

# 임계지역 석회암의 일축압축강도와 점하중강도지수의 상관관계 연구

김경만, 김대훈, 강중석, 강상수, 백환조\*

## A Study on the Correlation between Uniaxial Compressive Strength and Point Load Strength Index of Limestone of Imgye Area

Gyoung Man Kim, Dae Hoon Kim, Jung Seock Kang, Sang Soo Kang, Hwanjo Baek\*

**Abstract** Though the uniaxial compressive strength (UCS) of rock material is one of the key properties for rockmass characterization purposes, core samples for the test cannot always be obtained from the field. Indirect tests such as the point load test (PLT) can be a useful alternative. In this study, correlation between the UCS and the point load strength index of limestone of Imgye area was analyzed, and the linear regression equation obtained from regression analysis of two variables was suggested. The results of this study were also compared with previous studies on limestone. It was suggested that conversion factors for the same rock type from diverse areas in Korea may have different values, and more data should be obtained to increase the accuracy of regression analysis.

**Key words** Uniaxial compressive strength, Point load test, Regressing equation, Conversion factor, Limestone

**초 록** 일축압축강도(UCS)는 암석의 주요 물성 중 하나이다. 그러나 항상 UCS 실험을 위한 시료를 취득할 수는 없다. 이러한 경우 점하중시험과 같은 간접시험법이 유용한 대안이 될 수 있다. 본 연구에서는 임계지역에 분포하는 석회암을 대상으로 일축압축강도와 점하중강도지수 사이의 상관관계를 분석하였으며 선형 회귀식이 제안되었다. 또한 석회암을 대상으로 수행된 이전 연구결과와 이번 연구 결과를 비교하였다. 동일한 암종이라도 국내에서 분포하는 지역에 따라 변환계수가 다를 수 있으며, 분석의 정확성을 높이기 위해서는 더 많은 자료가 필요할 것으로 판단된다.

**핵심어** 일축압축강도, 점하중시험, 회귀식, 변환계수, 석회암

### 1. 서 론

일축압축강도(UCS)는 암석의 가장 중요한 물성 중 하나로서(Basu and Aydin, 2006), 암반분류, 터널굴착, 사면과 발파설계 등에 널리 이용된다. 일축압축강도는 국내·외에서 표준화된 시험법(ASTM, 1986; KSRM, 2005b; ISRM, 2007)에 따라 측정할 수 있다. 일축압축강도 시험법은 비교적 간단하지만, 시험편의 준비과정

이 복잡하고 많은 시간이 소요되며, 시험편의 취득 및 성형이 불가능한 경우에 적용할 수 없다. 이 경우 점하중시험(Point Load Test, PLT)과 같은 간접시험법이 일축압축강도시험의 유용한 대안이 될 수 있다. PLT는 낮은 하중수준으로 실험을 수행할 수 있기 때문에 휴대용 장비가 가능하고 코어와 불규칙 형상 시험편에도 적용이 가능하며, 강도 이방성도 용이하게 측정할 수 있다(Broch and Franklin, 1972; Lee et al., 2003).

일반적으로 PLT는 직경방향, 축방향 또는 불규칙 시험편을 대상으로 실시한다. Bieniawski(1975)는 세 가지 방법으로 PLT를 수행하고 이를 비교한 결과, 사암과 Belfast 지역의 norite를 대상으로 수행한 실험에서 축방향 실험의 표준편차가 다른 두 방법에 비해 가장 적었고, 불규칙 시험편 시험방법이 가장 컸다. 그러나 그에 따르면 직경 방향 실험이 다른 두 방법에 비해 더 편리하고 간단

**Received:** September 20, 2012

**Revised:** October 8, 2012

**Accepted:** October 8, 2012

**\*Corresponding Author:** Hwanjo Baek

Tel) +82332506257, Fax) +82332556257

E-Mail) hwanjo@kangwon.ac.kr

Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Korea

하다고 보고하였다. 또한 Broch and Franklin(1972)은 축방향 방법과 불규칙 시험편 시험에서 시료의 형상효과가 두드러졌다고 보고하였다.

그간 다양한 종류의 암석에 대하여 UCS와 점하중강도지수(Is<sub>50</sub>) 사이의 상관관계에 대한 연구가 수행된 바 있다. PLT 장비를 개발한 Broch and Franklin(1972)은 변환계수(conversion factor) 24를 제안하였으나, 이 계수는 제한된 암종에 의한 결과로 이를 고려하여 사용해야 한다고 지적하였다. 11개의 암종(화성암 6, 변성암 3, 퇴적암 2)을 대상으로 한 연구에서 Fener et al.(2005)은 9의 변환계수를 제시했다. Singh et al.(2012)은 11개 암종을 대상으로 연구를 수행하였는데, 경암은 21-24를 연암에서는 14-16의 변환계수를 제시하였다. 그는 모든 암종에 대한 단일 변환계수는 잘못된 결론을 낼 수 있다고 하였다. Cha et al.(2007)은 실무에서는 암석의 종류를 고려한 실험이 필요하며 이것이 실험결과의 불확실성을 해소할 수 있다고 하였으며, Kang et al.(2005)은 삼호지역에 분포하는 유리질 화산암을 대상으로 Is<sub>50</sub>와 UCS사이의 관계를 규명하였다. Tsiambaos and Sabatakakis(2004)는 퇴적암을 대상으로 한 연구에서 Is<sub>50</sub> 값의 범위에 따라 추정식을 제안하였다. 기존 연구자의 연구결과 중 일부를 Table 1에 정리하였다.

UCS와 Is<sub>50</sub>은 대부분의 연구결과에서 높은 상관관계를 보이거나 변환계수들은 상당한 차이를 나타내며, 이는 주로 대상 암석의 생성원인과 조성 차이에 기인한 것으로 해석되고 있다(Tsiambaos, G. and Sabatakakis, N., 2004; Min and Moon, 2006). 따라서 국내에 분포하는 다

양한 암종에 대한 연구 결과는 암반을 대상으로 하는 광산 및 토목분야 설계에 반드시 필요할 것으로 판단된다.

국내에서 석회암은 국내 비금속광물 생산량의 91%, 생산액의 78%를 점유함으로써, 국내 광업에서 차지하는 비중이 가장 높은 부존자원이다(Lee and Jung, 2004). 그럼에도 불구하고 석회암의 공학적 특성과 관련된 연구는 미진한 실정이다. 본 연구에서는 강원도 정선 임계면에 분포하는 석회암을 대상으로 UCS와 Is<sub>50</sub> 사이의 상관관계를 규명하고 변환계수를 제안하였으며, 이 결과를 기존 연구 사례와 비교하였다.

## 2. 연구지역

연구지역은 강원도 정선군 임계면에 위치한 석회석 및 백운석 광산으로서(Fig. 1), 이 지역의 지질은 두위봉형 조선누층군에 속하며, 하부로부터 장산규암층, 묘봉층, 풍춘층, 화절층, 동점층, 두무동층, 막동층 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 주 가행대상은 풍춘층이며, 이 지층에는 퇴적 후에 중생대에 야기된 열수변질과 화강암류의 열접촉 효과에 의해서 지역별로 다양한 고품위 석회석 광체들이 형성되었다(Noh and Lee, 2007). 광체를 부존 지역에 따라 구분하면 서부광체, 중부광체 및 동부광체와 임계 123호광체로 구성된다. 이들 광체는 모두 동일한 퇴적환경 하에서 퇴적됨에 따라, 암상이나 품위의 변화는 크게 나타나지 않으나 구조적인 영향에 의해 부존양상 등에는 다소 차이를 보인다(Lee and Jung, 2004).

**Table 1.** Equations correlating the UCS to the point load strength index

Correlation Equation	Number of Specimens	Rock Type	Range of UCS [MPa]	Reference
$UCS = 22I_{s50} + 49$	32	Tuffs	80.4 ~ 208.0	Kim et al. (2004)
$UCS = 16.656I_{s50} + 21.7$	-	Gniss	29.0 ~ 209.3	Cha et al. (2007)
$UCS = 21.43I_{s50}$	-	Mudrocks	2.0 ~ 115.0	Lashkaripour (2001)
$UCS = 23I_{s50}, I_{s50} < 3.5 \text{ MPa}$	93	Sedimentary rocks	2.1 ~ 254	Tsiambaos and Sabatakakis (2004)
$UCS = 7.3I_{s50}^{1.71}, I_{s50} > 3.5 \text{ MPa}$				Min and Moon (2006)
$UCS = 18.11I_{s50}$	77	Sandstone, Mudstone, Shale	23.10 ~ 173.9	Diamantis et al. (2009)
$UCS = 22.8I_{s50}$	21	Quartzite	32.5 ~ 98.9	Singh et al. (2012)
$UCS = 21.9I_{s50}$	30	Sandstone	17.6 ~ 56.4	
$UCS = 14.4I_{s50}$	18	Shale	9.9 ~ 18.8	
$UCS = 23.3I_{s50}$	63	Gabbro	17.3 ~ 137.0	
$UCS = 22.3I_{s50}$	24	Limestone	86.9 ~ 129.8	

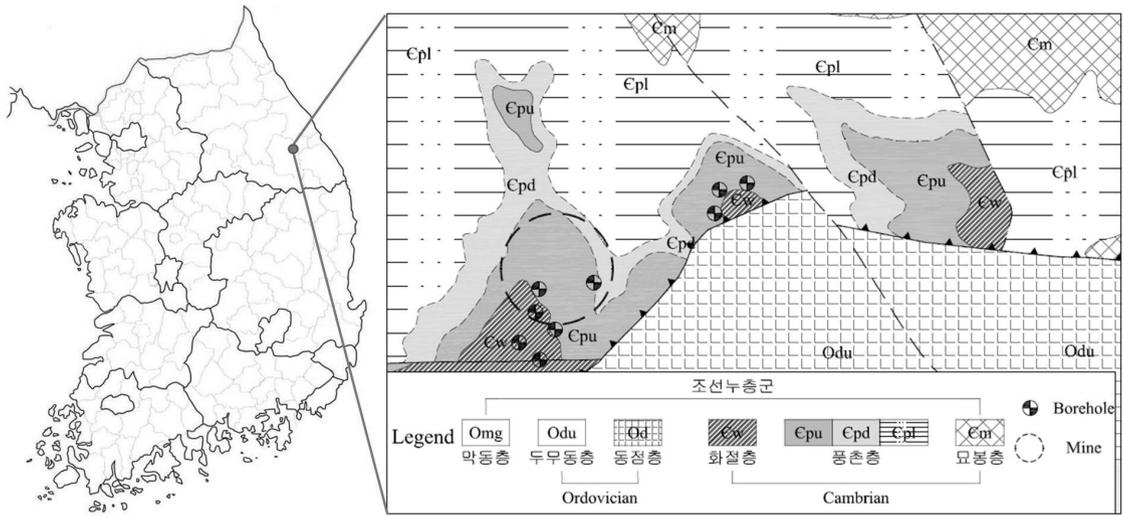


Fig. 1. Location of the study area and Geological map with location of boreholes (after Lee and Jung, 2004)

### 3. 실험방법

#### 3.1 시험편준비

본 실험의 시험편으로는 대한광물자원공사에서 '00~'04 년간 탐광을 목적으로 시추한 코어 중 일부와 최근에 추가 시추한 코어를 사용하였으며, 실험에 사용된 시험편은 주로 풍춘층에 해당한다. 시추코어는 NX 크기였으며, 비교적 균열이 없는 코어를 선택하였다. UCS 실험을 위한 시험편은 시험편제작표준법에 따라 제작하였으며(KSRM, 2005a), PLT용 시료는 UCS 시험편을 채취한 코어의 상·하부 부분을 표준암석시험법에 따라 성형하였다(KSRM, 2007). 일반적으로 함수비는 암석의 강도에 영향을 준다고 알려져 있다. Bell(1995)은 여러 종류의 암석을 대상으로 건조상태와 포화상태에서 변환계수를 추정하고 동일한 암종에서 변환계수가 4~38까지 달라짐을 보였다. 이와는 대조적으로 Kohno and Maeda(2012)는 열수변질작용을 받은 응회암을 대상으로 한 연구에서 함수비에 따른 변환계수의 변화는 거의 없는 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 오븐에서 건조한 시험편들을 사용하였다.

#### 3.2 일축압축시험

일축압축시험에 사용된 시험편들의 직경 대 길이 비는 약 1:2로서, 일정한 재하속도를 유지하였으며, 하중을 가한 후 2~15분 이내에 파괴가 발생할 수 있도록 조정하였다(KSRM, 2005b). 총 67개의 시험편 중 취약면의 영향을 받은 것으로 확인된 19개를 제외하고, 나

머지 48개 시험편들의 자료들을 사용하여 회귀분석을 실시하였다.

#### 3.3 점하중시험

본 연구에서는 직경방향 실험을 수행하였다. 전술한 바와 같이 직경방향 결과가 축방향에 비해 편차가 더 크긴 하지만, 시료를 준비할 때 축방향 시험법에 비해 직경방향 시험이 더 간편하기 때문이다. 실험 시 접촉점과 시험편의 끝부분 사이의 거리가 시험편 직경의 0.5 배 이상이 되도록 하였으며, 유압으로 하중을 서서히 증가시켜 파괴가 10~60초 사이에 발생하도록 하였다(KSRM, 2007). 파괴하중은 로드셀을 이용하여 측정하였으며, 일축압축강도시험용으로 제작된 48개 시험편의 상·하부를 이용하여 제작된 총 96개의 시험편이 실험에 사용되었다. 측정된 Is는 Is50으로 보정하여 회귀분석에 사용하였다.

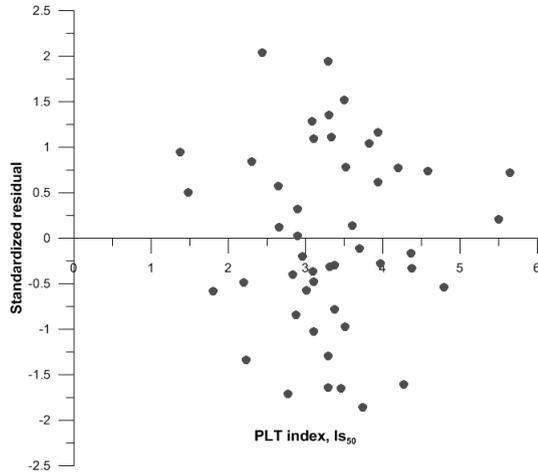
### 4. 실험 결과

실험결과와 통계량을 Table 2에 정리하였다. UCS는 38~161 MPa의 범위를 보였으며, 평균은 88 MPa이다. Is50은 1.38~5.65(MPa)의 범위를 가지며, 평균은 3.33 MPa로 나타났다. 두 집단의 평균이 크게 차이가 날 경우 표준편차만으로는 두 집단의 산포정도를 비교할 수가 없다. 이 경우 변동계수(Coefficient of variation, Cv)를 계산함으로써 두 집단의 산포정도를 비교할 수 있다. 변동계수는 표준편차를 평균으로 나눔으로써 계산되며,

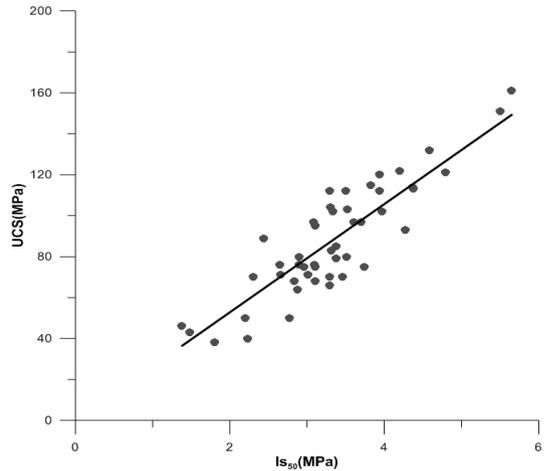
**Table 2.** Statistics on UCS and  $I_{s50}$

Variable	Minimum	Maximum	Median	Mean	S.D	Cv
UCS (MPa)	38	161	82	88	27.5	0.31
$I_{s(50)}$ (MPa)	1.38	5.65	3.30	3.33	0.88	0.26

\*S.D : standard deviation, Cv : coefficient of variation



**Fig. 2.** Scatter plot of the standardized residual



**Fig. 3.** Scatter plot with linear zero-intercept function

백분율로 표현되기도 한다. 두 실험결과의 변동계수는 0.31, 0.26으로 비슷하며 이는 두 집단의 산포정도가 크게 차이가 나지 않음을 말해준다.

UCS와  $I_{s50}$  사이의 상관관계 분석을 위해 회귀분석을 실시하였다. 대다수의 연구자들은 UCS와  $I_{s50}$  사이의 회귀식을  $y = ax$ , 혹은  $y = ax + b$ 로 제안하고 있다 (Table 1). 이에 반해, Grasso et al.(1992)은  $y = ax^b$ 의 형태를 제안하였고, Quane and Russel(2003)은 연암을 대상으로  $y = ax^2 + bx$ 의 형태를 제안하였다. 본 연구에서 도출된 회귀식은 식 (1)과 같다.

$$UCS = 27.774 \cdot I_{s50} - 4.7748 \quad (R^2 = 0.78) \quad (1)$$

식 (1)의 결정계수( $R^2$ )는 0.78 이며 상관계수( $r$ )는 0.88 이다. 결정계수와 상관계수의 값은 UCS와  $I_{s50}$  사이에 높은 상관성이 있음을 말해준다. Fig. 2는 식 (1) 이용해 계산된 표준화된 잔차도이다. 잔차도가 특정한 패턴을 보인다면 두 변수 간에 비선형의 관계가 존재할 수 있음을 의미하는데, 본 실험의 자료는 표준화된 잔차도가 특정한 패턴 없이 퍼져있으므로 회귀선이 선형이라는 가정을 만족하는 것으로 판단할 수 있다.

회귀분석 시 절편을 강제로 0으로(원점 회귀분석) 만

들어 회귀식을 도출할 수도 있다. 몇몇 연구자들은 절편이 0인 선형회귀식이 더 현실적인 예측 모델이라고 하였다(Sabatakakis et al., 1993; Marinos et al., 1994; Sabatakakis et al., 2002). 이는 절편이 존재하는 모델의 경우  $I_{s50} = 0$ 일 때 UCS가 0이 되지 않기 때문이다 (Min and Moon, 2006; Diamantis et al., 2009). Min and Moon(2006)은 절편을 0으로 만들기 위해 원점 회귀분석을 이용하는 대신, 강도비( $UCS/I_{s50}$ )를 이용하여 만든 예측식을 제안하였다. 강도비를 이용하는 방법은 먼저  $I_{s50}$ 와 이에 대응하는 UCS값을 이용하여 각 시료에 대한 각각의 강도비를 계산한다. 그 후 계산된 강도비의 분포에 따라 평균 혹은 중앙값을 변환계수로 사용하여 예측식을 도출한다.

PLT를 이용하여 간편하게 UCS를 추정하기 위해서는 회귀식 또한 단순한 형태가 유리하다. 회귀식의 절편이 크지 않고, 결정계수 값의 변화가 크지 않다면 절편이 0인  $y=ax$  형태의 회귀식이 더 큰 편의성을 지닐 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 원점 회귀분석과 강도비를 이용하여 회귀식을 도출하였다. Fig. 3은 원점 회귀분석 결과이며 식 (2)는 원점 회귀분석을 이용하여 도출한 회귀식이다. 식 (1)의 결정계수 값은 0.7805이며, 식 (2)의 결정계수 값은 0.7786이다. 두 결정계수

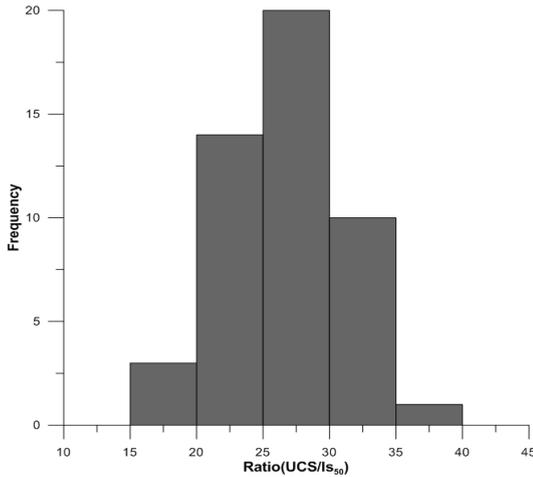


Fig. 4. Histogram on UCS/Is<sub>50</sub> ratio

Table 3. Statistics on UCS/Is<sub>50</sub>

Variable	Mean	Median	S.D
UCS/Is <sub>50</sub>	26.30	26.14	4.27

간의 차이가 거의 없기 때문에, 좀 더 단순한 형태인 식 (2)가 더 높은 편의성을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

$$UCS = 26.43 \cdot Is_{50} \quad (R^2 = 0.78) \quad (2)$$

$$UCS = 26.30 \cdot Is_{50} \quad (3)$$

위의 식 (3)은 강도비를 이용한 예측식이다. 강도비의 분포가 정규분포와 비슷하기 때문에(Fig. 4), 강도비의 평균값을 이용하였다(Min and Moon, 2006). Table 3은 강도비의 통계량을 정리한 것이다. 두 가지 방법으로 도출된 예측식은 상당히 비슷한 변환계수를 보여주고 있다. 그러나 회귀식이 원점을 지나지 않을 경우 회귀계수와 강도비로 계산된 변환계수 사이에 차이가 발생할 수 있다. Min and Moon(2006)의 연구결과에 따르면, 사암, 세일과 이암을 대상으로 한 연구에서 선형 회귀분석 결과는  $UCS = 20.26 \cdot Is_{50} + 12.69$ 이며, 동일한 자료로 계산된 강도비에 의해 도출된 회귀식은  $UCS = 24.31 \cdot Is_{50}$ 이었다. 이러한 차이는 원점 회귀분석에서도 나타나는데, 강도비와 원점 회귀분석 방법을 사용할 경우 다른 통계적 기준들에 의한 판단이 필요할 것이다.

회귀식의 형태는 단순할수록 직관적이고 편의성을 제공하지만, 대부분의 연구결과에서는 변환계수를 실수로 제한하고 있다. 원점 회귀분석 결과로 계산된 변환계수

Table 4. RMSE about the regression equation

Regression equation	RMSE	Difference
$UCS=26 \cdot Is_{50}$	13.18	0.09
$UCS=26.43 \cdot Is_{50}$	13.09	-
$UCS=27 \cdot Is_{50}$	13.24	0.15

26.43을 정수로 표현한다면 26이나 27이 가능하다. 이들 중 어떤 값이 더욱 적절한가는 제공근-평균-제곱 오차(root-mean-square error, RMSE)를 비교해 봄으로써 해결할 수 있다. RMSE는 실제값과 회귀식을 통해 제시된 예측치 사이의 차이를 반영하는 것으로, 종속변수 즉, UCS를 추정할 때 오차의 표준크기를 나타내 준다. 일반적으로 회귀직선과 RMSE의 관계는 평균과 표준편차의 관계와 유사하며, 식 (4)로 계산한다.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 / (n-2)} \quad (4)$$

위의 식에서,  $y_i$ 는 실제 값,  $\hat{y}$ 는 추정치, 그리고  $n$ 은 표본의 수를 나타낸다. Table 4는 각 회귀식에서 계산된 RMSE를 보여준다. 세 개의 회귀식 모두 RMSE에서는 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 26이 27에 비해 26.43과의 차이가 더 작기 때문에 본 연구에서는 26을 변환계수로 선택하였다.

#### 4.1 기존연구와의 비교

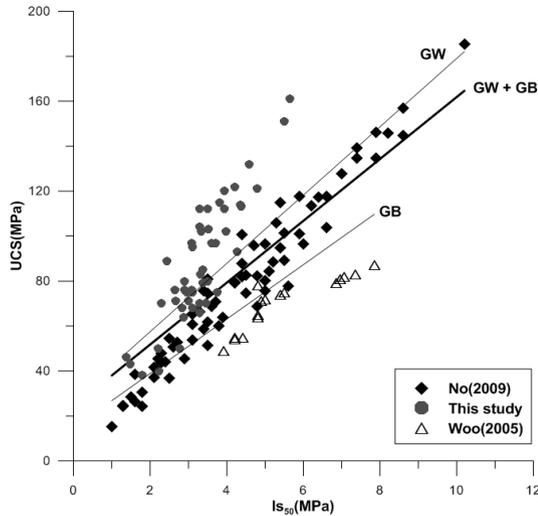
국내에서 석회암을 대상으로 UCS와 Is<sub>50</sub> 사이에 상관관계를 규명한 연구사례는 거의 없는 실정이다. Woo(2005)는 경북 봉화군에서 산출되는 장군석회암을 대상으로 연구를 수행하였으며, No(2009)는 경북 봉화·울진, 강원 삼척·정선·영월 지역에서 석회암을 채취하여 UCS와 Is<sub>50</sub> 사이의 상관관계 연구를 수행하였다. Table 5에 이들의 연구결과를 정리하였다. No(2009)의 결과는 전체 자료 중 석회암에 해당하는 자료만으로 분석한 결과이다.

본 연구에서 도출된 회귀식은 다른 두 연구결과에 비해 상당히 높은 값을 보였다. 특히 Woo(2005)가 보고한 연구결과와는 3배 이상의 차이를 보이며, No(2009)의 연구결과와도 대략 10정도의 차이를 보였다.

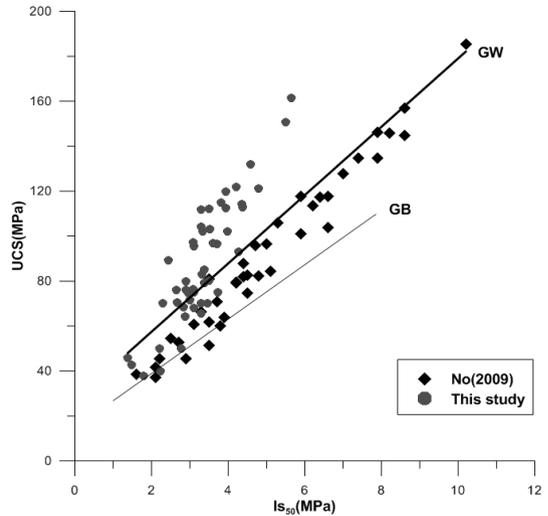
석회암을 대상으로 한 연구결과와 다른 두 연구결과를 함께 도시하여 회귀분석을 실시하였다(Fig. 5). Woo(2005)의 연구결과와 No(2009)의 연구결과 중 경상북도 봉화군과 울진군에서 채취한 석회암층은 선클브리아기에 생성된 석

**Table 5.** Comparison of previous results with this study

Correlation Equation	Number of Specimens	Range of UCS (MPa)	Range of $I_{S50}$ (MPa)	Reference
$UCS=8.313 \cdot I_{S50}+24.853$ ( $R^2=0.79$ )	16	45 ~ 82	3.92~7.85	Woo (2005)
$UCS=17.37 \cdot I_{S50}+3.17$ ( $R^2=0.95$ )	70	15.2 ~ 185.3	1.0 ~ 10.2	No (2009)
$UCS=26 \cdot I_{S50}$	48	38 ~ 161	1.38 ~ 5.65	This study



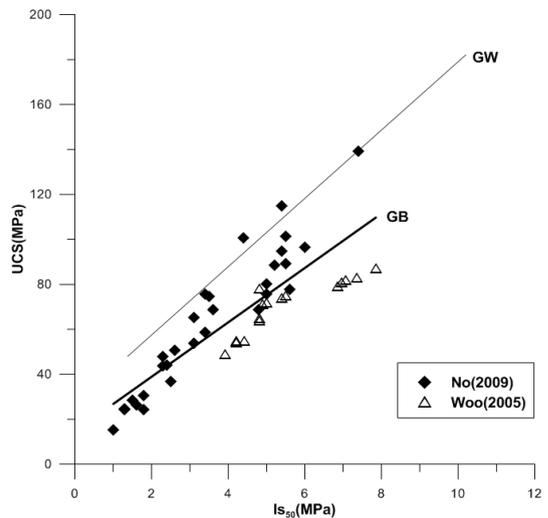
**Fig. 5.** Scatter plot of the previous and this studies



**Fig. 6.** Scatter plot of limestone in Gangwon area

회암이라고 판단된다(Lee et al., 1993). 이에 반해 본 연구결과를 포함한, 강원도 지역의 석회암은 캄브로-오도비스기의 조선누층군에 속한다(Jung et al., 1979; Won et al., 1994; Lee and Jung, 2004). 따라서 강원지역과 경북지역으로 자료를 따로 분류하여 회귀분석을 실시하였으며(Fig. 6과 Fig. 7), 그 결과를 Table 6에 정리하였다.

강원지역과 경북지역을 통합한 전체 자료의 상관계수는 0.77이며 결정계수는 0.59로 계산되었다. 강원지역의 자료를 분석한 결과 상관계수는 0.83, 결정계수는 0.70으로 나타났다. 경북지역의 자료에서는 상관계수 0.84, 결정계수는 0.71로 나타났다. 즉, 강원지역과 경북지역으로 구분하여 얻은 결정계수와 상관관계가 통합한 자료에 비해 더 높은 값을 나타낸다. 반면에 No(2009)의 연구에서는 지역을 구분하지 않았음에도 아주 높은 상관관계를 보였다(Table 5). 분석의 신뢰도를 확보하기에는 자료의 수가 충분하지 않으나, 동일한 암종이라도 지역적으로 석회암의 기원 및 생성시기가 다를 수 있으며, 이에 따라 UCS와  $I_{S50}$  간의 관계식도 달라질 것으



**Fig. 7.** Scatter plot of limestone in Gyeongbuk area

로 판단된다. 그러나 분석의 신뢰성을 높이기 위해서는 더 많은 자료가 필요할 것으로 생각된다.

**Table 6.** Results of the regression analysis on three studies

Region	Equation	r	R <sup>2</sup>	RMSE	Sample size	Range of UCS (MPa)	Range of Is <sub>50</sub> (MPa)
GW, GB	UCS=13.76Is <sub>50</sub> +24.27	0.77	0.59	20.55	134	15 ~ 185	1.0 ~ 10.2
GW	UCS=15.2Is <sub>50</sub> +27.10	0.83	0.70	17.58	88	37 ~ 185	1.38 ~ 10.2
GB	UCS=12.1Is <sub>50</sub> +14.72	0.84	0.71	14.18	46	15 ~ 139	1.0 ~ 7.85

\*GW = Gangwon-do, GB = Gyeongsangbuk-do

## 5. 결론

강원도 정선군 임계면에 분포하는 석회암을 대상으로 UCS와 Is<sub>50</sub> 사이의 상관관계를 분석하고 회귀식을 도출하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연구결과에 의해 제안된 회귀식과 유효 범위는 다음과 같다.

$$UCS = 26 \cdot Is_{50}$$

$$(1.38 < Is_{50} < 5.65 \text{ MPa}, 38 < UCS < 161 \text{ MPa})$$

2. 선형 회귀식은 가능하면 단순한 형태가 유리하므로, RMSE를 계산함으로써 오차범위를 확인하고 회귀식의 변환계수를 정수화할 수 있다.
3. 원점 회귀분석 또는 강도비 해석을 수행할 경우, 다른 통계적 기준을 이용하여 회귀식을 결정해야 좀 더 신뢰성이 있는 회귀식을 도출할 수 있을 것이다.
4. 같은 암종이라도 지역에 따라 암석의 기원 및 생성 시기가 달라짐에 따라 변환계수 값의 차이를 보일 것으로 예상되며, 향후 더 많은 연구자료를 축적해서 분석되어야 한다.

## 사 사

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(2011T100200108)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

## 참고문헌

1. ASTM, 1986a. Standard test method of unconfined compressive strength of intact rock core specimens. D2938.
2. Basu, A. and Aydin, A., 2006, Predicting uniaxial compressive strength by point load test: significance of cone penetration, *Rock Mech. Rock Eng.* 39.5, 483-490.
3. Bell F. G., 1995, Laboratory testing of rocks. In: Bell FG (ed) *Engineering in rock masses*. Butterworth-Heinemann,

Oxford, 151-169.

4. Bieniawski, Z. T., 1975, The point load test in geotechnical practice, *Eng. Geol.* 9, 1-11.
5. Broch, E. M. and Franklin, J. A., 1972, The point load strength test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 9, 669-697.
6. 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 geiss complex in Gyunggi province, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* 8.1, 21-16.
7. 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, *Eng. Geol.* 108, 199-207.
8. Grasso, P., Xu, S. and Mahtab, A., 1992, Problems and promises of index testing of rocks. *Proc. 33<sup>rd</sup> US Symp. Rock Mech.*, Sante Fe, NM, Balkema, Rotterdam, 3-5 June 1992, 879-888.
9. Hawkins, A. B., 1998, Aspects of rock strength, *Bull. Eng. Geol. Env.* 57, 17-30.
10. ISRM, 2007, The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, Hudson (Eds.), *Suggested methods prepared by the commission on testing methods*, International Society for Rock Mechanics. ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey. 628 pp.
11. Jung, C. K., Lee, D. Y., Ryu, Y. S. and Kang, K. W., 1979, Geological report of the Pyeongchang-Yeongwol sheets, Korea Institute of Geology, Mining and Materials.
12. 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 & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics)* 15.3, 223-227.
13. 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* 14.3, 273-285.
14. Kohno, M. and Maeda, H., 2012, Relationship point load strength index and uniaxial compressive strength of hydrothermally altered soft rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 50, 147-157.
15. KSRM, 2005a, Standard method for sampling and preparation of rock test specimen, *Tunnel & Underground Space (Journal*

- of Korean Society for Rock Mechanics) 15.2, 81-84.
16. KSRM, 2005b, Standard test method for uniaxial compressive strength of rock, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics) 15.2, 81-84.
  17. KSRM, 2007, Standard test method for point load strength of rock, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics) 17.2, 75-82.
  18. Lashkaripour, S., 2001, Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 38, 98-994.
  19. Lee, C., K., Chang, S. M., Lee, S., G. and Son, K. 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, Mar. 2003, 173-180.
  20. Lee, D. J., Kim, Y. W., Kim, D. U., Yoo, J. H., Hong, S. S., Lee, H. J., Choi, C. K. and Lee, J. S., 1993, Survey report of limestone deposit in Uljin, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, 2.
  21. Lee, Y. J. and Jung, H. K., 2004, Survey report (limestone, Jeongseon-Imgye area), KORES, 39.
  22. Marinos, P., Koukis, G., Sabatakakis, N. and Tsiambaos, G., 1994, Laboratory testing aspects of Athenian schist. 7<sup>th</sup> Congress of the Int. Association of Eng. Geol.(IAEG), Lisboa, Portugal, 5-9 Sept., Vol. 2, 975-982.
  23. Min, T. K. and Moon, J. K., 2006, A review of strength estimation method on Ulsan sedimentary rocks, Journal of Korean Geotechnical Society 22.8, 63-75.
  24. No, J. S., 2009, A study on the brazilian strength behavior of Korean rocks, Ph.D. thesis. Univ. of Ulsan, 107-109.
  25. Noh, J. H. and Lee, N. K., 2007, Applied-mineralogical study on the grinding effects and powder properties of high-Ca limestone, Journal of the Korea Society for Geosystem Engineering 44.3, 191-207.
  26. Quane, S. L. and Russel, J. K., 2003, Rock strength as a metric of welding intensity in pyroclastic deposits, Eur. J. Mineral 15, 855-864.
  27. Singh, T. N., Ashutosh Kainthola, and Venkatesh A., 2012, Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for different rock types, Rock Mech. Rock Eng. 45, 259-264.
  28. Sabatakakis, N., Tsiambaos, G. and Koukis, G., 1993, Index properties of soft marly rocks of the Athens basin, Greece. Proc. Int. Symp. Geotech. Engin. of Hard Soils and Soft Rocks, Athens, vol 1, 275-279.
  29. Sabatakakis, N., Tsiambaos, G. and Gerochristodoulou, D., 2002, Estimation of physical and mechanical parameters of rock material. Bull. of the public works central laboratory of Gress (KEDE), 3-8. special edition.
  30. Tsiambaos, G. and Sabatakakis, N., 2004, Considerations on strength of intact sedimentary rocks, Eng. Geol. 72, 261-273.
  31. Won, C. K., Park, B. K. and Lee, S. H., 1994, Geological report of the Samcheok-Gosari sheets, Korea Institute of Geology, Mining and Materials.
  32. Woo, B. S., 2005, Evaluation of uniaxial compressive strength by point load test and hardness test, Master thesis. Andong Nati. Univ., 38-39.

**김 경 만**

2006년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사  
2008년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 043-868-3319  
E-mail: yaong011@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 에너지·자원공학과 대학원 박사과정

**김 대 훈**

2008년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사  
2010년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 033-255-6257  
E-mail: ggadae@yahoo.co.kr  
현재 강원대학교 에너지·자원공학과 대학원 박사과정

**강 중 석**

1986년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학석사

Tel: 042-868-3331  
E-mail: kangjs@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원

**강 상 수**

1980년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1987년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1999년 동아대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3255  
E-mail: kss@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원

**백 환 조**

1984년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1994년 University of Texas at Austin, 토목공학과 공학박사

Tel: 033-250-6257  
E-mail: hwanjo@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수