

## 산청 고령토 중의 흑운모의 풍화작용에 의한 캐올리나이트의 생성

### Kaolinite Formation by Weathering of Biotite in Sancheong Kaolin

정기영(Gi Young Jeong)\* · 김수진(Soo Jin Kim)\*\*  
김영호(Young Ho Kim)\*\*\* · 조현구(Hyun Goo Cho)\*\*\*

\*안동대학교 지질학과

(Department of Geology, Andong National University, P. O. Box 203, Andong 760-600, Korea)

\*\*서울대학교 지질학과

(Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

\*\*\*경상대학교 지질학과

(Department of Geology, Gyeongsang National University, Chinju 660-701, Korea)

요약 : 회장암에 함유된 흑운모의 풍화작용을 고령토에 함유된 캐올리나이트의 기원과 관련하여 연구하였다. 흑운모는 사장석이나 각섬석 등 다른 모암광물에 비하여 빠른 속도로 풍화되어 고령토화 초기에 흑운모/버미큘라이트 혼합층광물, 버미큘라이트로 변질된다. 버미큘라이트는 계속하여 캐올리나이트로 변질되어 최종적으로 원 흑운모 입자에 비하여 크게 팽창된 캐올리나이트의 가상을 고령토 내에 형성한다. 변질 중인 흑운모에서 방출된 K와 Ti는 각각 일라이트와 아나타제로 침전되며 일라이트는 다시 캐올리나이트로 변질된다. 흑운모가 캐올리나이트의 유일한 모물질이라고 할 수는 없으나 풍화과정에서 상당한 양의 캐올리나이트의 생성을 유도하여 고령토내 캐올리나이트 함량 증가에 크게 기여하는 것으로 보인다.

**ABSTRACT :** Weathering of biotite was studied in relation to the origin of kaolinite in Sancheong kaolin. Biotite altered to biotite/vermiculite and then to vermiculite in the early stage of weathering, and subsequently highly expanded to kaolinite pseudomorph. K and Ti liberated from altered biotite were used to form illite and anatase, respectively. Although biotite is not the sole source of kaolinite, its weathering favored the precipitation of kaolinite and highly contributed to the increase of kaolinite content in the Sancheong kaolin.

#### 서 언

화성암 및 변성암의 주요 조암광물인 흑운모의 풍화작용은 토양의 물성과 화학적 특성 형성에 큰 영향을 미치므로 여러 분야에서 그 광물 및 화학적 특성에 대한 연구들이 이루어져 왔다. 흑운모의 풍화 결과 생성되는 버미큘라이트와 스�멕타이트 등의 팽윤성 점토광물들은 토양의 양이온 교환능의 향상에 기여하며 방출되는 K는 토양내 주요 영양원소 중의 하나이다 (Brady, 1990). 풍화산물의 생성 양상은 모암의 종류, 조직, 기후,

지형, 수리조건 등의 지표 환경조건에 따라 결정된다. 흑운모 풍화산물의 광물종이나 생성순서도 그 지역의 풍화조건에 따라 다양하여 버미큘라이트, 흑운모/버미큘라이트 혼합층, 녹니석/버미큘라이트 혼합층, 캐올리나이트, 할로이사이트, 침철석, 아나타제, 깁사이트 등의 여러 가지 점토광물 및 산화광물이 보고되어 있다 (Fanning et al., 1989). 흑운모의 버미큘라이트 및 흑운모/버미큘라이트 혼합층화작용은 오래 전부터 여러 저자에 의하여 자세히 연구된 바 있으나 (Jackson et al., 1952; Basset, 1960; Wilson, 1970; Norrish, 1973;

Gilkes and Suddhiprakarn, 1979a and b; Ghabru et al., 1987; Banfield and Eggleton, 1988; Moon, et al., 1994) 캐올리나이트화 작용은 버미클라이트화 작용에 비하여 비교적 최근에 연구되고 있다 (Stoch and Sikora, 1976; Harris et al., 1985; Rebertus et al., 1986; Ahn and Peacor, 1987). 이들의 연구에 의하면 흑운모는 직접 또는 버미클라이트나 버미클라이트/흑운모 혼합층의 중간 상태를 거쳐 캐올리나이트 가상으로 변질된다. 캐올리나이트는 할로이사이트와 함께 온난습윤한 기후지역의 주요한 토양구성광물로서 주로 장식 광물이 풍화되어 생성된다. 캐올리나이트 입자 중에는 책모양의 입자형태를 갖고 있는 것이 많은데 이들이 모두 장식의 풍화산물인지는 의문이 있다. 고령토 형성에 관한 필자들의 연구에 의하면 이들 중 상당수는 운모류 광물의 풍화과정에서 생성된 것으로 생각된다. 회장암의 풍화산물인 경남 산청지역의 고령토는 주로 할로이사이트와 캐올리나이트로 구성되어 있으며 적은 양이지만 버미클라이트와 일라이트가 거의 항상 수반된다 (Jeong, 1992; 정기영과 김수진, 1994). 필자들의 연구에 의하면 고령토내 캐올리나이트의 함량은 버미클라이트 및 일라이트의 함량과 상당한 상관관계가 있다 (Jeong, 1992). 회장암에 함유된 흑운모는 버미클라이트 및 일라이트의 근원물질로서 결과적으로 고령토내 캐올리나이트의 생성에 기여를 한 것으로 예측된다. 이 논문의 목적은 회장암의 고령토화 작용으로 생성되는 흑운모 풍화산물들의 광물학적 특성 및 조직을 조사하여 모암내 흑운모와 고령토내 캐올리나이트 사이의 상호 성인적인 관계를 밝히는 것이다.

### 시료 및 연구방법

흑운모를 함유하는 회장암과 변질 흑운모를 함유하는 고령토는 회장암질 암체의 서측인 산청군 금서면에 분포한다. 분석용 시료는 이 지역 노천 고령토 광산들의 채굴장에 노출된 풍화단면으로부터 풍화도에 따라 하부로부터 체계적으로 채취한 후 플라스틱병에 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 고령토내 변질 흑운모는 초음파세척, 습식체

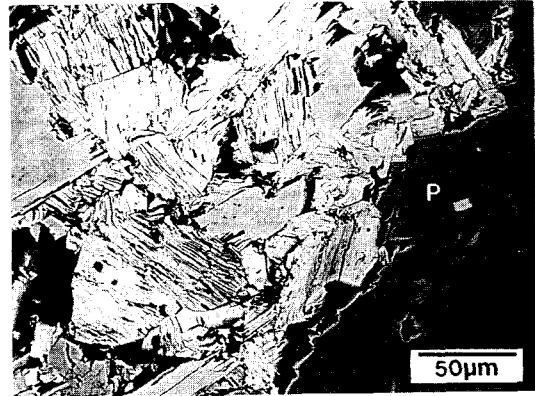


Fig. 1. Back-scattered electron image of biotite in anorthosite. B:biotite, P:plagioclase.

질(200mesh), 자력분리의 순서로 처리하여 일차 분리한 후 실체현미경하의 수선을 통해서 최종 분리되었다. 보다 고운 분말로 파쇄한 분리 시료에 대하여 X선 회절분석기(Rigaku model RAD3C)와 열분석기(Rigaku model TAS)로 변질산물의 광물 감정을 실시하였다. 고령토 시료는 에폭시 수지(Araldite)로 굳힌 후 연마박편을 제작하여 조직관찰과 전자현미분석을 실시하였다. 조직관찰은 주사전자현미경(JEOL JCXA 733 Superprobe)을 이용하였으며, 동시에 가속전압 15kV, 빔전류 10nA, 빔직경 5 $\mu$ m의 기기조건에서 단체광물의 전자현미분석을 실시하였다.

### 결 과

#### 회장암 내 흑운모

회장암 내에서 흑운모는 중립질이고 개방니콜에서 적갈색을 띤다. 회장암내 함량은 5% 이내로서 간극정출조직이나 (Fig. 1) 열극충진조직, 교대조직을 보이며 산출된다 (Jeong and Lee, 1986). 흔히, 각섬석, 녹염석, 일메나이트, 티타나이트 등의 다른 유색광물과 집합체를 이루며 일메나이트나 녹염석을 포획하기도 한다. 흑운모의 전자현미 분석결과는 Table 1과 같다. 흑운모는 종종 녹니석으로 변질되어 있으며 이는 풍화 이전에 일어난 저변성작용의 결과로 해석된다 (Jeong and Lee, 1986).

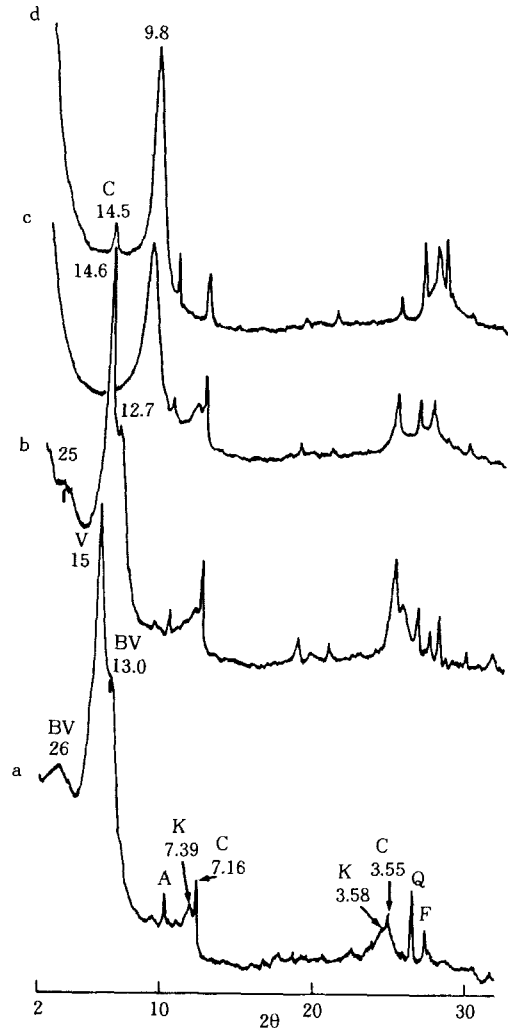
**Table 1.** Electron microprobe analysis of biotite in anorthosite.

	2-2	4-2-1	4-3-2	5-1-1	5-1-6
SiO <sub>2</sub>	37.32	37.17	37.07	37.27	37.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.67	15.90	16.02	16.13	15.78
FeO	16.59	16.63	17.03	16.44	17.16
MgO	13.23	13.46	12.83	12.89	13.05
TiO <sub>2</sub>	0.70	0.73	0.73	0.82	0.81
MnO	0.17	0.02	0.13	0.13	0.08
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17	0.17	0.08	0.12	0.23
K <sub>2</sub> O	8.19	8.68	8.50	8.45	8.18
Na <sub>2</sub> O	0.11	0.17	0.09	0.15	0.11
CaO	0.17	0.09	0.27	0.14	0.12
Formulas on the basis of O <sub>22</sub> (OH) <sub>4</sub>					
Si	5.678	5.697	5.707	5.726	5.712
Al(IV)	2.322	2.303	2.293	2.274	2.288
Sum	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al(VI)	0.667	0.569	0.613	0.648	0.575
Fe <sup>2+</sup>	2.111	2.131	2.193	2.112	2.210
Mg	3.001	3.075	2.944	2.952	2.994
Ti	0.080	0.084	0.084	0.094	0.093
Mn	0.022	0.003	0.017	0.017	0.010
Cr	0.020	0.020	0.009	0.014	0.028
Sum	5.901	5.882	5.860	5.837	5.910
K	1.589	1.697	1.669	1.657	1.607
Na	0.032	0.050	0.027	0.044	0.032
Ca	0.028	0.016	0.044	0.022	0.020
Sum	1.649	1.763	1.740	1.723	1.659

**변질 흑운모**

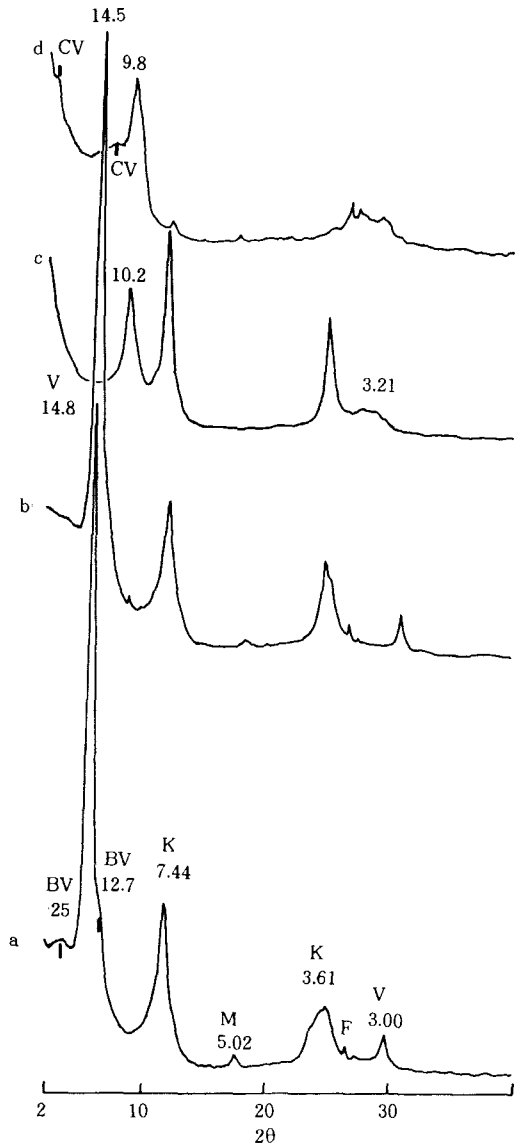
**광물조성**

매우 미약하게 풍화되어 거의 신선한 암석에 가까운 회장암(사장석 90% 이상) 내의 흑운모도 이미 상당히 변질되어 황갈색을 띤다. 변질물은 주로 버미큘라이트와 흑운모/버미큘라이트 혼합층으로 구성되며 그외 약간의 캐올리나이트와 녹니석을 함유한다 (Fig. 2). 이 중에서 녹니석은 풍화 이전 흑운모의 저변성작용에 의하여 생성된 것으로 모암에서 이미 확인된 바 있다. 상당히 풍화된 회장암(사장석 함량 46%)내의 흑운모는 완전히 변질되어 중립질 또는 조립질의 황갈색 염편으로 산출되며, 특히 회장암내 유색 광물피의 풍화물인 황갈색 띤 반점 부분에서 집중적으로 발견된다. X선 회절분석에 의하면 흑운모/버미큘



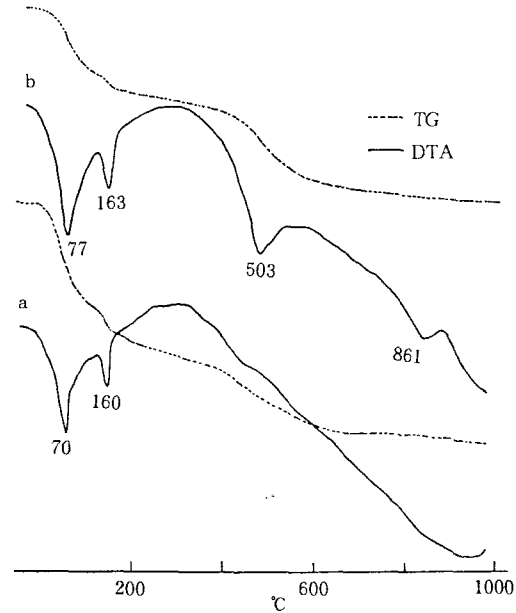
**Fig. 2.** Oriented powder X-ray diffraction patterns of altered biotite grains in very slightly weathered anorthosite. (a) untreated, (b) Mg-saturated and ethylene-glycolated for 48 hour, (c) Mg-saturated and heated at 370°C for 4 hour, (d) Mg-saturated and heated at 550°C for 4 hour. CuK $\alpha$  radiation, BV:biotite/vermiculite, V:vermiculite, K:kaolinite, C:chlorite, A:amphibole, Q:quartz, F:feldspar.

라이트 혼합층의 양은 작아지고 캐올리나이트의 양은 크게 증가되므로서 변질 흑운모는 주로 버미큘라이트와 캐올리나이트로 이루어진다 (Fig. 3). 한편 미량으로 섞여 있던 녹니석은 녹니석/버



**Fig. 3.** Oriented powder X-ray diffraction patterns of altered biotite grains in highly weathered anorthosite. (a) untreated, (b) Mg-saturated and ethylene-glycolated for 48 hour, (c) Mg-saturated and heated at 370°C for 4 hour, (d) Mg-saturated and heated at 550°C for 4 hour.

미클라이트 혼합층으로 풍화되었다. 변질 초기 흑운모(Fig. 2의 시료)의 열분석 결과, 버미클라이트 층간수의 2단계 탈수작용에 의한 흡열반응과 중량감소가 각각 70°C와 160°C에서 나타나고 (Fig. 4a), 보다 변질된 흑운모(Fig. 3의 시료)에서는 캐올리나이트의 탈수산기 작용에 의한 흡열반응과



**Fig. 4.** Differential thermal (DTA) and thermogravimetric (TG) curves of altered biotite in (a) very slightly weathered and (b) highly weathered anorthosite.

중량감소가 503°C 근처에서 일어난다 (Fig. 4b). K로 포화시킨 버미클라이트에 전자현미분석을 실시하여 얻어진 버미클라이트의 구조식은  $(K_{1.28}Na_{0.04}Ca_{0.04})_{1.28}(Al_{0.91}Fe^{3+}_{1.92}Mg_{1.76}Mn_{0.01}Ti_{0.25})_{4.76}(Si_{5.91}Al_{2.09})_8O_{20}(OH)_4 \cdot xH_2O$ 이다. 층간 전하는 1.31이며 팔면체 자리 79%가 양이온에 의하여 채워져 있다.

#### 조직

Fig. 5는 고령토 원석 박편의 후방산란전자상(Back-Scattered Electron Image, BEI)으로서 변질된 흑운모 엽편들을 보여주고 있다. 흑운모 엽편들은 변질과정에서 여러 갈래로 분리되어 있다 (Fig. 5). 각 입자들은 밝고 조밀한 부분과 어둡고 성긴 부분으로 구성되어 있으며 이는 각각 서로 다른 화학조성과 광물조성을 반영한다. 전자현미분석에 의하면 어두운 부분은 대개 1.4wt% 정도의  $K_2O$ 와 다량의  $Fe_2O_3$ 와  $MgO$ 를 함유하나 그렇지 않은 부분은  $K_2O$ 가 없으나  $Fe_2O_3$ 와  $MgO$ 의 양은 여전히 높다. 즉 전자는 주로 흑운모/버미클라이트 혼합층 및 버미클라이트의 혼합체, 후자는 버미클라이트와 캐올리나이트의 혼합체로 보인다.

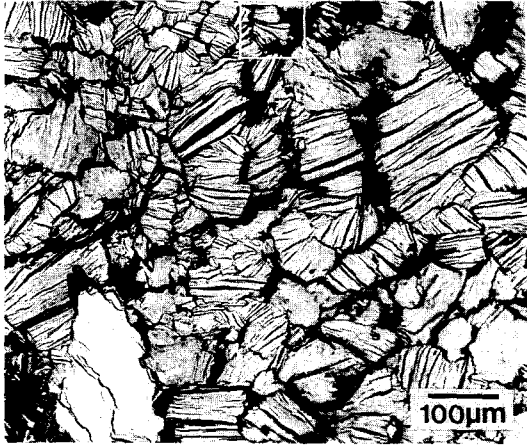


Fig. 5. Back-scattered electron image of altered biotite grains in highly weathered anorthosite (thin section). Note variable brightness within the grain. White grain at the low left : hornblende.

이와 같은 변질 흑운모 입자의 조직과 화학조성의 변화는 흑운모의 버미클라이트화에 이은 버미클라이트의 캐올리나이트화 작용에 기인한 것으로 생각된다. Fig. 5의 한 입자의 확대한 BEI(후방산란전자상)를 K, Mg, Al의 X선상과 비교하면 변질 흑운모 입자의 부채꼴 모양으로 펼쳐진 부분에 특히 K와 Mg의 양이 작은 반면 (<0.5 wt%) 그의 부분은 K와 Mg의 양이 상대적으로 많다 (Fig. 6a). 즉 부채 모양으로 펼쳐진 부분은 일부 변질되지 않은 흑운모가 흑운모/버미클라이트 혼합 형태로 버미클라이트와 함께 잔류하는 부분이며 그외의 부분은 캐올리나이트와 버미클라이트로 구성되어 있는 것으로 보인다. 캐올리나이트로 주로 구성된 부분이 부채처럼 펼쳐져 있는 양상은 버미클라이트의 캐올리나이트화 과정에서 체적의 팽창이 있었음을 의미한다. 한편 BEI(후방산란전자상)에서 부채부분에 산재하는 작은 반점들은 X-선상의 Ti 분포와 일치한다 (Fig. 6a). 동일시료의 주사전자현미경 관찰에서는 캐올리나이트로 변질 중인 버미클라이트의 표면과 벌어진 엽편들 사이에 지름 1µm 정도의 원반형 Ti산화물들이 산포되어 있음을 볼 수 있다 (Fig. 6b). Ti산화물들은 그 형태나 조성으로 보아 풍화환경에서 흑운모의 풍화산물로 보고되고 있는 아나타제로

생각된다 (Weaver, 1976).

사상석이 모두 분해되어 없어진 고령토에서 관찰되는 흑운모의 최종 변질 산물은 원래의 크기보다 몇 배로 팽창된 캐올리나이트의 가상이다 (Fig. 7). 버미클라이트로부터 생성된 캐올리나이트 입자는 대개 다른 캐올리나이트 입자보다 10배 이상 (너비 50µm, 길이 100µm) 크며 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (<3wt%)와 MgO (<1wt%)의 함량이 높다. 높은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 MgO 함량은 캐올리나이트 입자에 잔류하는 버미클라이트에 기인한 것으로 보인다.

일라이트는 고령토에 5wt% 내외로 버미클라이트와 함께 항상 함유된다. 일라이트 입자는 고령토 원석에서는 육안으로 관찰되지 않는다. 그러나 원석의 부분별 X-선 회절분석에서 버미클라이트가 있는 황갈색 띠와 반점 부위에 특히 많이 함유되어 있는데 이러한 현상은 흑운모의 변질작용이 일라이트의 형성에 많은 기여를 하였음을 의미한다. 일라이트는 변질 흑운모 입자의 X-선 회절분석에서 검출되지 않았으므로 이들이 변질 흑운모의 입자내부나 표면에 붙어서 존재하지는 않는다. 그러나 원석 박편의 BEI(후방산란전자상)사진에서는 애벌레형 캐올리나이트와 형태가 유사하면서도 K를 함유한 입자들이 변질 흑운모 입자들 사이에 집중적으로 분포되어 있음을 볼 수 있다 (Fig. 8). 이들 입자의 전자현미분석에 의하면 K<sub>2</sub>O가 최대 7.8wt%까지 함유되나, 입자별 함량 변화가 극심하여 대체로 복팔면체형(dioctahedral) 일라이트와 캐올리나이트의 중간적인 화학조성을 보인다. 이는 이들 입자들이 두 광물의 혼합체임을 의미한다. 두 광물의 성인적 관계는 보다 미세한 조직 연구를 통해서 가능하나 아마도 흑운모의 초기 변질 작용중 버미클라이트화 과정에서 생성된 일라이트가 다시 캐올리나이트로 변질 중인 것에 기인한 것으로 보인다. 단체 일라이트 입자에 대한 전자현미 분석은 불가능하며 NaOH 용액으로 캐올리나이트를 선택적으로 농집시킨 후 습식분석한 일라이트의 구조식은 (K<sub>0.69</sub>Na<sub>0.06</sub>Ca<sub>0.04</sub>)<sub>0.79</sub>(Al<sub>1.81</sub>Fe<sup>3+</sup><sub>0.05</sub>Mg<sub>0.13</sub>Ti<sub>0.01</sub>)<sub>2.00</sub>(Si<sub>3.29</sub>Al<sub>0.71</sub>)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>이다.

흑운모가 흔히 최종 풍화물로서 캐올리나이트로 풍화되는 현상은 이미 잘 알려져 있다. Stoch

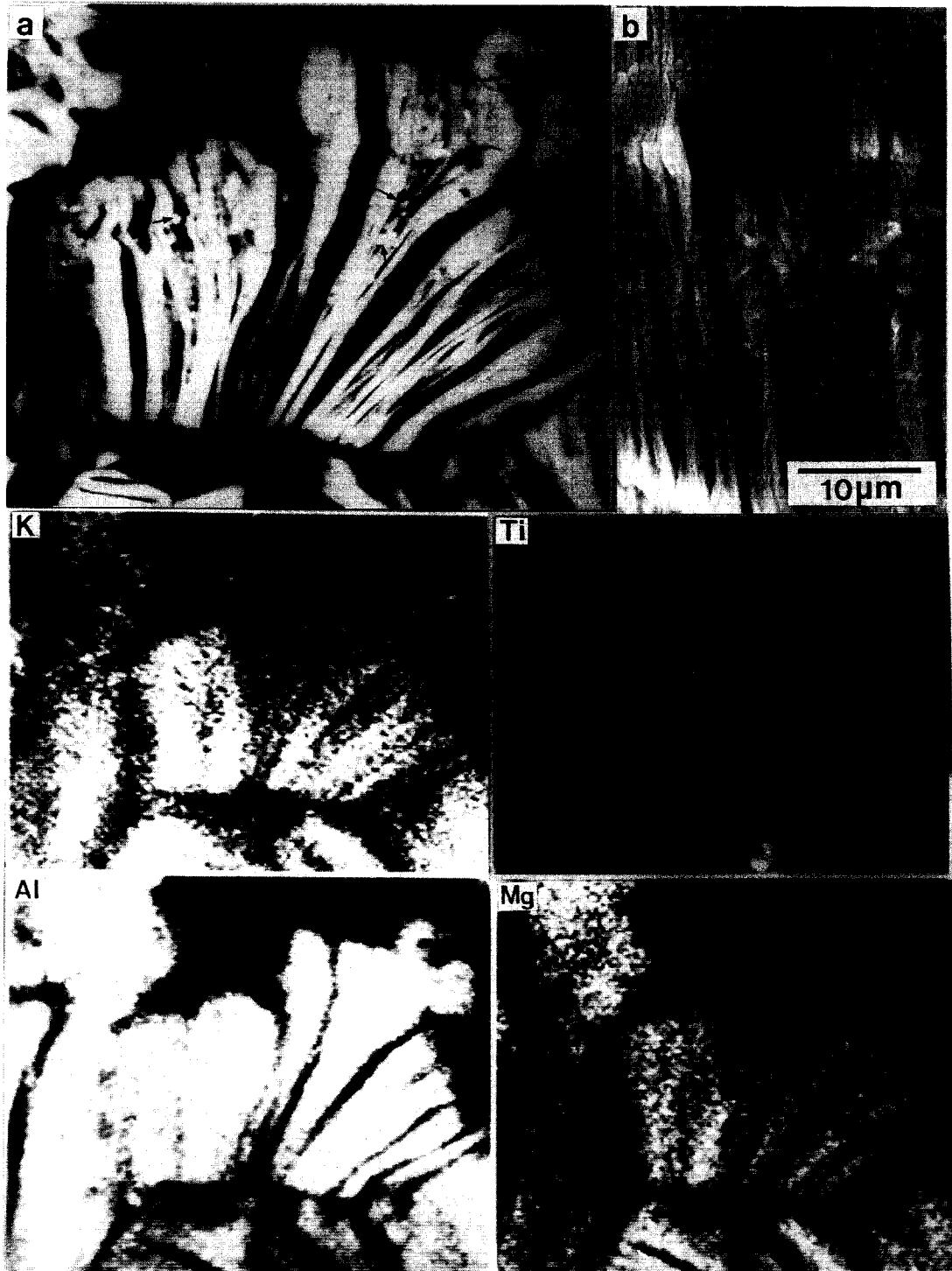


Fig. 6. Enlarged back-scattered electron (a) and its X-ray images of altered biotite grain in the box of Fig. 5. Note Ti-oxide grains in back-scattered electron image (a) and secondary electron image (b).

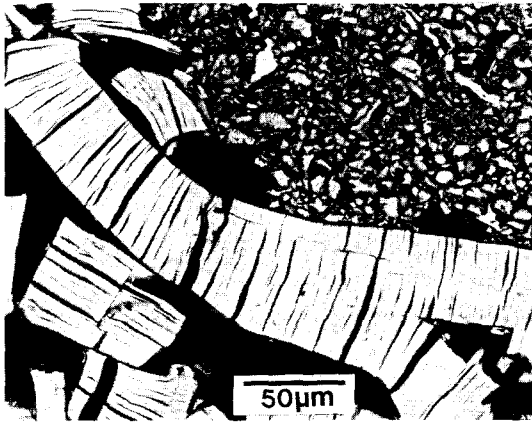


Fig. 7. Expanded kaolinite pseudomorph after biotite. Note the small vermiform kaolinite books in the upper part.



Fig. 8. K-bearing illitic books (K) among the kaolinite-vermiculite pseudomorphs (KV) after biotite.

토 의

와 Sikora (1976), Rebertus 외 (1986), Harris 외 (1985a, 1985b), Ahn과 Peacor (1987) 등은 흑운모가 직접 캐올리나이트로 변질됨을 관찰하였으며 Gilkes와 Suddhiprakarn (1979a, 1979b)과 Banfield와 Eggleton (1988) 등은 흑운모가 혼합층 및 버미클라이트를 거쳐 캐올리나이트로 변질됨을 보고하였다. 산청지역 회장암 내 흑운모는 풍화 초기 단계에 흑운모/버미클라이트 혼합층과 버미클라이트로 변질되며 버미클라이트는 다시

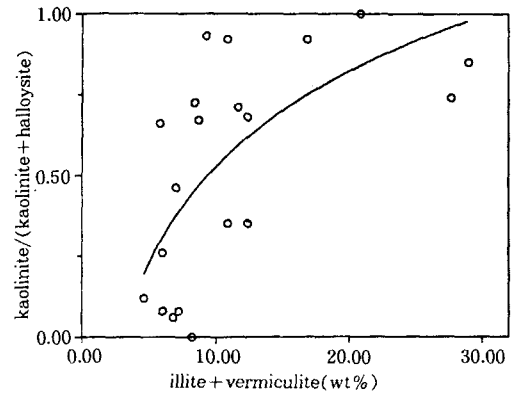


Fig. 9. Plot showing the positive relation between kaolinite content and the sums of illite and vermiculite contents in kaolin samples (Data from Jeong (1992)).

빠른 속도로 캐올리나이트로 변질되어 최종적으로 캐올리나이트의 가상을 형성한다. 한편 캐올리나이트가 흑운모의 화학성분만 물려받아 생성된 것이라면 전체 체적은 흑운모 원체적의 67% 정도로 감소해야 한다 (Stoch and Sikora, 1976). 그런데 오히려 캐올리나이트 가상의 체적이 원래 흑운모 입자보다 크게 증가되었음은 캐올리나이트의 주구성이온인 Si와 Al이 외부 풍화용액으로부터 도입되어 많은 양의 캐올리나이트가 추가로 침전되었음을 의미한다. 최근의 연구들에 의하면 2:1 광물의 노출된 규산염 격자는 캐올리나이트의 에피탁시적 성장(epitactic growth)에 필요한 훌륭한 기저면이 될 수 있다 (Banfield and Eggleton, 1988, 1990; Samotoin and Chekin, 1993; Pevar and Nagy, 1993). 변질 흑운모 입자의 벌어진 엽편 사이 작은 공간에 노출된 편평한 버미클라이트의 규산염 격자는 유사한 격자의 캐올리나이트 결정성장의 기저면 역할을 하는 것으로 생각되며 열극내 풍화용액으로부터 많은 Si와 Al을 침전시켜 캐올리나이트 가상의 크기를 몇 배로 증가시킨 것으로 해석된다.

일라이트는 풍화초기에 단면 하부에서 생성되며 풍화가 진행됨에 따라 다시 캐올리나이트로 변질된다. 일라이트의 생성에는 K의 공급이 필수적이다. 따라서 K의 주 공급원인 흑운모가 초기 단계에 버미클라이트로 변질되므로 일라이트의

생성도 풍화단면 하부에 국한되어 생성되는 것으로 보인다. Garrels(1984)의  $25^{\circ}\text{C}$ 에서  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$ 계의 이온 활동도에 따르면 일라이트의 침전은 높은  $a\text{K}^+/a\text{H}^+$  와  $a\text{SiO}_2$  조건에서 일어난다. 따라서 일라이트가 침전하기 위해서는  $\text{K}^+$ 의 활동도와 pH가 높은 수준에서 유지되어야 한다. 단면하부에서 버미클라이트로 변질중인 흑운모 주변의  $\text{K}^+$  농도는 국지적으로 매우 높다. 사장석의 지속적인 용해반응에 따라 수소이온이 소비되고  $\text{SiO}_2$ 가 방출되므로 하강하는 풍화용액의 pH와  $\text{SiO}_2$ 의 활동도는 계속 증가하게 된다 (TsuZuki and Kawabe, 1983). 일라이트는 이와 같은 조건에서 단면하부 흑운모 열극 부근에 침전된다. 일단 생성된 일라이트는 고령토화가 진전되면 주변 풍화용액의 K 농도가 떨어지게 되고 pH가 낮아지게 되어 계속하여 캐올리나이트로 변질된다. 버미클라이트와 일라이트를 제외한 흑운모의 풍화산물로 아나타제, 침철석등이 가상 주변의 빈 공간이나 가상 표면에 생성되며 이들은 흑운모의 풍화과정에서 방출된 Ti나 Fe를 소비하면서 용액으로부터 침전되어 생성된 것이다.

고령토 내 캐올리나이트와 할로이사이트의 상대적 함량 변화의 가능한 원인으로 지형적인 영향을 들 수 있다. 그러나 현재까지의 조사로는 고도차나 경사도와 같은 지형 조건과 두 광물의 함량 변화 사이의 명확한 상관 관계를 발견하지는 못하였다. 예를 들면 할로이사이트가 풍부한 고령토가 완만한 저지에서 발견되기도 하며 캐올리나이트가 풍부한 고령토가 경사도가 급한 곳에서 발견되기도 한다. 고령토 내 캐올리나이트의 함량이 일라이트 및 버미클라이트의 함량과 정(+)의 관계(Fig. 9)를 보이는 것으로 보아, 버미클라이트 및 일라이트의 주요 모광물(precursor)인 흑운모가 고령토 내 캐올리나이트의 함량에 어느 정도 영향을 미친 것은 거의 확실하다. 물론 할로이사이트와 캐올리나이트 사이의 성인적 관계가 아직 명확하지 않으므로 흑운모의 존재가 고령토 내 캐올리나이트 생성에 있어 유일한 원인이라고 할 수는 없다. 그러나 버미클라이트의 캐올리나이트화 과정에서의 체적 증가, 일라이트의 캐올리나이트화 작용 등은 흑운모의 회장암내 함량은 작아

도 그 몇 배로 고령토 내 캐올리나이트의 생성에 기여한 것으로 보인다.

## 결 론

흑운모는 사장석이나 각섬석등 다른 회장암 구성광물에 비하여 고령토화 초기에 빠른 속도로 변질된다. 흑운모는 먼저 흑운모/버미클라이트 혼합층상광물, 버미클라이트로 변질되며, 버미클라이트는 다시 캐올리나이트로 변질된다. 변질과정에서 입자 밖으로 방출된 Ti와 K는 각각 아나타제와 일라이트로 침전되며 일라이트는 다시 캐올리나이트로 변질된다. 흑운모의 변질이 고령토 내 캐올리나이트의 함량 증가의 유일한 원인이라고 할 수는 없으나 풍화과정에서 상당한 양의 캐올리나이트의 생성을 유도함으로써 고령토 내 캐올리나이트 함량 증가에 상당히 기여하는 것으로 보인다.

## 사 사

본 연구는 기초과학연구소 학술연구조성비 지원에 의한 경상분지 남서부 지역의 지각구조 및 고령토의 물리화학적 특성연구(과제번호: BSRI-94-5402)의 일부이다. 연구비를 지원하여준 학술진흥재단에 감사하는 바이다.

## 참고 문헌

- 정기영, 김수진 (1994), 지질학회지, 30, 262-283.  
 Ahn, J. H. and Peacor, D. R. (1987) Kaolinitization of biotite: TEM data and implications for an alteration mechanism: Amer. Miner. 72, 353-356.  
 Banfield, J. F. and Eggleton, R. A. (1988) Transmission electron microscope study of biotite weathering: Clays Clay Miner. 36, 47-60.  
 Banfield, J. F. and Eggleton, R. A. (1990) Analytical transmission electron microscope studies of plagioclase, muscovite, and K-feldspar weathering: Clays Clay Miner. 38, 77-89.



- Basset, W. A. (1960) Role of hydroxyl orientation in mica alteration : *Bull. Geol. Soc. Amer.* 71, 449-456.
- Brady, N. C. (1990) *The Nature and Properties of Soils*, Maxwell Macmillan.
- Fanning, D. S., Keramidas, 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. (1985b) Biotite kaolinitization in Virginia Piedmont soils : I. Extent, profile trends, and grain morphological effects : *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49, 1290-1297.
- Jackson, M. L., Hseung, Y, Corey, R. B., Evans, 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. (1992) *Mineralogy and genesis of kaolin in the Sancheong district, Korea*. PhD thesis, Seoul National University.
- Jeong, J. G. and Lee, S. M. (1986) Regional metamorphism of anorthositic rocks in Hadong-Sancheong area : in *Memoirs in Celebration of the Sixtieth Birthday of Professor Sang Man Lee*, 87-106 (in Korean).
- Moon, H. -S., Song, Y., Lee, S. Y. (1994) Supergene vermiculitization of phlogopite and biotite in ultramafic rocks, central Korea : *Clays Clay Miner.*, 42, 259-268.
- Norrish, K. (1973) Factors in the weathering of mica to vermiculite in *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, 0-141.
- 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.
- Samotoin, N. D. and Chekin, S. S. (1993) Helical growth of kaolinite crystal in layer silicates; 10th International Clay Conference, Adelaide, Australia, abstracts, P-143.
- Stoch, L. and Sikora, W. (1976) Transformations of micas in the process of kaolinitization of granites and gneisses: *Clays Clay Miner.* 24, 156-162.
- Tsuzuki, Y. and Kawabe, I., 1983, Polymorphic transformations of kaolin minerals in aqueous solutions, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 59-66.
- Weaver, C. E. (1976) The nature of TiO<sub>2</sub> in kaolin: *Clays Clay Miner.* 24, 215-218.
- 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.