

타격력 응답신호를 이용한 암석의 비파괴 압축강도 산정방법에 관한 연구

Study on Non-destructive Assessment of Compressive Strength of Rock Using Impact Force Response Signal

손 무 락[†] · 성 진 현¹⁾

Moorak Son · Jinhyun Seong

Received: July 13th, 2022; Revised: August 11th, 2022; Accepted: September 14th, 2022

ABSTRACT : This paper is to provide the results of usability of the impact force response signal induced from initial and successive rebound impacting a rock specimen for assessing the compressive strength of rock non-destructively. For this study, a device was devised for impacting a rock specimen and a system for measuring the impact force was set up. The impact was carried out by an initial rotating free falling impact and following repetitive impacts from the rebound action which eventually disappears. Three different kinds of rock specimen 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 induced from initial and rebound impacts was compared with the directly measured compressive strength for each rock 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 rock can be assessed non-destructively using total impact force signal energy.

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

요 지 : 본 연구는 암석의 압축강도를 비파괴적으로 산정하기 위하여 암석시편 초기타격 및 반발에 의한 연속적인 반복타격 시 발생하는 타격력에 대한 응답신호를 모두 측정하고 이를 누적한 전체 타격력 신호에너지를 이용하고 그 결과를 제시하는 것에 관한 것이다. 본 연구에서는 이를 위해서 타격 및 측정장치를 고안 및 셋업하였고 이를 이용하여 암석시편을 회전 자유낙하에 의해 초기 타격토록하고 반발작용에 의한 반복타격이 이루어질 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 서로 다른 세 종류의 암석시편에 대하여 타격력실험을 실시하고 발생신호를 측정하였다. 각 시편별 초기 및 반발타격으로부터 발생된 신호로부터 산정된 전체 타격력 신호 에너지와 각 시편별 측정된 직접압축강도와 상호 비교하였다. 비교결과, 타격력 응답신호로 부터 산정된 전체 타격력 신호에너지는 시편의 직접압축강도와 직접적인 관계가 있다는 것을 확인하였으며, 이를 통해 암석의 압축강도는 타격 시 발생하는 타격력 응답신호로부터 산정된 전체 타격력 신호에너지를 이용하여 비파괴적으로 산정할 수 있음을 알 수 있었다.

주요어 : 암석, 압축강도, 비파괴시험, 타격력 신호에너지, 타격장치

1. 서 론

암반기초위의 구조물 설계 및 시공과 직접적으로 관련된 요소인 암석의 일축압축강도를 보다 정확하고 용이하게 측정할 수 있는 방법 및 기술의 개발은 매우 중요한 일이다. 암석강도를 측정하거나 추정하는 방법에 있어서 직접적인 강도측정법은 암석강도를 가장 정확하게 측정할 수 있는 시험법으로서, 미국 표준시험메뉴얼(ASTM, 2014) 및 국제 암반역학회(ISRM, 2007)에서 관련시험법을 규정하고 있지만 큰 압축하중을 부여할 수 있는 장비가 필요하고 시험과정 등에 번거로움과 불편함이 존재하며 시간과 비용이 상대적으로 많이 소요된다는 문제점이 있다. 이와 비교하여 간접

적인 시험법(점하중시험, Block punch test 등)이나 비파괴 시험법(슈미트해머 시험법, 초음파시험법, Scleroscope 시험법 등)은 저렴하면서 간편하고 신속하게 시험을 진행할 수 있지만 측정강도의 신뢰성은 측정방법 및 암석조건에 많이 좌우되고 직접압축강도 시험법보다 일반적으로 정확성이 떨어진다라는 특징이 있다. 그럼에도 불구하고 간접적인 시험법과 비파괴시험법은 시험이 빠르고 용이하다는 장점 등으로 인해 설계 예비단계에서 널리 활용되고 있다. 그 중에서도 점하중 강도시험법(Point load test)과 블록펀치시험법(Block punch test) 등은 직접 압축강도 시험법보다 시험체 준비 및 시험과정이 상대적으로 간편한 특징이 있으나 시험체의 파괴가 동반되며 여전히 시험과정에 불편함과 번거로움이 존재

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

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

한다는 단점이 있다. 이에 비하여 비파괴검사(NDT, Non-Destructive Testing)는 측정정확도 면에서 직접적인 방법보다 그 신뢰도가 떨어지는 단점은 있으나, 강도측정 절차가 용이하고 측정대상물에 손상을 주지 않으면서 보다 짧은 시간에 많은 횟수의 강도를 측정할 수 있는 등의 여러 가지 많은 장점이 있다.

현재 이용되고 있는 비파괴시험법(NDT)은 표면시험법(Surface testing)과 관통시험법(Through testing)으로 크게 나눌 수 있다(Patil & Patil, 2008). 표면시험법에는 슈미트해머 시험법, Shore Scleroscope, Pull-out, Pull-off 및 관입시험법 등이 있으며 이러한 시험법들은 암석의 압축강도를 표면의 경도나 관입저항력, 인성 등으로부터 경험식에 의해서 간접적으로 예측한다. 관통시험법에는 울림시험법, 초음파시험법(Ultrasonic pulse velocity test), 상대진폭시험법, 응력반사법, X-ray 시험법, 방사선시험법, 전자기시험법 등이 있다. 이러한 관통시험법들은 초음파, 응력파, 빛 및 전자기파 등을 이용하고 이들 파들의 전달속도와 관련한 이론에 근거하고 있으며 주로 시험체 내부에 존재하는 균열이나 간극, 들뜸 등의 결함들을 조사하거나 시험체의 압축강도를 간접적으로 측정하기 위하여 활용된다. 비파괴시험법들은 시험법에 따라 각각 장점과 단점을 가지고 있으며, 미도료연방청(FHWA, 1997)과 국제원자력기구(IAEA, 2002) 등의 보고서에 관련 시험법들에 대한 배경, 원리, 시험절차, 적용성, 장점 및 단점 등이 잘 정리되어 제시되고 있다.

가장 널리 활용되는 비파괴시험법들 중의 하나인 슈미트해머시험법은 원래 콘크리트의 강도가 아닌 경도를 측정하기 위하여 개발되었지만(Schmidt, 1951), 현재에는 콘크리트나 암석의 압축강도를 예측하기 위하여 널리 이용되고 있다. 슈미트해머시험법을 이용한 반발경도와 암석의 직접압축강도와의 관련성은 많은 연구자들에 의해서 조사되었지만 반발경도와 직접압축강도의 상관성은 연구자에 따라 큰 변화폭을 가지고 있다. 이와 같은 원인으로서 슈미트해머시험법이 시험자에 따라 다소 주관성을 띤다는 점과 단 한 번의 타격으로 인한 반발력만으로 표면의 경도만을 측정함으로써 강도예측의 정확성이 떨어질 수 있다는 점을 들 수 있다. 이와 더불어 슈미트해머 시험의 다른 문제점은 프러저팁이 곡면을 형성하고 있는 암석시편 주변부에 완전히 밀착되지 않을 수 있고 상대적으로 높은 타격에너지로 인해 암석시험체 내부에 압축강도에 큰 영향을 미칠 수 있는 미세균열이 발생하거나 시험시편이 파괴될 수 있다는 점이다. Goktan & Gunes(2005)는 슈미트해머시험법의 절차가 아직까지 잘 정립되지 않았다는 것을 지적하였으며, FHWA(1997)와 IAEA(2002)는 슈미트해머시험의 반발경도와 재료의 강도사이에

는 명확한 이론적 관계가 없다고 보고하였다. 일반적으로 슈미트해머시험에 의한 예측강도의 정확성은 약 60~70% 정도인 것으로 보고되었다(Malhotra, 1991; FHWA, 1997).

암석강도를 예측하기 위하여 시험체의 두 지점 간 초음파속도를 이용하는 초음파시험법은(Naik & Malhotra, 1991; FHWA, 1997) 시험체의 균열, 간극, 들뜸 또는 부식 등에 대한 시험체의 균질성이나 상태 등을 파악하기 위하여 많이 이용되고 있지만 초음파속도는 물체표면에 부착되는 시험장치의 접촉상태 및 온도, 습도, 시험체의 비균질성 및 전파경로 등의 많은 변수에 영향을 받는다는 문제점이 있다. Kahraman(2001)과 Yasar & Erdogan(2004) 등은 다양한 암석에 대한 일축압축강도와 초음파속도간의 상관성을 비교한 결과 상관성이 높지 않다고 보고하였다. Shalabi 등(2007)도 초음파속도와 암석의 일축압축강도와의 상관성에 대한 조사결과, 그 상관성이 슈미트해머시험법과 Shore 시험법보다 낮게 형성된다고 보고하였다. 국제원자력기구(IAEA, 2002)에 의하면 기존의 그래프에 근거하여 초음파시험결과를 해석하는 것은 잘못된 것이 될 수 있고 압축강도와 초음파속도간의 상관성은 실무사용에 있어서 충분한 신뢰성을 확보하지 못한다고 보고하였다.

이처럼 시험체의 물성특성을 예측하기 위한 다양한 비파괴시험법이 존재하고 또한 활용되고 있음에도 불구하고 기존의 시험법들은 시험체의 압축강도를 예측함에 있어서 정확성이 떨어진다는거나 또는 적용이 적절치 않다는 것을 여러 연구자의 논문 및 보고서로부터 파악할 수 있었다. 이에 따라 암석의 강도를 보다 정확히 그리고 보다 용이하게 예측할 수 있는 새로운 방법이 요구되고 있다. 이와 같은 요구에 부응하고 기존 시험법들의 문제점들을 최소화하면서 암석의 압축강도를 보다 정확하게 예측하기 위한 새로운 비파괴시험법을 개발하는 것은 매우 중요한 것이라 판단된다.

본 연구는 이와 같은 기존 직접 및 간접강도측정법에서 야기되는 여러 가지 결점 및 문제점들을 해소하면서 암석의 비파괴 압축강도를 보다 신뢰성 있게 산정할 수 있는 방법을 강구하기 위해 수행되었다. 이와 관련하여 Son & Kim(2017)은 사운드 응답신호를 이용하여 암석 및 콘크리트의 비파괴 압축강도를 산정하는 방법에 대해서 보고한 바 있다. 본 연구에서는 사운드 신호가 아닌 자유낙하에 의한 암석타격 시 초기타격 및 반발작용에 의한 연속적인 반복타격 시 발생하는 타격력 응답신호를 모두 측정하고 이를 누적한 전체 타격력 신호에너지를 이용한 암석 비파괴 압축강도 산정 가능성에 관해 연구를 수행하고 그 결과를 제시하고자 한다.

2. 암석강도에 영향을 미치는 인자

암석의 일축압축강도는 다양한 인자에 의해서 영향을 받을 수 있으며 암석재료에 관련된 것과 시험조건에 관련된 것으로 크게 분류할 수 있다. Shalabi 등(2007)은 암석의 일축압축강도는 단위중량(밀도) 및 탄성계수에 비례하고 간극율에 반비례함을 보고하였다. Rashed et al.(2014)도 암석의 일축압축강도는 단위중량에 비례(간극율에 반비례)한다고 보고하였다. Tronvoll & Fjær(1993)은 엽리구조 등의 암석 내 구조적 및 광물적 비등방성(anisotropy)이 압축강도에 크게 영향을 미칠 수 있다고 보고하였다. 온도 또한 암석강도에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 건조상태의 암석보다는 포화상태에서 암석의 강도변화가 더 크다는 것을 보고하였다(Mellor, 1971). Sygala 등(2013)은 섭씨 400~600도 사이의 온도에서 암석의 강도에 큰 변화가 발생된다고 보고하였다. Vászárhelyi(2003)은 포화상태에서의 압축강도가 건조상태에서의 압축강도보다 더 작게 발생한다고 보고하였다. 이와 같은 이유로는 암석 내에 발생하는 간극수압이 주요원인으로 작용하였기 때문이다. 암석의 강도는 구속압력에 의해서도 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 하지만 일축압축강도는 일축압력 하에서 측정되는 구속압력과는 무관한 역학적 물성치이다.

압축강도 시험조건 또한 일축압축강도에 영향을 미칠 수 있다. Tuncay & Hasancebi(2009)는 암석시편의 길이(L) 및 직경(D), 비(L/D)와 암석의 일축압축강도를 비교한 실험으로부터 그 비가 증가할수록 강도가 줄어드는 경향을 보이며 2~2.5 사이에서는 매우 작은 변화가, 2.5 보다 큰 경우에는 거의 일정한 값을 나타낸다고 보고하였다. 하중재하 속도도 압축강도(탄성계수에 비례함)에 영향을 미치는 것으로 보고되었다(John, 1972). Lama와 Vutukuri(1978)에 의하면 단단하고 강한 암석은 하중재하속도에 큰 영향을 받지 않으나 그렇지 않은 암석은 재하속도가 증가하면 탄성계수(압축강도와 비례관계)도 크게 측정될 수 있다고 보고하였다. 암석시편의 크기 또한 압축강도에 영향을 미칠 수 있는 것으로

보고되고 있지만 암석시편의 크기와 강도와의 관계는 연구자에 따라 차이가 있다. 이와 같은 결과로부터 암석시편 크기의 강도에 대한 영향은 암석의 형성과정과 구성광물 등의 다양한 다른 인자에 의해서 또 다른 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

이처럼 암석의 강도는 암석재료 자체뿐만 아니라 시험조건에 따라 다양하고 복잡하게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 여러 조건을 고려하면서 암석강도를 보다 정확하고 신속하게 측정하기 위한 기술의 개발은 지반 및 구조물의 붕괴를 감소시켜 시민의 안전을 확보하고 다양한 산업적 경제적 이익을 창출할 수 있다는 점에서 매우 중요한 사항 중의 하나인 것으로 판단된다.

3. 실험방법 및 절차

3.1 다양한 종류의 암석 코어링을 통한 다수의 시험공시체 제작

다양한 현장에서 지반조사 시 채취한 암석코어를 지반조사업체를 통해 획득하고 실험실로 옮긴 후 암석절단기 및 연마장치를 이용하여 암석 시험공시체를 제작하였다. 시험공시체의 크기는 직경 50mm, 높이 100mm의 크기로 제작하였으며 제작된 암석 시험공시체의 암석종류 및 공시체의 수는 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

3.2 시험공시체에 대한 타격력 신호 파악 및 타격력 신호에너지 산정

제작된 암석 시험공시체는 타격력 신호 발생 및 분석장치

Table 1. Number of test specimens used in this study

Rock type	Number of test specimen
Shale	12
Granite	12
Granitic gneiss	12



Fig. 1. Rock test specimens (shale, granite, granitic gneiss) used in this study

(Fig. 2)를 사용하여 각 시험공시체의 중앙부를 초기타격하고 타격에너지가 없어질 때까지의 반발타격에 대한 응답시그널을 측정하고 전체 타격력 신호에너지를 산정하였다.

본 연구에 사용된 타격장치는 타격높이 조절대, 타격봉(길이: 200mm, 직경: 2mm), 타격구(15mm 직경) 및 타격력 측정 센서(Dytran 1053V4)로 이루어졌으며 타격봉의 일단에 타격력 측정 센서가 결합되고 차례로 타격구가 타격력 측정 센서에 결합되는 형태로 제작하였다. 타격봉의 타단은 타격높이 조절대에 힌지로서 연결되어 회전 자유낙하에 의한 시편의 초기타격 후 반발작용에 의한 연속적인 반발타격이 발생할 수 있도록 하였다. 시편타격으로부터 발생하는 타격력 응답신호의 측정 및 분석은 타격력 측정 센서, 센서로부터 측정된 신호

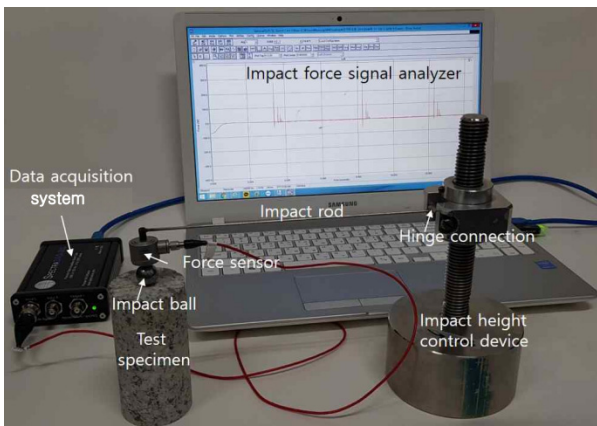


Fig. 2. Impact force signal measurement system

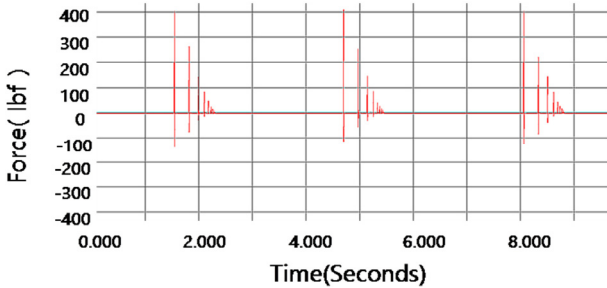
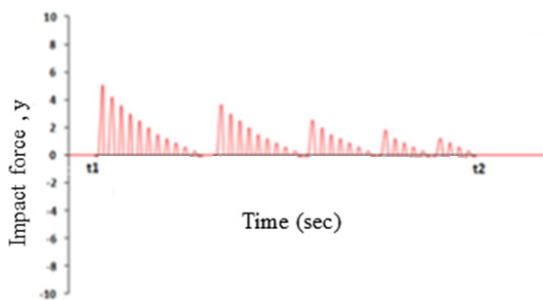
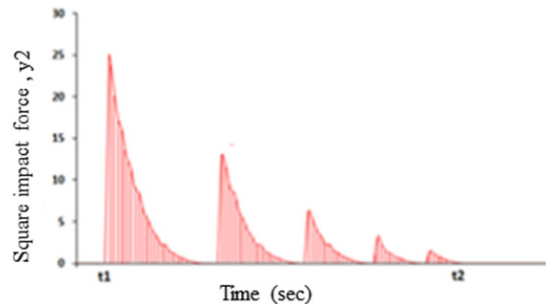


Fig. 3. Measured impact force signals (time vs force) from 3 times impacts for a granite test specimen



(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

를 케이블을 통해 획득하는 신호획득장치(SpectraDAQ-200), 획득된 신호를 분석하는 신호 분석프로그램(SpectraPLUS-SC)으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 준비된 공시체를 타격하기 전에 타격이 가해지는 표면을 연마석을 이용하여 평탄하게 연마하였다. 연마가 된 공시체의 중앙부에 3회의 타격을 가해 응답신호를 측정하고 평균값을 이용하였다. 각 타격 당 초기타격은 타격봉을 공시체의 상단면과 89°의 각도를 이루는 위치에서 회전 자유낙하 운동에 의해 이루어졌으며 초기타격 후 타격구의 반발작용에 의한 연속적인 반발타격이 자유롭게 발생하여 소멸될 때까지 타격력 응답신호를 측정하였다(Fig. 3).

각 시험공시체당 측정된 3개의 응답신호로부터 3개의 타격력 신호에너지를 산정하고 그 값들을 평균한 값을 각 공시체의 타격력 신호에너지로 사용하였다. 타격력 신호에너지는 발생신호 전체에 대한 전체 타격력 신호에너지(TIFSE: Total Impact Force Signal Energy)로서 정의하고 아래와 같이 계산하였다(Fig. 4 참조).

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

여기서, t_1 : 신호 시작시간, t_2 : 신호 종결시간, y^2 : 진폭(타격력)의 제곱

3.3 시험공시체에 대한 직접 압축강도 측정

타격력 응답시험이 끝난 시험공시체는 타격력 신호응답으로부터 산정한 전체 타격력 신호에너지의 크기와 직접 측정된 압축강도와의 관계를 파악하기 위하여 직접압축강도 시험을 실시하고 시편별 직접압축강도를 측정하였다. Fig. 5는 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. 이와 같이 하나



Fig. 5. Universal test machine for measuring direct compressive strength

의 시험공시체에 대하여 타격력 신호에너지와 직접압축강도의 두 시험결과 값을 획득하였다. 이와 같은 과정을 반복하여 세 가지 종류의 암석 시험공시체에 대하여 타격력 신호에너지와 직접압축강도의 시험결과를 획득하고 그 관계성을 분석하였다.

4. 전체 타격력 신호에너지와 일축압축강도 비교분석

타격력 신호특성으로부터 산정된 공시체별 전체 타격력 신호에너지와 일축압축강도 측정결과를 토대로 서로 다른 종류의 암석 시험공시체에 대하여 그 상관성을 분석하였다. 암석은 셰일, 화강암, 화강편마암의 세 종류로 나누어 구분하였다. Figs. 6~8은 암석종류에 따른 전체 타격력 신호에너지와 일축압축강도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 전체 타격력 신호에너지가 증가할수록 측정된 암석의 일축압축강도 또한 전반적으로 증가한다는 것을 알 수 있으나 암석의 종류 및 특성에 따라 그 관계가 조금씩 차이가 난다는 것을 알 수 있다. 다른 암석에서도 일부 나타

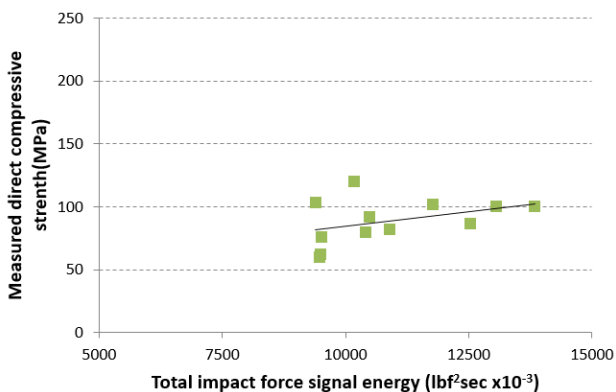


Fig. 6. Comparison of total impact force signal energy and measured direct compressive strength (Shale)

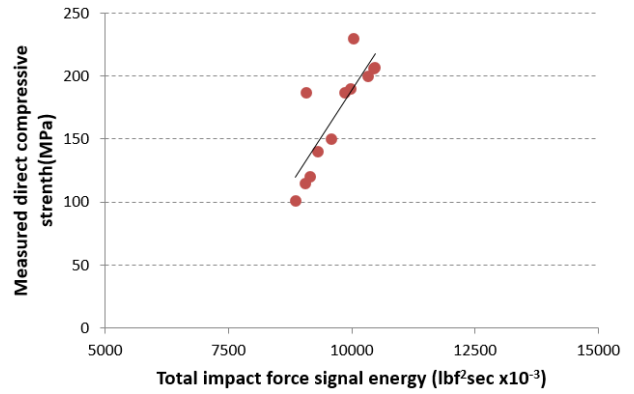


Fig. 7. Comparison of total impact force signal energy and measured direct compressive strength (Granite)

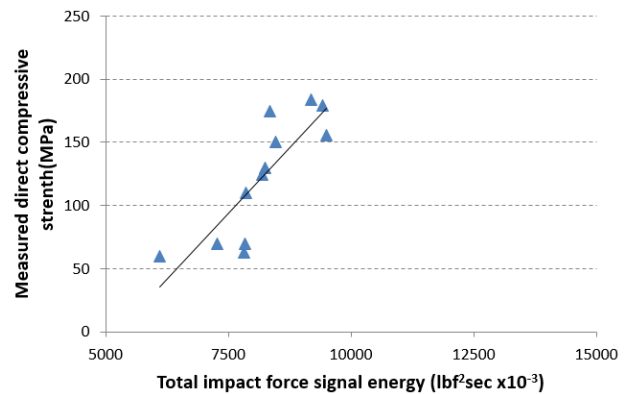


Fig. 8. Comparison of total impact force signal energy and measured direct compressive strength (Granitic gneiss)

났지만 특히 화강편마암의 경우 타격력 신호는 크게 측정되었으나 측정된 일축압축강도는 작게 나타나는 경우가 많이 발생하였는데, 이는 암석을 이루고 있는 광물의 특성 및 입자구조, 암석시편 내에 존재하는 엽리 또는 약한 면의 존재에 기인한 것으로 판단된다. 다시 말해서, 암석 내의 불연속면인 엽리나 균열 등의 약한면이 존재하면 암석의 타격력 신호에너지와 일축압축강도의 상관성은 낮아지는 것으로 나타났다. 제한된 수의 시편을 통한 분석으로서 암석시편의 수가 증가하면 그 상관성은 보다 뚜렷해질 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 암석시편을 타격하여 발생하는 타격력 응답신호를 조사하고 이를 암석의 비파괴 강도측정을 위한 하나의 방법으로서의 가능성을 검토하기 위하여 먼저 타격력 발생

장치를 고안하고 타격신호 측정장치를 구축하였다. 타격장치는 회전 자유낙하에 의한 암석시편의 초기타격 후 반발작용에 의한 연속적인 반발타격이 발생할 수 있도록 하여 암석재료의 에너지감쇠특성을 보다 잘 반영할 수 있도록 하였다.

- (2) 서로 다른 종류의 암석 시편을 타격함으로써 발생하는 타격력 응답신호로부터 계산한 전체 타격력 신호에너지와 직접 측정된 압축강도시험 결과를 비교함으로써 서로 다른 종류의 암석에 대한 타격력 신호에너지와 압축강도와의 관계특성을 파악할 수 있었다.
- (3) 암석시편에 대한 타격력 응답신호로부터 계산한 시편별 전체 타격력 신호에너지와 직접 측정된 압축강도를 서로 비교한 결과, 전반적으로 전체 타격력 신호에너지가 증가할수록 측정된 압축강도 또한 증가한다는 것을 알 수 있었다. 다시 말해서 타격으로 인해 발생한 전체 타격력 신호에너지는 암석의 압축강도와 밀접한 관계를 가진다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 화강편마암의 경우 타격력 신호는 크게 측정되었으나 측정된 일축압축강도는 작게 나타나는 경우가 많이 발생하였는데 이는 암석을 이루고 있는 광물의 특성 및 입자구조, 암석시편 내에 존재하는 엽리 또는 약한 면의 존재에 기인한 것으로 판단된다. 다시 말해서, 암석 내의 불연속면인 엽리나 균열 등의 약한면이 존재하면 암석의 타격력 신호에너지와 일축압축강도의 상관성은 낮아지는 것으로 나타났다.
- (5) 본 연구에서는 타격력 응답신호를 이용하여 암석시편의 압축강도를 비파괴적으로 산정할 수 있는 가능성을 파악하고자 하는 연구를 수행하였으며 압축강도 산정식의 제안은 향후 암석종류 및 시험조건, 시편의 수 등의 다양한 경우를 고려한 많은 실험을 통한 자료축적 이후의 과제로 남겨두고자 한다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 결과가 향후 암석의 압축강도 산정을 위한 비파괴 강도 측정 분야에 새로운 정보를 제공하고 일익을 담당할 수 있기를 기대한다.

References

1. ASTM D7012-14 (2014), American Society for Testing and Materials, Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures, Vol. 04.09. Pennsylvania.
2. Goktan, R.M. and Gunes, N. (2005), A comparative study of Schmidt hammer testing procedures with reference to rock cutting machine performance prediction, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, pp. 466-477.
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. ISRM (International Society for Rock Mechanics) (2007), The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006 (Eds. Ulusay&Hudson).
6. John, M. (1972), "The Influence of Loading Rate on Mechanical Properties and Fracture Processes of Rock", Republic of South African CSIR, Meg. 1115, p. 28.
7. Kahraman, S. (2001), Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 38(7), pp. 981-994.
8. Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. (1978), Handbook on Rock Properties of Rocks, Trans Tech Publications.
9. Malhotra, V. M. (1991), "Surface hardness methods", Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Ch. 1, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, pp. 1-17.
10. Mellor, M. (1971), "Strength and Deformability of Rocks at Low Temperatures", CRREL RR 294.
11. Minaeian, B. and Ahangari, K. (2013), Estimation of uniaxial compressive strength based on P-wave and Schmidt hammer rebound using statistical method, *Arabian Jour. Sci.*, Vol. 6(6), pp. 1925-1931.
12. 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.
13. 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.
14. Rashed, M. A., Mnsour, A. S., Fars, H. and Afify, W. (2014), "Factors affecting the ultimate compressive strength of the Quaraternary calcarenites, north western desert, Egypt", *Int. J. of Environ., Chem., Ecolo., Geol., and Geophy. Eng.*, Vol. 8(2), pp. 117-129.
15. Sachpazis, C. I. (1990), Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 42, pp. 75-83.
16. Schmidt, E. (1951), A non-destructive concrete tester, *Concrete*, Vol. 59(8), pp. 34-35.
17. Shalabi, F. I., Cording, E. J. and Al-Hattamleh, O. H. (2007), Estimation of rock engineering properties using hardness tests, *Eng. Geol.*, Vol. 90(3-4), pp. 138-147.
18. Son, M. and Kim, M. (2017), "Estimation of the compressive strength of intact rock using non-destructive testing method based on total sound signal energy", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 40(4), pp. 643-657.
19. Son, M. and Kim, M. (2017), "Development and validation of an NDT based on total sound signal energy", *ASTM Journal of testing and evaluation*, Vol. 47(1), pp. 87-103.
20. Sygala, A., Bukowska, M. and Janoszek, T. (2013), "High temperature versus geomechanical parameters of selected rocks-The present state of research", *J. of Sustainable Mining*, Vol. 12(4), pp. 45-51.
21. Tronvoll, J. and Fjær, E., "Experimental Study of Sand Production from Perforation Cavities", Investigation of Cavity Failures for

- Sand Production Prediction, University of Trondheim, Trondheim, Norway, (August 1993), pp. 92~106.
22. Tuncay, E. and Hasancebi, N. (2009), "The effect of length to diameter ratio of test specimens on the uniaxial compressive strength of rock", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 68(4), pp. 491~497.
 23. Vásárhelyi, B. (2003), "Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in case of dry and saturated conditions", Bull. Eng. Geol. Env., Vol. 62, pp. 245~249.
 24. Yasar, E. and Erdogan, Y. (2004), Estimation of rock physico-mechanical properties using hardness methods, Eng. Geol., 71, pp. 281~288.