

임팩에코 응답신호를 적용한 건설재료 비파괴 압축강도 산정

Nondestructive Assessment of Compressive Strength of Construction Materials Using Impact-Echo Response Signal

손 무 락[†] · 김 무 준¹⁾

Moorak Son · Moojun Kim

Received: June 27th, 2017; Revised: July 5th, 2017; Accepted: July 25th, 2017

ABSTRACT : This paper is to grasp the use of impact-echo response signal induced from impacting an object for the assessment of compressive strength of construction materials nondestructively and to propose the test results. For this study, an impact device was devised and used for impacting an object by an initial rotating free falling impact and following repetitive impacts from the rebound action which eventually disappears. Concrete test specimens which had been mixed for different strengths were tested and the impact echo response signal was measured for each test specimen. The total sound signal energy which is assessed from integrating the impact-echo response signal was compared with the directly measured compressive strength for each specimen. The comparison showed that the total sound 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 sound signal energy which is assessed from integrating the impact-echo response signal induced from impacting an object.

Keywords : Compressive strength, NDT, Construction materials, Impact-echo response signal, Impact device

요 지 : 본 논문은 암석 및 콘크리트 등의 건설재료의 비파괴 압축강도를 산정하기 위하여 재료타격 시 발생하는 임팩에코 응답신호를 모두 측정하고 이를 누적한 전체 사운드 신호에너지의 이용성에 관해 파악하고 그 결과를 제시하는 것이다. 본 연구에서는 이를 위해서 타격장치를 고안하였고 이를 이용하여 재료를 회전 자유낙하에 의해 초기 타격토록 하고 이후 반발작용에 의한 반복타격이 소멸될 때까지 발생할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 서로 다른 강도를 가지도록 배합된 콘크리트 시편에 대하여 실험을 실시하고 임팩에코 응답신호를 측정하였다. 시편별 산정된 전체 사운드 신호에너지는 직접압축강도시험을 통한 시편별 압축강도와 상호 비교하였다. 비교결과, 임팩에코 응답신호를 통해 산정된 전체 사운드 신호에너지는 시편의 직접압축강도와 직접적인 관계가 있다는 것을 확인하였으며, 이를 통해 암석 및 콘크리트 등의 건설재료의 압축강도는 재료타격 시 발생하는 임팩에코 응답신호로부터 산정된 전체 사운드 신호에너지를 이용하여 비파괴적으로 산정할 수 있음을 알 수 있었다.

주요어 : 건설재료, 비파괴시험, 압축강도, 사운드 신호에너지, 타격장치

1. 서 론

국내외적으로 안전에 대한 관심이 많이 증가하고 있다. 특히 사회기반시설물에 대한 안전문제는 시민의 생명 및 재산 등과 직접적으로 연관되어 안전에 대한 최우선 대상으로 분류되고 있으며, 설계 및 시공, 유지관리 시 사용재료에 대한 철저한 조사와 더불어 강도측정을 반드시 필요로 하고 있다.

암석이나 콘크리트 등의 다양한 건설재료에 대한 강도측정에는 크게 직접적인 강도측정법과 간접적인 강도측정법이 있다. 직접적인 강도측정법은 시험시편을 압축강도 시험장치 등을 통해 직접적으로 파괴시켜 강도를 측정하는 것으로서 현장에서의 시편 채취, 공시체 준비 및 시험과정 등의

번거로움과 불편함 등의 여러 가지 문제점을 내포하고 있다. 이에 비해 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 있다. 현재 실무에서 가장 많이 적용되고 있는 강도측정 비파괴검사법은 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 널리 사용되고 있다. 반발경도법의 원리는 타격 시 해머의 타격에너지에 따라 반사되는 반발력의

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

1) Department of Civil Engineering, Daegu University

크기와 측정대상물의 강도와 상관계수를 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 문제가 발생한다. 또한, 한 타격지점에서의 일회성의 반발력만을 이용함으로 인해 강도 추정의 정확성이 떨어진다는 단점이 있다. 초음파법을 이용한 압축강도 산정(Naik & Malhotra, 1991; FHWA, 1997)은 측정대상물을 통과하는 초음파의 전달속도에 바탕을 두고 있으나 재료 내부의 음파 전달속도는 재료와 시험장비의 접촉상태, 시험 시 재료의 온도, 습도, 비균질성, 통과길이 등의 여러 인자 및 국부적인 미소결함에 의해 큰 영향을 받는 특징이 있다. 이로 인해 초음파법은 재료 내부의 결함 등을 파악함에 있어서는 큰 활용성이 있으나 재료의 압축강도와 관련해서는 신뢰성 있는 강도추정이 어렵다는 문제점이 있었다. 물체를 타격함으로써 발생하는 응력파의 반사를 이용하는 임팩에코 방법이 Carino와 Sansalone (1984)에 의해 개발되었다. 이 방법에서는 발생한 응력파가 물체 내부의 인터페이스나 외부경계부를 만나면 반사되어지고, 반사된 파는 물체의 표면에서 변위를 유발시키는데 이를 트랜스듀서와 오실로스코프를 통해 측정하고 기록한다. 이 방법은 발생변위에 대한 측정신호를 분석하여 물체 내부의 균열이나 공극 등의 결함들을 파악하기 위해서 사용하는 것으로서 강도를 예측하기에는 문제점이 있으며 본 연

구의 사운드 신호에너지를 이용하여 압축강도를 산정하는 방법과는 그 방법 및 적용성에 있어서 근본적으로 차이가 있다. 이 외에도 여러 가지 비파괴시험법이 존재하며 이에 관한 설명은 국제원자력기구(IAEA, 2002)와 Patil & Patil (2008) 이 발표한 보고서에 자세하게 나타나 있다.

본 연구는 이와 같은 기존 강도측정법에서 야기되는 여러 가지 결점 및 문제점들을 해소하고 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 임팩에코 사운드 응답신호를 모두 측정하고 이를 누적한 전체 사운드 신호에너지의 이용성에 관해 파악하고 결과를 제시하였다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 실험시편 준비

본 연구에서는 서로 다른 배합강도를 가지도록 콘크리트 시편(직경 50mm, 높이 100mm)을 제작하고 양생하였다. 콘크리트 강도는 크게 저강도, 보통강도, 고강도로 구분하여 제작하였고 이를 위해서 물-시멘트 비(W/C), 굵은 골재, 잔 골재, 시멘트, 고성능 감수제의 양을 달리하여 배합하였다 (Table 1). 또한 같은 배합강도의 시편에 대해서 양생기간을

Table 1. Mixing design and test details of concrete specimens with various strength

Specimen types	G max (mm)	W/C (%)	S/a (%)	W (g)	C (g)	S (g)	G (g)	S.P (g)	Design strength (MPa)
Low strength concrete	13	67	50	3,256	4,857.6	15,840	16,931.2	-	20
Medium strength concrete	13	50	48	3,168	6,336	14,731.2	17,072	-	35
High strength concrete	13	35	46	3,080	8,800	13,288	16,684.8	88	55
Specimen size (diameter X height, mm)	50 x 100								
Curing ages of test specimens	28 days, 68 days, 108 days, 114 days, 120 days, 156 days								
Test specimens for determining correlation equations through regression analysis	Low strength concrete	50x100: 28 days (6)*, 68 days (6), 108 days (3), 120 days (3), 156 days (6)							
	Medium strength concrete	50x100: 28 days (6), 68 days (6), 108 days (3), 120 days (3), 156 days (6)							
	High strength concrete	50x100: 28 days (6), 68 days (6), 108 days (3), 120 days (3), 156 days (6)							
Test specimens for validation through statistical analysis	Low strength concrete	50x100: 114 days (6)							
	Medium strength concrete	50x100: 114 days (6)							
	High strength concrete	50x100: 114 days (6)							

* S.P: Superplasticizer, *: Number of test specimen

달리하여 실험을 실시하였다. 실험은 크게 두 단계로 실시하였으며, 첫 번째 단계의 실험결과는 최적 회귀곡선을 도출함에 이용되었고, 두 번째 단계에서는 제시된 비파괴 강도산정방법의 신뢰성을 확인하기 위해 첫 번째 단계의 실험에서는 사용하지 않은 시편들의 실험결과를 이용해 통계분석을 실시하였다.

2.2 임팩에코 신호응답 실험방법

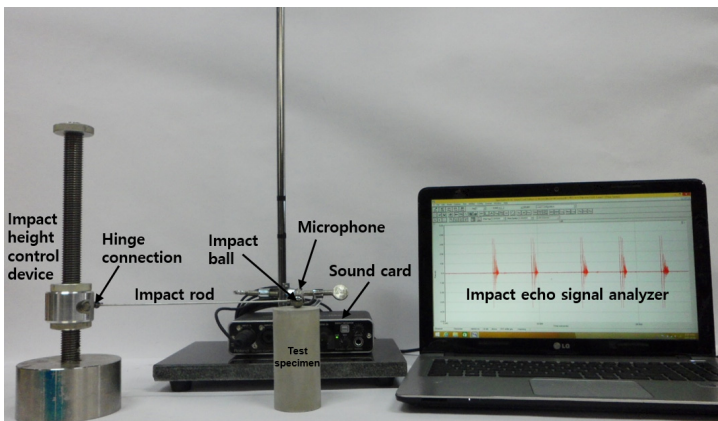
본 연구에서는 시험시편의 타격을 위해 타격장치를 고안하여 제작하였으며(Fig. 1), 또한 시험시편 타격으로부터 발생하는 임팩에코의 특성을 파악하기 위하여 상용프로그램인 SpectraPLUS-SC를 이용하였다.

본 연구에 사용된 재료타격장치는 타격높이 조절대, 타격봉(200mm 길이) 및 타격구(15mm 직경)로 이루어져 있으며 타격봉과 타격구는 일체로 제작하였으며 타격봉은 타격높이 조절대에 힌지로서 연결되어 회전 자유낙하에 의한 시편의 초기타격 후 반발작용에 의한 연속적인 반발타격이 발생할 수 있도록 하였다. 시편타격으로부터 발생하는 임팩에코 응답신호의 측정 및 분석은 마이크로폰, 외장형 사운

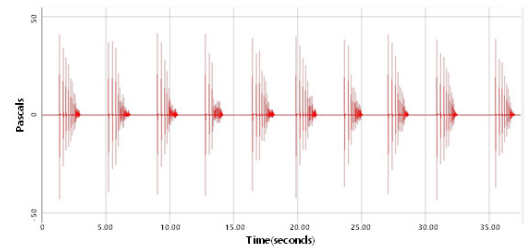
드카드 및 사운드 분석프로그램으로 구성되어 있으며 실험에 앞서 사운드 분석프로그램은 소리교정기를 이용하여 교정하였다. 본 연구에 사용된 시편타격장치는 타격높이 조절대, 타격봉(길이: 200mm, 직경: 2mm) 및 타격구(15mm 직경)로 이루어져 있으며 타격봉과 타격구는 크롬강으로서 일체로 제작하였으며 타격봉은 타격높이 조절대에 힌지로서 연결되어 회전 자유낙하에 의한 시편의 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반발타격이 발생할 수 있도록 하였다. 실험은 콘크리트 바닥 위에서 실시하였다.

본 연구에서는 준비된 시편을 타격하기 전에 타격이 가해지는 표면을 연마석을 이용하여 평탄하게 연마하였다. 연마된 시편에 5개의 타격지점(중앙부를 중심으로 상하좌우 각 1cm 간격지점)을 표시하고 각 타격지점당 2번씩 타격을 가해 시편 하나당 총 10개의 임팩에코 응답신호를 측정하였다.

각 임팩지점 당 초기타격은 타격봉을 타격면과 89°의 각도를 이루는 위치에서 회전 자유낙하에 운동에 의해 이루어졌으며 초기타격 후 타격구의 반발작용에 의한 연속적인 반발타격이 자유롭게 발생하여 소멸될 때까지 임팩에코 응답

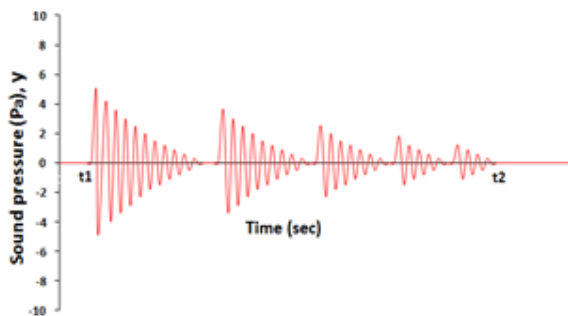


(a) Impact-echo signal response test setup

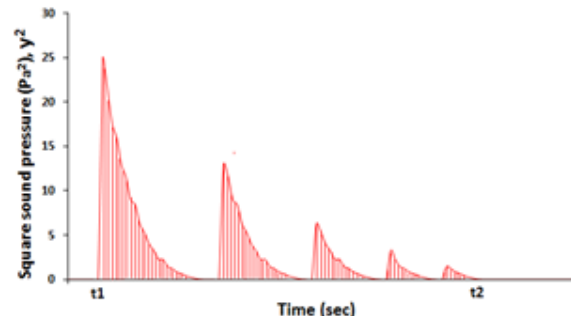


(b) Measured impact-echo signals of 10 times impacts (time vs pressure)

Fig. 1. Measurement of impact-echo signal response



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



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

Fig. 2. Schematic view of total signal energy calculation

신호를 측정하였다(Fig. 1).

임팩에코 신호응답은 시간에 따른 압력(Pa) 신호로 측정하였으며 본 연구에서는 신호에너지의 정의를 이용하여 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반발타격으로부터 발생한 전체 사운드 신호에너지를 아래와 같이 산정하여 사용하였다(Fig. 2).

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

여기서 t1: 신호 시작시간, t2: 신호 종결시간, y²: 진폭의 제곱(발생신호의 압력크기 제곱)

2.3 직접압축강도 측정방법

본 연구에서는 실험시편에 대해 임팩에코 신호응답으로부터 산정한 전체 사운드 신호에너지의 크기와 직접 측정된 압축강도와의 관계를 파악하기 위하여 직접압축강도시험을 실시하고 시편별 압축강도를 측정하였다. Fig. 3은 직접압축강도 측정시험 장비 및 측정모습을 보여주고 있다. 직접압축강도 측정시험은 2000ton 용량의 만능시험기(UTM: Universal Test Machine)를 사용하였으며 하중재하방식(1MPa/sec)으로 압축강도를 측정하였다.



Fig. 3. Uniaxial direct compressive test of granite

3. 전체 사운드 신호에너지와 일축압축강도의 비교

Fig. 4는 임팩에코 응답신호로부터 산정된 시편별 전체 사운드 신호에너지와 일축압축강도를 서로 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체 사운드 신호에너지가 증가할수록 측정된 일축압축강도 또한 증가한다는 것을 알 수 있다. 실험시편 전체에 대한 전체 사운드 신호에너지와 직접

압축강도와의 관계에 대한 회귀분석을 실시하였으며 그 결과를 그림에 나타냈다.

Fig. 4로부터 전체 사운드 신호에너지는 직접압축강도와 높은 결정계수를 가지고 직접적인 관계를 형성한다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 시편타격으로 인해 발생한 임팩에코 응답신호로부터 산정한 전체 사운드 신호에너지가 시편의 일축압축강도와 직접적인 관계를 가진다는 것을 확인하였다.

더 나아가 Fig. 4로부터 파악된 회귀식을 이용하여 콘크리트 시편의 압축강도를 추정할 수 있는지 조사하였다. 이때 사용된 시편은 회귀식 결정에 이용되지 않은 새로운 시편으로 구성하였다. Fig. 5는 회귀식을 이용하여 추정된 강도와 직접 측정된 압축강도와의 관계를 보여주고 있다. 두 강도 사이의 관계에 대한 통계분석을 수행하고 그 결과를

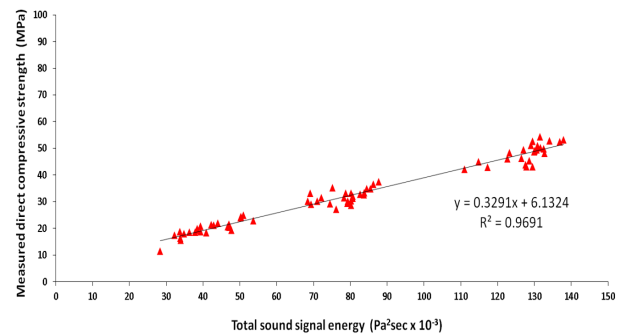


Fig. 4. Comparison of total sound signal energy and measured direct compressive strength

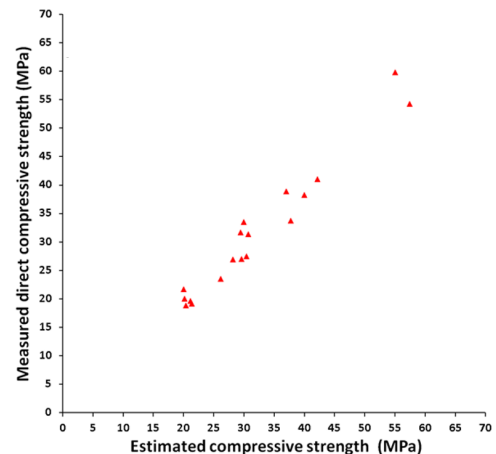


Fig. 5. Comparison of estimated compressive strength and measured direct compressive strength for different concrete specimen size

Table 2. Results of statistical analysis

Pearson correlation coefficient (R)	Standard error	Root mean square error (RMSE)
0.981	2.349	2.472

Table 2에 정리하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 Pearson 상관계수는 아주 높게 나타난 반면 표준편차와 평균제곱근 오차(RMSE)는 아주 낮게 나타나 회귀식을 이용한 추정 압축강도가 직접 측정된 압축강도와 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.

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

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.

4. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시편을 타격하여 발생하는 임팩에코 응답신호를 조사하고 이를 건설재료의 비파괴 강도측정을 위한 하나의 방법으로서의 가능성을 검토하기 위하여 먼저 타격발생 장치를 고안하고 구축하였다. 이를 이용하여 회전 자유낙하에 의한 시편의 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반복타격으로부터 발생한 임팩에코 응답신호를 측정하고 이를 통해 건설재료의 강도특성을 파악하고자 하였다.
- (2) 콘크리트 및 암석 등의 건설재료의 비파괴 압축강도 측정을 위하여 다양한 강도 및 양생기간을 가지는 콘크리트 시편을 타격함으로써 발생하는 임팩에코 응답신호로부터 산정한 전체 사운드 신호에너지와 직접 측정된 압축강도시험 결과와 비교함으로써 건설재료의 비파괴 압축강도 측정방법에 대한 새로운 방법을 제시하였다.
- (3) 다양한 강도 및 양생기간을 가지는 콘크리트 시편에 대한 임팩에코 응답신호로부터 산정한 시편별 전체 사운드 신호에너지와 직접 측정된 압축강도를 서로 비교한 결과, 전체 사운드 신호에너지가 증가할수록 측정된 압축강도 또한 증가한다는 것을 알 수 있었다. 다시 말해

서 타격으로 인해 발생한 전체 사운드 신호에너지는 건설재료의 압축강도와 직접적인 관계를 가진다는 것을 알 수 있었다.

- (4) 본 연구결과로부터 향후 콘크리트 및 암석 등을 포함한 다양한 건설재료의 압축강도는 회전 자유낙하에 의한 재료의 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반복타격으로부터 발생한 임팩에코 응답신호로부터 산정한 전체 사운드 신호에너지를 이용하여 산정할 수 있다는 사실을 확인하였다.
- (5) 본 연구에서는 임팩에코 응답신호를 이용하여 건설재료의 압축강도를 비파괴적으로 산정할 수 있는 가능성을 파악하고자 하였으며 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

본 연구는 한국연구재단 일반연구지원사업(2016)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

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.