

강원도 원주일대에 분포하는 화강암 및 화강편마암의 화학풍화실험에 의한 물성 변화 연구

우 익^{1)*}, 엄정기²⁾, 박혁진³⁾

Variation of Geomechanical Characteristics of Granite and Orthogneiss in Wonju Area due to Accelerated Artificial Chemical Weathering Tests

Ik Woo, Jeong-Gi Um, Hyuck-Jin Park

Abstract The purpose of the study is to evaluate the effects of chemical weathering on the granite and orthogneiss in Wonju area based on accelerated artificial chemical weathering. The rock samples were scrutinized the variation of index properties and ion exchanges caused by artificial chemical weathering which was implemented with leaching test for 170 days using double soxhlet extractor. The differential weathering and decrease of p wave velocity were obtained by weathering process without significant changes of porosity. In case of granite samples, the uniaxial compression strength was reduced by 20% and 16% for the F-grade and SW-grade, respectively. For MW-grade granite, however, was not able to examine the effect of strength reduction due to lack of sample number. Also, for orthogneiss, it is difficult to compare the values of uniaxial compressive strength between before and after the test because of its strong anisotropy.

Key words Chemical weathering, Double soxhlet extractor, Granite, Orthogneiss, Wonju

초 록 본 연구는 실내 화학풍화실험을 통하여 원주일대에 분포하는 화강암 및 화강편마암의 화학적 풍화특성을 평가하는데 목적이 있다. 이를 위하여 이중속실톨추출장치를 이용하여 170여일간의 용탈실험을 수행하고 연구 지역 암석의 화학적 풍화작용에 의한 원소 이동과 물성변화를 측정하였다. 풍화에 따른 구성광물의 반응정도에 따른 차별적 풍화침투와 P파속도의 전반적인 감소가 관찰되었으나, 공극률의 변화는 거의 없는 것으로 확인되었다. 화학풍화실험에 따른 화강암의 일축압축강도는 F 등급에서 20%, SW 등급에서 16% 정도 감소되는 것으로 나타났다. 연구지역에 분포한 화강편마암의 경우에는 뚜렷한 이방성에 의한 일축압축강도의 편차로 인하여 풍화에 따른 압축강도의 저감효과를 평가하기 어렵다. 연구지역에 대한 중·장기적인 풍화 예측을 위해서는 화학적 풍화와 더불어 물리적 풍화가 병행된 조건에서의 고찰 필요하며 앞으로도 심도있는 후속 연구가 요구된다.

핵심어 화학적 풍화, 이중속실톨추출장치, 화강암, 화강편마암, 원주

1. 서 론

대기 중에 노출된 암석은 자연적 혹은 인공적인 주위 환경에 영향을 많이 받는다. 이러한 요인들 중에는 강우, 온도, 노출암반의 방향, 지하수조건, 응력조건변화,

생물적 환경 및 대기 및 토양의 오염 등 여러 가지가 있을 수 있다. 이러한 여러 조건하에 장·단기적으로 노출된 암석은 다양한 풍화 작용에 의하여 공학적, 물리적 성질의 변화가 발생하여 암반 구조물 - 터널 혹은 암반 굴착사면 등 - 의 예기치 못한 붕괴를 초래하기도 한다.

불연속면을 포함한 암반의 풍화는 구성 암석과 불연속면의 발달에 따라 그 성질을 달리한다. 즉, 광물구성, 조직, 공극률, 미세절리 발달, 광물간의 경계 그리고 암석의 초기 풍화상태 등에 따라 영향을 받을 수 있다. 그동안 여러 연구자에 의하여 풍화의 일반적인 경향에 대한 연구가 진행되었는데(Fookes et al., 1971, Fookes et al.,

¹⁾ 군산대학교 해양건설공학과
²⁾ 부경대학교 에너지자원공학과
³⁾ 세종대학교 지구정보공학과
* 교신저자 : woo@kunsan.ac.kr
접수일 : 2009년 6월 8일
심사 완료일 : 2009년 6월 17일
게재 확정일 : 2009년 6월 19일

1988, Lumb, 1983, Ondera et al., 1974, Price, 1995), 일반적으로 암석의 경우에는 공극률이 높을수록, 구성 입자가 클수록, 미세절리가 발달할수록 풍화가 촉진된다. 또한 암반 불연속면의 발달이 증가할수록 풍화 작용의 반응 표면적이 넓어져 암반 전체의 풍화가 가속된다.

이 연구는 화학적 풍화작용에 의한 암석의 특성변화 분석에 주목적을 두고 있다. 화학적 풍화는 암석이 주위환경과 평형상태를 이루기 위하여 화학적인 작용에 의하여 풍화되는 과정을 말하며, 이를 통해 새로운 물질이 생성되기도 한다. 화학적 풍화는 풍화과정에 가장 중요한 요소인 용매 역할을 하는 물과 풍화속도를 가속시킬 수 있는 온도와 아주 밀접한 관계를 지니고 있다(Woo et al., 2008). 물 혹은 용매와 접촉한 암석의 구성광물들은 용매와 이온을 주고받거나, 치환 혹은 용해, 가수분해, 수화작용, 산화/환원 등의 작용을 통하여 화학적 풍화가 이루어진다. 또한 용매의 pH는 암석의 화학적 풍화에 큰 영향을 미친다. 암권, 생물권 및 대기권의 불순환시스템에서 이산화탄소의 함유량이 증가하면 그에 따른 용매의 pH가 낮아져 화학적 풍화가 가속된다. 이에 못지않게 온도도 화학적 풍화의 속도를 좌우하는 요소인데, 한 예로 30°C때의 화학적 풍화는 10°C의 풍화보다 4배정도 빠른 반응을 하는 것으로 알려져 있다(Caroll, 1970).

본 연구에서는 강원도 원주지역에 분포하는 화강암 및 화강편마암에 대하여 실험실 조건에서 화학적 풍화작용을 모사하기 위하여 화학풍화실험을 수행하였다. 즉, 화학적 풍화가 암석의 초기 풍화상태에 따라 영향을 미치는 정도를 실험실에서 측정하여 공학적 시간에서 변화할 수 있는 암석의 공학적-물리적 물성을 예측하기 위한 요소이론을 개발하고자 한다.

2. 암석의 풍화분류

암석의 풍화분류는 여러 연구자에 의하여 제시되었으며, 일반적으로 정성적인 방법과 정량적인 방법으로 구분할 수 있다(Dearman, 1976, Deaman, 1995, Dearman et al., 1978, Irfan et al., 1978). 정성적인 방법은 암석 풍화등급을 암석의 상대적인 강도측정, 변색정도, 구성광물의 풍화상태 등 주관적인 방법으로 구분하지만, 야외에서 가장 널리 사용되는 방법이다. 암석의 정량적 풍화 분류법은 암석의 풍화에 따른 물리적, 공학적 물성에 근거하여 그 범위에 따라서 암석의 풍화 등급을 분류하는 방법으로 공극률, 탄성파속도, 압축강도 등 지표가 될 만한 물성의 범위를 풍화등급별로 결정한다. 또한, 한가지의 물성만으로 암석의 풍화특성을 결정하기

란 상당히 어려운 점을 많이 내포하기 때문에 풍화지수(Woo et al., 2008)을 사용하여, 여러 가지 물성들의 조합으로 풍화상태를 정량적으로 구분하기도 한다.

본 연구에서는 대상 암석을 정성적인 기준에 의하여 6 단계의 풍화등급으로 구분하였다. 이를 위하여 GSE(1995)와 Lee et al.(1989)의 화강암 풍화 분류방법을 이용하였다(Table 1). 즉, 암석을 풍화의 흔적이 없는 신선한 F, 절리면과 부분적으로 변색된 약한 풍화 SW, 변색이 전암석에 걸쳐 발생하고 지질해머로 타격시 쉽사리 부서지는 보통 풍화 MW, 물에 침수될 경우 암석 구조가 와해되는 심한 풍화 HW, 암반의 지질구조만 가지고 특성은 토양과 같은 완전 풍화 CW, 풍화를 지속적으로 받은 후 장소의 이동 없이 원래 위치에서 토양화된 풍화잔류토 RS로 구분한다.

Table 2는 국토해양부표준품셈(건설교통부, 1996)으로 암석의 풍화에 따른 분류 지침이다. 국내 대부분의 토목공사에서는 표에 의거하여 암석을 극경암, 경암, 연암, 풍화암 등으로 구분한다. 그러나 이러한 암석 물성의 범위는 암석의 종류에 따라서 그 범위를 달리할 수 있으며 각 암종의 풍화 등급에 따른 여러 물성 범위가 지속적으로 개정되어야 한다고 판단된다.

3. 연구지역 및 시료특성

본 연구의 대상 지역(Fig. 1)은 경기도 광주군 초월읍에서 강원도 원주시 가현동에 이르는 구간으로 경기변성암복합체와 대보화강암류 및 백악기 화성암류로 구성되어 있다. 화학풍화실험을 위한 암석 시료는 연구지역에서 신설될 OO고속도로의 지반조사용 시추코어에서 채취된 화강암 및 화강편마암이다. 채취된 암석 시료는 풍화 등급을 구분하여 실험용 공시체로 성형하였다.

화강암 시료는 각섬석화강암(hornblend granite) 및 흑운모화강암(biotite granite)이며, 화강편마암 시료는 호상편마암(banded gneiss) 및 반상변정질편마암(porphyroblastic gneiss)이다. 각섬석화강암은 중립 내지 조립질로 각섬석이 유색광물로 나타나며 사장석이 1~2 cm 크기로 장방향의 조직을 갖는 형태를 이루는 경우도 있다. 주 구성광물로는 석영, 사장석, 각섬석, 흑운모이며 녹니석이 소량 분포하고 있다. 흑운모화강암은 각섬석화강암에 비하여 입도가 작고 밝은 색을 띠고 있으며 흑운모가 주를 이루고 있다. 주 구성광물로는 석영, 사장석, 흑운모이며 소량의 미사장석이 존재한다. 호상편마암은 흑운모와 장석이 우세한 띠가 서로 교호하며 엽리구조로 나타나고 있다. 엽리간의 간격은 1 cm 내외로 엽리간의 간격이 좁다. 주 구성광물로는 석영, 사장석, 흑운모 등

Table 1. Weathering classification for granitic materials (Lee et al., 1989, GSEG, 1995)

Weathering Grade	GSEG(1995)	Lee(1989)			
		Chemical weathering	SHV	Impact	Micro-fissures
F	Unchanged from original state	All mineral constituents are sound	59-62	Many blows of geological hammer to fracture rock	No evident microfracturing
SW	Slight discoloration Slight weakening	Plagioclase are occasionally slightly decomposed. Biotites are slightly decomposed and beginning to stain some of the surrounding minerals.	51-56	More than one blow of geological hammer to fracture.	Slightly microfractured (>10 mm spacing)
MW	Considerably weakened, penetrative discoloration Large pieces cannot be broken by hand	Most of plagioclases and some potash feldspars are moderately decomposed. Biotites are moderately decomposed staining many of the surrounding minerals.	37-48	Single firm blow of geological hammer, NX core cannot be broken by hand.	Moderately microfractured (5-10 mm spacing)
HW	Large pieces can be broken by hand Does not readily disaggregate when dry sample immersed in water	All plagioclases and some potash feldspars are highly decomposed and most potash feldspars are moderately decomposed. Biotites are highly decomposed staining most rock minerals.	12-21	Indented by a geological pick or knife. Crumbled under firm blows with geological hammer	Highly microfractured (2-5mm spacing)
CW	Considerably weakened Slakes in water Original texture apparent	All plagioclases and most potash feldspars and biotites are completely decomposed, some potash feldspars are highly decomposed.	Not available	Readily indented by a geological pick or knife, cannot be indented by thumb, can be disintegrated by agitation in water.	All microfractures and grain boundaries tend to be open.

Table 2. Ranges of physical and mechanical properties of rocks for different weathering grade (MLTM, 1996)

Classification	UCS (MPa)	PLS (MPa)	SHV	Q _A (%)
extremely hard rock	>180	>8.8	>60	<0.24
hard rock	130 ~ 180	5.6~ 8.8	51 ~ 60	0.47 ~ 0.24
moderate rock	100 ~ 130	3.7 ~ 5.6	44 ~ 51	0.80 ~ 0.47
weak rock	70 ~ 100	1.8 ~ 3.7	34 ~ 44	1.65 ~ 0.80
weathered rock	30 ~ 70	0 ~ 1.0	10 ~ 34	9.25 ~ 1.65

**MLTM : Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, UCS : uniaxial compressive strength, PLS : point load strength, SHV : V type schmidt hammer index, Q_A : Quick water absorption ratio

이 있다. 반상변정질편마암은 반상 변정이 변형작용으로 안구상으로 신장되어 나타나며 엽리구조가 발달하여 있다. 대부분 알칼리 장석으로 구성되어 있으며 비사장석으로 퍼사이트가 소량 분포하고 있다.

암석시료는 직경 50 mm, 길이 100 mm의 공시체로

성형하였다. 공학적 물성을 측정하기 위한 공시체는 입자 크기에 대한 공시체의 지름을 최소화하여 시간에 따른 암석 공시체의 풍화가속 효과를 최대화하였다. 성형된 암석시료들은 비파괴 물리적 특성을 측정하였다. 물리적 특성이 유사한 암석공시체는 서로 유사한 공학적

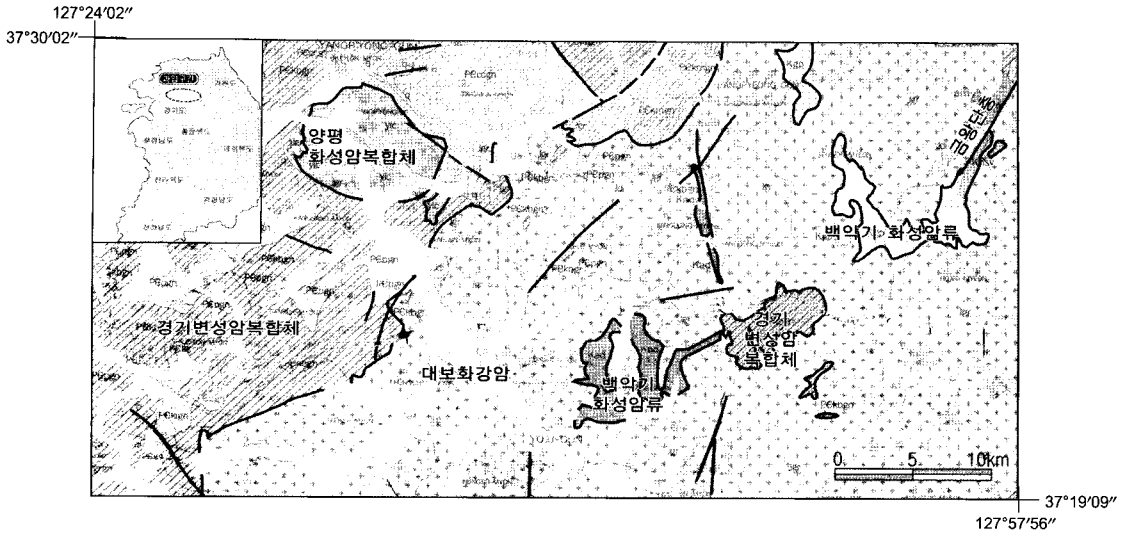


Fig. 1. Geological map of the study area

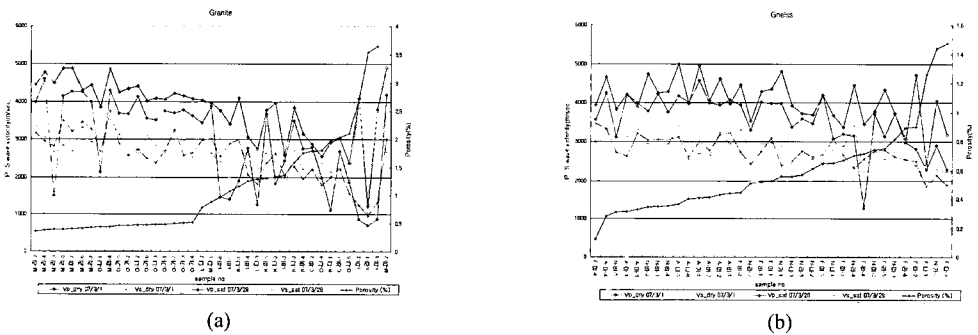


Fig. 2. Physical properties of rock specimens; (a) granite and (b) gneiss

특성을 지닐 수 있다는 가정 하에, 유사한 물리적 특성을 지닌 시료들은 동일한 풍화그룹으로 분류하였다.

이와 같은 방법은 일축압축강도의 심한 편차를 고려하여, 풍화실험 이전과 이후의 물성 비교를 위한 공학적 물성의 편차를 최소화시키기 위하여 사용되었다. 각 그룹 내에 속하는 암석 시료들은 풍화실험용과 비풍화실험용, 즉, 화학풍화실험을 거치지 않는 시료들로 분류하였다. 풍화실험 이후에는 풍화실험용 시료와 비풍화실험용 시료의 공학적 특성을 상호 비교하여 전반적인 공학적 물성 저감 효과를 예측하였다. 다음 그림은 본 실험을 위하여 공시체로 성형된 화강암 및 화강편마암 시료들의 물리적 특성 분포를 나타내고 있다.

공시체의 풍화등급은 Table 2의 분류기준법에 따라 공시체 시료의 변색, 변질 상태 등 외관상으로 풍화 정도에 의하여 일차적으로 분류되었다. Fig. 2은 현장에서 획득한 모든 시료의 초기 물성을 나타내고 있다. 이러

한 물성의 분포를 바탕으로 이차적인 풍화등급이 분류되었으며 이에 따른 각 물성 값의 범위가 결정되었다. 여기에서 풍화등급을 결정하는 데 가장 중요한 역할을 하는 물성 값은 시료의 공극정도를 나타내는 공극률이다. 본 연구에서는 탄성파속도는 편차가 상대적으로 크게 나타나 풍화등급을 구분하는 기준으로 사용하기 어려웠다.

Fig. 2에 나타난 시료들의 물성을 바탕으로 화학풍화실험을 위한 암석 시료들이 선별되었다. 연구지역의 암석은 초기 공극률에 따라 크게 4개의 그룹으로 분류 가능하다. 즉, 그래프 최하부에 분포하는 0.2~0.5%의 신선한 F 풍화등급의 시료들과, 그 바로 위의 0.5~0.7%의 SW 풍화등급, 그리고 상부의 1.5% 부근의 SW~MW, 2.0% 부근의 MW~HW 풍화등급으로 구분된다. 또한, 초기 P파 속도로 3개의 그룹으로 구분 수 있다. 즉, 4000-4500 m/sec, 3000-3500 m/sec 그리고 2000-2600

m/sec, 1000 m/sec 이하의 그룹으로 구분되며, 이들은 탄성과 속도와 관련된 기존 연구(Dearman et al., 1978, Irfan and Dearman, 1978, Kim and Hong, 1990, Iliev, 1966)의 풍화등급 분류에 의하면 각각의 그룹은 F, SW, SW~MW, MW~HW 등급으로 분류될 수 있다. 이러한 측정결과를 토대로 각 암종의 풍화등급은, 화강암의 경우, F, SW~MW, MW~HW의 풍화등급으로, 화강편마암의 경우는 F, SW, MW의 풍화등급으로 구분가능하다. 실험의 편의상 화강암의 풍화등급은 각기 F, SW, MW로 명명하여 실험을 진행하였다. 각 시료의 암종 및 풍화등급은 Table 3과 Table 4에 수록되어 있다. 또

한 풍화실험에 사용된 비실험용 시료와 실험용 시료들의 암종 및 풍화등급에 따른 물리적 특성의 범위가 Table 5에 수록되어 있다.

4. 실험방법

상기한 바와 같이 암석 시료들은 암종과 풍화등급에 따라 물리적 특성이 유사한 시료들을 분류하여, 동일 집단 시료들의 일부는 풍화실험을 거치지 않는 비실험용으로, 그리고 나머지 시료에 대하여서는 풍화실험용으로 구분하였다. 실험이 진행되는 동안 주기적으로 공극

Table 3. Rock types of the sample specimens

Sample no.	Granite		Gneiss	
	Hornblend Granite	Biotite Granite	Banded Gneiss	Porphyroblastic neiss
M-라-4	●			
M-마-7	●			
M-라-2	●			
K-다-1		●		
I-바-3		●		
C-바-2		●		
A-가-1				●
A-마-1				●
N-나-2			●	
F-다-3			●	
N-나-3			●	
N-바-2				●

Table 4. Weathering grade of the rock sample specimens

Sample no.	Granite			Gneiss		
	F	SW	MW	F	SW	MW
M-라-4	●					
M-마-7	●					
M-라-2	●					
K-다-1		●				
I-바-3		●				
C-바-2			●			
A-가-1				●		
A-마-1				●		
N-나-2					●	
F-다-3						●
N-나-3					●	
N-바-2				●		

Table 5. Range of physical properties of the pre-test sample specimens

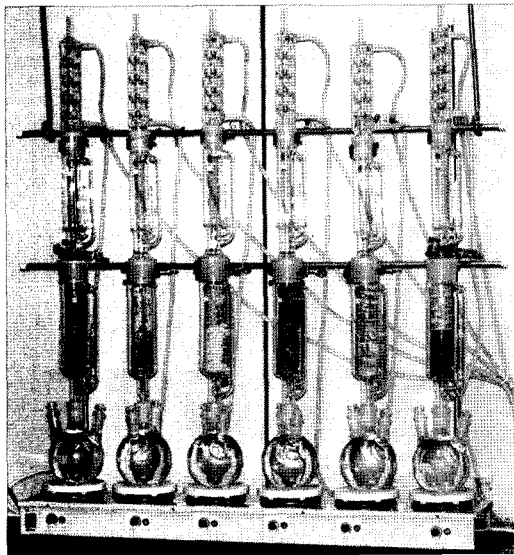
Rock Type	Weathering Grade	Porosity (%)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)	no. of sample
Hornblend Granite	F	0.35 ~ 0.40	4000~4500	2900~3200	8
Biotite Granite	SW~MW	1.30 ~ 2.00	2600~2900	2000~2600	12
	MW~HW	2.00 ~ 3.70	700~1800	600~1500	6
Banded Gneiss	SW	0.50~0.70	3200~3600	2800~3000	15
	MW	1.40~2.00	2500~2700	1900~2100	7
Porphyro-blastic Gneiss	F	0.30~0.40	4200~4700	3000~3400	11

를 및 탄성파속도 등과 같은 암석의 비파괴적 물리적 특성을 측정하여 시간에 따른 암석 물성의 변화 추이를 고찰하였으며, 화학풍화실험이 종료된 후에는 풍화실험용 암석시료와 비실험용 암석시료의 일축압축강도를 측정하여 이들의 변화에 대한 추이도 관찰하였다.

이 연구의 화학풍화실험은 이중속실텟추출장치(Double soxhlet extractor; Fig. 3)를 사용한 용탈실험(leaching test; Woo et al., 2008)이며 실험에서 사용된 용매는 약 70°C 정도의 증류수(pH=7)이다. 풍화 등급별로 구분된 암석시료는 이 용매에 90분의 주기로 지속적으로 침수 되도록 고안된 이중속실텟추출장치 내에서 가수 분해, 수화 작용, 산화·환원 작용 등의 화학적 풍화가 유발된다. 일일 인공 강우량은 2880 mm/day로서 국내 연강우량의 2배에 해당하는 가혹조건을 부여하였다. 암석시료의 용탈작용이 지속적으로 발생됨에 따라 하부 플라

스크에는 암석에서 용해된 이온들이 축적되면서 용매의 색상이 탁해지고, 침전물이 생성된다. 본 화학풍화실험은 암중 및 풍화등급별 암석시료에 대하여 대략 총 170일 동안 실시되었다.

암석 물성의 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 화학풍화실험이 수행되는 동안 10일 주기로 ISRM(1978) 방법에 기초하여 암석시료에 대한 물리적인 특성, 즉, 공극률 및 탄성파속도가 측정되었다. 또한 실험 중 하부 플라스크에 집적된 용매의 pH를 측정하여 시료에서 용탈되는 이온들에 대한 정량적인 평가가 수행되었다. 화학풍화실험 종료 후 용매에 집적된 침전물에 대하여서는 XRD 및 SEM/EDS를 사용하여 용탈된 화학성분을 분석하였으며 암석시료에 대해서는 SEM/EDS를 이용하여 풍화에 의한 시료의 외부 변화와 성분의 변화를 살펴보고있다. 한편 파편관찰을 통하여 암석의 화학적 풍화진행에 따른 광물결정의 변화를 고찰하였다.

**Fig. 3.** Double Soxhlet Extractors

5. 실험결과

5.1 용매의 pH 변화

Fig. 4에 나타난 하부 플라스크에 집적된 용매의 pH 변화는 암석의 종류에 상관없이, 즉, 모든 이중속실텟추출장치에서 동일한 추세를 보여주고 있다. 이러한 결과는 초기에 암석 시료 표면에서 용탈된 Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ 등과 같은 양이온의 영향으로 pH가 9.5 이상까지 상승하다가 양이온과 결합되었던 음이온이 추가적으로 용탈되어 pH가 하강되면서 pH=9 부근에서 안정화되는 추세를 보이는 것으로 판단된다.

5.2 공극률의 변화

화학풍화실험기간동안 매 10일마다 암석시료를 실험장치에서 탈거하여 암석의 공극률을 측정하였다. 각 암석시료는 48시간의 건조 후 시료의 무게를 측정하고,

다시 24시간 건조하여 무게를 재측정한 후, 그 차이가 0.01g 이하일 때, 시료의 건조질량으로 결정하였다. 건조 후에는 진공펌프를 이용하여 시료를 24시간동안 포화시켜, 포화질량을 측정하고 수중질량을 측정하여 시료의 부피를 산정하였다.

Fig. 5에 나타난 공극률 측정 결과에서 모든 풍화등급의 시료는 실험 초기부터 종료까지 측정 오차를 고려하면 공극률의 변화가 거의 없는 것으로 볼 수 있다. 즉, 대체적으로 신선한 암석 시료의 공극률은 0.5% 내외에서 변화 없이 지속되고 있었으며, 초기 풍화가 진전된 암석 시료는 1.5 ~ 2.0%의 공극률을 나타내며 의미 있는 변화가 관찰되지 않았다. 이와 같은 결과는 화학풍화실험 동안 측정된 건조중량의 변화가 대부분의 시료에서 0.1%미만으로 발생한 것을 참조하면 예상할 수 있는데, 이러한 결과는 연구 지역의 결정질 암석인 화강암 및 화강편마암을 구성하는 광물조직이 MW 등급에서도 치밀 견고하여 시료가 화학적 용탈작용에 안정함을 지시한다.

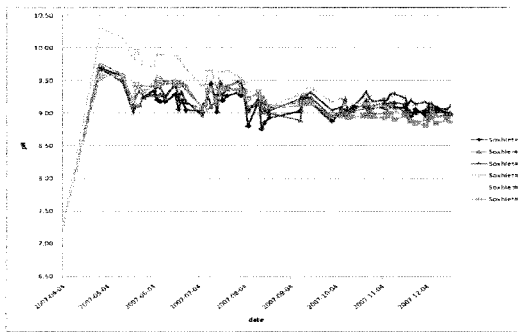


Fig. 4. Measured pH of solution in the lower flask during the leaching test

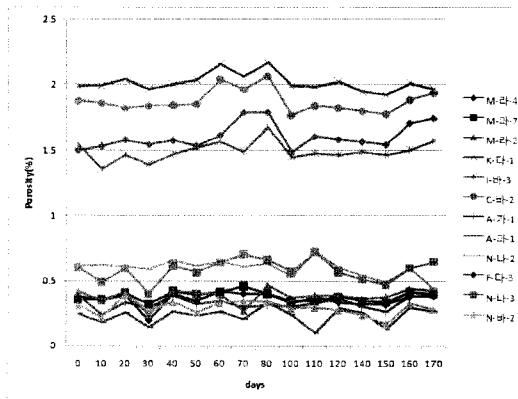


Fig. 5. Variation of porosity of rock specimens due to leaching test

5.3 탄성과 속도의 변화

탄성과 속도는 암석의 역학적 물성과 상관관계가 있으며, 특히, P파는 암석의 풍화상태와 밀접한 상관관계를 지니고 있다. P파와 S파 속도를 측정함으로써 비파괴실험적인 동탄성계수를 구할 수 있고 이를 실제 파괴 실험에서 얻은 탄성계수와와의 상관관계도 규명되고 있다(Eissa and Kazi 1988).

본 실험에서는 시료의 탄성파속도측정은 OYO사의 Sonic Viewer-SX를 사용하였으며, P파 및 S파 속도 측정시에는 500 kHz P-wave transducer와 100 kHz S-wave transducer를 사용하였다. Transducer와 시료와의 접촉 향상을 위한 실리콘은 화학풍화실험동안 시료의 공극률에 영향을 줄 수 있기 때문에 사용하지 않고 실리콘 필름을 접촉면에 사용하였다. 탄성파속도 측정은 시료의 건조 및 포화상태에서 각각 2~3회 수행되었다.

공극률이 화학풍화실험동안 변화가 없는 것과는 달리 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 건조 시료에 대한 P파의

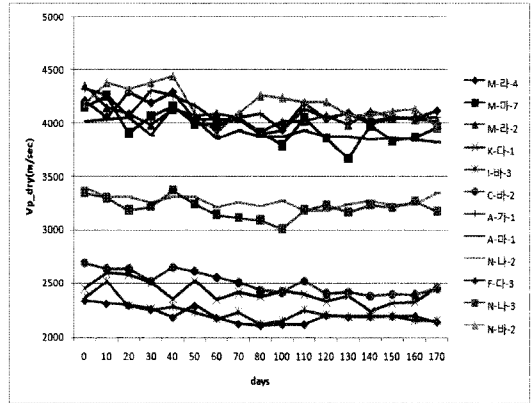


Fig. 6. P-wave velocity for dried specimens during the test

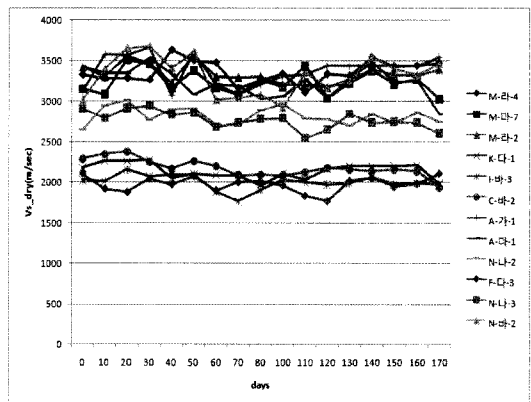


Fig. 7. S-wave velocity for dried specimens during the test

Table 6. Constituent elements in the precipitates detected using the SEM/EDS

Soxhlet no. / comp.	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)
#1	4.52	2.89	87.6	4.96
#2	3.50	4.04	85.91	6.54
#3	4.44	4.39	87.17	4.0
#4	5.39	5.05	85.07	4.49
#5	4.25	4.59	77.63	16.53
#6	5.15	4.6	84.91	5.35

속도는 대체적인 감소하는 경향을 보여주고 있다. 즉, F 등급에서는 대략 2~5%, SW 등급은 1~5%, 그리고 MW 등급은 8~9%의 P와 속도 감소가 발생했다. 이러한 P와

속도 감소는 풍화로 인한 외부표면과 transducer와의 접촉 상태 영향으로 발생할 수 있으며, 또한 전반적인 암석시료의 물성변화에도 기인할 수 있다. 그러나 S파

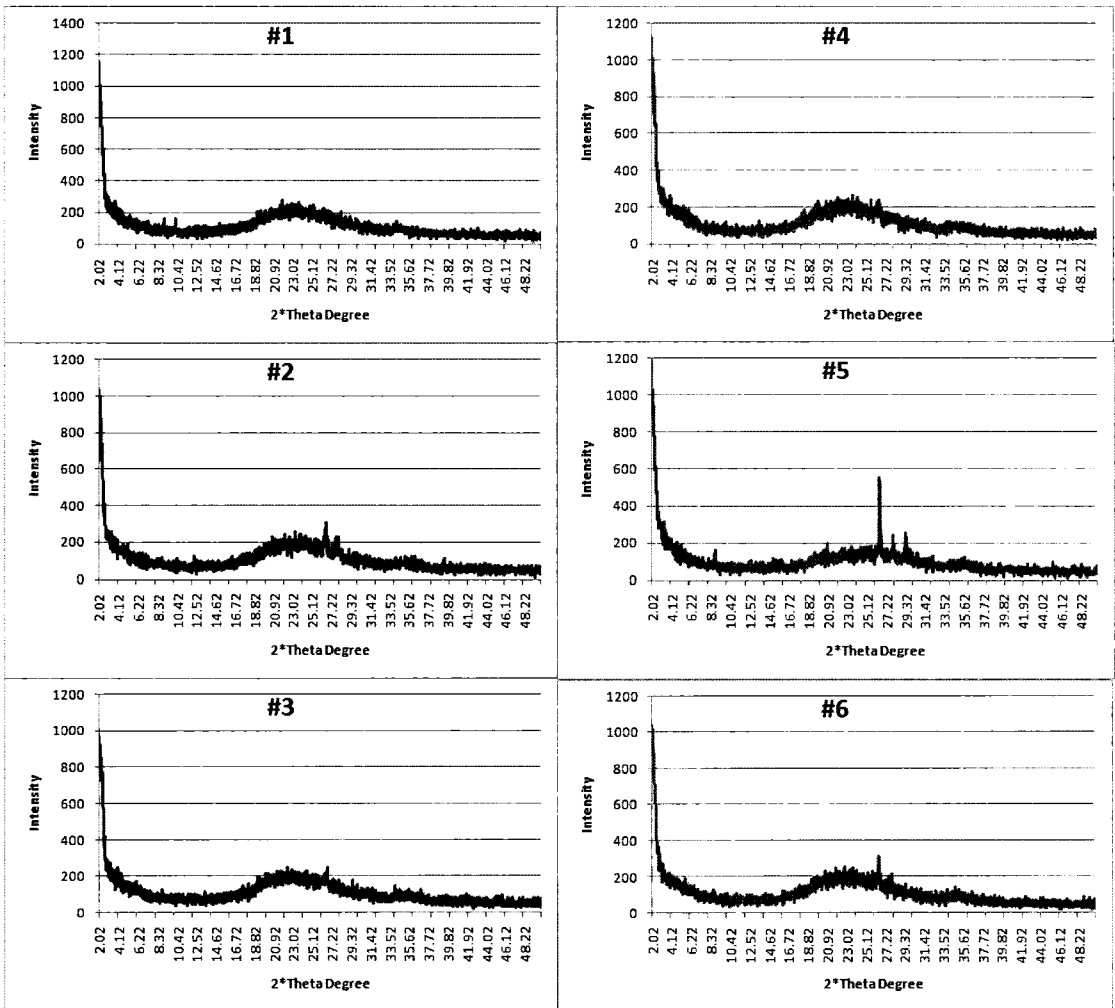


Fig. 8. XRD diagrams for precipitates of the solution in the lower flask after test

속도의 경우는 실험기간동안 큰 변화 없이 거의 일정한 값을 유지하였다(Fig. 7).

5.4 용매 집적물의 화학 성분

하부 플라스크의 용매를 건조시킨 후, 플라스크에 집적된 침전물은 따로 분리되어 화학분석이 수행되었다. XRD 분석에서는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 용탈된 이온들이 특정한 결정 구조를 가지지 못한 amorphous 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 시료에서 이탈된 석영 입자들이 간혹 XRD 그래프의 침투로 나타나고 있다. 구성 원자의 성분을 반정량적으로 분석하기 위하여 SEM/EDS 를 사용하여 침전물의 구성 성분을 분석한 결과 Table 6에 나타난 바와 같이 규소(Si^{4+})의 성분이 가장 많았으며, 나머지는 흑운모와 장석에서 분리된 MgO와 CaO, Al_2O_3 등으로 구성되어 있다. 화학풍화실험 동안 규산염광물이 주를 이루고 있는 화강암 및 화강편마암 시료에서 용탈된 원소들은 사장석과 흑운모와 등의 풍화 반응에 민감한 규산염광물에서 용탈된 규소와 Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} 등의 양이온들이다. 따라서 용매 집적물은 용탈 작용에 의하여 암석 표면의 광물로부터 양이온 및 규산염이온(SiO_4^{4-})이 분리되어 용매의 산소와 결합하여 콜로이드 형태로 존재하고 있음을 알 수 있다.

이러한 현상은 용매의 pH를 측정한 결과 - 용탈실험 초기에는 양이온의 용탈로 인하여 용매의 pH가 9.5까지 상승하다가 규산염이온과 같은 음이온의 용탈로 pH

가 다시 낮아져 100일 정도 후에는 양이온과 음이온의 용탈 정도가 균형을 이루어 pH=9 정도에서 안정화되는 현상 -와도 밀접한 관계를 지니고 있음을 알 수 있다.

5.5 암석 시료의 외적 변화

화학풍화실험을 하기 전 후의 시료를 비교하여 풍화가 진행됨에 따른 암상의 변화, 조성광물의 변색 등을 관찰하였다. Fig. 9의 각 시료표면 사진의 좌측사진은 화학풍화실험 전의 시료이며 우측사진은 화학풍화실험 후의 시료 사진이다.

화학풍화실험 후 암석 시료의 색상은 적갈색으로 바뀌어 외관적으로도 풍화가 발생한 것을 볼 수 있다. 흑운모의 산화에 의한 색상변화가 색상의 변화의 가장 큰 요인으로 작용하는 것으로 판단된다. 사장석의 경우에도 색의 변화를 볼 수 있으며 전체적으로 색상의 변화가 적갈색으로 변화됨을 보여주고 있다. 그러나 시료 절단 단면을 관찰한 결과, 풍화에 의한 색상의 변화는 단지 표면에만 국한되어 있었고 암석 시료 내부로의 풍화대 확장이 미약한 것으로 나타났다. 이에는 공극률 측정 결과에서도 유추할 수 있듯이 연구지역의 결정질 암석은 광물 결정의 경계가 치밀 견고하여 화학적 풍화만으로는 풍화가 촉진되기 어렵다는 것을 시사한다.

5.6 SEM 분석결과

본 연구에서는 외관상의 관찰이 어려운 시료 내부로의 풍화 침투 효과를 미시적으로 규명하기 위하여 전자

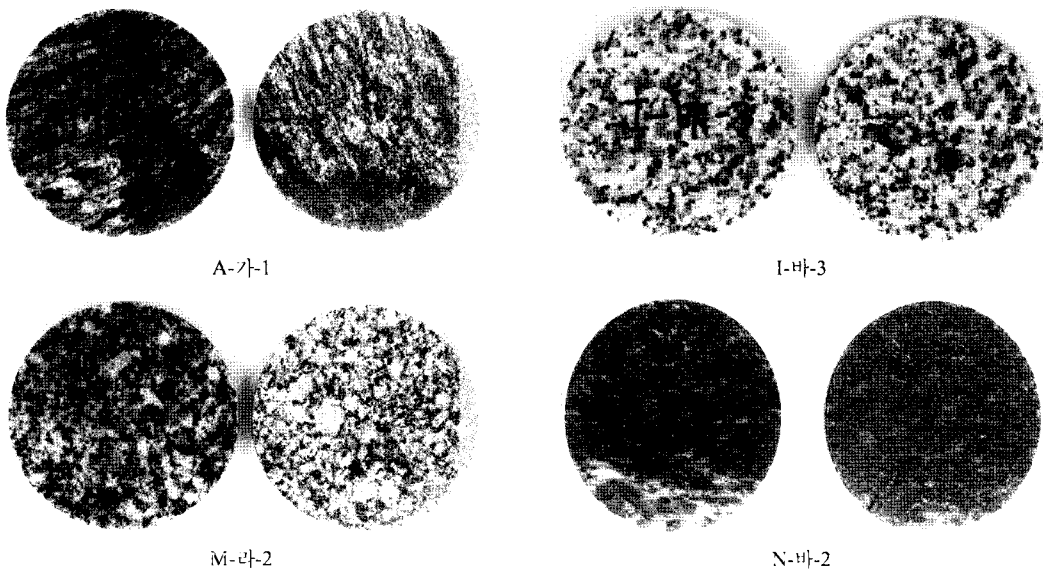


Fig. 9. Comparison of paired sample surfaces between before (left) and after (right) leaching test

주사현미경(SEM)을 이용하여 풍화 침투 정도 및 풍화에 따른 광물의 풍화양상을 관찰하였다. 이를 위하여 화학풍화실험을 거친 암석 시료의 상부 부분 - 즉, 용탈 작용의 영향을 직접 받은 부분 - 을 1 cm 정도의 두께로 얇게 절단한 조각에 대하여 SEM 분석을 실시하였다. 특히, 용탈 작용을 받은 암석 시료의 외부 표면과 내부 표면을 서로 비교하여 화학풍화실험의 효과를 고찰하였다.

Fig. 10(a)는 화강암 시료의 가장자리 부분을 확대한 영상으로 시료의 외부 표면에서만 화학적 풍화의 영향이 미친 것을 볼 수 있다. 이는 앞의 외관적 관찰 결과와도 일치하며 암석 내부로의 풍화 침투가 매우 제한적인 것을 영상에서 확인할 수 있다. Fig. 10(b)는 풍화된 암석 시료의 사장석에 대한 영상으로 사장석의 일부가 용탈되어 있는 상태를 보여주고 있다. Fig. 10(c)와 Fig. 10(d)는 각각 흑운모와 사장석의 영상인데, 흑운모에서 부분적으로 풍화가 약간 진행된 상태를 그리고 사장석

은 풍화를 받은 후 2차적인 물질이 생성되어 있는 상태를 보여주고 있다.

SEM 분석과 상기 외관상 표면 분석 결과, 용탈시험에 의한 화학적 풍화가 연구지역의 결정질 암석에 미치는 영향은 암석 표면에 국한되어 있었으며, 부분적으로 풍화반응정도가 다른 조성광물에 따라 차별적인 풍화 침투 현상이 발생하였음을 알 수 있다.

5.7 박편관찰

박편관찰은 화학풍화실험에 따른 조성광물의 풍화 영향을 고찰하기 위하여 화학적 풍화에 취약한 광물의 입자 경계 및 미세균열 발달 등에 초점을 두었다. 신선한 화강암 박편에서는 대부분의 입자들간의 경계가 치밀하나, 이미 사장석과 흑운모 등과 같은 풍화에 취약한 광물들에 대해서는 화학적풍화가 진행된 상태였다(Fig. 11(a)).

그러나 화학풍화실험으로 암석시료 전반에 걸친 풍화

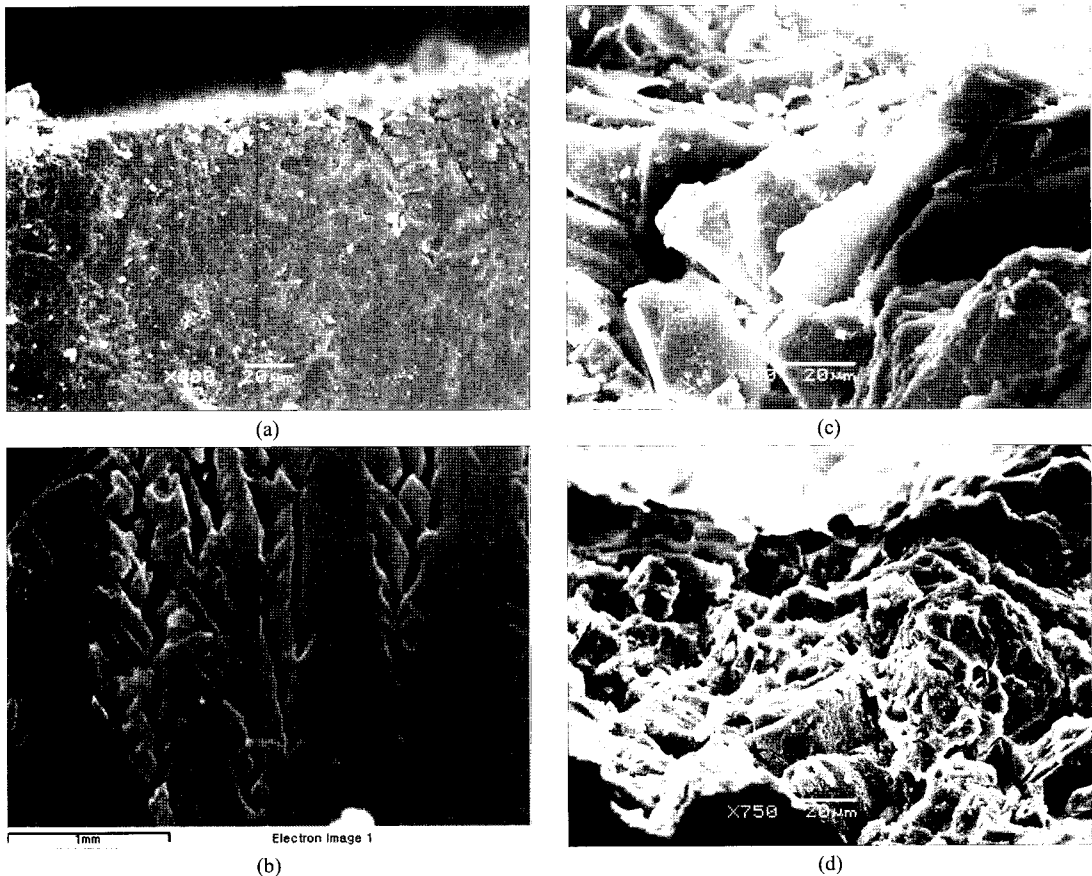
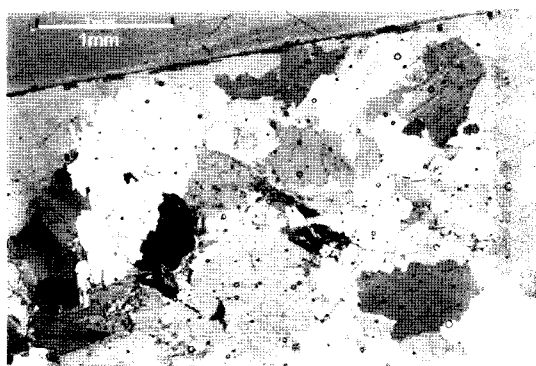
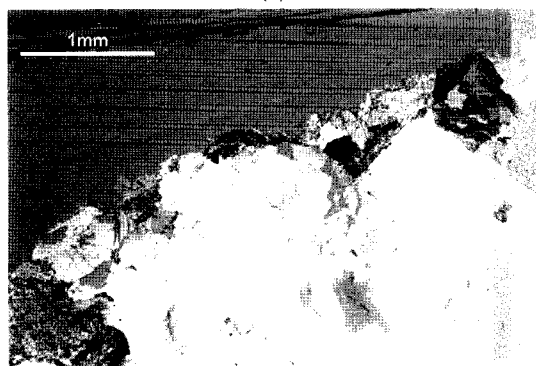


Fig. 10. SEM images for rock specimens after the leaching tests of hornblende granite (a, b) and banded gneiss (c, d)

실험의 영향을 관찰할 수는 없었으나, Fig. 12와 같이 일부 시료의 최외각 광물의 일부에서 풍화 침투 흔적을 관찰할 수 있었다. Fig. 11(b)에서 보는 바와 같이, 겉표면부위의 사장석과 흑운모들에게서는 화학풍화의 영향으로 아주 얇은 풍화대가 발달하고 있어, 화학풍화의 침투가 암석시료 표면에만 국한적으로 발생되었다



(a)



(b)

Fig. 11. Thin section of F-grade granite (a) before and (b) after leaching test

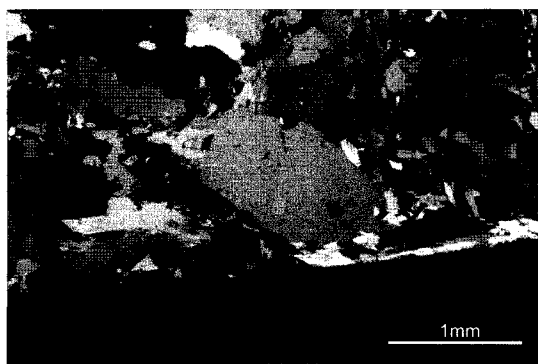


Fig. 12. Thin section of F-grade orthogneiss after leaching test

는 것을 알 수 있다.

화강편마암의 경우는 신선한 암석시료에 대해서는 화학풍화실험에 의한 특이한 변화가 없었다(Fig. 12).

5.8 일축압축강도의 변화

비풍화실험용 시료와 풍화실험용 시료에 대한 일축압축강도 실험을 실시하여 화학풍화실험에 따른 시료의 압축강도의 변화를 측정하였다. Fig. 13은 화강암의 화학풍화실험에 따른 일축압축강도변화를 나타내고 있다. 앞에서 언급하였듯이 화강암의 경우는 공극률에 따라 크게 3 그룹으로 분류할 수 있다. 신선한 F 등급의 암석 시료의 일축압축강도는 화학풍화실험 이후의 강도가 비풍화실험용 시료에 대비하여 평균값이 20% 감소하였다. SW 등급의 암석 시료는 일축압축강도의 평균값이 풍화실험전과 후를 비교하였을 때 약 16% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 한편 Fig. 13에서 MW 등급 그룹의 시료는 풍화실험 전과 후의 일축압축강도가 변화를 보이지 않는 것으로 나타나지만 화학풍화실험 후 측정된 하나의 일축압축강도 값으로 변화의 추이를 논하기에는 한계가 있다.

화강편마암의 경우에는 Fig. 14에 나타난 바와 같이

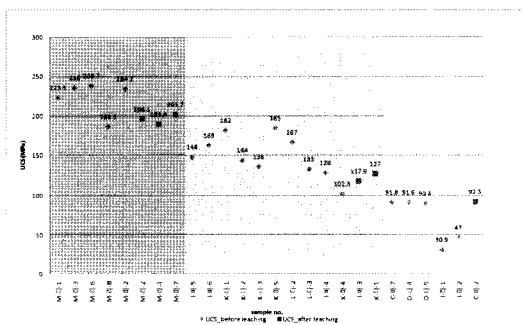


Fig. 13. UCS of granite before and after leaching test

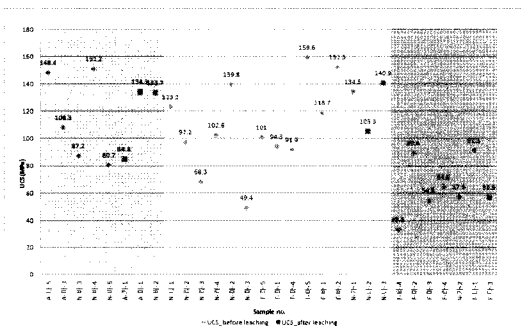


Fig. 14. UCS of orthogneiss before and after leaching test

F, SW, MW의 세 그룹으로 구분하여 화학풍화실험에 따른 일축압축강도의 변화를 고찰하였으나, 화강암과는 달리 모든 풍화등급에서 일축압축강도의 변화를 확인하기 어렵다. 이에 연구지역의 화강편마암이 엽리에 의한 이방성이 뚜렷하여 이방성에 의한 일축압축강도의 편차 범위가 화학풍화실험에 의해 저감될 수 있는 일축압축강도의 범위를 초과하기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

이 연구는 강원도 원주 일대에 분포하는 화강암 및 화강편마암에 대하여 이중속실험추출장치를 이용한 총 170일간의 화학풍화실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 화학풍화실험 동안에 Mg^{2+} , Ca^{2+} 이온의 용탈로 인하여 용매의 초기 pH는 급격하게 염기성으로 변하여 대략 pH=9.5까지 증가한다. 이 후 규산염이 추가로 용탈되어 용매의 pH가 감소되어 pH=9에서 안정화되는 추세를 이룬다. 따라서 연구지역 암석의 주 구성광물 중 사장석과 흑운모 등이 풍화에 민감한 광물로 판단된다.
- 2) 공극률의 변화는 실험 동안 거의 발생하지 않았으며, 약간의 값 변화는 측정오차에 기인하는 것으로 판단된다. 전반적으로 P파 속도는 감소하는 경향으로 나타났으며 초기 풍화도가 높은 암석에서 화학적 풍화가 진행 될수록 속도의 감소도 뚜렷해진다.
- 3) 화학풍화실험이 진행되는 동안 풍화침투정도를 파악하기 위한 시료의 외관관찰, SEM 분석 및 박편관찰을 실시한 결과 암석 시료의 외부 표면에만 국한하여 풍화의 영향이 관찰되었으며, 부분적으로 화학적 풍화에 민감한 광물에서 차별적인 풍화영향이 확인되었다. 연구지역의 결정질 암석은 광물 결정의 경계가 치밀 견고하여 화학적 풍화만으로는 암석 물성의 저감 효과가 미약하다고 사료된다.
- 4) 신선한(F~SW) 화강암시료는 화학풍화실험에 의하여 일축압축강도 값이 16~20% 정도 감소하였다. 화강편마암의 경우에는 이방성에 의한 강도 편차가 풍화에 의한 강도변화보다 크게 나타나므로 변화의 추이를 규명하기 어렵다고 판단된다.
- 5) 본 연구에서는 제한적인 실내실험조건에서 화학적 풍화만 고려하여 화강암 및 화강편마암의 풍화특성을 연구하였으나 실제 자연현상의 풍화현상을 규명하기 위해서는 물리적 풍화가 병행된 조건에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.

사 사

이 논문은 2006년 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-312-C00693)을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 1996, 터널공사표준시방서, 서울, pp. 21-36.
2. Carroll, D., 1970, Rock weathering. *Plenum Press*, 203p.
3. Dearman, W.R., 1976, Weathering classification in the characterisation of rock. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, N° 13, pp. 123-127.
4. Dearman, W.R., 1995, Description and classification of weathered rocks for engineering purposes: the background to the BS5930: 1981 proposals. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 28, N° 3, pp. 267-286.
5. Dearman, W.R., Baynes, F.J. and Irfan, T.Y., 1978, Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*, vol. 12, pp. 345-374.
6. Eissaa, E.A. and Kazi, A., 1988, Relation between static and dynamic Young's modulus of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 25, pp. 479-482.
7. Fookes, P. G., Dearman, W.R. and Franklin, J.A., 1971, Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 4, pp. 139-185.
8. Fookes, P.G., Gourley, C.S. and Ohikere, C., 1988, Rock weathering in engineering time, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 21, N° 1, pp.33-58.
9. G.S.E.G., 1995, Geological Society Engineering Group Working Party Report : The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 28, N° 3, pp. 207-242.
10. Iliev, I.G., 1966, An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physicommechanical properties, *Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, pp. 109-114.
11. Irfan, T.Y. and Dearman, W.R., 1978, Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, N° 17, pp. 79-90.
12. ISRM, 1978, Suggested methods for determining sound velocity : *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 15, pp. 53-58.
13. ISRM, 1979, Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 16, pp. 137-140.
14. Kim, Y.H. and Hong, S.H., 1990. A quantitative study on the variational features of rock properties followed

- by weathered in granites. *Journal of Korean Institute of Mining and Geology*, vol. 23, N° 2, pp. 221-232.
15. Lee, S.G. and De Fretas M. H., 1989, A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 22, pp. 31-48.
16. Lumb, P., 1983, Engineering properties of fresh and decomposed igneous rocks from Hong Kong. *Engineering Geology*, vol.19, N°2, pp. 81-94.
17. Onodera, T.F., Yoshinaka, R., Oda, M., 1974, Weathering and its relation to mechanical properties of granite. *Proceedings 3rd. International Congress of Society for Rock Mechanics*, Denver, vol. 2A, pp. 71-78.
18. Price, D.G., 1995, Weathering and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 28, N°3, pp. 243-252.
19. Woo, I., Fleurisson, J.A, Park, Y.J., Han, K.C, Song, W.K., Par, H.J., Kim, I.S., 2008, Essai d'alteration chimique acceleree au laboratoire par le double extracteur Soxhlet. Application a des roches granitique de Coree du Sud., *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 67, pp. 443-452.

우 익

1988년 연세대학교 지질학과 이학사
1992년 연세대학교 지구물리학 이학석사
2003년 Ecole des Mines de Paris 지질공학박사

Tel: 063-469-1863
E-mail: woo@kunsan.ac.kr
현재 군산대학교 해양건설공학과교수



엄 정 기

1988년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사
1990년 연세대학교 대학원 지질학과 이학석사
1997년 University of Arizona 자원지질공학과 공학박사

Tel: 051-629-6559
E-mail: jum@pknu.ac.kr
현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수



박 혁 진

1990년 연세대학교 지질학과 학사
1993년 연세대학교 지구물리학 석사
1999년 Purdue Univ. 지질공학 박사

Tel: 02-3408-3965
E-mail: hjpark@sejong.ac.kr
현재 세종대학교 지구정보공학과교수

