

문경지역 담홍색 화강암 코아의 물리적 및 화학적 특성

윤 현 수

한국자원연구소 (대전직할시 유성구 가정동 30, 305-350)

요 약: 국내 담홍색 화강암 석재의 대표적 산출지인 문경 가은읍 완장리에서 암반 시추탐사가 실시되었다. 코아상에서 풍화암, 연암, 보통암 및 경암으로 분류하여 물리적 및 화학적 차이 등을 연구하였다. 비중과 흡수율은 각각 2.37~2.64 와 0.27~1.87%이며, 풍화암에서 경암으로 갈수록 비중은 미약하게 증가하나 흡수율은 다소 크게 증가한다. 풍화가 심화될수록 공극율과 함수능력이 증가하여 뚜렷한 정 상관 관계를 가진다. 압축강도는 풍화정도가 감소될수록 크게 증가하나, 흡수율과 공극율은 경암에서 강도 증가에 관계없이 거의 균일하다. 풍화암으로 갈수록 점토질 성분의 잔존에 의한 것으로 해석되는 $Al_2O_3 + FeO(t)$ 는 증가하여 SiO_2 , CaO 와 K_2O 는 미약하게 감소한다.

핵심어: 분류, 비중, 흡수율, 공극율, 압축강도

서 언

경상북도의 문경지역 일대는 불국사 화성활동의 산물인 대규모 저반상 암체로 이루어져 있으며, 담홍색 계열 화강암 석재의 대표적 산출지이다 (Fig. 1). 연구지역인 가은읍 완장리에서는 암반 하부의 암질과 암석 판정에 의한 풍화양상 등을 알기 위해 모두 9 개공의 시추탐사가 실시되었다. 이 중 암석 판정의 구간이 비교적 크고 뚜렷한 대표적인 6개 공/총길이 300 m를 연구대상으로 택하여 육안 감정, 코아 로깅, 현미경 관찰 등에 의해 풍화암, 연암, 보통암과 경암으로 분류하였다. 암석 판정에 따른 여러 물성의 특징과 그 상호 관계성을 연구하였으며, 물성 자료 중 압축강도의 변화값을 구하여 국내 석재분류와 비교하였다. 또한 암석 판정 및 심도 차이에 따른 주 원소의 변화특성 등을 연구하였다. 연구 지역에서는 암석화학, 지열, 석재 물성과 화학성 등에 관해서는 보고되었으나, 암석 판정에 따른 물리적, 화학적 특성은 연구된 바 없다 (윤현수 외, 1993; 진명식 외, 1992; 윤현수와 김선억, 1990; 김규환과 신윤수, 1990).

암석 기재

담홍색 화강암은 주변의 육천층군, 평안층군과 시대미상암류를 관입한 백악기의 화성활동 산물로

Table 1. Modal compositions of fresh pinkish granite at the quarry

Sample	Qz	Kf	Pl	Bt	Ch	Sp	Zr	Op
1	33.7	42.2	21.1	3.0	tr	tr		tr
2	32.9	40.4	24.8	1.9			tr	0.1
3	34.8	32.9	29.9	2.4		0.9	tr	
4	43.2	35.0	20.7	1.1	tr			
5	42.6	40.2	15.5	1.9		tr	tr	tr
6	35.5	49.8	14.4	0.3	0.1			
7	32.7	35.4	29.5	2.4			tr	
8	40.6	30.0	26.8	3.2		tr	tr	tr
9	32.8	46.2	19.3	0.8				
10	34.2	40.1	24.2	1.5			tr	tr

Qz : quartz, Kf : alkali feldspar, Pl : plagioclase, Bt : biotite, Ch : chlorite, Sp : sphene, Zr : zircon, Op : opaque

서 대규모의 암체를 이룬다 (윤현수와 김선억, 1990). 이 화강암은 조립질이 우세하며 공동구조, 흑운모의 층상구조 (layering), 맥상의 애프라이트 (aplite), 페그마타이트질 포켓 (pegmatitic pocket) 등이 종종 산출된다. 연구지역인 완장리에서는 주변지역과 달리 치밀질 화강암 암반이 넓게 분포되며 간혹 공동이 국부적으로 산출된다. 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리 장석, 흑운모, 녹니석, 스피넬, 저어콘과 불투명 광물 등이다. 알칼리 장석은 대부분이 퍼다이트이고 일부 미사장석으로 구성된다. 이곳 체석장 시료는 모드 분석 결과 화강암에 해당된다 (Table 1).

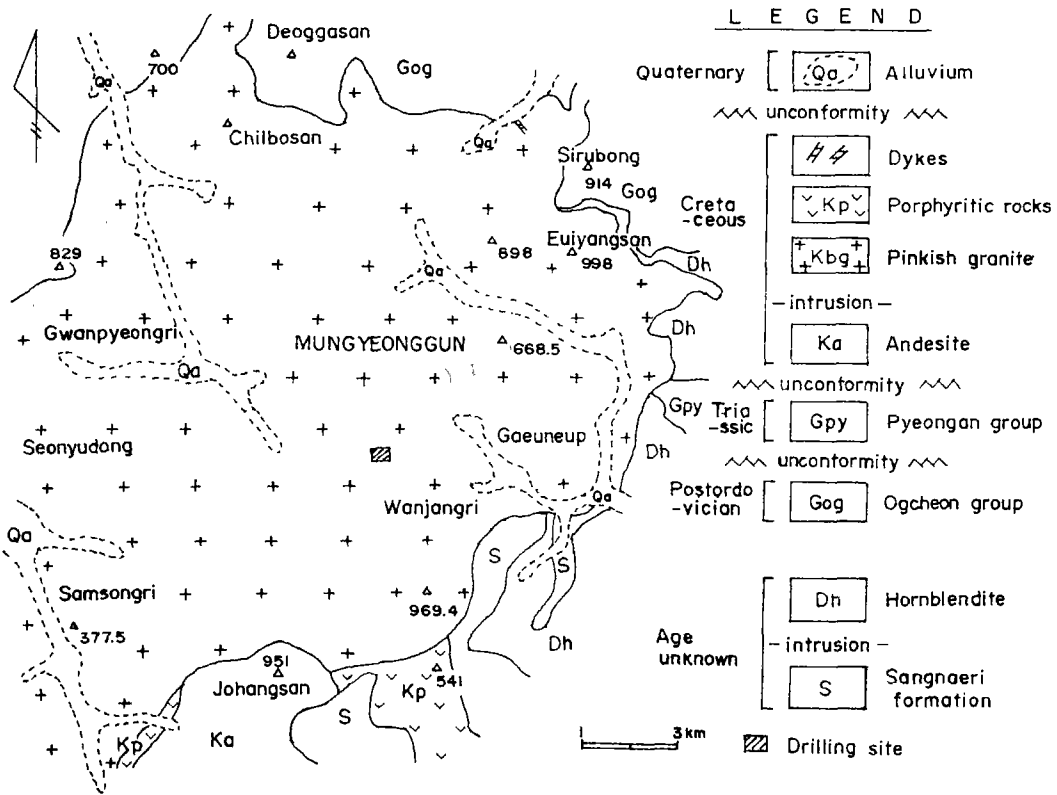


Fig. 1. Geologic map and drilling site of the study area.

시료 채취 및 암석 판정

연구대상은 1H, 3H, 4H, 5H, 8H, 9H의 6개 공으로서 각각의 심도는 50, 60, 40, 40, 70, 40 m에 달한다. 시료는 절리 발달구간, 열극대, 애프라이트 세맥, 페그마타이트질 부분 등을 피하여 각 풍화정도에 따라 가능한한 여러 개의 시료를 채취하였다.

암석 판정은 석재 분류에 이용되는 풍화암 (highly weathered rock, HWR), 연암 (moderately, MWR), 보통암 (slightly, SWR)과 경암 (fresh rock, FR)의 4 개로 구분하였다 (Hunt, 1984). 채취된 시료수는 HWR 10개, MWR 47개, SWR 33개, FR 46개로서 모두 136개에 달한다.

HWR은 보통 풍화 표토층 (residual soil) 바로 아래에 발달된다. 육안으로 구성광물의 경계를 식별하기 어려울 정도로 풍화변질을 받거나 용식 (溶蝕)되어 충식상 구조를 이루기도 한다. 이런 변질 암은 망치나 손으로 쉽게 분쇄된다. 구성광물 중 사장석은 다소 심하게, 알칼리 장석은 몹시 지저분하

며, 흑운모는 전체 또는 부분적으로 녹니석화 되기도 한다. 산화착색이 흑운모 전체 또는 주변이나 인접 광물의 미세 열극을 따라 발달한다. 이는 불안정 광물의 Fe^{2+} 가 산화되어 Fe^{3+} 로 착색되기 때문이다.

MWR은 대개 HWR에 이어 발달하며, 풍화변질 정도가 HWR보다 훨씬 작아서 구성광물의 원형이 대체로 보존되어 있다. 사장석, 알칼리 장석, 석영 등의 경계부나 입자내의 미세열극을 따라 산화철에 의한 착색부가 발달하기도 한다. 흑운모 주변부나 인접 광물의 미세 열극에 적갈색의 변질부가 발달하기도 한다. HWR과 MWR은 석재로서는 폐석에 해당된다.

SWR은 FR과 육안 구분이 용이하지 않으나 흑운모 주변부에서 미약한 산화 착색대를 이룬다. 이들은 석재로서 이용되는 암석이다. FR은 구성광물이 거의 신선하며 흑운모는 방사성 색운의 변질 (halo) 외에는 착색변질이 거의 발달하지 않는다. 이들 SWR과 FR 코아는 망치로 충격시에 다소 청명함을 낸다.

Table 2. Ranges and average values of the physical property data

	Specific gravity	Absorption ratio (%)	Porosity (%)	Compressive strength (kg/cm ²)
HWR	2.37~2.56 (2.49)	0.86~1.87 (1.56)	2.19~4.38 (3.79)	110~820 (373)
MWR	2.55~2.60 (2.58)	0.58~1.13 (0.78)	1.50~2.28 (2.00)	405~1,315 (964)
SWR	2.58~2.62 (2.59)	0.37~0.66 (0.50)	0.95~1.69 (1.23)	735~1,580 (1,191)
FR	2.59~2.64 (2.62)	0.27~0.46 (0.34)	0.70~1.15 (0.89)	1,090~1,695 (1,393)
	2.53~2.59*	0.25~0.81*	0.66~2.05*	1,100~1,868*

*: 윤현수 외 (1993)

물성 측정

물리적 특성을 알기 위해 시추공(NX 크기=직경 5.5 cm)에서, 암석 판정에 따라 그 발달폭이 얇은 HWR은 1~3개, 두꺼운 MWR, SWR과 FR은 4~6개의 공시체 (供試體, 높이 5.5 cm)를 제작하였다. 이들의 물성인 비중, 흡수율, 공극율과 압축강도는 한국공업규격 (KS-F 2518과 2519)에 의해 측정하였다 (윤현수 외, 1993).

물리적 특성

연구된 암석 판정에 따른 비중, 흡수율, 공극율, 압축강도의 특성과 상호관계는 다음과 같다 (Table 2).

비 중

석재의 비중은 시료의 중량과 동일한 체적을 가진 물의 질량과의 비로서 겉보기 비중을 말한다. 암석별 비중은 HWR 2.37~2.56 (평균 2.49), MWR 2.55~2.60 (2.58), SWR 2.58~2.62 (2.59), FR 2.59~2.64 (2.62)로서 풍화가 심해질수록 그 변화폭이 다소 증가되고 평균값은 감소된다. 이 값은 HWR 외에는 모두 화강암 비중인 2.52~2.81의 범위에 해당된다 (Daly *et al.*, 1966; Duncan, 1969).

흡수율

흡수율은 시료 내에 수분이 침투하여 포화상태일 때의 함유수분의 중량 (wt %)의 백분율을 말한다.

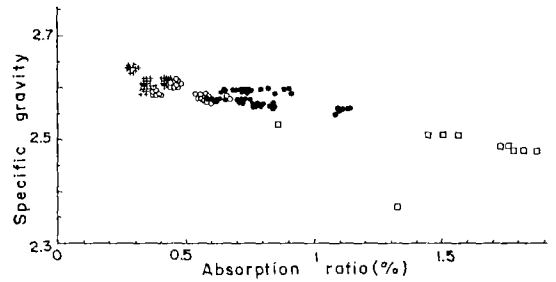


Fig. 2. Correlation diagram of the specific gravity and absorption ratio. Symbols : cross, highly weathered; open circle, moderately weathered; solid circle, slightly weathered; open square, fresh rock.

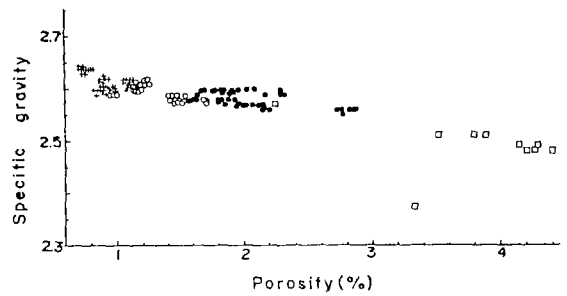


Fig. 3. Correlation diagram of the specific gravity and porosity. Symbols are the same as in Fig. 2.

암석 판정에 따른 흡수율은 HWR 0.86~1.87 (평균 1.56), MWR 0.58~1.13 (0.78), SWR 0.37~0.66 (0.50), FR 0.27~0.46 (0.34)로서 풍화가 심해질수록 그 범위와 평균값이 뚜렷이 증가되어 강승철 외 (1985)의 연구결과와 유사하다. 흡수율과 비중은 부의 상관관계를 가진다 (Fig. 2).

공극율

공극율은 시료의 전공극의 체적과 공극을 포함한 전체적과의 백분율이다. 암석 판정에 따른 공극율은 HWR 2.19~4.38 (평균 3.79), MWR 1.50~2.28 (2.00), SWR 0.90~1.69 (1.23), FR 0.70~1.15 (0.89)로서, 풍화가 진행될수록 그 범위와 평균값이 뚜렷이 증가된다. 이는 풍화가 심화 될수록 차별적으로 형성된 조암광물의 용식구조에 기인되는 것으로 보인다 (Farmer, 1968; Winkler, 1973). 공극율과 비중은 부의 상관관계를 가지며, 흡수율과 공극율은 거의 직선상의 뚜렷한 정의 관계를 가져 공극율이 클수록 흡수 능력의 증가 경향을 잘 보인다 (Fig. 3; 윤현수 외, 1993; Duncan, 1969).

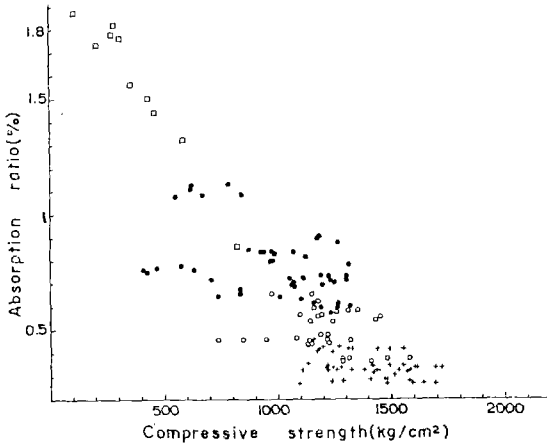


Fig. 4. Correlation diagram of the absorption ratio and compressive strength. Symbols are the same as in Fig. 2.

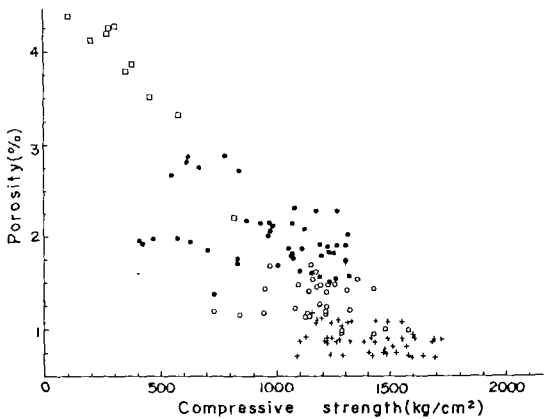


Fig. 5. Correlation diagram of the porosity and compressive strength. Symbols are the same as in Fig. 2.

압축강도

암석 판정에 따른 압축강도 (kg/cm^2)는 FR 1,090 ~ 1,695 (평균 1,393), SWR 735 ~ 1,580 (1,191), MWR 405 ~ 1,315 (964), HWR 110 ~ 820 (373)로서 후자로 갈수록 심한 풍화변질로 인해 급격히 감소한다 (Dixon, 1969). 연구지역의 SWR과 FR의 평균값은 전형적인 화강암의 압축강도인 1,000 ~ 2,500 범위에 해당된다 (Farmer, 1983; Hawkes and Mellor, 1970; Winkler, 1973). 한편 SWR의 평균값은 이 지역 화강암 석재의 압축강도 범위 (1,100 ~ 1,840)에 속한다 (윤현수 외, 1993). 암석은 강도에 따라 연암 (weak) 200 ~ 400, 중경암 (medium) 400 ~ 800, 경암 (strong) 800 ~ 1,600 등으로 분류된다.

따라서 SWR과 FR은 거의가 경암에 해당된다 (Farmer, 1983).

압축강도와 비중은 완만한 정의 상관관계를 이룬다. 또한 압축강도 대 흡수율, 압축강도 대 공극율은 대부분 부의 상관관계를 이루나, 경암에서는 압축강도의 증감에 관계없이 흡수율과 공극율이 대체로 0.3과 0.9이다 (Figs. 4, 5).

암석 판정에 따른 물성값의 특징

연구 지역에서 측정된 각 암상별 물성의 평균값과 범위는 Table 2와 같다. 이 중 표준 물성 (Index property)인 압축강도를 국내 석재의 물성 기준 (KS F 2530)에 비교하면 풍화 정도가 심하여 건축적으로 이용 불가능한 HWR과 MWR도 준경석과 경석에 각각 해당된다 (Bell, 1978). 국내 석재의 압축강도는 연석 <100, 준경석 100 ~ 500, 경석 500으로 분류하고 있다. 따라서 치밀질 담홍색 화강암의 암석 판정에 따른 압축강도 (평균값)는 HWR 370, MWR 960, SWR 1,190 그리고 FR 1,390으로 제시한다. 이 중 SWR과 FR은 연구지역에서 산출되는 석재의 강도 범위인 1,100 ~ 1,868의 범위안에 든다 (윤현수 외, 1993).

화학적 특성

풍화에 따른 전반적인 화학적 특성을 알기 위해 대표적인 시추공 3H, 8H에서 각 풍화정도별로 2개씩 모두 8개의 시료를 채취하였다. 이들 중 3H와 8H는 시추고도가 447 m와 451 m이고 동일 암반내에 근접하므로, 이들 코아로서 암석 판정별 화학성분 변화를 연구하였다 (Table 3).

SiO_2 는 암반상부 (시추심도 6.3 m) HWR에서 하부 (39 m) FR로 갈수록 서서히 증가한다. 암반하부로 갈수록 CaO 와 K_2O 는 미약하게 증가한다. 그리고 $\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}$, $\text{K}_2\text{O} + \text{SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}(t)$ 의 삼각 성분도에서 FR에서 HWR로 갈수록 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}(t)$ 는 약간 증가한다. 이는 풍화가 심화될수록 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}(t)$ 가 다른 원소들의 미약한 이동에 반해 점토 성분으로 다소 더 많이 잔존되기 때문으로 해석된다 (Harris and Adams, 1966; Krauskopf, 1967).

한편 산화철의 착색이 가장 뚜렷한 MWR, HWR에서 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 는 0.84 ~ 0.88의 거의 균일한 값을

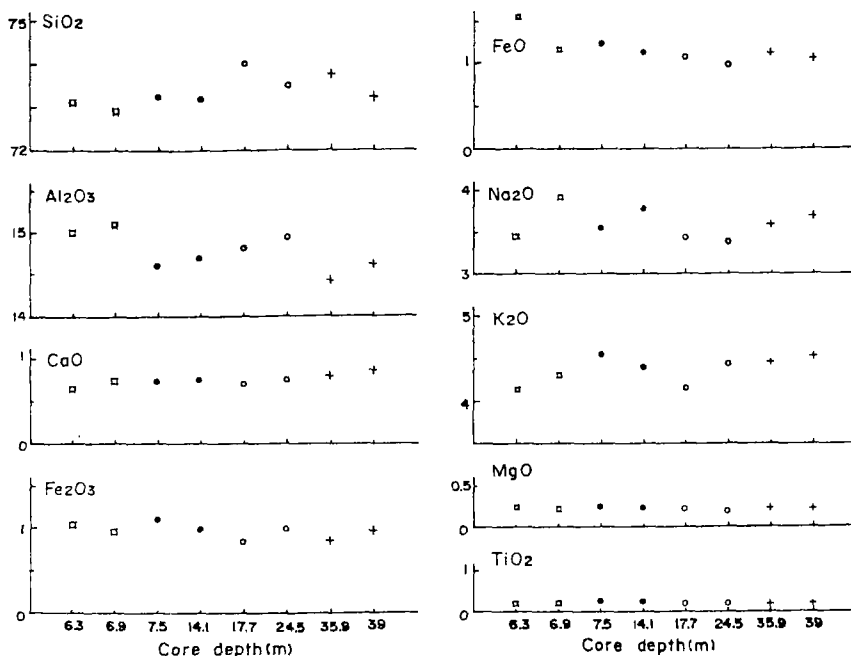


Fig. 6. Relation diagrams between major elements and core depth. Symbols are the same as in Fig. 2.

Table 3. Major element chemistry and rock classification of pinkish granite listed by core depth (m)

Sample	8H-1	3H-1	8H-2	3H-2	8H-3	3H-3	8H-4	3H-4
Depth	6.3	6.9	7.5	14.1	17.7	24.5	35.9	39.0
SiO ₂	73.12	72.92	73.23	73.20	74.02	73.52	73.78	73.23
TiO ₂	0.10	0.10	0.11	0.11	0.09	0.10	0.09	0.10
Al ₂ O ₃	15.00	15.11	14.60	14.70	14.82	14.96	14.44	14.63
Fe ₂ O ₃	1.04	0.97	1.10	0.99	0.83	1.00	0.86	0.98
FeO	1.58	1.16	1.24	1.13	1.08	0.98	1.12	1.07
MnO	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
MgO	0.24	0.21	0.25	0.23	0.21	0.19	0.22	0.21
CaO	0.65	0.74	0.73	0.77	0.69	0.76	0.79	0.87
Na ₂ O	3.44	3.91	3.57	3.79	3.44	3.38	3.60	3.70
K ₂ O	4.14	4.29	4.53	4.39	4.15	4.43	4.45	4.52
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Sum	99.40	99.50	99.45	99.39	99.41	99.40	99.43	99.39
Rock	HWR	HWR	MWR	MWR	SWR	SWR	FR	FR

가지나 암반상부 (시추심도 6.3 m)에서 0.66으로 감소한다. 이는 Fe²⁺가 산화된 Fe³⁺가 암반상부에서 더 용출되기 때문으로 보인다. 그리고 MgO는 풍화가 심화되어도 점토광물의 격자구조내에 들어가므로 FR과 거의 비슷한 함량을 가진다 (김수진 외, 1994). 극히 미량으로 존재하는 MnO와 TiO₂는 풍화정도에 관계없이 균일하다.

결 언

국내 담홍색 화강암 석재의 대표적 산출지인 문경의 가운읍 완장리에서 치밀질 화강암 암반의 시추탐사가 실시되었다. 암석 판정은 코아상에서 풍화암 (HWR), 연암 (MWR), 보통암 (SWR)과 경암 (FR)으로 구분하여 물리적 및 화학적 특성을 연구하였다.

비중은 2.37~2.64의 비교적 좁은 변화폭을 가지며 풍화가 심화될수록 평균값이 약간 증가한다. 그리고 흡수율 (%)과 공극율 (%)은 각각 HWR 1.56과 3.79, MWR 0.78과 2.00, SWR 0.50과 1.23, FR 0.34와 0.89로서 풍화가 진행될수록 뚜렷이 증가한다. 압축강도 (kg/cm²)는 FR 1,393, SWR 1,191, MWR 964, HWR 373으로서 풍화진행에 따라 그 값이 급격히 감소하는 경향을 보인다.

흡수율 대 비중, 공극율 대 비중은 완만한 부의 관계를 가지며, 흡수율 대 공극율은 뚜렷한 정의 관계를 보여 공극율이 클수록 함수 능력이 증가하는 경향을 잘 보인다. 또한 압축강도 대 흡수율, 압축강도 대 공극율은 풍화가 심화될수록 대부분 급격한 부의 상관관계를 이루나, FR에서는 강도 증가에 관계없이 흡수율과 공극율이 대체로 균일하여 각각

0.3과 0.9 정도에 이른다. 암석 판정에 따른 압축강도의 평균값은 HWR 370, MWR 960, SWR 1,190 그리고 FR 1,390에 각각 해당한다.

풍화가 심해질수록 $Al_2O_3 + FeO$ (t)가 다른 원소들의 미약한 이동에 반해 점토 성분으로 다소 더 많이 잔존한다. MWR과 HWR의 Fe^{3+}/Fe^{2+} 는 암반 상부에서 감소한다.

사 사

시추 탐사와 실내외 연구에 많은 도움을 준 김선익 부장님, 김윤규 박사, 박용순과 김영범 연구원, 기술지원실 여러분에게 감사를 드린다. 암석 물성측정과 화학분석에 수고하여준 김경수 연구원과 분석연구부 여러분, 그리고 용어상의 문제점을 지적해주 이수곤 박사에게 감사를 드린다. 끝으로 이 논문을 자세히 보아준 진명식 박사님, 권성택 교수님과 조문섭 교수님에게 깊은 감사를 표한다.

참고문헌

강승철, 전효택, 전용원, 1985, 풍화화강암의 물리적, 암석학적 및 지구화학적 특성. 대한광산학회지, 22, 339-352.
 김규한, 신윤수, 1990, 충주-월악산-제천 화강암류의 암석화학적 연구. 광산지질, 23, 245-259.
 김수진, 이민성, 김원사, 이수재, 1994, 서울 지역의 자연환경 변화에 관한 연구: 남산 화강암의 풍화에 관한 환경 광물학적 연구. 지질학회지, 30, 284-296.
 윤현수, 김선익, 1990, 문경 남부일대에 분포하는 백악기 화강암류의 암석학 및 암석화학. 광산지질, 23, 343-352.
 윤현수, 박용순, 이춘오, 이병대, 김경수, 1993, 문경-상주

사이에 분포하는 화강암류 석재의 암석학적 연구. 암석학회지, 2, 32-40.
 진명식, 이진수, 지세정, 서효준, 김상엽, 김성재, 신성천, 1992, 고온암체의 지열 에너지에 관한 암석학적, 지화학적 연구 (3). KR-92 (T)-23, 172p.
 Bell, F.G., 1978, The physical and mechanical properties of the Fell Sandstones, Northumberland, England. Eng. Geol., 12, 1-29.
 Daly, R.A., Manger, G.E. and Clark, Jr. S.P., 1966, Density of rocks. In Handbook of physical constants (ed. S.P. Clark, Jr.), Geol. Soc. Amer. Memoir, 97, 19-26.
 Dixon, H.W., 1969, Decomposition products of rock substances. Proposed engineering geological classification. Rock Mechanics Symp., Univ. Sydney, 39-44.
 Duncan, 1969, Engineering geology and rock mechanics. Leonard Hill, 252p.
 Farmer, I., 1983, Engineering behaviour of rocks. Chapman and Hall, 208p.
 Farmer, I.W., 1968, Engineering properties of rocks. E. and F.N. Spon Ltd., 180p.
 Harris, R.C. and Adams, J.A.S., 1966, Geochemical and mineralogical studies on the weathering of granitic rocks. Am. Jour. Sci., 264, 146-173.
 Hawkes, R.D. and Mellor, M., 1970, Uniaxial texturing in rock mechanics laboratories. Eng. Geol., 4, 177-285.
 Hunt, R.E., 1984, Geotechnical engineering investigation manual. McGraw-Hill Book Comp., 331-336p.
 Krauskopf, K.B., 1967, Introduction to geochemistry. McGraw-Hill Book Comp., 721p.
 Winkler, E.M., 1973, Stone: properties, durability in man's environment. Springer-Verlag, 230p.

(책임편집 : 조문섭)

Physical and Chemical Characteristics of Pinkish Granite Core in the Mungyeong Area

Hyun-Soo Yun

KIGAM (30 Gajeongdong, Yuseonggu, Daejeon, 305-350)

ABSTRACT : The Wongyeong site, one of massive pinkish granite quarries in the Mungyeong area, was drilled to study the physical and chemical properties following the rock classification from fresh rock to highly, moderately and slightly weathered one. The physical properties such as specific gravity, absorption ratio, porosity and compressive strength were tested from the core samples. Specific gravity and absorption ratio are 2.37~2.64 and 0.27~1.87% respectively, while porosity and compressive strength are 0.70~4.38% and 110~1,695 kg/cm². With increased weathering, absorption ratio vs. porosity shows a positive correlation. The absorption ratio is in reverse proportion to compressive strength. Toward the surface in the drilled core, the SiO₂, CaO and K₂O contents slightly decrease, but the Al₂O₃+FeO(t) contents increase by the enrichment of residual clay in the weathered rock.

Key words : rock classification, specific gravity, absorption ratio, porosity, compressive strength