

산지 규암 토양의 광물학적 및 지구화학적 특성과 풍성 기원

조혜연 · 박미연 · 정기영*

안동대학교 지구환경과학과

요 약

한반도 토양에 퇴적한 광물먼지 입자는 기반암 풍화물인 토양광물입자와 구분이 명확하지 않아 토양내 풍성 물질의 추적이 어렵다. 이 연구에서는 기반암 풍화의 영향이 적은 규암지역 산지토양의 광물 및 지구화학 분석을 실시하고, 광물먼지의 주요 기원지인 고비사막 토양과 비교하였다. 규암 풍화과정에서 새로운 토양광물이 생성되지는 않았다. 실트이하 입도의 토양을 분석한 결과, 규암의 풍화로 생성될 수 없는 점토광물(44%), 사장석, K-장석 등이 함유되어 있어서, 대부분 풍성기원으로 해석되었다. 규암지역 토양의 주요 점토광물은 히드록시시알삽입질석(HIV)이며, 고비 토양의 주요 점토광물은 일라이트-스멕타이트류 점토광물이다. 규암 산지에 퇴적한 풍성 점토광물의 일라이트 층간 K가 산성토양환경에서 용탈되고, 히드록시Al 이온이 삽입된 HIV가 생성되었다. 규암 토양의 Si/Ti, Al/Ti, Fe/Ti비는 고비사막 토양과 유사하였고, Na/Ti, Ca/Ti, Mg/Ti, K/Ti비는 고비사막 토양과 비교하여 감소하였다. 이러한 화학조성변화는 광물먼지가 퇴적 후에 겪은 화학적 풍화에 기인한다. 규암 토양의 희토류 원소조성은 고비 토양과 매우 유사하다. 이상의 결과로부터 한반도 토양에 장거리 이동 광물먼지 입자들이 상당히 퇴적되었음을 알 수 있다.

주요어: 점토광물, 지구화학, 풍성, 풍화, 토양

Hye-Yeon Jo, Mi Yeon Park and Gi Young Jeong, 2019, Mineralogy, geochemistry, and eolian source of mountain soils on quartzite. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 1, p. 87-103

ABSTRACT: Eolian particles are difficult to distinguish from soil particles originating from chemical weathering of local bedrocks. In this study, we conducted mineralogical and geochemical analyses on high mountain soils developed on quartzite because of little contribution of quartzite to fine fractions of soils. Quartzite was disintegrated into sand and coarse silt particles without a neoformation of soil minerals. X-ray diffraction analyses showed that silt fractions of soils contained a large quantity of clay minerals (44%) together with plagioclase and feldspar, which could not be formed by quartzite weathering. Thus, clay-silt particles in soils were deposited via eolian process. The major clay minerals in the quartzite soils are hydroxy-Al interlayered vermiculite (HIV), whereas those in the Gobi desert soils, the major source of the mineral dust, are illite-smectite series clay minerals. In acidic mountainous soil environments, interlayer K was leached from illite layers of eolian clay minerals to form vermiculite, followed by intercalation of hydroxy-Al ions into vermiculite. The ratios of Si/Ti, Al/Ti, and Fe/Ti of quartzite soils were similar to those of Gobi desert silts. The ratios of Na/Ti, Ca/Ti, Mg/Ti, and K/Ti decreased in comparison to those of Gobi silts, attributed to the chemical weathering of mineral dust after deposition. The rare-earth element compositions of quartzite soils are very similar to those of Gobi soils. The results suggest the significant deposition of clay-silt particles originating from long-range transported mineral dust on Korean soils.

Key words: clay minerals, geochemistry, eolian, weathering, soil

(Hye-Yeon Jo, Mi Yeon Park and Gi Young Jeong, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea)

1. 서 론

건조지역 토양의 실트 입자는 바람에 의해 수천 km의 먼거리까지 운반되어 그 지역 지구환경과 상

호작용한다(Swap *et al.*, 1992; Foster *et al.*, 2007; Johnson and Meskhidze, 2013). 한반도 주변 대기에 부유하는 실트 입자들은 아시아 내륙 사막에서 발생한 광물먼지 입자들이다. 이러한 입자들의 농도

* Corresponding author: +82-54-820-5619, E-mail: jeearth@anu.ac.kr

는 봄철에 특히 높으며, 시계를 떨어뜨릴 정도의 고농도 광물먼지는 황사라고 한다. 광물먼지는 자연적으로 또는 빗물에 씻겨 퇴적되는데, 기원지에 가까울수록 퇴적률이 높다. 사막 기원지와 가까운 중국 황토고원에는 수백만년간 퇴적된 광물먼지가 최대 300 m 두께의 풍성퇴적층을 형성한다(Kukla and An, 1989; An *et al.*, 1991).

주요 광물먼지 발원지인 고비사막에서 2,000 km 이상 떨어져 있는 한반도에는 황토고원처럼 다량의 광물먼지가 퇴적되지는 않지만, 인지할 수 있을 정도의 퇴적은 예상할 수 있다. 특히 침식과 퇴적물 유입이 적은 하안단구나 해안단구 등의 용기 평탄지에 광물먼지 퇴적물이 잘 보존되었을 것이다. 이러한 관점에서 단구를 피복하는 실트질 퇴적층들에 대한 물성, 지화학, 층서 연구들이 수행된 바 있다(Yi, 2000; Shin *et al.*, 2004, 2005; Yu *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2011; Yoon *et al.*, 2011; Jeong *et al.*, 2013; Kwak and Jeong, 2017). 이러한 실트층들은 얇은 경우 1 m 이내, 두꺼운 곳은 4 m에 이른다. Jeong *et al.* (2013)은 국내 여러 평탄지를 피복하는 갈색 실트질 퇴적층 단면을 대상으로 광물정량, 점토광물, 지화학, 입도, 색상, 미세조직, 동위원소의 체계적 분석을 실시하고, 그 결과를 중국 황토고원의 풍성 퇴스(loess)-고토양(paleosol)과 비교하였다. 그 결과, 위치, 지형, 지질학적 차이에도 불구하고 단면 최상부 층의 물성, 광물학적 및 지구화학적 특성, 동위원소 특성의 수렴현상을 발견하고, 광물먼지의 광역적 퇴적으로 해석하였다. 이들 퇴적층이 중국의 풍성퇴적물인 황토고원 퇴스(loess)와 광물조성, 화학조성, 입도 등에서 차이가 있으나, 이는 습한 한반도 환경에서의 화학적 풍화작용 및 기원지로부터 장거리 이동에 따른 입도 감소로 해석되었다.

이전 연구는 조사 대상이 대부분 강변이나 해안의 좁은 단구지대였는데, 한반도의 주요 지형인 산지 토양에 퇴적한 광물먼지는 아직 연구되어 있지 않다. 미세 광물입자들은 적은 양으로도 토양의 화학적 및 물리적 특성에 큰 영향을 미친다. 특히 점토광물이나 산화철은 표면적이 크고 표면화학적으로 활발하여 각종 이온 및 유기화합물과 상호작용한다. 팽윤성 점토광물들은 토양의 투수성이나 사면안정에 영향을 미친다(Brady, 2007). 토양에 유입되는 각종 유기 오염물질의 흡착, 탈착, 분해는 극세립 광

물들과 밀접하게 관련되어 있다(McBride, 1994). 이와 같이 광물먼지의 주성분인 극미립 토양광물의 잠재적 중요성에도 불구하고, 점토광물을 비롯한 한국 토양의 구성 물질은 한반도 기반암의 풍화잔류물이라는 견해가 지배적이다(Um *et al.*, 1992; Jang, 1998). 침식된 산지 토양입자들은 하천과 해류에 의해 멀리 운반 및 퇴적되어 지구 기후 변화나 지각 변동 등의 지구환경 변화를 기록한다(Chamley, 1989). 최근의 미광물학적 연구들에 의하면 광물먼지입자들은 대체로 크기가 20 μm 이하이며, 입자 자체도 더 작은 극미립 입자들의 집합체이므로(Jeong, 2008, 2018; Jeong *et al.*, 2011, 2014; Jeong and Nousiainen, 2014; Park and Jeong, 2016), 퇴적될 경우, 토양의 화학적 및 물리적 특성에 영향을 미칠 것이다. 더구나 한반도 기반암의 주요 풍화물이 고령토 계열의 점토광물인 반면, 광물먼지의 주요 구성성분은 이온교환능과 팽윤성이 큰 일라이트-스멕타이트류의 점토광물이다(Jeong and Kim, 1993; Jeong and Lee, 1998; Jeong 2000, 2018; Lee and Kim, 2000; Jeong and Achterberg, 2014; Jeong and Nousiainen, 2014; Jeong *et al.*, 2014; Park and Jeong, 2016).

단구 등의 평탄지가 아닌 산지에 퇴적한 광물먼지 연구가 어려운 이유는 광물먼지가 그 지역 암석 풍화기원의 토양입자와 혼합되고, 풍화 변질되기 때문이다. 더구나 기반암 및 화학적 풍화산물의 광물학적 및 지구화학적 다양성, 그리고 지형 조건의 다양성을 고려하면 일반 산지 토양에 퇴적, 혼합, 변질된 극미세 광물먼지의 추적 분석은 매우 어려운 일이다. 그러나 기반암의 영향이 거의 없는 조건이라면 광물먼지의 퇴적과 변질에 대한 광물학적 및 지화학적 정보를 얻을 수 있을 것이다. 규암은 풍화에 대한 저항성이 큰 석영으로 대부분 구성되어 있으므로 규암의 풍화작용으로 점토광물 등의 극세립 토양 광물이 형성되지 않는다. 따라서 지형적으로 주변 다른 기반암의 풍화산물이 유수나 사태로 유입되기 어려운 높은 산지 규암을 피복하는 토양이 있다면 풍성퇴적물일 가능성이 있다. 한반도 토양내 장거리 이동 광물먼지의 혼합과 영향을 규명하기 위한 연구의 일환으로, 강원도 및 충청북도 규암 분포지역 산지토양을 대상으로 광물학적 및 지구화학적 분석을 실시하였으며, 그 특성을 기원지 토양과 비교하여 광물먼지의 퇴적과 변질에 대하여 토의하였다.

2. 시료 및 실험방법

조사 대상 규암은 충청북도 제천시와 단양군의 경계에 위치한 고생대 금수산규암과 강원도 영월군의 고생대 장산규암이다. 토양 시료 채취지점은 1,000 m 이상의 가파른 산악지형의 높은 규암 능선이나 능선 부근 규암 사면이다(그림 1a-1b). 능선 전체가 규암으로 되어 있어서, 규암 이외 다른 기반암에서 유래한 토양이 지표과정에 의해 시표채취지점으로 유입될 수 없다. 시료는 부엽질 흑색층을 걷어내고, 하부 갈색층에서 채취하였다(그림 1c-1d). 토양 시료채취지점 인근 노두에서 규암 시료도 채취하였다. 금수산 규암은 백운모의 배열에 의한 엽리가 잘 발달되어 변형작용을 받았으며(그림 2a, 2c), 장산규암은 변형구조가 관찰되지 않고 석영 입자 사이에 견운모가 충전되어 있다(그림 2b, 2d). 금수산에서 토양 시료 2점(GS1, GS2), 규암시료 1점(GSR), 장산에서 토양 시료 2점(JS1, JS2), 규암시료(JSR) 등 총 6개의 시료를 채취하였다(표 1).

광물먼지 주요 기원지인 몽골 고비 사막에서 8개의 지표 토양 시료(G1-G8)를 채취하여 함께 분석하였다(표 1). 몽골 고비사막 지역은 고생대 조산운동으로 생성된 화산암 및 퇴적암류의 습곡산맥과 그 사이 분지를 충전하는 중생대 후기 및 신생대 퇴적암류로 구성되어 있다(Traynor and Sladen, 1995; Badarch *et al.*, 2002).

본 연구에서 주요 분석 대상은 실트 크기 이하의 입자들이므로, 일회용 63 μm 나일론(nylon) 체를 이용하여 습식으로 체질하고, 50 $^{\circ}\text{C}$ 에서 건조하여 X선 회절(X-ray diffraction, XRD)분석과 화학분석을 위한 시료를 준비하였다. 이 시료들의 입도는 실트 크기 이하로 점토 입자도 포함하지만 편의상 토양 실트라 명하기로 한다. XRD용 분말시료는 3 g의 시료를 에탄올과 혼합하여 10 μm 이하 입도로 McCrone Micronizing Mill에서 파쇄하고 50 $^{\circ}\text{C}$ 에서 건조하였다. 100 mesh체에 통과시킨 건조시료를 측면채움으로 홀더(holder)에 충전하고 Rigaku Ultima IV

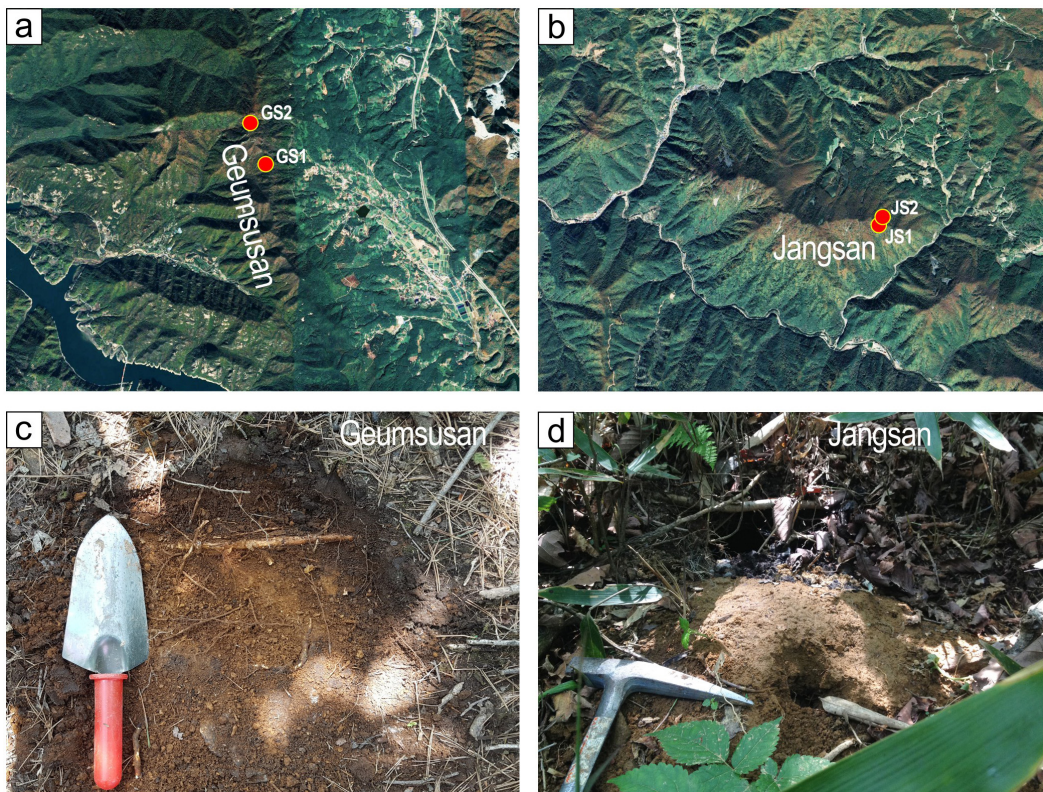


Fig. 1. Location of sample sites from the mountain ridges of quartzite. (a) Geumsusan quartzite. (b) Jangsan quartzite. (c) Occurrence of soil on Geumsusan quartzite (GS2). (d) Occurrence of soil on Jangsan quartzite (JS2).

회절기로 XRD 분석을 실시하였다. 분석 조건은 가속전압/전류 40 kV/30 mA, CuK α 선, 슬릿(slit)2/3°-0.3

mm-2/3°, 계수간격 0.03°, 계수시간 2초, 주사범위 3-65°(2 θ)이었다. 광물정량분석은 Siroquant 2.0을

Table 1. Samples from quartzite mountains and Gobi desert.

Sample	Type	Longitude	Latitude
GS1	Soil	N36°58'43.44"	E128°15'34.55"
GS2	Soil	N37°59'06.85"	E128°15'23.58"
GSR	Quartzite	N36°58'43.44"	E128°15'34.55"
JS1	Soil	N37°07'32.49"	E128°52'30.91"
JS2	Soil	N37°07'34.66"	E128°52'32.46"
JSR	Quartzite	N37°07'32.49"	E128°52'30.91"
G1	Gobi soil	N44°26'46.20"	E107°08'21.72"
G2	Gobi soil	N42°38'16.75"	E107°18'45.96"
G3	Gobi soil	N42°28'43.44"	E106°02'20.82"
G4	Gobi soil	N42°31'21.33"	E103°51'15.57"
G5	Gobi soil	N43°10'52.04"	E104°00'38.56"
G6	Gobi soil	N43°26'55.40"	E101°15'28.02"
G7	Gobi soil	N44°02'09.93"	E101°30'26.83"
G8	Gobi soil	N44°25'27.10"	E101°33'49.81"

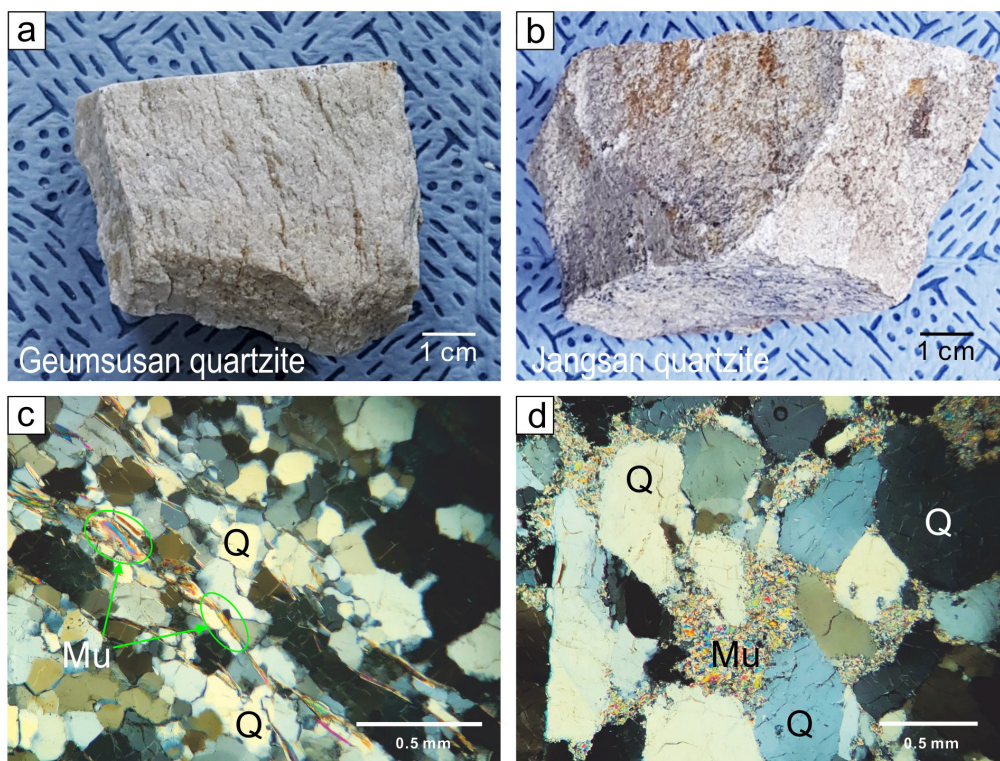


Fig. 2. Quartzite samples. (a) Foliated Geumsusan quartzite. (b) Massive Jangsan quartzite. (c) Polarizing microscope image of Geumsusan quartzite showing recrystallized quartz (Q) with aligned muscovite (Mu) grains. (d) Muscovite infillings in the interstices of detrital quartz grains in Jangsan quartzite.

이용하여 실시하였으며, 기저값, 단위포 상수, 분석 구간 등을 변화시키며 최적화하였다. 정량분석에 사용한 광물구조 및 화학조성자료가 실제 분석시료의 개별 광물과 차이가 있다. 특히 구조적 무질서도와 화학조성 변화가 심한 개별 점토광물 정량의 오차가 크다. 그러나 유사한 구조의 점토광물 그룹 함량의 오차는 적다. XRD 분석용 2 μm 이하 점토시료는 퇴적법과 원심분리로 분리하였으며, 점토 슬러리를 유리 슬라이드에 도포하여 정방위 점토시료를 제작하였다. 점토시료는 60°C 2일의 에틸렌 글리콜(ethylene glycol) 증기 처리, 30분 300°C 및 500°C 열처리를 차례로 실시하고, 각 단계별 XRD 분석을 시행하였다. 점토시료의 분석조건은 주사범위(2-30°, 2 θ)를 제외하면 전시료 분석조건과 동일하였다. 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 분석을 위해 토양 원시료에 에폭시(epoxy)를 주입하여 굳힌 다음, 연마 박편을 제작하였다. 연마 박편은 탄소 코팅 후, TESCAN LYRA 전계방출형 SEM 및 OXFORD

X-MAX 에너지분산X선분광(energy dispersive X-ray spectrometer, EDS) 장비를 이용하여 후방산란전자(back-scattered electron, BSE)상으로 토양 입자들의 크기, 형태, 광물 종을 분석하였다. 63 μm 나일론(nylon) 체질 전시료의 주원소 및 미량원소 화학분석은 Activation Laboratories에서 유도결합플라즈마 방출 및 질량분광분석으로 실시하였다.

3. 결 과

3.1 점토광물특성

에틸렌글리콜 처리한 금수산과 장산 점토시료의 XRD 분석 결과, 캐올리나이트, 녹니석, 14 Å 상이 주요 점토광물로 확인되며, 일라이트의 10 Å 회절선은 매우 약하다(그림 3). 300°C 가열시 14.0 Å 부근에 있던 회절선은 피크 높이가 낮아지고, 폭은 넓어지며, 13.8 Å 부근으로 이동한다. 500°C 가열시 12 Å 부근으로 추가 이동하나, 10 Å 회절선의 강도가 증가하

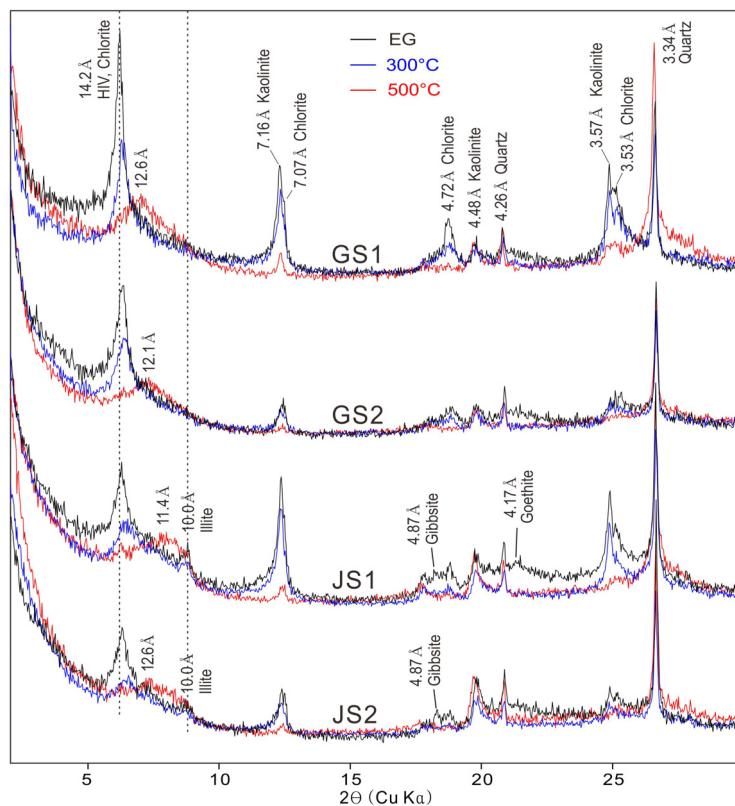


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of clay-silt fractions of mountain soils developed on Geumsusan (GS) and Jangsan (JS) quartzite. Oriented mounts. EG: ethylene glycol vapor treatment. HIV: hydroxy-Al interlayered vermiculite.

지는 않는다. 이는 $14\text{ \AA}$ 상이 히드록시(hydroxy)-Al 이 층간에 삽입된 질석(hydroxy-Al interlayered vermiculite, HIV)임을 지시한다(Banhisel and Bertsch, 1989). $7\text{ \AA}$ 부근 고령토 광물과 녹니석의 중첩된 회절선은 500°C 가열시 고령토의 회절선이 사라지고, 미약한 녹니석 회절선이 잔류한다.

에틸렌글리콜 처리 고비사막 점토의 XRD 패턴에서 일라이트의 $10\text{ \AA}$ 회절선, 스멕타이트의 $17\text{ \AA}$ 회절선, 녹니석의 $14\text{ \AA}$ 회절선이 모든 시료에서 관찰되는데, 일라이트와 스멕타이트의 회절선 폭이 넓고, 저각도 영역에서 배경값이 높으며, 스멕타이트 회절선의 강도 변화가 심하다(그림 4). 일라이트와 스멕타이트는 다양한 혼합층상 구조를 이루는 것으로 잘 알려져 있는데(Reynolds, 1980; Moore and Reynolds, 1997), 불규칙 혼합층의 경우에는 일라이

트 및 스멕타이트 혼합물과 구분이 모호하다. 에틸렌글리콜 XRD 패턴에서 일라이트와 스멕타이트의 $26\text{ \AA}$ 와 $5.3\text{ \AA}$ 부근에서 일라이트-스멕타이트 혼합층에 기인하는 낮고 폭넓은 피크가 존재한다(그림 4). 고비사막에서 발원한 광물먼지의 투과전자현미경 분석에서도 일라이트-스멕타이트 불규칙 혼합층이 흔히 존재함이 확인되었다(Jeong and Achterberg, 2014; Jeong and Nousiainen, 2014). 300°C 가열시 스멕타이트의 $17\text{ \AA}$ 회절선이 사라지고, 일라이트의 $10\text{ \AA}$ 회절선이 강화되며, 녹니석의 $14\text{ \AA}$ 회절선이 잔류한다. 500°C 가열시 캐올리나이트의 $7.14\text{ \AA}$ 회절선이 사라지고, 녹니석의 $7.04\text{ \AA}$ 회절선이 잔류한다. 가열 실험으로부터 고비 토양의 점토에는 규암 지역 토양과 달리, HIV가 존재하지 않음을 확인할 수 있다.

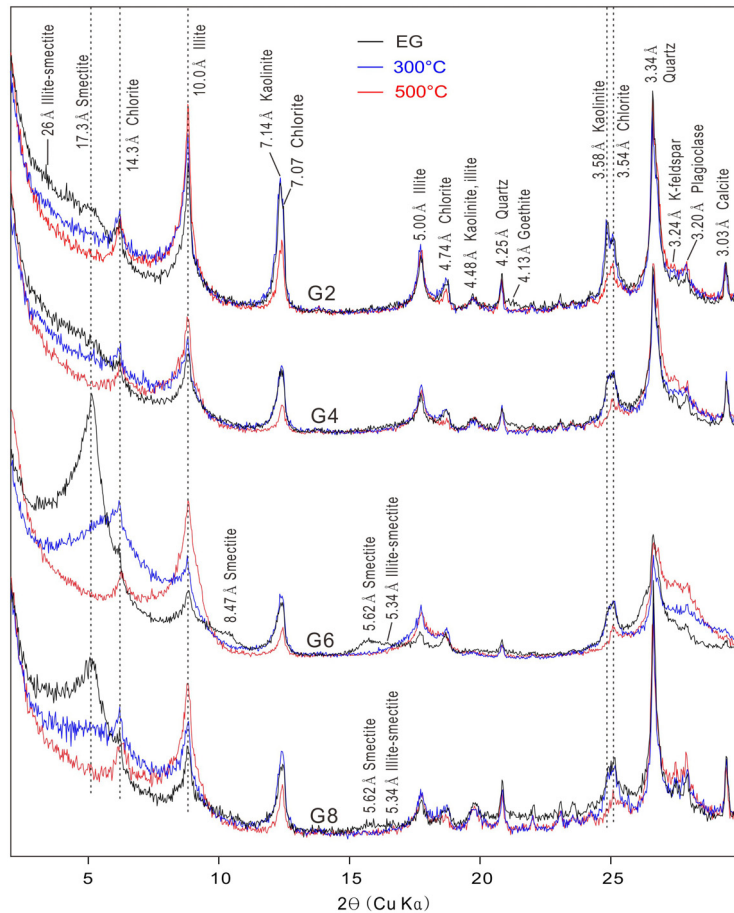


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of clay-silt fractions of Gobi desert soils. Oriented mounts. EG: ethylene glycol vapor treatment.

3.2 전시료 광물조성

기반암인 금수산규암은 석영 94.2%, 백운모 5.8%, 장산규암은 석영 90.4%, 백운모 9.6%로 구성되어 있고, 다른 광물은 검출되지 않았다(표 2). 금수산규암

을 피복하는 토양 실트에는 규암에 없는 광물들이 확인되었다(그림 5). XRD 패턴에서 20°와 35°(2θ) 부근의 강한 회절대가 특징인데(그림 5), 이는 적층무질서(stack disorder)가 큰 여러 점토광물의 공

Table 2. Mineral compositions in quartzite samples and clay-silt fractions of soils on quartzite (wt%).

Sample	Quartzite		Soils on quartzite			
	GSR*	JSR**	GS1	GS2	JS1	JS2
Quartz	94.2	90.4	42.5	46.8	42.1	41.9
Plagioclase	0.0	0.0	4.8	2.9	4.8	5.6
K-feldspar	0.0	0.0	3.0	1.8	6.3	4.4
Muscovite	5.8	9.6	****	-	-	-
HIV-I-Mix***	0.0	0.0	41.9	42.9	40.3	41.6
Kaolinite	0.0	0.0	3.8	1.4	3.0	2.2
Chlorite	0.0	0.0	2.3	2.1	2.2	2.9
Amphibole	0.0	0.0	0.7	0.7	0.5	0.6
Goethite	0.0	0.0	0.8	1.2	0.6	0.6
SUM	100.0	100.0	99.8	99.8	99.8	99.8
Total clay minerals	5.8	9.6	48.0	46.4	45.5	46.7

*GSR: Geumsusan quartzite, **JSR: Jangsan quartzite, ***Total contents of hydroxy-Al interlayered vermiculite (HIV), illite (I), and mixed layer clay minerals (Mix), ****Muscovite was included in HIV-I-Mix.

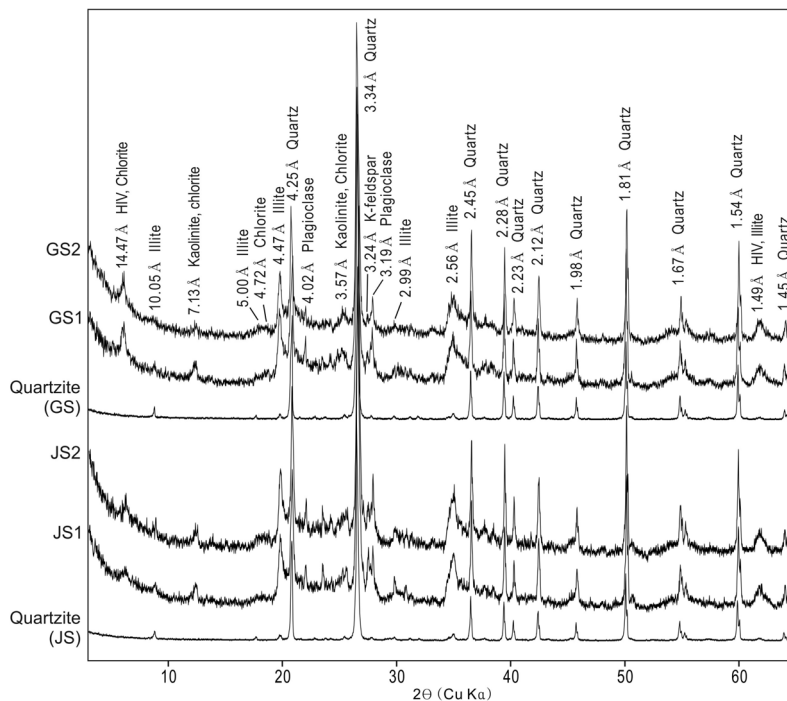


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of clay-silt fractions of mountain soils and quartzite samples. Random mounts. HIV: hydroxy-Al interlayered vermiculite.

통적인 특징(Brindley, 1980; Moore and Reynolds, 1997)이다. 앞의 점토광물 분석에서 밝혀진 바와 같이, 높은 무질서도의 HIV, 일라이트, 저결정질 고령토 광물에 기인하는 것으로 보인다. 그러나 20°와 35°(2 θ) 회절대의 높은 강도에 비하여 저면 회절선 강도가 낮아 불규칙 혼합층 광물도 많이 존재하는 것으로 보인다. (060) 회절선의 d 값이 1.49-1.50 Å으로 점토광물들은 이팔면체(dioctahedral) 구조형이다. 구조적으로 무질서하고 연속적 변화를 보이는 이들 점토광물들의 개별 정량분석은 구조의 불명확성과 표준물질의 부재로 매우 어렵다. HIV, 혼합층, 일라이트를 묶은 함량은 평균 41.7%이다(표 2). 그러나 정성적으로 그림 3과 5의 피크 높이로부터 일라이트의 함량은 매우 적고, 상대적으로 HIV의 함량이 많다고 할 수 있다. HIV, 혼합층, 일라이트를 묶은 함량은 황사(Jeong and Nousiainen, 2014; Jeong *et al.*, 2014), 중국 황토고원퇴사(Jeong *et al.*, 2008, 2011), 국내 단구 풍성퇴적층(Jeong *et al.*, 2013)의 주사 및 투과전자현미경과 XRD 광물분석에서 제안한 일라이트-스멕타이트 계열 점토광물(ISCM, illite-smectite series clay minerals) 총량(일라이트-스멕타이트, 일

라이트, 스멕타이트의 총합)에 대비된다. 여기에 녹니석과 고령토광물을 합한 층상규산염광물 총량은 평균 44.3%이다. 그 외 석영 함량이 4개 시료 평균 43.4%이며, 사장석(4.5%), K-장석(3.9%), 캐올리나이트(2.6%), 녹니석(2.4%), 각섬석(0.6%) 등이 함유되어 있었다(표 2). 장산 규암 및 토양 실트의 광물조성은 금수산 토양 실트와 매우 유사하다.

고비 토양 실트에는 규암 토양과 비교하여 방해석과 사장석이 다량 함유되어 있으며, 일라이트와 녹니석의 회절선이 강하다(그림 6). 그러나 규암지역 토양과 마찬가지로 20°와 35°(2 θ) 부근에서 강한 회절대가 관찰되나, 일라이트 및 스멕타이트 저면 회절선의 강도가 상대적으로 매우 낮아서 일라이트-스멕타이트 계열의 혼합층 점토광물이 다량 존재하는 것으로 보인다. XRD 광물조성분석에서 스멕타이트, 일라이트, 일라이트-스멕타이트를 합한 일라이트-스멕타이트 계열 점토광물(ISCM)의 총량은 평균 28.5%이고, 녹니석과 캐올리나이트를 합한 점토광물 총량은 38.9%이다. 그 외 사장석 16.5%, K-장석 7.4%, 방해석 8.5%, 각섬석 2.1%, 석고 1.9%, 백운석 0.7% 등이 함유되어 있다(표 3).

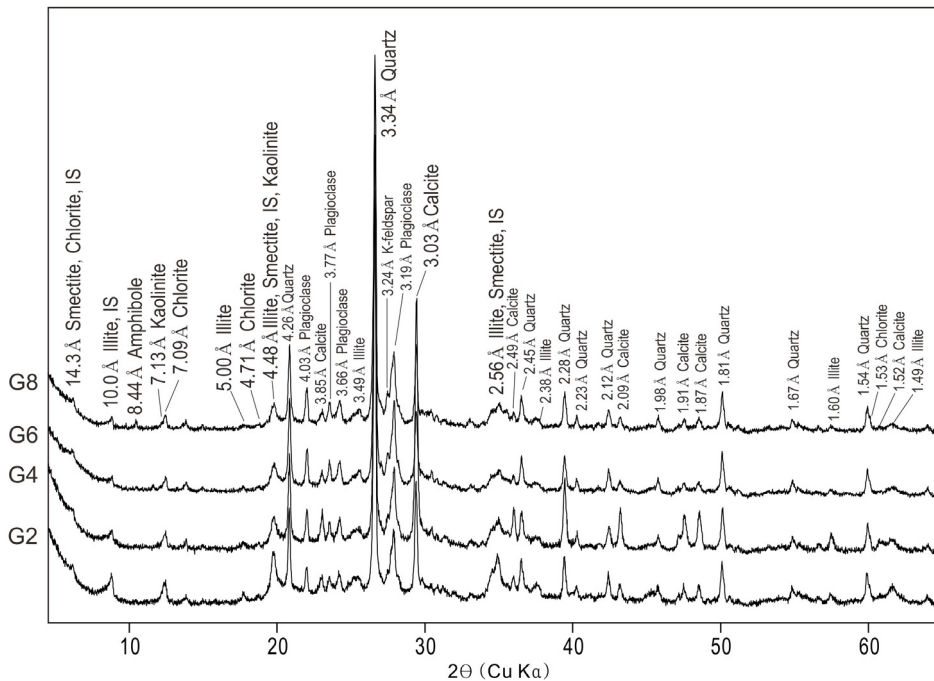


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of clay-silt fractions of Gobi desert soils. Random mounts. IS: illite-smectite mixed layer clay minerals.

Table 3. Mineral compositions in clay-silt fractions of Gobi desert soils (wt%).

Sample	Gobi desert soils							
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
Quartz	32.8	20.1	27.0	21.2	15.4	25.5	13.5	24.1
Plagioclase	22.9	12.7	18.9	15.3	13.2	20.5	8.7	19.7
K-feldspar	11.2	4.8	6.8	6.8	6.7	10.0	3.6	9.6
IS-I-smectite*	21.4	35	24.7	23.5	33.6	23.7	42.9	23.6
Kaolinite	1.4	4.7	2.5	2.9	4.2	2.4	6.5	1.9
Chlorite	5.2	7.4	8.7	6.7	7.5	5.5	7.3	7.9
Amphibole	2.7	1.2	2.3	2.0	1.4	2.0	1.4	3.7
Goethite	0.8	3.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hematite	1.0	0.5	1.1	0.7	0.2	0.5	0.4	1.1
Calcite	0.1	9.6	5.8	20.2	10.2	7.8	7.1	7.6
Dolomite	0.5	0.8	0.8	0.6	0.2	0.3	1.4	0.8
Gypsum	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	1.8	5.9	0.0
Halite	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	1.3	0.0
SUM	100.0	99.9	100.1	100.0	100.1	100.0	100.0	100.0
Total clay minerals	28.0	47.1	35.9	33.1	45.3	31.6	56.7	33.4

*Total contents of illite-smectite mixed-layered clay minerals, illite, and smectite.

3.3 주사전자현미경분석

금수산 토양 원시료의 경우, 군데군데 100-300 μm 크기의 세립모래 입자들이 분포하나, 대부분 실트 이하 크기의 입자들로 구성되어 있다(그림 7). 세립모래 입자는 대부분 날카롭게 각진 석영이며, 규암에서 유래한 입자들로 보인다(그림 7a). 토양내 규암편의 SEM 분석에서, 석영과 백운모가 세립모래 또는 굵은 실트 크기의 입자로 갈라지는 현상을 볼 수 있다(그림 7b). 토양 박편에서도 세립모래 크기의 백운모 입자들이 종종 관찰된다(그림 7c). EDS 분석에 의하면 규암편내 백운모와 토양내 세립모래 백운모 입자는 화학적으로 동일하고, 대부분 K, Al, Si로 구성되어 있다(그림 7e). 규암으로부터 토양입자로 분리된 후에도 화학조성이나 미세조직 변화가 없으므로 백운모는 거의 풍화되지 않았다.

토양 실트 입자들은 광물조성이 다양한데, 석영, 사장석, K-장석, 일라이트/백운모, 녹니석이 주요 광물이고, 그 외 각섬석, 산화철, 산화티탄, 활석, 조이사이트(zoisite)가 소량 관찰된다(그림 7c-7d). 실트 입자 사이는 개별 입자구분이 어려운 극미립 점토광물로 충전되어 있다(그림 7d). 점토집합체의 EDS 스펙트럼에서 Al:Si 피크 높이비는 거의 1:1에 가깝다(그

림 7f). 주성분은 Al과 Si이며, K 함량은 백운모에 비하여 낮고, Fe, Mg는 다양한 정도로 함유되어 있다. XRD 분석에 의하면 주요 점토광물이 HIV이므로, 1:1에 가까운 Al:Si 피크 높이비는 질석 층간에 히드록시Al이 삽입된 HIV에 기인한 것으로 보인다.

장산 토양의 경우, 세립모래 입자들이 거의 관찰되지 않고, 대부분 실트 이하 크기의 입자로 구성되어 있다(그림 8a). EDS 분석에 의하면 실트의 주요 광물은 석영, 사장석, K-장석, 일라이트, 녹니석이고, 그 외 각섬석, 산화철, 산화티탄, 조이사이트, Al 규산염, 저어콘이 소량 또는 미량으로 함유되어 있어서, 금수산 시료와 광물조성이 유사하다(그림 8b-8d). 실트 입자 사이를 충전하는 점토광물들의 화학적 특성도 금수산 시료와 유사하다(그림 8e-8f).

3.4 화학조성

규암지역 토양 실트의 주원소화학조성은 4개의 실트 시료 모두 유사하다(표 4). 기반암인 규암과 비교하면 Si를 제외한 모든 원소의 함량이 토양실트에서 높다. 특히, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , 작열감량(LOI)이 높아서 석영 외 규산염 광물이 토양실트에 다량 함유되어 있음을 지시하는 것으로 보이나, 일부 LOI는 유기물의

분해에 기인한 것이다. 규암에는 Si를 제외한 다른 원소의 함량이 극히 적으나, K의 함량은 비교적 높

으며, 이는 규암에 5-10% 정도 함유된 백운모 때문으로 생각된다. 고비 사막의 실트는 화학조성 변화가 상

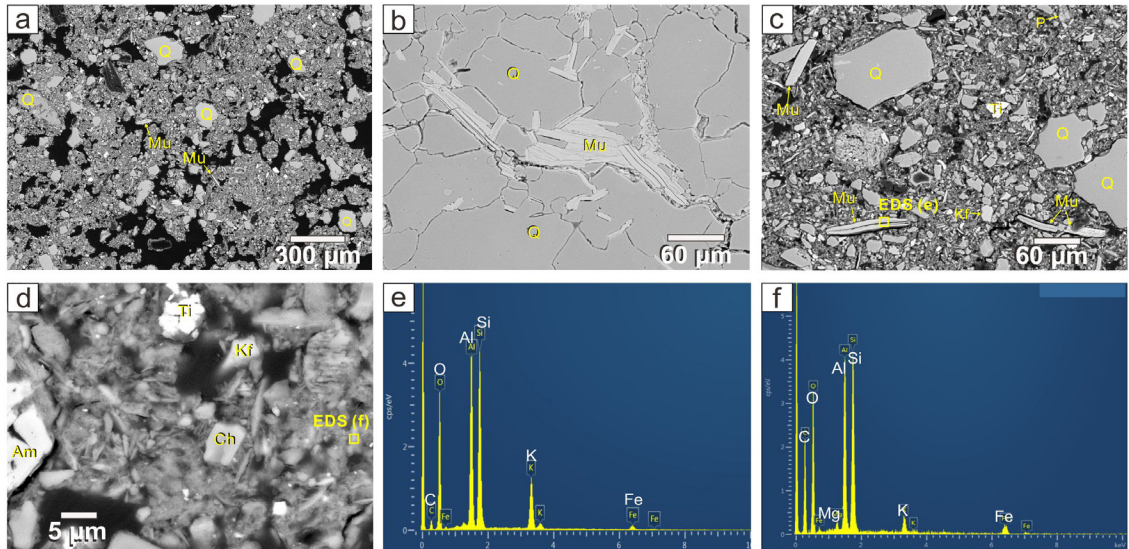


Fig. 7. Scanning electron microscope (SEM) back-scattered electron (BSE) images of Geumsusan soil thin section (GS1) and energy dispersive X-ray spectra (EDS). (a) Low magnification image showing sandy quartz grains. (b) BSE image of quartzite rock fragment in soil including muscovite grains of sand and coarse silt size. (c) BSE image showing fine sand and coarse silt grains of muscovite. (d) High magnification image showing the matrix of clay aggregates. (e) EDS pattern of fine sand grain of muscovite in c. (f) EDS pattern of the matrix of clay aggregates in d. Q: quartz, P: plagioclase, Kf: K-feldspar, Am: amphibole, Mu: muscovite, Ch: chlorite, Ti: Ti oxide.

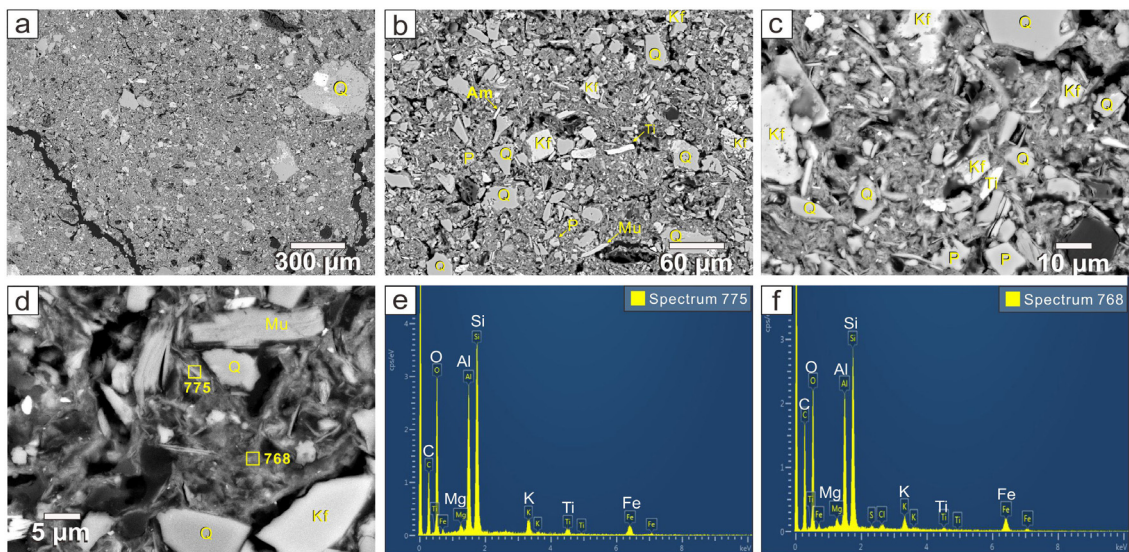


Fig. 8. SEM-BSE images of soil thin section (JS1) and EDS. (a) Low magnification showing sandy quartz grains. (b) Image magnified from a, showing coarse silt grains of quartz, K-feldspar, plagioclase, muscovite, and amphibole. (c) Image magnified from b, showing fine silt grains of quartz, plagioclase, K-feldspar, and Ti oxide enclosed in clay matrix. (d) Image magnified from c, showing the matrix of clay aggregates. (e, f) EDS pattern of clay aggregates in d. Q: quartz, P: plagioclase, Kf: K-feldspar, Am: amphibole, Mu: muscovite, Ch: chlorite, Ti: Ti oxide.

Table 4. Compositions of major (wt%) and rare earth elements (ppm) in quartzite and silt fractions of soils.

Sample	Quartzite		Soils on quartzite			
	GSR*	JSR	GS1	GS2	JS1	JS2
SiO ₂	94.06	93.18	54.67	53.25	59.15	53.65
Al ₂ O ₃	2.53	4.11	17.56	15.86	15.2	16.08
Fe ₂ O ₃ (T)	0.86	0.95	5.66	9.48	5.15	5.91
MnO	0.018	0.013	0.047	0.029	0.071	0.042
MgO	0.14	0.05	1.12	0.86	0.92	0.92
CaO	0.08	0.04	0.31	0.17	0.31	0.29
Na ₂ O	0.05	0.04	0.56	0.32	0.61	0.6
K ₂ O	0.73	1.2	1.13	1.09	2.18	1.8
TiO ₂	0.074	0.091	1.016	0.979	0.875	0.811
P ₂ O ₅	< 0.01	< 0.01	0.11	0.09	0.16	0.1
LOI**	0.54	0.68	17.37	17.4	14.43	19.98
Total	99.09	100.3	99.54	99.53	99.06	100.2
Y	6.4	1.7	20.7	25.4	19.1	17.7
La	23.2	20.8	30.9	30.8	42.3	34.3
Ce	41.5	35.4	74.5	66.7	85.5	74.3
Pr	4.13	3.99	6.22	7.34	8.39	6.74
Nd	14.1	13.3	21.8	26.7	27.9	23.5
Sm	2.07	1.68	4.09	5.14	4.95	4.39
Eu	0.384	0.261	0.863	0.991	1.04	0.88
Gd	1.22	0.66	3.61	4.78	3.49	3.45
Tb	0.2	0.06	0.59	0.74	0.6	0.59
Dy	1.2	0.31	3.64	4.59	3.69	3.57
Ho	0.2	0.06	0.7	0.92	0.69	0.69
Er	0.56	0.17	2.06	2.71	2.06	2.03
Tm	0.083	0.027	0.315	0.42	0.308	0.302
Yb	0.61	0.19	2.17	2.85	2.23	1.95
Lu	0.104	0.032	0.345	0.438	0.346	0.313
SUM	96.0	78.6	172.5	180.5	202.6	174.7

*GS: Geumsusan, JS: Jangsan, **Loss on ignition

당히 크며, 특히 Ca의 함량이 높다(표 5).

규암지역 토양 실트의 Ti에 대한 원소비를 구하여 국내 단구지대 실트질 퇴적물(Jeong *et al.*, 2013) 및 고비 사막 실트의 주원소화학적조성과 비교하였다(그림 9). 국내 실트질 퇴적물은 깊이별로 원소/Ti 원자비를 나타내었고, 규암지역 토양 및 고비 실트는 깊이를 고려하지 않고 나타낸 것이다. 규암지역 토양 실트 성분의 Si/Ti비를 Jeong *et al.* (2013)의 단구지역 실트질 퇴적층과 비교해보면, 단구지역 퇴적층 최상부(깊이 <1 m)의 Si/Ti 범위와 잘 일치하고 있다.

또한 이 연구 및 Maher *et al.* (2009)의 고비사막 토양 실트의 Si/Ti비와도 잘 일치하고 있다. Al/Ti 및 Fe/Ti도 Si/Ti와 유사한 경향을 보인다. 그러나 규암지역 및 단구 퇴적층 실트의 K/Ti, Mg/Ti, Na/Ti, Ca/Ti 값은 고비 사막 토양에 비하여 낮다.

규암 지역 토양 실트의 희토류원소 함량은 170-200 ppm 정도이며, 기반암인 모암의 70-100 ppm에 비하여 함량이 높다(표 4). 몽골 고비 사막 토양의 희토류원소 함량은 200-400 ppm 정도의 범위를 보인다(표 5). 콘드라이트(chondrite) 값으로 정규화한 희토

Table 5. Compositions of major (wt%) and rare earth elements (ppm) in clay-silt fractions of Mongolian Gobi desert soils.

Sample	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
SiO ₂	60.77	50.59	55.90	47.20	44.75	55.49	43.37	54.04
Al ₂ O ₃	12.78	14.34	13.39	11.63	12.45	12.58	14.87	12.43
Fe ₂ O ₃ (T)	5.14	5.71	6.10	5.34	5.57	4.72	6.32	6.15
MnO	0.091	0.116	0.115	0.103	0.116	0.094	0.127	0.126
MgO	1.65	3.34	2.65	2.23	3.43	1.96	3.85	2.57
CaO	1.71	5.91	4.73	11.17	7.05	6.14	5.36	6.05
Na ₂ O	2.18	1.38	1.99	1.57	2.36	2.12	2.99	1.95
K ₂ O	2.45	2.87	2.50	2.22	2.51	2.12	2.55	2.32
TiO ₂	0.957	0.708	0.939	0.863	0.638	0.819	0.654	1.153
P ₂ O ₅	0.14	0.22	0.26	0.17	0.21	0.17	0.20	0.24
Total*	87.87	85.18	88.57	82.50	79.08	86.21	80.29	87.03
Y	36.1	28.4	38.2	37.9	25.5	34.2	28.7	49.0
La	39.3	35.6	46.3	43.4	29.1	38.6	36.7	74
Ce	79.4	74.2	95.8	86.7	61.4	78.9	77.1	154
Pr	9.23	8.55	11.1	10.8	7.1	9.46	8.92	17.8
Nd	34.7	31.7	41.3	41.2	26.6	34.4	32.3	63.8
Sm	6.5	6.37	8.07	8.37	5.45	7.04	6.77	11.9
Eu	1.32	1.36	1.54	1.54	1.16	1.41	1.42	1.78
Gd	5.63	5.34	6.79	7.09	4.68	6.19	5.81	9.9
Tb	0.99	0.9	1.11	1.13	0.77	1.02	0.92	1.49
Dy	5.98	5.3	6.64	6.6	4.57	5.81	5.17	8.65
Ho	1.23	1	1.32	1.31	0.89	1.19	1	1.66
Er	3.66	2.9	4.03	3.95	2.63	3.49	2.91	5.12
Tm	0.592	0.439	0.612	0.602	0.375	0.54	0.422	0.786
Yb	4.21	2.85	4.14	4.21	2.47	3.7	2.77	5.5
Lu	0.664	0.436	0.712	0.663	0.384	0.606	0.46	0.947
SUM	229.5	205.3	267.7	255.5	173.1	226.6	211.4	406.3

*Loss on ignition (LOI) was not measured due to low weights of clay-silt samples separated from bulk soil samples.

류조성을 그림 10에 나타내었다. 규암 지역 토양 실트는 고비사막 토양의 희토류조성 패턴과 잘 일치한다.

4. 토 의

4.1 퇴적물의 기원

SEM 관찰, XRD 분석, 화학분석을 종합하면 규암은 대부분 석영으로 구성되어 있고, 백운모가 소량 함유되어 있다. 규암 구성 광물 중에서 백운모 만이 풍화가 가능한 광물이나, 백운모는 K장석과 함께 규산염 광물 중에서 비교적 풍화에 강하다(Jeong and Lee,

1998; Lee and Kim, 2000). SEM 관찰에 의하면 규암의 백운모는 토양 실트로 분리되는 과정에서 풍화되지 않았다(그림 7). 규암은 풍화과정에서 모래나 조립 실트 크기 입자로 부서지거나, 새로운 광물을 생성하지는 않는다. 따라서 조사지역 토양에 다량 함유된 HIV, 고령토광물, 녹니석 등 44%에 이르는 점토광물과 사장석, K-장석은 규암의 풍화작용으로 설명할 수 없다. 토양시료들은 정상부 규암 능선에서 채취되었기 때문에 다른 암석 풍화물이 혼합되기도 어렵다. 따라서 기반암에서 유래한 모래 및 굵은 실트 크기의 석영과 백운모를 제외하면, 대부분의 토양 실

트는 바람에 날려와 퇴적된 풍성퇴적물로 해석할 수 밖에 없다.

풍성퇴적물일 경우, 가까운 한반도 암석 풍화물이 날아온 것인지, 더 멀리 아시아 내륙 건조지로부터 장거리 이동한 것인지 구분할 필요가 있다. 황사 연구에서 보고된 바와 같이, 석고, 방해석, 백운석을 명백한 건조지역 기원의 지표광물로 이용할 수 있다(Jeong, 2008, 2018; Jeong *et al.*, 2014; Park and Jeong, 2016). 그러나 이들은 용해도가 높고 산에 약하여 한반도 토양에서 잔류하지 못하므로, 장거리 이동 광물먼지의 지표 광물이 되지 못한다. 따라서 광물먼지 기원지와의 환경차이를 반영하는 규산염광물 조성을 구분에 이용할 필요가 있다. 한반도 지표에 노출된 주요 기반암은 조립질 화강암류나 편마암류 암석들이다. 이 암석들은 전반적으로 석영-장석-운모류 광물들이 우세하다. 기존 연구에 의하면, 한반도 기반암 풍화는 기본

적으로 사장석의 고령토화 작용이 압도적이다(Jeong and Kim, 1993; Jeong, 1997, 2000; Jeong and Lee, 1998; Lee and Kim, 2000). 그 외 풍화에 약한 주요 조암광물은 흑운모로서, 질석, 질석-흑운모 혼합층, 캐올리나이트가 생성된다(Jeong, 1998; Jeong and Kim, 2003; Jeong *et al.*, 2006). 사장석과 흑운모에 비하여 풍화에 상대적으로 강한 K-장석과 백운모는 부분적으로 고령토화되거나 흔히 토양에 잔류한다(Jeong and Lee, 1998; Lee and Kim, 2000). 전반적으로 한반도 주요 기반암의 화학적 풍화로 생성되는 점토광물종은 주로 사장석의 풍화로 생성되는 1:1 구조의 고령토군 광물이며, 일부 흑운모의 풍화로 2:1 구조의 질석류 광물이 생성된다. 이는 규암지역 토양의 주요 점토광물이 HIV류 중심의 2:1 광물이라는 사실과 부합되지 않는다. 더구나 우리나라 토양의 질석은 대부분 삼팔면체 구조의 흑운모가 교대하여 생성되

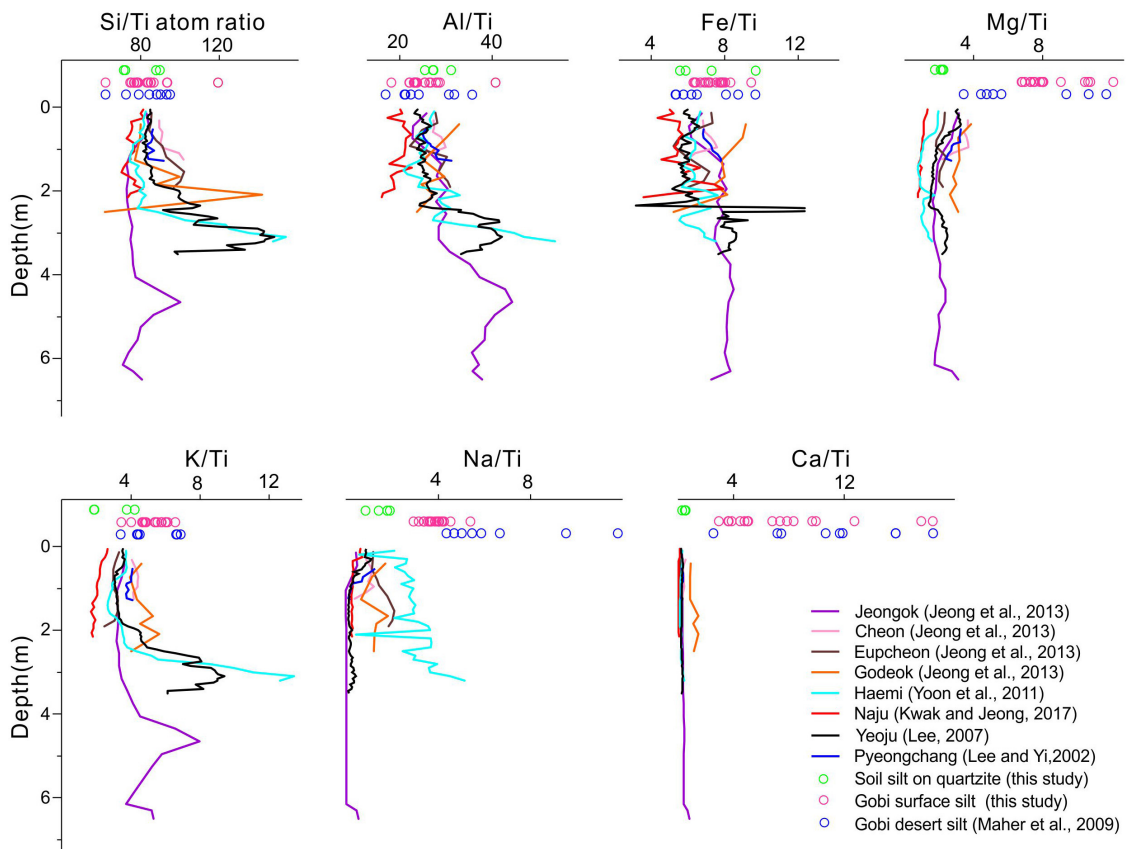


Fig. 9. Atomic ratios of major elements to Ti content. Lines are depth variations of atom ratios in silty sediments on Korean river and marine terraces. Circles are the ratios of clay-silts in quartzite soils (this study) and Gobi surface silts (this study and Maher *et al.*, 2009).

로, 입자가 크고, 삼팔면체(trioctahedral) 구조형인데 반하여, 규암지역 HIV는 실트입자 사이를 충전하는 극미립 점토입자로 산출되고, 이팔면체(dioctahedral) 구조형이다(그림 5). 따라서 한반도내 토양 물질의 풍성과정에 의한 운반 및 퇴적을 배제할 수 없지만, 규암지역 토양 실트 입자들의 주요 기원물질은 아시아 내륙 건조지역에서 장거리 이동하여 퇴적한 광물 먼지 퇴적물로 판단된다.

광물조성과 함께 지화학적 특성도 규암지역 토양이 장거리이동 풍성퇴적 기원임을 지시한다. Jeong *et al.* (2013)은 여러 단구지표 및 평탄지 실트질 퇴적층 단면의 깊이별 화학적 변화 분석에서, 깊은 곳에서는 그 지역 기반암의 영향을 받아 Si/Ti비가 크게 변하지만, 퇴적층 상부로 갈수록 지역에 관계없이 수렴하는 현상을 발견하고, 광역적인 광물먼지의 퇴적으로 해석하였다. 규암지역 토양 실트의 Si/Ti비를 Jeong *et al.* (2013)의 단구지역 실트질 퇴적층과 비교해보면, 단구지역 퇴적층의 최상부 풍성 퇴적물의 Si/Ti 범위와 잘 일치하고 있다. 또한 이 연구 및 Maher *et al.* (2009)의 고비사막 토양내 실트의 Si/Ti비와도 잘 일치하고 있다. 규암의 희토류원소 패턴은 중희토류 원소들이 많이 결핍된 패턴을 보이지만, 규암을 피복하는 토양실트는 고비사막 토양의 희토류조성 패턴과 잘 일치한다.

4.2 퇴적물의 풍화작용

규암지역 토양 실트의 기원을 아시아 내륙 건조 토양 실트로 해석하려면, 건조지 토양과 규암지역 토양 간의 광물학적 및 지화학적 차이점이 설명되어야 한다. 이는 광물먼지가 한반도 퇴적 후에 겪은 화학적 풍화작용으로 설명할 수 있다. 기존 연구에 의하면 황사에는 일라이트-스멕타이트 계열의 점토광물을 위

시하여, 석영, 사장석, K-장석, 캐올리나이트, 녹니석, 방해석, 석고가 주요 광물로 함유되어 있다(Jeong, 2008, 2018; Jeong and Achterberg, 2014; Jeong and Nousiainen, 2014; Jeong *et al.*, 2014; Park and Jeong, 2016). 고비 사막 토양 실트의 광물학적 특성(표 3)도 황사의 광물학적 특성과 유사하나, 장거리 이동하는 황사는 점토광물 함량이 더 높다. 한반도에 퇴적한 방해석, 백운석, 석고 등은 습한 산성 토양에서 용해되어 없어지므로, 잔존할 수 있는 광물은 규산염 광물들과 산화광물들이다. 한반도의 토양 환경에서 석영은 풍화되지 않으나, 장석류, 일라이트-스멕타이트 계열의 점토광물류, 녹니석, 각섬석 등의 광물들은 풍화된다(Jeong *et al.*, 2013). 규산염광물 중에서 사장석은 특히 풍화에 약하여 대부분 풍화되어 일반적으로 고령토 광물을 형성한다. 규암지역 토양 실트 및 단구지역 실트질 퇴적물의 풍화에도 불구하고 Si/Ti, Al/Ti, Fe/Ti 함량비가 고비사막 실트와 유사한 경향을 보이는 이유는 Al, Fe가 대표적인 비이동성 원소로서 풍화와 관계없이 토양에 잔류하고, Si는 이동성이 중간정도이나, 풍화에 강한 석영의 주성분이고, 캐올리나이트 등의 광물로 침전되었기 때문이다. K/Ti, Mg/Ti, Na/Ti, Ca/Ti 값은 고비 사막 토양에 비하여 규암지역 토양 실트와 단구 퇴적물에서 낮다. 이는 K, Mg, Na, Ca가 이동성이 큰 원소로서 방해석, 백운석, 사장석, 일라이트 점토광물의 풍화작용으로 용해되어 토양에서 용탈되었기 때문이다.

규암지역 토양에는 HIV가 흔하며, 일라이트 함량이 적은 반면에(그림 3), 고비사막 토양에는 HIV가 검출되지 않고, 일라이트-스멕타이트 계열의 점토광물이 흔하다(그림 4). 따라서 일라이트-스멕타이트 계열의 점토광물이 한반도에 퇴적한 후, 일라이트 층의 K가 용탈되면서 이팔면체 구조의 팽윤성 광물인 질

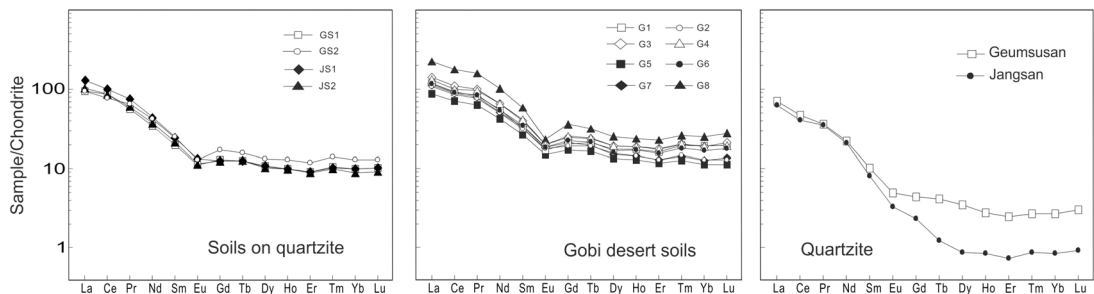


Fig. 10. Rare earth element concentrations of silty soils and quartzite normalized to chondritic values.

석이 형성되었으며, 함께 퇴적된 사장석의 풍화로 방출된 Al이 히드록시-Al 양이온 형태로 질석 층간에 삽입 고정된 것으로 해석된다. 히드록시-Al 양이온은 염기양이온의 용탈이 심한 산성토양에서 생성되며, 팽윤성 2:1 층상 규산염 광물의 층간에 삽입되어 고정된다(Jackson, 1962; Banhisel and Bertsch, 1989; McBride, 1994). 규암지역 산지는 산림 유기물이 지표에 다량으로 축적되고, 지형적으로 용탈이 심한 환경이어서 산성 토양 용액내 히드록시-Al 양이온의 농도가 높아 HIV가 흔하게 생성된 것으로 보인다. 기존 단구지역이나 해안평야 지역 풍성 퇴적물내 점토의 가열 실험에서도 HIV가 확인되었지만(Kwak and Jeong, 2017), 규암지역보다는 적은 듯하며, 이는 평탄지에서의 용탈작용이 산지보다 약하고 또한 유기물의 집적이 덜하기 때문으로 해석된다. 풍성퇴적물인 일라이트-스펙타이트 계열 점토광물의 풍화 현상은 중국 황토고원의 보다 다습한 지역에서 관찰된 바 있다(Jeong *et al.*, 2011). 사막으로부터 거리가 먼 황토고원 동쪽은 강수량이 보다 많아서 고토양내 규산염 광물들이 약간의 화학적 풍화작용을 겪었다. 이 지역 고토양 점토 광물정량분석에 의하면, 일라이트의 함량이 크게 줄고 팽윤성 점토광물 함량이 크게 증가하였다(Jeong *et al.*, 2011). 그러나 이 지역에서도 HIV는 생성되지 않았다. 이 지역이 황토고원에서 상대적으로 다습한 지역이긴 하지만, 한반도에 비하면 건조하며 지표 유기물 축적이 적고 탄산염 광물 함량이 높은 염기성 토양이어서 히드록시-Al 이온이 생성되지 않기 때문이다.

5. 결 론

기반암 풍화의 영향이 적은 규암지역 산지 토양 실트의 광물 및 지구화학 특성을 분석한 결과, 규암의 풍화로 생성될 수 없는 HIV가 풍부한 점토광물이 다량으로 함유되어 있어서 풍성퇴적물로 해석되었다. 또한 한반도 기반암 풍화의 주 생성물인 고령토광물 함량이 낮아서, 아시아 내륙 건조지역에서 발생한 광물먼지의 장거리이동 퇴적물로 해석되었다. 한반도 산지의 습한 산성 토양에 퇴적한 광물먼지의 방해석, 백운석, 석고는 곧 용해되어 없어지고, 사장석과 K-장석은 보다 서서히 풍화되어 함량이 낮아진다. 유기물이 풍부한 산성토양환경에서 장석의

풍화작용으로 히드록시Al 양이온이 형성되었다. 퇴적한 광물먼지의 주성분 점토광물은 일라이트-스펙타이트 계열 점토광물이며, 일라이트의 풍화로 층간 K가 용탈되어 형성된 질석 층간에 히드록시Al 양이온이 삽입되어 HIV가 형성되었다. 한반도 퇴적후 풍화에 의한 광물학적 변화를 고려하면, 고비사막 토양의 실트, 황사, 규암지역 토양, 국내 단구의 실트 질 퇴적층의 광물학적 및 지화학적 특성의 차이는 정합적으로 해석되며, 규암 지역 토양내 점토와 셰립실트의 대부분은 장거리 이동 광물먼지 퇴적물이다. 규암 지역 토양 실트에서 밝혀진 풍성 입자의 광물학적 및 지구화학적 특성은 풍화물이 많이 발생하는 타 기반암 지역 토양내 풍성입자 탐색과 정량화의 기준이 될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단과제 NRF-2017R1A2B201422의 지원을 받아 연구되었다. 원고를 세심하게 검토하시고 중요한 개선사항을 지적하여 주신 익명의 심사위원님들께 깊이 감사드립니다. 황사시로 채취를 도와준 박태훈 석사에게도 감사드립니다.

REFERENCES

- An, Z.S., Kukla, G., Porter, S.C. and Xiao, J., 1991, Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of central China during the last 130,000 years. *Quaternary Research*, 36, 29-36.
- Banhisel, R.I. and Bertsch, P.M., 1989, Chlorites and hydroxy-interlayered vermiculite and smectite. In: Dixon, J.B. and Weed, S.B. (eds.), *Minerals in Soil Environment*. Soil Science Society of America, Madison, 729-788.
- Badarch, G., Cunningham, W.D. and Windley, B.F., 2002, A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21, 87-110.
- Brady, N.C., 2007, *The Nature and Properties of Soils*. Maxwell MacMillan, New York, 621 p.
- Brindley, G.W., 1980, Order-disorder in clay mineral structures. In: Brindley, G.W. and Brown, G. (eds.), *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-ray Identification*. Monograph 5, Mineralogical Society, London, 125-195.
- Chamley, H., 1989, *Clay Sedimentology*. Springer-verlag, Berlin, 623 p.

- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M. and Van Dorland, R., 2007, Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Jackson, M.L., 1962, Interlayering of expansible layer silicates in soils by chemical weathering. *Clays and Clay Minerals*, 11, 29-46.
- Jang, Y.-S., 1998, Soil mineralogy. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 31, 36-44 (in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y., 1997, Genetic relations from the texture and morphology of kaolinite and halloysite coexisting in the slightly weathered anorthosite. *Journal of the Geological Society of Korea*, 33, 9-17 (in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y., 1998, Mineralogical characteristics and formation environment of kaolin minerals in the weathering of granitoids: weathering of biotite in Palgongsan granite. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 11, 97-105 (in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y., 2000, The dependence of localized crystallization of halloysite and kaolinite on primary minerals in the weathering profile of granite. *Clays and Clay Minerals*, 48, 196-203.
- Jeong, G.Y., 2008, Bulk and single-particle mineralogy of Asian dust and a comparison with its source soils. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 113, D02208, doi:10.1029/2007JD008606.
- Jeong, G.Y., 2018, Mineralogical properties of Asian Dust in April 6 and 15, 2018, Korea. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 31, 103-111 (in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y. and Achterberg, E.P., 2014, Chemistry and mineralogy of clay minerals in Asian and Saharan dusts and the implications for iron supply to the oceans. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 12415-12428.
- Jeong, G.Y., Cheong, C.-S. and Kim, J., 2006, Rb-Sr and K-Ar systems of biotite in surface environments regulated by weathering processes with implications for isotopic dating and hydrological cycles of Sr isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 4734-4739.
- Jeong, G.Y., Choi, J.H., Lim, H.S., Seong, C.T. and Yi, S.B., 2013, Deposition and weathering of Asian dust in Paleolithic sites, Korea. *Quaternary Science Reviews*, 78, 283-300.
- Jeong, G.Y., Hillier, S. and Kemp, R.A., 2008, Quantitative bulk and single-particle mineralogy of a thick Chinese loess-paleosol section: implications for loess provenance and weathering. *Quaternary Science Reviews*, 37, 1271-1287.
- Jeong, G.Y., Hillier, S. and Kemp, R.A., 2011, Changes in mineralogy of loess-paleosol sections across the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, 75, 245-255.
- Jeong, G.Y. and Kim, H.B., 2003, Mineralogy, chemistry, and formation of oxidized biotite in the weathering profile of granitic rocks. *American Mineralogist*, 88, 352-364.
- Jeong, G.Y., Kim, J.Y., Seo, J., Kim, G.M., Jin, H.C. and Chun, Y., 2014, Long-range transport of giant particles in Asian dust identified by physical, mineralogical, and meteorological analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 505-521.
- Jeong, G.Y. and Kim, S.J., 1993, Boxwork fabric of halloysite-rich kaolin formed by weathering of anorthosite in Sancheong area, Korea. *Clays and Clay Minerals*, 41, 56-65.
- Jeong, G.Y. and Lee, B.Y., 1998, Weathering of plagioclase in palgongsan granite. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 44-57 (in Korean with English abstract).
- Jeong, G.Y. and Nousiainen, T., 2014, TEM analysis of the internal structures and mineralogy of Asian dust particles and the implications for optical modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 7233-7254.
- Johnson, M.S. and Meskhidze, N., 2013, Atmospheric dissolved iron deposition to the global oceans: effects of oxalate-promoted Fe dissolution, photochemical redox cycling, and dust mineralogy. *Geoscientific Model Development*, 6, 1137-1155.
- Kim, J.C., Lee, Y.I., Lim, H.S. and Yi, S., 2011, Geochemistry of Quaternary sediments of the Jeongokri archaeological site, Korea: Implications for provenance and palaeoenvironments during the Late Pleistocene. *Journal of Quaternary Science*, 27, 260-268.
- Kukla, G. and An, Z., 1989, Loess stratigraphy in central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 72, 203-225.
- Kwak, T.H. and Jeong, G.Y., 2017, Mineralogical and geochemical properties of clay-silt sediments exposed in Jangdongri, Naju, Korea. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 30, 11-19 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.H. and Kim, S.J., 2000, Mineralogical Changes in the Weathering Profiles of Granitic Gneiss in the Yoogoo Area, Korea. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 13, 121-137 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.I. and Yi, S., 2002, Characteristics of Pyeongchang-ri

- Paleolithic-site paleosols, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea: implications for archaeogeological application. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 471-489 (in Korean with English abstract).
- Maher, B.A., Mutch, T.J. and Cunningham, D., 2009, Magnetic and geochemical characteristics of Gobi Desert surface sediments: Implications for provenance of the Chinese Loess Plateau. *Geology*, 37, 279-282.
- McBride, M.B., 1994, *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press, New York, 416 p.
- Moore, D.M. and Reynolds, R.C., 1997, *X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. Oxford University Press, New York, 400 p.
- Park, M.Y. and Jeong, G.Y., 2016, Mineralogical properties of Asian dust sampled at Deokjeok Island, Incheon, Korea in February 22, 2015. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 29, 79-87 (in Korean with English abstract).
- Reynolds, R.C., 1980, Interstratified clay minerals. In: Brindley, G.W. and Brown, G. (eds.), *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification*. Monograph 5, Mineralogical Society, London, U.K., 249-303.
- Shin, J.-B., Naruse, T. and Yu, K.-M., 2005, The application of loess-paleosol deposits on the development age of river terraces at the midstream of Hongcheon River. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 323-333 (in Korean with English abstract).
- Shin, J.-B., Yu, K.-M., Naruse, T. and Hayashida, A., 2004, Study on loess-paleosol stratigraphy of Quaternary unconsolidated sediments at E55S20-IV pit of Chongokni Paleolithic site. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 369-381 (in Korean with English abstract).
- Swap, R., Garstang, M., Greco, S., Talbot, R. and Kollberg, P., 1992, Saharan dust in the Amazon Basin. *Tellus*, 44B, 133-149.
- Traynor, J.J. and Sladen, C., 1995, Tectonic and stratigraphic evolution of the Mongolian People's Republic and its influence on hydrocarbon geology and potential. *Marine and Petroleum Geology*, 12, 35-52.
- Um, M.-H., Lim, H.-S. and Kim, T.-S., 1992, Genesis and characteristics of the soil clay minerals derived from major parent rocks in Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 25, 202-212 (in Korean with English abstract).
- Yi, S., 2000, For chronology and stratigraphy of Korean Paleolithic. *Journal of Korean Archaeological Society*, 42, 1-22 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S., Park, C.-S. and Hwang, S., 2011, Geochemical properties of loess-paleosol sequence in the Haemi area, Seosan, Chungnam Province, South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 47, 343-362 (in Korean with English abstract).
- Yu, K.-M., Shin, J.-B. and Naruse, T., 2008, Loess-paleosol stratigraphy of Dukso area, Namyangju City, Korea (South). *Quaternary International*, 176-177, 96-103.

Received : December 7, 2018

Revised : December 28, 2018

Accepted : December 29, 2018