

## 서남극 사우스셰틀랜드 킹조지섬 바톤반도 육상 토양의 광물학적, 지화학적 특성

### Mineralogical and Geochemical Characteristics of Soils of Barton Peninsula, King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica

정재우(Jaewoo Jung) · 구태희(Taehee Koo) · 양기호(Kiho Yang) · 김진욱(Jinwook Kim)\*

연세대학교 지구시스템학과  
(Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea)

요약 : 남극의 토양 환경에 대한 기초자료를 확보하기 위하여 킹조지섬 바톤반도에 위치한 세종기지 주변지역의 토양 성분과 토양을 구성하는 점토광물의 종류 및 분포, 조성을 규명하고자 X선 회절분석과 습식분석(철의 산화도와 양이온 교환능 측정), 투과전자현미경-전자에너지 손실 분광분석, 전함량 분석을 실시하였다. X선 회절 분석을 실시한 결과, 스멕타이트, 일라이트, 카올리나이트, 녹니석이 주요 점토광물로 함유되어 있으며 석영, 사장석 등의 화산활동 기원 초생광물도 함께 수반되어 나타났다. 토양 시료의 철 산화도 분포는 대부분의 지점에서 Fe(II)이 20~40%, Fe(III)이 50% 이상 토양 입자상에 존재하였고, 나노 스케일에서 스멕타이트를 분석했을 때 광물 구조 내 Fe(III)/ $\Sigma$ Fe이 약 57%로 분석되어 전체 토양의 철 산화도와 유사한 결과를 보였다. 양이온 교환능은 전반적으로 100-300 meq/kg 범위였으며, 시료 채취지점에 따른 유의미한 차이는 보이지 않았다. 전체 토양의 전함량 분석 결과, 광물의 주 구성 원소(Mg, K, Na, Al, Fe)는 지점에 따른 차이를 보이고 있는 반면, 중금속 원소(Co, Ni, Cu, Zn, Mn)는 지점별로 유사하게 나타났다. 이러한 결과들은 토양을 구성하는 기반암이 기본 원소 분포에 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 따라서 본 연구 결과는 남극 지표 토양환경과 토양 내 점토광물에 대한 기초자료 확보에 있어서 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

주요어 : 남극토양, 점토광물, 철 산화도, 양이온 교환능, 전함량 분석

**ABSTRACT** : Surface soils on Barton Peninsula, King George Island, West Antarctica were investigated to acquire the mineralogical and geochemical data of soil in Antarctica. Multiline of techniques for example, X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM)-electron energy loss spectroscopy (EELS), and wet chemistry analysis were performed to measure the composition of clay minerals, Fe-oxidation states, cation exchange capacity, and total cation concentration. Various minerals in sediments such as smectite, illite, chlorite, kaolinite, quartz and plagioclase were identified by XRD. Fe-oxidation states of bulk soils showed 20-40% of Fe(II) which would be ascribed to the reduction of Fe in clays as well as Fe-bearing minerals. Moreover, redox states of Fe in smectite structure was a ~57% of Fe(III) consistent to the values for the bulk soils. The cation exchange capacity of bulk soils ranged from 100 to 300 meq/kg and differences were not significantly measured for the sampling locations. Total cations (Mg, K, Na, Al, Fe) of bulk soils

\*Corresponding author: +82-2-2123-5668, E-mail: jinwook@yonsei.ac.kr

varies, contrast to the heavy metals (Co, Ni, Cu, Zn, Mn). These results suggested that composition of bed rocks influenced the distribution of elements in soil environments and soils containing clay compositions may went through the bio/geochemical alteration.

**Key words** : Antarctic soils, clay minerals, Fe-oxidation state, Cation exchange capacity (CEC), Total cation concentration

## 서 론

남극대륙은 남빙양으로 둘러싸인 넓이가 한반도의 60여 배인 약 1,360만 km<sup>2</sup>에 이르는 세계에서 5번째로 큰 대륙이며, 평균 약 2,000 m 두께의 빙하로 대륙 전체가 덮여 있다(Radok, 1985). 겨울에는 평균기온이 영하 40-70℃까지 떨어지는 혹독한 기후와 제한적인 접근성으로 인하여 연구에 많은 제약이 있으나, 지하 광물자원 및 석유자원이 풍부한 것으로 알려져 있다(Chang, 1986). 남극의 환경은 미래에 개발될 잠재적인 광물자원의 가치뿐만 아니라 최근 고조되어 가는 지구 온난화 문제에 따른 국제적인 지구 환경 보존의 참여 차원에 있어서 학술적인 측면과 국가 정책적인 측면에서 갈수록 중요하게 부각되고 있다(Choi *et al.*, 2011). 이에 발맞춰 우리나라도 1988년 남세틀랜드 제도에 위치한 킹조지섬에 세종과학기지(62°13'S, 58°47'W)를 건설한 이후, 매년 남극과학연구단을 파견하여 기지 주변의 육상과 인근 바다에서 지질조사 및 생태학적 연구를 수행하고 있다. 많은 연구자들에 의해서 세종기지를 중심으로 바톤반도 주변의 지하자원(Kim and Kwon, 1996; Jeong and Yoon, 2002), 해양환경(Shin *et al.*, 2001), 자연 환경(Choi *et al.*, 2006; Suh *et al.*, 2008), 조류(Jung *et al.*, 2006) 및 지의류(Lim *et al.*, 2009) 등에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있으나, 남극 토양의 광물학적, 지화학적 특성에 대한 연구는 미비한 실정이며 남극 대륙 지표 토양 내 점토광물의 분포, 조성 및 기원 규명의 필요성이 제기되고 있다(Yoon *et al.*, 1997). 따라서 본 연구에서는 남극의 토양환경에 대한 기초자료 확보를 위하여 킹조지섬 바톤반도에 위치한 세종기지 주변지역의 토양 성분과 토양을 구성하는 점토광물의 종류와 분포, 조성을 규명하고자 X선 회절 분석(XRD, X-Ray Diffraction)과 습식분석(철의 산화도와 양이온 교환능 측정), 투과전자현미경-전자에너지 손실 분광(TEM- EELS, Transmission Electron Microscopy-Electron Energy

Loss Spectroscopy) 분석, 전함량 분석을 실시하였다.

## 시료 및 실험방법

### 토양 시료

토양 시료는 서남극 남극반도 남서틀랜드 제도의 가장 큰 섬인 킹조지섬의 바톤반도 전역에 걸쳐서 46개 지점에서 표층 토양을 채취하였다(Fig. 1). 시료는 폴리에틸렌 병에 밀봉하여 조직과 습기를 보존하여 운반하였고 냉장 보관하여 최대한 원상태로 유지하고자 하였다. 이 중 해안가와 내륙지역, 기반암과 같은 특징으로 시료를 선정하여 분석을 진행하였다.

### X선 회절 분석(XRD)

X선 회절 분석(XRD)을 위해 선정된 7개 지점의 시료를 막자와 막자사발을 이용하여 곱게 갈아준 뒤, 분말 상태의 시료 ~0.5 mg을 1 ml의 증류수에 분산 시킨 뒤 이를 피펫팅하여 광물 분석용 유리슬라이드 위에 곱게 도말하고 공기 중에서 하룻밤 자연 건조시켜 정방위 시편을 만들어 사용하였다. 각각의 시편은 연세대학교의 Miniflex(II)를 이용하여 Cu-K  $\alpha$  radiation을 이용하여 2-theta 기준 2°에서 65°, 0.02°/step, 1.5°/min 조건으로 측정하였다. 동시에 토양 내 점토광물의 정확한 동정을 위하여 침강법으로 2  $\mu$ m 이하의 점토를 분리하여 정방위 시료를 제작한 후 원시료, 가열시료, 에틸렌 글리콜 처리한 시료에 대하여 각각 XRD 분석을 실시하였다.

### 철 산화도 & 양이온 교환능(CEC) 분석

토양 내 철의 산화상태(Fe-oxidation state)와 양이온 교환능(CEC, Cation exchange capacity) 확인을 위해 습식분석을 진행하였다. 철의 산화도 측

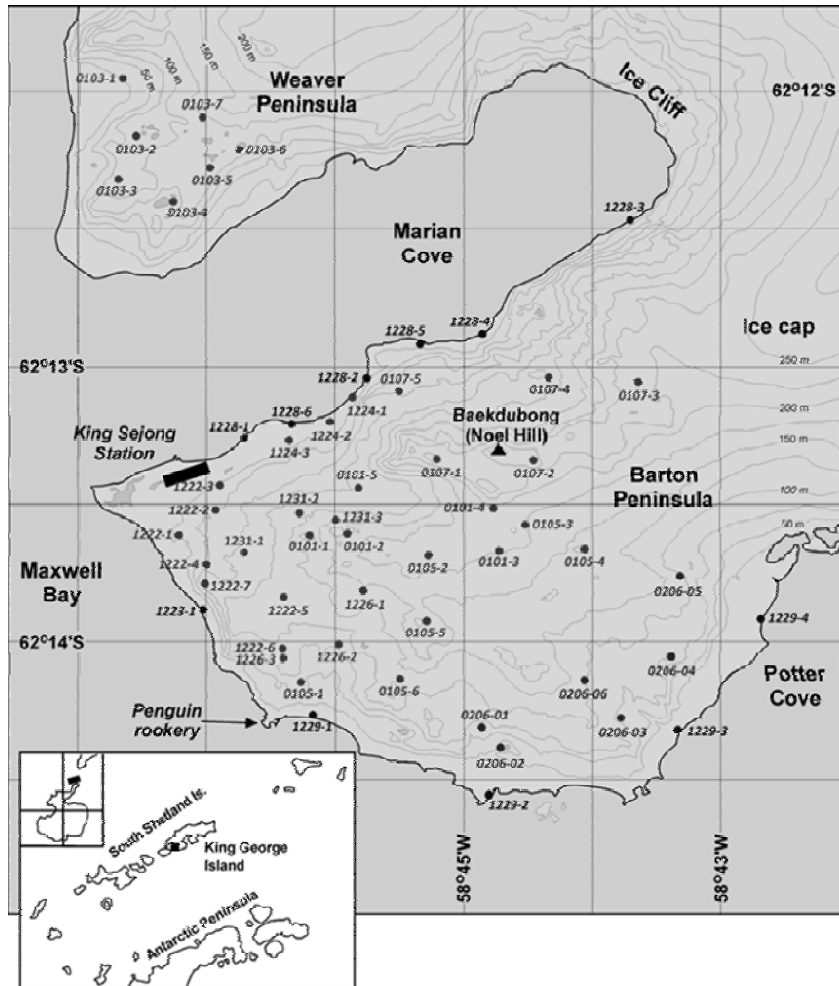


Fig. 1. Location of Sampling sites in Barton Peninsula of King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica.

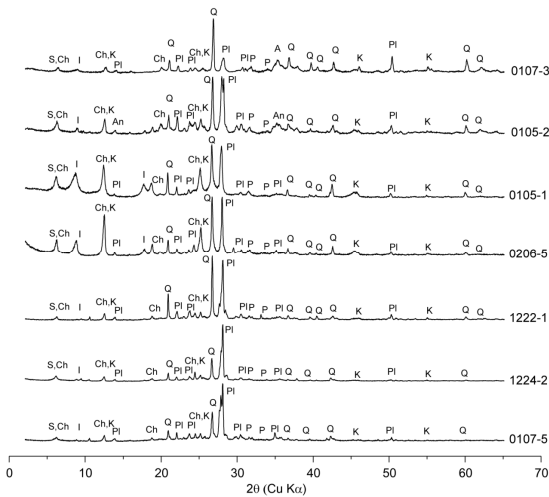
정은 1.10-phenanthroline assay를 이용해 전체 토양(bulk sediment)의  $Fe(II)/\Sigma Fe$ 의 비율을 계산하였다. 1.10-phenanthroline은  $Fe(II)$  이온과 결합하여 발색하는 시약으로, 510 nm에서의 흡광도를 측정하여  $Fe(II)/\Sigma Fe$  비율을 계산하였다. 이때 시료에 Hydroxylamine을 첨가하여 모두  $Fe(II)$ 로 환원시킨 뒤 측정하여  $\Sigma Fe$ 을 계산하고, 이를 통해  $Fe(II)$ 의 함량을 비율적으로 계산하였다(Stucki, 1981).

양이온 교환능은 먼저  $CaCl_2$ 로 포화된 전체 토양을 다시  $MgCl_2$ 를 이용하여 양이온 치환 반응을 일으켰을 때 치환되어 나오는  $Ca$ 의 농도를 측정하고 토양의 무게 대비 치환되어 나오는 양이온의 당량을 계산하여 전체 토양 내에 존재하는 광물들에 의

한 양이온 교환 정도를 계산하였다(Jackson, 1956).

투과전자현미경-전자에너지 손실 분광법 (TEM-EELS)

토양의 주요 구성광물인 점토광물을 나노스케일에서 직접 관찰하고 화학적 특성을 파악하기 위해 투과전자현미경(TEM)과 전자에너지 손실 분광(EELS) 분석을 진행하였다. 투과전자현미경 분석 시료는 막자와 막자사발을 이용해 최대한 곱게 갈아낸 뒤 에탄올에 미량의 시료를 분산시켜 상등액을 이용하여 제작하였다. 에탄올에 분산된 시료를 2-3분 정도 초음파 분해기(sonicator)를 이용하여



**Fig. 2.** X-ray diffraction profiles of bulk soils (0107-5, 1224-2, 1222-1, 0206-5, 0105-1, 0105-2, 0107-3.). S = Smectite, Ch = Chlorite, K = Kaolinite, I = Illite, Pl = Plagioclase, Py = Pyrophyllite, P = Pyrite, Q = Quartz.

최대한 분산시킨 뒤 Cu-grid로 상등액을 떠내 자연 건조 시켰다. 투과전자현미경분석은 한국기초과학지원연구원 서울센터의 시공간분자이미징연구팀의 지원을 받아 진행되었다. 전자에너지 손실 분광 분석의 결과는 ‘Gatan Digital Micrograph’ 프로그램을 활용하여 처리하였으며, 전자에너지 손실 분광 스펙트럼(EELS) 중에 Fe의  $L_3$ ,  $L_2$  피크 영역대의 배경신호를 제거한 뒤 표현하였다. 분석된 적분비율(Integral ratio)을 van Aken *et al.* (1998)과 Yang and Kim. (2016)에서 제시한 방법에 적용하여 스멕타이트 구조 내 철의 산화수를 정량 계산하였다.

### 전함량 분석

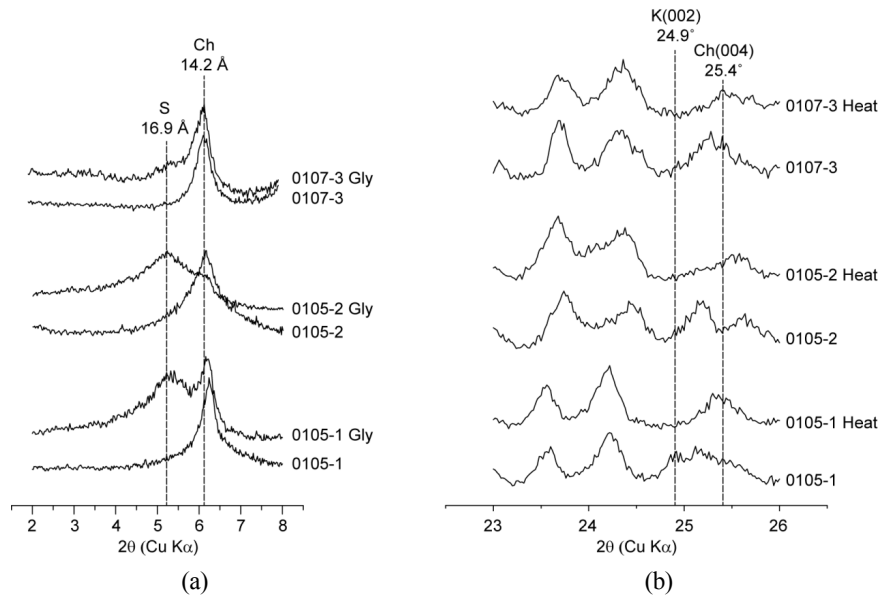
극지 토양 중 해안가와 내륙지역, 기반암과 같은 특징으로 선정된 17개 토양의 전함량 분석은 국립환경과학원 환경측정분석센터의 ICP/MS (Elan-DRC-e, Perkin elmer)를 이용하였다. 토양의 전처리에는 흑연블록 열분해장치에서 완전 용해법으로 산분해를 진행하였다. 산분해에 이용한 질산 및 염산, 불산은 Aldrich사의 trace metal 분석급 re-distilled acid를 이용하였으며, 붕산 및 과염소산은 미량 중금속 분석급 시약을 이용하였다. 분석의 정확도 확보를 위하여 SLRS-5 (NRCRRC, Canada) 인증 물

질을 함께 분석하였다.

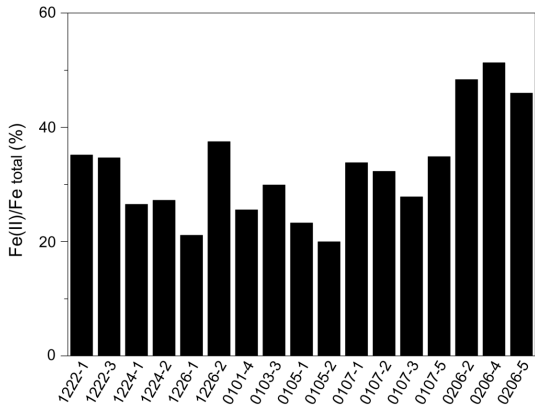
### 실험 결과 및 토의

#### X선 회절 분석(XRD)

바톤반도 전역에 걸쳐 기반암, 해안가와 내륙지역에 따라 선정된 7개의 분석 지점에 대한 광물종과약을 위해 X선 회절 분석을 진행하였다. 광물종 분포에 영향을 줄 수 있는 인자 세 가지(기반암의 특성, 위치, 온도)에 따른 차이를 보기 위해 분석 지역을 선정하였으며, 지점별로 X선 회절 분석을 통해 광물 분포상 분석을 실시하였다. X선 회절 분석 결과, 바톤반도 전역에 걸쳐 대부분의 시료 채취지점에서 스멕타이트(smectite), 일라이트(illite), 카올리나이트(kaolinite), 녹니석(chlorite) 등의 점토광물과 석영, 사장석 등의 화산활동 기원 초생광물 위주로 나타났다(Fig. 2). 또한 지점별로 광물간의 상대 피크 강도 차이(Relative peak intensity) 비교를 통해, 조성비 간의 미미한 차이만 있을 뿐 결정상의 구성 광물종은 유사하게 나타난 것을 알 수 있었다. 추가적으로 점토광물의 정확한 동정을 위하여 침강법으로 2  $\mu\text{m}$  이하의 점토를 분리하여 정방위 시료를 제작한 후 원시료, 가열시료, 에틸렌 글리콜 처리한 시료에 대하여 각각 X선 회절 분석을 실시하여 비교분석한 결과, 스멕타이트, 카올리나이트, 일라이트, 녹니석이 존재함을 확인하였다(Fig. 3a, 3b). 스멕타이트는 킹조지섬 기반암의 열수변질 또는 화산재의 열수변질에 의해 생성되었고, 카올리나이트의 대부분이 모암의 열수변질에서 유래되었다고 보고되고 있다(Jeong and Yoon, 2001). 일라이트와 녹니석은 대부분 화성암이나 변성암에서 유래한 쇄설성 광물로 알려져 있다(Ehrmann *et al.*, 1992). 이처럼 이 지역 토양 내 다양한 종류의 점토광물 구성은 사우스 셰틀란드 군도 및 브랜드필드 해협 지역의 화산 활동과 관련된 열수작용에 의해 영향을 받은 것으로 사료된다. 뿐만 아니라 일반적으로 토양에서 나오는 광물들이 남극 토양 내에 분포하는 것을 확인함으로써, 남극과 같은 저온 환경에서도 토양을 구성하는 광물들이 형성될 수 있음을 알 수 있다. 또한 향후 연구에서는 남극 토양의 회토류 분석을 통해 좀 더 정확한 점토 광물의 기원 및 기원지 분석이 필요할 것으로 사료된다.



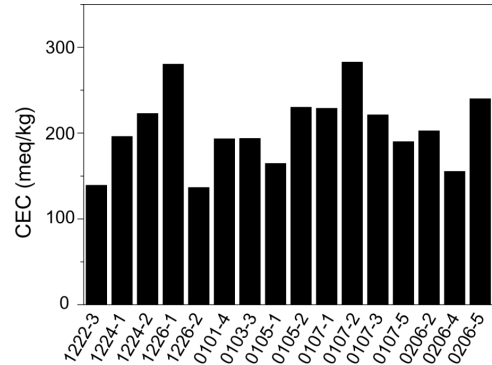
**Fig. 3.** X-ray diffraction profiles of < 2 μm size fraction of bulk soils (0105-1, 0105-2, 0107-3) (a) Ethylene-glycolated (b) heated at 550°C for 30 minutes. S = Smectite, Ch = Chlorite, K = Kaolinite.



**Fig. 4.** 1,10-phenanthroline assay results of 17 bulk soil samples.

#### 철 산화도 & 양이온 교환능(CEC) 분석

각 샘플링 지점의 토양의 지화학적 특성을 파악하기 위해 전체 토양의 철 산화도 상태(Fe-oxidation state)를 1,10-phenanthroline assay를 이용하여 분석한 결과, 토양 시료의 철 산화도 분포는 대부분의 지점에서 20~40%의 Fe(II)/ΣFe과 50% 이상의 Fe(III)/ΣFe 이 토양 입자상에 존재하고 있음을 확인하였다(Fig. 4). 이는 모든 시료가 지표에서 채취



**Fig. 5.** Cation exchange capacity (CEC) calculation of 16 bulk soil samples.

된 시료로써 대기 중의 산소에 노출되어 있었기 때문에 산화된 Fe(III)형태가 더 많은 경향을 보여준 것이라고 볼 수 있다.

양이온 교환능은 전체 시료 중 근접 중복 지점 (1222-01)을 제외한 16개의 지점에 대하여 분석을 수행하였으며, 분석 대상 시료 대부분이 100-300 meq/kg 범위로 시료 채취 지점에 따른 유의미한 차이는 나타나지 않았다(Fig. 5). 이는 양이온 교환능 측정이 전체 토양을 대상으로 하였기 때문에, 앞선 X선 회절 분석 결과와 마찬가지로 전반적으로

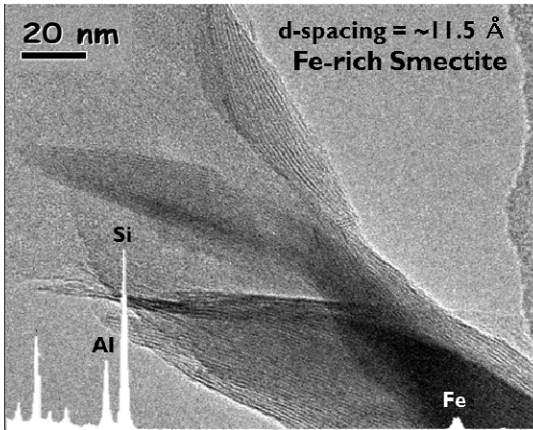


Fig. 6. TEM lattice fringe image of Fe-rich smectite and EDS spectrum from 1222-3.

유사하게 나타난 것으로 보인다. 따라서 향후 연구에서 토양 내 점토광물만을 분리하여 물리 화학적 특성을 파악하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

#### 투과전자현미경-전자에너지 손실 분광법 (TEM-EELS)

전체 토양에서 측정된 결과가 점토광물의 특성에도 반영될 수 있는지 확인하기 위해 반도 전역에 고르게 분포하고 있는 스멕타이트를 타겟 광물로 선정하여 나노 스케일에서 투과전자현미경 분석을 진행하였다. 먼저 투과전자현미경 상에서 나타나는 격자구조(lattice fringe)의 면간격(d-spacing)이 약 11.5 Å로 일반적인 스멕타이트의 면간격인 13-14 Å보다 작게 나타났으나, 이는 시편 제작 과정 중에 방향성을 가지고 배열되는 것을 피하기 위해 사용한 에탄올과 자연건조 중에 발생한 층간수의 탈수화 작용의 영향으로 보인다(Fig. 6). EDS 측정 결과 관찰되는 스멕타이트 모두 Al, Si 외에 Fe이 주요 원소로 분석되어 Fe-rich 스멕타이트인 것으로 확인되었으며, 이는 기존 연구에서 제시한 팔면체 자리가 주로 Fe으로 채워져 있는 함철바이델라이트(ferrian beidelite)와 함철사포나이트(ferrian saponite)와 일치하는 결과이다(Jeong and Yoon, 2001). 이러한 결과는 특정 철 함유 광물은 관찰되지 않았으나 점토광물이 Fe의 기원으로써 충분히 작용할 수 있음을 시사한다. 또한 앞서 철 산화도 분석을 통해 측정된 전체 토양에서의 철 산화도가 나노스케일의 스멕타이트에서도 유의한 연관성이 보이는데

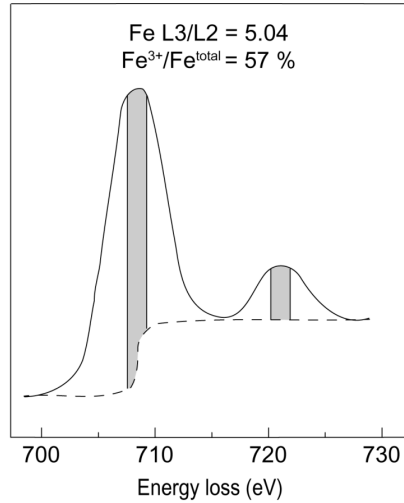


Fig. 7. EELS spectrum of Fe-rich smectite from 1222-3.

확인하기 위해 투과전자현미경-전자에너지 손실 분광 분석을 진행하였다(Fig. 7). 전자에너지 손실 분광 스펙트럼을 활용한 스멕타이트 구조 내 철의 산화수 분석 결과에서는 Fe(III)/ΣFe이 약 57%, 즉 Fe(II)이 43%이었으며, 이는 1,10-phenanthroline을 이용한 전체 토양의 철 산화도 분석에서 나타난 35%와 비교하여 유사한 결과로 보이며, 두 결과 간의 차이는 X회절분석 상에서 확인되지 않은 기타 비결정질(amorphous phase)의 광물 및 여러 광물들의 흡착-공침 등을 통해 존재하는 철에 의한 결과로 사료된다.

#### 전함량 분석

Chang *et al.* (2003)을 참고하여 바톤 반도 동쪽의 응회암(tuff) 지역, 반도의 서쪽 해안을 따라 위치한 화강섬록암(granodiorite)과 섬록암(diorite) 지역, 그리고 반도 전반적으로 위치한 현무암질 안산암(basaltic andesite)과 안산암(andesite) 지역을 기반암의 기준으로 삼고 이에 따라 17개 지점(1222-01, 1222-3, 1224-01, 1224-02, 1226-1, 1226-2, 0101-4, 0103-3, 0105-1, 0105-2, 0107-01, 0107-2, 0107-3, 0107-05, 0206-04, 0206-05)을 선정하여 분석을 진행하였다(Table 1). 광물의 주 구성 원소(Mg, K, Na, Al, Fe)는 지점에 따른 차이를 보이고 있다. 반면, 중금속 중에서는 Co, Ni, Cu, Zn, Mn 등은 지점별로 유사하게 나타났다. 그러나 Zn의 경우

**Table 1.** Trace metal concentration data of surface soil of selected 17 points from the Barton Peninsula (unit : mg/kg)

	Li	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Sr	Ag	Cd	In	Ba	Tl	Pb	Mg	K	Ca	Na	Al	Fe
1222-01	6.5	11.1	695.6	8.5	9.2	70.1	58.9	13.7	395	0.8	0.1	0	307.6	0.2	7.4	7582.1	13965	25036.2	2697.1	4385.4	3060
1222-03	7.4	12.2	770.8	9.6	10.3	77.4	136	15.3	410.9	0.8	0.1	0	319.8	0.2	8.1	6721.3	11503.8	22049.4	1418.6	5439.3	2928.1
1224-01	6	10.3	642.7	10	9.7	110.7	91.2	14.9	374.8	0.7	0.2	0	329.5	0.1	9	5459.3	17276.9	28540.7	2935.5	6084.7	3497.2
1224-02	9.7	15.9	781.5	8.1	10.8	106.3	64.5	13.7	409.3	0.7	0.2	0	237.4	0.2	7.2	12072	10087.5	26438.8	1841	5771.3	3245.4
1226-01	6.9	13	799.6	13.4	11.4	117.2	59.4	15.5	218.7	1	0.2	0.1	278.4	0.3	9	8331	17580.4	17232.3	1894.7	6410.7	3527
1226-02	6.1	6.9	777.8	12.5	11.5	90.7	53.32	15.1	313.6	1	0.2	0	351.9	0.2	5.8	8809	19684.3	34535.1	1165.4	4699.9	4558.6
0101-04	9.3	16.4	871.4	11.9	11.9	101.4	65.9	15	312.6	0.9	0.2	0	330.8	0.2	7.2	7042.8	12393.4	23175.8	3448.3	4617.7	2964.9
0103-03	23.8	18.5	1167.7	17.7	14.1	120.5	70.1	14.1	174.3	0.8	0.1	0	237.8	0.4	8	5958.6	24239.3	10739.5	2655.6	6872.2	5097.7
0105-01	9.1	9.8	1035.3	13.6	11.1	119.2	69.1	18	309.5	1.1	0.3	0	389.3	0.3	6.1	6282.5	15444.2	14859.8	4647.9	8977.3	3597.4
0105-02	8.9	8.5	968.6	13.6	11.1	119.2	69.1	18	309.5	1.1	0.3	0	378.3	0.3	6.3	8946.3	16200.2	15585	4821.3	5558.6	4555.2
0107-01	9.4	17.9	975.7	13	14.6	100.3	108.5	13.1	346.4	0.8	0.2	0	242.7	0.1	4.2	9338.2	12061.3	36797.9	2003.6	6795.8	4223.7
0107-02	10.6	15.5	759.4	11.9	13.2	110.5	52	14.9	313.2	0.9	0.2	0	262.8	0.1	5.1	10095.5	15441.7	36426.1	1353.8	6725.9	3971.1
0107-03	8	16.2	725.8	8.9	11.5	62.9	75.3	19.1	194.7	1	0.2	0	499.4	0.4	5.9	5596.8	24751.7	22737.4	1637.2	6755.7	3068.4
0107-05	8.7	17.2	915.7	11.9	13.2	109.9	471.1	13.7	310.7	0.9	0.3	0	324	0.2	12.5	8146.6	15451.1	29869.3	2190.1	5295.7	2946.1
0206-02	8.1	17.7	1050.5	13.3	10.9	88.1	109.7	12.8	499.8	1.7	1	0	184.4	0.1	2.8	8575.4	8469.3	43648.5	4476.6	5498.8	4048.1
0206-04	8	19.2	955.3	16.4	15.9	98.3	73.6	13	258.9	0.9	0.2	0	184.4	0.1	2.8	8575.4	8469.3	43648.5	4476.6	5498.8	4048.1
0206-05	13	10.3	919.5	13.4	10.6	129.1	64	15	258.8	0.8	0.2	0	325	0.3	7.1	7391.8	16251.2	16160.6	2129.3	5131	3326.4

지질도 상 화강섬록암 지역인 0107-01과 0107-05 지역에서 가장 높게 나타났다. 이는 샘플링 선정 당시 참고했던 Chang *et al.* (2003)보다 이후에 출간된 바톤반도 지역의 지화학적 특성에 대해 분석한 Lee *et al.* (2004)을 보면 화강섬록암으로 구분되었던 지역이 현무암질 안산암 및 안산암 지역으로 재분류된 것을 확인할 수 있다. 섬록암과 안산암은 마그마 분류 체계상 유사한 화학 조성을 갖지만 분출 유형에 따라 분출암과 심성암으로 분류되는 것으로, Lee *et al.* (2004)에 따르면 일부 지역의 경우 일반 안산암보다 고철질(mafic) 함량이 높은 현무암질 안산암의 특징을 보여준다. 이러한 특징이 일부 중금속(Zn, Cd) 함량이 높게 나타나는 것에 영향을 준 것으로 예상된다. Cu 역시 현무암질 안산암으로 재분류된 0107-01, 0107-05 지역에서 높게 나타났으며 석영이 주구성 광물인 1222-01 지역에서는 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 고철질 기반암이 있는 지역에서 함량이 높게 나타나고 SiO<sub>2</sub>가 주구성 성분인 석영이 주를 이루는 기반암 지역에서는 함량이 낮게 나타나는 경향이 나타난 것으로 해석할 수 있다. Co와 Ni의 경우 현무암질 안산암 지역보다 응회암 지역인 0206-04와 0206-05 지역에서 비교적 높게 나타났으며 다른 금속과 마찬가지로 1222-01 지역에서는 비교적 낮게 나타났다. 응회암은 화산재가 교결작용을 거치면서 다공질의 암석을 형성한 것으로써 퇴적 이후 뜨거운 상태에서 고결화작용을 거치기까지 당시 퇴적위치의 환경을 그대로 반영하는 특징을 보여주고 있다. 따라서 이는 응회암층이 형성되던 당시의 기반암의 특성을 반영한 결과라고 해석할 수 있다. 마지막으로 Mn의 경우 북쪽 해안가의 화강섬록암 지역인 1224-01, 1224-02 지역과 석영이 주구성성분인 1222-01 지역을 제외한 나머지 지역간의 편차가 약 200 mg/kg 정도로 나타나 고철질 기반암의 영향을 가장 잘 보여주고 있다. 이것은 토양을 구성하는 기반암이 기본 원소 분포에 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

## 결 론

본 연구는 2010/2011, 2011/2012 남극탐사를 통해 채취한 남극토양의 성분과 토양을 구성하는 점토광물의 종류와 분포, 조성을 X선 회절 분석(XRD)과 습식분석(철의 산화도와 양이온 교환능 측정), 투과전자현미경-전자에너지 손실 분광(TEM-

EELS)분석, 전함량 분석을 실시하여 규명하였다. 킹조지섬 바톤반도 육상 토양은 반도 전역에 걸쳐 스�멕타이트, 일라이트, 카올리나이트, 녹니석 등의 점토 광물과 석영, 사장석 등의 화산활동 기원 초생광물 위주로 구성되어 있다. 이를 통해 각 지점별로 조성비의 미미한 차이만 있을 뿐 결정상의 구성 광물종은 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 토양 내 철의 산화도는 대체적으로 20-40%의 Fe(II)과 50% 이상의 Fe(III)이 토양 입자상에 존재하고 있으며, 나노 스케일에서 스�멕타이트를 분석했을 때 광물 구조 내 Fe(III)이 약 57%로 분석되어 전체 토양의 철 산화도와 유사한 결과를 얻었다. 이는 지표에서 채취된 시료로써, 대기 중의 산소에 노출되어 있기 때문에 산화된 형태인 Fe(III)이 더 많은 경향을 보이는 것으로 사료된다. 또한 특정 철 함유 광물은 관찰되지 않았으나 점토광물이 Fe의 기원으로써 충분히 작용할 수 있음을 시사한다. 전체 토양의 양이온 교환능은 전반적으로 100-300 meq/kg 범위이었으며, 이러한 결과는 앞선 X선 회절분석과 토양 내 철의 산화도 결과와 유사한 경향으로 시료 채취지점에 따른 차이는 보이지 않았다. 전체 토양의 전함량 분석 결과, 광물의 주 구성 원소(Mg, K, Na, Al, Fe)는 지점에 따른 차이를 보였지만, 중금속 중에서는 Co, Ni, Cu, Zn, Mn 등은 지점별로 유사하게 나타났다. 이러한 결과들은 토양을 구성하는 기반암이 기본 원소 분포에 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 따라서 킹조지섬 바톤반도 토양의 광물학적, 지화학적 분석결과는 남극 지표 토양환경과 토양 내 점토광물에 대한 기초자료 확보에 있어서 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

## 사 사

이 논문은 2016년도 해양수산부 재원으로 극지연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(과제명 : 서남극 빙붕 변화 관측 시스템 구축 및 제4기 해빙사(deglaciation history)복원기술 개발).

## REFERENCES

- Chang, S.K. (1986) Terra australis incognita; Antarctica: Its natural environment, petroleum, and mineral resources. *Journal of Korean Earth Science Society*, 7, 117-128.
- Chang, S.K., Lee, J.I., Choe, M.Y., and Hur, S.D. (2003) *Geology around the King Sejong Station*,



- King George Island off the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 39, 271-286.
- Choi, T., Lee, B.Y., Kim, S.J., Park, Y.M., and Yoon, Y.J. (2006) The characteristics of radiation, Temperature and wind direction around King Sejong Station, Antarctica. *Journal of Korean Geophysical Society*, 9, 397-408.
- Choi, I.K., Park, Y.J., Seo, D.C., Kang, S.W., Jeon, W.T., Kang, U.G., Sung, H.H., Hur, T.Y., Heo, J.S., and Cho, J.S. (2011) Physico-chemical Characteristics of Soil in the Vicinity of King Sejong Station, King George Island, Antarctica. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44, 709-716.
- Ehrmann, W.U., Melles, M., Kuhn, G., and Grobe, H. (1992) Significance of clay mineral assemblages in the Antarctic Ocean. *Marine Geology*, 107, 249-273.
- Jackson, M.L. (1956) *Soil Chemical Analysis - Advanced Course*. UW-Madison Libraries Parallel Press, Wisconsin.
- 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*, 71, 833-842.
- Jeong, G.Y. and Yoon, H.I., (2002) Mineralogical characteristics and origins of smectite in the marine sediments around South Shetland Islands, Antarctica. *Journal of Mineral Society of Korea*, 15, 22-32.
- Jung, W.S., Joo, H.M., Hong, S.S., Kang, J.S., Choi, H.G., and Kang, S.H. (2006) Morphology and molecular data for Antarctic cryophilic microalga. *Porosira pseudodenticulata*, *Algae*, 21, 169-174.
- Kim, Y.D. and Kwon, M.S. (1996) Historical development of banning the exploitation of antarctic petroleum resources and national policy. *Korea Maritime Institute*, 11, 375-401.
- Lee, Y.I., Lim, H.S., and Yoon, H.I. (2004) Geochemistry of soils of King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica: Implications for pedogenesis in cold polar regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 4319-4333.
- Lim, H.S., Han, M.J., Seo, D.C., Kim, J.H., Lee, J.I., Park, H., Hur, J.S., Cheong, Y.H., Heo, J.S., and Cho, J.S. (2009) Heavy metal concentrations in the fruticose lichen *Usnea aurantiacoetra* from King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 52, 503-508.
- Radok, U. (1985) The Antarctic ice. *Scientific American*, 253, 82-89.
- Shin, Y.N., Yoon, H.I., Kim, Y.D., and Kang, C.Y. (2001) Diatom assemblages and its paleoceanography of the Holocene glaciomarine sediments from the Western Antarctic Peninsula shelf, Antarctica. *Journal of Korean Society of Oceanography*, 6, 152-163.
- Stucki, J.W. (1981) The quantitative assay of minerals for Fe<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup> using 1,10-phenanthroline: II. A photochemical method 1. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 638-641.
- Suh, J.K., Hwang, E., and Min, H.S. (2008) Measurement of heavy metals in antarctic soil at the King Sejong Station: application of isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Science and Technology*, 21(5), 364-374.
- van Aken, P. A., Liebscher, B., and Styrsa, V. J. (1998) Quantitative determination of iron oxidation states in minerals using Fe L 2, 3-edge electron energy-loss near-edge structure spectroscopy. *Physics and Chemistry of Minerals*, 25, 323-327.
- Yang, K.H. and Kim, J.W. (2016) Electron Energy Loss Spectroscopy (EELS) application to mineral formation. *Journal of the Mineral Society of Korea*, 29, 73-78.
- Yoon, H.I., Han, M.W., Park, B.K., Oh, J.K., and Chang, S.K. (1997) Glaciomarine sedimentation and palaeo-glacial setting of Maxwell Bay and its tributary embayment, Marian Cove, South Shetland Islands, West Antarctica. *Marine Geology*, 140, 265-282.

---

Received March 2, 2017, Revised March 20, 2017, Accepted March 23, 2017, Associate Editor: Jaehyung Yu