

사운드에너지 기반 화강편마암의 비파괴 압축강도 산정

Assessment of Compressive Strength of Granitic Gneiss Using Nondestructive Testing based on Sound Energy

손 무 락[†] · 김 무 준¹⁾

Moorak Son · Moojun Kim

Received: June 15th, 2018; Revised: June 22nd, 2018; Accepted: July 25th, 2018

ABSTRACT : This study provides a method to assess the compressive strength of granitic gneiss using total sound signal energy, which is calculated from the signal of sound pressure measured when an object impacts on rock surface, and its results. For this purpose, many test specimens of granitic gneiss were prepared. Each specimen was impacted using a devised device (impacting a specimen by an initial rotating free falling and following repetitive rebound actions) and all sound pressures were measured as a signal over time. The sound signal was accumulated over time (called total sound signal energy) for each specimen of granitic gneiss and it was compared with the directly measured compressive strength of the specimen. The comparison showed that the total sound signal energy was directly proportional to the measured compressive strength, and with this result the compressive strength of granitic gneiss can be reliably assessed by an estimation equation of total sound signal energy. Furthermore, from the study results it is clearly believed that the compressive strength of other rocks and concrete can be assessed nondestructively using the total sound signal energy.

Keywords : Granitic gneiss, NDT, Compressive strength, Total sound signal energy

요 지 : 본 연구는 암석표면 타격 시 발생하는 사운드압력에 대한 응답신호를 모두 측정하고 이를 누적한 전체 사운드 신호에너지를 이용하여 화강편마암의 압축강도를 비파괴적으로 산정하는 방법과 그 결과를 제시하는 것이다. 이를 위해서 다수의 화강편마암 암석시편을 준비하였고 각 시편에 대하여 고안된 타격장치(회전 자유낙하에 의한 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반복타격 가능 장치)를 이용하여 타격하고 타격 시 발생한 모든 사운드압력을 시간에 따른 신호로서 측정하였다. 암석시편별 측정된 사운드 신호를 모두 누적하고 그 값(전체 사운드 신호에너지라 명명함)을 암석시편별 직접 측정된 압축강도와 상호 비교하였다. 비교결과, 화강편마암의 각 시편에 대해서 타격을 통해 얻어진 전체 사운드 신호에너지는 해당 시편의 직접압축강도와 직접적인 비례관계가 있다는 것을 확인하였으며, 또한 전체 사운드 신호에너지를 이용한 강도예측식을 이용하여 화강편마암의 압축강도를 90% 이상 신뢰성 있게 예측할 수 있음을 파악하였다. 더 나아가 본 연구결과를 통해 향후 다양한 암석 및 콘크리트 등의 압축강도는 전체 사운드 신호에너지를 이용하여 비파괴적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 화강편마암, 비파괴시험, 압축강도, 전체 사운드 신호에너지

1. 서 론

암석의 압축강도는 지반에 접해서 설치되는 구조물 및 시설물의 설계 및 안전에 매우 중요한 요소로서 작용한다. 따라서 보다 정확한 압축강도의 산정을 위해서 암석시편을 직접적으로 파괴시켜 강도를 측정하는 직접 압축강도 측정법이 있으나 현장에서의 시편 채취, 공시체 준비 및 시험과정 등의 번거로움과 불편함 등의 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제점을 줄이기 위해서 시편의 파괴 없이 암석의 압축강도를 측정하는 다양한 비파괴검사법(NDT,

Non-Destructive Testing)이 개발되어 사용되어 지고 있다. 비파괴검사법은 강도측정이 보다 용이하고 제한된 시간과 비용을 가지고서 보다 많은 수의 강도측정을 할 수 있는 등의 여러 가지 장점을 내포하고 있다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 비파괴 강도측정법은 표면 타격법과 초음파법으로 스위스 Proceq사와 미국 NDT James Instruments사의 제품들이 많이 사용되고 있다. 표면 타격법은 슈미트 해머법(ASTM C805-13, 2013)이라고도 불리는 반발경도법으로서 측정대상물에 손상을 주지 않으면서 강도를 추정할 수 있는 방법으로 콘크리트를 비롯하여 다양한 재료에 널리 사용되

† Department of Civil Engineering, Daegu University (Corresponding Author : mson@daegu.ac.kr)

1) Department of Civil Engineering, Daegu University

어 지고 있다. 반발경도법의 원리는 타격 시 해머의 타격에너지에 따라 반사되는 반발력의 크기와 측정대상물의 강도와의 상관관계를 이용하는 것으로서 간단하고 단시간에 강도측정이 가능하지만 높은 타격에너지에 의해서 시험시편이 종종 파괴되는 문제가 발생할 뿐만 아니라 금속재료를 바탕으로 개발되어 복합재료인 콘크리트, 아스팔트, 암석 등에 적용 시에는 많은 제약이 따를 수 있다. 또한, 한 타격지점에서의 일회성의 반발력만을 이용함으로써 강도 추정치의 정확성이 떨어진다는 단점이 있다. 초음파법을 이용한 압축강도 산정(Naik & Malhotra, 1991; FHWA, 1997)은 초음파가 측정대상물을 통과하는 속도에 기준하고 있으나 음파의 전달속도는 측정재료의 표면과 시험장비의 접촉상태, 측정재료의 온도, 습도, 비균질성, 통과길이 등을 포함한 여러 인자 및 재료 내에 형성된 국부적인 미소결함에 의해 큰 영향을 받을 수 있다. 다시 말해서 초음파법은 재료 내부의 결함 등을 파악함에 있어서는 큰 활용성이 있으나 재료의 압축강도와 관련해서는 강도추정에 신뢰성이 떨어진다는 문제점이 있었다. 또 다른 비파괴시험으로서 물체를 타격함으로써 발생하는 응력파의 반사를 이용하는 임팩에코 방법이 Carino & Sansalone(1984)에 의해 개발되었다. 이 방법에서는 발생한 응력파가 물체 내부의 인터페이스나 외부 경계부를 만나면 반사되어지고, 반사된 파는 물체의 표면에서 변위를 유발시키는데 이를 트랜스듀서와 오실로스코프를 통해 측정하고 기록하게 된다. 이 방법은 발생변위에 대한 측정신호를 분석하여 물체 내부의 균열이나 공극 등의 결함들을 파악하기 위해서 사용하는 것으로서 강도를 예측하고 산정하기에는 여러 가지 문제점이 있었다. 이 외에도 다양한 비파괴시험법들이 존재하며 이에 관해서는 국제원자력기구(IAEA, 2002)와 Patil & Patil(2008) 이 발표한 보고서에 상세하게 설명되어 있다.

이와 같은 기존의 직접 및 비파괴 강도측정법에서 야기되는 여러 가지 결점 및 문제점들을 줄이기 위해서 Son & Kim(2017)은 임팩에코 응답신호를 이용하여 콘크리트시편의 압축강도를 비파괴적으로 산정하는 방법에 대해서 제시한 바 있다. 본 연구는 이와 같은 새로운 비파괴시험법의 신뢰성을 추가적으로 확보하기 위한 확장연구로서 콘크리트가 아닌 화강편마암 시편에 대해서 관련 시험법을 적용하여 그 결과를 분석하고 직접압축강도시험을 통한 시편별 측정 압축강도와 상호 비교하였다. 이를 통해 화강편마암의 압축강도뿐만 아니라 향후 다양한 암석 및 콘크리트 등의 압축강도 또한 새로운 비파괴시험법을 통해 산정할 수 있을 것을 파악하고자 하였다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 실험시편 준비

본 연구에서는 국내 전남 순천 공사현장에서 채취된 화강편마암 코어를 이용하여 실험시편(직경 50~52mm, 높이 100mm, Fig. 1)을 다수(57개 시편) 제작하였다. 제작된 시편은 두 그룹으로 나누어 한 그룹(42개 시편)은 실험을 통한 최적 회귀곡선을 도출하는 데 이용되었고, 또 다른 그룹(15개 시편)은 도출된 최적 회귀곡선을 통해 비파괴 압축강도를 신뢰성 있게 예측 및 산정할 수 있는지 검증하는 데 이용되었다. 실험시편의 표면은 연마석을 이용하여 평탄하게 연마하였다.

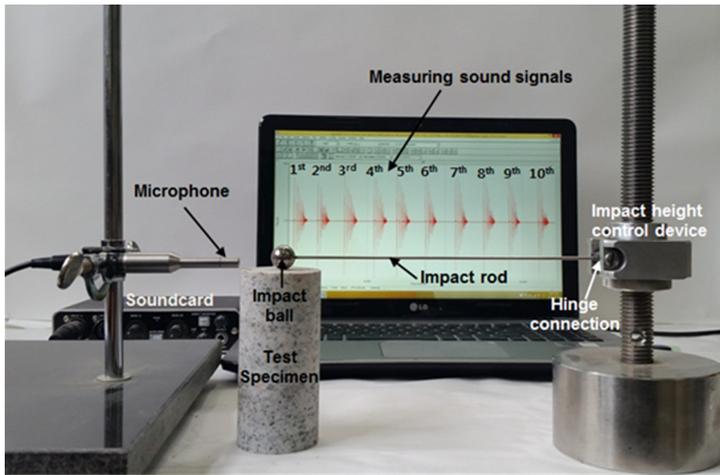
2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 비파괴시험법은 고안된 타격장치(회전 자유낙하에 의한 초기타격 및 연속적인 반발작용에 의한 반복타격 가능 장치, Fig. 2)를 이용하여 시편을 타격하고 타격 시 발생한 모든 사운드의 압력을 시간에 따른 신호로서 측정 후 전체시간에 대하여 누적한 값(전체 사운드 신호에너지)을 이용하여 비파괴압축강도를 산정하는 것이다. 시편 타격으로부터 발생하는 사운드압력의 시간에 따른 신호는 사운드 분석프로그램인 SpectraPLUS-SC를 이용하였다.

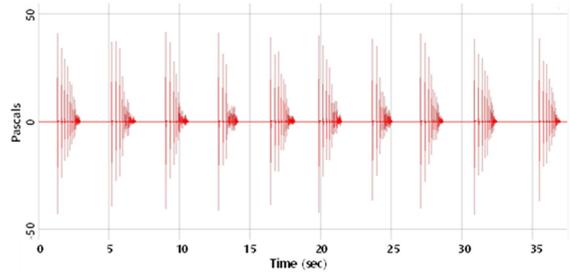
본 연구에서 사용된 타격장치는 타격높이 조절대, 타격구(직경: 15mm, 무게: 13.7g중), 타격봉(길이: 200mm, 직경: 2mm, 무게: 7.7g중)로 이루어져 있으며 타격봉은 타격높이 조절대에 힌지로서 연결되어 회전 자유낙하에 의한 시편의 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반발타격이 발생할 수 있도록 하였고 타격구는 타격봉의 일단에 고정되도록 하였다. 이와 같은 타격장치에 의해서 시편에 가해지는 초기타격 에너지와 다른 시험법들에 의해 발생하는 타격에너지를 비교하여 Table 1에 나타냈다. 표에서 보는 바와 같



Fig. 1. A specimen of granitic gneiss



(a) Test setup for impact sound pressure signal



(b) Measured impact sound pressure signals from 10 times impacts (time vs pressure)

Fig. 2. Measurement of impact sound pressure signal

Table 1. Comparison of impact energy

Method	Impact energy (N·m)
This study	0.0326
Scleroscope test	0.0065
Schmidt hammer test (N-type)	2.207

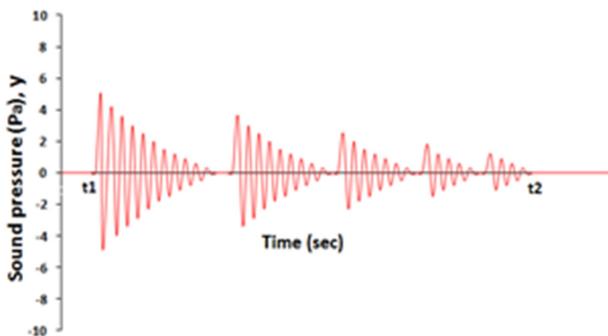
이 본 연구에 적용된 타격장치의 타격에너지는 기존의 슈미트해머 시험법의 타격에너지보다 훨씬 작다는 것을 알 수 있으며 이로부터 슈미트해머와 같은 높은 타격에너지에 의해서 시험시편이 종종 파괴되는 문제를 해소할 수 있을 것으로 판단된다.

시편타격으로부터 발생하는 사운드압력 신호의 측정 및 분석은 마이크로폰(EMM-13D082/S-P48/RM), 외장형 사운드카드(QUAD-CAPTURE) 및 사운드 분석프로그램(SpectraPLUS-SC)을 통해 이루어졌으며 실험에 앞서 사운드 분석프로그램은 소리교정기(SC-1 Calibrator)를 이용하여 교정하였다. 연마가 된 실험시편에 5개의 타격지점(중앙부를 중심으로

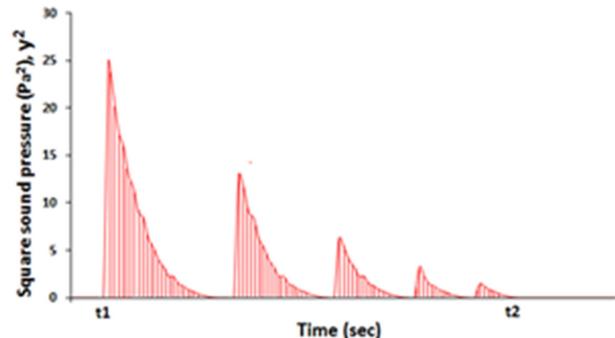
상하좌우 각 1cm 간격지점)을 표시하고 각 타격지점당 2번씩 타격을 가해 시편 하나당 총 10개의 사운드압력 응답신호를 측정하였다. 마이크로폰은 시편상단 가장자리에서 약 3mm 정도 이격하여 설치하였다.

각 타격지점당 초기타격은 타격봉을 타격면과 89°의 각도를 이루는 위치에서 회전 자유낙하에 운동에 의해 이루어졌으며 초기타격 후 타격구의 반발작용에 의한 연속적인 반복타격이 자유롭게 발생하여 소멸될 때까지 사운드압력 응답신호를 측정하였다(Fig. 2). 슈미트해머와 같이 단 한 번의 타격이 아닌 반발작용에 의한 연속적인 반복타격을 고려함으로써 시편의 재질에 따른 에너지 감쇄특성을 반영할 수 있는 장점이 있다.

타격에 의해 발생한 사운드의 응답은 시간에 따른 압력(Pa) 신호로 측정하였으며 신호에너지의 정의를 이용하여 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반복타격으로부터 발생한 전체 사운드압력 신호에너지를 아래와 같이 산정하여 사용하였다(Fig. 3).



(a) Measured sound pressure $y(t)$ over time



(b) Calculated square sound pressure $y^2(t)$ over time

Fig. 3. Schematic view of total signal energy calculation

$$E = \int_{t_1}^{t_2} y^2 dt, \text{ 단위: Pa}^2 \cdot \text{sec}$$

여기서, t1: 신호 시작시간, t2: 신호 종결시간, y²: 진폭 (발생 사운드압력 신호크기)의 제곱

2.3 직접압축강도 측정방법

제작된 화강편마암 실험시편에 대해 사운드압력 신호로부터 산정한 전체 사운드압력 신호에너지의 크기와 직접 측정된 압축강도와의 관계를 파악하기 위하여 실험시편을 대상으로 직접압축강도시험을 실시하고 강도를 측정하였다. 직접압축강도 측정시험은 2,000ton 용량의 만능시험기 (UTM: Universal Test Machine)를 사용하였으며 하중재하방식(1MPa/sec)으로 시험을 실시하였다. 본 기기의 정밀도는 측정강도에 대해 1%의 오차범위를 가지고 있다(Fig. 4).

3. 전체 사운드 신호에너지와 일축압축강도의 비교

Table 2와 Fig. 5는 화강암 시편 42개에 대해서 실시한 사운드 응답신호로부터 계산된 시편별 전체 사운드 신호에너지와 직접압축강도 시험을 통해 측정된 일축압축강도를 서로 비교한 것이다.

표 및 그림에서 보는 바와 같이 전체 사운드 신호에너지가 증가할수록 측정된 일축압축강도 또한 증가한다는 것을 알 수 있다. 실험시편 전체에 대한 전체 사운드 신호에너지와 직접압축강도와의 관계에 대한 회귀분석을 실시하였으며 그 결과를 그림에 나타냈다. 그림에 나타낸 바와 같이 전체 사운드 신호에너지는 직접압축강도와 높은 결정계수를 가지고 직접적인 관계를 형성한다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 시편타격을 통해 얻어진 사운드 응답신호로부터 산정한 전체 사운드 신호에너지가 시편의 일축압축강도

Table 2. Measured total sound signal energy and direct compressive strength

Specimen number	Total sound signal energy (Pa ² ·sec)	Measured direct compressive strength (MPa)
1	253.94	99.05
2	238.82	77.15
3	242.29	82.48
4	277.68	98.30
5	252.06	80.64
6	244.29	92.57
7	229.49	83.02
8	299.68	117.68
9	239.07	89.78
10	252.85	94.07
11	247.92	82.21
12	267.45	91.54
13	192.94	62.27
14	232.8	88.37
15	210.14	73.39
16	295.08	108.08
17	303.29	112.35
18	275.06	111.99
19	237.56	77.57
20	214.87	69.25
21	254.75	86.85
22	281.25	116.44
23	205.46	58.63
24	264.49	104.62
25	221.21	78.47
26	253.06	101.97
27	230.92	83.08
28	198.34	67.82
29	218.26	79.25
30	229.59	72.09
31	241.08	78.59
32	229.84	84.98
33	194.54	60.12
34	174.22	47.75
35	257.79	87.86
36	245.34	90.98
37	317.42	127.90
38	284.37	111.46
39	266.47	101.55
40	310.82	127.11
41	240.79	85.73
42	250.59	91.21



Fig. 4. Universal test machine for measuring direct compressive strength

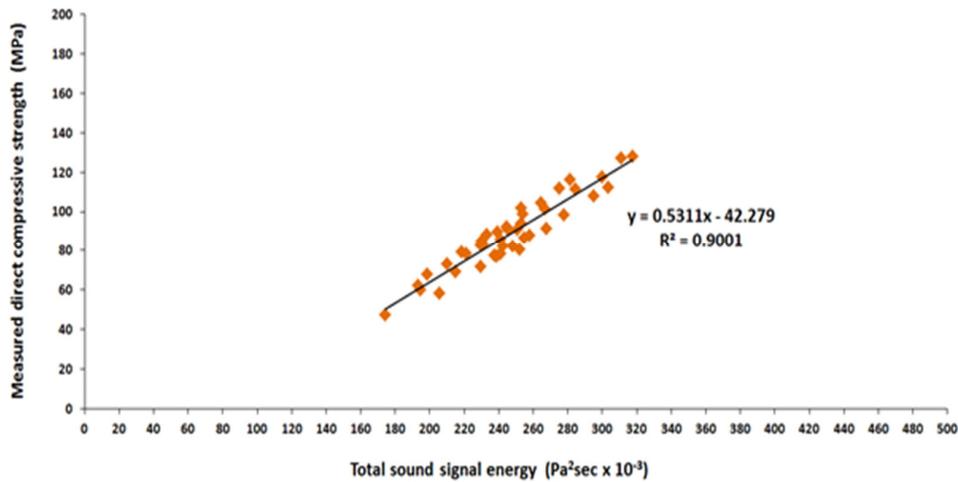


Fig. 5. Comparison of total sound signal energy and measured direct compressive strength

Table 3. Estimated strength and measured direct compressive strength

Specimen number	Estimated strength (MPa)	Measured direct compressive strength (MPa)
1	98.78	110.42
2	93.12	84.40
3	94.85	101.68
4	64.58	70.11
5	85.85	77.38
6	80.82	83.59
7	76.20	71.29
8	116.16	105.30
9	71.53	80.75
10	119.55	109.55
11	92.16	94.88
12	80.74	78.63
13	82.04	92.57
14	60.32	65.30
15	61.79	59.84

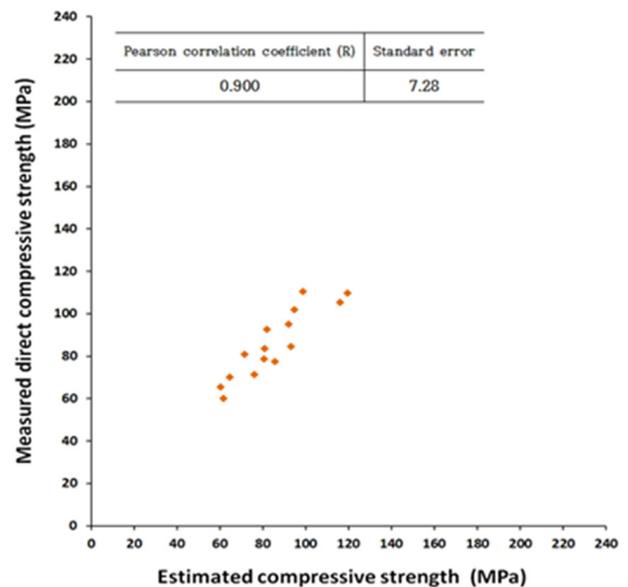


Fig. 6. Comparison of estimated compressive strength and measured direct compressive strength

와 직접적인 관계를 가진다는 것을 확인하였다.

더 나아가 Fig. 5로부터 얻어진 회귀식을 이용하여 다른 화강편마암의 압축강도를 추정할 수 있는지 조사하였다. 이때 사용된 시편은 회귀식 결정에 이용되지 않은 새로운 시편(15개 시편)으로 구성하였다. Table 3 및 Fig. 6은 회귀식을 이용하여 추정된 강도와 직접 측정된 압축강도와의 관계를 보여주고 있다.

두 강도사이의 관계에 대한 통계분석을 수행하고 그 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 Pearson 상관계수는 아주 높게 나타난 반면 표준편차는 아주 낮게 나타나 회귀식을 이용한 추정 압축강도가 직접측정된 압축강도와 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 통해 향후 화강편마암의 압축강도는 초기타격 및 반

발에 의한 연속적인 반복타격에 의해 발생한 사운드압력의 응답신호로부터 산정한 전체 사운드 신호에너지를 이용하여 신뢰성 있게 측정할 수 있다는 새로운 사실을 알 수 있었다. 더 나아가 향후 다양한 암석 및 콘크리트 등의 압축강도는 전체 사운드 신호에너지를 이용하여 비파괴적으로 예측할 수 있다는 것을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 화강편마암 암석시편에 대해서 초기타격 및 반복작용에 의한 연속적인 반복타격 시 발생하는 사운드압력에

대한 응답신호를 모두 측정하고 이를 누적한 전체 사운드 신호에너지를 이용하여 화강편마암의 압축강도를 비파괴적으로 산정하는 방법을 제시하고 그 결과를 확인하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 슈미트해머와 같이 단 한 번의 타격이 아닌 반발작용에 의한 연속적인 반발타격을 고려함으로써 시편의 재질에 따른 에너지 감쇄특성을 반영할 수 있는 장점이 있다.

- (2) 화강편마암의 각 시편에 대해서 타격을 통해 얻어진 전체 사운드 신호에너지는 해당 시편의 직접압축강도와 매우 밀접한 관계가 있다는 것을 확인하였으며, 회귀분석 결과 전체 사운드 신호에너지는 직접압축강도와 높은 결정계수를 가지고 직접적인 비례관계를 형성한다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 회귀분석식을 이용하여 회귀식 결정에 사용되지 않은 새로운 화강편마암 시편들에 대해서 압축강도를 예측하고 직접 측정된 압축강도와 비교하였다. 두 강도사이의 밀접성을 파악하기 위하여 통계분석을 실시한 결과 회귀식을 이용한 추정 압축강도가 직접측정된 압축강도와 90% 이상의 신뢰도를 가지면서 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 본 연구결과를 통해 향후 화강편마암의 압축강도는 초기타격 및 반발에 의한 연속적인 반복타격에 의해 발생한 사운드압력의 응답신호로부터 산정한 전체 사운드 신호에너지를 이용하여 신뢰성 있게 측정할 수 있다는

사실을 알 수 있었으며, 더 나아가 다양한 암석 및 콘크리트 등의 압축강도 또한 전체 사운드 신호에너지를 이용하여 비파괴적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. ASTM C805-13 (2013), Standard test method for rebound number of hardened concrete, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
2. Carino, N. J. and Sansalone, M. (1984), Pulse-echo method for flaw detection in concrete, NBS Technical Note 1199, U.S. Dept. of Commerce/National Bureau of Standards 34.
3. FHWA (1997), Guide to nondestructive testing of concrete, Federal Highway Administration, FHWA-SA-97-105 written by G.I. Crawford, pp. 1~58.
4. IAEA (2002), Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency, Training course series No. 17, Vienna, Austria, pp. 1~231.
5. Naik, T. R. and Malhotra, V. M. (1991), The ultra-sonic pulse velocity method, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, pp. 169~202.
6. Patil, N. R. and Patil, J. R. (2008), Non-destructive testing (NDT) advantages and limitations, SRES College of Engineering, Kopergaon, Maharashtra - 423 603, pp. 71~78.
7. Son, M. and Kim, M. (2017), Nondestructive assessment of compressive strength of construction materials using impact-echo response signal, J. of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 18(8), pp. 17~21 (In Korean).