

## 팔공산 화강암내 흑운모의 풍화과정에서 생성되는 고령토광물들의 광물학적 특성 및 생성 환경

### Mineralogical Characteristics and Formation Environment of Kaolin Minerals in the Weathering of Granitoids : Weathering of Biotite in Palgongsan Granite

정기영 (Gi Young Jeong)

안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

**요약** : 팔공산 화강암내 흑운모의 풍화작용을 X선회절분석 (XRD), 편광현미경관찰, 주사전자현미경관찰 (SEM), 전자현미분석 (EPMA)을 이용하여 연구하였다. 흑운모는 풍화 초기에 흑운모/버미큘라이트 규칙 혼합층 광물 (B/V)로 변질되며, 풍화도가 높아지면 B/V는 별개의 버미큘라이트 단계를 거치지 않고 직접 캐올리나이트로 교대되기 시작한다. 완전히 캐올리나이트로 변질된 B/V 입자도 관찰되나, 풍화단면 전체에 걸쳐서 B/V가 흑운모의 주요 변질물이다. 흑운모 층이 버미큘라이트 층으로 변환되는 과정에서 Mg, Fe, K가 각각 약 28%, 44%, 88% 용탈되며, Ti의 함량은 거의 일정하게 유지된다. B/V의 캐올리나이트화 과정에서는 변질 흑운모 입자의 부피가 크게 증가하는데, 이는 변질 중인 B/V 입자 내에 다량 도입된 외부 용액으로부터 Si와 Al이 캐올리나이트로 침전되었음을 의미한다. 변질 흑운모의 층상 규산염 격자는 캐올리나이트 핵의 형성을 쉽게 하는 형판(templet) 역할을 함으로서, 변질 흑운모 입자내 캐올리나이트의 침전을 유도한 것으로 보인다. 팔공산 화강암의 사장석이 할로이사이트로 풍화되는 것과는 대조적으로 흑운모는 풍화단면에서 캐올리나이트의 형성에 크게 기여하는 것으로 보인다.

**ABSTRACT** : Weathering of biotite in Palgongsan granite was studied by using X-ray diffraction, optical microscopy, scanning electron microscopy, and electron probe micro analysis. Biotite altered to biotite/vermiculite regular mixed layer mineral (B/V) in the early stage of weathering. Although partially replaced by kaolinite with the progress of weathering, B/V is the major weathering product of biotite throughout the profile. During the formation of B/V, Mg, Fe and K are removed from a biotite layer to form a vermiculite layer by about 28%, 44% and 88%, respectively, whereas the Ti content is not changed. Considerable volume increase after the kaolinitization of B/V suggests that Al and Si are largely introduced from the external weathering solution. The silicate lattice templet of a weathering biotite facilitated the nucleation and growth of kaolinite. In the Palgongsan granite weathering profile, plagioclase weathered mostly into halloysite whereas biotite greatly contributes to the kaolinite crystallization though its small content in fresh rock.

## 서 언

흑운모는 풍화과정에서 토양의 양이온 교환능을 높이고, 식물의 주 영양 원소인 K와 Mg 등의 미량 원소를 방출하거나 고정함으로서 토양용액내 영양 물질의 농도를 조절한다 (Brady, 1990). 이와 같은 중요성 때문에 과거 수많은 연구자들에 의하여 흑운모의 풍화과정이 연구되었는데 그 결과들을 분석해보면 지역에 따라 매우 상이한 변질 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 기존 연구들에 의하면 버미큘라이트 (Norrish 1973; Banfield and Eggleton, 1988), B/V (Wilson, 1970; Banfield and Eggleton, 1988; Moon *et al.*, 1994), 녹니석/버미큘라이트 혼합층 (Wilson, 1970), 캐올리나이트 (Harris *et al.*, 1985; Rebertus *et al.*, 1986; 정기영 외, 1995), 할로이사이트 (Samotoin *et al.*, 1987), 토양 기원 흑운모 (Ghabru *et al.*, 1987), 침철석 (Banfield and Eggleton, 1988), 아나타제 (정기영 외, 1995), 깃사이트 (Gilkes and Suddhiprakarn 1979), "변질" 흑운모(altered biotite) (Dong *et al.*, 1998; Murphy *et al.*, 1998) 등이 형성되는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 변질과정의 복잡성은 모암내 흑운모의 결정화학적 특성과 풍화전 변질역사, 기후, 지형, 배수조건, 모암의 광물조성과 조직 등의 환경 조건에 따라 결정되는 것으로 보인다. 그러나 개별적인 풍화단면내 흑운모의 변질과정에 대한 연구들은 많이 있으나, 아직도 흑운모 풍화의 다양성을 상기한 요인들과 관련하여 체계적으로 설명하지는 못하고 있으며 좀더 많은 연구자료가 축적되어야 할 것으로 보인다.

한편 정기영 외 (1995)와 Jeong (1998)은 산청 지역 회장암의 고령토화 과정에서 회장암에 소량 함유된 흑운모가 캐올리나이트로 변질되는 과정에서 입자체적이 9배 정도나 증가함을 보고하고, 풍화환경에서 캐올리나이트의 생성에 대한 흑운모의 기여도가 매우 크다고 하였다. 이는 동일 기후나 지형조건이라면 풍화단면에서의 고령토광물의 조성이 모암의 광물조성에 따라 상당히 영향을 받

을 수 있음을 의미한다는 점에서 주목된다. 따라서 보다 흔히 분포하는 암석내 흑운모를 대상으로 이와 같은 현상을 확인해 볼 필요가 있다.

최근 저자의 팔공산 화강암 풍화에 관한 연구에서 석영과 K장석은 거의 변질되지 않으나 사장석과 흑운모는 심하게 변질됨이 관찰되었다. 특히 사장석이 할로이사이트로 변질되는 것과 대조적으로 흑운모가 흑운모/버미큘라이트 혼합층을 거쳐 캐올리나이트로 변질되는 매우 흥미로운 현상이 관찰되었다. 사장석의 할로이사이트화 작용은 정기영과 이병윤 (1997)에 의하여 이미 자세히 보고된 바 있으므로, 여기서는 흑운모 변질과정에서 관찰되는 화학적 및 광물학적 변화와 흑운모의 변질이 화강암 풍화단면내 고령토광물 형성에 미치는 의미를 논의하고자 한다.

## 모암 및 풍화단면

팔공산 화강암은 백악기 말에 경상계 퇴적암층을 관입한 전형적인 I형 불국사 화강암으로서 대구 북쪽에 약 200 km<sup>2</sup>의 면적에 타원형 암주로 노출되어 있다 (Hong, 1983). 신선한 팔공산 화강암은 중립질의 반상조직을 갖고 있으며 반정은 누대구조를 보이는 사장석이다 (Fig. 2). 모드분석에 의하면 석영 29.5%, K장석 (퍼사이트) 30.8%, 사장석 31.1%의 조성을 가지며 QAP도에서 화강암 영역에 도시된다. 그 외에 흑운모 4.8%, 각섬석 2.8%, 불투명 광물 1.0%, 소량의 저어콘과 인회석이 수반된다. K장석은 엘바이트와 퍼사이트를 이루며 사장석은 Ab<sub>60</sub>-Ab<sub>40</sub>의 조성을 갖는 올리고클레이스이다. 화강암 풍화단면에는 전체적으로 모광물 입자의 크기, 모양, 배열 상태 등이 잘 보존되어 있으며 최상부 식물 뿌리로 교란된 부분만이 조직이 파괴되어 있는 정도이다. 즉 진정한 토양 (solum) (Fanning and Fanning, 1989)의 발달은 최상위 수십cm에 국한되고 대부분의 구간이 사프로라이트 (saprolite)의 특징을 갖는다 (Velbel, 1985; Nahon, 1991).

시료 및 연구 방법

도로변 절개지에 노출되어 있는 화강암 풍화단면으로부터 (경도, 128° 38' 12" ; 위도, 36° 01' 35" ; 해발 480m, 경사 11°), 심도별로 1~2 m 간격으로 5개의 화강암 풍화물 시료를 채취하였다. 시료의 전암 X선형광분석 값으로부터 계산된 사장석 함량은 37 wt.% (시료 9421, 심도 6 m), 24 wt.% (9422, -5 m), 19 wt.% (9423, -3 m), 10 wt.% (9424, -1 m), 8 wt.% (9425, -0.1 m)로서 풍화도가 증가함에 따라 사장석 함량이 줄어드는 경향을 보인다 (정기영과 이병운, 1997). 화강암 풍화물 내의 변질 흑운모 입자는 쌍안 실체현미경하에서 편색으로 분리하여 아게이트 유발에서 약하게 분쇄하였다. 변질 흑운모 분말은 1M MgCl<sub>2</sub> 용액에 분산시켜 Mg 이온으로 포화시켰으며 원심분리로 AgNO<sub>3</sub>에 반응이 없을 때까지 잔류염을 세척하였다. Mg 포화 시료는 3개의 방향 시료를 제작하여 60°C에서 하루 동안의 에틸렌글리콜 처리, 그리고 350°C와 550°C에서 각각 2시간 가열 후 즉시 XRD 분석을 실시하였다. 흑운모의 변질조직을 관찰하기 위해 원시료를 에폭시로 경화시킨 후 연마박편을 제작하였다. 연마박편은 다시 기초과학지원연구소 (대전)의 Cameca SX51 전자현미분석기로 변질 흑운모의 화학조성을 분석하였다. 흑운모의 풍화조직을 관찰하기 위하여 에너지 분산 X선분석기(EDS)가 부착된 Hitachi S2500 모델의 주사전자현미경을 사용하였다.

결 과

XRD 분석

Fig. 1과 Fig. 2는 각각 풍화도가 다른 9422와 9425에서 분리한 변질 흑운모의 XRD 회절도이다. 9422는 풍화 초기 시료(사장석 함량, 24 wt.%)로서 Mg 포화와 에틸렌글리콜 처리 결과 25.5 Å (001), 11.9 Å (002), 8.2 Å (003), 4.88 Å (005), 3.43 Å (007)의 초격자 회절선들이 관찰되며, 550°C에서 가열하면 10.4 Å 상으로 붕괴된다.

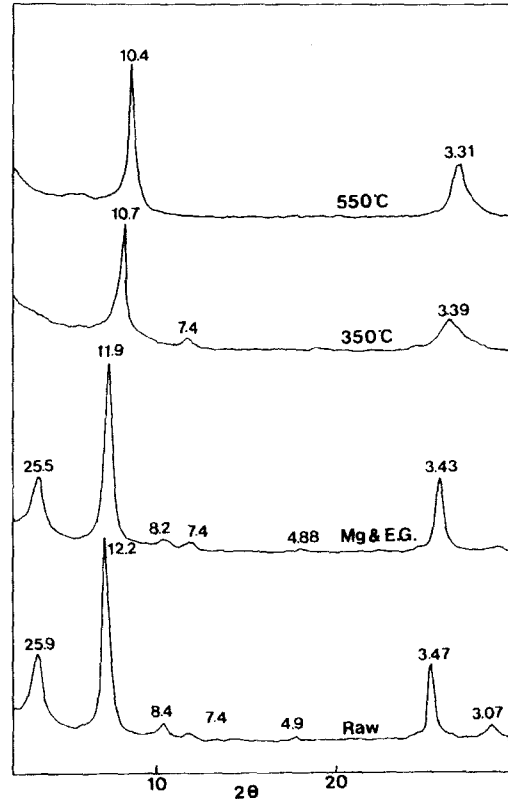


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of oriented powder samples of altered biotite (sample 9422, 5 m in depth). CuK $\alpha$  radiation. The *d*-spacings are in Å.

에틸렌글리콜 처리후 관찰되는 초격자 회절선들의 *d* 값들과 이들간의 규칙적인 간격은 변질 흑운모가 규칙 혼합층상 B/V임을 지시한다. 시료 9425는 풍화 후기 시료 (사장석 함량, 8 wt.%)로서 XRD 회절도는 시료 9422의 것과 매우 유사하나 회절선의 *d* 간격값이 25 Å (001)와 12.5 Å (002)으로서 *d*(001)은 약간 감소하였고 *d*(002)는 반대로 약간 증가하였다. NEWMOD (Reynolds, 1985)로 회절패턴을 계산해 보면 (002) 회절선이 B/V내 흑운모와 버미큘라이트의 함량 변화에 가장 민감하게 반응한다. 계산 결과와 실험 패턴을 비교해보면 9422와 9425는 모두 규칙 혼합층상 구조 (R=1)이며 B/V내 흑운모의 함량은 각각 약 60%와 43%이다. Fig. 1과 Fig. 2는 5 m 정도의 심도

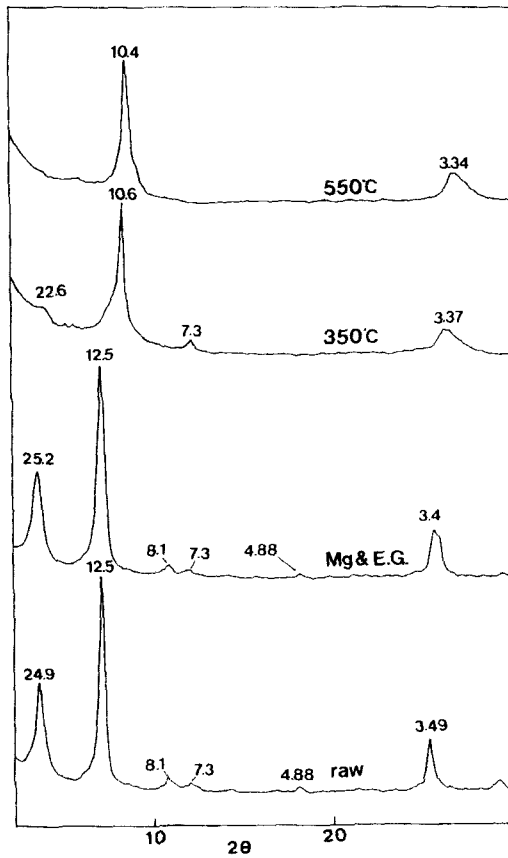


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of oriented powders of altered biotite (sample 9425, 0.1 m in depth). CuK  $\alpha$  radiation. The  $d$ -spacings are in Å.

차이에도 불구하고 흑운모의 주요 변질물이 모두 규칙 혼합층상 B/V임을 보여주고 있다. 한편 자연 상태의 습기를 유지한 원시료의 XRD 패턴에서 관찰되는 7.3~7.4Å 회절선은 에틸렌글리콜 실험에서 변화가 없고 550°C에서 가열하면 사라지는 것으로 보아 할로이사이트가 아닌 캐올리나이트로 추정되며 이는 뒤의 SEM 관찰에서도 확인된다.

#### SEM 관찰

풍화 초기 시료인 9421의 박편 관찰에 의하면 K 장석이나 사장석은 거의 변질되지 않았고 변질 흑운모도 원암의 입자 형태를 거의 그대로 유지하고

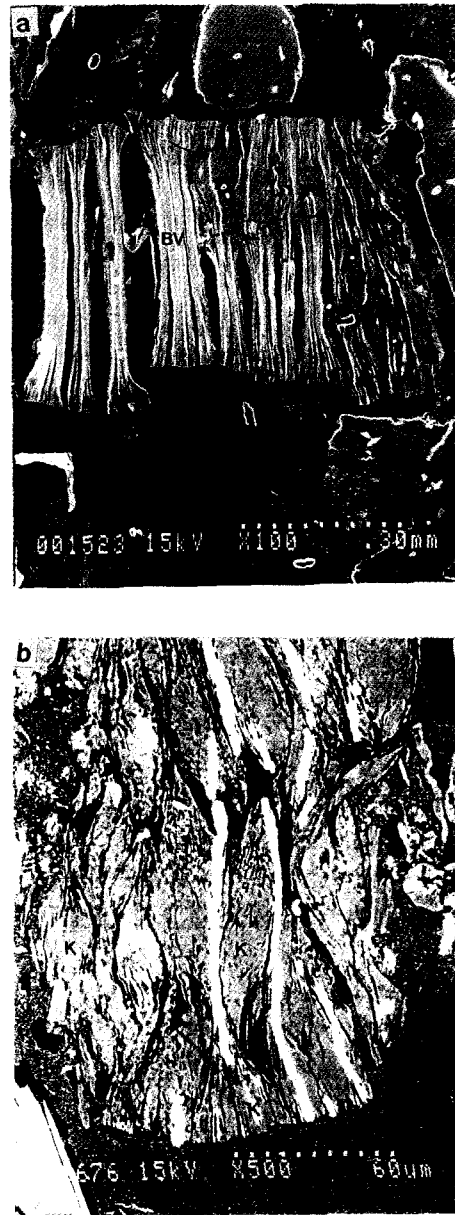


Fig. 3. Scanning electron micrographs of thin sections of altered biotite. a) Sample 9422. Fanning and exfoliation by the alteration of biotite/vermiculite regular mixed layer mineral (BV) to kaolinite (K). Note the lenticular voids. b) Highly expanded kaolinite pseudomorph showing the lenticular aggregates of kaolinites.

Table 1. Selected EPMA analysis data of altered biotite grains.

Sample	Parent rock	9421		9422		9423		9424		9425	
Analysis NO.	191	4	5	54(i)*	56(e)	73(i)	74(e)	85(i)	86(e)	79(i)	80(e)
SiO <sub>2</sub>	36.81	36.31	36.76	36.84	38.89	36.58	38.33	36.97	38.63	43.02	37.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.88	14.21	13.42	15.34	27.63	15.11	27.57	15.43	26.12	34.49	26.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.15	19.35	19.72	17.21	7.75	16.78	10.9	16.85	6.56	3.09	7.68
MgO	12.96	11.40	12.48	11.47	2.77	11.26	5.73	11.38	3.69	1.09	4.19
TiO <sub>2</sub>	5.01	4.72	5.02	4.66	0.71	5.08	0.12	5.12	1.50	0.03	1.61
MnO	0.35	0.24	0.16	0.18	0.07	0.21	0.15	0.22	0.00	0.00	0.06
CaO	0.00	0.44	0.19	0.30	0.12	0.26	0.13	0.13	0.07	0.01	0.05
K <sub>2</sub> O	8.84	5.31	7.66	4.86	0.77	5.62	0.01	4.96	0.95	0.09	1.98
Na <sub>2</sub> O	0.11	0.11	0.09	0.12	0.04	0.10	0.05	0.11	0.04	0.05	0.12
Total	98.11	92.07	95.51	90.98	78.74	91.01	82.99	91.16	77.56	81.87	79.43

\*i : interior of altered biotite grains. e : edge of the grains.

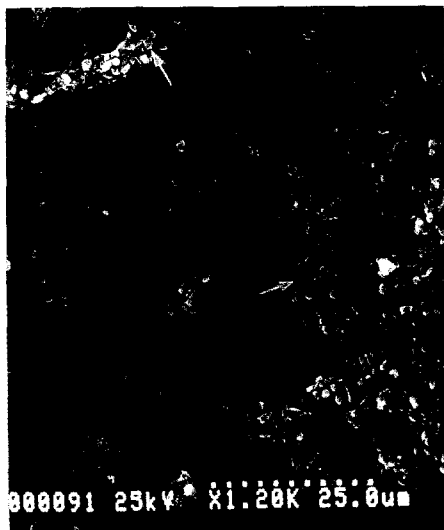


Fig. 4. Scanning electron micrograph of the cleavage surface of kaolinitizing B/V grain showing the aggregates of kaolinite plates (arrows).

있다. 그러나 EPMA 분석 (Table 1)에 의하면 K의 함량이 흑운모보다 40% 정도까지 감소하여 이미 B/V의 조성을 보이고 있다. 9422에서는 B/V가 입자 가장자리를 따라 고령토화하기 시작하는 동시에 엽편 가장자리에 부채 모양의 조직이 발달되고 입자의 결합 상태가 느슨해지면서 렌즈 모양

의 긴 공극이 엽편 사이에 형성된다 (Fig. 3a). 흑운모는 K에 비하여 45% 감소하였다. 9425에서도 9422와 유사한 조직의 변질 흑운모 입자들이 관찰되지만 심하게 고령토화되어 크게 팽창된 흑운모의 고령토 가상들도 종종 관찰된다 (Fig. 3b). 9425의 변질 B/V에서 떼어낸 엽편의 표면을 SEM으로 관찰한 결과 조밀한 고령토광물 집합체들이 표면을 두텁게 피복하고 있으며, 장경 2 μm 정도인 타원형의 잘 발달된 판상입자 형태로 보아 변질 흑운모의 고령토광물은 캐올리나이트로 판정된다 (Fig. 4).

#### EPMA 분석

Table 1은 모암내 신선한 흑운모와 변질 흑운모의 EPMA 분석 자료의 일부이다. 분석값 (No.191)에 근거한 흑운모의 구조식은 철이 2가 상태로 존재한다고 가정하면  $(K_{1.71}Na_{0.03})_{1.71}(Fe^{2+}_{2.41}Mg_{2.93}Ti_{0.45}Mn_{0.05})_{5.83}(Si_{5.58}Al_{2.30}Ti^{4+}_{0.12})_8O_{20}(OH)_4$ 이다. 변질 흑운모의 EPMA 분석값들로부터 22개 산소당 양이온 수를 계산하여 Al에 대한 상대적인 변화를 도출하였다 (Fig. 5). 점진적인 Al의 증가는 흑운모의 변질 정도를 나타낸다. 즉 풍화의 진행과 함께 흑운모층 내 광면체자리의 Mg, Fe, Ti와 층간의 K는 계속적으로 감소하는데, 양이온들의 감소 곡선들은 Al=2.69를 기준으로 기울기가 다른 두

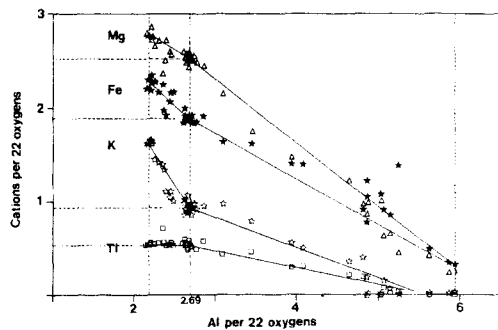


Fig. 5. Plots of cations vs. Al in altering biotite in the weathering profiles of Palgongsan granite. Number of cations are calculated on the basis of 22 oxygens from electron probe microanalysis data.

개의 직선 성분으로 나누어진다. Al이 2.69보다 작은 범위에서는 직선의 기울기가 매우 다양하여 K>Fe>Mg>Ti의 순서로 감소한다. 특히 Ti의 기울기는 0이다. Al이 2.69보다 큰 범위에서 직선의 기울기는 Mg>Fe>K>Ti의 순서로 감소하는데 이 순서는 양이온 함량의 순서와 같다. 두 직선 교차점에는 많은 분석값들이 밀집되어 있는데 이에 해당하는 Mg, Fe, Ti, K, Al의 값은 각각 약 2.52, 1.88, 0.55, 0.95, 2.69로서 B/V의 구조식을 반영한다.

## 토 의

### B/V와 원소의 거동

XRD 및 EPMA 분석 결과, 흑운모는 두 단계의 풍화과정을 보인다. 풍화 초기에 흑운모의 대부분은 이미 B/V로 변질되었으며, 후기에는 서서히 캐올리나이트로 변질된다. B/V로 변질되는 과정에서 원소들의 거동은 원소별로 상이하다. Fig. 5에서 흑운모 구조내 팔면체자리의 Mg과 Fe은 서로 비슷한 비율로 용탈되는데, Fe가 약간 더 큰 비율로 용탈된다. 흑운모는 풍화 초기에 구조내  $Fe^{2+}$ 가  $Fe^{3+}$ 로 산화되면서 발생한 과잉전하를 해소하기 위해 Fe를 방출하며 동시에 약간의 Mg도 방출하

는 것으로 알려져 있다 (Gilkes *et al.*, 1972). 반면에 팔면체자리의 Ti는 거의 용탈되지 않는다. B/V로 되기까지 Ti의 양은 거의 일정한 가운데 Mg와 Fe는 원래 함량으로부터 각각 약 14%와 22% 정도 감소하였다. 특히 높은 전하의 Ti이 B/V 생성 과정에서 용탈되지 않음은 매우 특징적이며 이와 같은 현상은 산청지역 회장암내 흑운모의 버미클라이트화 과정에서도 관찰된 바 있다. 이는 Ti가 버미클라이트화 과정에서 구조로부터 방출되어 제거되는 것으로 보고한 바 있는 Banfield and Eggleton (1988)의 결과와 다르며 그 원인에 대한 정밀한 결정화학적 검토가 필요할 것으로 보인다. 층간의 K는 가장 급격하게 용탈되는 원소로서 원래 함량으로부터 약 44% 정도 감소하였다. 이는 XRD 분석에서 B/V가 1:1 규칙 혼합층상 구조의 회절패턴을 보이는 현상과 일치한다. B/V가 1:1 규칙 혼합층상 구조를 갖고 있고 B/V내 흑운모의 조성이 원래 흑운모의 조성구와 같다고 가정하면, 하나의 흑운모 층이 하나의 버미클라이트 층으로 변하는 과정에서 Mg, Fe, K는 원래 흑운모내 함량에 비하여 각각 약 28%, 44%, 88% 용탈된다. 이에 근거하여 흑운모의 화학식으로부터 B/V내 버미클라이트의 구조식을 계산하면  $(K_{0.19}Na_{0.03})_{0.22}(Fe^{3+}_{1.35}Mg_{2.11}Al_{0.50}Ti_{0.53}Mn_{0.05})_{4.54}(Si_{5.42}Al_{2.58})_8O_{20}(OH)_4$ 가 된다. 물론 이 구조식에서 일부 Mg는 층간에 배치되어야 한다. 전체적으로 팔면체자리의 양이온의 수가 줄어 들어 이팔면체 (dioctahedral)의 구조에 보다 가깝게 된다.

### 캐올리나이트와 원소의 거동

B/V의 캐올리나이트화 과정에서 Mg, Fe, K, Ti의 함량은 캐올리나이트의 조성을 향하여 모두 균질하게 감소하는 경향을 보인다. 이는 B/V가 캐올리나이트로 변질되는 과정에서 B/V의 총체적인 용해와 캐올리나이트가 침전되기 때문으로 판단된다. 한편 B/V가 캐올리나이트로 변질되는 과정에는 큰 부피 증가가 있다. 캐올리나이트가 흑운모의 화학 성분만 물려받아 생성된 것이라면 전체 부피는 흑운모 원부피에 비하여 33% 정도 감소해야 한

다 (Stoch and Sikora, 1976). 따라서 캐올리나이트화 과정의 큰 부피 증가는 캐올리나이트 결정화에 소모된 Si와 Al의 대부분이 외부로부터 도입되었음을 의미한다. Banfield and Eggleton (1988)은 흑운모 및 버미큘라이트의 캐올리나이트 및 침철석화 과정에서 Al과 Fe가 보존된다고 하였으나 본 연구결과와는 상이하다. Banfield and Eggleton (1988)의 고분해 투과전자현미경 연구는 좀더 거시적인 조직에 근거한 흑운모의 전체적인 변질과정을 간과하였기 때문에 이들의 연구결과가 전체적인 흑운모의 캐올리나이트화 과정을 객관적으로 설명할 수 있는지 의문시된다. 정기영 외 (1995)와 Jeong (1998)은 산청지역 회장암의 풍화과정에서 모층상 규산염 광물들이 캐올리나이트화하면서 입자체적이 크게 증가하며 흑운모의 경우 9배 정도나 증가함을 보고한 바 있다. 화강암 풍화단면에 관한 본 연구결과와 종합하여 보면, 이와 같은 현상은 장석질 암석 풍화단면에서 흔히 일어나는 것으로 판단된다.

#### 화강암 풍화와 흑운모의 역할

일반적으로 저온의 풍화환경에서는 반응속도론적인 원인때문에 준안정한 광물이 안정한 광물에 비하여 먼저 생성될 수 있다 (Morse and Casey, 1988). 이는 준안정한 광물은 표면에너지가 안정한 광물보다 작기 때문에 쉽게 핵이 형성되어 광물 입자로 성장하기 때문이다. 그러나 오랜 시간이 지나면 일단 생성된 준안정한 광물은 안정한 광물로 재결정된다. 그런데, 핵의 형성을 용이하게 하는 형판이 존재한다면 핵의 형성에서 활성화에너지가 대폭 감소하므로 준안정한 광물을 거치지 않고 직접 안정한 광물이 생성될 수 있다. 할로이사이트는 캐올리나이트에 비하여 준안정한 광물로 풍화단면에서 먼저 생성된다. 산청지역 회장암 풍화단면에서 할로이사이트가 사장석의 주요 풍화물로 생성되거나 (Jeong, 1992; 정기영과 김수진, 1994), 팔공산 화강암 풍화단면에서 사장석이 할로이사이트로 풍화되고 있음이 관찰된 바 있다 (정기영과 이병윤, 1997). 그러나 정기영 외 (1995)와 Jeong

(1998)에 의하여 보고된 바와 같이 변질 흑운모내에서 캐올리나이트가 주로 생성되는 현상은 캐올리나이트의 침전을 용이하게 하는 환경이 조성되었음을 의미한다. 2:1 광물의 규산염층 표면이 캐올리나이트의 에피탁시적 성장 (epitactic growth)에 필요한 훌륭한 형판 (templet)이 될 수 있음이 실험적으로 관찰된 바 있다 (Pevear and Nagy, 1993). 그리고 Banfield and Eggleton (1988)은 실제 풍화과정에서 캐올리나이트가 흑운모층 위에 에피탁시(epitaxy)적으로 침전되었음을 보고하였다. 한편 최근 Murphy *et al.* (1998)과 Dong *et al.* (1998)은 푸에르토리코의 석영섬록암에 형성된 풍화단면에서의 흑운모의 변질에 관한 연구에서, 투과전자현미경 하에서 한층의 흑운모가 두층의 캐올리나이트로 풍화되거나 짧은 할로이사이트의 중간 단계를 거쳐 캐올리나이트로 풍화됨을 관찰하였다. 이들은 또한 벌어진 렌즈상 틈새에서 캐올리나이트가 추가로 침전됨을 보고하였는데, 이는 흑운모를 토포택틱 (topotactic)하게 교대한 캐올리나이트 위에 외부로부터 도입된 원소로부터 캐올리나이트가 추가로 에피탁시적으로 침전되었음을 의미한다. 이상의 기존 연구결과와 본 연구결과를 종합해보면 변질 흑운모는 흑운모층 또는 흑운모를 교대한 캐올리나이트 층이 외부에서 도입된 풍화용액으로부터 캐올리나이트 핵의 형성을 용이하게 하는 형판 역할을 함으로서 풍화단면 내에서 캐올리나이트의 다량 침전을 촉진하는 역할을 한 것으로 보인다.

#### 결 론

팔공산 화강암의 풍화과정에서 흑운모는 초기에 Mg, Fe, K가 용탈되면서 B/V로 변질되며, 풍화도가 높아지면 B/V는 별개의 버미큘라이트 단계를 거치지 않고 직접 캐올리나이트로 교대된다. 그러나 캐올리나이트로 완전히 변질된 흑운모 입자는 매우 드물고 풍화단면 전체에 걸쳐서 B/V가 흑운모의 주요 변질산물이다. B/V의 캐올리나이트화 과정에서 변질 흑운모 입자의 부피가 특징적으로 크게 증가하는데, 이는 외부용액으로부터 Si와 Al

이 변질 중인 B/V 입자 내로 다량 유입되어 캐올리나이트로 침전되었음을 의미한다. 변질 흑운모의 층상 규산염 격자는 캐올리나이트 핵의 형성을 쉽게 하는 형편 역할을 함으로써, 변질 흑운모 입자 내 캐올리나이트의 다량 침전을 유도한 것으로 보인다. 동일 풍화단면 내의 할로사이트가 주로 사장석의 풍화작용으로 생성되는 것과는 대조적으로 흑운모는 다량의 캐올리나이트의 침전을 유도함으로써, 화강암질 암석 풍화단면에서 캐올리나이트의 형성에 크게 기여한다.

## 사 사

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단의 자유 공모 과제 연구비에 의하여 이루어졌다.

## 참 고 문 헌

- 엄명호, 엄기태, 임형식 (1992) 한국의 주요 모암에서 발달된 토양점토광물의 특성과 생성학적 연구 III. 모래와 미사중에 토양광물의 특성 비교, 한국토양비료학회지, 25, 202-212.
- 엄명호, 임형식, 김태순 (1992) 한국의 주요 모암에서 발달된 토양점토광물의 특성과 생성학적 연구 IV. 토양광물의 분포 및 생성, 한국토양비료학회지, 25, 202-212.
- 이수곤 (1993) 화강암의 풍화, 지질학회지, 29, 396-413.
- 정기영, 이병운 (1998) 백악기 팔공산 화강암의 풍화 : 사장석의 변질작용, 지질학회지, 34, 44-57.
- 정기영, 김수진, 김영호, 조현구 (1995) 산청 고령토 중의 흑운모의 풍화 작용에 의한 캐올리나이트의 생성, 한국광물학회지, 8, 37-45.
- Banfield, J. F. and Eggleton, R. A. (1988) Transmission electron microscope study of biotite weathering. *Clays Clay Miner.* 36, 47-60.
- Brady, N. C. (1990) *The Nature and Properties of Soils*. Maxwell Macmillan.
- 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.* 62, 1881-1888.
- Fanning, D. S. and Fanning, M. C. B. (1989) *Soil-Morphology, Genesis and Classification*. John Wiley and Sons, New York, 395p.
- Fanning, D. S., Keramidis, V. Z., and El-Desoky (1989) Micas in Minerals in Soil Environment, 551-634, *Soil Sci. Soc. Amer.*
- Ghabru, S. K., Mermut, A. R., and Arnaud, R. J. st. (1987) The nature of weathered biotite in sand-sized fractions of gray luvisols (Boralfs) in Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 40, 65-82.
- Gilkes, R. J. and Suddhiprakarn, A. (1979) Biotite in deeply weathered granite. I. Morphologic, mineralogical, and chemical properties. II. The oriented growth of secondary minerals. *Clays Clay Miner.* 27, 349-367.
- Harris, W. G., Zelazny, J. C., Baker, J. C., and Martens, D. C. (1985) Biotite kaolinitization in Virginia Piedmont soils: I. Extent, profile trends, and grain morphological effects. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49, 1290-1297.
- Hong, Y. K. (1983) Petrology and geochemistry of the Cretaceous Palgongsan granite, southern Korea. *J. Korea Inst. Mining Geol.*, 16, 83-109.
- Jeong, G. Y. (1998) Vermicular kaolinite epitactic on primary phyllosilicates in the weathering profiles of anorthosite. *Clays Clay Miner.*, 46 (in press).
- Moon, H.-S., Song, Y., Lee, S. Y. (1994) Supergene vermiculitization of phlo-



- gopite and biotite in ultramafic rocks, central Korea. *Clays Clay Miner.* 42, 259-268.
- Morse, J. W. and Casey, W. H. (1988) Ostwald process and mineral paragenesis in sediments. *Amer. J. Sci.*, 288, 537-560.
- 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.* 62, 227-244.
- Nahon, D. B. (1991) Introduction to the Petrology of Soils and Chemical Weathering. New York, Wiley, 313p.
- Norrish, K. (1973) Factors in the weathering of mica to vermiculite. *Proc Int. Clay. Conf.*, Madrid, 417-432.
- Pevear, D. R. and Nagy, K. L. (1993) Kaolinite growth on mica in sandstone, bentonite, and experiments. 10th International Clay Conference, Adelaide, Australia, Abstracts, O-141.
- Rebertus, R. A., Weed, S. B., and Buol, S. W. (1986) Transformation of biotite to kaolinite during saprolite-soil weathering. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50, 810-819.
- Reynolds RC, Jr. (1985) NEWMOD computer program for the calculation of one-dimensional diffraction patterns of mixed-layered clays. 8 Brook Dr. Hanover, New Hampshire.
- Wilson, M. J. (1970) A study of weathering in a soil derived from a biotite-hornblende rock. I. Weathering of biotite. *Clay Miner.* 8, 291-303.
- Samotoin, N. D., Norikov, V. M., and Magazina, L. O. (1987) Paragenesis of secondary clays in a bauxite-bearing granite weathering zone. *Inter. Geol. Rev.* V. H. Winston & Sons, 1215-1227
- Stoch, L. and Sikora, W. (1976) Transformations of micas in the process of kaolinitization of granites and gneisses. *Clays Clay Miner.* 24, 156-162.
- Velbel, M. A. (1985) Geochemical mass balances and weathering rates in forested watersheds of the southern Blue Ridge. *Amer. J. Sci.*, 285, 904-930.