

암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구

A Study on Variation of Rock Strength due to Weathering and It's Estimation

정 형 식*1

Chung, Hyung-Sik

유 병 옥*2

You, Byung-Ok

Abstract

It is important to evaluate rock strength in order to check stability of a rock slope or to design a structure built on rock. However, test methods used for the evaluation have some difficulties since rock samples provide various deviation of strength due to micro cracks in the samples and test errors. Also, reliable data have not been accumulated for the rock strength in Korea. Therefore, simple test methods that can be used easily for investigation of rock strength in field or in laboratory are not provided sufficiently yet.

This study is to investigate variation of the rock strength due to the degree of weathering and to evaluate the degree of weathering by types of rocks, by using data that have been obtained for several years. Therefore, it is possible to provide a relationship between several rock strength values by performing tests such as uniaxial compression test, point load test, schmidt hammer test, absorption ratio test and slaking durability test. The equations of relationships that can be used to estimate rock strength by using simple test methods in field and in laboratory are proposed.

요 지

암석의 강도에 대한 평가는 지반공학분야에서 매우 중요한 일이나 시료를 성형해야 하기 때문에 시험이 번거롭고 미세균열이 많아 시험에 오차를 가지고 있으며 국내에는 시험자료축적이 부족한 상태이다. 그래서 현장 또는 실내에서 간단하게 시험방법으로 암석강도를 추정할 수 있는 방법이 미비한 실정이다.

본 연구에서는 수년간에 걸쳐 축적된 시험자료를 이용하여 암종에 따른 풍화정도 평가 및 풍화정도에 따른 강도특성의 변화에 대해 분석하였다. 그러므로 암석성형시편과 성형되지 않은 시료를 이용한 일축압축강도, 점하중시험, 현장 및 시편에서의 슈미트해머시험, 흡수율 시험, 내구성 등의 시험을 실시하여 여러 암석강도의 상호관계를 규명하였으며 현장 또는 실내에서 간단한 시험방법으로 암석의 강도를 추정하기 위한 상관 관계식을 제안하였다.

*1 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

Keywords : Uniaxial strength, Point load index, schmidt hammer value, Slaking durability test, Absorption ratio, Weathering grade

1. 서 론

암석의 풍화정도, 즉 암석강도에 대한 평가는 지반공학분야에서 매우 중요한 일이나 시료를 성형해야 하므로 시험이 번거롭고 시험에 많은 오차를 가지고 있다. 일본에서는 암종별로 풍화정도에 따른 암석의 정탄성계수 및 변형계수, 암석의 점착력, 마찰각, 전단강도 등에 대한 세부적인 시험자료가 축적되어 여러 가지 토목구조물의 설계에 있어 시험을 실시 못하는 여건이나 시험데이터가 없더라도 정량적인 평가에 의한 암석의 풍화등급을 분류하여 설계에 필요한 자료를 얻고 있다. 그러나 국내에는 이들에 대한 시험자료의 축적을 통한 암종에 따른 풍화정도 평가 및 풍화정도에 따른 강도특성의 변화에 대한 연구가 매우 부족한 실정으로 현장 또는 실내에서 간단하게 실시될 수 있는 시험방법으로 암석의 강도를 추정할 수 있는 방법이 미비한 실정이다.

그러므로 정성적인 풍화정도 규정 및 성형되지 않은 시료를 이용한 점하중시험, 현장에서 슈미트해머시험, 흡수율시험 등과 암석강도와의 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 광물의 대부분은 형성시기와는 전혀 다른 환경 하에 존재하므로 물리적으로 또는 화학적으로 변질되게 되는데 이러한 현상을 풍화작용이라 한다.

풍화작용은 물리적 풍화와 화학적 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(GCO, 1988). 특히, 화성암과 변성암은 고온하에서 형성되었으므로 퇴적암에 비해 생성시 보다 더 상이한 환경 하에서 존재한다고 할 수 있다. 따라서 풍화작용은 암석과 광물이 지표에서의 다양한 습도, 온도 및 생물학적 활동조건에 대해 보다 안정된 상태로 변질되는 과정이라 할 수 있다.

암반의 풍화에 대한 판단은 일반적으로 표 1과 같이 풍화단계를 6단계로 구분한다.

일반적으로 RS와 CW는 토층에 해당하고 HW는 암과 토층의 경계물질로 풍화암에 해당하고, MW는 연암, SW는 경암, F는 극경암에 해당한다.

지반의 풍화는 하부에서 상부로 올라갈 수록 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 1. 암반의 풍화단계기준(Brown, 1981)

단계	구분	분류 기준
I	RS (Residual Soil)	모든 암반이 완전히 흙으로 변화되어 있다. 암석조직은 파괴되었고 체적상의 커다란 변화가 있지만 운반되지는 않은 상태이다.
II	CW (Completely Weathered)	모든 암반이 변질(decomposed)되었거나 흙으로 풍화되어 있다. 원래의 암석구조는 그대로 남아 있다.
III	HW (Highly Weathered)	암반이 절반이상 변질(decomposed)되거나 흙으로 풍화(disintegrated)되어 있다. 지반내 신선하거나 변색된 암반은 불연속적 골격 혹은 핵석상태로 존재한다.
IV	MW (Moderately Weathered)	암반의 절반이하가 변질되어 있거나 흙으로 풍화되어 있다. 지반내 신선하거나 변색된 암석은 연속적인 골격 혹은 핵석상태로 존재한다.
V	SW (Slightly Weathered)	절리면과 암석의 변색(discolouration)은 풍화에 대한 지표가 되는데 모든 암반은 풍화에 의해 변색(discolouration) 되고 신선한 상태보다 극히 약해져 있다.
VI	F(Fresh)	주요 절리면에 대한 육안적인 변색(discolouration) 암반의 풍화를 볼 수 없다.

신선(fresh) : 풍화에 대한 흔적을 볼 수 없다.
 변색(discolouration) : 원래의 신선한 암석색깔이 변화되어 색깔의 변화정도가 지표가 된다. 색깔변화가 주요 광물구성에 한정된다면 이것을 언급하여야 한다.
 변질(decomposed) : 암석은 원래 암조직은 여전히 남아 있는 흙으로 풍화되어 있으나 일부 혹은 모든 광물입자가 변질되어 있다.
 풍화(disintegrated) : 암석은 원래 암조직은 여전히 남아 있는 흙으로 풍화되어 있으나 부서지기 쉽고 광물입자가 변질되어 있다.

3. 기존 시험자료 검토

3.1 슈미트해머 반발수치와 일축압축강도의 관계

3.1.1 외국의 시험자료

Deer & Miller(1966)에 의해서 제안된 것으로 그림 1에 나타나 있다. 이 그림은 슈미트해머 반발수치와 암석의 체적단위중량(%)의 곱한 값을 산술축적으로 나타내고 일축압축강도값을 대수 축적으로 할 때 매우 뚜렷한 직선 관계가 있다는 것을 보여 준다. 이 그림에서는 슈미트해머의 반발수치가 60이상 되는 경우에는 일축압축강도와와의 관계식이 그려지지 않으므로 슈미트해머 반발수치가 60이상인 암석의 일축압축강도를 추정할 수 없는 한계가 있다.

다른 방법으로 Deer & Miller에 의한 보고서

(1966)를 검토하면, 측정된 슈미트해머의 반발수치 R과 일축압축강도(C₀)와의 관계를 다음과 같은 식(1), (2)로 제시하였다.

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

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

상기 두 식은 L-type 해머를 사용하여 암반의 표면과 수평으로 타격이 되어야 하며 그 타격에너지는 회당 0.75 Nm이다. 그림 2에 일축압축강도 C₀와 슈미트해머반발수치 R과의 관계를 그래프로 나타내었다.

Schmidt(1960)에 의해서 제안된 것인데 밀도가 치밀한 Portland Cement에 대하여 수행한 시험결과로서, 슈미트해머 수치와 일축압축강도 사이에는 산술축적에서 서로 뚜렷한 직선 관계가 있는 것으로 나타났다. 이 직선관계는 80%의 비교적 높은 상관계수와 작은 편차수치를 지닌다. 그림 3에서 보여지는 뚜렷한 직선

대부분의 암석에 대한 강도의 평균 분산(MPa)

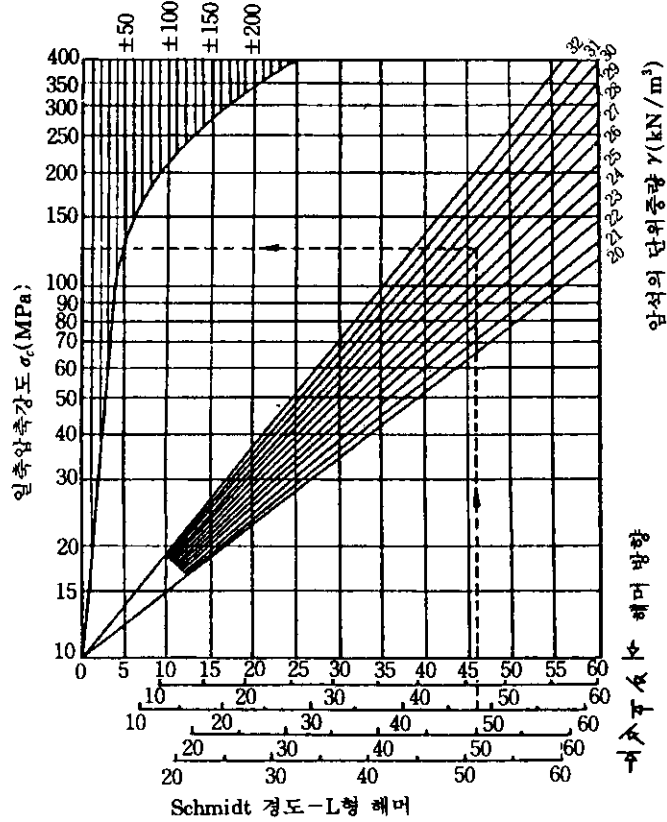


그림 1. 암석의 슈미트해머 반발치와 일축압축강도와의 관계(Deer & Miller, 1966)

1MPa=1MN/m²=10/2kg/cm²=145lb/in²
 1kN/m³=102kg/m³=6.37lb/ft³

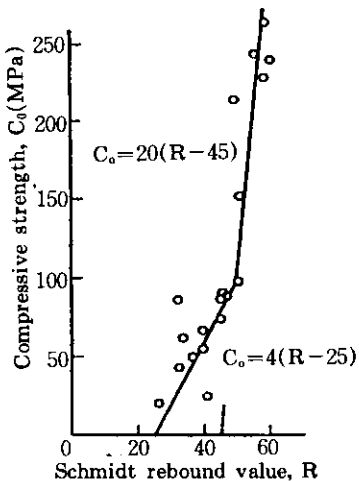


그림 2. 슈미트해머 반발치와 압축강도와의 관계 (Deer & Miller, 1966)

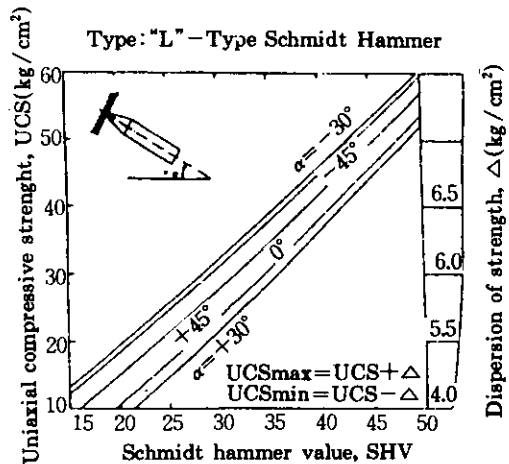


그림 3. 암석의 슈미트해머 반발치와 일축압축강도와의 관계 (Schmidt, 1960)

의 관계 식은 Deer & Miller(1966)나 Lee (1987) 등의 연구결과에서 도출된 점이적으로 증가하는 곡선의 관계와 차이를 보인다.

Saito와 Abe는 Basalt(현무암), Andesite (안산암), Docite, Quartz Diorite에 대한 슈미트해머 수치와 일축압축강도와의 관계를 그림 4와 같이 제시하였다(Saito and Abe, 1979). 두 상관관계가 비교적 포물선의 관계를 갖는데 강도가 매우 큰 시료의 사용으로 인하여 일축압축강도가 3,000kg/cm² 이상인 자료가 많다.

3.1.2 국내의 시험자료

한국화강암에 대한 일축압축강도와 슈미트해머 수치의 상관관계에 대한 기존의 연구는

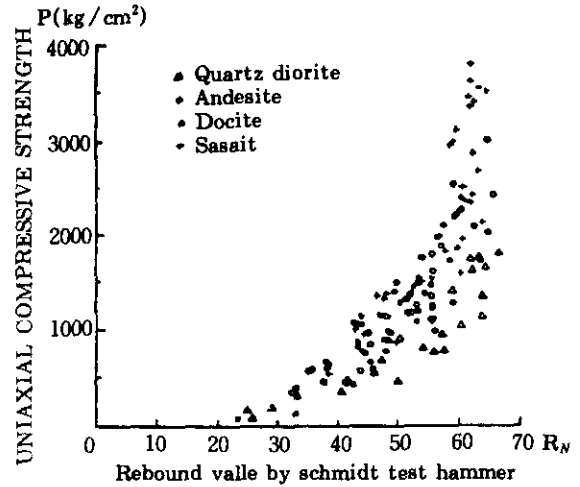


그림 4. 슈미트해머 반발치와 일축압축강도와의 관계 (Saito and Abe, 1979)

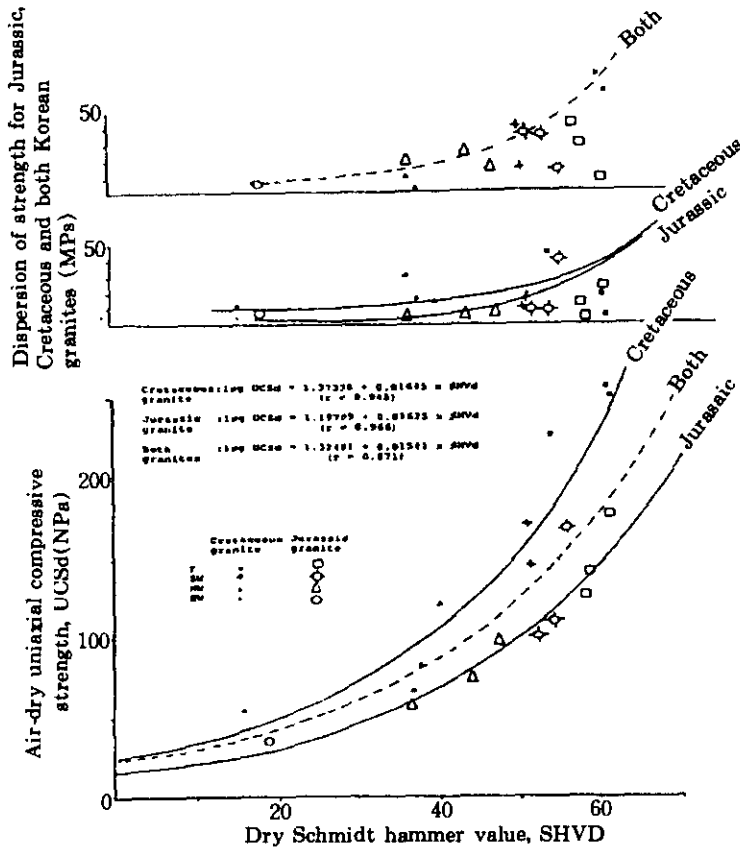


그림 5. 한국화강암의 슈미트해머 반발치와 일축압축강도와의 관계 (Lee, 1987)

표 2. 건설표준품셈에서의 일축압축강도 및 슈미트해머수치 (이수곤, 이송 1995 a, b)

암 종	분류기준 암질	일축압축강도 (kg/cm ²)	슈미트해머 수치(SHV)	
			건조상태의 암석	습윤상태의 암석
화강암 (1) 불국사 화강암 (중립질의 화강암)	풍화암	300~700	(1) 6~29 (2) 17~40 (3) 10~34	24~40 34~49 29~45
	연암	700~1,000	(1) 29~38 (2) 40~49 (3) 34~44	40~47 49~55 45~51
(3) 한국화강암 (중립질의 화강암과 조립질의 화강암 모두 를 포함하는 일반적인 한국화강암)	보통암	1,000~1,300	(1) 38~45 (2) 49~56 (3) 44~51	47~52 55~59 51~56
	경암	1,300~1,600	(1) 45~51 (2) 56~62 (3) 51~57	52~56 59~63 56~60
	극경암	1,600 이상	(1) 51이상 (2) 62이상 (3) 57이상	56이상 63이상 60이상

다음과 같다. Lee(1987)는 국내의 화강암에 대해서 슈미트해머 수치와 일축압축강도의 상관관계를 다음과 같이 표현하였다(그림 5 참조).

$$\begin{aligned} \text{건조상태 시료: } \log UCS_d &= 2.32481 \\ &+ 0.01541 \times SHV_d \quad (r=0.871) \quad (3) \\ \text{습윤상태 시료: } \log UCS_w &= 1.80601 \\ &+ 0.02324 \times SHV_w \quad (r=0.906) \end{aligned}$$

이수곤, 이송(1995 a, b)에서 제시하는 일축압축강도의 분류기준에 대비되는 한국화강암의 슈미트해머 반발수치범위를 표 2에 정리하였다. 슈미트해머 반발수치는 건조한 암석 표면에서보다도 습윤한 암석표면에서 평균 2~3 정도 수치가 더 낮다.

3.2 점하중지수와 일축압축강도의 관계

일반적으로 점하중 지수(I_p)와 일축압축강도(C_c)의 상관관계는 암석 종류에 따라 다양한 상관관계 계수(K)를 갖으나 일반적으로 $K=20\sim25$ 인 것으로 알려져 있는데 ISRM(1985)에 의하면, 점하중 지수와 일축압축강도

의 관계의 시험데이터를 회귀분석한 결과, 그림 6과 같이 $C_c = 22 I_p$ 의 관계가 있는 것으로 나타났다.

국내에서는 Lee(1987)가 국내 화강암에 대한 많은 점하중 지수와 일축강도수치를 비교 검토하여 점하중 지수와 일축압축강도의 상관

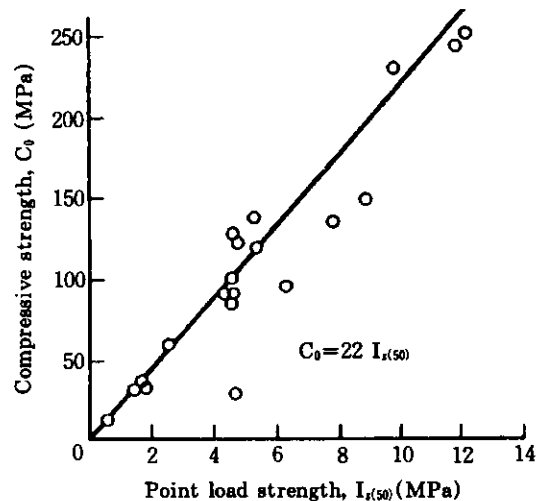


그림 6. 점하중 지수와 일축압축강도와의 관계 (ISRM, 1972)

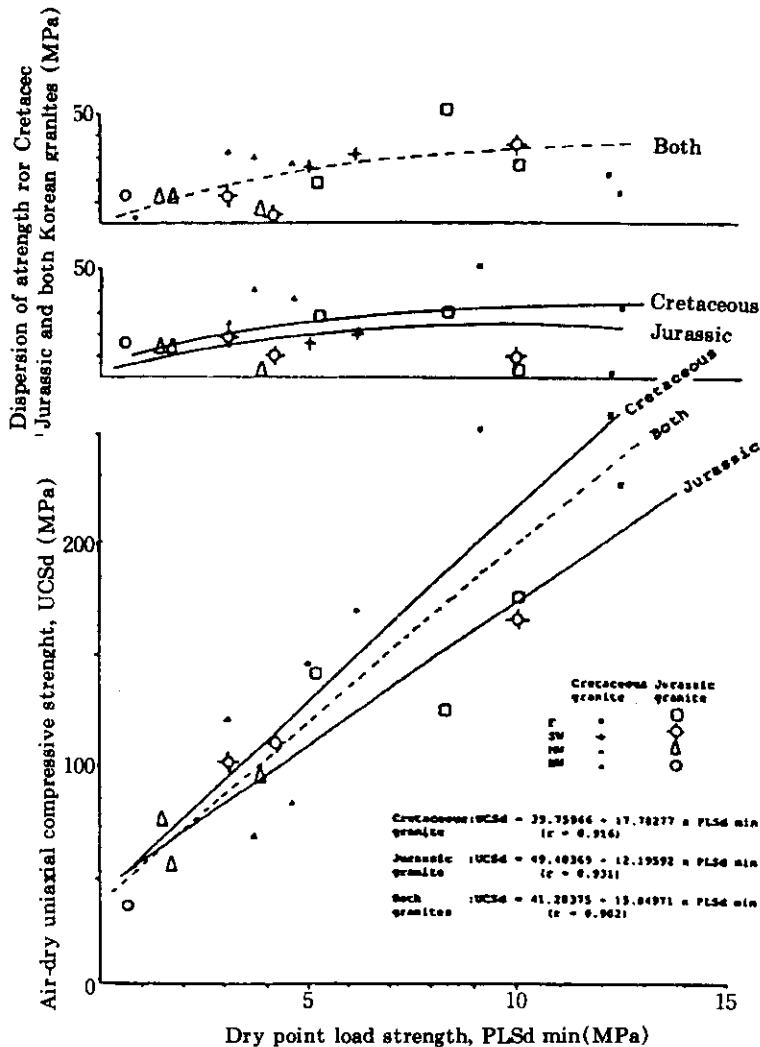


그림 7. 한국화강암의 점하중 지수와 일축압축강도와의 관계 (Lee, 1987)

관계는 그림 7과 같으며 식(4)의 관계식을 갖는다고 보고하였다.

$$\text{UCS}(\text{kg/cm}^2) = 412.8375 + 15.84971 \times \text{PLS}(\text{kg/cm}^2) \quad (4)$$

4. 암석의 강도특성

4.1 시료채취 및 제작

본 연구의 암석시편은 표 3에 기술된 암종이

며 이들 암석은 고속도로 절취사면의 시추조사 시 및 현장조사시 채취하였다.

일축압축시험을 위해 채취된 코아시료로 직경이 5.4cm, 길이 13cm로 성형하였으며 이들 시편으로 일축압축강도시험, 슈미트해머 시험, 점하중 시험을 실시하였고 작은 무정형 압편으로 추가적인 점하중 시험 및 슬레이킹 시험을 실시하였다. 그리고 점하중 시험 및 슈미트해머시험의 일부는 현장에서도 실시하였다.

표 3. 암석시료 채취 위치

암석명	채취 위치	비고
화강반암	호남고속도로 32km, 33.1km	비교적 치밀
편상화강암	호남고속도로 37km	미세균열을 다량함유
세일	구마고속도로 23km, 25km, 27km, 중앙고속도로 (대구-안동) 0~30km 구간	
화산각력암	호남고속도로 45km	
흑운모 편마암	서울외곽고속도로 1km, 중앙고속도로(홍천-춘천구간) 절토사면	
화강편마암	서울외곽고속도로(판교-산본구간), 중앙고속도로(홍천-춘천구간) 절토사면	

4.2 풍화정도에 따른 암종별 일축압축강도

일축압축강도시험은 ISRM(1979)에서 추천하는 시험방법에 준하여 실시하였다.

시편은 높이와 지름의 비가 2.5~3.0, 지름은 약 54mm인 NX core size 보다 작지 않은 실린더 형으로 시편의 편평도가 0.02mm 이내로 하여 성형하였으며 하중재하는 0.5~1.0 MPa/s 한계내에서 파괴가 5~10분 정도에서 일어난게 연속적으로 증가시켰다.

공시체 제작과정에서 암반의 강도가 비교적 큰 경우에는 공시체 제작이 가능하였으나 풍화정도가 심하거나 균열이 매우 발달된 경우에는 공시체 제작이 불가능하였다.

본 연구에서는 표 1의 암종의 풍화정도기준에 따라 풍화정도를 분류하고 암석의 일축압축강도를 시험한 결과, 표 4 및 그림 8과 같은 결과를 얻었다. 암석의 육안에 의한 풍화정도 판정과 일축압축강도의 관계에서 보는 바와 같이 일축압축강도는 등급별 일정한 상관성을 보임을 알 수 있는데 암석등급이 F, SW, MW 등급으로 변화함에 따라 일축압축강도는 1,800~300 kg/cm²로 변화함을 알 수 있었다. 따라서

일축압축강도는 암석의 등급에 따라 일정한 상관성을 보임을 알 수 있었으나 암석등급 HW, CW등급에서는 공시체의 성형이 곤란하여 시험을 할 수 없었다.

4.3 풍화정도에 따른 암종별 점하중강도

점하중시험은 점하중 시험기를 이용하여 암석 코어의 파괴시 하중을 측정하고 해당 코어 시료의 직경에 따른 점하중지수(Point Load Index: $I_p(50)$)를 산출하여 일축압축강도와 상관계수로 부터 암석의 일축압축강도를 구하는데 목적이 있다. 본 시험은 ISRM(1985)에서 추천하는 점하중지수 시험방법에 준하여 시험을 실시하였다.

시료의 양쪽에 점으로써 압축을 가하여 시료 내에 인장강도가 발생하게 하여 암석을 깨뜨리는데 이때의 값이 점하중 지수로 작용하중 값에 대한 시료에서의 Point Load Index(I_p) 값을 산정하기 위하여 $I_p = P(\text{점하중}) / D_p(\text{최소 직경})$ 의 식을 이용한다.

점하중 시험결과 산출되어 사용되는 $I_{p(50)}$ 은 50mm 코어시료를 기준으로 한것이기 때문에 윗 식에서 산출된 I_p 값은 50mm 코아에 해당되는 값으로 환산 보정한다.

본 연구에서의 풍화정도에 따른 암종별 점하중강도 특성은 표 4 및 그림 9에 나타내었다.

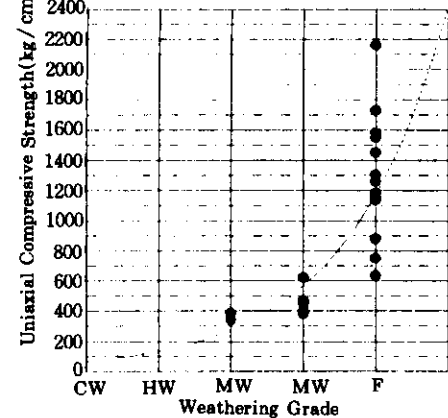
그림에서 보는 바와 같이 점하중 지수는 암반등급이 F, SW, MW, HW등급으로 변화함에 따라 5~100kg/cm² 사이의 값으로 다양하게 변화하는 것으로 나타났다.

4.4 풍화정도에 따른 암종별 슈미트해머 반발수치변화

본 시험은 현장에서 슈미트해머로 암석의 강도를 간단하게 시험 할 수 있는 현장시험으로 ISRM(1978)에서 추천하는 아래의 슈미트 해머 반발시험방법에 준하여 실시하였다.

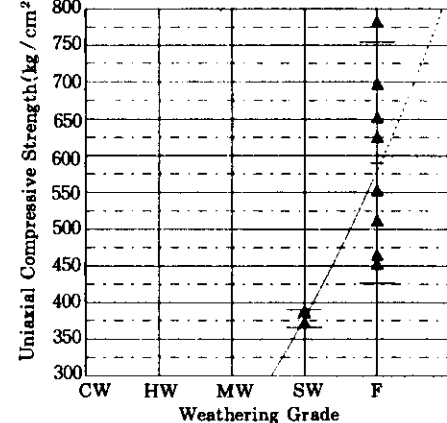
시험방법은 ISRM에서는 한 측정에서 20회 이상을 실시하여 최대 및 최소치를 제외하고

Weathering Grade and Uniaxial Compressive Strength (Granitic Porphyry)



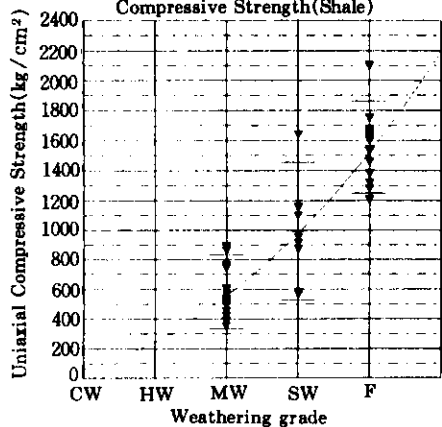
(a) 화강반암

Weathering Grade and Uniaxial Compressive Strength (Schistose Granite)



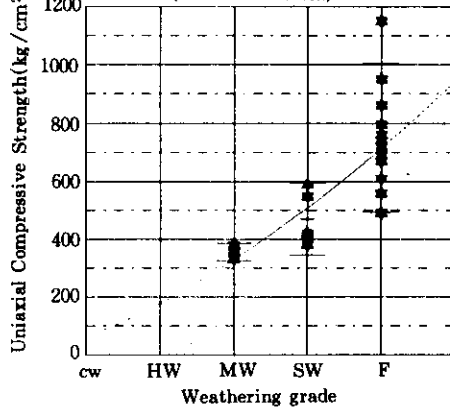
(b) 평성화강암

Weathering Grade and Uniaxial Compressive Strength (Shale)



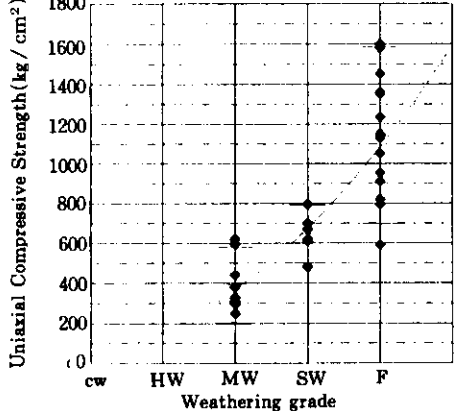
(c) 셰일

Weathering Grade and Uniaxial Compressive Strength (Volcanic Breccia)



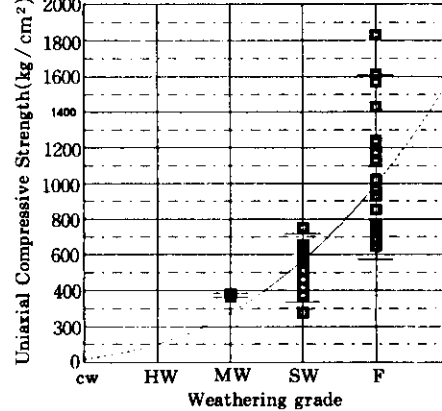
(d) 화산각력암

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

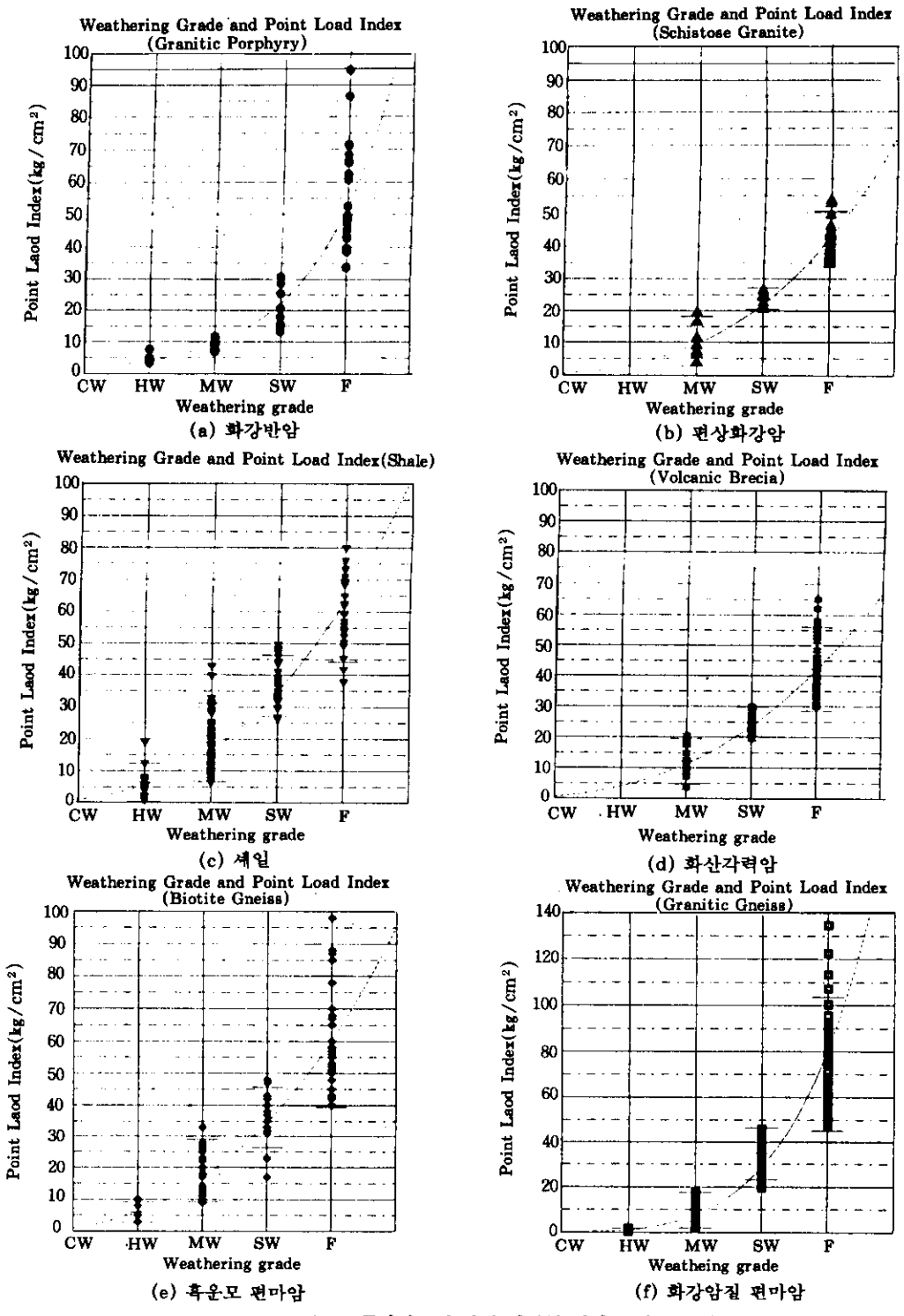


그림 9. 풍화정도에 따른 암종별 점하중 강도 특성

나머지 측정치의 평균값을 반발수치로 측정한다. 측정치의 낮은 값 50%는 없애고 높은 값 50%로 평균치를 구하여 Schmidt 반발수치를 얻는다. 이때 주의하여야 할 사항은 주변의 깨진 면에서 약 6cm 정도 벗어난 지점에서 행해야 하며 타격되는 지점의 면은 그라인더로 반들반들하게 갈아 사용해야 한다.

본 연구에서는 육안에 의한 암석의 풍화정도에 따라 슈미트해머 반발수치를 측정하였으며, ISRM에서는 20회 이상을 권장하나 실내에서 코아시료에 대해 실시하여야 하므로 충격으로 미세균열을 발생시킬 우려가 있어 한 측정에서 5회 실시하여 최대 및 최소치를 제외하고 나머지 측정치의 평균값을 반발수치로 추정하였다.

위의 여섯가지 종류의 암석에 대한 슈미트해머 수치를 측정된 결과, 표 4 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.

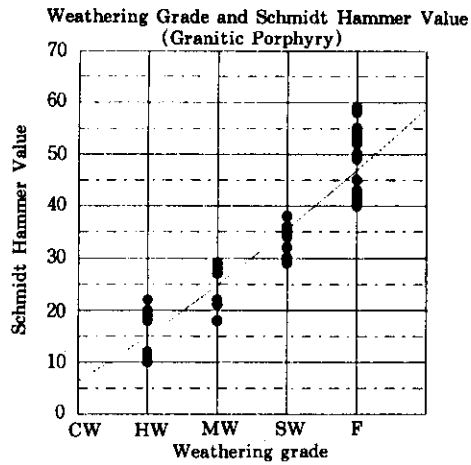
4.5 접하중지수변화에 따른 암종별 내구성 (Slaking Durability)

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.

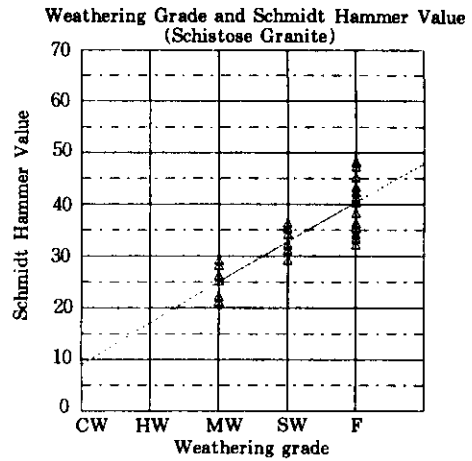
본 시험은 ISRM(1979)에서 추천하는 Slaking Durability Index 시험방법에 준하여 실시하였다. 시험방법은 암석시료에 건습의 반복을

표 4. 풍화정도에 따른 일축압축강도, 접하중 강도, 슈미트해머 반발수치

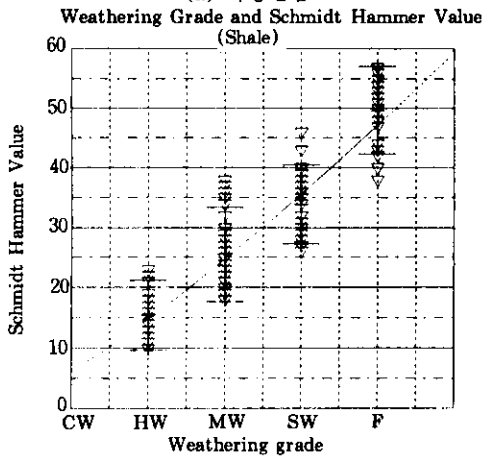
암 종		풍화정도에 따른 분포			
		HW	MW	SW	F
일축압축강도 화강반암	—	300~400	400~600	800~1,700	
	접하중지수(kg/cm ²)	4~8	5~12	12~30	30~90
	슈미트해머 반발수치	10~25	15~30	30~40	40~60
편상화강암	일축압축강도(kg/cm ²)	—	—	360~400	450~750
	접하중지수(kg/cm ²)	—	3~16	20~27	34~50
	슈미트해머 반발수치	—	20~30	30~38	33~50
세일	일축압축강도(kg/cm ²)	—	350~850	550~1,450	1,300~1,800
	접하중지수(kg/cm ²)	0~13	6~30	25~45	45~75
	슈미트해머 반발수치	10~20	18~30	27~40	43~55
화산각력암	일축압축강도(kg/cm ²)	—	300~400	350~600	500~1,000
	접하중지수(kg/cm ²)	—	5~20	20~30	30~55
	슈미트해머 반발수치	—	14~33	28~40	32~50
흑운모 편마암	일축압축강도(kg/cm ²)	—	200~600	500~800	700~1,600
	접하중지수(kg/cm ²)	5~10	10~30	26~45	40~80
	슈미트해머 반발수치	10~15	15~30	30~45	40~60
화강암질 편마암	일축압축강도(kg/cm ²)	—	350~400	400~750	700~1,600
	접하중지수(kg/cm ²)	0~1	1~20	20~40	45~105
	슈미트해머 반발수치	10~20	20~35	30~45	45~60



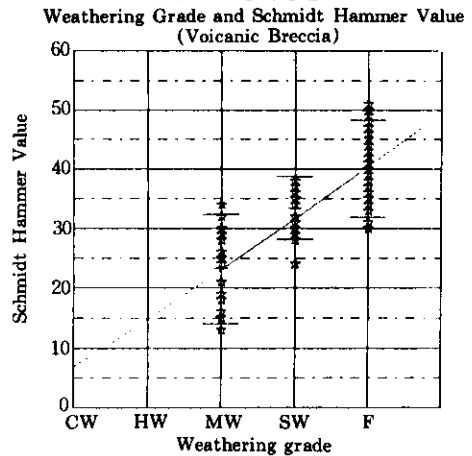
(a) 화강반암



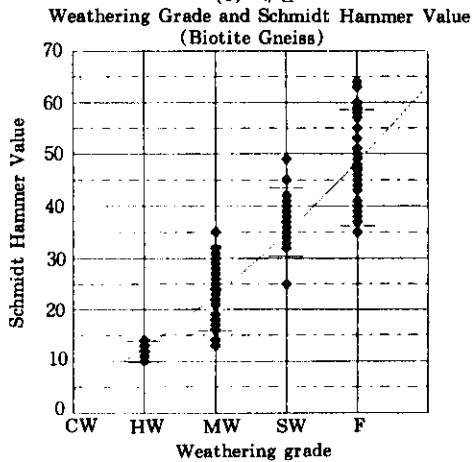
(b) 편상화강암



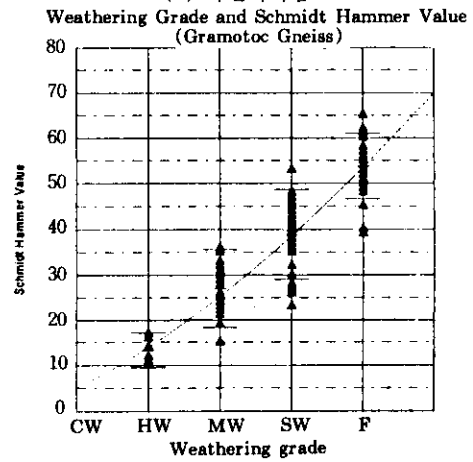
(c) 셰일



(d) 화산각력암



(e) 흑운모 편마암



(f) 화강암질 편마암

그림 10. 풍화정도에 따른 암종별 슈미트해머 반발수치 특성

2회 주었을 때의 취약화 또는 연질화에 대한 저항성을 조사하는 것이며, 최근 일본에서도 많이 채택되고 있는 방법으로 중량을 정확히 측정한 40~60g의 대표적인 암괴 10개를 시험 장치의 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 20rpm으로 10분간 회전시킨다. 그리고 드럼을 수조로부터 꺼내고

105°C의 온도로 노건조시키고 건조후 중량을 측정한다. 이 조작을 적어도 2회 이상 실시한다.

본 연구에서는 편마암 및 셰일에 대한 점하중 지수를 이용하여 풍화정도를 나타내어 점하중 지수에 따른 내구성을 파악하기 위하여 시험을 실시하여 다음 그림 11과 같은 점하중 지수가 높을 수록 반복횟수에 따라 마모에 강한 특성을 보이는 것으로 나타나 강도가 약할수록 현격하게 내구성이 떨어져 동근 암편화되는 현상이 두드러 졌다.

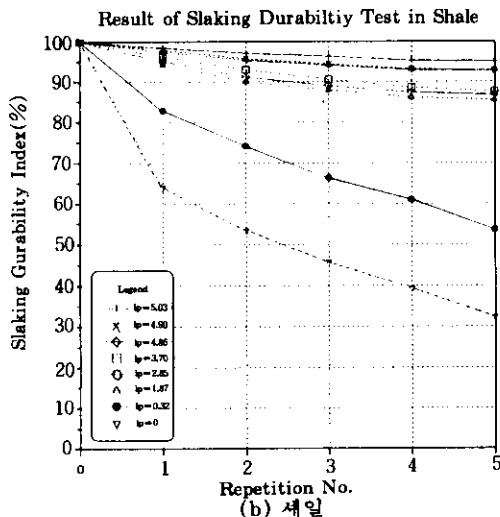
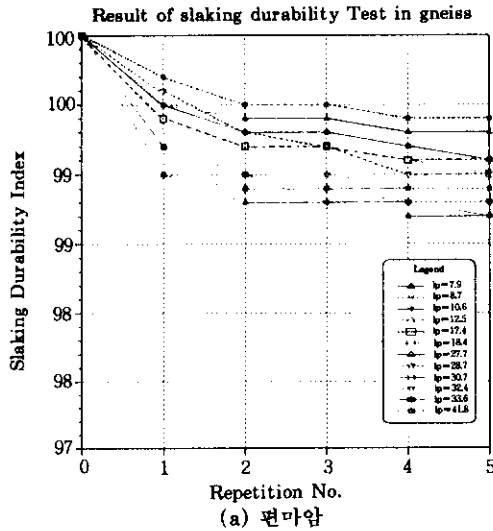


그림 11. 점하중지수 변화에 따른 암종별 내구성 특성

4.6 점하중 지수변화에 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_1 , W_2 로 하면 $(W_2 - W_1) / W_1 \times 100(\%)$ 로 부터 구해진다. 경암의 흡수율은 10% 이하이며, 신선하고 치밀한 암석에서는 1%에도 달하지 않는 경우가 많으며 풍화정도에 따라 흡수율은 현격히 증가한다.

흡수율은 일반적으로 암석의 강도가 비교적 약한 암석에서 흡수율이 크고 강도가 강한 경암에서의 흡수율은 거의 측정되지 않는 경향이 있으므로 점하중 지수에 따른 흡수율의 변화를 살펴 보았다.

본 시험은 위에서 언급한 ISRM(1979)에서 추천하는 흡수율 시험방법에 준하여 편마암에 대해 실시하여 그림 12와 같은 결과를 얻었으며 흡수율(A_p)과 점하중 지수(I_p)와의 다음 상관 식(5)를 추정하였다. 이 식에서 결정계수값이 편마암에 대해 0.97로 비교적 신뢰도가 큰 결과를 보였다.

편마암 : $A_p = -2.3 \times \log(I_p) + 8.8$
 셰일 : $A_p = -3.2 \times \log(I_p) + 10.0$ (5)

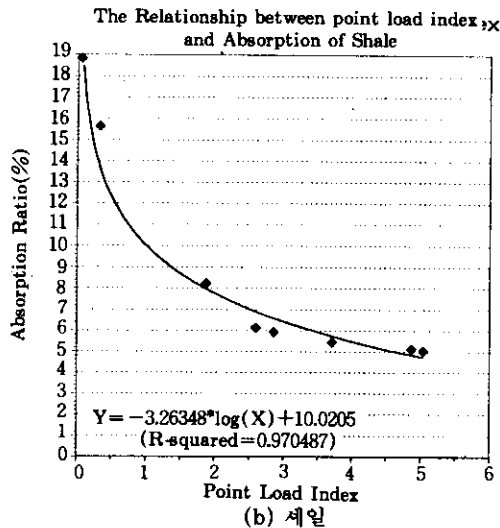
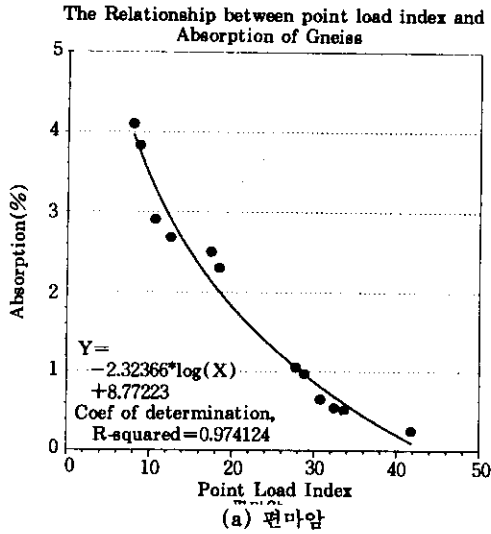


그림 12. 점하중 지수변화에 따른 흡수율 특성

4.7 점하중지수에 따른 암석의 이방성

암반은 암반내에 불연속면이 존재하여 강한 이방특성을 보이거나 암석은 미세균열과 광물의 결집상태, 광물종, 배열상태에 따라 이방성의 특성을 보인다. 특히, 광물중 운모류를 많이 포

함하는 암석은 강한 이방특성을 보일 수 있다. 암중에 따라서는 화성암의 경우 마그마의 고결냉각에 의해 형성되어 균질한 등방성 성질을 보이거나 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.

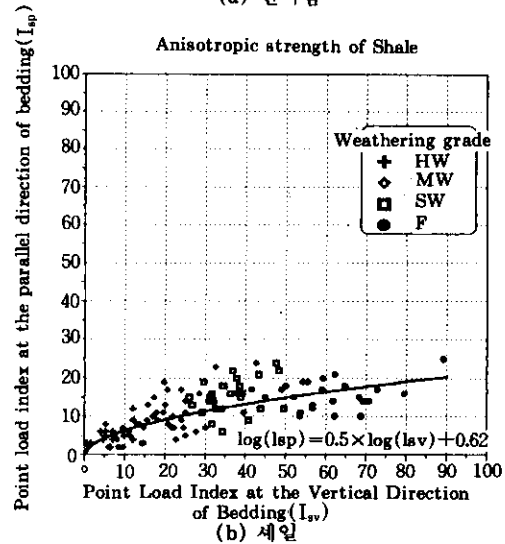
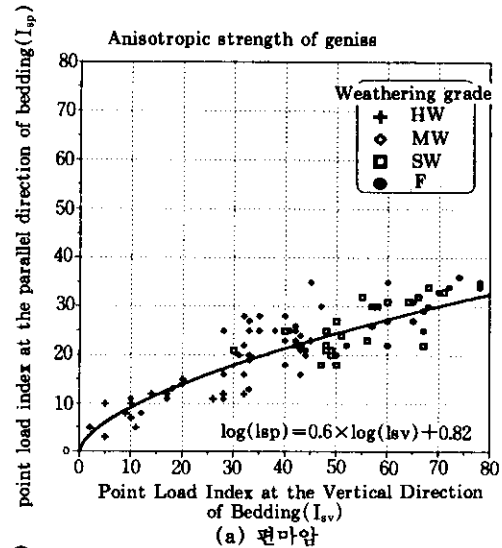


그림 13. 점하중 지수변화에 따른 암석의 이방성 특성

다. 즉, 층리면에 수직으로 하중이 작용하는 경우와 층리면에 평행하게 하중이 작용하는 경우 커다란 강도의 차이를 보인다.

본 연구는 암석의 이방성 특성이 강한 편마암과 세일에 대해 엽리 및 층리방향에 수직인 방향(I_w)과 평행한 방향(I_p)으로 하중을 가하여 두 점하중 강도값을 비교하여 보았다. 그리고 육안적인 풍화등급판정으로 구분하여 두 암종에 대한 이방성 특성을 시험한 결과, 그림 13과 같이 얻을 수 있었으며 두 암종의 이방성에 점하중 지수의 관계 식(6)을 아래와 같이 추정하였다.

본 결과에 의하면, 회귀식이 $\log(I_p) = A \times \log(I_w) + B$ 의 관계의 함수식을 갖는데 $A = 0.5 \sim 0.6$ 의 범위에서 분포한다. 그리고 편마암보다 세일이 2배 정도 강한 이방성의 성질을 가지고 있으며 암석의 강도가 클수록 즉, 풍화를 받지 않을수록 곡선의 기울기가 급해짐을 볼 수 있다. 이는 풍화를 받지 않을수록 광물사이의 결집력이 강해짐을 보여 준다.

$$\begin{aligned} \text{편마암} : \log(I_p) &= 0.6 \times \log(I_w) + 0.82 \\ \text{세 일} : \log(I_p) &= 0.5 \times \log(I_w) + 0.62 \end{aligned} \quad (6)$$

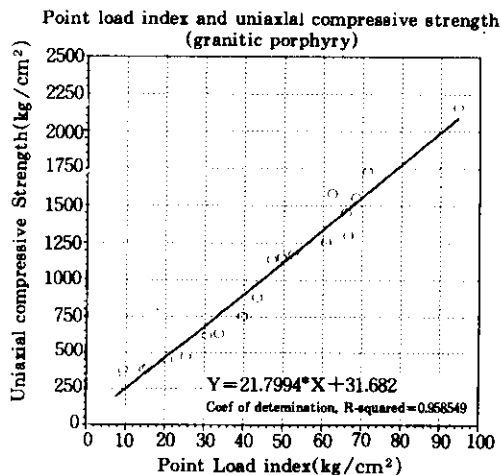
5. 암석의 강도특성 상관관계

본 연구에서 여섯 가지 암종에 대해 일축압축강도와 점하중 지수, 슈미트해머 반발수치 그리고 점하중지수와 슈미트해머 반발수치에 대한 시험결과를 종합분석하여 상호 관계를 아래와 같이 추정하였다.

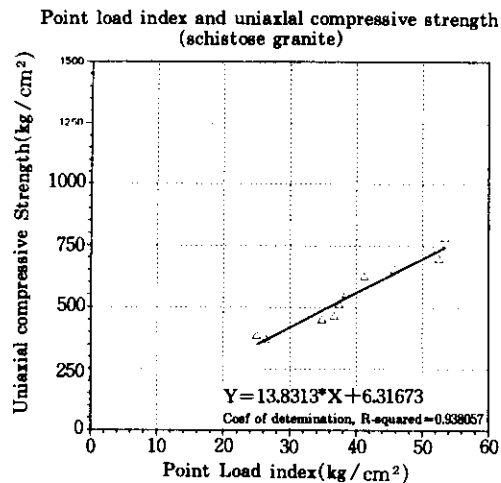
5.1 일축압축강도와 점하중지수의 관계

위의 시험 결과를 종합하여 분석하여 일축압축강도(σ_c)와 점하중 지수(I_p)와의 상관관계를 회귀분석한 결과, 그림 14와 같이 나타났으며 각 암종에 따른 상관 관계식은 표 5와 같이 선형의 관계($y = Kx + C$) 식을 갖는 것으로 분석되었다.

각 암종별 일축압축강도와 점하중지수와의 관계를 분석한 결과, $K = 13 \sim 23$ 의 넓은 분포를 갖는 것으로 나타났으며 각 암종은 결정계수(r^2)가 $0.88 \sim 0.96$ 까지로 비교적 신뢰성이 좋은 곡선식을 얻을 수 있다. 그러나 암종을 종합하여 보면, 결정계수(r^2)가 0.64 로 신뢰성이 낮은 결과를 얻었다.

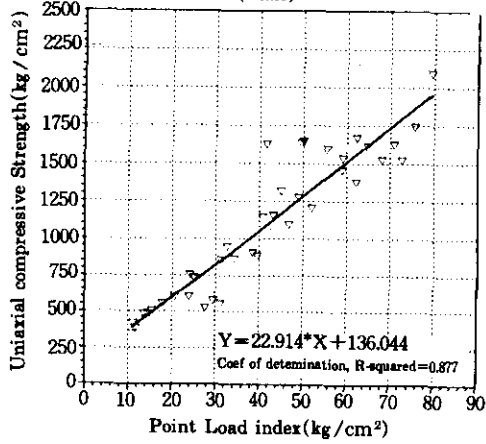


(a) 화강반암



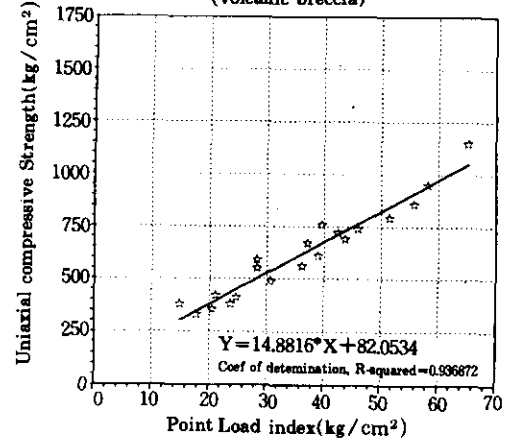
(b) 편상화강암

Point load index and uniaxial compressive strength
(shale)



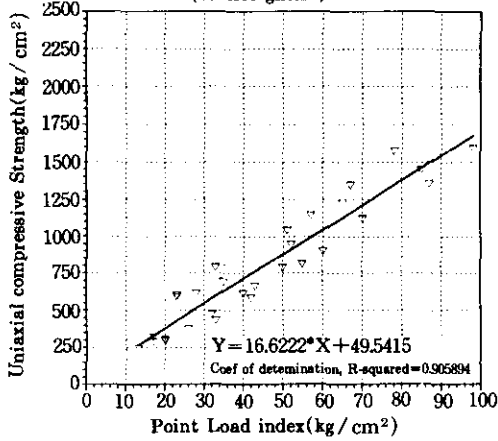
(c) 셰일

Point load index and uniaxial compressive strength
(volcanic breccia)



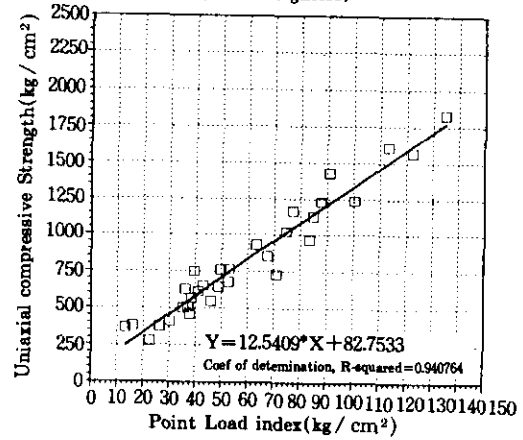
(d) 화산각력암

Point load index and uniaxial compressive strength
(biotite gneiss)



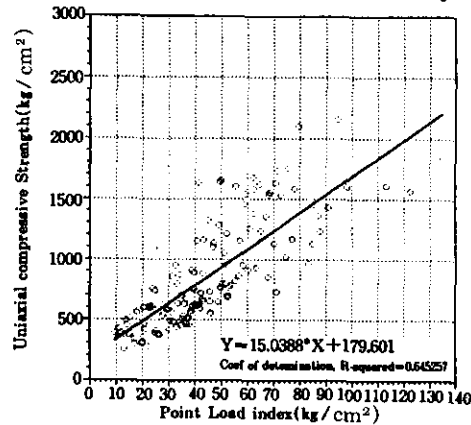
(e) 흑운모 편마암

Point load index and uniaxial compressive strength
(Granitic gneiss)



(g) 화강편마암

Point load index and uniaxial compressive strength



(g) 종합

그림 14. 점하중지수와 일축압축강도의 상관관계

그러므로 일축압축강도와 점하중지수와의 관계는 암종에 따라 많은 차이를 보이므로 암종에 맞는 K값을 사용하여야 것으로 판단된다.

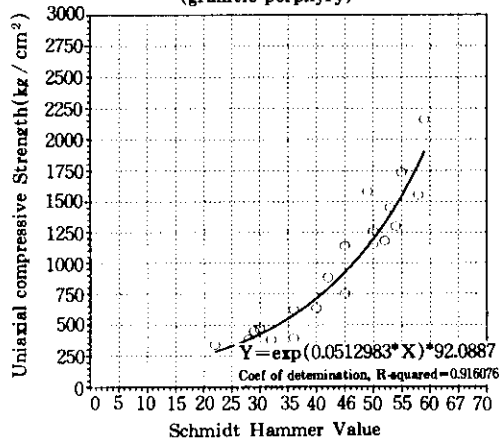
5.2 일축압축강도와 슈미트해머 반발수치와의 관계

일축압축강도(C_c)와 슈미트해머 반발치의 관계는 그림 15에서 보는 바와 같이 나타났으며 위의 시험 결과를 일축압축강도(C_c)와 슈미트해머 반발수치(SHV)와의 상관관계를 회귀분

석한 결과, $C_c = e^{(K \times SHV)} \times C$ 의 관계식으로 표현할 수 있는데 각 암종별 상수값인 $K=0.41 \sim 0.51$, $C=92 \sim 129$ 의 범위로 분포하고 있다. 그리고 각 암종은 결정계수(r^2)가 0.79~0.92까지로 분포를 보이고 있으나 여섯 가지 암종을 종합하여 보면, 결정계수(r^2)가 0.62로 낮은 값을 보인다. 그러므로 암종별로 각각의 강도특성에 차이를 보이므로 암종에 따라 일축압축강도와 슈미트해머 반발수치와의 관계를 찾는 것이 신뢰성 있는 강도추정이 될 수 있을 것이다.

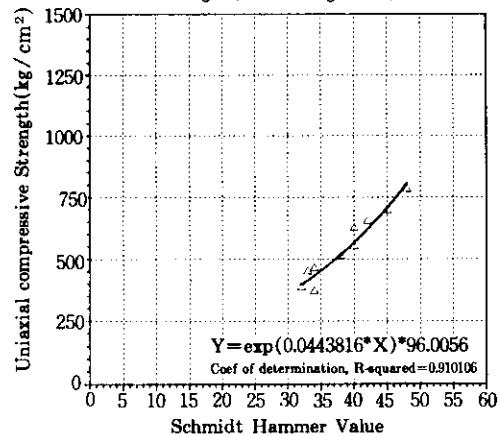
각 암종에 따른 상관 관계식은 표 5와 같은 관계 식으로 표현할 수 있었다.

Schmidt hammer value and uniaxial compressive strength (granitic porphyry)



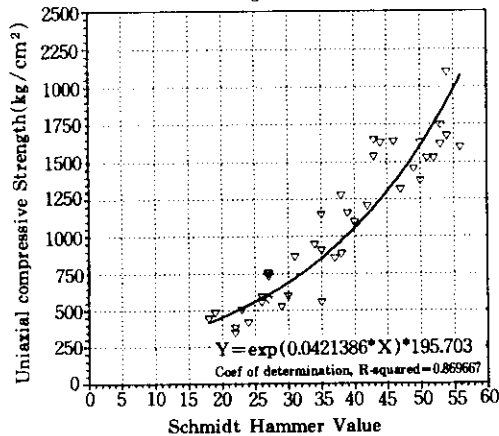
(a) 화강반암

Schmidt hammer value and uniaxial compressive strength (schistose granite)



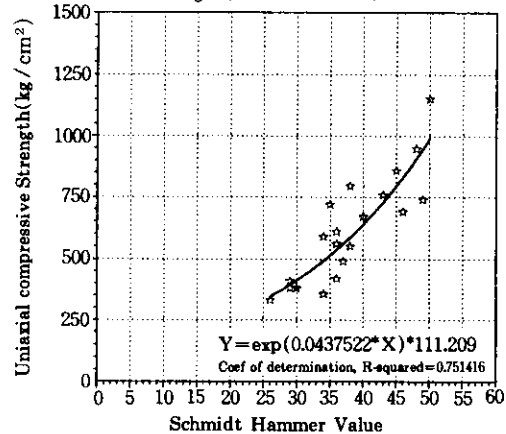
(b) 편상화강암

Schmidt hammer value and uniaxial compressive strength (shale)

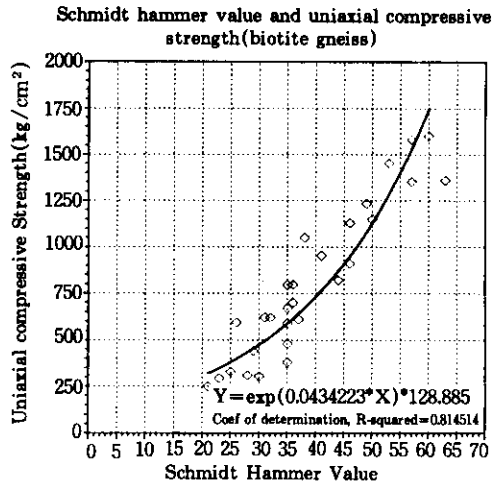


(c) 셰일

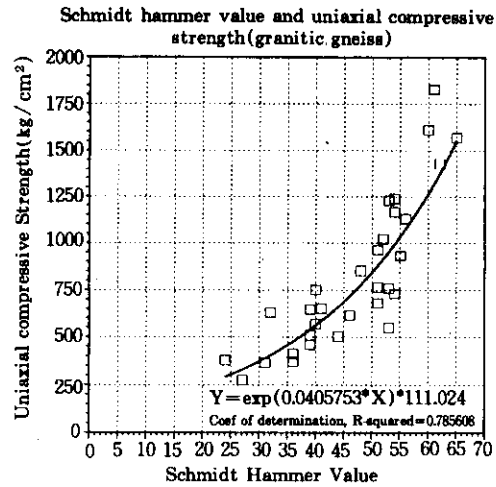
Schmidt hammer value and uniaxial compressive strength (volcanic breccia)



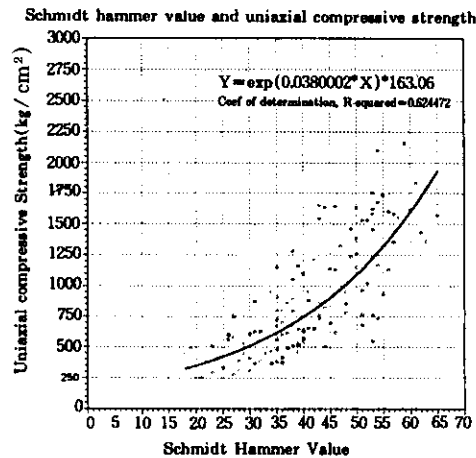
(d) 화산각력암



(e) 흑운모 편마암



(f) 화강편마암



(g) 종합

그림 15. 일축압축강도와 슈미트해머 반발수치와의 상관관계

5.3 점하중 지수와 슈미트해머 반발수치와의 관계

점하중지수와 슈미트해머반발수치와의 관계는 그림 16과 같으며 위의 시험 결과를 종합하여 분석하여 점하중 지수(I_s)와 슈미트 해머 반발수치(SHV)와의 상관관계를 회귀분석한 결과, $\log(I_s) = K \times \log(SHV) + C$ 의 관계식으로 표현할 수 있는데 각 암종별 상수값인

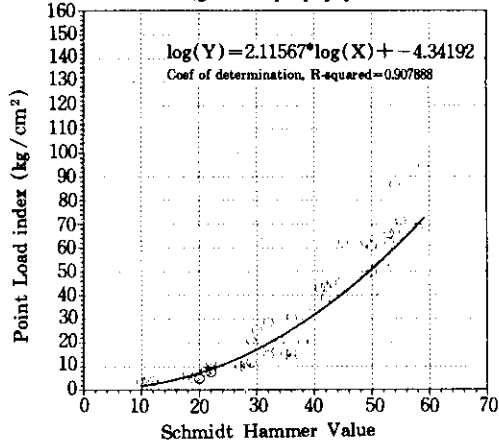
$K = 1.62 \sim 2.65$, $C = -2.22 \sim 7.18$ 의 범위로 분포하고 있다. 그리고 각 암종은 결정계수(r^2)가 0.80~0.93 까지로 비교적 높은 값의 분포를 보이고 여섯 가지 암종을 종합하여 보면, 결정계수(r^2)가 0.82로 비교적 신뢰성이 있는 상관성을 보인다.

암종에 따른 상관 관계식은 표 5와 같이 관계를 갖는 것으로 분석되었다.

표 5. 암종별 일축압축강도, 접하중 지수, 슈미트해머 반발수치의 상관관계식

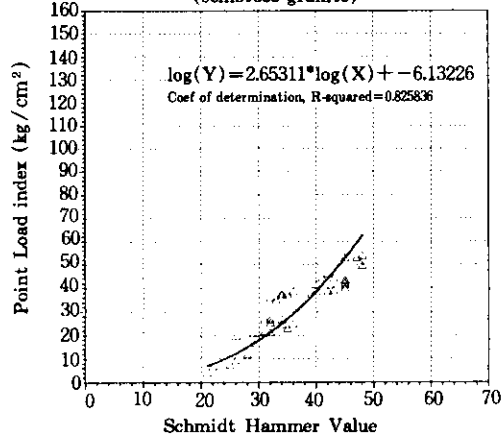
암 종	상관관계	K	C	r ²	관 제 식
화강반암	일축압축강도와 접하중지수	22	31.7	0.96	$C_o = 22 \times I_s + 31.7$
	일축압축강도와 슈미트해머 반발수치	0.051	92.1	20.92	$C_o = e^{(0.051 \times SHV)} \times 92.1$
	접하중지수와 슈미트해머 반발수치	2.12	-4.34	0.91	$\log(I_s) = 2.12 \times \log(SHV) - 4.34$
편상화강암	일축압축강도와 접하중지수	14	6.3	0.94	$C_o = 14 \times I_s + 6.3$
	일축압축강도와 슈미트해머 반발수치	0.044	96.0	0.91	$C_o = e^{(0.044 \times SHV)} \times 96.0$
	접하중지수와 슈미트해머 반발수치	2.65	-6.13	0.83	$\log(I_s) = 2.65 \times \log(SHV) - 6.13$
세일	일축압축강도와 접하중지수	23	136.0	0.88	$C_o = 23 \times I_s + 136.0$
	일축압축강도와 슈미트해머 반발수치	0.042	195.7	0.87	$C_o = e^{(0.042 \times SHV)} \times 195.7$
	접하중지수와 슈미트해머 반발수치	2.02	-3.68	0.88	$\log(I_s) = 2.02 \times \log(SHV) - 3.68$
화산각력암	일축압축강도와 접하중지수	15	82.1	0.94	$C_o = 15 \times I_s + 82.1$
	일축압축강도와 슈미트해머 반발수치	0.044	111.2	0.75	$C_o = e^{(0.044 \times SHV)} \times 111.2$
	접하중지수와 슈미트해머 반발수치	1.83	-3.14	0.80	$\log(I_s) = 1.83 \times \log(SHV) - 3.14$
흑운모 편마암	일축압축강도와 접하중지수	17	49.5	0.91	$C_o = 17 \times I_s + 49.5$
	일축압축강도와 슈미트해머 반발수치	0.043	128.9	0.82	$C_o = e^{(0.043 \times SHV)} \times 128.9$
	접하중지수와 슈미트해머 반발수치	1.62	-2.22	0.93	$\log(I_s) = 1.62 \times \log(SHV) - 2.22$
화강 편마암	일축압축강도와 접하중지수	13	82.8	0.94	$C_o = 13 \times I_s + 82.8$
	일축압축강도와 슈미트해머 반발수치	0.041	111.0	0.79	$C_o = e^{(0.041 \times SHV)} \times 111.0$
	접하중지수와 슈미트해머 반발수치	2.89	-7.18	0.90	$\log(I_s) = 2.89 \times \log(SHV) - 7.19$
총 합	일축압축강도와 접하중지수	15	179.6	0.65	$C_o = 15 \times I_s + 179.6$
	일축압축강도와 슈미트해머 반발수치	0.038	163.1	0.63	$C_o = e^{(0.038 \times SHV)} \times 163.1$
	접하중지수와 슈미트해머 반발수치	2.03	-3.84	0.82	$\log(I_s) = 2.03 \times \log(SHV) - 3.84$

Schmidt hammer value and point load index
(granitic porphyry)



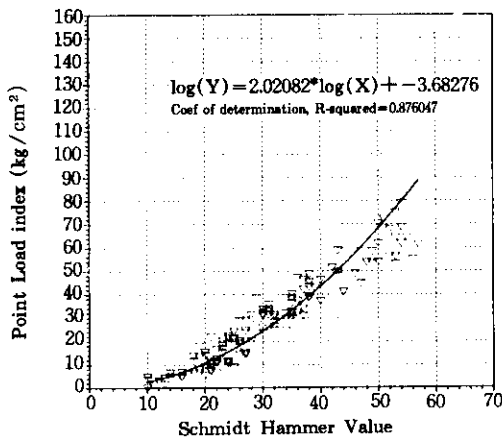
(a) 화강반암

Schmidt hammer value and point load index
(schistose granite)



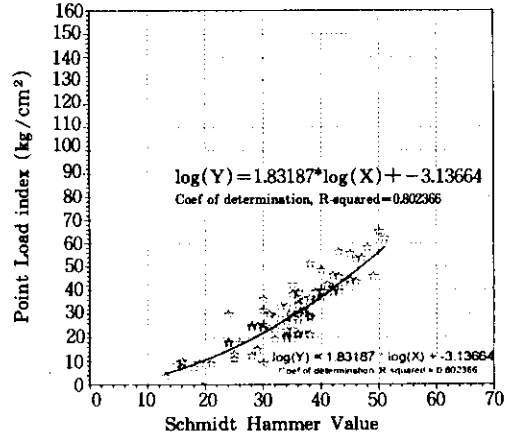
(b) 편상화강암

Schmidt hammer value and point load index (shale)



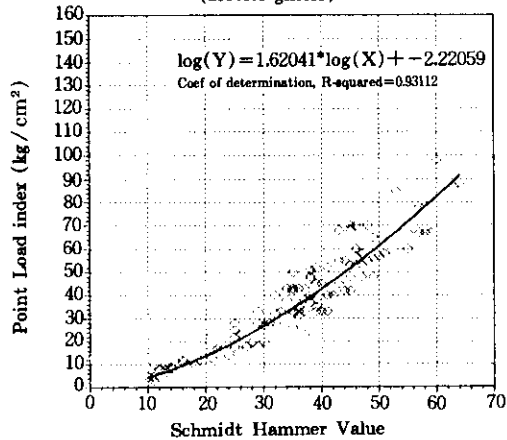
(c) 셰일

Schmidt hammer value and point load index
(volcanic breccia)



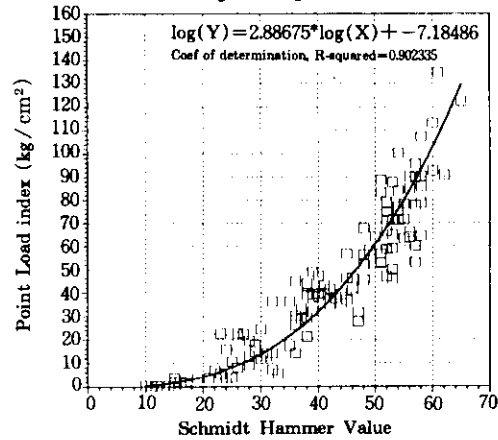
(d) 화산각력암

Schmidt hammer value and point load index
(biotite gneiss)

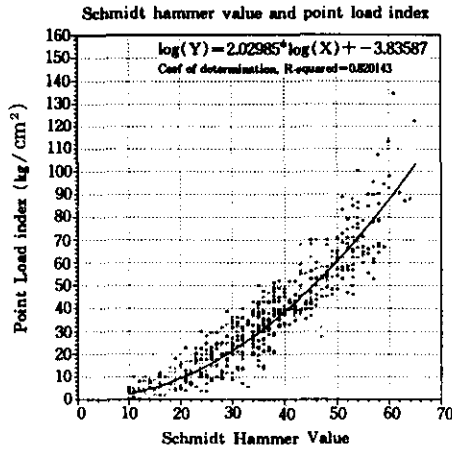


(e) 흑운모 편마암

Schmidt hammer value and point load index
(granitic gneiss)



(f) 화강 편마암



(g) 종합

그림 16. 점하중 지수와 슈미트해머 반발수치와의 상관관계

5.4 기존 시험자료와의 비교

암석강도는 많은 학자들이 상관관계에 대해 제안되어 왔지만 많은 오차와 결과치의 넓은 분산을 갖는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제는 많은 자료의 축적으로 극복하여야 하며 본 논문에서의 여섯 암종 이외에 대해서도 계속적인 자료의 구축이 요구된다.

이들 강도특성 즉, 일축압축강도와 점하중 지수와의 관계, 일축압축강도와 슈미트해머 반발수치와의 관계, 점하중 지수와 슈미트 해머 반발수치와의 관계를 규명하여 세가지 강도시험법에 대한 상관관계를 찾아 보는 것은 매우 중요한 일이다.

본 연구는 위에서 분석된 상관관계에 대한 결과와 기존 시험자료와의 표 6과 같이 비교하면 다음과 같다.

- 1) 일반적으로 점하중 지수와 일축압축강도와의 관계에서 암석의 강도특성은 암석의 종류에 따라 다른 양상을 보이므로 가능하면 암종에 따른 K값을 선택하여 사용하는 것이 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 국내에 분

포하는 여섯 종류의 암석에 대해 K=13~22의 범위값을 갖는 것으로 나타났는데 이는 ISRM에서 제안된 K=22보다는 낮은 값을 보이는 것으로 나타났다.

- 2) 슈미트해머 반발수치와 일축압축강도와의 상관관계에서는 Deer & Miller는 직선식의 관계로 표현하였고 Lee는 국내 화강암에 대해 $C_0 = 10^{(K \times x)} + C$ 의 관계식으로 건조한 시료에서는 $C_0 = 10^{(0.01541 \times x)} + 211.2564$, 습윤시료인 경우는 $C_0 = 10^{(0.02324 \times x)} + 63.9750$ 의 관계식으로 표현하였으나 본 연구에서는 지수함수의 관계로 표현하였다. 상관 관계식에서는 비교적 본 연구의 값이 Lee 보다 낮게 나타나는 경향이 있다(표 7).
- 3) 기존 시험자료에서는 점하중과 슈미트 해머와의 상관관계에 대한 자료를 얻을 수 없었으나 본 논문에서는 그 상관관계에 대해 언급하여 보았다.

그러므로 이 관계식을 이용하여 현장에서의 간단한 시험방법에 의해 일축압축강도 및 점하중 지수를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

표 6. 기존 시험자료와 본 논문결과와의 비교

제안자	일축압축강도와 점하중지수	슈미트해머 반발수치와 일축압축강도	점하중 지수와 슈미트해머 반발수치	
본 문	화강반암	$C_o = 22 \times I_s + 31.7$	$C_o = e^{(0.051 \times SHV)} \times 92.1$	$\log(I_s) = 2.12 \times \log(SHV) - 4.34$
	편상화강암	$C_o = 14 \times I_s + 6.3$	$C_o = e^{(0.044 \times SHV)} \times 96.0$	$\log(I_s) = 2.65 \times \log(SHV) - 6.13$
	세일	$C_o = 23 \times I_s + 136.0$	$C_o = e^{(0.042 \times SHV)} \times 195.7$	$\log(I_s) = 2.02 \times \log(SHV) - 3.68$
	화산각력암	$C_o = 15 \times I_s + 82.1$	$C_o = e^{(0.044 \times SHV)} \times 111.2$	$\log(I_s) = 1.83 \times \log(SHV) - 3.14$
	흑운모편마암	$C_o = 17 \times I_s + 49.5$	$C_o = e^{(0.043 \times SHV)} \times 128.9$	$\log(I_s) = 1.62 \times \log(SHV) - 2.22$
	화강편마암	$C_o = 13 \times I_s + 82.8$	$C_o = e^{(0.041 \times SHV)} \times 111.0$	$\log(I_s) = 2.89 \times \log(SHV) - 7.19$
	총 합	$C_o = 15 \times I_s + 179.6$	$C_o = e^{(0.038 \times SHV)} \times 163.1$	$\log(I_s) = 2.03 \times \log(SHV) - 3.84$
Deer & Miller	-	SHV(50까지): $C_o = 4(SHV - 25)$ (MPa) SHV(50이상): $C_o = 20(SHV - 25)$ (MPa)	-	
Lee (한국 화강암)	$C_o = 412.8375 + 15.84971 \times I_s$ (r=0.902)	건조상태 시료: $\log \sigma_{cd} = 2.32481 + 0.01541 \times SHV_d$ (r=0.871) 습윤상태 시료: $\log \sigma_{cs} = 1.80601 + 0.02324 \times SHV_w$ (r=0.906)	-	
Saito	-	포물선관계 (관계식없음)	-	
ISRM	$C_o = 22 I_{s(50)}$	-	-	

표 7. 각 제안자의 슈미트해머 반발수치와 일축압축강도와의 상관값비교

SHV	일축압축강도(kg/cm ²)		
	Deer & Miller	Lee	본 논문
SHV=30	204	513	359
SHV=55	2,040	1,487	1,080

6. 결론

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

- 1) 암석의 풍화정도에 따라 일축압축강도, 점하중 지수, 슈미트해머 반발수치가 많은 차이를 보였다.

- 2) 암석의 흡수율은 풍화의 정도를 가장 잘 표현해 주는 물리적인 성질로 본 연구에서 편마암에 대해 흡수율과 점하중 지수와의 관계를 알아 본 결과, 흡수율(A_p) = $-2.3 \times \log(I_s) + 8.8$, 세일에서는 흡수율(A_p) = $-3.2 \times \log(I_s) + 10.0$ 의 관계식을 갖는 것으로 나타났다.

- 3) 암석의 이방성 특성은 편마암보다 세일이 2배 정도 강한 이방성의 성질을 가지고 있으며 편마암이 세일보다 암석이 강도가 클수록 곡선의 기울기가 급해짐을 볼 수 있었는데 이는 강도가 클수록 광물사이의 결집력이 강함을 의미하는 것으로 보인다.

- 4) 암석의 내구성 시험결과는 점하중 지수가 클수록 내구성이 강한 특성을 보이며 세일이 편마암에 비해 내구성이 약한 특성을 보였다. 특히 암석강도가 약한 경우에는 급속히 마모가 되어 둥근 암편상을 보였다.

- 5) 여러 가지 강도에 대한 상관관계를 규명한 결과, 암종에 따라 다른 관계 식을 보이므로 암종에 따라 상관관계식을 적용하여야 한다.
- 6) 점하중 지수와 일축압축강도와의 관계는 암석의 강도특성은 암석의 종류에 따라 다른 양상을 보이므로 가능하면 암종에 따른 K값을 선택하여 사용하는 것이 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 7) 슈미트해머 반발수치와 일축압축강도와의 상관관계에서는 SHV값이 클 경우에는 비교적 본 논문의 값이 Deer & Miller와 Lee 제안식보다 낮게 나타나는 경향이 있었다.

감사의 글

본 연구를 위하여 연구비를 지원하여 주신 한양대학교 건설연구소에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 이수곤, 이송(1995a), "슈미트해머 수치를 이용한 한국 화강암의 일축압축강도 추정방법" 대한토목학회논문집 제15권 제1호 pp. 199~210
2. 이수곤, 이송(1995b), "침하강도를 이용한 한국 화강암의 일축압축강도 추정방법" 대한토목학회논문집 제5권 제4호, pp.1015~1027
3. Brown E. T. (1981), "Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities", Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, p. 31.
4. Deer D. U. and Miller R. P. (1966), "Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock", University of Illinois, US Department of Commerce, National Technical Information Service.
5. Deere, D. U. & Miller R. P. (1966), "Engineering Classification and Index Properties of Intact Rock", Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, New Mexico.
6. GCO(1988), "Guide to Rock and Soil Descriptions", Geotechnical Control Office, civil Engineering Services Department, Hong Kong, p. 17.
7. ISRM(1978), "Suggested Methods for Determining of the Schmidt Hammer Rebound Hardness", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 15. No. 3, pp. 89-97.
8. ISRM(1979), "Suggested Methods for Determining the Slaking-Durability Index Properties", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 16. No. 2, pp. 141-156.
9. ISRM(1979), "Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Material", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 15. No. 2, pp. 135-140.
10. ISRM(1979), "Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 16. No. 2, pp. 141~156.
11. ISRM(1985), "Suggested Methods for Determining Point Load Strength", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 22. No. 2, pp. 51-60.
12. Lee, S. G. (1987), "Weathering and Geotechnical Characterization of Korean Granites", Ph. D. Thesis, Imperial College, University of London, p. 415.
13. Saito T. and Abe M. (1979), "Study on Variation of Longitudinal Wave Velocity with Saturation in Various Rock Types", Rock Mechanics in Japan, p. 44.
14. Schmidt E. (1960), "Operating Instructions for the L-type Schmidt Hammer", Proceq Co., Basle and Zurich, Switzerland.

(접수일자 1997. 9. 12)