화학적 풍화에 의한 결정질 암석내의 미세조직 발달특징과 암반공학적 의미

추창오 · 정교철*

국립안동대학교 지구환경과학과

Characterization of Microtextures formed by Chemical Weathering in Crystalline Rocks and Implications for Rock Mechanics

Chang Oh Choo and Gyo-Cheol Jeong*

Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Korea

암석의 풍화작용은 암석의 강도를 약화시키고 궁극적으로는 지질공학적 대상물의 안정성을 저하시키게 된다. 화학적 풍화지수와 같이 암석의 풍화등급을 이용하여 암반의 안정성을 평가하는 여러 가지 지표가 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 편광현미경 관찰, XRF 전암분석에 의한 화학적 풍화지수, X-선회절(XRD)분석에 의한 광물의 종류와 함량분석, 전자현미경(SEM/EDS)에 의한 미세조직 분석, BET측정법에 의한 기공크기와 비표면적 분석, 미소촉점 X-선 CT 등을 이용하여 결정질 암석(편마암, 화강암)의 풍화도와 미세조직, 공극의 특성을 분석하였다. 이차광물의 생성과 미세구조의 발달특징은 광물의 용해, 침전, 파쇄반응과 같이 복합적인 요소에 의하여 영향을 받게 된다. 그러므로 단순히 전암분석치를 이용하여 계산하는 풍화지수(CIA, CWI 등)와 같은 기존의 화학적 풍화지표들은 암석의 풍화정도를 제대로 반영하지 못함이 밝혀졌다. 따라서 이 외에도 광물조성비, 미세조직, 미세공극의 특성을 고려한 새로운 평가기법이 요구된다.

주요어 : 풍화작용, 전자현미경, BET, 미소촉점 X선 CT, 미세조직, 미세공극

Weathering can reduce rock strength and eventually affect the structural stability of a rock mass, which is important in the field of engineering geology. Several methods have been developed to evaluate the degree of weathering, including the chemical weathering index. In this study, we analyzed the weathering degree and characteristics of microtextures and pores in crystalline rocks (gneiss and granites) based on petrographic observations, the chemical weathering index, mineralogy by XRD, microtextural analysis by SEM/EDS, measurements of pore size and surface area by the BET method, and microporosity by X-ray CT. The formation of secondary minerals and microtexture in gneiss and granitic rocks are assumed to be affected by complex processes such as dissolution, precipitation, and fracturing. Hence, it is clear that some chemical weathering indices that are based solely on whole-rock chemistry (e.g., CIA and CWI) are unable to provide reliable assessments of the degree of weathering. Great care is needed to evaluate the degree of chemical weathering, including an understanding of the mineralogy and microtexture of the rock mass, as well as the characteristics of micropores.

Key words : weathering process, SEM, BET, X-ray CT, microtexture, micropore

서 언

암석의 역학적 특성과 관련한 풍화 및 수리학적 특성은 암석의 내부구조, 특히 공극 및 크랙 구조에 크게 의존한다(정교철과 Takahashi, 2010). 지표나 천부지하에서 비가 역적, 자발적으로 진행되는 풍화작용은 노출된 암석의 강도를 쉽게 약화시키는데, 특히 역학적, 화학적 작용이

복합적으로 작용하여 일어난다. 특히 사면의 암석이 풍화되어 형성되는 풍화토는 노출사면의 안정성에 심각한 위험요소가 된다. 풍화토는 공기중에 노출됨과 동시에 풍화가 급속하게 진행되어 토공구조물에 심각한 영향을 줄 수 있으며, 입도가 불량하고 수분에 민감하여 다짐관리가 어려우며, 사면 표면에서 유실이 심각하게 발생한다. 암석의 풍화는 화학조성의 변화 없이 물리적으로 분

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

리되는 물리적 풍화작용과 수분이나 그 속에 포함된 다른 화학성분의 화학적인 반응에 의하여 광물이 용해되는 화학적 풍화작용이 지배적인데, 암석의 안정성은 암석을 파괴, 분해하는 풍화작용과 직접적인 상관관계가 있다. 예를 들면, 사면, 비탈면과 같이 지표에 노출된 암석은 대기, 지하수, 강우 등의 영향에 의하여 풍화작용이 가속되며, 풍화작용은 암석을 구성하는 광물의 화학적 성질을 변화시켜, 암석의 안정성을 저하시킨다. 그 중에서도 특히 암석에 발달하는 균열이나 미세공극과 같이 불연속면은 물의 흐름통로가 되기 때문에 암석의 안정성에 매우 중요한 인자가 된다. 암반사면은 다수의 불규칙한 패턴의 불연속면들이 내재되어 있는 불연속체로서 암반 내에 존재하는 절리는 암반의 수리적, 역학적 거동을 좌우하는 중요한 요소가 된다(김만일 외, 2008; 김재홍 외, 2009).

암석의 풍화민감도 분석은 노출된 암석들이 지표환경에서 지하수, 강우(산성비), 대기오염물질 등의 여러 가지 영향이 암석의 강도에 영향을 주는 정도를 정량적으로 예측하는 방법이다. 특히 암석의 지구화학적 분석을 통하여 특정원소의 함량비를 이용하는 화학적 풍화지수(chemical weathering index)는 다양한 공식으로 표현되는데, 이는 풍화정도에 따라서 이동성, 비이동성 원소의 함량비가 달라지는 지구화학적 원리에 기초하고 있다(Vogt, 1927; Reiche, 1943; Parker, 1970; Vogel, 1973; Nesbitt and Young, 1982; Harnois, 1988). 풍화가 진행됨에 따라 저온에서 안정한 광물인 점토광물이 생성되며, 이렇게 형성된 점토광물은 함수특성이 높고 역학적 강도가 낮아서 풍화를 더욱 가속시키게 된다. 특히 점토광물 중에서 팽윤성 광물의 존재유무를 파악하면 사면의 풍화정도와 지반의 안정성을 구체적으로 예측할 수 있다.

본 연구의 목적은 암석의 풍화특성 분석을 통하여 풍화진행에 따른 암석내 미세조직, 미세공극의 발달특징을 관찰하고, 측정함으로써 풍화암의 지질공학적 특성변화를 정량적으로 접근하여 암반의 안정성 해석의 기초자료로서의 가능성을 제시하는 데 있다. 이를 통하여 다양한 암반의 역학적 안정성 해석뿐만 아니라, 풍화사면의 보호공법 선정 기초자료, 풍화특성을 고려한 암반의 물성 변화 민감도 정립, 역학적 설계정도 결정 근거자료 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

연구방법

일반적으로 암반의 풍화와 관련한 물성변화는 광물학적 특성과 화학적 풍화에 의한 주성분의 특성변화를 통하여

나타난다. 따라서 본 연구에서는 화학적 풍화특성분석과 풍화산물로 형성되는 이차광물의 광물학적 특성변화를 분석하였다. 이를 위하여 편마암(3개)과 화강암(2개)을 대상으로 X선 형광분석(XRF)을 실시하여 풍화지수를 산정하고 암석의 지구화학적 성분변화를 검토하였다. 풍화에 따른 광물조직 변화, 이차광물 분석을 위하여 현미경에 의한 광물조직관찰, X선 회절분석(XRD) 및 광물정량 분석, 주사전자현미경(SEM)을 실시하였으며, 암석내 미세균열, 미세공극의 분포특징과 크기를 BET 등온흡착법과 미소촉점 X선 CT를 이용하여 측정하였다.

암석시료

암석시료는 화강편마암질 분포지 노두단면에서 풍화대별로 구분이 뚜렷한 지점에서 대표시료 3개(S4, S7, S15)를 채취하였으며, 화강암 분포지역의 시추코어에서 2개(C1, C3)를 채취하였다. 코어화강암은 ISRM 기준 NX코어로서 직경 10 mm로 오버 코어링한 것을 사용하였다. 육안상 관찰시 암석시료는 표면에서 미세절리가 일부 발달하며, 원암의 상태를 비교적 잘 보존하고 있다.

편마암은 우백질에 가까우며 석영, 장석류와 같은 알루미눔규산염과 같은 유백색 광물이 주를 이루며, 흑운모, 각섬석과 같은 유색광물이 소량으로 함유된다. 입자의 크기는 대부분 중립질에 가까우며, 석영은 비교적 풍화에 강하여 입자의 형태를 잘 유지하고 있으며, 장석류는 연회색, 미색, 연갈색 등을 띠며 풍화정도에 따라서 약간 상이한 조직을 보여준다. 풍화작용을 받은 시료는 갈색, 적갈색의 철광물이 암석을 피복하거나, 절리틈새를 따라 채우고 있다. 그럼에도 암석은 전반적으로는 편마암질의 특성을 잘 유지하고 있다.

화강암의 경우 심도에 따라서 풍화특성은 상이한데 신선한 암석인 C1의 경우 조립질의 석영, 사장석, 정장석, 운모로 구성되어 있으며 전형적인 화강암의 조직특성을 보여 준다. 반면에 풍화가 심하게 진행된 C3의 경우, 장석질의 대부분은 유백색의 점토질로 변질되어 있으며, 흑운모, 각섬석과 같은 유색광물은 적갈색, 흑색의 철산화물로 변질되어 있어 원래 입자의 형태를 관찰하기 어렵다. 이 암석에는 미세절리가 잘 발달해 있는데, 이들 미세절리에는 점토나 철산화물이 다수 충전되어 있다.

분석법

암석을 박편(thin section)으로 제작하여 편광현미경 관찰에 의한 모드분석을 실시하였다. 현미경 하에서 구성광물의 비 측정은 통상적인 포인트계수법의 모드분석

외에도 구성광물의 면적비를 계산하는 픽셀분석법에 의한 이미지분석법(Image J)을 통하여 주요 광물의 함량비를 정확하게 측정하였다.

구성광물의 종류와 함량분석을 위해서 XRD 분석을 실시하였으며, 이때 Philips사의 모노크로미터가 장착된 X' Pert-PRO/MRD 모델을 이용하였다. XRD의 분석조건은 5~65도 2θ범위에서 Ni-filtered Cu-Kα(1.54056 Å)선을 이용하였고, 가속전압 및 전류는 35 kV/25 mA, 측정방법은 연속 스텝 스캐닝으로 스텝당 0.5초를 적용하였다. 분석한 회절선은 현재 가장 신뢰도가 높고 범용화되어 있는 Siroquant v.3 프로그램을 이용한 리트베틀(Rietveld)법으로 광물의 종류와 함량을 정량분석하였다.

구성광물의 미세조직 관찰은 한국기초과학지원연구원 대구센터 소재 전계방출형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, HITACHI model S-4200)과 안동대학교 공동실험실습관 소재 주사전자 현미경(SEM, Scanning Electron Microscopy, Jeol JSM-6300)을 이용하여 실시하였으며, 이에 부착된 에너지 분산 스펙트럼(energy dispersive spectrum, EDS)으로 화학분석을 실시하였다. EDS스펙트럼의 중첩현상을 피하고 해상도를 높이기 위하여 시편을 백금(platinum)으로 코팅하여 제작하였다. SEM 관찰시의 가속전압과 전류는 각각 20 kV 및 10 nA이다.

암석의 BET 비표면적은 비표면적 측정기(Specific Surface Area Analyzer, Micromeritics ASAP-2010)로 안동대학교 공동실험실에서 측정하였다. 미소초점 X선 CT는 일본 연구소에서 HMX225 모델을 사용하였다.

전암의 화학분석은 한국기초과학연구원 서울센터 X선 형광분석기(X-ray fluorescence spectrometer, Philips PW2404 XRF)로써 분석하였다. 이때 분석항목은 SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, MgO, MnO, Na₂O, CaO, K₂O, P₂O₅이다. 철은 기기분석의 특성상 3가로 간주하였으며, 열에 의한 함수성분의 변화를 분석하기 위하여 작열감량(loss on ignition, LOI)을 함께 측정하였다.

결과 및 토의

현미경적 미세조직

편광현미경하에서 관찰할 시, 편마암(S4, S7, S15)에서 흔히 수반되는 광물로는 석영, 미사장석, 정장석, 흑운모, 백운모, 저어콘 등이 주를 이룬다(Fig. 1). 또한, 기존의 조암광물이 풍화변질되어 형성된 극미립의 견운모질 점토광물, 흑운모와 같은 함철광물로부터 유래한 녹니석

Fig. 1. Petrographic textures of thin sections (crossed nicols) of samples S4 (a, b), S7 (c, d), and S15 (e, f). Q: quartz, F: feldspar, B: biotite, Mc: muscovite.

(chlorite), 미정질의 철산화물 등이 관찰된다. 본 암석에서 풍화변질로 형성되는 점토광물은 주로 장석류와 수반되는 것이 특징이다. 이들 점토광물은 장석과 같은 기존의 알루미늄 규산염이 물과 산소가 풍부한 환경에서 부분적으로 분해되는 비조화용해(incongruent dissolution)과정을 거쳐 형성된다. 구체적으로 보면 S4의 경우, 육안으로도 풍화가 어느 정도 진행되어 있음을 알 수 있다(Fig. 1(a), (b)). 결정내부에서 균열이 많이 발달하며, 유색광물은 용탈되거나, 함철성분이 산화되어 빠져나와 부분적으로 철산화물로 피복되거나, 철산화물은 산점상으로 불규칙하게 분포한다. 대부분 결정의 입자는 상당히 파쇄화 되어 있으며, 균열이 다수 발달한다. 주요 광물로는 석영, 장석류가 대부분을 차지하며, 운모류가 일부 포함된다. 운모류는 주로 흑운모로 구성되며, 백운모는 거의 관찰되지 않는다. 석영은 일차적 기원인 조립질 석영과 변성작용동안 용해되어 나온 실리카가 재결정화 되어 형성된 자형의 미정질 석영으로 세분된다. 조립질의 석영은 변성작용 동안 결정축이 뒤틀려 약한 파쇄소광을 보이며, 입자의 가장 자리는 파쇄되거나, 입자 내부에서 불규칙한 방향으로 균열이 발달한다. 미정질의 석영은 입자들간 접촉면이 직선적이며, 120도로 접합되는데, 대부분 자형으로서 등립질에 가깝다. 이들은 고도변성 작용하에서 재결정화된 것들인데, 고온, 고압에서 형성되어 평행소광이 특징적이다.

이차기원의 미정질 석영은 일차기원 조립질 석영에 비하여 균열이 적다. 장석류는 풍화변질로 인하여 가장자리가 용식되거나, 불규칙한 경계를 보인다. 장석류는 정장석과 미사장석이 우세하며, 사장석은 소량으로 함유된다. 정장석은 풍화변질작용을 받아 극미립질의 점토광물로 변화거나, 입자가 파쇄되어 많은 균열을 보인다. 미사장석도 정장석과 비슷하게 풍화변질 작용을 많이 받아 점토광물이 형성되어 있다. 운모류는 상당히 풍화변질되어 특징적인(001)면 기저벽개(basal cleavage)나 특징적인 암갈색의 간섭색을 보이지 않는다. 풍화변질된 흑운모에서 철성분이 빠져나와 흑운모 내부 또는 결정경계부에 재침전되어 비정질의 철산화물 집합체를 형성한다. 흑운모는 부분적으로 녹니석으로 변질되어 있는데, 이는 광학적 특징으로 쉽게 구분된다. 공극이나 균열은 풍화변질 작용에 의하여 형성되는데, 특히 입자경계부를 따라 발달한다. 공극이나 균열은 점토광물과 같은 이차광물이 유실되어 빠져나간 자리나, 물리적 파쇄부에 해당한다. 이 암석시료는 풍화변질을 많이 받아 타 시료에 비하여 공극이나 파쇄균열의 비율이 상대적으로 높다.

보다 신선한 암석인 S7의 경우, 비교적 치밀한 조직을 보여 준다(Fig. 1(c), (d)). 조립질 석영은 파쇄소광을 보이며, 미정질 석영은 등립조직을 보이는 데 고도변성 작용 동안 재결정화 되었다. 미사장석과 정장석은 일부 약하게 변질된 조직을 보이나, 대체로 신선한 상태를 보인다. 흑운모는(001)면 기저벽개가 구분되지 않고, 함철성분이 주변에 침전한 것으로 보아 풍화변질 작용을 다소 받았음을 보여준다.

S15에서는 조립질의 석영, 장석류가 대부분을 차지하며, 재결정화 된 미정질 석영은 치밀하게 접촉한다(Fig. 1(e), (f)). 정장석은 풍화변질 된 부분이 혼한데, 결정의 내부에서 일라이트질 점토광물이 풍부하게 형성되어 있다.

화강암 시료인 C1의 경우 육안상으로는 신선한 암석이며, C3는 심하게 풍화된 특징을 보인다. 현미경 관찰결과, C1은 입자의 접촉면이 비교적 잘 유지되어 있으나, 입자내부와 접촉부에서 미세균열이 다수 발달한다(Fig. 2). 흑운모는 기저벽개가 잘 보존되어 있으나, 입자내부와 가장자리에서 철산화물이 일부 형성되어 있으며, 전형적인 간섭색은 소멸된 상태이다. 사장석과 정장석의 내부에 점토광물이 불규칙하게 형성되어 있으며, 미세질리나 균열이 다수 발달한다. 풍화가 심한 C3의 경우, 흑운모의 가장자리에서 철산화물이 집중적으로 형성되어 있다(Fig. 3(a)). 사장석에는 점토광물이 산점상으로 형성되어 있으며(Fig. 3(b)), 풍화저항성이 높은 광물인 저어콘도 가장자

Fig. 2. Petrographic textures of a thin section of sample C-1 (crossed nicols). Q: quartz, P: plagioclase, B: biotite, CL: clay minerals.

Fig. 3. Petrographic textures of a thin section of sample C-3 (crossed nicols). Q: quartz, P: plagioclase, B: biotite, zir: zircon, HFO: hydrous ferric oxide.

리 부분에서 변질된 조직을 보여 준다(Fig. 3(c)), 이 외에도 장석류와 석영은 파쇄되어 다수의 미세균열이 발달한다. 철산화물은 불규칙한 입자특징을 보이는데(Fig. 3(d)), 이는 흑운모와 같은 철함유 광물로부터 철이 용해되어 인근에 침전한 것이다. 철함량이 높은 흑운모는 용해되어 빠져나온 철이 흑운모의 자리에 주로 침전하는데, 흑운모의 용해속도는 엣지(edge)나 기저면에서 차이가 있다(Murakami et al., 2003).

모드분석결과와 편마암류의 경우 장석의 함량비율에는 큰 차이가 없으나, 석영, 운모, 점토광물의 함량은 차이가 있다(Fig. 4). 미세크랙의 함량은 S4에서 가장 높게 나타난다.

X-선 회절(XRD) 분석에 의한 광물조성

X-선 회절분석결과, 편마암의 광물조성은 석영, 장석

Fig. 4. Mineral compositions of gneiss, as calculated by modal analysis under the microscope.

류, 운모, 각섬석 등의 결정질 광물의 구성비가 우세하며, 몬모릴로나이트도 함유되어 있다. 그러나 대표적인 점토 광물인 녹니석, 카올린 등은 거의 감지되지 않는 것으로 나타났다(Table 1). S4의 경우, 팽윤성 점토광물인 스멕타이트의 일종인 몬모릴로나이트(montmorillonite)가 나타나며, S15에서는 몬모릴로나이트 외에도 각섬석이 함유되어 있음을 보여준다. 각섬석은 지표 노출시 매우 빠른 풍화를 겪게 되는데, 향후 이들의 풍화는 점토광물 중 스멕타이트와 같은 팽윤성 점토의 생성을 유발한다. S7의 경우 석영, 장석류, 운모로 구성되어 전형적인 화강암질의 특성을 가지고 있다. S15에는 각섬석이 8.3% 함유되어 있으므로 아직 풍화작용을 심하게 받지 않은 상태이다. 그럼에도 몬모릴로나이트가 5.7% 들어 있으므로 이러한 함수 점토광물이 계속 형성될 가능성이 있음을 보여준다.

Table 1. Mineral compositions obtained using Rietveld quantitative calculations from XRD data. (wt.%)

	S4	S7	S15	C1	C3	remarks
quartz	19.0	22.8	22.7	18.9	23.6	
albite	44.8	31.8	33.2	16.4	31.7	
microcline	15.2	37.5	21.4			primary minerals
anorthoclase				43.2	22.2	
micas	13.8	7.9	8.7	9.0		
hornblende			8.3	10.6		
montmorillonite	7.1		5.7			
vermiculite					4.1	secondary minerals
kaolin				1.9		
laumontite					18.4	

전반적으로 석영, 장석류의 비율은 큰 변화가 없으며 장석류는 지점에 따라 약간 다른 광물종이 우세한 특징을 보여준다. 현재로서는 풍화작용을 심하게 받지 않았음을 알 수 있으나, 지표에서 물과 산소에 노출이 계속되는 환경에 놓이게 되면 점차 심한 풍화작용을 겪게 될 수 있다. 이들 광물조성비로 볼 때 향후 형성될 수 있는 풍화광물은 일라이트, 고령토, 스멕타이트, 녹니석, 버미큘라이트가 될 가능성이 높다.

주사전자현미경에 의한 미세조직 및 풍화변질

SEM 관찰하에서 대부분의 암석의 조직은 비교적 치밀하여 풍화변질작용이 심하게 일어나지 않았음을 보여준다. 시료 7의 경우(Fig. 5), EDS 에너지분산 분광분석에 따르면 주요 성분은 O 44.23, Na 2.26, Mg 0.86, Al 9.59, Si 29.38, K 0.83, Ca 2.09, Fe 10.76 atomic%로 구성된다. 이 조성은 장석류, 석영이 대부분인 암석에서 비교적 높은 철이 함유되어 있음을 지시한다. 장석, 석영, 운모류의 경계부가 명확하지 않으며, 미립질의 비정질 결정의 집합체가 다수 관찰되는 것으로 볼 때, 초기 풍화작용이 진행되었음을 알 수 있다. 그러나 입자간에는 여전히 단단하고 치밀한 조직이 존재하므로 풍화변질의

Fig. 5. SEM image of sample S7 and EDS spectrum obtained for the area marked by an arrow. Mu: muscovite, Qz: quartz, HFO: hydrous ferric iron oxide.

강도는 심하지 않은 것으로 보인다.

S4의 경우 철의 함량이 높고 극미립질의 등립체의 이차광물이 피복하고 있는 것으로 보아 이는 비정질의 철산화물의 집합체로 보인다(Fig. 6). 이들의 주요 성분은 EDS 에너지분산 분광분석에 따르면 O 32.81, Al 12.46, Si 41.46, K 1.57, Fe 11.70 atomic%로서 정장석이나, 운모류와 더불어 철광물이 함유되어 있다. 미세균열이 다수 발달하며, 장석의 벽계가 변질되어 명확하지 않으므로 풍화작용이 진행되었음을 알 수 있다. 이에 반해, S15의 경우, 입자간 조직이 치밀하고 균열발달이 미약하여 비교적 신선한 암석임을 나타낸다(Fig. 6). EDS 에너지분산 분광분석에 의하면 주요 성분은 Na 2.18, Mg 0.36, Al 16.81, Si 69.77, K 2.42, Ca 1.36, Fe 7.09 atomic% 이다. 이 조성비는 암석의 대부분이 장석류, 석영, 운모류로 구성되며, 일부 함철광물들이 함유되어 있음을 나타낸다.

화강암의 경우, 신선암인 C1에서 석영은 파단면이 신선하고, 운모에서도 변질조직은 거의 없다(Fig. 7). 그러나 장석의 경우 입자주변에서 약한 변질조직이 관찰되며 이차광물도 소량 확인된다. 풍화가 심한 C3에서는 사장석은 상당히 용식되어 있으며, 주변에는 Ca 제올라이트인 로

Fig. 6. SEM images of S4 (a) and S15 (b). Pl: plagioclase, HFO: hydrous ferric iron oxide, Qz: quartz.

Fig. 7. SEM images of samples C1 (a, b) and C3 (c, d). Qz: quartz, Kf: K-feldspar, Pl: plagioclase, Lm: laumontite, Vm: vermiculite.

몬타이트(laumontite)가 자형의 집합체를 이루고 있다. 이는 사장석으로부터 용탈되어 나온 Ca가 함수성분과 결합하여 형성된 이차광물이다. 따라서 C3은 사장석이 용해되었으며, 적절한 수분이 공급되면서 수화작용을 받아 이차적 기원의 로몬타이트가 형성된 풍화암의 특징을 보여준다.

주사전자현미경에 의한 관찰은 매우 미세한 범위에 국한되므로 각 관찰지점에 따라서 동일한 시료임에도 일관성이 나타나기 어렵다. 그러므로 SEM 관찰결과가 반드시 전체 암석의 특징을 체계적으로 반영한다고는 할 수 없다. 그럼에도 미세한 암석의 조직관찰이나 성분분석, 이차적 풍화변질산물인 미세한 점토광물의 특성분석에서 가장 강력한 수단으로 암석의 풍화특성 조사에서 SEM 분석은 보조적인 수단으로서 가치가 매우 높다.

화학적 풍화지수

암석이나 광물중의 원소는 화학적 풍화에 의해 용탈되며, 이들 원소의 양과 이동도는 용해도와 원소의 종류에 따라 달라진다. 조암광물에서 이동성이 높은 화학종(알칼리금속, 알칼리토금속)과 이동성이 낮은 화학종(TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O , P_2O_5)의 성분을 비교하면 풍화에 따른 특정한 원소의 거동을 알 수 있다. 즉 암석내 주 구성 성분의 함량변화를 분석, 비교하면 암석의 화학적 풍화의 진행정도를 예측할 수 있다. 전암분석을 이용한 풍화지수에는 화학적 변질지수 CIA (Nesbitt and Young, 1982), 화학적 풍화지수

CIW (Harnois, 1988)가 대표적이며, 그 외에, 변형풍화잠재지수(MWPI; Vogel, 1973), Parker (1970), 및 Reiche (1943) 등이 특정한 성분비를 이용하여 제안한 풍화지수 등이 있다(Table 2). 풍화지수는 유동성이 매우 낮은 Al_2O_3 에 대한 알칼리 원소의 변화를 나타내는 화학적 풍화지수를 의미한다. 즉 풍화작용이 진행되면서 유동성이 작은 Al_2O_3 는 암석에 잔류하는 반면에, 알칼리 계열의 원소들은 용해되어 쉽게 유실되기 때문에 풍화지수가 증가한다는 개념에 기초한다. 그러므로 풍화지수가 클수록 풍화작용이 많이 진행되었음을 나타낸다. 이같은 원소들의 거동특성과 부화 및 결핍정도를 근거로 대표적인 화학적 풍화지수(chemical index of alteration, CIA)를 구할 수 있다(Nesbitt and Young, 1982). 이 경우 Na, K, Mg, Ca와 같은 알칼리 및 알칼리 토류 원소는 용해도와 이동성이 높기 때문에 풍화가 진전됨에 따라 그 양은 감소된다.

대표적인 조암광물인 장석, 흑운모, 각섬석 및 휘석에 대한 CIA는 각각 50, 50~55, 10~30, 0~10이며, 신선한 화강암의 CIA 값은 약 50정도이다. 점토광물 중 풍화의 최종 단계에 있는 고령토(kaolinite), 깁사이트(gibbsite), 녹니석의 CIA는 100이며, 일라이트(illite), 스멕타이트(smectite)는 70~85의 값을 가진다. 따라서 CIA는 조암광물인 1차 광물과 풍화변질 광물인 2차 광물의 비율을 반영하며, 화학적 풍화의 정도를 나타낼 수 있다. 화학적 풍화

지수는 유동성이 작은 Al_2O_3 에 대한 알칼리 원소의 변화를 나타내는 것으로 지수 값이 클수록 강한 풍화작용을 지시한다.

풍화토는 풍화환경에 따라 동종의 모암일지라도 풍화양식이나 풍화정도가 달라지므로 궁극적으로 조암광물의 화학적 변화로써 구분할 수밖에 없다. 따라서 풍화에 예민한 광물의 화학적 분석을 통한 화학적 풍화지표인 CWI (chemical weathering index)를 사용하기도 한다(Table 3).

CWI에서는 우리나라의 화강암질 풍화토는 대부분 CWI > 20의 강풍화에서 거의 완전 풍화잔적으로 보는데, 이들은

Table 3. CWI chemical index by Dearman and Irfan (1978).

CWI (%)	Grade	Extend of Weathering
13-15	I	Fresh rock
	II	Slightly weathered
15-20	III	Moderately weathered
	IV	Highly weathered
20-40	V	Completely weathered
40-60	VI	Residual soil
60-90	VII	Weathered hard pan (as cemented)

Table 2. Comparison of representative chemical weathering indices.

Index	Method	Remarks
CIA	$[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$	Nesbitt and Young (1982)
CIW	$[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)] \times 100$	Harnois (1988)
PI	$2N_2O/0.35 + MgO/0.90 + 2K_2O/0.25 + CaO/0.70$	Parker (1970)
VR	$(Al_2O_3 + K_2O)/(MgO + CaO + Na_2O)$	Vogt (1927)
RR	SiO_2/Al_2O_3	Ruxton (1968)
MWPI	$[(K_2O + Na_2O + CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O + CaO + MgO)]$	Vogel (1973)

Table 4. Whole-rock chemistry analyzed by XRF.

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃ *	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I	Total
S4	67.3	15.2	0.58	3.84	0.59	0.08	2.40	2.65	3.85	0.12	1.60	98.2
S7	73.1	13.3	0.17	1.34	0.21	0.05	0.96	4.76	2.99	0.05	1.21	98.1
S15	71.8	14.4	0.44	2.98	0.44	0.08	2.32	4.23	3.64	0.09	0.87	101.0
C1	71.2	14.1	0.25	1.97	0.57	0.04	1.03	6.47	3.40	0.06	0.38	99.5
C3	70.4	14.8	0.33	1.28	0.31	0.04	3.50	3.02	3.07	0.07	4.30	101.0

*Fe₂O₃ = Total Fe

화학적 풍화단계가 상당히 진행된 것으로 간주한다.

Table 4는 본 연구에서 수행된 암석시료의 전암분석 결과를 나타낸 것이다. 시료 S4번에서 알루미늄과 L.O.I 수치가 비교적 높는데, 이는 수분함량이 높고, 점토광물의 함량이 높음과 관련된다. 이 화학분석치를 이용하여 암석의 풍화경로를 지시하는 화학적 변질지수(CIA)와 풍화지수(CWI)를 검토, 비교하였다(Table 5). S15번 시료의 경우 풍화지수가 낮아 신선암에 속하므로 비교적 풍화가 덜 진행되었음을 알 수 있다. S7번 시료의 경우도 거의 신선암에 속한다. S4번 시료의 경우도 약한 풍화암 (slightly weathered rock)에 해당하므로 풍화가 미약하게 진행되었음을 지시한다. CIA와 CWI는 일치하지 않는데, 이는 알루미늄과 다른 알칼리원소와의 상대적인 비가 일정하지 않아서 나타나는 현상이다. C3은 육안으로도 가장 풍화가 심한 시료인데, CIA수치는 별 차이가 없지만, CWI 수치는 가장 높다.

암석에서 풍화가 진행될수록 CaO, Na₂O, SiO₂의 양은 용탈에 의해 감소하고, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, L.O.I (loss on ignition)의 양은 증가하는 것이 일반적이다. Al의 경우, 풍화가 진행됨에 따라 점토광물의 주요 구성원소로 암석에 잔류하며, L.O.I는 감열감량에 의한 손실되는 양을 나타내는데, 화학적 변질지수가 증가하는 것에 비례하여 L.O.I가 증가한다. 이는 암석중에 포함되어 있는 구조수를 갖는 함수광물과 층간의 흡착수, H₂O와 관련되는데, 특히 암석 중에서 풍화작용으로 형성되는 함수광물인 점토광물의 형성과 밀접히 관련된다. 그 밖에도 비정질 수산화 철,

알루미늄광물이 수분함량이 높은 환경에서 풍화작용으로 형성되면 전암내의 L.O.I가 증가한다.

비표면적(BET)과 미소촛점 X-선 CT에 의한 미세 공극의 특성

표면적과 미세공극의 수치는 풍화도에 따라서 차이가 있다(Table 6). 특히 풍화가 약한 화강암인 C1은 공극의 크기가 매우 작거나, 미세균열이 덜 발달하여 측정이 불가능하였으며, 비표면적도 측정시료 중에서 가장 낮게 나타났다. 편마암시료의 공극의 평균직경은 105 Å이하이며, 비표면적은 약 4 m²/g 이하이다. 공극의 분포양상은 50 Å 이하의 미세공극이 주를 이루는데, 분포빈도는 특정한 구간에서 특히 높다(Fig. 8). 두 암종별 차이는 나타나지 않는데, 이는 각 암석내에서도 풍화진행 정도에 따라서

Fig. 8. Pore area and pore size measured using the BET method.

Table 5. Representative chemical weathering indices.

Sample	CIA	CWI
S4	52.73	17.43
S7	52.84	13.41
S15	49.34	13.64
C1	49.38	11.52
C3	50.14	22.99

Table 6. Surface area and micropores in rock samples, measured using the BET method.

	S4	S7	S15	C1	C3
BET surface area (m ² /g)	2.6835	2.2537	4.0413	0.0149	2.3755
t-plot micropore area (m ² /g)	1.0042	1.6555	1.2887	0.0753	0.6748
t-plot micropore volume (cm ³ /g)	0.000449	0.000285	0.000569	0.000035	0.000294
adsorption average pore diameter (Å)	81.3703	105.4313	85.3132	no data	74.1445

미세공극의 크기와 비표면적이 달라지기 때문이다. 다만, 본 분석표에 국한할 시, 화강암이 편마암에 비하여 미세공극과 비표면적이 약간 작게 나타난다. 그러나, 이러한 미세조직 특성을 신뢰도가 높고 정량적으로 비교하기 위해서는 추후에 다수의 시료를 대상으로 분석, 검토할 필요가 있다.

미소촉점 X-선 CT에 의한 화강암의 미세공극의 분포는 12~100 μm 범위가 주를 이룬다. 비교적 신선한 상태인 C1에서의 유효공극(effective pore)은 12~70 μm 범위이고, 25~35 μm 범위가 가장 높은 비율을 차지한다. 풍화암인 C3의 경우 유효공극의 범위는 13~100 μm 이고, 주요 빈도는 20~30 μm 범위이다. 이는 풍화정도에 따라서 공극의 크기범위와 최빈값 범위가 다양함을 지시한다. 또한 공극의 연결성을 나타내는 공극연결 통로(throat)의 크기와 빈도는 암반의 미세균열의 발달과 연결과 관련된다. 이 경우 풍화가 심할수록 공극의 연결통로는 커진다(정교철과 Takahashi, 2010). 이처럼 미세공극의 범위는 기기분석법의 검출범위에 따라서 다양한 수치를 보인다. 이같은 미세공극, 미세균열에 대한 정량적 정보는 기존의 개념적 풍화특성 연구기법의 한계를 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

암석의 풍화지수와 풍화속도

암석의 풍화민감도는 극히 민감(ES)에서 불민감(U)까지 6개의 등급으로 구분되는데, 국내 기준 암석에서 풍화민감도의 구분기준은 대부분 육안관찰에 의한 정성적인 구분 기준에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 적절한 지반정수의 변화를 예측할 수 있는 정량적인 기준이 제시될 필요가 있다. 암석의 풍화등급을 강도에 의한 물성치와 화학적 풍화지수로 평가하는 데에는 여전히 오차가 크고, 일률적인 기준이 성립되기 어려운 것이 현실이다(김성욱 외, 2004; 우익 외, 2004). 예를 들면, 백록담 일원의 한라산 조면암의 경우 화학적 풍화지수는 풍화진행에 따라 일정한 경향을 보여주지 않는데(이창섭 외, 2008), 이는 전암분석치에 의해 계산하는 풍화지수는 신뢰도 높은 지표가 되지 않음을 반증한다.

암석의 풍화속도는 암석을 구성하는 일차광물의 용해, 변질작용과 관련된다. 지표에 노출된 대부분의 암석에서 용해작용이 활발하게 일어나며, 이는 궁극적으로 암석의 토양화 내지 풍화토를 생성하므로 사면과 지반의 안정성에 직접적인 영향을 준다. 특히 암석내 발달하는 미세절리나 균열은 물의 유입을 용이하게 함으로써 일차광물의 용해작용을 가속화시켜 암석의 불안정성을 가속화시킨다.

Table 7. Log dissolution rates and corresponding theoretical mean lifetimes of a 1-mm³ cube of selected silicate and aluminosilicate minerals at pH 5 and 25°C (after Lasaga et al., 1994; Langmuir, 1997).

Mineral	Lifetime (yr)	Mineral	Lifetime (yr)
albite	5.75×10^5	kaolinite	6.0×10^6
anorthite	1.12×10^2	microcline	9.21×10^5
biotite	3.80×10^4	muscovite	2.6×10^6
diopside	6.80×10^3	nepheline	2.11×10^2
enstatite	1.01×10^4	quartz	2.41×10^7
forsterite	2.30×10^3	sanidine	2.91×10^5
gibbsite	2.76×10^5	tremolite	5.80×10^4

지표나 천부지하에서 물과 반응하면서 진행되는 일차광물의 용해는 지표수와 지하수에서 주요 용존성분이 된다(Stefansson et al., 2001).

Table 7은 상온의 약산성환경에서 주요 조암광물의 용해속도를 계산한 자료로서 대체로 광물의 정출순서와 규산염 구조와 일치함을 보여준다(Lasaga et al., 1994; Langmuir, 1997). 예를 들면, anorthite 사장석의 용해속도는 albite 사장석에 비하여 수 천배 빠르며, 석영에 비하여 10^5 이상 빠르다. 이는 암석내 주 구성광물의 종류가 암석의 풍화, 용해에 중요한 변수임을 지시한다. 광물의 구성비, 암석에서 물의 통로가 되며, 풍화작용을 가속화 시키는 미세절리, 입자간 또는 입자내부에 존재하는 미세공극이나 간극의 발달특징 등이 물-암석반응이나 풍화변질작용에서 가장 중요한 인자가 된다. 따라서 단순히 암석의 화학조성비가 화학적 풍화등급을 나타내는데 한계가 있다.

암석에는 현미경 조직으로도 쉽게 인지되지 않는 초미세 균열과 공극이 입자의 경계와 내부에 수없이 존재하며, 풍화가 진행될수록 점토광물과 같은 이차광물이 생성되어 양이온교환능력이나 흡착력이 변한다. 풍화등급을 단순히 화학풍화지수로 환산하는 것은 암석의 안정성 해석에 상당한 오류를 야기한다. 따라서 풍화암의 경우 미세균열과 미세공극의 분포와 크기에 대한 특성파악이 중요하다. 이같은 암석내 초미세 조직특성은 암석의 물리, 화학적 풍화작용에 영향을 주는 근본요소가 된다. 즉 풍화작용으로 생성된 이차광물의 종류와 풍화암내 미세구조의 발달특징은 조암광물의 용해도, 침전, 파쇄작용 등이 복합적으로 작용하여 규제된다. 그러므로 단순히 전암분석치를 이용하여 계산하는 풍화지수(CIA, CWI 등)와 같은 기존의 화학적 풍화지표들은 암석의 풍화정도를 제대

로 반영하지 못한다.

따라서 화학분석법 외에도 광물조성비, 미세조직, 미세 공극의 특성을 고려한 새로운 평가방법이 요구된다. 그러므로 국내 암석에 대해 적절한 평가기준을 제시하기 위해서는 다양한 암석에 대해 풍화민감도 분석뿐만 아니라, 미세조직과 공극의 특성자료가 축적될 필요가 있다. 향후 이를 기준 기준으로 풍화민감도 등급이 정량적으로 구분되어야 할 것이다.

결 론

본 연구에서는 편광현미경 관찰, 화학적 풍화지수, X-선회절(XRD)분석에 의한 광물의 종류와 함량분석, 전자현미경(SEM/EDS)에 의한 미세조직 분석, BET측정법에 의한 기공크기와 비표면적 분석, 미소촉점 X선 CT 등을 이용하여 결정질 암석(편마암, 화강암)의 풍화도와 미세조직, 공극의 특성을 분석하였다. 결정질암석의 풍화지수, 광물조성, 미세조직, 표면적과 미세공극의 수치는 풍화도에 따라서 차이가 있는 것으로 나타났다. 두 암종의 미세조직특성은 암질자체보다는 각 암석내에서 풍화진행 정도에 따라 결정된다. 다만 미세공극의 크기와 함량이 높은 표면적은 화강암이 약간 작다. 이차광물의 생성과 미세구조의 발달특징은 광물의 용해, 침전, 파쇄반응과 같이 복합적인 요소에 의하여 영향을 받게 된다. 그러므로 단순히 전암분석치를 이용하여 계산하는 기존의 화학적 풍화지표들은 암석의 풍화도를 제대로 반영하지 못한다. 따라서 광물조성비, 미세조직, 미세공극의 특성을 고려한 통합적인 새로운 평가방법이 요구된다.

사 사

본 연구의 기기분석(XRD/FE-SEM, XRF)은 한국기초과학지원연구원 대구센터, 서울센터에서 각각 수행되었으며, 이 연구는 2008년 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-C00929).

참고문헌

- 김만일, 김종태, 김재홍, 노병돈, 정교철, 2008, 편마암 풍화사면에서의 지구물리탐사 및 안정성 해석 사례연구, 지질공학, 18, 287-295.
- 김성욱, 이선갑, 류호정, 김춘식, 김인수, 2004, 화강암분포지역에서 화학적 풍화변질지수와 풍화등급의 비교, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, 266-271.
- 김재홍, 박철숙, 이현재, 정교철, 2009, 풍화사면에서의 추
정파쇄대 평가를 위한 2차원 전기비저항 구조도 적용
기법, 지질공학, 19, 323-330.
- 우익, Fleurisson, J.-A., 박연경, 박혁진, 유광호, 2004, 국내에 분포하는 화강암 및 화강편마암의 풍화지수, 한국암반공학회 춘계학술발표회, 167-172.
- 이창섭, 조태진, 이상배, 원경식, 2008, 제주도 한라산조면암의 풍화특성에 관한 연구, 지질공학, 17, 235-251.
- 정교철, Takahashi, M., 2010, 미소촉점 X선 CT를 이용한 암석내 공극의 분포 및 공극률 분석, 지질공학, 20, 461-465.
- Dearman, W.R. and Irfan, T.Y., 1978, Assessment of the degree of weathering in granite using petrographic and physical index tests. In: Proc. Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments, UNESCO, Paris, Paper 2-3.
- Harnois, L., 1988, The CIW index: a new Chemical Index of weathering. Sedim. Geol., 55, 319-322.
- Langmuir, D., 1997, Aqueous Environmental Geochemistry, Prentice Hall, 600p.
- Lasaga, A.C., Soler, J.M., Ganor, J., Burch, T.E., and Nagy, K.L., 1994, Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles. Geochim. Cosmochim. Acta, 58, 2361-2381.
- Murakami, T., Utsunomiya, S., Yokoyama, T., and Kasama, T., 2003, Biotite dissolution processes and mechanisms in the laboratory and in nature: Early stage weathering environment and vermiculation, Am. Miner., 88, 377-386.
- Nessbitt, H.W. and Young, G.M., 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, Nature, 299, 715-717.
- Parker, A., 1970, An index of weathering for silicate rocks, Geol. Mag. Nov., 501-504.
- Reiche, P., 1943, Graphic representation of chemical weathering, Jour. Sedim. Petrol., 13, 58-68.
- Ruxton, P.P., 1968, Measures of the degree of chemical weathering of rock, Jour. Geol., 76, 518-527.
- Stefansson, A., Gislason, S.R., and Arnorsson, S., 2001, Dissolution of primary minerals in natural waters II. Mineral saturation state, Chem. Geol., 172, 251-276.
- Vogel, D.E., 1973, Precambrian weathering in acid metavolcanic rocks from the Superior Province, Villebon Township, south central Quebec, Can. Jour. Sci., 12, 2080-2085.
- Vogt, T., 1927, Sulitjelmafeltets geologi og petrografi. Norges Geologiske Undersøkelse, 121, 1-560 (in Norwegian, with English abstract).

원고접수일 : 2011년 11월 21일

수정본채택 : 2011년 12월 19일

게재확정일 : 2011년 12월 21일

김만일, 김종태, 김재홍, 노병돈, 정교철, 2008, 편마암 풍화사면에서의 지구물리탐사 및 안정성 해석 사례연구, 지질공학, 18, 287-295.

김성욱, 이선갑, 류호정, 김춘식, 김인수, 2004, 화강암분포지역에서 화학적 풍화변질지수와 풍화등급의 비교, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, 266-271.

김재홍, 박철숙, 이현재, 정교철, 2009, 풍화사면에서의 추

추창오

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5182
Fax: 054-822-5467
E-mail: mineralogy@paran.com

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@andong.ac.kr