

충격력 응답신호를 이용한 비파괴 압축강도 산정에 관한 기초연구

A Pilot Study on Nondestructive Assessment of Compressive Strength Using Impact Force Response Signal

손 무 락[†] · 최 윤 서¹⁾

Moorak Son · Yoonseo Choi

Received: January 14th, 2019; Revised: January 30th, 2019; Accepted: March 25th, 2019

ABSTRACT : This paper is to provide the results of a pilot study of the usability and possibility of impact force response signal induced from impacting an object for the assessment of compressive strength of various materials (rock, concrete, wood, etc.) nondestructively. For this study, a device was devised for impacting an object and measuring the impact force. The impact was carried out by an initial rotating free falling impact and following repetitive impacts from the rebound action which eventually disappears. Wood and rock test specimens for different strengths were tested and an impact force response signal was measured for each test specimen. The total impact force signal energy which is assessed from integrating the impact force response signal was compared with the directly measured compressive strength for each specimen. The comparison showed that the total impact force signal energy has a direct relationship with the directly measured compressive strength and the results clearly indicated that the compressive strength of construction materials can be assessed nondestructively using total impact force signal energy which is assessed from integrating the impact force response signal induced from impacting an object.

Keywords : Compressive strength, NDT, Impact force signal energy, Impact device

요 지 : 본 논문은 건설재료(암석, 콘크리트, 목재 등) 등의 압축강도를 비파괴적으로 산정하기 위하여 재료타격 시 발생하는 충격력에 대한 응답신호를 모두 측정하고 이를 누적한 전체 충격력 신호에너지의 이용성 및 가능성에 관해 기초연구를 수행하고 그 결과를 제시하는 것이다. 본 연구에서는 이를 위해서 충격 및 측정장치를 고안하였고 이를 이용하여 측정대상물을 회전 자유낙하에 의해 초기 타격토록하고 이후 반발작용에 의한 반복타격이 소멸될 때까지 발생할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 서로 다른 강도를 가지는 목재와 암석시편에 대하여 충격력실험을 실시하고 발생신호를 측정하였다. 시편별 산정된 전체 충격력 신호에너지는 직접압축강도시험을 통한 시편별 압축강도와 상호 비교하였다. 비교결과, 충격력 응답신호를 통해 산정된 전체 충격력 신호에너지는 시편의 직접압축강도와 직접적인 관계가 있다는 것을 확인하였으며, 이를 통해 다양한 건설재료의 압축강도는 재료타격 시 발생하는 충격력 응답신호로부터 산정된 전체 충격력 신호에너지를 이용하여 비파괴적으로 산정할 수 있음을 알 수 있었다.

주요어 : 압축강도, 비파괴시험, 충격력 신호에너지, 타격장치

1. 서 론

사회기반시설물의 설계 및 시공, 유지관리에 있어서 안전문제는 시민의 생명 및 재산 등과 직접적으로 연관되어 있으므로 사용재료 및 노후화에 대한 철저한 조사와 더불어 강도측정을 반드시 필요로 하고 있다.

일반적인 재료의 강도측정에는 크게 직접적인 강도측정법과 간접적인 강도측정법이 있다. 직접적인 강도측정법은 시험시편을 압축강도 시험장치 등을 통해 파괴시켜 강도를 측정하는 것으로서 재료의 강도를 직접적으로 측정하는 장점이 있으나 현장에서의 시편 채취, 공시체 준비 및 시험과정

등의 번거로움과 불편함 등의 여러 가지 단점을 내포하고 있다. 이와 비교하여 간접적인 강도측정법의 하나인 비파괴 검사(NDT, Non-Destructive Testing)는 강도측정 절차가 용이하고 더욱 짧은 시간에 보다 많은 횟수의 강도를 측정할 수 있는 등의 여러 가지 장점이 있지만 직접적 강도측정법과 비교하여 신뢰성이 떨어지는 문제점이 있다. 현재 가장 많이 적용되고 있는 강도측정 비파괴검사법은 슈미트해머법(ASTM C805-13, 2013)이라고도 불리는 반발경도법과 초음파법으로 스위스 Proceq사와 미국 NDT James Instruments사의 제품들이 많이 사용되고 있다. 반발경도법은 측정대상물에 손상을 주지 않으면서 강도를 추정할 수 있는 방법으로 널리

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

1) Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Daegu University

사용되어 지고 있다. 반발경도법의 원리는 타격 시 해머의 타격에너지에 따라 반사되는 반발력의 크기와 측정대상물의 강도와의 상관관계를 이용하는 것으로서 간단하고 단시간에 강도측정이 가능하지만 금속재료를 바탕으로 개발되어 복합재료인 콘크리트, 아스팔트, 암석 등에 적용 시에는 많은 제약이 따를 뿐만 아니라 상대적으로 높은 타격에너지에 의해서 시험시편이 종종 파괴되는 문제도 발생한다. 또한, 일회성의 반발력만을 이용함으로써 재료의 에너지감쇠특성을 잘 반영하지 못해 강도 추정의 정확성이 떨어진다. 단점이 있다. 초음파법을 이용한 압축강도 산정(Naik & Malhotra, 1991; FHWA, 1997)은 측정대상물을 통과하는 초음파의 전달속도에 근거하고 있으나 재료내부의 음파 전달속도는 시험장비의 접촉상태, 재료의 온도, 습도, 비균질성, 통과길이 등의 여러 인자 및 국부적인 미소결함에 의해 큰 영향을 받는 특징이 있다. 이로 인해 초음파법은 재료내부의 결함 등을 파악함에 있어서는 큰 활용성이 있으나 재료의 압축강도와 관련해서는 신뢰성이 떨어지는 문제점이 있다. 물체를 타격함으로써 발생하는 응력파의 반사를 이용하는 임팩에코 방법이 Carino & Sansalone(1984)에 의해 개발되었지만 이 방법은 발생변위에 대한 측정신호를 분석하여 물체내부의 균열이나 공극 등의 결함들을 파악하기 위해서 사용하는 것으로서 강도를 예측하기에는 문제점이 있다. 이 외에도 여러 가지 다양한 비파괴시험법이 존재하며 이에 관한 설명은 국제원자력기구(IAEA, 2002)와 Patil & Patil(2008)이 발표한 보고서에 자세하게 나타나 있다.

본 연구는 이와 같은 기존 직접 및 간접강도측정법에서 야기되는 여러 가지 결점 및 문제점들을 해소하면서 암석 및 콘크리트 등의 다양한 건설재료의 비파괴 압축강도를 보다 신뢰성 있게 산정할 수 있는 방안을 강구하기 위해 수행되었다. 이를 위해 본 연구에서는 자유낙하에 의한 재료타격 시 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반복타격 시 발생하는 충격력 응답신호를 모두 측정하고 이를 누적한 전체 충격력 신호에너지의 비파괴 건설재료 압축강도 산정에 대한 이용성 및 가능성에 관해 기초연구를 수행하고 그 결과를 제시하고자 한다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 실험시편 준비

본 연구에서는 서로 다른 압축강도를 가지는 목재 및 암석시편(세일 및 화강암)을 제작하였다. 목재시편은 경북 청송이 원산지인 소나무를 사용하여 제작하였으며, 세일 암석시편은 경남 함안지역에서, 화강암 암석시편은 경북 영천시

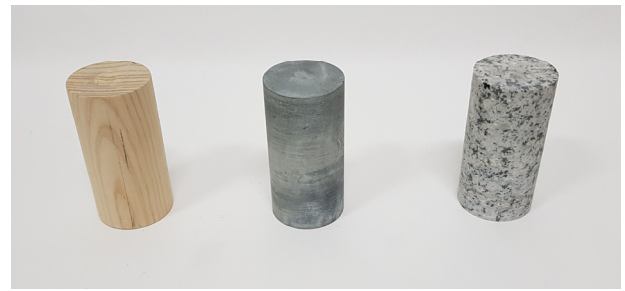


Fig. 1. Test specimens (pine tree, shale, and granite) used in this study

역에서 채취하였다. 상기 3가지 재료의 시편은 모두 직경 50mm, 높이 100mm의 크기로 제작하였고(Fig. 1) 실험결과와의 평 균을 위하여 각 재료당 3개씩 제작하였다.

2.2 충격력 신호응답 측정방법

본 연구에서는 시험시편의 타격 및 타격 시 발생하는 충격력 측정을 위해 타격장치를 고안하여 제작하였으며(Fig. 2), 또한 시험시편 타격으로부터 발생하는 충격력 신호의 특성을 파악하기 위하여 상용프로그램인 SpectraPLUS-SC를 이용하였다.

본 연구에 사용된 타격장치는 타격높이 조절대, 타격봉(길이: 200mm, 직경: 2mm), 타격구(15mm 직경) 및 충격력 측정센서(Dytran 1053V4)로 이루어졌으며 타격봉의 일단에 충격력측정센서가 결합되고 차례로 타격구가 충격력측정센서에 결합되는 형태로 제작하였으며 타격봉의 타단은 타격높이 조절대에 힌지로서 연결되어 회전 자유낙하에 의한 시편의 초기타격 후 반발작용에 의한 연속적인 반발타격이 발생할 수 있도록 하여 재료의 에너지감쇠특성을 보다 잘 반영할 수 있도록 하였다. 또한 상대적으로 낮은 타격에너지가 가해지도록 하여 시험시편의 파괴문제를 줄일 수 있도록 하였다. 시편타격으로부터 발생하는 충격력 응답신호의 측정 및 분석은 충격력측정센서, 센서로부터 측정된 신호를 케이블을 통해

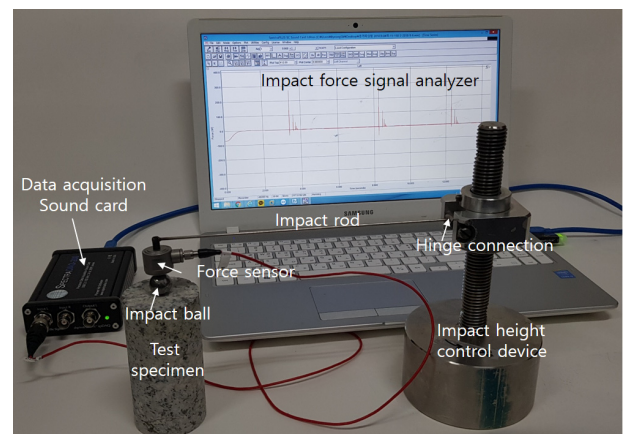


Fig. 2. Measurement of impact force signal response

획득하는 신호획득장치(SpectraDAQ-200), 획득된 신호를 분석하는 신호 분석프로그램(SpectraPLUS-SC)으로 구성되어 있다. 본 연구에서 실험은 콘크리트 바닥 위에서 실시하였다.

본 연구에서는 준비된 시편을 타격하기 전에 타격이 가해지는 표면을 연마석을 이용하여 평탄하게 연마하였다. 연마가 된 시편의 중앙부를 3번씩 타격을 가해 시편 하나당 총 3개의 충격력 응답신호를 측정하였다(Fig. 3).

각 임팩지점 당 초기타격은 타격봉을 타격면과 89°의 각도를 이루는 위치에서 회전 자유낙하에 운동에 의해 이루어졌으며 초기타격 후 타격구의 반발작용에 의한 연속적인 반복타격이 자유롭게 발생하여 소멸될 때까지 충격력 응답신호를 측정하였다(see Fig. 2).

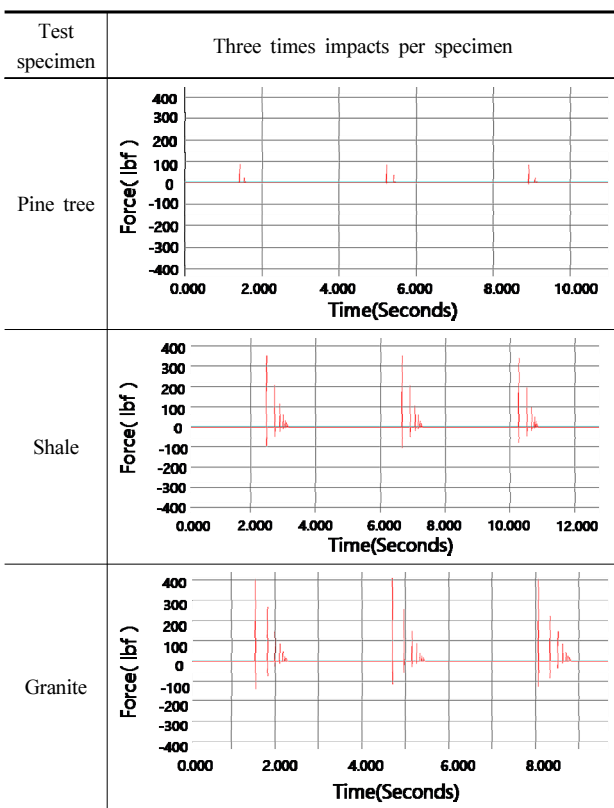


Fig. 3. Measured impact signals of test specimens in time domain (X-axis: time, Y-axis: impact force)

충격력 신호응답은 시간에 따른 충격력(N) 신호로 측정하였으며(Fig. 3) 본 연구에서는 신호에너지의 정의를 이용하여 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반복타격으로부터 발생한 전체 충격력 신호에너지를 다음과 같이 산정하여 사용하였다(see Fig. 4).

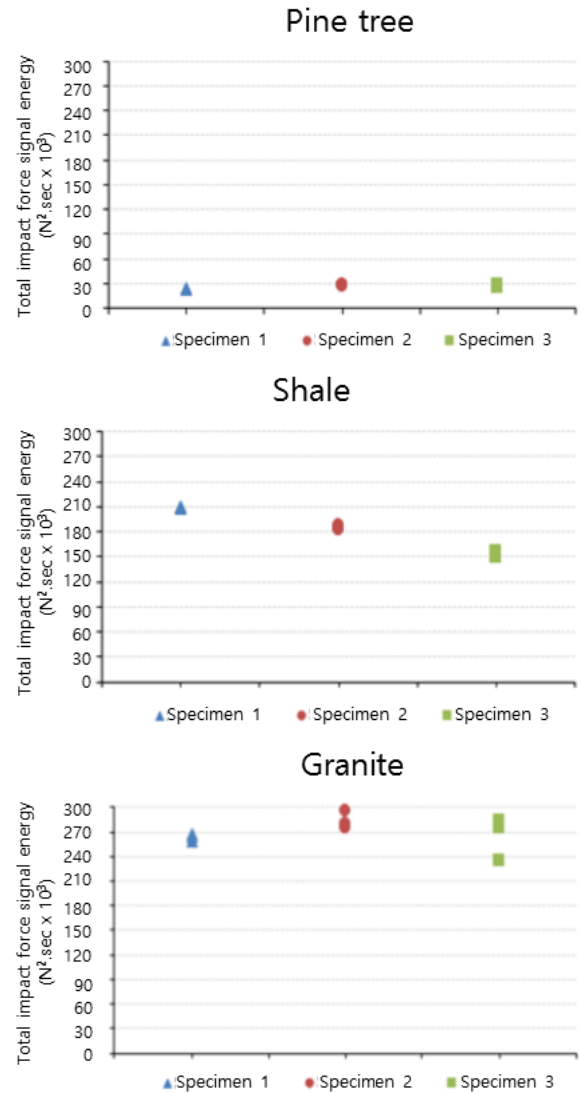
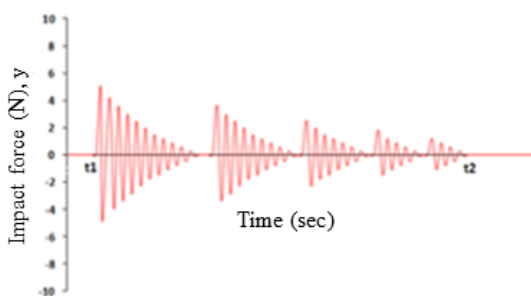
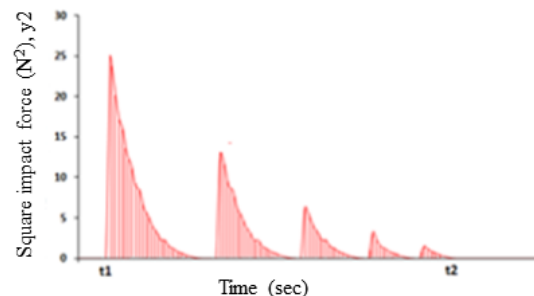


Fig. 5. Comparison of total impact force signal energy for different materials



(a) Measured impact force $y(t)$ over time



(b) Calculated square impact force $y^2(t)$ over time

Fig. 4. Schematic view of total impact force signal energy calculation

$$TIFSE = \int_{t_1}^{t_2} y^2 dt, \text{ 단위: } N^2 \cdot \text{sec} \quad (1)$$

여기서, t1: 신호 시작시간, t2: 신호 종결시간, y²: 진폭(충격력)의 제곱

Fig. 5는 각 재료별 3개의 대상시편(1개의 시편에 대해서 3번의 타격을 실시함)에 대해서 측정된 충격력시그널로부터 산정된 전체 충격력 시그널에너지를 재료 및 대상시편별로 나타낸 것으로서 각 재료별 전체 충격력 시그널에너지와 재료의 강도는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

2.3 직접압축강도 측정방법

본 연구에서는 실험시편에 대해 충격력 신호응답으로부터 산정한 전체 충격력 신호에너지의 크기와 직접 측정한 압축강도와와의 관계를 파악하기 위하여 직접압축강도시험을 실시하고 시편별 압축강도를 측정하였다. Fig. 6은 직접압축강도 측정시험 장비 및 측정모습을 보여주고 있다. 직접압축강도 측정시험은 2,000ton 용량의 만능시험기(UTM: Universal Test Machine)를 사용하였으며 하중재하방식(1MPa/sec)으로 압축강도를 측정하였다.

Table 1은 각 재료별 3개의 시편에 대해 측정된 일축압축강도 시험결과를 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 소나무(pine tree)가 가장 작은 일축압축강도를 나타냈고 화강암이 가장 큰 일축압축강도를 가지는 것으로 나타났다.



Fig. 6. Uniaxial direct compressive test machine

Table 1. Measured compressive strength

Material	Compressive strength (MPa)		
	1	2	3
Pine tree	43.4	49.1	46.1
Shale	72.4	64.5	56.2
Granite	103.5	113.3	105.2

3. 전체 충격력 신호에너지와 일축압축강도의 비교

Fig. 7은 충격력 응답신호로부터 산정된 시편별 전체 충격력 신호에너지와 일축압축강도를 서로 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체 충격력 신호에너지가 증가할수록 측정된 일축압축강도 또한 증가한다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 시편타격으로 인해 발생한 충격력 응답신호로부터 산정한 전체 충격력 신호에너지가 시편의 일축압축강도와 직접적인 관계를 가진다는 것을 확인하였다.

이와 같은 결과를 통해 향후 암석 및 콘크리트 등을 포함한 다양한 건설재료의 압축강도는 재료의 초기타격 및 반발에 의한 연속적인 반복타격에 의해 발생한 충격력 응답신호로부터 산정한 전체 충격력 신호에너지를 이용하여 측정할 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

본 연구의 결과가 향후 다양한 건설재료의 비파괴 강도 측정 분야에 새로운 정보를 제공하고 일익을 담당할 수 있기를 기대한다. 그럼에도 불구하고 향후 기존 비파괴 방법들과의 비교를 통해서 강도예측의 신뢰성에 대한 비교검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

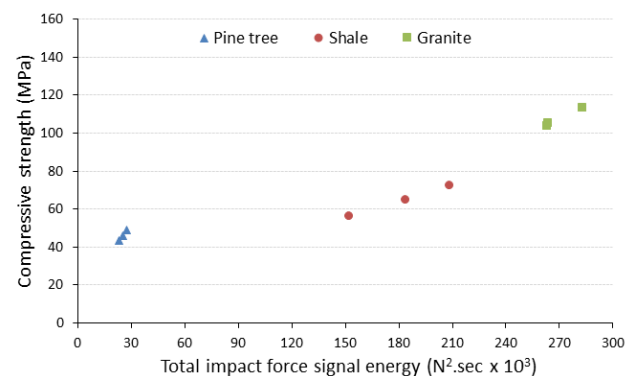


Fig. 7. Comparison of total impact force signal energy and measured direct compressive strength

4. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시편을 타격하여 발생하는 충격력 응답신호를 조사하고 이를 건설재료의 비파괴 강도측정을 위한 하나의 방법으로서의 가능성을 검토하기 위하여 먼저 충격력 발생장치를 고안하고 구축하였다. 고안장치는 회전 자유낙하에 의한 시편의 초기타격 후 반발작용에 의한 연속적인 반복타격이 발생할 수 있도록 하여 재료의 에너지

감쇠특성을 보다 잘 반영할 수 있도록 하였으며, 또한 상대적으로 낮은 타격에너지가 가해지도록 하여 시험 시편의 파괴문제를 줄일 수 있도록 하였다.

- (2) 다양한 강도 및 재료특성을 가지는 시험시편을 타격함으로써 발생하는 충격력 응답신호로부터 산정한 전체 충격력 신호에너지와 직접 측정된 압축강도시험 결과를 비교함으로써 다양한 재료의 비파괴 압축강도 측정 방법에 대한 새로운 방법을 제시하였다.
- (3) 시험시편에 대한 충격력 응답신호로부터 산정한 시편별 전체 충격력 신호에너지와 직접 측정된 압축강도를 서로 비교한 결과, 전체 충격력 신호에너지가 증가할수록 측정된 압축강도 또한 증가한다는 것을 알 수 있었다. 다시 말해서 타격으로 인해 발생한 전체 충격력 신호에너지는 재료의 압축강도와 직접적인 관계를 가진다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 본 연구결과로부터 향후 콘크리트 및 암석 등을 포함한 다양한 재료의 압축강도는 회전 자유낙하에 의한 재료의 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반복타격으로부터 발생한 충격력 응답신호로부터 산정한 전체 충격력 신호에너지를 이용하여 산정할 수 있다는 사실을 확인하였다.
- (5) 본 연구에서는 충격력 응답신호를 이용하여 다양한 재료의 압축강도를 비파괴적으로 산정할 수 있는 가능성을 파악하고자 기초연구를 수행하였으며 재료별 압축강도 산정식의 제안은 향후 재료 및 시험조건 등의 다양한 경우를 고려한 많은 실험을 통한 자료축적 이후의 과제로 남겨두고자 한다. 그럼에도 불구하고 본 연구의

결과가 압축강도 산정을 위한 비파괴 강도측정 분야에 새로운 정보를 제공하고 일익을 담당할 수 있기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2015학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 논문이며, 본 연구를 가능케 한 상기 기관에 감사드립니다.

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.