

## 춘천시 신북지역에 분포하는 운모편암의 물리적 풍화특성

우 익<sup>1\*</sup> · 한병현<sup>2</sup>

<sup>1</sup>군산대학교 해양시스템공학전공, <sup>2</sup>삼성물산 건설부문

### Physical Weathering Characteristics of Mica-Schist in Sinbuk Area, Chuncheon, Korea

Ik Woo<sup>1\*</sup> and Byeong-Hyeon Han<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ocean-System Engineering Major, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

<sup>2</sup>Technical Advisory Team, Samsung Corporation, Gyonggi-Do 463-824, Korea

This study shows the weathering characteristics of mica-schist affected by faulting and metamorphism through laboratory tests. Frozen-thaw test, which simulate the physical-chemical weathering processes in the laboratory, shows the important influence of foliation developed in mica-schist, resulting in 20~40% reduction of UCS according to weathering grade of rock. Slaking durability test was carried out for different weathering grade rock specimens and indicated that the specimens from fault area had a low durability index compared to other relatively fresh samples. XRD analysis allowed to estimate the dynamic evolution of mineral composition through wet-dry cycle in which the chlorite was the most important mineral leached out during slaking test. The creep test indicated that the main deformation produced along the foliation plane. The compacted clay minerals between discontinuity planes influence on the discontinuity shearing properties and result in a big difference between peak shear strength and residual strength. The results of laboratory tests on mica-schist show the possibility of a important deformation along the foliation plane or discontinuity.

**Key words** : Mica-schist, Faulting, Physical weathering, Foliation, Discontinuity shear strength

본 연구는 변성 및 단층의 영향을 받은 운모편암의 풍화 특성에 관한 고찰로 여러 실내 실험을 통하여 운모편암의 풍화 특성을 규명하였다. 물리적·화학적 풍화현상을 모사한 동결-융해실험은 운모편암에 발달한 엽리면의 영향으로 일축압축강도의 저하가 풍화상태에 따라 20~40% 발생함을 보여주고 있다. 서로 다른 풍화등급의 가진 시료에 대하여 슬레이킹 내구성 실험을 실시한 결과 단층과쇄대부근의 심한풍화상태의 시료의 내구성 지수가 상대적으로 신선한 시료보다 낮음을 볼 수 있었다. 슬레이킹 실험 전후의 시료에 대한 XRD 분석을 통하여 건습에 의해 녹니석과 같은 점토광물이 용탈되는 광물의 동적변화양상을 알아보았다. 시간에 따른 운모편암의 거동은 크립시험을 통하여 알아보았는데 이 역시 암석내에 발달한 엽리면에서의 거동이 주요한 변형 원인으로 나타났다. 불연속면의 전단특성은 불연속면에 충전되어 있는 점토광물의 영향을 많이 받고 있으며 최대전단강도와 잔류전단강도의 차이가 크게 발생함을 볼 수 있었다. 이러한 실내실험들은 운모편암의 공학적 특성은 엽리면 혹은 불연속면의 거동에 많은 영향을 받을 것이라는 것을 보여주고 있다.

**주요어** : 운모편암, 단층작용, 물리적풍화, 엽리면, 불연속면전단강도

## 1. 서 론

변성암에서 흔히 볼 수 있는 엽리조직 중 강엽리는

판상, 엽상 또는 침상의 광물들이 광물학적으로 우세한 암석에 발달해 있다(Raymond, 2003). 특히, 아질스카글리오스(argile scagliose)라 불리우는 세일이나 점

\*Corresponding author: woo@kunsan.ac.kr

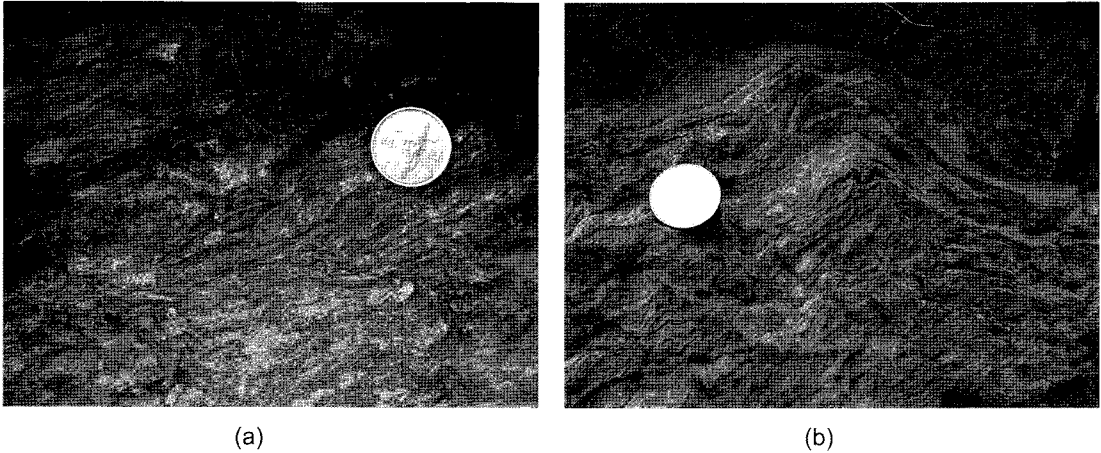


Fig. 1. Foliated mica-schist (a) and micro-fold structure of mica-schist (b) in Sinnuk, Chuncheon.

관암과 같이 점토광물이나 미세운모가 많은 암석이 전단력에 의하여 생긴 강엽리를 지닌 변성암의 엽리면은 매우 매끈하며 평탄한 양상을 띠곤 한다(Pluijm and Marshak, 1997). 이러한 강엽리의 변성암으로 구성된 암반 구조물은 엽리면의 특성상 안정성에 많은 문제점이 제기되곤 한다.

이러한 변성암은 단층 작용과 더불어 나타나기도 하여 암반 내에 발달한 엽리면과 단층면을 따른 거동이 주요 변형 요인이 되곤 한다.

본 연구는 단층대 부근에 분포해 있는 강엽리를 지닌 운모편암에 대한 지질공학적 물성에 대한 고찰로 장기적인 풍화 작용을 받을 경우 운모편암의 공학적 물성의 변화에 대하여 논하였다.

## 2. 연구 지역 지질

본 연구지역은 행정적으로는 강원도 춘천시 신북읍에 위치하고 있으며, 지질적으로는 운모편암과 호상편마암, 석영편암, 석영장석질편마암 등으로 구성되어 있고 석회규산염암, 화강편마암, 안구상편마암이 소규모로 분포하며 후기의 암맥류가 관입하고 있다. 특히 운모편암은 이질의 퇴적물이 변성작용을 받아 형성된 암석으로 편상의 엽리구조가 발달되어 있으며 유색광물로 흑운모와 백운모가 주를 이루고 있다(Fig. 1a). 운모류에 의해 정의되는 엽리면은 평탄하며 연속성이 좋고 엽리간격은 매우 좁다. 운모편암을 구성하고 있는 흑운모 중 다수는 녹니석화되어 편암의 엽리면을 충진하고 있는 경우가 많이 관찰되고 있다. 녹니석은 또한 기타 변성작용시 받은 높은 압력에 의하여 짙은 색의 압축

된 형태로 엽리면 혹은 절리면을 충진하고 있어 절리면의 전단강도를 저하시키는 요인으로 작용하고 있다.

구조적으로는 본 연구지역은 많은 단층이 존재하고 있어 터널과 같은 지중구조물 및 사면과 같은 지상암반구조물에 불리한 영향을 미칠 수 있다. 대부분의 이 지역 단층은 0.2-0.3m의 비교적 넓은 폭을 지닌 채 발달해 있고, 단층의 전단운동으로 발생한 일라이트, 녹니석 등이 주 구성분을 이루고 있으며, 흑색을 띠고 있는 단층점토가 발달한 곳이 관찰된다.

본 연구지역의 단층점토는 녹니석 등과 같은 점토광물이 변성작용에 의하여 압축-열화된 형태로 나타나는 것으로 엽리면 또는 단층면을 따라 충진하여 절리나 단층의 전단강도를 현격하게 저하시키는 중요한 요인으로 작용하고 있다. 또한, 단층을 따라 부분적으로 파쇄가 발달한 구간들은 녹니석으로 변질되어 교란이 심하게 나타나고 있으며, 특히 두 단층이 교차하는 부분에서는 심한 파쇄와 엽리의 변형구조가 관찰되고 있다(Fig. 1b).

## 3. 연구 방법 및 연구 결과

본 연구를 위하여 단층대 부근의 시추코어에서 운모편암시료를 채취하였다. 선정된 운모편암 시료에 대하여 물리-화학적 풍화작용이 풍화정도에 따라 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위하여 다음과 같은 실내 실험을 실시하였다. 즉,

- 1) 신선한 운모편암과 풍화가 진행된 운모편암에 대하여 산 침수에 의한 동결-융해 실험을 실시한 후의 물성 변화 고찰

- 2) 슬레이킹 내구성 실험 (slaking durability test)을 통한 물에 대한 암석 내구성 고찰
- 3) 슬레이킹 내구성 실험 전과 후의 시료에 대한 XRD 분석을 통한 구성 광물들의 동적 변화에 대한 고찰
- 4) 여러 조건의 절리면에 대한 절리면 직접전단 실험을 통한 절리면 전단 특성 평가

**3.1. 시료 선정 및 특성**

본 연구지역에 분포하고 있는 운모편암의 장기적인 풍화에 의한 물성 변화를 고찰하기 위하여, 본 연구지역의 단층과쇄대 부근에 위치한 NX 크기의 운모편암 시추코어(코어외경 52 mm)에 대하여 G.S.E.G.(1995) 및 Woo(2003)의 암석의 풍화등급에 따라 시료를 채취하였다. 운모편암시료는 풍화정도에 따라 본 연구에서는 크게 2가지로 분류하여 풍화실험을 실시하였다.

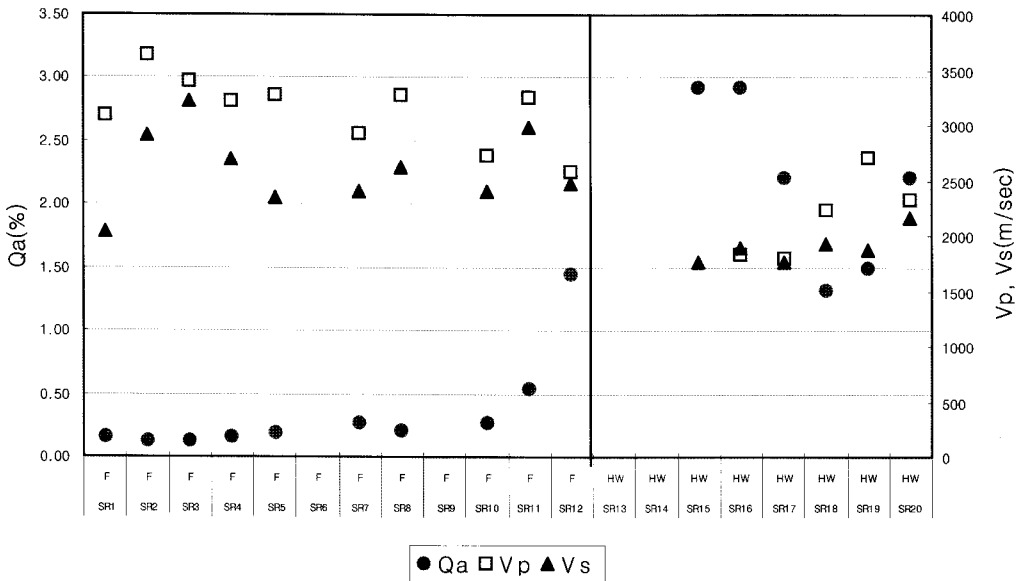
- 신선한 등급(F 등급)
  - 보통 풍화와 심한 풍화 사이의 암석(MW-HW 등급)
- 선정된 시료는 실내실험을 위하여 지름 52 mm 길이, 100 mm의 원통형 시료로 성형하였다.

자연 상태의 암석은 비등방·비균질이기 때문에 실내 실험에서 여러 가지 오차 및 편차가 발생할 수 있다. 이러한 실험물성 값에 관한 오차 및 편차를 최대한 줄이기 위하여 같은 풍화등급에 속하는 암석 시료들의 풍화실험 이전의 흡수율 및 탄성과 속도를 측정

하여 이들 값을 비교한 후 서로 유사한 값을 지닌 암석시료에 대하여서 실내 실험을 수행하였다. 이는 동일한 물리적 특성을 가지는 암석 시료는 유사한 압축강도를 가질 수 있는 확률이 높기 때문이다. 파괴실험인 압축강도시험은 풍화실험 전후의 동일 시료에 대한 강도 특성의 변화를 파악할 수 없기에, 본 연구에서는 유사 물성을 지닌 암석 시료 중 일부는 풍화실험을 하지 않고 일축압축강도를 측정하고 나머지는 풍화실험을 실시한 후 강도를 측정하여 풍화실험 전후의 강도에 대한 비교를 실시하였다.

다음의 Fig. 2에서는 암석시료의 흡수율 및 탄성과 속도의 분포를 풍화등급에 비추어 보여 주고 있는데, 신선한 F 등급의 흡수율은 0.13~0.27%의 범위로 나타나고 있으며, P와 탄성과 속도는 2700~3600 m/sec, S와 탄성과 속도는 2000~3200 m/sec의 범위를 보여 주고 있다. 또한, 풍화등급 MW-HW의 암석 시료는 신선한 암석시료보다 큰 편차를 보여주고 있다. 즉, 흡수율은 1.31~2.93%, P와 속도는 1800~2700 m/sec, S와 속도는 1700~2200 m/sec의 범위를 가짐을 볼 수 있다.

Table 1에서는 측정된 물리적 물성의 범위에 따라 나누어진 그룹을 표시하고 있다. 즉, 신선한 F 등급의 시료들은 2개의 그룹으로, MW-HW 등급의 암석의 물리적 물성은 F 등급의 암석보다 큰 편차로 인하여 총 3개의 그룹으로 구분할 수 있다. 구분되어진 각 그룹의



\*Qa: quick absorption ratio, Vp: P-wave velocity, Vs: S-wave velocity

Fig. 2. Physical properties of sample specimens.

**Table 1.** Physical properties of samples for the weathering test.

Weathering Grade	F		MW-HW		
	I	II	I	II	III
Q <sub>A</sub> (%)	0.13~0.18	0.21~0.27	2.92~2.93	2.21~2.22	1.31~1.49
V <sub>p</sub> (m/sec)	3100~3600	2700~3300	≅1800	1800~2300	2200~2700
V <sub>s</sub> (m/sec)	2000~3200	2400~2600	≅1800	1700~2200	1800~1900
Sample No.	SR1,3,4,5	SR7,8,10	SR15,16	SR17,20	SR18,19

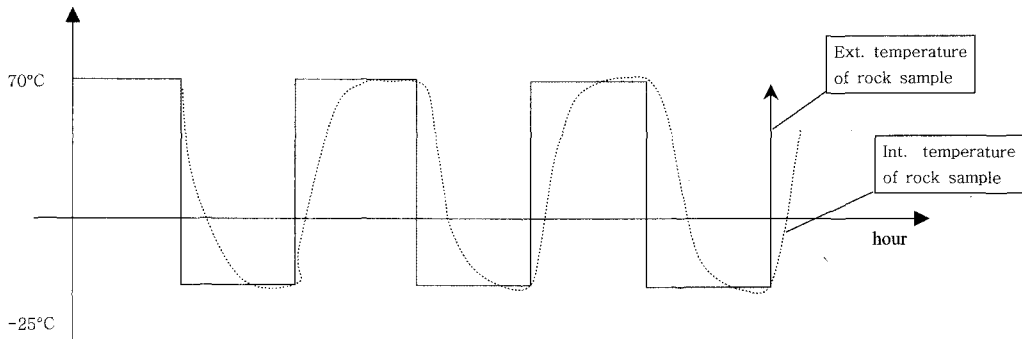
\*Q<sub>A</sub>: quick absorption ratio, F: fresh, MW: moderately weathered, HW: highly weathered

물리적 물성 분포를 기존의 연구결과와 비교하여 보면 F등급의 그룹 I의 흡수율 분포는 Irfan and Dearman (1978)의 분류에 의하면 F등급의 분포에, Dearman *et al.*(1978)과 Kim and Hong(1990)에 의하면 SW등급에 해당하며, 그룹 II는 Irfan and Dearman(1978) 및 Dearman *et al.*(1978) Kim and Hong(1990)의 연구에 의하면 SW등급에 해당한다. MW-HW등급의 그룹 I과 II는 Irfan and Dearman(1978) 및 Dearman *et*

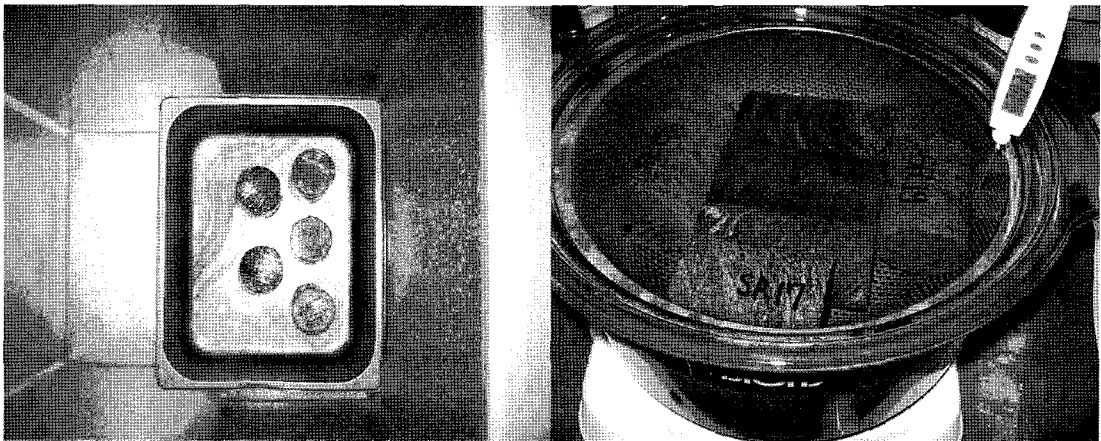
*al.*(1978)의 흡수율 및 탄성파전파속도와 암반 풍화등급에 관한 연구에 의하면, HW등급에, III은 MW에 해당하며, 탄성파속도는 그룹 I은 MW-HW, 그룹 II는 MW, 그리고 그룹 III은 SW-MW에 각기 해당됨을 알 수 있다.

**3.2. 동결-용해 실험**

실내 풍화실험에서는 자연 상태에서 암석이 겪을 수



**Fig. 3.** Frozen-thaw cycle(frozen at -25°C and thaw at 70°C for 12 hours).



(a)

(b)

**Fig. 4.** Samples under (a) frozen phase in freezer at -25°C and (b) thaw phase in hot water at 70°C for 12 hours.

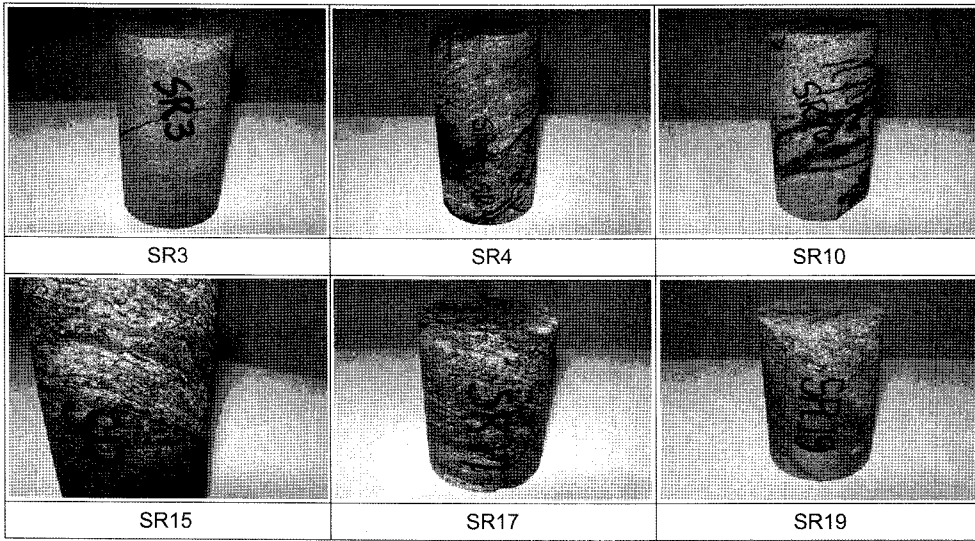


Fig. 5. Surface condition of rock specimens after 18 cycles of frozen-thaw test.

있는 풍화조건을 고려하여 좀 더 가혹한 조건으로 암석에 대한 풍화현상을 구현하였다. 이를 위하여 풍화 등급에 따라 선정된 운모편암 공시체를 다음과 같은 조건하에서 총 30 cycles에 해당하는 동결-융해 실험을 실시하였다(Fig. 3).

즉, 풍화는 기후조건과 아주 밀접한 관계를 지니고 있다. 본 연구지역의 기후는 겨울에는 평균최저온도가 영하 5°C, 낮 기온은 영상으로 일교차에 따른 동결-융해작용이 암석에 영향을 미칠 수 있고, 또한 계절변화에 따른 동결-융해작용이 발생하는 지역이다. 이러한 기후조건을 감안하여 실내실험에서는 동결시에는 영하 25°C에서 포화된 암석을 8시간 동안 동결시켜 암석내의 공극 혹은 절리에 있는 물의 팽창압력을 증대시켰으며, 해동시에는 온도 및 산성도에 의한 화학적 풍화 속도를 증가시키기 위하여 해동 용매의 산성도를 황산을 이용하여 pH=5 로, 온도는 70°C로 조절하여 8시간 동안 해동시켜 실험실에서의 상대적으로 짧은 시간 동안의 풍화 가속효과를 주었다(Fig. 4).

특히, 동결시에는 수분방지랩을 사용하여 동결시에 발생할 수 있는 공시체내의 수분 증발을 방지하였다. 실험 동안 암석공시체에 나타나는 외적인 변화를 관찰하고 실험 전후의 물리적 특성과 역학적 특성을 비교하여 풍화실험에 따른 암석의 공학적 물성 변화 양상을 관찰하였다

3.2.1. 외관상의 변화

Fig. 6은 암석시료에 뚜렷한 변화가 보이기 시작한

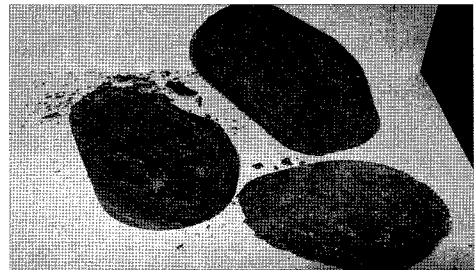


Fig. 6. Rupture along foliation planes in rock specimen SR15.

18 cycles이 끝난 후의 시료 사진으로 전체적인 풍화실험에 의하여 발생한 암석 표면의 변화는 다음과 같다.

신성한 암석 시료(F)

- 화학적 풍화보다는 물리적인 풍화 작용에 의한 영향이 더 크게 나타남.

- 아래 Fig. 5의 18cycles 끝난 후의 사진에 나타나듯이 엽리를 따른 물의 침투가 13 cycles 부터 확연하게 표시됨.

- 동일 F 등급에서도 Group I 에 속하는 암석보다 흡수율이 높은 Group II 에 속하는 SR-10에서 더 확연히 나타남.

풍화 암석 시료(MW)

- 화학적인 작용에 의하여 표면의 광물들의 산화 흔적이 많이 나타남.

- 동결-융해에 의한 물리적인 풍화 작용에 의한 영향으로 26 cycles에서 SR-15 내에 발달한 엽리를

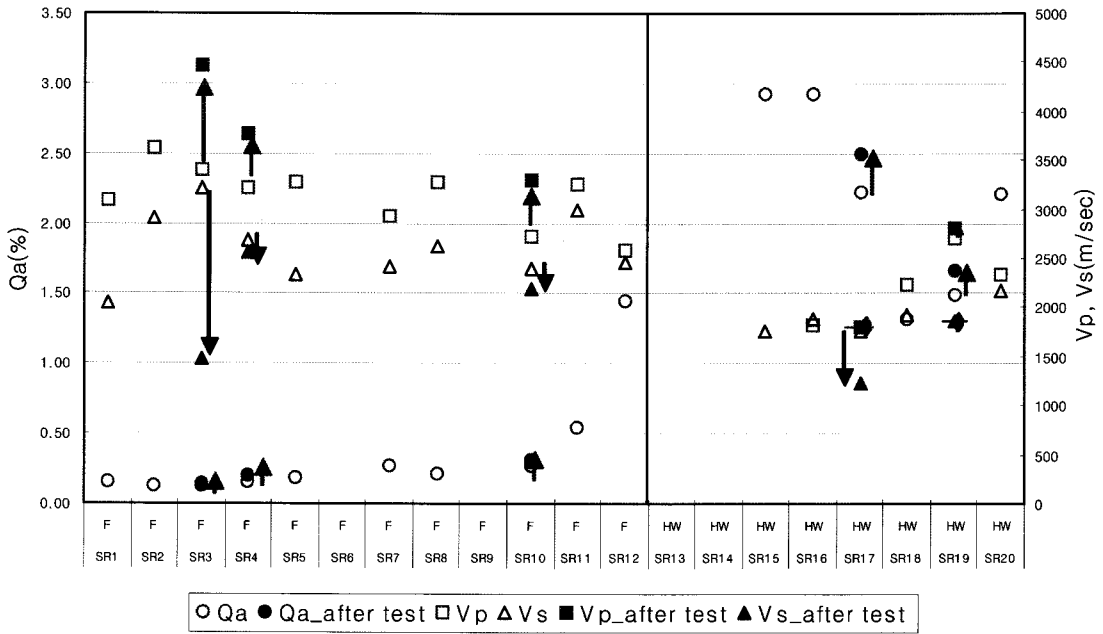


Fig. 7. Evolution of physical properties of rock specimens after weathering test.

Table 2. Variation of physical properties after weathering test.

Weathering Grade	Sample No.	Change		
		Q <sub>A</sub> (%)	V <sub>p</sub> (%)	V <sub>s</sub> (%)
F	SR-3	9.9	31.5	-54.1
	SR-4	25.4	17.3	-4.8
	SR-10	13.6	20.5	-8.1
MW-HW	SR-15	rupture after 26 cycles		
	SR-17	12.7	-0.3	-30.4
	ISR-19	11.1	3.7	-0.3

\*Q<sub>A</sub>: quick absorption ratio, F: fresh, MW: moderately weathered, HW: highly weathered

따라 파괴 발생.

- SR-15의 파괴(Fig. 6)에서 보듯이 엽리면이 산화 작용으로 붉은 색을 띤.

상기의 관찰에서 보여주듯이, 운모편암의 풍화실험에서는 풍화등급에 상관없이 엽리를 따른 풍화 영향이 가장 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 신선한 암석 시료에서는 엽리를 따른 열개 현상을 관찰할 수 있었고, 풍화된 시료에서는 엽리면 광물들의 산화현상이 뚜렷하게 나타남을 관찰할 수 있었다.

### 3.2.2. 물리적 특성 변화

암석의 물리적 특성은 흡수율 및 탄성파전파속도를 측정함으로써 동일 시료에 대하여 풍화실험에 의한 물성의 변화를 비교할 수 있었다. 흡수율은 암석의 풍화

상태와 가장 밀접한 지수 중의 하나이며(Hamrol, 1961; Kim and Hong, 1990), 암석 내의 공극과 열극의 분포상태에 영향을 많이 받는다. 탄성파전파속도로 동적 암석 탄성계수(dynamic elastic moduli)를 직접 구할 수 있고, 정적 암석 탄성계수(static elastic moduli)와 선형적인 관계를 지니지만 측정조건에 영향을 많이 받는 탄성파전파속도의 심한 편차로 인하여 그 상관관계가 좋지 않다(King, 1983; Eissa and Kazi, 1988).

그러나 동일한 시료의 풍화실험 전후에 측정되는 탄성파전파속도의 값으로 암석내부의 열극의 발생 등과 같은 구조적 변화를 예측할 수 있게 한다(Tourenq *et al.*, 1971; Klimis *et al.*, 1989) 따라서 Table 2에와 Fig. 7에와 같이 풍화실험 전후의 흡수율 및 탄성파전파속도를 동일 시료에 대하여 측정하였고, 그 변화율

은 다음과 같다.

즉,

- 흡수율 :

F 등급에서 10~25%의 증가

MW~HW 등급에서 12%내외의 증가

- P파 속도 :

F 등급에서 20~ 30%의 증가

MW~HW 등급에서 3~20%의 증가

- S파 속도 :

F 등급에서 5~ 55%의 감소

MW~HW 등급에서 0.3~30%의 감소를 보여주고 있다.

특히, 암석의 풍화상태와 아주 밀접한 관계를 지니는 흡수율의 경우에는 MW~HW 등급 암석시료는 유사한 증가율을 보여주고 있어, 공학적 물성 또한 비슷

한 양상의 변화를 보여줄 것으로 예상된다. P파의 경우는 풍화실험 후에 오히려 전파속도가 증가한 것을 보여주고 있는데, 이는 실험전후의 함수조건의 차이와 기기의 차이에 의해서 발생한 것으로 보인다. 그러나 S파의 경우는 함수비와는 상관없이 나타나는 값으로 전반적으로 전파속도의 감소가 나타나며 이는 전반적으로 역학적 물성의 감소를 유추할 수 있다.

3.2.3. 일축압축강도의 변화

F 등급 중 Group I에 해당하는 SR-3 및 SR-4의 흡수율은 풍화실험 후에 각각 10% 및 25%의 증가가 풍화실험에 의해 발생하였으며, 풍화실험 종료 후의 일축압축강도의 범위는 60~90 MPa를 보여주고 있다. 이 그룹에 해당하는 풍화실험을 거치지 않은 시료의 일축압축강도는 60~90 MPa로 편차가 다소 심한 범위를 보이고 있다. Fig. 8에서 보여주듯이, 풍화실험 전후의

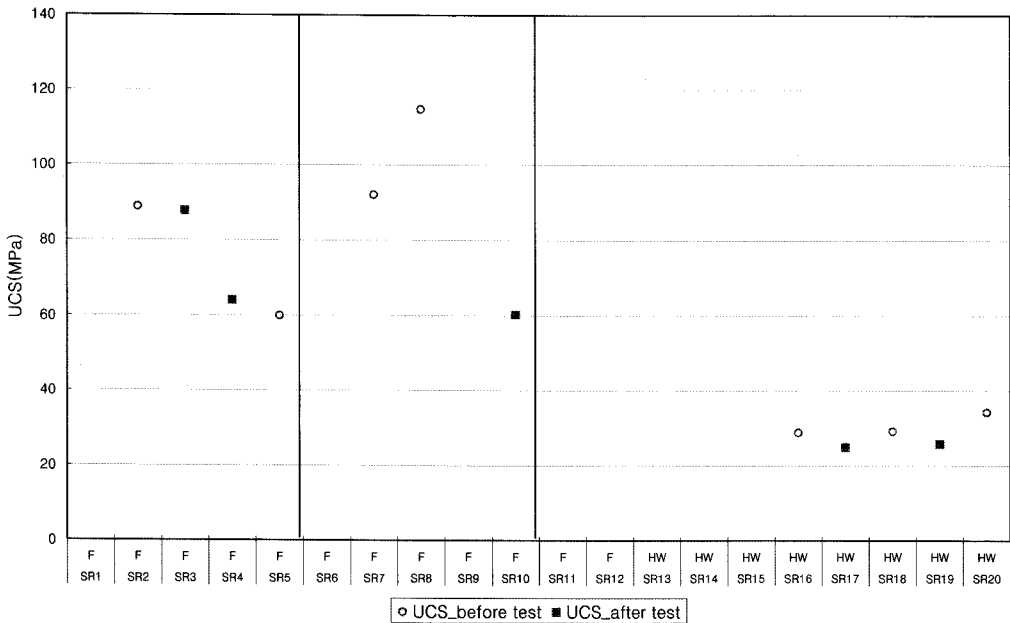


Fig. 8. Comparison of UCS without and after weathering test.

Table 3. Evolution of uniaxial compressive strength(UCS) by weathering test.

Weathering grade	Group	UCS before weathering test (MPa)	UCS after weathering test (MPa)	Reduction rate (%)
F	I	74.5	76	2.0
	II	103.5	60.3	-41.7
MW-HW	I	30.7	25.4	-17.4
	II	30.7	25.4	-17.4
	III	30.7	25.4	-17.4

\*F: fresh, MW: moderately weathered, HW: highly weathered

일축압축강도를 비교한 결과, 풍화실험에 의한 일축압축강도의 변화는 거의 없음을 알 수 있다.

F 등급 중 Group II에 해당하는 SR-10은 전술한 바와 같이 시료내의 엽리면이 풍화에 의하여 열개되었는데, 이러한 효과는 일축압축강도의 뚜렷한 감소로 본 실험에서 나타나고 있다. 즉, 풍화실험을 실시하지 않은 F 등급 Group II는 103 MPa이며, 풍화실험을 실시한 시료는 60 MPa 정도로 약 40%의 압축강도의 감소가 발생하였다(Table 3). 같은 F 등급에서도 Group I과 II의 서로 다른 변화 양상은 암석 시료의 엽리면이 풍화의 영향을 받았는지 여부에 따라 발생하였다고 볼 수 있다. 상대적으로 짧은 기간 동안의 실내 실험이었기에, 암석 시료내의 전반적인 열극이 발생하기보다는 기존의 엽리면을 따른 열개가 우세하기 때문이다.

MW-HW 등급은 원래 3개의 그룹으로 분류를 하였으나, 물성변화에서 보여주듯이, 그 변화율이 유사하여 3개 그룹에 속하는 시료들의 평균값으로 일축압축강도의 변화를 살펴보았다. 이 시료들의 풍화실험 후 강도는 실험을 거치지 않은 암석시료들 보다 대략 17%의 감소를 보여주고 있다. 풍화를 받은 시료들의 풍화 특성상 화학적으로 불안정한 광물들은 이미 자연 상태의 풍화 작용으로 인하여 용탈(leaching) 혹은 용해된 상태 이어서 물리적인 풍화작용에 의하여 SR-15와 같이 시료의 연약한 면을 따른 절리의 발달 및 파괴가 발생하여 강도의 저하를 초래한 것으로 보인다.

### 3.3. 슬레이킹 내구성 시험

암석이 건설의 반복에 의하여 고결력을 잃고 조적이 파괴되어 입자간의 결합력이 급격히 저하되어 붕괴되는 것을 슬레이킹(slaking)현상이라 하며, 점토질 퇴적암이나 화산암과 같은 미고결 암석이 지표면에 노출되었을 때 현저하게 발생하는 경우가 많다. 본 연구에서는 점토질 세일이 변성되어 생성된 운모편암에 대하여 슬레이킹 내구성 시험을 실시하여 슬레이킹 내구성 지수를 구하였고, 슬레이킹 내구성 실험 전후의 암석시료에 대한 XRD 분석을 실시하여 어떠한 물질이 본 실험동안 유출이 있었는가를 살펴보았다.

본 연구에서의 슬레이킹 내구성 시험은 ISRM(Brown, 1981)의 시험법에 의거한 것으로, 건설을 통한 물에 대한 암석의 풍화 특성을 결정하는 시험으로 40~90 g의 등근형태인 시료 약 10개를 슬레이킹 내구성 시험기에 10분간 200회전 시킨 것을 1 cycle로 간주하고 각 cycle이 끝난 후의 남은 암석과 원래의 암석 중량과의 비를 내구성 지수(slake durability index)로 사용하고 있다. 기존의 여러 연구 결과 내구성 지수는 2 cycles 이 지난 후의  $I_{d2}$  를 슬레이킹 내구성 지수로 사용하는 것이 보통이지만 2 cycles에서는 실험 시료의 중량변화가 미약하여 본 연구에서는 4 cycles까지 실시하여 암석의 물에 대한 풍화 특성을 알아보았다.

본 실험에서는 단층파쇄대 부근에 위치한 시추공에서 채취한 3가지 서로 다른 풍화등급의 운모편암에 대하여 실시하였다. 즉,

- S-1(F) : 풍화의 흔적이 거의 없는 신선한 암석

Table 4. Slaking durability test results.

Sample No.	weathering grade	Initial weight [g]	Slaking Durability Test Cycle				Slake-durability index $I_{d2}$ (%)
			weight after 1st cycle[g]	weight after 2nd cycle[g]	weight after 3th cycle[g]	weight after 4th cycle[g]	
S-1	F	562.7	560.2	558.8	557.6	556.5	99.094
S-2	MW	584.4	579.9	577.0	575.1	572.3	98.734
S-3	HW	429.6	375.8	358.2	341.9	333.0	83.38

\*F: fresh, MW: moderately weathered, HW: highly weathered

Table 5. Slake durability classification (Gamble, 1971).

Group Name	% retained after one 10-minute cycle (dry weight basis)	% retained after two 10-minute cycle (dry weight basis)
Very high durability	> 99	>98
High durability	98 - 99	95-98
Medium high durability	95-98	85-95
Medium durability	85-98	60-85
Low durability	60-85	30-60
Very low durability	<60	<30



• S-2(MW) : 풍화가 진전되어 일부 변색이 되고 강도의 저하가 발생한 암석

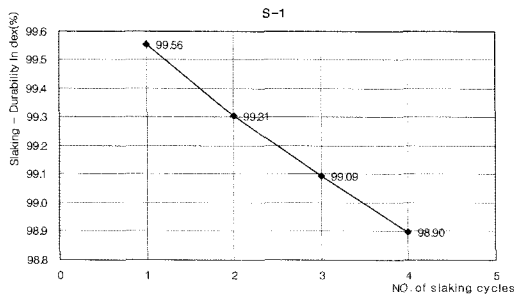


Fig. 9. Variation of slaking durability index of S-1 during 4 cycles.

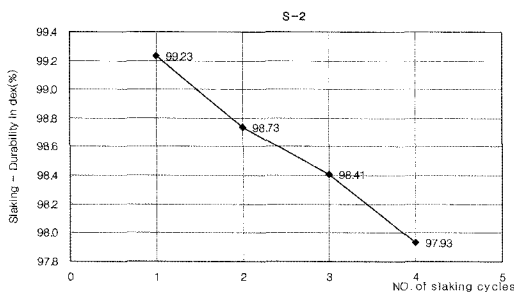


Fig. 10. Variation of slaking durability index of S-2 during 4 cycles.

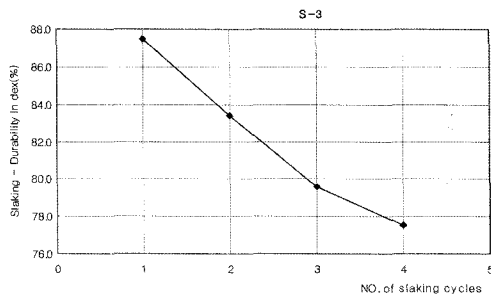


Fig. 11. Variation of slaking durability index of S-3 during 4 cycles.

• S-3(HW) : 파쇄대에 위치한 풍화가 심하여 공시체 성형이 어려운 암석

슬레이킹 내구성 실험 결과인 Table 4에서 보여주듯이,  $Id_2$  값은 S-1과 S-2는 98~99%로 Gamble(1971)에 따르면 very high durability에 속한다(Table 5). 그러나 S-3는 83%로 medium high durability의 범주에 속함을 알 수 있다. 이러한 결과를 비추어 볼 때, 파쇄가 많이 진행된 S-3 시료는 상대적으로 점토광물을 많이 함유하는 관계로 슬레이킹에 대한 내구성이 떨어지는 것으로 보인다. Fig. 9~Fig. 11에서 보여주듯이, 슬레이킹에 대한 내구성을 좀 더 알아보고자 4 cycles에 걸쳐 슬레이킹 실험을 한 결과,  $Id_4$  값의 변화는 S-1과 S-2의 경우 아주 약한 변화를 보였지만, S-3의 경우는 83%에서 78% 정도로 상당히 슬레이킹 내구성 지수가 낮아졌음을 볼 수 있다. 즉, S-3의 경우는 지속되는 건조와 물의 영향에 의하여 암석 내에 함유되어 있는 점토광물과 같은 물질들이 제거될 수 있는 가능성이 많은 것으로 판단되어 진다.

### 3.4. XRD 분석

4 cycles에 걸친 슬레이킹 내구성 실험 전과 후의 시료에 대하여 XRD 분석을 실시하였다. XRD의 분석은 MXP 18A RINT-2500(Mac-Science사, 일본) 장비를 사용하였으며, 측정 조건은 Cu- $K_{\alpha}$  radiation(40 kV, 30 mA)을 이용하고, 0.02° step으로 2구간에 대하여 측정하였다. 구성 광물의 동적변화를 XRD 회절도에서의 각 광물의 피크(peak)의 크기를 고려한 상대적인 중량 퍼센트를 이용한 반정량적인 분석과 슬레이킹 내구성 실험 결과를 서로 비교하여 알아보았다(Table 6, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14).

슬레이킹 내구성 지수로는 슬레이킹 내구성 실험동안 물에 의하여 용탈되는 광물의 종류 및 그 량을 알 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 슬레이킹 내구성 실험

Table 6. Semi-quantitative content of mineral before and after slaking durability test based on XRD analysis.

Sample No.	Weathering grade	Quartz (wt%)	Chlorite (wt%)	Mica (wt%)	Plagioclase (wt%)	Other (wt%)
S1-B	F	12%	29%	48%	10%	1%
S1-A		25%	15%	44%	15%	1%
S2-B	MW	27%	45%	28%	2%	1%
S2-A		44%	26%	25%	3%	2%
S3-B	HW	11%	59%	21%	5%	5%
S3-A		14%	44%	34%	5%	4%

\*meaning of suffix : -B : specimen before slaking durability test, -A : specimen after slaking durability test, \*\*F: fresh, MW: moderately weathered, HW: highly weathered

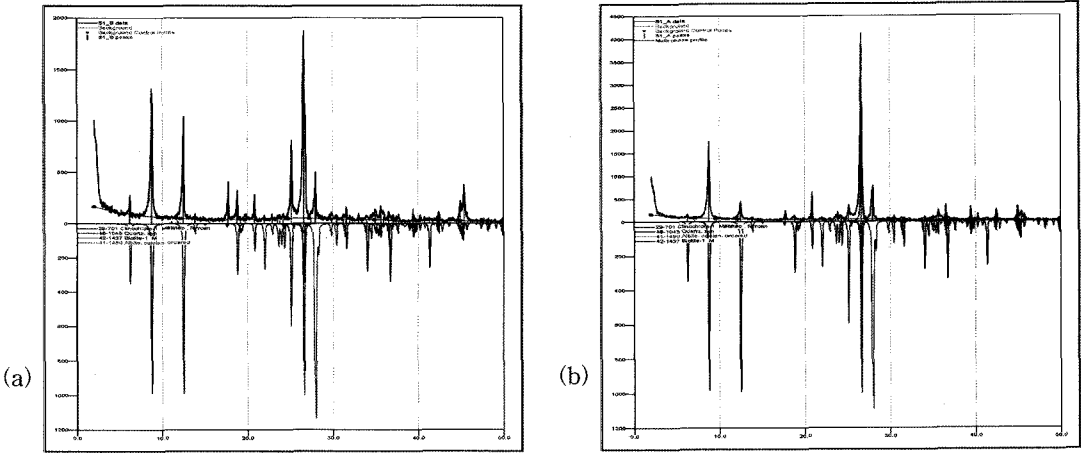


Fig. 12. X-ray diffraction patterns of S-1 before(a) and after(b) slaking durability test(Cu-Kα radiation).

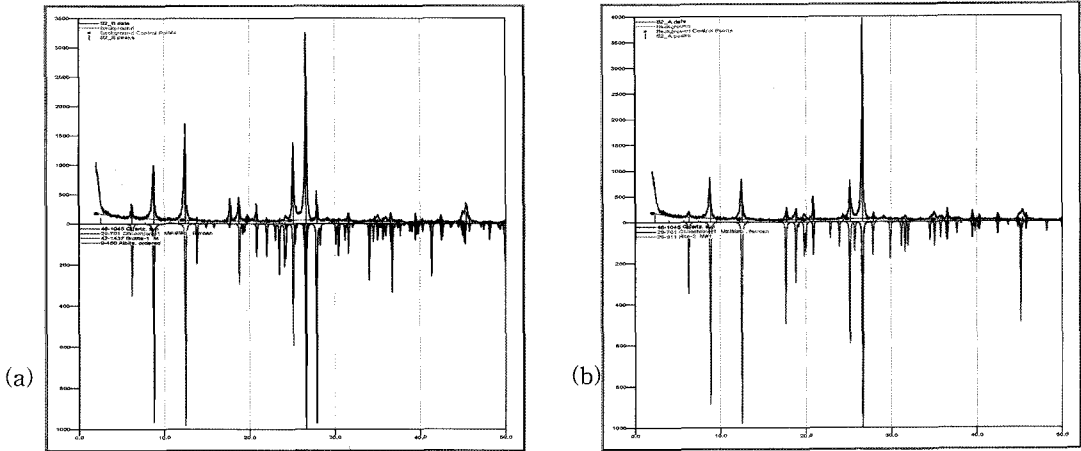


Fig. 13. X-ray diffraction patterns of S-2 before(a) and after(b) slaking durability test(Cu-Kα radiation).

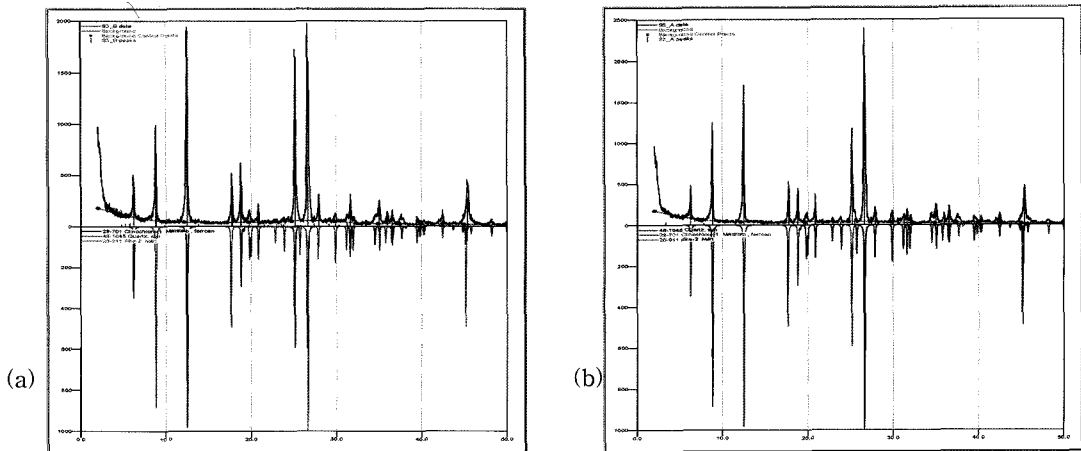
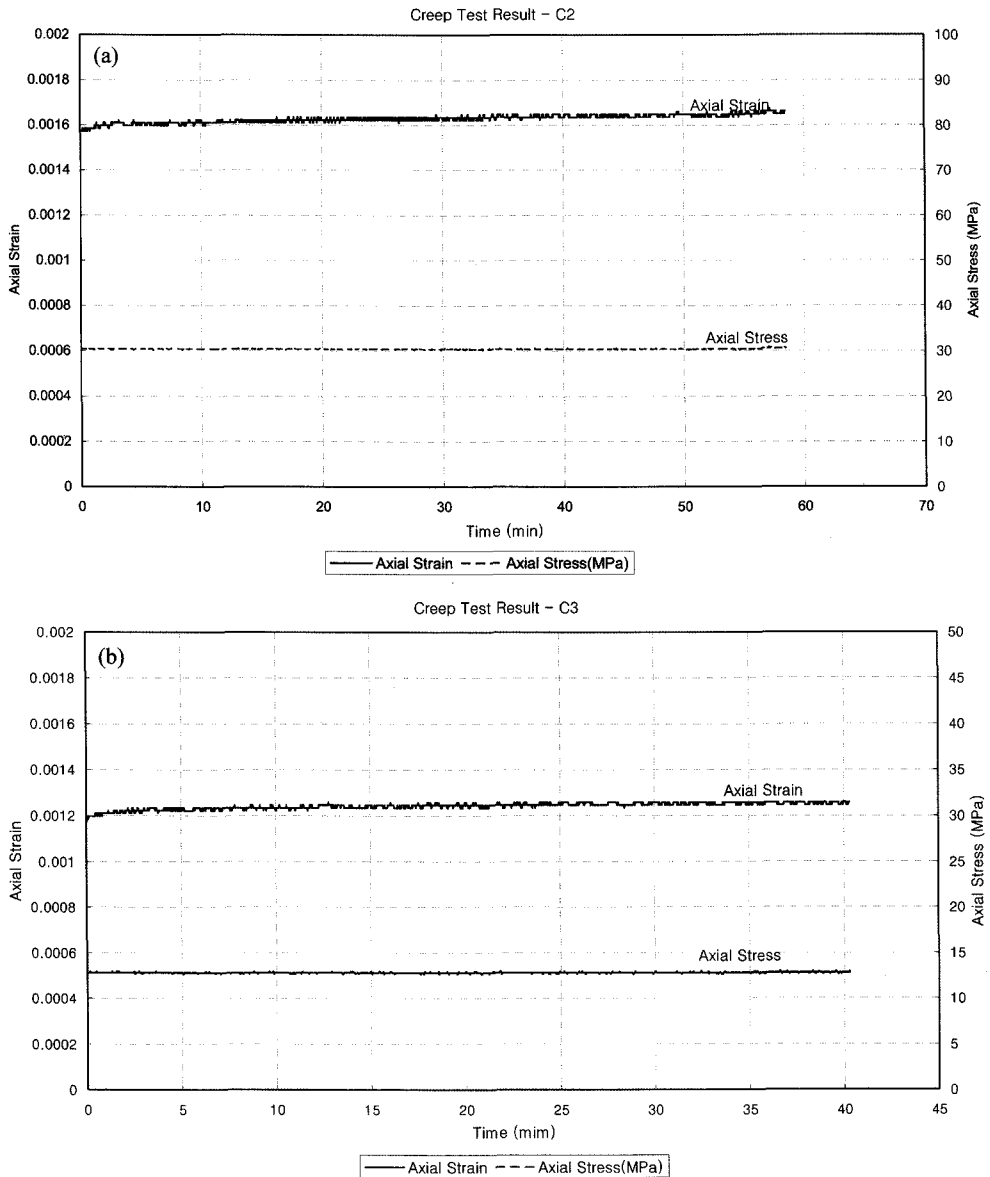


Fig. 14. X-ray diffraction patterns of S-3 before(a) and after(b) slaking durability test(Cu-Kα radiation).

전후의 시료에 대한 XRD 분석과 그 그래프에서 각 광물에 해당하는 첨두의 진폭 값으로 암석 내에 분포하는 구성 광물의 종류 및 구성 광물의 반정량적인 함유량을 분석하여 암석이 건설작용을 받으면서 용탈되

**Table 7.** Results obtained from creep tests for the sample (a) C2 and (b) C3 with 80% of uniaxial compressive strength during primary and secondary creep.

Sample No	Stress Ratio (%)	Creep Rate (/hr)	Maxwell unit		Kelvin unit	
			$E_m$ (MPa)	$\eta_m$ (MPa/min)	$E_k$ (MPa)	$\eta_k$ (MPa/min)
C2	70.5	$3.6 \times 10^{-5}$	$1.80 \times 10^5$	$1.05 \times 10^6$	$8.86 \times 10^3$	$1.69 \times 10^7$
C3	79.5	$6.0 \times 10^{-6}$	$5.14 \times 10^4$	$6.50 \times 10^5$	$4.96 \times 10^3$	$4.27 \times 10^7$



**Fig. 15.** Creep of (a) C2 and (b) C3 with 80% of uniaxial compressive strength during primary and secondary creep.

는 광물의 동적 변화를 추적하는 방법을 사용하였다.

우선 슬레이킹 내구성 실험 이전의 원래 암석에 대하여 살펴보면: F 등급인 S-1 시료에서부터 HW 등급인 S-3 시료까지의 구성광물의 변화에서 가장 뚜렷하게 구분되는 것은 녹니석의 함량의 증가와 운모류 함량의 감소이다. 이러한 결과는 암석의 풍화 및 변성에 따라서 운모류가 녹니석으로 변질되었음을 나타내는 것이다.

슬레이킹 내구성 실험 전과 후의 암석에 대한 구성광물 함유량의 동적 변화를 살펴보면 슬레이킹 내구성 실험에 의하여 용탈되는 광물의 대부분은 녹니석이 차지하고 있음을 볼 수 있다. 그에 따라 상대적으로 화학적 풍화가 이루어지지 않은 석영과 녹니석에 비하여 상대적으로 풍화에 강한 운모류의 함유량은 증가함을 볼 수 있다.

즉, 슬레이킹 내구성 실험과 XRD 분석에 의하면 물의 건습에 의하여 용탈되는 광물은 암석의 풍화정도에 상관없이 점토광물인 녹니석이 그 대부분을 차지함을 알 수 있다.

### 3.5. 크리프 시험(Creep Test) 결과

크리프 시험은 암석의 시간 의존성을 점탄성거동으로 해석하여 탄성계수 및 점성계수를 구하여 시간에 따른 암석의 변형률을 예측할 수 있게 한다. 본 실험에서는 암석의 점탄성 거동을 맥스웰 재료(Maxwell body)와 켈빈 재료(Kelvin body)가 직렬로 연결된 버거 재료(Burgers body)로 가정한 다음의 식에서 각 탄성계수 및 점성계수를 구하였다(Table 7, Fig. 15).

$$\epsilon_1(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3E_m} + \frac{\sigma_1}{3E_k} - \frac{\sigma_1}{3E_k} e^{-\left(\frac{E_k}{\eta_k} t\right)} + \frac{\sigma_1}{3\eta_m} t$$

Fig. 15는 풍화 등급 MW의 C2 및 C3에 대하여 실

시한 크리프 시험에 대한 그래프로 시료의 크리프에 대한 1차 및 2차 거동에 대하여서만 실험을 실시하였다. 각 암석 공시체의 일축압축강도는 43.1 MPa, 16.1 MPa이며, 일축압축강도에 대한 크리프 시험동안 가하여진 응력비(Stress ratio)는 대략 70~80%로 크리프 변형이 일어나기에 충분한 응력을 가하였다.

크리프 시험 후에 일축압축실험을 실시한 결과 암석 내에 발달한 엽리면을 따라 파괴가 발생한 것을 볼 수 있었는데, 이는 크리프 시험동안 발생하였던 대부분의 변형은 엽리면을 따라 발생한 변형임을 알 수 있다. 또한, Table 7에 나타난 탄성계수 및 점성계수의 값들은 상대적으로 적은 값을 나타내고 있어, 크리프 변형이 상대적으로 많이 일어날 수 있음을 보여주고 있다. 결론적으로 엽리면을 따른 시간 거동이 중요한 암반의 거동이 될 수 있음을 보여주고 있다.

### 3.6. 절리면 직접 전단 실험

절리면 직접 전단 실험은 연구 지역에 분포하는 운모편암류의 풍화특성 및 절리면 상태에 따른 절리면 전단 특성을 파악하기 위하여 실시되었다. 절리면의 풍화상태 및 충전물 상태에 따라 절리면 시료를 채취하여 실험을 하였다.

- 약간 풍화 단계의 시료: SRJ-1, 2, 3, 4
- 보통~심한 풍화 등급의 시료: SRJ-5, 6, 7
- 점토광물(녹니석)이 충전된 엽리면 시료: SRJ-8, SRJ-9

절리면 시료의 거칠기는 대체적으로 매끈한 상태로 몇 개의 시료를 제외하고는 JRC 값이 3 이하의 작은 값을 보이고 있다. 본 암석의 절리면 혹은 엽리면에는 운모류가 다수 분포되어 있어 운모류의 벽개면을 따른 매끈한 양상을 띠고 있는 절리면이 다수 존재한다.

Table 8이 보여주듯이, 최대마찰각과 잔류마찰각과의

Table 8. Results of direct shear test for discontinuities in mica-schist.

Joint No.	Weathering grade of joint surface	JRC	JCS (MPa)	Peak friction angle (°)	Residual friction angle (°)
SRJ-1	SW	3.22	79	45	27
SRJ-2	SW	3.88	65	40	19
SRJ-3	SW	4.45	45	36	16
SRJ-4	SW	5.28	32	35	18
SRJ-5	HW	4.68	52	32	21
SRJ-6	HW	8.55	28	41	23
SRJ-7	MW	1.91	79	41	16
SRJ-8	MW(oxidated)	7.94	33	38	14
SRJ-9	clay coating	(1.64)	57	23	10

\*JRC: joint roughness coefficient, JCS: joint compressive strength

큰 차이를 볼 수 있다. 즉, 최대마찰각은 신선한 절리면의 경우는 SRJ-1을 제외한 나머지는 35°~40°의 범위를 보여주고 있고, 잔류마찰각의 경우는 16°~19°로 나타나고 있다. 이러한 경향은 MW 등급의 절리면에도 유사한 결과를 보여주고 있다. HW 등급의 절리면은 상대적으로 거친 정도가 크기 때문에, 거칠기 효과가 잔류마찰각 값에 어느 정도 영향을 준 것으로 파악된다. 특히 SRJ-9은 절리면을 아주 매끈하게 만드는 압축된 녹니석이 충전된 절리면으로 최대마찰각이 23°에서 잔류마찰각은 10°로 잔류마찰각의 값이 아주 작음을 볼 수 있다. 따라서, 절리면의 풍화 상태와 크게 상관없이 잔류마찰각은 20°이하의 작은 값으로 최대마찰각과의 큰 차이를 보여주고 있다. 즉:

- F grade joint : 35°~45° ➡ 18°
- MW grade joints : 40° ➡ 15°
- HW grade joints : 32°~41° ➡ 22°
- clay coating joints : 23° ➡ 10°

절리면 전단 실험 결과를 살펴보면, 연구 지역 불연속면에 충전되어 있는 운모류 혹은 녹니석과 같은 광물들은 절리면의 전단 특성을 저감시키는 주요한 요인으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

(1) 산침수에 의한 동결-융해 실험에서는 신선한 공시체는 엽리면의 열개로 인한 강도저하가 40% 정도 발생하였으며, 풍화암에 대하여서는 20% 정도의 강도저하가 발생하였다.

(2) 슬레이킹 내구성 실험에서는 신선한 암석과 보통 풍화 등급의 암석은 슬레이킹에 대한 내구성이 높았으며, 변질대 근처의 심한 풍화 등급의 풍화암은 보통 정도의 내구성을 가지는 것으로 나타났다. 슬레이킹 실험 전후의 암석 시료에 대하여 XRD 분석한 결과, 슬레이킹 실험에서 물에 의하여 용탈되는 광물은 암석의 풍화도에 따라 양적인 차이는 있지만 대체적으로 녹니석과 같은 점토광물이 그 대부분을 차지하는 것으로 판명되었다.

(3) 크릴 시험에서 변형을 좌우하는 주요한 요소는 암석 내에 발달한 엽리면으로 변형의 대부분이 엽리면을 따라 발생하였으며, 상대적으로 작은 탄성계수 및 점성계수를 가지고 있는 것으로 나타났다.

(4) 서로 다른 풍화등급과 절리면 조건에 따라 절리면 직접 전단실험을 한 결과, 절리면에 분포하고 있는 운모류나 녹니석과 같은 점토광물로 인하여 절리면의

전단강도 특성이 저하됨을 볼 수 있다. 운모편암류는 절리면의 풍화상태와는 크게 상관없이 최대마찰각과 비교하여 아주 작은 잔류마찰각을 가지고 있었다.

(5) 풍화실험 및 크릴 시험에서 보여주듯이 연구 지역 운모편암류에 발달하고 있는 엽리면이 암반의 변형에 큰 영향력을 미치는 것으로 나타났다. 슬레이킹 내구성 실험과 XRD 분석 결과는 물에 의해서 용탈되는 녹니석과 같은 점토광물들이 엽리면을 충전하고 있을 경우, 지하수의 유입 등과 같은 영향으로 엽리면과 절리면의 전단강도가 현저히 저하될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

(6) 이러한 가능성은 실험실에서 실시한 절리면 직접 전단실험에서 확인이 되었다. 즉, 풍화 혹은 암반 굴착 등에 의한 응력이완 등으로 엽리면 혹은 절리면이 미세한 거동을 한다면 최대마찰각과 큰 차이를 지니는 잔류마찰각으로 인하여 암반의 지지력이 원지반보다 상당히 저하될 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- Brown, E.T. (1981) Rock characterization testing and monitoring-ISRM Suggested Methods. Pergamon Press, 550p.
- Dearman, W.R., Baynes, F.J. and Irfan, T.Y. (1978) Engineering grading of weathered granite. *Engineering Geology*, v. 12, p. 345-374.
- Eissa, E.A. and Kazi, A. (1988) Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 25, no. 6, p.479-482.
- Gamble, J.C. (1971) Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks Ph.D. Thesis, University of Illinois (*from Rock characterization testing and monitoring by E.T. Brown, 1981*).
- 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*, v. 28, no. 3, p. 207-242.
- Hamrol, A. (1961) A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. *Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference of Soil Mechanics And Foundation Engineering*, Paris 2, p. 771-774.
- 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*, no. 17, p. 79-90.
- 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*, v. 23, no. 2, p.221-232.
- King, M.S. (1983) Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian Shield. *International Journal*

- of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 20, no. 5, p.237-241.
- Klimis, N., Massieu, E. and Durville J-L. (1989) Attenuation des ondes ultrasonores dans les roches. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussees, no. 161, p.7-16.
- Pluijm, B.V and Marshak, S. (1997) Earth Structure. McGrawHill, 495p.
- Raymond, L.A. (2003) Metamorphic Petrology. Sigma-press, 301p.
- Tourenq, C., Fourmaintraux, D. and Denis, A. (1971) Wave propagation and discontinuities in rocks. Symposium of International Society for Rock Mechanics, Nancy, p. 72-92.
- Woo, I. (2003) Alterability of granites and gneisses in South Korea. Consequences on the long-term stability of excavated rock slopes. Theses of CGI, Ecole des Mines de Paris, 205p.

---

2007년 10월 9일 원고접수, 2007년 11월 14일 게재승인.