

거창화강암의 역학적 특성에 관한 연구

김명균*

The Mechanical Properties of the Geochang Granite

Myeong Kyun Kim*

Abstract The Geochang granite widely used in construction works is one of the most popular dimension stones in Korea. In order to evaluate the physical properties of rock, a lot of laboratory tests for the Geochang granite were conducted to find unit weight, absorption ratio, P wave velocity, S wave velocity, uniaxial compressive strength, Young's modulus, Poisson's ratio, tensile strength, cohesion, friction angle and point load strength index. The uniaxial compressive strength of the Geochang granite was 19.5 times tensile strength and also 8.6 times cohesion, besides P wave velocity was 1.5 times S wave velocity. Correlation analyses were also conducted to find the correlation among 11 different physical properties, where the uniaxial compressive strength showed Pearson correlation coefficient of more than 0.8 with Poisson's ratio, point load strength index and Young's modulus, respectively. Regression analyses were finally conducted by means of both linear and multiple analysis and the brief results including coefficient of determination of more than 0.7 were presented.

Key words Geochang granite, Dimension stone, Physical property, Correlation analysis, Regression analysis

초 록 거창화강암은 국내 주요 석재자원의 하나로서 토목 및 건축사업에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 거창화강암을 대상으로 수많은 실내시험을 실시하여 암석의 단위중량, 흡수율, P파 속도, S파 속도, 일축압축강도, 인장강도, 영률, 포아송비, 점착력, 내부마찰각, 점하중강도지수 등의 물리적 성질을 조사하였다. 일축압축강도는 인장강도의 19.5배, 점착력의 8.6배이고, P파 속도는 S파 속도의 1.5배 수준이었다. 실험결과로 얻어진 각종 물성간의 상호관계를 분석하였으며, 일축압축강도는 포아송비, 점하중강도지수, 영률과 0.8 이상의 피어슨 상관계수를 보였다. 또한, 단순회귀분석과 다중회귀분석을 통해 물성간의 각종 회귀식을 구하였으며, 특히 결정계수 0.7이상의 회귀식을 정리하여 나타내었다.

핵심어 거창화강암, 석재, 물리적 성질, 상관분석, 회귀분석

1. 서 론

국내 토목 및 건축 사업에 있어서 석재 자원의 활용도가 커지고 있다. 우리나라에서 채석되었던 석재의 암종은 사암, 대리암, 슬레이트, 편암, 편마암, 응회암, 현무암, 안산암, 유문암, 규장암, 각섬암, 반려암, 섬록암,

섬장암, 화강암 등의 15개이지만, 현재는 화강암, 섬록암, 대리암 등의 7~8개 암종의 석재만이 생산되고 있다(이춘오 등, 2006).

경상남도 거창지역에는 소위 “거창석”이라고 불리는 화강암 석재가 생산되고 있는데, 포천, 익산과 더불어 국내 3대 화강암 석재단지로 알려져 있다(좌용주 등, 2007). 거창화강암이 국내의 주요 석재로 많이 사용됨에 따라 이 암석에 대한 각종 연구도 수행되었는데, 최진범 등(2006)은 현미경 관찰과 X-선 분석을 통해 광물조성을 분석하였고 한미 등(2010)은 모드조성 분석을 통해 지구화학적 특징을 연구하였으며 서용석과 박덕원(2003)은 이 암석의 역학적 이방성에 대해 보고하였다.

한편, 암석의 물리적 성질들은 상호 간에 상관관계가

Received: Dec. 12, 2014

Revised: Jan. 20, 2015

Accepted: Jan. 20, 2015

***Corresponding Author:** Myeong Kyun Kim

(Tel) +82432298469, (Fax) +82432298466

E-Mail) mkkim@cju.ac.kr

Dept. of Civil Engineering, Cheongju University, 289 Daeseong-no, Cheongju, Chungcheongbuk-do, 360-764, Korea

있으며, 이에 대한 다각적인 국내 연구가 실시되고 있다. 이정인 등(1982)과 이희근 등(1983)은 시발적인 연구로서 우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적 특성에 대해 보고하였으며, 김태윤과 김명균(1992)은 국내산 화강암류 석재의 물성과 지구화학적 특성 간의 상호관련성을 조사하였다. 특정 지역에 분포하는 암석 물성에 대한 연구도 실시되었는데, 박찬 등(2008)은 독도 암석에 대해 조사하였으며, 김종우 등(2012)은 제천지역 석회암의 역학적 특성에 대해 보고하였다. 이와 같이 국내 암석의 물리적 성질에 관한 연구들은 꾸준히 수행되고 있지만, 암석은 불균질하고 이방성을 가진 재료이므로 아직까지 모든 물성을 규명하지는 못하였고 볼 수 있으며, 더욱이 암석의 물성은 암석 종류나 풍화 정도에 따라 민감하게 달라지므로 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 특히 화강암은 우리나라에 분포하는 가장 많은 암석 중의 하나이며 이 중 거창화강암은 국내 주요 석재자원으로 사용되기 때문에 이 암석에 대한 역학적 성질 규명은 매우 중요하다.

본 연구에서는 거창화강암의 기초 물성들을 조사하기 위하여, 이 암석에 대해 총 927회의 실내시험을 실시하여 암석의 단위중량, 흡수율, P파 속도, S파 속도 일축 압축강도, 영률, 포아송비, 인장강도, 점착력, 내부마찰각, 점화중강도지수 등의 각종 물리적 성질을 구하였다. 또한, 여러 가지 물성 간의 단순회귀분석과 다중회귀분석을 통해 물성 상호 간의 관련성을 알아보았다. 이 연구의 결과는 국내 암석의 물리적 성질에 관한 연구 중에 하나로서, 국내 화강암에 대한 기초 자료로도 활용될 수 있다.

2. 거창화강암의 특징

2.1 암석기재

거창화강암은 회백색을 띠며 1~5 mm의 중립질 조직을 가진 흑운모 화강암의 일종으로서 김용준 등(1989)에 의해 처음 명명되었다. 주 구성광물은 석영, 사장석, 알칼리장석, 흑운모이고, 알칼리장석을 반정으로 가지는 반정질의 조직을 보이며 전체적으로는 일정한 입도와 조직을 가진다. 한미 등(2010)에 의하면 이 암석의 모드분석 결과는 Fig. 1의 × 심볼과 같이 화강섬록암과 화강암 영역에 해당한다. 또한 최진범 등(2006)의 노름(norm) 광물조성 분석에 의하면 거창화강암의 석영함량은 16.8~24.7%이고 사장석은 39.6~43.8%, 알칼리장석은 27.1~39.1%이다.

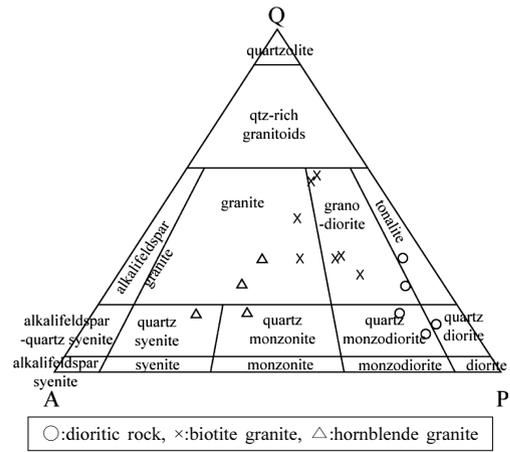


Fig. 1. Modal Q-A-P diagram (Han Mi, et. al, 2010)

2.2 석산 현황

거창화강암을 생산하고 있는 석산들은 거창군 북상-위천-마리의 서부 산간 소분지와 고제-웅양-주상의 중앙 산간 소분지를 둘러싸고 있는 산계에 위치하고 있다. 거창지역에는 16개의 석산에서 매년 약 305만 톤의 석재를 채취하고 있으며, 국내 화강석 생산의 약 20%를 차지한다(최진범 등, 2006). 한편, 석재로 생산된 거창화강암은 “거창석” 또는 “거창화강석”이라는 브랜드로 판매되고 있다. 재단법인 거창화강석연구센터에 의하면 이 석재의 주성분원소 함량은 Table 1과 같고, 연간매출규모는 약 1500억 원으로, 거창군 생산의 약 25%를 차지하며 거창군의 중요 산업기반이 되고 있다.

Table 1. Major element compositions of the Geochang granite (after Geochang Granite Resource Center)

Element	Weight percent (%)
SiO ₂	66.2~71.1
TiO ₂	0.2~0.4
Al ₂ O ₃	16.1~18.2
FeOT	1.2~2.3
MnO	0.03~0.04
MgO	0.3~0.9
CaO	2.1~3.4
Na ₂ O	4.6~5.1
K ₂ O	2.8~3.8
P ₂ O ₅	0.04~0.11

Table 2. Mechanical properties of Geochang granite obtained from literature searches

References	Unit weight (kN/m ³)	Porosity (%)	Absorption ratio (%)	P-wave velocity (m/s)	UCS ¹⁾ (MPa)			UCS ²⁾ (MPa)	Tensile strength (MPa)	Test condition
					Rift	Grain	Hardway			
Seo, Y.S. et. al. (2003)	26.1	0.87	0.33	3148~4410	201	179	166		9	Anisotropic strength test
No. of data	15	15	15	5	1	1	1		6	
Kang, M.H. (2010)	26.5		0.28		190	173	169			
No. of data	30		30		10	10	10			
Heo, J.S. (2011)				3463~3763			178~203			
No. of data				63			7			
Jwa, Y.J. et. al. (2007)	26.1~26.7	0.64~1.39	0.24~0.53					156~267	6~13	General strength test
No. of data	30	30	30					30	30	

1) UCS means uniaxial compressive strength obtained from anisotropic strength test

2) UCS means uniaxial compressive strength obtained from general uniaxial strength test

2.3 기발표된 연구사례 분석

거창화강암은 국내 주요 석재자원 중 하나로서 각종 연구가 진행되어 왔다. 그러나 대부분의 연구는 광물조성, 미세균열, 풍화내구성 등과 관련하고 특히, 포천석, 황등석, 그리고 중국 석재와 특징을 비교하는 연구가 많았으며, 암석의 역학적 특징에 관한 연구는 비교적 적었다.

Table 2는 거창화강암을 대상으로 기발표된 4건의 암석역학적 연구에서 얻어진 암석의 물성을 요약한 것이다. 이 중 3건은 강도 이방성 시험, 그리고 나머지 1건은 일반적인 시험으로부터 구해졌다. 한편, 거창화강암은 국내 다른 화강암 석재와 마찬가지로 “결”이 존재하는데, 각각 1번 결(rift), 2번 결(grain), 3번 결(hardway)이 있으며, Table 2와 같이 각 방향에 따른 강도 이방성이 확인되기도 하였다. 그러나 이와 같은 선행연구의 결과는 시험시료의 개수가 비교적 적어 암석의 불균질성을 감안하면, 도출된 물성의 신뢰성은 다소 미흡한 편이라 생각된다. 또한, 선행연구에서는 암석의 물성 중에서 단위중량, 간극률, 흡수율, P파 속도, 일축압축강도, 인장강도의 값만 제시되었지만, 그 외에 S파 속도, 영률, 포아송비, 점착력, 내부마찰각, 점하중강도지수 등의 물성 값도 규명될 필요가 있다.

한편, 거창화강암은 국내 주요 석재로 사용되기 때문에 향후 이방성을 고려한 수많은 시험을 통해 각종 물성의 특징이 재조명될 필요가 있으며, 포천석, 황등석 등에 대한 심층적인 비교 연구도 필요하다.

3. 거창화강암의 물성

3.1 실내 물성 시험

본 연구에서는 거창화강암의 물성을 구하기 위하여 본 지역 석산에서 채취한 암석 코어를 대상으로 NX 규격의 원주형 암석 시험편들을 제작하였다. 일축압축강도 시험편, 압열인장강도 시험편, 삼축압축강도 시험편은 각각 한국암반공학회 표준암석시험법을 따라 제작하였으며(한국암반공학회, 2005), 각 시험별 시험편의 수량은 Table 3과 같다. 이와 같이 본 연구에서는 총 927회의 실내 시험을 실시하여 거창화강암의 물성을 정량적으로 구하였다. 한편, 본 실험의 결과 중 일부는 노승재(2013)에 의해 석사학위논문으로 기발표된 바 있지만, 본 연구에서는 선행연구의 미비점을 보완하고 추가적인 실험을 실시하여 그 결과를 반영하였으며 새로운 회귀분석도 실시하였다.

한편, 전술한 바와 같이 거창화강암은 결에 따른 강도 이방성이 존재하지만, 본 연구에서는 이방성을 고려한 시험을 실시하지는 못하였다. 이는 본 지역 다수의 석

Table 3. The number of rock specimens

Tests	Number of specimens
Uniaxial compressive test	157
Brazilian test	157
Triaxial compressive test	456
Point load test	157
Total	927

산으로부터 채취된 임의의 암석코어의 시추방향이 어느 결 방향인지 불분명하였기 때문인데, 거창화강암의 물성 분포와 물성 간 상호관련성을 더욱 심층적으로 연구하기 위해서는 향후 이방성을 고려한 시험도 요구된다. 다시 말해서 본 연구에서 얻어진 암석의 물성값은 결의 이방성을 고려한 것은 아니지만, 시험편의 수량이 많은 점을 감안하면 결을 고려하지 않은 거창화강암 물성의 전체적인 평균값 개념으로 이해될 수 있다.

3.2 일축압축시험

본 연구에서는 평균값으로서 지름 54 mm, 길이 108 mm 규격의 일축압축시험편을 총 157개 제작하고 일축압축시험을 실시하여, 암석의 단위중량, 흡수율, P파 속도, S파 속도, 영률, 포아송비를 구하였다. 세부적인 시험방법은 한국암반공학회 표준암석시험법(한국암반공학회, 2005)에 따라 실시하였다.

Table 4는 시험에서 얻어진 암석의 물성들을 나타낸 것으로, 최솟값, 최댓값, 평균값, 표준편차로 나누어 표시하였다. 예를 들어 Table 4에서 거창화강암의 단위중량은 24.8~27.1 kN/m³의 범위를 보였으며, 평균값은 25.9, 표준편차는 0.5이다. 일축압축시험을 통해 얻어진 암석의 물성은 평균값 기준으로 단위중량 25.9 kN/m³, 흡수율 0.38%, P파속도 3408 m/s, S파속도 2234 m/s, 일축압축강도 121 MPa, 영률 44 GPa, 포아송비 0.231이다. 또한, Table 4에 나타난 물성 중 인장강도, 마찰각, 점착력, 점하중강도지수에 대해서는 후술한다. 한편, 157회의 일축압축시험 중 4회는 실험 오류로 인해 영률과 포아송비를 구하지 못하였다. 따라서 Table 4에 나타난 물성들 중 영률과 포아송비의 자료 수는 153개이고 단위중량, 흡수율, P파 속도, S파 속도의 자료 수는 157개이다.

3.3 압열인장시험과 점하중시험

거창화강암의 인장강도를 구하기 위하여 평균값으로서 지름 54 mm, 길이 27 mm 규격의 원판형 시험편을 사용하여 압열인장시험 157회를 실시하였다. 또한 점하중강도지수를 구하기 위하여 점하중시험 157회를 실시하였다. 점하중시험은 원주형, 직육면체, 불규칙한 형태의 시험편에 대해 실시되지만, 본 연구에서는 지름 54 mm인 암석 코어 원주형 시험편에 대해 직경방향시험을 실시하였다. 시험편의 규격이나 구체적인 시험방법은 한국암반공학회 표준암석시험법(한국암반공학회, 2007)에 따라 실시하였다.

압열인장시험과 점하중시험에서 얻어진 암석의 물성은 평균값 기준으로 인장강도 6.2 MPa, 점하중강도지수 4.6 MPa이며, 각각의 자료 수는 157개이다. 구체적인 물성값 분포는 Table 4에 표시하였다.

3.4 삼축압축시험

삼축압축시험은 암석의 점착력과 내부마찰각을 구하는 것을 목적으로 하며, 구속압의 크기를 달리한 시험편의 개수는 5개 이상을 원칙으로 하되 최소 3개 이상의 시험편에 대해 시험을 실시하도록 규정되어 있다(한국암반공학회, 2006). 본 연구에서는 구속압의 크기를 5, 10, 15 MPa로 설정한 3개의 시험편을 1세트로 하여 삼축압축시험을 실시하였다. 즉, 일축압축시험편과 동일한 규격의 시험편을 총 456개 제작하여 삼축압축시험 152세트를 실시하였다. 삼축압축시험에서 얻어진 물성은 평균값 기준으로 점착력 14.0 MPa, 내부마찰각 51.3°이며, 각각의 자료 수는 152개이다.

Table 4. Results obtained from laboratory rock tests

Items	Unit weight (kN/m ³)	Absorption ratio (%)	P-wave velocity (m/s)	S-wave velocity (m/s)	UCS ¹⁾ (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Tensile strength (MPa)	Friction angle (°)	Cohesion (MPa)	$I_{s(50)}^{2)}$ (MPa)
Minimum	24.8	0.08	2498	1495	46	17	0.14	2.1	38.9	4.3	2.9
Maximum	27.1	1.11	4698	3264	252	70	0.31	14.3	65.6	27.8	7.6
Average	25.9	0.38	3408	2234	121	44	0.23	6.2	51.3	14.0	4.6
S.D. ³⁾	0.46	0.22	388	282	52	12	0.04	2.6	6.2	5.8	1.4
No. of data	157	157	157	157	157	153	153	157	152	152	157

1) UCS means uniaxial compressive strength
 2) $I_{s(50)}$ means point load strength index considering the size effect of specimen
 3) S.D. means standard deviation

3.5 거창화강암의 물성분포

Fig. 2는 일축압축시험, 압연인장시험, 삼축압축시험, 점하중시험에서 얻어진 물성값의 분포를 나타낸 것으로, Table 4에 나타난 물성별로 히스토그램과 정규곡선을 표시한 것이며 각각의 물성은 산술평균, 표준편차, 자료 수를 함께 나타내었다. 애초에 시험 암석들은 모두 비슷한 외견을 가지고 있었으나 암석의 불균질성으로 인해 각종 물성값들은 어느 정도 흩어짐이 나타나는 것을 알 수 있었다.

한편, Fig. 2에 나타난 각종 물성 중에서 흡수율, 일축압축강도, 인장강도, 점하중강도지수는 다른 물성에 비해 산술평균으로 대푯값을 지시하기는 곤란할 정도로 자료의 분산이 컸는데, 각각의 변동계수(coefficient of variation)를 백분율로 나타내면 58%, 43%, 42%, 30%이다. 이는 암석 고유의 불균질성에 따른 영향으로 이해되는데, 특히 암석의 불구속 강도(unconfined strength) 특성에 해당하는 일축압축강도, 인장강도, 점하중강도 지수의 분산이 큰 것은 암석 파괴의 핵으로 작용하는 Griffith crack의 분포특성이나 방향이 시험편마다 달랐기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 따라서 동일 암종이라 하더라도 물성의 대푯값을 설정하기 위해서는 보다 수많은 시험이 요구된다고 할 수 있다.

한편, Table 4에서 평균값 기준으로 암석의 물성을 비교하면, 거창화강암의 일축압축강도는 인장강도의 19.5배, 점착력의 8.6배이고, P파 속도는 S파 속도의 1.5 배 수준이었다. 또한 Deere와 Miller의 암석분류법에 따르면(이희근과 양형식 외, 1997), 일축압축강도 121 MPa, 영률 44 GPa인 거창화강암은 경암이면서 중간 정도의 탄성을 비를 보이므로 BM으로 분류된다.

4. 물성의 통계분석

4.1 상관분석과 회귀분석

암석의 물성들은 독립적인 실험에 의해 구해지지만, 상호 간에 어느 정도의 관련성을 가지는 것으로 알려진다. 한편, 변수들 간의 관련성을 조사하기 위한 방법으로는 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)가 널리 사용되며, 본 연구에서는 SPSS를 사용하여 Table 4에서 나타난 11가지 물성 변수들에 대한 상관분석을 실시하였다. Table 5는 상관분석을 통해 얻어진 피어슨 상관계수를 보여준다.

회귀분석은 2개 이상의 정량적 변수들 간의 관계를 이용하여 하나의 변수를 나머지 다른 변수들로부터 예측할 수 있도록 하는 방법이다. 회귀분석은 단순회귀분석과 다중회귀분석으로 나누어진다. 단순회귀분석은 독

립변수가 하나인 경우이고, 다중회귀분석은 독립변수가 두 개 이상인 경우이다. 한편, 회귀분석을 통해 얻어지는 회귀식이 관찰값에 얼마나 적합한 지를 측정할 수 있는 여러 척도 중에서 결정계수(R^2 , coefficient of determination)가 널리 사용된다. 그런데, 결정계수는 설명변수의 수를 늘릴수록 그 변수가 유용한 것이든 아니든 큰 값이 되어 간다는 문제점을 안고 있기 때문에, 무의미한 변수를 설명변수로서 사용했을 경우를 조정하는 수정된 결정계수(adjusted R^2)가 사용되기도 한다.

본 연구에서는 Table 4에 나타난 11가지 물성들 중에서 물성 간 상호관련성이 비교적 큰 물성들에 대하여 단순회귀분석과 다중회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 통해 여러 가지 회귀식을 산출하였는데 각 회귀식은 수정된 결정계수를 함께 표시하였다.

4.2 탄성파속도

암석의 P파 속도와 S파 속도는 암석 비파괴시험의 주요 항목이며, 특히 P파 속도는 국토해양부 표준품셈에서 암석분류 요소 중의 하나이기도 하다. Table 5에서 P파 속도와 상관성이 큰 변수는 S파 속도로서 상관계수는 0.72이었으며, 나머지 변수와의 상관성은 매우 작았다. Fig. 3(a)는 P파 속도와 S파 속도의 관계를 나타낸 것이고 회귀식은 다음과 같다.

$$V_p = 1179 + 0.997 V_s \quad (R^2 = 0.53) \quad (1)$$

한편, 이희근 등(1983)은 극연암에서 극경암에 해당하는 국내 암석들에 대한 시험결과를 바탕으로 암석의 일축압축강도는 P파 속도에 따라 지수함수적으로 증가한다고 하였다. 그러나 Table 5와 같이, P파 속도와 일축압축강도의 상관계수는 0.12에 불과하기 때문에 거창화강암의 경우는 Fig. 3(b)와 같이 이들의 상호관련성을 찾아보기는 어려웠다. 실제로 이희근 등(1983)이 다른 암석들은 다양한 암종이면서 강도 범위가 매우 큰 그룹들에 대한 통계분석이었지만, 본 연구에서 다른 암석은 동일 암종이면서 무결암 수준의 암석이었기 때문에 이들의 상호관련성이 적게 나타난 것으로 생각된다.

4.3 일축압축강도

암석의 일축압축강도는 암석 물성 중에서 가장 중요시되는 항목이다. 본 연구에서는 거창화강암의 일축압축강도와 나머지 물성간의 상호관련성을 알아보기 위하여 실험결과 값들에 대한 상관분석을 실시하였다 (Table 5 참고). 그 결과, 일축압축강도는 다른 역학적 수인 영률, 포아송비, 인장강도, 내부마찰각, 점착력, 점

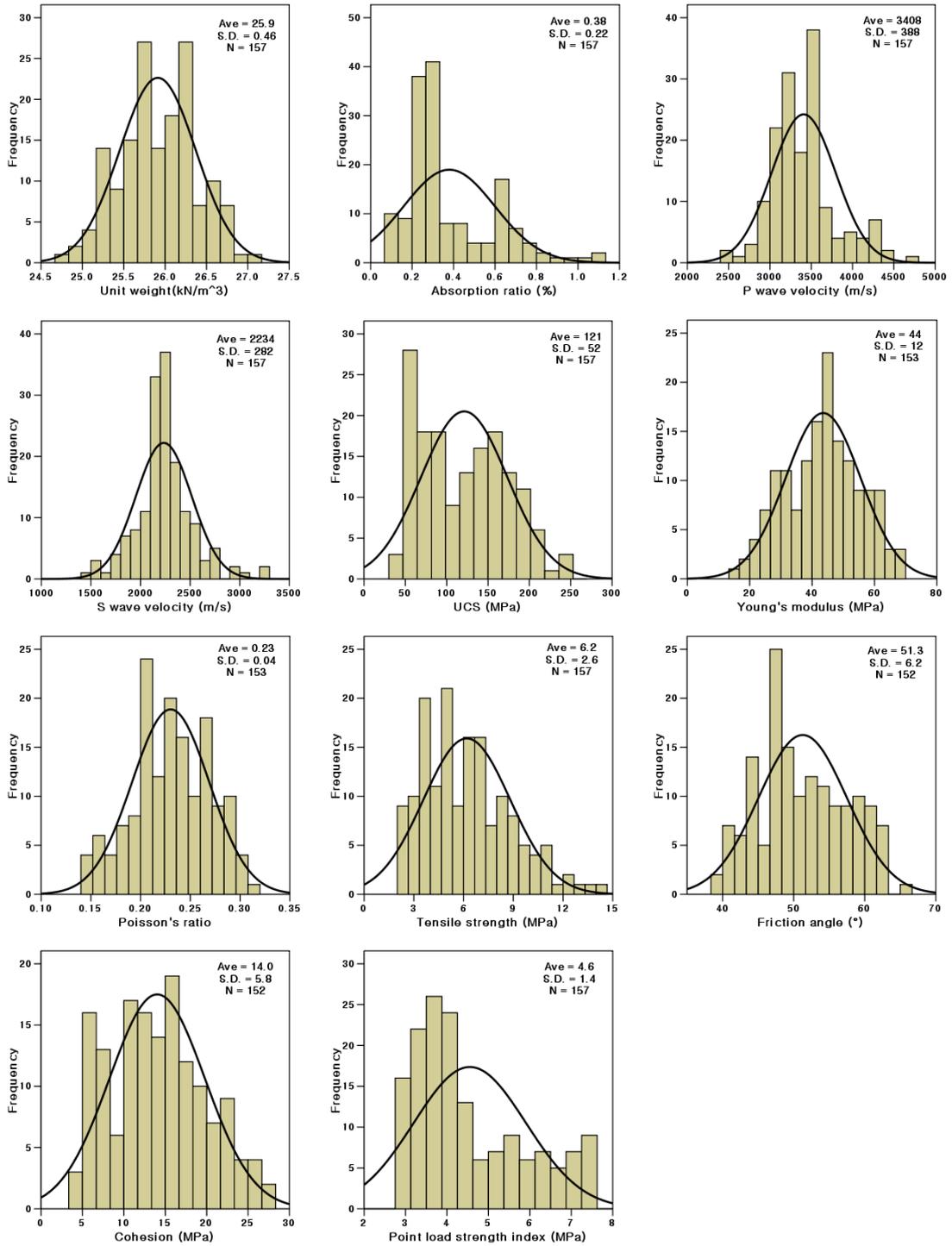
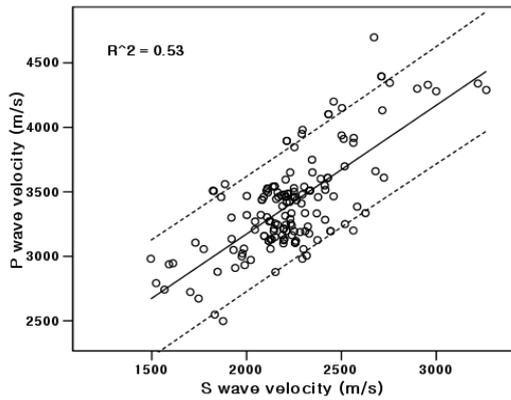


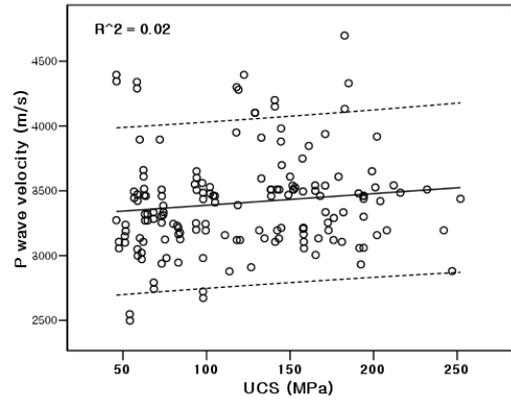
Fig. 2. Distribution of physical properties of the Geochang granite

Table 5. Pearson correlation coefficients obtained from correlation analyses

	Unit weight	Absorption ratio	P-wave velocity	S-wave velocity	UCS	Young's modulus	Poisson's ratio	Tensile strength	Friction angle	Cohesion	$I_{s(50)}$
Unit weight	1	-0.57	0.03	-0.01	-0.14	-0.04	0.10	-0.11	-0.06	-0.17	-0.15
Absorption ratio	-0.57	1	-0.03	0.09	0.01	-0.02	0.02	0.01	-0.01	0.01	0.04
P-wave velocity	0.03	-0.03	1	0.72	0.12	0.15	-0.07	-0.03	0.05	0.06	0.07
S-wave velocity	-0.01	0.09	0.72	1	0.08	0.13	-0.01	0.02	0.08	0.09	0.06
UCS	-0.14	0.01	0.12	0.08	1	0.82	-0.89	0.67	0.54	0.64	0.86
Young's modulus	-0.04	-0.02	0.15	0.13	0.82	1	-0.79	0.57	0.51	0.47	0.67
Poisson's ratio	0.10	0.02	-0.07	-0.01	-0.89	-0.79	1	-0.63	-0.51	-0.55	-0.74
Tensile strength	-0.11	0.01	-0.03	0.02	0.67	0.57	-0.63	1	0.63	0.88	0.69
Friction angle	-0.06	-0.01	0.05	0.08	0.54	0.51	-0.51	0.63	1	0.62	0.50
Cohesion	-0.17	0.01	0.06	0.09	0.64	0.47	-0.55	0.88	0.62	1	0.67
$I_{s(50)}$	-0.15	0.04	0.07	0.06	0.86	0.67	-0.74	0.69	0.50	0.67	1



(a) P wave velocity vs. S wave velocity



(b) P wave velocity vs. UCS

Fig. 3. Relation between P wave velocity and other physical properties

하중강도지수 등과 상관계수 0.5 이상의 관련성을 보였지만, 역학정수가 아닌 단위중량, 흡수율, P파 속도, S파 속도와와의 관련성은 거의 없었다. 이 중에서 0.8 이상의 큰 상관계수를 보인 것을 순서대로 나타내면 포아송비(ν), 점하중강도지수($I_{s(50)}$), 영률(E)이다.

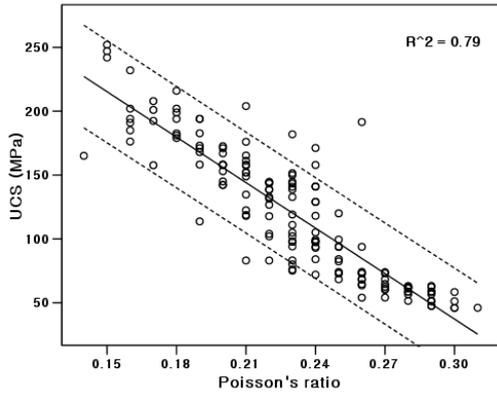
Fig. 4는 이들의 상호관계를 나타낸 것이다. 단순회귀 분석을 통해 산출된 물성 간의 회귀식은 다음과 같으며,

결정계수가 큰 것부터 순서대로 나타내었다.

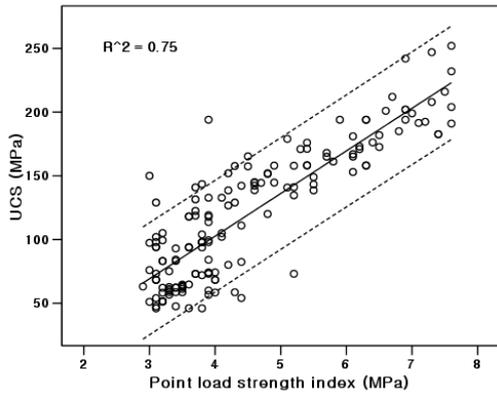
$$UCS = 393 - 1187\nu \quad (R^2 = 0.79) \quad (2)$$

$$UCS = -31.2 + 33.5 I_{s(50)} \quad (R^2 = 0.75) \quad (3)$$

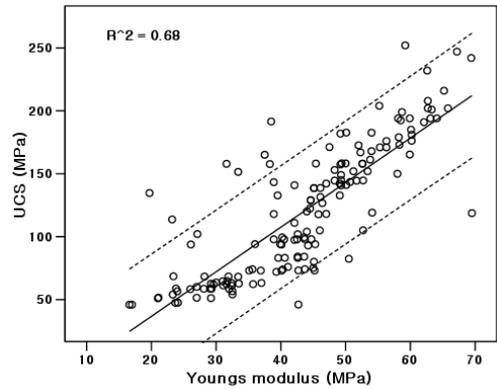
$$UCS = -34.1 + 3.54 E \quad (R^2 = 0.68) \quad (4)$$



(a) UCS vs. Poisson's ratio



(b) UCS vs. $I_{s(50)}$



(c) UCS vs. Young's modulus

Fig. 4. Relation between UCS and other physical properties

한편, 일축압축강도와 0.8 이상의 큰 상관계수를 보인 포아송비, 점하중강도지수, 영률에 대해서는 상호 간의 다중회귀분석도 실시하였다. 아래는 독립변수가 2개인

경우 다중회귀분석을 통해 산출된 물성 간의 회귀식으로, 결정계수가 큰 것부터 순서대로 나타내었다.

$$UCS = 214 - 745\nu + 17.2 I_{s(50)} \quad (R^2 = 0.88) \quad (5)$$

$$UCS = -62 + 21.6 I_{s(50)} + 1.9 E \quad (R^2 = 0.85) \quad (6)$$

$$UCS = 255 - 846\nu + 1.4 E \quad (R^2 = 0.83) \quad (7)$$

독립변수가 3개인 경우의 회귀식은 다음과 같으며 결정계수는 0.9로서 90%의 설명력을 가진다.

$$UCS = 129 - 537\nu + 1.0 E + 15.6 I_{s(50)} \quad (R^2 = 0.90) \quad (8)$$

4.4 영률과 포아송비

암석의 영률과 포아송비는 일축압축시험을 통해 얻어 지는데, 이들은 암반구조물의 변형거동을 좌우하므로 수치해석의 필수 입력자료에 해당한다. Table 5에서 거창화강암의 영률과 상관관계가 큰 물성은 일축압축강도와 포아송비의 순서로 나타났으며, 포아송비와 상관관계가 큰 물성은 일축압축강도와 영률의 순서로 나타났다. Fig. 5, 6은 이들의 상호관계를 나타낸 것이고, 단순회귀분석을 통해 산출된 물성 간의 회귀식은 다음과 같다.

$$E = 20.5 + 0.19 UCS \quad (R^2 = 0.68) \quad (9)$$

$$E = 100 - 246 \nu \quad (R^2 = 0.63) \quad (10)$$

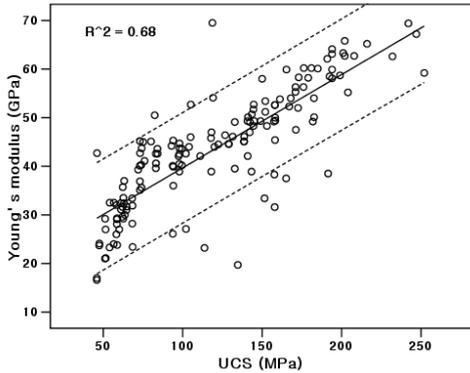
$$\nu = 0.31 - 0.00066 UCS \quad (R^2 = 0.79) \quad (11)$$

$$\nu = 0.34 - 0.0025 E \quad (R^2 = 0.63) \quad (12)$$

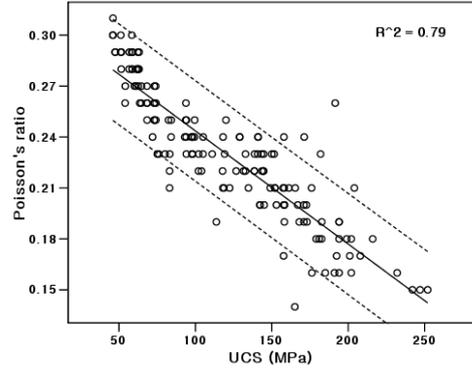
한편, 암반구조물의 변형거동 해석을 위해서는 영률과 포아송비 자료가 반드시 필요하며, 일축압축시험을 통해 이를 구해야 한다. 하지만 실험장치가 부족하여 단순히 파괴실험을 통해 일축압축강도만 구하고 나서, 영률과 포아송비를 예측할 경우가 있다. 이 경우 거창화강암은 (9), (11)식의 관계를 사용할 수 있다. 단, 이는 각각 68%, 79%의 설명력을 가진다는 점에 유의해야 한다.

4.5 인장강도

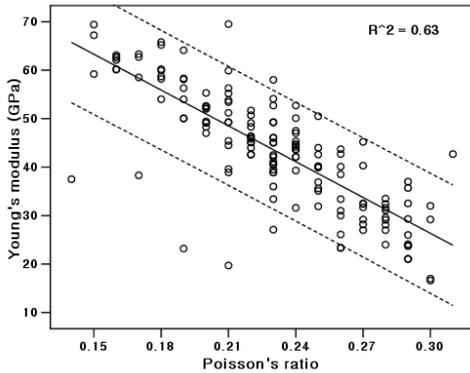
거창화강암의 인장강도와 상호관련성이 큰 물성은 점착력, 점하중강도지수, 일축압축강도의 순서로 나타났



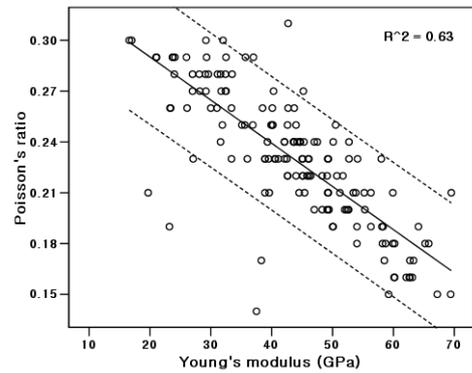
(a) Young's modulus vs. UCS



(a) Poisson's ratio vs. UCS



(b) Young's modulus vs. Poisson's ratio



(b) Poisson's ratio vs. Young's modulus

Fig. 5. Relation between Young's modulus and other physical properties

Fig. 6. Relation between Poisson's ratio and other physical properties

는데, 이 중 상관계수가 0.8 이상인 것은 점착력뿐이었다. Fig. 7은 상호관계를 나타낸 것이다.

인장강도에 대한 단순회귀분석을 통해 산출된 물성 간의 회귀식은 아래와 같은데, 이 중 (13)식은 결정계수가 0.78로서 어느 정도 신뢰성은 있지만 (14), (15)식은 결정계수가 0.5 이하이므로 신뢰도는 떨어진다.

$$S_t = 0.48 + 0.41 c \quad (R^2 = 0.78) \quad (13)$$

$$S_t = 0.07 + 1.35 I_{s(50)} \quad (R^2 = 0.48) \quad (14)$$

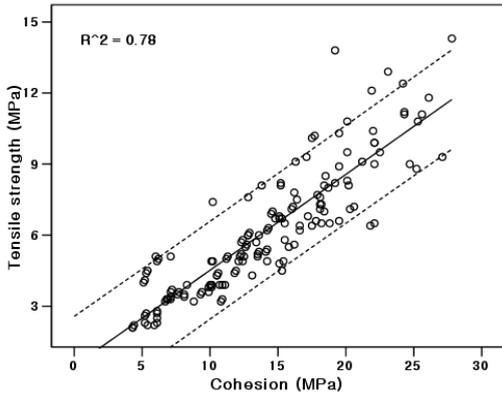
$$S_t = 2.10 + 0.034 UCS \quad (R^2 = 0.45) \quad (15)$$

4.6 점착력과 내부마찰각

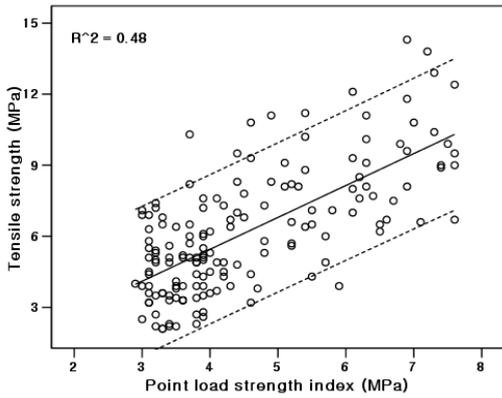
거창화강암의 경우 점착력과 상관계수가 0.8이상인

물성은 인장강도뿐이었고 내부마찰각과 상관계수가 0.8 이상인 물성은 없었다. 이외에 점착력과 0.6 이상의 상관성이 나타난 물성은 점하중강도지수, 일축압축강도, 내부마찰각이며, 내부마찰각과 0.6 이상의 상관성이 나타난 물성은 인장강도, 점착력이었지만 상관성이 부족한 편이다.

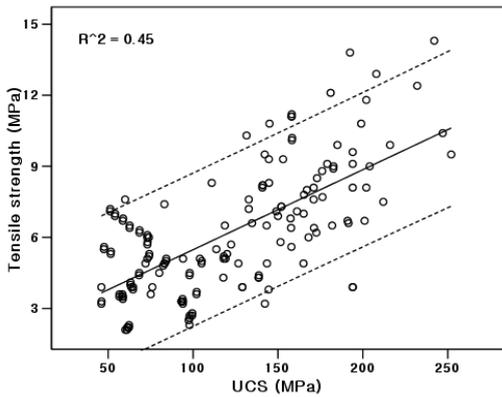
실제로 암석의 점착력과 내부마찰각은 Mohr-Coulomb 파괴조건 상수로서 암반구조물의 안정성해석 입력자료이며 이는 암석의 삼축압축시험을 통해 얻어진다. 본 연구에서 얻어진 물성 간의 상관성을 감안하면, 거창화강암의 점착력과 내부마찰각은 다른 시험을 통해 유추되기는 어려운 것으로 생각된다. 다만, 상관계수가 크게 나타난 점착력과 인장강도 사이의 관계는 Fig. 8과 같고 회귀식은 다음과 같다.



(a) Tensile strength vs. cohesion



(b) Tensile strength vs. $I_{s(50)}$



(c) Tensile strength vs. UCS

Fig. 7. Relation between tensile strength and other physical properties

$$c = 2.15 + 1.93 S_t \quad (R^2 = 0.78) \quad (16)$$

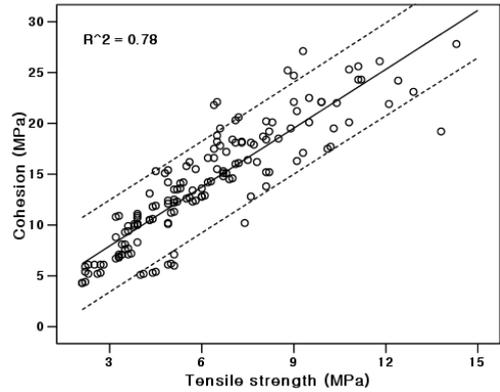


Fig. 8. Relation between cohesion and tensile strength

4.7 점하중강도지수

점하중강도시험은 점하중강도지수를 구하는 것을 목적으로 하지만(암반공학회, 2000), 시험편을 정형할 필요가 없고 시험방법이 간편하기 때문에 실제로는 암석의 일축압축강도나 기타 여러 가지 물성값을 얻기 위한 용도로 발전되고 있다.

거창화강암의 경우 점하중강도지수와 상관계수가 0.8 이상인 물성은 일축압축강도로 나타났으며, 이외에 0.6 이상의 상관성이 나타난 물성은 인장강도, 영률, 포아송비 등이었다. 이 중에서 점하중강도지수와 상관성이 큰 일축압축강도와와의 관계는 Fig. 9와 같고 회귀식은 다음과 같다.

$$I_{s(50)} = 1.85 + 0.022 UCS \quad (R^2 = 0.75) \quad (17)$$

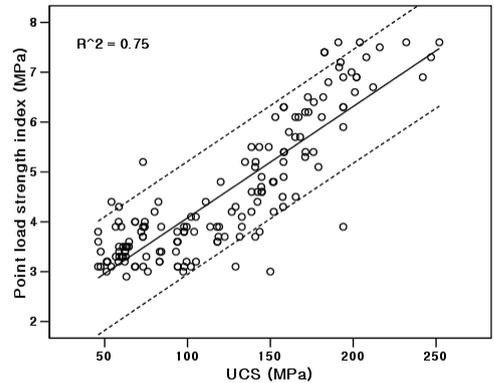


Fig. 9. Relation between $I_{s(50)}$ and UCS

Table 6. Useful regression equations for the Geochang granite

Evaluating method	Regression equations	R^2	Eq.	Variables
multiple regression analysis	$UCS = 129 - 537\nu + 1.0E + 15.6 I_{s(50)}$	0.90	(8)	$UCS, \nu, E, I_{s(50)}$
	$UCS = 214 - 745\nu + 17.2 I_{s(50)}$	0.88	(5)	$UCS, \nu, I_{s(50)}$
	$UCS = -62 + 21.6 I_{s(50)} + 1.9E$	0.85	(6)	$UCS, I_{s(50)}, E$
	$UCS = 255 - 846\nu + 1.4E$	0.83	(7)	UCS, ν, E
simple regression analysis	$UCS = 393 - 1187\nu$	0.79	(2)	UCS, ν
	$\nu = 0.31 - 0.00066 UCS$	0.79	(11)	ν, UCS
	$S_t = 0.48 + 0.41 c$	0.78	(13)	S_t, c
	$c = 2.15 + 1.93 S_t$	0.78	(16)	c, S_t
	$UCS = -31.2 + 33.5 I_{s(50)}$	0.75	(3)	$UCS, I_{s(50)}$
	$I_{s(50)} = 1.85 + 0.022 UCS$	0.75	(17)	$I_{s(50)}, UCS$

4.8 여러 가지 회귀식에 대한 검토

본 연구에서는 거창화강암에 대한 수많은 실험을 통해 물성을 구하였으며, 상관분석과 회귀분석을 거쳐 (1)~(17)식과 같은 회귀식을 도출하였다. 그러나 이 식들 중 일부는 물성 간의 상호관련성을 설명하기 위하여 결정계수가 작은 것도 포함되어 있었지만, 실제로 결정계수가 작은 것은 유의성이 떨어지기 때문에 공학적으로 사용될 수는 없다.

Table 6은 본 연구에서 도출한 회귀식 중에서 결정계수가 0.7 이상인 것을 정리한 것으로, 결정계수가 큰 것부터 나열한 것이다. 이는 국내 암석 물성의 데이터베이스 자료로 활용될 수 있으며, 사용자의 주의를 따라 거창화강암에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 거창화강암을 대상으로 수많은 실내 암석시험을 통해 각종 물성을 구하였다. 실험결과로 얻어진 각종 물성 간의 상호관계를 분석하였으며, 단순회귀분석과 다중회귀분석을 통해 각종 회귀식을 구하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 일축압축시험 157회, 압열인장시험 157회, 삼축압축시험 152회, 점하중강도시험 157회를 실시하여 얻어진 거창화강암의 평균 물성은 단위중량 25.9 kN/m³, 흡수율 0.38%, P파속도 3408 m/s, S파속도 2234 m/s, 일축압축강도 121 MPa, 영률 44 GPa, 포아송비 0.23, 인장강도 6.2 MPa, 점착력 14 MPa, 내부마찰각 51.3°, 점하중강도지수 4.6 MPa이었다.

2. 거창화강암의 물성을 서로 비교하면 일축압축강도는 인장강도의 19.5배, 점착력의 8.6배이고, P파 속도는 S파 속도의 1.5배 수준이었다.
3. 시험을 통해 얻어진 모든 물성을 히스토그램으로 표시하여 물성값의 흠어짐을 확인하였으며, 물성별 최솟값, 최댓값, 평균값, 표준편차를 나타내었다.
4. 물성 상호 간의 관련성을 조사하기 위한 상관분석에서 일축압축강도는 포아송비, 점하중강도지수, 영률과 0.8 이상의 상관계수를 보였다.
5. 단순회귀분석과 다중회귀분석을 통해 물성 간의 여러 가지 회귀식을 구하였으며, 본 연구에서 얻어진 결정계수 0.7 이상의 회귀식을 Table 6과 같이 정리하였다.
6. 본 연구의 결과는 국내 암석 물성의 데이터베이스 자료로 활용될 수 있으며, 사용자의 주의를 따라 거창화강암에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2014학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었습니다.

References

1. Choi, J.B., Jwa, Y.J., Kim, K.K. and Hwang, G.C., 2006, Analyses of mineral composition of Geochang granitic rocks for stone specification, J. Miner. Soc. Korea, 19.4, 363-381.
2. Geochang granite resource center, 2011, <http://www.granite>.

- go.kr/?pid=a102, accessed on November 20, 2014.
3. Han, M., Kim, S.W., Yang, K.H. and Kim, J.S., 2010, Petrological study of the dioritic and granitic rocks from Geochang area, *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 19.3, 167-180.
 4. Heo, J.S., 2011, A study on the physical and chemical deterioration of Geochang granite, MS thesis of Gyeongsang national univ., Korea, p.34-41.
 5. Jwa, Y.J., Choi, J.B., Kim, K.K., Kim, J.S. and Hwang, G.C., 2007, Quality standard of Geochang granite stone, *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 16.1, 38-45.
 6. Kang, M.H., 2010, A study on the relationship between the microcracks and compressive strength of Geochang granites, MS thesis of Gyeongsang national uni., Korea, p. 20-25.
 7. Kim, J.W., Kim, M.S., Kim, P.G., Nor, S.J., Park, C., Jo, Y.D. and Park, S.G., 2012, The mechanical properties of limestones distributed in Jecheon, *Tunnel and Underground Space*, 22.5, 354-364.
 8. Kim, T.Y. and Kim, M.K., 1992, A study on physical and geochemical properties of granitic building stone in Korea, *J. KSMER*, 29.5, 287-298.
 9. Kim, Y.J., Cho, D.L. and Park, Y.S., 1989, K-Ar ages and major mineral compositions of the mesozoic igneous rocks in the vicinity of the Geochang area, *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, 22.2, 117-127.
 10. KSRM, 2005, Standard method for sampling and preparation of rock test specimen, *Tunnel and Underground Space*, 15.2, 81-84.
 11. KSRM, 2005, Standard test method for uniaxial compressive strength of rock, *Tunnel and Underground Space*, 15.2, 85-86.
 12. KSRM, 2006, Standard test method for indirect tensile strength of rock by the Brazilian test, *Tunnel and Underground Space*, 16.4, 279-280.
 13. KSRM, 2006, Standard test method for triaxial compression of rock, *Tunnel and Underground Space*, 16.6, 433-436.
 14. KSRM, 2007, Standard test method for point load strength test of rock, *Tunnel and Underground Space*, 17.2, 75-82.
 15. Lee, C.I., Lee, H.K., Ryu, C.H. and Yang, H.S., 1982, A study on the mechanical properties of major rocks distributed in Korea (1st Report), *J. KSMER*, 19.4, 260-267.
 16. Lee, C.O., Hong, S.S., Lee, B.T., Kim, G.S. and Yun, H.S., 2006, Spatial distribution of the dimension stone quarries in Korea, *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 15.3, 154-166.
 17. Lee, H.K., Lee, C.I. and Yang, H.S., 1983, A study on the mechanical properties of major rocks distributed in Korea (2nd Report), *J. KSMER*, 20.2, 101-109.
 18. Lee, H.K. and Yang, H.S., 1997, *Advanced rock mechanics*, Publishing department of SNU, Korea, 119-120.
 19. Nor, S.J., 2013, A study on the correlation of physical properties of Geochang granite, MS thesis of Cheongju Univ., Korea.
 20. Park, C., Cheon, D.S., Jung, Y.B., Song, W.K., Sunwoo, C. and Kim, B.C., 2008, Mechanical properties of rocks in Dokdo, *Tunnel and Underground Space*, 18.1, 69-79.
 21. Seo, Y.S. and Park, D.W., 2003, Mechanical anisotropy of Jurassic granite in Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 13.2, 257-266.

**김명균**

1978년 서울대학교 자원공학과 공학사
1980년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 043-229-8469

E-mail: mkkim@cju.ac.kr

현재 청주대학교 토목공학과 교수
