

현장 및 실내 측정 탄성과 속도에 근거한 암반평가 기준에 대한 고찰

이강녕, 박연준*

On the Evaluation of Construction Standards Based on Seismic Velocities Obtained In-Situ and through Laboratory Rock Tests

Kang Nyeong Lee, Yeon Jun Park*

Abstract Seismic velocities measured from in-situ tests ($n=177$) and through rock core samples ($n=1,035$) are reviewed in light of construction standards, widely used standards as a first-hand approximation of rock classification solely based on seismic velocities. In-situ down hole tests and refraction survey for soft rocks showed seismic velocities of 1,400~2,900 m/s which is faster than those specified in construction standards. For moderate~hard rocks, in-situ down hole tests and refraction survey showed 2,300~3,800 m/s which roughly corresponds with the range specified in the construction standards. A similar trend is also observed for seismic velocities measured from rock core samples. The observed differences between construction standards and seismic velocities can be explained in two ways. If construction standards are correct the observed differences may be explained with seismic velocities affected by underlying fast velocities and also possibly with selection of intact cores for velocity measurement. Alternatively, construction standards may have intrinsic problems, namely artificial discrete boundaries between soft rocks and moderate rocks, application of foreign standards without consideration of geologic setting and lack of independent verification steps. Therefore, we suggest a carefully designed verification studies from a test site. We also suggest that care must be exercised when applying construction standards for the interpretation and assessment of rock mass properties.

Key words Seismic velocity, Soft rock, Hard rock, Rock classification, Construction standards

초 록 이 연구에서는 국내 토목현장에서 수행된 하향식 탄성파탐사 및 굴절법 탄성파탐사 자료(177개)와 시추조사 시료(1,035개)에 대해 연암과 경암(보통암 포함)으로 분류한 후, 건설표준품셈과 지반조사표준품셈의 탄성과 속도에 의한 암반분류 기준을 비교하였다. 현장에서의 하향식 탄성파탐사 및 굴절법 탄성파탐사에 의한 탄성과 속도는 연암의 경우 1,400~2,900 m/s의 범위로 건설표준품셈 A그룹(1,200~1,900 m/s)과 지반조사표준품셈(1,200~2,500 m/s)의 기준보다 빠르게 나타났으며, 보통암과 경암의 경우 2,300~3,800 m/s의 범위로 기준범위와 유사하게 나타나는 것으로 나타났다. 실내암석시험에서 구해진 연암과 보통암~경암의 탄성과 속도 또한 현장 탐사 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 암반 탄성과 속도와 품셈간의 상이점을 품셈이 절대적으로 옳다는 관점에서 본다면, 현장 탄성과 속도의 경우 하부지반의 영향을 받아 속도가 빨라지는 것과 실내암석시험의 경우에는 연암구간에서의 시료선별 시 무결암의 선별에 의한 것으로 여길 수 있다. 반대로 상이점의 원인을 품셈에 오류가 있는 것으로 본다면, 품셈상의 지층경계가 점이적이지 않은 뚜렷한 경계가 인위적으로 설정된 점, 지질 양상이 다른 외국의 기준을 그대로 차용하여 사용한다는 점, 품셈상 지층의 탄성과 속도에 대한 독립된 검증이 이루어지지 않은 점 등의 문제가 있음을 알 수 있다. 이 연구에서는 현장에서의 향후 이러한 검증 연구를 제안하며, 널리 쓰이는 품셈에 의한 지층분류에는 내포된 문제가 있음에 대한 인식이 중요하다.

핵심어 탄성과 속도, 연암, 경암, 암반 분류, 건설품셈

Received: Jul. 28, 2017

Revised: Aug. 14, 2017

Accepted: Aug. 14, 2017

*Corresponding Author: Yeon Jun Park

Tel) +82312202580, Fax) +82312202522

E-Mail) yjpark@suwon.ac.kr

Dept. of Civil Engineering, College of Engineering, The University of Suwon, 17, Wauan-gil, Wau-ri, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

1. 서론

탄성 거동을 하는 매질(흙, 암석 등)에 발파 또는 해머 타격 등에 의해 순간적으로 급격한 힘이 가해지면 매질 내 변위가 발생하는데 변위의 발생과 회복에 따른 에너지가 전파되는 것을 탄성파라고 한다. 탄성파는 진폭, 주기, 속도 등의 특성을 갖는데 이 중 탄성파의 속

도는 매질의 밀도와 탄성계수의 영향을 받는다. 이와 같은 탄성파의 전파속도가 매질의 영향을 받는다는 사실은 다양한 공학적 용도의 근거이다. 특히 흙과 암석으로 구성된 지반 혹은 지층을 통해 전파되는 탄성파의 속도는 현장 및 실내시험을 통하여 획득될 수 있는데 이렇게 획득된 탄성파 속도로부터 탄성계수, 밀도, 균열의 정도 등 지반의 특성을 파악하려는 노력이 많이 이루어져 왔다(Barton, 1995; 박혁과 정교철, 2002).

지반에서 탄성파는 일축압축강도, 흡수율, 공극율, 탄성계수 등 암석의 물리·역학적 특성과 상관관계가 있으며(Barton, 1995), 또한 균열, 절리특성(거칠기, 충전물 등)에도 영향이 있음이 보고되었다(차민수 외, 2005). 이러한 탄성파의 특성으로 지반상태에 대한 정보획인이 가능하여 탄성파 속도를 이용한 지표면 하부의 지층 분류(Heiland, 1968)와 여러 종류의 암석에 대해서 굴착을 위한 정량적인 굴착난이도(rippability)의 판정이 가능한 것으로 보고되어 있다(Atkinson, 1971; Smith, 1986). Bieniawski(1973)이 제안한 RMR과 함께 터널 설계와 시공에 널리 사용되는 Q값의 경우 탄성파 속도 사이의 회귀식이 제안되었다(Barton, 1991). 이러한 연구결과들은 탄성파 속도가 암반을 평가하고 분류함에 있어 매우 유용한 지표가 될 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있어, 그동안 지질학이나 자원분야에서만 사용되던 탄성파탐사를 비롯한 물리탐사 기법이 토목분야에도 적용되기 시작하였다. 국내에서도 탄성파 탐사를 포함한 다양한 물리탐사 기법이 1990년대 후반에 본격적으로 토목엔지니어링 분야에 활용되기 시작하여 도로나 터널공사 등 각종 국토이용을 위한 지반조사 등에서 암분류 및 암반평가에 이용되기 시작하였다(권병두, 2006).

우리나라의 암반분류 혹은 지층분류 기준 중 탄성파 속도가 분류항목에 포함된 대표적인 기준으로는 건설표준품셈(2001)과 한국엔지니어링협회의 지반조사표준품셈(2017)이 있으며, 지층과 암종의 구분에 따라 현장 및 암편의 탄성파 속도의 범위를 제시하고 있다. 또한 한국도로공사에서도 굴착난이도의 평가에 있어 탄성파 속도를 이용하고 있다. 이 논문에서는 국내 여러 토목공사 프로젝트 설계단계에서 획득된 지반조사 결과를 분석하여, 현장 측정 탄성파 자료를 인근 시추조사로 확인된 지층과 대비하여 추출된 연암과 경암 구간의 탄성파 속도와 실내암석시험에서 측정된 연암과 경암의 탄성파 속도를 분석하여 이들 실제 측정값이 국내에 널리 사용되는 암반분류 혹은 지층분류 기준에서 제시된 연암과 경암의 탄성파 속도 기준값에 얼마나 부합하는지 여부 등을 검토하였다.

2. 탄성파 속도를 이용한 암반평가

모든 토목구조물의 설계와 시공에 있어 공사현장에 분포하는 층적토, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암 등으로 흙과 암반을 구분하는 지층분류가 필요하며, 이를 위해 지표하부를 확인하기 위하여 시추조사가 수행된다. 하지만 시추조사는 지층을 육안으로 직접 확인할 수 있는 장점을 가지고 있으나 한 지점에 대한 시추조사 결과를 미시추구간에 적용함에 있어 한계를 보인다. 이러한 시추조사의 단점을 보완하기 위하여 물리탐사 기법이 활용되고 있으며, 많이 이용되는 물리탐사 방법으로 전기, 전자탐사 및 탄성파탐사 등이 있다. 일반적으로 터널설계에서는 단층 및 파쇄대 등과 같은 지질 이상대를 영상화할 수 있는 전기, 전자탐사가 많이 활용되고 있으며(김기석 외, 2003), 탄성파 속도를 이용하는 탄성파탐사의 경우는 토공공간에서 풍화암, 연암, 경암 등의 지층구분 및 굴착난이도 평가에 많이 이용되고 있다.

일반적으로 리퍼(ripper)에 의해 작업이 가능한 정도를 굴착난이도라고 하며, 리퍼에 대한 기록은 로마시대까지 거슬러 올라간다. 현대적 리퍼는 1920년대 미국에서 개발되어 현재까지 계속 사용되고 있다. 리퍼 작업시 굴착난이도를 평가할 때 과거에는 육안관찰에 의한 평가로 오차가 많이 발생하여 탄성파탐사에 의해 측정된 탄성파 속도가 새로운 대안으로 제시되었다(Atkinson, 1970). Fig. 1은 Atkinson(1970)이 제안한 탄성파 속도와 굴착난이도와의 관계를 보여주고 있다. 탄성파 속도와 암석강도를 포함시켜 국내에서는 유병옥과 김경석(2003)이 굴착난이도 평가를 위한 체크리스트를 제안하기도 하였다.

탄성파 속도가 포함되어 있는 대표적인 국내 암반분류는 국토교통부 “건설표준품셈”과 한국엔지니어링협회의 “지반조사표준품셈”으로 건설공사비 산출을 위해 사용하고 있다. 그리고 설계 및 시공 등의 공학적 목적을 위해 각 기관별로 다른 암반분류법이 사용되고 있다. Table 1과 Table 2에는 각각 “건설표준품셈”과 “지반조사표준품셈”의 암반분류표를 정리한 것이다.

이 연구에서는 건설표준품셈과 지반조사표준품셈의 탄성파 속도 기준을 현장 탄성파탐사와 실내암석시험 결과를 이용하여 재검토하였다. 건설표준품셈과 지반조사표준품셈에서는 연암, 보통암, 경암, 극경암으로 구분하여 각각 분류기준을 제시하고 있다. 그러나, 일반적으로 국내 토목현장에서는 보통암 이상의 암반을 경암으로 분류하여 연암과 경암으로만 지층을 구분하고 설계와 시공이 이루어지고 있다. 따라서 이 연구에서 사용된 경암의 하한기준은 품셈상 보통암의 하한기준이다.

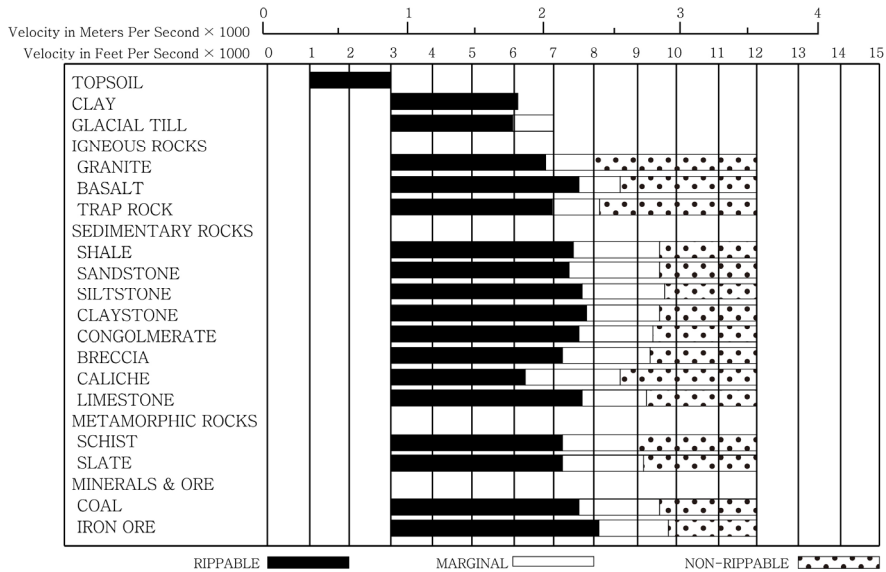


Fig. 1. Seismic velocity chart and relation with rippability (Atkinson, 1970)

Table 1. Classification of rocks by seismic velocity (Construction standard production unit system, 2001)

Features Rock classification	Group	Field P-wave velocity (V, km/s)	Lab P-wave velocity (Vc, km/s)	Strength* (MPa)	Remarks
Weathered rock	A	0.7~1.2	2.0~2.7	29.4~68.6	Strength* Measurement 1. cuboidal sample with 50 mm edges 2. dried in furnace for 24 hours 3. wetting in water for two days 4. compressive test 5. compression direction: perpendicular to planar structures in rocks or parallel to z axis or parallel to slowest direction of elastic waves
	B	1.0~1.8	2.5~3.0	9.8~19.6	
Soft rock	A	1.2~1.9	2.7~3.7	68.6~98.0	
	B	1.8~2.8	3.0~4.3	19.6~49.0	
Moderate rock	A	1.9~2.9	3.7~4.7	98.0~127.4	
	B	2.8~4.1	4.3~5.7	49.0~78.4	
Hard rock	A	2.9~4.2	4.7~5.8	127.4~156.8	Measurement of Lab P-wave velocity 1. Sample: slab with two parallel sides and with thickness of 150~200 mm 2. Measurement direction: parallel to x axis (the fastest direction of elastic waves) or parallel to planar structures in rocks
	B	greater than 4.1	greater than 5.7	greater than 78.4	
Extremely hard rock	A	greater than 4.2	greater than 5.8	greater than 156.8	
Groups	A & B Group				
Features	A Group			B Group	
Rock type	gneiss, psammitic schist, greenish schist, breccia, limestone, sandstone, diabasic rhyolite, conglomerate, granite, diorite, dunite, shale, andesite, basalt			dark schist, greenish schist, diabasic rhyolite, shale, mudstone, rhyolite, agglomerate	
Features	rocks with high contents of quartz			rocks with high contents of micaceous minerals with little quartz	
Characteristics when hit by a hammer with 500~1,000 gram	platy rock fragments with little rock powders			mostly powders with little rock fragments	

Table 2. Rock classification according to ground condition (Korea Engineering & Consulting Association, 2017)

Rock classification	Rock type	Unconfined compressive strength (MPa)	Field P-wave velocity (km/s)
Weathered rock	-	below 5	lower than 1.2
Soft rock	unconsolidated sediments	below 30	lower than 2.5
Moderate rock	sandstone, sandy shale, gneiss, pyroclastic rock	30~80	2.5~3.5
Hard rock	conglomerate, gneiss, igneous rocks	80~150	3.5~4.8
Extremely hard rock	quartzose rocks, hornfels, chert	greater than 150	greater than 4.5
Fracture zone	fault zone, fracture zone	-	zones with relatively low velocity

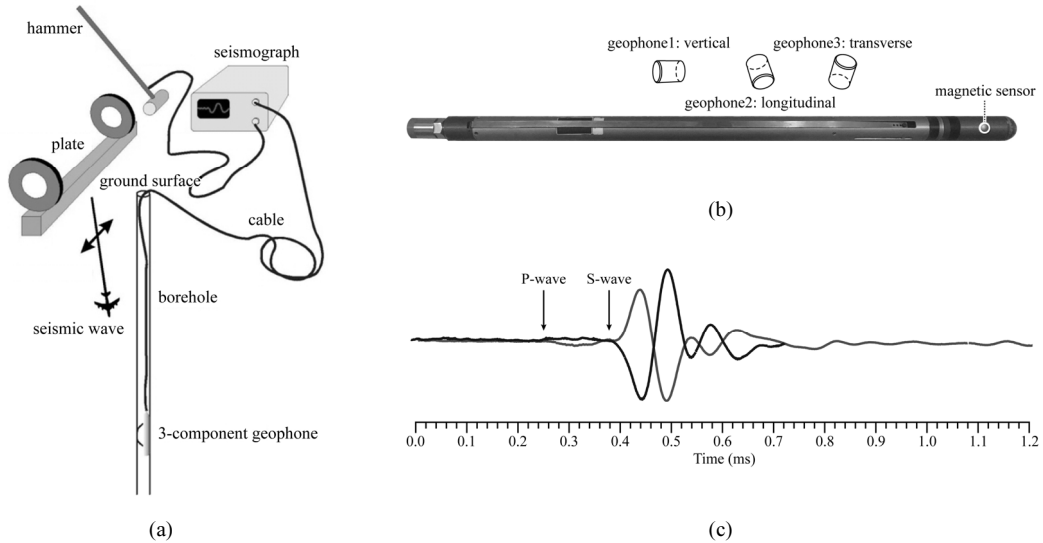


Fig. 2. Down hole test method: (a) Scheme of down hole test, (b) 3-component geophone, (c) S-wave data of down hole test

3. 암반 탄성파 속도 측정

3.1 현장 탄성파탐사

지반에서 변형에 의하여 순간적으로 급격한 변위가 생기면 진동이 발생하면서 탄성파가 전파된다. 이렇게 발생된 탄성파를 이용하여 지반특성을 파악할 수 있으며, 심부의 구조 또한 유추할 수 있다. 암반에서의 탄성파 속도는 풍화대, 변질대, 파쇄대 및 균열 등의 발달 상태에 따라 달라지는데, 이 점을 착안하여 암반상태 평가 시 탄성파 속도를 이용한다. 암반의 탄성파 속도 측정에는 측정이 용이한 P파의 속도를 주로 활용되고 있으며, 탄성파 속도를 측정하는 방법으로는 여러 물리탐사 기법 중 하향식 탄성파탐사와 굴절법 탄성파탐사를 대표적으로 꼽을 수 있다. 두 기법에 대하여 간략히

살펴보면 다음과 같다.

3.1.1 하향식 탄성파탐사

하향식 탄성파탐사는 시추공을 활용하여 지반의 탄성파 속도를 구하는 방법이다(Fig. 2). 지표에 설치된 타격판(plate)을 가격하여 수직 및 수평방향의 탄성파를 발생시킨 후 시추공 내에 위치시킨 3성분 수신기로 자료를 취득하며, 취득 자료의 초동을 발체한 후 이를 해석함으로써 시추공 주변의 지하매질에 대한 탄성파 속도 구조를 규명하는 탐사기법이다.

하향식 탄성파탐사 시 시추공 심도에 따른 자료취득 간격은 따로 정해진 규정이 없으나 일반적으로 토사층의 경우는 심도 1 m마다, 기반암 이후 암반층의 경우는 심도 2 m마다 자료를 취득한다. 현장자료 취득변수는

Table 3. Data acquisition parameters for down hole test

record length (s)	sample interval (ms)	time delay (s)	preamp gains (dB)	data type
0.256	0.256	-0.02	36	SEG-2

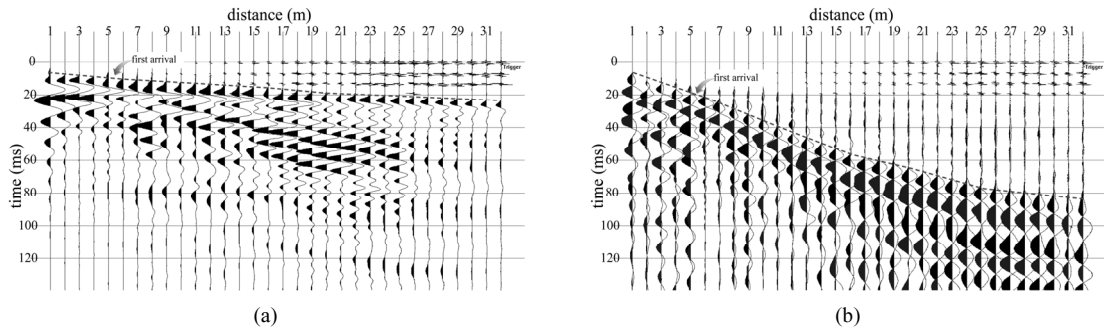
**Fig. 3.** In-situ data of down hole test: (a) P-wave, (b) Stacked S-wave

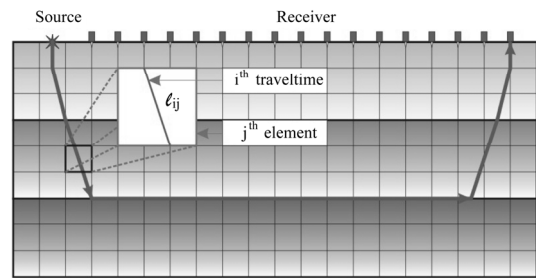
Table 3에 나타난 바와 같이 기록시간 0.256 s, 샘플링 간격(sampling interval) 0.256 ms로 설정할 때 자료 당 샘플링 수는 1,000개가 된다. 자료 획득 시 기록시간의 지연을 고려하여 장비를 설정하며, 기록된 탄성파자료의 저장형식은 국제표준형식인 SEG-2 형태로 저장된다.

Fig. 3은 각 성분별 자료를 측정심도에 따라 재배열한 것이며, 자료취득 간격은 1 m이다. 하향식 탄성파탐사 자료를 처리함에 있어 가장 처음으로 수행하는 작업은 동일 성분별 자료의 분류이다. 이 과정을 거친 후 초동 발체를 실시하는데, 측정 자료를 살펴보면 심도가 증가함에 따라 인식되는 P파의 초동이 늦추어짐을 확인할 수 있다. 3성분 수신기로부터 기록된 자료 중 타격판의 측면을 가격하여 기록된 S파의 자료는 Fig. 3(b)와 같다.

3.1.2 굴절법 탄성파탐사

굴절법 탄성파탐사는 해머(hammer), 중추(weight drop), 다이너마이트(dynamite) 등을 송신원으로, 지오폰을 수신기로 사용하며, 송신원에서 발생한 탄성파를 수신기에서 측정하고 각 수신기별로 가장 빨리 감지되는 초동 정보를 이용하여 지하매질의 탄성과 속도 구조를 예측하는 탐사 기법이다. 현장 탄성과 속도측정의 목적은 지하의 속도구조와 조사 지역의 물성을 알아내는데 있다.

굴절법 탄성파탐사 자료의 역산 방법 중 하나인 토모그래피법은 초동을 이용하여 전파시간을 계산하는 것이며, 토모그래피와 대비되는 파형역산은 탄성과 파동장을 이용한다는 점에서 차이가 있다. 토모그래피법을 이용한 역산 알고리즘은 크게 세 단계로 이루어져 있으며, 속도 모델의 설정(Fig. 4), 속도 모델의 주시 계산

**Fig. 4.** Wave ray paths from seismic source in discrete grids

(Qin et al., 1992), 그리고 이론적으로 계산된 주시와 자료로부터 발체한 초동을 바탕으로 계산된 주시를 비교하여 잔차를 계산하고 속도 값을 개선하는 단계로 구성되어 있다. 토모그래피법은 역산을 반복적으로 수행하여 오차가 충분히 작아지고, 속도 모델이 더 이상 개선되지 않을 경우 역산을 종료하게 된다.

굴절법 탄성과 탐사 자료처리 흐름은 Fig. 5와 같다. 자료처리 과정의 첫 번째 단계는 현장에서 취득한 원시 자료(raw data)를 해석에 사용되는 소프트웨어에 적합하도록 자료의 포맷을 변환하고 송신점 및 수신점의 정확한 위치를 입력한다. 이후 초동을 발체하여 주시곡선을 작성한다. 자료의 역산을 수행하기 위해 초기모델을 설정한 다음 토모그래피 기법을 이용하여 지하매질의 속도 구조를 도출하게 된다. 자료의 역산 시 오차를 줄이기 위한 노력으로는 발체한 초동을 수정하는 방법이 있겠으나 이 방법보다는 역산 수행 전 설정하는 초기모델을 수정하는 방법이 오차를 효율적으로 줄일 수 있다.

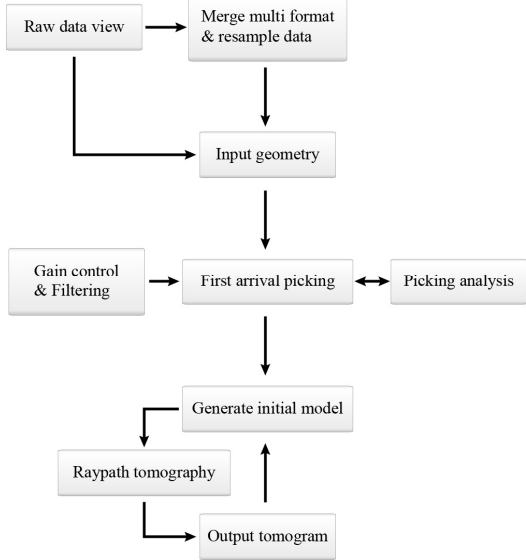


Fig. 5. Data processing for seismic refraction

현장자료 취득변수는 Table 4에 나타낸 바와 같이 기록시간 0.512 s, 샘플링 간격(sampling interval) 0.256 ms로 설정할 때 자료 당 샘플링 수는 2,000개가 된다. 자료 획득 시 기록시간의 지연을 고려하여 장비를 설정하며, 기록된 탄성파자료의 저장형식은 국제표준형식인 SEG-2 형태로 저장된다.

현장에서 측정된 굴절법 탄성파탐사 자료는 Fig. 6(a)와 같다. 해당 자료는 20채널의 수신기를 사용한 자료이며, 직접파 및 굴절파의 구분이 뚜렷하다. 해당 자료

의 송신점은 Fig. 6(a)에서 거리 95 m 지점이며, 송신점을 중심으로 40 m 이내까지는 직접파가, 40 m 거리에서는 굴절파가 수신되는 것을 알 수 있다. 주시곡선은 Fig. 6(b)와 같이 거리를 가로축으로, 전파시간을 세로축으로 설정하여 작성한다. 하나 이상의 송신점에서 같은 방향으로 확장한 주시곡선은 같은 수신 구간에서 서로 평행이 되는 부분이 존재한다. 이들은 같은 속도 경계면에 대한 굴절파의 주시로서 이러한 형태를 주시곡선의 평행성이라고 한다. 주로 지표 부근의 요철이나 노출된 암반 때문에 주시곡선 상에서 요철은 있을 수 있겠으나 평행성은 성립한다. 특히 지층 구조를 가정해 해석하는 방법을 사용할 경우 이 평행성은 주시곡선의 점검에 있어 중요한 점검 사항이 된다.

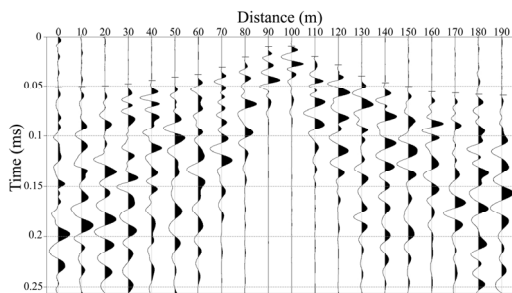
3.2 암석시료의 탄성파 속도 측정

실내암석시험은 시험결과와 객관성과 정확성이 확보되어야 하기 때문에 규정된 기준 및 절차에 의해 이루어져야 한다. 탄성파 속도 측정을 위한 국내의 표준시험 규정으로는 한국암반공학회 “암석의 탄성파속도 측정 표준시험법”, 국제암반학회 표준시험규정(International Society for Rock Mechanics, Suggested Methods for Determining Sound Velocity; Brown, 1981), 미국표준시험법(American Society for Testing and Materials, ASTM D2845-05, 2005) 등이 있으며, 이 연구에서는 이러한 표준시험규정에 의거하여 실내암석시험을 수행하였다.

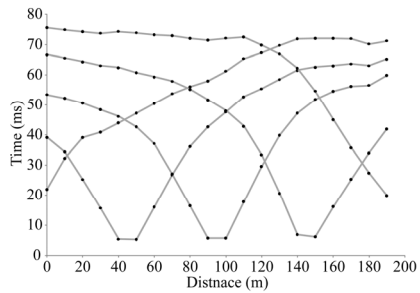
암석의 탄성파속도 측정은 시추코어형의 암석시료를 통과하는 탄성파의 시간을 확인하여 압축파(P파)와 전

Table 4. Data acquisition parameters for seismic refraction exploration

record length (s)	sample interval (ms)	time delay (s)	preamp gains (dB)	data type
0.512	0.256	-0.02	24	SEG-2



(a)



(b)

Fig. 6. Example of seismic refraction data, (a) Raw data, (b) Travel time curve

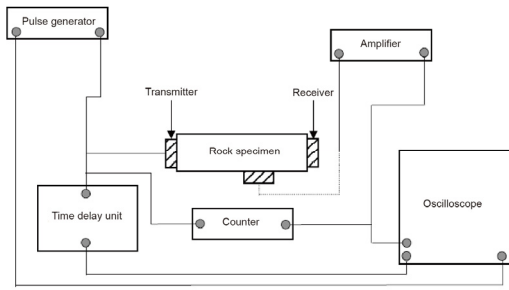


Fig. 7. Measurement of seismic velocity for rock cores (KSRM, 2010)

단파(S파)의 전파속도를 구하는 비파괴시험법으로 압축파는 파의 진동방향과 진행방향이 같고 전단파는 파의 진동방향이 진행방향과 직각을 이루는 파형을 말한다. 암석의 탄성파속도 측정방법은 수신기의 위치에 따라서 파동 전송 측정방식(pulse transmission technique)과 중단면 연속 측정방식(seismic profiling technique)으로 구분되며, 측정 모식도는 Fig. 7과 같다.

탄성파속도는 탄성파가 암석시료를 통과하는 시간(t)과 거리(d)를 이용하여 탄성파속도를 계산할 수 있으며, 다음과 같은 계산식으로 계산된다.

$$P\text{파의 전파속도: } V_p = \frac{d}{t_p}$$

$$S\text{파의 전파속도: } V_s = \frac{d}{t_s}$$

여기서 t_p 와 t_s 는 각각 P파와 S파가 d 의 거리를 전파하는데 걸리는 시간이다.

4. 현장 탄성파 속도자료 검토 결과

이 논문에서는 Table 5와 같이 15개 국내 토목공사 현장에서 수행된 하향식 탄성파탐사 및 굴절법 탄성파

탐사 자료를 검토하였다. 검토된 자료의 총 개수는 모두 177개이고, 각 현장의 분포암종은 화강암과 편마암이 주를 이루고 있으며, 석회암 및 혼펠스 등이 기반암으로 존재하는데 이는 건설표준품셈에서 “A 그룹”에 해당한다. 이 장에서는 각 현장에서 얻어진 탄성파탐사 결과를 이용하여 연암과 경암(보통암 포함)의 구분에 따라 탄성파 속도가 어떻게 분포하고 있는지 살펴보았다.

4.1 현장 탄성파탐사 자료검토 결과

국내 11개 토목공사 현장에서 수행된 하향식 탄성파탐사 자료를 이용하여 암종에 따른 탄성파 속도 분포를 검토하였으며, 검토된 자료는 총 32개이다. 하향식 탄성파탐사 자료기록 장비는 미국 Geometrics社의 Ultra light exploration seismograph이고, 5 kg의 슬러지 해머를 이용하여 탄성파를 발생하였다. 자료의 수신은 미국 Geostuff社의 3성분 수신기를 이용하였다.

굴절법 탄성파 탐사는 국내 13개 토목현장에서 수행되었던 자료로 145개의 자료를 정리하였다. 굴절법 탄성파탐사 자료기록 장비는 미국 Geometrics社의 Ultra light exploration seismograph 또는 StratavizorNZ를 이용하여 자료를 기록하였고, 사용된 탄성파 송신원은 5 kg의 슬러지 해머, 다이너마이트, 중추 등 다양한 송신원을 이용하여 탄성파를 발생시켰다. 자료의 수신은 14 Hz의 중심주파수를 갖는 수신기를 이용하였다.

하향식 탄성파탐사와 굴절법 탄성파탐사 자료를 이용하여 연암과 보통암을 포함하는 경암층에 대한 탄성파 속도 분포를 살펴본 결과는 Fig. 8과 같다. 연암과 경암(보통암 포함)의 지층은 시추조사 결과를 이용하여 구분하였으며, 탐사단면과 대비된 해당 지층의 심도에서의 속도 자료를 확인하였다. 연암은 총 168개, 보통암을 포함한 경암의 경우 총 172개의 자료가 검토되었다.

연암의 현장 탄성파 속도 분포범위는 1,400~2,900 m/s이며, 경암(보통암 포함)은 2,300~3,800 m/s이다. 현장 탄성파 속도 검토결과 연암의 탄성파 속도는 건설표준품셈 기준에 22.0%, 한국엔지니어링협회 기준에는 55.9%의 자료가 만족하는 것으로 나타나며, 경암(보통

Table 5. Source of raw data for down hole tests and seismic refraction

location	rock type	test type	number of data
Incheon, Yeongju, Hwacheon, Yangpyeong, Hwaseong, Seongnam, Suncheon	gneiss	down hole	18
		seismic refraction	93
Yeongcheon, Yeosu, Wonju, Daegu	granite	down hole	10
		seismic refraction	48
Danyang, Chungju	limestone	down hole	4
		seismic refraction	4

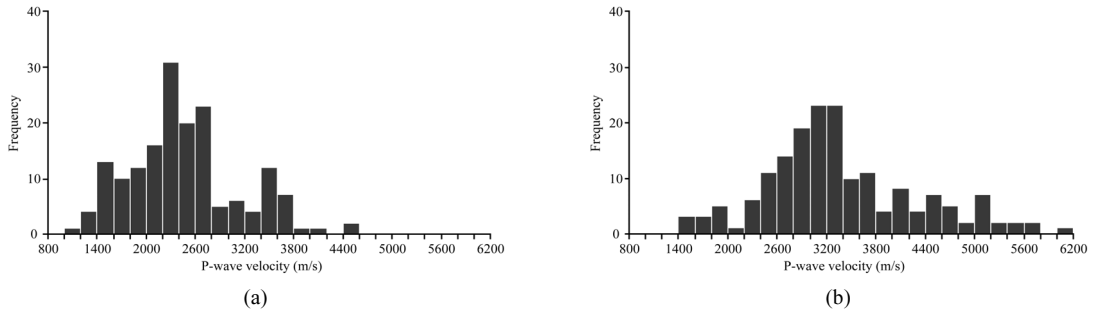


Fig. 8. P-wave velocity distribution of bed rock: (a) Soft rock, (b) Moderate~hard rock

Table 6. P-wave velocity (in this study) in relation to i) construction standard production unit system and ii) Korea engineering & consulting association

rock type	in situ seismic velocity (m/s)	construction standard production unit system		Korea engineering & consulting association	
		standard (m/s)	percentage of the number of data satisfying the standard (%)	standard (m/s)	percentage of the number of data satisfying the standard (%)
soft rock	1,400~2,900	1,200~1,900	22.0	1,200~2,500	55.9
moderate~hard rock	2,300~3,800	> 1,900	95.3	> 2,500	88.9

Table 7. Source of raw data for P-wave velocity

rock type	gneiss	granite	limestone	tuff	schist
number of data	292	564	71	52	56

암 포함)의 경우 건설표준품셈 기준에는 95.3%, 한국엔지니어링협회 기준에는 88.9%의 자료가 부합하는 것으로 나타난다(Table 6).

5. 실내암석시험: 탄성파 속도자료 검토 결과

5.1 분석암종 및 자료

이 연구에서 활용한 실내암석시험 자료는 편마암과 화강암, 석회암, 응회암, 편암 시료를 대상으로 하였으며, 국내에서 수행된 도로, 철도 등 프로젝트의 일환으로 수행된 지반조사 결과로 시료별 데이터 수량은 Table 7에 정리하였다. 실내암석시험 자료는 탄성파(P파)속도와 일축압축강도이며, 시추주상도상의 암석을 구분하여 연암과 보통암을 포함하는 경암으로 나누어 분석하였다.

5.2 결과

실내암석시험 결과를 국내에서 가장 널리 사용되는 분류기준인 건설표준품셈과 한국엔지니어링협회 지반

조사품셈의 압편에 대한 탄성파속도와 일축압축강도 기준에 대하여 살펴보았다.

5.2.1 연경암의 탄성파속도 및 일축압축강도

연암과 경암(보통암 포함)의 탄성파속도와 일축압축강도의 평균 및 표준편차는 Table 8과 같다.

5.2.2 상관관계 분석

탄성파속도와 암석 물성과의 관계에 대하여 많은 연구가 진행되어 P파의 속도와 일축압축강도는 양의 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다(한국지구물리-물리탐사학회, 2011). 이 연구에서도 탄성파속도(P파속도)와 일축압축강도의 상관성이 존재하는지와 그 정도를 검토하였다(Fig. 9).

일축압축강도와 탄성계수는 탄성파속도와 양의 상관관계를 보이는 것으로 확인되었으며, 대체로 선형식으로 회귀하는 것보다 지수식으로 회귀하는 것이 결정계수(coefficient of determination, R-squared)가 가장 높게

Table 8. Summary of rock test results

rock type		P-wave velocity (m/s)		Uniaxial compressive strength (MPa)	
		average	standard deviation	average	standard deviation
gneiss	soft rock	3,205	1,212	62.6	45.9
	moderate ~hard rock	4,261	870	112.7	43.3
granite	soft rock	3,389	1,115	70.0	55.2
	moderate ~hard rock	4,071	983	113.8	60.8
limestone	soft rock	3,226	773	58.9	27.2
	moderate ~hard rock	4,115	1,273	85.9	43.1
tuff	soft rock	4,291	1,004	94.9	60.9
	moderate ~hard rock	4,606	350	145.7	66.3
schist	soft rock	3,393	957	52.4	28.9
	moderate ~hard rock	4,048	746	78.2	45.8

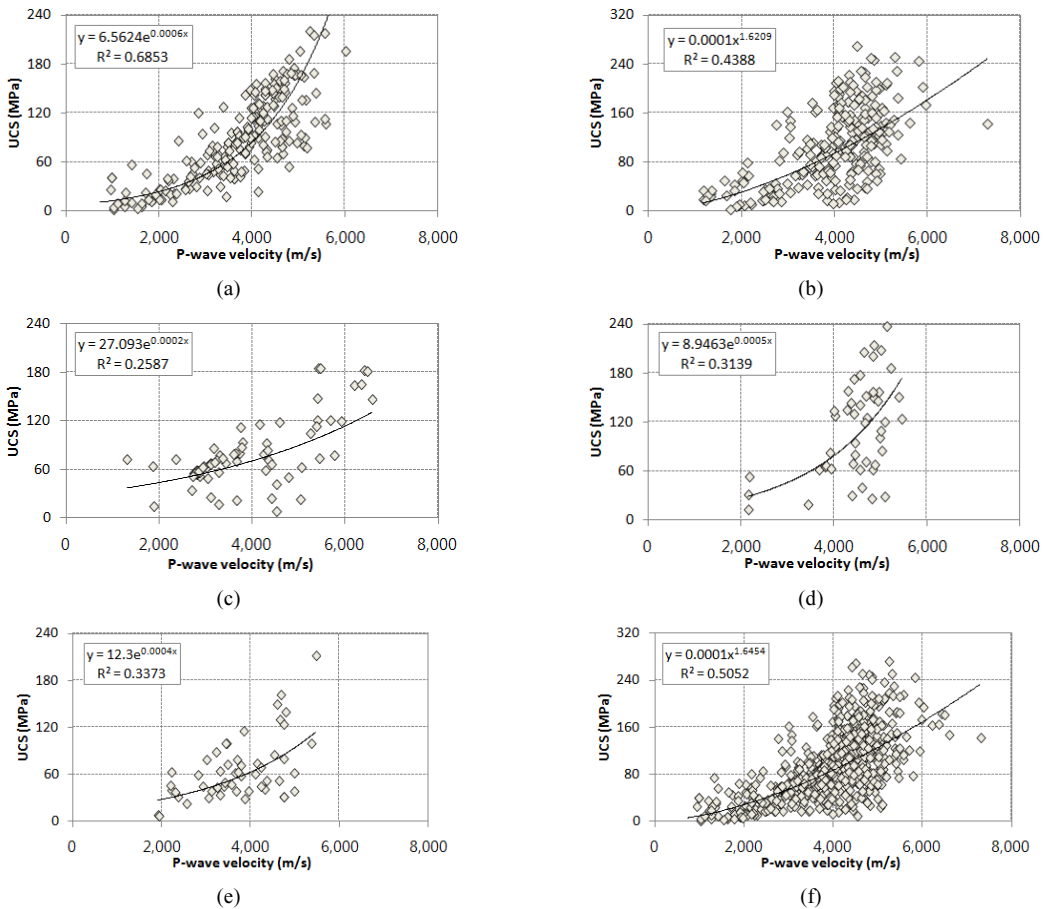


Fig. 9. Relationship between uniaxial compressive strength and P-wave velocity: (a) gneiss, (b) granite, (c) limestone, (d) tuff, (e) schist, (f) total

Table 9. P-wave velocity and UCS distribution in relation to i) construction standard production unit system and ii) Korea engineering & consulting association

rock type		P-wave velocity			UCS	
		group	standard (m/s)	percentage of the number of data satisfying the standard (%)	standard (MPa)	percentage of the number of data satisfying the standard (%)
soft rock	gneiss	A	2,700~3,700	27.0	4.9~29.4	26.4
	granite			25.0		18.0
	limestone			57.1		20.0
	tuff	B	3,000~4,300	21.7		13.0
	schist			42.3		17.9
moderate ~ hard rock	gneiss	A	> 3,700	77.3	> 29.4	98.1
	granite			72.7		96.3
	limestone			94.6		92.7
	tuff	B	> 4,300	82.8		100.0
	schist			38.5		100.0

나오는 것으로 파악되었다. 그러나, 결정계수 값이 0.69인 편마암에 대한 탄성파속도와 일축압축강도의 관계를 제외하면 대체로 낮은 결정계수를 보이며, 암종에 관계없이 전체 데이터에 대해 탄성파속도와 일축압축강도 간의 결정계수도 0.505로 다른 물성과 탄성파속도 간의 결정계수보다 높게 나타난다. 암석물성간의 회귀 분석 연구를 수행한 천대성 등(2008)의 연구에서도 탄성계수와 일축압축강도간의 결정계수가 0.689로 가장 높게 나타났고 다른 물성간의 결정계수는 대체로 낮게 나타났는데, 천대성 등(2008)은 이와 같이 결정계수가 낮은 이유를 암종과 풍화상태, 지역적 요인 등이 모두 포함되어 산포가 크게 나타났기 때문으로 해석하였다. 즉, 암석 물성들 값 간의 이러한 높은 분산은 조암광물의 종류, 크기, 풍화정도, 미세균열의 유무 등 암석이라는 재료 자체가 갖는 다양성에 기인한다고 하겠다.

5.2.3 탄성파속도 및 일축압축강도 기준에 의한 연암 구분

탄성파속도(P파 속도)를 이용하여 건설표준품셈에서는 연암과 경암의 기준을 A, B그룹의 암석 종류에 따라서 구분하고 있다. 연암의 기준은 A그룹이 2,700~3,700 m/s의 범위이며, B그룹이 3,000~4,300 m/s의 범위에 해당한다. 그리고 경암(보통암 포함)은 A그룹이 3,700 m/s 이상이며, B그룹이 4,300 m/s 이상에 해당한다. 이 연구에서는 A그룹의 편마암, 화강암 및 석회암과 B그룹의 응회암과 편암을 대상으로 하였다. 그리고 일축압축강도를 이용한 한국엔지니어링협회 기준에서 연암은 4.9~29.4 MPa의 범위에 해당하며, 경암(보

통암 포함)은 29.4 MPa 이상의 값에 해당된다.

실내암석시험결과는 Table 9에 정리하였다. 탄성파속도 기준에 의한 연암에서 A그룹은 25.0~57.1%로 석회암을 제외한 대부분이 기준 범위 밖에 분포하고 있으며, 연암 B그룹은 21.7~42.3%로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 경암(보통암 포함)에서는 A그룹이 72.7% 이상, B그룹의 편암이 38.5%로 낮고 응회암은 94.6%로 높게 분포하여 대부분 기준을 만족하고 있다. 그리고 일축압축강도 기준에서는 연암 A그룹은 26.4% 이하로 나타나며, B그룹은 17.9% 이하로 기준 범위를 대부분 벗어나고 있다. 경암(보통암 포함)은 A그룹이 92.7% 이상, B그룹이 100%로 기준을 만족하고 있다.

6. 고찰 및 결론

현장에서 수행된 탄성파탐사 및 실내암석시험으로부터 측정된 연암의 탄성파 속도는 건설표준품셈 및 한국 엔지니어링협회의 기준보다 빨라 각 기관에서 제시하고 있는 기준과 차이를 보이는데, 이와 같은 결과의 원인으로서는 다음과 같은 몇 가지 이유를 살펴볼 수 있다.

Fig. 8(a)의 그래프는 현장 탄성파 탐사를 통해 구해진 연암의 속도 분포를 나타내는데, 연암에서의 탄성파 속도 주 분포범위는 1,400~2,900 m/s이고, 해당 탄성파 속도 값은 기존 프로젝트 중에서도 굴절법 탄성파탐사 자료에서 가져온 것들이 대부분이다. 또한 기존 프로젝트의 굴절법 탐사자료 역산에는 시추조사 및 지표 지질조사와 같은 사전정보가 전혀 반영되지 않은 결과

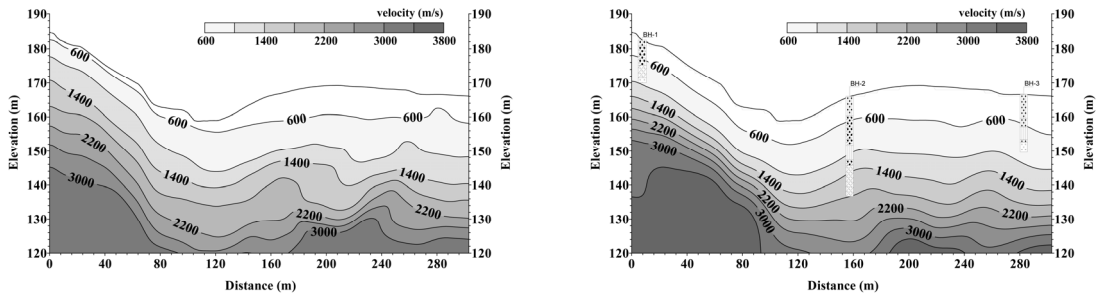


Fig. 10. Comparison of seismic refraction: (a) inversion result without information from bore hole survey, (b) inversion result with consideration of bore hole survey

이다. 이처럼 연암의 속도가 각 기관에서 제시하는 기준보다 빠르게 나타나는 것은 굴절법 탄성과 탐사자료를 역산할 때 탐사지역 하부 지반의 영향을 배제할 수 없는 부분, 즉 탄성과의 전파 특성 상 밀도가 높은 쪽을 지향함에 따라 상대적으로 밀도가 낮고 탄성과 전파 속도가 낮은 상부 지반의 속도 값의 산출에 영향을 준다고 볼 수 있다.

굴절법 탐사 자료처리 시 앞서 언급한 허용오차를 줄이기 위한 방안으로는 사전정보, 즉 시추조사 자료 및 지표지질조사 자료 등과 같은 정보를 역산에 반영시키는 방법이 있다. 주시 토모그래피 기법은 근본적으로 비선형이기에 계산 과정에서 초기모델이 요구된다. 만약 초기모델이 적절하게 구성되었다면 최소한의 역산 반복 횟수로도 원하는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

Fig. 10은 역산 시 각기 다르게 설정된 초기모델에 따라 도출되는 속도단면도를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)의 경우 심도에 따라 속도가 일괄적으로 증가하는 초기모델을 이용했을 경우의 결과이며, Fig. 10(b)는 해당지역에서 이루어진 3개소의 시추조사 자료가 반영된 초기모델이 설정된 경우의 결과이다. 초기모델에 시추조사 자료의 반영은 굴절법 탄성과 탐사 측선에서의 시추위치를 x 값으로, 시추조사로 확인된 지층의 출현심도를 y 값으로, 그리고 각 지층의 출현심도에 맞게 탄성과 속도 값을 설정하여 초기모델을 구성한 다음 토모그래피 역산을 수행한다. 여기서 각 지층에 맞는 탄성과 속도의 설정은 품셈에서 제시하고 있는 각 지층의 평균 탄성과 속도를 의미한다. 이와 같은 방법으로 굴절법 탄성과 탐사 자료를 역산할 경우 Fig. 10(a) 결과에서 Fig. 10(b)의 결과와 같이 시추조사 결과에 잘 부합하는 속도단면도를 얻을 수 있으며, 사전정보를 고려한 해석은 탄성과 탐사가 가지고 있는 한계를 상당 부분 극복할 수 있을 것으로 판단되고, 이러한 역산 방법을 이용한다면 Fig. 8(a)에 나타난 연암의 탄성과 속도 분포범위는 기

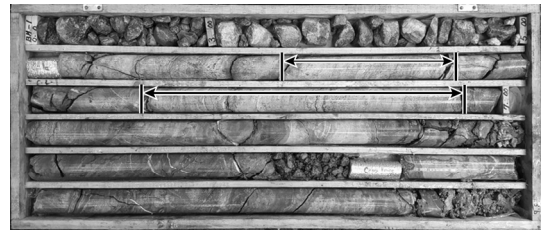


Fig. 11. Photograph drilled core (see text for discussion)

준에 맞게 하향 조정될 것으로 예상된다.

실내암석시험 기준 분석결과 연암의 경우 탄성과속도와 일축압축강도 기준 범위에 포함된 자료수의 백분율이 Table 9에서와 같이 대부분 낮게 나타나고 있으며, 검토된 자료의 상당수가 탄성과속도와 일축압축강도의 연암 기준보다 크게 분포하고 있다. 시추조사를 통하여 일반적으로 회수되는 연암은 대부분 풍화정도가 보통 이상을 보이고, 절리가 매우 많이 발달한 상태로 회수되어 암질지수(Rock Quality Designation, RQD)가 대부분 낮지만 부분적으로 약한 풍화정도를 보이는 구간도 함께 분포하고 있어 암질지수가 높은 구간도 관찰되어진다. 여기서 암질지수는 샘플링으로 회수된 암석코어 중 길이가 10 cm 이상인 코어들의 합계를 샘플링한 총길이로 나눈 값의 백분율이다.

실내암석시험을 위한 시추코어 선별 시에는 시료성형 조건길이(10 cm 이상)를 만족하는 코어를 우선대상으로 하고 있으며, 잠재절리와 같이 시험 결과에 영향을 주는 요인을 제외하기 위해서 코어의 외관(표면)에 문제가 없는 구간에서 시료를 선별하는 것이 현재의 실정이다.

Fig. 11은 연암 구간에서의 시료선별 예로, 암석시험을 위한 시료 선별은 화살표 구간과 같이 시료의 성형이 가능한 위치에서 선별되는데, 그 이유는 하나의 시

료를 이용하여 일축압축시험과 탄성과 속도 측정을 병행하기 때문이다. 즉, 이와 같은 연암구간의 시료 선별 관행으로 인하여 암질이 더 양호한 시료의 물성이 측정되어 기준보다 높은 탄성과 속도 및 일축압축강도가 나타나게 된다.

암석의 이방성은 절리와 같은 불연속면과 엽리에 기인하며 탄성과 속도의 이방성 측정에 대한 연구가 수행되었다(송무영과 황인선, 1993; 박형동, 1995). 박찬(2006)의 편암 이방성에 대한 연구에 의하면 탄성과 진행방향과 엽리사이의 각도가 지각일 경우 P파 속도는 약 7%까지 증가하는 것으로 보고되었다. 이 논문에서 사용된 자료들의 경우, 엽리 이방성에 대한 정보가 없이 탄성과 속도가 측정되었으며, 표준편차는 평균값의 20~30%에 이른다(Table 8). 이러한 표준편차는 박찬(2006)의 엽리각도에 의한 영향보다 훨씬 더 크므로, 이 연구의 탄성과 속도 자료들은 엽리각도의 영향 뿐만 아니라 풍화도, 절리 발달정도의 영향까지 포함한다고 할 수 있다.

Fig. 1에서와 같이 Atkinson(1970) 연구에 의하면 굴착난이도 평가 시 리핑이 가능하거나 불가능한 암반으로 구분되는데 중간의 경계부가 넓은 범위로 분포한다. 반면에 Table 1과 같이 건설품셈에서는 지층간의 탄성과 속도의 경계가 명확하게 나타난다. 이와 같이 Atkinson(1970)의 경계부가 넓게 나타나는 가장 중요한 이유로 탄성과 속도가 하부지반의 영향을 받기 때문으로 여길 수 있다. 건설품셈에서 또한 Atkinson(1970)과 같이 경계부가 넓게 나타나는 것이 타당하지만 실제로 품셈에서는 지층간 경계가 뚜렷하게 구분되어 있다. 이는 기준을 먼저 설정하고 그 인위적 기준에 따라 지층분류를 하려고 하는 의도에서 기인한 것으로 해석된다.

여러 현장에서 지침으로 삼고 있는 Table 1의 속도 기준은 일본에서 구분한 내용을 그대로 활용하고 있기에 이를 우리나라에서 활용함에는 많은 한계를 가지고 있는 것으로 사료된다. 그 이유를 간략히 살펴보면 일본과 우리나라에 분포하는 기반암과 지질이 매우 다르기 때문이다. 일본의 기반암은 호상열도에서 분출되는 화산암이 지질작용에 의하여 생성된 반면 우리나라의 경우 대륙지각의 기저부에 위치함으로써 많은 변성작용에 의해 편마암과 같은 암종이 주요 기반암으로 구성된다. 이에 대한 예로 A, B그룹의 구성 암종 중 우리나라에서 산출되지 않는 감람암, 사교암, 유교암 등과 같은 암종이 포함된 것을 들 수 있다. 이와 같은 이유로 일본의 암종별 탄성과 속도를 근거로한 품셈을 암종과 지질양상이 다른 우리나라에 그대로 적용하는 것은 문

제가 있다.

마지막으로 이 연구에서 사용된 탄성과 속도를 이용한 지층 분류 시에는 적어도 다음의 두 가지 문제가 선결되어야 한다.

첫째, 적합한 탄성과 탐사 및 해석 방법이 적용되어야 한다. 둘째, 실령 올바른 탄성과 탐사 및 해석 방법이 적용되고 탐사결과를 품셈에 제대로 적용한다 하여도 지층분류(또는 암반평가)가 올바르게 되었음을 보장하지 않는다. 즉, 탐사결과를 품셈에 적용하여 평가된 지층분류 결과가 시추 등의 독립적인 방법으로 평가된 지층분류 결과와 일치한다는 보장은 없는 셈이다. 이의 해결 방법으로는 주의 깊게 설계된 테스트 베드에서의 탐사결과 및 지층분류 등이 상세히 연구되어야 한다.

이 연구에서는 여러 토목공사를 위한 지반조사를 통해 구해진 암반의 탄성과 속도를 건설표준품셈과 한국엔지니어링협회 기준에서 제시하는 암반탄성과 속도를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었으며, 문제가 되는 부분에 대하여는 아래와 같이 제안한다.

1. 현장 탐사와 실내암석시험을 통하여 측정된 연암의 탄성과 속도는 건설표준품셈 및 한국엔지니어링협회의 기준에 비해 크게 나타난다. 그러나 보통암을 포함하는 경암의 경우에는 현장 탐사와 실내암석시험으로부터 측정된 대부분의 자료가 각 기관에서 제시하고 있는 기준범위에 잘 부합한다.
2. 실내 탄성과 속도 측정결과 연암은 기준보다 빠르게 나타나고, 경암(보통암 포함)은 기준에 부합하고 있다. 이는 무결암과 같이 시험조건에 적합한 시료 선별에서 비롯된 결과라고 판단된다. 그렇기 때문에 실내암석시험으로부터 측정된 탄성과 속도만을 활용하여 암반평가 기준과의 직접적인 비교는 적절하지 않다고 생각된다.
3. 현장 탄성과 탐사로부터 획득한 연암의 탄성과 속도가 높은 이유는 하부지반의 빠른 탄성과 속도의 영향을 받기 때문인 것으로 해석된다.
4. 현장 탄성과 탐사 자료해석 시 시추자료를 고려하여 해석하면 보다 정확한 탄성과 속도 단면을 구할 수 있다. 따라서 지반조사 시 탄성과 탐사 측선에 가급적이면 2~3공의 시추공 배치를 제안한다.
5. 탄성과 속도를 통한 암반분류는 많은 문제가 있음에도 불구하고 적용이 용이하고 비용이 적게 들기 때문에 현장에서 많이 쓰이는데 전술한 문제점들에 대해 인지하고 그 결과를 사용함이 바람직하다.

사 사

국내 현장에서 수행되었던 지반조사 자료를 제공해주신 (주)희송지오텍 김기석 사장님께 감사드립니다.

References

1. 박찬, 2009, 편암의 암석역학적 특성, 한국지반공학회 2009년도 암반역학기술위원회 특별세미나 논문집, pp.38-44.
2. 차민수, 조계춘, 김재관, 최은석, 2005, 절리암반에서의 탄성과 속도 특성, 한국지반공학회지, 제21권, 제10호, pp.25-33.
3. 한국엔지니어링협회, 2017, 지반조사표준품셈.
4. 한국지구물리·물리탐사학회, 2011, 물리 탐사 길라잡이.
5. American Society for Testing and Materials, 2005, ASTM Standard Test Method: Designation D2845-05.
6. Atkinson, T., 1970, Ground Preparation by Ripping in Open Pit Mining, Min Mag, pp. 458-469.
7. Atkinson, T., 1971, Selection of Open Pit Excavation and Loading Equipment, Trans. InstMin. Metal., 80, Section A-Mining Industry, A101-129.
8. Barton, N., 1995, Permanent Support for Tunnels Using NMT, Special Lecture, Proc. Sym. KSRM (Korean Society for Rock Mechanics) and KSEG (Korean Society of Engineering Geology).
9. Berryman, J. G., 1989, Fermat's Principle and Nonlinear Traveltime Tomography, Phys. Rev. Lett. Vol. 62, pp. 2953-2956.
10. Brown, E.T., 1981, Rock Characterization Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, pp. 129-160.
11. Construction Standard Production Unit System, 2001.
12. Cheon, D.S., Park, E.S., Park, C.W. and Park C., 2008, A Basic Study for Mechanical Properties of Domestic Rocks and Database Construction, Tunnel and Underground Space, Vol. 18, No. 5, pp. 317-327.
13. Chun, I.S., 2001, Standard of Construction Estimate, KS Pumsem, 110p.
14. Heiland, C. A., 1968, Geophysical Exploration, Hafner, London.
15. Kim, K.S., Kwon, H.S. and Kim, J.H., 2003, A Case Study for Rock Mass Classification Using Geophysical Exploration Electrical Resistivity is One of Physical Property of the Earth, Seminar for Rock Mass Classification, pp. 119-137.
16. Korean Society of Rock Mechanics, 2008, Standard Test Method of Rock, pp. 13-18.
17. Kwon, B.D., 2006, On-Land Seismic Survey of Korea, Econ. Environ. Geol., 39(4), pp.441-450.
18. Park H. and Jeong, G.C, 2002, A Study on Damage Propagation Characteristics of Granite in Different Damage Levels, The Journal of Engineering Geology, Vol. 12, No. 3, pp. 273-284.
19. Park, H.D., 1995, A Study of the Laboratory Scale Measurement Technique of P-Wave Velocity for the Assessment of the An Isotropy of Engineering Property of Rock, The Journal of Engineering Geology, Vol. 5, No. 3, pp. 237-247.
20. Qin F., Olsen, K. B., Cai, W. and Schuster, G. T., 1992, Finite-difference Solution of the Eikonal Equation Along Expanding Wave Fronts, Geophysics, Vol. 57, pp. 478-487.
21. Smith, H. J., 1986, Estimating Rippability by Rock Mass Classification, Proc. 27th U.S. Symp. Rock Mech., Tuscaloosa, Ala., 443-448.
22. Song, M.Y. and Hwang, I.S., 1993, Structure and Physical Properties of Earth Crust Material in the Middle of Korean Peninsula(2): Comparison Between Elastic Velocity and Point-load of Core Specimen of Sedimentary Rocks, The Journal of Engineering Geology, Vol. 3, No. 1, pp. 21-37.
23. You, B.O. and Kim, K.S., 2003, Estimation of Excavation Difficulty in Rock Mass, Seminar for Rock Mass Classification, pp. 85-115.

이강녕



1993년 서울과학기술대학교 공과대학 토목공학과 공학사
2007년 서울시립대학교 대학원 토목공학과 공학석사
2017년 수원대학교 대학원 토목공학과 공학박사 수료

Tel: 031-220-2580

E-mail: lkn81800@korea.kr

현재 수원대학교 공과대학 건설환경에너지공학부(건설환경공학) 박사과정

박연준



1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1992년 미네소타대학교 대학원 토목공학과 공학박사

Tel: 031-220-2580

E-mail: yjpark@suwon.ac.kr

현재 수원대학교 공과대학 건설환경에너지공학부(건설환경공학) 교수