시추공 합성탄성과 기록을 통한 지하 불연속 경계면의 파악

김지수^{1*} · 이재영^{1,2} · 서용석¹ · 주현태¹

¹충북대학교 지구환경과학과, ²나노테크이엔지

Identification of Subsurface Discontinuities via Analyses of Borehole Synthetic Seismograms

Ji-Soo Kim^{1*}, Jae-Young Lee^{1,2}, Yong-Seok Seo¹, and Hyeon-Tae Ju¹

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Nano Tech Eng Inc.

지반 조사를 위해 흔히 수집하는 지표탐사 자료, 시추조사 자료, 지질공학 자료들을 서로 상관시켜 불연속 경계면 및 암반 파쇄대등의 분포를 파악하였다. 전기비저항 입체도와 공내 영상촬영을 통해 개략적인 지질 연약대의 주향 방향을 분석하고, 시추공 사이 탄성과 토모그래피 속도와 로즈 다이어그램을 통해 지층 및 암반 파쇄대의 공간적인 분포대를 파악하였다. 암반의 동적 물성을 파악하기 위해 S-PS 검층과 γ - γ 검층으로 동적 탄성계수를 계산하여 푸아송 비 및 P파 속도와와의 상관관계를 알아보았다. 지층의 불연속 경계면은 타격수 N값, 개별적인 밀도나 속도 정보를 이용하여 결정하는 것 보다 물리검층에서 수집한 속도와 밀도로부터 계산한 음향 임피던스의 대비, 즉 반사계수 자료와 시각적으로 잘 상관되었다. 암반에 발달한 주요 파쇄대 구간은 그 상부 경계면이 반사계수와 최적 리커 요소와의 곱말기로 계산된 합성 탄성과 트레이스에서 극성이 음인 높은 진폭과 잘 상관되었다. 합성탄성과 기록으로 해석된 주된 파쇄대는 실제로 시추 코어 자료에서 관찰된 코어손실 구간 및 공내 영상촬영 자료에서 평가된 낮은 암질 구간과 잘 부합되었다.

주요어 : 파쇄대, 음향임피던스, 합성탄성과 기록, 물리검층, 동적 탄성계수

We integrated and correlated datasets from surface and subsurface geophysics, drilling cores, and engineering geology to identify geological interfaces and characterize the joints and fracture zones within the rock mass. The regional geometry of a geologically weak zone was investigated via a fence projection of electrical resistivity data and a borehole image-processing system. Subsurface discontinuities and intensive fracture zones within the rock mass are delineated by cross-hole seismic tomography and analyses of dip directions in rose diagrams. The dynamic elastic modulus is studied in terms of the P-wave velocity and Poisson's ratio. Subsurface discontinuities, which are conventionally identified using the N value and from core samples, can now be identified from anomalous reflection coefficients (i.e., acoustic impedance contrast) calculated using a pair of well logs, comprising seismic velocity from suspension-PS logging and density from logging. Intensive fracture zones identified in the synthetic seismogram are matched to core loss zones in the drilling core data and to a high concentration of joints in the borehole imaging system. The upper boundaries of fracture zones are correlated to strongly negative amplitude in the synthetic trace, which is constructed by convolution of the optimal Ricker wavelet with a reflection coefficient. The standard deviations of dynamic elastic moduli are higher for fracture zones than for a compact rock mass, due to the wide range of velocities resulting from the large numbers of joints and fractures within the zone.

Key words : fracture zones, acoustic impedance, synthetic seismogram, well logging, dynamic elastic modulus

*Corresponding author: geop22@cbnu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

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, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

지반에 대한 지표 물리탐사 및 시추공 검층은 지반 굴착, 발파 설계, 사면 안정성 검토, 내진 설계 등 지질 토목 구조물의 설계 및 시공에 필요한 정보를 제공하는 매우 중요한 작업이다. 예를 들어 전기비저항과 탄성과 굴절법 탐사, 물리검층 및 시추공 조사에서 얻는 현지 암반의 탄성과 속도는 실내 시험에서 얻는 각종 탄성계수와 더불어 굴착 난이도, 암반 분류, 지반의 안정성 검토 등 설계 및 시공을 위해 매우 중요하게 사용되고 있으며 이로부터 평가하는 동적 탄성계수들은 내진 설계와 지질토목 구조물의 설계에 필수적인 정보가 된다 (Chang et al., 1999).

지반 조사에서 지층 경계면은 지표 물리탐사 외에 일반적으로 각종 지질공학적 정보(N값, RMR, RQD, 변형계수, 코어 분석)와 시추 검층 및 토모그래피, 공내 영상촬영 등으로 파악한다. 왜냐하면 비파괴적인 방법으로 지하구조를 개괄적으로 표현하는 지표 물리탐사만으로는 높은 해상도가 요구되는 천부 엔지니어링 분야에서 지하의 지질 및 구조에 대한 정보를 얻기에는 아직 오차의 범위가 크기 때문이다. 실제 암석 시편을 분석하여 풍화도, 풍화암, 연암, 경암을 구분하는 전통적인 지질공학적인 방법에 근래에는 정적 탄성계수 및 동적 탄성계수를 포함시켜 암석 내에 분포하는 집중 파쇄대 및 미세 균열 등의 현장 암반의 특성을 효과적으로 파악하는데 초점을 두고 발전해오고 있다(Eissa and Kazi, 1988; Kang et al., 2000; Park et al., 2002; Mashinskii, 2004; Ryu and Chang, 2006).

물리 검층은 시추 탐사가 갖는 단점을 보완할 수 있는 시추공 탐사법으로서 특히 시추 코어의 회수가 불가능한 경우 그 장점은 극대화 된다. 즉 매우 높은 수직 분해능으로 시추공 전 구간에서 연속적으로 현장 암반의 특성을 알아냄으로서 각종 지질공학적인 분석 자료와 상관해석 할 수 있는 장점이 있다. 이 연구에서는 S-PS (suspension PS) 검층에서 측정된 P파와 S파의 속도, $\gamma\gamma$ 검층에서 측정된 밀도 정보로부터 음향임피던스를 계산하여 지층의 경계면을 파악하고자 하였다. 이 방법은 궁극적으로 반사 계수와 합성탄성과 기록을 만들어내므로 이 연구에서는 그 기록의 진폭 및 부호를 가지고 지층 경계면과 암반 내의 집중 파쇄대 구간을 시각적으로 파악하고자 하였다. 시험 연구에 활용한 자료는 기존의 물리탐사, 시추공 조사에서 수집한 자료들 (Nano Tech., 2011)을 토대로 하였고 합성탄성과 기록에

Fig. 1. (a) Satellite photograph, (b) geologic map, and (c) survey lines and boreholes of the study area in Heaundae Gu, Busan.

서 해석된 지하 경계면은 구간에 따른 각종 동적 탄성계수의 표준편차, 코어 관찰 및 공내 영상촬영 자료와 상관시켜 보았다.

대상 지역 및 축선 · 축점

이 연구에 활용된 자료는 부산광역시 해운대구 일대에서 수집되었으며(Fig. 1a) 이곳은 양산 단층계의 일원인 북북동 주향 방향의 일광단층, 장산단층 등에 인접하고 있다(Ree et al., 2003). 대부분 백악기 화성암류가 분포하는 본 역의 지형은 해발 고도가 높지는 않으나 산사면의 경사가 가파르고, 일반적으로 화학적 풍화에 약한 편인 심성암류의 분포지에 비해 유천층군의 화산

암류가 분포하는 험준한 편이다.

배경 지질은 백악기 경상속의 상부 유전층군과 불국사관입암류로 대별된다. 유전층군은 하부로부터 대대포층, 안산암질 화산각력암, 안산암류, 암회색 응회질 퇴적암, 유문석영 안산암질 화산 각력암, 유문석영 안산암, 유문암질암으로 구분된다(Fig. 1b). 유전층군은 퇴적초기에 정상적인 퇴적상이 우세하였으나 곧 격렬한 안산암질 화산활동이 전개되었으며 이러한 활동과 수반되어 곳에 따라 소곡분에 응회질 퇴적물이 퇴적되었다. 화산활동에 따른 암상변화 측면에서 본 역의 화산암류는 화산활동이 젊어짐에 따라 안산암에서 석영조면 안산암으로 또는 유문석영 안산암에서 유문암으로 성분이 이화되었다.

이 연구에 활용된 자료는 대상 지역의 단층, 파쇄대 및 각종 연약대 분포 양상을 파악하여 구조물 설계에 반영하기 위해 수집된 것으로서, 우선 전기비저항 탐사로 지질 연약대로 해석되는 저비저항 이상대를 확인하고 그의 개략적인 주향을 파악하였으며, 탄성과 토모그래피로서 탄성과 속도값에 따른 지층이나 암반의 균열 또는 풍화정도를 파악하였다. 또한 S-PS (Suspension PS)검층으로서 지층별 탄성파(P파, S파)속도를 파악하여 대상지역의 동적 탄성계수(영탄성계수, 전단계수, 체적탄성률)들을 산출하고 이를 $\gamma\gamma$ 검층 자료와 상관시켰으며 시추공벽 영상촬영을 통해 암반에 발달한 파쇄대 및 불연속면의 방향성과 분포상태 등을 파악하였다.

Fig. 1c는 전기비저항 이상대의 주향 방향을 파악하기 위한 전기비저항 측선(동서방향의 측선 Line1, Line2, Line3; 남북방향의 측선 Line4, Line5; 북서방향의 Line6)과 탄성파속도 및 저속도대의 연결성을 알기 위해 실시한 탄성과 토모그래피(cross-hole tomography)의 시추공들(BH-1, BH-2, BH-3, BH-4)의 위치를 보여준다. 지층 경계면, 연약대 및 파쇄대의 수직적인 분포를 알기 위한 S-PS 검층 및 $\gamma\gamma$ 검층, 공내 영상촬영 자료에 대한 분석은 시추공 BH-4에서 수집한 자료를 이용하였다.

연약대의 주향분석

전기비저항 탐사자료의 분석은 예상 연약대의 존재를 확인하고 존재할 경우 그 연장성을 파악하는데 목적을 두었다. 위성 자료에서 해석된 북동-남서 방향의 선구조를 고려하여 전개한 여러 개의 측선 자료 중에서 해안가 및 장산 단층 부근에서의 연장성을 파악하기 위해 쌍극자배열을 사용한 동서방향의 측선 Line1, Line2, Line3, Line3; 남북방향의 측선 Line4, Line5; 북서방향

의 Line6을 선택하였다(Fig. 1c).

측선은 보다 천부의 반응을 강조하기 위해 측점 간격을 20 m로 좁게 하여 실시하였다. Kim et al. (2003)에 의해 조사된 인근의 일광 단층조사 자료에 의하면 이 지역은 단층 및 해수의 영향으로 전기비저항값이 매우 낮게 나온 바 있어 신호 대 잡음비(S/N)을 최대한 높이기 위해 전류를 최대 250 mA까지 투입하였다. 자료처리에는 역산을 위해 각 면적 셀과 이에 대한 전기비저항을 추정 변수로 작성된 자료처리 소프트웨어인 DIPROWIN (KIGAM, 2008)를 사용하였다.

각 측선들에 대한 전기비저항 역산 결과(Fig. 2a) 전 반적으로 10-1000 ohm-m 내외의 낮은 전기비저항 분포를 보이고, 예상 단층구간에서는 수십~수백 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 다양한 폭으로 깊이 30-60 m까지 연장되고 있다. 각 측선에 대한 단면을 서로 조합하여 만든 울타리 투영도(fence projection)에서 40 ohm-m 이하의 낮은 비저항대가 북동쪽 및 동쪽 방향으로 연장됨을 보이는데 이 양상은 암반(깊이 30 m 이상)만을 대상으로 한 입체도(Fig. 2b)에서 보다 선명히 나타난다. 이와 같은 저비저항 이상대는 해안에 발달하고 있는 단층파쇄대로 해석되며(Kim et al., 2003) 이와 같은 연약대의 주향(N04-20E, N51-52E)은 공내 영상촬영에서 도출한 rose diagram (Fig. 2c)의 결과(N13-19E, N66-86E)에서도 잘 확인된다.

시추공 탄성파탐사의 목적은 지반의 탄성과 속도 측정에 의한 지층 구분과 이에 근거한 암반분류 및 각종 동적 탄성계수의 산출을 시행하여 설계 및 시공의 기초 자료를 제공하는데 있다. 특히 각종 건설현장에서의 굴착설계, 발파설계, 사면의 안정성검토, 터널의 안정성 검토, 내진설계 등을 위해서는 암반의 정확한 탄성과 속도 측정과 이에 의한 암반의 평가가 필수적이다. 시추공 물리탐사에서 지하 불연속면을 작성하기 위해 가장 많이 쓰이는 시추공 사이 토모그래피(cross-hole tomography)는 한 개의 시추공에는 탄성과 발생 장치를 다른 시추공에는 수신 장치를 삽입한 후 여러 각도로 탄성파를 주고받은 다음 이들 파의 초동주시(혹은 진폭)를 발체하고 이를 역산하여 속도단면을 기준으로 주 시추공 사이의 지층구조를 영상화한다(Reynolds, 2011).

이 연구에는 여러 개의 시추공 중에서 4개의 시추공(BH-1, BH-2, BH-3, BH-4) 사이에서 실시한 탄성파 토모그래피를 조합하였다(Fig. 3a). 속도는 풍화도 외에 시추공 BH-4의 경우 35-45 m 구간에서 속도가 상대적으로 낮게 나온다. 시험 구간은 약 3000 m/s를 기준으

Fig. 2. (a) Fence diagram compiled from electrical resistivity sections. The zones of lower resistivity represented by dashed lines trend to the NE. (b) The trend of zones of low electrical resistivity (< 40 ohm-m and deeper than 30m) delineated from the fence diagram is consistent with the dip/dip direction of joints and fractures (see the rose diagram).

Fig. 3. (a) Velocity structure integrated from the composite cross-hole seismic tomography, which is similar to that derived from a seismic refraction survey conducted previously near the study area (modified from Kim et al., 2003). (c) Block diagram showing lower-velocity structures (deeper than 30m) from the composite seismic tomography.

로 풍화암과 암반을 구분하고 있다. 이 양상은 부근의 일광 단층에서 탄성파굴절법 탐사로 얻은 속도정보(Kim et al, 2003, Fig. 3c)와 대체로 부합한다. Fig. 3b는 암반 구간 내에 분포하는 저속도대(3000 m/s 이하)를 표시한 것으로서 여기서도 연약대의 주향이 대체로 NE방향을 보여주고 있다. 지층 경계면, 연약대 및 파쇄대의 수직적인 분포를 보다 상세히 파악하기 위해 S-PS 검층 및 $\gamma\gamma$ 검층, 공내 영상촬영 자료를 이용하였다. BH-4 부근의 토모그래피 자료에서 기반암 구간의 40-45 m, 50-53 m 깊이에서 속도변화가 상대적으로 심한 것으로 보이는데 이것은 파쇄대와 절리에 의한 영향으로 해석되며, 이에 대한 분석을 RMR, TCR, RQD 자료 및 동적 탄성계수와 P파 속도와의 상관관계로 알아보았다.

불연속면 및 파쇄대 분석

물리검층 자료

S-PS 검층의 시추공은 물로 채워져 있고 철심에 순차적으로 전류를 흐르게 하면 전자해머가 한쪽 방향으로 움직이면서 그 방향의 물에 압력을 가하고 반대쪽의 물은 부의 압력을 받는 형태가 되면서 이러한 압력 분포가 주변의 지반에 전달되어 지반을 변형시킴으로써 P파와 S파를 발생시키게 된다(Song et al, 2002; Yu et al, 2007). 진원에서 발생한 파는 지반을 통해 전파하게 되며 이 파는 진원의 상부에 있는 2개의 수신부에 도달하게 된다. $\gamma\gamma$ 검층은 Co60 γ 소스를 부착한 손테를 상향 이동시키면서 0.01 m 간격으로 측정하였으며 그 대표 값은 구간별로 평균한 것이다.

시추공 BH-4에서 S-PS 검층을 통하여 얻어진 P파 속도는 풍화토(2000 m/s 이하), 풍화암(2000~2500 m/s), 연암(2500~3000 m/s), 경암(3000 m/s 이상)의 범위로 나타났다(Fig. 4a). S파 또한 이에 상응하는 구분 경계면에서 잘 구분되지만 풍화토/풍화암 경계면에 비해 풍화암/연암과 연암/경암의 경계면의 구분이 어렵고 또한 암반 내에서의 작은 이상대가 복수로 나타나고 있다.

지반이나 구조물의 반응특성을 예측할 수 있는 표준 지표가 되는 동적 탄성계수(영탄성계수, 전단탄성계수, 체적탄성계수)를 계산하기 위해 S-PS 검층을 통하여 측정된 탄성과 속도와 $\gamma\gamma$ 검층을 통하여 측정된 밀도 값을 이용하였다.

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

Fig. 4. (a) Seismic velocities of P- and S-waves from the S-PS well logging. Subsurface discontinuities are tentatively shown as sticks based on the N values and an abrupt increase in P-wave velocity. The arrows indicate a decrease in velocity, probably due to fractures and joints in the rock mass. (b) Dynamic elastic moduli versus P-wave velocities. Compared with the lower velocity zone, the data points for the higher velocity zone show awide scatter. (c) Higher standard deviation related to the large numbers of joints and fractures within the soft and hard rocks.

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

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

여기서 식 (1), (2), (3)에 사용된 속도값은 1 m 간격으로 측정된 속도값이며, ρ 는 밀도(t/m^3), v_d 는 동적 푸아송비, E_d 는 동적 영탄성계수, G_d 는 동적 전단탄성계수, K_d 는 동적 체적탄성계수이다.

일반적으로 체적탄성계수가 영탄성계수와 전단탄성계수에 비하여 높은 값을 나타내며(Ryu and Chang, 2006), 이들 탄성계수는 P와 속도가 증가할수록 또 푸아송비가 작을수록 증가하는 상관성을 보인다(Fig. 4b). 또한 경암 구간으로 갈수록(속도가 커짐) 동적 탄성계수가 넓게 분산되는 것은 이곳에 상대적으로 많이 분포하는 절리나 파쇄대에 의한 것으로 보인다. Fig. 4c는 풍화토, 풍화암, 연암과 경암 구간별로 각종 탄성계수 값들의 표준편차를 막대그래프로 표현한 것으로서 연암과 경암 구간에서 표준편차가 상대적으로 크게 나타난다. 이것 또한 암반 구간에 상대적으로 많이 분포하는 절리 및 파쇄대에 기인한 것으로 보인다.

합성탄성과 기록

이 연구에서는 앞에서 구분한 경계면 외에 암반에 발달한 주요 파쇄대 및 절리의 깊이를 규명하기 위해 물리검층 자료(S-PS 검층, γ - γ 검층)를 토대로 작성된 합성탄성과 기록에서 지층 경계면 및 주요 파쇄대를 시각적으로 관찰하고자 하였다.

탄성과 반사법은 기본적으로 지하구조를 반사파의 영상(트레이스의 진폭)으로 경계면을 구분하는바 반사에너지의 강도를 설명하는 반사계수는 위아래 층에 대한 밀도와 탄성과 속도의 곱인 음향임피던스($Z = \rho v$)의 대비로 표현된다(Kim et al., 2009).

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) \quad (4)$$

여기서 Z_1 은 상부층의 음향임피던스, Z_2 는 하부층의 음향임피던스이다. 따라서 밀도와 속도대비가 큰 지층 경계면 및 파쇄대는 상대적으로 큰 반사계수를 보인다. 반사계수는 $-1 < R < 1$ 로서 하부의 속도가 더 작은 파쇄 경계면의 상부는 음으로 나타난다. 지하로 전파하는 요소파(wavelet) $W(t)$ 는 서로 다른 음향임피던스를 갖는 지층(반사계수 시계열 $R(t)$ 로 표현)을 통과할 때 변형되어 지표 시스템에 $S(t)$ 로 기록된다. 이 과정은 수학적으로

$$S(t) = W(t) * R(t) \quad (5)$$

와 같이 표현되며 *는 곱말기(convolution) 연산을 의미한다(Yilmaz, 2001).

Fig. 5. (a) Ricker wavelet constructed from the inverse Fourier transform of the amplitude spectrum (center frequency of 50 Hz) and the phase spectrum (zero phase). (b) Schematic diagram of a synthetic seismogram for the interfaces and fracture zones. The upper boundary of the fracture zone is typically represented by a negatively high amplitude due to the lower acoustic impedance in the fracture zone. (c) Construction of a synthetic seismogram using P-wave velocity data, calculation of acoustic impedance, and convolution of the reflection coefficient with a wavelet. The subsurface interfaces and the fracture zones are clearly resolved using the 50 Hz wavelet.

Fig. 5는 S-PS 검층자료의 P와 속도(Fig. 4a)와 γ - γ 검층자료의 곱으로 식 (4)에서 계산한 반사계수 $R(t)$ 에 요소파 $W(t)$ 를 곱말기하여 합성탄성과 기록 $S(t)$ 를 얻는 식 (5)의 과정을 보여준다. 밀도는 일반적인 지반탐

사에서와 같이 $\gamma\text{-}\gamma$ 검층자료를 토대로 각 구간별로 일정한 값을 사용하였다(풍화토: 1.95 g/cm^3 , 풍화암: 2.19 g/cm^3 , 연암: 2.37 g/cm^3 , 경암: 2.65 g/cm^3). VISTA 2D/3D Full PRO (Schlumberger, 2012a) 및 OMNI3D Workshop (Schlumberger, 2012b) 프로그램을 사용하여 위상이 영이고 중심 진동수에서 진폭이 가장 큰 스펙트럼을 역푸리에 변환하여(Inverse Fourier Transform)하여 리커 요소파(Ricker wavelet)를 재건하였다(Fig. 5a).

이 연구의 핵심이 되는 주요 파쇄대의 상부 경계면은 이론적으로 위층보다 아래층이 속도가 더 작기 때문에 탄성파기록에서 음의 값을 갖는 큰 진폭으로 나타날 것이다(Fig. 5b). 최적 파형 W를 선택하기 위해 Hampson-Russell S-8 (CGGVeritas, 2007) 소프트웨어를 사용하여 중심 진동수가 20, 50, 100 Hz이고 위상이 영인 요소파에 대한 각각의 합성탄성과 영상을 출력한 결과(Fig. 5c) 주요 지층 경계면 및 암반 파쇄대의 분해능은 50 Hz의 요소파를 선택할 때 가장 높게 나타났다(Fig. 5c). 특히 암반에 발달하는 파쇄대는 위층보다 아래층의 속도가 작기 때문에 그 상부 경계면은 진폭이 큰 음의 값을 보인다.

풍화토, 풍화암, 연암, 경암으로 갈수록 속도가 커지므로 각 경계면에 대한 탄성과 트레이스의 진폭은 양의 값으로 커지기 때문에 경계면이 잘 구분되어, 타격수 N 값으로 구분하는 경계면과 대체로 일치하였으나 풍화토와 풍화암의 경계는 약 24 m 깊이로서 약 4 m 차이가 있었다. 이것은 Fig. 4a에서처럼 P와 속도만으로는 그 값이 완만하게 증가하여 명확한 구분이 어렵기 때문이다. 이 경계면은 음향임피던스의 대비로 작성한 탄성과 트레이스의 영상에서 보다 명확히 구분되고 있다(Fig. 5c). 특히 탄성과 토모그래피와 전기비저항 자료에서 규명이 잘 안되고 개별 검층 곡선에서 구분이 어려운 암반 내에 발달한 집중 파쇄대는 연암과 경암 구간에서 각각 FR1과 FR2의 영상으로 뚜렷하게 부각된다.

시추코어 자료 및 공내영상 촬영 자료

탄성과 기록에 대한 검증을 위해 시추공벽 영상촬영 자료에서 암반 내 파쇄대 및 불연속면의 방향성과 분포 상태의 특성을 분석하였다. 즉 파쇄대 구간에 대해 시추코어 시료 및 공벽 영상 자료와의 비교·검토를 통해 불연속면의 수리적인 연결성을 파악하였다.

Fig. 6. (a) Borehole view (optical televiewer image) and (b) joint sections for N-S and E-W directions. FR1 and FR2 with arrows indicate fracture zones in soft and hard rock, respectively. Several joints are developed, particularly in the fracture zones (approximately 43 m deep), branching off in all directions.

Fig. 7. (a) Drilling logs and (b) photograph of drill-core. The fracture zones (FR1 and FR2) apparent in the synthetic seismogram (Fig. 5c) and in the television image (Fig. 6a) are observed in drilling logs and in the core data.

합성탄성과 기록으로 확인된 암반 내의 파쇄구간(Fig. 5c)을 영상촬영 자료(Fig. 6a) 및 이로부터 해석된 방향에 따른 균열대의 집중도(Fig. 6b)와 비교해 보았다. 앞서 동적 탄성계수와 P파 속도와의 상관관계에서 해석된 42 m 부근(연암)과 53 m 부근(경암)의 암반에 많이 발달한 절리 및 파쇄대의 분포가 영상자료에서 직접 관찰된다. Fig. 7은 BH4의 시추 기록과 사진을 보여준다. 5등급 암반분류 체계에서 RQD는 25-72%, RMR은 II-IV 등급으로 분류되는데 연암 구간의 RQD와 RMR은 각각 25-42%, IV 등급으로 분류되어 경암 구간에 비해 파쇄가 많은 것으로 해석된다. 특히 합성탄성과 기록(Fig. 5c)에서 뚜렷이 관찰된 주요 파쇄대 FR1(연암 구간)과 FR2(경암 구간)는 시추주상도의 RQD가 낮은 구간(Fig. 7a)과 시추코어 사진의 코어 손실대(core loss zone)(Fig. 7b)와 잘 부합된다.

결과 및 토의

이 연구에서는 S-PS검층으로 부터 획득한 P파 속도, $\gamma\gamma$ 검층으로 부터 획득한 밀도 정보로 부터 음향 임피던스를 이용하여 지하 불연속 경계면 파악하였다.

검층자료를 이용하여 산출한 동적 탄성계수와 P파 속도와와의 상관관계를 해석한 결과 대체로 P파 속도가 증가할수록 동적 탄성계수도 증가하였다. 또한 절리 및 파쇄대 구간이 포함된 연암과 경암 구간에서 동적 탄성계수의 표준편차가 상대적으로 크게 나타났다.

불연속 경계 특히 파쇄대 구간의 상부는 개별적인 속도 정보 보다는 S-PS 검층과 $\gamma\gamma$ 검층으로 얻은 P파 속도와 밀도의 복합 정보로 부터 작성된 합성탄성과 영상에서 음의 극성을 갖는 높은 진폭으로 잘 규명되었다.

사 사

자료 분석에 대한 이 논문은 2012년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A1A2041933).

References

- CGGVeritas, 2007, Hampson-Russell Software-8 R1.2, France.
- Chang, H. S., Lim, H. R., and Hong, J. H., 1999, Borehole Seismics: Review and Its Application to Civil Engineering, Conference of Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 176-201.
- Eissa, E. A. and Kazi, A., 1988, Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 25(6), 479-482.
- Hwang, S., Park, I., Yoon, K., Kim, C., Bae, D., and Ko, Y., 2003, Investigation of and Application to Rock Mass, Borehole Test, Korean Society of Engineering Geology, 1.6-1-1.6-30.
- Kang, D., Jong, T., and Lee, J., 2000, Static and Dynamic Elastic Properties of the Iksan Jurassic Granite, Korea, Jour. of the Korean Geophysical Society, 3(2), 99-112.
- Kim, J., Ree, J., Han, S., Kim, H., Lee, Y., Lee, K., and Joo, B., 2003, The Ilkwang Fault in Southeastern Korea Revealed by Geophysical and Trench Surveys. Journal of the Geological Society of Korea. 39(2), 211-223.
- Kim, J., Song, Y., Yoon, W., Cho, I., and Kim, H., 2009, Applied Geophysics, Sigma Press, 792p.
- KIGAM, 2008, DIPROWIN, Korea.
- Mashinskii, E. I., 2004, Variants of the Strain-Amplitude Dependence of Elastic Wave Velocities in Rocks under Pressure, Journal of Geophysics and Engineering, 1(4), 295-306.
- Nano Tech., 2011, Technical Report for Haeundae Project.
- Park, C., Park, J., and Song, M., 2002, Relationship between Dynamic Elastic Modulus and Lithology using Borehole Prospecting, Jour. Korean Earth Science Society, 23(6), 507-513.
- Ree, J., Lee, Y., Rhodes, E., Park, Y., Kwon, S., Chae, U., Jeon, S., and Lee, B., 2003, Quaternary Reactivation of Tertiary Faults in the Southeastern Korean Peninsula, The Island Arc, 12, 1-12.
- Reynolds, J. M., 2011, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics Second Edition, Blackwell, 688p.
- Ryu, K. and Chang, C., 2006, Comparison of Rock Young's Moduli Determined from Various Measurement Methods, Journal of Engineering Geology, 16(1), 1-14.
- Schlumberger, 2012a, OMNI3D Workshop Seismic Survey Design & Modeling, USA.
- Schlumberger, 2012b, VISTA 2D/3D Full PRO Seismic

Processing Software, USA.

- Song, M., Kim, H., and Park, J., 2002, Relationship between Lithology and Rock Physical Property using Borehole Prospecting, Journal of Engineering Geology, 1(2), 127-135.
- Yilmaz, ö., 2001, Seismic Data Analysis, Society of Exploration Geophysics, 2027p.
- Yu, Y., Song, M., and Lee, K., 2007, Data Analysis of Suspension P-S Velocity Logging in Banded Gneiss Area around Hanam, Gyeonggi Province, Journal of Engineering Geology, 17(4), 623-631.

원고접수일: 2013년 11월 8일

수정본채택: 2013년 12월 16일

게재확정일: 2013년 12월 17일

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

이재영

나노테크이엔지 / 충북대학교

431-824, 경기도 안양시 동안구 평촌대로374번길

(비산동) 대서빌딩 5층

Tel: 031-383-2646

Fax: 031-383-2649

E-mail: lly2031@hanmail.net

서용석

충북대학교 지구환경과학과

361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-273-9645

E-mail: ysseo@cbnu.ac.kr

주현태

충북대학교 지구환경과학과

361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)

Tel: 043-261-3201

Fax: 043-273-9645

E-mail: loginer-kool@hanmail.net