

## 강화도 선두리 지역 흑운모 편마암과 화강암에 대한 풍화 특성

### Characterization of Weathering Process in Biotite Gneiss and Granite, Ganghwa Island

김 정 진 (Jeong Jin Kim)<sup>1,\*</sup> · 장 윤 득 (Yun Deuk Jang)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

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

<sup>2</sup>경북대학교 지질학과

(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

요약 : 흑운모 편마암과 화강암에 대한 풍화정도에 따른 광물조성과 화학성분 변화를 X-선회절분석, 전압분석을 통하여 연구하였다. 흑운모 편마암의 주 구성광물은 흑운모, 석영, 사장석이며 화강암의 주 구성광물은 석영, 사장석, 백운모과 약간의 정장석을 포함하고 있다. 풍화가 진행될수록 흑운모 편마암은 버미클라이트와 할로이사이트가 증가하고 화강암은 일라이트와 캐올리나이트가 증가한다. 풍화가 진행될수록 대체로 Na<sub>2</sub>O, CaO, K<sub>2</sub>O가 감소하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 증가하지만, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 값은 흑운모 편마암과 화강암에서 큰 차이를 나타낸다.

주요어 : 풍화, 일라이트, 할로이사이트, 버미클라이트, 캐올리나이트

**ABSTRACT** : X-ray diffraction and chemical analysis were used for mineralogical characteristics of weathering grade of granite and biotite gneiss. Granite is composed mainly of quartz, albite, and minor K-feldspar and biotite gneiss is biotite, quartz, albite. Illite and kaolinite increased in granite, and vermiculite and halloysite in biotite gneiss as increasing weathering process. The percentages of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> increase but that of CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O decrease as the weathering process. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> different from granite and biotite gneiss.

**Key words** : weathering, illite, halloysite, vermiculite, kaolinite

#### 서 언

일반적으로 암석은 높은 온도와 압력 및 물과 공기의 접촉이 없는 환경에서 생성되었기 때문에 낮은 온도와 압력 및 공기와 물의 접촉 등의

이유로 풍화가 발생한다. 높은 온도에서 형성된 규산염 광물들은 대기와 접하는 곳에서는 환경의 변화에 기인하여 불안정하게 된다. 암석의 화학적 및 광물학적 풍화는 주로 용해, 수화, 가수분해, 산화환원, 탄산화 및 킬레이트화 작용

\*교신저자: jjkim@andong.ac.kr

등이 있으나 대부분은 서로 복합적으로 작용하여 암석의 구성성분, 성질 및 조직을 파괴한다. 특히 화강암류의 풍화는 쌍정과 벽개가 잘 발달된 장석과 운모류의 변질에서부터 시작된다(Nagano and Nakashima, 1989; Sharma and Rajamani, 2000).

풍화작용이 일어나는 동안 풍화단면에서의 원소 분포는 강수나 지하수에 의한 원소의 유출이나 유입 등에 의한 원소의 이동과 생성된 이차광물의 조성에 영향을 받는다(Fritz and Regland, 1980; Chesworth and Larroque, 1981). 암석의 풍화도를 결정하는 방법은 풍화산물인 2차 생성 광물의 비율과 결정도를 이용하거나 풍화대의 전암분석을 통한 화학 조성의 변화를 이용한다(Gilkes and Suddhiprakarn, 1979; Harris *et al.*, 1985). 화성암에서 열역학적 자료와 반응 속도론을 기초로 한 풍화과정에서 화학조성의 변화는 풍화초기에는 CaO와 Na<sub>2</sub>O가 감소하다가 말기에는 K<sub>2</sub>O가 감소하면서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 증가되는 경향을 나타낸다(Nesbitt and Young, 1984). 풍화에 대한 연구에 따르면 풍화가 진행되면서 주원소의 변화는 Si, Mg, Ca, Na, P, K는 감소하고, Al, Fe, Mn, Ti는 증가하거나 일정한 값을 유지하는 경향을 보여 주지만 모암의 종류, 풍화 광물의 특성, pH 등에 의해 영향을 받는다(Gouveia *et al.*, 1993; Eggleton, 1987; 문희수 등, 1993; 김수진 등, 1994; Schroeder, *et al.*, 2000; Drever and Zobrist, 1992; Sharma and Rajamani, 2000).

연구지역은 강화군 길상면 망실지 부근(N 37° 38' 11", E 126° 28' 15")의 도로 절개지로 풍화단면을 잘 관찰할 수 있는 지점이다. 강화군 길상면 일대의 지질은 선캠브리아기의 운모편암이 우세한 결정질편암을 기저로 이를 덮고 있는 화강암질 편마암과 이들을 관입한 시대미상의 화강암으로 구성되어 있다(김봉균과 박용안, 1968; 김용준과 오민수, 1978). 연구지역 절개지의 결정질 편암은 대부분 흑운모와 석영으로 구성된 호상편마암으로 흑운모 편마암으로 분류하는 것이 더 타당할 것으로 사료된다.

본 연구의 목적은 강화도 온수리 부근 흑운모 편마암과 화강암을 모암으로 하는 풍화 단면에서 풍화도에 따른 원소 분포와 점토광물의 조성 및 양적 변화를 각각 화학분석과 X-선회절 광물 정량 분석을 통하여 알아보는 것이다.

## 연구방법

실험에 사용한 시료는 흑운모 편마암과 화강암의 경계가 노출된 지역 절개지의 풍화 단면에서 각 모암의 풍화정도를 고려하여 채취하였다. 풍화도에 따라 채취한 시료와 침전법을 이용하여 분리한 점토광물을 감정하기 위하여 Rigaku Geigerflex RAD3-C 모델을 이용하여 X-선회절 분석을 실시하였으며, 분석 조건은 CuK $\alpha$ , 40 kV, 35 mA, 주사속도 1° 2 $\theta$ /min이다. 풍화도에 따른 구성광물의 변화를 SIROQUANT X-선회절 정량분석 프로그램을 이용하여 측정하였다.

전암분석은 모델 PW2400 X-선형광분광분석기를 이용하여 풍화 정도에 따른 주원소의 변화양상에 대하여 연구하였다. 풍화가 거의 진행되지 않은 암석에 대해서 직접 박편을 제작하였으며 풍화가 진행된 시료에 대해서는 초저점도 에폭시로 암석을 균한 다음 박편을 제작하여 편광현미경 관찰을 실시하였다.

## 결과 및 토의

### 야외 조사 결과

시료채취지역 주변의 지질은 결정질 편암, 화강암질 편마암, 화강암 등으로 구성되어 있다. 연구지역의 절개지 풍화단면은 화강암질 편마암과 화강암의 경계가 노출된 지역으로 풍화정도를 잘 관찰할 수 있는 지점이다(Fig. 1A, B, C). 풍화가 많이 진행된 암석에는 틈을 따라 풍화산물인 점토광물이 충전되어 모암의 풍화에 의해 생성되는 점토광물의 특성을 연구하는 데 좋은 자료가 될 수 있다(그림 1D). 풍화가 많이 진행된 흑운모편마암은 붉은색이나 갈색을 띠고 있지만 화강암은 석영을 제외한 다른 광물들은 모두 흰색의 점토광물로 변해 있으며, 모암의 조직을 그대로 갖고 있어 각 암석의 풍화도에 따른 광물조성과 원소들의 변화를 연구하는 데 적당한 지역이다(그림 1E, F).

### 편광현미경 관찰 결과

#### 흑운모 편마암

주 구성광물은 흑운모, 석영, 사장석 등이며

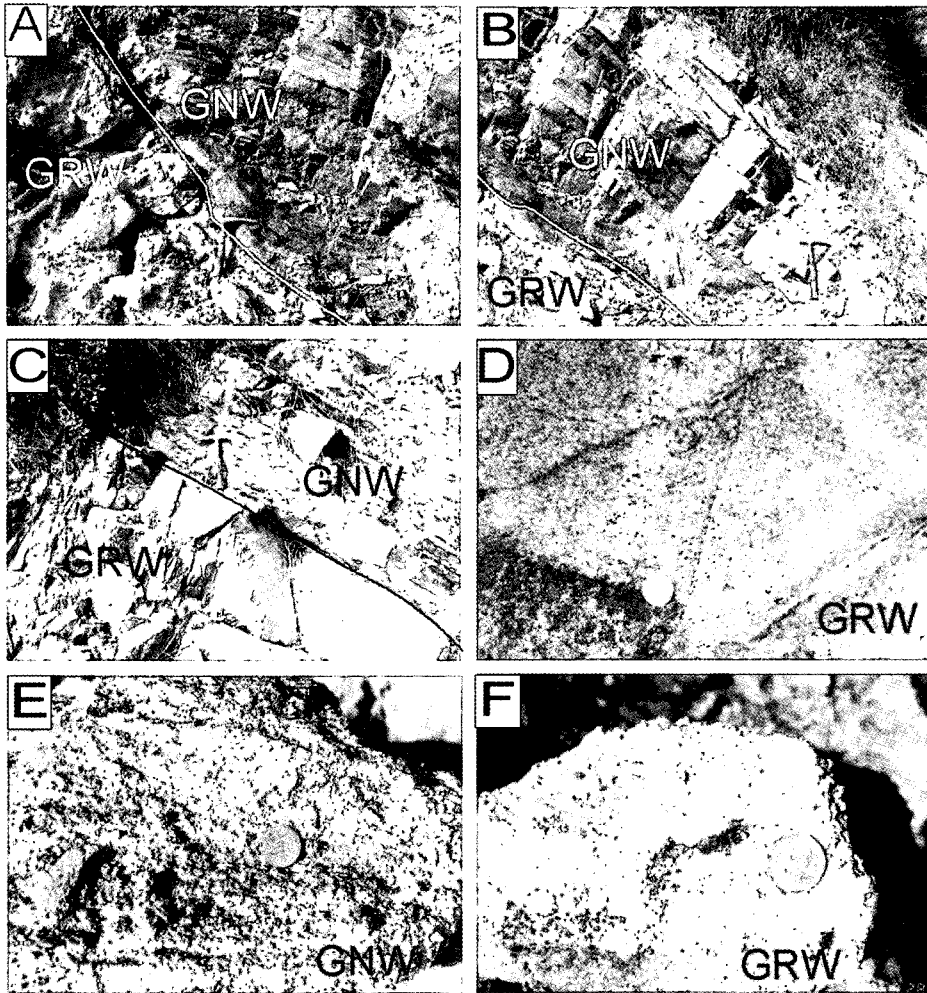


Fig. 1. Weathering profiles contact with biotite gneiss (GNW) and granite (GRW).

대부분이 흑운모로 구성되어 있다. 흑운모는 풍화 정도에 따라 큰 차이를 보여주는 데 풍화가 많이 진행된 시료일수록 회색 내지 암회색의 낮은 간섭색을 보여준다. 이것은 풍화 작용에 의해 흑운모가 점토광물로 변해가는 것이며 처음에는 주로 광물의 경계면이나 벽개면을 따라 변질되지만 풍화가 많이 진행되면 광물 입자 전체는 흑운모의 형태를 갖고 있지만 결정 전체가 점토 광물로 변한 것도 관찰할 수 있다(그림 2A, B). 석영은 다른 광물에 비해 거의 변질이 되지 않았지만 대부분이 파동 소광 현상을 나타내며, 사장석은 풍화 정도에 따라 신선한 입자에서부터 완전히 점토광물로 변한 것들을 관찰할 수 있다(그림 2C).

#### 화강암

주 구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모, 백운모, 점토광물 등이다. 풍화가 진행됨에 따라 주로 사장석이 점토광물로 변한 것을 관찰할 수 있다. 사장석의 풍화는 쌍정면이나 결정의 가장자리 부근을 따라 변질되어 점토광물로 변한 것을 볼 수 있는데 이들은 아주 미세한 입자들로 변해있기 때문에 편광현미경 하에서는 아주 낮은 간섭색을 보여주는 것이 특징이다(그림 2D). 풍화가 많이 진행된 경우 사장석의 결정형태를 갖고 있지만 결정 전체가 점토광물로 변해있는 경우도 쉽게 관찰할 수 있다(그림 2E) 백운모도 가장자리 부근을 따라 풍화가 진행되거나 입자 전체가 변질된 것을 관찰할 수

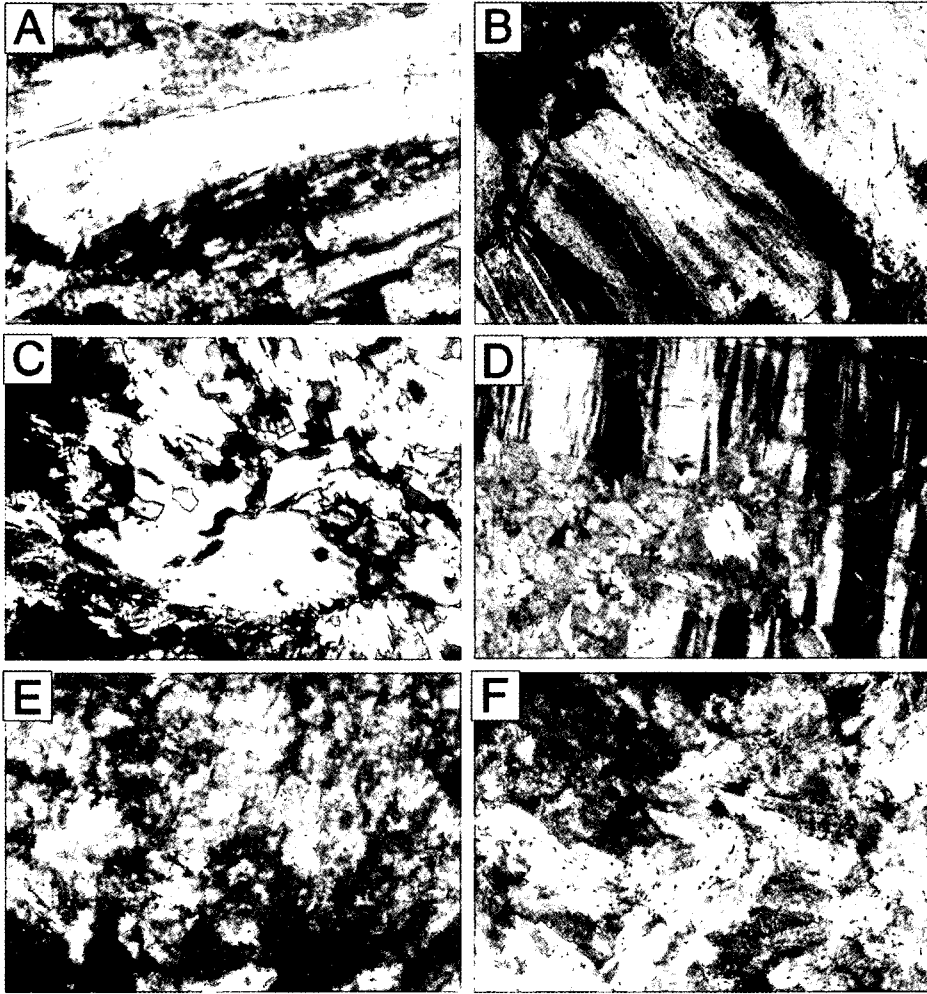


Fig. 2. Microphotography of biotite gneiss (A, B and C) and granite (D, E and F).

있다(그림 2F).

#### X-선회절 분석 결과

##### 흑운모 편마암

Fig. 3은 흑운모 편마암 시료에 대한 X-선 회절선으로 풍화정도에 따라 GNW1 (fresh), GNW2 (moderately weathered), GNW3 (highly weathered)의 세 가지로 분류하였다. GNW1 시료는 풍화가 진행되지 않은 신선한 암석으로 주 구성 광물은 흑운모, 석영, 사장석이며 소량의 정장석을 포함하고 있다. 풍화가 좀더 진행된 GNW2 시료도 GNW1시료와 광물 조성상 큰 차이가 없지만 미약하게 점토광물의 회절선이 나타나

고 사장석의 회절선의 강도가 높게 나타난다. 풍화가 많이 진행된 GNW3 시료는 GNW2 시료에 비해 점토광물에 대한 회절선이 나타나며 주로 할로이사이트와 버미클라이트이다. 편광 현미경 관찰결과 풍화가 많이 진행된 경우 흑운모가 점토광물로 변한 경우 쉽게 관찰할 수 있는데 흑운모의 풍화에 의해 버미클라이트가 생성되었을 것으로 추정된다. 흑운모의 풍화작용에 의해 변질산물로 생성된 캐올리나이트는 풍화초기에는 흑운모에서 버미클라이트로, 버미클라이트에서 캐올리나이트로 변질되지만 지표층가까이에서 산성환경하의 급격한 풍화작용에 의해 흑운모에서 바로 캐올리나이트로 변할 수 있다(Wilson, 1966; Banfield and Eggleton,

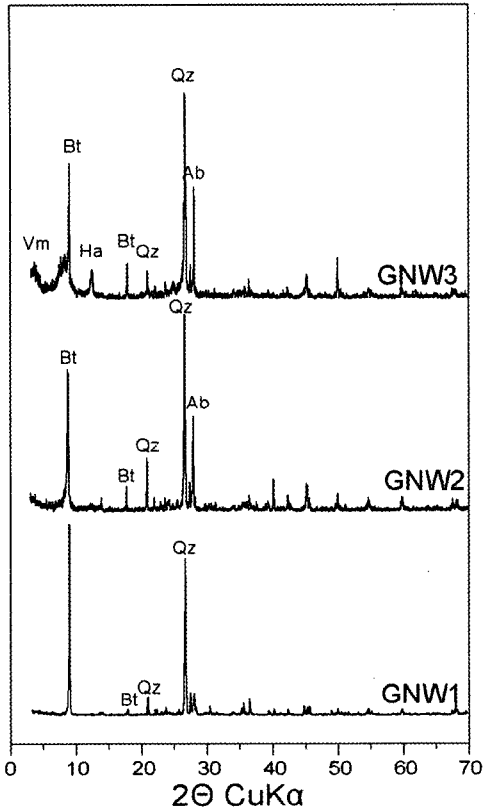


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of biotite gneiss according to weathering grade (Bt: biotite, Qz: quartz, Ha: halloysite, Ab: albite) GNW1 (fresh), GNW2 (moderately weathered), GNW3 (highly weathered).

1988; Lee, 1999). 흑운모의 버미큘라이트화 작용과(Wilson, 1970; Norrish, 1973; Gilkes and Suddhiprakarn, 1979; Banfield and Eggleton, 1988; Moon, *et al.*, 1994) 버미큘라이트의 캐올리나이트화 작용에 대한 연구(Stoch and Sikora, 1976; Harris *et al.*, 1985; Rebertuse *et al.*, 1986; Ahn and Peacor, 1987)가 수행된 바 있다. 그러나 본 연구에서는 흑운모 편마암의 경우 캐올리나이트 보다는 할로이사이트가 주로 나타난다. 풍화가 많이 진행된 시료를 침전법에 의해 점토광물을 분리하여 X-선회절 분석결과 7 Å과 10 Å 할로이사이트가 같이 나타나지만 10 Å 할로이사이트는 가열실험으로 7 Å 변하므로 쉽게 구분할 수 있다(그림 4).

Table 1은 SIROQUNT X-선회절 정량분석 프

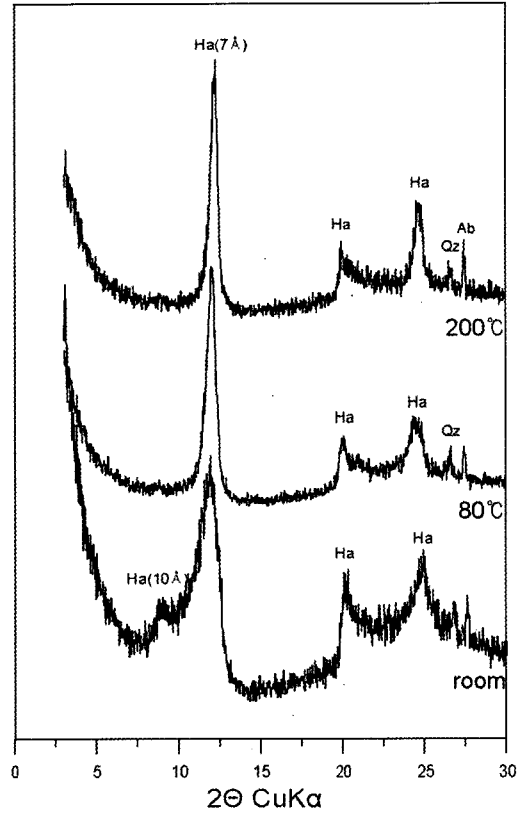


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of halloysite in biotite gneiss heated at given temperature for 3 hours.

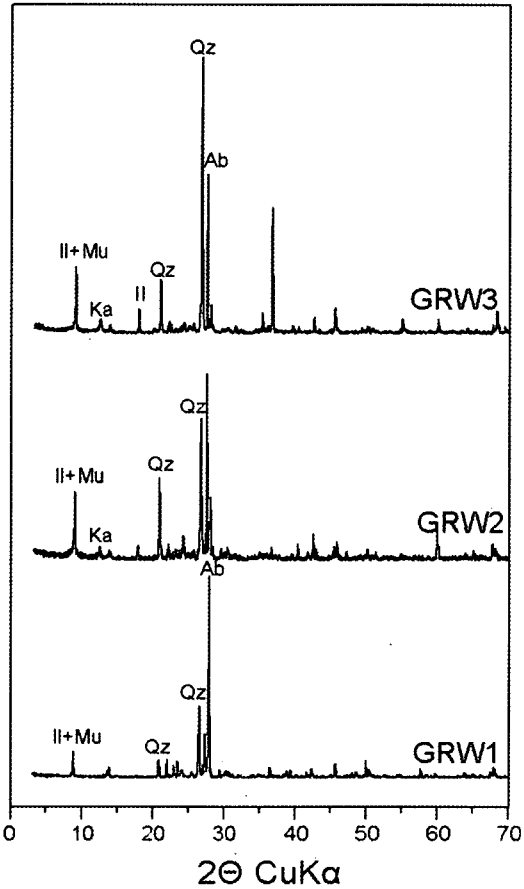
로그래를 이용하여 풍화정도에 따른 흑운모 편마암에 대한 광물의 정량분석결과를 나타낸 것이다. 풍화가 진행될수록 할로이사이트와 버미큘라이트가 증가하며 흑운모의 함량은 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 흑운모의 풍화에 의해 할로이사이트와 버미큘라이트가 생성된 것으로 볼 수 있다.

#### 화강암

그림 5는 화강암 시료에 대한 X-선 회절선으로 풍화정도에 따라 GRW1 (fresh), GRW2 (moderately weathered), GRW3 (highly weathered)의 세 가지로 분류하였다. GRW1 시료는 풍화가 진행되지 않은 신선한 암석으로 주 구성 광물은 석영, 사장석, 백운모이며 소량의 흑운모를 포함하고 있다. 풍화가 진행될수록 일라이트와 캐올리나이트의 함량이 증가하고 사장석의 함

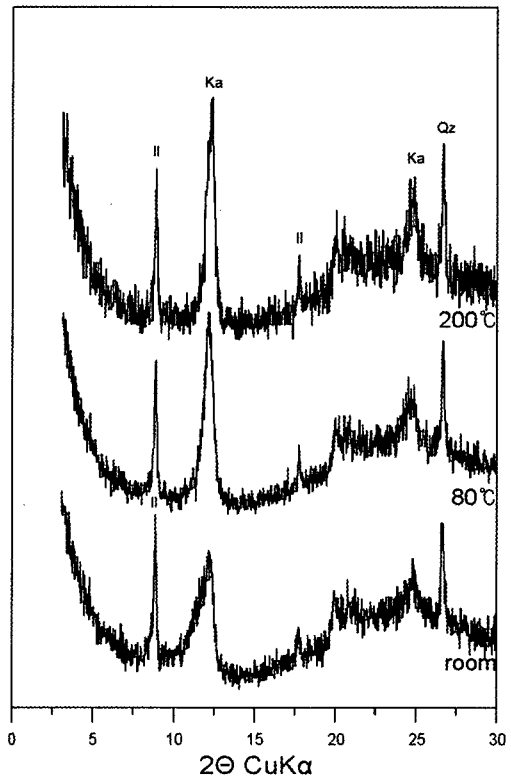
**Table 1.** Quantitative analysis with weathering grade of biotite gneiss

Sample No.	Quartz	Halloysite	Albite	Biotite	Vermiculite	Total
GNW1	38.2	0	4.3	57.5	0	100
GNW2	42.3	3.2	15.2	35.2	4.1	100
GNW3	45.5	12.4	14.7	15.2	12.2	100



**Fig. 5.** X-ray diffraction patterns of granite according to weathering grade (Il: illite, Mu: muscovite, Qz: quartz, Ka: kaolinite, Ab: albite) GRW1 (fresh), GRW2 (moderately weathered), GRW3 (highly weathered).

량이 상대적으로 감소한다. 편광현미경 관찰결과 사장석의 풍화는 초기에는 결정의 가장자리와 쌍정면을 따라 풍화가 진행되지만 풍화가 많이 진행된 경우 사장석 결정전체가 점토광물로 변해 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 사장석의 풍화에 의해 캐올리나이트와 일라이트



**Fig. 6.** X-ray diffraction patterns of illite and kaolinite in granite heated at given temperature for 3 hours.

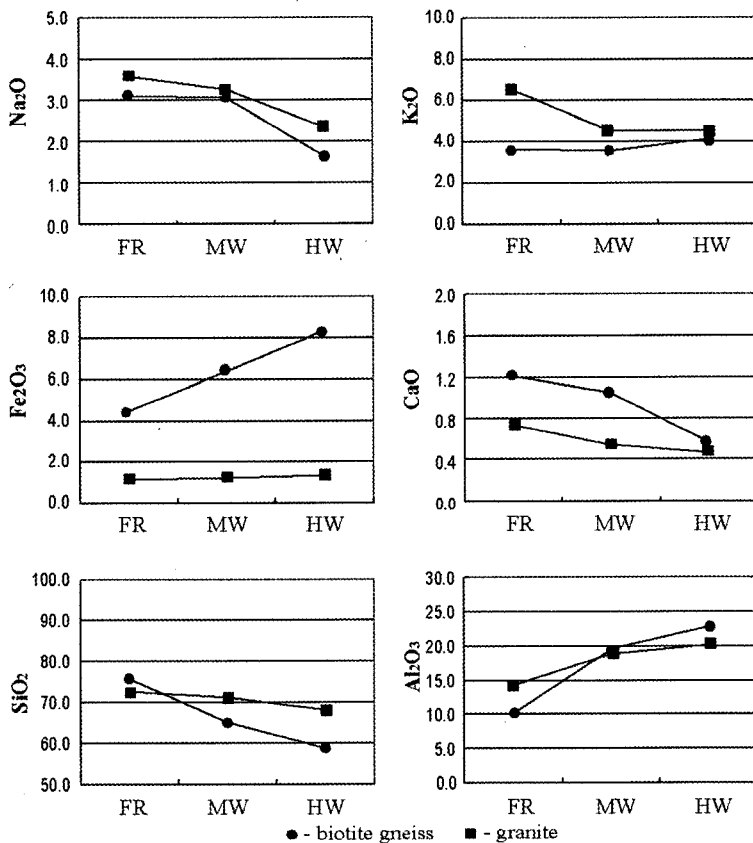
가 생성되었을 것으로 추정된다. 풍화가 많이 진행된 시료를 침전법에 의해 점토광물을 분리하여 X-선회절 분석결과 일라이트와 캐올리나이트로 구성되어있다(그림 6). 온수화강암에 대한 풍화작용 연구에 의하면 풍화 작용에 의해 생성된 캐올린 광물은 포름아미드 처리 실험결과 캐올리나이트와 할로이사이트가 혼합되어 있으며, 흑운모 편마암의 풍화산물은 대부분 할로이사이트다(문희수와 김신애, 1989). 사장석의 풍화는 야외 조사에서도 쉽게 관찰할 수 있는데 풍화가 많이 진행된 암석에서 석영 입자

**Table 2.** Quantitative analysis with weathering grade of granite

Sample No.	Quartz	Kaolinite	Albite	Muscovite (Illite)	K-feldspar	Total
GRW1	12.8	0	71.2	12.4	3.6	100
GRW2	36.5	9.5	22.4	28.4	3.2	100
GRW3	49.4	10.8	4.2	32.2	3.4	100

**Table 3.** Whole rock analysis of weathering profile with weathering grade from biotite gneiss (GNW) and granite (GRW)

Sample No.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
GNW1	75.13	9.80	4.53	0.56	0.06	0.69	1.21	3.18	3.69	98.86
GNW2	64.35	19.26	6.43	0.63	0.06	1.03	1.06	3.12	3.60	99.54
GNW3	58.16	22.51	8.36	0.87	0.08	1.75	0.60	1.72	4.14	98.18
GRW1	72.45	14.21	1.16	0.15	0.03	0.04	0.74	3.59	6.56	98.93
GRW2	71.25	18.81	1.27	0.15	0.02	0.03	0.55	3.26	4.53	99.88
GRW3	68.25	20.17	1.33	0.15	0.02	0.06	0.47	2.35	4.49	97.29



**Fig. 7.** Variation of major elements with weathering grade (FR: fresh, MW: moderate weathered, HW: highly weathered).

는 관찰할 수 있으나 사장석은 거의 관찰할 수 없고 대신에 미세한 분말형태의 점토광물화 된 것을 관찰할 수 있다.

표 2는 SIROQUNT X-선회절 정량분석 프로그램을 이용하여 풍화정도에 따른 화강암에 대한 광물의 정량분석결과를 나타낸 것이다. 풍화가 진행되면서 캐올리나이트와 일라이트가 증가하며 사장석이 급격히 감소한다. 이것은 사장석의 풍화 산물로 캐올리나이트가 생성된 것으로 추정할 수 있다.

### 암석 화학

풍화과정에서 주원소의 변화를 전암분석을 통하여 알아보았으며 풍화정도가 다른 각 암석 시료에 대한 분석값은 표 3과 같다. 암석의 화학적 풍화정도는 전암분석의 결과를 이용하여 구할 수 있으며, 풍화가 진행될수록  $Al_2O_3$ 의 함량이 증가하고  $CaO+Na_2O+K_2O$ 의 함량이 감소하는 경향을 보여주며 이는 암석내의 장석이 풍화되어 점토광물화 하였음을 지시해준다(Miura, 1973; Shirahata and Suzuki, 1985).

흑운모편마암과 화강암에서 풍화가 진행되면서 증가하는 성분은  $Al_2O_3$ 이며 감소하는 성분은  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ 이다. 이것은 풍화가 진행되는 동안  $CaO$ 나  $Na_2O$  성분이 용탈되어 이 성분이 감소하며, 점토광물이 생성되면서 상대적으로  $Al_2O_3$  성분이 증가한 것으로 추정된다. 일반적으로 풍화작용이 진행되는 동안 지표수 환경에서  $Al_2O_3$ 은 불용성으로 비교적 유동성이 작은 것으로 알려져 있지만 본 연구에서는 풍화가 진행될수록 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 사장석이나 흑운모가 풍화작용동안 버미쿨라이트나, 일라이트, 할로이사이트, 캐올리나이트 등으로 변화하면서  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  등의 유실로 상대적으로 증가되는 경향을 보이는 것으로 생각된다. 사장석이 용해되어 캐올리나이트와 깃사이트를 형성하는 풍화과정에서 화학조성이  $Al_2O_3$ 가 증가하며,  $Al_2O_3$ 에 대한 알칼리 원소의 변화를 나타내는 화학적 풍화지수에서 풍화작용이 진행되면서 유동성이 작은  $Al_2O_3$ 는 시료에 잔류하고 있는 반면 알칼리 원소들은 용액에 쉽게 녹아  $Al_2O_3$ 값의 비가 증가하게 된다(Nesbitt and Young, 1984).

풍화가 진행됨에 따라 대부분의 성분 변화는

흑운모 편마암과 화강암에서 유사한 경향을 보이지만,  $Fe_2O_3$ 의 경우 상이한 변화를 나타낸다. 흑운모편마암은 풍화가 진행됨에 따라  $Fe_2O_3$ 가 급격히 증가하지만 화강암의 경우 거의 변화가 없이 일정하게 유지된다.  $Fe_2O_3$ 의 함량을 결정하는 광물은 주로 흑운모로 흑운모화강암의 경우 풍화가 진행됨에 따라  $Na_2O$ 와  $CaO$ 가 감소하는 것으로 보아 사장석이 흑운모 보다 풍화가 우세하게 진행되는 것으로 볼 수 있다.  $K_2O$ 는 화강암에서는 풍화가 진행될수록 감소하지만 흑운모편마암은 큰 변화를 나타내지 않는다. 따라서 흑운모 편마암에서 풍화가 진행됨에 따라  $K_2O$ 의 유실은 크지 않는 것으로 볼 수 있다.

### 결 언

강화도 온수리 지역 흑운모편마암과 화강암의 경계부근 절개지에서 나타나는 풍화단면에서는 암석의 종류에 따라 풍화 정도의 차이가 있지만 지표면 부근에는 풍화가 심하게 진행되었어도 모암의 조직을 유지한 형태로 나타나기 때문에 풍화정도에 따른 광물조성과 원소의 변화를 연구하는데 아주 적합하다.

풍화단면에서 풍화정도에 따라 채취한 시료들에 대한 연구 결과 풍화가 진행되면 점토광물의 양이 증가하지만 흑운모편마암은 버미쿨라이트와 할로이사이트가 생성되며, 화강암의 풍화에 의해 생성된 점토광물은 주로 일라이트와 캐올리나이트이다. 사장석의 풍화는 초기에는 결정의 가장자리와 쌍정면에서 집중적으로 변질현상이 나타나지만 풍화가 많이 진행된 경우 형태는 그대로 유지한 채 결정 전체가 점토광물로 변한다.

흑운모편마암과 화강암에서 풍화가 진행되면서 증가하는 성분은  $Al_2O_3$ 이며 감소하는 성분은  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ 로 풍화가 진행되는 동안  $CaO$ 나  $Na_2O$  성분이 용탈되어 이 성분이 감소하며, 점토광물이 생성되면서 상대적으로  $Al_2O_3$  성분이 증가한 것으로 추정된다. 일반적으로 풍화작용이 진행되는 동안 지표수 환경에서  $Al_2O_3$ 은 불용성으로 비교적 유동성이 작은 것으로 알려져 있지만 본 연구에서는 풍화가 진행될수록 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 사장석이나 흑운모가 풍화작용동안 버미쿨라이트나, 일라이트, 할로이사이트, 캐올리나이트 등으로 변화



면서 CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O 등의 유실로 상대적으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 증가되는 경향을 보이는 것으로 생각된다.

흑운모편마암은 풍화가 진행됨에 따라 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 급격히 증가하지만 화강암의 경우 거의 변화가 없이 일정하게 유지된다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량을 결정하는 광물은 주로 흑운모로 흑운모 화강암의 경우 풍화가 진행됨에 따라 Na<sub>2</sub>O와 CaO가 감소하는 것으로 보아 사장석이 흑운모 보다 풍화가 우세하게 진행되는 것으로 볼 수 있다. K<sub>2</sub>O는 화강암에서는 풍화가 진행될수록 감소하지만 흑운모편마암은 큰 변화를 나타내지 않는 것으로 보아 흑운모의 풍화에 의해 K<sub>2</sub>O의 유실은 크지 않는 것으로 생각된다.

## 사 사

본 논문 심사과정에서 논문 내용 개선에 좋은 조언을 해주신 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 홍세선 박사님과 지하수지열연구부 박기화 박사님께 진심으로 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

김봉균, 박용안 (1968) 강화도의 지질개요. 대한지질학회지, 4, 31-39.

김수진, 이민성, 김원사, 이수재 (1994) 서울지역의 자연환경 변화에 관한 연구: 남산 화강암의 풍화에 관한 환경광물학적 연구. 대한지질학회지, 30, 284-296.

김용준, 오민수 (1978) 강화도 동남부에 분포하는 소위 강화 섬장암질암에 대하여. 광산지질, 11, 47-58.

문희수, 김신애 (1989) 강화도 온수리 지역 화강암의 풍화작용에 의한 카올리나이트의 형성. 광산지질, 22, 65-80.

문희수, 송윤구, 신상은 (1993) 질석화가 진행된 풍화단면에서의 광물조성과 주원소의 변화. 자연환경지질학회지, 26, 29-40.

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. (1988) Transmission electron microscope study of biotite weathering. Clay and Clay Miner., 36, 47-60.

Chesworth, W., Dejoux, 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 kaolinitization 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. PhD thesis in Seoul National University, 200p.

Miura, K. (1973) Weathering in plutonic rocks; Weathering during late Pliocene of Gotsu plutonic rocks. Engineering Geol., 14, 87-102.

Moon, H.S., Song, Y., and Lee, S.Y. (1994) Supergene vermiculitization of phlogopite and biotite in ultramafic rocks, Central Korea. Clays Clay Miner., 42, 259-268.

Nagano, T. and Nakashima, S. (1989) Study of colors and degrees of weathering of granitic rocks by visible diffuse reflectance spectroscopy. Geochem. Jour., 23, 75-83.

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.

Norrish, K. (1973) Factors in the weathering of mica to vermiculite in Proc Int. Clay Conf., Madrid, 417-432.

Rebertuse, 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.
- 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 rate. *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.
- Shirahata, H. and Suzuki, T. (1985) Variation in the concentrations of trace metals Ba, Sr, Li and Rb in granodiorite from southwestern Hokkaido during chemical weathering. *J. Japan Assoc. min. Petr. Econ. Geol.*, 80, 1-12.
- Stoch, L. and Sikora, W. (1976) Transformations of micas in the process of kaolinitization of granites and gneisses. *Clays Clay Miner.* 24, 156-162.
- Wilson, M.J. (1966) The weathering of biotite in some Aberdeenshire soils. *Mineral Mag.*, 35, 1080-1093.
- 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.
- 
- 2006년 3월 12일 원고접수, 2006년 3월 20일 게재승인.