

RESEARCH ARTICLE

점하중시험을 이용한 국내 암석의 일축압축강도산정 연구

김학준*

대전대학교 건설안전방재공학과

Estimation for the Uniaxial Compressive Strength of Rocks in Korea using the Point Load Test

Hak Joon Kim*

Department of Construction Safety and Diaster Prevention, Daejeon University

*Corresponding author: hakkim@dju.ac.kr

Received: January 30, 2018

Revised: February 10, 2018

Accepted: February 13, 2018

ABSTRACT

Accurate estimation of the uniaxial compressive strength of rock is very crucial for the safety of construction activities occurring in the rock mass. However, the uniaxial compressive strength test is expensive and time consuming. Moreover, the uniaxial compressive strength test cannot be performed in the field. In order to solve this kind of problem, many foreign researchers investigated the use of the point load strength test for the estimation of uniaxial compressive strength of rock. However, the result of research obtained for rocks from other countries may not be directly applicable for rocks in Korea. The correlation between the point load strength index and the uniaxial compressive strength for rocks in Korea is suggested in the form of table by using the results of the extensive literature reviews and laboratory tests. The suggested result is expected to be used for the simple and quick estimation of uniaxial compressive strength of rocks in Korea.

Keywords: Uniaxial compressive strength, Point load strength test

초록

암반에서 공사를 수행하는 경우에는 공사의 안정성 확보를 위하여 대상 암반의 일축압축강도를 정확히 평가해야 한다. 그러나 일축압축강도를 산정하기 위해서는 많은 비용과 시간이 필요하다. 또한 현장에서는 암석의 일축압축강도시험을 수행할 수 없다는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 점하중강도 시험을 이용하여 암석의 일축압축강도를 산정하는 방법이 외국의 많은 연구자들에 의하여 조사되었다. 그러나 외국의 암석에서 얻어진 연구결과를 그대로 국내에서 적용하는 것은 신뢰성에 문제가 있을 수 있다. 본 연구에서는 국내 암석에 대한 점하중강도지수와 일축압축강도의 상관관계를 광범위한 국내외 문헌조사와 실내시험 결과를 통하여 도표로 제시하였다. 본 연구결과는 국내 암석의 일축압축강도를 간편하고 신속하게 추정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어: 일축압축강도, 점하중강도시험

서론

암석의 일축압축강도는 RMR이나 Q와 같은 암반분류법에 필수적으로 사용되는 인자이며 공사 현장의 지반공학적 설계에서 가



장 중요한 인자로 간주된다. 암석의 일축압축강도시험에는 일반적으로 원주형 시료가 사용되며 일축압축시험기가 필요하므로 시료 제작을 포함한 시간과 노력이 필요하다. 점하중시험기는 현장에 휴대가 가능하며 불규칙한 시료에 적용이 가능하다는 장점이 있으므로 암석의 일축압축강도를 산정하기 위하여 널리 사용되고 있다. 따라서 국내외적으로 현장에서 간편하게 간접적인 방법을 사용하여 암석의 일축압축강도를 산정하려는 많은 연구가 수행되었다. 국내 현장에서 점하중강도를 이용하여 일축압축강도를 결정하는 경우, 외국에서 연구된 결과를 그대로 국내 암석에 적용하여 사용하는 경우가 일반적이다. 또한 국내에 발표된 연구결과는 대부분 어떤 특정 지역의 암석을 대상으로 상관관계식이 제시되었다. 본 연구에서는 점하중강도를 이용하여 국내 암석의 일축압축강도를 산정하는 관계식과 이러한 상관 관계식의 한계점 등을 국내외의 광범위한 문헌조사와 실내시험 결과 등을 종합하여 제시하고자 한다.

점하중강도지수와 일축압축강도 상관관계 연구 현황

점하중강도지수

암석의 점하중강도 시험은 점하중 시험기에 암석시료를 장착한 후 수행되는데, 직경방향 시험의 경우 파괴하중을 시료 직경의 제곱, 타 형태의 시료는 등가직경의 제곱으로 나누어 암석의 점하중강도 지수(Point Load Strength Index, I_s)를 구한다. 점하중강도 시험은 코어 시료뿐만 아니라 불규칙 압괴 등을 시험편으로 사용할 수 있으며 현장에서도 시험이 가능하다는 장점이 있다.

일반적으로 점하중강도지수와 일축압축강도는 선형관계를 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 점하중강도지수를 이용하여 암반분류나 지반설계 등에서 널리 사용되고 있는 일축압축강도를 결정하려는 연구가 국내외에서 활발히 수행되었다. 암석의 점하중강도지수는 원통형 시료의 직경방향 시험(diametral test)과 축방향 시험(axial test), 육면체 시료의 블록 시험(block test), 불규칙한 시료 시험(irregular lump test) 등 다양한 형태의 시료 시험을 이용하여 산정이 가능하다. ISRM(1985), KSRM(2007), ASTM(2016)은 암석의 점하중강도 표준시험법을 제시하였다.

국외 연구 현황

D'Andrea et al.(1964)을 포함하여 60~70년대부터 많은 연구자들은 점하중강도시험을 이용하여 일축압축강도를 추정하는 방법을 제시하였다. Broch and Franklin(1972), Bieniawski(1975), Singh and Singh(1993) 등은 직경 50 mm의 시료에서 얻어진 점하중강도지수에 24의 환산계수(conversion factor)를 곱하면 암석의 일축압축강도를 얻을 수 있음을 제안하였으며 이 환산계수는 국내외에서 널리 사용되고 있다. Broch and Franklin (1972), Brook(1980, 1985), Hassani et al.(1980), Forster(1983), Turk and Dearman(1985), Chau and Wong(1996) 등은 코어 시료의 직경이 50 mm가 아닌 경우의 점하중강도지수의 보정 방법을 제시하였다.

ISRM(1985)에 의하면 환산계수는 평균적으로 20~25의 범위를 보이지만 이방성 암석의 경우에는 15~50까지의 범위를 보인다. Smith(1997)는 환산계수를 가능한 특정 지역별 혹은 암종별로 결정하여 사용하고, 기존의 문헌에 제안된 환산계수는 단지 개략적인 강도추정이나 상대적인 강도값 추정에만 활용할 것을 제안하였다. 이것은 특히 강도가 약하거나 포화된 암석의 경우, 환산계수가 많은 오차를 유발할 수 있기 때문이다. Hawkins(1998)는 문헌조사 결과를 토대로 암상이나 상태에 따라 환산계수가 7~68까지의 범위를 보이므로 지역별로 적당한 값을 사용할 것을 제안하였다. Kahraman(2001)도 임의의 환산계수를 이방성 암석에 적용하는 경우에는 일축압축강도의 오차가 100 %까지 발생할 수 있음을 지적하였다. Fener et al.(2005)의 문헌조사 결과에서도 환산계수는 8.6~29사이의 넓은 범위를 보였다.

Yilmaz(2009)는 점하중시험의 단점으로 (i) 시험 암석이 일반적으로 이방성이고 불균질하지만 시험이 매우 국부적으로 수행됨,

(ii) 유효하지 않은 불규칙적인 파괴가 자주 발생하여 너무 많은 시험편이 요구됨, (iii) 하중을 가하는 동안에 시험편을 고정시키기 어려운 점 등을 제시하였다. 점하중강도지수(x)와 일축압축강도(y)의 상관관계식은 $y=ax$, $y=ax+b$, $y=ax^b$, $y=ax^2+bx$, $y=a\ln(x)+b$, $y=ae^{bx}$ 등의 다양한 형태가 있다. 이러한 상관관계식 중에서 $y=ax$ (a는 환산계수) 형태가 가장 널리 사용되고 있으며 $y=ax$ 형태의 식을 제외한 다양한 유형의 상관관계식도 Table 1과 같이 많은 연구자들에 의하여 제시되었다. $y=ax$ 형태의 식은 2.5 절에서 상세히 논의하였다.

Table 1. Equations correlating the UCS to the point load strength index expressed in various types

Rock types	Conversion equations	UCS Range (MPa)	References
Dolostone, sandstone, limestone ¹	$16.5 \times PLS + 51.0$ ($r^2=NG^*$)	68-345(USA)	Gunsallus and Kulhawy (1984)
Sandstone ¹	$19 \times PLS + 12.7$ ($r^2=0.81$)	31-118 (Turkey)	Ulusay et al. (1994)
Limestone, marlstone, sandstone ¹	$7.3I^{1.71}$ ($r^2=0.82$)	2-254 (Greece)	Tsiambaos and Sabatakakis (2004)
Sedimentary (various) ¹	$29.77 \times PLS - 51.49$ ($r^2=0.78$)	40-175 (Turkey)	Kahraman and Gunaydin (2009)
Sedimentary rock ¹	$10.46 \times PLS^{1.12}$ ($r^2=0.61$)	0-250 (Various)	Tziallas et al. (2009)
Sandstone ¹	$5.69 \times PLS^{1.58}$ ($r^2=0.79$)		
Gypsum (air-dried) ¹	$7.557 \times PLS + 23.68$ ($r^2=0.94$)	29-37 (Iran)	Heidari et al. (2012a)
Gypsum (sat.) ¹	$11.96 \times PLS + 10.64$ ($r^2=0.94$)	17-30 (Iran)	
marly rock ¹	$24.2 \times PLS - 9.584$ ($r^2=0.91$)	15-89 (Iran)	Azimian and Ajalloeian (2014)
	$56.939 \times \ln(PLS) - 1.6551$ ($r^2=0.929$)		
	$14.416 \times PLS^{1.357}$ ($r^2=0.90$)		
	$11.608 \times e^{0.5552PLS}$ ($r^2=0.82$)		
Sandstone ¹ (Calcareous)	$2.59 \times PLS + 0.21$ ($r^2=0.65$)	0.13-5 (United Arab Emirates)	Elhakim (2015)
Sedimentary (various) ¹	$19.94 \times PLS + 4.84$ ($r^2=0.85$)	8-120 (Turkey)	Kaya and Karaman (2016)
Igneous (various) ²	$8.20 \times PLS + 36.43$ ($r^2=0.68$)	50-203 (Turkey)	Kahraman and Gunaydin (2009)
Igneous rock ²	$6.65 \times PLS^{1.34}$ ($r^2=0.91$)	0-250 (Various)	Tziallas et al. (2009)
Igneous (various) ²	$16.34 \times PLS + 13.06$ ($r^2=0.79$)	10-221 (Turkey)	Kaya and Karaman (2016)
Metamorphic (various) ³	$18.45 \times PLS - 13.63$ ($r^2=0.77$)	24-211 (Turkey)	Kahraman and Gunaydin (2009)
Metamorphic rock ³	$12.36 \times PLS^{1.14}$ ($r^2=0.75$)	0-250 (Various)	Tziallas et al. (2009)
Schist ³	$11.103 \times PLS + 37.659$ ($r^2=0.74$)	40-108 (India)	Basu and Kamran (2010)
Phyllite ³	$32.07 \times \ln(PLS) + 16.83$ ($r^2=0.884$)	17-52 (Portugal)	Andrade and Saraiva (2010)
	$16.61 \times PLS + 3.47$ ($r^2=0.843$)		
Metagreywacke ³	$11.91 \times PLS + 11.29$ ($r^2=NG^*$)	32-74 (Portugal)	
Hornfels ³	$24.36 \times PLS - 2.14$ ($r^2=0.99$)	96-273 (Iran)	Fereidooni (2016)
Metamorphic (various) ³	$15.10 \times PLS + 17.30$ ($r^2=0.74$)	66-263 (Turkey)	Kaya and Karaman (2016)
Sandstone, limestone, dolomite, marble, gneiss ⁴	$23 \times PLS + 13$ ($r^2=0.884$)	35-288 (USA)	Cargill and Shakoor (1990)
Coal measure rocks ⁴	$23.62 \times PLS - 2.69$ ($r^2=0.86$)	15-149 (Turkey)	Kahraman (2001)
Other rocks ⁴	$8.41 \times PLS + 9.51$ ($r^2=0.72$)	7-152 (Turkey)	
Chalk, pumice, tuff ⁴	$3.86 \times PLS^2 + 5.65PLS$ ($r^2=NG^*$)	3-13 (Canada)	Quane and Russel (2003)
Various (All rock) ⁴	$10.91 \times PLS + 27.41$ ($r^2=0.61$)	26-211 (Turkey)	
Various (n<1%) ⁴	$24.83 \times PLS - 39.64$ ($r^2=0.72$)	26-211 (Turkey)	Kahraman et al. (2005)
Various (n>1%) ⁴	$10.22 \times PLS + 24.31$ ($r^2=0.75$)	45-204 (Turkey)	
Various ⁴	$9.08 \times PLS + 39.32$ ($r^2=0.72$)	61-203 (Turkey)	Fener et al. (2005)
Andesite/basalt, sandstone, gypsum, marble ⁴	$13.3291 \times PLS + 7.4353$ ($r^2=0.639$)	22-189 (Turkey)	Yilmaz (2009)
All types ⁴	$10.92 \times PLS + 24.24$ ($r^2=0.56$)	24-203 (Turkey)	Kahraman and Gunaydin (2009)
All rock types ⁴	$10.58 \times PLS^{1.14}$ ($r^2=0.66$)	0-250 (Various)	Tziallas et al. (2009)
All types ⁴	$16.48 \times PLS + 10.27$ ($r^2=0.81$)	8-263 (Turkey)	Kaya and Karaman (2016)

*NG: Not given in the references, *UN: Unknown, 1: Sedimentary rock, 2: Igneous rock, 3: Metamorphic rock, 4: Various rocks

국내 연구 현황

Bae et al.(1991)은 편마암에 대한 일축압축강도와 점하중강도지수의 상관관계를 연구하였는데 약한면의 방향을 고려하여 구한 결정계수($r^2=0.81$)가 방향을 고려하지 않고 얻어진 결정계수($r^2=0.36$)보다 더 높았다. Lee et al.(2003)에 의하면 층리를 가진 셰일의 경우 층리에 평행한 방향과 수직방향으로 구한 점하중강도지수의 비율은 약 2.2로서 평행한 방향의 점하중강도지수는 수직방향의 약 50%로 나타났다. Lee and Youn(2009)은 대구 셰일의 이방성을 고려한 상관관계를 연구하였는데 층리각을 90°로 고정시킨 상태에서의 환산계수는 14.4로서 ISRM(1985)의 층리가 없는 무결암 시료에 대한 일반적인 환산계수인 22와는 많은 차이가 있었다.

Baek et al.(2006)은 안동지역의 흑운모화강암에 대하여 상관관계식을 제시하였는데 선형관계식이 가장 높은 결정계수(r^2)를 나타내었다. Kim et al.(2008)은 호상 흑운모 편마암의 경우 일축압축강도 시험이 일반적으로 엽리방향과 수직으로 수행되므로 점하중강도지수는 직경방향보다 축방향으로 얻어진 시험 결과를 활용하는 것이 타당한 것으로 판단하였다. 또한 엽리와 수직으로 재하되는 조건인 축방향으로 얻어진 점하중강도지수가 직경방향으로 얻어진 점하중강도지수보다 더 크게 측정되었으며 풍화암과 연암 보다는 보통암과 경암의 경우 엽리가 암석의 강도에 더 큰 영향을 주고 있음을 확인하였다.

이외에도 국내의 많은 연구자들이 특정 지역의 암석에 대한 상관관계를 제안하였으며 $y=ax$ 형태의 식을 제외한 다양한 유형의 상관관계식은 Table 2와 같다. 국내암석에서 얻어진 결정계수(r^2)의 평균은 0.85로 국외암석의 평균 0.79보다 모든 암종에서 더 상관성이 높았는데 이는 국내 연구결과가 특정 지역 암석에서 집중적으로 수행되었기 때문으로 판단된다.

상관관계에 영향을 주는 인자

국내외의 많은 연구자들이 점하중강도지수를 이용하여 암석의 일축압축강도를 결정하려는 연구를 진행하였다. 국내외의 광범위한 문헌조사를 통하여 상관관계에 영향을 주는 인자를 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

암석시료의 크기와 모양

일축압축강도와 점하중강도 사이의 상관관계는 암석 시료의 크기, 암석 시료의 길이와 직경의 비율, 시료의 모양 등과 연관이 있다는 것은 많은 실험 결과를 통하여 입증되었다(Broch and Franklin, 1972; Bieniawski, 1975; Brook, 1980; Hassani et al., 1980; Broch, 1983; Forster, 1983; Turk and Dearman, 1985; Chau and Wong, 1996 등). Hawkins(1998)의 실험에 의하면 시료의 직경이 증가할수록 그리고 원통형 시료가 육면체 시료보다 환산계수가 더 컸다. Lee et al.(2011)은 선형회귀분석(Linear regression analysis)을 적용하여 강원도 지역 화강암의 점하중강도와 일축압축강도를 산정하는 관계식을 제안하였는데 관계식에는 시료의 폭과 두께를 고려하였다.

일축압축강도와 인장강도 비율

점하중강도시험에서 암석은 인장을 받아 파괴가 발생하므로 점하중강도지수에 의한 암석의 일축압축강도 추정의 정확성은 일축압축강도와 인장강도의 비율에 따라 달라진다(Hoek, 1977; Chau and Wong, 1996; Singh et al., 2012). Sheorey(1997)에 의하면 일축압축강도와 인장강도의 비율($R=\sigma_c/\sigma_t$)은 2.7부터 39까지 다양한 값을 보이며 문헌상 평균값은 14.7이다. R값은 암종과 암석의 생성기원에 따라 달라지며 일반적인 경암의 경우 이 비율은 약 10, 이암(mudstone)이나 점토암(claystone)은 5정도이다(Cai, 2010). Karaman et al. (2015)에 의하여 제시된 R값은 화산암 6.27, 변성암 5.97, 퇴적암 7.02이었다.

Table 2. Correlating equations expressed in various types for rocks in Korea

Rock Types	UCS-Point Load Strength (MPa)	References
Shale ¹	$23 \times PLS + 13.342$ ($r^2=0.88$)	Chung and You (1997)
Volcanic breccia ¹	$15 \times PLS + 8.054$ ($r^2=0.94$)	
Black shale (Daegu) ¹	$32.42 \times PLS + 32.218$ ($r^2=0.87$): coring \perp bedding plane	Kim et al. (2001)
	$52.60 \times PLS - 48.851$ ($r^2=0.89$): coring \parallel bedding plane	
Red shale (Daegu) ¹	$30.66 \times PLS + 28.726$ ($r^2=0.91$): coring \perp bedding plane	
	$20.86 \times PLS + 40.623$ ($r^2=0.84$): coring \parallel bedding plane	
Tuff (Goheung) ¹	$22 \times PLS + 49$ ($r^2=0.903$)	Kim et al. (2004)
Limestone ¹	$8.313 \times PLS + 24.853$ ($r^2=0.786$)	Woo (2005)
Sandstone ¹	$21.58 \times PLS + 6.06$ ($r^2=0.839$)	Min and Moon (2006)
	$18.11 \times PLS_{axi} - 0.09$ ($r^2=0.962$)	
Shale ¹	$16.28 \times PLS + 31.26$ ($r^2=0.626$)	
	$15.95 \times PLS_{axi} + 12.77$ ($r^2=0.852$)	
Mudstone ¹	$17.65 \times PLS + 12.01$ ($r^2=0.750$)	Min et al. (2008)
	$15.77 \times PLS_{axi} + 3.06$ ($r^2=0.857$)	
Sedimentary rocks ¹	$20.26 \times PLS + 12.69$ ($r^2=0.808$)	
	$17.87 \times PLS_{axi} + 1.04$ ($r^2=0.931$)	
Sandstone ¹	$19.32 \times PLS + 6.08$ ($r^2=0.738$)	Kim et al. (2012)
Shale ¹	$19.25 \times PLS + 17.20$ ($r^2=0.745$)	
Limestone ¹	$27.774 \times PLS - 4.7748$ ($r^2=0.78$)	Kwag et al. (2013)
Black shale (Daegu) ¹	$15.84 \times PLS + 17.39$ ($r^2=0.84$): coring \perp bedding plane	
Red shale (Daegu) ¹	$15.26 \times PLS + 37.74$ ($r^2=0.89$): coring \perp bedding plane	Lee and Lee (1995)
Granite (J*) ²	$48.465 + 12.1959 \times PLS$ ($r^2=0.867$)	
Granite (C*) ²	$39.005 + 17.7828 \times PLS$ ($r^2=0.839$)	Chung and You (1997)
Granite porphyry ²	$22 \times PLS + 3.108$ ($r^2=0.96$)	
Granite (Chunyang)-J* ²	$16.203 \times PLS + 11.059$ ($r^2=0.882$)	Woo (2005)
Biotite granite (J*) ²	$27.84 \times PLS - 9.818$ ($r^2=0.821$)	Baek et al. (2006)
Biotite granite (C*) ²	$6.064 \times PLS + 12.60$ ($r^2=0.860$)	Eom et al. (2008)
Granite (Geochang)-J* ²	$33.5 \times PLS - 31.2$ ($r^2=0.75$)	Kim (2015)
Schistose granite (J*) ³	$14 \times PLS + 0.618$ ($r^2=0.94$)	Chung and You (1997)
Biotite gneiss ³	$17 \times PLS + 4.856$ ($r^2=0.91$)	
Granitic gneiss ³	$13 \times PLS + 8.123$ ($r^2=0.94$)	
Biotite gneiss ³	$16.656 \times PLS + 21.239$ ($r^2=0.84$)	
Gneiss ³	$16.24 \times PLS - 1.52$ ($r^2=0.870$)	Min et al. (2008)
Gneiss ³	$16.24 \times PLS - 1.52$ ($r^2=0.870$)	Kwon (2012)
	$12.84 \times PLS_{axi} - 13.11$ ($r^2=0.93$)	
Granite (C*), Biotite granite (C*), Granitic gneiss (J*), Porphyric granite (J*), Alkali granite (J*) ⁴	$14.73 \times PLS + 23.33$ ($r^2=0.80$)	Woo (2014)

*C: Cretaceous, J: Jurassic, 1: Sedimentary rock, 2: Igneous rock, 3: Metamorphic rock, 4: Various rocks

암석의 종류

Pells(1975)에 의하면 24의 환산계수가 조립현무암(dolerite), 노라이트(norite), 휘석암(pyroxenite)과 같은 암석의 일축압축강도 추정에는 약 20%의 오차를 보일 수 있었다. Vallejo et al.(1989)은 암종의 차이로 인하여 사암보다 세일의 환산계수가 더 작은 것으로 결론지었다. 그러나 Rusnak and Mark(1999)는 암종보다는 세일의 강도가 작아서 환산계수가 더 작은 것으로 해석하였다. Fener et al.(2005)은 암석의 종류, 암석의 미세 조직, 그리고 실험 상태의 차이가 환산계수에 영향을 미칠 수 있음을 실험을 통하여 제시하였다. Kahraman and Gunaydin(2009)의 실험과 Tziailas et al.(2009)의 문헌조사 결과에 의하면 화성암, 변성암, 퇴적암으

로 구분하여 얻어진 환산계수의 상관관계가 전체 암석의 환산계수보다 일반적으로 더 높았다. Singh et al.(2012)은 10개의 서로 다른 암종으로 구성된 318개의 NX규격 코어를 이용하여 인도지역의 암석에 대한 점하중강도지수와 일축압축강도 사이의 상관관계를 제시하였다. 실험에 의하면 암종에 따라 환산계수의 차이가 있었으며, 암종별로 시료가 하중을 받을 때 응력-변형률 관계가 다르며, 암종별 이방성으로 인하여 이러한 차이가 발생하는 것으로 추정하였다. 그러나 전반적으로 강한 암석이 약한 암석에 비하여 환산계수가 더 컸으므로 암종보다는 암석 강도를 환산계수 차이의 가장 중요한 요인으로 간주하였다.

Chung and You(1997)는 국내 암석의 풍화정도에 따른 일축압축강도, 점하중강도의 범위와 6개 암종에 대한 일축압축강도와 점하중강도의 상관관계를 제시하였다. 일축압축강도와 점하중강도의 상관관계식은 선형의 관계식($y=Kx+C$)을 갖는 것으로 분석되었으며 K는 13~23의 넓은 분포를 갖고 있으며 각 암종의 결정계수(r^2)는 0.88~0.96까지로 높은 신뢰성을 보였다. 그러나 6개 암종을 종합하면 K는 15, 결정계수(r^2)는 0.64로 신뢰성이 더 낮았다. 따라서 점하중강도를 이용하여 암석의 일축압축강도를 추정할 경우에는 암종별로 다른 상관관계식을 사용할 것을 제안하였다. Min and Moon(2006)과 Kim et al.(2012)도 연구 사례마다 환산계수의 차이가 보이는 이유를 암석의 생성원인과 조성 차이에 기인하는 것으로 해석하였다. Kaya and Karaman(2016)은 성인에 따라 화성암은 화산쇄설암(pyroclastic rock), 화산암, 심성암으로, 퇴적암은 화학적(chemical)과 쇄설성(clastic), 그리고 변성암은 엽리상(foliated)과 비엽상(nonfoliated)으로 더욱 세분하여 환산계수를 산정하였다. 이들은 암석의 지질학적 기원이 환산계수에 큰 영향을 미치며 따라서 암석의 성인에 따라서 다른 환산계수를 이용할 것을 제안하였다. 그러나 y절편이 0인 환산계수로 나타낸 그들의 실험결과를 분석해보면 화성암의 결정계수는 0.77, 화산쇄설암 0.85, 화산암 0.59, 심성암 0.49, 퇴적암의 결정계수는 0.85, 화학적 퇴적암 0.15, 쇄설성 퇴적암 0.59, 변성암의 결정계수는 0.72, 엽리상 암석 0.56, 비엽상암석 0.55로 대체로 성인에 따라 더욱 세분한 환산계수의 결정계수가 더 낮았다.

암석의 산출지역

Lee and Lee(1995)에 의하면 모든 종류의 국내 화강암에서 측정한 점하중강도지수와 일축압축강도사이의 상관관계($r=0.902$)보다 불국사 화강암($r=0.916$)과 대보 화강암($r=0.931$)으로 구별하여 측정한 상관관계가 약간 더 높았다.

Kim et al.(2012)은 임계지역에 분포하는 석회암을 대상으로 일축압축강도와 점하중강도지수 사이의 상관관계를 연구하였으며 국내 타 지역의 석회암을 대상으로 수행된 연구와 비교하였다. 연구결과, 동일한 석회암이라도 국내 분포지역에 따라 상관관계가 다를 수 있다는 결론을 얻었다. Heidari et al.(2012a)은 이란의 Gachsaran 층에서 나타나는 석고암(gypsum rock)의 점하중강도지수와 일축압축강도의 상관관계식을 제시하였는데 다른 지역의 석고암에는 사용하지 말 것을 제안하였다. Cha et al.(2007)은 경기도 편마암복합체내 경기 동부지역에 분포하고 있는 호상 흑운모 편마암에 대하여 상관관계를 분석한 결과 지역별로 상관관계의 차이가 있었다. 상관관계가 가장 큰 차이를 보이는 곤지암지역의 상관관계를 광주지역에 적용할 경우 암석의 일축압축강도가 약 65 MPa 작게 산정이 되었다. Min and Moon(2006)은 같은 퇴적암이라도 산출지역별로 환산계수가 차이가 보이는 이유를 퇴적이력, 입자구조 및 광물조성의 차이 때문일 것으로 추정하였다.

암석의 강도

Abbs(1985)의 연구에 의하면 약하고 기공이 있는 탄산염 암석의 경우 환산계수가 4에 불과하였다. Goodman (1989)은 강도가 약한 암석일 경우 24의 환산계수 사용이 매우 큰 오차를 보일 수 있으므로 주의해야 함을 강조하였다. Bieniawski(1989)는 RMR을 이용한 암반분류에서, 일축압축강도가 25 MPa 이하의 암석에서는 점하중강도지수를 이용한 무결암 강도 산정을 권장하지 않

았다. Vallejo et al.(1989), Smith(1997), Sabatakakis et al.(2008), Nuri et al.(2012)의 실험에서도 약한 암석의 환산계수가 더 작은 경향을 보였다. Rusnak and Mark(1999)의 실험 결과에서는 연암의 환산계수가 경암보다 작은 것은 일부 확인하였으나 이러한 경향이 명확하지는 않았다. Koncagül and Santi(1999)에 의하면 점하중강도지수는 강도가 큰 암석의 경우 값이 더 크게 증가하는 경향이 있으며 시료의 모양에 따라 다양한 값을 보였다. 따라서 점하중강도지수는 암석의 강도를 일정하게 측정하지 못한다고 결론지었다. Quane and Russell(2003)은 점하중강도가 5 MPa 이상의 강한 암석에서는 선형관계식, 4 MPa 이하의 약한 암석에서는 비선형관계식을 사용할 것을 권장하였다. Tsiambaos and Sabatakakis(2004)는 퇴적암인 석회암, 이회암, 사암 등의 환산계수가 강도에 따라 차이가 있음을 제시하였다. 이들의 실험 결과에 의하면 점하중강도지수가 2 MPa 이하는 13, 2~5 MPa 사이는 20, 5 MPa 보다 더 큰 경우는 28의 환산계수를 보였다. Singh et al.(2012)에 의하면 점하중강도지수를 일축압축강도로 변환하는 환산계수는 14와 24 사이의 범위를 보였는데 편마암계통의 콘달라이트(Khondalite)암석에서의 예외가 있지만 일반적으로 경암일수록 환산계수 값이 증가하는 경향이 있었다. 따라서 점하중강도시험의 결과는 연암과 경암이 다르게 해석되어야 한다고 결론지었으며 연암(일축압축강도 25 MPa 이하)의 환산계수는 14~16, 경암은 21~24를 제안하였다. 연암의 경우에는 환산계수의 상관계수도 낮았는데 이것은 연암의 화학조성, 이방성, 파괴 양상 등의 차이에 의한 것으로 추정하였다. 그러나 Cargill and Shakoор(1990)의 실험결과에서는 경암이 연암보다 환산계수의 상관계수가 더 낮았다.

시료의 포화도

Vallejo et al.(1989)에 의하면 시료가 포화되어 있을 경우에 환산계수가 증가하는 경향이 있었다. Nuri et al. (2012)도 이라크 지역의 석회암, 석고암, 사암의 습윤시료 환산계수가 건조시료 환산계수보다 더 크다고 보고하였다. 특히 석회암과 석고암보다 사암의 습윤시료 환산계수(22.7)가 건조시료 환산계수(11.8)와 큰 차이를 보였는데 사암이 공극이 많고 압축강도가 낮은 것에 기인하는 것으로 해석하였다. 그러나 Bell(1995)의 보통암과 경암에 대한 연구결과에 의하면, 습윤한 시료의 환산계수는 7~26(평균 14), 건조시료의 환산계수는 15~30(평균 20)이었다. Smith(1997)의 연구결과에서도 습윤한 석회암의 환산계수(23)가 건조시료(27.2)보다 더 작은 값을 보였다. Hawkins(1998)와 Kahraman et al. (2005)은 일축압축강도와 점하중강도지수가 함수비에 영향을 받으므로 현장에서는 함수비를 고려하여 환산계수를 사용할 것을 권장하였다. 그러나 일축압축강도가 25 MPa 이하인 열수 변질(hydrothermally altered)된 연암의 경우, 함수비가 환산계수에 미치는 영향은 거의 없었다(Kohno and Maeda, 2012). 결론적으로, 일반 암석의 경우 포화도가 환산계수에 영향을 주고 있으나 암종에 따라 습윤한 시료와 건조시료의 환산계수 크기에 차이가 있었다.

암석의 이방성 및 불균질성

일축압축강도는 축방향으로 시험이 수행되지만 점하중강도지수는 직경방향으로도 시험이 수행되므로 특히 암석이 이방성인 경우에는 축방향시험과 환산계수가 달라질 수 있다. 따라서 Greminger(1982)는 점하중강도지수를 이용하여 이방성 암석의 일축압축강도를 추정할 경우 상당한 오차가 발생할 수 있음을 강조하였다. Broch(1983)는 축방향과 직경방향으로 측정한 점하중강도지수를 이용하여 암석 강도의 이방성을 측정하는 방법을 제시하였다. Vallejo et al.(1989)과 Kim et al. (2004)의 실험에서는 직경방향으로 측정한 점하중강도지수는 축방향으로 측정한 값보다 훨씬 작았다. Rusnak and Mark(1999)는 일축압축강도 산정을 위해서는 직경방향보다 축방향으로 수행한 점하중강도지수를 활용할 것을 권장하였다. Kwon(2012)은 18개 지역에서 총 260개의 편마암 시료를 채취하여 점하중강도지수와 일축압축강도의 상관관계를 연구하였다. 연구를 위하여 불연속면과 수직된 방향으로 NX

규격의 공시체를 제작하여 일축압축시험과 점하중강도 시험을 수행하였다. 일축압축강도와 점하중강도지수의 상관관계는 직경방향보다 축방향으로 수행한 점하중강도지수가 일축압축강도와 더 높은 상관성을 보였다. Min and Moon(2006)에 의하면 층리 혹은 불연속면을 포함한 울산지역 퇴적암의 경우에서도 축방향에서 얻어진 점하중강도지수가 일축압축강도와 더 높은 상관성을 보였는데 일축압축강도의 측정값과 예측값의 결정계수(r^2)가 축방향은 0.93, 직경방향은 0.79이었다.

암석이 뚜렷한 불연속면을 보이지 않더라도 암석 자체의 불균질성으로 인하여 암석의 강도가 달라질 수 있으며 이것이 환산계수에 영향을 미칠 수 있다(Ibris et al., 2011; Elhakim, 2015). 특히 석회질 암석의 경우에는 불균질성이 심해서 일축압축강도와 점하중강도지수의 변동계수(coefficient of variation)가 각각 39%와 59%이었다(Kulhawy and Prakoso, 2001). Diamantis et al.(2009)도 그리스지역 사문암의 환산계수가 다소 분산되는 이유를 암석학적인 다양성, 사문암화 작용(serpentinization)의 차이 등으로 해석하였다.

암석의 풍화도

현장에서 암석의 풍화는 균일하게 발생되지 않으므로 풍화가 진행된 암석에서 점하중강도시험이나 일축압축시험을 수행할 경우에는 실험값이 다소 분산될 것을 예상할 수 있다. Pells(1975)와 Read et al.(1980)에 의하면 일축압축강도와 점하중강도지수의 상관관계가 암석의 종류와 풍화도에 따라 달랐다. 특히 일축압축강도와 점하중강도지수의 시험이 서로 직각 방향으로 수행되므로 암석이 이방성인 경우에는 이러한 차이가 더 컸다. Kim et al.(2008)의 연구에서도, 이방성 암석의 경우 암석강도에 미치는 엇리방향의 영향이 풍화도에 따라 달랐다. Elhakim(2015)도 암석 풍화도의 차이가 실험값 분산 원인 중의 하나로 지적하였다.

암석의 공극률

Palchik and Hatzor(2004)는 다공질 백악(porous chalk)에서의 실험 결과를 토대로 공극률이 18%에서 40%로 증가하면 환산계수가 18에서 8로 감소한다고 보고하였다. Kahraman et al.(2005)은 공극률이 일축압축강도와 점하중강도지수의 상관관계에 미치는 영향을 조사하기 위하여 38종(화성암 11종, 변성암 9종, 퇴적암 18종)의 암석에 대한 실험을 수행하였다. Palchik and Hatzor(2004)의 결과와 달리 공극률과 환산계수는 직접적인 상관관계를 보이지 않았는데 이것은 이들이 다양한 암석에 대한 실험을 수행한 반면에 Palchik과 Hatzor는 1가지 암종만을 대상으로 실험을 수행하였기 때문으로 해석되었다. 그러나 공극률이 1%보다 큰 그룹과 작은 그룹으로 암석을 나누어 각 그룹별로 결정한 상관관계가 모든 암종에 대한 상관관계 보다 더 높았으며, 공극률이 더 작은 강한 암석이 공극률이 큰 암석보다 환산계수가 더 큰 경향을 보였다. Fereidooni(2016)의 혼펠스에 대한 실험결과에 의하면 점하중강도지수와 공극률은 반비례 지수(Inverse exponential)관계를 보인다. 그러나 Kahraman et al.(2005)의 실험 결과를 분석해보면 공극률이 큰 암종이 공극률이 작은 암종보다 더 강한 경우도 있었다. 따라서 공극률과 환산계수의 직접적인 상관관계는 일부 암석의 동일한 암종에만 적용되는 것으로 판단된다.

점하중시험 시의 콘의 침투 심도

Broch and Franklin(1972)은 강한 암석의 경우에만 파괴 시 콘이 암석 내부로 침투하지 않아서 점하중시험기의 시험 전 콘 간격을 직경(D)로 간주할 수 있다고 하였다. ISRM(1985)도 암석이 크거나 강한 경우에는 시험 전 콘 사이 간격을 암석 시료 직경(D)로 간주해도 오차가 작다고 규정하였다. 그러나 Basu and Aydin(2006)의 레이저 거리 측정기를 이용한 연구에 의하면 풍화된 화강암

보다 신선한 화강암의 콘 침투(cone penetration)심도가 더 컸다. 따라서 신선한 암석의 파괴시의 콘 사이 간격을 고려하여 점하중 강도지수 값을 보정해주는 경우에 환산계수의 결정계수가 상당히 높아졌고 환산계수도 더 작았다. 이들은 문헌조사에서 제시된 강한 암석의 환산계수의 결정계수(r^2)가 콘 침투 심도 때문에 더 낮은 것으로 해석하였다. 콘 침투 심도가 거의 영향을 미치지 않는 압축강도의 상한 값은 주로 암종이나 암석의 미세구조에 의하여 결정된다. 취성암석에서 침투 심도는 인장강도가 감소할수록 감소하지만 세립질 암석이 더 작을 수 있다. 그러므로 성분이 유사한 암석이라도 입도가 다른 경우에는 환산계수를 별도로 산정할 것을 권장하였다.

기타

Chau and Wong(1996)에 의하면 일축압축강도와 점하중강도 사이의 상관관계는 암석의 압축강도와 인장강도의 비율, 시료의 길이와 직경과 함께 암석의 포아송비가 영향을 미친다.

Rusnak and Mark(1999)는 점하중강도지수와 일축압축강도 사이의 관계가 다양하게 나오는 이유를 암석의 일축압축강도 산정의 부정확성, 점하중강도지수 산정의 부정확성, 그리고 두 시험사이의 실제 값 차이 등의 3가지로 제시하였는데 특히 일축압축강도 시험 자체의 부정확성을 가장 큰 요인으로 추정하였다. 즉 같은 지역의 동일한 암석이라도 일축압축강도가 다양할 수 있다는 것이다. Kaya and Karaman(2016)의 경우에도, 터키 동부 흑해지역 암석에 대한 환산계수(17.92)를 실험을 통하여 산출하였는데 같은 지역의 기존 문헌조사에서 얻은 실험 결과를 포함한 환산계수(14.81)와 약간의 차이를 보였다. Woo(2014)에 의하면, 흡수율이 유사한 암석시료들끼리 시료 균을 나누어 강도 평균을 구한 후 상관관계를 분석한 경우 더 높은 결정계수를 보였다.

결론적으로 점하중강도지수를 이용하여 일축압축강도를 산정할 경우에 사용하는 환산계수는 암석 고유의 불균질성과 이방성 이외에도 암석시료의 직경, 암석 시료의 길이와 직경의 비율, 시료의 모양, 일축압축강도와 인장강도의 비율, 암석의 종류, 암석의 종류가 동일하더라도 분포지역의 차이, 암석 강도, 시료의 포화도, 풍화도, 공극률, 점하중강도시험 시 콘의 침투 심도, 포아송비, 일축압축강도와 점하중강도 시험 자체의 정확성, 미세 균열 등의 다양한 요인에 영향을 받는다. 특히 암석은 일반적으로 같은 지역의 동일한 암석이라도 풍화도나 광물조성의 차이 등에 의하여 균질하지 않는데 일축압축시험과 점하중시험에는 동일한 시료가 사용되지 않으므로 환산계수가 영향을 받을 것으로 판단된다.

점하중강도지수와 일축압축강도 상관관계

Fener et al.(2005)은 21개의 논문에 제시된 일축압축강도(y)와 점하중강도지수(x)의 상관관계를 요약하여 제시하였는데, 상관관계식에는 $y=ax$, $y=ax+b$, $y=ax^b$, $y=ax^2+bx$ 등의 다양한 형태가 있었으며 $y=a\ln(x)+b$, $y=ae^{bx}$ 등의 관계식도 Azimian and Ajalloeian(2014) 등에 의하여 제시되었다. 상관관계식 중에서 $y=ax$ 형태가 가장 널리 사용되고 있으며 이 식에서 a 를 환산계수라고 한다.

Sabatakakis et al.(2008)의 실험결과에 의하면 지수함수(exponential function)로 표현한 상관관계식의 결정계수(0.81)가 y 절편이 0인 경우의 결정계수(0.71)보다 약간 더 높았다. Tziallas et al.(2009)도 문헌조사 결과를 이용하여 모든 종류의 암석, 퇴적암, 화성암, 변성암, 사암에 대한 상관관계식을 별도로 제시하였는데 지수함수가 원점 회귀식보다 약간 더 높은 결정계수를 보였으나 퇴적암을 제외하고 큰 차이는 없었다. Heidari et al.(2012b)에 의하면 점하중강도지수를 이용하여 암석의 일축압축강도를 추정할 때 y 절편이 0인 환산계수를 사용하는 것보다 y 절편을 갖는 관계식이 더 정확한 결과를 보였다.

Forster(1983)는 일반적으로 점하중강도지수를 이용하여 암반분류에 사용되는 암석의 일축압축강도를 산정할 경우, 일축압축 시험 자체의 오차를 고려했을 때 $\pm 20\%$ 의 오차는 충분히 정확한 것으로 간주될 수 있다고 판단하였다. 또한 Ulusay et al.(1994), Min and Moon (2006), Diamantis et al.(2009), Sheraz et al.(2014), Elhakim(2015) 등은 선형 회귀분석을 사용하여 상관관계를 구하는 경우 점하중강도지수가 0이어도 일축압축강도가 y축의 절편만큼 존재하는 모순이 있으며 강도가 클수록 y축의 절편이 증가하여 참값과의 편차가 더 크다는 문제점을 지적하였다. 따라서 일축압축강도와 점하중강도지수의 상관관계는 환산계수로 나타낼 것을 권장하였다.

점하중강도지수와 일축압축강도의 상관관계를 제시한 국내외의 논문들로부터 얻어진 결정계수(r^2)는 Table 3과 같다. Table 1에 제시된 외국사례의 경우, 다양한 식으로부터 얻어진 암종별 평균 결정계수는 퇴적암 0.83, 화성암 0.79, 변성암 0.82이었으며 예상대로 다양한 암석에서 얻어진 결정계수는 0.72로 가장 낮았다. Table 2에 제시된 국내사례의 경우에는, 다양한 식에서 산출된 결정계수(r^2)의 암종별 평균은 퇴적암 0.84, 화성암 0.85, 변성암 0.90이었으며 예상대로 다양한 암석에서 얻어진 결정계수는 0.80으로 가장 낮았다. Table 3에 의하면 국내외 모든 암석에서, y절편이 0인 환산계수를 사용한 경우의 결정계수는 다양한 식에서 얻어진 결정계수보다는 다소 낮았으나 그 차이가 크지 않았다. Vallejo et al.(1989)과 Rusnak and Mark(1999), Cha et al.(2007), Elhakim(2015), Kaya and Karaman(2016)의 연구결과에서도 y절편이 0인 환산계수가 표준 회귀식과 비교하여 정확도가 떨어지지 않았다. Kim et al.(2012)도 원점 회귀분석을 이용하더라도 결정계수가 일반 회귀식과 큰 차이가 없었으며, 원점 회귀분석에서 얻어진 값(26.43)이 Min and Moon(2006)이 제안한 환산계수(강도비)를 이용하여 얻어진 값(26.30)과 유사한 결과를 보였으므로 원점 회귀분석에서 얻어진 값을 사용할 것을 권장하였다.

일축압축강도의 산정을 위하여 24의 환산계수가 국내외에서 널리 사용되고 있으며 RMR 암반분류의 일축압축강도 산정에도 25의 환산계수가 사용되고 있다. 따라서 일축압축강도와 점하중강도지수 시험의 정확성, 기존의 사례연구, 사용의 편리성 등을 종합했을 때 다양한 형태의 식보다는 단순한 환산계수를 사용하여 암석의 일축압축강도를 산정하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단된다.

Table 3. Coefficients of determination (r^2) for equations correlating the UCS to the point load strength index

	Rocks in foreign countries		Rocks in Korea	
	Various type equations	Conversion factors	Various type equations	Conversion factors
Sedimentary rocks	0.83	0.74	0.84	0.76
Igneous rocks	0.79	0.88	0.85	0.92
Metamorphic rocks	0.82	0.80	0.90	0.78
Various rock types	0.72	0.71	0.80	0.77
Total rock averages	0.79	0.78	0.85	0.80

점하중강도지수와 일축압축강도 환산계수

국외 사례 연구

국외에서 많은 연구자들이 환산계수를 발표하였으며 퇴적암은 Table 4, 화성암, 변성암, 다양한 암석은 Table 5와 같다. Table 3

Table 4. Conversion factors correlating the UCS to the point load strength index for sedimentary rocks from foreign countries

Rock types	Conversion factor	UCS Range (MPa)	References
Sandstone, limestone, mudstone	21-22 ($r^2=UN^*$)	UN*	Carter and Sneddon (1977)
Sedimentary rocks	29 ($r^2=0.884$)	10-200	Hassani et al. (1980)
Sandstone, siltstone	16 ($r^2=UN^*$)	27-180	Read et al. (1980)
Sandstone	14.8-17.6 ($r^2=NG^*$)	17-39	Forster (1983)
Limestone	26.5 ($r^2=UN^*$)		
Sandstone	24.8 ($r^2=UN^*$)	UN*	Hawkins and Olver (1986)
Siltstone	9 ($r^2=UN^*$)		
Limestone, sandstone, anhydrite, halite	21.8 ($r^2=UN^*$)	17-217	O'Rourke (1989)
Sandstone	17.4 ($r^2=NG^*$)	NG*	
Shale	12.5 ($r^2=NG^*$)	NG*	Vallejo et al. (1989)
Siltstone	14.7 ($r^2=UN^*$)		
Sandstone	18 ($r^2=UN^*$)	UN*	Das (1985)
Shale	12.6 ($r^2=UN^*$)		
Mudstone	16 ($r^2=UN^*$)	UN*	Wilson (1976)
Sandstone/limestone	24 ($r^2=NG^*$)	41-85	
Shale	12.6 ($r^2=NG^*$)	NG*	Smith (1997)
Shale	21.8 ($r^2=NG^*$)	1-140	
Siltstone	20.2 ($r^2=NG^*$)	10-140	
Sandstone	20.6 ($r^2=NG^*$)	10-140	Rusnak and Mark (1999)
Limestone	21.9 ($r^2=NG^*$)	35-240	
Sandstone	14.1 ($r^2=UN^*$)	UN*	Jermy and Bell (1991)
Limestone, marlstone, sandstone	PLS (Total)-25.3 ($r^2=0.71$) PLS<2 - 13 ($r^2=0.49$) 2<PLS<5 - 24 ($r^2=0.36$) PLS>5 - 28 ($r^2=0.53$)	1-260	Sabatakakis et al. (2008)
Limestone, marlstone, sandstone	23 ($r^2=0.75$)	2-254	Tsiambaos and Sabatakakis (2004)
Sandstone (Calcareous)	2.86 ($r^2=0.64$)	0.13-5	Elhakim (2015)
Sedimentary (various)	18.74 ($r^2=0.85$)	8-120	Kaya and Karaman (2016)
Sandstone	19 (author's suggestion)	31-118	Ulusay et al. (1994)
Mudrock	21.4 ($r^2=0.856$)	1-110	Lashkaripour (2002)
Chalk (백악, 퇴적암)	8-18 ($r^2=NG^*$)	21-63	Palchik and Hatzor (2004)
sandstone, siltstone,	13.4 ($r^2=0.89$)	1-11	Agustawijaya (2007)
Sedimentary rock	13.55 ($r^2=0.48$)		
Sandstone	15.70 ($r^2=0.62$)	0-250	Tziallas et al. (2009)
Wet Sedimentary rocks	10 (PLS<2), 16 (PLS 2-5), 24 (PLS>5) ($r^2=NG^*$)	NG*	Hawkins (1998)
Limestone (dry)	14.7 ($r^2=NG^*$)	29	
Limestone (wet)	15.8 ($r^2=NG^*$)	18	
Sandstone (dry)	11.8 ($r^2=NG^*$)	12	
Sandstone (wet)	22.7 ($r^2=NG^*$)	3	Nuri et al. (2012)
Gypsum (dry)	14.4 ($r^2=NG^*$)	33	
Gypsum (wet)	16.0 ($r^2=NG^*$)	20	
Dolostone, sandstone, limestone	23.8 ($r^2=NG^*$)	68-345	Gunsallus and Kulhawy (1984)

*NG: Not given in the references, *UN: Unknown

Table 5. Conversion factors correlating the UCS to the point load strength index for igneous, metamorphic, and various rocks from foreign countries

Rock types	Conversion factor	UCS Range (MPa)	References
Basalts ¹	20 ($r^2=UN^*$)	30-132	Read et al. (1980)
Dolerite ¹	11.8-14 ($r^2=NG^*$)	79-114	Forster (1983)
Granite ¹	16 ($r^2=0.563$)	25-119	Ghosh and Srivastava (1991)
Granitic rocks ¹	15.25 ($r^2=0.960$)	98-251	Tugrul and Zarif (1999)
Igneous (various) ¹	18.22 ($r^2=0.77$)	10-221	Kaya and Karaman (2016)
Granite (considering cone penetration) ¹	18 ($r^2=0.97$)	6-196	Basu and Aydin (2006)
Granite (no correction) ¹	21 ($r^2=0.93$)		
Granite (Dry) ¹	30 ($r^2=0.96$)	11-288	Irfan and Dearman (1978)
Granite (Saturated) ¹	24 ($r^2=0.98$)	5-262	
Igneous rock ¹	14.40 ($r^2=0.88$)	0-250	Tziallas et al. (2009)
Greenstone ²	7.4 ($r^2=NG^*$)	12	Forster (1983)
Quartzite ²	23.4 ($r^2=0.960$)	75-76	Singh and Singh (1993)
Metamorphic (various) ²	16.96 ($r^2=0.72$)	66-263	Kaya and Karaman (2016)
Serpentinite ²	19.79 ($r^2=0.74$)	19-126	Diamantis et al. (2009)
Metamorphic rock ²	18.15 ($r^2=0.78$)	0-250	Tziallas et al. (2009)
Various ³	23.7 ($r^2=0.774$)	1-250	Broch and Franklin (1972)
Sandstone, quartzite, norite ³	23.5 ($r^2=NG^*$)	55-312	Bieniawski (1975)
Hard rock ³	21-24 ($r^2=0.884$)	17-159	Singh et al. (2012)
Soft rock ³	14-16 ($r^2=0.813$)	10-77	
Granite/tuff ³	12.5 ($r^2=0.533$)	18-180(Avg.=100)	Chau and Wong (1996)
Various ³	22 ($r^2=NG^*$)	1-250	Brook (1985)
Sandstone, limestone, dolomite, marble, gneiss ³	24 ($r^2=NG^*$)	35-288	Cargill and Shakoor (1990)
Various ³	13.38 ($r^2=0.533$)	2-22	Karaman et al. (2015)
Various ³	14.81 ($r^2=0.624$)	5-263	
All types ³	17.92 ($r^2=0.79$)	8-263	Kaya and Karaman (2016)
Basalt, granite, hornfels ³	24.4 ($r^2=NG^*$)	70-305	Quane and Russel (2003)
Hydrothermally altered rock (dacite, tuff, sandstone, conglomerate) ³	16.4 ($r^2=0.85$)	1-25	Kohno and Maeda (2012)
All rock types ³	14.49 ($r^2=0.62$)	0-250	Tziallas et al. (2009)
Dry Sedimentary & Igneous rocks ³	15 (PLS<2), 20 (PLS 2-5), 25 (PLS>5) ($r^2=NG^*$)	NG*	Hawkins (1998)

*NG: Not given in the references, *UN: Unknown, 1: Igneous rock, 2: Metamorphic rock, 3: Various rocks

에 의하면 화성암의 결정계수는 0.88로 가장 높았으며 다양한 암석은 0.71로 가장 낮았다. 퇴적암의 환산계수는 2.86~29(평균 17.7), 화성암 11.8~30(평균 19.0), 변성암 7.4~23.4(평균 17.1), 다양한 암석은 12.5~25(평균 19.0)의 범위를 보였다. 국외의 모든 사례 연구에서 얻어진 환산계수의 평균은 18.1이었다.

모든 암종의 환산계수 평균값은 기존에 국내외에서 널리 사용되고 있는 24보다는 작았으며 암종별로 유의미한 결과를 보이지 않았다. 본 연구에서 제시한 사례 연구에 의하면 약한 암석의 환산계수가 더 작은 경향을 보였으므로 Table 4와 5 중에서 암석의 압축 강도를 알 수 있는 데이터에 대해서만 추가적으로 암석의 강도별 환산계수를 분석하였다(Table 6). ISRM(1981)의 일축압축강도

Table 6. Average conversion factors for different rock types from foreign countries

Rock types	Conversion factor	UCS Range (MPa)
Sedimentary rock	17.7	0-345
	14.1	0-50
	13.8	0-25
	14.6	25-50
	20.8	50-100
	21.1	100-345
Igneous rock	19.0	0-288
	16.3	50-100
	20.1	100-288
Metamorphic rock	17.1	0-263
	12.0	0-25
	21.6	50-100
	17.6	100-263
Various rock types	19.0	0-312
	14.9	0-50
	14.9	0-25
	15.0	25-50
	17.5	50-100
	20.6	100-312
Average for all conversion factors	18.1	0-345
	13.8	0-50
	13.3	0-25
	14.7	25-50
	19.5	50-100
	19.6	100-150
	20.4	100-345
	22.6	150-345

에 의한 무결암 분류에 의하면 25 MPa 이하는 연암(low strength) 혹은 극연암(very low strength), 25~50 MPa은 보통암, 50~100 MPa은 중경암, 100 MPa 이상은 경암 혹은 극경암에 해당된다. Table 6에 의하면 일축압축강도가 50 MPa 이하인 모든 암석의 평균 환산계수가 15보다 작았다. 특히 일축압축강도가 25 MPa 이하인 암석에서는 상대적으로 더 낮은 환산계수를 보였으며, 10 이하의 매우 낮은 환산계수를 보이는 경우도 있었다. 50~100 MPa의 암석은 환산계수가 19.5, 100~150 MPa의 암석은 환산계수 19.6으로 유사하였다. 또한 100 MPa 이상 암석의 평균 환산계수는 20.4, 150 MPa 이상 암석의 평균 환산계수는 22.6이었다.

외국의 사례조사를 통해서 얻은 결론은, 환산계수는 Bieniawski(1989)의 제안과 같이 일축압축강도가 25 MPa 이상의 암석에 서만 사용하는 것이 권장되며 25~50 MPa 암석은 환산계수 15, 50~150 MPa의 암석은 환산계수 20, 150 MPa 이상의 암석은 23의 환산계수를 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

국내 사례 연구

국내에서도 많은 연구자들이 환산계수에 대한 연구를 수행하였으며 이를 종합하면 Table 7과 같다. Table 3에 의하면 화성암의

결정계수는 0.92로 가장 높았으며 퇴적암은 0.76으로 가장 낮았다. 점하중강도 시험의 축방향 실험을 제외하면, 퇴적암의 환산계수는 12.6~26.4(평균 20.6), 화성암 17.7~25.4(평균 20.4), 변성암 15.9~22.2(평균 18.8), 다양한 암석은 17.7의 범위를 보였다. 국내의 모든 사례 연구에서 얻어진 환산계수의 평균은 19.7이었다. 축방향 실험 결과를 포함할 경우의 환산계수 평균은 퇴적암 19.7, 변성암 17.3, 전체 암석 18.8로서 약 1 정도 작은 값을 보였다.

국내 암석의 환산계수의 평균값은 외국 사례 연구와 마찬가지로 모든 암종에서 기존에 국내외에서 널리 사용되고 있는 24보다는 작았으며 암종별로 유의미한 결과를 보이지 않았다. 국내 암석의 강도별 환산계수는 Table 8과 같다. 본 연구에서 수집된 국내사례에서는 일축압축강도의 평균값이 50MPa이하인 경우는 없었으며, 50~100 MPa 암석은 환산계수가 19.6, 100~150 MPa 암석의 환산계수는 20.0이었다. 국외 사례의 경우 50~100 MPa의 암석은 환산계수가 19.5, 100~150 MPa의 암석은 환산계수 19.6이었으므로 국내와 국외 암석의 환산계수는 일축압축강도에 따라 거의 유사하였다. 국내 사례 연구의 경우 일축압축강도가 150 MPa 이상인 암석에 대한 실험 결과도 상당수 포함되었으나 평균값이 150 MPa이상인 암석을 대상으로 제시된 환산계수 사례는 얻을 수 없었다.

Table 7. Conversion factors correlating the UCS to the point load strength index for rocks in Korea

Rock Types	Conversion factor	UCS Range (MPa)	References	
Sedimentary rocks ¹	15.01 ($r^2=0.82$)	8-179 (middle 94)	Lee et al. (2000)	
Limestone (Janggun) ¹	12.566 ($r^2=0.570$)	49-87 (avg. 70)	Woo (2005)	
Sedimentary rocks ¹	24.31	23-174 (avg. 89)		
	18.11 (axi.)			
Sandstone ¹	23.02	35-174 (avg. 106)	Min and Moon (2006)	
	18.06 (axi.)			
Shale ¹	25.73	42-138 (avg. 93)		
	18.70 (axi.)			
Mudstone ¹	23.25	23-93 (avg. 54)		
	16.94 (axi.)			
Shale ¹	14.4 ($r^2=0.86$)	20-150 (middle 85)	Lee and Youn (2009)	
Limestone ¹	26.43 ($r^2=0.78$)	38-161 (avg. 88)	Kim et al. (2012)	
Granite (Chunyang)-J* ²	17.67 ($r^2=0.97$)	49-137 (middle 93)	Baek et al. (1997)	
Glassy volcanic rock ²	25.4 (r^2 =not given)	66	Kang et al. (2005)	
Granite (Chunyang)-J* ²	18.089 ($r^2=0.869$)	56-136 (avg. 101)	Woo (2005)	
Biotite gneiss (Total) ³	18.90 ($r^2=0.82$)	14-220 (avg. 92)	Cha et al. (2007)	
Biotite gneiss (Gonjiam) ³	16.137 ($r^2=0.81$)	27-181 (avg. 76)		
Biotite gneiss (Bundang) ³	18.231 ($r^2=0.82$)	15-200 (avg. 81)		
Biotite gneiss (Gwangju) ³	21.369 ($r^2=0.69$)	72-216 (avg. 126)		
Biotite gneiss (Dukso) ³	17.877 ($r^2=0.72$)	15-220 (avg. 99)		
Biotite gneiss (Yangpyung) ³	19.642 ($r^2=0.85$)	14-209 (avg. 76)		
Biotite gneiss ³	22.2 ($r^2=0.79$)	15-160 (middle 88)		Kim et al. (2008)
	11.6 (axi.) ($r^2=0.72$)	18-145 (middle 82)		
Gneiss ³	15.90 (r^2 =not given)	25-170 (avg. 95)	Kwon (2012)	
	11.13 (axi.) (r^2 =not given)			
Granite (C*), Biotite granite (C*), Granitic gneiss (J*), Porphyric granite (J*), Alkali granite (J*) ⁴	17.68 ($r^2=0.77$)	23-195 (avg. 117)	Woo (2014)	

* 1: Sedimentary rock, 2: Igneous rock, 3: Metamorphic rock, 4: Various rocks, axi.: axial test, J*:Jurassic, C*:Cretaceous

Table 8. Average conversion factors for different rock types in Korea

Rock types	Conversion factor	UCS Range (MPa)
Sedimentary rock	20.6 (19.7)*	8-179
	20.2 (19.5)*	50-100
	23.0 (20.5)*	100-150
Igneous rock	20.4	49-137
	21.5	50-100
	18.1	100-150
Metamorphic rock	18.8 (17.3)*	14-220
	18.4 (16.8)*	50-100
	21.4	100-150
Various rock types	17.7	23-195
	17.7	100-150
Average for all conversion factors	19.7 (18.8)*	8-220
	19.6 (18.6)*	50-100
	20.0 (19.6)*	100-150

()* : Including test data from axial direction

국내외 사례 연구에 의한 환산계수 제안

환산계수는 다양한 인자들에 의하여 영향을 받을 수 있으나 이러한 인자들을 모두 고려하여 환산계수를 결정하는 것은 실무적으로 적용하기 어렵다. 국내외 사례연구 결과에 의하면 환산계수는 암종이나 산출지역보다는 일축압축강도와 밀접한 상관성이 있는 것으로 판단된다. 일축압축강도가 25 MPa 이하의 암석은 환산계수가 매우 다양하므로 환산계수는 일축압축강도가 25 MPa 이상의 암석에서만 사용하는 것이 권장되며 25~50 MPa 암석은 환산계수 15, 50~150 MPa 이상의 암석은 환산계수 20, 150 MPa 이상의 암석은 23의 환산계수를 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

그러나 현장에서는 암석의 점하중강도지수를 먼저 측정한 후 환산계수를 이용하여 일축압축강도로 환산하게 되므로 점하중강도지수에 따른 환산계수 값을 제시하는 것이 필요하다. 또한 일축압축강도의 범위에 따라 하나의 환산계수를 제시하는 것은 약간의 일축압축강도의 차이에 따라 환산계수의 차이가 크게 발생할 수 있는데, 예를 들면 어떤 암석의 일축압축강도가 149 MPa인 경우에는 20, 151 MPa인 경우 23의 환산계수를 사용해야 하는 문제점이 있다.

일축압축강도를 구간별 환산계수를 이용하여 점하중강도지수로 환산한 후, 각 구간별 비례관계를 가정하여 점하중강도지수에 대한 환산계수를 구하면 Table 9와 같다. 환산계수는 점하중강도지수가 1.5 MPa 이상일 경우에만 사용하고, 환산계수 식을 이용할 경우 소수점으로 환산계수가 계산될 수 있는데 소수 첫 번째 자리에서 반올림하여 정수로 이용하는 것이 권장된다.

Hawkins(1998)가 건조한 퇴적암과 화성암에서 얻은 환산계수는 15(PLS<2 MPa), 20(PLS 2~5 MPa), 25 (PLS>5 MPa)인데, Table 9를 이용하여 이 범위의 환산계수를 계산하면 PLS 1.5 MPa은 15, PLS 2~5 MPa은 17~22(평균 19.5), PLS>5 MPa은 22~23이므로 비교적 유사한 결과를 보인다. 그러나 Sabatakakis et al. (2008)이 석회암, 이회암, 사암으로부터 구한 환산계수 13(PLS<2 MPa), 24(PLS 2~5 MPa), 28(PLS>5 MPa)과는 다소 차이가 있다.

결론적으로, 국내외 암석에 대한 사례연구 결과 점하중강도지수가 1.5 MPa(혹은 일축압축강도 25 MPa) 미만인 암석의 경우 환산계수의 신뢰성이 매우 떨어져서 사용하지 않는 것이 권장된다. 또한 환산계수가 암석의 강도와 밀접한 상관성이 있어서 강도가 증가할수록 환산계수가 증가하는 경향이 뚜렷하므로 국내외에서 널리 사용되는 24와 같은 하나의 환산계수를 사용하여 암석의 일

축압축강도를 추정하는 것은 많은 오차를 유발할 수 있다. 점하중강도지수 6.5 MPa(혹은 일축압축강도 150 MPa)이상의 경암이나 극경암에서는 환산계수가 더 이상 증가하지 않으므로 23의 환산계수를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

Table 9. Suggested conversion factors for rocks in Korea obtained using literature reviews

Point load strength index (PLS, MPa)	Conversion factor*
< 1.5	Do not use
1.5	15
1.5 < PLS ≤ 2.5	6 × PLS + 5
2.5 < PLS ≤ 6.5	0.75 × PLS + 18.1
> 6.5	23

* Natural number

환산계수의 국내 현장 적용

본 연구결과의 신뢰성을 검증하기 위하여, 점하중강도시험을 수행하였다. 일축압축시험과 점하중강도시험의 시료 규격과 절차는 한국암반공학회에서 제안한 KSRM(2005, 2007)의 표준시험법을 적용하였다. 시험은 모두 NX 크기의 직경을 가진 시추코어를 사용하였으며, 점하중시험의 경우 직경방향시험은 직경과 길이의 비율이 1:2, 축방향시험은 1:1의 시료가 주로 사용되었다.

국내 암석에서 수행된 일축압축강도와 점하중강도지수를 요약하면 Table 10과 같다. 일축압축시험은 무결암(intact rock)에서 수행되는데 국내 암석의 무결암 강도가 일반적으로 양호하므로, 25~50 MPa의 일축압축강도를 가진 보통암에 해당되는 암석 시료에 대한 자료 취득에는 어려움이 있었다. 본 연구에 사용된 국내 암석의 일축압축강도 평균은 최소 59 MPa에서 최대 197 MPa로 중경암~경암에 해당된다. 일축압축강도시험은 표준시험법에 따라 모든 사례에서 3개 이상의 시험결과를 이용하였으나 점하중시험은 균질한 시료 채취의 어려움으로 인하여 10개 이하의 시료에서 얻어진 결과도 Table 10에 포함하였다. 그러나 최대값과 최소값을 제외한 나머지 값을 평균하여 점하중강도지수를 결정하였으며 취득한 점하중시험 결과의 분산이 크지 않았으므로 시료수의 부족으로 인한 오차는 크지 않을 것으로 판단된다.

세종시의 쥐라기 흑운모 화강암은 직경과 축방향으로 점하중시험이 수행되었다. 세종시 화강암의 경우 이방성을 보이지 않아서 직경방향과 축방향의 점하중강도지수가 거의 동일하였으며 환산계수는 10이었다. 충북 옥천군 대흥교에서 시추된 역암시료의 일축압축강도는 6개 시료의 평균으로부터 87 MPa로 결정되었으며 환산계수는 15이었다. 대전시 동구 대전대학교 캠퍼스 내에서 채취된 화강편마암의 일축압축강도 평균은 97 MPa, 환산계수는 16이었다.

대전 하소일반산업단지에서 시추된 암석은 화강암질이 많은 편암이며 석영, 감람석, 운모 등의 광물을 포함하고 있다. 5개 시료의 평균으로부터 얻어진 암석의 일축압축강도는 102 MPa이었다. 직경과 축방향으로 점하중시험이 수행되었으며 직경방향은 직경과 길이의 비율이 1:2.5, 축방향은 1:0.9~1의 시료가 사용되었다. 이방성을 보이는 편암의 특성상 환산계수는 직경방향 12, 축방향 25로 상당히 큰 차이를 보였다. 경기도 화성시 갈천리 지역 호상편마암의 평균 일축압축강도는 112 MPa이며 환산계수는 24로 국내외에서 널리 사용되고 있는 환산계수와 동일하였다.

강원도 홍천군 굴업리 지역의 편마암은 선캄브리아기의 자류석 편마암으로 직경과 축방향으로 점하중시험이 수행되었다. 이 지역 편마암의 평균 일축압축강도는 125 MPa이었으며 환산계수는 직경방향 22, 축방향 17로 이방성을 보였다. 세종시 새롬동에서

Table 10. Comparison of conversion factors obtained from this study

Rock type	Location	σ_c (MPa)		PLS (MPa)		σ_c/PLS	Conversion factors from this study
		Test results	Avg.	Test results	Avg.		
Granite (Jr.)	Sejong	44.4, 46.3, 87.8	59	3.9, 3.9, 4.7, 6.2, 6.6, 7.0, 7.6	5.7	10	22
				4.8, 4.8, 5.7, 6.4, 6.4, 8.7	5.8	10	
Conglomerate	Okcheon	75.2, 80.2, 88.3, 89.4, 90.3, 98.5	87	5.4, 5.7, 5.8, 6.0, 6.1	5.8	15	22
Granitic gneiss	Daejeon	88.9, 90.0, 90.8, 97.8, 105.1, 108.0	97	5.5, 5.7, 5.9, 6.2, 6.4	5.9	16	23
Schist	Daejeon	79, 101, 107, 110, 115	102	7.2, 8.0, 8.3, 8.5, 8.6, 8.9, 9.0, 9.2, 9.6, 10.3	8.8	12	23
				2.3, 2.8, 3.4, 3.5, 3.6, 3.6, 3.8, 4.7, 5.7, 7.1	3.9*	25	21
Banded gneiss	Hwaseong	90.8, 97.7, 107.2, 108.0, 120.7, 148.0	112	4.6, 4.6, 4.7, 4.9, 5.3	4.7	24	22
Gneiss	Hongcheon	101.2, 108.5, 118.3, 140.6, 157.2	125	4.8, 4.8, 4.8, 5.0, 5.4, 7.0, 7.6, 8.5	5.8	22	22
				1.5, 5.7, 6.3, 6.6, 8.4, 10.2, 12.1	7.4*	17	23
Granitic gneiss	Sejong	103.1, 114.3, 131.3, 140.6, 160.6	130	4.1, 4.8, 5.0, 6.2, 6.3, 6.5, 6.9	5.8	22	22
				6.9, 7.1, 7.2, 8.3, 10.6, 11.1, 12.2	8.9*	15	23
Granite (Cre.)	Iksan	160.3, 170.4, 176.0, 178.5	171	5.8, 6.5, 6.5, 6.6, 6.6, 6.6, 6.8, 6.8, 7.5, 8.7	6.7	26	23
				5.3, 5.8, 6.0, 6.1, 6.1, 6.1, 6.3, 6.3, 6.3, 6.8	6.1*	28	
Granite (Jr.)	Icheon	169.3, 184.4, 185.6, 194.9, 214.8, 225.7	196	6.8, 7.0, 7.0, 7.1, 7.5	7.0	28	23
Granite (Cre.)	Daejeon	188.9, 191.7, 195.1, 200.0, 200.4, 205.5	197	6.7, 6.8, 7.4, 7.4, 7.4	7.2	27	23

*axial test

시추된 선캠브리아기 편마암질 화강암의 평균 일축압축강도는 130 MPa이었으며 직경과 축방향으로 점하중시험이 수행되었다. 편마암질 화강암의 환산계수는 직경방향 22, 축방향 15로 이방성을 보였다.

익산시의 황등화강암은 백악기 흑운모 화강암이며 직경과 축방향으로 점하중시험이 수행되었다. 화강암의 평균 일축압축강도는 171 MPa이었고, 환산계수는 직경방향 26, 축방향 28로 비교적 유사하였다. 경기도 이천시 이천소방서 인근에서 채취된 쥐라기 화강암의 평균 일축압축강도는 196 MPa로 경암에 해당되며 환산계수는 28이었다. 대전 동구 대전대학교 건설부지에서 채취된 백악기 화강암의 평균 일축압축강도는 197 MPa, 환산계수는 27이었다.

Table 10의 10개 사례연구에 의하면 환산계수는 시료채취 지역이나 암종보다 일축압축강도에 가장 큰 영향을 받는다. 일축압축강도와 환산계수의 관계는 Fig. 1과 같은데 일축압축강도가 증가할수록 환산계수가 증가하는 경향이 뚜렷하였다. 약 50~200 MPa의 범위의 일축압축강도를 가진 암석의 경우, 일축압축강도(x)와 환산계수(y)는 $y=0.108x + 7.724$ ($R^2=0.72$)의 관계식을 보

였다. 본 연구에서 문헌조사 결과를 통하여 도출한 환산계수와 비교하면, 일축압축강도가 100 MPa 이하 암석의 경우에는 측정된 환산계수가 예상치보다 작았고, 100~130 MPa에서는 예상치와 측정치가 유사하였으며 170 MPa 이상의 암석은 예상 환산계수보다 더 크게 측정되었다.

세종과 익산시 지역의 화강암은 점하중강도시험의 방향이 환산계수에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 편암, 편마암, 화강편마암과 같은 변성암은 직경방향과 축방향의 환산계수가 상당히 큰 이방성을 보였다. 따라서 이방성을 보이는 암석의 경우에는 어느 한 방향의 점하중시험결과를 가지고 암석의 일축압축강도를 추정하는 것은 매우 큰 오차를 유발할 수 있다. Rusnak and Mark (1999)는 직경방향보다 축방향으로 수행한 점하중강도시수를 활용하여 일축압축강도를 산정할 것을 권장하였다. 이방성이 뚜렷한 편암의 경우에는 축방향 점하중강도시수를 활용하여 일축압축강도를 산정하는 것이 기존 연구결과와 유사하였으나 이방성이 육안으로 뚜렷하지 않은 편마암의 경우에는 직경방향의 결과가 기존 연구와 일치하였다. 결론적으로, 변성암의 경우에는 강도가 이방성일 가능성이 있으므로 환산계수 적용에 주의해야 하며 특히 육안으로 약한면이 관찰되는 경우에는 이를 고려하여 점하중시험의 방향을 결정해야 한다. 즉 약한면과 수직방향의 일축압축강도를 추정할 경우에는 점하중시험도 일축압축시험과 동일한 방향으로 시험이 수행되어야 한다.

고찰 및 토의

본 연구에서 문헌조사 결과를 통하여 도출한 Table 9의 환산계수를 10개의 사례연구에 적용한 결과, 24의 동일한 환산계수를 적용하는 경우보다는 정확성이 높았다. 그러나 일축압축강도가 50~100 MPa인 암석의 경우에는 측정된 환산계수가 예상치보다 작았고, 100~130 MPa에서는 예상치와 측정치가 유사하였으며 170~200 MPa인 암석은 예상 환산계수보다 더 크게 측정되었다.

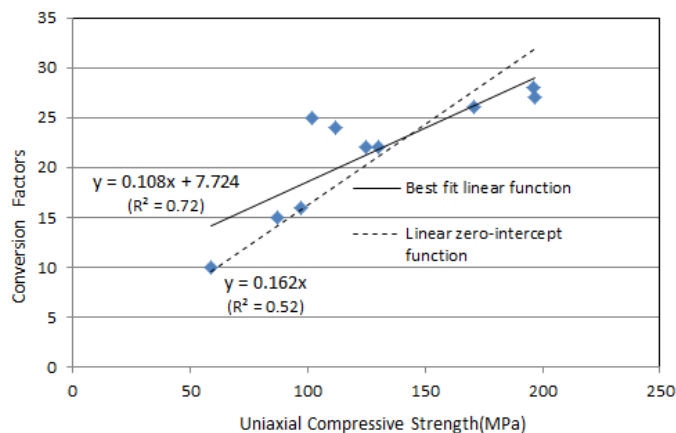


Fig. 1. Relationship between uniaxial compressive strength and conversion factors

본 연구와 기존 연구결과에서 도출된 공통된 결론은 암석의 일축압축강도가 증가할수록 환산계수가 증가하며 따라서 특정 지역이나 혹은 암종에 따라 특정한 환산계수를 제시할 수는 없다는 것이다. 특정지역의 특정암석에 대하여 동일한 장비를 가지고 시험을 수행하여 얻어진 환산계수의 결정계수(r^2) 평균은 국내암석 0.80, 국외암석 0.78로 비교적 높은 상관성을 보였으나 24와 같은 특

Table 11. Suggested conversion factors for rocks in Korea

Point load strength index (PLS, MPa)	Conversion factor	σ_c (MPa)
< 1.5	Do not use	< 25
1.5	15	25
1.5 < PLS < 2.5	17 (or $6 \times \text{PLS} + 5$)	25 < σ_c < 50
2.5	20	50
2.5 < PLS < 6.5	22 (or $0.75 \times \text{PLS} + 18.1$)	50 < σ_c < 150
≥ 6.5	24	≥ 150

정한 환산계수를 모든 암석에 일률적으로 적용하는 것은 큰 오차를 야기할 수 있다. 이것은 상관관계에 영향을 주는 인자들이 매우 다양하기 때문에 판단된다. 실제로 10개 사례연구에서, 일축압축강도와 환산계수는 결정계수(R^2) 0.72의 비교적 높은 상관관계를 보였다(Fig. 1). 따라서 암석의 강도를 고려하여 환산계수가 적용되는 것이 타당하다. Fig. 1의 경우 환산계수 24에 해당하는 암석의 일축압축강도는 약 150 MPa이다.

현장에서는 암석의 점하중강도지수를 이용하여 일축압축강도를 산정하게 되므로 점하중강도지수의 범위별로 환산계수가 제시되어야 한다. 암석의 점하중강도지수에 따라 환산계수를 제시하더라도 특정 암석의 일축압축강도의 추정에는 오차가 필연적으로 수반될 수 있으나 하나의 환산계수를 사용하는 것보다는 더 신뢰성 있게 일축압축강도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

국내외 암석에 대한 사례연구 결과 점하중강도지수가 1.5 MPa(혹은 일축압축강도 25 MPa) 미만인 암석의 경우 환산계수의 신뢰성이 매우 떨어져서 사용하지 않는 것이 권장된다. 점하중강도지수가 6.5 MPa이하인 암석은 국내외 사례연구를 통하여 도출한 Table 9의 환산계수를 사용하고 점하중강도지수가 6.5 MPa(일축압축강도 약 150 MPa)이상인 경우에는 기존에 널리 사용되고 있는 24의 환산계수를 사용할 것이 권장된다. 이것은 비록 150 MPa이상의 국내 암석에서는 24보다 약간 더 큰 환산계수가 예상되지만 기존에 24가 널리 사용되었고 보수적인 가정이며 더 큰 환산계수를 사용하여 일축압축강도가 다소 증가되더라도 이미 암석의 강도가 양호하므로 설계에 큰 영향을 주지 않을 것이기 때문이다. 국내외 문헌조사 결과와 본 연구를 통하여 최종적으로 제시된 환산계수는 Table 11과 같다. Table 9에서는 점하중강도지수가 1.5~2.5 MPa과 2.5~6.5 MPa 사이의 환산계수는 수식으로 주어졌으나 환산계수의 정확도를 고려했을 때 각각 17과 22를 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 향후 국내 암석에 대한 점하중강도지수와 일축압축강도 자료가 더 축적될 경우 Table 11에서 제안된 환산계수의 신뢰성 검증과 보완이 기대된다.

결론

본 연구에서는 광범위한 국내외 문헌조사와 실내시험 결과를 통하여 국내 암석에 대한 점하중강도지수와 일축압축강도의 상관관계를 제시하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 광범위한 사례 연구를 통하여, 암석시료의 크기와 모양, 일축압축강도와 인장강도 비율, 암석의 종류, 암석의 산출지역, 암석의 강도 등 점하중강도지수와 일축압축강도의 상관관계에 영향을 주는 인자들을 제시하였다.
2. 국내외 암석에 대한 점하중강도지수와 일축압축강도의 다양한 상관관계식을 결정계수와 함께 제시하였다.
3. 국내외 암석의 환산계수분석을 통하여 암석의 점하중강도지수의 범위에 따른 환산계수를 제시하였으며 점하중강도지수가 1.5 MPa이하일 경우에는 환산계수를 사용하지 말 것을 제안하였다.

4. 문헌조사를 통해 도출한 환산계수를 국내 10개 현장 사례에 적용하여 환산계수의 신뢰성을 검증하였으며 최종적으로 환산계수를 제안하였다.
5. 편암, 편마암과 같이 육안으로 이방성이 관찰되거나 이방성을 보일 가능성이 있는 암석의 경우에는 얻고자 하는 방향의 일축압축강도와 동일한 방향으로 점하중강도시험을 수행한 후 환산계수를 적용해야 한다.

향후 국내 암석에 대한 점하중강도지수와 일축압축강도 자료가 더 축적될 경우 본 논문에서 제안된 환산계수의 신뢰성 검증과 보완이 기대된다.

사사

이 논문은 2016학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

- Abbs, F.A., 1985, Use of the point load strength index in weak carbonate rocks, In: strength testing of marine sediments: Laboratory and in-situ measurements, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication 833, R. C. Chaney and K. R. Demars, Editors, 413-421.
- Agustawijaya, D.S., 2007, The uniaxial compressive strength of soft rock, Civil Engineering Dimension, Vol. 9, 9-14.
- Andrade, P.S. and Saraiva, A.A., 2010, Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 69, 207-214.
- ASTM, 2016, Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications, ASTM D5731-16, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Philadelphia.
- Azimian, A. and Ajalloeian, R., 2014, An empirical correlation of uniaxial compressive strength with P-wave velocity and point load strength index on marly rocks using statistical method, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 32, 205-214.
- Bae, D.S., Song, M.Y., and Kim, K.S., 1991, The anisotropic mechanical characteristics of the metamorphic rocks distributed in the Samkwang-Mine area, Cheongyang, Chungnam, The Journal of Engineering Geology, Vol. 1, 54-67.
- Baek, S.C., Kim, K.B., Lee, K.D., 1997, Evaluation of rock uniaxial compressive strength using point load strength index and shore scleroscope hardness, Proceedings of Korean Society of Engineering Geology, Spring conference, 31-39.
- Baek, S.C., Kim, Y.T., Kim, H.T., Yoon, J.S., Lee, Y.G., 2006, Evaluation of rock uniaxial compressive strength using ultrasonic velocity, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 7, 33-42.
- Basu, A. and Aydin, 2006, Predicting uniaxial compressive strength by point load test: significance of cone penetration, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 39, 483-490.
- Basu, A. and Kamran, M., 2010, Point load test on schistose rocks and its applicability in predicting uniaxial compressive strength,

- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 47, 823-828.
- Bell, F.G., 1995, Laboratory testing of rocks, In: Bell F.G. (ed), Engineering in rock masses, Butterworth-Heinemann, Oxford, 151-169.
- Bieniawski, Z.T., 1975, Point load test in geotechnical practice, Engineering Geology, Vol. 9, No. 1, 1-11.
- Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications, John Wiley & Sons, 251p.
- Broch, E. and Franklin, J.A., 1972, The point-load strength test, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, Vol. 9, No. 6, 669-697.
- Broch, E., 1983, Estimation of strength anisotropy using the point-load test, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, Vol. 20, 181-187.
- Brook, N., 1980, Size correction for point load testing, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, Vol. 17, 231-235.
- Brook, N., 1985, The equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, Vol. 22, 61-70.
- Cai, M., 2010, Practical estimates of tensile strength and Hoek-Brown strength parameter m_i of brittle rocks, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 43, 167-184.
- Cargill, J.S. and Shakoor, A., 1990, Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, Vol. 27, 495-503.
- Carter, P.G. and Snedden, M., 1977, Comparison of Schmidt hammer, point load and unconfined compression tests in carboniferous strata, Proceedings of a Conference on Rock Engineering, University of New Castle, Tyne, England, 197-210.
- Cha, A.R, Song, J.H., Choi, H.S., and Chun, B.S., 2007, The study on the correlation between unconfined compressive strength and point load strength within the gneiss complex in Gyunggi Province, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 8, 21-26.
- Chau, K.T. and Wong, R.H.C., 1996, Uniaxial compressive strength and point load strength of rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, Vol. 33, No. 2, 183-188.
- Chung, H.S. and You, B.O., 1997, A study on variation of rock strength due to weathering and its estimation, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 13, 71-93.
- D'Andrea, D.V., Fisher, R.L., and Fogelson, D.E., 1964, Prediction of compression strength from other rock properties, Quarterly of the Colorado School of Mines, Vol. 59, No. 4b, 623-640.
- Das, B.M., 1985, Evaluation of the point load strength for soft rock classification, Proceedings of the Fourth International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV, 220-226.
- Diamantis, K., Gartzos, E., and Migiros, G., 2009, Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: test results and empirical relations, Engineering Geology, Vol. 108, 199-207.
- Elhakim, A.F., 2015, The use of point load test for Dubai weak calcareous sandstones, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 7, 452-457.
- Eom, T.U., Kim, H.M., Kim, C.K., Jang, K.J., and Pyo, M.R., 2008, The weathering index and prediction of uniaxial compressive

- strength for Chung-Ju granite, Proceedings of Korean Geotechnical Society Conference, 863-874.
- Fener, M., Kahraman, S., Bilgil, A., and Gunaydin, O., 2005, A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strength of rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol 38, No. 4, 329-343.
- Fereidooni, D., 2016, Determination of the geotechnical characteristics of hornfelsic rocks with a particular emphasis on the correlation between physical and mechanical properties, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 49, 2595-2608.
- Forster, I.R., 1983, The influence of core sample geometry on the axial point-load test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, Vol. 20, 291-295.
- Ghosh, D.K. and Srivastava, M., 1991, Point-load strength: An index for classification of rock material, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 44, 27-33.
- Goodman, R. E., 1989, *Introduction to rock mechanics*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 562p.
- Greminger, M., 1982, Experimental studies of the influence of rock anisotropy on size and shape effects in point-load testing, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, Vol. 19, 241-246.
- Gunsallus, K.L. and Kulhawy, F.H., 1984, A comparative evaluation of rock strength measures, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, Vol. 21, 233-248.
- Hassani, F.P., Scoble M.J., and Whittaker, B.N., 1980, Application of the point load strength index test to strength determination of rock and proposals for a new size correction chart, *Proceedings of 21st US Symposium, Rock Mechanics, Rolla*, 543-553.
- Hawkins, A.B., 1998, Aspects of rock strength, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 57, No. 1, 17-30.
- Hawkins, A.B. and Olver, J.A.G., 1986, Point load tests: correlation factor and contractual use. An example from the Corallian at Weymouth, In: Hawkins A.B (ed) *Site investigation practice: assessing BS 5930*. Geological Society of London, 269-271.
- Heidari, M., Khanlari, G.R., Torabi Kaveh, M., and Kargarian, S., 2012a, Predicting the uniaxial compressive and tensile strengths of gypsum rock by point load testing, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 45, 265-273.
- Heidari, M., Khanlari, G.R., Torabi Kaveh, M., and Kargarian, S., 2012b, Reply to Discussion by Li and Wong on "Predicting the uniaxial compressive and tensile strengths of gypsum rock by point load testing" by Heidari et al., *Rock Mechanics and Rock Engineering* (2012) 45: 265-273, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 45, 1131-1135.
- Hoek, E., 1977, Rock mechanics laboratory testing in the context of a consulting engineering organization, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol.14, 93-101.
- Idris, M.A., Saiang, D., and Nordlund E., 2011, Numerical analyses of the effects of rock mass property variability on open stope stability, 45th US Rock Mechanics and Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association, 1530-1540.
- Irfan, T.Y. and Dearman, W.R., 1978, Engineering classification and index properties of a weathered granite, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 17, 79-90.
- ISRM, 1981, Basic geotechnical description of rock masses, International Society for Rock Mechanics, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol.18, 85-110.
- ISRM, 1985, Suggested method for determining point-load strength, International Society for Rock Mechanics, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 22, No. 2, 53-60.
- Jermy C.A. and Bell, F.G., 1991, Coal bearing strata and the stability of coal mines in South Africa, *Proceedings of the 7th International Congress on Rock Mechanics*, International Society for Rock Mechanics, 1125-1131.

- Kahraman, S. and Gunaydin, O., 2009, The effect of rock classes on the relation between uniaxial compressive strength and point load strength index, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 68, 345-353.
- Kahraman, S., 2001, Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 38, 981-994.
- Kahraman, S., Gunaydin, O., and Fener, M., 2005, The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load strength index, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 42, 584-589.
- Kang, S.S., Lee, H.J., Kang, C.W., and Kim, C.B., 2005, Physical and mechanical properties of volcanic glass in the Samho area, South Korea, *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 15, No. 3, 223-227.
- Karaman, K., Kaya, A., and Kesimal, A., 2015, Use of the point load strength index in estimation of the strength rating for the RMR system, *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 106, 40-49.
- Kaya, A. and Karaman, K., 2016, Utilizing the strength conversion factor in the estimation of uniaxial compressive strength from the point load strength index, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 75, 341-357.
- Kim, G.M., Kim, D.H., Kang, J. S., Kang, S. S., and Baek, H., 2012, A study on the correlation between uniaxial compressive strength and point load strength index of limestone of Imgye area, *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 22, No. 5, 330-338 (in Korean).
- Kim, H.G., Koh, Y.K., and Oh, K.H., 2004, A study on the mechanical properties of the cretaceous tuffs in Goheung area, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 14, No. 3, 273-285.
- Kim, J.H., Choi, S.Y., Kim, K.S., and Park, Y.J., 2008, Characteristics of the point load strength index considering the foliation of gneiss, *Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics Conference*, 137-143.
- Kim, M.K., 2015, The mechanical properties of the Geochang granite, *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 25, 24-36.
- Kim, Y.S. and Seo, I. S., Heo, N.Y., Lee, J.H., and Kim, B.T. 2001, Engineering characteristics of shales due to the angle of bedding planes, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 17, 5-13 (in Korean).
- Kohno, M. and Maeda, H., 2012, Relationship between point load strength index and uniaxial compressive strength of hydrothermally altered soft rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 50, 147-157.
- Koncagül, E.C. and Santi, P.M., 1999, Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 36, 139-153.
- KSRM, 2005, Standard test method for uniaxial compressive strength of rock, *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 15, No. 2, 85-86 (in Korean).
- KSRM, 2007, Standard test method for point load strength of rock, *Tunnel and Underground Space*, Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 17, No. 2, 75-82 (in Korean).
- Kulhawy, F.H. and Prakoso, W.A., 2001. Foundations in carbonate rocks and karst, In: Brandon T.L. editor, *Foundations and Ground Improvement*, American Society of Civil Engineers, 1-15.
- Kwag, S.M., Jung, Y.W., and Kim, G.W., 2013, Engineering properties of red shale and black shale of the Daegu area, Korea, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 23, 341-352.

- Kwon, S.H., 2012, Application of point load strength test to the Korean gneiss, M.Eng. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Ulsan University, 25p.
- Lashkaripour, G.R., 2002, Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 61, 73-77.
- Lee, J.G., Jang, S.M., Lee, S.G., and Sohn, G.C., 2003, A study on strength anisotropy characteristic and suggested methods for determining RQD as for shale, *Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics Conference*, 173-180.
- Lee, M.S., Kim, M.I., Baek, J.N., and Han, B.K., 2011, Calculating the uniaxial compressive strength of granite from Gangwon Province using linear regression analysis, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 21, 361-367.
- Lee, S.G. and Lee, S., 1995, A suggested method to predict uniaxial compressive strength of Korean Granites by point load strength, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, 1015-1027 (in Korean).
- Lee, Y.H, Kim, Y.J., and Park, J.K., 2000, Engineering characteristics of the sedimentary rocks on compressive strength and weathering grade, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 16, 5-17.
- Lee, Y.H. and Youn, C.H., 2009, The point load strength index of the Daegu shale and its relation to the uniaxial compressive strength, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 10, 37-45.
- Min, T.K. and Moon, J.K., 2006, A review of strength estimation method on Ulsan sedimentary rocks, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 22, 63-75.
- Min, T.K. and Moon, J.K., and Ro, J.S., 2008, Predicting uniaxial compressive strength and elastic modulus using Brazilian test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 24, 131-146.
- Nuri, T.M, Ali, A.N.Y., and Ahmed, S., 2012, Correlation study between point load test and uniaxial compressive strength and tensile strength of some sedimentary rocks in Mosul City, *Engineering & Technology Journal*, Vol. 30, No. 1, 155-166
- O'Rourke, J.E., 1989, Rock index properties for geo- engineering in underground development, *Mining Engineering*, Vol. 41, 107-110.
- Palchik, V. and Hatzor, Y.H., 2004, The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalk, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 37, No. 4, 331-341.
- Pells, P.J.N., 1975, The use of point load test in predicting the compressive strength of rock material, *Australian Geomechanics Journal*, Vol. 5(N1), 54-56.
- Quane, S.L. and Russell, J.K., 2003, Rock strength as a metric of welding intensity in pyroclastic deposits, *European Journal of Mineralogy*, Vol. 15, 855-864.
- Read, J.R.L., Thornten P.N., Regan W.M., 1980, A rational approach to the point load test, *Proceedings of Austria-New Zealand Geomechanics*, Vol. 2, 35-39.
- Rusnak, J.A. and Mark, C., 1999, Using the point load test to determine the uniaxial compressive strength of coal measure rock, *Proceedings of 19th International Conference on Ground Control in Mining*, 362-371.
- Sabatakakis, N., Koukis, G., Tsiambaos, G., and Papanakli, S., 2008, Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks, *Engineering Geology*, Vol. 97, 80-90.
- Sheorey, P.R., 1997, *Empirical rock failure criteria*, A.A. Balkema, Rotterdam, 176p.
- Sheraz, A.M., Emad, M.Z., Shahzad, M., and Arshad, S.M., 2014, Relation between uniaxial compressive strength, point load

- strength index and sonic wave velocity for dolerite, *Pakistan Journal of Science*, Vol. 66, 60-66.
- Singh, T.N., Ashutosh K., and Venkatesh, A., 2012, Correlation between point load strength index and uniaxial compressive strength for different rock types, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 45, No. 2, 259-264.
- Singh, V.K. and Singh, D.P., 1993, Correlation between point load strength index and compressive strength for quartzite rocks, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 11, 269-272.
- Smith, H.J, 1997, The point load test for weak rock in dredging applications, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No. 3-4, pp. 295.e1-295.e13.
- Tsiambaos, G. and Sabatakakis, N., 2004, Considerations on strength of intact sedimentary rocks, *Engineering Geology*, Vol. 72, 261-273.
- Tugrul, A. and Zarif, I.H., 1999, Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, *Engineering Geology*, Vol. 51, 303-317.
- Türk, N. and Dearman, W.R., 1985, Improvements in the determining point-load strength, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 31, 137-142.
- Tziallas, G.P., Tsiambaos, G., Saroglou, H., 2009, Determination of rock strength and deformability of intact rocks, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 14, 1-12.
- Ulusay R., Tureli, K., and Ider, M.H., 1994, Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques, *Engineering Geology*, Vol. 37, 135-157.
- Vallejo, L.E., Walsh, R.A., and Robinson, M.K., 1989, Correlation between unconfined compressive and point load strength for appalachian rocks, *Proceedings of the 30th US Symposium on Rock Mechanics*, 461-468.
- Wilson, L.C., 1976, Tests of bored and driven piles in Cretaceous mudstone at Port Elizabeth, South Africa, *Geotechnique*, Vol. 26, No. 1, 5-12.
- Woo, B.S., 2005, Evaluation of uniaxial compressive strength by point load test and hardness test, M.Sc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Andong National University, 55p.
- Woo, I., 2014, Correlation between the point-load strength and the uniaxial compressive strength of Korean granites, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 24, 101-110.
- Yilmaz, I., 2009, A new testing method for indirect determination of the unconfined compressive strength of rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 46, 1349-1357.