

초음파 속도를 이용한 암석의 일축압축강도 평가

Evaluation of Rock Uniaxial Compressive Strength Using Ultrasonic Velocity

백승철* · 김용태** · 김홍택*** · 윤준식**** · 이윤규*****

Baek, Seung-Cheol · Kim, Yong-Tae · Kim, Hong-Taek · Yoon, Jun-Sig · Lee, Yun-Gyu

Abstract

Eighteen biotite granites on Andong area and twenty seven igneous rocks(diorite, granite, andesite, rhyolite) on Yeosu area were tested to evaluate the correlations between the uniaxial compressive strength values, as determined by the standard uniaxial compression test, and the corresponding results of the ultrasonic velocity. The variability of test results for each test was evaluated by calculating the coefficient of determination or variation. Results indicate that strong correlations exist between the results of uniaxial compression vs the point load, Schmidt hammer and ultrasonic velocity test. The correlation equations for predicting compressive strength using different methods are presented along with their confidence limits. Ultrasonic velocity test used provide reliable estimates of compressive strength.

keywords : Ultrasonic velocity, Rock, Uniaxial compressive strength, The coefficient of variability

요 지

표준화된 일축압축강도시험에 의해 구한 암석의 일축압축강도를 간편법에 의해 평가할 수 있는 관계를 구하기 위하여 18개의 안동 흑운모화강암과 27개의 여수 부근의 화성암(섬록암, 화강암, 안산암, 유문암) 암석이 실험에 이용되었다. 각 시험 결과의 타당성은 변동계수를 구하여 평가하였다. 그 결과 일축압축강도와 점하중시험, 슈미트해머시험 및 초음파속도시험 값들 사이에 압축강도를 평가할 수 있는 관계식을 구하였다. 각각 다른 방법으로 구한 예측된 압축강도 관계식은 신뢰할 수 있는 범위에 있었으며, 초음파속도시험은 암석의 일축압축강도를 추정에 신뢰성 있는 관계식을 제공하고 있다.

주요어 : 초음파속도, 암석, 일축압축강도, 변동계수

* 정회원, 안동대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 진산이엔지 지반부 대리

*** 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수

**** 정회원, 진산이엔지 대표이사

***** 정회원, 건동대학교 건설공학부 조교수

1. 서론

암석의 일축압축강도에 대한 평가는 지반공학 분야에서 매우 중요한 요소이며, 암반구조물 및 지하구조물 설계와 시공에 있어 매우 넓게 사용되고 있다. 암석의 일축압축강도 측정은 ASTM(1984)과 ISRM(1981)에 의해 표준화 되어 있으나, 제안된 시험규정에 적합하게 시편을 성형해야 하므로 시간이 소비되고, 암석 자체에 확인하기 어려운 미세 균열로 인하여 시험 결과에 오차를 유발할 수 있다. 따라서 이러한 불편한 점을 해소하기 위하여 점하중시험, 슈미트해머 시험, 초음파속도 등을 이용하는 간접적인 방법을 이용하여 암석의 일축압축강도를 예측하는 방법이 연구되고 있다. 이러한 간접적인 시험방법은 시편형성의 준비가 편리하며, 시험장비의 운영도 복잡하지 않다. 또한 현장에서 직접 쉽게 이용할 수도 있어, 상대적으로 간편하고 경제적으로 알려져 있다.

따라서 본 논문에서는 암석의 일축압축강도를 추정하기 위하여 간편법 중 초음파속도를 이용하는 방안을 연구하였다. 이를 위해 18개의 안동흑운모화강암 대상으로 일축압축강도시험, 점하중시험, 슈미트해머 시험, 초음파속도 측정시험을 실시하여 통계처리에 의한 초음파속도의 활용방안을 분석하였고, 여수 부근에서 채취한 총 27개의 화강암, 안산암, 섬록암 및 유문암을 대상으로 초음파속도를 이용한 암석의 일축압축강도 관계식을 구하였다. 각 시험의 상관계수와 결과의 변화를 결정하기 위해 통계분석을 토대로 분석하였다.

2. 간편법의 연구결과

점하중시험은 현장에서 수행할 수 있는 가장 간단한 시험방법이다. 비정형 암편 시료에 대해서도 시험이 가능하며, 시험법이 간단하고 짧은 시간에 결과를 얻을 수 있기 때문에 많은 시료에 대하여 실시할 수 있다. 또한 시험법도 간단하여 이동할 수 있는 장점이 있으며, 시험결과는 암반분류 또는 일축압축강도와 관련되어 이용되고 있다. 지금까지 연구 발표된 일축압축강도와 점하중지수와의 관계식은 표 1에 제시되어 있다.

슈미트해머시험은 쉽게 현장에서 암반의 풍화정도를 정량화할 수 있는 방법일 뿐 만 아니라, 일축압축강도를 추정할 수 있는 비교적 신뢰성 있는

지수를 제공한다. 슈미트해머시험은 암석의 일축압축강도와 비교적 상관성이 좋아 일축압축강도를 추정하는데 적합한 시험으로 알려져 있다. 슈미트해머는 N-type과 L-type 두 가지 타격에너지를 가지는 종류가 있으며, 타격에너지가 작은 L-type이 암석내에 균열을 발생키는 정도가 작아 많이 이용되고 있다. 시험결과는 국내에서 정량적인 현장 암판정 기준으로 이용하는 등 많은 활용성이 알려져 있으며, 지금까지 발표된 일축압축강도와 슈미트해머 반발지수와의 관계식은 표 2에 제시되어 있다.

초음파속도 측정시험은 시험편을 탄성파가 통과하는 소요시간을 측정하여 탄성파인 P파와 S파속도를 구하는 비파괴시험이며, 시편은 일축압축강도, 삼축압축시험 등에 사용되는 것을 이용한다. 실험실 시험에서는 초음파 발진장치를 사용하여 시편을 통과하는 초음파의 속도를 측정하고 이를 고유물성으로서 활용하거나 관계식을 구하여 동탄성계수를 구하거나, 일축압축강도와 같은 다른 특성과 비교 또는 분석에 이용되기도 한다. 초음파속도는 암반 등급분류나 암편의 내압강도를 추정하는데에도 이용되고 있다. 지금까지 실험적 연구에 의해 발표된 일축압축강도와 초음파속도 관계식은 표 3에 제시되어 있다. 그러나 아직 초음파속도를 활용한 암석의 일축압축강도를 추정하는 방법은 그 활용도가 미비하다.

3. 시험시편 및 시험방법

3.1 시험시편

18개의 안동 흑운모화강암과 27개의 여수 부근의 화강암, 안산암 및 섬록암이 본 연구를 위해 이용되었다. 흑운모화강암은 충분한 크기의 블록시편을 채취하여 실험실에서 실내 암석코아 시추기(NX 크기)를 이용하여 각 시험규정에 적합하게 암석 시편을 제작하였으며, 여수 부근에서 채취한 암석은 NX 코아 보링으로 지반조사를 수행하여 얻은 시료를 이용하여 실험을 수행하였다.

흑운모화강암을 대상으로는 일축압축강도시험, 점하중시험, 슈미트해머시험, 초음파속도시험(P파), 단위중량 및 흡수율 등을 실시하여 각 시험 관계식을 결정하였으며, 여수 부근의 암석은 일축압축강도시험, 초음파속도시험(P파, S파) 등을 수행하

표 1. 일축압축강도와 점하중지수 관계

발 표 자	제 안 식	상관계수
D'Andrea et al.[1964]	$q_u = 15.3 I_{s(50)} + 16.3$	0.947
Broch and Franklin[1972]	$q_u = 24 I_{s(50)}$	0.880
Bieniawski[1975]	$q_u = 23 I_{s(50)}$	
Hassani et al.[1980]	$q_u = 29 I_{s(50)}$	0.940
Read et al.[1980]		
(1) Sedimentary rocks	$q_u = 16 I_{s(50)}$	
(2) Basalts	$q_u = 20 I_{s(50)}$	
Foster[1983]	$q_u = 14.5 I_{s(50)}$	
Gunsallus and Kulhawy[1984]	$q_u = 16.5 I_{s(50)} + 51.0$	0.690
ISRM[1985]	$q_u = (20 \sim 25) I_{s(50)}$	
Cargill and Shakoor[1990]	$q_u = 23 I_{s(54)} + 13$	
Grasso et al.[1992]	$q_u = 9.30 I_{s(50)} + 20.4$	
Chau and Wong[1996]	$q_u = 12.5 I_{s(50)}$	
Kahraman[2001]		
(1) Coal	$q_u = 23.62 I_{s(50)} - 2.69$	0.930
(2) Other rocks	$q_u = 8.41 I_{s(50)} + 9.51$	0.850

* q_u and I_s in Mpa.

표 2. 일축압축강도와 슈미트해머 반발치 관계

발 표 자	제 안 식
Deer and Miller[1966]	$q_u = 6.9 \times 10^{[0.16 + 0.0087(R_n \rho)]}$
Aufmuth[1973]	$q_u = 6.9 \times 10^{[1.348 \log(R_n \rho) - 1.325]}$
Beverly et al.[1979]	$q_u = 12.74 e^{[0.0185(R_n \rho)]}$
Kidybinski[1980]	$q_u = 0.477 e^{(0.045 R_n + \rho)}$
Sheorey et al.[1984]	$q_u = 0.4 R_{LM} - 3.6$
Haramy and DeMarco[1985]	$q_u = 0.094 R_n - 0.383$
Cargill and Shakoor[1990]	
(1) Sandstones	$\ln q_u = 4.3 \times 10^{-2} (R_n \rho_d) + 1.2$
(2) Carbonates	$\ln q_u = 1.8 \times 10^{-2} (R_n \rho_d) + 2.9$
Kahraman[2001]	$q_u = 6.97 e^{0.014 R_n \rho} (r = 0.78)$

* q_u in Mpa and ρ in g/cm^3

표 3. 일축압축강도와 초음파속도 관계

발 표 자	제 안 식
Inoue and Ohomi[1981]	$q_u = k \rho V_p^2 + A$
Göktan[1988]	$q_u = 0.036 V_p - 31.18$
Kahraman[2001]	$q_u = 9.95 V_p^{1.21} (r = 0.83)$

* Inoue and Ohomi : q_u in kg/cm^2 , ρ in g/cm^3 , V_p in km/sec

Göktan : q_u in MPa, V_p in m/sec

Kahraman : q_u in MPa, V_p in km/sec

여 초음파속도를 이용한 암석의 일축압축강도 추정 관계식을 결정하였다. 또한 통계분석을 실시하여 시험의 오차특성을 분석하였다.

3.2 시험방법

암석의 일축압축강도 시험은 ISRM(1981)의 규정에 적합하게 암석시편을 제작하여 수행하였다. 암석 시편은 NX 코어(지름 약 54mm) 크기로 직경비가 2.5정도, 편평도는 0.02mm 이내, 수직도 0.001 radian이 되도록 제작하였다. 점하중시험은 Broch와 Franklin(1972)과 ISRM(1985)이 제안한 일정한 원주형 시편에 대한 방법으로 실험을 수행하였다. 시편의 길이와 지름의 비가 1.4 이상이며, 가압하는 점은 시료의 길이 중앙부분으로서 지름과 같은 방향으로 가압하여 실험을 수행하였다. 결과는 10개 시편을 대상으로 점하중시험을 수행하여 평균값으로 정리하였다.

슈미트해머 실험은 길이와 직경비가 2~2.3인 암석 코어를 이용하였다. 본 연구에 사용된 슈미트해머는 타격에너지가 0.74N·m인 L형이며, 타격점은 최소 약 6cm 이상 떨어지게 실험을 수행하였다. Cargill과 Shaker(1990)의 연구결과에 의하면 슈미트해머 반발치가 15~30인 나무 바닥, 30 이상인 타일 바닥 및 50 이상인 콘크리트 바닥에서 실험한 결과 시험 값에 특이한 차이는 없다고 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 슈미트해머 시험을 위해 제작된 시편 홀더를 이용하여 실험을 수행하였으므로 바닥에 대한 영향은 없는 것으로 판단하였다. 슈미트해머 반발치는 총 10회를 실험하여 평균값으로 결정하였다.

초음파속도 측정 시험은 시험편을 초음파가 통과하는데 소요된 시간을 측정하여 압축파(P파, 종파)와 전단파(S파, 횡파)의 전파속도를 구하는 비파괴시험이며, 시험편은 일축압축강도에 사용되는 시험편을 사용하였다. 초음파속도만을 측정할 때는 시험편의 길이는 5.0~10.0cm, 최소 단면적을 0.5cm² 이상으로 하고 시험편 양쪽 끝 면은 서로 평행하며 측정 축과 직각으로 되도록 제작하여야 하며, 시험편의 형태는 원주형이 아니어도 된다. 시험방법은 그림 1과 같이 시험편의 말단에 발진기를, 다른 한쪽에는 수신기를 접촉시킨 다음 0.5 kg/cm² 이하의 압력을 가하면서 발진기의 펄스(pulse)를 발생시켜 초음파가 시험편을 통과하는데

걸린 시간을 측정 후 시험편의 길이로 나누어 구하였다. 그림 1에 초음파시험의 개요도를 제시하였다.

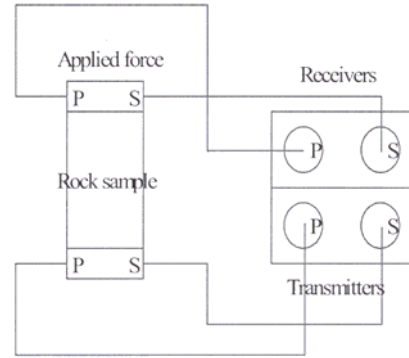


그림 1. 초음파속도 시험의 개요도

3.3 통계분석

각각의 시험과 각 암석에 따른 실험결과의 변화는 변동계수를 결정하여 평가하였다. 변동계수는 표준편차를 평균으로 나누어 계산하며, 백분율로 표시한다. 변동계수가 크면 실험 결과에 큰 변화가 있다는 것을 의미한다. 또한 각각의 실험 결과를 정리하여 일축압축강도와의 관계를 위한 회귀선을 구하였다. 회귀선 방정식을 이용하여 다른 경험적 시험결과로부터 일축압축강도를 예측하는데 이용되었다.

4. 일축압축강도 추정 관계식

4.1 흑운모화강암의 실험결과

안동의 흑운모화강암을 대상으로 일축압축강도와 단위중량의 관계는 그림 2와 같다. 그림 2에서와 같이 특별한 분산 없이 건조단위중량이 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하였다. 일반적으로 암석의 건조단위중량이 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하며, 초기에는 증가율이 크나 점차 증가율이 완화되는 경향을 나타내고 있다. Cargill 등(1990)의 연구결과에 의하면 건조단위중량과 일축압축강도 관계는 일축압축강도를 추정할 수 있는 다른 경험적 시험 방법 중 특히 슈미트해머시험에서 중요한 역할을 할 수 있으나, 점하중시험에 의한 일축압축강도 추정에 있어서는 건조단위중량이

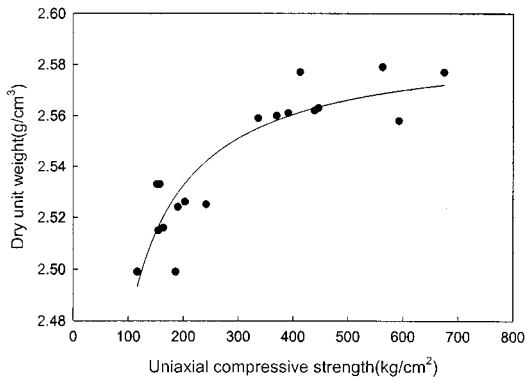


그림 2. 흑운모화강암의 일축압축강도와 단위중량 관계

영향을 주지 않는다.

초음파속도에 의한 암석의 일축압축강도를 추정할 수 있는 관계식의 효율성을 도출하기 위하여 흑운모화강암을 대상으로 일축압축강도시험, 점하중시험, 슈미트해머시험 및 초음파속도(P파) 시험을 수행하였다. 시험결과를 정리하여 일축압축강도를 추정할 수 있는 관계식과 결정계수를 정리하면 표 4에서 표 6에 제시되어 있다. 여기서는 Cargill 등(1990)의 연구결과에 의해 점하중지수를 이용한 일축압축강도 추정 관계식에는 단위중량을 고려하지 않았으나, 슈미트해머반발치와 P파를 이용한 일축압축강도 추정 관계식을 유도하기 위해서는 단위중량을 고려하여 다양한 회귀분석을 실시하였다. 또한 기존의 연구결과(표 1에서 표 3 참조) 형태의 관계식을 참조하여 회귀분석을 실시하였다. 표 4, 표 5 및 표 6에서 일축압축강도와 점하중지수의 단위는 kg/cm^2 이고, 초음파속도(P파)의 단위는 km/sec 이다.

점하중지수에 의한 일축압축강도 관계식은 선형 관계식이 지수형 비선형관계식보다 높은 결정계수를 나타내고 있으며, 슈미트해머시험에 의한 관계식은 단위중량을 고려한 멱제곱형 비선형관계식의 결정계수가 가장 높게 나타나고 있다. 또한 초음파속도인 P파시험에 의한 관계식은 초음파속도의 지수형 비선형방정식이 가장 높은 결정계수를 나타내고 있다.

각각의 시험에 의해 구한 관계식의 결정계수를 비교한 결과 슈미트해머시험에 의한 관계식이 가장 큰 결정계수를 나타내고 있으며, 점하중시험과 초음파속도시험에 의한 관계식의 결정계수에는 큰 차이가 발생하지 않았다. 점하중시험과 슈미트해머시험에 의한 암석의 일축압축강도 추정은 신뢰성 있는

결과를 제공하고 있다고 알려져 있다(Kahraman 등, 2002). 따라서 지금까지 암석의 일축압축강도 추정에 신뢰성 있는 방법으로 알려진 점하중시험 및 슈미트해머시험과 비교하여 초음파속도를 이용하여 일축압축강도 추정 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3에는 각각의 시험방법에 의한 결정계수가 가장 높은 관계식을 이용하여 암석의 일축압축강도와 추정 관계식을 이용한 결과를 비교하였다. 그 결과 슈미트해머시험이 암석의 일축압축강도 측정값에 가장 근접한 추정 결과를 얻을 수 있었으며, 초음파속도를 이용하여도 점하중시험과 같이 일축압축강도 추정에 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있음을 제시하고 있다. 따라서 초음파속도시험을 이용하여 암석의 일축압축강도를 추정하는 방법은 현재 이용 빈도가 높은 점하중시험과 슈미트해머시험을 이용하는 방법과 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Cargill 등(1990)의 점하중시험은 넓은 강도 범위에서 신뢰성 있는 일축압축강도를 추정할 수 있고, 슈미트해머시험은 낮은 강도에서부터 중간정도의 강도 범위에서 일축압축강도를 추정할 수 있다는 연구결과와 비교하면 초음파속도의 활용도를 평가할 수 있다고 판단된다.

표 4. 흑운모화강암의 일축압축강도와 점하중지수 관계

관 계 식	a	b	결정계수(r^2)
$UCS = a I_s(50) + b$	27.8385	-100.0806	0.8209
$UCS = a e^{b I_s(50)}$	100.1015	0.0723	0.7737

표 5. 흑운모화강암의 일축압축강도와 슈미트해머 반발치 관계

관 계 식	a	b	결정계수(r^2)
$UCS = a S_h + b$	27.8778	-311.4636	0.8839
$UCS = a e^{b S_h}$	44.3588	0.0824	0.9058
$UCS = a e^{b(S_h \gamma)}$	47.4189	0.0312	0.9080
$UCS = a(\gamma S_h)^b$	0.0893	2.0013	0.9117

표 6. 흑운모화강암의 일축압축강도와 P파속도 관계

관계식	a	b	결정계수(r^2)
$UCS = a V_p + b$	316.7950	-806.6981	0.7894
$UCS = a e^{b V_p}$	6.3604	1.0664	0.8243
$UCS = a V_p^b$	2.0688	3.8947	0.8244
$UCS = a V_p^2 + b$	44.8048	-256.7343	0.8051
$UCS = a(\gamma V_p^2) + b$	17.0760	-240.1579	0.8107

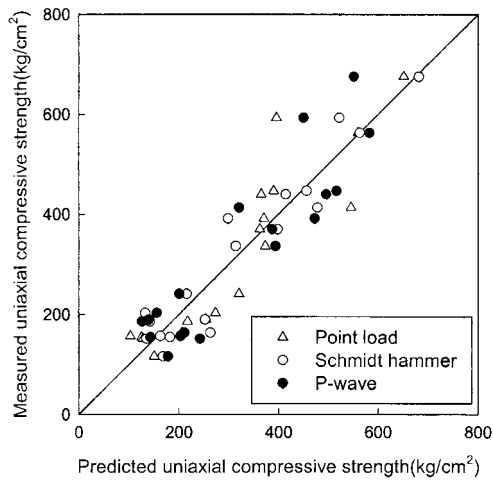


그림 3. 흑운모화강암의 일축압축강도 측정값과 추정값 비교

4.2 여수부근 암석 실험결과

초음파속도를 이용하여 암석의 일축압축강도를 추정할 수 있는 관계식을 도출하기 위하여 총 27개의 여수부근에서 채취한 화강암, 안산암, 섬록암 및 유문암을 대상으로 일축압축강도시험과 초음파속도시험 결과를 인용하였다. 실험 결과는 표 7에 제시되어 있다.

일축압축강도는 $128 \sim 3,433 \text{ kg/cm}^2$ 범위로 측정되었으며, 대부분 ISRM 일축압축강도 기준으로 경암 이상의 강도를 나타내고 있다. P파의 속도는 $1,065 \sim 5,783 \text{ m/sec}$, S파 속도는 $760 \sim 3,065 \text{ m/sec}$ 범위로 측정되고 있으며, 실험 결과 일축압축강도, P파 및 S파의 변동계수가 각각 8.36%, 2.59% 및 1.78%로 나타나고 있다. 각각의 측정값 변동계수 평균에 의하면 일축압축강도시험보다 초음파속도

시험이 좀 더 일정한 결과를 얻을 수 있어 신뢰성 있는 실험결과를 제시할 수 있음 확인할 수 있었다.

이상의 실험 결과를 이용하여 암석의 일축압축강도와 초음파속도 관계식을 구하기 위하여 기존의 연구 결과(표 3 참조)의 형태로 통계분석을 수행하였다. 그 결과는 표 8과 표 9에 제시되어 있다. P파의 경우 멱제곱 비선형 관계식의 결정계수가 가장 크게 나타나고 있으며, S파의 경우 측정값 제곱값과 관련된 선형 관계식의 결정계수가 크게 나타나고 있다. 그러나 멱제곱 비선형 관계식의 결정계수와 큰 차이가 발생하지 않고, 흑운모화강암의 경우(표 6 참조)도 멱제곱 비선형 관계식의 결정계수가 가장 크게 나타나 본 연구에서는 P파의 경우와 같이 S파에 의한 일축압축강도 추정 관계식을 멱제곱 비선형 관계식을 이용하였다. 그림 4와 그림 5에 통계분석을 실시한 관계식을 제시하였다. 미소하지만 S파의 결정계수가 더 크게 나타나 암석의 일축압축강도 추정에 있어 S파가 더 정확한 값을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 실험 결과를 이용하여 초음파속도를 이용한 일축압축강도 추정 관계식에 결정된 추정값과 실제 일축압축강도 측정값 비교를 그림 5에 제시하였다. 그림 6에 의하면 초음파속도를 이용하여 추정한 일축압축강도는 낮은 강도에서 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Cargill (1990)과 Kahraman 등(2002) 등의 연구 결과와도 일치하고 있다. 따라서 초음파속도를 이용하여 암석의 일축압축강도를 추정하는 방법은 높은 강도의 암석보다 낮은 강도에서 더 정확한 값을 얻을 수 있다고 판단된다. 또한 표 4에서 표 6을 보면 P파보다 S파가 시험값의 분산도 적어 일정한 측정값을 얻을 수 있고, 관계식의 결정계수도 커서 더 많은 상관성이 있다고 판단된다.

그림 7에 본 연구에서 수행한 여수 화성암을 대상으로 한 일축압축강도 추정 제안식과 Gökten(1988) 및 Kahraman(2001)의 연구결과와 비교하였다. Gökten은 함탄퇴적암을 대상으로 한 연구결과이며, Kahraman은 48개의 실험결과 중 43개가 퇴적암인 연구결과이다. 그림 7에 의하면 초음파속도가 클수록 퇴적암보다 화성암에서 더 큰 일축압축강도로 추정되고 있어 암석성인에 따라 그 결과 차이를 확인할 수 있다. 그리고 높은 초음파속도보다 낮은 초음파속도에서 추정한 일축압축강도 값의 편차가 적게 나타나고 있다. 따라서 초음파속도에 의한 암석

의 일축압축강도 추정에 있어 낮은 일축압축강도를 게 나타남을 확인할 수 있었다.
 갖는 암석에는 암석성인에 의한 영향이 비교적 적

표 7. 일축압축강도와 초음파속도 실험 결과

일축압축강도			P파			S파		
UCS (kg/cm ²)	표준편차 (kg/cm ²)	변동계수 (%)	P파속도 (m/sec)	표준편차 (m/sec)	변동계수 (%)	S파속도 (m/sec)	표준편차 (m/sec)	변동계수 (%)
1,790	22	1.21	4,685	7	1.51	2,435	7	0.29
520	14	2.77	2,180	170	7.78	1,350	57	4.19
2,554	36	1.41	4,365	7	0.16	2,305	7	0.31
2,220	141	6.34	4,453	162	3.64	2,347	40	1.55
1,873	33	1.75	4,693	68	1.45	2,407	12	0.48
3,256	155	4.75	4,757	55	1.16	2,583	49	1.91
2,818	42	1.51	4,697	107	2.28	2,477	42	1.68
2,981	31	1.05	5,170	96	1.87	2,673	31	1.14
3,107	12	0.38	5,107	6	0.11	2,603	38	1.45
2,356	87	3.67	4,645	7	0.15	2,515	7	0.28
3,212	288	8.98	5,310	125	2.35	2,700	46	1.69
3,042	123	4.03	5,063	265	5.23	2730	20	0.73
955	65	6.79	2,720	14	0.52	1,660	42	2.56
2,859	22	0.76	5,013	105	2.09	2,620	35	1.32
128	7	5.61	1,065	35	3.32	760	57	7.44
1,438	115	8.02	3,190	170	5.53	1,920	85	4.42
2,767	77	2.79	4,647	49	1.06	2,600	35	1.33
1,795	221	12.33	4,837	151	3.13	2,563	21	0.81
897	101	11.27	4,027	125	3.11	2,207	15	0.69
1,591	115	7.22	4,537	127	2.79	2,380	34.64	1.46
2,114	1090	51.55	4,793	508	10.60	2,523	153	6.07
2,872	463	16.11	5,700	60	1.05	2,933	15	0.52
2,865	576	20.11	5,948	16	1.11	3,065	10	0.33
2,876	462	16.07	5,440	227	4.18	2,850	50	1.75
2,699	368	13.64	5,657	131	2.31	2,817	15	0.54
3,433	291	8.49	5,783	40	0.69	2,930	-	-
3,154	222	7.03	5,590	44	0.78	2,877	40	1.40
평 균		8.36	평 균		2.59	평 균		1.78

표 8. 일축압축강도와 P파속도 관계

관계식	a	b	결정계수(r^2)
$UCS = a V_p + b$	694.7488	-889.8844	0.7588
$UCS = a e^{b V_p}$	421.9440	0.3568	0.7269
$UCS = a V_p^b$	2000.5285	1.5837	0.7610
$UCS = a V_p^2 + b$	91.2782	263.1902	0.7506
$UCS = a(\gamma V_p^2) + b$	32.2262	374.0715	0.7367

표 9. 일축압축강도와 S파속도 관계

관계식	a	b	결정계수(r^2)
$UCS = a V_s + b$	1553.9900	-1486.1912	0.7666
$UCS = a e^{b V_s}$	288.0687	0.8270	0.7469
$UCS = a V_s^b$	372.6334	2.0014	0.7765
$UCS = a V_s^2 + b$	385.3283	-83.4202	0.7773
$UCS = a(\gamma V_s^2) + b$	139.3086	65.1552	0.7640

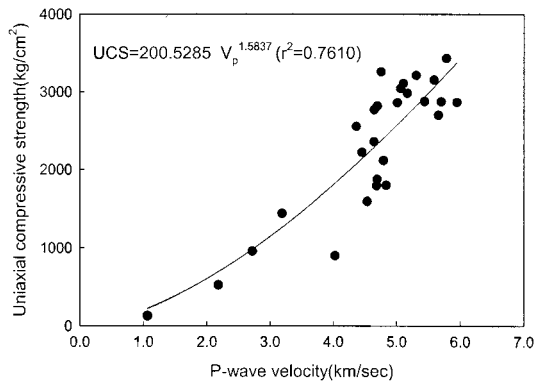


그림 4. 일축압축강도와 P파속도 관계

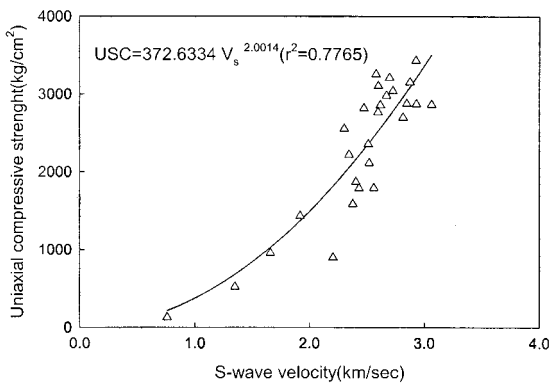


그림 5. 일축압축강도와 S파속도 관계

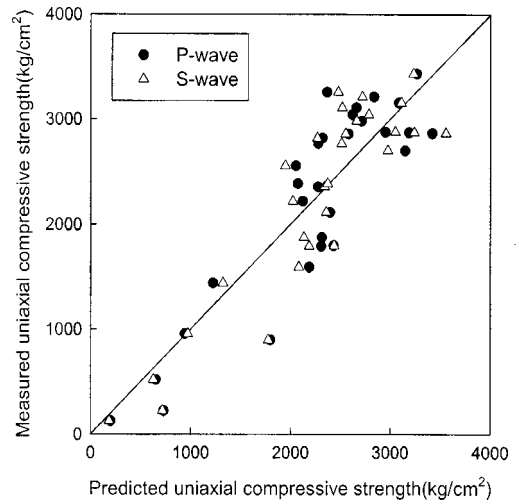


그림 6. 일축압축강도의 측정값과 초음파속도에 의한 추정값 비교

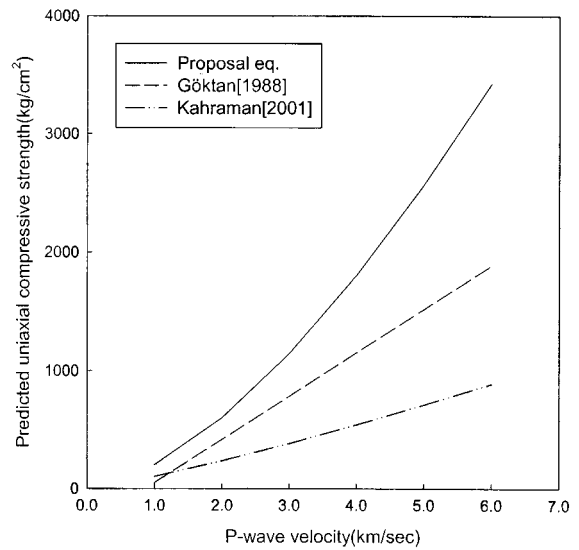


그림 7. 기존의 연구결과와의 비교

5. 결론

초음파속도를 이용하여 암석의 일축압축강도를 추정하기 위해 흑운모화강암을 대상으로 그 가능성을 평가하고, 여수부근의 화성암을 대상으로 일축압축강도와 초음파속도 시험을 수행하여 일축압축강도를 추정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 흑운모화강암을 대상으로 점하중시험, 슈미트해머시험 및 초음파속도시험을 수행하여

통계분석을 실시한 결과 초음파속도를 이용한 방법도 암석의 일축압축강도 추정에 신뢰성 있는 결과를 제공하고 있다.

(2) 여수부근의 화성암에서 실험값의 변동계수에 의하면 일축압축강도보다 초음파속도시험이 더 일정한 실험 결과를 얻을 수 있으며, 일축압축강도와 초음파속도 관계는 멱제곱형 비선형관계식이 높은 상관성을 나타내고 있다.

(3) 초음파속도를 이용하여 일축압축강도를 추정하는 방법은 높은 일축압축강도보다는 낮은 일축압축강도의 암석에서 더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

(4) 또한 초음파속도에 의한 일축압축강도 추정에 있어 낮은 일축압축강도의 암석에서는

암석의 성인에 의한 영향이 적게 나타남을 확인하였다.

향후 좀 더 다양한 암석을 대상으로 보완실험을 수행하고 많은 실험 자료를 이용하면 초음파속도를 이용한 암석의 일축압축강도 추정에 신뢰성 있는 결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2003학년도 안동대학교 국제학술교류 보조금 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

(접수일자 : 2006년 1월 31일)

참고문헌

1. American Society for Testing and Materials(1984), Standard Test Method for Unconfined compressive Strength of Intact Rock Core Specimens, Soil and Rock, Building Stones : Annual Book of ASTM Standards 4.08. Philadelphia, Pennsylvania.
2. Bieniawski Z. T.(1975), Point Load Test in Geotechnical Practice. Eng. Geol. Vol. 9, No. 1, pp. 1~11.
3. Broch E., Franklin J. A.(1972), Point-load Strength Test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9, No. 6, pp. 669~697.
4. Cargill J. S. Shakoor A.(1990), Evaluation of Empirical Methods for Measuring the Uniaxial Compressive Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 27, pp. 495~503.
5. Chau K. T. Wong r. H. C.(1996), Uniaxial Compressive Strength and Point Load Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 33, pp. 183~188.
6. D'Andrea D. V, Fisher R. L., Fogelson D. E.(1964), Prediction of Compression Strength from Other Rock Properties. Colo Sci Mines Q. Vol. 59, No. 4B, pp. 623~640.
7. Deer D. U., Miller R. P.(1966), Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. Air Force Weapons Lab. Tech. Report, AFWL-TR 65-116, Kirtland Base, New Mexico.
8. Forster I. R.(1983), The Influence of Core Sample Geometry on the Axial Point-load Test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci, Vol. 20, pp. 291~295.
9. Göktan R. M.(1988), Theoretical and Practical Analysis of Rock Rippability. Ph. D. Tehsis, Istanbul Technical University.
10. Grasso P. Xu S, Mahtab A.(1992), Problems and Promises of Index Testing of Rocks. In : Tillerson, Wawersik, editors. Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, ISBN 9094100451, pp. 879~888.
11. Gunsallus K. L., Kulhwy F. H.(1984), A Comparative Evaluation of Rock Strength Measures. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 21, pp.233~248.
12. Haramy K. Y. DeMarco M. J.(1985), Use of the Schmidt Hammer for Rock and Coal Testing. In : Aswath J. B., Eileen W., editors. 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, pp. 549~555.
13. Hassani F. P. Scoble M. J. Whittaker B. N.(1980), Application of Point Load Index Test to Strength Determination

- of Rock and Proposals for New Size-correction Chart. In : Proceedings of the 21st US Symposium on Rock Mechanics, Rolla, pp. 543~564.
14. Inoue M. Ohomi M.(1981), Relation Between Uniaxial Compressive Strength and Elastic Wave Velocity of Soft Rock. In : Akai K., Mayashi M. Nishimatsu Y. editors. Proceedings of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo, pp. 9~13.
 15. ISRM(1981), Suggested Methods., Determining Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. In : Brown ET, editor, Rock Characterisation Testing and Monitoring, Oxford : Pergamon Press, pp. 111~119.
 16. ISRM Suggested Methods(1985), Suggested Method for Determining Point-load Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci, Vol. 22, pp. 53~60.
 17. ISRM Suggested Methods(1981), Suggested Method for Determining of the Schmidt Rebound Hardness. In : Brown ET, editor, Rock Characterisation Testing and Monitoring, Oxford : Pergamon Press, pp. 101~102.
 18. Kahraman S.(2001), Evaluation of Simple Methods for Assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock. Int. J. Rock Mech. Sci., Vol. 38, pp. 981~994.
 19. Kidybinski A.(1968), Rebound Number and the Quality of Mine Roof Strata. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 5, pp. 283~292.
 20. Read J. R. L., Thornter P. N., Regan W. M.(1980), A Rational Approach to the Point Load Test. In : Proceedings Aust- N.Z. Geomechanics, Vol. 2, pp. 35~39.
 21. Sheorey O. R., Barat D., Das M. N., Mukherjee K. P., Singh B.(1984), Schmidt Hammer Rebound Data for Estimation of Large Scale in Situ Coal Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 21, pp. 39~42.