

## 초음파속도를 이용한 암석의 일축압축강도와 탄성계수 예측

# Predicting the Uniaxial Compressive Strength and Young's Modulus of Rocks using Ultrasonic Velocity

최길현<sup>1)</sup> · 백승철<sup>†</sup>

Gilhyun Choi · Seungcheol Baek

Received: November 7<sup>th</sup>, 2013; Revised: November 15<sup>th</sup>, 2013; Accepted: December 26<sup>th</sup>, 2013

**ABSTRACT** : The uniaxial compressive strength and Young's modulus of intact rocks are the most important analytical parameters for design of rock mass structures. But the preparation of the samples for uniaxial compressive test is a hard and time consuming task. By using ultrasonic test, engineers can predict the analytical parameters that is the uniaxial compressive strength and Young's modulus. The uniaxial compressive test and ultrasonic test were carried out 115 samples of igneous rocks, 74 samples of metamorphic rocks and 55 samples of sedimentary rocks and, after regression analysis of the test results, best fit equations for predicting the uniaxial compressive strength and Young's modulus are proposed. In order to obtain a better correlations coefficient between uniaxial compressive strength and P-wave velocity, the P-wave velocity were multiplied by density values. The proposed equations for predicting uniaxial compressive strength and Young's modulus using ultrasonic test provide reliable results.

**Keywords** : Ultrasonic velocity, Rock, Uniaxial compressive strength, Young's modulus

**요지** : 암석의 일축압축강도와 탄성계수는 암반구조물의 설계에 있어 매우 중요한 해석 변수이다. 그러나 일축압축시험은 시험시편 준비가 어렵고 시간이 오래 걸린다. 그래서 기술자들은 해석변수를 예측하기 위해 초음파속도시험과 같은 실험을 이용한다. 본 연구를 위해 115개의 화성암, 74개의 변성암, 55개의 퇴적암을 대상으로 일축압축시험과 초음파시험을 수행하고 회귀분석하여 일축압축강도와 탄성계수의 관계식을 구하였다. 일축압축강도와 P파속도의 더 좋은 상관성을 구하기 위해 P파속도에 단위중량을 곱한 값을 이용하였다. 초음파속도를 이용하여 일축압축강도와 탄성계수를 구하는 관계식은 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다.

**주요어** : 초음파속도, 암석, 일축압축강도, 탄성계수

## 1. 서 론

암석의 일축압축강도시험은 지반구조물의 해석에 이용되는 변수를 결정하기 위해 가장 널리 사용되는 실내실험 방법이다. 지반구조물의 설계 및 시공에 있어 암반의 특성과 기본적인 해석변수를 얻기 위해 수행되는 시험이며, ASTM(1995)과 ISRM(1981)에서 시험법을 표준화하여 제안하고 있다. 그러나 정밀한 암석시편의 준비가 필요하며, 시편의 크기와 형상에 대한 의존도가 높아 실험을 수행하는 것이 쉽지 않고 시간이 소비되는 단점이 있다.

초음파속도시험은 시편의 내부구조 변화 없이 필요한 결과를 얻을 수 있으며, 상대적으로 적은 경비가 들어 암석의 일축압축강도를 추정하는데 이용되고 있다. 또한 이 시험법은 암석의 일축압축강도 시험보다 간단하고 빠른 장점이 있다. 그러나 초음파속도 측정은 암석의 형태, 광물의

구성, 암석의 조직 및 구조, 입자 크기와 형태, 단위중량, 공극율, 이방성, 간극, 구속압력, 온도, 풍화와 변질 정도, 층리면, 절리의 성질 등에 의해 영향을 받을 수 있다(Yasar & Erdogan, 2004).

초음파속도에 의한 암석의 일축압축강도 추정은 점하중 시험, 슈미트해머시험 등과 함께 간단한 실험에 의해 가능하고, 일축압축시험의 불편한 점을 해소할 수 있어 그 활용도를 높이는 다양한 연구가 진행되고 있다. 또한 초음파속도 시험방법은 시편형성의 준비가 편리하며, 시험장비의 운영도 복잡하지 않고, 상대적으로 간편하고 경제적으로 알려져 있다(Baek et al., 2006).

따라서 본 논문에서는 암석의 일축압축강도를 추정하기 위하여 초음파속도를 이용하는 방안을 연구하였다. 이를 위해 115개의 화성암, 74개의 변성암, 55개의 퇴적암을 대상으로 암석의 단위중량, 일축압축강도, 탄성계수, P파속도

1) Department of Civil Engineering, Kyungbuk College

† Department of Civil Engineering, Andong National University (Corresponding Author : civilb@anu.ac.kr)

를 측정하여 통계처리에 의한 초음파속도의 활용방안을 분석하였다. 즉 P파속도를 이용하여 암석의 성인별 일축압축강도와 탄성계수의 상관관계를 분석하여 관계식을 제안하였다.

## 2. 암석의 일축압축강도 추정을 위한 경험식

초음파속도 측정시험은 암석시편의 내부구조 변화 없이 시편의 초음파 전달시간을 측정하는 비파괴시험이며, 다른 시험과 비교하여 상대적으로 쉽게 이용할 수 있는 장점이 있다. 실내시험에서는 초음파 발진장치를 사용하여 시편을 통과하는 초음파의 속도를 측정하고 이를 고유물성으로써 활용하거나 관계식을 이용하여 동탄성계수를 결정한다. 또한 일축압축강도 및 탄성계수와 같은 다른 특성값 추정에 이용되기도 한다. P파의 경우는 암반 등급분류나 암시편의 내압강도를 추정하는데에도 이용되고 있다.

지금까지 일축압축강도와 초음파속도 관계식을 규명한 실험적인 연구가 다양하게 진행되어 왔다. Inoue & Ohomi (1981)는 연암을 대상으로 일축압축강도와 P파속도, 단위중량의 관계를 규명하여 Eq. (1)의 관계식을 제안하였다.

$$UCS = k\gamma V_p^2 + A \quad (1)$$

여기서 UCS는 일축압축강도(kg/cm<sup>2</sup>),  $\gamma$ 는 암석의 단위중량(g/cm<sup>3</sup>),  $V_p$ 는 P파 속도(km/sec) 이다.

Kahraman(2001)은 27개의 여러 종류의 암석을 대상으로 Eq. (2)와 같은 비선형 관계식을 제안하였다.

$$UCS = 9.95 V_p^{1.21} (r^2 = 0.83) \quad (2)$$

여기서 UCS는 일축압축강도(Mpa),  $V_p$ 는 P파속도이다

(km/sec).

Yasar & Erdogan(2004)는 터키 앙커라 주변의 탄산염 암석 13개 시편을 대상으로 일축압축시험과 초음파시험을 수행하여 P파를 활용한 수학적 선형관계를 규명하였다. 일축압축강도와 탄성계수를 평가할 수 있도록 관계식을 Eq. (3)과 Eq. (4)와 같이 제안하였다.

$$V_p = 0.0317 UCS + 2.0195 \quad (3)$$

$$V_p = 0.093 E_s + 1.7528 \quad (4)$$

여기서  $V_p$ 는 P파속도(km/sec), UCS는 일축압축강도(kg/cm<sup>2</sup>),  $E_s$ 는 탄성계수(GPa)이다.

Chary et al.(2006)은 남인도의 갈탄 광산에 채취한 일축압축강도가 큰 사암, 혈암질과 석탄질이 함유된 중간 정도의 일축압축강도를 갖는 사암을 대상으로 일축압축강도와 P파속도를 측정하여 Eq. (5)와 Eq. (6)과 같은 관계식을 제안하였다.

$$UCS = 0.1564 V_p - 692.41 (r^2 = 0.8018) \quad (5)$$

$$UCS = 0.0144 V_p - 24.856 (r^2 = 0.5099) \quad (6)$$

여기서  $V_p$ 는 P파속도(m/sec), UCS는 일축압축강도(MPa)이다.

Sharma & Singh(2008)은 17개의 사암, 4개의 현무암, 8개의 천매암, 4개의 운모편암, 5개의 석탄, 10개의 혈암을 이용하여 일축압축강도와 P파속도를 측정하여 Eq. (7)과 같은 관계식을 제안하였다.

$$UCS = 0.0642 V_p - 117.99 (r^2 = 0.9022) \quad (7)$$

Table 1. Proposed equations for predicting uniaxial compressive strength

Parameters	Equations	a	b	$r^2$
UCS, $V_p$	$UCS = a \exp[b/V_p]$	165.05	-4,451.07	0.70
UCS, $V_p$ , $\gamma$	$UCS = a \exp[b/(\gamma V_p)]$	142.47	-9,560.57	0.77
UCS, $E_d$	$UCS = a E_d / (b + E_d)$	122.11	39.37	0.77

Table 2. Proposed equations for predicting static young's modulus

Parameters	Equations	a	b	$r^2$
$E_s, V_p$	$E_s = a V_p^b$	2.06	2.78	0.92
$E_s, E_d$	$E_s = a E_d^b$	0.25	1.29	0.92

여기서 UCS는 일축압축강도(Mpa),  $V_p$ 는 P파속도이다(m/sec)이다.

Moradian & Behnia(2009)는 이란의 댐 현장에서 채취한 44개의 석회암을 대상으로 일축압축강도와 탄성계수와 P파속도의 관계식을 Table 1과 Table 2와 같이 제안하였다.

이상의 기존 연구결과는 암석의 일축압축강도와 P파속도의 관계를 선형 또는 비선형 회귀식을 이용하여 상관관계를 규명하였으며, Inoue & Ohomi(1981)와 Moradian & Behnia(2009)는 암석의 단위중량과 P파속도를 함께 고려하여 상관관계를 규명하였다. 따라서 본 연구에서는 P파속도를 이용하여 암석의 일축압축강도와 탄성계수를 구하기 위해 선형회귀와 비선형회귀 분석을 수행하였으며, P파속도와 단위중량을 곱한 값을 이용하는 방법도 이용하였다.

### 3. 시험시편 및 실험방법

#### 3.1 시험시편

본 연구의 목적인 초음파속도와 일축압축강도 및 탄성계수 관계를 규명하기 위해 115개의 화성암, 74개의 변성암, 55개의 퇴적암을 대상으로 암석의 단위중량, 일축압축강도, 탄성계수, P파속도를 측정하였다. 화성암은 화강암, 반상편마상화강암, 복운모화강암, 흑운모화강암, 안산암, 현무암, 석영반암이 연구에 이용되었다. 또한 변성암은 편마암, 규암, 호상흑운모편마암, 흑운모편마암, 우백질편마암, 안구상편마암, 점판암, 화강편마암이고, 퇴적암은 사암, 셰일, 석회

암, 응회암 등이 연구에 이용되었다.

각각의 암석 시편을 대상으로 P파속도, 단위중량, 일축압축강도, 탄성계수를 측정하여 P파와 일축압축강도, P파와 탄성계수 관계를 규명하기 위해 선형 및 비선형 회귀식을 이용하여 분석하였다.

암석의 일축압축강도 시험은 ISRM(1981)의 규정에 적합하게 암석시편을 제작하여 수행하였다. 암석 시편은 NX 코어(지름 약 54 mm) 크기로 직경비가 2.5 정도, 편평도는 0.02 mm 이내, 수직도 0.001 radian이 되도록 제작하였다.

초음파속도 측정 시험은 시험편을 초음파가 통과하는데 소요된 시간을 측정하여 P파의 전파속도를 측정하는 비파괴시험이며, 시편은 일축압축강도에 사용된 시편을 사용하였다. 초음파속도만을 측정할 때는 시편의 길이는 5.0~10.0 cm, 최소 단면적을 0.5 cm<sup>2</sup> 이상으로 하고 시편 양쪽 끝 면은 서로 평행하며, 측정 축과 직각으로 되도록 제작하여야 한다. 시편의 형태는 원주형이 아니어도 되나, 본 연구에서는 NX코어 시추코어를 이용하였다. 시험방법은 시험편의 말단에 발진기를, 다른 한쪽에는 수신기를 접촉시킨 다음 5 kPa 이하의 압력을 가하면서 발진기의 펄스(pulse)를 발생시켜 초음파가 시험편을 통과하는데 걸린 시간을 측정한 후 시험편의 길이로 나누어 초음파속도를 계산하였다.

### 4. 일축압축강도와 탄성계수 관계식

P파속도를 측정하여 암석의 일축압축강도와 탄성계수를 구하기 위해 115개의 화성암, 74개의 변성암, 55개의 퇴적암을 대상으로 암석의 단위중량, 일축압축강도, 탄성계수, P파

Table 3. The Statistical analysis of the test results

Parameters		Density (kN/m <sup>3</sup> )	Vp (m/sec)	UCS (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Igneous rock	Sample number	115	115	115	115
	Max. value	27.55	5,247	143.29	15.86
	Min. value	23.57	1,455	23.83	4.48
	Average	26.01	3,569	83.45	10.22
	Standard deviation	0.74	935.69	29.13	2.74
Metamorphic rock	Sample number	74	74	74	74
	Max. value	28.32	4,885	130.53	14.73
	Min. value	25.10	1,658	39.60	4.16
	Average	26.71	3,247	87.38	10.31
	Standard deviation	0.50	878.75	24.40	2.61
Sedimentary rock	Sample number	55	55	55	55
	Max. value	28.40	5,048	134.45	15.02
	Min. value	21.54	2,235	31.79	5.34
	Average	25.50	3,432	67.67	8.66
	Standard deviation	1.68	709.2	23.63	2.15

속도를 측정하였으며, 그 결과를 통계분석한 것은 Table 3 과 같다. 단위중량은 21.54~28.40 kN/m<sup>3</sup>, P파속은 1,455~5,247 m/sec, 일축압축강도는 23.83~143.29 MPa, 탄성계수는 4.16~15.86 GPa 범위로 측정되었다. 통계분석 결과를 보면 단위중량의 경우 퇴적암의 표준편차가 크게 나타났으며, 일축압축강도, 탄성계수, P파속도 등의 실험 결과는 화성암에서 표준편차가 크게 나타났다. 화성암이 일축압축강도와 탄성계수 값이 크므로 P파속도가 크게 측정되어 표준편차도 크게 나타난 것으로 판단된다.

본 연구에서 P파속도를 이용하여 암석의 일축압축강도와 탄성계수를 추정하기 위한 관계식을 구하기 위해 암석의 성인별로 선형 및 비선형회귀식을 이용하여 상관관계식을 구하였다. 암석의 성인별로 구별하여 회귀분석을 수행한 이유는 초음파속도가 암석의 형태, 광물의 구성, 암석의 조직 및 구조, 입자 크기와 형태 등에 의해 영향을 받기 때문에 이에 대한 영향을 감소시키기 위해서다. 회귀분석한 결과는 Table 4와 Table 5와 같다. Table 4는 P파속도와 일축압축강도와의 회귀분석 결과이며, Table 5는 P파속도와 탄성계수 관계를 회귀분석한 결과이다.

분석에 이용된 회귀분석은 P파속도를 독립변수로 하는

선형회귀 분석, P파속도와 단위중량을 곱한 값을 독립변수로 하는 선형회귀 분석 및 P파속도를 독립변수로 하는 비선형회귀 분석을 수행하였다.

P파속도와 일축압축강도의 회귀분석 결과 화성암, 변성암, 퇴적암에서 P파속도만 이용할 경우 선형회귀분석보다 비선형회귀분석의 경우가 결정계수 값이 크게 나타났다. 그러나 P파속도와 단위중량을 곱한 결과를 이용하여 선형회귀분석한 결과 결정계수 값이 퇴적암, 화성암, 변성암 순으로 점차 크게 증가함을 확인하였다. 즉 P파속도만을 이용하여 암석의 일축압축강도를 추정하는 것보다는 P파와 단위중량을 함께 고려하는 것이 더 상관성이 높은 관계식을 제안할 수 있었다. 이러한 상관성은 Kahraman(2001), Chary et al.(2006), Moradian & Behnia(2009)의 연구결과와 유사하게 나타났다.

P파속도와 암석의 탄성계수의 회귀분석은 P파만 이용할 경우 변성암, 화성암, 퇴적암 순으로 큰 상관성을 나타냈으나, P파와 단위중량을 함께 고려한 경우 화성암, 변성암, 퇴적암 순으로 상관성이 높게 나타났다. 또한 단위중량을 함께 고려함으로써 더 상관성이 높은 관계식을 구할 수 있었다. 이러한 결과는 단위중량이 암석의 강도특성에 영향을

Table 4. Results of predicting equations for uniaxial compressive strength

Parameters		Equations	a	b	r <sup>2</sup>
UCS (MPa), Vp (m/sec)	Igneous rock	$UCS = b + aV_p$	0.0273	-13.8483	0.7665
		$UCS = aV_p^b$	0.0045	1.1989	0.7695
		$UCS = b + a(V_p \gamma)$	0.0011	-14.4323	0.8044
	Metamorphic rock	$UCS = b + aV_p$	9.0060	0.0241	0.7555
		$UCS = aV_p^b$	0.0678	0.8862	0.7558
		$UCS = b + a(V_p \gamma)$	0.0009	10.3946	0.7583
	Sedimentary rock	$UCS = b + aV_p$	0.0252	-18.7287	0.5707
		$UCS = aV_p^b$	0.0017	1.2900	0.5772
		$UCS = b + a(V_p \gamma)$	0.0010	-16.0315	0.7309

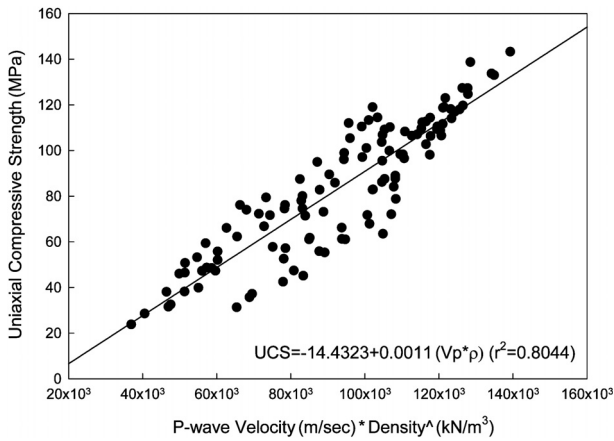
Table 5. Results of predicting equations for Young's modulus

Parameters		Equations	a	b	r <sup>2</sup>
E (GPa), Vp (m/sec)	Igneous rock	$E = b + aV_p$	0.0026	1.0790	0.7655
		$E = aV_p^b$	0.0068	0.8944	0.7636
		$E = b + a(V_p \gamma)$	0.0001	1.0376	0.8010
	Metamorphic rock	$E = b + aV_p$	0.0026	1.7902	0.7779
		$E = aV_p^b$	0.0155	0.8050	0.7820
		$E = b + a(V_p \gamma)$	0.0001	1.9597	0.7773
	Sedimentary rock	$E = b + aV_p$	0.0022	0.9608	0.5495
		$E = aV_p^b$	0.0052	0.9117	0.5462
		$E = b + a(V_p \gamma)$	0.0001	1.3591	0.6743

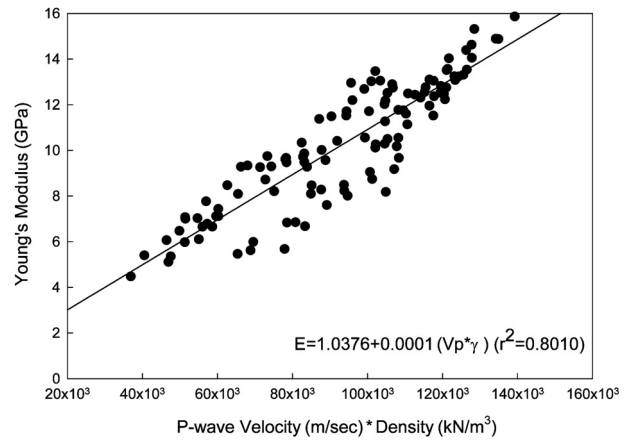
주고 있음을 확인하는 결과라고 판단된다. Fig. 1과 Fig. 2는 각각의 분석에 의해 상관성이 높게 나타난 P파속도와 단위중량을 곱한 값과 일축압축강도 및 탄성계수의 상관성을 나타낸 것이다.

이상의 실험 결과를 이용하여 P파속도를 이용한 일축압축강도와 탄성계수 추정 관계식에 의해 계산된 값과 실제 일축압축강도와 탄성계수 측정값 비교를 Fig. 3과 Fig. 4에

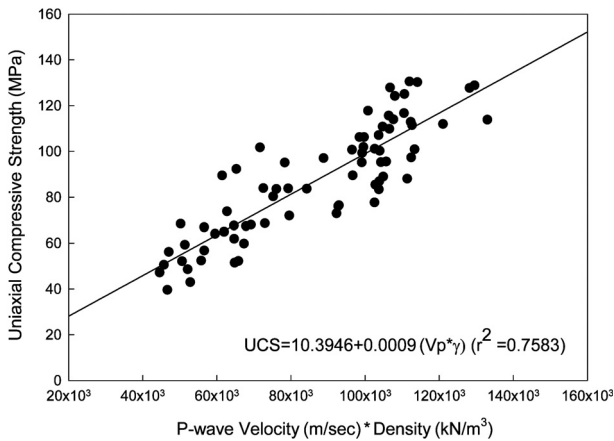
제시하였다. 일축압축강도의 경우 80 MPa 이하에서는 추정식 값이 약간 크게 나타났으며, 100 MPa 이상에서는 추정식 값이 약간 작게 나타나고 있다. 또한 탄성계수의 경우 10 GPa 이하에서는 대체적으로 추정식 값이 크게 나타나고 있으며, 10 GPa 이상에서는 추정식 값이 약간 작게 나타나고 있다.



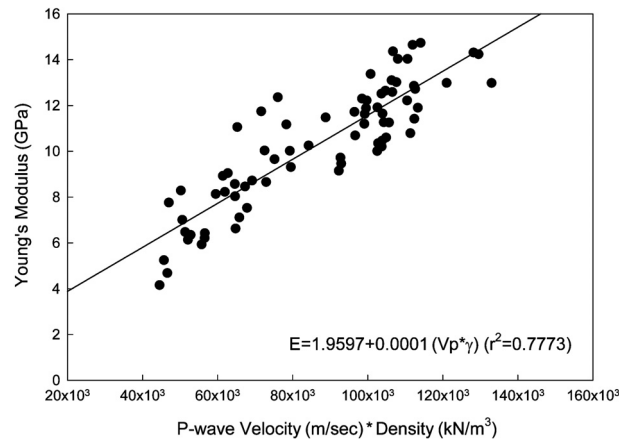
(a) Igneous rock



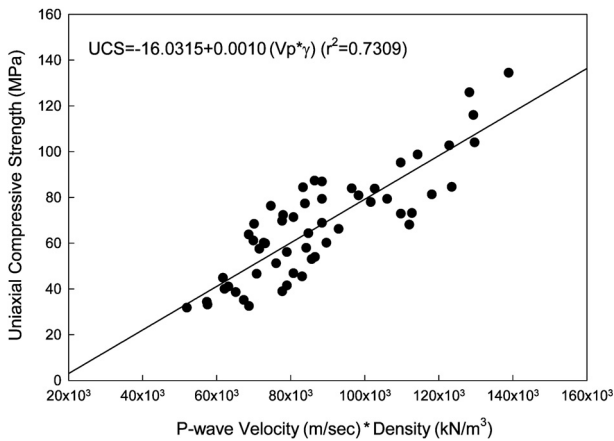
(a) Igneous rock



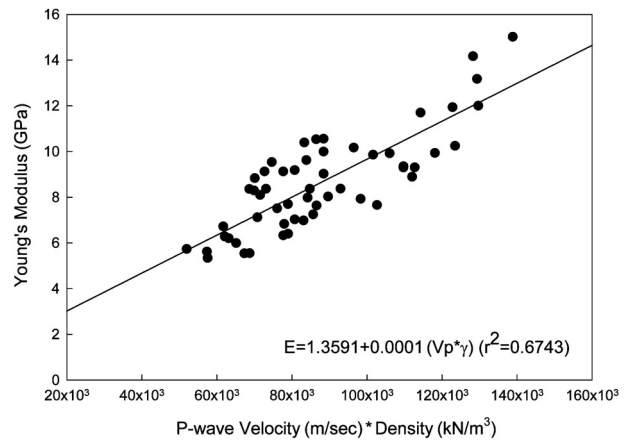
(b) Metamorphic rock



(b) Metamorphic rock



(c) Sedimentary rock



(c) Sedimentary rock

Fig. 1. P-wave velocity versus uniaxial compressive strength

Fig. 2. P-wave velocity versus Young's modulus

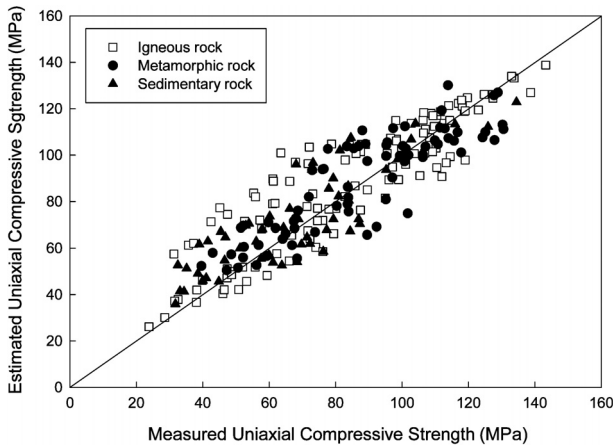


Fig. 3. Measured uniaxial compressive strength versus estimated uniaxial compressive strength

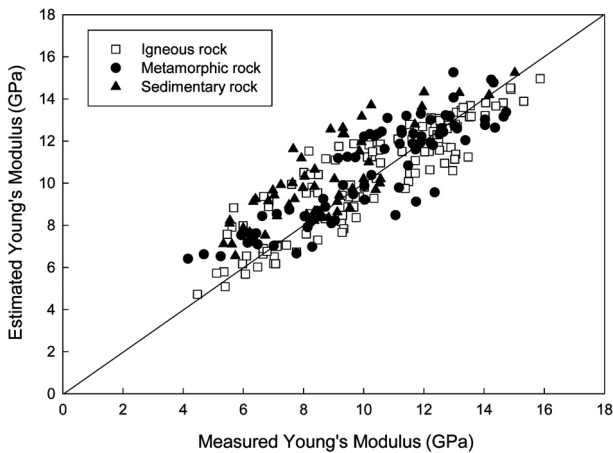


Fig. 4. Measured Young's modulus versus estimated Young's modulus

## 5. 결 론

초음파속도를 이용하여 암석의 일축압축강도와 탄성계수를 추정하기 위해 화성암, 변성암, 퇴적암을 대상으로 단위중량, P파속도, 일축압축강도, 탄성계수 값을 구하였다. 각각의 실험결과를 이용하여 암석의 성인별 P파속도와 일축압축강도 및 탄성계수와의 상관성을 분석하였으며, P파속도를 이용하여 일축압축강도와 탄성계수 관계식을 제안하였다.

초음파속도인 P파속도를 이용하여 일축압축강도, 탄성계수의 관계식을 구한 결과 P파속도와 단위중량을 곱한 값을 이용하는 것이 상관성이 높은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 비선형회귀분석이 더 큰 결정계수 값을 나타내고 있으나, P파속도와 단위중량을 함께 고려하면 선형회귀분석이 더 상관성을 얻을 수 있었다.

암석의 성인별 P파속도와 단위중량을 곱한 값을 이용하여 일축압축강도와 탄성계수를 실측값과 예측값의 관계를

분석한 결과 대체적으로 추정값이 실측값보다 약간 크게 나타나고 있었다. 앞으로 정확한 암석의 실험결과를 이용하여 다양한 분석을 수행하면 초음파속도를 이용한 암석의 일축압축강도 추정에 있어 신뢰성 있는 결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 2010학년도 안동대학교 학술교류보조금 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## References

1. American Society for Testing and Materials (1995), Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens, Designation : D 2938 - 95, American Society for Testing Materials 100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428, pp. 1~3.
2. Baek, S. C., Kim, Y. T., Kim, H. T., Yoon, J. S. and Lee, Y. G. (2006), Evaluation of rock uniaxial compressive strength using ultrasonic velocity, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 7, No. 2, pp. 33~42 (in Korean).
3. Chary, K. B., Sarma, L. P., Prasanna Lakshmi, K. J., Vijayakumar, N. A., Naga lakshmi, V. and Rao, M. V. M. S. (2006), Evaluation of engineering properties of rock using ultrasonic pulse velocity and uniaxial compressive strength, Proceedings of National Seminar on Non-Destructive Evaluation, Indian Society for Non-Destructive Testing Hyderabad Chapter, Hyderabad, pp. 379~385.
4. Inoue M. and 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.
5. ISRM (1981), Suggested Methods., Determining uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, In : Brown ET, Editor, Rock Characterization Testing and Monitoring, Oxford : Pergamon Press, pp. 111~119.
6. 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, No. 7, pp. 981~984.
7. Moradian, Z. A. and Behnia, M. (2009), Predicting the uniaxial compressive strength and static Young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test. International Journal of Geomechanic, Vol. 9, No. 1, pp. 14~19.
8. Sharma, P. K. and Singh, T. N. (2008), A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 68, No. 1, pp. 17~22.
9. Yasar, E. and Erdogan, Y. (2004), Correlating sound velocity with the density, compressive strength and young's modulus of carbonate rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, No. 5, pp. 871~875.