

암석의 역학지수 추정을 위한 간접시험법의 거동특성

민덕기^{1)*}, 문종규²⁾, 노재술³⁾

Behavioral Characteristics of Rocks on Indirect Tests

Tuk-Ki, Min, Jong-Kyu Moon, Jai-Sool Ro

Abstract To analyze the behavioral characteristics of rocks on indirect tests and uniaxial compressive strength, researchers have investigated 1417 pieces of rock block, which include igneous, metamorphic and sedimentary rocks in Korea. The same behavioral characteristics have been shown in every type of sedimentary rock and in the same species of rock in the case of Brazilian strength application. This suggests that correlations of rocks for geological considerations can lead to high reliability of the experimental results in case of an indirect method.

Key words Uniaxial compressive strength, Brazilian test, Igneous rock, Metamorphic rock, Sedimentary rock, Behavioral characteristics.

초 록 본 연구는 국내에서 출토되는 화성암, 변성암, 퇴적암 1,417개 블록의 일축압축강도를 간접방법으로 도출하는 과정에서 각 시험법에 따른 강도발현의 거동 특성을 분석하였다. 퇴적암은 간접시험법에 따라 암석군에 상관없이 동일거동을 보이며, 압열인장강도를 매개로 시행한 과정에서는 암석군끼리 동일 거동 특성을 나타내고 있다. 이는 간접시험법을 적용했을 때에는 지질학적 생성원인에 따라 상관성해석을 시행해야 신뢰성 높은 결과를 도출할 수 있음을 암시한다.

핵심어 일축압축강도, 압열인장시험, 화성암, 변성암, 퇴적암, 거동 특성

1. 서 론

국내외의 많은 연구자들은 암석의 역학적 특성을 구명하기 위하여 간접시험법을 연구하여 왔다. 간접시험법을 쓰는 것은 시간, 비용 및 노력을 절감하기 위한 목적을 지니기도 하지만 현장시추에서 회수된 시료의 부족, 약한 암석의 성형의 어려움 등이 현실적으로 더 큰 원인으로 작용한다고 볼 수 있다.

이에 따라 연구자들은 점하중시험, 탄성과 속도시험, Schmidt hammer 타격시험, 경도시험, 압열인장강도시험, L.A.마모율시험 등을 활용하여 다양한 경험식을 제안하였다. 그러나 그 많은 경험식들이 실무에 활용되어 신뢰성을 인정받은 사실은 아직은 없는 실정이다. 이는

암석의 역학적 특성을 지배하는 지질학적 생성배경에 대한 고려, 암석의 대표성을 유지할 시료채취의 보편성 시험대상 모집단의 규모에 대한 적절성, 시험자료의 통계적 적합성에 대한 검토 및 해석자료의 신뢰성 검증 등의 공학적 배려가 미흡하기 때문일 것이다.

암석의 역학적 특성을 지배하는 요소중에서 가장 중요한 것은 암석의 지질학적 생성배경일 것이다. 중생대 백악기에 형성된 셰일이라도 미국의 Eagle Ford 셰일, Pierre 셰일, Canada의 Queenstone 셰일, Shaftesbury 셰일들의 강도는 매우 낮은 특징을 가지고 있으나 제각기 물리적인 특성은 다르게 나타난다. 그렇지만 Canada의 Peace Canyon 셰일은 북미주에서 출토되는 셰일에 비해서 3배나 높은 강도를 보여주고 있다. 이것은 퇴적 후 압밀 상재하중이 대단히 컸다는 추정을 할 수 있다. 중국의 Longyon 셰일도 일본 중서부 셰일과 한국의 셰일 강도에 비해서 1/3정도로 강도가 낮은 암석들이다. 호주의 Hawkesbury 셰일도 매우 낮은 강도를 나타내는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 셰일은 강도가 낮은 암석으로 알려져 있으나 일본의 중서부지방의 셰일

¹⁾ 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 교수

²⁾ 동명기술공단(주)부사장, 공학박사

³⁾ 정회원, 수성기술단 이사, 박사수로

* 교신저자 : tkmin@ulsan.ac.kr

접수일 : 2009년 10월 6일

심사 완료일 : 2009년 10월 26일

게재 확정일 : 2009년 10월 27일

과 한국의 세일은 강도가 대단히 강하다. 우리나라의 세일은 평균강도가 화강암보다 높게 나타나고 있다(민덕기 등, 2009).

외국의 연구자들은 자기나라의 암석에 대한 연구로 경험식들을 보고하여 왔다. 그리고 암석의 고유한 생성 배경을 고려하지 않고 복수의 암석을 대상으로 도출된 경험식들로 우리나라의 암석을 대상으로 추정하게 되면 그 값이 참값에 가까울 수가 없다. 또한 국내의 연구자들도 이러한 점을 고려하지 않은 경험식들을 제안하였다.

2. 연구의 목적 및 방법

건설공사의 설계와 시공에 임하는 실무 기술자들은 시간, 예산의 제약과 지질조사에서 획득한 시료의 제약이라는 어려운 조건하에서 암석, 암반의 물리적, 역학적 인자를 도출해야 할 필요가 생길 때가 많다. 그러한 경우 간접시험방법이 필연적일 경우도 있고 효율적일 경우도 많다. 그러나 적용해야 할 간접시험법의 효율성과 신뢰성에 대한 판단이 어려울 경우도 많다.

여러 간접시험방법들은 독특한 시험특성과 자료 처리 방법을 지니며 그에 따라 추정값의 차이가 발생한다. 이들의 특성을 상호 비교하여 참값에 가까운 추정값을 도출하는 시험방법이 어느 것인지도 판단할 필요가 있다. 또한 시료의 상태와 수량에 따라 적합한 시험방법이 어느 것인지도 판단할 필요가 있다. 이는 실무에 임하는 기술자들의 바람이기도 하다.

본 연구는 국내 건설현장에서 출토빈도가 높은 화성암, 변성암 및 퇴적암 11종(세일, 사암, 이암, 역암, 응회암, 석회석, 화강암, 안산암, 유문암, 편마암, Hornfels 등) 1,417개 블록(40×50×30 cm, 160 kg급)의 시험자료를 대상으로 점하중시험, Schmidt hammer 타격시험, L.A.마모율시험 및 압열인장강도시험 등 다양한 경험식을 적용할 것이다. 이것은 일축압축강도를 추정하여 각종 간접시험법에 따른 암석의 강도발현 거동특성을 분석하여 향후 최적의 방법을 찾아내어 적용할 수 있는 결과를 가져올 것이다.

3. 연구동향

점하중강도시험은 1960년대초 Russia 공학자들이 고안하였으며 Protodyakonov와 Voblikov (1957)는 구형에 가까운 불규칙 암석시료의 강도시험법을, Hobbs (1963), D'Andrea 등(1965)은 이 방법으로 일축압축강도(α_c) 추정식을 발표했다. Hiramatsu와 Oka (1966)에 이르러 점하중

강도의 이론적 근거가 비로소 정립되었으며 Broch와 Franklin (1972)은 일축압축-점하중 관계식 및 구체적인 시험법을 제시하여 실용적 활용을 권장하였으며, Bieniawski (1975)에 의해 Broch와 Franklin의 경험식이 검증되어 ASTM (D 5731-95)과 ISRM (1985)에서 표준시험법으로 채택되어 현재에 이르고 있다.

추정식은 암종별 및 지질학적 생성배경과 퇴적력에 따라 다르므로 최근에 앞서 연구된 일반식의 성과가 현실적으로 잘 맞지 않고 있음이 드러나고 있으며, Pells (1975), Cargill과 Shakoor (1990) 등 여러 연구자들은 ASTM 및 ISRM에서 제안한 경험식은 보편성이 없다는 주장들을 하여왔다.

Wilson (1976)은 연약암인 경우는 일축압축-점하중 관계를 축방향 점하중강도로 추정할 것을 주장하였으며, Pells (1975), Forster (1983), Cargill과 Shakoor (1990), Greene와 Schaffer (1997)는 직경방향보다는 축방향 점하중강도를 이용해야 일축압축강도의 추정오차가 감소됨을 실험적으로 제시했다.

Schmidt hammer는 Swiss의 기술자 Ernst Schmidt가 1948년에 콘크리트 강도의 평가를 위하여 개발하였으며 콘크리트 강도측정(Schmidt, 1951)을 발표한 이래 암석의 강도측정을 하는 단계까지 발전하였다(Barton 등, 1977). Deere와 Miller (1966)는 hammer의 반발치(R_n)와 단위중량(r_i)을 곱한값($R_n \cdot r_i$)과 암석의 일축압축강도, 탄성계수와의 상관성 도표를 발표했고, Aufmuth (1974)와 Beverly (1979)는 여러 암석을 대상으로 $R_n \cdot r_i$ 와 일축압축강도사이의 높은 상관성이 있음을 실험으로 증명하였다. ISRM (1978a)은 Schmidt hammer 시험법을 규정하게 이르렀다. Kidybinski (1980)는 R_n 값과 일축압축강도값을 직접 상관시켰고, Singh 등(1983), Shorey 등(1984), Haramy와 DeMorco(1985)는 ISRM의 규정에 따른 시험으로 여러 암석을 대상으로 R_n 값과 일축압축강도값의 상관성을 발표하였다. Xu 등(1990)은 R_n 값으로 연약암의 물리적 성질을 추정할 수 있는 상관식을 발표하였고, Katz 등(2000), Kahraman (2001)도 R_n 값과 일축압축강도값의 상관성 연구를 하였다.

한편 이영남 등(1993)은 화강암과 편암을 대상으로, 이수근 등(1995)은 한국 화강암을 대상으로, 정형식 등(1997)은 다양한 암종에 대하여, 이영휘 등(2000)은 대구 경북지역 퇴적암을 대상으로 Schmidt hammer 반발치와 일축압축강도의 상관식을 발표하였으며 임성빈 등(2005)은 인공 신경망 기법을 적용하여 일축압축강도 추정식을 연구하였다.

L.A.마모율시험은 건설용 골재 품질을 판단하기 위하여 ASTM (C 131-69, 1974), (C 535-89, 1988), ISRM

(1978b)에서 제정한 것으로 우리나라에서도 이를 준용하여 품질관리 기준으로 활용되고 있는 시험법이다. 즉 마모율이 적으면 골재 기준강도가 확보되어 콘크리트, 도로의 기층재, 철도의 ballast 골재로 적합한 재료로 인정을 받을 수 있다.

이러한 사실은 마모율과 암석의 강도가 밀접한 관계를 가지고 있다는 사실을 내포하고 있다. 1960년대 중반부터 1970년대 중반 사이에 Russia 공학자들은 이 사실에 착안하여 암석의 마모율과 각종 공학적, 물리적 상관성을 해석하여 실용적 성과를 도출하여왔다. Kowalski (1966), Smorodinov 등(1970), Rzhovski 등(1971), Szlavin (1974)는 서로 다른 각종 암석을 대상으로 마모율과 일축압축강도와의 상관성을 해석하여 암석강도 추정을 가능하게 했으며, ASTM (C 131-69, 1974)에서는 시험법을 제정하여 Los Angeles Abrasion Test Method로 발표하였다. 이에 따라 Kazi 등(1980-a), Gunsallus 등(1984), Shakool 등(1996)은 강도추정과 더불어 물리적, 암석학적 특성을 추정할 수 있는 상관식을 발표하였다. Cargill과 Shakoor (1990)은 마모율과 일축압축강도와의 상관성 경험식을 제시했고 또한 물리적 parameter 와도 높은 상관성을 발표하여 활용중이다. 국내에서는 민덕기 등(2007)이 보고한 내용이 유일한 연구성과이다.

압열인장강도를 매개로 암석의 역학지수를 추정한 연구는 국내외를 통틀어 민덕기 등(2008, 2009)이 유일하다. Griffith (1924)는 일축압축강도와 인장강도의 비, 즉 취성도가 8이라는 사실을 이론적으로 증명하였다. 이는 일축압축강도와 인장강도 사이에 일정한 비례가 존재한다는 사실을 제시한 것으로 이 두 강도 사이에 깊은 상관성이 존재한다는 사실을 보여준다. 이 점에서 본 연구가 시작되었으며, 연구의 결과는 신뢰성이 높다고 할 수 있겠다.

4. 시험방법의 선택

지질조사에서 획득한 시료가 풍부할 경우에는 선택상별 문제가 없을 것이나 시료량의 제약이 생길 경우에는 간접시험법 선택이 매우 중요하게 대두될 것이다. TCR, RMR값이 높은 암에서는 시료 확보에 문제가 없을 것이나, 연약한 암에서는 시료 성형의 어려움과 시료부족이 발생하기 쉽기 때문에 필연적으로 간접시험법을 활용할 수 밖에 없는 경우가 대부분이다.

점하중시험을 시행할 경우는 NX규격 기준의 시료(개당 200 gr이상)가 40개이상으로 최소 3개조가 필요하기 때문에 3.6 m분의 코어가 필요하게 된다. TCR 50 이하, RMR 40 이하의 연약암질 코어에서 이 분량을 확보하기 어려울 경우가 많다. 더욱이 점하중시험 자료는

분산이 크기 때문에 3개조의 실험값으로 신뢰성을 제고하기에는 문제가 있기 때문에 3개조 이상의 실험이 필요하다. 또한 골재형의 시료일 경우는 퇴적암에서는 불연속면의 방향식별이 어려울 경우도 많다.

Schmidt hammer 타격시험은 비파괴시험으로 현장에서는 자연암반을 대상으로, 실험실에서는 블록을 대상으로 시행할 수 있는 이점이 있다. 많은 연구자들은 실내에서 코어를 대상으로 시험을 시행한 보고를 많이 하였으나 이는 강한 암을 대상으로 연구를 수행하였기 때문임을 알 수 있다. 일축압축강도 약 80 MPa 이하의 약한 암에서는 1회 타격으로 코어는 대부분 파손된다. ASTM이나 ISRM의 시험규정에 따른 시험법은 1회 타격법으로 암석을 대상으로 시행한 결과는 참값과의 차이가 많음이 밝혀졌기 때문에 연속 타격법(민덕기 등, 2009)으로 시행하기를 권한다. 자연암반을 대상으로 시행한 값은 함수를한 상태의 값이라는 사실을 고려하여야 한다. 그러나 시료가 출토된 곳은 노두나 발파암일 경우가 많아서 지하 깊은곳의 자료를 획득하기에는 적합하지 않다는 점이 흠이다.

L.A.마모율시험은 간접시험법으로 잘 알려져 있지 않다. 그러나 지질조사에서 얻은 부스러진 약한 암석을 대상으로 시행하기에는 좋은 시험법이라 할 수 있다.(C 535-89, 1988)의 시료규정에 적합하도록 가공하여 ASTM (C 131-69,1974), ISRM (1978b)의 규정에 따른 시험법으로 일축압축강도를 도출하면 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다(민덕기 등, 2007). 즉 부스러진 시료를 사용할 수 있는 것이 장점이기때 활용성이 높다 하겠다.

압열인장강도를 활용하여 신뢰성 높은 추정값을 얻을 수 있다. TCR 50 이하, RMR 40 이하의 연약암질 코어로 길이 3 cm정도의 시료 3조(3개/조)시험으로 일축압축강도 추정이 가능할 것이다(민덕기 등, 2008, 2009). 즉, 소량의 시료로 추정이 가능한 방법이라 할 수 있다.

5. 시료채취 및 시험

5.1 시료채취

본 연구에서는 토목 공사의 대상으로 가장 출토비율이 빈번한 암들을 위주로 선별하여 실무에 활용이 용이하도록 채취하였다. 퇴적암에 속하는 셰일, 사암, 이암, 역암, 석회석 및 응회암을, 화성암에 속하는 화강암, 안산암 및 유문암을, 변성암으로는 편마암과 호른펠스를 대상으로 선정하였다. 화강암 채취에서는 대보화강암, 불국사 화강암 및 엽리상 화강암을 출토 비율에 따라 고루 포함시켰다. 편마암도 화강 편마암, 흑운모 편마

표 1. 시료의 물리, 역학적 특성

암석군	암 석	시료수	강도분포	UCS	E	rt	Gs	Wa
퇴적암	shale	211	18.5~266.5	97.5	46.5	2.664	2.755	2.69
	sandstone	166	15.3~250.7	101.3	47.5	2.657	2.730	2.45
	mudstone	49	13.8~92.5	52.6	25.3	2.638	2.797	4.26
	conglomerate	15	24.5~97.8	50.6	23.8	2.592	2.717	4.29
	limestone	70	15.2~185.3	79.3	35.9	2.753	-	-
	tuff	57	13.0~115.7	48.7	25.1	2.672	-	-
화성암	granite	321	10.1~168.0	87.0	21.8	2.698	2.709	0.85
	andesite	127	30.5~229.9	117.6	48.9	2.700	2.744	0.59
	rhyolite	66	63.2~143.5	105.3	32.0	2.597	2.731	4.30
변성암	gneiss	260	24.7~163.0	95.0	8.4	-	-	-
	hornfels	75	46.5~342.2	199.2	77.1	2.715	-	-
계		1,417						

* 시료수:블록, UCS:일축압축강도(MPa), E:탄성계수(GPa), rt:단위중량(ton/m³), Wa:흡수율(%)

암, 엽리상 편마암을 출토 지역에 따라 포함시켰으며 지리산 복합체 편마암류도 포함시켰다. 호른펠스는 세 일이 호른펠스화된 시료를 채취하였다.

시료는 한국지질도(한국자원 연구소, 1995)의 분포 기준으로 지역과 면적의 비례에 따라 지점을 선정하였다. 현지에서 Rock hammer와 Schmidt hammer 타격으로 개략적 강도 분포를 또한 고려하였다. 동일한 블록에서 생산된 시료로 일축 압축시험 및 기타 물성시험을 시행하기 위하여 28~30 cm 길이의 NX 기준 core가 최소한 30개 이상이 필요하기에 이를 확보하기 위하여 최소한 40×50×30 cm(약 160 kg/개)급의 블록이 필요하였다. 이들의 분포와 물리적 성질을 표 1(민덕기 등, 2009)에 요약하였으며 전국에서 1,417개 블록을 채취하였다.

5.2 시험

시료는 층리 및 엽리면에 수직으로 coring 하였으며 일축압축강도용 시료는 직경이 54 mm, 길이 110 mm 기준으로 가공하였고(ASTM D 7012-07e1, ASTM D4543-08, ISRM 1979), 압열인장강도용 시료(ASTM D3967-95a, ISRM 1978a)와 점하중강도용 시료(ASTM D5731-95, ISRM 1985)는 일축압축강도용 시료로 가공한 동일한 core에서 가공하였다. 압열인장강도용 시료는 직경 대 길이의 비가 1.0에 가깝도록 성형하였으며, 일축 압축강도용 시료와 압열인장강도용 시료는 각각 3개를 1조로 구성하였다. 일축압축강도의 파괴 시험은 UTM 200 ton (MT200S, M & T Korea)을 사용하였으며 예상 파괴강도의 1/3, 2/3 점에서 재하, 재재하를 시행하

여 3회 반복재하로 수행하였다. Spherical platen을 사용하여 편심을 방지하였고 모든 성과는 data logger를 통하여 storage computer에 수용하였다. 시험은 3개/조로 시행하여 평균값을 대표성으로 채택하였으며 모든 시료는 공기 건조 상태의 것을 사용하였다.

본 연구에서 원주형 core는 NX 기준으로 제작하였으나 일부는 BX 규격도 포함되어 있기 때문에 직경 50 mm를 기준하고, 또한 길이도 90~110 mm 사이에 분포하므로 이를 100 mm 기준으로 변환하기 위하여 ASTM (D 7012-07e1)과 ISRM (1979)에서 권장하는 보정식 1과 식 2를 사용하였다.

$$\beta = \frac{0.889}{0.778 + 0.222(D/H)} \tag{1}$$

$$\psi = (D/50)^{0.18} \tag{2}$$

압열인장강도용 시료는 길이 50 mm를 기준으로 삼았으며, 3개/조로 시험을 시행하여 평균값을 해석에 사용하였다. 시료는 NX 규격이므로 파괴시험시 가압면적이 원주상에서 10 mm정도가 되기 위하여 upper, lower jaw의 직경이 95 mm가 되도록 stainless steel 재료로 제작하여 시험을 시행하였다(ISRM-1978a, ASTM D 3967-95a). 수동식 100 kN 압축기를 사용하여 5~8분정도(0.6~1.0 ton/분)에 파괴하중에 도달하도록 서서히 압력을 가하였다. upper jaw와 하중봉 사이에 spherical platen을 삽입하여 축방향의 하중전달이 편향되지 않게 하였다. 파괴하중과 시료의 치수에 따라 식 3으로 압열인장 강도를 계산하였다.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (3)$$

여기서 σ_t : 압열인장강도(100kPa)
 P : 파괴하중(10N)
 D : 시료의 직경(cm)
 t : 시료의 길이(cm)

접하중강도용 시료는 Broch와 Franklin (1972)의 scale effect를 피할 수 있도록 길이 55 mm 이상, 축 방향 시료는 25 mm 이상으로 준비하여 bedding면에 수직으로 coring하였다. $I_{s(50)}$ 으로 통일하기 위하여 식 4 (ASTM D5731-95, ISRM 1985)로 환산하였다.

$$I_{s(50)} = F \cdot I_{s(test)} ; F = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} \quad (4)$$

Schmidt hammer 타격시험용 시료는 암석용으로 제작된 N-hammer (HS-1665A, 타격 에너지 2.207 N*m-0.225kg*m / Sanyo Testing Machine / GSR-자동기록)를 사용하였다. 채취한 암석 블록에 6 cm간격의 grid를 설정한 후 울퉁 불퉁한 요철면을 diamond grinder로 마모하여 평탄한 면을 만든 후 각 점에 Schmidt hammer를 수직하향 방향으로 타격하였다. 블록의 가장자리는 최소 6 cm의 이격거리를 두고 grid 점을 설정하였다. 타격중 요동

을 방지하기 위하여 철제 좌대(H-beam : 350×350×12)를 제작하여 그 위에 블록을 고정한 후 엽리, 층리면에 수직으로 타격하였다(그림 1a, 그림 1b). Schmidt hammer를 수직하향으로 타격하고 grid 상의 동일점에 25회 연속타격을 하였다. 이 과정의 모든 규정은 ASTM(D 5873-05)에 준하여 시행하였다.

L.A.마모율시험은 석산 채석골재의 강도를 추정하기 위하여 시료를 소정의 규격으로 준비하여 철재 Drum에 강철구와 함께 시료를 넣은 후 일정한 수로 회전시킨 후에 투입된 골재가 1.7 mm이하로 마모된 양을 측정하여 마모율을 산정하여 원석이 채석골재의 적합도를 판단하는 시험이다.

L.A.마모율시험은 세골재(모래)를 대상으로하는 시험과 조골재를 대상으로 하는 시험이 있으며 조골재 시험에는 시료 규격이 19 mm 이상 75 mm 이하를 대상으로 하는 시험법(ASTM C 535-89)과 37.5 mm 이하를 대상으로 하는 시험법(ASTM C 131-69)이 있다. 여기에 따라서 투입하는 강철구의 개수와 중량이 달라지며 투입시료 전체 무게에 따라 회전수가 달라진다. KS F 2508 (1997)은 위의 두 가지 방법을 통합해서 제정되어 있다. 그러나 규정내용은 ASTM과 같으며, ISRM (1978b)에서도 ASTM과 같은 내용으로 규정되어 있다. ASTM의 규정을 표 2로 요약하였다.

본 연구에서는 37.5 mm로 시행하였기에 시험법 ASTM

표 2. ASTM 시험규정(L. A. Abrasion Loss)

Passing	Retained On	Grading (g)			
		A	B	C	D
37.5 mm (1.1/2 in.)	25.0 mm (1 in.)	1250 ± 25	...	...	...
25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (3/4 in.)	1250 ± 25	...	...	...
19.0 mm (3/4 in.)	12.5 mm (1/2 in.)	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
12.5 mm (1/2 in.)	9.5 mm (3/8 in.)	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
9.5 mm (3/8 in.)	6.3 mm (1/4 in.)	...	...	2500 ± 10	...
6.3 mm (1/4 in.)	4.75 mm (No.4)	...	...	2500 ± 10	...
4.75 mm (No.4)	2.36 mm (No.8)	...	...	...	5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

표 3. 분포도의 통계값

	블록(개)	평균값	표준편차	중위값	변동계수	편기도
일축압축강도(MPa)	1,417	97.8	49.8	93.6	0.51	4.3%
접하중강도(//, MPa)	1,417	6.1	3.4	5.8	0.58	4.9
Schmidt Hammer 타격값	1,417	58.8	15.2	61.0	0.26	3.7
압열인장강도(MPa)	1,417	9.9	5.3	9.4	0.54	5.0
L.A. 마모율(%)	1,417	42.5	21.8	40.4	0.51	4.9

C 131-69의 A grade에 준하였으며 105°C, 24시간 건조된 시료와 12개의 철구를 시험기에 넣고 30~33 rpm 속도로 500회 회전 후 인출하여 #12번체(1.7 mm)로 쳐서 통과한 양을 투입시료와의 백분율로 산출한 값이 loss 양이다.

6. 시험자료의 검증

화성암, 변성암 및 퇴적암 1,417개 블록을 대상으로 일축압축강도, 점하중강도, Schmidt hammer 타격시험, 압열인장강도 및 L. A. 마모율시험을 시행하였다. 이들 시험값이 해석대상으로 적합한지 여부를 분포도로 검정을 하였다. 이들 값이 정규분포를 이룬다면 시료채취 과정에서도, 시험시행 과정에서도 무리함이 없다는 것을 의미한다. 즉 해석대상 자료로 적합하다는 것을 의미하기 때문이다. 그림 1은 각각의 시험성과 분포를 나타낸 것이다. 5개의 그림은 대체적인 정규분포 양상을 띠고 있으며 표 3에서 정점의 편기도(δ값)도 작게 나타났다. 그림 1과 표 3에서 분포상태와 통계값은 좋은 편은 아니다. 표준편차가 평균값의 50% 정도로 나타나고, 변동계수가 0.30 이상을 보이고 있음은 강도발현의 거동이 각기 다른 암석이 조합되어 있는 결과로 볼 수 있다. 표준편차와 변동계수값들은 거동이 같은 암석끼리는 좋은 값을 해석결과에서 볼 수 있다.

7. 거동분석

민택기 등(2009)의 화성암군 거동분석에서 Schmidt hammer 타격거동은 화강암, 안산암 및 유문암의 거동

이 각각 다르게 나타난 바 있다. 그림 2는 각 실험방법에 따른 일축압축강도와의 관계를 도시한 것이다. 그림 2(c)에서는 화강암, 안산암 및 유문암의 거동은 동일하게 표현되고 있다. 즉 화성암에서의 압열인장강도와 일축압축강도의 적점은 동일한 거동임을 알 수 있다. 그림 2(d)는 암석에 따라 각각의 거동 특색을 보여주고 있다.

요약하면 화강암군을 대상으로 점하중강도, Schmidt hammer 타격값 및 L. A. 마모율값을 종속변수로, 일축압축강도값을 독립변수로 정한 상관식은 암석별로 산출해야함을 알 수 있다. 그러나 압열인장강도값을 종속변수로 할 경우에는 화강암군의 어느 암석이라도 동일한 거동이 나타난다는 것을 알 수 있다.

그림 3의 변성암의 거동은 점하중강도와 Schmidt hammer 타격값에서는 편마암과 Hornfels는 전혀 다른 거동 양상을 보이고 있으나, 압열인장강도와 L.A. 마모율의 거동은 유사하게 나타나고 있다. 그림 3(c)의 압열인장강도와 일축압축강도의 좌표상에서 동일한 상관함수로 보기에는 무리가 있으며, 본연구의 모집단 규모에서나 나타날 수 있는 정도로 파악할 수 있겠다. 위의 여러 경우를 고려하면 이 역시 동일 상관함수로 추정해도 큰 오차는 없을 것으로 판단된다.

소량의 매장량으로 출토빈도가 작아서 본연구의 대상에서 제외한 변성암류의 점판암(slate), 편암(schist), 천매암(phyllite), 규암(quartzite) 및 대리암(marble)을 포함하면 어떤 거동 특성이 나타나는가에 대한 연구는 차후의 과제로 남길 것이다.

그림 4는 퇴적암에 대한 거동을 나타낸 것이다. 사암, 세일 이암, 역암, 응회암 및 석회석을 포함하는 암석군으로 모두 6개 암종, 568개 블록의 자료를 도시한 것이

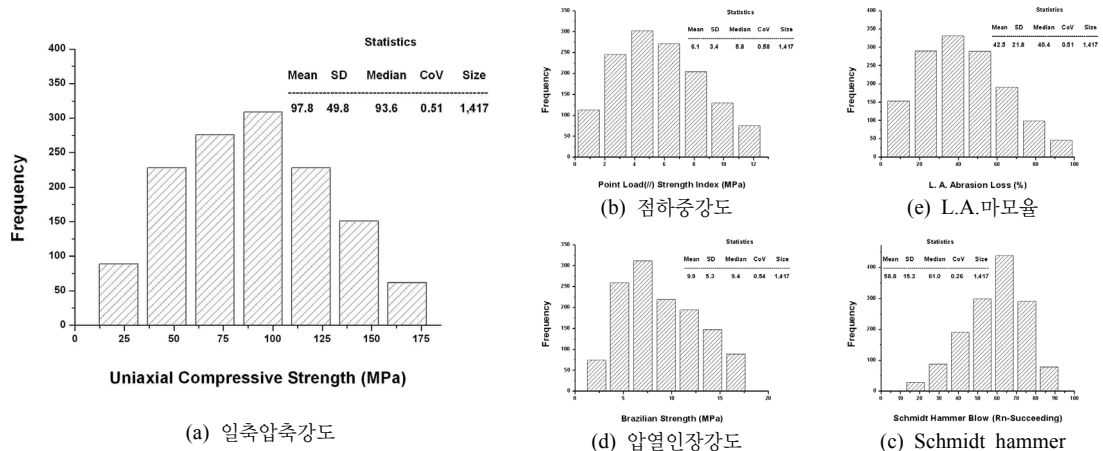


그림 1. 시험값의 분포

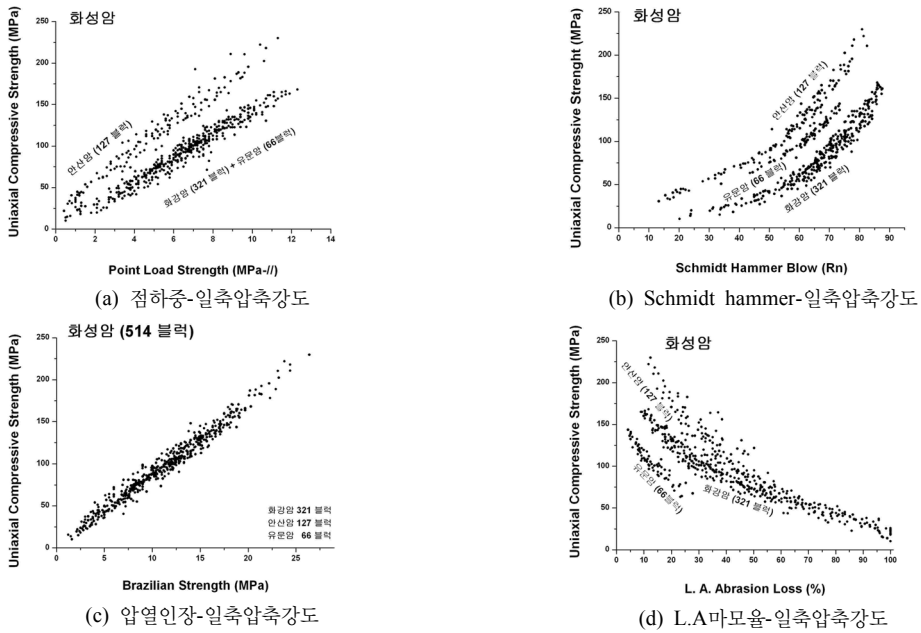


그림 2. 화성암의 거동

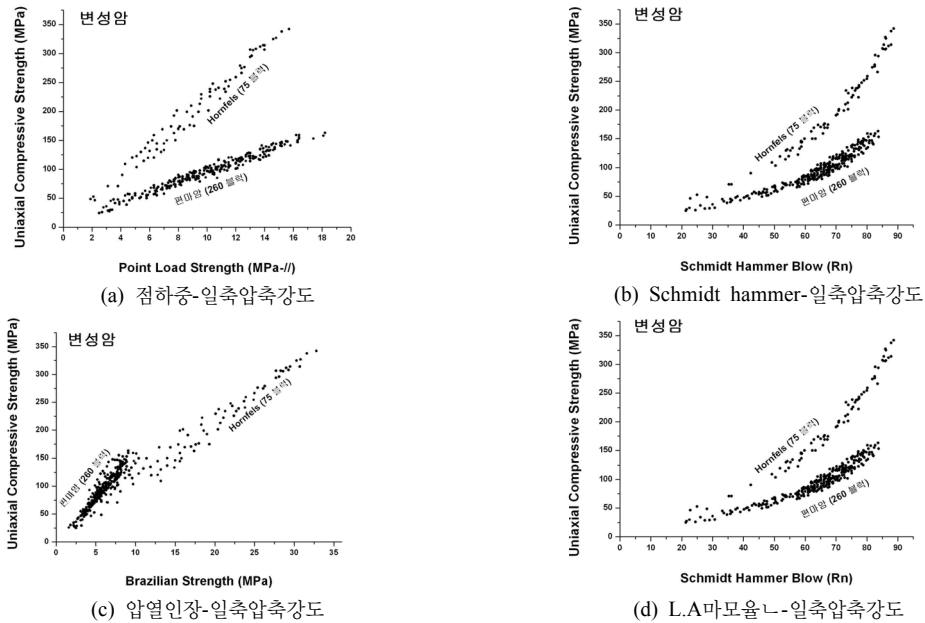


그림 3. 변성암의 거동

다. 점하중강도, Schmidt hammer 타격값, 압열인장강도 및 L.A.마모율값과 일축압축강도값의 상관함수를 표현하였다. 각각의 시험방법에서 도출된 값에 상관없이 일축압축강도 발현의 거동 특성은 동일하게 나타나

고 있다. 즉 화강암, 변성암에서는 암종에 따라 다른 거동 특성을 보여주었으나 퇴적암에서는 동일한 거동을 보이고 있는 점이 타 암종과의 차이점이라 할 수 있다. 특히 Schmidt hammer 타격값과 일축압축강도의 상관

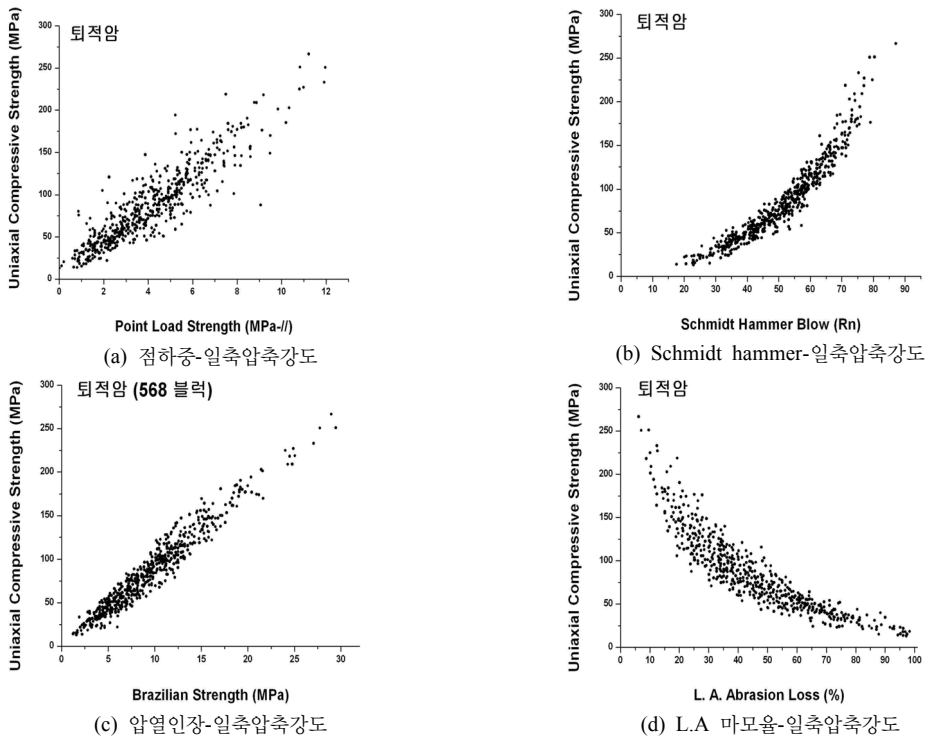


그림 4. 퇴적암의 거동

함수, 압열인장강도와 일축압축강도의 상관함수의 적점 상태는 분산이 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 이들은 신뢰성이 높은 결과를 기대할 수 있음을 뜻한다.

이상의 거동 특성을 요약하면 퇴적암에서는 점하중강도, Schmidt hammer 타격법, 압열인장강도 및 L.A.마모율값을 매개로하여 일축압축강도를 추정하면 암석의 특성에 상관없이 모든 시험법에서 동일한 거동을 나타내고 있다. 또한 압열인장강도를 매개로하여 일축압축강도를 추정할 상관성 분포에서는 화성암, 변성암 및 퇴적암중에 관계없이 각 암석군별로 동일한 거동 특성을 보여주고 있다. 즉 압열인장강도를 매개로 추정할 때는 압군과 암종의 구분에 구애받지 않고 추정이 가능함을 알 수 있다.

지금까지 여러 연구자들이 각종방법으로 일축압축강도를 추정할 때에는 각종암이나 혼합된 모집단을 대상으로 시행한 결과를 보면 상관계수가 낮고 적점의 분산이 큰 상태였는데 이는 모집단의 규모가 작아 각종암의 거동 특성을 충분히 표현하지 못하고 분산값이 큰 것으로 이해하였다고 사료된다. 따라서 암석의 공학적 특성을 추정할 때에는 충분한 모집단의 크기가 우선적으로

필요하다고 하겠다.

8. 강도발현 기구

민덕기 등(2009)은 Schmidt hammer 타격거동 연구에서 암석의 파괴강도 저항력에 대한 거동을 밝힌 바 있어 본 항은 이와 매우 유사한 사항이므로 그 내용을 다소 침언하여 전제하면 다음과 같다.

화성암은 높은 온도의 마그마가 지중 혹은 지표에서 굳어져 생성된 암이다. 여기서 굳어지는 속도, 즉 온도구배와 압력 및 마그마의 화학조성에 따라 각종 화성암으로 형성되는데 이때 온도구배의 차이와 입자간의 결정온도에 따라 결정작용이, 용융온도에 따라 형태가 다른 용융접합작용이 이루어지며(정지곤 등, 2000, 정형식, 2004) 이것이 강도를 결정하는 요인이라 볼 수 있다. 이 과정을 주도하는 중요 요소가 사장석(plagioclase)이며 이는 화성암을 구성하는 주 광물이다. 이 사장석의 생성이 온도구배에 직접적 영향을 주어 생성양의 정도가 결정되며 이에 따라 화성암종이 달라진다. 즉 사장석의 생성 정도에 따라 강도의 차이와 거동 특성이 달라진다고 볼 수 있다. 사장석은 공기와 물의 작용으

로 풍화가 진행되면 점토 광물화되기도 한다. 또한 화강암, 유문암은 화학적으로 입자간 공유산소 결합을 하는 경우도 있고 음양 이온간의 이온결합을 하는 입자들도 있으므로 화성암의 강도지배 요소는 물리적 결합인 용융접합과 화학적 결합으로 파괴력에 대한 저항력이 발현한다고 볼 수 있다.

변성암은 퇴적암, 화성암들이 지각내에서 용출하는 마그마의 높은 열과 이에 따른 높은 압력에 의해서 암석내의 광물입자의 조직이 용융, 재배열되어 물리적, 화학적, 공학적 성질이 모암과 다른 암석을 조성하는 변성작용에 의해 생성된 암석이다(안건상 등, 2000, 원종관 등, 1989). 이때 각 입자는 용융된 교질물질에 의해 입자표면에 막을 형성하고 입자와의 접촉이 이루어지며 용융체로 공극이 채워져 매우 강도가 큰 암석으로 변한다. 즉 변성암은 입자의 재결정, 맞물림 및 용융접합의 정도에 따라 암석의 강도 발현의 차이가 생긴다고 볼 수 있다. 퇴적암의 근원암은 화성암, 변성암 및 개체가 또 다른 퇴적암일 것이다. 이들 근원암들은 풍화로 인해 모암에서의 분리, 지구조운동의 강력한 힘에 의한 파쇄, 풍수압에 의한 모암에서의 분리로 인한 파편들이 바람에 의해 이동하거나, 수류에 의해 이동한 뒤 퇴적되어 수천만년 동안 높은 상재압력을 받아 지금의 퇴적암이 형성되었다(정공수 등, 2000, 원종관 등, 1989).

근원암의 입자구성 상태와 화학적 광물 조성상태가 각각 다른 퇴적암 그룹의 암석이 동일한 강도발현을 한다는 사실은 근원암의 입자구조나 화학적 조성에 상관없이 입자와 입자가 맞물리는 표면의 접촉력 때문이라는 사실을 추리할 수 있다. 즉 높은 압력에 의한 압착용접과 교질물질(cementing minerals)에 의한 부착으로 압축강도가 발현된다고 볼 수 있다. 이러한 사실로 퇴적

암의 강도는 교질물질의 부착력과 압착용접에 의한 표면 접촉력에 지배받는다고 할 수 있다. 이 점이 화강암과 변성암의 강도발현 특성과 다른 점이라 할 수 있다.

9. 해석의 검토

암석은 지질학적 생성 원인에 따라 조성광물도 다르고 조직형태도 각각 다름을 알 수 있다. 특히 파괴력에 대한 저항력의 발현거동이 각각 다름을 확인할 수 있다. 암석물성의 대표적인 일축압축강도를 여러 간접시험법을 통해 추정할 때에는 시험법에 따라, 대상암석에 따라 거동 특성이 다르게 나타남을 보여 주고 있다. 거동 특성이 동일한 암들만을 대상으로 상관성 해석을 하면 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 각각의 시험방법에 따라 각 암석별로 시험한 결과를 매개로하여 일축압축강도를 추정할 수 있는 상관식을 도출하여 요약한 것이 표 4(점하중강도-일축압축강도), 표 5(압열인장강도-일축압축강도), 표 6(Schmidt hammer 타격값-일축압축강도) 및 표 7(L.A.마모율-일축압축강도)이다. 여기서 퇴적암의 거동특성을 수식으로 확인할 수 있다. 점하중강도, 압열인장강도, Schmidt hammer 타격 및 L.A.마모율시험을 한 성과는 암중에 관계없이 압열인장-일축압축 좌표에서 거동이 동일하게 표출된다는 사실이다. 이것은 퇴적암의 중요한 특성이라 할 수 있다. 퇴적암을 구성하는 입자는 화성암, 변성암 및 또 다른 퇴적암 입자일 것이나, 이를 구성하는 각 입자의 화학적 요소에는 무관하다는 사실을 확인할 수 있다.

점하중강도-일축압축강도의 좌표에서는 상관성이 일차함수로 표현된다. $Y=aX+b$ 의 함수식에서 b 값이 모두 적절하게 나타나고 있으나 안산암에서는 높게 나타났

표 4. 상관성 해석(점하중강도-일축압축강도)

암석군	암석	해석식	상관계수	SD	비고
퇴적암	세일	$UCS=18.84*PLS(//)+9.41$	0.906	19.0	6개 암석이 동일 거동을 함.
	사암				
	이암				
	역암				
	석회석				
	응회암				
화성암	화강암	$UCS=14.09*PLS(//)+0.29$	0.974	8.42	
	안산암	$UCS=17.96*PLS(//)+23.18$	0.981	9.39	
	유문암	$UCS=12.99*PLS(//)+9.75$	0.977	4.23	
변성암	편마암	$UCS=16.24*PLS(//)-1.53$	0.933	11.02	
	hornfels	$UCS=22.20*PLS(//)-0.50$	0.987	12.23	

표 5. 상관성 해석(압열인장강도-일축압축강도)

암석군	암석	해 석 식	상관계수	SD	비고
퇴적암	세일	UCS=9.03*BRZ+0.14	0.968	11.28	6개 암석 동일 거동.
	사암				
	이암				
	역암				
	석회석				
	응회암				
화성암	화강암	UCS=8.36*BRZ+3.73	0.982	7.24	3개 암석 동일 거동.
	안산암				
	유문암				
변성암	편마암	UCS=9.24*BRZ+37.01	0.960	17.50	2개 암석 동일 거동.
	hornfels				

표 6. 상관성 해석(Schmidt Hammer 타격값-일축압축강도)

암석군	암석	해 석 식	상관지수	비고
퇴적암	세일	UCS=19.09exp(Rn/31.28)-19.80	0.968	6개 암석이 동일 거동.
	사암			
	이암			
	역암			
	석회석			
	응회암			
화성암	화강암	UCS=8.04exp(Rn/28.79)-4.80	0.955	
	안산암	UCS=20.32exp(Rn/34.33)+4.70	0.973	
	유문암	UCS=3.00exp(Rn/20.99)+42.87	0.980	
변성암	편마암	UCS=11.93exp(Rn/32.64)+5.88	0.948	
	hornfels	UCS=23.89exp(Rn/33.58)+2.00	0.989	

표 7. 상관성 해석(L.A.마모율-일축압축강도)

암석군	암석	해 석 식	상관지수	비고
퇴적암	세일	UCS=263.28exp(-LA/32.07)+11.31	0.874	6개 암석이 동일 거동.
	사암			
	이암			
	역암			
	석회석			
	응회암			
화성암	화강암	UCS=190.82exp(-LA/51.47)+0.48	0.959	
	안산암	UCS=316.53exp(-LA/54.57)-38.30	0.935	
	유문암	UCS=126.69exp(-LA/18.29)+39.63	0.912	
변성암	편마암	UCS=323.01exp(-LA/27.88)+16.16	0.955	2개 암석이 동일 거동.
	hornfels			

다. 이는 안산암의 강도가 타 암석에 비해 매우 높게 표출되고 있음을 알 수 있다. 상관계수도 매우 높고 표준편차도 낮아 신뢰성이 높음을 짐작할 수 있다. 퇴적암에서는 모든 암석에서 동일한 거동을 나타내고 있으나, 표준편차가 높아 분산이 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

압열인장강도를 종속변수로, 일축압축강도를 독립변수로 정한 상관성은 일차함수에서 최적의 관계를 나타내고 있다. 여기서도 높은 상관계수와 낮은 표준편차를 보여주고 있어 상관식이 높은 식을 도출할 수 있을 것이다. 그러나 변성암과 퇴적암에서 분산값이 크게 나타나고 있다. 화성암, 변성암 및 퇴적암에서는 암석에 상관없이 암근끼리는 동일한 거동을 보임으로 상관식도 동일한 식으로 표현되고 있다.

Schmidt Hammer 타격값-일축압축강도는 Exponential Growth 함수의 이차함수에서 최적의 상관성을 보여주고 있다. 유문암은 전체 강도가 커서 축 절편값이 매우 크게 나타나고 있으나 타 암석은 적절한 값으로 사료된다. 이차함수이므로 상관지수(R^2)로 표현되고 상관계수 기준으로 보면 매우 높은 값이며 거동이 동일한 암석들 로만 해석을 하면 상관성이 매우 높음을 알 수 있다.

L.A.마모울-일축압축강도 역시 Exponential Growth 함수의 이차함수에서 최적의 상관성을 보여주고 있다. 여기서는 점진적 저감곡선으로 표현되고 있다. 상관성도 매우 높게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 퇴적암에서는 상관성이 약간 낮게 나타나고 있다. 퇴적암석 전체와 변성암의 편마암과 Hornfels에서는 동일한 거동을 보이고 있다.

10. 결론

간접시험법인 점하중강도시험, Schmidt hammer 타격시험, 압열인장강도시험 및 L.A.마모울시험값을 매개로 일축압축강도를 추정하기 위하여 국내에서 출토되는 암석 1,417개 블록(화성암 514개 블록, 변성암 335개 블록, 퇴적암 568개 블록)을 대상으로 각 암군별로 거동 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 화성암, 변성암을 대상으로 일축압축강도를 도출하는 과정에서 각 암석의 거동은 생성원인에 따라 각각 다르다.
- 퇴적암을 대상으로 일축압축강도를 도출하는 과정에서 각 암석(셰일, 사암, 이암, 역암, 석회석, 응회암)의 거동은 모두 동일하다.
- 압열인장강도를 매개로 일축압축강도를 도출하는 과정에서 화성암, 변성암 및 퇴적암별로 거동이 동일하나 점하중시험, Schmidt hammer 타격시험 및 L. A. 마모

울시험에서는 각각 다른 거동 특성을 보이고 있다.

- 간접시험법으로 일축압축강도를 도출하기 위해서 지질학적 생성원인에 따라 군별로 상관성해석을 하는 것이 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있다.

참고문헌

1. 민덕기, 문종규, 이상일(2007), “퇴적암의 공학지수를 추정하기 위한 L.A. 마모울시험”, 제23권, 11호, pp.15-26. 한국지반공학회 논문집.
2. 민덕기, 문종규, 노재술(2008), “Brazilian 시험을 이용한 일축압축강도, 탄성계수의 추정(I)”, 한국지반 공학회 논문집, 제24권, 제10호, pp.131-146.
3. 민덕기, 문종규, 노재술(2009), “Brazilian 시험을 이용한 일축압축강도, 탄성계수의 추정(II)”, 한국지반공학회 논문집, 제25권 제8호, pp.65-76.
4. 안건상 등(2000), “변성암석학(Raymond L.A. 원저)”, 시그마프레스, pp.1-198.
5. 이수곤, 이송(1995), “슈미트 해머 수치를 이용한 한국 화강암의 일축 압축강도 추정방법”, 대한토목학회 논문집, 제15권, 제2호, pp.199-210.
6. 이영남, 윤지선, 김두영(1993), “Rock Test Hammer 측 정결과의 활용에 관하여”, 한국암반역학회, 터널과 지하공간, Vol.3, pp.167-174.
7. 이영휘, 김용준, 박준규(2000), “압축강도와 풍화도에 관련된 퇴적암의 공학적특성”, 한국지반공학회 논문집, 제 16권, 제1호, pp.5-17.
8. 임성빈, 김교원, 서용석(2005), “대구지역 퇴적암의 일축 압축강도 예측을 위한 인공신경망 적용”, The Journal of Engineering Geology, Vol.15, No.1, pp.67-76.
9. 정공수 등(2000), “퇴적암석학”, 시그마프레스.
10. 정지곤 등(2000), “화성암석학”, 시그마프레스.
11. 정형식, 유병욱(1997), “암석의 풍화에 따른 강도 변화특 성 및 강도추정에 관한 연구”, 한국지반 공학회 논문집, 제13권, 제6호, pp.71-91.
12. 정형식 (2004), “암반역학”, 도서출판 새론, pp.1~81.
13. 원종관 등(1989), “지질학 원론”, 도서출판 우성, pp.237-594.
14. KS F 2503(1997), “굵은 골재의 비중 및 흡수율 시험방법.”한국산업규격.
15. Aufmuth, R.E. (1974), “A systematic determination of engineering criteria for rock”, Bull. Ass. Eng. Geol., Vol.6, No.3, pp.235-245.
16. Barton, N., Choubey, V. (1977), “The shear strength of rock joints in theory and practice”, Rock Mech., Vol.10, pp.1-54.
17. Beverly, B. E., Schoenwolf, D.A., Brierly, G.S. (1979), “Correlations of rock index values with engineering properties and the classification of intact rock”.
18. Bieniawski, Z. T. (1975), “The point-load test in geotechnical practice”, Eng. Geol. Vol. 9, pp.1-11.
19. Broch E. and Franklin, J. A. (1972), “The point-load strength test” Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9, pp.669-697.
20. Cargill, A. S and Shakoor, A. (1990), “Evaluation of

- empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock" *Int. J. Rock-Mech. Min. ci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 27, pp.495-530.
21. D'Andrea, D. V, Fischer, R. L. and Fogelson, D. E (1965), "Prediction of compressive strength from other rock properties", US Bureau of Mines, Report of Investigation, REPT. 6702, pp.1-23.
 22. Deere, D.U., Miller, R.P. (1966), "Engineering classification and index properties for intact rocks", Tech. Report, Air Force Weapons Lab. New Mexico, No. AFNL-TR. Kirtland.,pp.65-116.
 23. Forster, I. R (1983), "The influence of core sample geometry on the axial point load test", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No.6, pp.291-295.
 24. Greene, S.(1997)Greene, B. H. and Schaffer, A. (1997), "Laboratory measurement of weak rock strength." *Proc. Symp. Characterization of weak and weathered rock masses. Ass. Eng. Geologists. Special Pub. Vol. 95.9*, pp.73-85.
 25. Griffith, A. A. (1924), "Theory of Rupture", *Proc. 1st. Int. Congr., Applied Rock Mechanics, Delft*, pp.55-63.
 26. Gunsallus, K. L. and Kulhawy, F. H. (1984), "A comparative evaluation of rocks strength measurement" *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, Vol. 21, pp.223-248.
 27. Haramy, K.Y., DeMarco, M.J. (1985), "Use of Schmidt hammer for rock and coal testing", *Proc. 26th. U. S. Symp. Rock Mech.*, pp.549-555.
 28. Hiramatsu, Y. and Oka, Y. (1966) "Determining of the tensile strength of rock by a compression test of an regular test piece", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*, Vol. 3, pp.89-99.
 29. Hobbs, D. W. (1963), "A simple method for assessing the uniaxial compressive strength of rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 1, pp.5-15.
 30. Kazi, A., Al-Masour, Z. R., (1980-a), "Empirical relationship between Los Angeles abrasion and Schmidt hammer strength tests with application to aggregate around Jeddah".
 31. Katz, O., Reches, Z., Reogiers, J.C.(2000), "Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.37, pp.723-728.
 32. Kahraman, S. (2001), "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.38, pp.981-994.
 33. Kidybinski, A. (1980), "Method of investigations, estimation and classification of roofs in mines in the United States of America for the selection of suitable mechanized support for long-walls", *USDI/CMI Joint Research Project Report. Q. J. Eng. Geol.*, Vol.13, pp.45-52.
 34. Kowalski W.C. (1966), "The independence between the strength and voids ratio of limestone and marls in connection with their water saturating and anisotropy." *Proc. 1st. Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, Portugal. pp.143-144.
 35. Pells, P. J. N. (1975), "The use of the point load test in predicting the compressive strength of rock materials" *Australian Geomechanics Journal, Lecture Note*, pp.54-56.
 36. Protodyakonov, M. M. and Voblikov, V.S. (1957), "Determining rock strength with specimens of irregular shape", *Ugol. 32. Vol. 14.* pp.13-17.
 37. Rzhveski V. and Novik G. (1971), "The Physics of Rocks", Moscow, Mir Publishers, pp.320.
 38. Schmidt, E. (1951), "A non-destructive concrete tester", *Concrete*, Vol.59, No.8, pp.34-35.
 39. Shakoor, A., Brown, C. L.,(1996), "Development of quantitative relationship between unconfined compressive strength and Los Angeles abrasion loss for carbonate rocks", *Bull. Int. Ass. Eng. Geol.*, No.53, pp.97-103.
 40. Shorey, P.R., Barat, D., Das, M.N., Mukherjee, K.P., Sing, B. (1984), "Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in situ coal strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.21, pp.39-42.
 41. Singh, R.N., Hassani, F.P., Elkington, P.A.S. (1983), "The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations", *Proc. 24th. US Symp. on Rock Mech.*, Texas A & M Univ., AEG, pp. 599-609.
 42. Smorodinov M.I., Motovilov E.A. and Volkov V.A. (1970), "Determination of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks." *Proc. 2nd. Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Vol.2, Belgrade, pp.35-37.
 43. Szlavin J. (1974), "Relationships between some physical proterties of rock determined by laboratory tests," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.11, pp.57-66.
 44. Wilson, L. C. (1976), "Tests of bored and driven piles in cretaceous mudstone at Port Elizabeth Africa," *Geotechnique.*, Vol. 26, No. 1, pp.5-12.
 45. Xu, S., Grasso, P., Mahtab. (1990), "Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock", *Proc. 6th. Int. IAEG Cogress*, Vol.1, pp.511-519.



민 덕 기

1976년 연세대학교 공과대학 토목공학과
공학사
1980년 연세대학교 대학원 토목공학과
공학석사
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과
공학박사
Tel: 052-259-2259
E-mail: tkmin@ulsan.ac.kr
현재 울산대학교 공과대학 건설환경공학부
교수



문 중 규

1964년 서울대학교 공과대학 토목공학과
공학사
2002년 울산대학교 대학원 토목공학과
공학석사
2007년 울산대학교 대학원 토목공학과
공학박사
Tel: 052-259-1668
E-mail: 1067mjk@hanmail.net
현재 동명기술공단(주) 부사장, 울산대
학교 건설환경공학부 겸임교수



노 재 술

1999년 경일대학교공과대학 토목공학과
공학사
2002년 부산대학교 대학원 토목공학과
공학석사
2005년 울산대학교 대학원 토목공학과
박사수료
Tel: 02-552-0111
E-mail: jsro88@hanmail.net
현재 (주)수성엔지니어링 감리부 이사