

시추 및 물리검층자료의 상관해석을 통한 청주화강암체의 물성 정보 및 절리 분포

이선중 · 이철희 · 장형수 · 김지수*

충북대학교 지구환경과학과

Physical Properties of and Joint Distribution Within the Cheongju Granitic Mass, as Assessed from Drill-core and Geophysical Well-logging Data

Sun-Jung Lee, Cheol-Hee Lee, Hyung-Su Jang, and Ji-Soo Kim*

Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

기존의 지표탐사 자료가 존재하는 화강암 지역의 파쇄대 및 절리 분포를 파악하기 위해 30 m 떨어져 있는 두 개의 시추공에 대한 코어자료 분석 및 물리검층을 실시하였다. 시추 코어 자료를 이용하여 암상을 구분하였고 RMR(암반분류)과 RQD(암질지수)에 의한 암반 상태를 확인하였으며, 기반암에 해당되는 연암과 경암 부분에 대한 파쇄대의 절리 및 분포 상태를 물리검층과 시추공 탄성과 토모그래피를 통해 확인하였다. 이미 탄성과 굴절법탐사에서 해석된 기반암까지의 깊이를 공대공 탄성과 토모그래피를 통해 확인하였고 암반의 동적인 성질을 파악하기 위해 완전파형 음파검층과 감마-감마검층으로 동탄성계수를 계산하여 P와 속도와의 상관관계를 알아보았다. 특히 시추공 BH-2의 경암 부근에서 그 상관성이 넓게 분산되는 현상은 절리 및 파쇄대가 BH-1 지역에 비해 많이 발달한 효과로 보인다. 이 양상은 초음파 주사형 텔레뷰어 및 광학적 영상기법 텔레뷰어와 같은 이미지 검층 자료에서도 충분히 관찰되었다.

주요어 : 시추공, 물리검층, 동탄성계수, 탄성과 토모그래피, 절리, 이미지 검층

Abstract: To clarify the distribution of joints and fracture zones in the Cheongju granitic mass, we analyzed drill-core and geophysical well-logging data obtained at two boreholes located 30 m from each other. Lithological properties were investigated from the drill-core data and the samples were classified based on the rock mass rating (RMR) and on rock quality designation (RQD). Subsurface discontinuities within soft and hard rocks were examined by geophysical well-logging and cross-hole seismic tomography. The velocity structures constructed from seismic tomography are well correlated with the profile of bedrock depth, previously mapped from a seismic refraction survey. Dynamic elastic moduli, obtained from full waveform sonic and γ - γ logging, were interrelated with P-wave velocities to investigate the dynamic properties of the rock mass. Compared with the correlation graph between elastic moduli and velocities for hard rock at borehole BH-1, the correlation points for BH-2 data showed a wide scatter. These scattered points reflect the greater abundance of joints and fractures near borehole BH-2. This interpretation is supported by observations by acoustic televiewer (ATV) and optical televiewer (OTV) image loggings.

Keywords : borehole, geophysical well-logging, dynamic elastic modulus, seismic tomography, joint, image logging

서 론

지반의 지층상태 및 물성자료를 얻기 위해 여러 가지 조사기법들이 수행되고 있다. 이중에서 시추공을 활용한 물리탐사는 비록 국부적이지만 현지(in-situ) 물성과 높

은 해상도의 지하구조를 파악할 수 있는 대표적인 방법이다. 건설 및 시공을 위한 사전 지질조사로서는 일반적으로 지표지질조사, 굴절법 탄성파탐사, 시추조사 등을 실시하지만 복잡한 천부 지질구조나 지하수면의 파악에는 충분치 않은 경우가 많기 때문이다.

*Corresponding author: geop22@cbnu.ac.kr

특히 지질조사는 지표만을 대상으로 하고 정밀 지질 조사 방법인 시추조사는 지하 지층의 시료를 직접 채취하여 원위치 시험을 통해 지하매질의 물성정보를 정확하게 파악 가능하지만 시추위치에 국한된 정보만을 얻을 수 있다는 단점이 있다. 그리고 동적 하중을 받는 토목구조물의 설계에서 지반의 구조물과의 상호작용에 대한 이해가 중요하며, 이를 위해서는 동적인 지반탄성계수의 측정이 필요하다. 또한 굴절법 탄성파탐사는 주로 지반의 평균적인 탄성파속도를 구하는 것으로서 고속도층의 아래에 저속도층이 분포할 경우에는 저속도층에 대한 해석이 대단히 어려워지는 단점을 가지고 있다. 따라서 지반조사 분야에서 정확한 평가를 내리기 위해서는 지표뿐만 아니라 지하에 대한 정보를 얻어 이들을 서로 상관해석하는 것이 필수적이며 특히 지하구조나 지하 물성정보를 정량적으로 파악하기 위해서는 다양한 물리탐사를 복합적으로 실시하는 것이 요구된다(Nascimento da Silva et al., 2004).

국내 대부분의 불연속면에 관한 연구는 초음파나 가시광선을 이용하는 텔레뷰어기법(김중열 외, 1995; 황세호와 이상규, 1999; 김경수, 2001)에 의존하고 있다. 그러나 일반적인 물리검층에 의한 불연속면 즉, 절리 및 파쇄대 연구의 필요성은 적지 않은바, 이는 텔레뷰어에 의한 두 시추공간의 절리에 대한 비교분석뿐만 아니라

지하 불연속면의 연장성을 파악하는데 초점을 두어야한다(김영화 외, 2001).

이 연구에서는 인근지역에서 이미 지표조사와 천부 물리탐사에서 일부 확인된 지역의(김지수 외, 2005) 지하구조를 보다 정확히 해석하고 지하매질의 물성을 정량적으로 살피고자 시추코어 자료의 분석 및 RMR과 RQD에 의한 암반의 풍화등급(ISRM, 1981)을 분류하였으며, 공대공 탄성파 토모그래피를 굴절법탐사에서 구해진 속도단면도(이선중 외, 2010a)와의 상관해석을 통해 기반암의 깊이 등을 확인하였다. 또한 완전파형 음파검층과 감마-감마검층(γ - γ logging)을 실시하여 각 암상들의 변화에 대한 탄성파 속도와 밀도를 계산하여 탄성파 속도에 대한 동전단탄성계수(G_{ij}), 동탄성계수(E_{ij}), 동체적탄성계수(K_{ij})를 구하여 P파 속도와와의 상관관계 그래프를 통해 절리 및 파쇄대의 상태를 분석하고, 이미지 검층을 통하여 이들을 관찰해 보았다(Fig. 1).

연구지역

본 연구지역은 1대 5만 청주도폭 (권영일과 진명식, 1974)의 중심부인 충북대학교 부지로 북위 36°37'32'', 동경 127°27'23'' 부근에 위치하며 주 구성암석은 중생대 쥐라기 대보화강암체이다. 이 지역은 화강암이 폭넓

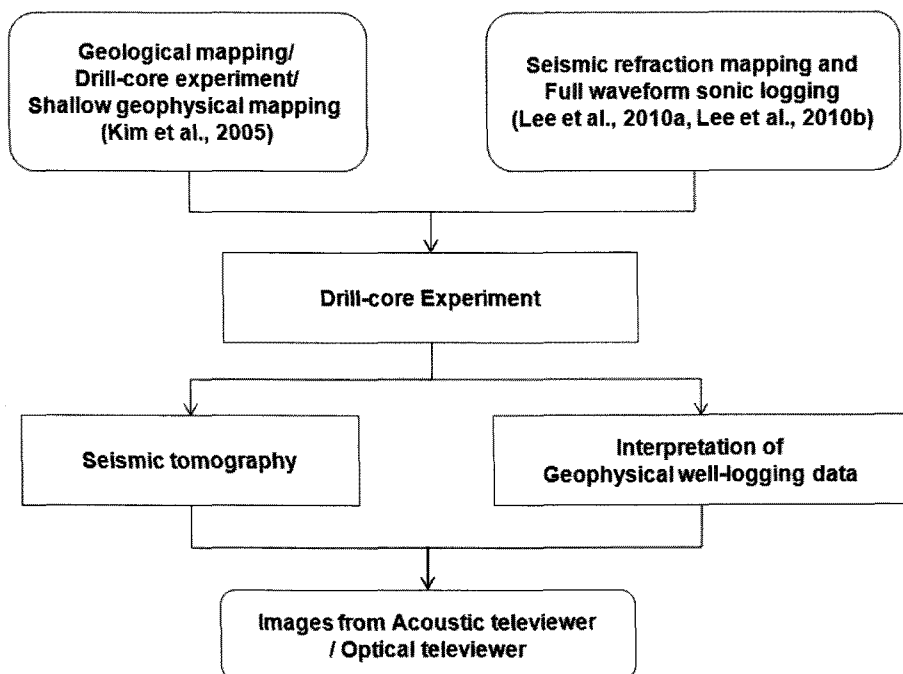


Fig. 1. Flowchart of the research stream in the present study.

게 분포하고 있으며 또한 이를 비슷한 시기에 관입한 것으로 생각되는 섬록암과 중생대 또는 백악기의 맥암류가 곳곳에 산재한다. 그리고 이들 기반암들을 4기의 층적층들이 부정합관계로 폭넓게 덮고 있다. 청주 도폭에 분포하고 있는 화성암류는 반상화강암, 흑운모 화강암이며 암상은 화강섬록암-화강암 계열에 속한다. 조사 지역의 지질은 노출되어 있는 암상을 기준으로 했을 때 크게 반상화강암과 염기성 맥암으로 구성된다. 이 암석들은 풍화로 인하여 대부분 마사(saprolite)로 변해가는 과정 중에 있으나 대부분 기존 암석의 특징이 잘 나타난다. 육안에서 확인되는 반상화강암의 주 구성광물은 석영, 정장석, 흑운모, 각섬석 등이며 정장석이 반정으로 나타나는 것이 특징이다.

이번 시추공 탐사는 서로의 거리가 30 m 떨어진 두 시추공을 기반으로 실시하였는데 이번 조사지역에서 약 200 m 떨어진 지역에서 풍화토층 및 관입암맥과 관련된 단층을 확인하기 위한 지표관찰, 시추코어의 지질공학실험, 천부지표물리탐사가 실시된바 있다(Fig. 2a; 김지수 외, 2005). 단층의 윗부분은 폭이 약 40 cm이고 N10°E, 75°NW의 방향성을 갖는 염기성 맥암으로 단절되어 있다

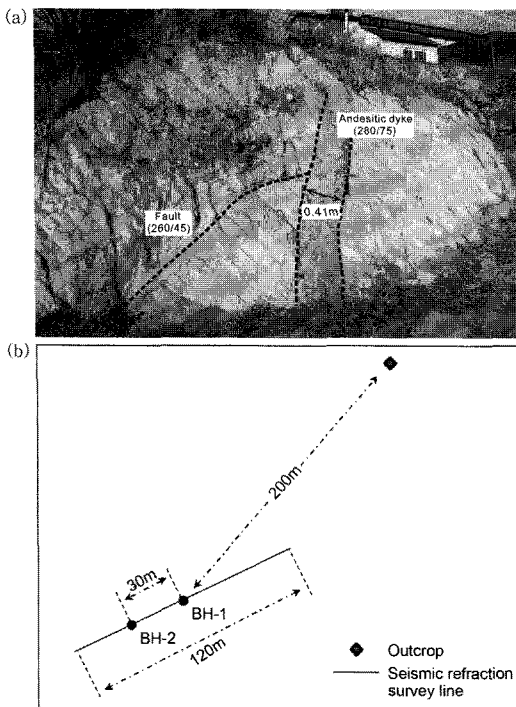


Fig. 2. (a) Photograph of an outcrop (Kim et al., 2005) located approximately 200 m northeast of the study site (b).

(Fig. 2a). 기반암까지의 깊이를 알기 위해 최근에 시추공 구간을 포함한 120m 거리의 현장에서 직접 처리가 가능한 탄성과 굴절법 GRM 프로그램이 운용된 바 있다(Fig. 2b; 이선중 외, 2010b). 당시 굴절법 탐사에 사용된 수신기는 모두 23개로 총 120m의 거리에서 설정하였으며, 해머 타격은 각각 양끝 이격거리 5m 지점에서 실시하였다.

시추코어 자료 분석

지질 및 지반조사에서 두 시추공 사이의 지층 구분은 각 시추코어 자료에 나타나는 같은 지층을 연결하여 해석하는 것이 일반적이다(Fig. 3). 그러나 시추공간 거리가 30 m에 불과한 이 지역이 Fig. 2a에서 보는 바와 같이 소규모의 단층 및 암맥과 관련된 지층이 어느 정도 교란되어 있는 곳이라 해석되어 시추조사와 시추공 물리탐사를 수행하여 조사지역의 지질 및 지반의 정보를 얻고자 하였다.

두 시추공 사이에 분포하는 풍화암과 기반암의 지질 공학적인 특성을 파악하기 위해 RMR (rock mass rating), TCR (test core recovery), RQD (rock quality designation)를 분석하였다.

RMR 시스템의 분류요소는 5개로 구성되며 일축 압축강도 15점, RQD 20점, 평균불연속면 간격 20점, 불연속면의 상태 30점, 그리고 지하수 상태가 15점으로 각 요소의 중요인자에 대한 가중치를 결정하여 합산한 값을 기본 RMR 값으로 하였다(Table 1). Deere and Miller (1966)에 의하면 암석의 일축 압축강도는 슈미트 해머의 타격 값(Schmidt hammer rebound value)과 유사한 대비 관계가 있음을 보여주었다. 따라서 일축 압축강도는 이번 시추코어 자료 분석 시 슈미트 해머의 타

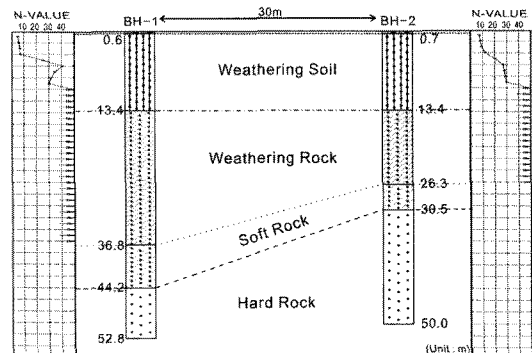


Fig. 3. Lithological description of the Cheongju Granite at the study site (modified from Lee et al., 2010b).

Table 1. RMR parameters and their values for soft and hard rocks near the two boreholes.

NO.	Rock Mass Rating	Soft Rock		Hard Rock	
		BH-1	BH-2	BH-1	BH-2
1	Strength of Intact Rock	7	5	12	8
2	RQD	10	8	20	13
3	Spacing of Joint	8	8	13	9
4	Discontinuity length(Persistence)	10	9	15	13
5	Ground water	3	3	3	3
	Total RMR Range	38	33	63	46

Table 2. Uniaxial compressive strength data obtained from Schmidt Hammer values.

		Density (kg/m ³)	Schmidt Hammer value	UCS (Mpa)	R1
BH 1	Soft rock	2650	40, 45, 48, 55, 38, 35, 36, 42, 30, 40	55~90	7
	Hard rock	2780	50, 52, 55, 50, 60, 58, 58, 52, 54, 52	150~250	12
BH 2	Soft rock	2560	32, 38, 36, 32, 38, 38, 40, 34, 42, 36	60~70	5
	Hard rock	2670	42, 42, 40, 36, 48, 46, 44, 46, 48, 40	100~120	8

격 시험에 의한 타격 값을 이용하였으며, 이는 암석의 일축 압축강도를 구하기가 매우 쉽고, 편리하며(Cheong and Lee, 1998) 시추코어를 손상시키지 않고 보존할 때 많이 이용한다.

두 시추공의 기반암을 기준으로 RMR 평가를 하였는데, 시추공 BH-1과 BH-2의 연암 부분에서의 RMR 값은 각각 38과 33으로 불량한 상태의 암반(poor rock)으로 확인되었다. 경암 부분에서는 BH-1의 RMR 값은 63으로 비교적 신선한 암반(good rock)으로 확인되었지만 BH-2의 RMR 값은 46으로 보통 상태의 암반(fair rock)으로 확인되었다.

Table 1에 사용된 일축 압축강도는 시료를 직경 50 mm, 길이 100 mm의 균일한 크기로 제작하여 측정 한 밀도와 구간별로 총 20회씩 타격하여 상위 10회의 값으로 평균을 낸 슈미트 경도 및 일축 압축강도와

상관그래프(Deere and Miller, 1966)를 이용하여 산정하였다(Table 2).

코어의 절리 상태를 확인하기 위해 시추코어의 자료를 기반으로 TCR과 RQD를 살펴보았다(Table 3). 코어 회수율인 TCR은 BH-1과 BH-2 모두 좋은 편에 속하였다. RQD는 회수된 코어에서 0.1 m 이하의 코어 길이를 제외한 나머지 코어의 총길이를 백분율로 나타내며 RQD를 계산함으로써 대체적인 절리의 상태를 확인할 수 있다. 경암을 기준으로 할 때 BH-2에서의 RQD는 BH-1에서의 값보다 매우 낮게 나타나는 점으로 볼 때 BH-2 부근의 경암에 파쇄대와 절리 등이 상대적으로 많이 발달하는 것으로 해석된다.

시추코어를 토대로 시추주상도에 기록된 암질과 불연 속면의 발달상태, 지하의 경계면 등으로 지하의 대체적인 모습을 확인할 수 있지만 굴진 과정에서 회전력이나

Table 3. TCR and RQD values for soft and hard rocks in terms of depth within the two boreholes.

Depth(m)	BH-1		Depth(m)	BH-2			
	TCR(%)	RQD(%)		TCR(%)	RQD(%)		
Soft Rock	36.8-39.6	100	43	Soft Rock	26.3-28.4	100	29
	39.6-42.2	85	24		28.4-30.5	100	46
	42.2-44.2	100	55		30.5-33.6	93	59
	44.2-46.4	100	86		33.6-36.4	100	53
Hard Rock	46.4-48.8	100	100	Hard Rock	36.4-39.4	100	19
	48.8-51.8	100	99		39.4-42.6	100	49
	51.8-52.8	100	61		42.6-45.0	100	43
					45.0-48.0	100	32
			48.0-50.0	100	0		

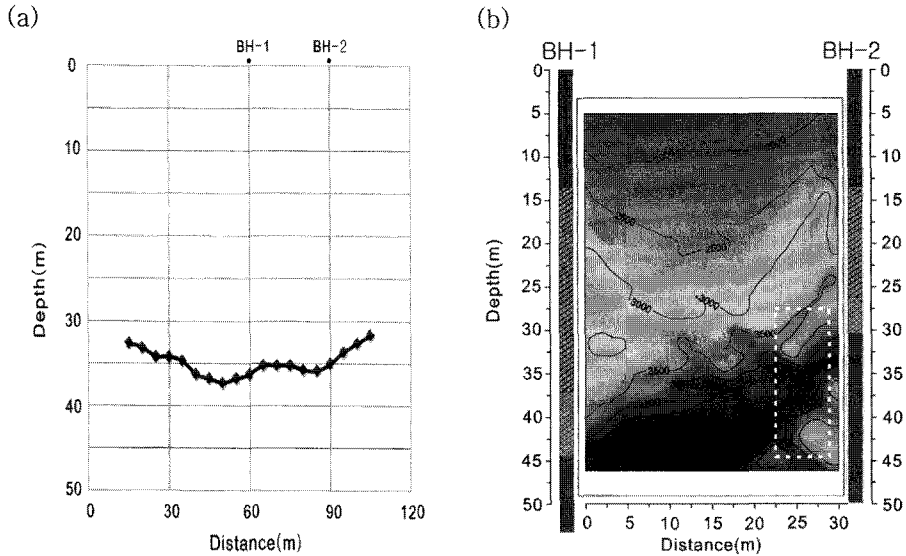


Fig. 4. (a) Profile of the depth to bedrock, as obtained from a seismic refraction survey (Lee et al., 2010), and (b) velocity structure obtained from cross-hole tomography. Velocities in the white rectangle appear to be variable at the depth of hard rock near borehole BH-2, indicating the development of fractures and joints.

충격에 의해 정향이 흐트러지거나 기계적인 파괴 작용이 수반될 수도 있고, 또한 지반 조건이 불량한 경우에는 코어 자체도 얻기 곤란할 수 있어 지반의 정확한 평가에 어려움이 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 물리검층과 시추공탐사, 그리고 지하의 지질 상태를 육안으로 확인할 수 있는 이미지 검층을 실시하였다.

공대공 탄성파 토모그래피

시추공 물리탐사에서 지하불연속면을 작성하기 위해 가장 많이 쓰이는 시추공간 토모그래피(crosshole tomography)는 한 개의 시추공에는 탄성파 발생 장치를, 다른 시추공에는 수신장치를 삽입한 후 여러 각도로 탄성파를 주고받은 다음 이들 파의 초동주시(혹은 진폭)를 발췌하고 이를 역산(inversion)하여 주 시추공 사이의 지층구조를 영상화하는 방법이다(장현삼 외, 1999). 역산 방법으로는 사영법(projection method)에 기초를 둔 ART(algebraic reconstruction techniques)법을 변형한 SIRT(simultaneous iterative reconstruction techniques)법(Trampert and Leveque, 1990)을 사용하여 모든 파선에 대한 격자의 보정치를 구하여 이들의 평균치로 보정하였다.

이 연구에는 초동주시를 이용한 주시토모그래피가 이용되었고 여기서 작성된 속도단면도를 탄성파굴절법 자

료에서 얻어진 기반암 상부와 부합되는지 살펴보았다. 즉 약 30 m 거리에 있는 깊이 50 m의 2개 시추공의 위치를 포함하는 120 m 길이의 축선의 탄성과 굴절법 양단발파 자료(Fig. 2b)에서 이미 해석된 결과(Fig. 4a; 이선중 외, 2010a)를 탄성파 토모그래피에서 얻어진 속도 단면도(Fig. 4b)와 비교해 보았다. 토모그래피는 깊이 3~48 m까지 1 m의 송신간격, 하이드로폰을 이용한 깊이 4~50 m까지의 수신간격 1 m로 작성되었다. 시추 및 공대공 탄성파 토모그래피에 나타난 기반암의 연암 상부까지의 깊이는 탄성과굴절법에서 기반암 전체의 P파 속도 4000 m/s를 근거로(이선중 외, 2010a) 해석된 기반암까지의 깊이 32~37 m와 대체로 일치하고 있다. 토모그래피 자료에서 BH-2의 기반암에 해당되는 부분(흰 점선의 상자)에서 속도변화가 상대적으로 심한 것으로 보이는데 이것은 파쇄대와 절리에 의한 영향으로 앞에서 기술된 RMR, TCR, RQD가 낮은 부분과 부합되며 이와 같은 해석은 또한 다음에 설명할 동탄성계수와 P파 속도와의 상관관계 그래프에서의 분산 현상과 잘 상관된다.

동탄성계수와 P파 속도와의 상관관계

동탄성계수는 지진과 같은 외부의 진동이 지반이나 구조물에 미치는 반응특성을 예측할 수 있는 표준지표가 되기 때문에 원자력 발전소, 대형교량, 지하유류 비

축기지 및 터널과 같이 진동에 민감한 구조물을 시공할 때 반드시 지반의 동탄성계수를 측정할 필요가 있다. 이와 같이 동적 분석에 있어서 가장 중요한 변수 가운데 하나인 동탄성계수는 현장에서 P파, S파 속도를 측정하여 구할 수 있다(한국암반공학회 외, 1999). 완전파형 음파검층을 통하여 측정된 탄성과 속도와 감마-감마검층을 통하여 측정된 밀도 값을 이용하여 동탄성계수, 동전단탄성계수 및 동체적탄성계수를 각각 다음과 같은 식으로부터 구하였다.

$$E_d = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 1V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} = 2G_d(1 + \nu_d) \quad (1)$$

$$G_d = \rho V_s^2 \frac{E_d}{2(1 + \nu_d)} \quad (2)$$

$$K_d = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) = \frac{E_d}{3(1 - 2\nu_d)} \quad (3)$$

여기서 식 (1), (2), (3)에 사용된 속도값은 1 m 간격으로 측정된 속도값이며, ρ 는 밀도(kg/m^3), ν_d 는 동포아

송비, E_d 는 동탄성계수, G_d 는 동전단탄성계수, K_d 는 동체적탄성계수이다.

밀도 검층은 Co⁶⁰ 감마소스를 부착한 손드(sonde)를 상향 이동시키면서 0.01 m 간격으로 측정을 하였으며 그 값은 구간별 평균값으로 계산하였다.

Fig. 5에서 완전파형 음파검층을 통하여 얻어진 P파 속도는 시추공 BH-1 부근의 연암 구간에서 2800~5800 m/s, 경암 구간에서 5100~5800 m/s의 분포를 나타내고 있다. 또한 BH-2부근의 P파 속도는 연암 구간에서 2800~3600 m/s, 경암 구간에서 3200~5800 m/s의 분포를 보인다. BH-2 부근의 경암이 속도변화가 큰 것은 암상의 변화와 심도별 질리의 분포 변화에 기인된 것으로 파악되는데 이것은 박충화 외(2002), 송무영 외(2002)의 해석결과와도 대체로 일치된다.

탄성과 P파 속도에 대한 동탄성계수의 분산을 비교하면 전체적으로 동체적탄성계수가 동탄성계수와 동전단탄성계수에 비하여 높은 값을 나타내며, P파 속도가 증가할수록 동탄성계수가 증가하는 상관성을 보인다. 또한

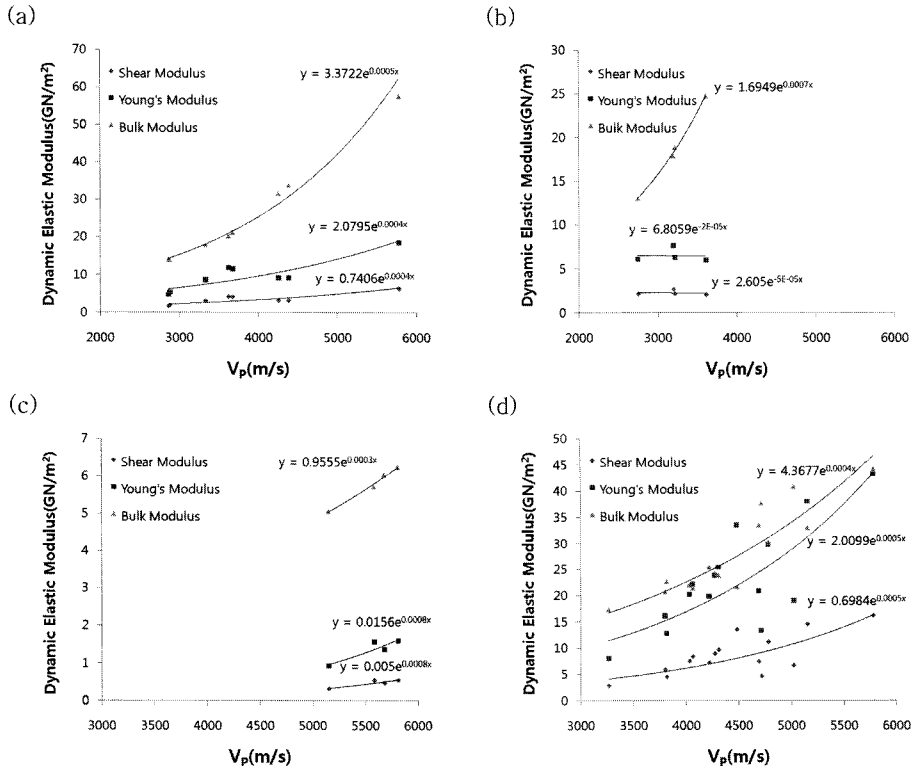


Fig. 5. Seismic P-wave velocity versus the dynamic elastic moduli E_d , K_d , and G_d of (a) soft rock and (b) hard rock at BH-1, and of (c) soft rock and (d) hard rock at BH-2. Compared with BH-1, the data points for hard rock at BH-2 show a wide scatter, which is related to the large number of joints and fractures near BH-2.

Table 4. Velocities and densities of soft and hard rocks near the two boreholes.

			Velocity(m/s)				Density(kg/m ³)			
			min	max	average	standard deviation	min	max	average	standard deviation
BH-1	Soft rock	P	2865	5780	3850	897	1760	2170	1980	130
		S	911	1802	1295	266				
	Hard rock	P	5155	5814	5560	247	1760	2370	2060	170
		S	1244	1629	1499	155				
BH-2	Soft rock	P	2747	3610	3192	305	1960	2190	2100	60
		S	987	1127	1035	54				
	Hard rock	P	3268	5780	4429	604	1740	2410	1970	200
		S	1198	2865	2041	449				

BH-2에서 연암 구간의 감소 형태나 경암 구간으로 갈수록 속도변화가 크고 동탄성계수의 분포가 넓어지는 것은 이곳에 상대적으로 많이 분포하는 절리나 파쇄대에 의한 것으로 보인다.

Table 4는 연암과 경암 구간에 대한 탄성과 속도와 밀도의 통계 분석 결과를 도표화한 것이다. 경암 구간을 보면 BH-1에 비해 BH-2의 P파 속도 및 밀도의 평균 값이 작고 표준편차는 크게 나타난다. 이 결과는 BH-2의 경암 구간에 상대적으로 많이 분포하는 절리 및 파쇄대에 기인한 것으로 보인다. 실내시험에 비하여 밀도 값이 낮은 이유는 실내시험에서 보다 현장에서 물성 정

보에 미치는 요인(절리, 암석 성분 등)에 기인한 것으로 보인다.

물리 · 이미지 검층자료 및 불연속면 분석

이 연구에서는 이미지 검층 중에서 초음파주사형 텔레뷰어(ATV; acoustic televiewer) 검층기법과 광학적 영상기법 텔레뷰어(OTV; optical televiewer)를 이용하였다. ATV를 이용하여 절리 및 단층의 발달 상태를 확인하였으며 OTV를 사용하여 시추공벽을 촬영하였는데 특히 RMR에서 서로 비슷하게 나왔던 연암 구간보다 확연한

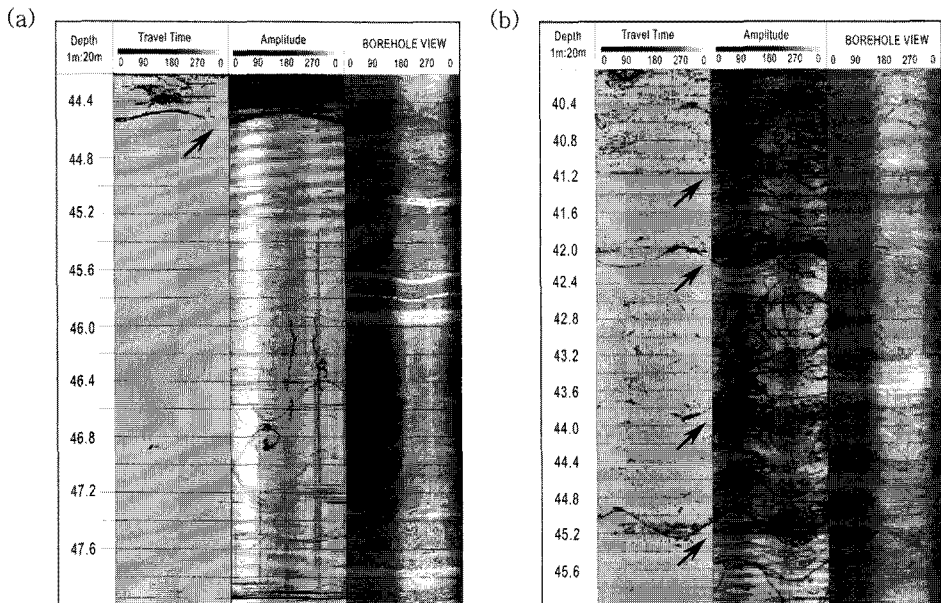


Fig. 6. Acoustic televiewer and optical televiewer images of hard rock at (a) BH-1 and (b) BH-2. The two logs on the left (“Travel time” and “Amplitude”) represent the acoustic televiewer images; that on the right (“BOREHOLE VIEW”) represents the optical televiewer image. Arrows indicate events from the joints, which are clearly shown for BH-2.

차이를 보였던 경암 부분을 강조하여 확인해 보았다(Fig. 6). 앞서 동탄성계수와 P파 속도와와의 상관관계에서 해석된 BH-2의 경암 부분에서 많이 발달한 절리 및 파쇄대의 분포를 이미지 검층으로 직접 관찰할 수 있다.

또한 완전파형 음파검층과 $\gamma\text{-}\gamma$ 검층(Fig. 7a, 7b)에서 얻어진 속도와 밀도 자료에서 속도와 밀도가 급격하게 감소하는 구간인 BH-1의 연암 40~44 m 부분과 BH-2의 경암 35~40 m 부분(Fig. 7a, 7b의 점선 구간)을 이미지 검층으로 확인해보았다(Fig. 7c, 7d). 여기서도 많은 절리와 파쇄대가 관찰되는데 따라서 절리와 파쇄대의 유무에 따라 속도와 밀도, 그리고 동탄성계수가 차이 난다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다.

두 시추공의 이미지 검층자료에서 확인된 불연속면에 대한 연관성을 확인해보기 위하여 방향성을 평가하였다(Fig. 8). Fig. 8에 표시된 절리면 중 열린절리면과 닫힌절

리면의 구분은 ATV 이미지에서 발췌한 불연속면에 대한 정보를 하나의 보기로서 도표화하여 나타낸 것이다. 열린 절리면은 절리가 열려 있거나 혹은 시추에 의해 열려진 경우에 해당한다. 즉, 이미지 검층에 대한 분석결과(Fig. 6)에서 진폭 상의 \sin 곡선이 전파시간 상에서도 나타나는 경우(화살표 표시 부분)이며, 닫힌절리면은 절리가 닫혀 있거나 광물이 충전된 경우로, 진폭 상에서 \sin 곡선의 형태가 조금이라도 인식되는 모든 경우에 해당한다.

이미지 검층으로 확인한 열린절리면과 닫힌절리면의 수는 BH-2가 BH-1에 비해 많이 관찰되는데(Fig. 8) 이 현상은 앞에서 일반적으로 설명된 BH-2의 경암 부근에서 더 많이 분포하는 파쇄대/절리와 관계있다.

BH-1에 대해서 전체절리면의 주방향성은 $N31^{\circ}E/73^{\circ}SE$, 열린절리면은 $N55^{\circ}W/46^{\circ}SW$, 닫힌절리면은 $N33^{\circ}E/74^{\circ}SE$ 의 주향과 경사를 각각 보인다. BH-2는 각 절리면에 대해

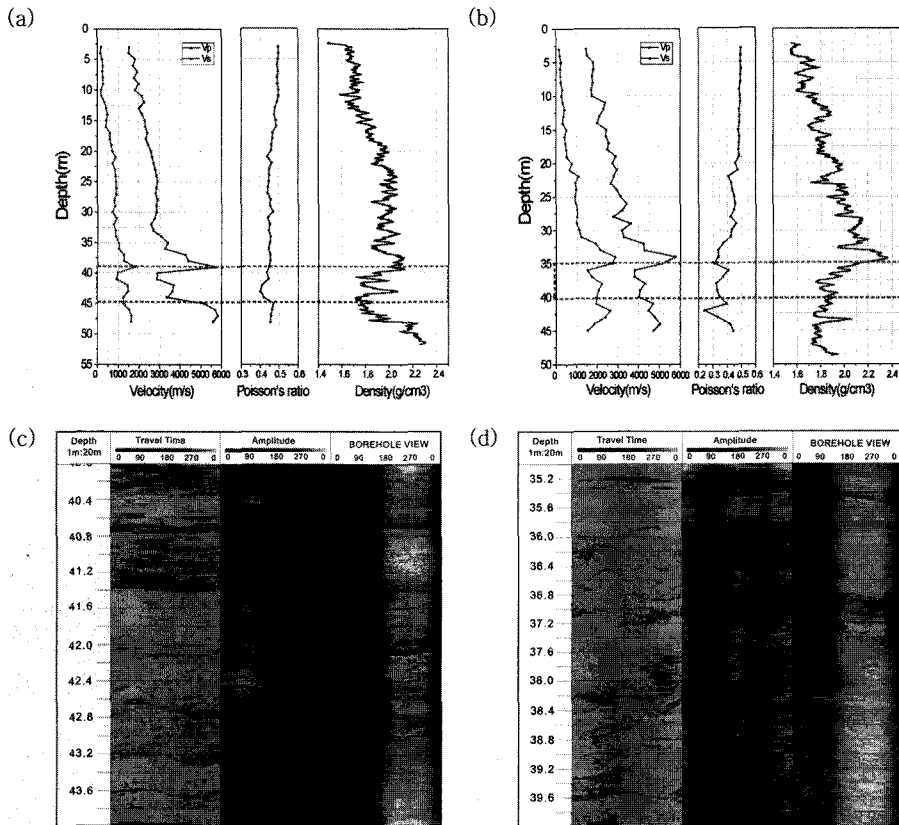


Fig. 7. Full waveform sonic and $\gamma\text{-}\gamma$ logging data from boreholes (a) BH-1 and (b) BH-2. Also shown are acoustic televiewer and optical televiewer images from (c) BH-1 and (d) BH-2. The two logs on the left (“Travel time” and “Amplitude”) represent the acoustic televiewer images; that on the right (“BOREHOLE VIEW”) represents the optical televiewer image. $\gamma\text{-}\gamma$ profiles were constructed using a measurement interval of 0.01 m. The interval between the dashed lines (a, b) represents the analysis window for the image logs (c, d).

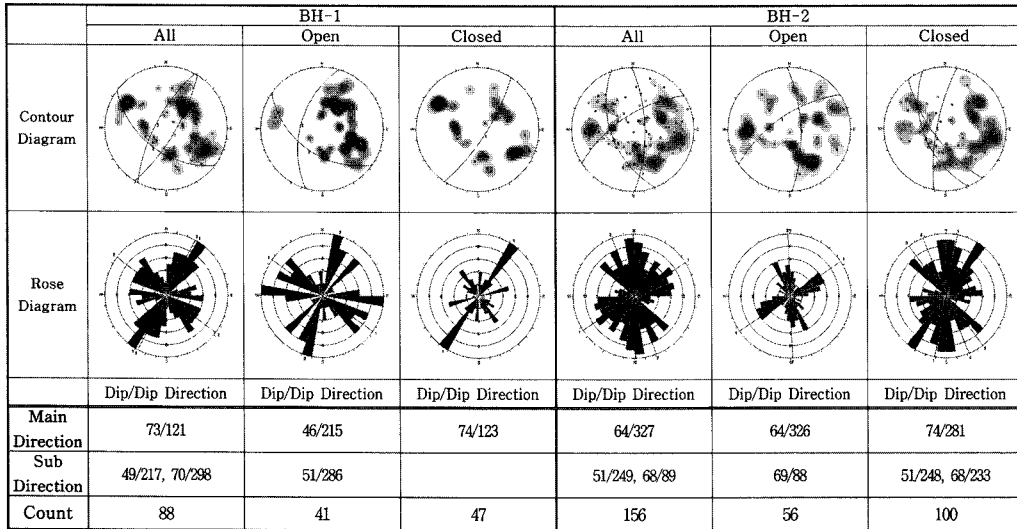


Fig. 8. Orientations of joints and fractures analyzed from the acoustic televiwer image logs. Counts are the total number of joints. Note that the number of joints for BH-2 is approximately double that for BH-1, due to the large number of joints and fractures in the hard rock at BH-1.

각각 N57°E/64°NW, N56°E/64°NW, N11°E/74°NW의 주향과 경사를 보이는데 BH-1의 열린절리면을 제외한 나머지 절리면에서 거의 60° 이상의 고각도로 경사하고 있는 절리면의 규칙적인 방향성은 확인하였으나 기존에 200 m 떨어진 곳에서 관찰된 관입암맥 및 시추공 간의 불연속면에 대한 연관성을 확인하기는 어려웠다.

결론

1) RMR 자료의 분석에서 BH-1의 연암과 BH-2의 연암은 모두 불량한 상태의 암반(poor rock)이었으며 BH-1의 경암에서는 비교적 신선한 암반(good rock)으로 나타났지만 BH-2의 경암에서는 보통 상태의 암반(fair rock)으로 RQD의 결과에서도 같은 양상을 보였다.

2) 검층자료를 이용하여 산출한 동탄성계수와 P파 속도와 상관계수를 해석한 결과 대체로 동체적탄성계수가 동탄성계수와 동전단탄성계수에 비하여 높은 값을 보이며 P파 속도가 증가할수록 동탄성계수가 증가하였다. 또한 BH-2의 경암 구간으로 갈수록 탄성파의 속도 및 동탄성계수의 분포 범위가 다소 넓어지는 것은 이곳에 상대적으로 많이 분포하는 파쇄대나 절리에 기인한 것으로 보인다.

3) 탄성과 토모그래피에서 작성된 속도단면도는 탄성과 굴절법에서 해석된 기반암까지의 깊이와 잘 상관되는데 BH-2 부근에 많이 발달한 절리나 파쇄대의 영향

으로 기반암의 속도변화가 심하였으며 이 현상은 이미지 검층자료에서도 잘 관찰되었다.

4) 이미지 검층자료를 기반으로 확인한 열린절리면과 닫힌절리면의 수는 BH-1에서 각각 41개와 47개, BH-2에서 각각 56개와 100개로 BH-1보다 BH-2에서의 절리가 많이 관찰되는데 이러한 분포는 종합적으로 탄성파속도 단면도, 탄성과 토모그래피, 시추 및 검층 자료에서 해석된 양상과 잘 일치한다.

사사

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원으로 연구되었음을 밝힌다. 조사를 위해 힘써 주신 그린지오텍, 지오맥스 및 다이크와 건설적인 논문 심사를 해주신 세 분의 심사자분들께도 깊이 감사드린다.

참고문헌

권영일, 진명식, 1974, 청주 지질도폭 (1:50,000), 설명서 국립 지질 광물 연구소, 8p.
 김경수, 2001, 지질공학 단기실무강좌, 대한지질공학회, pp.217-254.
 김영화, 양영근, 김종열, 김유성, 2001, 석회암지역에서 불연속면의 물리검층반응, 지구물리 4(2), 95-102.
 김종열, 김유성, 현혜자, 1995, Geotomography에 의한 암반구조연구(V), 과학기술처 특정연구개발사업보고서, KR-95(T)-17, 392p.
 김지수, 한수형, 서용석, 이용재, 2005, 물리탐사를 이용한

- 청주 화강암 지역의 지반특성 파악, 대한지질공학회지, 15(1), 41-55.
- 박중화, 박종오, 송무영, 2002, 시추공 물리탐사를 이용한 동탄성계수와 암상과의 상관성 분석, 한국지구과학회, 23(6), 507-513.
- 송무영, 김환석, 박종오, 2002, 시추공물리탐사를 통한 지반물성과 암상과의 상관성 분석, 대한지질공학회지, 12(2), 127-135.
- 이선중, 김지수, 이철희, 문윤섭, 2010a, 굴절법 탄성파탐사 현장에서 GRM을 이용한 청주화강암지역 기반암 깊이의 신속한 추정, 자원환경지질, 43(6), 615-623.
- 이선중, 이철희, 김지수, 2010b, 시추·검층·탐사자료의 분석으로 본 청주화강암의 물성, 대한지질공학회 추계학술대회 논문집, 117-120.
- 장현삼, 임해룡, 홍재호, 1999, 시추공 탄성파탐사 및 이의 토목공학적 응용, 한국지구물리탐사학회 제2회 학술 발표 논문집, 196p.
- 한국암반공학회, 한국지구물리탐사학회, 한국자원연구소, 1999, 건설기술자를 위한 지반조사 및 시험기술, 799p.
- 황세호, 이상규, 1999, 물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적 지반정수의 산출, 건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회, 156-175.
- Cheong, S. and Lee, C. Z., 1998, The Determination of Rock Mass Rating(RMR) with joint spacing and its relation to slope stability, Journal of Korean Earth Science Society, 19, 641-648.
- Deere, D.V and Miller, R.P., 1966, Engineering classification and index properties for intact rocks, Air Force Weapons Laboratory, Research and Technology Division, Air Force Systems Command, Kirkland Air Force Base, New Mexico, Technical Report, AFWL-TR-65-116, 307p.
- ISRM, 1981, Rock characterization for testing and monitoring, ed., E. T. Brown, 201p.
- Nascimento da Silva, C.C., Eugenio de Medeiros, W., Jardim de Sa, E.F and Neto, P.X., 2004, Resistivity and ground-penetrating radar images of fractures in a crystalline aquifer: a case study in Caicara farm-NE Brazil, Journal of Applied Geophysics, 56, 295-307.
- Trampert, J. and Leveque, J.-J. 1990, Simultaneous Iterative Reconstruction Techniques: Physical Interpretation Based on the Generalized Least Squares Solution, Journal of Geophysical Research, 95(B5), 12,553-12,559.

2011년 1월 5일 원고접수, 2011년 3월 10일 게재승인

이선중

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-273-9645
E-mail: navit@hanmail.net

이철희

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-273-9645
E-mail: geolee78@gmail.com

장형수

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: engeo85@hanmail.net

김지수

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-3201
Fax: 043-273-9645
E-mail: geop22@cbnu.ac.kr