

연구논문

초음파 주사검층 방법을 이용한 암반강도 평가에 관한 연구

이광배¹⁾ · 허 승²⁾ · 송영수³⁾ · 송승엽³⁾ · 김학수²⁾

Assessment of the Rock Strength using Borehole Acoustic Scanner

Kwangbae Lee¹⁾, Seung Heo²⁾, Young-Soo Song³⁾, Seungyup Song³⁾ and Haksoo Kim²⁾

요 약 : 이 연구에서는 초음파 주사검층(borehole acoustic scanner)으로 얻어진 반사파의 에너지 및 도달시간 자료를 이용하여 연속적인 암반의 강도를 평가함으로써 지반의 안정성 조사나 대형 구조물의 설계 및 시공 대책을 위한 지반 정보를 제공하고자 한다. 배합비가 다른 모르타르와 콘크리트 시료와 여러 암종의 암석에 대한 실내 물성 시험을 통해 탄성과 속도, 밀도 및 일축압축강도를 측정하고, 동일한 시료에 대하여 초음파 주사검층을 실시하여 반사파의 에너지 및 도달시간 자료를 획득한 후, 실내 물성 시험 결과와 초음파 주사검층 결과를 비교 분석함으로써 초음파 주사검층의 반사파 에너지를 이용한 암반강도 평가의 정량화 가능성을 확인하였다.

주요어 : 초음파 주사 검층, 반사파 에너지, 반사파 도달시간, 암반강도, 일축압축강도

Abstract : The purpose of this study is to provide the geo-technical information by assessment of the in-situ rock strength using the reflected wave energy and travel time data acquired by the borehole acoustic scanner. In order to compare and analyze the relationship between the uniaxial compressive strength and the reflected wave energy, the laboratory test and the borehole acoustic scanning were conducted for the set of specimens, such as mortar, concrete, and rock samples which have different rock type. Finally, we verified the applicability of the reflected wave energy acquired by the borehole acoustic scanner to quantitatively estimate the in-situ rock strength.

Keywords : borehole acoustic scanner, reflected wave energy, reflected wave travel-time, rock strength, uniaxial compressive strength

서 론

최근 국내의 시추공 물리탐사 기술은 각종 건설이나 토목 및 환경, 지하수 개발 등 산업계에서 지표 물리탐사와 더불어 적용이 활발하게 이루어지고 있다. 시추공 물리탐사 기술 중 시추공 벽면의 영상을 획득하여 암반의 불연속면의 특성을 파악하기 위한 다양한 기법들이 사용되는데, 그 중 초음파 빔을 송신원으로 사용하는 초음파 주사검층 기법은 불연속면 분포 특성은 물론 다양한 해석 기법들을 통한 암반의 역학적 특성을 파악하는데 응용되고 있다(김중열, 김유성, 1999).

초음파 주사검층의 주요 측정 대상은 시추공의 중심에서 공벽을 향하여 초음파 빔을 방사하였을 경우, 공내 매질(일반적으로 지하수)과 공벽을 이루는 암반의 탄성과 임피던스(밀도 탄성과속도) 차이에 의해 발생하는 반사파의 도달시간(주시) 및 에너지(진폭)이다. 초음파 주사검층에서 측정된 반사파의 에너지 및 주시를 방향(자북 기준) 및 심도에 따라 영상으로

표현하면, 시추공 벽면에 나타난 불연속면의 방향과 경사각을 측정할 수 있다. 또한 반사파 에너지는 암반의 탄성과 임피던스의 변화를 직접적으로 반영하므로, 측정된 진폭값에 상수배의 교정값을 적용하면 텔레뷰어 암석강도를 계산할 수 있으며, 이는 토목 설계 및 시공시 암반을 구분하는 기준인 일축압축강도에 대한 보조 자료로 이용된다(김중열, Schepers, 1995).

이 연구에서는 초음파 주사검층으로부터 얻어진 진폭을 이용하여 상대적 암반강도를 추정하는 기존의 방법에서 탈피하여 보다 정확한 암반강도 평가를 위해 주시가 고려된 진폭 변화 특성과 일축압축강도의 관계를 분석하였다. 다양한 강도를 갖는 시료에 대한 분석을 위하여 각기 다른 배합비를 갖는 모르타르와 콘크리트 시료를 제작하고 여러 가지 암석 시료를 수집하였다. 일축압축 시험을 수행하기 위해서 각각의 시료로부터 직경 55.5 mm의 시험편을 채취하였고, 초음파 주사검층을 실시하기 위해 각각의 시료에 NX 규격(내경 76 mm)으로 코어링을 실시하였다. 각 시험편에 대하여 탄성과속도, 밀도

*2004년 10월 5일 접수

1) 지하정보기술(주)
2) ㈜지오제니컨설팅트
3) 전북대학교 자원·에너지공학과

및 일축압축강도를 측정하였고, 시료에 초음파 주사검층을 실시하여 반사파의 에너지와 주시 자료를 측정하였다. 시험편에서 구한 일축압축강도와 초음파 주사검층을 통한 반사파 에너지의 상관성을 고찰함으로써 초음파 주사검층 자료로부터 암석의 일축압축강도에 대한 정량적인 정보를 도출하고자 하였다.

이 론

초음파 주사검층의 반사파 에너지에 영향을 미치는 요소

초음파 주사검층(borehole acoustic scanner)은 주주파수가 약 1.4 MHz인 초음파 빔(beam)을 시추공 내벽에 주사하여 공내 매질과 공벽을 이루는 암반의 탄성과 임피던스 차이에 의해 발생하는 반사파의 진폭 및 주시를 분석함으로써 불연속면(예: 절리, 단층)의 틈새 및 간격, 주향 및 경사각, 암질의 변화 내지 암반의 역학적 상태 등의 정보를 획득하는 시추공 물리검층 기술이다.

초음파 주사검층에서 초음파 빔을 시추공 벽면에 입사시키면 시추공 벽면에서 반사되는 탄성파의 에너지(진폭)는 초음파 빔의 입사각, 경계면에서의 탄성과 임피던스 차이와 경계면의 거칠기에 따라 변화한다(김중열 등, 1993). 따라서 초음파 주사검층의 진폭은 입사파 에너지에 대한 반사파 에너지의 비와 같다.

반사계수

초음파 빔의 입사각이 임계각보다 작을 경우 입사파 진폭과 반사파 진폭의 비 즉, 반사계수 R 은 식 (1)을 1차 근사로 사용할 수 있으며, 입사각이 약 6° 미만에서는 식 (1)이 유효하다(김중열, Schepers, 1995).

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \quad (1)$$

여기서, V_i : 각 매질의 탄성파(P파) 속도

ρ_i : 각 매질의 밀도

일반적으로 시추공에서 초음파 주사검층을 실시할 경우, 시추공 내부에 지하수가 존재하므로 초음파 주사검층에 적용되는 반사계수 R' 은 식 (2)와 같이 변형할 수 있다(김중열, Schepers, 1995).

$$R' = \frac{\rho_R V_R - \rho_W V_W}{\rho_R V_R + \rho_W V_W} = \frac{I_R - I_W}{I_R + I_W} \quad (2)$$

여기서, I_R : 암반의 탄성과 임피던스

ρ_R : 암반의 밀도(g/cm^3)

V_R : 암반의 P파 속도(m/sec)

I_W : 지하수의 탄성과 임피던스

ρ_W : 지하수의 밀도($\approx 1 g/cm^3$)

V_W : 지하수의 P파 속도($\approx 1500 m/sec$)

벽면의 거칠기

초음파 빔이 시추공 벽면에 입사되면, 반사파 에너지는 시추공 벽면의 거칠기 정도에 따라 산란(scattering)하게 된다. 시추공 벽면의 거칠기 정도는 불연속면의 존재 혹은 암반 구성 물질의 경도 및 시추시 작업 여건 등에 따라 결정되며, 벽면이 거칠수록 반사파 에너지는 감소된다. 이러한 산란 현상은 절리 및 파쇄대가 발달한 구간에서 뚜렷하게 관찰되기 때문에 초음파 주사검층을 통한 불연속면 파악의 중요한 요소가 된다.

초음파 빔의 입사각

초음파 주사검층을 수행할 때 시추공 단면상의 센서 위치 및 시추공 벽면의 형상에 따라 초음파 빔의 입사각이 변한다. 원형의 시추공에서 센서가 시추공 단면의 정중앙에 위치하면 시추공 단면상의 모든 지점까지의 거리가 동일하게 되고, 동시에 모든 지점에서 수직입사 상태가 되므로 반사계수 및 공벽의 거칠기가 일정한 경우 동일한 반사파 에너지가 측정된다. 그러나 일반적인 경우 센서는 시추공 단면상에 편심된 지점에 위치하게 되고 이 때문에 센서로부터 시추공 벽면까지의 거리와 초음파 빔의 입사각이 변하게 되며, 거리 및 입사각에 따라 반사파 에너지의 감소 현상이 발생한다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 센트럴라이저 등의 보조 장비를 사용하여 시추공 단면상의 중앙에 센서를 위치시켜 자료를 측정하여야 한다. 또한, 시추공 단면의 형상이 원형이 아닐 경우, 즉 시추공 벽면에 굴곡이 있을 경우 입사각이 변하게 되며, 이에 따라 측정되는 반사파 에너지도 변하게 된다. 시추공 벽면에 불연속면이 존재할 경우 시추공 단면의 형상도 변하는 것이 일반적이며, 이러한 시추공 단면 형상의 변화는 반사파의 에너지뿐만 아니라 반사파의 도달시간을 통해서도 확인할 수 있다.

실험 방법

이 연구에서는 다양한 강도를 갖는 시료에 실험을 적용하기 위하여 모르타르 및 콘크리트 시료를 제작하고, 여러 지역에서 암석 시료를 채취하여 실내 물성 시험 및 초음파 주사검층을 시행하였다. 모르타르 및 콘크리트 시료의 경우 서로 다른 배합비를 적용하여 강도의 변화를 주었으며, 암석 시료의 경우 다양한 지역에서 여러 암종의 시료를 채취하였다. 준비된 시료에 대한 물성 측정을 위하여 각각 시험편을 채취하고, 각 시험편에 대하여 밀도, 탄성과 속도 및 일축압축강도를 실내 물성 시험을 통하여 측정하였다. 또한, 각각의 시료에 대하여 NX 규격으로 코어링을 실시하여 초음파 주사검층을 수행하였다.

시료 제작 및 수집

다양한 강도를 갖는 시료를 확보하기 위하여 Table 1과 같이 서로 다른 배합비를 갖는 모르타르와 콘크리트 시료를 각각 8개씩 제작하였다. 각 시료는 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 300$

Table 1. The specification of the mortar and concrete specimens.

Sample Type	Mortar	Concrete
Number of Samples	8	8
Mixture Volume Ratio	Cement : Sand = 1 : 1.0~4.5	Cement : Sand : Gavel = 1 : 0.35~1.3 : 0.35~1.3
Dimension	250 mm × 250 mm × 300 mm (width × length × height)	

mm (가로×세로×높이)의 크기로 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement), 모래 및 자갈을 혼합하여 재령일 28일 동안 표준 양생하여 제작하였다.

또한 Table 2에 정리한 바와 같이 여러 지역에서 다양한 암종의 암석 시료를 수집하여 실험에 적용하였다. 암석 시료는 전북 일원의 야산 및 석산 현장의 지표에서 수집하였으며, 가급적 모르타르 및 콘크리트 시료와 비슷한 크기를 수집하였다. 암석 시료의 경우 서로 다른 암종의 시료를 수집함으로써 다양한 물성을 갖는 시료를 확보하고자 하였다. 석산 현장 주변에서 수집한 암석 시료는 상대적으로 신선한 상태인 것으로 판단되며, 암종은 안산암과 응회암이다. 한편 야산의 노두에서 수집한 암석 시료는 겉으로 보아 다소 풍화가 진행된 상태이며, 암종은 화강암과 편마암이다.

실내 물성 시험

모르타르, 콘크리트 시료 및 지표에서 수집한 암석 시료에 대하여 직경 55.5 mm, 높이 111 mm의 원통형 시험편을 2~3 개씩 채취한 후 실내 물성 시험을 실시하였다. 채취된 시험편은 건조로에서 110±5 °C의 온도로 24시간 이상 건조시킨 다음 탄성과 속도 및 밀도를 측정하고, 이로부터 탄성과 임피던스(밀도×탄성과속도) 및 반사계수를 계산하였다. 또한 각각 시험편에 대하여 일축압축강도 시험을 수행하였다.

Table 2. The specification of the rock samples.

Sample Type	Outcrop
Number of Samples	13
Rock Type	Granite, Andesite, Tuff, Gneiss
Location	Jinan, Sunchang, Imsil

콘크리트 시료 중 자갈의 입도가 큰 시료의 경우 시험편 채취시 자갈에 비트가 직접 접촉될 경우 급격한 물성 변화로 인하여 코어링이 힘들었고 경우에 따라서는 자갈이 이탈하는 현상을 보이기도 하였다. 또한 콘크리트 시료에 대한 일축압축시험시 골재의 불균일성 때문에 비정상적인 시험 결과를 보이는 시험편은 자료 분석시 제외하였다.

암석 시료 중 야산에서 채취한 시료의 경우, 모양이 불규칙하여 시험편 채취시 곤란을 겪었으며, 코어링시 구멍의 단면이 원형을 이루지 못하고 변형되는 현상이 관찰되었다. 또한, 일축압축시험 결과 풍화에 의해 내재된 것으로 판단되는 불연속면의 영향을 받아 비정상적인 시험 결과를 보인 시험편이 확인되었다. 이러한 경우 역시 결과 분석시 제외하였다.

초음파 주사검층 실험

초음파 주사검층 장비는 룩셈부르크 ALT에서 제작된 FAC-40을 사용하였다. 초음파 주사검층에서 획득되는 자료는 초음파 빔의 입사각에 민감하게 반응하기 때문에, 센서가 시추공의 중앙에 위치하도록 세심한 주의를 기울이며 자료를 획득하였다. 일반적으로 초음파 주사검층을 수행하여 획득되는 주요 자료는 반사파의 에너지를 송신파의 에너지로 나눈 형태의 진폭값과, 반사파의 도달시간이다. 이 연구에서는 측정된 진폭값을 측정 장비의 최대 진폭값으로 정규화하여 반사에너지율(RER),

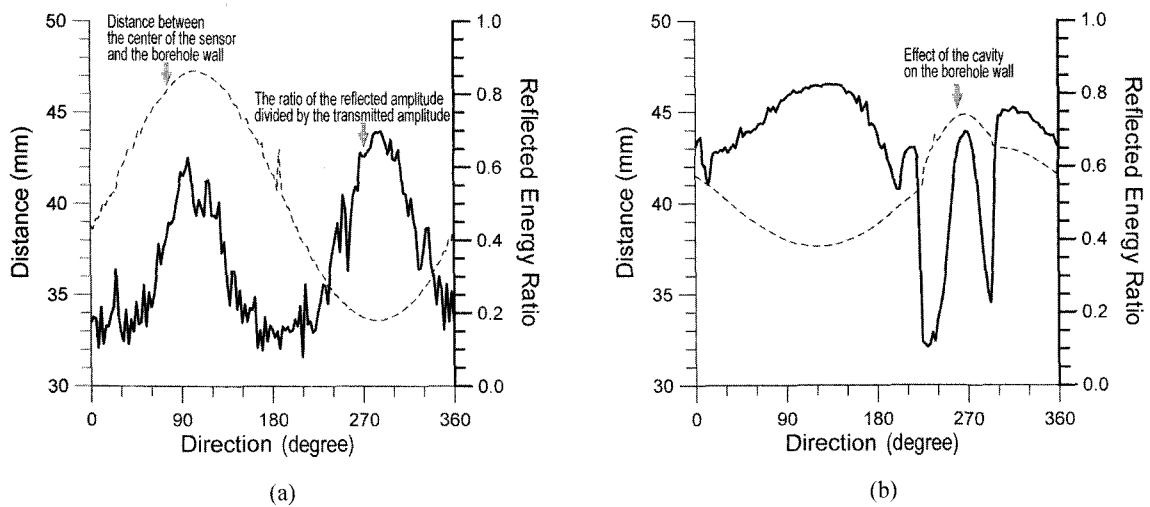


Fig. 1. The distance and reflected energy ratio converted from the travel time and amplitude measured using borehole acoustic scanner. (a) The measured distance and reflected energy ratio in case that the sensor is not located at the center of the borehole, (b) The measured distance and reflected energy ratio in case that the borehole wall has a cavity.

Reflected Energy Ratio)로 표현하였다. 또한 측정된 주시 값은 센서의 중심에서 반사파가 발생한 지점(시추공 벽면)까지의 거리로 변환하여 표시하였다. Fig. 1은 센서가 1회전 하여 획득한 반사파의 진폭과 주시를 반사에너지율 및 공벽까지의 거리로 변환하여 자북을 기준으로 방위각에 따라 도시한 예이다.

단면이 원형인 시추공에서 초음파 주사검층 센서가 시추공의 정 중앙에 위치할 경우, 초음파 빔은 모든 지점에서 시추공 벽면에 수직으로 입사하게 된다. 그러나, 시추공에 센서가 편심되어 위치할 경우, 센서로부터의 거리가 최소 또는 최대가 되는 두 지점에서만 수직입사가 이루어지게 되고, 수직입사가 이루어지지 않는 지점에서는 진폭이 감소하게 된다. Fig. 1(a)에 도시된 바와 같이 센서의 중앙에서 공벽까지의 거리가 최대가 되는 지점(280° 부근)에서 최대 반사에너지율이 측정되며, 입사각이 작아질수록 반사에너지율이 감소함을 확인할 수 있다. 또한 거리가 최소가 되는 지점(100° 부근)에서도 수직 입사가 이루어지므로 반사에너지율이 증가함을 확인할 수 있다. 한편 시추공 단면이 원형을 이루지 못하는 경우, 즉 공벽이 변형된 부분에서는 초음파 빔이 산란 현상을 일으켜 진폭값의 감소가 발생한다. Fig. 1(b)는 코어링을 실시할 때 자갈이 이탈되어 공벽이 패인 콘크리트 시료에 대한 초음파 주사검층 결과이다. 변형이 발생한 경계부에서 급격한 반사에너지의 감소가 확인되며, 각각 수직입사가 발생한 부분에서 상대적으로 높은 반사에너지가 측정됨을 확인할 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 입사각 및 산란현상에 의한 영향을 최소화시키기 위해 측정된 자료 중 센서에서부터 공벽까지의 거리가 최소인 지점의 좌우 15° 구간(총 30° 구간)에서 측정된 값을 평균하여 반

사에너지율의 대표값으로 채택하였다.

실험 결과 및 고찰

모르타르 및 콘크리트 시료에 대한 결과

모르타르 및 콘크리트 시료에 대하여 실내 시험을 통해 측정된 물성과 초음파 주사검층을 수행하여 획득한 반사에너지율을 시료의 종류에 따라 Table 3에 정리하였다. 모르타르 시료의 경우 모래의 비율이 증가함에 따라 탄성과 속도 및 밀도가 증가하며, 동시에 일축압축강도 및 반사에너지율이 증가함을 확인할 수 있다. 콘크리트 시료의 경우, 측정된 결과가 다소 불규칙한 분포 특성을 보인다. 이는 혼합된 골재 중 자갈이 시료의 불균질성을 초래한 결과로 판단되며, 일축압축강도는 모르타르 시료보다 낮은 분포를 보이는 현상을 확인할 수 있다.

암석 시료에 대한 결과

암석 시료에 대하여 실험 결과를 암종에 따라 Table 4에 정리하였다. 하나의 시료에서 채취한 여러 시험편 중 비정상적인 결과를 보인 시험편에 대한 자료는 분석에서 제외하였다. 암석 시료에 대한 실험을 수행한 결과 밀도는 2.5~2.77 g/cm³, 탄성과 속도는 3,798~5,280 m/sec의 분포를 보이며, 일축압축강도는 932~2,588 kgf/cm²의 다양한 분포를 보인다. 야산에서 수집한 화강암 및 편마암 시료에 비해 석산 현장 근처에서 수집한 안산암 및 응회암 시료의 일축압축강도가 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 풍화 정도 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

Table 3. The physical properties of the mortar and concrete specimens.

Specimen Type	P-wave Velocity (m/sec)	Density (g/cm ³)	Acoustic Impedance (10 ³ × kg/m ² sec)	Reflection Coefficient	Uniaxial Compressive Strength (kgf/cm ²)	Reflected Energy Ratio	Mixture Volume Ratio (Cement:Sand:Gravel)
Mortar	2,571	1.86	4,791	0.52	138	0.432	1 : 1.0 : 0
	3,089	1.94	6,007	0.60	226	0.513	1 : 1.5 : 0
	3,225	1.98	6,379	0.62	309	0.544	1 : 2.0 : 0
	3,199	1.99	6,365	0.62	325	0.548	1 : 2.5 : 0
	3,396	1.99	6,749	0.64	516	0.549	1 : 3.0 : 0
	3,563	2.04	7,277	0.66	542	0.585	1 : 3.5 : 0
	3,489	2.03	7,077	0.65	577	0.504	1 : 4.0 : 0
	3,714	2.05	7,613	0.67	622	0.603	1 : 4.5 : 0
Concrete	3,434	2.06	7,079	0.65	374	0.540	1 : 0.35 : 0.65
	3,450	2.10	7,251	0.66	421	0.533	1 : 0.45 : 0.55
	3,487	2.10	7,325	0.66	403	0.572	1 : 0.55 : 0.45
	3,553	2.15	7,630	0.67	460	0.546	1 : 0.65 : 0.35
	3,514	2.07	7,251	0.66	457	0.606	1 : 0.70 : 1.30
	3,673	2.13	7,836	0.68	469	0.562	1 : 0.90 : 1.10
	3,463	2.14	7,896	0.68	516	0.582	1 : 1.10 : 0.90
	3,564	2.10	7,079	0.65	441	0.643	1 : 1.30 : 0.70

Table 4. The physical properties of the rock samples collected from the outcrops.

Rock Type	P-wave Velocity (m/sec)	Density (g/cm ³)	Impedance (10 ³ × kg/m ² sec)	Reflection Coefficient	Uniaxial Compressive Strength (kgf/cm ²)	Reflected Energy Ratio	Location
Granite	4,303	2.63	11,307	0.77	1,601	0.826	Jinan
	4,154	2.51	10,437	0.75	997	0.715	
	4,388	2.56	11,247	0.76	1,155	0.674	
	4,200	2.62	11,002	0.76	1,659	0.582	
Andesite	5,050	2.62	13,245	0.80	2,108	0.674	Imsil
	5,280	2.68	14,163	0.81	1,065	0.651	
	4,847	2.64	12,789	0.79	2,588	0.755	
	4,725	2.59	12,256	0.78	2,561	0.720	
Tuff	4,915	2.77	13,591	0.80	2,377	0.728	Sunchang
	4,659	2.75	12,873	0.79	2,022	0.702	
	4,421	2.57	11,353	0.77	2,077	0.723	
Gneiss	4,168	2.56	10,659	0.75	1,312	0.823	Sunchang
	3,798	2.50	9,507	0.73	932	0.650	

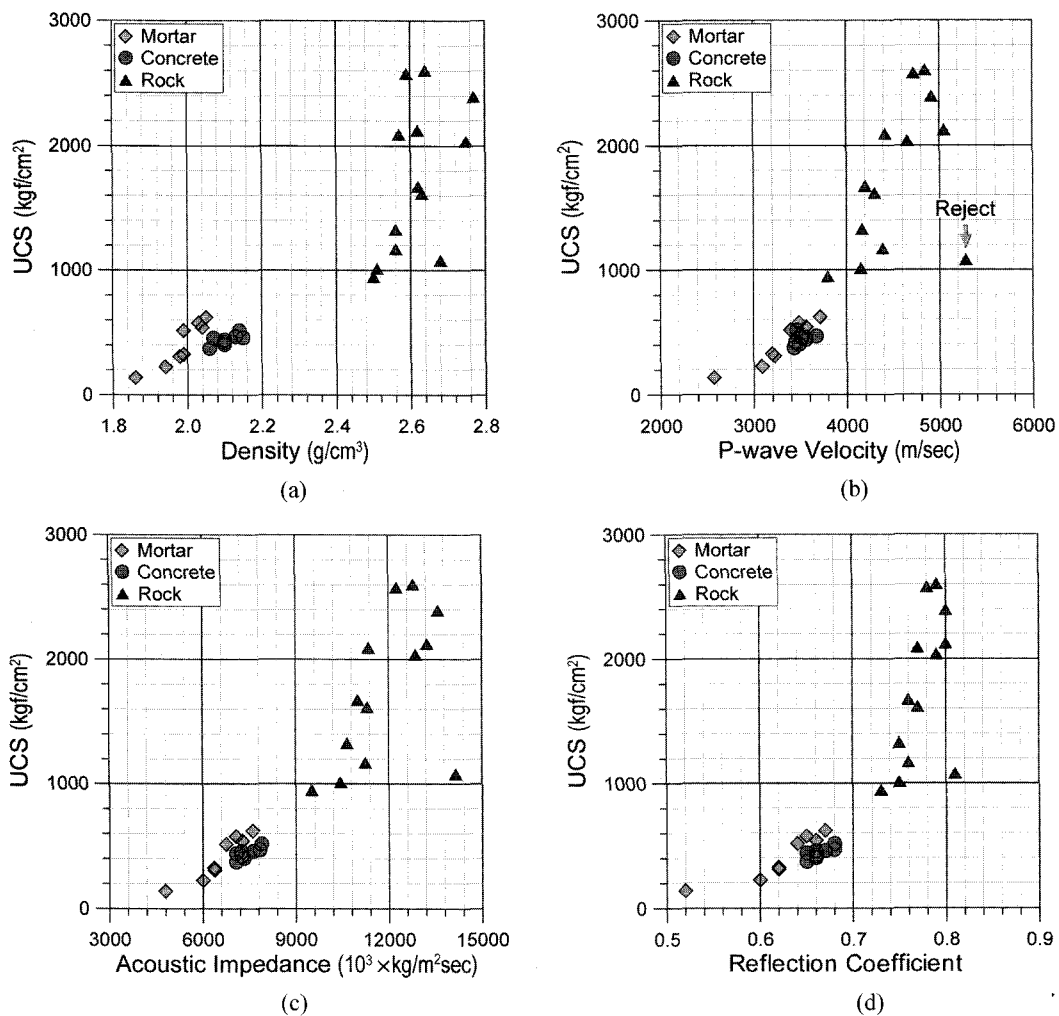


Fig. 2. Comparison of the uniaxial compressive strength(UCS) with (a) the density, (b) the P-wave velocity, (c) the acoustic impedance and (d) the reflection coefficient.

실내 물성 시험 결과의 상관성 분석

Fig. 2는 실내 물성 시험에서 측정된 밀도, 탄성과 속도 및 이로부터 계산된 탄성과 임피던스 및 반사계수와 일축압축강도 간의 상관성을 도시한 그래프이다. Fig. 2에 도시된 바와 같이 밀도 및 탄성과 속도와 일축압축강도는 서로 비례하는 관계를 보이며, 탄성과 속도에 따른 일축압축강도의 상관 관계가 밀도와 일축압축강도와의 상관관계보다 변별도가 높은 것으로 판단된다. Fig. 2(c)와 (d)에 도시된 바와 같이, 밀도 및 탄성과 속도로부터 계산된 탄성과 임피던스 및 반사계수는 일축압축강도와 지수함수적 비례관계를 보인다. 특히 초음파 주사검층의 반사에너지율에 직접적인 영향을 주는 반사계수와 일축압축강도의 상관 관계를 통해서 초음파 주사검층의 반사에너지율이 일축압축강도에 대한 지표로서 활용될 수 있음을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 2(b)에 도시된 바와 같이 암석 시료 중 탄성과 속

도는 5,200 m/sec 이상으로 측정되었으나 일축압축강도가 상대적으로 낮게 측정된 시료의 경우, 실내 물성 시험 수행시에 외관상으로 확인되지는 않았지만 내재된 불연속면에 의해 비정상적인 결과를 보인 것으로 판단되어 반사에너지율과의 비교 분석에서는 제외하였다.

실내 물성 시험 결과와 초음파 주사검층 결과의 상관성 분석

실내 물성 시험에서 측정된 밀도, 탄성과 속도 및 이로부터 계산된 탄성과 임피던스 및 반사계수를 초음파 주사검층으로 획득한 반사에너지율과 비교하기 위하여 Fig. 3과 같이 도시하였다. 시료의 밀도 및 탄성과 속도가 증가함에 따라 반사에너지율도 증가함을 확인할 수 있다. 반사계수와 반사에너지율은 일차함수적 비례관계를 보인다.

한편, Fig. 3(d)에 도시된 바와 같이, 콘크리트 시료 중 1개와 암석 시료 중 1개의 결과가 비정상적인 관계를 보여 분석

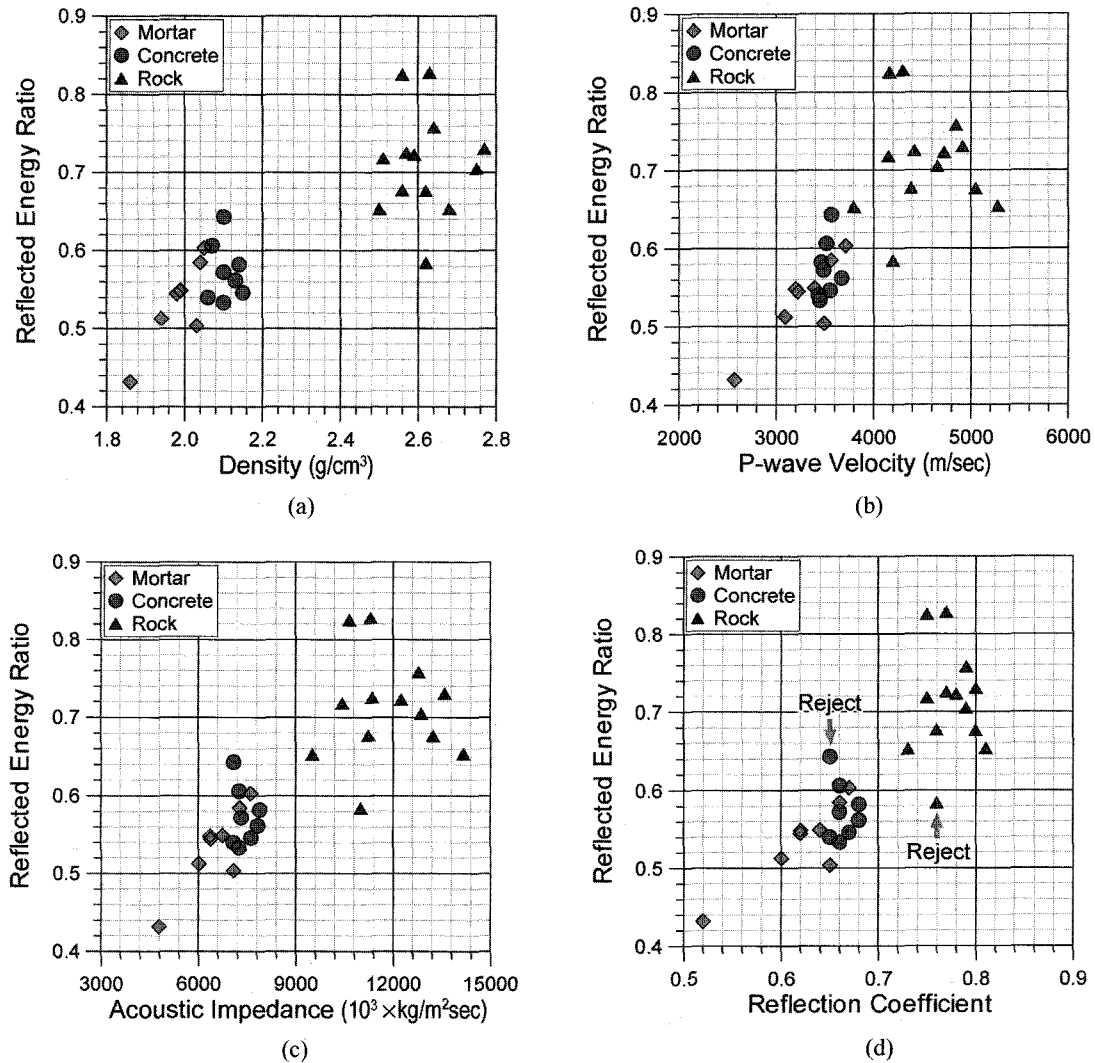


Fig. 3. Comparison of the reflected energy ratio with (a) the density, (b) the P-wave velocity, (c) the acoustic impedance and (d) the reflection coefficient.

에서 제외하였다. 콘크리트 시료의 경우 반사에너지율의 대폭 값을 구한 구간에 자갈이 존재하여 상대적으로 높은 반사에너지율이 측정되었다. 암석 시료의 경우, 시료 내부에 천공한 면의 상태가 불량하여, 초음파 주사검층 수행시 산란 현상에 의해 반사에너지율이 감소한 것으로 판단된다.

일축압축강도와 반사에너지율의 상관성 분석

Fig. 4는 시료의 일축압축 강도와 반사에너지율의 분포를 도시한 결과이다. 초음파 주사검층의 반사에너지율은 일축압축 강도의 변화에 따라 지수함수적으로 비례하는 경향을 보이고 있다. 콘크리트와 모르타르 시료의 경우 자료의 분포 범위가 집중되어 나타나지만, 암석 시료의 경우 일축압축강도의 분포 범위가 넓게 나타나며 이는 암종에 따라 집단화되는 경향을 보여준다(Fig. 4(a)). 이 연구의 목적은 기존의 상수배의 교정 값을 적용하여 텔레뷰어 암석강도를 계산하던 방식에서 탈피하여 일축압축강도와 반사에너지율의 상관성 분석을 통한 정량적 현지 암반강도의 산정에 있으므로, Fig. 4(b)와 같이 시험을 통해 획득한 자료에 대하여 회귀분석을 실시하였다. 다음은 일축압축강도와 반사에너지율에 대한 회귀분석을 수행하여 얻은 상관식이다.

$$\ln(\sigma_c) = 7.098 \times (\text{RER}) + 2.173 \quad (3)$$

여기서, σ_c : 추정 일축압축강도(단위: kgf/cm²)
 RER : 반사에너지율

상기한 바와 같이 암석시료의 경우 분포범위가 넓고 암종에 따른 집단화 경향이 관찰되므로, 회귀분석을 수행할 때 상한과 하한에 대한 분석도 수행하였다. 식 (4)와 식 (5)는 각각 회귀 분석의 상한과 하한에 대한 상관식이다.

$$\ln(\sigma_{cUp}) = 8.591 \times (\text{RER}) + 1.744 \quad (4)$$

여기서, σ_{cUp} : 추정 일축압축강도 상한(단위: kgf/cm²)
 RER : 반사에너지율

$$\ln(\sigma_{cLow}) = 6.235 \times (\text{RER}) + 2.176 \quad (5)$$

여기서, σ_{cUp} : 추정 일축압축강도 상한(단위: kgf/cm²)
 RER : 반사에너지율

식 (4)와 식 (5)의 상관식은 초음파 주사검층의 반사에너지율을 이용한 일축압축강도 추정시 공학적 판단을 위한 잠정적 기준으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

현장 자료에 대한 적용

실내실험을 통해서 확인한 일축압축강도와 반사에너지율의

Table 5. The physical properties of the field data.

Rock Type	Uniaxial Compressive Strength (kgf/cm ²)	Reflected Energy Ratio	Location
Granite	1,390	0.772	Chuncheon
	1,460	0.760	
	1,680	0.805	
	1,500	0.829	
Schist	2,250	0.806	Jangseong
	2,020	0.784	Jangseong
1,670	0.742		
1,800	0.769		
Gneiss	1,790	0.800	Chuncheon
	1,700	0.797	
	1,560	0.814	
	1,720	0.839	
	1,250	0.808	

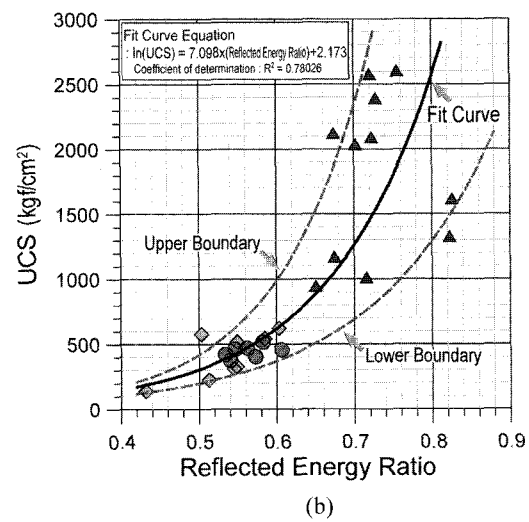
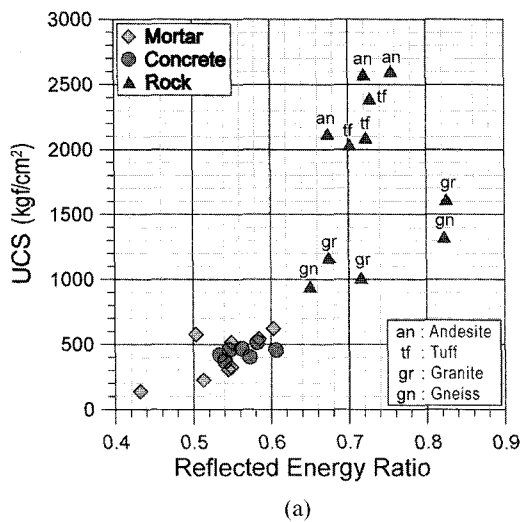


Fig. 4. Relationship between the reflected wave ratio and the uniaxial rock strength using the reliable results of the laboratory test with (a) respect to the rock type and (b) the regression curve.

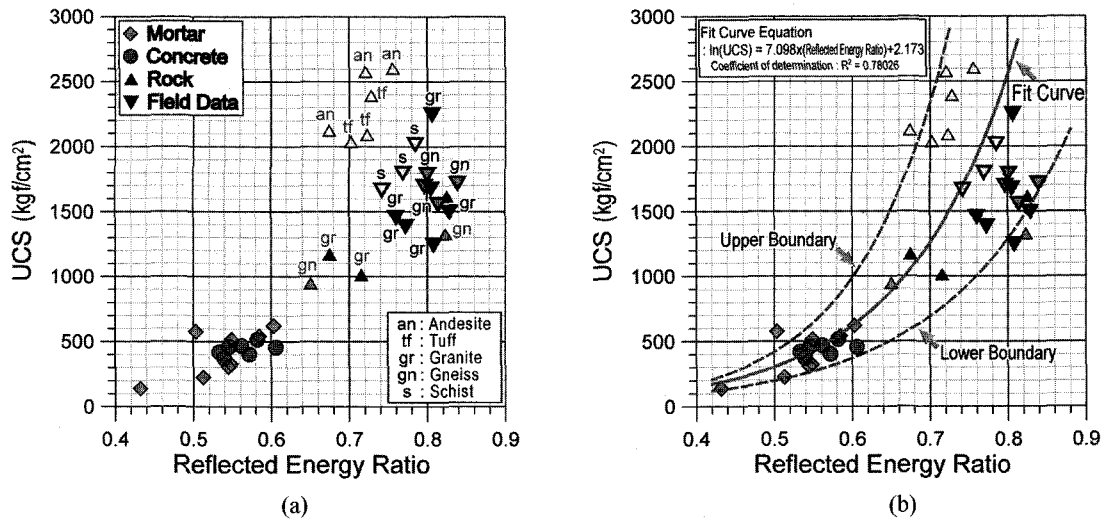


Fig. 5. Relationship between the reflected wave ratio and the uniaxial rock strength using the reliable results of the laboratory test and the field data with (a) respect to the rock type and (b) the regression curve.

상관성을 현장자료와 비교하기 위하여 지반조사용 NX 규격의 시추공 중 초음파 주사검층과 실내 암석시험이 동시에 수행된 자료를 수집하여 이 연구의 실험 결과와 비교 분석하였다. 춘천, 장성 등 2개 지역의 현장 자료를 사용하였으며, 시료의 암종은 화강암, 편마암 및 편암이다. 수집된 현장자료에 대한 일축압축시험 및 초음파 주사검층 결과를 Table 5에 정리하였다. 수집된 자료의 일축압축강도의 범위는 1,126~2,250 kgf/cm²로 대부분이 경암층에 해당한다.

현장에서 수집된 자료를 실내 실험을 통해 획득한 일축압축강도와 반사에너지율 간의 상관도에 동시에 표시한 것이 Fig. 5와 같다. 현장 자료의 경우에도 암종에 따른 집단화 현상이 확인되며, 화강암 및 편마암이 편암에 비해 하한선 근처에 분포함을 확인할 수 있다.

이 연구에서 분석된 암석 자료 중에 안산암, 응회암 및 편암은 특정 지역의 암석만을 대상으로 하였기 때문에 분석된 결과를 선별리 일반화 시킬 수는 없을 것으로 판단된다. 이에 반해 화강암 및 편마암은 상대적으로 여러 지역의 시료를 분석된 결과로서, 실내실험 결과를 분석한 바와 같이 집단화되는 경향을 나타낸다. 또한, 현장자료 역시 식 (4)와 식 (5)의 상한한 경계를 크게 벗어나지 않는 구역이 분포하므로, 이 연구에서 도출한 일축압축강도와 초음파 주사검층의 반사에너지율에 대한 상관식이 공학적 판단의 기준으로 적용될 수 있음을 확인할 수 있다.

결 론

다양한 배합비를 갖는 모르타르 및 콘크리트 시료와 서로 다른 암종의 암석 시료에 대한 실내 물성 시험과 초음파 주사검층을 수행하여 획득한 밀도, 탄성과 속도, 일축압축강도 및

반사에너지율을 상호 비교함으로써, 초음파 주사검층의 결과를 이용하여 현지 암반강도를 정량적으로 추정할 수 있음을 검증하였다.

1. 초음파 주사검층 자료를 이용하여 현지 암반강도를 산정할 경우 초음파 빔의 입사각에 따른 반사에너지 변화를 감안하여 반사파의 도달시간이 고려된 반사에너지율을 이용함으로써 보다 정량적인 정보를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.
2. 초음파 주사검층을 이용하여 획득한 반사에너지율과 일축압축강도 사이의 관계를 분석함으로써 다음과 같은 상관식을 구할 수 있었다.

$$\ln(\sigma_c) = 7.098 \times (\text{RER}) + 2.173 \quad (\text{상관계수: } R^2 = 0.78026)$$

여기서, σ_c : 추정 일축압축강도(단위: kgf/cm²)

RER : 반사에너지율

또한, 암종별 분포 특성 분석을 통해 상관식에 대하여 다음과 같은 상한 및 하한을 확인하였으며, 이는 초음파 주사검층의 반사에너지율을 이용한 일축압축강도 산정의 공학적 판단 기준으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

$$\ln(\sigma_{cUp}) = 8.591 \times (\text{RER}) + 1.744$$

$$\ln(\sigma_{cLow}) = 6.235 \times (\text{RER}) + 2.176$$

여기서, σ_{cUp} : 추정 일축압축강도 상한(단위: kgf/cm²)

σ_{cLow} : 추정 일축압축강도 하한(단위: kgf/cm²)

RER : 반사에너지율

이상과 같이 최근 대형 구조물의 지반조사에 광범위하게 사용되는 초음파 주사검층의 자료를 이용한 정량적 물성 산정 가능성을 확인하였다. 앞으로 다양한 암종의 암석 시료에 대한 추가적 자료 수집이 이루어진다면 암종이 고려된 신뢰도 높은

상관식이 도출될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김중열, 장현삼, 김유성, 현혜자, 김기석, 성낙훈, 1993, Geotomography에 의한 암반 구조연구(III), 한국자원연구소, 과학기술부, 125-148.
- 김중열, Schepers, R., 1995, 고분해능 텔레뷰어 검층기법의 기능 (High resolution Borehole acoustic scanner (Televiewer)), 대한지질공학회지, 5(3), 277-288.
- 김중열, 김유성, 1999, 텔레뷰어에 의한 토목설계 매개변수의 산출, 한국지구물리탐사학회 1999년도 제2회 학술발표회 논문집, 서울교육문화회관, 1997년 8월 27일, 한국지구물리탐사학회, 137 p.