

옥천대지역 - 제천·금산·김천 - 에 분포하는 화강암 및 화강 편마암의 풍화분류에 관한 고찰

우익 · 박혁진

세종대학교 지질재해정보연구소

Classification of Weathering for the Granite and Granite Gneiss in Okcheon Belt-Jecheon · Geumsan · Gimcheon in Korea

Ik Woo and Hyuck-Jin Park

Geohazard Information Laboratory (National Research Laboratory), Sejong University, Seoul 143-747, Korea

A study on the weathering grade classification has been performed for granite and granite gneiss in Korea. The qualitative classification criteria of weathering were reviewed and then modified with field studies for the weathered rock masses. The thin section observations and XRD analyses for the different weathering grades rock samples showed the petrographical and petrophysical difference with respect to the weathering : the proportion of weathering-resistant minerals such as quartz and orthoclase has a tendency to increase with the development of weathering, but that of weathering-sensible minerals such as anorthite and biotite is decreased. The ranges of physical and mechanical rock properties for different weathering grades were obtained from the laboratory rock tests and field tests for the studied rocks. And then, along with RDI_{sq} (Fookes *et al.*, 1988), the weathering index I_a (Woo, 2003) has been developed in this study to demarcate the weathering grade. Those two indices rely mainly on the water absorption ratio of rock and on the different rock strength. The range of these weathering indices have been determined with the physical and mechanical rock properties that can be obtained from simple field or laboratory tests in 4 grades : $I_a > 7$ for F, $3.5 < I_a < 10$ for SW, $1.0 < I_a < 6.0$ for MW and $I_a < 2.5$ for HW. Consequently, the weathering index could be utilized to classify quantitatively the rock weathering grade, especially for the studied granites and the granite gneiss in Korea.

Key words : weathering classification, granite, granite gneiss, weathering index

국내에 분포하는 화강암 및 화강편마암의 풍화 등급에 따른 정성적·정량적인 분류법을 고찰하였다. 정성적인 분류는 암석의 외적 관찰과 상대적 강도 측정에 의존하는 주관적인 방법이 사용되었으며, 정량적 분류를 위하여서는 실내·외 실험을 통한 암석의 기본적 물성을 이용한 풍화 지수를 사용하여 암석을 풍화에 따라 분류를 하였다. 풍화 분류 기준은 기존의 여러 문헌에서 얻은 방법 및 본 연구에서 사용한 방법을 추가 혹은 수정하여 제시하였다. 또한, 풍화 등급별로 채취된 암석 시료의 박편 관찰을 통하여 암석 구성 광물의 변화와 미세절리 발달을 풍화 등급별로 관찰하였다. 풍화에 약한 광물인 사장석 및 흑운모의 화학적 풍화 정도는 풍화가 진행됨에 따라 점점 발달됨을 살펴볼 수 있었으며, 신선한 암석에서도 사장석 및 흑운모의 풍화가 어느 정도 발달되어 있음을 살펴볼 수 있었다. 서로 다른 풍화 등급의 암석 분말에 대한 XRD 분석을 수행하여, 암석 구성 광물의 풍화에 따른 동적변화를 살펴보았다. 즉, 풍화에 약한 광물의 비율이 풍화가 진행됨에 따라 감소되며, 풍화에 강한 광물의 비율은 반면에 증가되는 경향을 보여주고 있다. 풍화의 정량적인 분류를 위해서 여러 암석 물성 값을 이용한 Fookes *et al.* (1988)이 제안한 RDI_{sq} 및 본 연구에서 제안한 I_a (Woo, 2003)를 사용하였다. 그 결과, 연구대상 암석의 신선한 풍화등급 F는 $I_a > 7$, 약간풍화 SW는 $3.5 < I_a < 10$, 보통풍화 MW는 $1.0 < I_a < 6.0$ 그리고 심한풍화 HW는 $I_a < 2.5$ 로 분류될 수 있다. 실내·외 실험을 통한 풍화에 따른 국내 화강암 및 화강편마암의 물리적 혹은 공학적 물성 값을 고려하여 본 풍화 지수들의 범위를 결정하여 간편하고 빠르게 암석의 풍화 등급을 결정할 수 있게 하였다.

주요어 : 풍화 분류, 화강암, 화강편마암, 풍화 지수

1. 서 론

우리나라에서는 화성암류가 다른 암석보다도 더 우세하게 분포한다. 그 중에서 화강암 및 화강 편마암이 대부분을 차지하며, 이러한 화강암류들은 우리나라에서 중요한 기복을 지닌 지형을 형성하게 된다. 이로 인하여, 고속도로 혹은 철도 건설시 대절토 사면이나 터널 등 암반 구조물 등의 건설이 불가피하다. 또한 여름의 고온 다습한 열대성 기후, 그리고 겨울의 건조하고 추운 대륙성 기후를 가진 우리나라의 기후 조건을 고려하면, 풍화가 이들 암반 구조물에 미치는 장기적 영향을 간과할 수 없다. 이러한 풍화의 장기적 영향을 평가하기 위한 선행 연구로 암반의 풍화분류 및 풍화등급에 따른 물성 변화에 대한 연구가 필요하다 따라서, 본 연구에서는 암석의 풍화 등급을 결정하는 기준을 재 고찰하고, 풍화에 따른 암석의 변화 추이를 광물·암석학적인 측면과 공학적인 측면에서 관찰하여 암반 구조물의 풍화에 따른 반응정도를 살펴보고자 한다. 또한 현장과 실험실에서 수행할 수 있는 간단한 실험 결과를 이용한 풍화지수를 사용하여 암반의 풍화분류를 정량적으로 시도하고자 하는데 목적이 있다.

2. 암반 풍화 등급

암반은 변색 정도, 구성 광물의 풍화 정도, 절리면의 발달 정도, 그리고 암석의 상대적인 강도에 따라 풍화 등급이 결정된다. 본 연구에서는 풍화 등급을 분류하는 기준이 되는 여러 사항과 각 풍화 등급에 해당하는 화강암류의 여러 물리적 혹은 공학적 특성을 살펴 보았다.

2.1. 암반 풍화 등급 분류 기준

풍화에 따라서 암반은 대체적으로 6등급으로 구분이 되며, 사용자에 따라서는 더욱 세분될 수도 있다. 암반을 풍화에 따라 6등급으로 구분할 때, 절리를 포함하지 않는 암석과 절리를 포함한 여러 풍화 등급의 암석으로 구성된 비균질 암반이 풍화 등급 결정의 대상이 된다(GSEG, 1995). 즉, 절리를 포함하지 않는 암석에 대하여서는 풍화를 받지 않은 신선한 상태의 F, 약간 풍화된 상태 SW, 보통 풍화된 상태 MW, 심하게 풍화된 상태 HW, 완전 풍화 상태 CW 그리고 잔류 풍화 토 RS로 나눌 수 있으며, 비균질 암반에 대하여서는 절리나 풍화된 암석의 비율에 따라 6단계로 나뉜다. 그

Table 1. Rock weathering classification criteria.

Grade	Decoloration	Chemical weathering	SHL	Sound/Rebound	Impact	Fragility	Microfissures
F	none	none	> 50	metallic sound, excellent rebound	difficult to break off the corner by several blows of geologic hammer	none	rare, very tighten
SW	whitish for some feldspar	biotite : little sign plagioclase : a little bit whitish,	50	clear sound, good rebound	break the corners into angled particles by 2~3 blows	none	weak development, contacts between tighten grains
		K-feldspars, no sign of weathering	40				
MW	whitish yellowish	biotite decoloured a little, plagioclase : yellowish	40	hollow sound bad rebound	break along the fissures easy break by 2~3 blows	sometimes along a fracture	development with a spacing of 5~10 mm some open fractures
		decomposition signs along microfissures	25				
HW	light yellow dark yellow	biotite : brown and some particles are removed away,	25	very heavy sound without rebound	easy break by a hit, cutting by a knife	big pieces	development with a spacing of 2~5 mm in the open contacts
		plagioclase : dark yellow, K-feldspars : whitish ~ yellowish	10				
CW	dark yellow	most of biotites/ K-feldspars and all of the plagioclases are decomposed	< 10	very heavy sound without rebound	footprint by hammer cut by a knife	yes	indistinguishable from rock discontinuities

러나, 일반적으로 현장에서 가능한 암반의 풍화 등급 분류 기준은 정성적인 것으로서, 암반의 변색 정도, 구성 광물, 특히 장석 및 운모류의 풍화 상태, 절리면의 발달 상태, 지질 해머의 반발 정도 그리고 손으로 느낄 수 있는 정성적인 강도 등이 있다. 본 연구에서는 기존에 발표된 여러 풍화 등급 분류 기준(Dearman, 1974; IAEG, 1979; ISRM, 1981; Irfan *et al.*, 1978)과 현장 조사에 사용되었던 방법에 근거하여 풍화 등급을 결정하였다(Table 1).

즉, 본 연구에서 사용된 분류 기준으로는 암반의 화학적 풍화 기준, 변색 정도, 슈미트해머 반발 계수, 지질해머에 대한 반발 정도 및 반발음, 그리고 칼이나 지질해머에 의하여 분리 혹은 파괴되는 양상과 미세절리 발달 상태 등이 있다. 변색 정도에 의하여 풍화 상태를 구분할 때에는 사장석이나 흑운모의 변색 상태에 많이 의존하게 된다. 즉, 사장석의 경우에는 풍화가 진행됨에 따라 광택을 점점 잃게 되고, 흑운모는 윤택이 나는 검정에서 점점 윤택을 잃고 갈색으로 변화되어, 전체적인 암석의 광택이 점점 없어지는 것을 관찰할 수 있었다. 슈미트해머는 통상 10회 이상 대상 암석에 적용한 후, 최고 값과 최하위 값을 제외한 나머지 값의 평균값을 구한 것으로 풍화 등급에 따른 값의 변화는 Table 1에 표시되어 있다. 지질해머에 의한 반발력은 풍화가 되어감에 따라 그 반발력을 잃어가고, 또한 반발음은 점점 둔탁해지는 양상을 보여주고 있다.

국내 토목 공사에서는 보편적으로 풍화도에 따라 암반을 4등급 - 경암, 연암, 풍화암, 풍화토 - 으로 나누고 있다. 이를 위해서 암반을 육안 관찰에 의한 풍화 상태와 시추 시에 사용된 시추 비트 종류 및 시추 굴진 속도, 그리고 시추 코어의 상태 및 상대 강도 등에 의해서 구분한다. 각 공사 발주 기관에 따라 각기의 암반 풍화 기준이 마련되어 있으며, 이는 건설교통부에

서 제시한 암석 물성에 의한 암반의 풍화 분류에 그 기반을 두고 있다(Table 2).

3. 연구 지역 지질 및 시료 채취

본 연구는 옥천지향사시대에 속하는 3개의 지역 - 제천, 김천, 금산 - 에 대하여 수행되었다. 본 연구 지역들은 화강암 및 화강편마암, 그리고 편마암이 주로 분포하는 지역으로 그 지질 구조가 복잡하다. 주 연구 대상은 고속도로 혹은 고속철도선로 건설 중 굴착된 사면으로, 특히 화강암 및 화강편마암이 관찰되는 사면에 국한하여 연구를 수행하였다.

특히, 제천 지역의 화강암은 큰 결정의 장석을 함유한 거정질 흑운모 반상화강암이 그 주를 이루고 있고, 금산 지역은 중립질 흑운모 화강암, 그리고 김천 지역에서는 세립질 흑 중립질 흑운모 화강암과 화강섬록암, 호상 흑운모 화강편마암 등이 주를 이루면서 분포하고 있다. 이들 암석에 대하여 암석 풍화 등급에 따라 시료를 채취하여, 실내 실험을 통하여 암석 물성을 측정 및 광물학적 변화를 관찰하였다. 즉, 각 지역에서 채취한 시료는 토양 상태의 완전 풍화 및 잔류 토양을 제외한 4단계의 풍화 등급 - 즉 신선한 암석인 F, 약간 풍화 상태 SW, 보통 풍화 MW, 그리고 심한 풍화 HW - 으로 Table 1에 나타난 분류 기준 방법에 의하여 구분하였다. 그런데, 풍화 등급 HW의 시료는 사실상 시료 채취의 어려움으로 인하여, MW와 HW의 중간단계의 암석 시료에 대하여 풍화 실험을 실시하였다.

3.1. 현미경 관찰

풍화 등급별로 구분된 암석의 박편을 편광현미경하에서 관찰을 하였다. Fig. 2과 Fig. 3에는 각기 김천지역의 화강섬록암과 제천지역의 반상흑운모화강암의 서

Table 2. Weathering classification of rocks with respect to the strength and mechanical properties of rock (Korean Ministry of Construction and Transportation).

Classification		UCS	PLS	SHL	Q _A	Geologic Hammer Rebound
International	MOCT	(MPa)	(MPa)		(%)	
F	Very hard rock	> 180	> 8.8	> 60	< 0.24	hard to break, good rebound
SW	Hard rock	130~180	5.6~8.8	51~60	0.47~0.24	edge break by a strong blow
MW	Normal rock	100~130	3.7~5.6	44~51	0.08~0.47	break along joints surface by a strong blow
	Soft rock	70~100	1.8~3.7	34~44	1.65~0.80	easy to break by a normal blow
HW	Weathered rock	30~70	0~1.0	10~34	9.25~1.65	very easy to break by a normal blow, sometimes break down by hand

UCS: Unconfined Compressive Strength, SHL: L-type Schmidt hammer rebound coefficient, Q_A: water absorption ratio

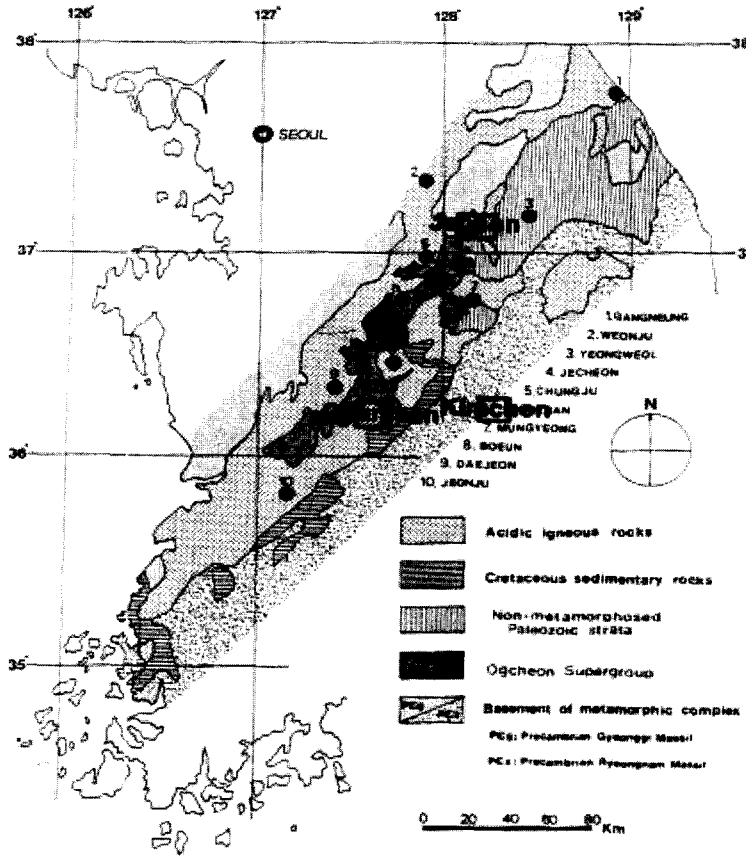


Fig. 1. The geologic map of the study areas.

로 다른 풍화 등급의 암석을 편광현미경하에서 관찰한 사항을 보여주고 있다. Fig. 2과 Fig. 3에서 보여주듯이, 풍화가 진전됨에 따라 미세질리가 발달하고 그 간격이 넓어지며, 또한 사장석과 흑운모 등 풍화에 약한 광물들의 풍화된 정도의 비율이 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 또한, 화학적 풍화에 영향을 거의 받지

않는 석영의 경우에는 풍화가 진전됨에 따라 석영 결정 내에 미세질리들이 점점 발달함을 볼 수도 있다. Fig. 2의 (a)나 Fig. 3의 (a)는 각기 풍화를 거의 받지 않은 신선한 암석 풍화 등급인 F에 해당하는 박편 사진이다.

이 사진들에서도 이미 사장석과 흑운모는 화학적 풍

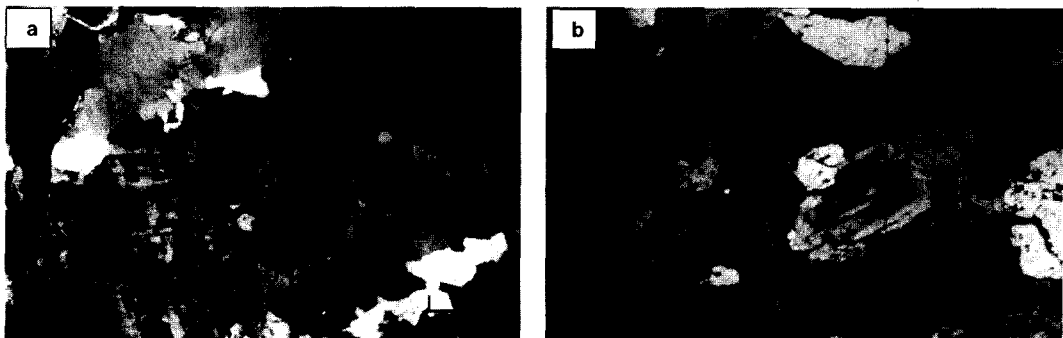


Fig. 2. Thin section for the granodiorite for the weathering degrees of (a) F, (b) HW.

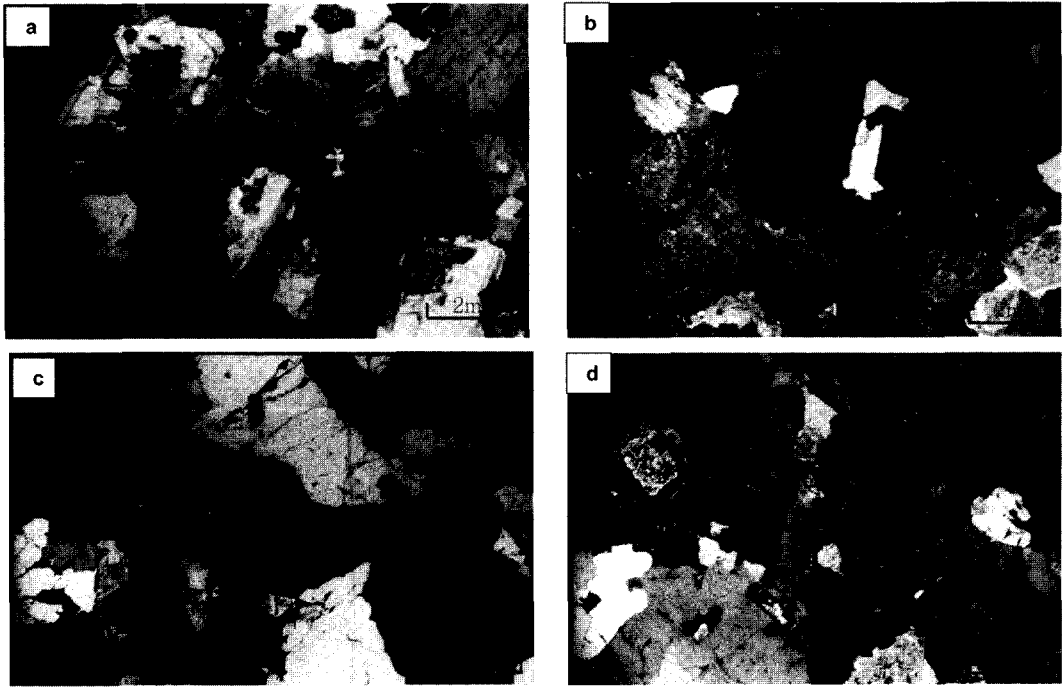


Fig. 3. Thin section of the biotite porphyric granite for the weathering degrees of (a) F (b) SW (c) MW (d) HW.

화가 어느 정도 진전되어 있음을 볼 수가 있다. 본 연구에서 암석 시료 채취시 정량적이기보다는 정성적으로 행하여지고 있다. 즉, 현장에서 인식된 신선한 F 등급의 암석이라 할지라도 이미 대기 중에 노출되어 있었고, 혹은 이미 암반 내에서 지하수 등의 영향에 의하여 풍화의 영향을 받았기 때문에 신선한 암석에서도 풍화의 흔적을 발견할 수 있는 것이다.

3.2. XRD 분석

신선한 암석과 HW 풍화 등급의 암석을 분말화하여 XRD에 의한 관찰을 하였다. Fig. 4는 반상흑운모화강암의 예로서, 서로 다른 풍화 등급 F와 HW에 대한

XRD spectrum을 나타낸 것이다. 신선한 암석과 풍화된 암석의 상대적인 구성 광물의 비율의 변화를 살펴 보면 암석 구성 광물의 풍화에 따른 동적인 변화를 살펴볼 수 있다.

즉, 풍화를 받지 않은 신선한 암석에서는 풍화에 약한 albite의 비율이 다른 구성광물에 비하여 중요하다. 그러나, 풍화를 받은 암석에서는 풍화에 강한 석영의 비율이 제일 중요하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상을 종합하여 보면, 풍화에 의하여 암석 구성광물 중 풍화에 저항이 약한 광물인 사장암(anorthite), 조장석(albite) 혹은 흑운모(biotite)의 비율이 감소함을 볼 수 있다. 특히 사장암(anorthite)의 경우에

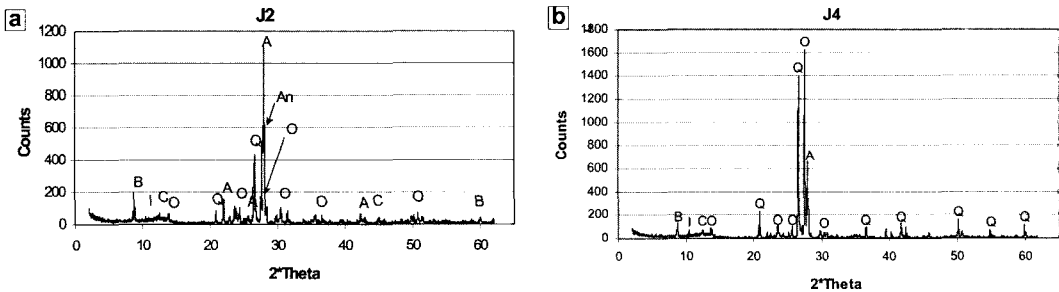


Fig. 4. XRD spectrum for the biotite porphyric granite in Jecheon area for the weathering degrees of (a) F, (b) HW.

Table 3. Physical and mechanical characteristics of studied rock sample ($\Phi=32$ mm).

Rock type	Sample No	Specific density (kN/m ³)	Q _A (%)	seismic wave propagation velocity (m/s)		UCS (MPa)	Young's modulus (10*GPa)	Poisson's Ratio
				V _s	V _p			
Granodiorite in Gimcheon	W1_32	26.1	0.34	2370	4370	270	2.96	0.27
	(F)	26.2	0.41	2420	4570	266	4.28	0.25
	W4_32	25.9	0.72	1340	2250	55	0.67	0.34
	(HW)	25.8	0.72	1140	2240	57	0.72	0.31
Porphyric biotite granite in Gimcheon	G1_32	26.8	0.24	2670	4970	172	4.35	0.23
	(F)	27.0	0.24	2670	4990	192	4.12	0.24
	G2_32	26.2	0.75	1980	4050	57	1.11	0.37
	(SW)	26.4	0.48	2330	4730	127	2.80	0.19
	G3_32	25.9	1.33	1940	3840	81	1.70	0.25
	(MW)	26.3	0.73	2330	4560	119	2.55	0.16
Porphyric biotite granite in Jechon	J1_32	27.0	0.24	2500	4720	147	3.10	0.24
	(F)	26.9	0.24	2110	4400	170	3.31	0.26
	J1_32	27.0	0.24	2230	4500	-	-	-
	(F)	27.0	0.24	2270	4230	163	3.41	0.19
	J2_32	26.7	0.39	2510	4140	105	2.55	0.24
	(SW)	26.8	0.34	2500	4740	114	2.97	0.25
	J3_32	26.5	0.44	1580	2610	98	1.71	0.21
	(MW)	26.6	0.43	1620	2570	78	1.24	0.28
	J4_32	25.7	1.69	1930	4230	89	1.65	0.09
	(HW)	24.8	2.62	1870	3460	47	0.83	0.09
	J1_32	26.8	0.21	2670	4570	145	3.27	0.15
	(F)	26.7	0.22	2890	4510	177	3.25	0.18
	J2_32	26.8	0.31	2550	4560	159	3.26	0.23
	(SW)	26.7	0.33	2360	4250	113	2.73	0.21
J4_32	26.1	0.75	1580	2340	70	0.88	0.21	
(HW)	26.3	0.87	1360	2560	-	-	-	
Granite in Geumsan	K1_32	26.1	0.39	2900	5210	178	3.80	0.19
	(F)	26.2	0.39	2790	5190	237	3.71	0.22
	K2_32	27.0	0.51	2510	4710	147	3.14	0.21
	(SW)	27.1	0.49	2610	4720	135	3.02	0.18
	K3_32	27.0	0.43	2720	4790	-	-	-
	(MW)	27.3	0.44	2700	5160	152	3.15	0.19
	K4_32	26.6	0.89	1930	3430	61	1.10	0.26
	(HW)	26.5	0.97	1800	3100	49	0.90	0.22

는 신선한 시료에서는 45~55%의 분포를 보이던 것이 심한 풍화 상태에서는 15~25%의 분포대로 감소됨을 Fig. 5에서 관찰할 수 있다. 풍화에 강한 석영은 상대적으로 20~30%에서 35~45%로, 그리고 정장석(orthoclase)은 2~5%에서 30~40%로 그 구성 비율은 증가됨을 볼 수 있다. 즉, 풍화가 진행됨에 따라 구성 광물 중 풍화에 약한 광물들은 점점 풍화에 의하여 그 비율이 감소되고, 반면에 풍화에 강한 광물들은 상대적으로 비율이 증가하는 경향을 살펴볼 수 있다.

3.3. 풍화에 따른 암석 물성 변화

서로 다른 화강암류에서 풍화등급에 따라 총 74개의 암석시료를 채취하여 실내암석실험을 통하여 풍화등급에 따른 물성변화를 살펴보았다(Table 3, Table 4). 즉, 세립질화강섬록암(시료번호 W로 시작하는 시료), 거정질반상흑운모화강암(시료번호 J로 시작하는 시료), 중립질흑운모화강암(시료번호 G와 K로 시작하는 시료), 화강편마암(시료번호 T로 시작하는 시료)를 32 mm와 50 mm 두 가지의 지름을 지닌 원통형시료로 성형하여 비중, 탄성파 속도 및 흡수율 그리고 일축압축강도를 측정하여 풍화에 따른 암석의 물리적, 공학적 특성 변화를 관찰하였다. Table 3과 Table 4에서 시료번호 뒤

Table 4. Physical and mechanical characteristics of the studied rock samples ($\Phi=32$ mm and $\Phi=50$ mm).

Rock type	Sample N ^o	Specific density (kN/m ³)	Q _A (%)	seismic wave propagation velocity (m/s)		UCS (MPa)	Young's modulus (10*GPa)	Poisson's Ratio
				V _s	V _p			
Granodiorite in Gimcheon	W1_50	26.9	0.22	2860	4880	147	4.50	0.15
	W1_50	26.9	0.24	2840	4640	155	4.27	-
	W1_50	26.7	0.22	2610	4510	214	4.68	0.19
	W1_32	26.4	0.42	2780	4320	235	4.05	0.18
	W1_32	26.3	0.57	2200	3880	289	4.22	0.20
	W1_32	26.4	0.36	2630	4830	269	3.98	0.18
	W4_50	25.9	1.08	1170	1470	57	0.47	0.27
	W4_50	25.8	1.14	1100	1380	47	0.40	0.35
Granite gneiss in Gimcheon	T1_50	27.0	0.15	2590	4250	189	4.13	0.16
	T1_50	27.0	0.15	2550	4350	196	4.30	0.17
	T1_50	27.0	0.15	2430	4270	211	4.74	0.19
	T2_50	27.4	0.13	2510	4010	161	4.31	0.17
	T2_50	27.3	0.15	2460	4110	163	4.14	0.16
	T2_50	27.5	0.12	2410	3890	171	4.08	0.16
	T3_50	26.5	0.51	1580	2460	85	1.44	0.29
	T3_50	26.6	0.66	1770	2600	74	1.22	0.26
	T3_50	26.4	0.80	1370	1830	56	0.67	0.30
	T4_50	26.4	0.42	2780	4320	99	1.61	0.19
	T4_50	26.3	0.57	2200	3880	98	1.57	0.20
	T4_50	26.4	0.36	2630	4830	107	1.83	0.17
Porphyric biotite granite in Jechon	J1_50	27.1	0.19	2080	3330	170	4.23	0.18
	J1_50	27.0	0.19	2190	3640	172	4.60	0.19
	J1_50	26.9	0.19	2190	3820	183	4.20	0.19
	J1_32	26.9	0.29	1880	3310	130	2.70	0.18
	J1_32	27.0	0.27	1860	3320	116	2.52	0.23
	J1_32	27.1	0.23	1940	3740	152	3.79	0.19
	J2_50	26.7	0.30	1880	3290	164	3.45	0.22
	J2_50	26.9	0.22	2870	4720	173	3.38	0.18
	J2_50	26.8	0.22	2410	4920	176	2.93	0.21
	J3_50	26.4	0.61	1500	2100	94	1.69	0.24
	J3_50	26.3	0.62	1650	2630	77	1.62	0.18
	J3_50	26.3	0.65	1680	2700	87	1.66	0.21
	J3_32	26.3	0.65	1570	2480	66	1.26	0.20
	J3_32	26.6	0.59	1470	2330	71	1.05	0.22
	J3_32	26.4	0.57	1470	2230	47	0.81	0.16
	J4_50	26.6	0.66	1450	1960	82	1.45	0.31
J4_50	26.4	0.64	1290	1670	65	0.83	0.33	
J4_32	26.4	0.42	2780	4320	46	0.60	0.33	
J4_32	26.3	0.57	2200	3880	38	0.53	0.33	
J4_32	26.4	0.36	2630	4830	61	1.04	0.28	

의 숫자는 풍화등급을 나타내는 것으로 1일 경우에는 풍화등급 F, 2는 SW, 3은 MW 그리고 4는 HW를 각 기 표시한다. Table 3과 Table 4에서의 시료번호 뒤의 표식 _50과 _32는 시료의 지름을 표시하는 것이다.

그런데, 풍화 등급은 현장에서 주로 대상 암반에 대하여 육안관찰과 현장에서 할 수 있는 간단한 상대적

강도 실험을 통하여 결정되었기 때문에, 시료 성형 과정과 육안 관찰에 의한 오차로 인하여 동일한 풍화 등급의 암석의 물성에서도 그 편차가 큼을 Fig. 5에서 볼 수 있다. 특히, 심한 풍화 HW와 보통 풍화 MW의 경계가 확연하지 않으며, 각 풍화등급간의 경계가 명확하지 않음을 또한 관찰할 수 있다. 이는 서로 다

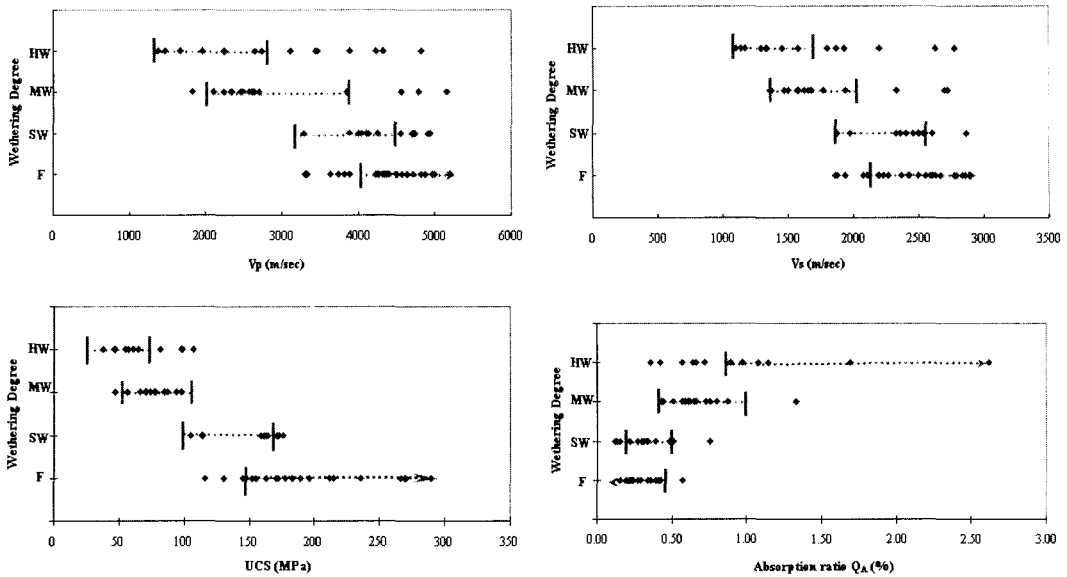


Fig. 5. Physical and mechanical rock properties with respect to the weathering degree for the granite and granite gneiss in Korea.

른 풍화등급간의 점이적인 변화 때문에 나타나는 현상으로 서로 다른 풍화등급의 암석물성 범위를 결정할 때 서로 중복되는 구간을 두어 이러한 점이적인 변화를 반영하였다.

따라서, 각 풍화등급에서 오차에 속하는 물성 값을 육안이나 정성적인 암석 풍화 등급 분류의 오차 및 각 물성값의 표준편차를 고려하여 결정할 수 있다. 각 풍화 등급에서 보여 질 수 있는 물성 범위는 Fig. 5에서 직선 혹은 화살표로 표시되었으며, 각 풍화 등급에 따른 암석 물성치의 변화는 Table 5에 다시 기재되어 있다.

본 연구에서 구한 화강암 및 화강편마암의 풍화등급에 따른 물성 범위를 Lee(1989)와 Kim *et al.* (1990)가 국내 화강암에 대하여 구한 암석 물성값의 범위와 비교를 하면 흡수율이 본 연구에서 구한 값이 좀 더 낮게 결정이 된 것을 알 수 있으며, 그 외 나머지 물성에서는 서로 유사한 결과를 보여주고 있다.

4. 풍화 지수

아외에서 흔히 사용되는 암석 풍화 분류는 관찰자의 주관에 많이 좌우되는 정성적이 방법이 대부분이다. 풍화 지수는 이러한 정성적 분류법을 부분적으로 보완하면서 암석의 풍화 상태를 정량적으로 구분할 수 있게 한다. 그러나, 단 한가지의 암석 특성만으로는 풍화 상태를 결정하기 어려우므로, 여러 암석의 물성을 조합한 풍화 지수와 신선한 암석과 풍화를 받은 암석의 물성을 서로 비교한 풍화 지수를 사용할 수 있다. 지금까지 여러 연구자들이 암석의 공학적 혹은 물리적 특성을 고려하여 풍화 지수들을 제시하였다. 그 중 Fookes *et al.*(1988)이 여러 암석 물성을 조합하여 암석의 내구성에 관한 지수 RDI(Rock Durability Index)를 제시하였고, 이를 다시 동적인 힘을 받는 조건(RDI_d)과 정적인 힘을 받는 조건(RDI_s)으로 구분하였다. 동적인 조건은 고속도로 혹은 철도의 기반을 구성하는 암석 등

Table 5. Range of the physical and mechanical properties of the granite and granite gneiss in Korea.

Weathering grade	UCS (MPa)	V _p (m/sec)	V _s (m/sec)	Q _A (%)
F	150~300	4000~5200	2200~3000	0.12~0.41
SW	100~170	3200~4500	1800~2500	0.22~0.49
MW	60~110	2000~3900	1400~2000	0.36~1.0
HW	30~65	1200~2700	1100~1700	> 1.0

이 이에 해당하며, 사면 혹은 터널과 같은 암반 구조물은 정적인 힘을 받는 조건으로 구분이 될 수 있다. 본 연구에서 사용한 정적인 조건의 암석의 RDI_{sq} 값은 다음 식에 의하여 구할 수 있다(Fookes *et al.*, 1988).

$$RDIs = \frac{Is(50)^* - 0.1(SST + 5WA)}{SGssd}$$

where, Is(50)*=average dry and saturated point-load index; SST=magnesium sulphate soundness test; WA=water absorption; SGssd=specific gravity saturated and surface dried

상기 식을 좀 더 간단히 표현하기 위하여, 각 암종에 대하여 많은 실험을 거쳐 magnesium sulphate soundness test와 water absorption ratio의 상관 관계를 구한 뒤 간편식 RDI_{sq}을 제안하였는데, 다음 식은 화강암에 관한 RDI_{sq}을 구하는 공식이다.

$$RDI_{sq} = \frac{Is_{(50)} - 0.1[10.23Q_A - 0.7]}{SGssd}$$

상기 공식에 의거하여 Fookes *et al.*(1988)은 풍화나 외부 조건에 대한 암석의 내구성에 따라 암석의 상태

를 Excellent, Good, Fair, Poor로 구분하였고, 그에 해당하는 RDI_{sq} 값의 범위를 구하였다(Table 3). 풍화를 받지 않은 신선한 암석은 일반적으로 내구성(durability)이 좋은 것과 같이 풍화 등급과 내구성은 어느 정도의 상관관계를 가지고 있으나, 풍화 등급과 내구성은 의미상의 차이를 지니고 있다.

본 연구에서는 채취한 화강암 및 화강편마암들의 암석의 물리적, 공학적 특성에 근거하여, 다음과 같은 풍화 지수 I_a(Woo 2003)를 제시하였다.

$$I_a = \frac{\text{Strength}_{\text{weathered}}}{\text{Strength}_{\text{fresh}}} \times \frac{\text{Dry Specific Gravity}(g/cm^3)}{Q_A(\%)}$$

이 공식에서 첫 번째 항은 암석 강도의 상대적인 값으로 신선한 암석(풍화 등급 F)의 강도 - 일축압축강도, 점허중강도, 슈미터해머강도 등 - 와 풍화를 받은 암석의 강도의 비로 나타낸다. 두 번째 항은 흡수율(Q_A)에 대한 건조 암석 비중의 비이다. 즉, 풍화 지수 I_a는 현장에서 간단한 실험을 통하여 얻을 수 있다. 각 풍화 등급에 해당하는 암석의 물성을 대입한 결과 Fig. 7에서는 풍화지수 RDI_{sq}와 I_a의 값의 분포를 풍화 등급에 따라 표시하였다.

RDI_{sq}의 경우에는 Fookes *et al.*(1988)이 제안한 값

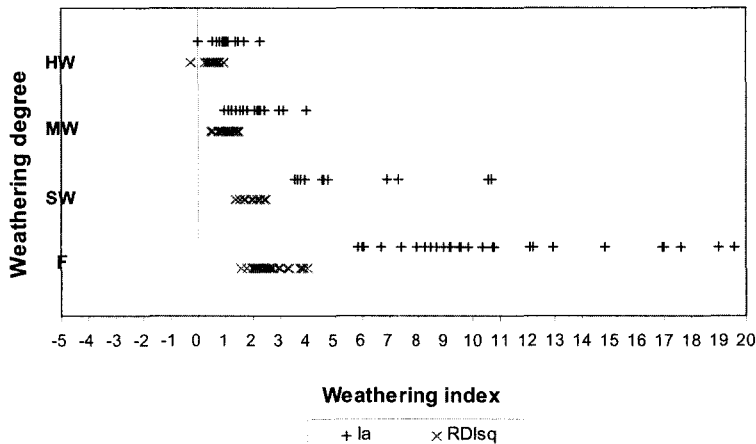


Fig. 6. Range of the weathering indices Ia and RDI_{sq} with respect to the weathering degree.

Table 6. Range of the weathering index of I_a and RDI_{sq} for the granite and granite gneiss in Korea.

Weathering degree	I _a	Potential Durability	RDI _{sq} (Fookes <i>et al.</i> , 1988)	RDI _{sq}
F	> 7	Excellent	> 2.5	> 2.5
SW	3.5~10	Good	-1~2.5	1~2.5
MW	1.0~6.0	Fair	-3~1	0~1.5
HW	< 2.5	Poor	< -3	< 0.5

과 Fig. 7에 표시된 본 연구에서 구한 값과 차이가 있음을 볼 수 있다(Table 6). 본 연구에서 산정된 RDI_{sq} 는 영국 화강암에 대하여 Fookes *et al.* (1988)이 여러 실험을 통하여 구한 값으로 국내 화강암류에 대하여 차이가 있음을 보여주고 있다. 즉, 본 연구에서 산출된 RDI_{sq} 값의 범위에 근거한 풍화 등급별 값의 범위는 Table 6에 제시되어져 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, I_a 의 값은 RDI_{sq} 에 비하여 그 분포 범위가 넓으며, 서로 인접한 풍화 등급간의 중복되는 구간이 존재함을 볼 수 있다. 서로 중복되는 구간은 점이적인 풍화 등급의 발달을 고려한 것으로, 중복되는 구간의 암석의 풍화 등급은 다른 정성적인 방법 혹은 정량적인 방법에 의하여 결정되어야 할 것이다. Fig. 6에 나타난 풍화 등급에 따른 I_a 의 범위는 Table 6에 제시되었다.

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 풍화에 따른 화강암 및 화강편마암의 물성변화정도를 결정하기 위하여 우선, 재고찰된 풍화 분류 기준에 따라 시료를 채취하고 육안 관찰 및 박편 관찰을 통하여 그에 따른 광물학적인 관찰을 하였고, 또한 XRD 분석으로 암석 구성 광물의 풍화에 따른 동적 변화도 살펴보았다. 암석을 총 6단계의 풍화등급으로 구분하였으며, 풍화가 심해질수록 암석을 구성하는 광물들간의 경계면이 불투명해지며, 미세질리가 점점 발달됨을 알 수 있었다. 또한, 풍화에 민감한 광물인 사장석이나 흑운모의 상대적인 구성 비율이 풍화가 진행됨에 따라 감소됨을, 반면에 풍화에 저항력이 강한 석영이나 정장석의 경우엔 오히려 그 구성 비율이 증가됨을 관찰할 수 있었다.

풍화등급에 따른 암석물성의 변화를 측정하여 풍화 등급에 따른 암석물성 범위를 결정하였다. Fookes *et al.* (1988)이 제시한 풍화 지수 RDI_{sq} 와 암석의 물에 대한 흡수율과 신선한 암석과의 상대적인 강도 및 암석비중치를 바탕으로 한 I_a 값을 서로 비교하고, 그 값의 범위를 암석 풍화 등급에 따라 정하였다. I_a 값은 풍화등급에 따라 감소한다. 즉, 신선한 암석 F의 경우에는 I_a 의 값이 7이상이며, 심한풍화상태인 HW의 경우엔 I_a 의 값이 2.5이하로 구분된다.

이러한 풍화지수에 의한 암석의 풍화등급분류는 이전의 정성적인 방법보다 좀더 정량적으로 접근하려는 시도이나, 제시된 풍화 지수 I_a 값의 범위는 연구 지역

에 분포하는 화강암 및 화강편마암들에 대한 값으로 다른 암석에 대하여서는 또 다른 시료 채취 및 여러 시험을 통하여 구하여야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국과학재단과 주한 프랑스 대사관 및 프랑스 ARIEL 간의 국제 공동 연구 사업(과제 번호 20015-312-01-2)의 지원에 의해 수행되었다. 논문을 작성 시 재정 지원을 해주신 세종대학교 국가지정 지질 재해정보연구소(NRL)에도 감사를 드립니다.

참고문헌

- Dearman, W. R. (1974) Weathering classification in the characterization of rock for engineering purposes in British practice. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, v. 9, p. 33-42.
- Fookes, P. G., Gourley, C. S. and Ohikerec (1988) Rock weathering in engineering time. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 21, n. 1, p. 33-58.
- GSEG (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, n. 3, p. 207-242.
- IAEG (International Association of Engineering Geology) (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: Rock and soil materials. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, v. 19, p. 364-371.
- 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, p. 79-90.
- ISRM (International Society of Rock Mechanics) (1981) Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, v. 22, p. 51-60.
- 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, p. 221-23.
- Lee, S. G. and De Freitas, 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, p. 31-4.
- Woo, I. (2003) Alterability of granites and gneisses in South Korea. Consequences on the long-term stability of excavated rock slopes. Thesis in Paris School of Mines, 205p.