주로 사장석, 석영, 스멕타이트, 녹니석으로 구성되어 있다고 할 수 있다. 분리한 세립질 시료에 대하여 가열실험과 에틸렌 글리콜 삼입 실험을 시행한 결과, 다량의 스멕타이트의 존재

Table 2. Mineral compositions of sediment core NCS9 in wt%.

Depth(m)	Q	Pl	A	M	Ch	Sm	Z	Ca	Py	H
0	20.8	56.7	0.0	2.6	7.9	3.7	2.1	3.2	0.8	2.2
10	11.8	63.2	0.0	4.9	7.9	5.6	1.8	1.9	0.0	2.9
20	15.3	55.0	1.7	5.5	6.9	7.7	2.1	3.6	0.0	2.2
30	18.9	58.6	2.0	6.1	8.4	3.7	1.1	0.0	0.0	1.4
40	14.5	63.0	0.3	1.5	8.4	6.9	1.9	0.9	0.0	2.6
50	13.6	47.5	4.9	5.5	10.1	10.3	1.9	0.8	0.0	5.6
60	16.0	52.9	4.0	5.1	8.6	3.8	1.4	0.4	0.7	7.2
70	15.3	50.4	4.0	6.7	8.0	10.8	1.7	0.0	0.0	3.1
80	14.1	44.5	9.5	5.5	9.6	9.3	2.2	1.8	0.0	3.6
90	11.8	58.6	4.4	2.8	6.2	9.8	1.3	0.4	0.0	4.6
100	10.6	69.2	0.0	4.3	4.4	5.1	1.4	0.0	0.0	5.0
110	11.3	61.5	0.0	4.9	9.2	7.8	1.7	0.0	0.0	3.5
120	17.7	49.1	3.9	4.2	9.7	8.4	2.3	0.1	0.0	4.6
130	12.4	55.2	4.8	4.7	5.8	10.1	1.3	1.2	0.0	4.5
140	10.5	55.3	4.7	6.3	7.3	11.0	1.4	0.0	0.0	3.6
150	10.5	55.3	4.7	6.3	7.3	11.0	1.4	0.0	0.0	3.6
160	14.0	57.0	8.8	3.5	5.8	5.5	1.7	1.5	0.0	2.2
170	12.9	63.4	1.7	0.0	6.8	10.4	2.1	0.0	0.0	2.6
180	14.9	61.2	4.4	1.7	4.2	8.6	1.4	0.0	0.0	3.6
190	13.4	60.7	3.0	4.0	5.8	8.5	0.9	0.1	0.0	3.7
200	17.1	49.9	6.3	4.7	5.1	8.0	1.6	1.1	0.0	6.3
210	12.4	58.2	3.7	5.7	5.3	9.0	2.6	0.0	0.0	3.1
220	16.8	60.0	0.0	1.6	5.8	9.4	1.5	0.0	0.0	4.9
230	16.1	56.7	0.0	2.7	5.4	12.0	1.5	0.0	1.1	4.6
240	16.6	60.2	0.0	5.3	4.7	9.8	1.2	0.1	0.0	2.0
Average	14.4	56.9	3.1	4.2	7.0	8.3	1.7	0.7	0.1	3.7
($\pm 2\sigma$)	(± 1.1)	(± 2.2)	(± 0.7)	(± 0.7)	(± 0.7)	(± 1.0)	(± 0.2)	(± 0.4)	(± 0.1)	(± 0.5)

Abbreviations: same as shown in Table 1.

를 확인할 수 있었다(Fig. 3). GC98-2와 마찬가지로 XRD 분석으로 검출할만한 정도의 캐올리나이트는 확인되지 않았다.

A10-01

코아 기체에 의하면 심도 100 cm를 기준으로 해서 상부가 하부에 비하여 입도가 작고 유기물 함량이 높다. 주광물인 사장석(평균 47.4%)과 석영(평균 21.4%)의 경우, 전반적으로 그와 병행하는 변화를 보이지는 않는다 (Table 3). 그러나 각각의 시료에서 석영과 사장석의 양은 서로 반대되는 경향이 있다. NCS09와 비교하여 사장석의 양은 작고 석영의 양은 크며, GC98-2와는 사장석과 석영의 양이 매우 유사하다. 그 외 녹니석(8.9%), 운모(8.9%), 스멕타이트(3.1%), 암염(2.6%), 각섬석(2.4%), 엽납석(2.3%), 석고(1.7%), 불석(1.6%), 황철석(0.7%), 방해석(0.6%)

이 소량 함유되어 있다. 녹니석의 3.54Å 회절선에 작은 왼쪽 어깨(shoulder)가 3.58Å 위치에서 관찰되는 것으로 보아서 적은 양의 캐올리나이트의 존재가 추정된다. 그러나 녹니석 회절선의 강도가 커서 캐올리나이트는 계산되지 않았다. 특징적으로 스멕타이트의 함량이 심도 110 cm를 경계로 해서 상부에서 증가하였는데 하부 시료들의 평균이 1.5%, 상부 시료들의 평균이 4.7%였다. 엽납석도 상부에서 약간 증가하였다. 그러나 스멕타이트와 엽납석 모두 상부 구간내에서 깊이에 따른 변화는 관찰되지 않았다. 분리한 세립질 시료에 대하여 가열실험과 에틸렌 글리콜 삼입실험 결과 스멕타이트의 존재를 확인할 수 있었다(Fig. 4). 한편 다른 코아들에서 관찰되지 않는 석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)가 전 구간에서 걸쳐서 평균 1.7% 정도 함유되어 있다. 용해도가 높은 석고가 원래 퇴적물에 함유되어 있었다고 보기는 어려우므로, 암염과 함께 시료

Table 3. Mineral compositions of sediment core A10-01 in wt%.

Depth(m)	Q	Pl	A	M	Ch	Sm	PP	Z	Ca	Py	H	G
0	20.7	46.1	3.6	9.1	11.1	4.2	2.9	2.0	0.0	0.3	1.6	0.4
10	20.8	46.6	2.3	9.2	7.9	1.7	4.7	1.7	0.0	0.6	3.9	2.3
20	19.6	49.1	0.3	9.4	6.7	7.1	4.0	2.0	0.8	0.7	1.5	0.9
30	22.0	37.9	2.1	12.8	9.0	4.7	4.4	1.1	0.0	0.7	4.8	1.5
40	22.7	38.1	2.0	10.9	12.6	5.9	2.8	1.9	0.0	0.0	3.0	2.1
50	20.4	38.4	3.7	9.4	11.5	5.6	5.0	1.8	0.0	0.7	4.0	1.3
60	19.4	39.0	2.1	13.2	9.5	7.5	3.9	1.4	0.0	0.1	4.0	1.3
70	18.0	51.0	3.2	6.7	8.1	3.1	3.7	1.7	0.2	0.3	4.3	1.5
80	22.8	40.0	0.7	10.9	11.5	4.7	4.7	2.2	0.0	0.0	3.4	1.3
90	19.1	44.9	4.7	9.2	8.0	2.8	3.3	1.3	0.6	0.0	4.9	2.2
100	24.7	37.5	3.1	8.4	10.4	5.1	2.9	1.4	0.1	1.1	4.6	2.1
110	22.6	45.0	2.3	9.7	10.3	4.4	1.4	1.7	0.0	0.4	2.5	1.3
120	23.3	46.7	2.9	9.3	8.6	0.9	1.8	2.1	0.0	1.0	2.5	3.0
130	24.7	43.0	1.7	10.5	9.3	0.4	1.4	1.3	0.0	3.3	3.4	2.2
140	17.2	49.2	1.1	10.5	12.8	1.6	0.0	1.4	0.4	1.2	2.2	3.6
150	20.2	44.0	4.0	10.4	11.9	2.0	1.5	1.4	0.0	1.2	2.9	2.0
160	21.9	49.5	4.0	5.5	8.7	2.6	1.2	1.7	3.9	0.4	1.9	0.5
170	20.6	55.2	1.6	9.5	6.6	1.1	0.0	2.0	0.9	1.2	1.5	1.9
180	39.8	38.3	3.2	7.3	8.6	0.1	0.0	1.4	0.0	1.0	1.1	0.6
190	10.7	73.3	1.1	4.4	3.2	2.8	0.6	0.9	0.3	0.9	0.5	2.2
200	21.6	51.7	1.1	10.3	7.4	1.4	1.5	1.5	0.0	0.6	2.2	2.2
210	15.9	68.5	3.6	3.5	4.6	1.2	0.0	2.5	0.2	1.0	0.7	0.9
220	18.0	56.5	0.0	6.8	8.6	2.3	1.1	1.4	4.3	0.3	0.5	1.4
230	26.7	47.4	2.0	7.4	6.5	1.9	2.2	1.4	2.6	0.0	0.3	3.0
Average ($\pm 2\sigma$)	21.4 (± 2.0)	47.4 (± 3.6)	2.4 (± 0.5)	8.9 (± 0.9)	8.9 (± 1.0)	3.1 (± 0.8)	2.3 (± 0.7)	1.6 (± 0.2)	0.6 (± 0.5)	0.7 (± 0.3)	2.6 (± 0.6)	1.7 (± 0.3)

Abbreviations: same as shown in Table 1 except PP=pyrophyllite, G=gypsum.

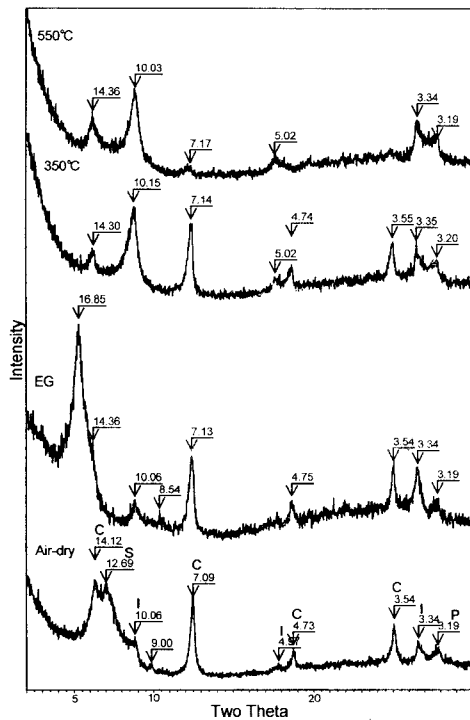


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of clay fraction of sediment at depth 20 m of NCS09 core. A= amphibole, C=chlorite, I=illite, P=plagioclase, S= smectite, EG=ethylene glycol.

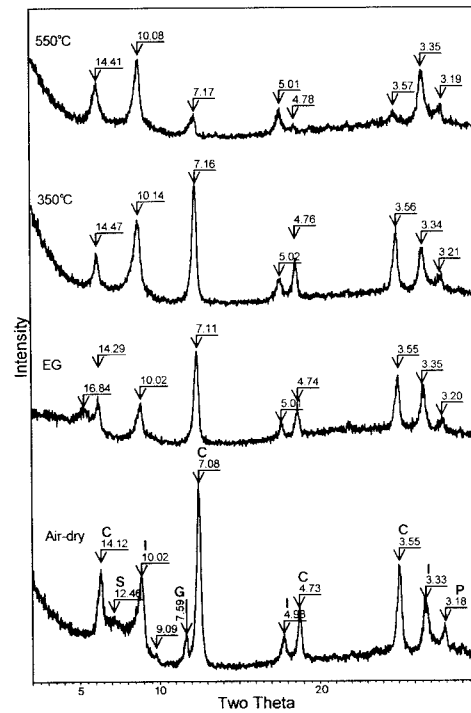


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of clay fraction of sediment at depth 40 m of A10-01 core. A= amphibole, C=chlorite, G=gypsum, I=illite, P= plagioclase, S=smectite, EG=ethylene glycol.

건조과정에서 공극수로부터 침전되었을 가능성이 높다. 그러나 최근 연구에서 석고가 북극권의 여러 지역 피요르드 퇴적물에서 쇄설성 광물로 보고된 바가 있으므로 향후 이에 대한 확인이 필요하다 (St. John and Cowan, 2000).

화학조성

스멕타이트

박편 관찰에 의하면 스멕타이트가 다량 함유된 시료 NCS09에는 황록색의 간섭색을 보이는 아원상 황색 입자들이 분급이 불량한 석영편, 장석편, 암편 및 세립기질들 사이에 불균질하게 혼재되어 있다 (Fig. 5). 미세조직 관찰에 의하면 극미립상 조직을 보이는 이 황색 입자들은 단일한 광물편이 아니며 미세한 점토입자들의 집합체로 생각된다. 이 입자들의 EPMA 분석결과 Table 4와 같다. 특징적으로 Fe_2O_3 의 함량이 평균 16.97%로 상당히 높으며, K_2O 의 양도 2.53%로 높은 편이다. 분석값으로부터 음이온을 $O_{20}(OH)_4$ 로 가정하고 계산된 평균 구조식은 다음과 같으며 함철바이델라이트로 분류된다: $(K_{0.47}Na_{0.02}Ca_{0.06})_{0.55}(Al_{1.49}Fe_{1.87}Mg_{0.93}Ti_{0.05})_{4.34}(Al_{0.63}Si_{7.37})_8O_{20}(OH)_4$. 평균충간전하가 0.6이고, 팔면체 자리의 양이온 합이 평균 4.34인 이팔면체구조(dioctahedral)의 스멕타이트에 해당한다. 그러나 실제 높은 K_2O 함량으로부터 일라이트가 혼합 또는 스멕타이트와 호층을 이루고 있을 가능성이 높으므로 이에 대한 확인이 차후 요청된다.

한편 GC98-2의 경우, 박편 관찰에서 황색 점토립이 매우 드물다. 평균 구조식은 $(K_{0.34}Na_{0.14}Ca_{0.11})_{0.59}(Al_{0.98}Fe_{2.02}Mg_{1.30}Ti_{0.08}Mn_{0.01})_{4.38}(Al_{0.41}Si_{7.59})_8O_{20}(OH)_4$ 로서 팔면체자리보다 사면체자리에서 더 많은 음전하가 발생하는 함철바이델라이트에 해당한다 (Table 4). 역시 높은 K_2O 함량은 일라이트의 혼합 또는 일라이트-스멕타이트 호층의 가능성을 제시한다. A10-01에서는 전자현미분석기로 분석할 만한 크기의 황색 점토입단을 거의 발견하지 못하였다.

화산유리

편광현미경 관찰에 의하면 주로 GC98-2 퇴적물에서 화산유리들이 종종 관찰되었으나 NCS09

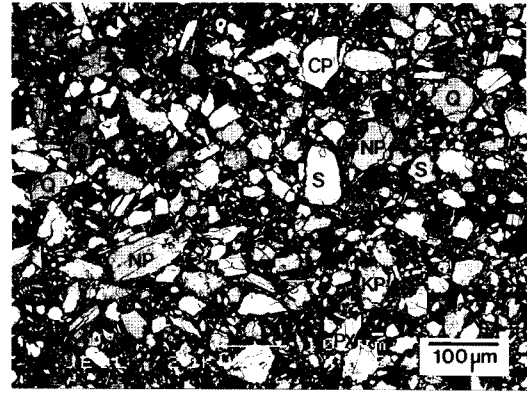


Fig. 5. Back-scattered electron image of thin section of sediment of NCS09 core at depth 0 m. CP=calcic plagioclase, KP=K-feldspar, NP=sodic plagioclase, PX=pyroxene, Q=quartz, S=smectitic clay granule. Dark area: pore.

와 A10-01에서는 희소하였다. GC98-2의 심도 50 m 시료에서는 화산유리가 기공벽을 따라 변질되어 팔라고나이트(palagonite, 변질화산유리)가 생성되어 있다. Table 5는 GC98-2 및 A10-01의 몇몇 화산유리편의 EPMA 분석결과이다. GC98-2와 A10-01의 화산유리는 모두 현무암에서 안산암질 현무암의 조성을 갖는 것으로 분석되었다.

토 의

해양퇴적물내 점토광물의 기원을 추정하기 위해서는 기원지로 추정되는 육상쇄설물 또는 토양광물에 관한 연구자료와 비교하여볼 필요가 있다. 그러나 현재 사우스세틀란드 제도나 남극반도 일원에서 가용한 육상 토양광물에 대한 자료는 정기영 등(1999)과 Jeong and Kim (2001)의 사우스세틀란드제도 킹조지섬의 바톤반도를 제외하면 거의 없는 형편이다. 그럼에도 자료가 부족한 만큼 우선 바톤반도 자료와 비교분석하여 보기로 한다. 본 연구결과에서 캐롤리나이트의 함량은 극히 작고 일라이트와 녹니석의 성인은 비교적 잘 알려져 있으므로 기원이 문제가 되는 점토광물은 스멕타이트이다.

NCS09와 GC98-02 스멕타이트

Jeong and Yoon (2001)은 바톤반도의 토양에

해양퇴적물내 스멕타이트의 특성과 기원

Table 4. Electron microprobe analysis of yellow-green granules of smectitic clay in the sediment cores.

	NCS09 (26points)			GC98-2 (8points)			A10-01
	Average	Range	Median	Average	Range	Median	
SiO ₂	50.60 ± 1.03	42.21-54.54	50.82	48.03 ± 2.86	41.03-51.40	49.97	43.31
Al ₂ O ₃	12.51 ± 2.24	1.64-25.37	11.94	7.59 ± 3.06	3.25-14.61	6.38	8.57
Fe ₂ O ₃ *	16.97 ± 2.58	3.17-28.97	18.28	16.96 ± 3.94	6.81-24.43	18.32	15.65
MgO	4.26 ± 0.82	1.45-11.99	3.74	5.60 ± 3.98	3.03-19.72	3.45	12.64
TiO ₂	0.48 ± 0.17	0.01-1.97	0.44	0.70 ± 0.40	0.11-1.70	0.42	0.11
MnO	0.04 ± 0.02	0.00-0.28	0.03	0.05 ± 0.03	0.01-0.13	0.04	0.11
K ₂ O	2.53 ± 0.78	0.22-6.80	1.65	1.75 ± 0.61	0.48-2.89	1.91	0.22
Na ₂ O	0.08 ± 0.02	0.01-0.30	0.07	0.47 ± 0.31	0.13-1.47	0.26	0.11
CaO	0.35 ± 0.09	0.04-0.94	0.29	0.70 ± 0.39	0.08-1.64	0.53	0.16
Total	86.11 ± 1.90	76.31-92.98	88.19	80.15 ± 4.90	67.48-89.66	79.36	79.30

Number of cations on the basis of O20(OH)4

Si	7.37 ± 0.13	6.08-7.82	7.41	7.59 ± 0.43	6.30-8.14	7.79	6.87
Al(IV)	0.63 ± 0.13	0.18-1.92	0.59	0.41 ± 0.43	-0.14-1.70	0.21	1.13
Sum		8.00	8.00	8.00		8.00	8.00
Al(VI)	1.49 ± 0.31	0.11-3.03	1.42	0.98 ± 0.27	0.67-1.66	0.83	0.47
Fe ³⁺	1.87 ± 0.29	0.32-3.35	1.89	2.02 ± 0.46	0.79-2.69	2.25	1.87
Mg	0.93 ± 0.18	0.30-2.58	0.79	1.30 ± 0.90	0.72-4.51	0.84	2.99
Ti	0.05 ± 0.02	0.00-0.23	0.05	0.08 ± 0.05	0.01-0.18	0.05	0.01
Mn	0.00	0.00-0.03	0.00	0.01 ± 0.00	0.00-0.02	0.00	0.01
Sum	4.34 ± 0.11	3.92-5.08	4.29	4.38	4.03-6.03	4.17	5.35
K	0.47 ± 0.14	0.05-1.27	0.32	0.34 ± 0.11	0.09-0.52	0.40	0.04
Na	0.02 ± 0.01	0.00-0.09	0.02	0.14 ± 0.09	0.04-0.40	0.08	0.03
Ca	0.06 ± 0.01	0.01-0.15	0.05	0.11 ± 0.06	0.01-0.26	0.09	0.03
Charge	0.60 ± 0.16	0.08-1.53	0.44	0.72 ± 0.22	0.31-1.30	0.63	0.13

* Total Fe₂O₃.

Table 5. Electron microprobe analysis of volcanic glass in the sediment cores GC98-2 and A10-01.

Samples	G10	G50	G120	G120	G120	A100	A100	A200	A220
Analysis No.	57	67	70	72	73	78	79	82	83
SiO ₂	49.79	51.39	52.91	49.18	56.03	50.95	51.08	54.11	51.30
Al ₂ O ₃	13.89	20.67	16.12	15.24	16.12	14.94	15.28	15.13	16.76
FeO*	11.78	7.09	10.16	9.41	8.48	10.01	10.16	10.05	9.96
MgO	4.49	3.14	3.99	5.54	3.00	5.26	4.91	3.56	4.11
MnO	0.22	0.13	0.13	0.18	0.24	0.18	0.17	0.18	0.14
TiO ₂	3.14	1.71	2.23	2.07	1.65	2.38	2.41	2.35	2.40
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.50	0.24	0.32	0.28	0.48	0.19	0.16	0.19	0.39
K ₂ O	0.70	0.36	0.67	0.50	0.98	0.53	0.60	0.89	0.43
Na ₂ O	3.79	4.80	4.04	4.15	2.53	3.92	3.83	3.80	4.01
CaO	8.75	9.84	7.65	10.38	6.24	8.76	8.86	7.35	8.29
Total	97.06	99.38	98.21	96.99	95.74	97.15	97.45	97.60	97.79
Type	B	B	AB	B	AB	B	B	AB	B

* Total FeO. Abbreviations: B = basalt, AB = andesitic basalt.

서 스�멕타이트가 화산유리의 변질산물로 생성되어 있음을 기재하였다. 이들은 화산유리와 스�멕타이트에 EPMA 분석을 실시하였는데, 화산유리는 현무암에서 현무암질 안산암의 화학조성을 갖고 있으며, 스�멕타이트는 Fe_2O_3 (17.76%)를 다량 함유하고 있는 함철바이텔라이트이다. 또한 이 스�멕타이트는 높은 Fe_2O_3 함량으로 인해서 마리안 소만(Marian cove)의 화강섬록암의 프로파일리틱 변질(propylitic alteration)로 생성된 스�멕타이트(평균 Fe_2O_3 2.21%)와 구분된다. 본 연구에서 얻어진 해양퇴적물내 스�멕타이트는 Fe_2O_3 함량이 16.97%로 상당히 높은 함철바이텔라이트로서 바톤반도 토양내 화산유리의 변질산물인 스�멕타이트와 매우 유사하며, 화강섬록암 변질로 생성된 스�멕타이트와는 다르다. 바톤반도 토양내 스�멕타이트가 현무암질 화산유리의 변질산물이고, 퇴적물에서 분석된 화산유리가 현무암 또는 안산암질현무암의 화학조성을 보이므로 퇴적물내 스�멕타이트는 염기성 화산암류 또는 화산재의 변질산물일 가능성이 매우 높다. 퇴적물내 스�멕타이트의 한가지 구분되는 특징은 높은 K_2O 함량이다. 일반적으로 K는 일라이트에 주로 함유되어 있으므로 스�멕타이트의 높은 K함량은 시료내 일라이트-스멕타이트 혼합층의 존재를 의심하게 한다. 따라서 K가 시료 중 스�멕타이트의 층간이온으로 존재하는지 또는 일라이트내에 고정되어 있는지 밝혀져야 한다 이를 위해서는 XRD 분석과 함께 TEM 격자상 관찰이 필요하다.

스멕타이트의 층간양이온은 대부분 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 임에 반하여(Weaver, 1973), 해양퇴적물에서 산출되는 열수 또는 속성기원의 Fe가 풍부한 스�멕타이트의 주요 양이온은 흔히 K^+ 인 것으로 보고되고 있다. Zhou and Fyfe (1989)는 해저분출 현무암질 용암의 화산유리가 팔라고나이트화작용(palagonitization)을 거쳐 스�멕타이트로 되는 과정에서 스�멕타이트에 K가 농집되는 경향이 있다고 하였다. Masuda et al. (1996)는 난카이해구(Nankai Trough)의 해저 유문암질 화산회 퇴적물의 초기속성 변질과정에서 K가 풍부한 스�멕타이트(평균 함량 K_2O 1.78%)가 화산유리의 변질산물로 생성됨을 보고하였다. Singer et al.(1984)가 정리한 세계 여러 지역 해저 열수기원 논트로나이트(nontronite)의 화학분석 자료에 의하면 대부분의 시료에서 K_2O 가 1~3% 정도로 함유되어 있다.

Singer et al.(1984) 등이 분석기재한 남서태평양 분지퇴적물내 모래 크기의 녹황색 또는 황색 논트로나이트 입단(granule)들은 K_2O 가 1.7% 정도로 함유되어 있다. Singer et al. (1984)에서 비록 자세한 조직 그림이 제시되지는 않았지만 본 연구에서 기재한 스�멕타이트 입자는 Fe_2O_3 함량이 높고, 전하가 사면체 자리에서 주로 발생하며, 층간 주요이온이 K^+ 라는 점에서, Singer et al. (1984)의 논트로나이트 스�멕타이트와 매우 유사하다. 해저면에 분출한 현무암질 화산암은 표면이나 열극을 따라서 해수와 저온열수반응을 통해 팔라고나이트화작용을 겪게 된다 (Chamley, 1989). 팔라고나이트화 과정에 대한 자세한 지화학적 및 광물학적 연구들에 의하면, 현무암질 유리는 팔라고나이트라고 부르는 변질유리를 거쳐서 K-Na 제올라이트와 K-Mg-Fe 스�멕타이트로 변질된다 (Honorez, 1981). 지화학적 수지균형 계산에 의하면 이 과정에서 Ca, Mg, Si 등은 유출되고 K, Na, H_2O 가 도입된다 (Honorez, 1981; Zhou and Fyfe, 1989).

GC98-2와 NCS09 코아의 전체광물조성을 비교해 보면 GC98-2보다 NCS09가 석영과 운모의 함량이 작은 반면에 사장석, 스�멕타이트, 제올라이트의 함량이 높다. 따라서 남극대륙에 가까운 GC98-2는 대륙의 심성암, 화산암, 퇴적암 등의 여러 가지 암석의 침식물이 퇴적물로 공급되었고, 사우스세틀란드 제도에 인접한 NCS09는 사우스세틀란드 및 인근 해저의 화산성 기원지에서 현무암질 화산암 변질산물들이 주로 공급된 것으로 판단된다. 사우스세틀란드 제도에는 현재도 활동 중인 디셉션(Deception)섬을 비롯하여 해양관의 섭입 및 브랜스필드(Branfield)해협 확장과 관련된 활발한 화산활동이 신생대에 걸쳐서 일어났다. 본 연구에서 기재한 스�멕타이트는 그 광물학적 특성이나 화학조성, 그리고 형태로 보아서 염기성 화산활동이 활발한 사우스세틀란드 일원의 화산화 또는 용암 등의 해저화산암류가 해수와 반응하여 생성된 것으로 보인다. 그리고 반복적인 빙하기를 겪으면서 해수면의 하강과 빙하침식에 의해서 운반된 후 퇴적되었을 것으로 생각된다.

A10-01 스�멕타이트

킹조지섬 마리안 소만의 A10-01에서 100 cm를 기준으로 하부는 주로 다이아미톤이며 상부

는 피상점토층으로 구분된다. 100 cm를 기준으로 그 하부가 마리안 소만이 빙하로 덮여 있을 시기의 기저빙퇴석 등의 빙하퇴적물이고 그 상부는 빙하 후퇴 후의 해성퇴적물이라고 하면, 스멕타이트는 주로 빙하 후퇴후 마리안 소만에 퇴적하였다고 해석된다. 김동선 등(1998)은 유기탄소, 생물기원규소, 총황의 수직분포로부터 마리안소만의 코아채취지점이 약 4700년 이전에는 육상빙하로 덮여 있었으며, 그 이후 기후가 따뜻해지면서 빙하가 후퇴하였다.

하부와 상부 구간 사이에 스멕타이트와 엽납석 함량의 뚜렷한 차이가 있고 상부구간내에서는 스멕타이트 함량이 거의 일정하다. 퇴적물내 엽납석은 NCS09나 GC98-2에서는 전혀 발견되지 않는 반면에 마리안 소만의 A10-01에서만 발견된다. Jeong and Yoon (2001)은 바톤반도의 마리안 소만 연안 화산암의 황백색 필릭(phyllitic)/아질릭(argillic) 열수변질대 토양에 한정되어 엽납석이 함유되어 있음을 보고한 바 있다. 바톤반도는 크게 안산암 또는 안산암질 현무암과 화강섬록암으로 구성되어 있으며 화산암의 필릭/아질릭 열수변질대를 제외한 다른 암석에서는 엽납석이 발견되지 않는다. 따라서 퇴적물내의 엽납석은 마리안 소만의 필릭/아질릭 열수변질대로부터 공급되었음이 분명하다. 바톤반도 기반암에서 스멕타이트는 마리안 소만에 노출된 화강섬록암의 일부가 프로필리틱 열수변질을 받아 생성되어 있으나 화산암내에서는 스멕타이트가 거의 관찰되지 않는다. 이는 바톤반도의 화산암은 이미 저변성작용을 받았기 때문에 초기 속성과정에서 생성되었을 수도 있는 스멕타이트가 전혀 남아 있지 않기 때문이다. 반면에 바톤반도의 토양에는 풍성 현무암질 안산암 화산유리편(glass shard)들이 다량 함유되어 있으며, 이들의 일부는 스멕타이트로 변질되어 있다(Jeong and Yoon, 2001). 따라서 A10-01 코아에서 상부층의 스멕타이트의 기원에는 크게 2종류가 있다고 할 수 있다. 즉 첫째, 화강섬록암 변질산물이 빙하침식 또는 물리적 풍화작용으로 떨어져 나온 후에 유수에 의해 마리안소만에 퇴적되었을 경우와 둘째, 풍성화산재기원으로 마리안 소만에 직접 퇴적되었거나 바톤반도에 일차 퇴적한 후 유수에 의해 마리안 소만에 유입된 경우이다. 화강섬록암변질기원 스멕타이트와 화산유리편변질기원 스멕타

이트의 화학조성이 전혀 다르므로 A10-01 퇴적물내 스멕타이트의 분석값이 필요하지만, 이번 연구에서는 충분한 화학분석값을 구할 수는 없었다. 그러나 화산유리가 보다 광범하게 분포하므로 퇴적물내 스멕타이트도 화산기원일 가능성이 높다.

바톤반도의 스멕타이트가 화산유리기원인가 화강섬록암 변질기원인가에 관계없이, 스멕타이트가 마리안소만 상부퇴적물에서 그 함량이 높다는 사실은 마리안 소만의 빙하가 후퇴하고 이와 동시에 바톤반도의 빙하가 녹고 지표면이 노출된 후, 스멕타이트가 육성 또는 풍성 퇴적물의 퇴적에 수반되었음을 의미한다. 하부의 빙하퇴적물인 다이아믹톤은 직접 빙하에 의해 운반되어 쌓인 빙퇴석이며 이 빙퇴석은 마리안 소만의 형태로 볼 때 대부분 바톤반도가 아닌 킹조지섬 내륙에 광범하게 분포하는 화산암기반암에서 유래하였을 것이다. 사실 마리안 소만에 노출되어 있는 화강섬록암은 암주의 형태로 관입한 소규모 암체이며 킹조지섬 기반암의 대부분은 화산암으로 구성되어 있다. 바톤반도의 화산암연구에서 알 수 있듯이 킹조지섬 화산암에는 스멕타이트가 거의 남아있지 않다. 따라서 빙퇴석에도 스멕타이트의 양은 적다. 같은 종류의 화산암이라도 제4기의 최근 화산암은 지표 근처에서 변질되어 스멕타이트를 비롯한 점토 광물들이 생성되어 있을 수 있으나 이 지역의 오래된 제3기 화산암은 깊이 매몰되어 이미 저변성작용까지 받았으므로 점토광물들이 남아있지 않은 것이다. 실제로 저자들은 현재 마리안 소만과 포터소만의 빙하 말단부 빙벽아래에서 빙하점토를 채취하여 광물분석을 실시하였으나 스멕타이트를 발견하지 못하였다. 따라서 A10-01 코아에서 100 cm를 전후한 스멕타이트 함량의 수직변화는 앞에서 언급한 엽납석의 기원과 관련하여 생각해 보면 빙하의 후퇴에 따른 퇴적물 공급원의 변화에 기인한 것으로 생각된다. 즉 빙하가 마리안소만을 덮고 있던 시기에는 스멕타이트가 없는 화산기반암으로부터 유래한 빙퇴석이 주로 퇴적되었고 그 후 마리안 소만과 바톤반도에서 빙하가 후퇴하면서 노출된 열수변질대 쇄설물로부터 엽납석이 유입되었고, 스멕타이트를 포함한 화산재의 강하와 토양의 유입, 스멕타이트를 포함한 일부 화강섬록암 쇄설물의 유입 등이 일어났다.

결 론

NCS09와 GC98-2 코아는 심도별로 큰 변화 없이 각각 평균 8.3%와 1.1%, A10-01은 110 cm를 기준으로 상부에서 평균 4.7%, 하부에서 평균 1.5% 정도의 스멕타이트가 함유되어 있으며 캐올리나이트는 검출되지 않았다. 박편관찰에 의하면 스멕타이트가 풍부한 NCS09 코아에는 황색 또는 황록색의 둥근 점토입단들이 흔히 관찰된다. 이 점토는 Fe_2O_3 와 K_2O 를 각각 평균 16.97%와 2.53% 함유하고 있으며, 평균 구조식으로부터 함철바이델라이트로 판명되었다. GC98-2의 스멕타이트는 양은 작으나 NCS09와 유사한 화학적 및 조직적 특성을 갖는다. NCS09의 스멕타이트는 사우스셰틀란드 근해의 비교적 최근 현무암질 화산물질이 해수와 반응하여 생성된 후에 빙하침식이나 화산분화시 재동되어 퇴적한 것으로 판단된다. 보다 대륙에 가까운 GC98-2는 심성암류나 고기 화산암류의 영향을 많이 받아 스멕타이트의 양이 작다. A10-01의 경우 하부에는 킹조지섬 내륙의 스멕타이트가 없는 고기 화산암이 빙하침식되어 퇴적되었고, 상부에는 빙하가 후퇴한 후에 드러난 바톤반도의 열수변질물을 포함한 육상퇴적물들과 풍성 퇴적물들이 피요르드로 유입되어 퇴적한 것으로 보인다. XRD 분석결과에도 불구하고 스멕타이트내 높은 K 함량은 불규칙 스멕타이트-일라이트 혼합층 광물의 존재를 지시하고 있어서 향후 TEM 격자상관찰에 의한 미조직 관찰이 필요할 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 2000년도 “극지환경 특성 및 보존에 관한 연구”의 일부로 수행되었다. 광물정량분석을 도와준 여상진, 이범한 석사 그리고 박편제작에 수고한 배진한 석사에게 감사를 표합니다. 논문을 심사해 주신 김윤중 박사와 익명의 심사위원에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김동선, 박병권, 윤호일, 강천운 (1998) 남극 남셰틀란드 군도의 맥스웰 만에서 홀로세 기후변화에 대한 지화학적 증거. 한국해양연구소 극지환경 특성 및 보존에 관한 연구보고서 BSPP 98001-04-1149-7, 49-70.
- 정기영, 윤호일 (2000) 남극 남극 사우스셰틀란드 킹조지섬 바톤 반도 토양에서의 화학적 풍화작용과 풍화기원광물에 대한 미조직학적 증거. 한국해양연구소 극지환경 특성 및 보존에 관한 연구보고서 ECPP 99001-03, p. 346-366.
- 정기영, 윤호일, 박병권 (1999) 서남극 킹조지섬 바톤반도의 토양 점토광물의 분포 및 기원. 지질학회지, 35, 265-278.
- Chamley, H. (1989) Clay sedimentology, Springer-Verlag, Heidelberg, 623p.
- Ehrmann, W.U., Melles, M., Kuhn, G., and Grobe, H. (1992) Significance of clay mineral assemblages in the Antarctic Ocean. Marine Geol., 107, 249-273.
- Honnorez, J. (1981) The aging of the oceanic crust at low temperature. In: Emiliani C. (ed.), The oceanic lithosphere, The Sea, 7, Wiley & Sons, New York, 525-587.
- Jeong, G.Y., and Kim, S.J. (1993) Boxwork fabric of halloysite-rich kaolin formed by weathering of anorthosite in the Sancheong area, Korea. Clays Clay Miner., 41, 56-65.
- 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. Jour. Sed. Res., 71, 833-842.
- Masuda, H., O'Neil, J.R., Jiang W.-T., and Peacor, D. R. (1996) Relation between interlayer composition of authigenic smectite, mineral assemblages, I/S reaction rates and fluid composition in silicic ash of the Nakai Trough. Clays Clay Miner., 44, 443-459.
- Melles, M., Kuhn, G., Fütterer, D.K., and Meischner, D. (1995) Processes of modern sedimentation in the Southern Weddell Sea, Antarctica - Evidence from surface sediments. Polarforschung, 64, 45-74.
- Singer, A., Stoffers, P., Heller-Kallai, L., and Szafrank, D. (1984) Nontronite in a deep-sea core from the South Pacific. Clays Clay Miner., 32, 375-383.
- St. John, K.E.K and Cowan, E.A. (2000) Terrestrial gypsum from Alaska and Greenland in glacially influenced marine sediments. Sed. Geol., 136, 43-58.
- Weaver, C.E. and Pollard, L.D. (1973) The chemistry of clay minerals. Elsevier, Amsterdam, 213p.
- Zhou, Z. and Fyfe, W.S. (1989) Palagonitization of basaltic glass of DSDP site 335, Leg 37: textures, chemical composition, and mechanism of formation. Amer. Mineral., 74, 1045-1053.

2002년 2월 4일 원고접수, 2002년 2월 15일 게재승인.