

유구지역 화강암질 편마암의 풍화작용에 따른 원소의 거동

Elemental Mobility during the Weathering of Granitic Gneiss in the Yoogoo Area, Korea.

이석훈 (Seok Hoon Lee)* · 김수진 (Soo Jin Kim)**

*한국기초과학지원연구원 전자현미경팀
(Electron Microscopy Team, Korea Basic Science Institute, Taejon 305-600, Korea, E-mail: shlee@comp.kbsi.re.kr)
**서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부
(School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

요약 : 공주군 유구면 일대의 화강암질 편마암의 풍화작용에 따른 원소의 거동과 pH와 이차광물과의 관계를 XRF, ICP-AES, ICP-MS를 이용한 원소분석결과를 통하여 검토하였다. 이 지역의 암석은 pH6 내외의 산성환경 하에서 심한 풍화작용을 받아 할로이사이트, 캐올리나이트, 질석, 스멕타이트, 일라이트, 깃사이트, 침철석, 아나타제와 같은 다양한 이차광물을 생성하면서 심각한 화학조성의 변화를 초래했다. 주 원소의 화학조성을 이용한 풍화지수는 토양층에서 79~88로 모암 중의 사장석이 용해되고 흑운모가 변질되어 캐올린광물의 생성이 활발한 방향으로 풍화작용이 진행되었다. 지표층으로 가면서 Al에 대한 주 원소의 거동은 Si, Ca, Na, K, P가 감소하고 Fe, Ti, Mn이 증가하는 경향을 보이며, pH가 낮은 풍화단면에서 주 원소의 변화량이 더 크다. 이 풍화대에서 Mg은 거의 일정하다. Li, As, 모든 전이원소는 pH가 감소함에 따라 증가하며, 특히 이들 원소는 Fe의 함량과 비례해서 증가해 침철석과 공침하였거나 표면에 흡착되어 있는 것으로 보인다. Ga은 Fe와 비례하기는 하지만 변화량은 전 풍화단면에서 일정하다. Zr, Mo, Sn, Cd은 pH에 변화에 상관없이 일정한 반면에 Rb, Sr, Ba, Y, Pb, Th, U 등은 감소하는 경향을 보인다. 특히 Rb과 Sr은 Ca에 비례해서 감소한다. 희토류원소는 전 풍화단면에서 감소하는 경향을 보이는 데, Al₂O₃에 대한 상대적인 변화량을 보면 경희토류원소는 사프롤라이트(saprolite) 하부와 상부에서 부화되어 있고 중부 사프롤라이트와 토양층에서 감소하는 반면에 중희토류원소는 사프롤라이트 하부와 상부에서 감소하고 중부 사프롤라이트 및 토양층에서 부화되는 경향을 보인다. 전반적으로 희토류원소의 원자번호가 클수록 손실율이 커진다. 이 풍화단면에서 원소의 거동은 각 풍화층의 pH와 생성된 이차광물의 조성에 지배를 받았다.

주요어 : 풍화작용, 풍화지수, pH, 이차광물, 원소의 거동.

ABSTRACT : Elemental mobility during the weathering of granitic gneiss in the Yoogoo area was investigated with relation to pH and secondary minerals using chemical analysis data determined with XRF, ICP-AES, and ICP-MS. The granitic gneiss has been significantly altered under acidic weathering environment of pH6 with formation of secondary minerals such as halloysite, kaolinite, vermiculite, smectite, illite, goethite, and anatase. Chemical change was great in the development of weathering profile including lower saprolite and upper soil. Chemical index of alteration of soils ranges from 78 to 88. Weathering process was dominated by feldspar dissolution, biotite alteration and formation of highly aluminous clay. Si, Ca, Na, K, and P were depleted relative to Al in soil, whereas other elements such as Fe, Ti and Mn are enriched. Mg content is constant through the weathering profiles. Element contents were more significantly changed in the portion of lower pH. Li, As, and all the transition metal elements are enriched with decreasing pH and increasing Fe content, suggesting coprecipitation/adsorption by

goethite. Ga content increases with Fe content, but its content relative to Al is constant through the profile. Zr, Mo, Sn, and Cd are relatively immobile regardless of pH, whereas Rb, Sr, Ba, Y, Pb, Th, and U tend to decrease toward the surface. Rb and Sr are depleted in proportion to Ca. Rare earth elements clearly have a tendency to decrease in the whole samples. LREEs relative to Al are enriched in the lower and upper saprolite, but depleted in the middle saprolite and soil. HREEs are depleted in the lower and upper saprolite, but enriched in the middle saprolite and soil. Loss of REE increases with atomic number. In the weathering profiles, element mobility was affected by soil pH and secondary minerals.

Keywords : Weathering, Chemical Index of Alteration, pH, Secondary Minerals, Element Mobility.

서 언

암석의 풍화작용에는 주변의 물리적인 변화로 암석을 구성하고 있는 광물이 보다 작은 입자로 파쇄되는 물리적인 풍화와 강우에 의해 침투된 지하수와 유기물질의 분해로 생성된 탄산용액이 구성광물과 반응하여 원소가 이동하면서 이차 광물이 생성되는 화학적 풍화작용이 함께 수반된다. 풍화작용이 일어나는 동안 풍화단면에서 원소의 분포는 모암의 광물조성과 화학조성, 강수와 지하수에 의한 원소의 유출 및 유입, 풍화층 상하부로의 원소이동과 생성된 이차광물의 조성에 영향을 받는다(Fritz and Ragland, 1980; Chesworth *et al.*, 1981). 따라서 암석의 풍화진행정도나 경향성을 규명하는 방법으로 풍화산물의 조성비와 결정도를 이용하거나(Gilkes and Suddhiprakarn, 1979; Harris *et al.*, 1985), 모암을 포함한 풍화대의 전암분석을 통한 화학조성의 변화를 이용한다. 후자의 경우 정량적인 수치로 표현하기에 보다 용이하기 때문에 화학적 풍화도를 나타내는데 일반적으로 널리 이용된다. Nesbitt and Young(1984)은 심성암에서 화산암까지의 암석을 대상으로 열역학적 자료와 반응속도 자료를 기초로 화학분석자료를 Al_2O_3 -(CaO+Na₂O)-K₂O 삼각그래프에 도시하여 풍화의 경향성에 대해 풍화초기에는 CaO와 Na₂O가 감소하는 경향을 보이다가 말기에는 K₂O가 감소하면서 Al_2O_3 의 정점 쪽으로 즉, 캐올리나이트와 깁사이트가 형성되는 쪽으로 진행된다는 사실을 보고한 바 있다. 풍화작용에 따른 원소의 거동에 관한 연구는 다양한 암석을 대상으로 진행되어왔다. 즉, 화강암 (Gouviea *et al.*, 1993; 김수진 등, 1994), 화강섬록암(Nesbitt, 1979), 현무암(Chesworth *et al.*, 1981; Eggleton *et al.*, 1987), 초염기성암(문희수 등, 1993; Schroeder,

2000), 퇴적암(Teveldal *et al.*, 1990)과 편마암(Drever and Zobrist, 1992; Sharma and Rajamani, 2000) 등의 풍화대에서 이차광물의 조성과 관련하여 주원소, 미량원소와 희토류원소의 거동을 보고하였다. 이들의 연구에 따르면 대체로 풍화가 진행되면서 주원소 중 Si, Mg, Ca, Na, P, K는 감소하는 경향을 보이며, Al, Fe, Mn, Ti는 증가 또는 일정하게 유지되는 경향을 나타내고, 희토류원소는 부화되는 경향을 보이는 반면 미량원소는 원소에 따라 다양한 거동을 나타내고 있다. 하지만 원소들이 항상 일정한 경향성을 보이는 것은 아니며, 모암의 종류, 풍화광물의 특성 및 지하수의 pH 등과 밀접하게 관련되어 그 변화양상이 다양하다.

이 연구는 충청남도 공주군 유구면 일대 분포하는 화강암질 편마암의 풍화단면에서 잔류물을 대상으로 화학조성의 변화를 조사하고, 풍화가 진행되면서 주원소, 미량원소 및 희토류원소의 거동을 다양하게 생성되어있는 이차광물과 pH와 관련하여 규명하고자 한다.

연구지역의 지질

연구지역의 지질은 이석훈과 김수진(2000)에 의해 자세히 설명된 바 있다. 간단히 요약하면 선캠브리아기의 화강암질 편마암으로 피상을 이루고 있으나 곳에 따라 엽리가 발달하기도 한다. 주 구성광물은 석영, 사장석, 흑운모이며, 알바이트, K-장석, 백운모, 녹니석, 석류석, 규선석, 근청석 등이 미량광물로 존재하고, 방해석, 저어콘, 인회석, 모나자이트 등이 관찰된다. 암석에서 광물의 분포가 균질하지 않아 위치에 따라 광물조성비에 다소 차이를 보인다. 특히

K-장석과 알바이트의 분포가 일정하지 않으며, 미량광물 분포의 균질도는 극히 불량하다. 전 지역이 풍화작용을 심하게 받아 지표 상에서 신선한 노두 관찰이 거의 불가능하다.

SG-단면은 산 능선의 절개면에 발달한 풍화 단면으로 고지형을 이루고 있어 배수가 매우 양호한 지역에 위치한다. 지표로부터 18 m 깊이에서 신선한 모암을 관찰할 수 있으며, 상부로 가면서 풍화암, 사프롤라이트층, 토양층이 발달한다(Fig. 1). Gn-단면은 경사가 거의 없는 수평층의 절개면으로 비교적 배수가 불량한 지역의 풍화단면이다. 지표로부터 약 8 m 깊이까지만 노두상에서 나타나며 신선한 모암은 관찰되지 않았다. 풍화단면은 하부로부터 풍화암, 사프롤라이트층과 비교적 두꺼운 토양층(약 1 m)이 지표층으로 가면서 발달한다. 풍화단면의 토양층에는 각종 식물의 뿌리 등 유기물이 다량 함유되어있으며, 방해석 단편과 같은 Ca-농집층은 확인되지 않았으나 일부 시료에서 소량의 방해석이 현미경하에서 관찰되었다.

분석방법

채취된 시료는 실온에서 건조한 후 분말로 만들어 X-선 회절분석(XRD) 및 원소분석을 실시하였다. 서울대학교 지질학과에서 40 kV, 30 mA의 조건으로 CuK α 선을 이용하여 X-선 회절분석(Rigaku, RAD-3C)을 수행하였다. X-선 회절분석결과를 이용하는 광물의 정량분석 프로그램인 SIROQUANT 분석결과와 편광현미경하에서의 모드분석을 통해 풍화단면에서의 광물조성비를 구하였으며, 전암의 화학분석 결과로 이를 보정하여 주었다.

주 원소 분석은 한국기초과학지원연구원 서울분소의 X-선형광분석기(XRF: Philips, PW 1480)를 이용하였다. 분말시료 약 1.5 g을 정확하게 무게를 측정하여 도가니에 담아 전기로에 넣고 950°C에서 30분간 가열하였다가 냉각시켜 다시 무게를 측정하여 연소감량(Loss on Ignition)을 계산하였으며, 연소된 시료는 리튬테트라보레이트(lithium tetraborate, Li₂B₄O₇)와 1:5의 비율로 섞어 백금도가니에 담고 1200°C로 가열하여 완전히 용융시킨 후 몰드에 부어 유리구슬을 만들었다. 같은 방법으로 여러 개의 표준시

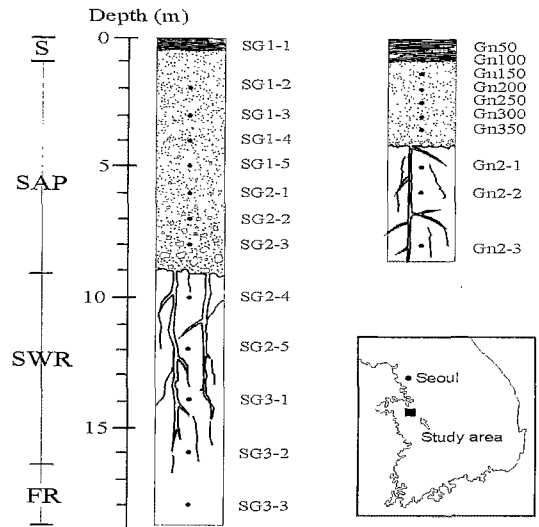


Fig. 1. Columnar sections of weathering profiles (SG and Gn) and the location of sampling sites from the granitic gneiss in the Yoogoo area. S, soil; SAP, saprolite; SWR, slightly weathered rock; FR, fresh parent rock.

료(Standard Reference Material, SRM)의 유리구슬을 제조하여 정량분석용 검정곡선을 만들어 분석에 사용하였다. 측정오차 범위는 2 σ 에서 $\pm 0.8\%$ 이다. 미량원소는 유도결합플라즈마 분광분석기(ICP-AES: Shimadzu, ICPS-1000 III)로, 희토류원소는 유도결합프라즈마질량분석기(ICP-MS: Fisons, PQ3 STE)로 각각 분석하였다. 시료준비는 0.2 g의 분말시료를 60 mL의 테플론(teflon) 비이커에 넣고 HF, HNO₃, HClO₄를 넣어 220°C로 가열한 상태에서 하루 밤을 둔다. 위 과정을 다시 반복해서 시료가 완전히 용해된 뒤 하얀 케이크가 만들어지면 묽은 염산을 첨가하여 다시 용해시킨다. 이 용액을 1%의 염산을 이용하여 측정농도 범위로 묽힌 후 분석기에 주입하였다. 시료를 용해시킬 때 2개의 SRM과 동일시료를 중복하여 동시에 용해시켜 SRM은 장비의 내부표준용액으로 활용하여 측정감도 변위와 매질의 영향을 보정하여 주었고 중복시료는 분석에 정확도 검증에 이용하였다. 분석오차 범위는 2 σ 에서 $\pm 4\%$ 이다. 시료의 수소이온농도 (pH)는 5%의 분말시료와 95%의 증류수(무게비)로 현탁액을 만들어 완전히 평형상태를 이룬 2시간 후에 측정하였다.

Table 1. Quantitative analyses of mineral composition using X-ray diffraction, optical microscopic modal analysis and chemistry of bulk sample from the weathering profiles in the Yoogoo granitic gneiss.

Sample	SG-profile										Gn-profile										
	SG	SG	SG	SG	SG	SG	SG	SG	SG	SG	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	Gn	
	3-3	3-1	3-1	2-4	2-3	2-2	2-1	1-5	1-3	1-2	1-1	2-3	2-2	2-1	350	300	250	200	150	100	50
Quartz	30.2	31.2	32.1	32.4	31.6	31.1	32.0	29.4	31.8	29.7	31.2	32.1	32.4	31.9	30.5	31.2	30.9	31.5	30.3	30.6	
Plagioclase ¹⁾	37.1	36.3	36.4	33.0	35.2	25.0	26.0	14.5	12.1	4.3	34.4	33.5	32.5	3.8	0.0	0.0	0.0	2.5	0.5	0.8	
K-feldspar	4.2	6.7	6.2	4.1	5.0	1.5	1.7	4.7	1.5	4.2	8.1	6.1	8.5	4.4	2.7	2.6	3.2	4.1	5.5	6.7	
Biotite	24.7	22.7	23.0	21.8	21.2	19.1	14.1	9.9	7.6	5.8	24.3	22.4	16.6	13.4	11.4	11.0	7.5	4.1	2.0	1.7	
Muscovite	1.4	0.7	0.9	0.8	1.5	0.9	1.1	0.6	0.1	0.1	0.9	1.2	1.5	0.9	1.2	0.5	0.7	0.5	0.3	0.3	
Chlorite	0.6	1.2	0.6	6.2	3.2	0.4	0.0	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	
Garnet	1.0	0.7	0.4	0.8	1.2	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	
Oxide	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.7	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Kaolin ²⁾	4.1	-	0.1	0.1	0.2	18.8	21.3	38.1	44.4	42.9	0.0	3.3	7.1	44.3	52.1	51.2	50.9	47.9	47.8	35.1	
Vermiculite ³⁾	-	-	⁵⁾ 0.0	0.0	0.2	1.4	2.1	0.5	0.6	10.1	0.0	0.4	0.7	0.1	1.2	1.7	4.2	6.8	10.9	21.4	
Illite	-	-	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	
Gibbsite	-	-	-	0.0	0.0	0.8	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	-	0.0	0.3	0.0	0.0	
Goethite	-	-	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	1.5	1.1	2.1	0.5	0.0	0.2	0.7	0.5	1.4	2.1	1.9	2.2	2.7	
total	99.7	99.8	99.9	99.7	99.8	99.9	99.7	99.9	99.9	99.9	99.9	99.7	99.9	99.8	99.9	99.8	99.7	99.8	99.9	99.9	

1) including albite, 2) including kaolinite, halloysite and agillan, 3) including interstratified biotite/vermiculite and smectite, 4) non-detected, 5) trace.

결과 및 토의

풍화단면의 광물조성

X-선 회절분석과 편광현미경하에서의 모드분석을 토대로 화학분석결과로 보정한 풍화단면에서의 광물조성비를 Table 1에 나타내었다. 전 풍화단면에서 석영은 거의 일정한 함량을 유지하고 있으며, K-장석도 분포가 불균질하지만 지표층으로 가면서 감소하는 경향을 보이지는 않는다. 흑운모는 풍화초기부터 감소하는 경향이 뚜렷하여 모암의 구성광물 중 가장 먼저 화학적 풍화작용이 일어났음을 지시하며, 사장석은 사프롤라이트층에서 급격히 용해되고 있음을 보여주고 있다. 특히 Gn-단면에서 알바이트를 포함한 사장석이 거의 완전히 용해되어 SG-단면에 비해 상대적으로 풍화작용의 영향이 심했음을 나타낸다.

풍화작용으로 생성된 이차광물 중 캐올린광물은 풍화단면에서 주요 풍화산물이며 지표층으로 가면서 함량의 증가경향이 현저하다. 연구지역에서의 캐올린광물은 흑운모의 변질과 사장석의 용해작용 이후 침전에 의해 형성되었으며 캐올리나이트에 비해 할로이사이트의 산출이 현저하여 구성비가 90% 이상이다(이석훈과 김수진, 2000). Gn-단면의 상부 사프롤라이트층 및 토양층에서 운모/질석 혼합층광물을 포함한 질석의 산출이 뚜렷하다. 철을 함유한 광물들의 용해작용으로 용탈된 철이 침전되어 형성된 침철석은 상부층으로 가면서 증가하는 경향을 보인다.

pH와 연소감량의 변화

풍화단면 각 층 시료에서 pH 측정결과를 Table 2와 3의 상단에 나타냈다. 모암에서는 9.57로 알칼리성이나, 풍화가 진행될수록 pH값이 작아지는 경향을 보이며 최 상부 토양층에서는 5.74~5.88로 산성을 나타낸다(Fig. 2). SG-단면에서 하부 사프롤라이트까지는 알칼리성이나 중부 사프롤라이트에서 중성을 나타내며, 상부 사프롤라이트에서부터 산성을 나타낸다. 하지만 Gn-단면에서는 풍화암(slightly weathered rock)에서 알칼리성 또는 중성이나 하부 사프롤라이트에서부터 산성이다. 이러한 pH의 변화는 지표로

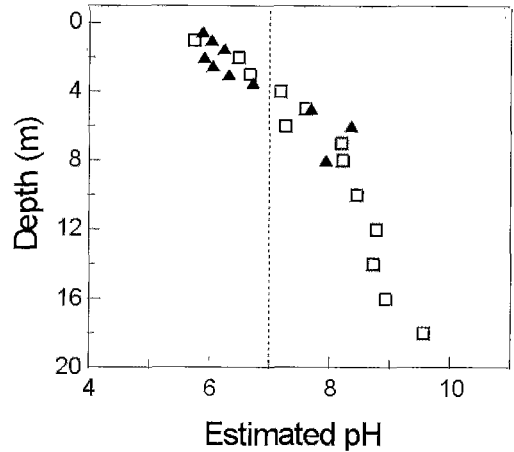


Fig. 2. pH variation with increasing depth in the weathering profiles at the SG- (□) and Gn-site (▲). Dashed line shows pH=7.

부터의 산성비의 유입과 광물의 변질과정에서 유리된 수소이온 농도의 차이에 기인하고, 모암 광물을 변질, 용해시키면서 이차광물을 생성하는 과정에서 특정원소의 선택적인 거동을 수반하여 각 층에서의 원소변화를 초래했다. 지표면으로 가면서 지표수와 유기물의 영향으로 만들어진 산성환경은 풍화작용을 더 가속화 시켰다. 모암에서 연소감량은 주로 운모광물의 층간수 및 구조수에 기인하여 1.2 wt.%이던 것이 풍화가 진행되면서 토양흡착수와 토양유기물의 증가로 인해 토양층에서는 7.0~9.0 wt.%까지 늘어났다(Table 2와 3). 연소감량이 사프롤라이트층에서부터 현저하게 증가하는 것은 이 층에서 암석의 파쇄대가 발달하여 공극이 많아지고 광물내의 벽개간 또는 광물간의 간격이 넓어져 지하수의 유입이 용이하여 토양흡착수가 증가하였고, 생성된 점토광물의 층간수 및 구조수의 함량증가와 상부 층으로부터 유입된 유기물의 증가에 기인한다.

풍화단면에서 주원소의 거동

풍화과정에서 주원소의 변화를 전암분석 자료를 이용하여 검토하였다. 각 시료에 대한 화학조성을 SG-단면은 Table 2에 Gn-단면은 Table 3에 나타냈다. 풍화단면에서 주원소의 조성비는 깊이에 따라 일정한 경향성을 보이며, 사프롤라이트 층에서 그 경향성이 더욱 현저해진다. 상

Table 2. Whole rock chemistry (major, trace and rare earth elements) of SG-profile from the granitic gneiss in the Yoogoo area.

Horizon Sample	Soil			Saprolite			Saprock ¹			Rock
	SG1-1	SG1-2	SG1-3	SG1-5	SG2-1	SG2-2	SG2-3	SG2-4	SG3-1	SG3-3
pH	5.74	6.48	6.67	7.18	7.27	8.19	8.21	8.45	8.72	9.57
SiO ₂	62.38	62.24	63.53	65.57	66.82	66.75	67.77	67.26	68.61	68.66
TiO ₂	0.55	0.86	0.83	0.75	0.56	0.60	0.56	0.63	0.54	0.48
Al ₂ O ₃	17.65	17.78	16.99	15.58	15.32	15.62	15.20	15.47	15.08	14.64
Fe ₂ O ₃ *	6.44	6.49	6.14	6.30	6.08	6.14	5.57	5.57	4.82	4.70
MnO	0.07	0.06	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03
MgO	1.68	2.09	2.15	2.12	1.76	1.85	1.86	1.93	1.53	1.61
CaO	0.35	1.29	1.02	1.02	0.87	1.10	1.17	1.17	1.55	1.96
Na ₂ O	0.43	1.46	1.31	1.51	1.64	2.30	2.17	2.15	2.53	2.58
K ₂ O	3.22	2.15	3.32	2.79	3.11	2.78	3.00	3.26	3.41	3.42
P ₂ O ₅	0.06	0.08	0.08	0.07	0.06	0.08	0.06	0.08	0.08	0.15
L.O.I.**	7.03	5.13	4.16	3.50	3.10	2.50	2.00	1.72	1.32	1.24
Total	99.86	99.63	99.56	99.23	99.36	99.76	99.40	99.29	99.50	99.47
CIA***	78.52	71.54	69.08	67.92	66.71	63.98	62.95	62.73	59.56	55.99
Trace elements (ppm)										
Li	23.1	24.1	22.8	21.9	22.3	22.7	25.2	18.0	16.7	17.4
Sc	9.6	9.7	82.5	9.2	10.3	10.1	8.4	8.7	7.8	8.5
V	72.0	75.4	73.2	79.3	71.3	68.6	61.8	66.1	52.5	54.5
Cr	61.2	38.4	40.1	66.0	65.7	81.7	66.0	85.8	36.9	32.3
Co	30.2	29.3	23.9	46.3	39.9	28.6	25.2	40.6	45.5	30.0
Ni	59.5	39.5	31.0	37.8	37.7	49.4	45.1	45.4	30.2	40.0
Cu	48.0	37.4	34.2	42.7	41.4	33.8	25.2	13.5	24.2	34.0
Zn	95.5	96.1	89.7	94.7	80.9	90.7	80.6	80.3	71.0	71.3
Ga	25.0	28.0	26.5	24.6	23.9	23.6	23.3	26.0	21.4	21.5
As	5.75	1.40	2.03	3.79	3.74	2.65	1.13	5.14	2.50	3.04
Rb	63.2	57.2	142.5	95.0	122.5	98.7	92.2	143.5	141.3	153.8
Sr	76.2	139.8	168.5	178.4	166.6	200.0	185.0	276.9	223.0	157.7
Y	7.7	11.7	11.0	15.1	22.0	15.5	14.6	13.2	14.0	31.0
Zr	36.9	31.1	18.6	11.0	23.4	32.3	30.2	21.4	29.8	15.1
Nb	16.6	18.6	17.9	17.0	12.4	12.5	14.7	14.0	13.2	10.7
Mo	0.42	0.28	0.40	0.37	0.42	0.33	0.21	0.08	0.19	0.43
Cd	0.10	0.09	0.08	0.05	0.08	0.11	0.07	0.05	0.07	0.12
Sn	0.74	0.71	1.02	0.94	1.55	1.33	0.58		1.50	1.37
Ba	663.3	369.3	884.4	613.0	847.6	707.7	704.7	691.2	633.1	579.4
Cs	1.87	1.56	2.30	2.27	1.80	1.88	1.60	3.66	3.41	2.80
Ta	0.77	1.18	1.28	1.29	0.79	0.92	0.77	1.12	1.00	1.18
Pb	32.8	18.1	34.2	24.9	22.4	34.5	35.7	24.4	30.0	41.1
Th	16.1	24.0	31.3	20.4	22.8	21.8	27.8	23.1	19.1	21.9
U	1.60	3.59	2.81	2.88	2.72	3.65	2.49	2.98	4.77	3.60
Rare earth elements (ppm)										
La	7.7	31.4	55.2	38.1	44.4	40.6	46.9	52.6	33.8	41.9
Ce	29.3	76.9	118.1	82.7	91.9	94.1	97.4	103.0	73.2	85.0
Pr	3.0	9.9	14.1	10.1	11.1	10.5	11.6	12.2	9.1	10.2
Nd	12.4	37.2	49.4	36.1	39.6	37.0	41.5	42.8	32.9	36.1
Sm	3.14	7.55	9.61	6.92	7.82	6.96	8.15	7.68	6.65	7.41
Eu	0.72	1.28	1.55	1.17	1.34	1.33	1.57	1.59	1.21	1.24
Gd	2.79	6.24	7.07	5.76	6.55	5.65	6.50	6.04	5.41	6.76
Tb	0.42	0.81	0.84	0.81	0.94	0.77	0.86	0.80	0.74	1.10
Dy	2.54	3.81	3.38	4.01	4.96	3.89	3.80	3.65	3.56	6.32
Ho	0.47	0.58	0.43	0.65	0.90	0.64	0.61	0.50	0.53	1.12
Er	1.42	1.47	1.07	1.79	2.47	1.77	1.57	1.26	1.35	3.13
Tm	0.21	0.17	0.11	0.25	0.32	0.24	0.20	0.15	0.17	0.42
Yb	1.43	1.07	0.66	1.46	1.87	1.53	1.22	0.93	1.04	2.60
Lu	0.20	0.16	0.09	0.23	0.26	0.23	0.18	0.13	0.15	0.39

¹ Slightly weathered rock, * Total Fe as Fe₂O₃, ** Loss on Ignition, *** Chemical index of alteration.

Table 3. Whole rock chemistry (major, trace and rare earth elements) of Gn-profile from the granitic gneiss in the Yoogoo area.

Horizon	Soil		Saprolite					Saprock ¹		
Sample No.	Gn50	Gn100	Gn150	Gn200	Gn250	Gn300	Gn350	Gn2-1	Gn2-2	Gn2-3
pH	5.88	6.03	6.24	5.91	6.05	6.32	6.72	7.69	8.36	7.93
SiO ₂	53.08	53.08	62.25	67.78	67.50	68.48	66.54	69.96	70.22	69.87
TiO ₂	1.16	1.11	0.89	0.68	0.56	0.54	0.74	0.47	0.43	0.48
Al ₂ O ₃	20.45	21.74	18.28	15.50	15.71	15.25	15.99	15.75	14.73	14.12
Fe ₂ O ₃ *	10.11	10.70	6.82	6.91	5.90	6.30	6.56	3.23	4.06	4.00
MnO	0.16	0.12	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
MgO	2.45	1.37	2.07	1.26	1.30	1.53	1.55	1.12	1.35	1.23
CaO	0.21	0.12	0.41	0.05	0.09	0.07	0.06	1.53	1.13	1.26
Na ₂ O	0.07	0.05	0.51	0.00	0.03	0.01	2.15	2.10	2.13	2.26
K ₂ O	2.79	2.50	2.57	2.65	2.58	2.55	2.49	3.07	4.24	4.79
P ₂ O ₅	0.09	0.09	0.07	0.17	0.05	0.05	0.07	0.24	0.09	0.21
L.O.I.**	8.97	8.79	5.63	4.93	5.74	4.70	3.77	2.16	1.21	1.61
Total	99.54	99.67	99.54	99.97	99.50	99.51	99.95	99.65	99.61	99.85
CIA***	85.33	87.85	82.58	83.97	83.94	84.00	71.60	62.23	59.2091	55.78
Trace elements (ppm)										
Li	37.5	33.9	26.4	26.2	23.3	22.6	24.1	32.3	21.5	20.4
Sc	18.1	22.2	11.0	10.8	10.5	8.7	10.6	5.3	5.9	6.6
V	108.0	105.3	85.1	91.1	70.4	83.2	80.5	22.7	45.0	28.3
Cr	133.7	113.5	71.9	91.2	66.6	78.7	79.6	24.1	48.2	19.2
Co	61.2	52.4	34.1	38.2	32.9	47.7	38.5	16.5	28.1	23.0
Ni	108.3	92.1	55.1	70.9	66.0	65.3	64.3	36.7	34.6	14.8
Cu	44.0	43.4	42.2	55.6	48.4	38.1	23.4	12.5	26.6	20.2
Zn	121.4	107.7	87.0	84.7	76.7	79.6	93.9	54.5	68.4	60.9
Ga	31.0	31.0	24.2	24.4	22.1	21.6	27.4	20.8	19.2	21.2
As	8.55	10.65	5.90	5.86	2.95	2.73	2.63	1.47	0.72	1.46
Rb	49.4	83.8	119.5	37.7	90.7	69.3	95.4	147.0	147.9	176.0
Sr	92.5	50.3	32.5	14.8	16.1	21.5	49.3	244.6	210.3	184.9
Y	9.4	12.9	78.0	15.9	18.5	9.8	15.0	19.7	15.3	22.5
Zr	251.4	244.2	263.0	32.9	39.5	37.1	30.6	46.9	33.1	23.7
Nb	17.8	19.9	16.9	14.1	11.0	13.1	15.5	13.2	12.1	16.4
Mo	0.33	0.62	0.44	0.31	0.13	0.17	0.11	0.06	0.21	0.10
Cd	0.57	0.43	0.30	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11	0.05	0.04
Sn	2.05	2.31	1.32	1.39	1.20	1.26	0.97	1.93	0.70	1.38
Ba	959.3	650.6	652.1	516.5	678.4	702.1	576.8	1020.2	892.5	1278.6
Cs	0.62	1.96	3.77	2.73	3.82	2.65	2.96	3.35	2.89	2.21
Ta	0.69	0.76	0.88	0.80	0.68	0.95	0.98	1.01	0.88	0.97
Pb	14.1	21.0	44.6	26.4	20.6	24.3	31.4	17.4	35.6	34.3
Th	4.8	12.1	196.3	12.8	25.0	20.7	50.9	21.7	22.2	30.0
U	1.46	2.67	22.37	3.42	3.39	3.91	3.80	2.41	4.46	2.70
Rare earth elements (ppm)										
La	9.9	15.7	140.0	18.4	59.5	19.5	77.1	46.7	42.8	56.1
Ce	17.2	53.4	671.4	40.3	101.2	38.0	180.5	96.8	85.2	119.7
Pr	3.3	4.4	94.6	6.2	14.9	6.5	22.8	11.4	10.0	15.2
Nd	13.7	16.8	342.7	25.5	53.3	25.1	82.3	40.7	35.6	54.7
Sm	3.19	3.57	64.50	5.72	9.47	5.15	15.70	7.42	6.78	10.02
Eu	1.29	1.40	2.77	0.97	1.51	1.01	1.39	1.40	1.42	1.46
Gd	3.51	3.37	20.00	5.33	7.64	4.66	11.21	6.14	5.75	7.88
Tb	0.56	0.57	6.23	0.79	1.02	0.65	1.28	0.91	0.80	1.07
Dy	3.42	3.64	27.57	4.56	4.99	3.70	5.18	4.74	3.87	5.75
Ho	0.67	0.74	3.54	0.87	0.79	0.60	0.67	0.78	0.59	0.91
Er	1.88	2.26	8.12	2.53	2.03	1.57	1.85	2.01	1.55	2.52
Tm	0.29	0.34	0.82	0.35	0.25	0.20	0.22	0.24	0.18	0.31
Yb	1.78	2.22	4.57	2.18	1.63	1.21	1.40	1.21	1.02	1.80
Lu	0.26	0.31	0.66	0.32	0.25	0.18	0.21	0.17	0.15	0.24

¹ Slightly weathered rock, * Total Fe as Fe₂O₃, **Loss on Ignition, *** Chemical index of alteration.

부 층으로 가면서 SiO₂, CaO, Na₂O, K₂O가 감소하는 반면에 Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MgO는 증가하는 경향을 보인다. 일반적으로 풍화작용이 진행되는 동안 지표수 환경에서 Al₂O₃은 불용성으로 비교적 유동성이 작은 것으로 알려져 있지만 본 풍화단면에서는 풍화작용이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 사장석의 용해작용에 이은 할로이사이트의 생성과 흑운모의 질석화작용 및 캐올린화작용에 의해 Al₂O₃가 지하수와 함께 유출되지 않고 점토광물로 시료 내에 남아있어, 다른 원소의 손실에 따라 상대적으로 나타나는 가시적인 증가로 보인다. 이러한 효과는 사장석이 용해되어 캐올리나이트와 깁사이트를 형성하는 풍화과정에서 화학조성이 Al₂O₃-(CaO+Na₂O)-K₂O 삼각그래프의 Al₂O₃ 정점으로 이동하는 Nesbitt and Young (1984)의 연구결과에서 확인된 바 있다.

주 원소의 화학분석 값은 시료의 상대적인 원소구성비를 나타내는 것으로 원소의 함량 변화를 설명하기는 어렵다. 따라서 풍화층에서 원소의 농도변화를 검토하기 위해서는 모암에서의 원소농도와 비교하여 원소의 증감을 표현해야 한다. 모암에 대한 각 층의 원소변화량을 Nesbitt and Young(1982)이 제안한 아래 식을 이용하여 구하였다.

$$\% \text{ change} = [(element/Al_2O_3)_{sample}/(element/Al_2O_3)_{parent} - 1] \times 100$$

여기서 원소는 변화량을 측정하고자 하는 시료와 모암에서의 특정원소 농도이고, Al₂O₃는 시료와 모암에서 상대적인 변화 비율을 나타내는 기준원소이다. 기준원소는 용액에서 유동성이 없는 원소를 대상으로 하는데, 저어콘은 풍화에 대해 안정성이 강하지만 시료에서 분포가 균일하지 않고 그 양이 미량이어서 기준원소로는 적당하지 않았다. TiO₂는 암석에 상대적으로 양이 많고 수용액이나 탄산용액에 잘 녹지 않는 유동성이 적은 원소지만 시료에서 균질도가 떨어져 제외하였다. 지표수에서 용해되지 않아 유동성이 낮은 Al₂O₃를 기준원소로 선택하였다. 시료의 Al₂O₃에 대한 원소의 비를 모암의 Al₂O₃에 대한 원소의 비로 나누어 구한 원소들의 변화량을 풍화진행 정도와 관련하여 Fig.3에 도시하였다. 풍화작용이 진행되면서 모암에 비해 Fe₂O₃는 부화되어 풍화단면의 토양층에서 약 52% 정

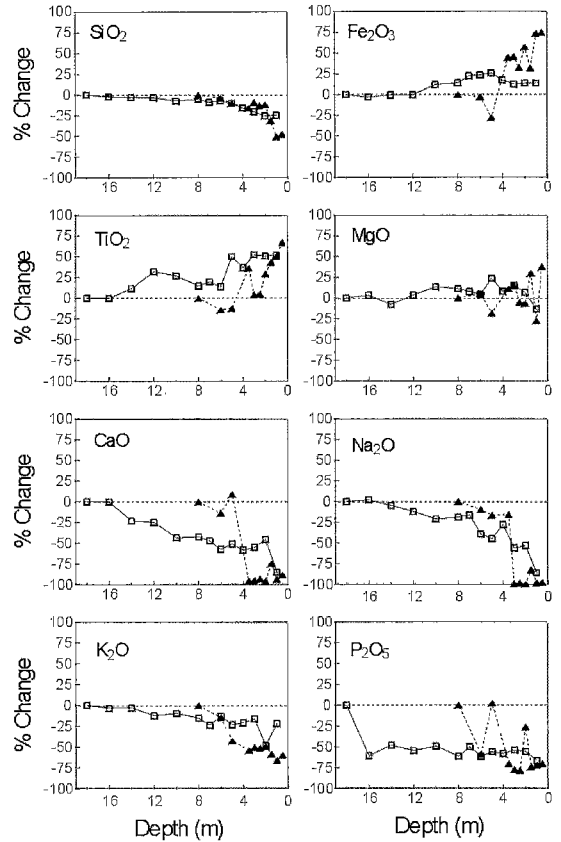


Fig. 3. Percentage change of major elements vs. depth of SG-(□) and Gn-profile (▲) showing progressive weathering toward surface.

도의 증가를 보이며, TiO₂도 지표면에서 약 50% 정도 증가한다. Fe₂O₃와 TiO₂는 지표층으로 가면서 일정한 증가현상을 보이는데, 흑운모의 변질작용시 용탈된 이 원소들은 비교적 유동성이 작아 유출되지 않고 철수산화물(침철석) 및 아나타제를 형성하여 풍화광물 주변에 남아있기 때문이다. MgO는 비교적 유동성이 큰 원소이나 SG-단면에서는 거의 일정하며 소량 부화되어 있고, Gn-단면에서는 변화 폭이 크지만 증가하는 경향을 보인다. 이러한 MgO의 변화경향은 질석의 생성에 기인되며, 상대적으로 질석의 함량이 많은 Gn-단면에서 MgO의 증가현상은 이 사실을 뒷받침하고 있다. 반면에 지표층으로 가면서 CaO, Na₂O, K₂O, SiO₂는 모암에 비해 현저하게 손실되었다. CaO와 Na₂O는 풍화암에서부터 감소현상이 인지되고 있어 이 층에서

이미 사장석의 일부가 용해되는 화학적 풍화작용이 진행되고 있음을 지시한다. Gn-풍화단면의 사프롤라이트 층에서 이미 100% 가까이 손실되었음을 나타내는 것은 풍화단면에서 사장석이 완전히 용해되어 위 원소들이 지하수를 통해 유출되었음을 의미하며, 점토광물에도 흡착되어있지 않았음을 시사한다. CaO와 Na₂O의 감소현상은 거의 모든 풍화연구에서 확인되고 있다. 알칼리성 원소인 K₂O도 손실률이 뚜렷하지만 토양층에서 약 60%의 손실이 있었음을 보여준다. 상대적으로 흑운모의 조성비가 현저하게 감소한 Gn-단면에서 K₂O의 손실률이 더 크게 나타나는 것은 K₂O의 손실이 주로 흑운모의 풍화작용에 기인하고 있음을 시사하고 있다. 용탈된 K의 일부는 일라이트의 층간이온으로 들어있거나 다른 점토광물에 흡착되어 있고, 토양층에서조차 K-장석이 아직 풍화되지 않고 잔류하고있어 Ca와 Na에 비해 상대적으로 손실률이 적다. 풍화단면에서 SiO₂의 손실이 확인되고 있는데, SG-단면의 토양층에서 약 25%의 손실이 있었으나 상대적으로 풍화작용을 심하게 받은 Gn-단면의 토양층에서는 약 50% 감소했음을 알 수 있다. 상대적으로 유동성이 작은 Si는 사장석의 용해작용으로 인해 CaO와 Na₂O가 손실이 나타나는 풍화암에서는 일정하다가 사프롤라이트 층에서 감소경향이 현저해진다. 캐올린광물의 함량이 증가하는 층에서부터 감소하는 경향을 보이는 것은 사장석의 용해작용으로 용탈된 Si가 할로사이트이 형성에 기여하였지만 사장석에 비해 잔류광물에서 Si의 상대적인 몰비가 적기 때문이며, 일부는 지하수와 함께 유출되었음을 시사한다.

SG-단면에서 주 원소의 변화경향이 비교적 일정하고 변화율이 적은 반면에 Gn-단면에서는 사프롤라이트 층을 기준으로 급격하게 변화하며 변화율도 크다. 이것은 Gn-단면에서의 pH가 사프롤라이트 최 하부층을 기준으로 급격하게 변하며 그 상부층은 상대적으로 강한 산성 환경에 놓여있어 화학적 풍화작용이 빠르게 진행된 결과로 모암 광물의 용해 및 변질작용과 2차 광물의 생성이 원소변화에 기인한 것으로 보인다.

풍화지수

풍화단면에서 풍화작용의 진행정도를 측정하

는 방법으로 주원소의 분석결과를 이용하여 화학적인 풍화작용의 정도를 풍화지수로 나타낸다. 가장 일반적으로 사용하는 풍화지수는 유동성이 작은 Al₂O₃에 대한 알칼리 원소의 변화를 나타내는 화학적 풍화지수(chemical index of alteration; CIA)로 (Nesbitt & Young, 1982), 풍화작용이 진행되면서 유동성이 작은 Al₂O₃는 시료에 잔류하고 있는 반면에 알칼리 원소들은 용액에 녹아 쉽게 유실됨으로써 이 풍화지수는 커진다. 즉 이 지수 값이 클수록 풍화작용이 많이 진행되었음을 시사한다.

각 원소의 몰비를 이용한 풍화지수는 아래 식으로 주어진다.

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$$

여기에서 CaO*는 암석 내에서 규산염광물에만 포함된 양으로 탄산염광물과 인회석에 유래된 CaO에 대해서는 보정이 이루어져야 한다. 풍화지수를 계산하는 과정에서 모암과 풍화암에서는 방해석과 인회석이 미량으로 함유되어 있어 무시하였고, 사프롤라이트와 토양층에서는 현미경관찰을 통해 조사된 두 광물의 구성비를 고려하여 CaO값을 보정하여 주었다. 풍화단면 각 층으로부터의 시료에 대한 화학분석 값을 이용하여 구한 풍화지수는 Table 2와 3의 주원소분석 하단에 나타났다. 깊이에 따른 풍화지수는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 모암에서 55이던 것이 풍화가 진행되면서 증가하는 경향을 보이며 토양층에서 88까지 나타낸다. 풍화가 진행되어 토양층으로 가면서 사장석과 흑운모가 용해되거나 변질되어 알칼리성 원소가 손실되고 Al₂O₃의 몰비가 큰 질석 및 캐올린광물이 생성되고 있음을 보여준다. 풍화지수는 지표면으로 가면서 증가하는 전형적인 풍화양상을 보여준다.

미량원소의 거동

암석의 풍화에 따라 주원소의 거동이 모암광물의 변질과 점토광물의 생성과 관련하여 중요한 풍화지수로 활용되지만, 미량원소 또한 풍화현상을 나타내는 여러 가지 요인들과 깊은 관련을 가지면서 거동을 보이고 있어 풍화양상을 설명할 수 있는 중요한 요인이 된다.

미량원소의 거동은 풍화가 진행되면서 pH와

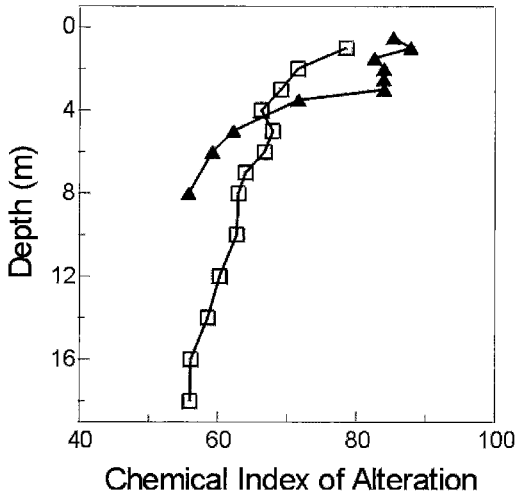


Fig. 4. Correlation between depth and chemical index of alteration in the weathering profiles developed on a granitic gneiss in the Yoogoo area. □=SG-profile, ▲=Gn-profile.

풍화광물의 함량 변화에 따라 3가지의 유형으로 나누어진다. pH가 감소함에 따라 Li, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Nb은 증가율은 다르지만 증가하는 경향을 보이며, Rb, Sr, Y, Cs, Pb, Th, U은 감소한다(Lee, 1999). 이러한 경향은 Sharma and Rajamani(2000)에 의해 보고된 편마암 풍화작용의 미량원소 거동과 일치하지만, 화강암 풍화작용에 의한 미량원소의 거동(Gouveia *et al.*, 1993)과 상반된 결과를 보이고 있어 풍화작용에 따른 미량원소의 거동은 pH의 영향뿐만 아니라 모암의 광물조성 및 생성되는 이차광물의 분포에 영향을 받고있음을 시사하고 있다. 반면에 Zr, Mo, Cd, Sn, Ba은 전 풍화단면에서 거의 일정하여 pH의 변화에 따른 거동을 나타내지 않는다. 즉, 풍화작용에 따른 변화가 거의 일어나지 않았음을 의미한다.

미량원소의 거동은 주 원소의 지배를 받는 경우가 많은데, Ti, Mn을 포함한 모든 전이원소와 Ga 및 As은 Fe의 함량에 비례해서 증가한다. 이러한 경향성은 새로 생성된 철수산화물에 이들 원소들이 Fe를 치환해 들어가거나 표면에 흡착되어 있기 때문이다. Rb과 Sr이 CaO에 비례하여 감소하는 것은 이들 원소가 광물내의 Ca를 치환하고 있어 용해작용 시에 Ca와 함께 용탈되어 지하수에 의해 유출되었음을 의미하며, 풍화작용 시에 주로 용해된 광물은 사장석

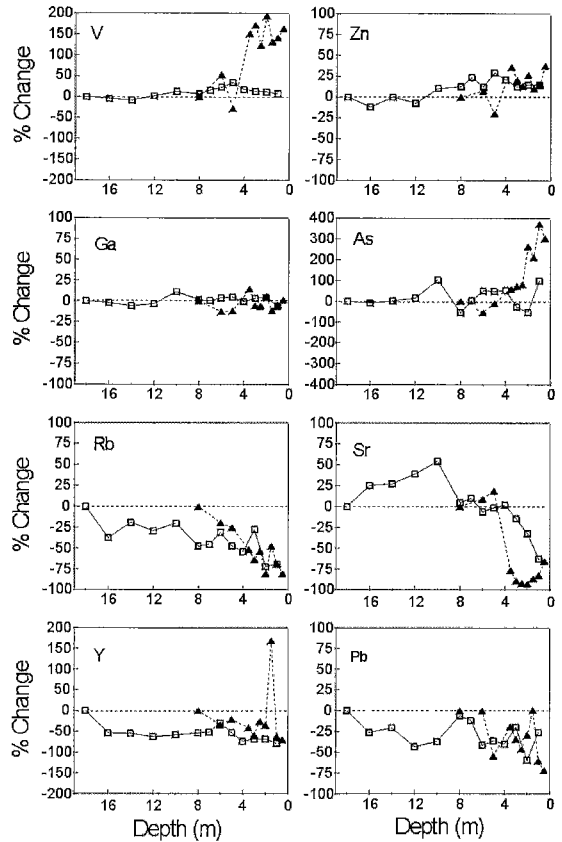


Fig. 5. The percentage change of trace elements vs. depth in the SG-(□) and Gn-profile (▲) showing progressive weathering toward surface.

이다.

미량원소의 Al_2O_3 에 대한 상대적인 변화량을 보면 Li과 모든 전이원소 그리고 As은 전 풍화단면에 걸쳐 부화되고 있지만 Ga, Nb, Zr은 변화없이 일정한 경향을 보인다(Fig. 5). 반면에 Rb, Y, Ba, Ta, Pb는 지표층으로 가면서 일정한 비율로 손실이 일어난다. 이러한 원소들은 모암 광물의 용해시 용탈되어 지하수를 따라 외부로 유출되었음을 시사한다. Sr은 풍화암에서 부화되었다가 사프롤라이트층으로 가면서 감소하는데 광물의 용해작용에 의해 용탈된 Sr은 외부로 유출되지 않고 하부층으로 침투하는 지하수와 함께 이동하여 풍화암에 부화된 것으로 보인다. Th과 U은 토양 층에서 손실이 있으나 그 아래 상부 사프롤라이트에서 부화되어 있는 것으로 봐서 산성용액에서 용해되어 하부층으로 이동

하여 집적된 결과로 보인다. Mo, Cd, Sn은 Gn-단면에서는 부화되지만 SG-단면에서는 손실이 일어나 정확한 거동을 논하기는 어렵다.

희토류원소의 변화

풍화작용의 진행에 따른 희토류원소들의 변화는 풍화 초, 중기에 증가하다 말기에 감소하는 경향을 보인다. 풍화단면의 각 층 시료들을 콘드라이트(chondrite)에 대한 상대적인 분포 패턴이 일정하지 않고 수평으로 변하고 있는 것으로 보아(Fig. 6) 풍화작용에 의한 분화작용이 일어났음을 지시하며 광물의 조성비에 심각한 변화가 있음을 시사한다(Sharma and Rajamani, 2000).

희토류원소들의 Al_2O_3 에 대한 상대적인 변화를 보면 La 및 Ce과 같은 경희토류원소(Light Rare Earth Element: LREE)는 풍화초기에 증가하다 중부 사프롤라이트에서 감소하며 상부 사

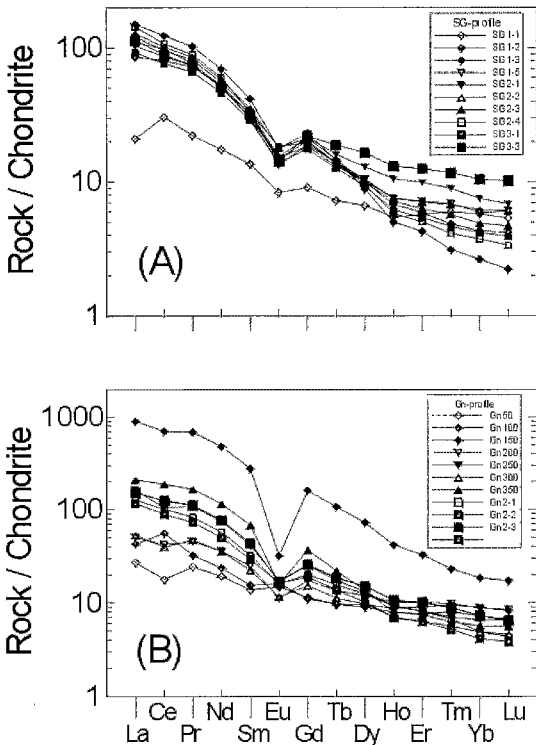


Fig. 6. Chondrite-normalized REE patterns of weathering profiles developed on the granitic gneiss in the Yoogoo area. (A) SG-profile; (B) Gn-profile.

프롤라이트에서 다시 증가하다 토양층에서 감소하는 M자 모양의 변화경향을 보인다(Fig. 7). 그러나 Yb와 Lu과 같은 중희토류원소(Heavy Rare Earth Element; HREE)는 풍화초기에 감소하다 중부 사프롤라이트에서 증가, 다시 상부 사프롤라이트에서 감소하다 토양층에서 증가하는 W자 모양의 변화경향을 나타낸다. LREE와 HREE는 풍화단면상에서 정반대의 분포양상을 나타내고 있다. 중간의 REE들은 두 변화의 중간양상을 보이는데, 변화 정도는 다르지만 Dy까지는 La과 같은 변화를 보이고 Ho 부터는 Lu와 같은 양상을 보인다. 이러한 경향성은 모암 광물의 풍화작용으로 용탈된 희토류원소들이 지하수가 중성인 층에서 집적되고, 특히 경희토류 원소들은 점토광물에 흡착되어 부화되나(Nesbitt *et al.*, 1990), 중희토류원소들은 용해성 화합물로 형성되어 제거된다(Gouveia *et al.*, 1993). 풍화작용을 보다 심하게 받은 지표 층에서는 토양수가 산성이 되어 대부분의 희토류 원소들이 하부층으로 이동하여 손실되었으며, 경희토류 원소들은 상대적으로 유동성이 커져 손실물이 더 커진다. 따라서 풍화단면에서의 희토류원소의 거동은 지하수의 pH와 관련된 것으로 보인다. 즉, 토양층에는 점토광물과 다량의 유기물을 함유하고 있으며, 유기물질이 많은 토양층을 통해 침투된 물은 CO_2 를 증가하여 pH를 감소시킨다. 유기산은 이 지표수에 용해되어 특별히 부식성이 강한 토양수를 만든다. 토양층의 주구성 점토광물인 할로이사이트는 낮은 pH의 물

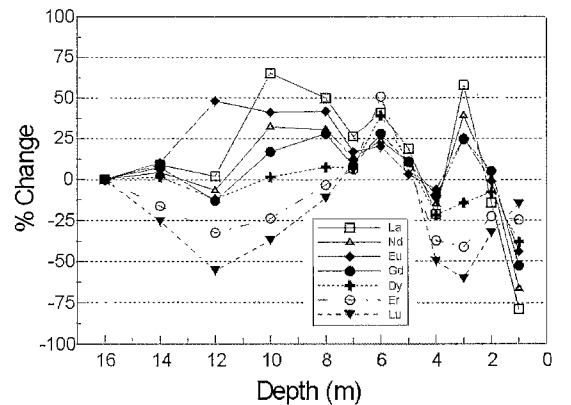


Fig. 7. Percentage change of REEs vs. depth of SG-profile at the Yoogoo granitic gneiss showing progressive weathering toward surface.

을 중화시키지 못해 이 산성수는 토양층 아래로 침투하면서 용해성 있는 원소를 제거한다. 제거된 원소들은 탄산염이나 수산화 복합물 또는 자유이온으로 이동된다. 이 산성용액의 일부가 보다 하부층으로 침투하여 사장석, 흑운모 또는 다른 광물들을 변질시키며 점토광물을 만들고 동시에 초기의 산성용액의 pH를 증가시킨다. 용액이 염기성이 되면 상대적으로 용해성이 낮은 REE들은 수산화물 또는 탄산염광물로 침전되거나 광물의 표면에 흡착된다, 즉 산성용액에 의해 REE가 용탈되어 운반됨으로써 토양층에서는 감소하나 그 하부에서 물-암석 반응이 일어나고 있는 변질대에서 pH가 증가하여 부화된다(Nesbitt, 1979).

결 론

공주군 유구면 일대의 화강암질 편마암은 pH 6 내외의 산성환경 하에서 심한 풍화작용을 받아 할로이사이트, 케올리나이트, 질석, 스�멕타이트, 깃사이트, 침철석 및 아나타제와 같은 이차광물의 생성과 더불어 심각한 화학조성의 변화를 초래했다. 주원소의 화학조성을 이용한 풍화지수는 토양층에서 79~88로 모암 중의 사장석이 용해되고 흑운모가 변질되어 케올린광물의 생성이 활발한 방향으로 풍화작용이 진행되었다. 지표층으로 가면서 Al_2O_3 에 대한 주 원소의 거동은 Si, Ca, Na, K, P가 감소하고 Fe, Ti, Mn이 증가하는 경향을 보이며, pH가 낮은 풍화단면에서 주 원소의 변화량이 더 크다. 이 풍화대에서 Mg은 거의 일정하다. Li 및 As과 모든 전이원소는 pH가 감소함에 따라 증가하며, 특히 이들 원소는 Fe의 함량과 비례해서 증가해 침철석과 공침하였거나 표면에 흡착되어 있는 것으로 보인다. Ga은 Fe와 비례하기는 하지만 변화량은 전 풍화단면에서 일정하다. Zr, Mo, Sn, Cd은 pH에 변화에 상관없이 일정한 반면에 Rb, Sr, Ba, Y, Pb, Th, U 등은 감소하는 경향을 보인다. 특히 Rb과 Sr은 Ca에 비례해서 감소하며 이것은 모암광물 내에서 후자의 원소를 치환하고 있다가 용해되면서 같이 용탈되어 지하수로 유출된 결과이다. 희토류원소는 전 풍화단면에서 감소하는 경향을 보이는데, Al_2O_3 에 대한 상대적인 변화량을 보면 경희토류원소는 사프롤라이트 하부와 상부에서 부화

되어있고 중부 사프롤라이트와 토양층에서 감소하는 반면에 중희토류원소는 사프롤라이트 하부와 상부에서 감소하고 중부 사프롤라이트 및 토양층에서 부화되는 경향을 보인다. 전반적으로 희토류원소의 원자번호가 클수록 손실율이 커진다. 이 풍화단면에서 원소의 거동은 각 풍화층의 pH와 생성된 이차광물의 조성에 지배를 받았다.

사 사

원소분석에 애써주신 한국기초과학지원연구원 최만식 박사, 신형선 박사과 박찬수 박사께 감사드립니다. 이 논문을 세심하게 읽고 교열해주신 부산대학교 황진연 교수님과 익명의 심사위원님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김수진, 이민성, 김원사, 이수재 (1994) 서울지역의 자연환경 변화에 관한 연구: 남산 화강암의 풍화에 관한 환경 광물학적 연구. 대한지질학회지, 30, 284-296.
- 문희수, 송윤구, 신상은 (1993) 질석화가 진행된 풍화단면에서의 광물조성과 주원소의 변화. 자원환경지질학회지, 26, 29-40.
- 이석훈, 김수진 (2000) 유구지역 화강암질 편마암의 풍화작용에 의한 광물조성의 변화. 한국광물학회지, 13, 121-137.
- Chesworth, W., Dejou, J., and Larroque, P. (1981) The weathering of basalts and relative mobilities of the major elements at Belbex, France. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, 1235-1243.
- Drever, J. I., and Zobrist, J. (1992) Chemical weathering of silicate rocks as a function of elevation in the southern Swiss Alps. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, 3209-3216.
- Eggleton, R. A. (1987) Weathering of Basalt: Changes in rock chemistry and mineralogy. *Clays Clay Miner.*, 35, 161-169.
- Fritz, P. C., and Regland, P. C. (1980) Weathering rinds developed on plutonic rocks in the North Carolina Piedmont. *Amer. Jour. Sci.*, 280, 546-559.
- Gilkes, R. H., and Suddhiprakarn, A. (1979) Biotite alteration in deeply weathered granite. I. Morphological, mineralogical, and chemical properties. *Clays Clay Miner.*, 27, 349-360.
- Gouveia, M. A., Prudencio, M. I., Figueiredo, M. O., Pereira, L. C. J., Waerenborgh, J. C., Morgado, I., Pena T., and Lopes A. (1993) Behavior of REE

- and other trace element and major elements during weathering of granitic rocks, Evora, Portugal. *Chem. Geol.*, 107, 293-296.
- Harris, W. G., Zelazny, L. W., Baker, J. C., and Martens, D. C. (1985) Biotite kaolinization in Virginia Piedmont soils: I. Extent, profile trends, and grain morphological effect. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 49, 1290-1297.
- Lee, S. H. (1999) Electron microscopic study on the weathering of the granitic gneiss in the Yoogoo area. Korea. Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- Nesbitt, H. W. (1979) Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a 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 lutites. *Nature*, 299, 715-717.
- Nesbitt, H. W., and Young, G. M. (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on the thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1523-1534.
- Nesbitt, N. W., MacRae, N. D., and Kronberg, B. I. (1990) Amazon deep-sea fan mud: Light REE enriched products of extreme chemical weathering. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100, 118-123.
- Schroeder, P. A., Melear, N. D., West, L. T., and Hamilton, D. A. (2000) Meta-gabbro weathering in the Georgia Piedmont, USA: implications for global silicate weathering rates. *Chem. Geol.*, 163, 235-245.
- Sharma, A., and Rajamani, V. (2000) Weathering of gneissic rocks in the upper reaches of Cauvery river, South India: implications to neotectonics of the region. *Chem. Geol.*, 166, 203-223.
- Tevelde, S., Horgensen, P., and Stuanes, A. O. (1990) Long-term weathering of silicates in a sandy soil at nordmoen, Southern Norway. *Clay Miner.*, 25, 447-465.
-
- 2001년 2월 27일 원고접수, 2001년 3월 11일 게재승인.