양단자유공진주 및 초음파속도법으로 획득한 압축파 속도를 이용한 암석시편의 전단파 속도 도출

방은석^{1*} · 박삼규¹ · 김동수²

¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부

²한국과학기술원 건설 및 환경공학과

Evaluating Shear Wave Velocity of Rock Specimen Through Compressional Wave Velocities Obtained from FFRC and Ultrasonic Velocity Methods

Eun Seok Bang^{1*}, Sam Gyu Park¹, and Dong Soo Kim²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Mineral Resources Research Division

²Korea Advanced Institute of Science and Technology, Department of Civil and Environmental Engineering

요 약: 암석의 강도 및 건전성 평가에 있어 전단파를 사용하는 것이 압축파에 비해 높은 신뢰성과 정확도를 제공한다. 암편의 V_s 도출을 위해 양단자유공진주기법을 수행할 시 비틀림파에 의한 공진주파수를 구분해야 하나 쉽지 않은 상황이 자주 발생한다. 또한, 초음파속도기법에서는 P파에 비해 S파 도달 시점이 모호하여 암편의 V_s 를 객관적으로 산출하는 것이 쉽지 않다. 반면에 초음파 속도법을 통해서는 V_p 값을, 양단자유공진주기법을 통해서는 V_L 값을 안정적으로 획득할 수 있는데 탄성계수간의 관계식을 이용하여 포아송비를 계산할 수 있게 되며 V_s 값을 산출할 수 있다. 알루미늄, 모노캐스트 등 다른 재질과 다른 길이를 가지는 모형 시편을 이용하여 검증 실험을 수행하였고 국내 여러 지역에서 채취한 암석시편에 대해서 제안된 방법을 적용하여 본 결과 제안된 방법의 유용함을 확인할 수 있었다.

주요어: 초음파속도법, 양단자유공진주시험, 전단파속도, 암석시편

Abstract: Using shear wave velocity is more reasonable to estimate strength and integrity of rock compared with using compressional wave. It is often ambiguous to pick the dominant frequency caused by torsional wave when evaluating V_s of rock specimen from FFRC method. It is also sometimes ambiguous to pick the first arrival point of S wave compared with P wave in the signals acquired from ultrasonic velocity method. Otherwise, the procedure of evaluating V_p using ultrasonic velocity method and V_L using FFRC method is relatively stable. Through the relationship between elastic modulus, poisson's ratio and V_s can be obtained from V_p , V_L . Applicability was checked using model specimens having different material property and length and rock specimens sampled in mine area, and usefulness of proposed procedure was verified.

Keywords: ultrasonic velocity method, FFRC method, shear wave velocity, rock core

서 론

암반의 물성 측정을 위해 암석시편에 대해서 밀도, 공극률, 강도/변형 특성 측정은 물론 탄성과 속도, 대자율, 유도분극(induced polarization) 특성을 포함한 전기적 물성 측정 등이

이루어지고 있다. 측정된 자료는 토목건설 및 자원공학분야에 있어 설계정수로 쓰이며 암석 물성 정보의 데이터베이스(database, D/B) 구축을 위한 기반이 된다. 이러한 D/B를 바탕으로 각 측정치간의 상관관계 등을 구하기도 하는데 상관관계 분석의 신뢰도를 높이기 위해서는 각각의 측정 자료의 정확성을 높여야 한다.

암석시편에 대한 탄성과 속도의 측정은 초음파속도기법(Ultrasonic Velocity Method, UVM)과 양단자유공진주(Free Free Resonance Column, FFRC) 기법 등이 적용되고 있다. 측정 시스템 및 측정 기법에 따라 동일한 암편에 대한 실험 결과에 차이가 있을 수 있으며 특히 초음파속도기법은 초동 추정이 용이하지 않아 측정장치 혹은 실험자에 따라 다른 결과

2013년 11월 11일 접수; 2013년 11월 25일 수정; 2013년 11월 26일 채택

*Corresponding author

E-mail: esbang@kigam.re.kr

Address: Mineral Resources Research Division, KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

©2013, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution,

를 도출할 수도 있다. FFRC 기법은 충격 가진에 의한 암석시편의 공진주파수를 측정하는 것이므로 초음파 기법에 비해서 결과 도출 과정이 객관적이며 반복성이 뛰어나다. 압편에서 초음파속도기법을 통해 도출하는 압축과 속도는 V_P (velocity of primary wave)인 반면에 FFRC 기법을 통해 도출하는 압축과 속도는 막대파 속도, V_L (velocity of rod wave or longitudinal wave)이다. V_P 는 구속탄성계수(constrained modulus, M)와 V_L 은 비구속탄성계수, 영률(Young's modulus, E)와 관련이 있다 (Kolsky, 1963; Achenbach, 1975). V_L 로부터 구속탄성계수(M)를 구하기 위해서는 포아송비(Poisson's ratio, ν)를 이용한 변환이 필요하다. FFRC 기법을 이용하여 압편의 V_S 를 도출할 시에 획득한 주파수 영역의 신호에서 여러 우세주파수(dominant frequency) 중 비틀림파(torsional shear wave)에 의한 공진주파수를 구분해야 하나 쉽지 않은 상황이 자주 발생한다. 초음파속도기법에서는 P파에 비해 S파 도달 시점이 모호한 경우가 있으며 가진주파수에 따라 그 지점이 바뀌기도 하여 압편의 V_S (velocity of shear wave)를 객관적으로 산출하는 것이 쉽지 않다.

압축파는 간극 및 간극수(pore water) 등에 영향을 받는 반면에 전단파는 암반자체의 특성을 주로 반영하므로 암반의 강도 및 건전성 평가에 있어 전단파를 사용하는 것이 압축파를 사용하는 것보다 높은 신뢰성과 정확도를 제공한다. 따라서 종래의 압축파 속도 측정과 더불어 전단파 속도 측정에 대한 수요가 증가하고 있다. 초음파 속도법이나 FFRC 기법 모두 신뢰성 있는 전단파 속도를 측정하는데 있어서는 압축파 속도를 측정하는 것에 비해 어려움이 있다. 초음파 속도법을 통해서 V_P 값을, FFRC 기법을 통해서 V_L 값을 비교적 안정적으로 획득할 수 있다. 탄성계수와 포아송비와의 관계식(relationships between elastic constants)을 이용하여 V_P 값 및 V_L 값으로부터 포아송비를 계산할 수 있게 되며 계산된 포아송비를 이용할 경우 V_P 혹은 V_L 값으로부터 V_S 값을 산출할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같이 비교적 측정이 용이한 V_P 와 V_L 값으로부터 V_S 값을 도출하는 방안이 직접적으로 V_S 값을 실험을 통해 구하는 것에 비해 얼마나 객관성 있는 값을 제공하는지에 대해 검증해 보았다. 아크릴, 모노케스트 등의 비교적 균질한 모형 시편을 이용하여 검증을 수행하였으며 실제 암석시편에 대해서 제안된 방법을 적용하여 보았다.

적용된 탄성과 속도 측정법 소개

초음파 속도 측정 기법

초음파를 이용한 탄성과 속도 측정은 실험 방법 및 해석 모두 비교적 간단하다. Fig. 1에 초음파 기법과 관련한 개요도 및 측정 일례를 도시하였다. 가진 및 감진 센서를 압편 양단에 각각 밀착시켜 놓고 함수발생기(function generator)를 이용하여 가진 센서를 작동시키면 이 때 발생한 초음파가 압편을 통해

Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic velocity method.

이동하여 감진 센서로 전달되게 된다. 가진 및 감진 신호를 오실로스코프(oscilloscope)를 이용하여 관찰, 기록하며 이를 이용하여 초음파의 압편 내부에서의 이동시간을 측정, 압편의 탄성과 속도를 측정하게 된다(Brown, 1981). 본 연구에서 가진을 위한 함수발생기는 Agilent사의 33220A를 사용하였다. 감진 신호 취득 및 도시를 위한 오실로스코프는 최대 자료추정 간격(sampling rate)이 2Gsa/s인 Agilent사의 DSO5014A를 사용하였다. 초음파 센서는 OYO사 제품을 사용하였다. 이 기법은 가진시점부터 P파 혹은 S파의 초동을 측정하여 도달시간을 산출해야 하므로 초동지점의 정확한 판단 및 측정 장비의 시스템 에러를 보정하는 것이 매우 중요하다. 초음파 실험을 통해 획득되는 신호 일례를 Fig. 2에 도시하였다. P파 측정용 가진 및 감진기를 이용하여 획득한 파형 일례(Fig. 2(a))를 보면 P파의 초동은 비교적 분명하게 추정할 수 있다. 반면에 Fig.

Fig. 2. Typical acquired signals from ultrasonic velocity method; (a) P wave measurement, (b) S wave measurement.

2(b)의 S파 측정용 가진 및 감진기를 이용하여 획득한 파형 일례를 보면 S파의 도달 전에 잡음이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이러한 잡음이 심할 경우 S파 도달 시점을 정확히 추정하는데 어려움이 있다. 암석 시편의 길이가 짧고 탄성과 속도가 빠르므로 S파 도달시점 추정에 있어 약간의 오류는 속도 산출에 큰 영향을 준다. 초음파속도기법에서 가진원의 주파수는 100 kHz 이상의 초고주파 영역이므로 시편에 크기에 비해 파장의 크기가 작아 시편 경계의 영향을 받지 않는다고 가정할 수 있으며 따라서 획득한 압축파 속도는 V_p 라고 할 수 있다.

양단자유공진주기법

양단자유공진주(FFRC)기법은 시편에 길이방향으로 충격을 주고 그 공진주파수(resonance frequency, f)를 측정하여 시편의 속도를 도출하는 기법이다(Kim *et al.*, 1997). 본 연구를 위해 FFRC 기법 수행 시스템을 구성하였으며 그 개략도는 Fig. 3과 같다. 양단자유는 시편의 양 끝단이 고정되어 있지 않은 상태를 의미하는 것으로 실(thread) 등을 이용하여 시편을 허공에 매단 상태로, 시편의 경계가 공기 외에 다른 매질과 접촉이 되지 않는 조건에서 타격을 통해 공진을 유발하게 된다. 양단자유조건에서 기본 모드의 공진일 때 시편의 길이는 반 파장(λ)에 해당하므로 길이 L 의 시편에 대해서 식 (1)과 같은 관계를 가진다.

$$v = f \times \lambda = f \times 2L \quad (1)$$

압축파 측정의 경우 한쪽 끝단에 가속도계를 부착하여 진동파형을 측정하고 다른 한쪽 끝단에 시편길이방향으로 충격을 가해준다. 여기서 암석 시편과 충격원과의 접촉면 크기를 달리함으로써 가진주파수를 달리해 줄 수 있다. FFRC 기법에서는 시편전체에 막대와 형식으로 파가 이동하면서 공진하는 것이므로 여기서 획득하는 압축파 속도는 V_L 이다.

센서로 사용된 가속도계는 PCB사의 모델이며 Signal Conditioner는 PCB사의 모델, 동적신호분석기(dynamic signal analyzer)는 Agilent사의 35670A모델을 사용하였다. 구성된 시스템이 올바르게 작동되는지 검증하고자 길이 1 m의 모노캐스트(monocast) 모형시편을 이용하여 시간영역 신호를 측정하였다. 가속도계를 시편 양단에 부착하고 충격해머(instrumental

Fig. 3. Schematic diagram of FFRC method.

Fig. 4. Time domain signals acquired from two accelerometers attached to both sides of 1 m length specimen.

Fig. 5. Frequency domain signal transformed from the time domain signal of accelerometer #2 in Fig. 4.

hammer)로 한쪽 면을 타격하였으며 그 시간영역 신호는 Fig. 4와 같다.

가진으로 인해 발생한 탄성파가 모형 시편 양단을 왕복하며 진행하는 것을 볼 수 있다. 양단자유 조건이므로 시편 끝단에서의 위상 반전은 관찰되지 않는다. 타격면에 위치한 가속도계(accelerometer #1)로 측정된 신호에서는 타격신호가 들어오고 그 뒤로 시편반대편까지 왕복하고 돌아온 신호들이 반복적으로 보인다. 타격지점 반대편에 위치한 가속도계(accelerometer #2)로 측정된 신호에서는 타격 이후 특정 시간이 지난 뒤에 첫 신호가 보이고 타격면까지 다시 왕복하고 돌아온 신호들이 차례로 보인다. 타격시점으로부터 타격 반대편에서 측정된 신호의 초동을 이용하면 간단한 수식을 통해 시편의 압축파 속도를 측정할 수 있겠지만 실제 획득한 파형에서 정확한 타격시점과 초동 시점을 유추하는 것이 어렵다. 실제 측정된 신호로부터 추정된 압축파의 도달시간은 50.35 ms이며 속도는 2,034 m/s가 된다. 양단을 왕복하는 신호를 반복적으로 측정하였으므로 도달시간을 측정하는데 있어서 극대점을 이용하는 것도 가능하다. 극대점을 이용할 경우 극대점은 그 지점이 명확하

로 초동 지점을 유추하는 것보다는 객관적으로 도달시간을 도출할 수 있다. 극대점을 기준으로 하여 측정된 시간차는 54.17 ms로 시편 길이를 이용하여 속도를 계산하면 1,890 m/s가 된다.

이러한 시간 영역 신호를 FFT를 통해 주파수 영역 신호로 변환한 결과는 Fig. 5와 같다. 공진주파수는 920 Hz이며 식 (1)을 이용하여 속도를 계산하면 1,884 m/s가 된다. 이는 시간 영역에서 극대점을 이용하여 구한 값과 거의 동일하다. 반면에 초동 측정을 통해 획득한 속도는 실제보다 과다 산정된 값을 알 수 있다. 초동 측정을 통해 획득한 속도가 실제 값보다 크게 측정되는 이유는 일차적으로 초동 측정의 오류가 있을 것이며 FFRC 기법에서 가진원이 저주파임에도 불구하고 가진된 파가 시편을 최초로 이동시에는 V_p 와 V_L 도 아닌 정체성이 모호한 파가 계측될 수도 있기 때문이다. 예시와 같은 모형시편은 시편의 길이가 1 m로 길고 압축파 속도가 크지 않아 시간 영역에서 시간차를 이용한 속도 측정이 가능할 수도 있으나 일반적으로 암석 시편의 길이는 10 cm이며 압축파 속도도 빨라서 시간 영역에서 해석하기는 힘들다. 이러한 실험 결과 일례는 주파수 영역에서 해석이 진행되는 FFRC 기법의 장점을 증명하는 것이라 할 수 있다.

FFRC 기법에서 비틀림 전단파를 가해주고 비틀림 전단파의 측정을 통해 공진주파수를 찾음으로써 암석 시편의 전단파 속도를 도출하는 것이 가능하다. 하지만 주로 압축파에 대한 공진주파수만이 두드러지는 압축파 시험과 달리 휨파(Flexural Wave) 등이 포함된 여러 주파수가 나타나고 비틀림 전단파에 대한 공진주파수가 가장 두드러지지 않는 경우가 많아 적용이 쉽지 않다(Park, 2005). Joh *et al.* (2006)에 의해 보다 나은 결과를 얻기 위해 OSR (Optimized Shear-Wave Resonance) 기법을 제안한 바 있지만 압축파 속도 측정을 위한 실험 방법에 비해 단순하지는 않다.

암편의 압축파 속도로부터 포아송비 및 전단파 속도 계산 방법

초음파 속도 측정기법에서는 V_p 를, FFRC 기법에서는 V_L 도출이 용이한 반면에 두 기법 모두 전단파 속도 도출은 압축파 속도 도출에 비해 쉽지 않다. 여러 탄성계수간의 이론적인 관계에 기초하면 V_p , V_L , V_s 중 어느 두 개의 값을 알면 포아송비(ν)를 구할 수 있으며 또한 모르는 다른 하나의 속도값을 계산할 수 있다. 따라서 초음파 속도 기법으로 V_p 를 구하고 FFRC 기법을 통해 V_L 을 정확하게 구할 수 있다면 실험을 통해 직접적으로 획득하기가 어려운 V_s 도출을 용이하게 할 수 있다고 판단되며 이를 본 논문에서 검증하고자 한다.

FFRC 기법을 통해 획득하는 V_L 은 식 (2)에서와 같이 비구속 탄성계수인 영률(E)과 밀도(ρ)와 관련되어 있다. 초음파 속도법으로 획득하는 V_p 는 식 (3)에서와 같이 구속탄성계수(M)와 관련된다. 구속탄성계수와 비구속탄성계수는 포아송비와

연계하여 직접적으로 변환이 가능하며 식 (4)와 같이 정리할 수 있다. 식 (4)는 포아송비에 대해서 정리가 가능하므로 V_p , V_L 의 비를 알면 포아송비를 구할 수 있다. 물론 이러한 관계식들은 선형이며 탄성거동을 하고 등방성이라는 가정하에 만족한다. 선형 및 탄성거동이란 가정사항은 탄성과 속도 측정 실험과 관련해서는 완벽하게 만족한다. 하지만 등방성 가정에 있어서는 암석의 생성원리상 비등방성인 경우가 대부분이고 이와 관련해서 고찰이 필요하지만 이러한 관계식들이 편의상 쓰이고 있다. V_s 는 식 (5)와 같이 전단탄성계수(G)와 직접적으로 관련되는데 전단탄성계수와 영률은 식 (6)과 같은 간단한 관계를 가진다. 따라서 V_L 을 알고 포아송비를 알면 식 (7)을 이용하여 전단파 속도를 계산할 수 있다.

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3)$$

$$\left(\frac{V_p}{V_L}\right)^2 = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

$$E = 2G(1+\nu) \quad (6)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} = \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}} V_L \quad (7)$$

모형시편을 이용한 제안된 방법 검증

제안된 방법을 검증하기 위해 모형시편을 이용하여 탄성과 속도를 측정하였다. 모형시편 재질은 알루미늄(aluminum, Al), 모노캐스트(monocast, M) 등이며 0.1 m 간격으로 0.1 m에서 0.4 m까지 다양한 길이로 제작하였다. 초음파 속도 측정에 대

Fig. 6. Typical testing result of FFRC method (0.3 m length monocast specimen).

Table 1. Measured elastic wave velocity and poisson's ratio of model specimens.

Model (length, mm)	Measured Value	UVM (①)	FFRC (②)	$V_P \& V_L$ (①&②)	$V_P \& V_L$ (①&②)	UVM (③)	FFRC (④)	UVM (①&③)	FFRC (②&④)
		V_P (m/s)	V_L (m/s)	ν	V_S (m/s)	V_S (m/s)	V_S (m/s)	ν	ν
M_0.1(101)		2695	1787 (1835)	0.407 (0.401)	1065 (1096)	1121	1107	0.395	0.303 (0.360)
M_0.2(198)		2720	1850	0.401	1105	1099	1096	0.403	0.424
M_0.3(301)		2719	1858	0.400	1110	1103	1064	0.402	0.525
M_0.4(403)		2717	1876	0.397	1122	1111	1041	0.400	0.624
Al_0.1(100)		6427	5043 (5144)	0.353 (0.343)	3066 (3138)	3040	3098	0.356	0.325 (0.394)
Al_0.2(200)		6402	5120	0.344	3123	2915	3110	0.369	0.355
Al_0.3(300)		6405	5146	0.342	3141	2959	3110	0.364	0.369
Al_0.4(400)		6447	5171	0.342	3156	3029	3085	0.358	0.405

한 일례는 Fig. 2와 같으며 FFRC 기법의 측정 일례는 Fig. 6과 같다. 알루미늄, 모노캐스트와 같은 재료의 시편에서는 Fig. 2와 Fig. 6의 일례에서 보듯이 초동 지점 추정 및 공진주파수 도출이 매우 용이하였다. 이는 모형 시편들의 재질이 매우 균질하고 탄성과 전달이 잘 되기 때문이다. 모든 시편에 대한 실험 결과를 Table 1에 요약하여 정리하였다.

우선 초음파속도법으로 V_P 를 산출(UVM; ①)하고 FFRC 기법을 통해 V_L 을 산출(FFRC; ②)하였다. 이 두 값을 이용하여 식 (4)에 근거하여 포아송비를 계산(ν ; ①&②)하였다. 그리고 이 포아송비를 이용하여 식 (7)에 근거하여 전단파 속도를 계산(V_S ; ①&②)하였다. 초음파속도법 및 FFRC 기법을 통해 전단파 속도를 직접 획득(UVM; ③, FFRC; ④)하여 보았으며 초음파속도법을 통해 획득한 V_P , V_S , FFRC 기법을 통해 획득한 V_L , V_S 를 이용하여서도 포아송비(UVM; ①&③, FFRC; ②&④)를 각각 계산하여 보았다.

Joh *et al.* (2006)의 연구에서 시편의 세장비(slenderness ratio, 길이/직경)에 따라 V_L 값이 달라지며 세장비가 3 내지 4 이상일 때 비로소 FFRC 기법을 통해 산출한 값과 이론적인 V_L 값과 일치한다고 보고되었다. 시편의 길이가 0.1 m 일 경우 세장비가 2 이므로 실험을 통해 획득한 V_L 값을 보정해 주어야 한다. 그래서 시편의 길이가 0.1 m 인 경우에 대해서는 다음 식 (8), 식 (9)를 통해 보정을 수행했으며 보정한 값을 표의 괄호 안에 별도로 표기하였다. 포아송비와 V_L 값이 서로 맞물려 있으므로 반복계산을 통한 수렴과정을 거쳐 최종 값을 산출하였다.

$$\beta = 1.0008 - 0.017189\nu - 0.12344\nu^2 \quad (8)$$

$$\overline{V_{rod,L}} = \frac{V_{rod,L}}{\beta} \quad (9)$$

우선 초음파 기법으로 구한 V_P 가 서로 다른 길이의 모형 시편에서 모노캐스트, 알루미늄 시편 모두 거의 동일한 값을 도출하였다. 모노캐스트 등의 재질은 제작 조건에 따라 그 물성

이 달라질 수 있지만 알루미늄의 경우에는 일반적인 물성이 알려져 있으며 V_P 는 6,360 m/s, V_S 는 3,200 m/s이다(Christensen, 1982). 실험을 통해 획득한 알루미늄의 압축파 속도는 평균 6,420 m/s로 알려진 물성값과 거의 유사하다. 즉, 초음파 기법으로 V_P 도출하는데 있어 신뢰성이 크다고 볼 수 있다. 또한 FFRC 기법을 통해 획득한 V_L 도 다른 길이의 여러 시편에서 거의 동일한 값을 보인다. 시편 길이 0.1 m의 경우 보정 전에 다른 길이 시편 결과에 비해 상대적으로 작게 나왔지만 보정 후에는 거의 동일한 값으로 되었다. 이를 통해 세장비 보정이 필요함을 본 연구에서도 확인하였으며 다음 장의 실제 암석 시편에 대한 적용 실험에도 동일한 과정의 세장비 보정을 수행하였다. 압축파 속도가 각 시편 길이에 따라 거의 동일한 결과가 나왔으므로 이 두 값을 이용하여 식 (4)로 계산한 포아송비 또한 모노캐스트의 경우 약 0.4, 알루미늄의 경우는 약 0.343으로 거의 동일하게 도출되었다. 따라서 식 (7)를 통해 계산된 V_S 값을 보면 모노캐스트, 알루미늄 등, 각 재료에 대해 구해진 값이 거의 동일하였으며 또한 물성이 알려진 알루미늄의 경우 제안된 방법으로 획득한 V_S 가 일반적인 알루미늄의 V_S 인 3,200 m/s와 유사하다.

반면에 실험을 통해 직접 획득한 V_S 값(UVM; ③, FFRC; ④)을 보면 큰 값의 차이를 보이지는 않지만 V_P , V_L 값을 이용하여 도출한 결과에 비해 편차가 큰 것을 알 수 있다. 특히 각각의 기법으로 구한 압축파 속도 및 전단파 속도를 바탕으로 계산한 포아송비(UVM; ①&③, FFRC; ②&④)와 비교해 보면 초음파 속도 기법으로 구한 경우는 비교적 양호하나 FFRC 기법으로 구한 결과는 분산이 상당히 심하며 실제로는 존재하지 않는 0.5 이상의 잘못된 값을 도출하기도 한다. 이는 FFRC 기법으로 V_S 값 도출시 실험 방법 및 자료 처리 과정에서 어려움이 없는 것으로 보이나 실제로 구한 V_S 값에 오류가 있을 수 있음을 의미한다. 초음파 속도 기법으로 구한 결과에 있어서도 이론적인 알루미늄의 포아송비가 0.33 근처인 것을 고려할 때 계산된 포아송비가 다소 크게 산정된 것으로 판단

된다.

모노캐스트, 알루미늄 재질의 검증시편을 이용해서 제안된 기법을 검증해 본 결과 제안된 기법이 안정적이고 반복적인 값을 제공하고 있으며 재질의 일반적인 물성을 대표하는 값을 제공하고 있는 것을 알 수 있었다.

암석 시편 적용 결과

광산현장에서 획득한 암석시편에 제안된 기법을 적용하여 보았다. 모형시편에서와 마찬가지로 초음파 속도법 및 FFRC 기법으로 압축파 속도, 전단파 속도를 각각 도출하였으며 제안된 방법으로 전단파 속도를 계산하여 보았다. 결과 파형 일례

Fig. 7. Typical good quality ((a) and (b)) and bad quality ((c) and (d)) testing results (frequency domain signals) of FFRC method using rock core specimens sampled in mine area.

를 Fig. 7에 도시하였으며 Table 2에 적용 결과를 요약하여 정리하였다. 초음파 속도법에 대한 파형 일례는 Fig. 2에서와 같이 전반적으로 양호하여 도시를 생략하였다. Fig. 7(a)와 (b)는 같은 시편에 대해서 압축파 및 전단파에 의한 양호한 주파수 영역 신호 일례를 보여준다. 공진 현상이 뚜렷하며 공진주파수를 의심 없이 읽을 수 있다. 반면에 Fig. 7(c)와 (d)는 공진 현상이 뚜렷하지 않아 주파수 영역 신호가 불량한 예로 우세주파수를 선택할 수는 있으나 신뢰도가 떨어진다. 전단파의 경우에는 압축파에 비해 가진 및 감진이 어려워 그 영향은 크며 비틀림전단파에 의한 공진주파수라고 확신하기도 더 어려워진다.

Table 2의 요약된 결과를 보면 초음파 속도기법 혹은 FFRC 기법을 통해 V_s 획득의 어려움은 실제 암석 시편 실험 결과에서 더욱 명확하게 보인다. 각각의 기법으로 구한 V_p , V_L , V_s 값의 정확도에 대해서는 모형시편에서와 같이 참고치가 존재하지 않아 객관적으로 평가할 수가 없으나 도출된 포아송비를 통해 신뢰성 정도를 판단할 수 있다. 초음파 기법과 FFRC 기법을 통해 획득한 각각의 V_p , V_s 그리고 V_L , V_s 를 이용하여 계산한 포아송비를 보면 GM02-13에서는 FFRC 기법으로 구한 것은 너무 컸으며, DH2 계열에서는 너무 작거나 음의 값을 보였다. 하지만 제안된 방법을 통해 획득한 포아송비는 일반적인 암석 물성 범위 안에 있으며 계산된 전단파 속도의 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

토의 및 결론

검증 시편을 이용하여 초음파 속도기법으로 V_p 및 V_s 를 구하는데 있어 실험 과정 및 결과 값 자체를 따로 놓고 보면 서로 다른 길이의 시편에서 거의 동일한 값이 나오고 알루미늄 시편의 경우 알려진 값과 유사한 값을 제공하는 등 정확도가 매우 높다고 판단할 수 있었다. 하지만 이 두 개의 속도값을 이용하여 산출한 포아송비는 일반적인 알루미늄의 포아송비인 0.3에 비해 상당히 큰 값인 0.36 정도로 산출되었다. 이는 초음파 속도기법으로 V_p 및 V_s 를 측정할 때 정확한 초동 파악에 문제가 있어 값의 오류로 이어진 것으로 판단된다. 일반적으로 알려진 알루미늄의 V_p 값(=6,360 m/s), V_s 값(=3,200 m/

Table 2. Measured elastic wave velocity and poisson's ratio of rock core specimens.

Model (length, mm)	Measured Value	UVM	FFRC	$V_p \& V_L$	$V_p \& V_L$	UVM	FFRC	UVM	FFRC
		V_p (m/s)	V_L (m/s)	v	V_s (m/s)	V_s (m/s)	V_s (m/s)	v	v
GM02-1(100.5)		6230	5503	0.281	3438	3350	3421	0.298	0.298
GM02-10(100.3)		5669	5143	0.256	3245	3240	3234	0.257	0.267
GM02-13(100.7)		5797	5342	0.240	3392	3380	3171	0.242	0.506
GM05-7(100.8)		5692	5382	0.205	3466	3357	3430	0.233	0.236
GM03-5(97.9)		5595	5164	0.237	3283	3308	3295	0.231	0.227
DH2-143(100.4)		3358	3067	0.249	1940	2212	1902	0.117	0.316
DH2-171(100.5)		3150	2792	0.278	1746	2464	2239	-0.288	-0.240

s)과 비교하여 볼 때 V_s 값의 차이가 더 컸으며 이는 초동 지점 파악의 어려움이 V_s 측정 시 더 크다는 것을 의미한다. 또한 FFRC 기법으로부터는 V_L 의 값을 획득하는데 있어서는 객관적인 값의 도출이 가능하였다. 초음파속도법과 FFRC 기법을 통해서 직접적으로 V_s 값을 구하는 경우에도 실험 및 결과 도출과정에서는 큰 문제없이 V_s 값을 도출할 수도 있었다. 하지만 각각의 기법에서 직접적으로 구한 압축파 및 전단파 속도를 통해 계산된 포아송비를 볼 때 일반적인 값보다 크거나 0.5 이상의 잘못된 값을 도출하기도 하여 신뢰성 측면에서는 의문이 있었다. 반면에 제안된 기법으로는 검증 시편 및 실제 암편을 통해 획득한 결과에서 보면 신뢰성 높은 V_s 값을 제공했다고 판단되었다. 우리가 공학적 목적으로 암편의 V_p , V_s , V_L 을 구할 때 신뢰할만한 값들을 제공하지 못한다면 실험기법으로서의 가치가 떨어진다. 이런 측면에서 제안된 방법은 암석 시편의 V_s 값을 제공하는데 있어 훌륭한 대안이 될 수 있다고 생각된다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘심부 금속광체

정밀 물리탐사 및 채광기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Achenbach, J. D., 1975, *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland, Amsterdam, p.33.
- Brown, E. T., 1981, *Rock Characterization Testing and Monitoring*, Pergamon, Oxford, p. 211.
- Christensen, N. I., 1982, Seismic velocities, in *Handbook of Physical Properties of Rocks*, Vol. II, edited by R. S. Carmichael, pp. 1-228, CRC Press.
- Joh, S. H., Cho, M. R., Park, B. S., and Kwon, S. A., 2006, Optimized Shear-Wave Resonance (OSR) Method to Evaluate the Compressive Strength of Concrete Cores and Cylinders, *Korean society of road engineers*, 2006 autumn conference.
- Kim, D. S., Kweon, G. C., and Lee, K. H., 1997, *Transp. Res. Rec.*, **62**, p. 1577,
- Kolsky, H., 1963, *Stress Waves in Solids*, Dover, New York, p.96.
- Park, B. S., 2006, Evaluation of Shear wave Velocities Using the Resonances of Unconstrained Compressive Waves and Flexural Waves in Free-Free Resonance Tests, *Master Thesis*, Chung-Ang University.