

안동화강암의 풍화단면에서 산출되는 산화흑운모

Oxidized Biotite in the Weathering Profile of Andong Granite

정 기 영 (Gi Young Jeong) · 김 혜 빈 (Hye Bin Kim)

안동대학교 지구환경과학과

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

요약: 안동화강암에 발달한 풍화단면에서 발견되는 흑운모 및 그 풍화산물을 대상으로 X-선회절분석, 화학분석, 전자현미경 관찰 등의 광물학적 분석을 실시하였다. 그 결과, 이 지역의 흑운모는 풍화과정에서 별개의 질석이나 흑운모-질석 규칙혼합층 구조로 변질되지 않고 10 Å의 회절선을 보이는 산화흑운모로 풍화되었다. Fe의 산화로 발생하는 과잉 양전하는 사면체 자리의 양이온 점유율의 변화는 없이 팔면체자리로부터 16%의 Fe와 12%의 Mg, 그리고 층간에서 13%의 K가 제거되는 방식으로 해소되었다. 동시에 흑운모의 5%는 산화흑운모와 불규칙혼합층을 이루는 질석으로 변환되었다. 흑운모 풍화초기에 Fe의 산화로 야기된 약간의 화학조성 및 구조적 변화의 결과로 생성된 산화흑운모는 대부분의 풍화 구간에서 더 이상 질석으로 풍화되지 않고 안정한 상태를 유지하다가 상부에서 부분적으로 캐올리나이트로 분해된다. 흑운모가 풍부한 기반암의 지표환경에서 원소거동을 이해하기 위해서는 신선한 흑운모가 아닌 풍화저항도가 매우 큰 산화흑운모에 대한 생성원인과 용해실험이 요청된다.

주요어: 흑운모, 풍화, 화강암, 산화

ABSTRACT: Biotite and its weathering products in the weathering profile of Andong granite were examined using X-ray diffraction, chemical analysis, and electron microscopy. Major weathering product of biotite was oxidized biotite, which is decomposed into kaolinite in the upper part. Discrete vermiculite or hydrobiotite was not detected although minor vermiculite (5%) was randomly interstratified with oxidized biotite. Excess positive charge induced by iron oxidation was balanced by release of Fe (16%) and Mg (12%) from octahedral site and K (13%) from interlayer site. After slight chemical and structural modification induced by iron oxidation, oxidized biotite persists through the weathering profiles with partial decomposition in the upper part of the profile. *Formation environments and dissolution experiments of oxidized biotite highly resistant to weathering are required to understand the elemental behavior in the surface environments on the biotite-bearing bedrocks.*

Key words: biotite, weathering, granite, oxidation

서 언

화강암질 암석들의 주요 조암광물인 흑운모는 복잡한 화학조성과 구조를 갖고 있어서 풍화 과정에서 K, Mg 등의 식물과 미생물의 필수 영양소가 방출되고, 질석이나 혼합층상 광물과 같은 높은 양이온교환능을 갖는 이차광물이 생성된다. 따라서 흑운모의 풍화는 원소의 지화학적 순환에 매우 중요한 역할을 한다. 우리나라의 흑운모 풍화에 관한 최근의 연구들에서는 송윤구(1995)가 염기성암 풍화 연구에서 흑운모의 흑운모-질석 혼합층화 과정을 기재한 바 있으며, 정기영 외(1995)는 회장암내 흑운모 풍화 과정 연구에서 질석화 과정을, 정기영(1998)과 Jeong (2000)은 팔공산 화강암내 흑운모의 풍화 과정 연구에서 흑운모-질석혼합층화 과정을 기재한 바 있다. 외국에서는 흑운모의 풍화에 관한 많은 연구들이 이미 오랫동안 수행되어 왔다. 기존의 연구결과를 종합해보면, 흑운모는 다음과 같은 매우 다양한 풍화 경로를 보여 주고 있다: 1) 흑운모 → 흑운모-질석혼합층 → 고령토 광물(Jackson, *et al.*, 1952, 송윤구, 1995), 2) 흑운모 → 질석 → 고령토 광물(Barshad, 1948; Jackson, *et al.*, 1952, 정기영, 1998), 3) 흑운모 → 흑운모-질석혼합층 → 질석 → 고령토 광물(정기영, 1998), 4) 흑운모 → 산화흑운모 → 고령토 광물(Hariss, 1985a, 1985b; Rebertus *et al.*, 1986; Murphy *et al.*, 1998; Dong *et al.*, 1998). 흑운모의 다양한 풍화 경로와 풍화 산물은 흑운모의 풍화작용이 토양용액 및 수계의 원소조성에 미치는 영향이 상이할 수 있음을 의미한다. K의 거동을 예로들면, 흑운모가 곧바로 질석으로 풍화될 경우에는 다량의 K가 풍화단면 하부에서 지하수로 유리될 것이며, 그 반대로 산화흑운모로 풍화될 경우에는 K가 풍화단면 최상부 토양층에서 서서히 용출될 수 있을 것이다. 따라서 최근 활발히 연구되고 있는 지표 환경에서의 원소 수지 균형(Velbel, 1985; Drever, 1988; White *et al.*, 1998; Murphy *et al.*, 1998) 해석과 원소순환의 모델 정립에 있어서 흑운모의 다양한 풍화 경로가 고려되어야 한다. 흑운모의 풍화작용에 대한 많은 기존 연구가 있지만 산화흑운모를 거쳐서 풍화되는 과정에 대한 연구는 드문 편이다. 산화흑운모(oxidized biotite)는 Fe가 모두 산화되었고 팽윤성이 없는

풍화된 흑운모를 본 연구에서 임시로 명명한 용어이다. 흑운모의 다양한 풍화경로와 그 원인을 연구하는 과정에서, 안동화강암체의 풍화단면에서 산화흑운모가 흔히 발견되어 그 광물학적 특성을 밝히고자 한다.

시료 및 분석방법

연구된 화강암 풍화단면은 안동시 녹전면의 도로변 석산의 수직 절개지에 노출되어 있다 (Fig. 1). 이 안동 화강암은 조립질로서 주구성 광물은 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모, 각섬석 등이며, 부성분광물은 인회석, 저콘, 티탄철석, 녹염석, 티타나이트, 견운모 등이다. 신선한 모암에서 토양층까지 약 9 m의 구간에서 1~3 kg씩의 풍화물 시료를 6개 채취하였다.

원암 시료의 일부는 200 mesh 이하로 미분쇄하여 전암단위로 화학분석을 실시하였고, 일부는 1 mm 내외의 입자로 조분쇄한 후 자석과 편셋을 이용하여 흑운모를 분리하였다. XRD 분석용 흑운모 시료는 아세톤과 함께 아게이트 몰타르에서 잘게 분쇄한 후, 정방위 시료는 분말시료들의 현탁액을 유리슬라이드에 떨어뜨린 후 건조시켜 제작하였고, 부정방위시료는 알루미늄 홀더에 채워 넣어 준비하였다. XRD 분석은 회절법 단색화장치와 Cu X-선관이 부착된 Rigaku D/MAX2200 모델의 XRD 기기를 이용하였다. 가속전압과 전류는 각각 40 kV와 30 mA이었고, 발산슬릿(divergent slit)과 반산란슬릿(antiscatter slit)은 1°, 그리고 수광슬릿(receiving slit)은 0.15 mm를 사용하였다. 정방위 시료는 0°~50° 범위에서 2°/min의 속도로, (060) 회절선을 관찰하기 위한 부정방위시료는 58°~64.4° 범위에서 0.5/min 속도로 주사되었다. 조직관찰과 전자현미분석을 위하여 원시료의 연마박편을 제작하였다. 원시료를 진공하에서 에폭시를 주입시켜 상온에서 건조시킨 후 다시 건조기에 넣고 60°C에서 충분히 경화시켜 알루미늄 분말로 연마하였다. 연마박편은 흑운모의 변질 조직을 관찰하기 위하여 에너지 분산 X-선 분석기(Oxford Energy Dispersive spectrometer; EDS)가 부착된 JEOL JSM6300 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)으로 관찰하였고, 대전의 한국기초과학지원연구원의 Cameca SX51 전자현미분석기로 흑운모

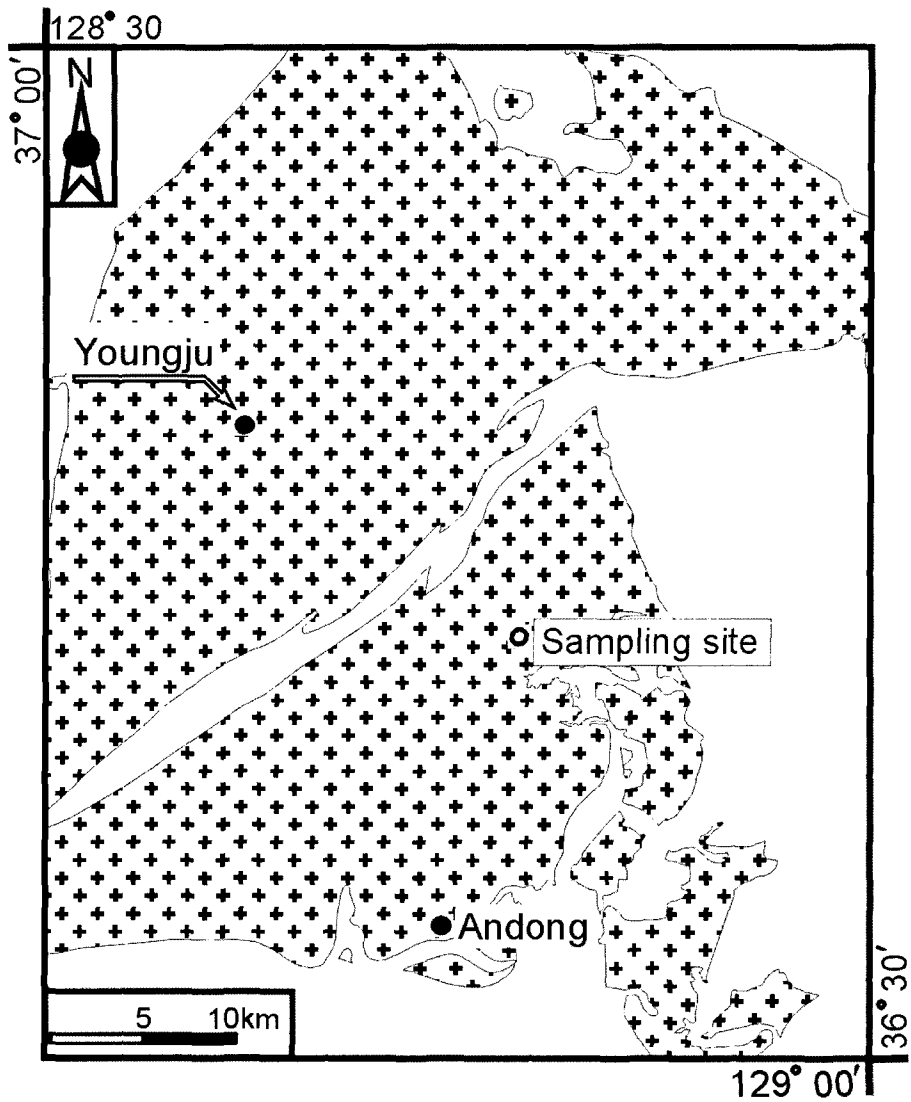


Fig. 1. Location of the granite weathering profile investigated in this study. Granite batholiths are outcropped in the areas filled by cross symbols.

및 풍화된 흑운모의 화학조성을 분석하였다. 화강암 풍화물의 전암단위의 화학분석은 서울 한국기초과학지원연구원의 X선형광분석기(X-ray fluorescence, XRF)로 실시하였다. 분리된 흑운모 및 그 풍화물의 Fe^{3+}/Fe^{2+} 비율은 150 mg의 시료를 설탕과 혼합하여 아세톤하에서 분말화한 후 피스바우어 분광법으로 분석하였다. 또한 약 20 mg의 흑운모 및 그 풍화물의 분말시료를 준비하여 상온에서 1000°C의 범위에서 10°C/min의 승온률로 DSC-TG 열분석을 실시하였다.

전암단위 시료분석

Table 1은 화강암 및 그 풍화산물들의 전암단위의 화학분석자료이다. 풍화단면에서 원소들의 절대함량 변화를 알아보기 위해서는 풍화된 암석의 공극률이 측정되어야 한다. 그러나 실제로 쉽게 부스러지는 풍화물을 대상으로 공극률을 측정하는 것이 매우 어려웠으므로 본 연구에서는 공극을 제외한 고체상만을 대상으로 모암 내의 함량과 비교한 상대함량 변화를 계산

Table 1. Whole-rock chemical composition of granite and its weathering products

Samples	9511	9512	9513	9514	9515	9516
Depth (m)*	-8.90	-5.80	-3.80	-1.90	-1.00	-0.30
SiO ₂	69.92	70.40	69.38	68.38	70.50	67.93
Al ₂ O ₃	15.87	15.71	16.13	16.75	15.57	16.85
Fe ₂ O ₃	2.49	2.50	2.47	2.56	2.45	2.84
MgO	0.61	0.54	0.52	0.54	0.51	0.61
TiO ₂	0.35	0.36	0.35	0.37	0.34	0.40
MnO	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04
P ₂ O ₅	0.04	0.10	0.13	0.12	0.12	0.12
CaO	2.69	2.59	2.51	2.53	2.29	1.87
Na ₂ O	3.85	3.71	3.76	3.83	3.31	2.98
K ₂ O	3.13	2.94	3.44	3.58	2.95	3.14
LOI**	0.53	0.88	1.04	1.07	1.50	2.82
TOTAL	99.51	99.76	99.77	99.77	99.57	99.60
W.I.P.***	0	4	4	3	14	26

* Depth from surface, ** Loss on ignition.

*** Weathering index of plagioclase: $\{(CaO+Na_2O)_{fresh\ rock} - (CaO+Na_2O)_{sample}\} \times 100 / (CaO+Na_2O)_{fresh\ rock}$

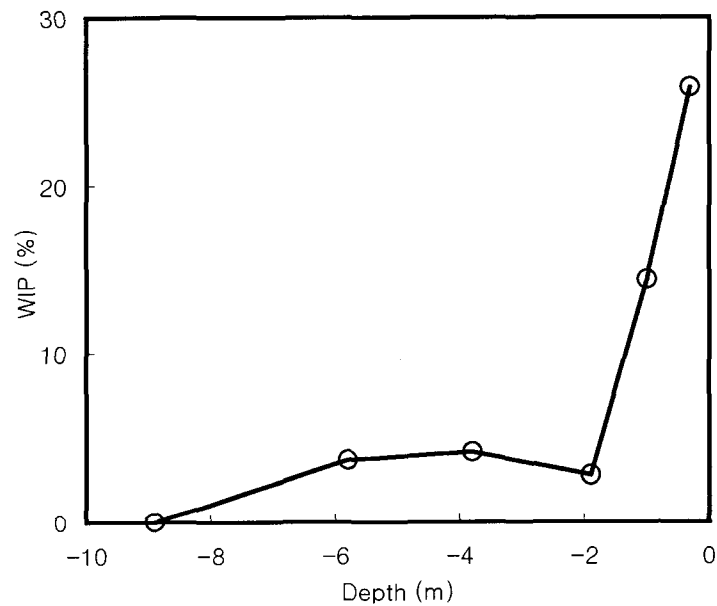


Fig. 2. Plot of weathering index of plagioclase (WIP) vs. sample depth from surface.

하여 원소들의 거동을 알아보았다. 본 풍화단면의 연구에 의하면, 가장 심하게 분해되는 광물은 사장석이며 석영이나 K-장석은 거의 풍화되지 않는 것으로 관찰되었다. 따라서 사장석의 주성분인 CaO와 Na₂O의 상대적인 함량변화는 화강암 풍화도의 좋은 지시자가 될 수 있다. 그

래서 CaO와 Na₂O의 합의 변화량을 다음과 같이 계산하여 사장석 풍화지수(Weathering Index of Plagioclase, WIP)로 정의하고 전체 화강암 풍화도의 지시자로 사용하였다: $WIP = \{(CaO + Na_2O)_{fresh\ rock} - (CaO + Na_2O)_{sample}\} \times 100 / (CaO + Na_2O)_{fresh\ rock}$.

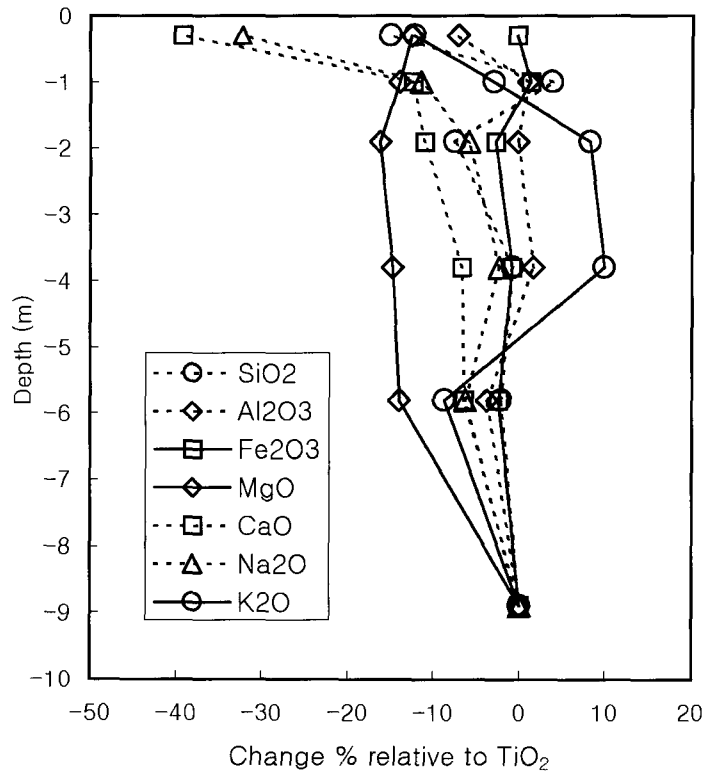


Fig. 3. Changes of oxides relative to TiO₂ as an immobile component in the weathering profile.

Fig. 2의 시료 깊이에 따른 WIP의 변화를 보면 전체 9 m 정도의 풍화구간 중에서 하부 7 m 정도의 구간에서는 전구간에 걸쳐서 10% 이내의 일정한 풍화도를 보이고 있으며, 최상부 2 m 정도의 구간에서 풍화도가 급속히 증가하여 30% 내외의 풍화도를 보이고 있다. Fig. 3은 TiO₂에 대한 각 성분들의 상대적인 변화를 보여주고 있다. MgO의 양이 14~16% 정도로 가장 크게 감소하였고, CaO와 Na₂O의 양은 각각 6~11%, 2~6% 정도로 약간 감소하였으며, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂의 양은 거의 변화가 없다. 그런데 K₂O의 함량은 초기에 9% 정도로 감소하였다가 다시 10% 정도로 증가하는 특이한 경향을 보이고 있는데, 이는 원암 조성 자체의 변화이거나 상대적으로 풍화에 강한 K장석의 부화를 반영하는 것으로 보여진다. 최상부 2 m 구간에서 사장석의 급격한 풍화로 인한 CaO와 Na₂O의 감소가 가장 뚜렷하며, 그의 성분들에서는 뚜렷한 감소가 관찰되지 않는다.

풍화 흑운모의 광물학적 분석

X-선회절분석

Fig. 4는 풍화단면내의 흑운모 및 그 풍화물 시료의 XRD 양상이다. 신선한 시료인 9511의 경우 미량의 녹니석이 함유되어 있을 뿐 대부분 흑운모로 구성되어 있다. 나머지 풍화물시료(9512-9516)에서는 풍화도가 증가함에 따라 캐올리나이트 회절선의 강도가 서서히 증가하고 9516에서는 강도는 약하지만 12 Å의 흑운모-질석 혼합층상구조의 회절선도 관찰된다. 그러나 전체적으로 볼 때 10 Å 근처의 (001) 회절선을 보이는 흑운모 외의 다른 구성광물의 함량은 매우 적음을 알 수 있다.

풍화도가 높아짐에 따라 10 Å 회절선의 높이는 낮아지고, 폭(Full Width at Half Maximum, FWHM)은 넓어진다. 우선 FWHM의 변화를 보면 신선한 흑운모(9511, -8.9 m)의 0.18°에서

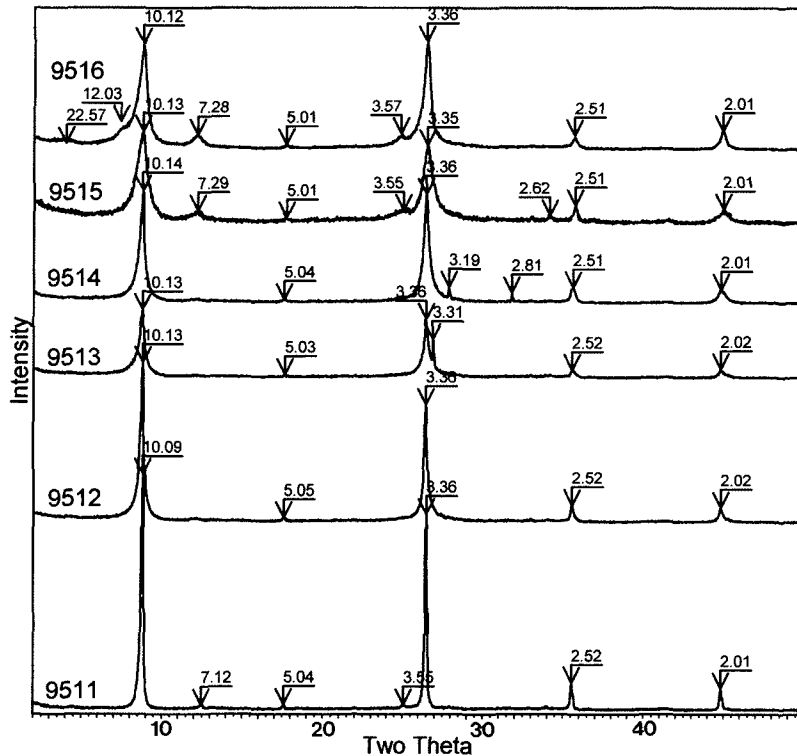


Fig. 4. XRD patterns of fresh biotite (9511) and its weathering products (9512-9516). Oriented mounts. CuK α radiation.

-1.9 m 깊이의 풍화된 흑운모(9514)의 0.4° 로 비교적 완만하게 증가하였으며, 그 보다 얇은 심도에서는 0.8° 정도로 빠르게 증가하였다. 회절선폭의 변화와 함께 회절선의 위치도 풍화가 진행됨에 따라 약간씩 이동되고 있다. d_{001} 은 9511(-8.9 m)의 10.09 Å에서 9516(-0.3 m)의 10.12 Å으로 약간 증가하였다. 이와 같은 회절선의 FWHM과 위치의 변화는 풍화가 진행됨에 따라 흑운모 구조에 변화가 일어나고 있음을 의미한다. FWHM과 d_{001} 의 증가는 흑운모 일부의 질석화 작용과 관련지을 수 있다. 이의 확인을 위하여 열분석과 회절패턴의 모델링을 실시하였다. 시료 9515의 550°C까지의 단계별 가열 실험 결과, d 값은 10.03 Å으로 감소하였고 회절선의 FWHM은 줄고 높이는 증가하여 약간의 팽윤성 층이 함유되어 있음을 알 수 있다 (Fig. 5). 그리고 550°C에서 사라지는 7.3 Å 회절선으로부터 캐올리나이트의 존재를 확인할 수 있다. 흑운모 풍화의 결과로 생성되는 미량의 팽

윤성 층은 DSC 곡선에서 200°C 이하에서 나타나는 2개의 흡열피크와 600°C와 700°C 사이 1개의 흡열피크로부터 질석으로 해석되고, 400°C와 500°C 사이의 1개의 흡열피크는 캐올리나이트의 탈수피크로 해석된다(Fig. 6). NEW-MOD를 이용한 시료 9515 XRD 패턴 모델링결과 약 5%의 질석이 흑운모와 불규칙혼합층상을 이루는 것으로 해석되었다(Fig. 7). 흑운모 단위포의 b_0 를 반영하는 d_{060} 값은 9511(-8.9 m)의 1.541 Å에서 9513(-3.8 m)의 1.533 Å으로 풍화초기에 급격히 감소한 이후, 1.533~1.534 Å 사이의 비교적 일정한 값을 유지한다(Fig. 8).

주사전자현미경관찰

박편의 SEM 관찰을 실시하여 풍화에 따른 흑운모의 미조직 변화를 관찰하였다(Fig. 9). 풍화되지 않은 9511의 흑운모는 치밀한 조직을 보여주며 조사이트 등의 광물들이 미량 포획

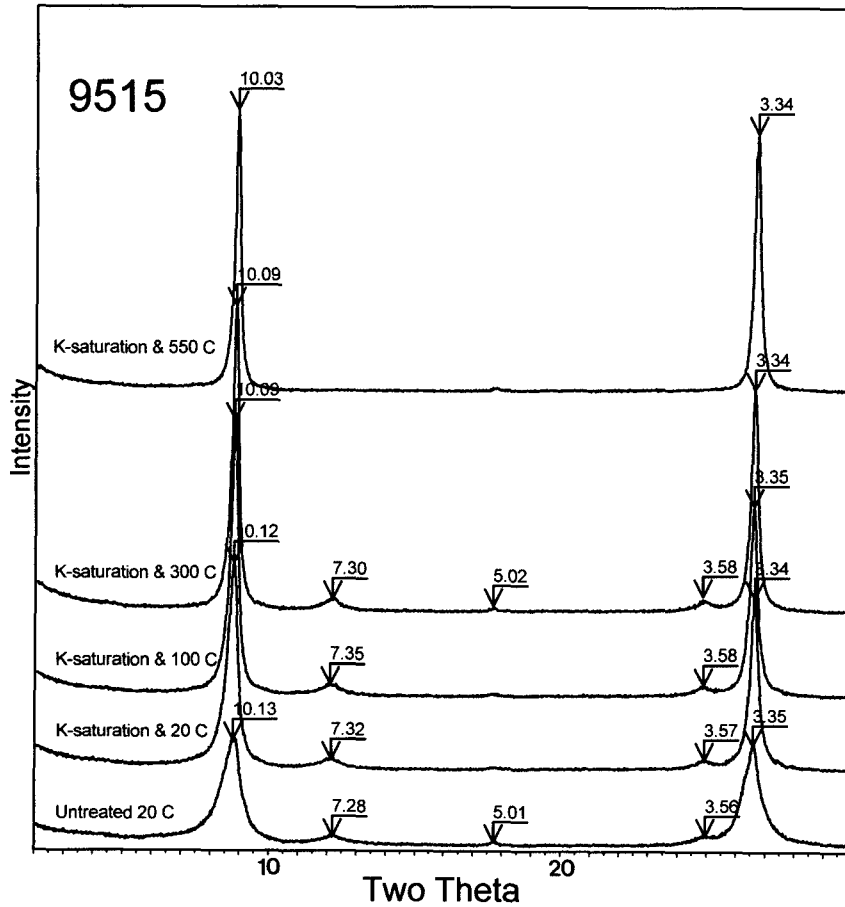


Fig. 5. XRD patterns of weathered biotite 9515 treated with heat. Oriented mounts. CuK α radiation.

되어 있다(Fig. 9a). 약간 풍화된 9513의 흑운모는 입자 가장자리를 따라 엽편들이 부채모양으로 갈라지며 캐올리나이트로 변질되고 있다(Fig. 9b). 심하게 풍화된 9516의 흑운모는 c축에 수직방향으로 크게 팽창되어 있으며 심한 캐올리나이트화 작용을 받고 있다(Fig. 9c).

되스바우어분광분석

되스바우어분광분석에 의하면 신선한 흑운모(9511)의 경우 Fe^{3+} 의 비율이 19%이나 풍화단면 하부로부터 급격히 산화가 진행되어 9512에서는 이미 66%가 산화된 상태이고 9513에서는 82%로 이미 대부분 산화되었고 9516에서는 완전히 산화되었음을 볼 수 있다(Fig. 10).

전자현미분석 (EPMA)

풍화단면내 흑운모의 EPMA 분석자료로부터 44 음전하당 양이온수를 계산한 후, x 좌표를 K로 하여 다른 양이온의 개수를 도시하면 Fig. 11 같다. Fig. 11에서 볼 수 있는 가장 큰 변화는 흑운모의 화학조성이 풍화초기에 불연속적으로 변한다는 사실이다. Fig. 11에서 K가 1.72보다 큰 분석점들은 Si, Al, Fe, Mg, Ti의 양이온수에서 변화가 없으나, K가 1.72에서 1.64로 감소하면서 갑작스런 Si의 증가와 Fe 및 Mg의 감소가 있으며, Al과 Ti의 양이온수에는 큰 변화가 없다. 1.64보다 작은 분석점들은 1.47 정도까지 다시 Si, Al, Fe, Mg, Ti의 양이온수가 일정한 값을 유지하며, 1.47보다 작은 분석점들은

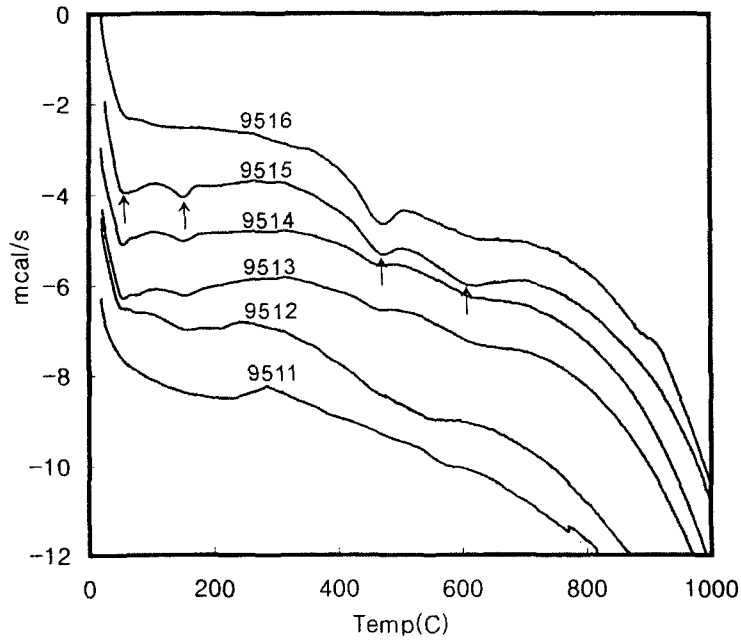


Fig. 6. DSC curves of fresh biotite (9511) and its weathering products (9512-9516).

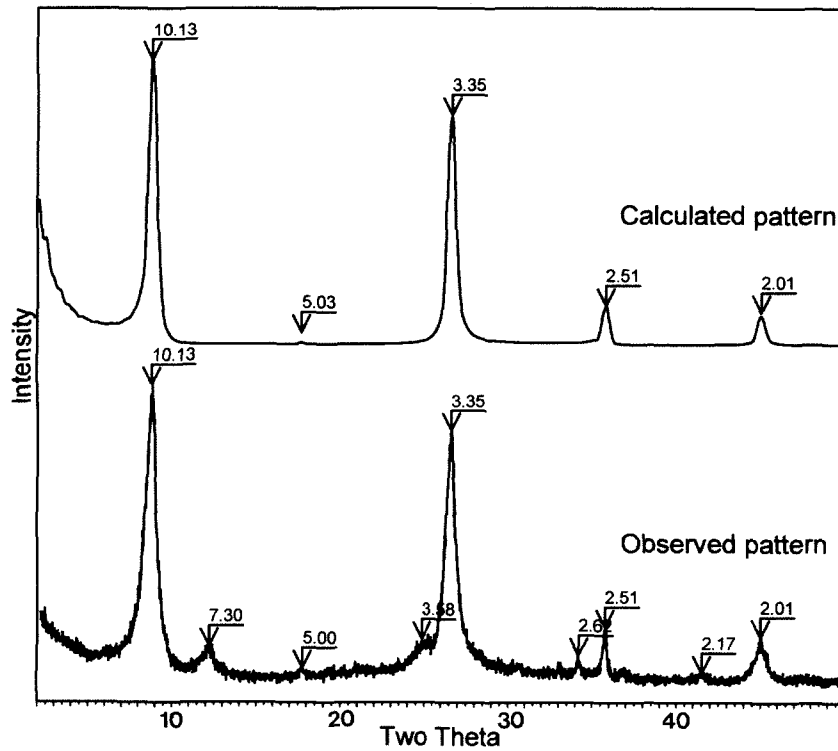


Fig. 7. Observed and calculated XRD patterns of weathered biotite 9515.

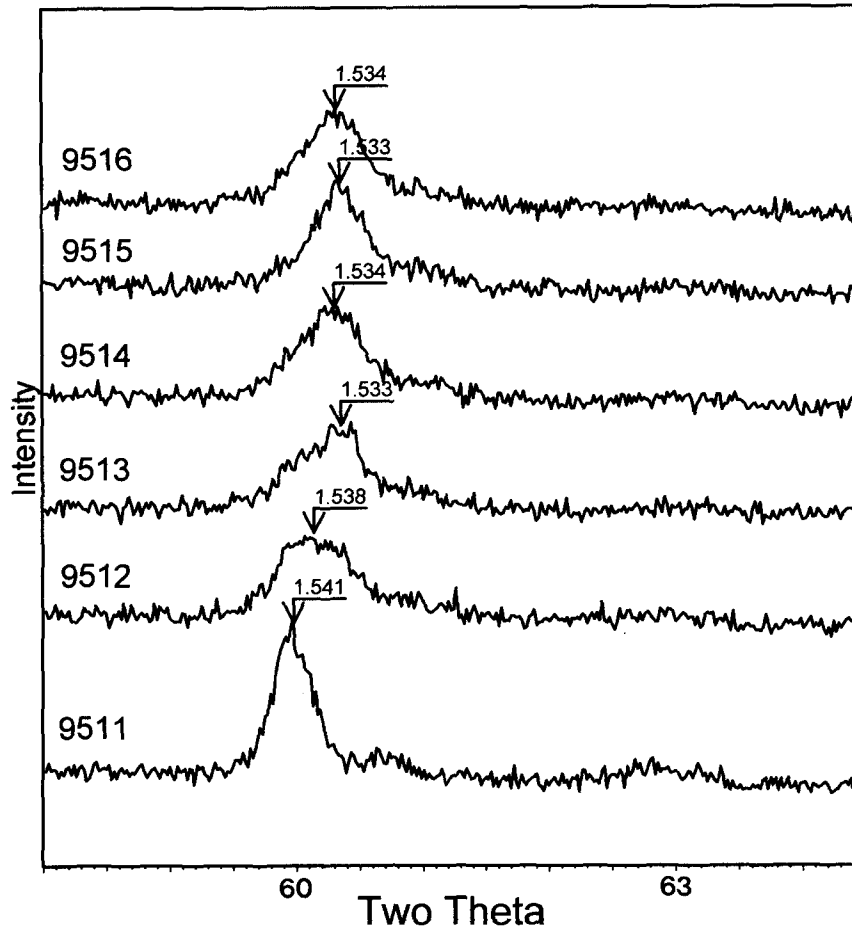


Fig. 8. XRD patterns of fresh biotite (9511) and its weathering products (9512-9516). Random mounts. CuK α radiation.

Si와 Al은 증가하고, Fe, Mg, Ti가 서서히 감소하는 경향을 보인다. 즉 분석점들의 K에 대한 양이온수 변화로부터 4개의 구간을 설정할 수가 있다: Si, Al, Fe, Mg, Ti의 양이온수가 일정한 구간A(1.72~1.88), 변화하는 구간B(1.64~1.72), 일정한 구간C(1.47~1.64), 변하는 구간D(1.47 이하). 구간A의 분석점들은 풍화되지 않았거나 심각한 구조적 및 화학적 변형을 겪지 않은 흑운모의 분석점들이라고 할 수 있다. 구간B의 분석점들은 신선한 흑운모와 풍화된 흑운모의 혼합분석값으로 볼 수 있다. 사실 구간B에서의 Si를 비롯한 양이온수의 갑작스런 변화는 풍화과정에서 Fe의 산화작용을 고려하지 않고, 구조식을 계산할 때 Fe의 산화수를 모두 +3으로 가정하였기 때문에 발생한 인위적인 현상

이다. 뫼스바우어 분석에서 구한 신선한 흑운모의 실제 Fe²⁺와 Fe³⁺의 비율을 적용하여 다시 Fig. 11에 도시하면 풍화과정에서의 Si와 Al의 갯수 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 Fe와 Mg는 크게 감소하였으며 Ti의 변화는 거의 없다. 구간C는 산화흑운모의 분석값들이다. 산화흑운모의 분석값들이 그림과 같이 일정한 범위를 갖는 이유는 신선한 흑운모의 분석값들이 일정한 범위를 갖기 때문이다. 신선한 흑운모의 K값의 범위가 0.17이므로 산화흑운모의 K값의 범위도 0.17로 정하여 Fig. 11과 같이 구간을 나누는데 이용하였다. 한편 구간D의 Si와 Al의 증가, Fe, Mg, Ti의 감소 현상은 SEM과 XRD에서 확인된 바와 같이, 캐올리나이트의 생성으로 인한 것이다. Fig. 11로부터 신선한

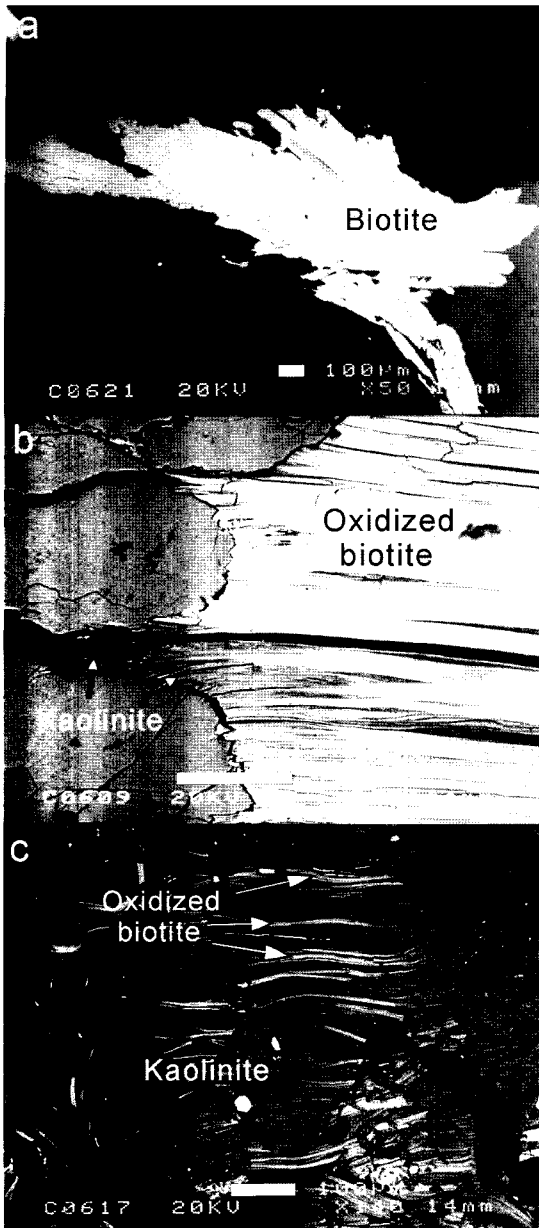


Fig. 9. SEM photographs of fresh biotite 9511 (a), weathered biotite 9513 (b) and 9516 (c).

흑운모(구간A)는 풍화초기에 일정한 조성의 산화흑운모(구간C)로 불연속적으로 변하며 이 산화흑운모의 조성은 최종 풍화산물인 캐올리나이트로 풍화될 때까지 일정한 조성을 유지하는 것으로 보인다.

Table 2. Structural formulas of fresh and oxidized biotites on the basis of 44 negative charges

	Profile 951			
	Fresh biotite (EPMA)	Oxidized biotite (EPMA)	gain(+) or loss(-)	Change ¹⁾ (%)
Si	5.48	5.47	-0.01	0
Al(IV)	2.52	2.53	0.01	0
Sum	8.00	8.00	0.00	
Al(VI)	0.29	0.26	-0.03	
Fe ²⁺	2.24	0.00	-	
Fe ³⁺	0.52	2.32	-	
Fe _{total}	2.75	2.32	-0.43	-16
Mg	2.11	1.86	-0.26	-12
Ti	0.34	0.34	-0.01	
Mn	0.04	0.03	-0.01	
Sum	5.55	4.81	-0.74	-13
Ca	0.01	0.04	0.03	
Na	0.02	0.03	0.00	
K	1.88	1.55	-0.33	-17
K2)			-0.252)	-13 ²⁾
Charge	1.92	1.65	-0.27	-14
		Element ratio		
Fe _{total} /Mg	1.30	1.25	1.70	
K/Mg	0.89	0.83	1.28	
		0.96 ²⁾		

1) Change relative to fresh biotite

2) Correction of vermiculite content (5%).

산화과정에서의 화학적 변화

Fig. 11의 구간C의 분석값들을 평균하여 산화흑운모의 평균조성을 구하고 신선한 흑운모의 평균조성과 비교하여 산화흑운모 생성과정에서 화학조성의 변화를 Table 2에 비교하여 보았다. 신선한 흑운모가 산화흑운모로 풍화되는 과정에서 Si, Al, Ti의 양에는 거의 변화가 없으나, 층간의 K가 13%, 팔면체 자리의 Fe가 16%, Mg가 12% 용탈되었다. Fe²⁺가 Fe³⁺로 산화되면서 +2.24의 과잉 양전하가 발생하였으며 이 과잉전하는 팔면체자리 양이온인 Fe, Mg 그리고 층간의 K의 일부가 방출됨으로서 해소된 것으로 보인다. 제거된 양이온의 Fe_{tot}/Mg와 K/Mg는 각각 1.7과 0.96로서 Fe가 더 많은 비율로 제거되었고 K와 Mg는 비슷한 비율로 제거되었다. XRD 양상에서 d₀₆₀ 값의 감소는 이처럼 Fe의

안동화강암의 풍화단면에서 산출되는 산화흑운모

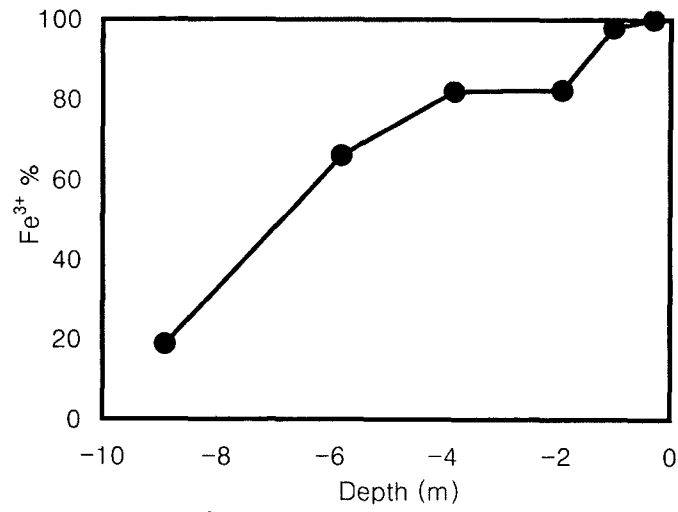


Fig. 10. Plot of Fe³⁺% of biotite vs. sample depth from surface.

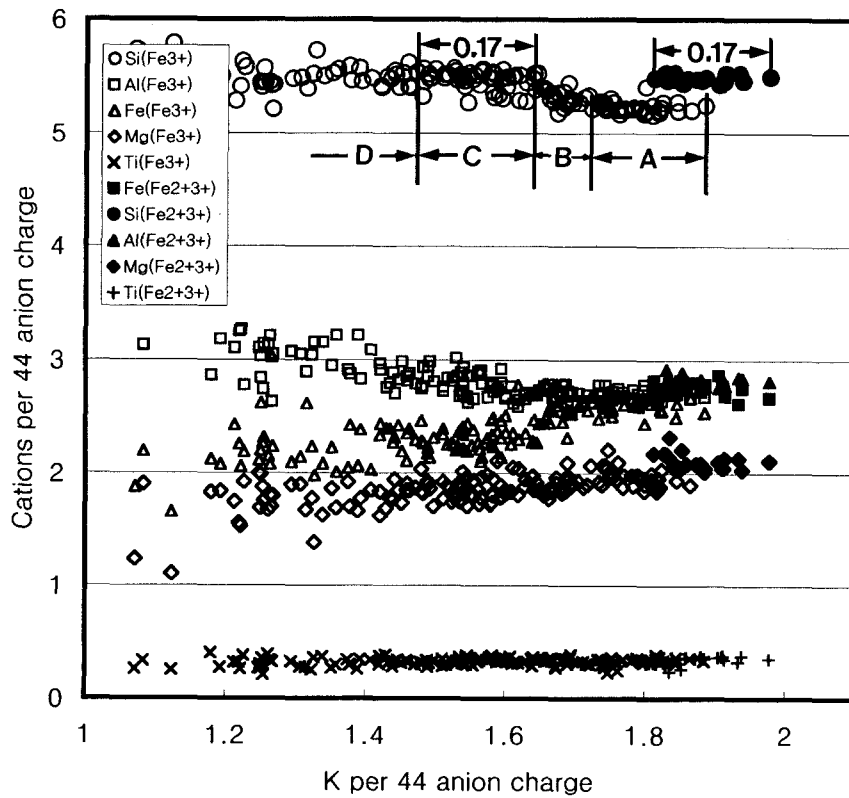


Fig. 11. Plot of number of cation vs. K per 44 anion charges. Filled and cross symbols are cation numbers calculated using Fe²⁺/Fe³⁺ ratios measured by Mossbauer spectrometry, while other symbols are cation numbers calculated assuming all the Fe as Fe³⁺.

산화로 인한 양이온의 제거에 기인한다.

결 론

화학적 풍화도가 미약한 안동화강암 풍화단면내에서 흑운모의 주요 풍화산물은 약간의 질석과 불규칙혼합층을 이루는 산화흑운모이며 풍화가 심한 최상부에서 질석이나 질석이 풍부한 규칙혼합층단계를 거치지 않고 캐올리나이트로 풍화된다. Fe의 산화과정에서 발생하는 과잉전하는 팔면체자리 Fe와 Mg, 그리고 층간 K의 제거로 해소되었으며 사면체자리의 조성변화는 없었다. 신선한 흑운모의 5%는 K의 완전한 제거로 질석으로 변환되었으며, 흑운모의 전체적인 풍화산물은 산화흑운모-질석 불규칙혼합층이었다. 화학적 풍화도가 미약한 풍화단면에서는 산화흑운모가 보다 흔한 흑운모의 중간 풍화산물로 예상되며, 산화흑운모의 양이온교환능은 다른 중간 풍화산물에 비해서 매우 작다. 또한 일단 생성된 산화흑운모는 풍화에 대한 저항도가 커서 층간이온의 용탈을 수반하는 질석화 작용을 받지 않고 풍화단면내에서 상당히 안정하게 유지되며 상부에서 일부 캐올리나이트로 분해된다. 따라서 풍화환경에서 원소들의 거동을 이해하기 위해서는 그 생성원인과 용해 거동에 대한 연구들이 수행되어야 할 것으로 보인다.

사 사

원고를 심사하고 교열해 주신 강원대학교 노진환 교수님과 부산대학교 황진연 교수님께 감사드립니다. 비교연구를 위해 흑운모 시료를 제공해준 강원대학교 부설 산업광물은행에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

송윤구 (1995) 청양-광천지역 염기성 암체의 변질작용과 변질광물의 광물화학. 연세대학교 대학원 박사학위논문, 293pp.
 정기영, 김수진, 김영호, 조현구 (1995) 산청 고령토층의 흑운모의 풍화작용에 의한 캐올리나이트의 생성. 한국광물학회지, 8, 37-45.
 정기영 (1998) 팔공산 화강암내 흑운모의 풍화과정에서 생성되는 고령토 광물들의 광물학적 특성 및 생성환경. 한국광물학회지, 11, 97-105.

Barshad, I. (1948) Vermiculite and its relationship to biotite as revealed by base exchange reactions, X-ray analyses, differential thermal curves and water content. *Am. Mineral.*, 33, 655-678.
 Dong, H., Peacor, D.R., and Murphy, S.F. (1998) TEM study of progressive alteration of igneous biotite to kaolinite throughout a weathered soil profile. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, 1881-1888.
 Drever, (1988) *The Geochemistry of Natural Waters*, Prentice-Hall, New Jersey, 437 pp.
 Harris, W.G., Zelazny, J.C., and Bloss, F.D. (1985a) Biotite kaolinitization in Virginia Piedmont soils: II. Zonation in single grains. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 49, 1297-1302.
 Harris, W.G., Zelazny, J.C., Baker, J.C., and Martens, D.C. (1985b) Biotite kaolinitization in Virginia Piedmont soils: I. Extent, profile trends, and grain morphological effects. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 49, 1290-1297.
 Jackson, M.L., Hseung, Y., Corey, R.B., Evance, E.J., and Vanden Heuvel, R.C. (1952) Weathering of clay-size minerals in soils and sediments. II. Chemical weathering of layer silicates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 16, 3-6.
 Jeong, G.Y. (2000) The dependence of localized crystallization of halloysite and kaolinite on primary minerals in the weathering profile of granite. *Clays Clay Miner.*, 48, 196-203.
 Murphy, S.F., Brantley, S.L., Blum, A.E., White, A.F., and Dong, H. (1998) Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: II. Rate and mechanism of biotite weathering. *Geochim Cosmochim Acta*, 62, 227-243.
 Rebertus, R.A., Weed, S.B., and Buol, S.W. (1986) Transformation of biotite to kaolinite during saprolite-soil weathering. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 50, 810-819.
 Velbel, M.A. (1985) Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge. *Amer. Jour. Sci.*, 285, 904-930.
 White, A.F., Blum, B.A., Schulz, M.S., Vivit, D.V., Stonestrom, D.A., Larsen, M., Murphy, S.F., and Eberl, D. (1998) Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: I. Long-term versus short-term weathering fluxes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, 209-226.

2002년 7월 5일 원고접수, 2002년 9월 3일 게재승인.