

압축강도와 풍화도에 관련된 퇴적암의 공학적 특성

Engineering Characteristics of the Sedimentary Rocks on Compressive Strength and Weathering Grade

이 영 휘*¹ Lee, Young - Huy

김 용 준*² Kim, Yong - Jun

박 준 규*³ Park, Jun - Kyu

Abstract

The physical and mechanical properties of the sedimentary rocks deposited in Taegu and Kyongbuk region have been measured in the laboratory and at the field. Four kinds of rocks such as the shale, the mudstone, the siltstone and the sandstone were the object of this study. In sedimentary rock joint, bedding made it impossible to extract cores for uniaxial compressive test. Some correlations between the uniaxial compressive strength and the other characteristic values such as Point load index, Schmidt hammer rebound, Brazilian strength, P-wave velocity and Absorption ratio are made. The chemical and mineral compositions are also investigated by the XRF and XRD analysis.

In addition, the weathering grade of rocks are classified by the quantitative indices of Point load index, Schmidt hammer rebound and Absorption ratio.

요 지

본 연구에서는 대구·경북 지역에 분포하는 셰일, 이암, 실트스톤, 사암에 대한 물리·역학적 특성을 실험실과 현장에서 측정하였다. 절리와 층리가 잘 발달한 퇴적암에서 일축압축 시험을 위한 암석코어 시료를 확보하기가 어렵다. 그래서 퇴적암에 대해서 점하중강도, 슈미트해머 반발치, 압열인장강도, P-파 속도, 흡수율 등의 특성값들과 일축압축강도의 상관성을 분석하였다. 그 결과 퇴적암의 일축압축강도를 제반지수를 이용하여 평가할 때 기존의 상관식은 일축압축강도를 크게 평가하는 것으로 나타났다. 또한 암석의 화학성분과 광물성분을 XRF와 XRD분석을 통해 조사하였다.

추가적으로 육안식별에 의한 풍화등급 구분은 주관적인 경향에 따라 다르게 분류되는 혼란이 야기되므로 점하중강도, 슈미트해머 반발치, 흡수율과 같은 지수들을 이용하여 암석의 풍화도를 정량적으로 나타내었다.

Keywords : Sedimentary rock, XRF, XRD, Uniaxial compressive strength, Index test, Plane Griffith theory, Extended Griffith theory, Weathering grades

*1 정회원, 영남대학교 공과대학 토목도시환경공학부 교수

*2 영남대학교 대학원 토목도시환경공학부 박사과정

*3 영남대학교 대학원 토목도시환경공학부 석사과정

표 1. 암석의 화학성분

(단위 : 중량 백분율)

암 종	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
사 암 (대구 종합전시장)	63.15	11.59	9.39	3.52	1.78	2.23	0.13	3.77	0.49	-
실트스톤 (영덕)	65.65	16.32	5.68	4.96	3.90	1.69	0.08	1.02	0.58	0.12
이 암 (포항 창포동)	67.90	12.16	0.40	2.67	1.73	0.48	0.04	0.48	0.47	-
세 일 (대구 종합경기장)	59.53	15.44	8.28	5.83	3.59	3.81	0.08	2.56	0.70	0.17
세 일 (낙동강변)	58.65	15.66	7.13	6.12	3.35	4.85	0.11	3.31	0.63	0.20
세 일 (대구지하철2호선)	56.56	15.51	4.95	6.83	2.50	4.36	0.08	3.34	0.64	-
세 일 (대구 담티고개)	54.34	15.94	6.76	6.65	3.62	3.72	0.07	1.80	0.64	-

1. 서론

대구·경북지역의 지층은 주로 중생대 백악기에서 신생대 제 3기에 형성된 암반층으로 층리와 절리가 잘 발달되어 있는 셰일(shale), 이암(mudstone), 실트스톤(siltstone), 사암(sandstone) 등의 쇄설성 퇴적암류로 대부분 구성되어 있다. 최근 도시기반 시설의 확충, 지역간의 균형 발전을 도모하기 위한 목적으로 택지 및 단지개발, 도로 및 터널 등의 건설이 급증하고 있는 추세이다. 그러나 암반절취사면, 지하굴착, 터널 등의 설계와 시공에 절대적인 영향을 미치는 암석의 공학적 특성에 관한 연구는 화강암이나 화산암에 편중된 경향이 있다.

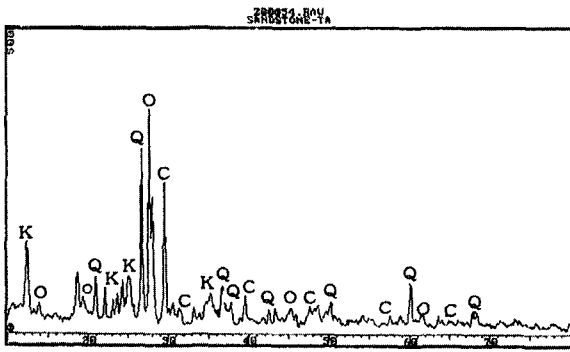
이에 정 형식 등(1997)은 국내에 분포하는 여러 종류의 암석에 대하여 풍화에 따른 강도특성을 규명하고 일축압축강도와 제반지수와의 상관성을 도출하여 외국의 연구결과와 상이함을 규명하였으나 퇴적암에 대한 연구는 다소 부족하였다. 이에 본 연구에서는 퇴적암의 기본적인 물리·역학적 특성을 실험적으로 조사하고, 특히 암반구조물 설계에서 요구되는 암석의 일축압축강도와 현상이나 실험실에서 비교적 간편하게 측정할 수 있는 점하중강도, 탄성파(P-파)속도, 슈미트해머 반발치(SHV), 압열인장강도 및 흡수율 등과의 상관성을 분석하고자 한다. 그리고 김 영수 등(1998)은 셰일의 층리에 따른 일축압축강도, 탄성파 속도, 압열인장강도의 비등방성을 규명하였다. 이와 관련하여 본 연구에서는 층리가 잘 발달한 퇴적암의 강도 특성을 동일한 조건에서 평가하기 위하여 층리면에 직각인 방향($\beta=0$)으로 시료를 채취하여 일축압축강도와 제반지수의 상관성을 회귀분석을 통해 산정하였다.

또한 퇴적암이 일반적으로 화성암이나 변성암에 비하여 환경변화에 따른 풍화속도가 빠르고 암석의 풍화정도가 강도특성에 큰 영향을 미치는 데 비해, 풍화등급이 육안 관찰에 의하여 정성적으로 분류(ISRM, 1981)되기 때문에 주관적인 기준의 차이가 풍화도 결정에 많은 혼란을 초래하고 있다. 이와 관련하여 점하중강도, 슈미트해머 반발치, 흡수율 등과 같은 암석의 특성치를 이용하여 풍화등급을 정량적으로 도출하고자 한다.

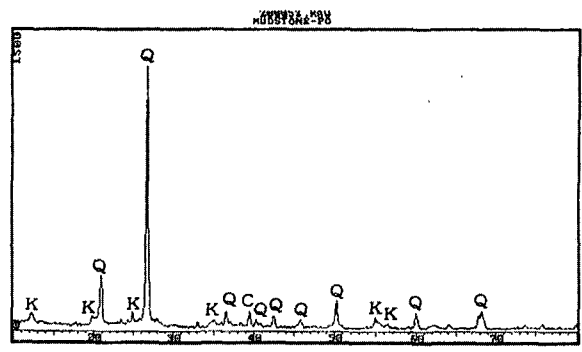
2. 암석의 화학성분 및 광물성분

암석의 화학성분을 정량적으로 나타내기 위하여 X-선 형광분광법(X-ray Fluorescence ; XRF)을 실시하였다. 표 1은 암석의 화학성분 함량을 중량백분율로 나타낸 것이다. 시험결과 7개 대상지역의 퇴적암은 주로 9~10개의 화학성분으로 구성되어있고, 실리카(SiO₂)와 산화알루미늄(Al₂O₃)이 대부분을 차지하고 있다.

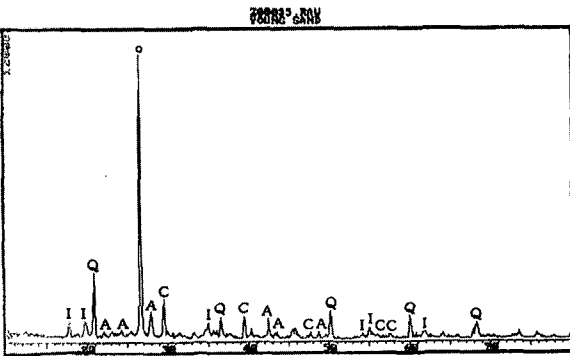
암석의 공학적 성질은 주로 광물 및 화학성분, 입자구조 및 배열 등의 인자에 의해서 직접적인 영향을 받게된다. 그러나 현재까지 알려진 내용으로는 이들 인자로서 공학적 성질의 정량적인 표현이 곤란한 실정이다. 점토광물 및 비점토광물의 정성적인 식별은 통상적으로 X선 회절분석(X-ray diffraction analysis ; XRD)을 통하여 가능하다. 본 연구에서 사용된 암석의 광물성분은 ASTM의 JCPDS (Joint Committee of Powder Diffraction Standards)에서 발행한 분말일부의 표준시료(bentonite, kaolinite, quartz)에서 직접 X선 회절분석을 실시하여 얻은 분말회절 자료를 이용하여, 실제 퇴적암에서 측정된 X선 회절분석 결과와



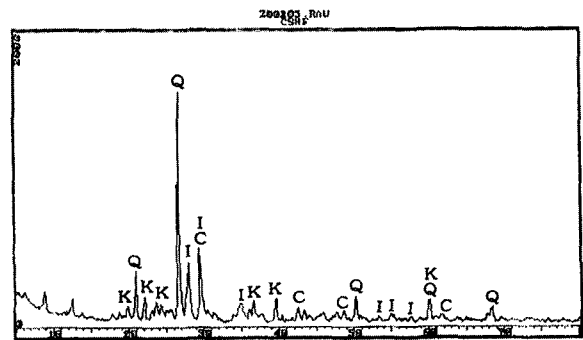
(a) 사암(대구 종합전시장)



(b) 이암(포항 창포동)



(c) 실트스톤 (영덕)



(d) 세일(대구 종합경기장)

그림 1. 퇴적암의 X-선 회절분석

비교하여 퇴적암의 광물성분을 파악하였다.

4종류의 암석에 대하여 광물성분을 분석한 결과 그림 1과 같이 나타났다. 분석결과에 의하면 대구·경북 일원에 분포하는 퇴적암에는 석영과 방해석이 모두 존재하였고, 세일과 실트스톤은 점토광물인 illite, kaolinite를 포함하고 있다. 또한 사암과 실트스톤은 규산염광물인 장석중 정장석, 조장석이 존재하고 있음을 확인하였다.

3. 일축압축강도와 제반지수와의 상관성

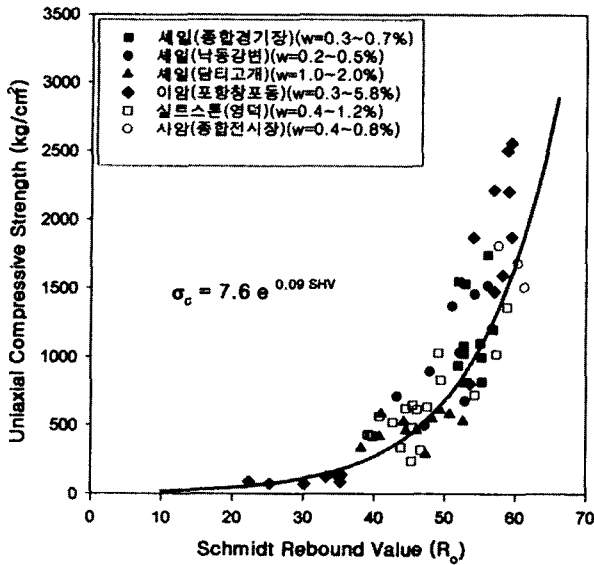
절리와 층리가 잘 발달한 퇴적암에서 일축압축강도를 평가하기에 적합한 암석코어를 채취하는 것은 대단히 어려울뿐만 아니라, 암석은 풍화가 진행됨에 따라 신선암에서 잔적토까지 폭넓은 범위의 재료로 변화하므로 한가지 시험방법만으로 암석의 일축압축강도를 평가하는 것은 불가능하다. 따라서 퇴적암의 일축압축 시험을 못할 경우 일축압축 시험 이외에 슈미트해머 반발시험, 점하중강도 시험, 압열인장 시험, 탄성파속도 시험, 흡수율 시험 등을 실시하여 일축압축강도를 추정할 필요성이 있다. 이에 제반지수를 이용하여 일축압축강도를 평가하기 위하여 일

축압축강도와 제반지수와의 상관성을 회귀분석을 이용해 산정하였다. 이때 암석의 강도와 관련된 제반지수들은 시료의 함수비에 크게 영향을 받으므로 각 시험은 일축압축 시료의 함수비와 동일한 자연함수비 상태에서 실시하였으며, 이때의 함수비를 각 실험결과에 나타내었다. 그리고 점하중강도 시험과 압열인장 시험은 파괴기구가 인장에 의해 지배되는 유사성을 가지고 있으므로, 이들에 대한 상관성을 비교하여 지수 함수식으로 나타내었다.

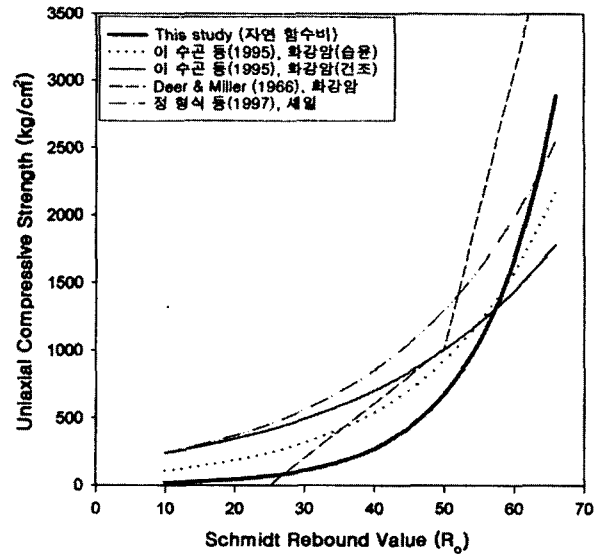
3.1 일축압축강도와 슈미트해머 반발치

Deere & Miller(1966)는 슈미트해머의 반발치(SHV)매우 신뢰성 있는 지수로 널리 이용되고 있으며, 국내의 연구로는 이 수근 등(1995)과 정 형식 등(1997)이 화강암과 세일에 대해서 실시한 연구가 있다.

본 연구에서 사용된 슈미트해머는 일본 KAMEKURA SEIKI사(모델명 : $\alpha - 650 \cdot X$)에서 제작한 것이며, 측정 가능한 반발치는 10 ~ 100이다. 그리고 일축압축시험장비는 일본 Schmadzu사(모델명 : UH-100A)의 UTM으로 최대용량은 100 ton이다.



(a)



(b)

그림 2. 일축압축강도와 슈미트해머 반발치의 관계

그림 2 (a)는 퇴적암의 슈미트해머 반발치와 일축압축강도의 관계를 지수 함수식으로 나타낸 것으로서 슈미트해머 반발치가 50이상일 때 일축압축강도가 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 슈미트해머 반발치가 55이상에서는 지수함수식이 일축압축 강도를 다소 작게 산정하고 있다. 이는 일축압축강도와 슈미트해머 반발치의 상관성은 Deere & Miller(1966)가 제안한 2중 선형관계가 더 적합한 것으로 나타났지만 관계식의 간편성을 위해 지수함수식으로 나타내었기 때문이다. 그리고 그림 2 (b)에 의하면 다른 연구자들의 상관식도 슈미트해머 반발치가 50~55범위에서 일축압축강도가 급변하고 있다. 또한 이들의 연구 결과는 퇴적암의 슈미트해머반발치에 대한 일축압축강도를 다소 크게 평가하고 있는 것으로 나타났으나 슈미트해머 반발치가 55이상에서는 본 연구결과가 다소 큰 일축압축강도를 나타내고 있다. 위의 상황들을 고려해볼 때 일축압축강도 평가를 위한 슈미트해머 반발치의 값은 55이하가 적합한 것으로 판단된다. 아래의 식(1)에는 본 연구에서 실험을 통하여 얻은 퇴적암의 일축압축강도와 슈미트해머 반발치의 상관식과 상관도(r^2)를 나타내었다.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 7.6 e^{0.09SHV} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \\ r^2 &= 0.83 \end{aligned} \quad (1)$$

3.2 일축압축강도와 점하중강도

점하중강도 시험은 현장에서 할 수 있는 간단한 역학적

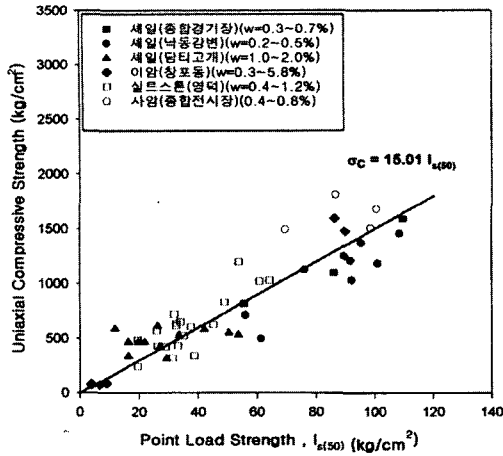
험 중의 하나로써 일축압축강도(σ_c)를 추정하기 위해서 쓰이는 간접 강도시험중 가장 많이 사용되는 시험이다. 일반적으로 점하중강도 시험을 통하여 얻어지는 점하중강도는 무수정 점하중강도 I_s 로 표시되며, 직경 50mm에 대한 시료의 강도로 환산된 수정 점하중강도 $I_{s(50)}$ 을 얻어 일축압축강도와 비교를 한다. 이때 점하중강도를 산정하는 식은 아래의 (2), (3)에 나타나 있다.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}, D_e^2 = 4WD/\pi \text{ (축방향 시험)} \quad (2)$$

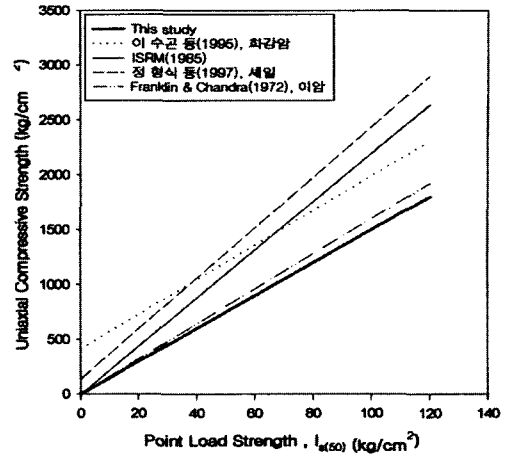
$$I_{s(50)} = F \cdot I_s, F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^m \quad (3)$$

여기서 W = 시료두께, D = 시료직경, F 는 크기보정계수로써 지수 $m = 2(1 - n)$ 이다. n 은 $\log P - \log D_e^2$ 의 기울기이며 크기가 다른 동일한 암석에 대해서 실험을 통해 얻어지는 값이다. 본 연구에서는 크기보정계수(F)를 ISRM에서 제안한 지수 $m = 0.45$ 를 이용하여 산정하였다. 그리고 점하중 시험에 사용된 시험기구는 영국의 ELE 제품(모델명: 77-0100)으로 하중범위 0 ~ 5.5KN까지는 0.1KN으로 새겨져 있고 0 ~ 55KN까지 1KN 간격으로 눈금이 새겨진 저압용과 고압용의 2개의 하중 gauge로 구성되어 있다.

ISRM(1985)에서는 점하중강도($I_{s(50)}$)와 일축압축강도의 시험결과를 분석하여 일축압축강도는 점하중강도의 22배인 것으로 나타내었다. 한편 비등방성 이암에서 일축압축강도는 점하중강도의 16배인 것으로 밝혀졌으며



(a)



(b)

그림 3. 일축압축강도와 점하중강도와의 관계

(Franklin & Chandra, 1972), Wyllie(1992)는 여러 종류의 비등방성 암석에서 일축압축강도는 점하중강도의 15~50배 범위에 있다고 주장하였다. 따라서 점하중강도로 일축압축강도를 추정하기 위해 제안된 상관식들을 사용하기 전에 대상 암석에 대하여 기존의 제안식들이 신뢰성 있게 사용될 수 있는지를 검토해야 한다.

그림 3 (a)에서는 NX크기 코어 시료의 퇴적암에 대해서 축방향으로 재하하여 얻은 점하중강도와 일축압축강도의 상관성은 선형적인 관계로 나타났다. 그리고 그림 3 (b)에서 나타난 ISRM (1985)이나 다른 연구결과는 점하중강도에 대한 대구·경북지역에 분포하는 퇴적암의 일축압축강도를 크게 평가하는 것으로 나타났다. 아래의 식 (4)에서는 본 연구에서 실험을 통하여 얻은 퇴적암의 σ_c 와 $I_{s(50)}$ 의 상관식과 상관도(r^2)를 나타내었다.

$$\sigma_c = 15.01 \times I_{s(50)} \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \quad r^2 = 0.82 \quad (4)$$

3.3 일축압축강도와 압열인장강도

인장강도는 암석과 같은 취성재료에 있어서 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다. 암석의 인장강도는 시험편의 단면에 수직으로 균등한 인장하중을 가하는 직접인장 시험과 압열인장 시험(Brazilian test), 굴곡 시험(bending test)과 같은 간접인장 시험법이 있다. 이와같은 시험방법 중 암석의 순수인장강도를 얻기 위하여 직접인장 시험이 가장 효과적이지만 시험기기 및 시험편의 가공과 제작이 어렵기 때문에 현재까지는 주로 간접인장 시험 중 압열인장 시험이 많이 사용된다. 본 연구에서 압열인장 시험에 사용된 압축기는 일본 Schmadzu사(모텔명 :

SFL-250 KANG) 제품으로 최대하중은 25 ton이다.

Mellor & Hawkes(1971)가 묘사한 간접인장 시험중 압열인장 시험은 취성재료에 있어서 공기건조나 포화상태에서 직접인장강도와 거의 1:1의 관계를 나타내어 암석의 인장강도를 측정하기 위한 압열인장 시험이 적합한 것으로 나타내었다. 그리고 암석의 인장강도와 일축압축강도의 특정한 관계를 예측하는 Griffith 이론은 plane Griffith 이론, extended Griffith 이론 등이 있다.

plane Griffith 이론은 2차원 상에서 파괴가 발생할 때 최대, 최소주응력 σ_1, σ_3 와 일축인장응력 T_0 의 관계는 아래의 식 (5)와 같다.

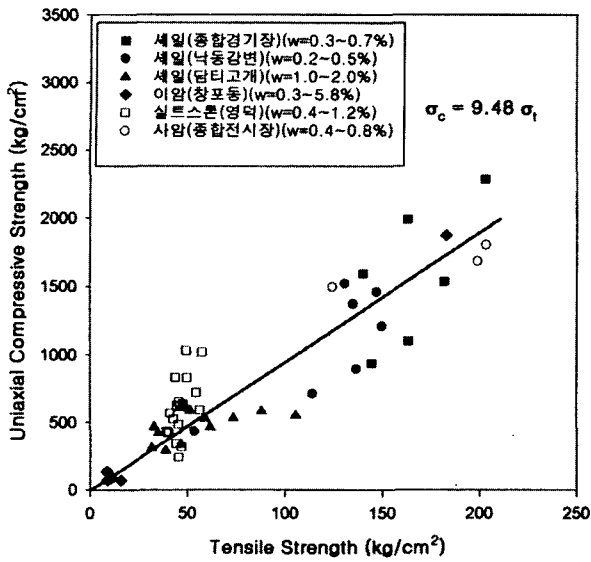
$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)^2 &= 8 T_0 (\sigma_1 + \sigma_3), \text{ if } \sigma_1 + 3 \sigma_3 > 0 \\ \sigma_3 &= -T_0, \text{ if } \sigma_1 + 3 \sigma_3 < 0 \end{aligned} \quad (5)$$

이때 $\sigma_3 = 0$ 이면, 일축압축응력 $\sigma_1 = 8 T_0$ 가 된다. extended Griffith 이론은 plane Griffith 이론이 3차원으로 확장된 개념으로써 그 관계는 아래의 식 (6)과 같다.

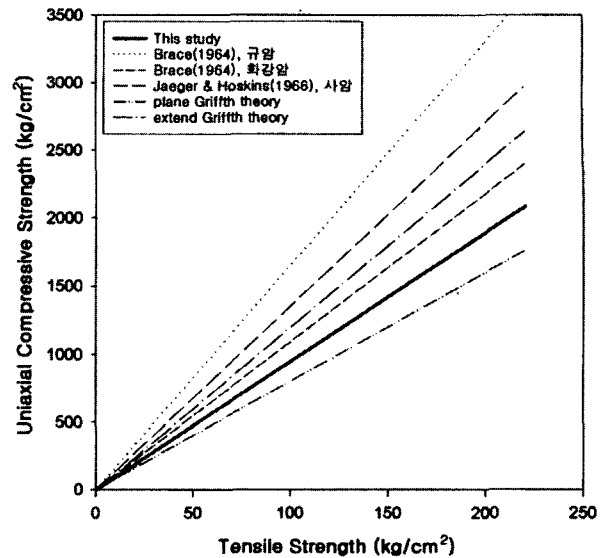
$$\begin{aligned} (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 &= 24 T_0 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ \text{or } \tau_{oct}^2 &= 8 T_0 \sigma_{oct} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 이면, 일축압축응력은 $\sigma_1 = 12 T_0$ 가 된다. 그리고 τ_{oct} 은 팔면체 전단응력(octahedral shear stress)이고, σ_{oct} 은 팔면체 연직응력(octahedral sheatress)이다.

그림 4 (b)에서 Jaeger & Cook(1971)이 나타낸 여러 연구자들의 시험결과는 extended Griffith이론이 더 적합한



(a)



(b)

그림 4. 일축압축강도와 압열인장강도의 관계

것으로 보고하고 있다. 본 연구에서 퇴적암의 일축압축강도와 인장강도의 비는 plane Griffith 이론보다 크며 extended Griffith 이론보다는 낮게 나타났다.

그림 4 (a)에서 압열인장 시험에 의해 측정된 퇴적암의 압열인장강도와 일축압축강도의 상관성은 선형적인 관계로 나타났으나 실트스톤의 압열인장강도는 일축압축강도와 상관성이 적은 것으로 나타났다. 아래의 식(7)에는 본 연구에서 실험을 통하여 얻은 퇴적암의 압열인장강도 (σ_t)와 σ_c 의 상관식과 상관도(r^2)를 나타내었다.

$$\sigma_c = 9.48 \times \sigma_t \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \quad r^2 = 0.82 \quad (7)$$

3.4 일축압축강도와 탄성파속도

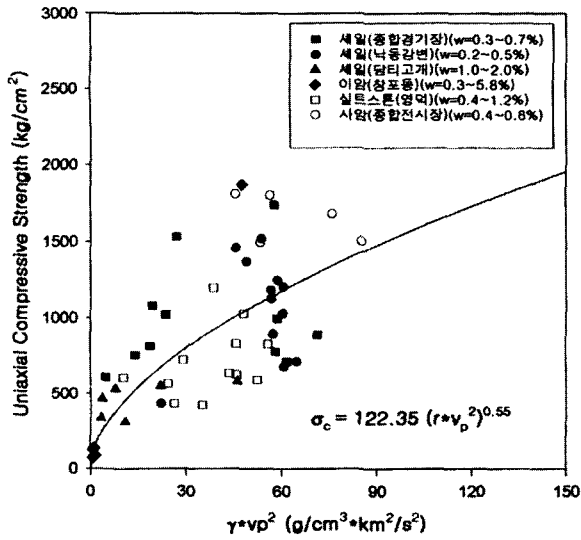
암석의 탄성파속도는 암석의 동적인 성질을 파악하기 위해서 실시된다. 그리고 탄성파속도는 암석의 밀도, 공극율, 함수비, 절리 등에 크게 의존하므로 암석등급 구분 자료로서 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 측정된 탄성파 시험은 고전압 펄스가 암석시료 내부를 전파하는 속도를 직접 측정하는 투과법이 사용되었다. 그리고 셰일과 같은 비등방성 암석에 대해서 감쇄비를 적게하기 위해서 저주파수의 고전압 펄스를 사용하였다. 본 연구에 사용된 탄성파 시험장비는 미국의 SBEL의 Seismic Analyzer(모델명: SA2008)를 이용하여 파를 발진하고, Analog Oscilloscope(모델명: TAS 250)를 이용하여 파의 trace를 화면에 도시한다. 이때 Oscilloscope의 화면을 통해 측정된

지연시간은 digital 신호로 Seismic Analyzer에 표시된다. 이때 사용된 주파수는 200KHz이고 출력전압은 $1.2V_{p-p}$ [V]이었다.

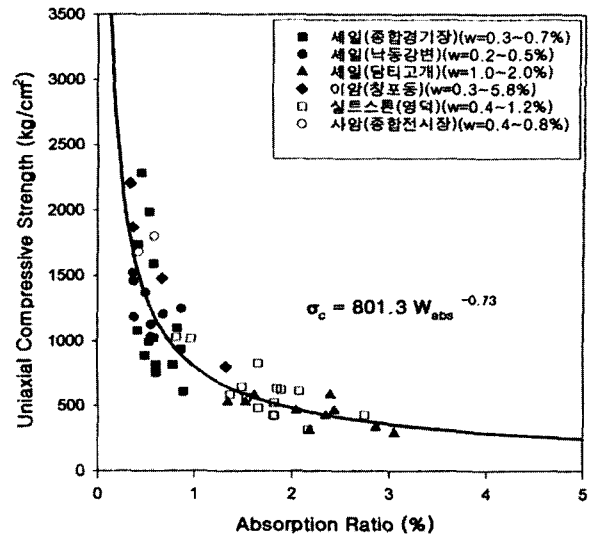
그림 5 (a)는 퇴적암의 탄성파(P- 파) 속도와 일축압축강도와의 관계에서 암석의 단위중량(γ)을 고려하여 지수함수식으로 나타내었지만 자연함수비 상태에서 실시한 탄성파속도와 일축압축강도의 상관성은 다소 산만한 것으로 나타났으며, 아래의 식 (8)에는 퇴적암의 탄성파속도와 일축압축강도의 상관식과 상관도(r^2)를 나타내었다. 그림 5 (b)는 Inoue & Ohomi(1981)가 연암(응회암) 시료에 대하여 실시한 시험결과를 발췌하여 회귀분석한 결과이다. 탄성파(P- 파) 속도와 일축압축강도의 관계에서 암석의 단위중량을 고려하여 그 상관성을 분석한 결과에 의하면 공기 건조 상태의 시료는 상관성($r^2=0.34$)이 거의 없는 것으로 나타났으나, 포화된 시료에 대해서는 높은 상관성($r^2=0.90$)을 얻었다. 이는 연암과 같이 공극이 큰 암석에서는 탄성파 속도가 공극에 큰 영향을 받은 것으로 사료되며, 공극이 물로 포화되면 탄성파 속도의 감쇄비는 적은 것으로 판단된다.

실제적으로 암석은 많은 미소균열을 포함하고 있으며, 특히 층리면이 뚜렷한 퇴적암과 같이 불연속면이 존재하는 암석에 대해서 탄성파속도를 이용한 일축압축강도의 추정에는 암석 내부에 존재하는 공극을 물로 포화시킨 상태에서 실시하는 것이 바람직하다고 판단된다.

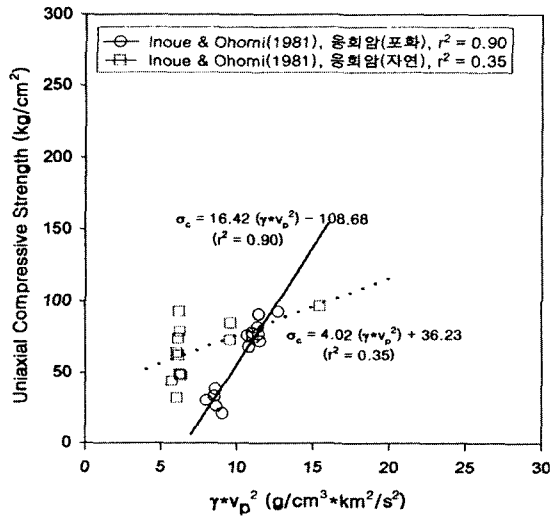
$$\sigma_c = 122.35 \times (\gamma \cdot v_p^2)^{0.55} \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \quad r^2 = 0.76 \quad (8)$$



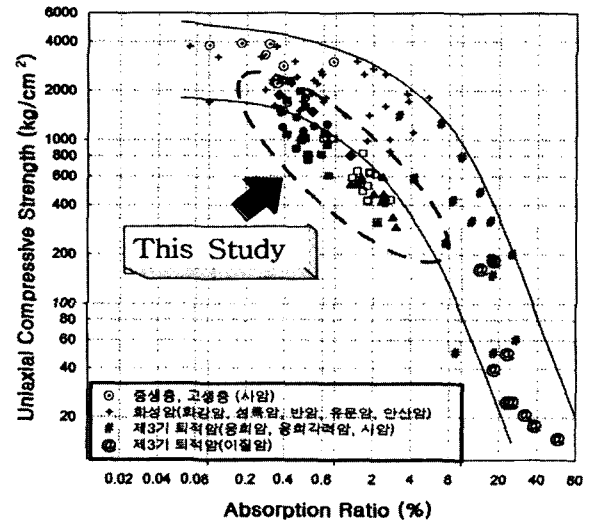
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 5. 일축압축강도와 탄성파속도의 관계

그림 6. 일축압축강도와 흡수율의 관계

3.5 일축압축강도와 흡수율

흡수율은 암석시료의 공극에 물이 어느정도 침투하는가를 나타내는 것으로써 암석의 풍화정도를 가장 잘 표현해주는 물리적인 성질이다. 그리고 흡수율은 신선하고 치밀한 암석에서는 작고 연암에서는 크다. 菊地宏吉(1990)는 퇴적암과 화성암에 대하여 일축압축강도와 흡수율의 관계를 양대수로 나타내어 흡수율의 증가에 따른 일축압축강도의 감소를 그림 6(b)와 같이 나타내고, 흡수율 3%와 이것에 대응하는 일축압축강도를 800~1,000 kg/cm²에서 2가지 그룹으로 구분하였다. 첫 번째 부분은 흡수율에 따른 일축압축강도의 차이는 작고, 두 번째 부분은 흡수율에

다른 일축압축강도의 차이가 현저하다. 이것은 암석의 구성입자 사이에 존재하는 공극의 크기가 첫 번째 부분에서는 일축압축강도에 미치는 영향이 작고, 두 번째 부분은 일축압축강도에 크게 영향을 끼치는 것으로 나타내었다.

본 연구에서의 대상시료인 퇴적암은 菊地宏吉(1990)의 실험결과와 유사한 형상을 나타내었으나, 흡수율 1%에서 일축압축강도가 800~1,000 kg/cm²를 나타내어 菊地宏吉(1990)의 연구결과와는 다소 상이하다. 이는 비교적 강도가 높고 치밀한 구조를 가진 화성암과 비교적 고결도가 낮은 신생대 제3기의 퇴적암의 시험결과라는 것을 고려할 때, 대구·경북 지역에 분포하는 퇴적암(중생대 백악기)에서 흡수율이 암석의 일축압축강도에 영향을 미

치는 경계값은 1%정도로써 菊地宏吉(1990)의 3%와는 다소 차이가 있다. 그림 6 (a)에 나타난 바에 의하면 퇴적암은 흡수율 1%이하에서 흡수율의 변화에 따른 일축압축강도의 변화폭이 크게 나타나고 있으므로, 1%이하의 흡수율에서 일축압축강도를 평가할 때 세심한 주의가 필요하다. 아래의 식 (9)에는 본 연구에서 실험을 통하여 얻은 퇴적암의 흡수율과 일축압축강도의 상관식과 상관도(r^2)를 나타내었다.

$$\sigma_c = 801.3 \times W_{abs}^{-0.73} \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \quad r^2 = 0.81 \quad (9)$$

3.6 압열인장강도와 점하중강도

가장 일반적으로 사용되는 암석의 인장강도 시험은 점하중 시험과 압열인장 시험이다. 비록 점하중 시험이 일축압축강도를 결정하기 위한 간접시험으로 더 많이 사용이 되더라도 그 파괴양상은 재하점 사이를 연결하는 직선을 포함한 면에서 인장응력에 의해 파괴된다. 본 연구에서는 퇴적암의 인장강도를 구하기 위하여 압열인장강도와 점하중강도($I_{s(50)}$)의 상관성을 비교하고자 한다. 그러나 이 두 시험방법은 하중형태의 차이 이외에도 아래의 2가지 측면에서 시험의 차이가 있다.

- (1) 점하중 시험에서 파괴면은 어느 방향으로도 발생할 수 있다. 그러나 선하중 시험에서는 파괴면이 미리 결정되어 있다.

(2) 점하중 시험에서 응력장은 매우 복잡하다. 그러나 선하중 시험시 접촉면에서 응력집중이 발생하더라도 횡방향 응력장은 이론적으로 동일하다.

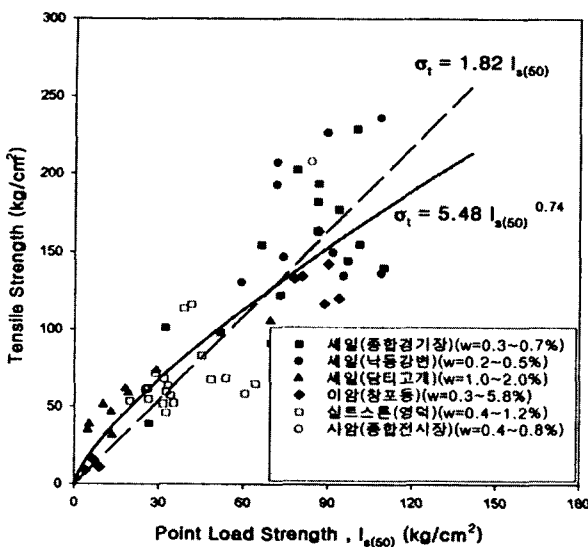
선하중에서 야기되는 인장응력($\sigma_{t,L}$)은 식 (10)과 같다.

$$\sigma_{t,L} = \frac{2 P_L}{\pi t d} \quad (10)$$

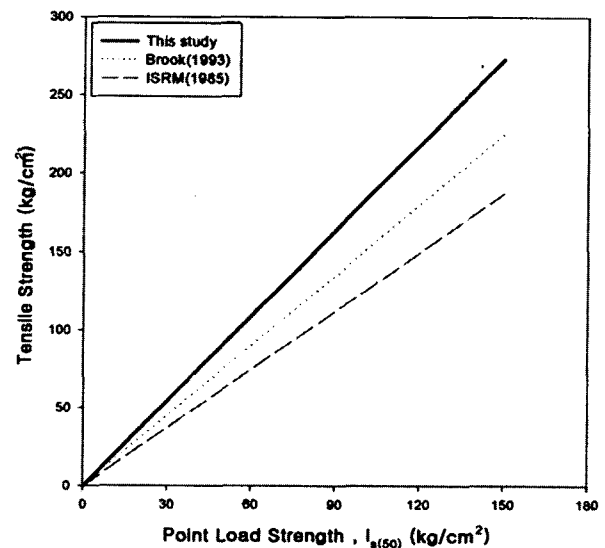
여기서 P_L = 선하중, t = 시료의 두께, d = 시료 직경이다. 파괴시 응력값이 인장점하중 시험에서 인장력은 파괴면에서 일정하지 않다. 그래서 이 결과의 해석은 상당히 어렵다. 현재 점하중에 의해 야기된 인장응력을 결정하는 방법은 Frocht(1974)에 의해 개발된 공식을 사용하고 있다. 이 해석기법에 의하면, 시료가 연직방향으로 점하중 P_p 를 받고 있다면 이때 시료의 연직면에 작용하는 수평인장력은 $\frac{P_p}{\pi}$ 이다. 만약 점하중(P_p)이 파괴된 시료면에 고르게 분포한다면 평균인장응력($\sigma_{t,P}$)은 식 (11)과 같이 주어진다.

$$\sigma_{t,P} = \frac{P_p}{\pi t d} \quad (11)$$

크기가 동일한 시료에 대해서, 압열인장 시험시 파괴면의 방향과 유사하도록 축방향으로 실시한 점하중 시험에서 얻어진 인장강도는 이론적으로 같아야 하며 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.



(a)



(b)

그림 7. 압열인장강도와 점하중강도의 관계

$$\sigma_{t,L} = \sigma_{t,P} = \sigma_t$$

$$\frac{P_P}{\pi t d} = \frac{2 P_L}{\pi t d} \text{ and } P_P = 2 P_L \quad (12)$$

식 (12)에 의하면 파괴시 점하중은 선하중보다 2배 크게 나타난다. 그러나 여러 연구자들의 실험결과에 의하면 점하중이 선하중보다 작게 나타났다. Peng(1976)은 점하중을 받는 암석시료의 응력분포에 대한 유한요소 해석을 실시하였으며, 그 결과에 의하면 파괴면내의 접선인장력의 합은 점하중의 2배 정도로 나타나 암석의 인장강도는 점하중 시험에서 얻어진 것 보다 크다.

본 연구에서는 퇴적암에 대하여 점하중강도 시험에서 얻은 점하중강도($I_{s(50)}$)와 압열인장 시험에서 얻은 인장강도의 상관성을 비교하여 그림 7에 나타내었다. ISRM (1985)에서 제안한 압열인장강도나 직접인장강도는 점하중강도($I_{s(50)}$)의 약 1.25배라고 제안하였으며, Brook(1993)은 직접인장강도는 점하중강도($I_{s(50)}$)의 1.5배인 것으로 나타내었다. 그러나 본 연구결과에 의하면 1.82배 정도의 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 그 관계식의 비교를 그림 7 (b)에 나타내었다.

그림 7 (a)는 두 지수간의 상관성을 규명하기 위하여 NX core 시료에서 축방향으로 구한 점하중강도($I_{s(50)}$)와 압열인장 시험에 의해 측정된 압열인장강도(σ_t)의 상관성을 나타낸 것이다. 압열인장강도와 점하중강도의 관계를 선형적으로 가정할 경우 상관도(r^2)는 0.74이다. 그러나 최적의 회귀식은 식 (13)과 같이 지수함수식으로 나타났으며,

이 식을 이용하면 점하중강도 시험에 의해서 암석의 인장강도를 추정할 수 있다. 그러나 점하중강도($I_{s(50)}$)가 70 kg/cm² 이상에서는 산만한 분포를 나타내고 있다. 아래의 식 (13)에는 본 연구에서 실험을 통하여 얻은 퇴적암의 압열인장강도(σ_t)와 점하중강도($I_{s(50)}$)의 상관식과 상관도(r^2)를 나타내었다.

$$\sigma_t = 5.48 \times I_{s(50)}^{0.74} \text{ (kg/cm}^2\text{)}, \quad r^2 = 0.80 \quad (13)$$

4. 풍화도에 따른 퇴적암의 공학적 특성

풍화에 따른 암석과 암반의 분류는 지질학적인 정보와 공학적인 정보에 의해서 이루어지고 있다. 이러한 분류에 있어서 풍화에 따른 암반의 완벽한 묘사를 위해서는 암체를 구성하고 있는 재료와 불연속면에 대한 분포 및 특성에 관한 정보가 필요하며, 암석은 그 기원과 광물성분이 풍화 단계에 따라 어떻게 변화되었는지가 중요하다. 이에 Lee & Freitas(1989)는 한국 화강암에 대하여 풍화정도를 나타내는 육안적 식별을 외국의 경우와 달리 묘사하였다. 그리고 암반의 풍화등급 구분은 절리면으로 경계지워진 block에서 절리면 근처에서의 암석의 풍화도와 암석 block 내부의 풍화도를 고려하여 풍화도를 결정하였다. 일반적으로 암반에서 발생하는 풍화는 암반내 발달한 불연속면을 따라 발생하며, 암반절리면 상에 분포하는 암석의 풍화도는 암반의 풍화도를 구별하는데 이용이 되고 있으며, 이를 이용한 화강암의 풍화등급 구분은 비교적 명확하게 제시

표 2. 암반의 풍화도 판정 (ISRM, 1981)

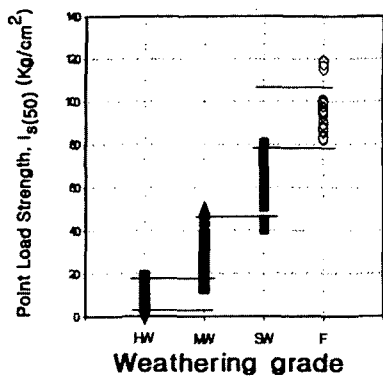
단계	구분	분 류 기 준
I	F (Fresh)	주요 절리면에 대한 육안적인 변색이나 암반의 풍화를 볼 수 없다.
II	SW (Slightly Weathered)	절리면과 암석의 변색은 풍화에 대한 지표가 되는데 모든 암반은 풍화에 의해 변색되고 신선한 상태 극히 약해져 있다.
III	MW (Moderately Weathered)	암반의 절반이상이 변질되어 있거나 흙으로 풍화되어 있다. 지반내 신선하거나 변색된 암석은 연속 골격 혹은 핵석상태로 존재한다.
IV	HW (Highly Weathered)	암반이 절반이상 분해되거나 흙으로 붕괴되어 있다. 지반내 신선하거나 변색된 암반은 불연속적 혹은 핵석상태로 존재한다.
V	CW (Completely Weathered)	모든 암반이 분해되었거나 흙으로 풍화 되어 있다. 원래 의 암석구조는 그대로 남아있다.
VI	RS (Residual Soil)	모든 암반이 완전히 흙으로 변화되어 있다. 암석조직은 파괴되었고 체적상의 커다란 변화가 있지만 운반되지는 않은 상태이다.

신선(fresh) : 풍화에 대한 흔적을 볼 수 없다.

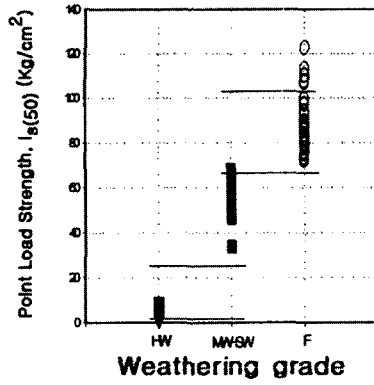
변색(discoloured) : 원래의 신선한 암석 색깔이 변화되어 색깔의 변화정도가 지표가 된다. 색깔변화가 주요 광물구성에 한정된다면 이것을 언급하여 야 한다.

분해(decomposed) : 암석의 원래 암조직은 여전히 남아 있는 흙으로 풍화되어 있으나 일부 혹은 모든 광물입자가 변질되어 있다.

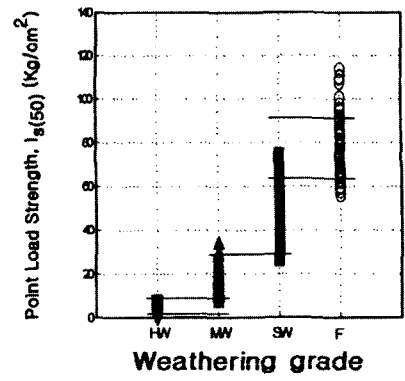
붕괴(disintegrated) : 암석의 원래 암조직은 여전히 남아 있는 흙으로 풍화되어 있으나 부수러지기 쉽고 광물입자가 변질되어 있다.



(a) 실트스톤

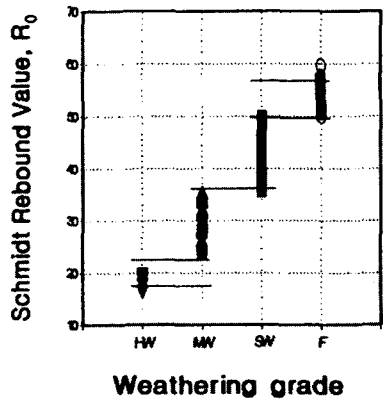


(b) 이암

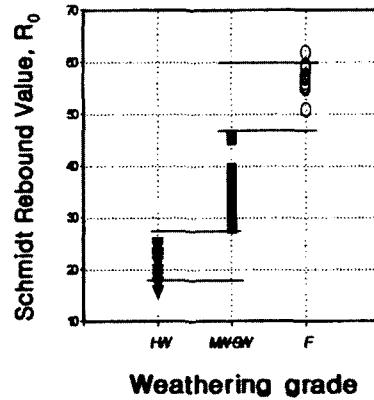


(c) 세일

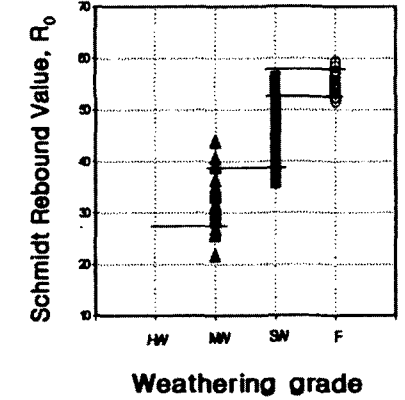
그림 8. 풍화등급에 따른 점하중강도



(a) 실트스톤

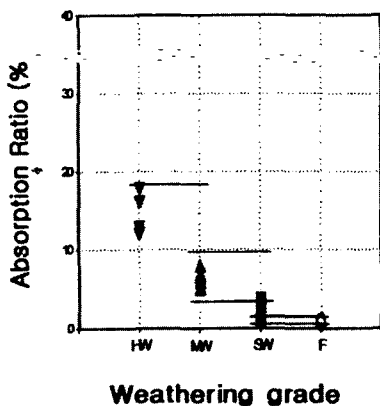


(b) 이암

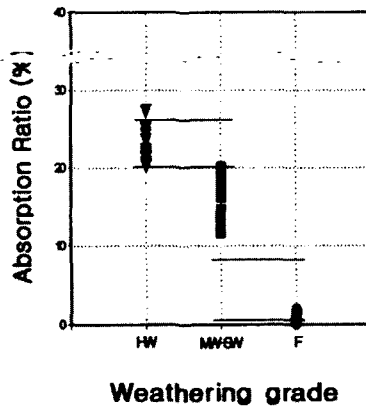


(c) 세일

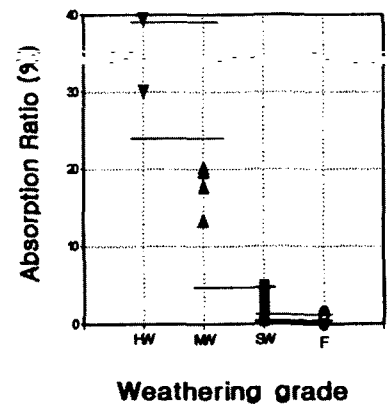
그림 9. 풍화등급에 따른 슈미트해머 반발치



(a) 실트스톤



(b) 이암



(c) 세일

그림 10. 풍화등급에 따른 흡수율

되고 있으나 세립질로 구성된 퇴적암에서 풍화정도를 구분하는 기준은 아직 구체적으로 제시되지 않았다. 그리고 풍화정도를 나타내는 표현은 연구자에 따라 다소 차이가

있다. 이에 본 연구에서는 불연속면을 따라 발생한 암반의 풍화등급 구분을 위한 묘사를 표 2와 같이 ISRM(1981)에서 제안한 기준에 따라 육안식별에 의해 색깔(colour), 구

조(fabric)의 변화를 이용하여 퇴적암의 풍화등급을 6단계로 구분하였다.

그러나 육안식별에 의한 암석과 암반의 풍화에 따른 분류는 주관적이어서 혼란이 야기되므로 객관적인 평가에 의해 정량적인 값으로 묘사하기 위해서 불연속면을 따라 발생한 풍화된 암석에 대하여 점하중강도, 슈미트해머 반발치, 흡수율을 이용하여 암반의 풍화도를 정량화하였다.

육안관찰에 의한 풍화도 판정은 실트스톤과 세일의 경우 ISRM(1981)의 풍화도 판정 기준에 따라 분류가 가능하였으나, 이암은 풍화진행 속도가 상당히 빨라서 육안식별에 의해 SW, MW에 해당하는 시료를 구분하기가 곤란하였다. 그래서 이암의 풍화도 판정은 SW와 MW를 구별하지 않고 하나의 풍화등급(SW ~ MW)으로 나타내었다. 그리고 CW는 그 특성이 흙과 유사하여 정량적으로 나타내지 못하였다.

실트스톤, 이암, 세일에 대해서 실시한 제반지수 시험결과에 의하면 동일한 풍화도 판정에서도 그 특성값이 다소 넓은 범위의 값을 나타내었다. 그래서 풍화도에 따른 암석의 특성을 정량적으로 도출하기 위해서 시험 결과로부터

평균값을 산정하고 평균값에 대한 95% 신뢰구간을 결정하였다. 이때 신뢰구간을 결정하기 위해서는 시험된 data들이 정규성을 만족하여야 한다. 만약 분석된 data가 정규성 검정결과 유의수준($\alpha=0.05$)보다 작으면, 분석된 data에 대하여 변수변환을 실시하여 정규성을 만족하도록 하였다.

육안식별에 의해 구분된 실트스톤, 이암, 세일에 대한 풍화등급에 따른 점하중강도, 슈미트해머 반발치 및 흡수율을 각각 그림 8, 그림 9, 그림 10에 나타내었다.

그림 8 ~ 그림 10에 의하면, 퇴적암은 풍화가 진행됨에 따라 점하중강도, 슈미트해머 반발치는 감소하고 흡수율은 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 세일은 HW에서 슈미트해머 반발치가 측정되지 않았다. 그리고 암석은 풍화등급에 따른 제반시험의 특성이 비교적 분포가 넓고 제반지수 값들이 중복되는 부분이 있으므로 풍화등급에 따른 제반지수의 범위를 구분할 필요성이 있다. 그래서 풍화등급에 따른 제반지수의 경계치는 각 값들의 평균값에 대한 표준편차를 이용하여 구분하였다. 이때 중복되거나 중복되지 않은 부분은 두 경계값의 중앙값에서 구분하였다. 이

표 3. 퇴적암의 풍화도에 따른 공학적 특성

			점하중강도($I_{s(50)}$) (kg/cm^2)	슈미트해머 반발치 (R_o)	흡수율 (%)
실트 스톤	F	평균 (범위)	91.16 (78.42~106.73)	53.35 (49.60~56.60)	0.74 (0.55~1.03)
		95% 신뢰구간	87.69 ~ 94.63	52.57 ~ 54.13	0.65 ~ 0.83
	SW	평균 (범위)	61.67 (47.32~78.45)	43.60 (36.70~49.60)	1.77 (1.03~3.10)
		95% 신뢰구간	58.74 ~ 64.60	42.47 ~ 44.73	1.67 ~ 1.87
	MW	평균 (범위)	31.02 (18.83~47.31)	29.51 (22.90~36.70)	5.87 (3.10~9.82)
		95% 신뢰구간	29.52 ~ 32.52	27.81 ~ 31.21	4.91 ~ 6.83
HW	평균 (범위)	7.83 (2.40~18.82)	19.18 (17.40~22.90)	14.47 (9.82~17.62)	
	95% 신뢰구간	6.83 ~ 8.83	17.86 ~ 20.50	11.10 ~ 17.84	
이암	F	평균 (범위)	83.00 (67.42~101.81)	56.62 (46.50~60.00)	1.09 (0.57~7.53)
		95% 신뢰구간	79.92 ~ 86.08	54.82 ~ 58.42	0.97 ~ 1.21
	SW-M W	평균 (범위)	54.54 (25.62~67.41)	34.53 (27.40~46.50)	16.23 (7.53~20.09)
		95% 신뢰구간	49.44 ~ 59.64	32.87 ~ 36.19	14.55 ~ 17.91
	HW	평균 (범위)	4.09 (1.12~25.62)	22.66 (18.30~27.40)	23.33 (20.09~25.68)
		95% 신뢰구간	3.73 ~ 4.45	21.27 ~ 24.05	22.37 ~ 24.29
혈암	F	평균 (범위)	75.25 (62.62~90.92)	55.03 (52.60~57.00)	0.67 (0.42~1.12)
		95% 신뢰구간	72.51 ~ 77.99	54.36 ~ 55.70	0.63 ~ 0.71
	SW	평균 (범위)	47.32 (28.17~62.64)	45.76 (38.40~52.60)	2.74 (1.12~8.91)
		95% 신뢰구간	43.73 ~ 50.91	43.14 ~ 48.38	2.56 ~ 2.92
	MW	평균 (범위)	14.19 (8.61~28.19)	33.81 (27.60~38.40)	17.45 (8.91~24.34)
		95% 신뢰구간	13.44 ~ 14.94	32.13 ~ 35.49	12.46 ~ 22.44
	HW	평균 (범위)	5.27 (2.53 ~8.63)	-	30.38 (24.34~38.91)
		95% 신뢰구간	4.73 ~ 5.81	-	30.25 ~ 30.51

때 평균값에 대한 신뢰구간이 범위를 벗어나는 경우가 발생하여, 위의 방법에서 결정된 범위내의 data를 이용해 평균값과 신뢰구간을 다시 결정하였다. 표 3은 퇴적암의 점하중강도, 슈미트해머 반발치, 흡수율 값의 범위(각각의 풍화등급에서 평균 ± 표준편차의 중앙값)와 이 범위에서의 평균값과 평균값에 대한 95% 신뢰구간을 나타내었으며, 이러한 분류는 퇴적암에서 풍화도에 따른 암반의 zone을 구분하는데 사용할 수 있다.

5. 결론

대구·경북 지역(대구, 영덕, 포항)에 분포하는 퇴적암에 대해서 XRF, XRD 분석을 통한 암석의 화학성분과 광물 성분 분석, 일축압축강도와 제반지수들의 특성 분석, 그리고 제반지수를 이용하여 풍화등급을 정량화하고 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 대구·경북 일원에 분포하는 4개의 퇴적암의 화학성분은 실리카(SiO₂)와 산화알루미늄(Al₂O₃)이 주성분이다. 그리고 광물성분 분석결과 석영과 방해석은 모든 암석에 존재하였으며, 세일, 실트스톤은 점토광물인 illite, kaolinite를 포함하고 있으며, 사암, 실트스톤은 규산염 광물인 장석중 정장석, 조장석이 존재하고 있음을 확인하였다.
- 2) 퇴적암의 일축압축강도와 제반지수의 상관성을 규명하기 위한 일련의 시험을 수행하여 그 상관식과 상관도(r²)를 아래에 나타내었다.
아래 결과에 의하면 대구·경북 지역에 분포하는 조사 대상 지역의 퇴적암에 대한 일축압축강도는 기존에 제안된 식을 이용할 경우 다소 크게 평가되는 것으로 나타났으며, 일축압축강도를 평가하기 위한 제반지수 시험 중에서 시험의 용이함과 상관성을 고려할때 슈미트해머 반발치, 점하중강도 시험이 적합한 것으로 판단된다.

특히, 일축압축강도 평가를 위한 슈미트해머 반발치의 값은 55이하가 적합하고, 층리면이 뚜렷한 퇴적암에서의 점하중강도와 일축압축강도의 상관식의 계수값은 15.01로써 ISRM에서 제안한 22보다 작게 나타났다.

- 3) 퇴적암과 같이 층리면이 뚜렷하거나 공극이 큰 암석에서 탄성과속도와 일축압축강도와 상관성을 비교할 때 암석 내부에 존재하는 공극을 몰로 포화시킨 상태에서 실시하는 것이 바람직하다. 그리고 대구·경북 지역에 분포하는 퇴적암은 흡수율 1%를 기준으로 하여 일축압축강도가 800~1,000 kg/cm²을 나타내고 경암과 연암의 구분 기준이 된다. 또한 퇴적암의 일축압축강도는 압열인장강도의 9.48배를 나타내어 plane Griffith 이론에 의한 것 보다 다소 크게 나타났으며, 점하중강도를 이용하여 암석의 인장강도를 추정할 수 있다.
- 4) 암반의 풍화도 판정은 암반내 분포하는 여러가지 풍화된 암석을 기준으로 하여 묘사되었다. 이때 절리면을 따라 발생한 암반의 풍화도를 정량적으로 묘사하기 위해 풍화정도에 따라 채취된 암석에 대하여 각각의 풍화등급에 따른 제반지수 값의 범위, 평균값 및 95% 신뢰구간을 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부 건설기술연구개발사업(과제번호 970007-1)에 의하여 연구비를 지원 받았으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김영수, 허노영, 서인식(1998), "퇴적암의 비등방 특성에 관한 연구(대구지역)", 한국지반공학회지, 제14권, 제4호, pp.5~15.
2. 이수곤, 이승(1995), "슈미트해머 수치를 이용한 한국 화강암의 일축압축강도 추정방법", 대한토목학회논문집, 제15권, 제1호, pp.199~210.

상관관계	상관식	상관도 (r ²)
일축압축강도(σ _c) - 슈미트해머 반발치(SHV)	$\sigma_c = 7.6e^{0.09SHV}$	0.83
일축압축강도(σ _c) - 점하중강도(I _{s(50)})	$\sigma_c = 15.01 \times I_{s(50)}$	0.82
일축압축강도(σ _c) - 압열인장강도(σ _t)	$\sigma_c = 9.48 \times \sigma_t$	0.82
일축압축강도(σ _c) - 탄성과속도(P _{wave})	$\sigma_c = 122.35 \times (\gamma \cdot v_p^2)^{0.55}$	0.76
일축압축강도(σ _c) - 흡수율(W _{abs})	$\sigma_c = 801.3 \times W_{abs}^{-0.73}$	0.81
압열인장강도(σ _t) - 점하중강도(I _{s(50)})	$\sigma_t = 5.48 \times I_{s(50)}^{0.74}$	0.80

3. 이영희, 박영목, 김용준, 금병술(1998), "퇴적암의 풍화도에 따른 특성과 일축압축강도와 제반지수와의 상관관계", 토목학회 학술발표회 논문집(Ⅱ)토질/터널, 서울, pp.131~134.
4. 정형식, 유병목(1997), "암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제13권, 제6호, pp.71~91.
5. 菊地宏吉(1990), 토목지질공학(윤지선 역), 구미서관, pp.63~64.
6. Brook N.(1993), The Measurement and Estimation of Basic Rock Strength, in Compressive Rock Engineering(edited by John A. Hudson), Vol. 3- I , Pergamon Press, pp.41~66.
7. Deere 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.
8. Franklin, J. A. and Chandra, A.(1972), "The Slake-Durability Test", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 9, pp.325~341.
9. Frocht, M. M.(1974), Photoelasticity, Vol 2, Willey, New York, 39p.
10. Inoue, M. and Ohomi, M. (1981), "Relation between Uniaxial Compressive Strength and Elastic Wave Velocity of Soft Rock", Proc. of Int. Sym. on Weak Rock., Tokyo, pp.9~13.
11. ISRM(1981), "Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities", Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, 31p.
12. ISRM(1985), "Suggested Methods for Determining Point Load Strength", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22. No. 2, pp.51~60.
13. Jaeger J. C. and Cook N. G. W.(1971), Fundamentals of Rock Mechnics, Chapman and Hall, England, pp.101~194.
14. Lee, S. G. and 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, London, Vol. 22, pp.31~48.
15. Mellor, M. and Hawkes, I.(1971), "Measurement of Tensile Strength by Diametral Compression of Disc and Annuli", Engineering Geology, pp.173~225.
16. Peng, S. S.(1976), "Stress Analysis of Cylindrical Rock Discs Subjected to Axial Double Point Load", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol 13., pp.97~101.
17. Wyllie, D. C.(1992), Foundations on Rock, Chapman & Hall, England, pp.54~56.

(접수일자 1998. 11. 26)