국내 화강암의 점하중강도와 일축압축강도간의 상관분석

우 익*

군산대학교 해양공학과

Correlation Between the Point-Load Strength and the Uniaxial Compressive Strength of Korean Granites

Ik Woo*

Department of Ocean science and Engineering, Kunsan National University

이 연구에서는 국내에 분포하는 화강암에 대한 점하중강도($I_{s(50)}$)와 일축압축강도(UCS) 사이의 상관관계를 선형회귀분석을 통하여 구하였다. 이를 위하여 암석시료의 물리적 물성에 근거하여 화강암 시료를 재분류하여 세 경우에 대한 회귀분석을 수행하였다. 첫째로, 풍화등급에 따른 원점회귀분석을 수행하여 풍화에 따른 상관관계를 구하였으나 풍화등급별 시료의 개수가 부족하여 만족할만한 신뢰수준의 회귀분석결과를 얻지 못하였지만, 풍화가 진행될수록 회귀직선의 기울기가 급해지는 경향을 파악할 수 있었다. 두 번째, 전체 화강암에 대한 회귀분석을 수행하기 위하여 단순선형회귀분석과 신뢰도 및 정확도를 향상시키기 위하여 부트스트랩 리샘플링법을 이용한 단순선형회귀분석을 통하여 두 강도간의 상관관계를 구하였다. 세 번째로는 유사한 물리적 물성을 지닌 화강암 시료들의 평균강도에 대한 선형회귀분석을 수행하여 상관관계를 구하였다. 이 방법들을 사용하여 구한 회귀직선방정식의 기울기는 14 내외의 값을 보이고 작은 편차를 지니고 있으며 국내 화강암에 대하여 수행한 기존 연구와 유사한 값을 보이고 있었다. 그러나 16에서 43의 범위를 지닌 y-축 절편은 큰 편차를 보이고 있기 때문에, 점하중강도로 일축압축강도를 추정할 때에는 이러한 회귀방정식의 오차범위를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

주요어 : 화강암, 점하중강도, 일축압축강도, 선형회귀분석, 최소제곱법, 부트스트랩 리샘플링

This study presents the results of a regression analysis of the point-load strength ($I_{s(50)}$) and the uniaxial compressive strength (UCS) of granites in Korea. The regression was carried out for three cases using the least-squares method, reclassifying the granite samples based on their physical properties. The first regression analysis through the origin according to the weathering grade did not give a result with a sufficient degree of confidence, due to the small number of samples. However, the general trend of the correlation between UCS and $I_{s(50)}$ according to weathering grade shows that the slope of the linear regression for weathered granite is steeper than that for fresh granite. The second analysis was a simple linear regression for all the granite samples using the least-squares method as well as a linear regression using the bootstrap resampling method in order to increase the confidence level and the accuracy of the regression results. The third regression considered the average strength of granite groups reclassified according to physical properties. These linear regression analyses yielded linear regression equations with slopes of 14 and small standard deviations being similar to values reported in previous studies on Korean granites, but whose intercept values range from 16 to 43 and have a larger standard deviation than those of the present study. In conclusion, it would be advisable to estimate UCS from $I_{s(50)}$, considering the error range derived from the deviation of the regression equations.

Key words : granite, point-load strength, uniaxial compressive strength, linear regression, least-squares method, bootstrap resampling

*Corresponding author: woo@kunsan.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

여러 암석의 공학적 물성 중에서 일축압축강도는 암석의 기본 물성을 나타내는 중요한 지표 중의 하나로 사용되고 있다. 일축압축강도실험을 수행하기 위하여서는 원통형 암석시료의 상·하부면을 0.02 mm의 오차한계로 수평을 조정하고, 공시체 장축과도 0.001 rad의 오차한계 내에서 수직을 유지하도록 정밀 성형을 하여야 한다(ISRM, 1979). 이러한 일련의 성형은 시간과 비용을 요구하는 과정이기 때문에 암석시료 성형에 대한 부담이 없고 보다 간편하고 신뢰할 수 있는 점하중강도 실험이 점차 활용되고 있다. 여러 연구에서는 이러한 필요성에 부응하여 점하중강도로부터 일축압축강도를 산정하기 위하여 암석 종류 및 풍화상태에 따른 일축압축강도(UCS)와 점하중강도($Is_{(50)}$)간의 상관계수를 구하여 발표하였다(Broch and Franklin, 1972; Bieniawski, 1975; Kahraman et al., 2005; Kahraman and Gunaydin, 2009; Basu and Kamran, 2010). 특히 일부 연구(Lee et al., 2011; Lee and Lee, 1995; Chung and You, 1997)에서는 국내 화강암에 대한 일축압축강도와 점하중강도간의 상관계수를 구하여 Broch and Franklin (1972)에서 제시한 점하중강도와 일축압축강도간의 상관계수와는 다른 국내 암석에 적합한 값을 제시하였다.

본 연구에서는 국내 분포 암석 중 많은 부분을 차지하고 있는 화강암류에 대한 일축압축강도와 점하중강도간의 상관관계를 통계적으로 구하여 보다 구체적이고 세분화된 기준을 마련하고자 한다.

암석시료

Fig. 1의 지질도 상에 표시된 것처럼 대구, 안동, 남원, 대전 그리고 인천 등 총 다섯 지역의 화강암을 채취하여 이 연구에 사용하였다.

대구지역에서는 불국사화강암에 속하는 화강암을, 나

머지 지역에서는 대보화강암에 속하는 여러 종류의 화강암을 채취하였다. 국내에는 화강암뿐만 아니라 화강편마암 또한 광범위하게 산출되므로 조성광물간의 치밀한 결합정도를 보이는 화강편마암을 남원과 안동지역에서 채취하였다. 이 연구에서는 시료의 균질성을 향상시키기 위하여 해당 지역에 위치한 시추공들에서 NX 크기의 시추코어를 지름 대 길이 비가 1:2인 원통형 공시체로 성형하여 실험에 사용하였다.

Table 1은 각 지역에서 채취한 암석시료의 지역 및 암종을 기입한 것으로 연구지역에서 채취한 화강암류는 화강암 및 흑운모화강암, 화강편마암, 반정질화강암, 알칼리화강암으로 구분되며 Fig. 2에 표시된 것과 같이 편

Fig. 1. Sampling locations (geological map from KIGAM, 1995) in granite and biotite granite from the Daegu area, granitic gneiss from the Andong area, granitic gneiss and biotite granite from the Namwon area, porphyritic granite from the Daejeon area and alkali granite from the Incheon area.

Table 1. Rock types of the collected samples.

Sampling Location	Rock type	Rock type
Daegu	Bulguksa Granite	Granite Biotite granite
Andong	Daebo Granite	Granitic gneiss
Namwon		Granitic gneiss Biotite granite
Daejeon		Porphyritic granite
Incheon		Alkali granite

Fig. 2. Photos of thin section of granite samples, showing (a) coarse-grained biotite granite and (b) fine-grained granite of the Daegu area; (c) granite gneiss of the Andong area with a linear texture defined by shattered quartz and feldspar; (d) foliated granitic gneiss and (e) biotite granite of the Namwon area; (f) coarse-grained porphyritic granite of the Daejeon area with zoned plagioclase; (g) alkali granite of the Incheon area comprising microcline, orthoclase and perthite with minor quartz and feldspar.

광현미경관찰을 통하여 각 암석의 광물학적 특징을 분석하였다.

대구지역에서 채취한 높은 석영 함량비를 보이는 세립질 화강암은 주로 석영과 사장석으로 구성되어 있으며 중간 중간에 벽개가 잘 발달한 흑운모가 협재되어 있는 치밀한 구조를 보이고 있다. 또한 대구지역의 흑운모 화강암은 조립질로 1 mm 이상의 입자크기를 보이고 있으며 석영과 사장석 그리고 흑운모로 구성되어 있다 (Fig. 2 (a), (b)). 안동지역에서 채취한 화강편마암은 육

안 상으로 뚜렷한 편마구조가 발달하여 있으며 편광현미경에서는 잘게 부서진 석영과 장석 그리고 흑운모 등이 엽리구조를 따라 배열되어 있다(Fig. 2 (c)). Fig. 2(d)는 남원지역에서 채취한 화강편마암으로 안동지역의 화강편마암보다 조립질이며 일정방향의 엽리가 발달되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 2(e)의 남원지역 흑운모 화강암은 세립질의 석영과 장석입자 그리고 벽개구조가 잘 발달한 흑운모로 이루어져 있다. 대전지역에서 채취한 반정질화강암은 육안 상으로 10 mm 이상의 거정질 사

Table 2. Results of point-load strength tests.

Location	Rock type	Q _A	V _p	Is ₍₅₀₎	Weathering
		(%)	(m/sec)	(MPa)	Grade
Daegu	Granite	0.26	4079	9.79	F
		0.29	3899	8.87	F
		0.30	4093	9.49	F
		0.31	3900	9.44	F
		0.33	3874	10.37	F
		0.46	3652	8.57	F
		0.47	3668	7.45	F
		2.22	1485	0.79	MW
		2.28	1460	0.71	MW
		2.41	1457	0.94	MW
	Biotite Granite	0.11	4004	7.35	F
		0.13	4197	8.71	F
		0.15	3745	6.69	F
		0.16	3772	6.37	F
Andong	Granitic Gneiss	0.30	4004	7.09	F
		0.30	3873	7.09	F
		0.98	2510	2.13	MW
		1.35	2047	1.82	MW
		1.54	1916	1.10	MW
Namwon	Granitic Gneiss	0.22	3500	9.05	F
		0.23	3486	8.67	F
		0.24	3774	8.47	F
		0.25	3797	8.79	F
		0.29	3192	8.67	F
		0.29	4060	7.95	F
	Biotite Granite	0.18	3500	7.46	F
		0.18	3603	6.67	F
		0.19	3483	7.07	F
		0.20	3442	7.85	F
		0.21	3483	7.06	F
Deajeon	Porphyric Granite	0.27	3223	5.20	F
		0.29	3170	6.09	F
Incheon	Alkali Granite	0.17	4366	7.75	F
		0.17	4393	7.81	F

*Q_A: quick absorption ratio, V_p: P-wave propagation velocity, Is₍₅₀₎: standard point-load strength for 50mm diameter core sample.

장석 반정을 함유하고 있고 Fig. 2(f)에서 보듯이 주로 조립질 석영 및 사장석으로 구성되어 있으며, 일부 사장석에서는 누대구조(zoning)를 관찰할 수 있다. Fig. 2(g)는 인천지역에서 채취한 알칼리화강암으로 적은 석영과

사장석 함량을 지니고 있으며 주요 조성광물로는 microcline과 정장석, perthite 등이 있으며 소량의 흑운모를 포함하고 있다.

Table 3. Results of uniaxial compressive strength tests.

Location	Rock type	Q _A	V _p	UCS	Weathering
		(%)	(m/sec)	(MPa)	Grade
Daegu	Granite	0.29	3953	156.9	F
		0.30	3954	146.2	F
		0.31	3946	128.0	F
		0.31	3938	151.3	F
		0.44	3772	129.2	F
		0.48	3805	127.1	F
		0.49	3726	145.1	F
		0.55	3756	99.5	F
		1.34	1959	28.9	MW
		1.64	1836	30.7	MW
		1.67	1783	25.3	MW
		1.85	1844	22.8	MW
	Biotite Granite	0.10	3885	142.0	F
		0.13	3988	127.6	F
		0.15	3885	161.2	F
		0.16	4105	126.0	F
Andong	Granitic Gneiss	0.31	3890	153.3	F
		0.31	3721	146.0	F
		1.03	2372	46.6	MW
		1.29	2447	51.5	MW
		1.39	1916	46.5	MW
		1.54	1791	44.2	MW
Namwon	Granitic Gneiss	0.25	3862	180.0	F
		0.25	3885	195.0	F
		0.25	3143	176.0	F
		0.26	3599	164.0	F
		0.27	3567	141.2	F
		0.28	3507	140.0	F
	Biotite Granite	0.18	3511	121.0	F
		0.19	3593	153.6	F
		0.19	3542	147.0	F
		0.21	3514	139.2	F
Deajeon	Porphyric Granite	0.22	4159	88.9	F
		0.27	3874	86.7	F
		0.32	3647	87.5	F
Incheon	Alkali Granite	0.16	4310	132.0	F
		0.17	4258	128.2	F
		0.20	4345	135.0	F

*Q_A: quick absorption ratio, V_p: P-wave propagation velocity, UCS:uniaxial compressive strength for 50 mm diameter core sample.

점하중강도 및 일축압축강도 실험

강도실험을 위하여 ISRM (1979)의 제안에 따라 총 82개의 NX형 화강암 공시체시료를 성형하였다. Table 2와 Table 3에 표시된 것처럼 화강암 공시체시료의 구성은 대구지역에서 채취한 세립질화강암 시료 24개 및 흑운모화강암 시료 8개 그리고 안동지역의 화강편마암 시료 11개, 남원지역의 화강편마암시료 12개 및 흑운모화강암 시료 9개, 대전지역의 반정질화강암 시료 4개, 인천지역의 알칼리화강암 시료 5개이다. 동일 시추공에서 인접 시추코어에서 채취한 암석시료라도 암석의 불균질성으로 인하여 그 물성의 변화가 발생할 수 있으므로, 각 암석시료에 대하여 물리적 물성(흡수율 및 탄성파속도) 측정을 한 후, 물리적 물성에 근거하여 동일암석의 암석시료를 재분류하였다. 각 암석시료는 수중에서 24 시간동안의 포화와 공기 중에서의 48시간 동안의 자연 건조과정을 거치는 동일 조건에서 강도를 측정하도록 암석시료를 준비하였다. 준비된 암석시료의 절반은 점하중강도실험군으로 나머지 절반은 일축압축실험군으로 분류하여 각기 강도실험을 수행하였다. 이 때, 점하중강도 실험군과 일축압축실험군의 암석시료 중 유사한 물리적 물성을 지니는 암석시료끼리 짝을 지어 회귀분석에 사용할 수 있도록 재분류를 하였다. 이 연구에서는 34개의 NX형 공시체에 대하여서는 ELE 사의 휴대용 점하중강도시험기로 기존 점하중시험법(Bieniawski, 1975; Brook, 1977, 1980, 1985; ISRM, 1985; ASTM, 2002)에 따라 공시체의 지름방향으로 점하중강도실험을 실시하여 해당하는 점하중강도 $I_{s(50)}$ 를 구하였다(Table 2). 나머지 38개의 NX형 공시체에 대해서는 ISRM (1979)의 제안에 따라 공시체의 장축방향으로 일축압축실험을 실시하여 각각의 강도를 구하였다(Table 3). Table 2와

Table 3에서는 흡수율(Q_A)과 탄성파속도(V_p)로 분류된 암석시료에 대한 점하중강도와 일축압축강도실험 결과를 해당하는 물리적 특성과 풍화등급과 더불어 나타내고 있다.

점하중강도와 일축압축강도간의 상관분석

이 연구에서는 상기에서 기술하였듯이 화강암의 점하중강도와 일축압축강도간의 상관관계를 구하기 위하여 점하중강도실험군 암석시료와 일축압축강도실험군의 암석시료의 물리적 물성이 서로 유사한 시료끼리 짝을 지어 최소제곱법을 이용한 선형회귀분석을 하였다. 각 암종마다 충분한 시료를 확보하지 못한 이유로 점하중강도와 일축압축강도간의 상관관계는 풍화등급에 따른 상관분석과 전체 화강암의 점하중강도와 일축압축강도간의 상관분석 그리고 각 암종별 평균값을 고려한 상관분석으로 구분하여 총 세 가지 다른 경우에 대한 분석을 수행하였다.

화강암 풍화정도에 따른 상관관계

Fig. 4에서는 암석시료를 풍화정도에 따라 두 개의 그룹으로 구분하여 수행한 회귀분석 결과를 보여주고 있다. Table 2와 Table 3에 표시된 것처럼, 풍화화강암군에 속한 보통풍화등급(MW)의 암석시료들은 1.0 이상의 흡수율을 지니고 있다. 풍화등급에 따른 회귀분석에서는 Bieniawski (1975) 및 Broch and Franklin (1972), Chau and Wong (1996) 등에서 구한 상관관계식과 같이 점하중강도와 일축압축강도간의 상관관계가 원점을 지나는 선형비례관계라고 가정하여 풍화정도에 따른 상관관계의 변화를 비교하였다(Fig. 4).

신선한 화강암군에 대한 회귀분석 결과를 나타내고

Fig. 3. (a) Point-load tester and (b) diametral point-load test.

Fig. 4. Results of linear regression showing the regression equation and coefficient of determination between point-load strength (PLS ($I_{s(50)}$)) and uniaxial compressive strength (UCS) for samples of (a) fresh granite and (b) weathered granite.

있는 Fig. 4(a)의 회귀직선 기울기는 약 18으로 Bieniawski (1975)가 NX형 시료에 대해 제안한 23보다는 작은 값을 보이고 있으나, Lee and Lee (1995)가 제안한 한국 화강암에 대한 값과 유사한 값을 보이고 있다. 반면 풍화화강암의 회귀직선 기울기는 약 27로 신선한 화강암군보다 높은 기울기를 보이고 있다. 이는 점하중강도실험에서 풍화가 진행됨에 따라 발달하는 선형구조를 따라 주로 파괴가 발생되기 때문에 나타나는 현상으로 파악된다.

Fig. 4의 회귀직선의 결정계수(r^2)가 작게 계산되는 것은 각 풍화등급에 속하는 시료의 부족으로 발생한 결과로 판단된다. 따라서 이 연구에서 구한 풍화등급별 회귀직선의 기울기를 이용하여 점하중강도로부터 일축압축강도를 정확하게 추정할 수 없지만, 이 연구에서 구한 풍화별 회귀직선은 풍화에 따른 두 강도 사이의 상호관계에 대한 경향을 추이할 수 있는데 만족하여야 할 것으로 판단된다. 추후 보다 많은 시료에 대한 강도자료를 보완하여 풍화에 따른 정밀한 회귀분석을 수행하여야 할

Fig. 5. Results of linear regression between point-load strength (PLS ($I_{s(50)}$)) and uniaxial compressive strength (UCS) for all granite rock samples. Solid line shows the simple linear regression and dashed line the linear regression through the origin.

것으로 사료된다.

전체 화강암에 대한 점하중강도와 일축압축강도간의 상관관계

Fig. 5는 풍화등급에 따라 구분하지 않는 전체 화강암 시료의 점하중강도에 대한 일축압축강도의 관계를 도시하고 있다. 여기에서의 회귀분석은 회귀직선이 원점을 지나도록 설정한 원점선형분석과 임의의 y-축 절편을 가지는 단순선형분석으로 구분하여 수행되었다.

우선 원점선형회귀분석에서 구한 회귀직선의 기울기는 17.68, 결정계수(r^2) 0.765로 계산되어 두 강도 사이의 상관정도가 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 풍화화강암의 강도 값에 대한 가중치가 낮게 고려되었기 때문에 전체 화강암에 대한 회귀분석결과로 채택하기에는 신뢰도가 떨어지는 것으로 판단된다.

두 번째 회귀분석방법인 단순선형회귀분석에서 계산한 회귀방정식의 기울기는 14.73, y축 절편은 23.33이며 결정계수(r^2)는 0.802로 높은 상관관계를 보여주고 있어 원점을 지나는 회귀방정식보다 적합도가 높은 것으로 판단된다.

그러나 이 연구에서 구한 강도의 분포가 균일하지 않는 단점을 보완하고 회귀분석 결과를 향상시키기 위해 Efron (1979) 및 Efron and Tibshirani (1993)에서 제안한 부트스트랩 리샘플링(bootstrap resampling) 기법을 이용하여 회귀분석을 또한 실시하였다(Fig. 6). 부트스트랩 리샘플링은 모집단(population)의 분포에 대한 정보가 없거나 표본(sample)의 크기가 충분하지 않을 때 사용되는 통계적인 리샘플링 기법으로 비모수적이다. 이 방법에서 각 표본은 모집단으로부터 독립적이며 균등하게 추

Fig. 6. Histogram showing the (a) slope and (b) y-axis intercept of the regression lines estimated using bootstrap resampling.

출된 것으로 가정 하에, 원래의 표본에서 중복을 허용한 채로 표본개수와 동일한 크기의 표본을 임의로 추출하는 리샘플링(resampling)을 주어진 횟수만큼 반복적으로 수행하는 기법이다.

이 연구에서는 총 1000회의 부트스트랩 리샘플링을 반복하여 각각의 경우에서 선형회귀분석을 수행하였다. Fig. 6에서는 1000회의 부트스트랩 리샘플링으로 계산된 회귀직선의 기울기와 y-축 절편을 히스토그램 형식으로 나타내고 있다. 이 회귀분석에서 구한 회귀직선의 기울기에 대한 95% 신뢰구간은 11.61에서 15.97 사이로 평균 14.15, 표준편차 1.19를 보이고 있고, y-축 절편의 95% 신뢰구간은 16.26에서 43.26 사이이며, 평균 26.29, 표준편차 7.07로 기울기에 비하여 상대적으로 큰

편차를 보이고 있다. 회귀직선의 기울기와 y-축 절편의 평균을 취한 회귀직선방정식은 $UCS=14.15 \times I_{s(50)}+26.29$ 이 된다. 따라서 최소제곱법을 이용한 전체 화강암에 대한 회귀직선방정식 $UCS=14.73 \times I_{s(50)}+23.33$ 은 부트스트랩 리샘플링에 의한 회귀분석에서 구한 기울기와 y-축 절편의 오차범위 내에 속하여 있음을 볼 수 있다.

흡수율에 따른 점하중강도 평균과 일축압축강도 평균사이의 상관관계

상기의 회귀분석에서는 서로 유사한 물리적 특성을 지닌 암석시료를 짝을 지어 그들의 점하중강도와 일축압축강도를 서로 대응시켜 회귀분석을 수행하였다. Fig. 5에서 보듯이 모든 화강암에 대한 경우에는 큰 분산을

Table 4. Classification of point-load strength and uniaxial compressive strength according to quick absorption ratio.

Rock Type	Q_A	$I_s(50)$	UCS
	(%)	(MPa)	(MPa)
Granite	0.27	9.3	156.9
	0.31	9.8	141.8
	0.50	8.0	125.2
	2.00	0.8	26.9
Biotite Granite	0.15	7.3	139.2
	0.2	7.2	140.2
Porphyric Granite	0.28	5.6	87.7
Granitic Gneiss	0.25	8.7	178.8
	0.30	7.7	145.1
	1.20	1.7	47.2
Alkali Granite	0.17	7.8	131.7
	0.20	7.1	99.1

Fig. 7. Results of linear regression using average value of point-load strength (PLS ($I_{s(50)}$)) and uniaxial compressive strength (UCS). Solid line shows the simple linear regression result and dashed line shows the linear regression through the origin.

보이고 있어 이들에 대한 회귀직선의 결정계수는 0.8 이하를 보이고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 Table 2와 Table 3에 표시되어 있는 암석시료들을 유사한 물리적 특성- 특히 흡수율 -을 지닌 암석시료들끼리 12개의 시료군으로 다시 구분한 후, 각 시료군들의 점하중강도와 일축압축강도의 평균을 구하였다(Table 4). 각 시료군의 강도 평균을 구하면 각 시료에 의한 강도의 편차가 줄어드는 효과를 볼 수 있어 보다 신뢰도있는 자료를 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다. Fig. 7에서는 Table 4의 자료에 대하여 원점회귀분석과 단순선형분석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 우선 원점회귀분석에서 결정한 적합한 회귀직선방정식은 $UCS=17.17 \times I_{s(50)}$ 이 되고, 단순선형회귀분석에서는 $UCS=15 \times I_{s(50)} + 17$ 이 가장 적합한 회귀직선의 방정식이 되었다. Fig. 7에 나타나 있는 두 회귀직선의 결정계수(r^2)는 0.85 정도로 높은 값을 보여주고 있어 신뢰도가 향상된 결과를 보여주고 있다. 그러나 상기에서 밝힌 바와 같이 풍화화강암 시료의 특성을 고려할 때, 단순선형회귀분석에 의한 회귀직선이 화강암 시료의 특성을 타나내는데 보다 적합하다고 판단된다.

결과 및 토의

이 연구에서는 국내에 분포하는 서로 다른 종류 및 풍화등급을 지닌 화강암에 대한 점하중강도와 일축압축강도간의 상관관계를 통계적인 방법으로 구하였다. 풍화등급에 따라 구분된 화강암 시료에 대하여 점하중강도와 일축압축강도 사이의 상관관계를 원점회귀분석을 수행한 결과, 신선한 화강암군의 회귀직선은 약 18 정도

의 기울기를 보여주고 있으며, 풍화화강암은 약 27 정도의 기울기를 보여주고 있다. 점하중강도 실험에서는 풍화화강암 시료 내에 이미 발달한 선구조 및 미세절리를 따라 파괴가 발생하기 때문에 풍화화강암에 대한 점하중강도와 일축압축강도 사이의 회귀직선은 신선한 화강암보다 큰 기울기를 지니는 것으로 판단된다. 그러나 풍화등급에 따라 구분한 화강암에 대한 회귀분석에서는 각 풍화등급별로 충분한 시료 개수를 확보하지 못하였기 때문에 풍화에 따른 점하중강도와 일축압축강도 사이의 상관관계에 대한 경향을 추이하는데 만족하였다.

이러한 한계를 극복하기 위하여 이 연구에서는 모든 화강암에 대한 점하중강도와 일축압축강도간의 단순선형회귀분석을 우선 수행하였고, 단순회귀분석 결과에 대한 정밀도 및 신뢰도를 향상시키기 위하여 1000회에 걸친 부트스트랩 리샘플링을 수행하여 각 경우에 대하여 단순선형회귀분석을 수행하였다. 그 결과 두 강도 사이에는 $UCS=14.15 \times I_{s(50)} + 26.29$ 라는 선형적인 상관관계가 있음을 구하였다.

또한, 물리적 특성이 유사한 화강암 시료들로 구성된 시료군 강도의 평균을 구하여 각 시료의 강도 편차를 감소시킨 후 선형회귀분석을 수행하였다. 그 결과 결정계수(r^2)가 향상된 회귀방정식 $UCS=15 \times I_{s(50)} + 17$ 을 얻을 수 있었다. 이 방법에서 구한 선형회귀분석 결과는 부트스트랩 리샘플링 기법을 적용한 회귀분석결과의 95% 신뢰구간에 속하여 있음을 볼 수 있었다.

이 연구에서는 여러 가지 방법으로 회귀분석을 수행하여 화강암의 점하중강도와 일축압축강도간의 상관관계를 구하여 점하중강도로부터 일축압축강도를 추정할 수 있는 선형회귀방정식의 상관계수의 범위를 제한하였다. 이 연구에서 계산한 회귀방정식의 기울기는 작은 편차를 보이고 있으나 y축 절편은 큰 편차를 보이고 있으므로 점하중강도로 일축압축강도를 추정할 때 그 오차 범위를 고려하여 결정하여야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2013년도 군산대학교 교수장기국외연수경비의 지원에 의하여 수행된 연구이므로 이에 감사드립니다.

References

American Society for Testing and Materials (ASTM), 2002, Standard test method for determination of the

- point load strength index of rock, D5731. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1488-1494.
- Basu, A. and Kamran, M., 2010, Point load test on schistose rocks and its applicability in predicting uniaxial compressive strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47(5), 823-828.
- Biennawski, Z. T., 1975, The point-load test in geo-mechanical practice, *Engineering geology*, 9, 1-11.
- Broch, E. and Franklin, J. A., 1972, The point-load strength test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 9, 669-697.
- Brook, N., 1977, The use of irregular specimens for rock strength tests, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 14, 193-202.
- Brook, N., 1980, Size correction for point loading testing, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 17, 231-235.
- Brook, N., 1985, The equivalent core diameter method of size and shape correction in point load testing, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 22(2), 61-70.
- Chau, K. T. and Wong, R. H. C., 1996, Uniaxial compressive strength and point load strength of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 33, 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 Korean Geotechnical Society*, 13(6), 71-91(In Korean with English abstract).
- Efron, B., 1979, Bootstrap methods: another look at the jackknife, *The Annals of Statistics*, 7(1), 1-26.
- Efron, B. and Tibshirani, R. J., 1993, An introduction to the bootstrap, Chapman & Hall, 257p.
- Kahraman, S. and Gunaydin, O., 2009 The effect of rock classes on the relation between uniaxial compressive strength and point load index, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 68(3), 345-353.
- Kahraman, S., Gunaydin, O., and Fener, M., 2005, The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, 584-589.
- KIGAM, 1995, Geological map of Korea, Sungi's Atlas co.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1979, Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 16(2), 137.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1985, Suggested method for determining point load strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 22, 53-60.
- 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*, 21(4), 631-644(In Korean with English abstract).
- Lee, S. G. and Lee, S., 1995, A suggested method to predict uniaxial compressive strength of Korean granite by point load strength, 1995, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 1015-1027(In Korean with English abstract).

원고접수일: 2014년 3월 7일

수정본채택: 2014년 3월 15일

게재확정일: 2013년 3월 17일

우 익

군산대학교 해양공학과

573-701, 전북 군산시 대학로 1170

Tel: 063) 469-1863

Fax: 063) 469-1861

E-mail: woo@kunsan.ac.kr