

텔레뷰어 암석강도 산출 및 그의 응용성

Televiwer Rock Strength as an Approach to Estimate the Strength of in situ Rocks

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 김유성¹⁾, Yoo-Sung Kim, 현혜자²⁾, Hye-Ja Hyun

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

²⁾ 한국지질자원연구원 선임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

SYNOPSIS : Televiwer is a logging tool capable of scanning the borehole wall. The tool uses a rotating acoustic beam generator that acts as both a transmitter and receiver. The beams are sent toward the wall. The amplitude of a returning signal from the wall has nearly a linear relationship with the reflection coefficient R of the borehole wall, when the wall is smooth. As R depends only on rock impedance for fixed water impedance, the amplitude is directly associated with mass density and seismic velocity of rock. Meanwhile, the amplitude can be further reduced by wall roughness that may be caused by drilling procedures, differences in rock hardness, because the rough surface can easily scatter the acoustic energy and sometimes the hole becomes elongated in all directions according to the degree of weathering. In this sense, the amplitude is related to the hardness of rocks. For convenience of analysis, the measured amplitude image(2-D data(azimuth \times depth)) is converted, with an appropriate algorithm, to the 1-D data(depth), where the amplitude image values along a predetermined fracture signature(sinusoid) are summed up and averaged. The resulting values are subsequently scaled simply by a scalar factor that is possibly consistent with a known strength. This scaled Televiwer reflectivity is named, as a matter of convenience, "Televiwer rock strength". This paper shows, based on abundant representative case studies from about 8 years of Televiwer surveys, that Televiwer rock strength might be regarded, on a continuous basis with depth, as a quite robust indicator of rock classification and in most cases as an approximate uniaxial strength that is comparable to the rebound value from Schmidt hammer test.

Key words : Televiwer rock strength, reflection coefficient, rock impedance, amplitude image

1. 서 론

암반의 역학적 특성으로서 강도는 제반 토목설계를 위한 주요 매개변수 중의 하나이다. 현장에서 암반에 대한 강도를 손쉽게 구할 수 있는 방법은 Schmidt 햄머 시험이라 할 수 있다. 즉, 그림 1에서 예시한 바 스프링 힘에 의해 가압된 햄머가 암반을 타격하였을 경우 그의 반동정도는 암반의 강도와 연계될 수 있다는 것이다. 이와 유사하게 만약 초음파 빔(좁은 방사각 범위 내에서 초음파 에너지가 방사됨)이 물을 통하여 암반에 수직으로 입사하게 되면 반사되는 초음파 빔의 진폭은 대체로 암반의 강도에 따

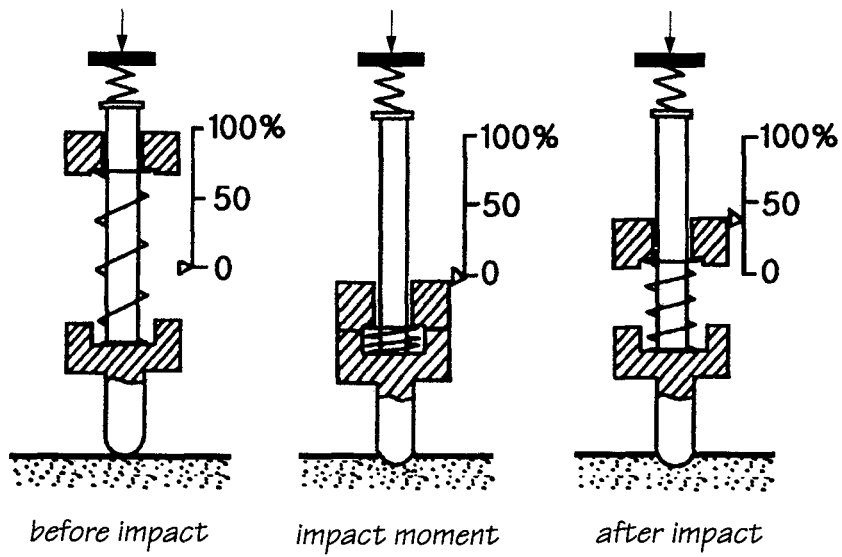


그림 1. 강도 추정을 위한 schmidt 햄머의 작동 원리.

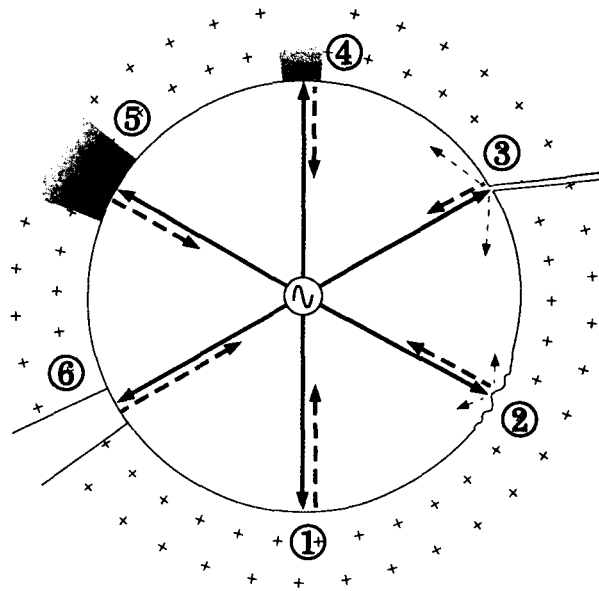


그림 2. 공벽에 수직으로 입사된 초음파 빔이 반사될 경우 그의 진폭치는 암반의 임피던스와 공벽의 거칠음에 의해 영향을 받게 된다. ①은 경암, ②는 경암 내의 거칠은 상태, ③은 절리, ④는 그라우팅 매질, ⑤는 탄층, ⑥은 석영 맥암을 대변하고 있다.

라 달리하고 있다. 그림 2는 시추공 축상에 놓인 초음파 발생원이 공벽에 수직으로 입사할 경우 반사되는 초음파의 진폭크기는 공벽에 표출되는 압중 및 공벽 상태에 따라 상대적으로 달리하고 있음(점선의 길이로 표시)을 예시하고 있다. 여기서 ①은 경암, ⑥은 석영맥암, ⑤는 탄층, ④는 그라우팅 매질을 대변하고 있으며 그에 따라 진폭치가 상대적으로 차별화되고 있음이 관찰된다. ②의 경우는 소위 암반의 거칠음(roughness)이 초음파의 산란현상을 유발하여 반사파의 진폭이 그만큼 작아짐을 보여주고 있으며 일반적으로 이러한 진폭감소는 절리의 경우(③) 더욱 크게 발생된다. 상기 초음파 전달에 대한 제반 관찰은 무엇보다 텔레뷰어 기법(김중열 외, 1995; 김중열, 2000)에 의해 가능하며 동시에 그 결과는 정량화될 수 있다.

그림 2에서 이미 예시한 바, 반사되는 초음파의 진폭은 크게 두 가지 요인에 의해 영향받게 된다. 그 하나는 만약 공벽이 매끄러운(smooth) 원호를 이루고 있는 경우 진폭치는 거의 공벽의 반사계수 R에 의해 결정된다는 것이다. 이 때 R은 물의 임피던스 $I_w(=\rho_w \cdot v_w)$ 및 암반의 임피던스 $I_R(=\rho_R \cdot v_R)$ 에 의해 표현된다.

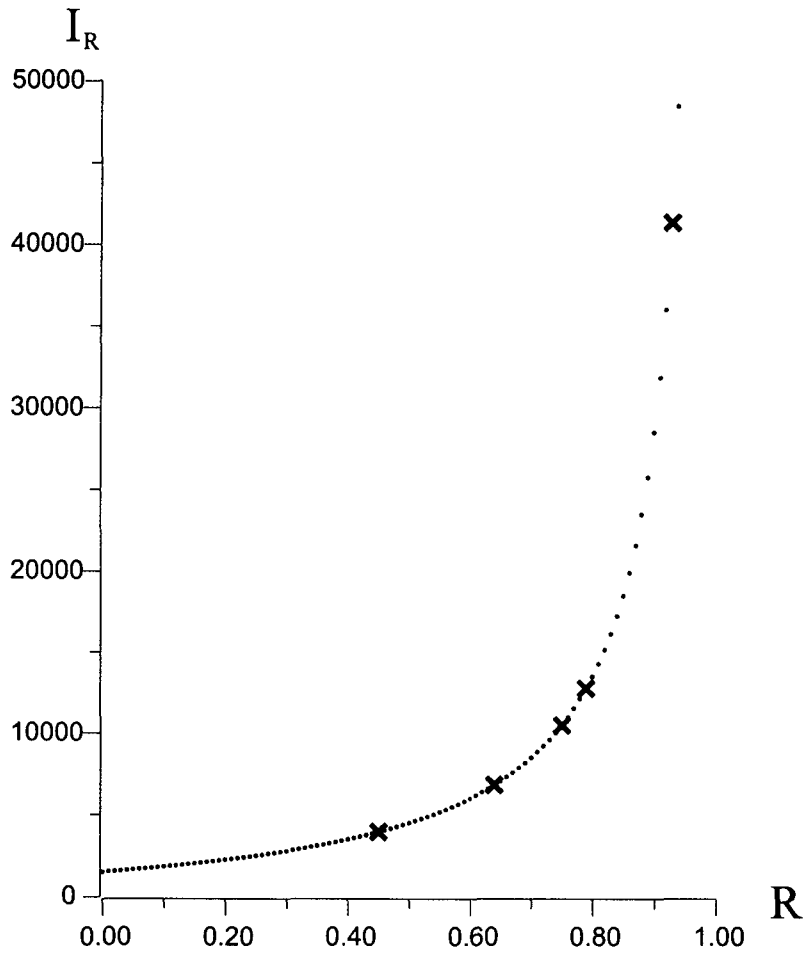
$$R = \frac{I_R - I_w}{I_R + I_w}, \quad \dots \dots \dots (1)$$

ρ_w, ρ_R : 물 및 암반의 밀도
 v_w, v_R : 물 및 암반의 P파 속도

식(1)에서 $I_w \approx 1\text{g/cm}^3 \cdot 1500\text{m/s}$ 는 거의 상수로 간주될 수 있기 때문에 R은 단지 하나의 변수 I_R 을 갖게 된다. 한편 탄성과 전달측면에서 각 암층은 그의 임피던스에 의해 구분된다. 즉, 임피던스가 다른 암층 사이에는 경계면이 형성되고 그 곳에서 탄성파가 반사되고 또한 굴절되는 것이다. 일반적으로 각 암층의 탄성과 속도는 밀도보다 그 변화폭이 훨씬 크기 때문에 흔히 탄성과 속도가 암층을 구분하기 위한 지침이 되고 있는 것이다. 암층을 대변하는 I_R 은 다시 R과 연계하여

$$I_R \approx 1500 \cdot \frac{1+R}{1-R} = 1500(1+2R+2R^2+2R^3+\dots) \quad \dots \dots \dots (2)$$

으로 표현된다. 그림 3은 식(2)에 대한 상관도를 그래프로 나타내고 있으며 여기에는 참고로, 아래 도표에서 예시한 여러 암층의 I_R 값을 ×로 표시하였다. 일별하여, R이 0.8보다 큰 경우에는 I_R 의 크기가 급속도로 변화함을 볼 수 있다. 그러나, 풍화암에서 경암까지는 I_R 과 R이 대체로 선형을 보여주고 있다. 따라서, 텔레뷰어 진폭치는 경암 이하의 암층을 구분할 수 있는 하나의 지침이 될 수 있다. 텔레뷰어 진폭치에 영향을 줄 수 있는 또 다른 요인은 바로 공벽의 거칠음이다. 공벽의 거칠음은 주로 풍화암이나 경암 내에서도 약한 암맥(예: 장식화된 암맥)에서 천공을 통하여 초래됨으로써 거의 거칠음 정도는 풍화가 심할수록 커지며 그에 따라서는 시추공 공경이 기준 규격보다 커지게 되는 경우도 허다하다. 이러한 면에서 텔레뷰어 진폭치는 암반의 견고성(hardness)과 상당한 연계성이 있음을 볼 수 있다. 결국, 텔레뷰어 진폭치는 상기 두 가지 요인에 의해 큰 편차를 나타내게 되며 그로 인해 풍화암도 보다 세분화하여 차별화 할 수 있는 여건이 마련된 것이다. 따라서, 본 논문의 주요 내용은 우선 텔레뷰어 진폭이미지(2-D: 심도-방위각)로부터 심도에 대한 대표적인 진폭치로 전환하는 적절한 알고리즘을 개발하고 나아가서 그 결과가 암층구분이나 강도판단에 어느 정도 효율성을 찾을 수 있는가를 살펴보는 데 있다.



$$R = \frac{I_R - 1500}{I_R + 1500}$$

	ρ	v	$I_R = \rho v$	R
풍화암	2.5	2800	7000	0.647059
탄층	2.0	2000	4000	0.454545
경암(석회암)	2.5	4300	10750	0.755102
경암(화강암)	2.6	5000	13000	0.793103
steel	7.8	5500	42900	0.932432

그림 3. 임피던스와 반사계수와의 상관관계.

2. 텔레뷰어 암석강도 산출

그림 4는 진폭이미지로부터 단지 심도에 따른 대표적인 진폭치로 전환할 수 있는 여러 가지 방법들을 예시하고 있다. 첫 번째 트랙에 나타난 진폭이미지는 도합 $160(\text{심도 } 80\text{cm}) \times 144(\text{방위각}) = 23040$ 점에 대응되는 진폭치를 담고 있으며 여기에는 두 개의 큰 절리가 약 35° 의 경사각을 보여주고 있다. 두 번째~다섯 번째 트랙은 이미지로부터 단지 N, E, S, W 방향에 대한 진폭치를 발췌하여 나타내고 있다. 비록 절리에 의한 진폭치 하락이 뚜렷이 인식되고 있으나 반면 심도에 따른 진폭치의 변화는 선정된 방위각에 따라 크게 달라지고 있으며 더구나 심도 역시 절리의 경사각 크기에 따라 서로 상당한 차이를 보여주고 있다. 여섯 번째 트랙은 단순히 각 심도에 대응되는 144개의 진폭치를 평균화하여 나타내었다. 만약, 절리의 경사가 대단히 완만한 경우에는 이러한 표현이 어느 정도 타당성을 찾을 수 있겠으나 절리의 경사가 크면 클수록 진폭치의 변화폭은 작게되어 전체적으로 암반의 역학적 특성이 제대로 반영될 수 없음을 볼 수 있다. 일곱 번째 트랙의 결과는 바로 상기 미흡한 부분을 근원적으로 보완한 것이라 할 수 있다. 즉, 거의 주안점은 바로 이미지에서 관찰되는 절리에 대응되는 정현곡선을 따라 진폭치를 평균화하는데 있다. 그림 5에는 대표적인 두 가지 평균화 과정을 정현곡선으로 나타내고 있다. (a)는 정현곡선이 등간격을 이루면서 그 이전의 절리특성(정현곡선)에 따르는 경우이며, (b)는 인접하는 절리의 정현곡선에 의해 둘러 쌓인 내부에서 내삽되는 상태를 보여주고 있다. 대체로, 절리발달 상태가 대단히 복잡할 경우 (a)에 의한 결과가 상대적으로 다소 현실에 보다 접근되는 경향을 나타내고 있다. 그런데, 상기 알고리즘에 의해 얻게된 진폭치는 어디까지나 하나의 수치(dummy value)에 불과하다. 따라서, 이러한 진폭 변화가 어떠한 의미를 갖기 위해서는 교정치가 요구된다. 대부분의 경우, 텔레뷰어는 NX규격의 코어드릴 시추공을 대상으로 하기 때문에 비록 측정된 진폭치들이 서로 다른 시추공에서 얻게 되더라도 대등하게 비교될 수 있다. 한편, 그림 4에서 예시한 바 steel 케이싱과 경암과의 임피던스 대조는 대단히 큰 반면 반사계수는 상대적으로 근소한 차이를 보여주고 있다. 따라서, steel 케이싱(NX규격)을 대상으로 얻게된 진폭치를 $1200\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 둔 후 그 이하의 진폭치를 교정하게 되었다. 이와 같이 교정된 진폭치에는 이미 지정한 바 암반의 임피던스는 물론 암반의 견고성에 대한 정보도 동시에 반영되고 있기 때문에 이러한 1차원 진폭치 표현을 편의상 텔레뷰어 암석강도(Televiewer rock strength)라 명명하게 된 것이다.

3. 현장응용사례

그림 6은 서해대교 주탑 지반조사를 위한 시추공(NX규격)을 대상으로 얻게된 텔레뷰어 암석강도를 보여주고 있다. 심도 약 11m 상부는 steel 케이싱된 구간으로 항상 최대 진폭치를 나타낸다. 경암 구간(심도 약 39m 이하)의 심도 약 40m 주위와 풍화암 구간 심도 약 27m 주위의 코어(화살표로 표시)에 대한 실내 압축강도 실험결과는 각각 약 $1100\text{kg}/\text{cm}^2$, $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 이며 이러한 수치는 바로 텔레뷰어 암석강도치와 훌륭한 대조를 보여주고 있음을 볼 수 있다. 참고로 그림 7에는 실험 코어(화살표로 표시) 주위의 코어상태를 나타내고 있다. 전체적으로 상기 연속적인 원위치 텔레뷰어 암석강도 변화는 무엇보다 코어 육안 관찰 결과를 훌륭하게 대변하고 있으며 또한 암층구분을 위한 바람직한 자료가 되고 있음을 볼 수 있다. 예를 들면, 심도 구간 약 11m~17m 사이의 대단히 낮은 텔레뷰어 강도치는 바로 코어박스의 비닐에 쌓인 암편에 해당하며 또한 절리가 밀집된 곳(예: 심도 약 29m 주위) 주위의 코어는 크게 부서져 있음을 관찰할 수 있다. 최근, 텔레뷰어 암석강도 결과를 접한 대부분의 지질학자들은 오히려 이를 바탕으로 암층을 구분하는 것이 보다 일관성을 띤 판단을 할 수 있다는 견해를 보이고 있는 실정이다. 그림 8은 대전역사 지하화에 따른 지반조사 과정에서 시추공 20개를 대상으로 얻게된 텔레뷰어 암석강도를 입체화하여 나타내고 있다. 여기서 시추공 사이의 값은 내삽(interpolation)에 의해 주어졌다. 전체적으로 암층의 구분이 보다 세분화되어 현실에 근접되고 있음을 볼 수 있다.

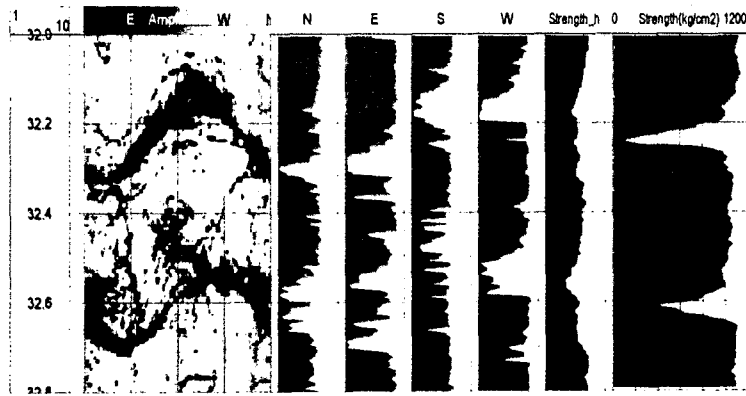


그림 4. 진폭 이미지(2-D : 심도-방위각)를 심도에 따른 대표적인 진폭치(1-D : 심도)로 전환할 수 있는 여러 가지 알고리즘이 예시되고 있다.

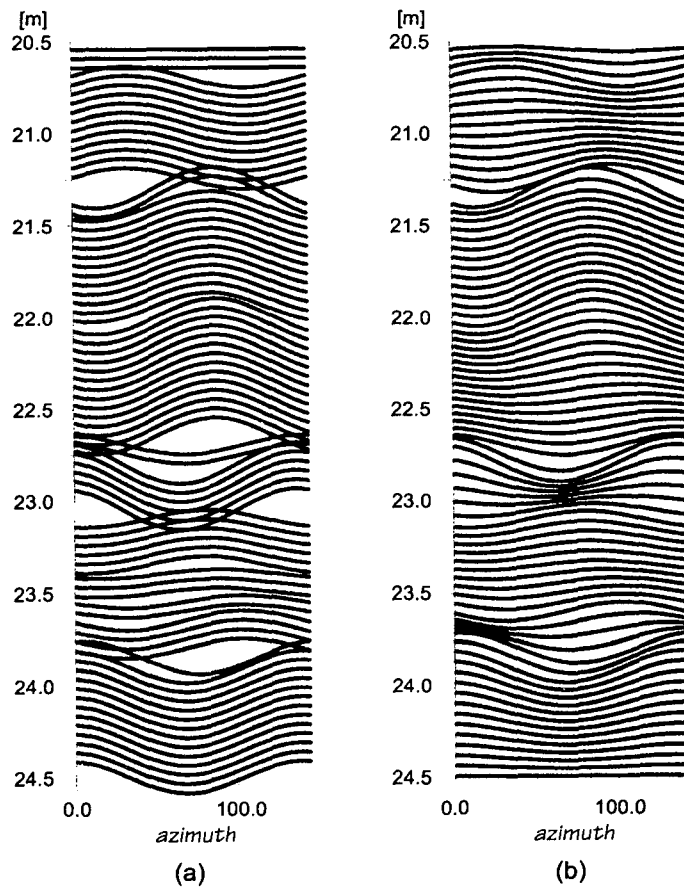


그림 5. 텔레뷰어 이미지에서 관찰된 절리의 정현곡선을 바탕으로 진폭치 평준화를 위한 정현곡선 배열의 유형.

PY1-WB3



Televiwer Rock Strength WB3

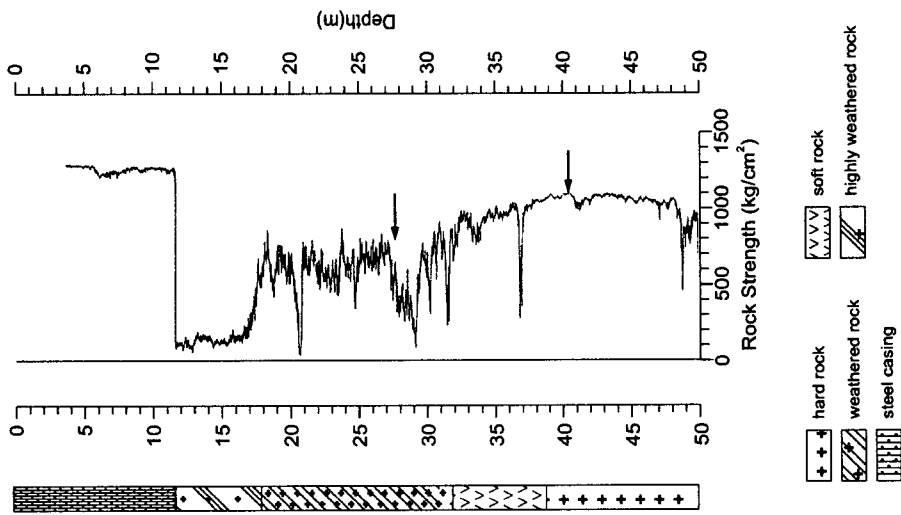


그림 6. 텔레뷰어 암석 강도의 현장응용 사례.

그림 7. 그림 6에서 소개한 시추공의 일부 코어.

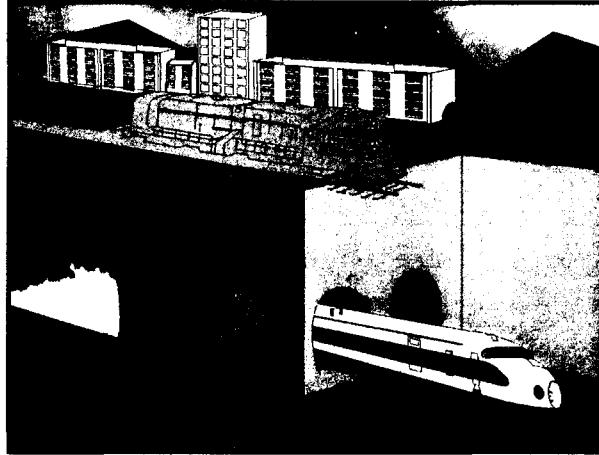


그림 8. 텔레뷰어 암석강도의 현장 응용 사례.

4. 결 론

텔레뷰어 암석강도는 Schmidt 햄머의 반동거리에 의해 강도가 추정되는 것과 유사하게 공벽에서 반사되는 초음파 빔의 진폭치에 바탕을 두고 있다. 측정된 진폭치는 이론적인 측면에서 암층을 구분(임피던스 대조)할 수 있는 정보를 갖고 있을 뿐만 아니라 동시에 암반의 견고성에 따른 영향도 받고 있다. 이러한 진폭치를 담고 있는 진폭이미지는 본 논문에서 제시된 알고리즘(프로그램“TeroSt”)에 의해 심도에 따른 대표적인 진폭치로 전환되었으며 그로 인해 벌어진 진폭치 편차는 경암이하 암층(특히 풍화암)을 보다 세분화할 수 있는 적절한 여건이 될 수 있었다. 한편, 이론과 현장경험에 근거한 교정치 설정(steel casing 반사기준: 1200kg/cm²)은 많은 경우 코어를 대상으로 한 실내 압축실험결과에 근접하는 경향을 보여주었다. 더구나, 텔레뷰어 암석강도는 심도에 대한 연속적인 원위치 물성치를 대변하고 있기 때문에 일관성을 띤 암층의 분리는 물론 박층의 크기, 파쇄대 및 단층 내 충전물질의 존재 및 그의 물성 파악, 물성의 점진적인 변화 등에서도 그의 응용성을 찾을 수 있다는 것이다. 따라서, 텔레뷰어 암석강도는 굳이 기존의 강도실험결과와 비교되기보다는 오히려 암층 분리 내지 강도에 대한 하나의 새로운 판단기준으로 간주됨이 보다 바람직하다고 할 수 있겠다.

5. 참 고 문 헌

1. 김중열, Schepers, R.(1995), "고분해능 텔레뷰어 검층기법의 기능", 대한지질공학회지, 제 5권, 제 3호, pp. 277-288.
2. 김중열(2000), "텔레뷰어 탐사의 원리 및 지반공학 분야에서의 실제적용", 새로운 지반조사 및 평가, 분석기술 국제 심포지움 논문집, 한국건설기술연구원, pp. 191-254.