

## 광주광역시 향등지역의 토양단면에서 주성분원소 및 미량성분원소의 지화학적 특성

신인현\* · 안건상 · 강종현

조선대학교 지구과학과, 500-759 광주광역시 동구 서석동 375

### Geochemistry of the Major and Trace Elements in a Soil Profile of the Hyangdeung Area, Gwangju City, Korea

In-Hyun Shin\*, Ahn, Kun-Sang and Jong-Hyun Kang

Department of Earth Sciences, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

**Abstract:** Elemental mobility during the weathering of granite in the Gwangju Hyangdeung area was investigated using ICP-MS analysis. It appeared that Al, Fe, Ti, K were lost from the profile, whereas Si, Ca, Na, Mg, P and Mn were immobile during chemical weathering. In less weathered soil, large enrichment of K and Ti were found relative to Al, whereas other elements such as Si, Ca, Na, Mg and P are deplete. Fe content is constant throughout the weathered profiles. Amounts of Rb, Sr, Y, Cs, Pb, Th and U increased toward the surface. Nb, and Co have accumulated in the deepest parts of the weathered soil profile. These results agree with similar published studies. In addition, the analytical data shows that Ba and Ga increased, while Cu, Zn, Cr and Ni were relatively constant in this area. REE tend to increase in most samples, while LREEs, relative to Al, were enriched in the lower and upper saprolite. HREEs were enriched in the lower and upper saprolite.

**Keywords:** soil profile, weathering, elemental mobility, granite, geochemistry

**요 약:** 광주광역시 향등지역에서 화강암의 풍화에 따른 토양단면의 지화학적 특성을 파악하기 위하여 11개의 시료를 화학분석 하였다. 모암에서부터 풍화암까지 주성분원소 중 Si, Ca, Na, Mg, P, Mn은 감소하고 Ti, Fe, K는 증가하는 경향을 보인다. 미량성분원소의 경우 Rb, Sr, Pb, Ba은 증가하는 경향을 보이며, As, Co는 감소하는 경향을 보인다. 또한 Zn, Cr, Ni 등은 부분적으로 집적된 경향을 보이나 전체적으로는 모암과 풍화토에서 거의 비슷한 함량을 갖는다. 희토류원소는 전체적으로 상부로 갈수록 증가하는데 경희토류원소(LREE)는 풍화초기에 기반암에서 용탈되어 풍화암(saprock)에서 집적되지만, 중희토류원소(HREE)의 경우는 상대적으로 집적되지 못하여 풍화초기에 약간 감소하는 경향을 나타낸다.

**주요어:** 토양단면, 풍화, 원소의 거동, 화강암, 지구화학

## 서 론

지표에 노출된 암석은 원래의 물질들이 새로운 환경에서 안정한 새로운 형태로 재구성하려 한다. 이처럼 지표근처에서 발생하는 모든 재구성작용을 풍화작용이라 한다. 풍화작용은 일차적으로 물리적 변화에 의하여 입자들이 파괴되고, 강우현상에 의해 침투한

지하수와 유기물질의 분해로 생성된 탄산용액이 구성 광물과 반응하여 원소가 이동하면서 이차 광물이 생성되는 화학적 풍화작용이 함께 수반된다(Chesworth et al., 1981). 특히 풍화작용이 일어나는 동안 풍화단면에서 원소의 분포는 모암의 광물조성과 화학조성, 강수와 지하수에 의한 원소의 유출 및 유입, 풍화층 상하부로의 원소이동과 생성된 이차광물의 조성에 영향을 받는다(Chesworth et al., 1981). 따라서 풍화도에 대한 대부분의 연구는 이차적으로 일어나는 화학적 풍화도에 초점을 두고 많은 연구들이 있는데

\*Corresponding author: ihshin@chosun.ac.kr  
Tel: 82-62-230-7335  
Fax: 82-62-230-7935

Nesbitt와 Young(1984)은 화성암을 대상으로 열역학적 자료와 반응속도 자료를 기초로 풍화초기에는 깃사이트와 캐올리나이트가 형성되는 풍화의 진행을 연구한 바가 있으며 화강암(김수진 등, 1994), 화강섬록암(Nesbitt, 1979), 현무암(Chesworth et al., 1981), 초염기성암(문희수 등, 1993), 퇴적암(Teveldal et al., 1990), 편마암(Drever and Zobrist, 1992)등 다양한 암석을 대상으로 풍화에 대한 연구가 있다. 이들의 연구에 따르면 기반암에서 풍화가 진행됨에 따라 주성분원소 중 Si, Mg, Ca, Na, P, K는 감소하는 경향을 보이고, Al, Fe, Mn, Ti는 증가 하거나 일정하게 유지된다. 또한 희토류원소는 상부로 갈수록 부화되는 경향을 보이고, 미량성분원소는 각각의 원소에 따라서 다양한 거동을 나타내는 것으로 나타났다. 그러나 이들 원소들은 모든 환경에서 일정한 경향을 가지면서 증가하거나 감소하는 것이 아니라 모암의 종류, 풍화광물의 특성, 지하수에 따라 다양한 변화의 경향이 나타난다.

따라서 본 연구는 광주광역시 향등지역 일대에서 쓰레기 매립장을 조성하면서 나타난 화강암을 기원으로 하는 대규모의 산사면(해발 100 m)에서 각 층별로 시료를 채취하여 모암에서 풍화토까지의 주성분원소, 미량성분원소 및 희토류원소의 거동 시 일어나는 지화학적 특성과 화강암의 풍화과정에서 원소의 거동과 기후와의 관계를 파악코자 한다.

### 시료 채취 및 연구방법

시료 채취는 향등지역 산사면(해발 100 m)의 풍화 단면에서 1개의 기반암(rock, GSG-1)과 1개의 풍화암(saprock, GSG-2), 4개의 부석암(saprolite, GSG-3~6), 5개의 풍화토양(soil, GSG-7~11)을 약 1 m간격으로 11개의 표품을 표층에서부터 약 10 m 깊이까지 채취했으며, 채취와 동시에 비닐팩에 밀봉하여 실험실로 운반, 유기물을 제거하였으며, 자연 상태에서 2주일간 건조 후, 80°C 오븐에서 하루 동안 완전 건조하여 토양 시료는 -80 mesh, -200 mesh의 체로 체분석 하여 분석용으로 사용하였고, 암석 시료는 토양 시료와 동일하게 자연 상태에서 2주일 건조 후 80°C 오븐에서 하루 동안 건조한 후, 조선대학교 공동기기센터의 분쇄기를 사용하여 분쇄한 후 토양 시료와 같은 방법으로 체분석을 하여 분석용으로 사용하였다. 이 중 -200 mesh 체분석 한 시료를 잘 혼합한 후 각각 50 g을 취하여 캐나다의 온타리오에 위치한

Activation Laboratories Ltd.에 화학분석을 의뢰했다. 주성분 및 미량성분원소는 lithium metaborate와 tetraborate에 용해시켜, 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer Scix ELAN 6000)로 분석하였다.

### 지형, 지질 및 기후

본 연구 지역은 북위 36° 54' 00", 동경 127° 00' 00"의 지점으로 행정구역상 광주광역시 남구 양과동에 속한다.

본 역은 쥬라기 광주화강암과 이를 부정합으로 덮는 다양한 화산암류로 구성되어 있다.

본 역 화강암의 명칭은 조직과 구성광물에 근거하여 광주화강암체의 연장으로 분류한 김용준 외(1993)의 연구 결과에 따라 광주화강암이라 부른다. 광주화강암은 조립 등립질이 대부분이고 백악기 화성활동과 퇴적작용으로 관입, 잠식되거나 부정합으로 덮여 있다. 축적 1:5만 광주도폭(김규봉 외, 1990)에서 본 암류는 전단작용을 전혀 받지 않은 것으로 보고되었으나, 노두의 암석에서는 미약한 열리가 발달되어 있다.

시추코어 연구에서는 상당히 깊은 파쇄대를 가지고 있으며, 전기 비저항 탐사 결과 대수층도 깊게 나타나고 있다, 신선한 암석시료에서의 화강암은 중립질 내지 조립질의 입상조직을 보이며, 주조성광물은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모 이고, 부성분광물은 각섬석, 스피, 인회석, 불투명광물 등 이다. 석영은 타형 내지 반자형으로 나타나고, 장석은 주로 회백색으로 사장석과 K-장석이며, 사장석은 누대구조와 석영과의 반응으로 형성된 미르메카이트 조직을 보인다. 미사장석은 격자상 쌍정을 보이며, K-장석은 퍼다이트 조직을 보인다. 흑운모의 풍화면은 갈색을 나타낸다.

호남지방 기후자료집(정덕환 외, 2005)에 의하면 호남지방의 기후는 노령산맥과 소백산맥의 중간에 위치한 평야지대로 광주, 전주, 정읍, 순천지방과 주변 지역이 남부평지다우형의 기후이며, Köppen의 기후 구분상 대부분이 온대동계건조기후대(Cwa)로 구분되고, McCune의 분류로 남부지방형과 남부해안지방형으로 분류된다. 또한 연평균 기온이 12~13°C, 최난월 평균기온은 25~26°C, 최한월평균기온은 -1~0°C 정도이다. 연평균강수량은 1,280~1,500 mm, 최습월 강수량은 250~300 mm, 최건월 강수량은 25~45 mm 정도로 월별 강수가 호남지방의 타 기후구에 비해 적다. 보다 정확한 기후 측정을 위해 2002년도 7월부터

**Table 1.** Chemical analysis of GSG profile from the granite of the Hyangdeung area, in Gwangju, Korea

Sample No.	Rocks		Aprock				Saprolite				Soil	
	GSG-1	GSG-5	GSG-6	GSG-9	GSG-10	GSG-11	GSG-12	GSG-13	GSG-14	GSG-15	GSG-16	
Major elements (wt.%)												
SiO <sub>2</sub>	65.76	64.51	61.35	62.30	64.04	63.47	64.75	64.57	64.43	64.73	61.33	
TiO	20.53	0.51	0.66	0.64	0.61	0.60	0.60	0.59	0.61	0.68	0.81	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.70	16.56	18.80	18.42	17.57	17.54	16.75	16.69	17.36	17.21	19.60	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.06	4.00	4.94	4.75	4.59	4.42	4.20	4.48	4.17	4.38	4.80	
MnO	0.06	0.06	0.06	0.16	0.08	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	
MgO	2.14	1.48	1.31	1.23	1.26	1.26	1.33	1.25	1.18	1.04	0.99	
CaO	4.87	2.90	2.16	1.86	1.61	1.79	2.70	1.89	1.26	1.66	1.02	
Na <sub>2</sub> O	3.49	3.40	1.46	1.35	1.96	1.46	2.94	2.27	2.31	1.98	1.08	
K <sub>2</sub> O	1.73	3.64	2.09	2.01	2.41	2.54	2.34	2.54	2.67	3.01	2.57	
P <sub>2</sub> O	50.14	0.16	0.10	0.07	0.09	0.08	0.18	0.12	0.05	0.05	0.09	
LOI	1.76	2.93	6.98	6.78	5.89	6.05	4.36	5.09	5.42	5.43	7.48	
Total	100.23	100.15	99.91	99.56	100.11	99.28	100.20	99.53	99.51	100.21	99.81	
Traceelements (ppm)												
Cu	5.02	3.67	4.37	4.22	4.47	3.88	3.03	3.56	4.00	5.56	6.19	
Zn	63.37	62.42	70.32	71.77	70.16	62.81	73.34	73.93	69.60	73.78	76.53	
As	4.60	4.93	5.70	3.20	3.94	2.68	2.50	3.24	3.65	1.03	2.11	
Cr	28.59	28.18	27.95	31.24	37.39	30.34	29.53	28.40	26.65	33.57	32.33	
Co	32.97	25.56	22.88	29.72	28.55	24.60	30.77	28.89	26.17	29.69	22.85	
Ni	11.72	10.78	14.00	14.18	12.98	13.91	11.97	12.68	11.07	12.66	11.89	
Rb	9.07	15.17	17.01	20.30	24.46	17.82	27.01	38.42	49.06	30.65	36.70	
Sr	51.58	71.27	64.52	66.48	81.34	76.46	76.21	77.21	49.66	79.71	46.55	
Ba	39.66	62.86	71.55	158.18	120.12	119.92	53.50	82.74	104.48	107.42	145.75	
Pb	4.59	11.02	12.73	11.57	12.82	10.89	7.71	9.67	9.46	11.76	16.38	
Rare earth elements (ppm)												
La	21.90	26.24	54.19	31.82	40.39	35.25	32.20	38.16	41.96	39.84	57.90	
Ce	40.04	46.01	72.96	69.65	80.04	68.81	64.10	62.88	69.88	73.82	88.40	
Nd	13.70	13.85	30.21	23.09	26.11	22.56	22.56	24.50	26.27	28.36	43.71	
Sm	2.16	1.99	4.44	3.98	4.34	3.80	3.87	4.14	4.16	4.78	6.97	
Eu	0.52	0.48	1.02	0.97	1.09	0.95	0.89	1.06	1.04	1.08	1.44	
Tb	0.21	0.19	0.39	0.39	0.41	0.37	0.39	0.45	0.40	0.46	0.57	
Yb	0.50	0.36	0.85	0.95	0.95	0.83	0.89	1.00	0.88	1.06	0.98	

2003년도 3월까지 연구지역에 무인기상관측기를 설치하여 주기적으로 기상자료를 분석하였다. 그 결과 9개월간 평균 기온의 변화는 -8.63~30.20, 9개월간 평균 습도의 변화는 48.10~96.59% 정도이며, 9개월간 강수량은 1500 ml 내외인 것으로 나타났다(정덕환 외, 2005)). 본 연구를 위한 시료 채취는 비교적 건기인 10월말에서 11월초에 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 시추코어 조사

2000년에 광주광역시에서 채취한 40개의 시추코어

중 본 역과 가장 가까운 곳에서 채취한 시추코어를 조사한 결과, 상부에서 2.0 m까지는 흑갈색 토양과 황갈색의 자갈이 혼재 되어 있으며, 3.0~7.5 m까지는 적갈색의 토양으로 화강암의 풍화토인 부식암층이다. 8.0 m까지는 풍화가 시작되는 부분으로 풍화암층이며, 8.2 m 이하는 파쇄대가 심각하게 발달하여 심한 균열을 보이는 층으로 시료채취 지역과 아주 유사한 분포를 보이고 있다.

### 암석과 토양층의 주성분원소 거동

Fig. 1과 Table 1에서 보는 바와 같이 기반암에서 지표로 갈수록 주성분원소의 구성비는 TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

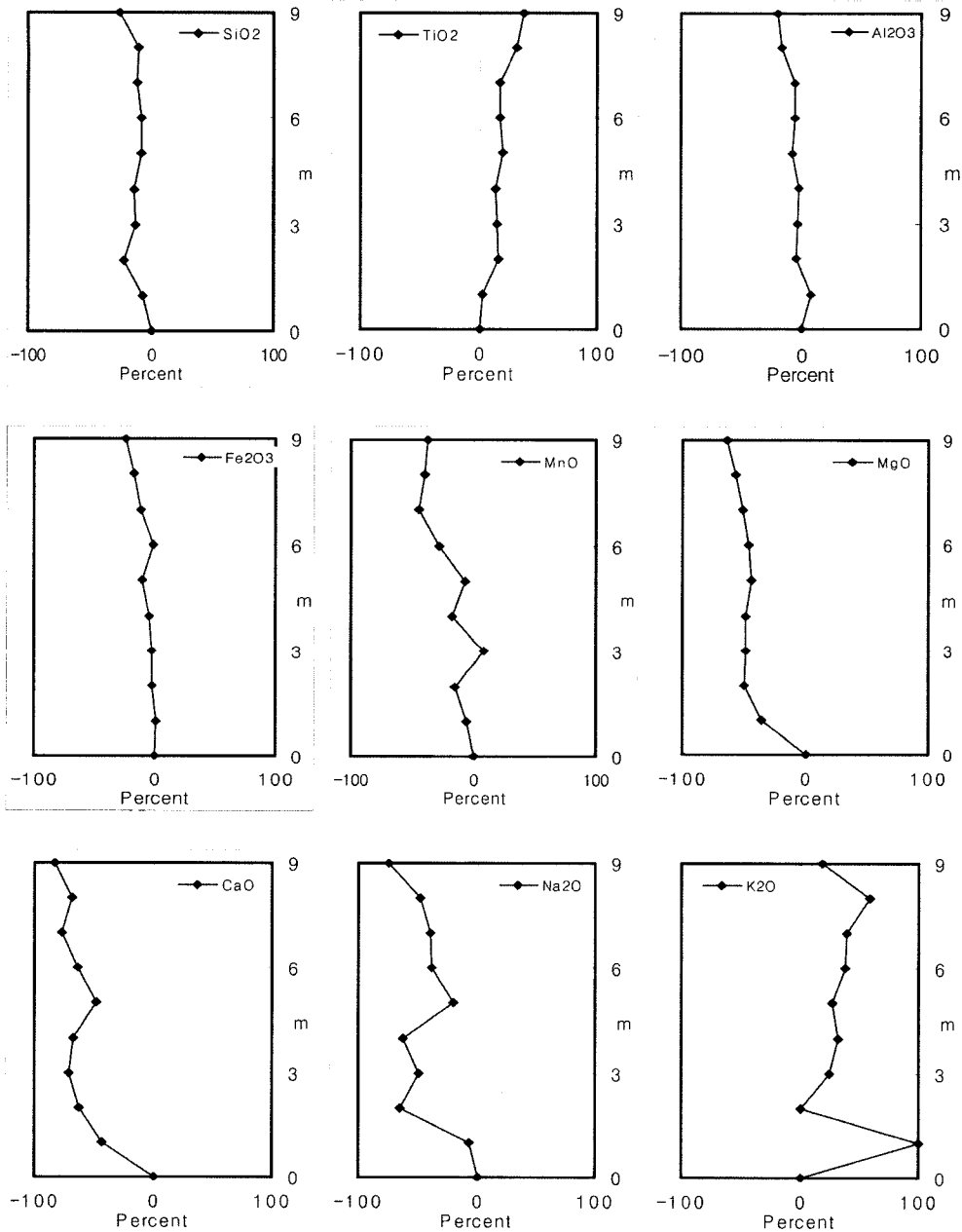


Fig. 1. Change of major elements depth of GSG showing progressive weathering toward surface.

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, LOI는 증가하고, SiO<sub>2</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO는 감소한다. 일반적으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 불용성으로써 토양 내에서 유동성이 적어 그들의 이동이 활발하지 않는 것으로 알려져 있지만, 본 역에서는 증가하는 경향이 나타난다. 이는 풍화단면에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 지하수와 함께 유출되지 않고 점토광물 내에 남게 되어 있어서 다른 원소에 비해 상대적으로

증가된 것으로 보인다.

이와 같이 화학분석 값은 시료의 상대적인 원소구성비이므로 원소의 함량 변화를 설명하기에 부적절하다. 따라서 Nesbitt와 Young(1982)은 모암에서의 원소의 농도와 풍화과정 중에서 생긴 단면에서 원소의 농도를 비교하기 위해 다음과 같은 식을 제안했다.

$$\text{Percent change} = [(element/Al_2O_3)_{sample}/(element/$$

$Al_2O_3$ )parent - 1] × 100

$Al_2O_3$ 는 풍화 2차광물인 점토광물의 구성 원소이며 지표수에 잘 용해되지 않고 유동성이 작아  $Al_2O_3$ 를 기준으로 모암과 시료의 농도를 비교함으로써 원소의 이동을 해석할 수 있다. 물론 기준원소 중에는 용액에 유동성이 없는  $TiO_2$ 와 같은 원소들이 있지만,  $TiO_2$  경우 그 결과 값이  $Al_2O_3$ 와 비슷하나 편차가 커서 제외시켰고, 저콘의 경우 시료 내에서 미량이기 때문에 제외하였다.

Table 1과 Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 역 11개 시료의 원소 구성비와 모암의  $Al_2O_3$ 에 대한 원소의 함량 변화를 살펴보면  $TiO_2$ 와  $K_2O$ 만이 양의 값을 가지면서 증가하였고, 나머지  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $MgO$ ,  $P_2O_5$ ,  $MnO$ 는 감소,  $Fe_2O_3$ 는 거의 변화가 일어나지 않았다. 특히  $K_2O$ 의 꾸준한 함량 증가는 주목된다. 이러한 함량의 변화는 본 역에서 사장석과 운모류의 풍화가 강하게 일어났으며, K-장석과 석영의 풍화는 사장석, 운모류에 비하여 미약하거나 거의 일어나지 않았음을 나타내고 있다.

$SiO_2$ 는 석영을 포함한 조암광물에 함유되어 있으며, 풍화 초기부터 지속적으로 감소한다. 특히 석영은 풍화에 강하여 토양층내에 잔존율이 높다(Nesbitt and Markovics, 1997). 본 역에서도 Si는 감소하는데 이는 지하수에 의한 용탈작용으로 생각된다. 또한 Si를 포함한 광물은 온난 습윤한 기후에서 Si를 잃으면서 철산화물로 변해간다. 본 역에서 Fe의 함량 변화가 양의 값을 갖는 것으로 보아 이곳은 온난 습윤한 기후로 철산화물화 작용이 강한 지역임을 알 수 있다.

기반암 내에서 Ca와 Na 성분은 주로 사장석 내에 구조적으로 함유되어 있으며, 이러한 사장석은 일반

적으로 K장석에 비하여 화학적 풍화에 약하여 풍화 초기부터 심한 용탈작용이 일어난다(Faure, 1991; White, 1997). 본 역에서 CaO의 경우 기반암(GSG-1)에서 풍화암(GSG-2)으로 전이되면서 43%정도의 감소를 보이고,  $Na_2O$ 는 풍화암(GSG-2)에서 부식암(GSG-3)으로 전이되는 부분에서 65%정도의 감소를 보인다. 또한 부식암의 최상단인 GSG-6에서는 Ca, Na 두 성분 모두 약간의 증가를 보인다. 이는 Ca가 토양 입자 표면에서 쉽게 흡착하여 토양으로부터 이온교환 형태로 용출 될 가능성이 높기 때문이다(전서령, 이정후, 2002).  $Al_2O_3$ 에 대한 Ca/Na의 비율은 GSG-3을 제외한 풍화가 일어나는 모든 부분에서 Ca의 풍화가 Na에 비하여 크게 나타나고 있다(Fig. 2). 특히나 풍화 초기에는 Ca는 Na에 비하여 7배나 큰 함량 변화를 보이고 있다. 그렇지만 GSG-3부에서는 Ca/Na이 0.97로 Na의 변화가 약간 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

$P_2O_5$ ,  $MnO$ 는 Na의 변화와 거의 비슷한 형태로 일어난다. 일반적으로  $P_2O_5$ 와  $MnO$ 는 2차광물로의 생성이 미약하여 풍화시에 꾸준한 감소를 보인다. 그러나 최상부에서 이 둘의 함량이 증가하는데 이는 외부로부터 유입된 강하물질로 해석된다.

흑운모에 포함되어 있는 MgO는 일반적으로 상부로 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 이는 대부분의 MgO의 풍화에 관여하는 운모가 풍화에 강하고, 2차광물(질석)의 생성에 따른 K와의 치환 때문이다(Nesbitt and Markovics, 1997; White, 1997). 그러나 본 역에서는 상부로 갈수록 감소하는데 이는 산성우에서 쉽게 토양으로 용출되는 Mg의 특성 때문이다. 대부분의 토양에서의 MgO는 질석과 같은 2차광물로

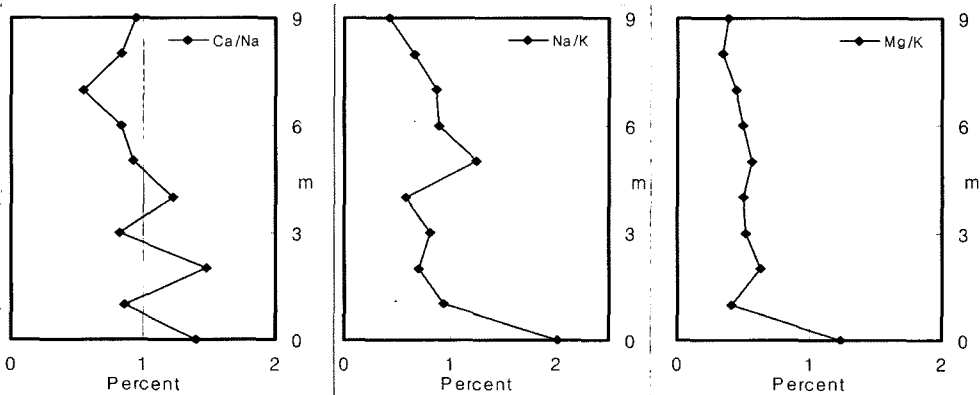


Fig. 2. Variation diagrams of Ca/Na, Na/K and Mg/K from soil profile with depth in the study area.

생성한다. 따라서 질석이 생성되는 곳에서는 Mg의 함량이 증가해야 한다. 그러나 본 역에서 Mg의 함량이 감소하는 이유는 질석의 경우 산에 쉽게 분해되고, 양이온의 치환이 강하기 때문이다. 또한  $Fe^{3+}$ 에 비해  $Mg^{2+}$ 가 K와 치환되면 질석이 생성되지 않고 일라이트로 변한다. 따라서 본 역에서 MgO의 감소는 운모의 질석화작용 이후에 강한 산성우에 의해 Mg가 용출되고, Mg가 K와 치환하여 일라이트로 변화했기 때문으로 생각된다.

기반암에서 K성분은 정장석이나 흑운모 내에 함유되어 있다(Faure, 1991). 특히 K성분은 흑운모의 풍

화에 의해 영향을 받는다. 강한 질석화 작용이 일어나는 곳에서는  $K_2O$ 는 감소하는 경향을 보이고, MgO는 증가하는 경향을 보이는 것이 일반적인 경향인데 본 역에서는 상이하게 나타난다. Fig. 2에서 보는바와같이 기반암에서 1.24였던 Mg/K의 함량은 꾸준히 감소한다. 이는 위에서 언급한 일라이트 생성으로 Mg가 K와 치환하여 토양에 남아 있기 때문이다.

또한 사장석 성분인 Ca, Na와 K-장석, 흑운모의 성분인 K를 비교해 보면, Fig. 2와 같은 변화를 볼 수 있다. 이는 풍화암으로 완전하지는 않지만 암석의 형태를 보존하고 있는 곳에서는 K성분을 포함하고

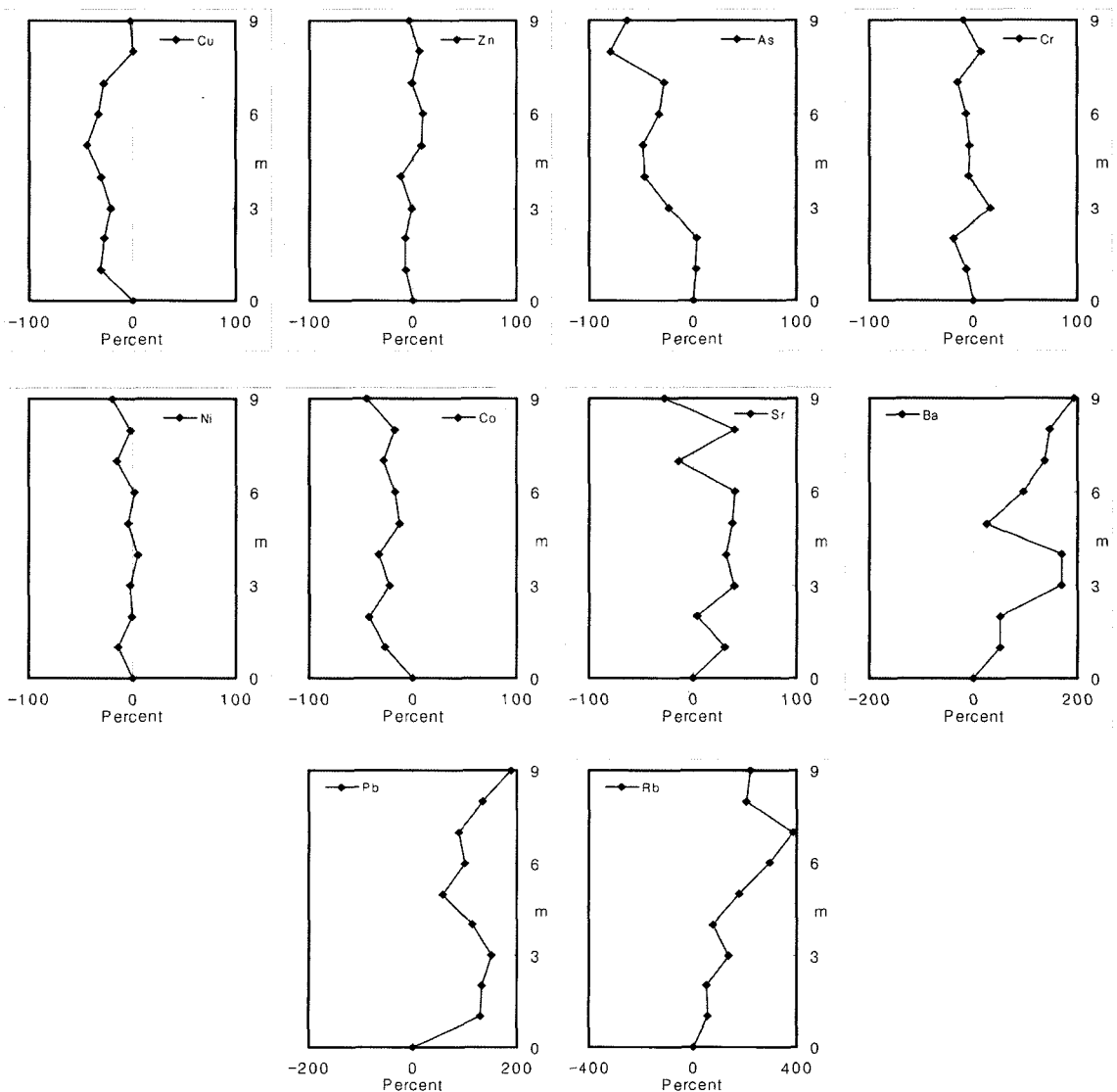


Fig. 3. Change of trace elements depth of GSG showing progressive weathering toward surface.

있는 흑운모나 정장석이 사장석에 비해 풍화에 강함을 시사해 주고 있다. Nesbitt(1979)는 사장석이 K-장석에 비해 풍화율이 1.5배 가량 높다고 주장했으며, Brantley(1992)는 2~3배 가량 풍화속도가 빠른 것으로 보고했다. 본 역에서 Na/K를 보면 2.02이던 비율이 상부로 올라가면서 0.42까지 내려가는 것으로 보아 이러한 이론들을 잘 뒷받침 해주고 있다(Fig. 2).

흑운모의 풍화에도 불구하고 K<sub>2</sub>O가 양의 값을 가지면서 변화하고, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 거의 변화하지 않는 것은 흑운모의 풍화는 심하게 진행 되면서 K성분은 일라이트의 층간이온으로 들어가 2차광물로 생성 되었기 때문이다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 일정한 함량은 흑운모의 변질에서 용탈된 이 원소들이 비교적 유동성이 작아 유출되지 않고 철수산화물(침철석) 및 아나타제를 형성하여 풍화광물 주변에 남아있기 때문으로 생각된다.

TiO<sub>2</sub>는 잔류성이 강해 잔류 지시인자로도 이용되는데(White, 1997) 흑운모나 각섬석 내에 주로 존재하며, 흑운모는 대부분의 토양 단면 내에서 풍화작용 초기에 급속하게 변성된다(Nesbitt and Young, 1984; Velbel, 1985). 따라서 Ti는 풍화 초기에 쉽게 용출되거나 쉽게 이동하지 못하고 변질된 흑운모 주위에서 산화물을 형성하여 전체적인 토양층 내에서는 큰 변화가 없는 것으로 알려져 있다(Nesbitt and Markovics, 1997). 본 역에서 TiO<sub>2</sub>는 상부로 갈수록 증가하는데 이는 TiO<sub>2</sub>가 풍화에 강하며 이동하지 않고 점토광물에 흡착하거나 이온교환과 같은 결과로 잔류했을 가능성이 높다.

**암석과 토양층의 미량성분원소 거동**

암석의 풍화를 설명할 때 주성분원소의 거동은 기반암에서 변질작용과 2차 점토광물의 생성에 중요한 자료가 된다. 미량성분원소 또한 풍화현상에 나타나는 여러 가지 요인들과 관련 하여 주요한 풍화 양상을 설명해 준다.

Fig. 3과 같이 본 역에서는 불규칙적이긴 하지만 Rb, Sr, Pb는 증가하는 경향을 보이며, As, Co는 감소하는 경향을 보인다.

또한 Ba는 증가하는 경향을 나타내며, Cu, Zn, Cr, Ni 등은 부분적으로 집적된 모습을 보이나 비교적 일정한 것으로 보아 풍화과정에서 심한 용탈이 일어나지 않았음을 나타낸다.

미량성분원소의 거동은 일반적으로 주성분원소의 지배를 받게 되는데 전이원소는 Fe의 함량에 비례해

서 변하며, 이는 새로 생성된 철수산화물에 이들 원소들이 Fe를 치환해 들어가거나 표면에 흡착되어 있기 때문이다. 여기서 Cu, Zn, Cr, Ni가 일정하게 나타나는 이유는 주성분원소의 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 일정하기 때문으로 판단된다.

Rb와 Sr은 CaO에 비례하여 감소하는 것은 이들 원소가 광물 내의 Ca를 치환하고 있어 용해 작용 시에 Ca와 함께 용탈되어 지하수에 의해 유출되었음을 의미한다. 풍화작용 시에 주로 용해된 광물은 사장석이다.

전반적으로 미량성분원소의 패턴을 볼 때 증가하거나 감소하는 원소의 경우 풍화암을 지나면서 증가하거나 감소하여 불규칙적인 경향을 나타내며 변화해간다. 이는 풍화가 아직 덜 진행된 암석에서 풍화가 진행되면서 점토광물을 생성하고 있음을 의미한다.

**암석과 토양층의 희토류원소 거동**

풍화작용의 진행에 따른 희토류원소들의 변화((Fig. 4, 5)는 풍화 초기에 거의 일정하게 유지 되다가 중·말기에 증가하는 경향을 보인다. 또한 풍화단면의 각 층별 시료들은 콘드라이트(chondrite)에 대한 상대적인 분포 패턴에서 180에서부터 2까지 급감하는 것으로 보아 이는 화강암에서 일어나는 패턴과 일치한다(Fig. 4). 희토류원소들에 대한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 상대적인 변화를 보면 La, Ce 및 Nd 같은 경희토류원소(Light Rare Earth Element: LREE)는 풍화초기에 증가하고, 주성분원소 함량의 변화와 비슷하게 풍화암에서 부식암으로 옮겨가는 GSG-4부터 GSG-6까지 감소하며, 그 이후로는 전반적으로 증가하는 경향을 나타낸다.

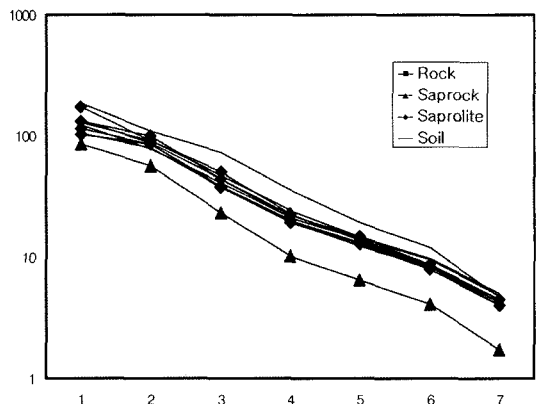


Fig. 4. Chondrite-normalized REE patterns of weathering profiles developed in the granite in the Hangdeung area.

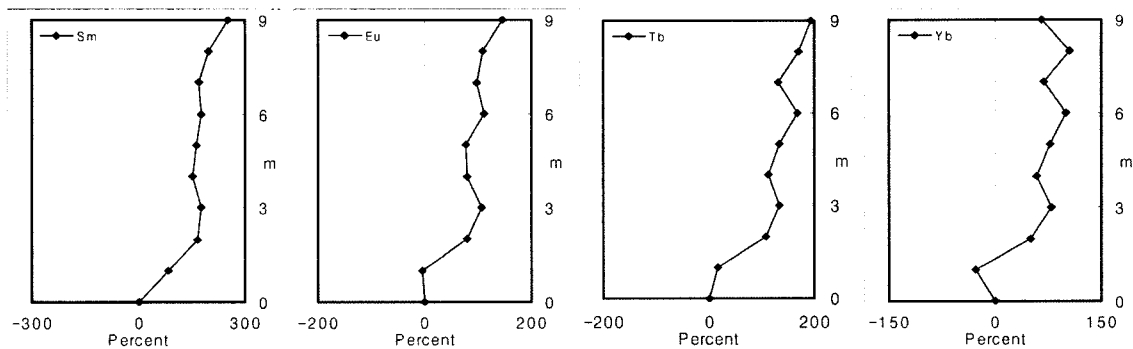


Fig. 5. Change of REEs depth of GSG showing progressive weathering toward surface.

그러나 Yb, Tb, Eu, Sm 같은 중희토류원소(Heavy Rare Earth Element: HREE)는 풍화초기에 별다른 반응을 보이지 않다가 경희토류원소가 급감하는 GSG-4부터 GSG-6사이에서 감소하다가 지표에 이르기까지 증가하는 경향을 보인다. 특히 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량과 비교해 보면 풍화암에서는 경희토류원소에서 중희토류원소로 변하면서 풍화암에서 더 많은 용탈작용이 일어났음을 알 수 있다. 이는 풍화초기에 희토류 원소들 중 경희토류원소들은 풍화되어 모암의 주위에 흡착되거나 부화(Nesbit et al., 1990)되고, 중희토류원소의 경우 용해성 화합물로 형성되어 제거되기 때문이다(Gouveia et al., 1993).

### 결 론

광주광역시 향동지역의 흑운모화강암은 평지다우형 기후의 환경 하에서 심한 풍화작용을 받았다. 이 산사면에서 모암부터 풍화도에 이르는 원소의 거동에 대한 지화학적 특성을 파악한 결과는 다음과 같다.

1. 연구지역의 산사면에서 모암부터 풍화도까지 주성분원소 중 Si, Ca, Na, Mg, P, Mn은 감소하고 Ti, Fe, K는 증가하는 경향을 보인다.
2. 미량성분원소의 경우 Rb, Sr, Pb, Ba은 증가하는 경향을 보이며, As, Co는 감소하는 경향을 보인다. 또한 Zn, Cr, Ni등은 부분적으로 집적된 모습을 보이긴 하지만 전체적으로는 모암과 풍화도에서 거의 비슷한 함량을 갖는다.
3. 희토류원소는 전체적으로 상부로 갈수록 증가하는데, 경희토류원소는 풍화초기에 기반암에서 용탈되어 풍화암에서 집적되지만, 중희토류원소의 경우는 상대적으로 집적되지 못하여 풍화초기에 약간 감소하

는 경향을 보인다.

4. 화강암의 풍화는 일반적으로 질석화작용이 일어나면서 모암에서부터 꾸준히 K는 감소하고 질석의 구성원소인 Mg는 증가하는 것이 일반적으로 일어나는 패턴이다. 그러나 본 연구지역에서는 K는 증가하고 Mg는 감소하는 경향이 나타난다. 이는 산성환경에서 일어나는 Mg의 용탈과 Mg과 K가 치환하여 일라이트로 변한 결과로 생각되며, Mg/K의 함량 변화에서도 K장석에 비해 Mg의 풍화가 더 심하게 일어나는 지역으로 생각된다.

### 사 사

이 논문은 2004년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구된 것으로 조선대학교에 감사한다.

### 참고문헌

김규봉, 이병주, 황상구, 1990, 1:50,000 한국지질도 광주도폭, 한국동력자원연구소, 24 p.  
 정덕환, 신극진, 2005, 호남지방 기후 자료, 광주지방기상청, 358 p.  
 김수진, 이민성, 김원사, 이수재, 1994, 서울지역의 자연환경 변화에 관한 연구: 남산 화강암의 풍화에 관한 환경광물학적 연구, 지질학회지, 30(3), 284-296.  
 김용준, 오민수, 박재봉, 1993, 광주화강암체에 대한 암석화학적 연구, 광산지질, 26(1), 83-96.  
 문희수, 송윤구, 신상은, 1993, 질석화가 진행된 풍화단면에서의 광물조성과 주원소의 변화, 광산지질, 26(2), 121-137.  
 전서령, 이정후, 2002, 화강암의 풍화에 의해 생성된 토양단면에서 주원소 및 미량원소의 지화학적 특성 (전북 진안군 백운면에 분포하는 two-mica granite을 대상으로), 지질학회지, 38(3), 293-307.



- Brantley, S.L., 1992, Kinetics of dissolution and precipitation-experimental and field result. In Kharaka, Y.K. and Maest, A.S. (eds.), International Symposium on Water-Rock Interaction. Balkema, 85-88.
- Chesworth, W., Dejoux, J., and Larroque, P., 1981, The weathering of basalts and relative mobilities of the major elements st. Belbex, France. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 45, 1225-1243.
- Drever, J.I., and Zobrist, J., 1992, Chemical weathering of silicate rocks as a function of elevation in the southern Swiss Alps. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 56, 3209-3216.
- Faure, G., 1991, *Inorganic Geochemistry*. Macmillan, 589 p.
- Nesbitt, H.W., 1979, Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of granodiorite. *Nature*, 279, 206-210.
- Nesbitt, H.W., and Young, G.M., 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of Lutetia. *Nature*, 299, 715-717.
- Nesbitt, H.W. and Young, G.H., 1984, prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 48, 1523-1534.
- Nesbitt, H.W. MacRae, N.D., and Kronberg, B.I., 1990, Amazon deep-sea fan mod: Light REE enriched products of extreme chemical weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 110, 118-123.
- Nesbitt, H.W. and Markovics, G., 1997, Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 1653-1670.
- Teveldal, S., Horgensen, P., and Stuanes, A.O., 1990, Long-term weathering of silicates in a sandy soil at Nordmoen, Southern Norway. *Clay Mineral*, 25, 447-465.
- Velbel, M.A., 1985, Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge. *American Journal of Science*, 285, 904-930.
- White R.E., 1997, *Principles and practice of soil science* (3rd ed.). Blackwell Science, 348 p.

---

2005년 9월 26일 원고 접수  
2005년 11월 30일 수정원고 접수  
2005년 11월 30일 원고 채택