

암석의 풍화에 따른 강도변화 특성에 관한 연구 A Study on Variation of Rock Strength due to Weathering

김성환¹⁾, Sung-hwan Kim, 유병옥²⁾, Byung-ok You, 조성로³⁾, Sung-ro Jo

요약(Abstract)

It is very important to evaluate rock strength in geotechnical engineering. But test methods are complicated, show many errors, and test data are insufficient. So there are a few methods to be able simply to assume rock strength in field and laboratory.

This paper is studied on the variation of rock strength due to weathering using test data accumulated for many years. Therefore, it was proposed equations of relationship between uniaxial strength and point load index, uniaxial strength and schmidt hammer rebound value, point load index and schmidt hammer rebound value.

주요어(Key words) : Strength, Uniaxial Strength, Point Load Index, Schmidt Hammer Value, Slaking Duability Test, Absorption, and Weathering Grade

암석의 강도에 대한 평가는 지반공학분야에서 매우 중요한 일이나 시험이 어렵고 시험에 많은 오차성을 가지고 있으며 많은 시험자료축적이 부족하다. 그래서 현장 또는 실내에서 간단하게 실시될 수 있는 실험방법으로 암석강도를 추정할 수 있는 방법이 미비한 실정이다.

본 연구는 수년간에 걸쳐 축적된 시험자료를 이용하여 암종에 따른 풍화정도 평가 및 풍화정도에 따른 강도특성의 변화에 대한 연구하였다. 그러므로 암석시편과 성형되지 않은 시료를 이용한 일축압축강도, 점하중시험, 현장 및 시편에서의 슈미트해머시험, 흡수율시험, 내구성 등의 시험을 실시하여 여러 암석강도의 상호관계를 규명하였으며 현장 또는 실내에서 간단한 시험방법으로 암석의 일축압축강도를 추정하기 위한 상관 관계식을 제안하였다.

1. 서론

암반의 풍화정도, 즉 암반강도에 대한 평가는 지반공학분야에서 매우 중요한 일이나 시험이 어렵고 시험에 많은 오차성을 가지고 있다. 일본에서는 암종별로 풍화정도에 따른 암반의 정탄성계수 및 변형계수, 암반의 점착력, 마찰각, 전단강도 등에 대한 세부적인 시험자료가 축적되어 여러 가지 토목구조물의 설계에 있어 실험을 실시 못하는 여건이나 실험데이터가 없다하더라도 풍화단계 구분이라는 정성적인 평가에 의한 암반의 풍화등급을 분류하여 설계에 필요한 자료를 얻을 수 있다. 그러나 국내에는 이들에 대한 실험자료의 축적을 통한 암종에 따른 풍화정도 평가 및 풍화정도에 따른 강도특성의 변화에 대한 연구가 매우 부족한 실정으로 현장 또는 실내에서 간단하게 실시될 수 있는 실험방법으로 암석의 강도를 추정할 수 있는 방법이 미

- 1) 한국도로공사 도로연구소, 수석연구원
Research Director, Highway Research Center, Korea Highway Corporation
- 2) 한국도로공사 도로연구소, 책임연구원
Chief Researcher, Highway Research Center, Korea Highway Corporation
- 3) 한국도로공사 도로연구소, 연구원
Researcher, Highway Research Center, Korea Highway Corporation

비한 실정이다. 그러므로 정성적인 풍화정도 규정 및 성형되지 않은 시료를 이용한 점하중시험, 현장에서의 슈미트해머시험, 흡수율시험 등과 암석강도와 의 상호관계를 규명하는 것이 중요하다.

본 연구는 국내에 분포하는 암석에 대해 풍화정도의 판정 또는 실내에서 간단한 시험방법으로 암석강도를 추정하기 위한 상관관계에 대해 연구하고자 한다.

2. 암석의 풍화도 판정

지표나 지표부근에 노출된 암석(또는 광물)의 대부분은 형성시기와는 전혀 다른 환경 하에 존재하므로 물리적으로 또는 화학적으로 변질되게 되는데 이러한 현상을 풍화작용이라 한다.

풍화작용은 물리적(Mechanical) 풍화와 화학적(Chemical) 풍화로 대별되는데, 물리적 풍화는 암석의 화학적 조성이나 광물학적 조성의 변화가 없이 단지 원래 암석이 작게 파쇄(Disintegration) 되는 것을 말한다. 일반적으로 자연환경 하에서는 물리적 풍화와 화학적 풍화가 동시에 일어나므로 두 가지 풍화작용의 상호 영향을 분리하여 고려하기는 어렵다.

물리적 풍화의 주요 원인으로는 위에 놓였던 하중의 제거에 따른 압력의 감소, 물의 동결, 온도변화, 식물의 작용 등을 들 수 있다. 화학적 풍화는 물과 암석중의 광물이 작용하여 용해, 산화, 탄산화, 가수분해, 수화, 이온교환 등을 일으켜서 암석을 풍화시키는 것을 말한다.

암석이 물리적 및 화학적 풍화와 생물의 작용을 받아 작은 입자들로 변하여 대체로 그 자리나 가까운 곳에 남아 있으며 유기물을 포함한 것을 토층(Soil)이라 한다. 지표의 굳지 않은 암석의 크고 작은 부스러기를 모두 토층이라고도 하나 지질학자는 이를 표토(Regolith)라 하여 토양과 구분하고 있다.

특히, 화성암과 변성암은 고온 하에서 형성되었으므로 퇴적암에 비해 생성시 보다 더 상이한 환경 하에서 존재한다고 할 수 있다. 따라서 풍화작용은 암석과 광물이 지표에서의 다양한 습도, 온도 및 생물학적 활동조건에 보다 안정된 상태로 변질되는 과정이라 할 수 있다.

암반의 풍화에 대한 판단은 다음과 같이 풍화단계를 6단계로 구분한다(표 1. 참조).

표 1. 암반의 풍화단계

단계	구분
1	RS(Residual Soil)
2	CW(Completely Weathered Soil)
3	HW(Highly Weathered Rock)
4	MW(Moderately Weathered Rock)
5	SW(Slightly Weathered Rock)
6	F(Fresh)

일반적으로 RS와 CW는 토층에 해당하고 HW는 암과 토층의 경계물질로 풍화암에 해당하고, MW는 연암, SW는 경암, F는 극경암에 해당한다. 이에 대한 공학적인 특성 및 분류기준은 표 2에서 보는 바와 같다.

지반물질의 풍화는 하부에서 상부로 올라갈수록 점진적으로 풍화정도가 심하게 되지만 곳에 따라서는 지하의 열수용액에 의한 풍화작용을 받게 되면 풍화가 하부에서도 상당히 진전되는 경우도 많으며 일반적으로 변성암에서는 단층 및 절리 등의 복잡한 지질구조로 인한 불규칙한 풍화양상을 보인다.

표 2. 암반의 풍화정도에 따른 암반의 공학적인 특성

Engineering property	Fresh I	Slightly weathered II	Moderately weathered III	Highly weathered IV	Completely weathered V	Residual soil VI
Foundation conditions	Suitable for concrete and earthfill dams		Suitable for small concrete structures, earthfill dams	Suitable for earthfill dams	Suitable for low earthfill dams	Generally unsuitable
Excavatability	In general blasting necessary		General blast, but ripping may be possible dependent upon the jointing intensity and plant available	Generally ripping and/or scraping dependent upon available plant	Scraping	Scraping
Quantitative comparison	4 m holes at 1.6-2 m centres dependent on the jointing, 0.44-0.69 kg/m ³ rock broken (60% special gelatin)		5 m holes at 2-3 m centres dependent on the jointing, 0.37-0.44 kg/m ³ rock broken	6.5 m holes at 3-4 m centres, 0.3-0.37 kg/m ³ rock broken (40% ammonia)		
Slope design	4:1	W:1 to 1:1	1:1	1:1 to 1.6:1		1.6:1 to 2:1
Tunnel support	Not required unless joints closely spaced or adversely orientated		Light steel sets of 0.6-1.2 m centres	Steel sets, partial lagging, 0.6-0.9 m centres	Heavy steel sets, complete lagging 0.6-0.9 m centres. If tunnelling below water table, high risk of soil flowing into tunnel	
Drilling RQD	75%, usually 90%		50-75%	0-50%	0 or does not apply	
% core recovery (N.N)	90%			Up to 70% if a high % of carbonates, as low as 15% if not	15% as sand	
Drilling rates Diamond NX	2-4 m/hr			6-10 m/hr	10-13 m/hr	
2 1/2" Percussion	5-7 m/hr	8 m/hr		12-15 m/hr	17 m/hr	
Permeability	Low to medium		Medium to high	High	Medium	Low
Quantitative comparison (m/s)	0-5 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻⁷ -4 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻⁷ -1 · 10 ⁻⁶		Rock fabric has appreciable permeability in the regions of 1 · 10 ⁻⁷ -1 · 10 ⁻⁶	
Seismic velocity (m/sec)	3050-5500	2500-4000	1500-3000	1000-2000	500-1000	
Resistivity (ohm metres)	340	240-540	Tends to be determined by joint openness and water table depth		180	

*Based on Moye (1965), Kiersch and Treascher (1955), Little (1965), Saunders and Fookes (1970), Fookes et al. (1971), and Deere and Patton (1971).

3. 기존 시험자료 검토

3.1 슈미트해머 반발치와 일축압축강도

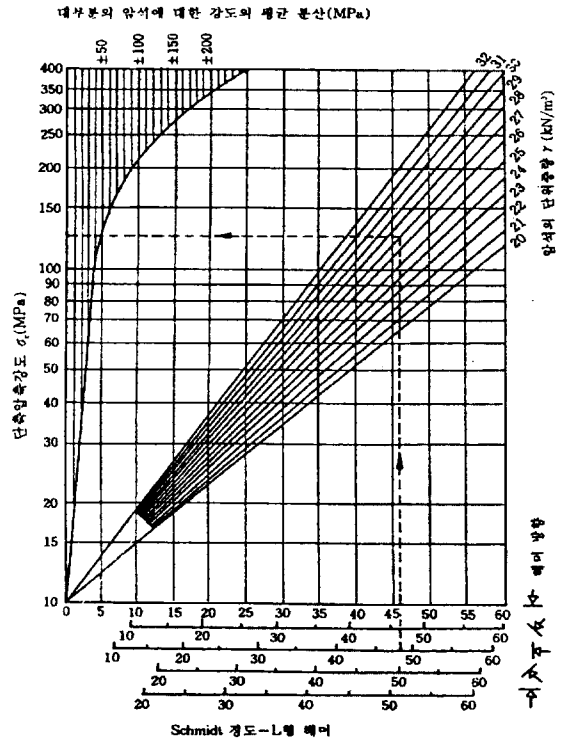
3.1.1 Deer & Miller의 이론(1)

Deer & Miller에 의해서 제안된 것으로서 그림 1에 나타나 있다. 이 그림은 슈미트 해머 수치와 암석의 체적단위중량(γ_b)의 곱한 값을 산술축적으로 나타내고 일축압축강도 수치를 대수 축적으로 할 때 매우 뚜렷한 직선관계가 있다는 것을 보여 준다. 이 그림에서는 슈미트 해머의 수치가 60이상 되는 경우에는 일축압축강도와와의 관계식이 그려지지 않으므로 슈미트 해머 수치가 60이상인 암석의 일축압축강도를 추정할 수 없는 한계가 있다.

그림 1. 암석의 슈미트해머 반발치와 압축강도와의 관계(Deer & Miller)

$$1\text{MPa} = 1\text{MN/m}^2 = 10.2\text{kg/cm}^2 = 145\text{lb/in}^2$$

$$1\text{kN/m}^3 = 102\text{kg/m}^3 = 6.37\text{lb/ft}^3$$



3.1.2 Deer & Miller의 이론(2)

Deer & Miller에 의한 보고서를 검토하면 측정된 슈미트 해머의 수치 R과 압축강도 C_0 와는 다음과 같은 관계 식(1,2)으로 표현하였다.

$$\text{For } R \text{ up to } 50 \quad C_0 = 4(R-25) \text{ (in MPa)} \text{ ----- (식 1)}$$

$$\text{For } R \text{ over } 50 \quad C_0 = 20(R-25) \text{ (in MPa)} \text{ ----- (식 2)}$$

상기 두 식은 암반의 표면과 수평으로 타격이 되어야 하며, L-type 해머를 사용하여 그 타격 에너지가 회당 0.75 Nm이다. 수평으로 타격하지 않은 경우의 보정치는 표 3과 같고, 실험에 의하여 그림 2에 일축압축강도 C_0 와 슈미트 해머의 수치 R과의 관계를 그래프로 나타내었다.

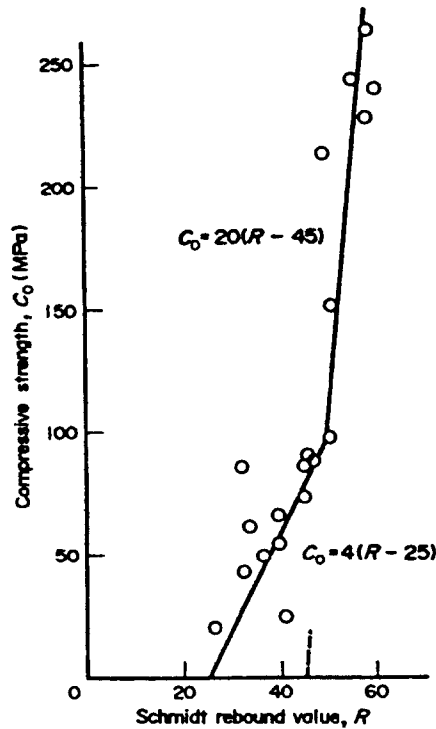


그림 2. 암석의 슈미트해머 반발치와 압축강도와의 관계(Deer & Miller)

표 3. 비수평 타격시 슈미트해머 반발치의 보정치

Rebound Value	Angle upwards		Angle downwards	
	90°	45°	90°	45°
10	-	-	+2.4	+3.2
20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1
40	-3.9	-2.6	+2.0	+2.7
50	-3.1	-2.1	+1.6	+2.2
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7

3.1.3 슈미트 해머 제작사의 제안

슈미트 해머의 제작사에 의해서 제안된 것인데 이 그림은 밀도가 치밀한 Portland Cement에 대하여 수행한 실험결과로서, 슈미트해머 수치와 일축압축강도 사이에는 산술축적에서 서로 뚜렷한 직선관계가 있는 것을 나타낸다. 이 직선관계는 80%의 비교적 높은 상관계수와 작은 편차수치를 지닌다. 그림 3에서 보여지는 뚜렷한 직선의 관계식은 본인들의 연구결과 뿐만 아니라 Deere & Miller, Irfan & Dearman, Carter & Sneddon 등의 많은 연구자들의 결과에서 일반적으로 도출된, 점이적으로 증가하는 곡선의 관계와 차이가 있다.

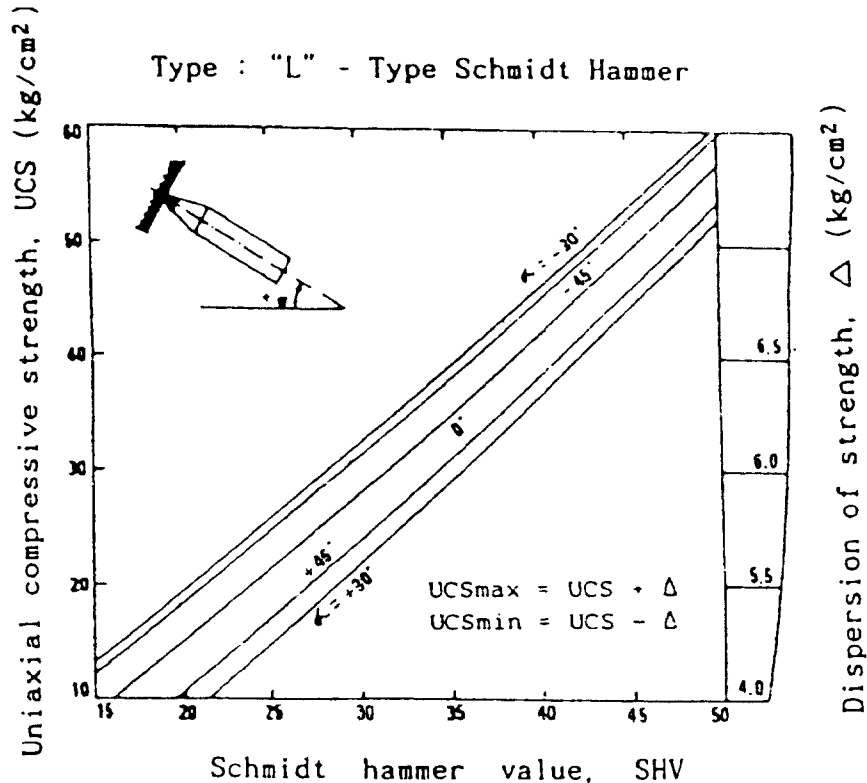


그림 3. 암석의 슈미트해머 반발치와 압축강도와와의 관계(슈미트 해머 제작사의 제안)

3.1.4 한국화강암에 대한 일축압축강도와 슈미트해머 반발치

한국화강암에 대한 일축압축강도와 슈미트해머 수치의 상관관계식들과 그에 따른 상관계수들은 다음과 같다. Lee, S. G.(1987)가 국내의 화강암에서는 슈미트해머 수치와 일축강도의 상관 관계는 다음과 같은 식(1)으로 표현하였다(그림 4 참조).

$$\begin{aligned} \text{건조상태 시료 ; } \log \text{UCSd} &= 2.32481 + 0.01541 \times \text{SHVd} : (r = 0.871) \\ \text{습윤상태 시료 ; } \log \text{UCSs} &= 1.80601 + 0.02324 \times \text{SHVw} : (r = 0.906) \end{aligned} \quad \text{--- (식 1)}$$

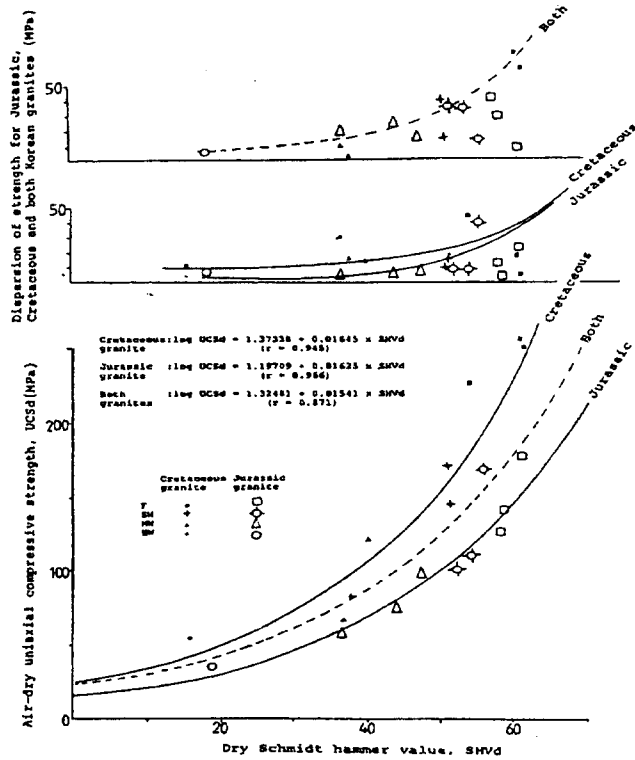


그림 4. 한국화강암의 슈미트해머 반발치와 압축강도와의 관계(Lee, S. G.(1987))

3.1.5 T. Saito의 제안

T. Saito(Iwate University, Morioka, Japan)에 의하여 4가지 시료(Basalt ; 현무암, Andesite ; 안산암, Docite, Quartz Diorite)에 대한 일축압축강도와 슈미트해머 수치의 관계가 다음 그림 5와 같이 나타났다. 두 상관관계가 비교적 포물선의 관계를 갖는데 강도가 매우 큰 시료의 사용으로 인하여 일축압축강도가 3000kg/cm² 이상인에 자료가 많다.

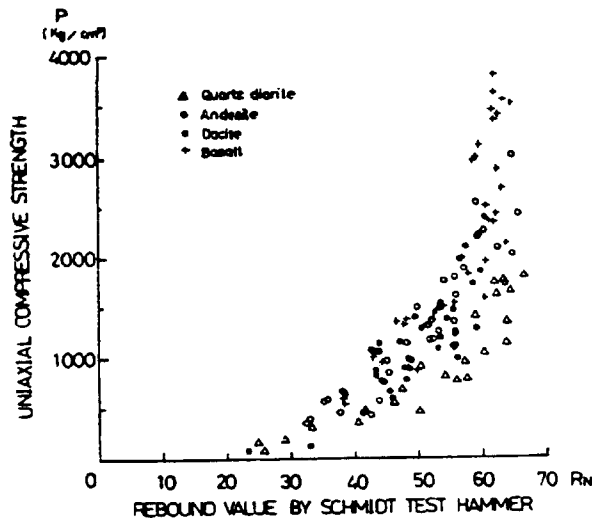


그림 5. 슈미트해머 반발치와 압축강도와의 관계(T.Saito, Japan)

3.1.6 건설표준품셈에서 제시하는 일축압축강도

건설표준품셈에서 제시하는 일축압축강도의 분류기준에 대비되는 한국화강암의 슈미트해머 수치범위가 표 4에 정리되어 있다. SHV는 건조한 암석표면에서 보다는 습윤한 암석표면에서 평균 2~3 수치가 더 낮다.

표 4. 건설표준품셈에서의 일축압축강도 및 슈미트해머수치

암종	분류기준		슈미트해머 수치(SHV)	
	암질	일축압축강도 (kg/cm ²)	건조상태의 암석	습윤상태의 암석
화강암 (1) 불국사 화강암 (중립질의 화강암)	풍화암	300~700	(1) 6~29	24~40
			(2) 17~40	34~49
(2) 대보화강암 (조립질의 화강암)	연암	700~1000	(1) 29~38	40~47
			(2) 40~49	49~55
(3) 한국화강암 (중립질의 화강암과 조립질의 화강암 모두를 포함하는 일반적인 한국화강암)	보통암	1000~1300	(3) 34~44	45~51
			(1) 38~45	47~52
	경암	1300~1600	(2) 49~56	55~59
			(3) 44~51	51~56
	극경암	1600 이상	(1) 45~51	52~56
			(2) 56~62	59~63
			(3) 51~57	56~60
			(1) 51이상	56이상
			(2) 62이상	63이상
			(3) 57이상	60이상

3.2 점하중지수와 일축압축강도

3.2.1 한국화강암에 대한 점하중지수와 일축압축강도

국내의 경암, 연암, 풍화암인 화강암에 대한 많은 점하중 지수와 일축강도수치를 비교 검토하여 Lee, S. G.(1987)가 국내의 화강암에서는 점하중 지수와 일축압축강도의 상관 관계는 그림 6과 같으며 식(2)의 관계식을 갖는다고 보고되었다.

$$UCS(kg/cm^2) = 412.8375 + 15.84971 \times PLS(kg/cm^2) \quad (r=0.902) \quad \text{-----} \quad \text{식 2}$$

3.2.2 ISRM의 제안

일반적으로 점하중 지수(Is)와 일축압축강도(Co)의 상관관계는 암석 종류에 따라 다양한 상관관계 계수(K)를 갖으나 일반적으로 K=20~25인 것으로 알려져 있는데 ISRM(국제 암반학회)에 의하면, 점하중 지수와 일축압축강도의 관계의 실험데이터를 회귀한 결과 그림 7과 같이 $Co = 22 Is$ 의 관계가 있는 것으로 나타났다.

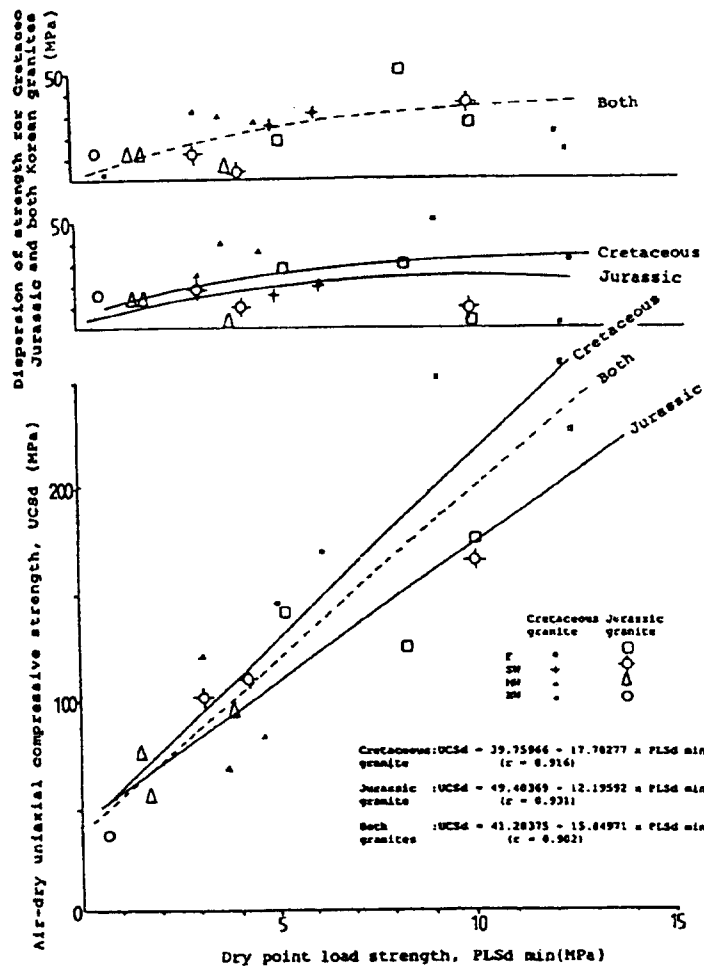


그림 6. 한국화강암의 점하중 지수와 압축강도와의 관계(Lee, S. G.(1987))

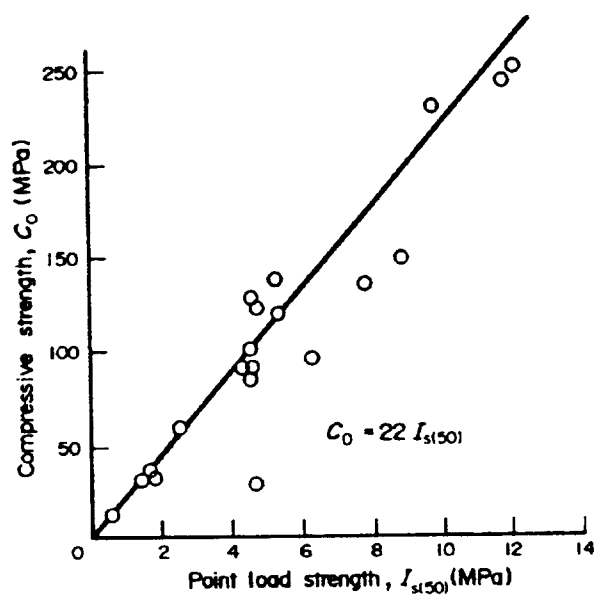


그림 7. 점하중 지수와 압축강도와의 관계 (ISRM의 제안)

4. 암석의 강도 특성

4.1 시료채취 및 제작

본 연구에서 시험될 암석시편은 표 5에 기술된 바와 같은 암종에 대해 실시하였으며 이들 암석을 고속도로 절취사면의 시추조사에 의해 채취되었다.

표 5. 암석시료 채취 위치

암 석 명	채취위치	비 고
화강반암	호남고속도로 32km, 33.1km	비교적 치밀
편상화강암	호남고속도로 37km	미세균열을 다량함유
세일	구마고속도로, 중앙고속도로(대구-안동)	
화산각력암	호남고속도로	
흑운모편마암	서울외곽고속도로, 중앙고속도로	
화강편마암	서울외곽고속도로, 중앙고속도로	

일축압축시험을 위해 채취된 코아시료로 직경이 5.4cm, 길이 10cm로 성형하였으며 이들 시편은 슈미트 해머 시험, 점하중 시험을 실시하였고 점하중 시험 및 슈미트 해머, 흡수율 시험 등의 시험은 일축압축시험에 의해 깨어진 암석 및 현장의 성형되지 않은 시편을 이용하였다.

4.2 풍화정도에 따른 암종별 일축압축강도 특성

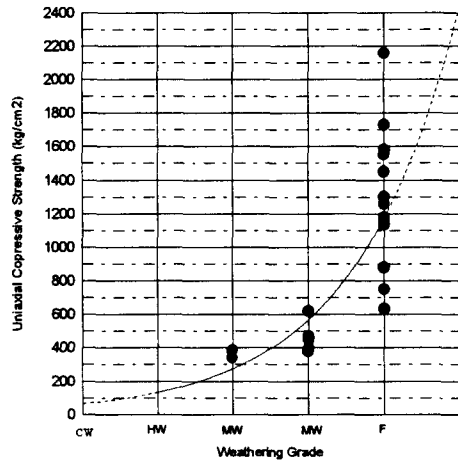
국제 암반학회에서 추천하는 실험방법에 준하여 공시체의 직경을 5cm로 하였으며 높이와 지름의 비를 1 : 2 정도의 실린더형으로 공시체를 제작하여 시험을 실시하였다. 공시체 제작과정에서 암반의 강도가 비교적 큰 경우에는 공시체 제작이 가능하였으나 풍화정도가 심하거나 균열이 매우 발달된 경우에는 공시체 제작이 불가능하였다.

본 연구에서는 암종의 풍화정도에 따라 암석의 일축압축강도를 시험한 결과, 표 6 및 그림 8 과 같은 결과를 얻었다. 암반의 육안에 의한 풍화정도 판정과 일축압축강도의 관계에서 보는 바와 같이 일축압축강도는 암반등급별 일정한 상관성을 보임을 알 수 있는데 암반등급이 F, SW, MW 등급으로 변화함에 따라 일축압축강도는 1800~300 kg/cm²로 변화함을 알 수 있었다. 따라서 일축압축강도는 암반의 등급에 따라 일정한 상관성을 보임을 알 수 있었으나 암반등급 HW, CW등급에서는 공시체의 성형이 곤란하여 시험을 할 수 없었다.

표 6. 풍화정도에 따른 일축압축강도

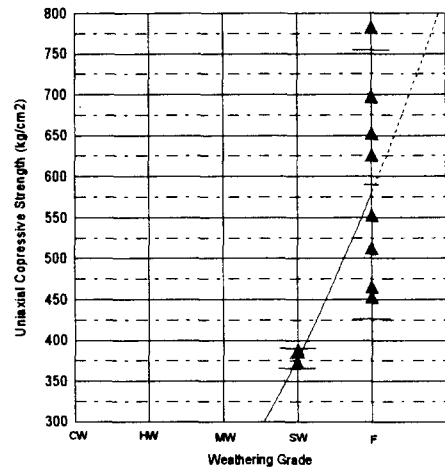
암 종	풍화정도에 따른 일축압축강도(kg/cm ²)			
	HW	MW	SW	F
화강반암	-	300-400	400-600	800-1700
편상화강암	-	-	360-400	450-750
세일	-	350-850	550-1450	1300-1800
화산각력암	-	300-400	350-600	500-1000
흑운모편마암	-	200-600	500-800	700-1600
화강암질 편마암	-	350-400	400-750	700-1600

Weathering Grade and Uniaxial Compressive Strength(Granitic Porphyry)



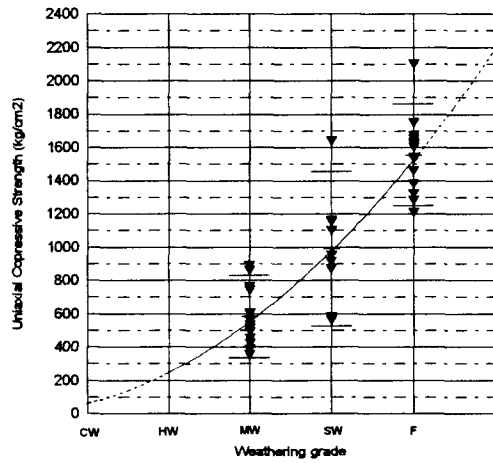
(a) 화강반암

Weathering Grade and Uniaxial Compressive Strength (Schistose Granite)



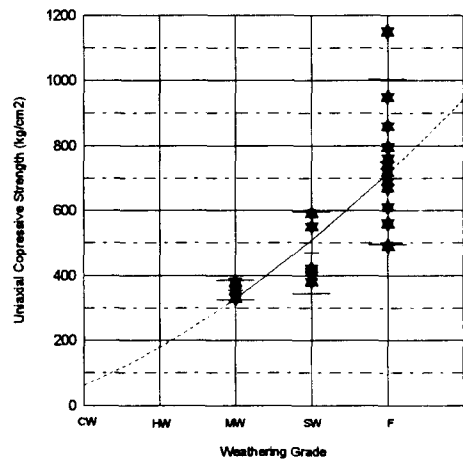
(b) 편상화강암

Weathering Grade and Uniaxial Compressive Strength (Shale)



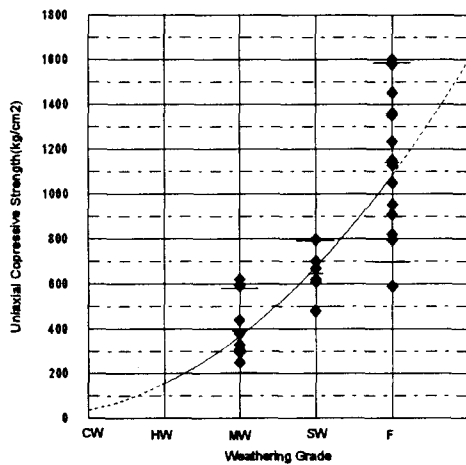
(c) 셰일

Weathering Grade and Uniaxial Compressive Strength(Volcanic Breccia)



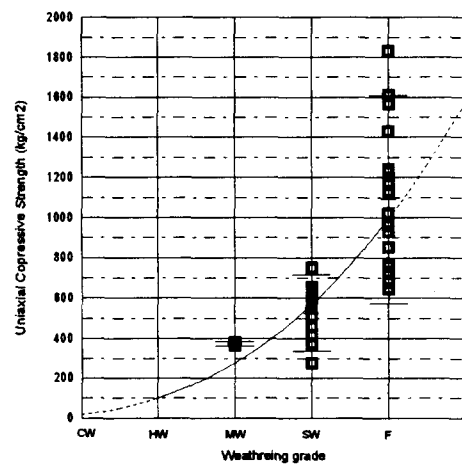
(d) 화산각력암

Weathering Grade and Uniaxial Compressive Strength(Biotite Gneiss)



(e) 흑운모 편마암

Weathering grade and Uniaxial Compressive Strength(Granitic Gneiss)



(f) 화강암질 편마암

그림 8. 풍화정도에 따른 암종별 일축압축강도 특성

4.3 풍화정도에 따른 암종별 점하중강도 특성

이 시험은 점하중 시험기를 이용하여 암석 코아의 파괴시 하중을 측정하고 해당 코아시료의 직경에 따른 점하중지수(Point Load Index ; $I_s(50)$)를 산출하여 일축압축강도와의 상관관계로부터 암석의 일축압축강도를 구하는데 목적이 있다.

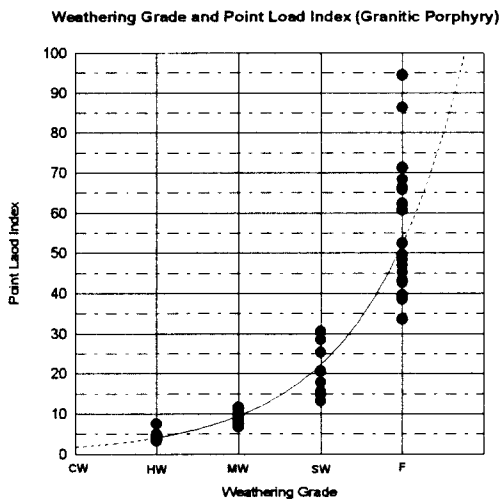
시료의 상하 양쪽에서 점으로 압축을 가하여 시료내에 인장강도를 발생하게 하여 암석을 파괴시키는 것으로, 이때 파괴시의 값이 점하중(Point Load)이다.

풍화정도에 따른 암종별 점하중강도 특성은 표 7 및 그림 9에 나타내었다.

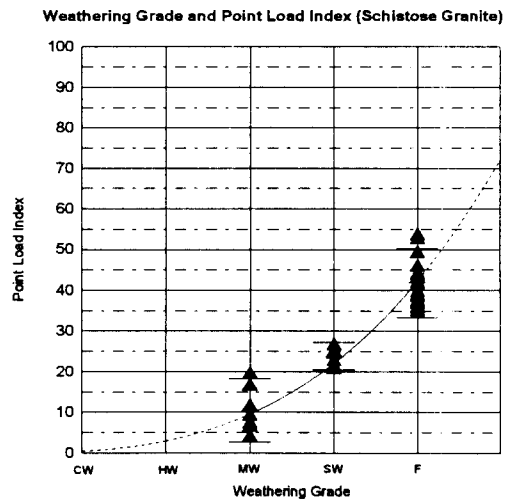
그림에서 보는 바와 같이 점하중 지수는 암반등급이 F, SW, MW, HW등급으로 변화함에 따라 5-100 사이의 값으로 다양하게 변화하는 것으로 나타났다. 그러나 풍화등급의 육안적인 판정은 많은 오차성을 가지고 있으므로 점하중 지수가 다소 큰 범위로 분포하고 있음을 알 수 있다.

표 7. 풍화정도에 따른 점하중강도

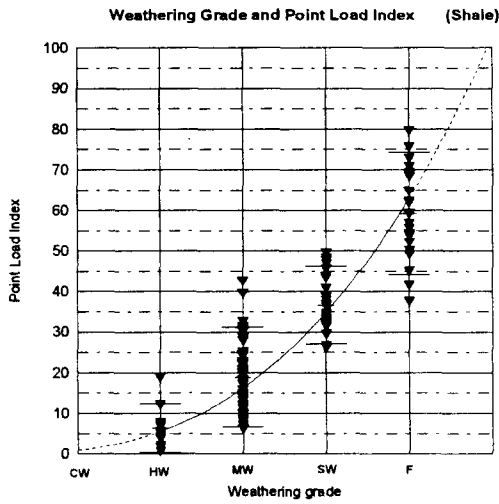
암 종	풍화정도에 따른 점하중지수(kg/cm^2)			
	HW	MW	SW	F
화강반암	4-8	5-12	12-30	30-90
편상화강암	-	3-16	20-27	34-50
세일	0-13	6-30	25-45	45-75
화산각력암	-	5-20	20-30	30-55
흑운모편마암	5-10	10-30	26-45	40-80
화강암질 편마암	0-1	1-20	20-40	45-105



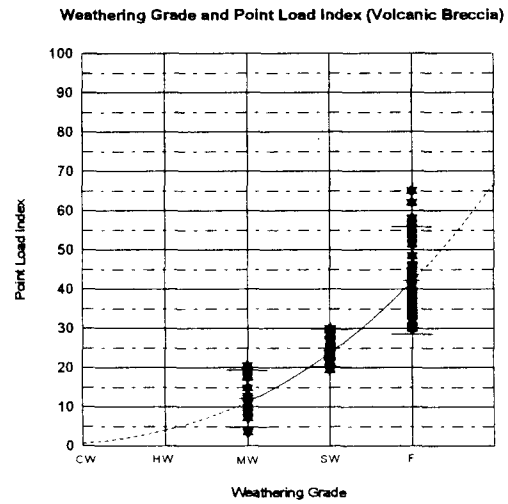
(a) 화강반암



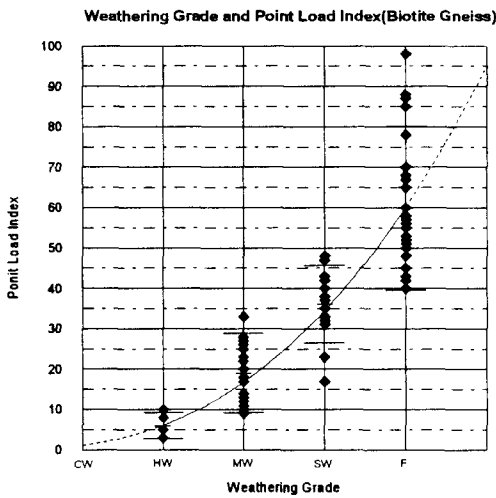
(b) 편상화강암



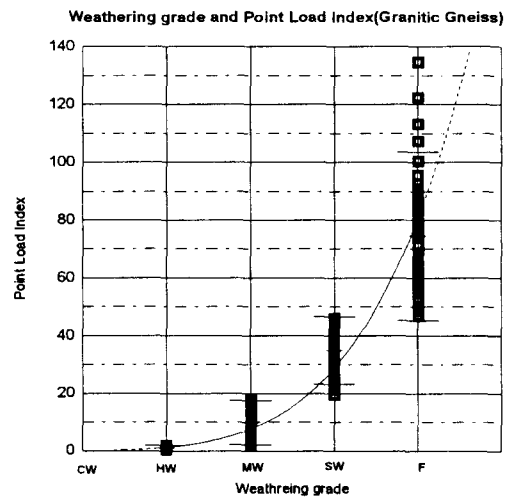
(c) 셰일



(d) 화산각력암



(e) 흑운모 편마암



(f) 화강암질 편마암

그림 9. 풍화정도에 따른 암종별 점하중 강도 특성

4.4 풍화정도에 따른 암종별 슈미트해머 수치변화 특성

현장에서 슈미트해머로 암반의 강도를 간단하게 시험 할 수 있는 현장시험으로 암반의 일축 압축강도 및 풍화상태를 개략적으로 파악하기 위한 시험이다.

본 연구에서는 암석의 풍화정도에 따라 슈미트해머 반발 수치를 측정하였으며, 한 측정점에서 5회 실시하여 최대 및 최소치를 제외하고 나머지 측정치의 평균값을 반발수치로 추정하였다.

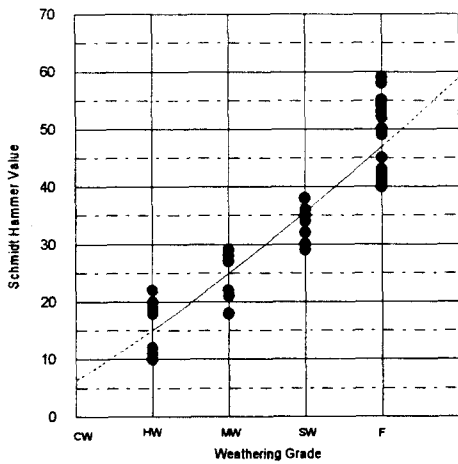
위의 6가지 종류의 암석에 대한 슈미트 해머 수치를 측정한 결과, 표 8 및 그림 10과 같은 결과를 얻었다.

그림에서 보는 바와 같이 슈미트해머 반발치는 암반등급 F-SW 까지는 30이상의 값으로 주로 분포함을 알 수 있었으며 MW 등급에서는 암반등급이 불량할 수록 비교적 작은 범위의 값을 보인다. 따라서 풍화가 심한 암반에서는 슈미트해머 반발수치와 육안에 의한 풍화등급과는 많은 오차성을 포함하고 있음을 알 수 있다.

표 8. 풍화정도에 따른 슈미트해머 수치

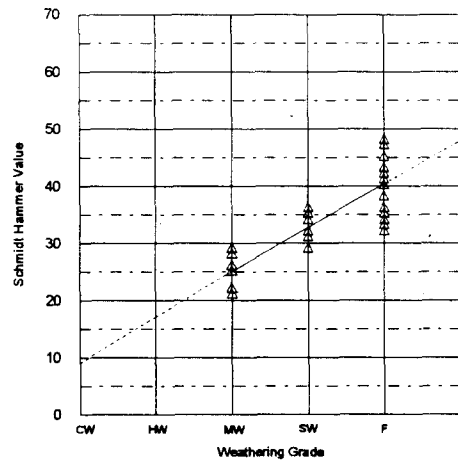
암 종	풍화정도에 따른 슈미트 해머 수치			
	HW	MW	SW	F
화강반암	10-25	15-30	30-40	40-60
편상화강암	-	20-30	30-38	33-50
셰일	10-20	18-30	27-40	43-55
화산각력암	-	14-33	28-40	32-50
흑운모편마암	10-15	15-30	30-45	40-60
화강암질 편마암	10-20	20-35	30-45	45-60

Weathering Grade and Schmidt Hammer Value(Granitic Porphyry)



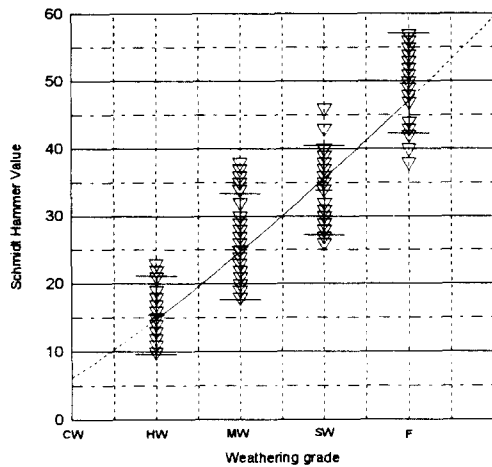
(a) 화강반암

Weathering Grade and Schmidt Hammer Value(Schistose Granite)



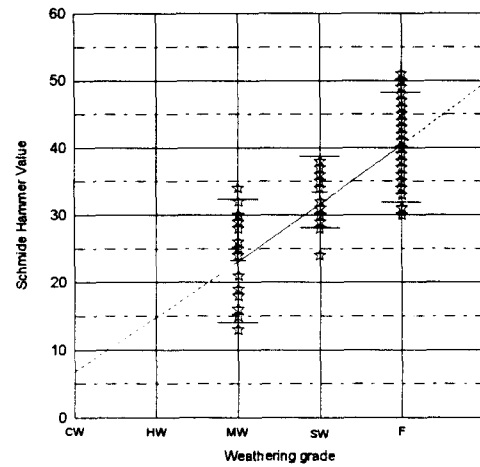
(b) 편상화강암

Weathering Grade and Schmidt Hammer Value (Shale)

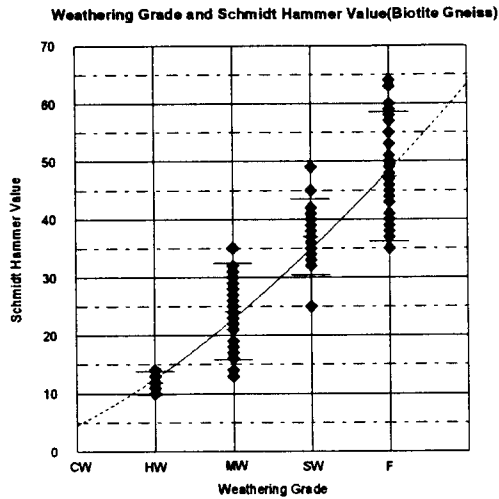


(c) 셰일

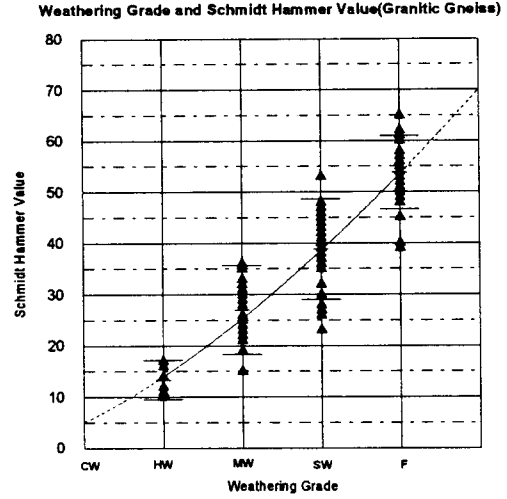
Weathering Grade and Schmidt Hammer Value (Volcanic Breccia)



(d) 화산각력암



(e) 흑운모 편마암



(f) 화강암질 편마암

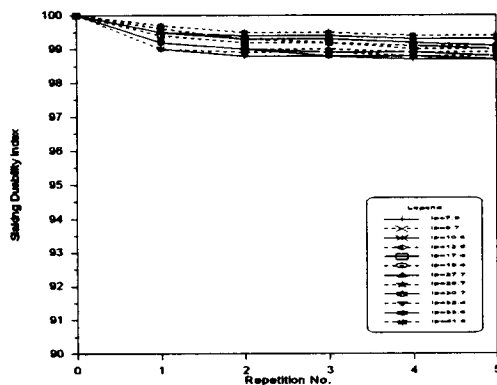
그림 10. 풍화정도에 따른 암종별 슈미트해머 반발수치 특성

4.5 풍화정도에 따른 암종별 내구성(Slaking Duability) 특성

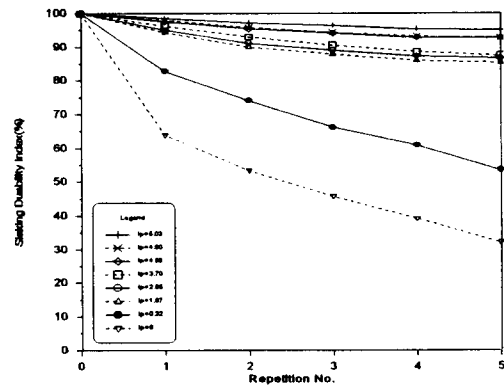
고결력을 지닌 암석이라도 지하수위 변동, 굴착 등에 의한 응력해방과 흡수팽창, 풍화 등에 의하여 고결력이 저하하는 경우가 있다. 특히 연한 암석에서는 이들 환경변화에 의거한 건조, 습윤반복에 의하여 급격히 고결력을 잃어 조직이 파괴되는 현상이 현저하므로 풍화의 진행으로 인하여 공학적인 고유한 성질을 잃어 버리는 경우도 있다.

시험방법은 암석시료에 건습의 반복을 2회 주었을 때의 취약화 또는 연질화에 대한 저항성을 조사하는 것이며, 최근 일본에서도 많이 채택되고 있는 방법으로 중량을 정확히 측정한 40~60g의 대표적인 암괴 10개를 시험장치의 드럼(2mm 표준철망으로 된 길이 100mm 직경 140mm의 원통관)에 넣고 105 °C의 온도로 2-6시간 노건조한다. 다음으로 이 드럼을 수조에 장착하고 회전축 아래 20mm까지 물을 넣은 후 드럼을 200rpm으로 10분간 회전시킨다. 그리고 드럼을 수조로부터 꺼내고 105 °C의 온도로 노건조시키고 냉각후 중량을 측정한다. 이 조작을 적어도 2회 이상 실시한다.

본 연구에서는 편마암 및 세일에 대한 풍화도를 나타내는 지수인 점하중 지수에 따른 내구성을 파악하기 위하여 시험을 실시하여 다음 그림 11과 같은 점하중 지수가 높을 수록 반복횟수에 따라 마모에 강한 특성이 보이는 것으로 나타났다.



(a) 편마암



(b) 세일

그림 11. 풍화정도에 따른 암종별 내구성(Slaking Duability) 특성

4.6 풍화정도에 따른 흡수율 특성

흡수율이란 암석시료의 간극에 물이 어느 정도 침투하는가를 나타내는 것이며, 암석의 기본적인 물성의 하나이다. 암석시료가 흡수할 수 있는 최대의 물량이 그 시료의 실질부분의 질량에 대하여 어느 정도인가를 나타내는 비율을 말한다.

흡수율을 구하는 시험은 강제 건조상태 및 강제 습윤상태에서의 측정중량을 각각 W_2 , W_3 로 하면 $(W_3 - W_2) / W_2 \times 100(\%)$ 로 부터 구해진다. 경암의 흡수율은 10% 이하이며, 신선하고 치밀한 암석에서는 1%에도 달하지 않는 경우가 많으며 풍화에 따라 흡수율은 증가한다.

흡수율은 암석의 강도가 비교적 약한 암석에서 그 경향이 잘 나타내고 경암에서의 흡수율은 거의 측정되지 않는 경향이 있으므로 점하중 지수에 따른 흡수율의 변화를 살펴 보았다.

본 실험은 편마암에 대해 실시하여 그림 12와 같은 결과를 얻었으며 흡수율(A_p)과 점하중 지수(I_s)와의 다음 상관 식(3)을 추정하였다.

$$A_p = -2.32366 \times \log(I_s) + 8.77223 \text{ ----- (식 3)}$$

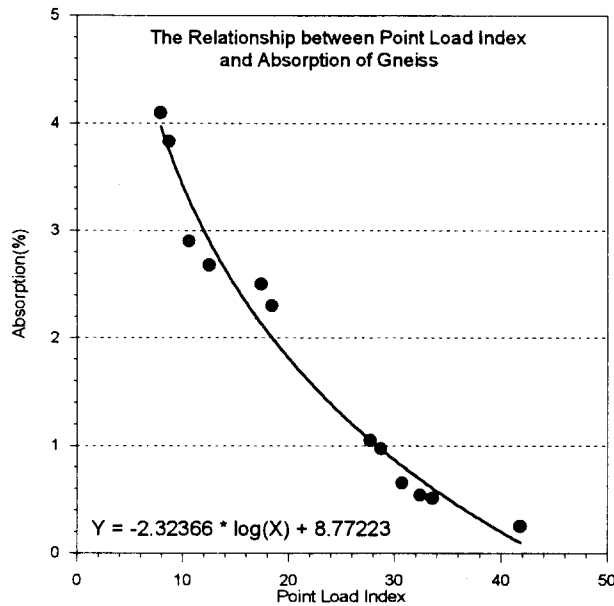


그림 12. 풍화정도에 따른 흡수율 특성

4.7 풍화정도에 따른 이방성 특성

일반적으로 암반은 암반내에 불연속면이 존재하여 강한 이방특성을 보이나 암석(Intact Rock)은 미세균열과 광물의 결집상태, 광물종, 배열상태에 따라 이방성의 특성을 보인다. 광물종 운모류를 많이 포함하는 암석은 강한 이방특성을 보일 수 있다.

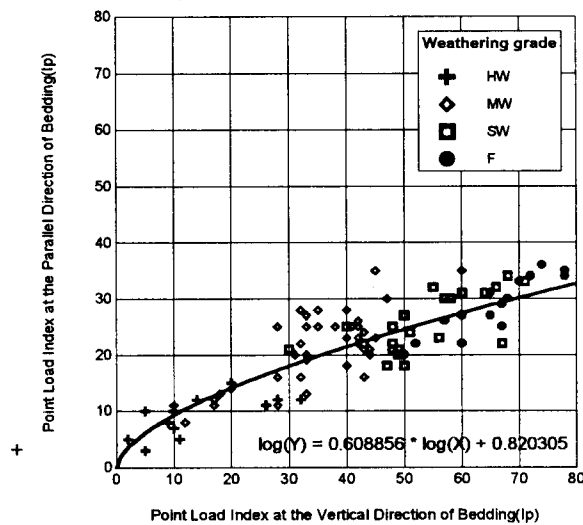
암중에 따라서는 화성암의 경우 마그마의 고결냉각에 의해 형성되어 균질한 등방성 성질을 보이나 변성암과 퇴적암, 특히 편마암과 셰일은 이방성의 특성을 크게 보인다. 편마암은 엽리의 발달로 인해 엽리면에 수직방향의 강도와 엽리면과 평행한 방향의 강도가 큰 차이를 보인다. 그리고 셰일의 경우는 퇴적되면서 형성된 층리면에 따라 강도에 커다란 차이를 보인다. 즉, 층리면에 수직으로 하중이 작용하는 경우와 층리면에 평행하게 하중이 작용하는 경우 커다란 강도의 차이를 보인다.

본 연구는 암석의 이방성 특성이 강한 편마암과 셰일에 대해 엽리 및 층리방향에 수직인 방향과 평행한 방향으로 하중을 가하여 두 점하중 강도값을 비교하여 보았다. 그리고 육안적인 풍화등급판정으로 구분하여 두 암종에 대한 이방성 특성을 실험한 결과 그림 13과 같은 결과를 얻을 수 있었으며 두 암종의 이방성에 점하중 지수의 관계 식(4)을 아래와 같이 추정하였다.

본 결과에 의하면 편마암보다 셰일이 2배 정도 강한 이방성의 성질을 가지고 있으며 암석이 강도가 클수록 즉, 풍화를 받지 않을 수록 곡선의 기울기가 급해짐을 볼 수 있다. 이는 풍화를 받지 않을 수록 광물사이의 결집력이 강해짐을 보여 준다.

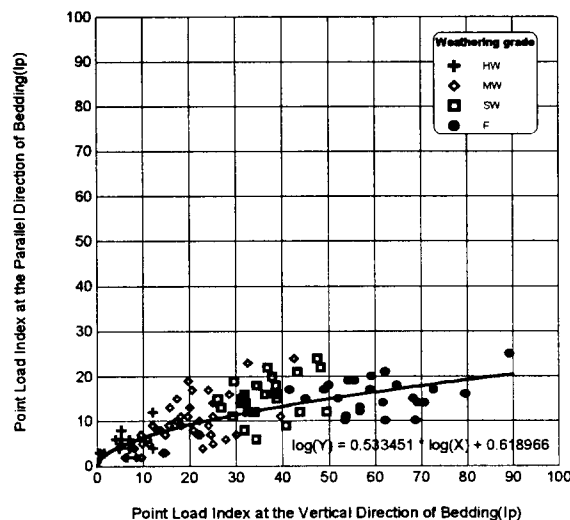
$$\begin{aligned} \text{편마암 ; } \log(I_{sp}) &= 0.608856 \times \log(I_{sv}) + 0.820305 \\ \text{셰 일 ; } \log(I_{sp}) &= 0.533451 \times \log(I_{sv}) + 0.618966 \end{aligned} \quad \text{----- (식 4)}$$

Anisotropic Strength of Gneiss



(a) 편마암

Anisotropic Strength of Shale



(b) 셰일

그림 13. 풍화정도에 따른 암석의 이방성 특성

5. 암석의 강도특성 상관관계

본 연구시편 및 현장 암편을 가지고 대상으로 암반등급을 F, SW, MW, HW, CW등급으로 구분하여 각각의 강도시험을 실시하였다. 강도시험은 일축압축 강도시험, 점하중 강도시험, 슈미트해머시험 등을 실시하였으며 각각의 상관관계는 다음과 같다.

본 연구는 위의 시험을 종합 분석한 결과, 위의 6가지 암종에 대해 일축압축강도와 점하중 지수, 슈미트해머 반발 수치에 대한 각각의 상호 관계를 아래와 같이 추정하였다.

5.1 일축압축강도와 점하중지수와의 관계

위의 시험 결과를 종합하여 분석하여 일축압축강도(σ_c)와 점하중 지수(I_s)와의 상관관계를 회귀분석한 결과, 그림 14와 같이 나타났으며 암종에 따른 상관 관계식은 표 11과 같이 선형의 관계($Y = KX + C$) 함수 식의 관계를 갖는 것으로 분석되었다.

표 9. 암종별 일축압축강도와 점하중 지수와의 관계식

암 종	관 계 식
화강반암	$\sigma_c = 22.5356 \times I_s + 27.3226$
편상화강암	$\sigma_c = 13.8313 \times I_s + 6.31673$
셰일	$\sigma_c = 22.1583 \times I_s + 109.076$
화산각력암	$\sigma_c = 15.3012 \times I_s + 63.5519$
흑운모편마암	$\sigma_c = 17.068 \times I_s + 22.5852$
화강암질 편마암	$\sigma_c = 12.5409 \times I_s + 82.7533$
전 암 종	$\sigma_c = 15.0388 \times I_s + 179.601$

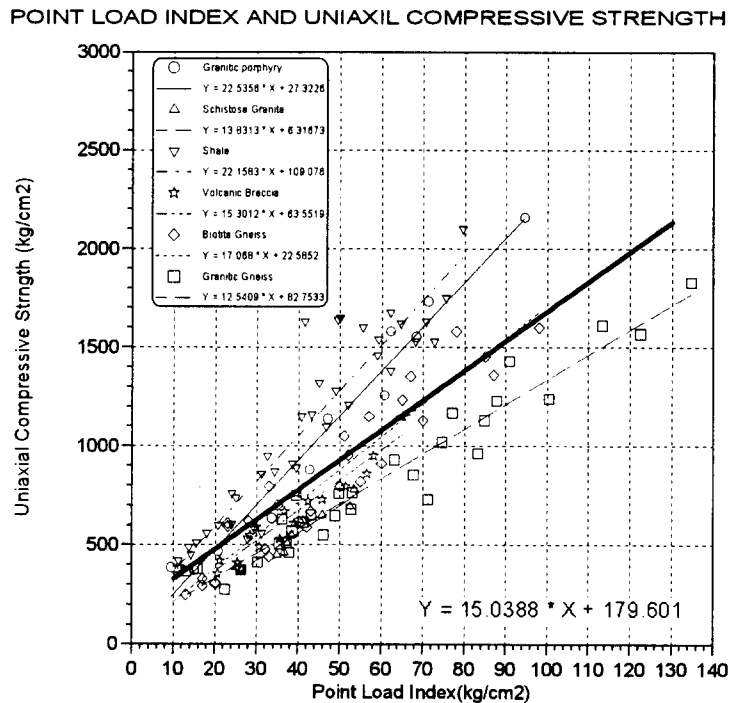


그림 14. 점하중지수와 일축압축강도의 상관관계

5.2 일축압축강도와 슈미트해머 반발수치와의 관계

일축압축강도(σ_c)와 슈미트해머 반발치의 관계는 그림 15에서 보는 바와 같이 나타났으며 위의 시험 결과를 일축압축강도(σ_c)와 슈미트해머 반발수치(SHV)와의 상관관계를 회귀분석한 결과, 암종에 따른 상관 관계식은 표 10과 같이 지수함수의 관계식으로 표현할 수 있었다.

표 10. 암종별 일축압축강도와 슈미트해머 반발수치와의 관계식

암 종	관 계 식
화강반암	$\sigma_c = \exp(0.0512983 \times SHV) \times 92.0807$
편상화강암	$\sigma_c = \exp(0.0443816 \times SHV) \times 96.0056$
셰일	$\sigma_c = \exp(0.0421386 \times SHV) \times 195.703$
화산각력암	$\sigma_c = \exp(0.0437522 \times SHV) \times 111.209$
흑운모편마암	$\sigma_c = \exp(0.0434223 \times SHV) \times 128.885$
화강암질 편마암	$\sigma_c = \exp(0.0405753 \times SHV) \times 111.024$
전 암 종	$\sigma_c = \exp(0.0380002 \times SHV) \times 163.06$

SCHMIDT HAMMER VALUE AND UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH

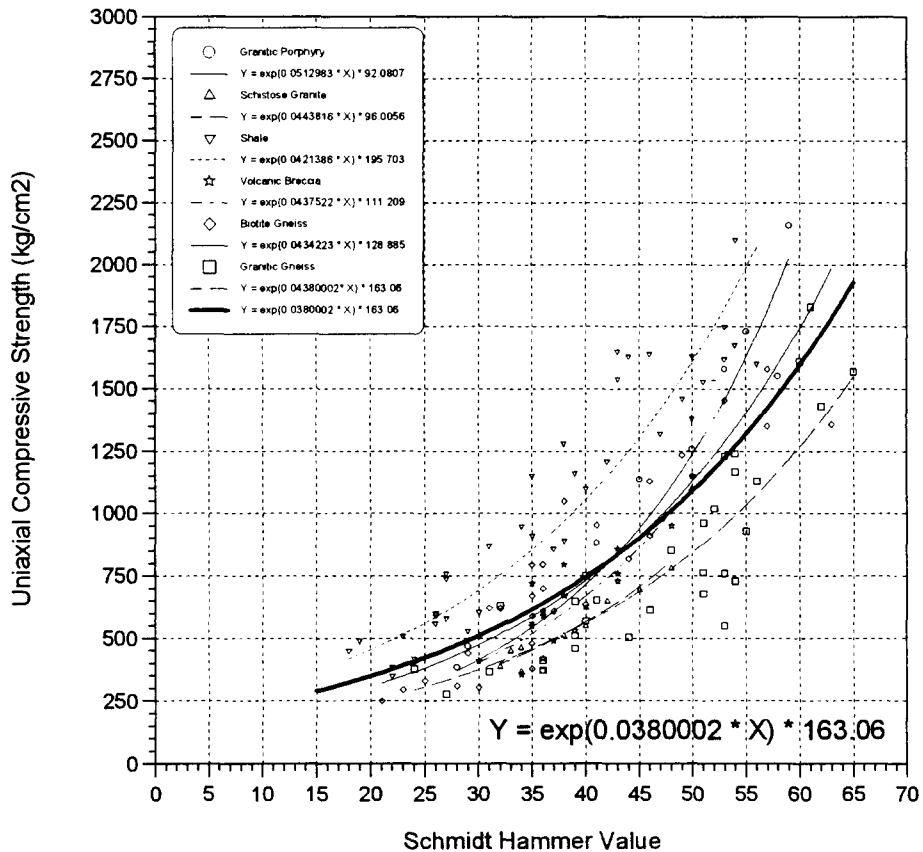


그림 15. 일축압축강도와 슈미트해머 반발수치와의 상관관계

5.3 점하중 지수와 슈미트해머 반발수치와의 관계

위의 시험 결과를 종합하여 분석하여 점하중 지수(Is)와 슈미트 해머 반발수치(SHV)와의 상관관계를 회귀분석한 결과, 그림 16과 같이 나타났으며 암종에 따른 상관 관계식은 표 11과 같이 log-log 함수식의 관계를 갖는 것으로 분석되었다.

표 11. 암종별 점하중지수와 슈미트해머 반반수치와의 관계식

암 종	관 계 식
화강반암	$\log(I_s) = 2.11567 \times \log(SHV) - 4.34192$
편상화강암	$\log(I_s) = 2.65311 \times \log(SHV) - 6.13226$
셰일	$\log(I_s) = 2.02082 \times \log(SHV) - 3.68276$
화산각력암	$\log(I_s) = 1.83187 \times \log(SHV) - 3.13664$
흑운모편마암	$\log(I_s) = 1.62041 \times \log(SHV) - 2.2059$
화강암질 편마암	$\log(I_s) = 2.88675 \times \log(SHV) - 7.18486$
전 암 종	$\log(I_s) = 2.02985 \times \log(SHV) - 3.83587$

SCHMIDT HAMMER VALUE AND POINT LOAD INDEX

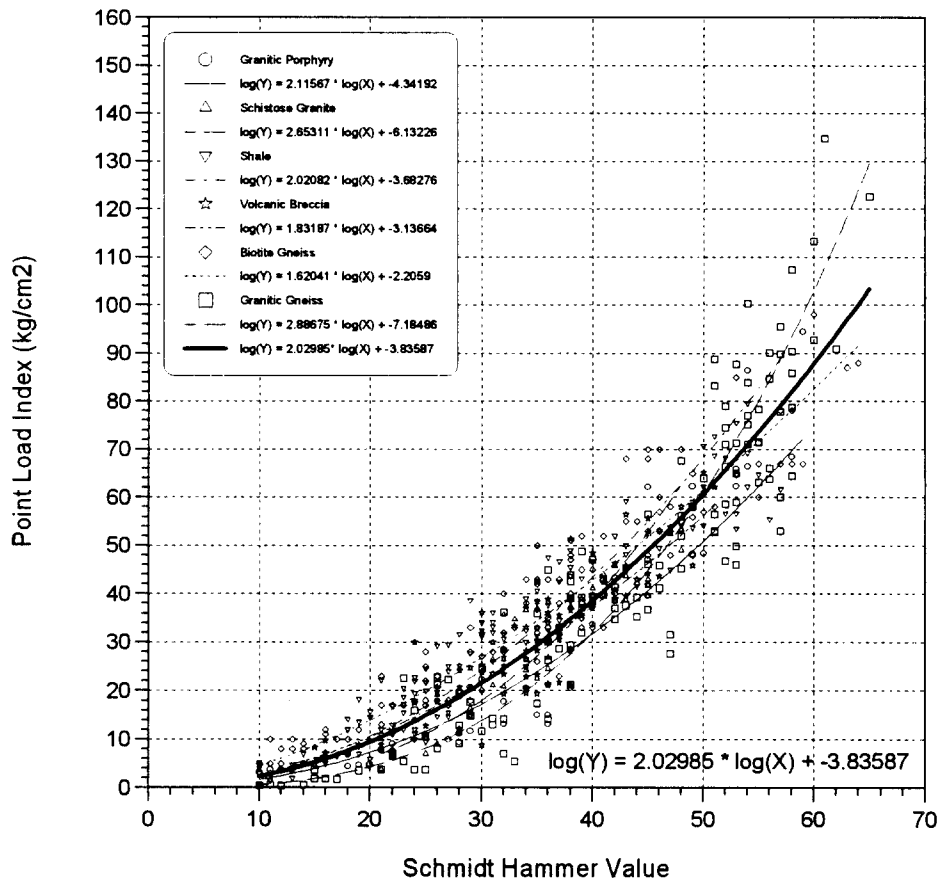


그림 16. 점하중 지수와 슈미트해머 반발수치와의 상관관계

6. 기존 시험자료와의 비교

암석의 강도는 일반적으로 일축압축강도를 말해 왔으나 일축압축강도는 시편을 제작해야 하는 어려움을 가지고 있어 많은 학자들이 좀 더 쉽고 간단하게 시험할 수 있는 방법들을 제안하였는데 그 중에 하나가 점하중 시험과 슈미트해머 반발수치이다. 이들 시험은 간편하기는 하나 많은 오차성과 결과치의 넓은 분산성을 갖는 문제점을 가지고 있다.

그러나 이들 강도특성 즉, 일축압축강도와 점하중 지수와의 관계, 일축압축강도와 슈미트해머 반발수치와의 관계, 점하중 지수와 슈미트 해머 반발수치와의 관계를 규명하므로 간단히 점하중 시험, 슈미트 해머시험을 통하여 일축압축강도를 추정할 수 있는 관계식을 찾아 보는 것은 매우 중요한 일이다.

본 연구는 위에서 분석된 상관관계에 대한 결과와 기존 시험자료와의 표 12와 같이 비교하고자 한다.

기존 시험자료에서는 점하중과 슈미트 해머와의 상관관계에 자료를 얻을 수 없었으나 그 상관관계에 대해 언급하여 보았다. 그러므로 이 관계식을 이용하여 현장에서의 간단한 시험방법에 의해 일축압축강도 및 점하중 지수를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

표 12. 기존 시험 자료와 연구결과와의 비교

제안자	일축압축강도와 점하중지수	슈미트해머 반발수치와 일축압축강도	점하중 지수와 슈미트해머 반발수치
본 논문	$\sigma_c = 15.0388 \times I_s + 179.601$	$\sigma_c = \exp(0.0380002 \times SHV) \times 163.06$	$\log(I_s) = 2.02985 \times \log(SHV) - 3.83587$
Deer & Miller	-	SHV(50까지) ; Co= 4(R-25)(MPa) SHV(50이상) ; Co=20(R-25)(MPa)	-
S. G. Lee	$UCS(kg/cm^2) = 412.8375 + 15.84971 \times PLS(kg/cm^2)$ (r=0.902)	건조상태 시료 ; $\log UCS_d = 2.32481 + 0.01541 \times SHV_d$ (r = 0.871) 습윤상태 시료 ; $\log UCS_s = 1.80601 + 0.02324 \times SHV_w$ (r = 0.906)	-
T.Saito의 제안	-	포물선관계	-
ISRM의 제안	$Co = 22 I_{s(50)}$	-	-

7. 결론

암석의 강도특성을 표현하는 방법으로는 여러 가지 있을 수 있으나 본 논문에서는 일축압축강도, 점하중 지수, 슈미트해머 반발수치, 내구성(Slaking Duability) 지수, 흡수율, 암석의 이방성 특성에 대해 시험한 결과는 다음과 같다.

- 1) 암석의 풍화정도에 대한 육안적인 판단은 주관적이며 큰 오차성을 가지고 있으므로 주의하여야 한다.
- 2) 암석의 풍화정도에 따라 일축압축강도, 점하중 지수, 슈미트해머 반발수치가 많은 차이를 보이는데 각 등급의 범위는 앞에서 제시된 표 6~8과 같다. 육안적인 풍화정도 판정과 시험치가 일부 강도범위외에 존재하는 것을 볼 수 있었다.
- 3) 암석의 흡수율은 풍화의 정도를 가장 잘 표현해 주는 물리적인 성질로 본 연구에서 편마암에 대해 흡수율과 점하중 지수와의 관계를 알아 본 결과 흡수율(A_p) = $-2.32366 \times \log(I_s) + 8.77223$ 의 관계식을 갖는 것으로 나타났다.
- 4) 암석의 이방성 특성은 편마암보다 세일이 2배 정도 강한 이방성의 성질을 가지고 있으며 암석이 강도가 클 수록 즉, 풍화를 받지 않을 수록 곡선의 기울기가 급해짐을 볼 수 있었는데 이는 풍화를 받지 않을 수록 광물사이의 결집력이 강해짐을 보여 준다.
- 5) 암석의 내구성 시험결과는 점하중 지수가 클 수록 내구성이 강한 특성을 보이며 세일이 편마암에 비해 내구성이 약한 특성을 보였다. 특히 암석강도가 약한 경우에는 급속히 마모가 되어 둥근 압편상을 보였다.
- 6) 여러 가지 강도에 대한 상관관계를 규명한 결과 암종에 따라 다른 관계식을 보이거나 모든 암종을 종합하여 관계식으로 나타내 보면, 일축압축강도와 점하중 지수와의 관계는 $\sigma_c = 15.0388 \times I_s + 179.601$, 슈미트해머 반발수치와 일축압축강도와의 관계는 $\sigma_c = \exp(0.0380002 \times SHV) \times 163.06$, 그리고 점하중 지수와 슈미트해머 반발수치와의 관계는 $\log(I_s) = 2.02985 \times \log(SHV) - 3.83587$ 의 관계식을 표현 할 수 있다.

참고문헌

- 유 재일, 유 병욱, 1991-1993, 사면안정처리에 관한 연구(I, II,III) 한국도로공사.
- Brady, B.H.G. & Brown, E.T., 1985. Rock Mechanics for Underground Mining. George Allen & Unwin, London, U.K., pp.484-490.
- De Freitas, M.H., 1980. Landslides. Ph D thesis, Imperial College, University of London.
- Franklin, J.A. & Chandra, A., 1972. The slake-durability test. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 9, 325-341.
- Goodman, R.E., 1980. Introduction to Rock Mechanics, Wiley, New York, 478 pp. (417-434).
- Hoek, E. & Bray, J.W., 1977(1981). Rock Slope Engineering. Revised Second (Third)

Edition. Institute of Mining and Metallurgy, London, 358 pp.

Hoek, E. & Brown, E.T., 1980. Undergroun excavations in rock. Institution of Mining and Metallurgy, London, England, 61-86.

International Society for Rock Mechanics, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 15, 319-368.

International Society for Rock Mechanics, 1981. Basic geotechnical description of rock masses. ISRM Commission on Classification of Rock Masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts., 18, 85-110.

International Society for Rock Mechanics, 1985. Suggested methods for determing point load strength: Revised version. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 22, 51-60.

Lee,S.G. & de Freitas, M.H., 1988. Quantitative definition of highly weathered granite using the slake durability test. Geotechnique, V.38(4), 635-640 pp.

日本道路公團, 平成 4年, 土質地質調査要領, 3-76.