

## 시추공 간 전단대 특성 규명을 위한 고해상 탄성과 토모그래피

이두성<sup>1\*</sup>

한성대학교 정보시스템공학과

### High Resolution Cross-well Seismic Tomography for Description of Shear Zone in Inter-well Region

Doo Sung Lee<sup>1\*</sup>

Information System Engineering, Hansung University

**요약:** 인접한(대략 1.5 m) 두 개의 시추공에서 확인한 화강암 전단대는 그 폭과 물성(투수율)에서 상당한 차이가 있다. 시추공 간 전단대의 투수율의 분포 특성을 규명하고자 고주파수(>10 kHz) 신호에 의한 시추공 탄성과 토모그래피 탐사를 실시하였다. 시추공에서 획득한 투수율과 탄성과 속도 토모그래피에 표출된 속도 패턴을 대비한 결과는 고해상 공대공 속도 토모그래피 전단대의 특성, 즉 균열빈도, 폭, 연장 등에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있다는 사실을 제시하였다.

**주요어:** 투수율, 전단대, 탄성과 토모그래피

**Abstract:** Measurements in two adjacent (about 1.5 m separation) boreholes reveal that there is a significant degree of variations in the width and property (permeability) of shear zones in the granitic rock. A high frequency (>10 kHz) cross-well seismic tomography was conducted to characterize the features of permeability distribution at the shear zones in the inter-well region. At the shear zones, the correlation between the permeability at the well location and the velocity pattern shown in the cross-well velocity tomogram suggests that a high resolution velocity tomogram may provide useful information for the shear zone characteristics, such as permeability, fracture density, width, and length.

**Keywords:** permeability, shear zones, seismic tomography

## 서론

본 연구는 시추공에서 측정된 암석의 투수율 정보와 시추공 간 토모그래피에 의한 탄성과 속도와의 상관분석을 통하여 암석의 투수율 분포 특성 규명에의 적용성을 고찰한 사례연구이다. 본 연구에서 사용한 자료는 화강암 지대에서 획득한 고해상 시추공 간 탄성과자료이다. 이 자료는 스위스의 그림젤 시험지역(Grimsel Test Site: GTS)에서 획득한 일련의 고주파수 시추공 자료의 일부로 일본의 오바야시(Obayashi)사에서 제공하였다.

조사지역의 화강암은 Aar Massif이며 이 화강암체는 알프스 조산운동으로 심한 변형을 하여 편리(schistosity) 및 전단대(shear zones)가 형성되었다(Geology at the GTS). 그림젤 시험지역은 핵폐기물 지하 저장에 관한 연구개발 목적으로 설립된

연구개발 센터로 스위스 중부지방 해발 1730 m의 화강암 지대의 지하 450 m에 위치한다. 실험 장소는 터널을 통하여 접근 가능하며 터널시스템은 총 연장 1 km이다. GTS 터널은 1983년부터 굴착되기 시작하였고 다양한 목적으로 많은 시추공이 굴착되었다. 이 시험지역은 비교적 교란되지 않은 신선한 암반지역과 심하게 균열된 지역으로 구성되어 유체거동에 관한 다양한 지구과학적 실험을 하기에 이상적인 환경을 제공하고 있다(Kickmaier and Wolfgang, 2002).

본 논문의 시추공 간 탄성과 자료는 GAM (Gas Migration in Shear Zones) 시험지역에서 획득하였다. GAM 프로젝트는 불균질한 암반 내 전단대(Shear Zones)에서 가스 및 유체거동을 분석하기 위한 목적으로 설립되었으며 시험지역에는 다수의 실험공이 있다(Fig. 1).

암반 내 유체거동 분석은 시추코어를 사용한 투수율 측정, 각종 물리검층 자료 등을 기초로 하는데, 이와 같은 시추공에서 획득한 자료는 신뢰도 높은 고품질의 데이터나 표본추출의 공간적 제한 때문에 시추공 간 영역의 암석의 물성분포를 도출하는데 상당한 수준의 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불확실성을 줄이기 위한 수단으로 탄성과 자료와 연계한 공간

2006년 9월 25일 접수; 2006년 11월 5일 채택

\*Corresponding author

E-mail: dslee@hansung.ac.kr

Address: Information System Engineering, Hansung University  
389 Samseon-dong, 3-ga,  
Seongbuk-gu, Seoul, 137-792 Korea

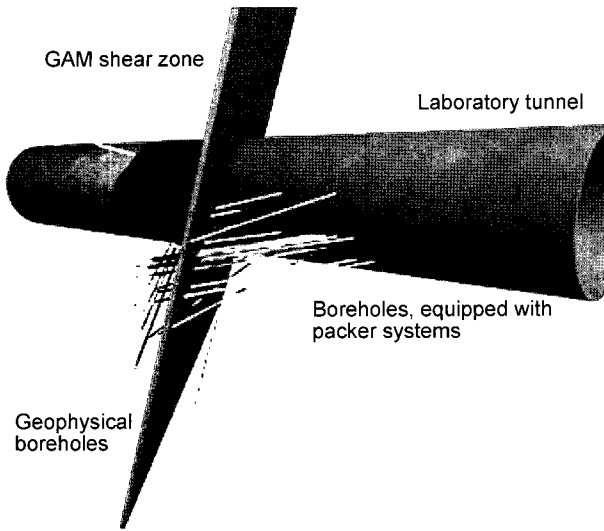


Fig. 1. Boreholes in GAM shear zone. (Kickmaier and Wolfgang, 2002).

통계학적인 방법이 적용되고 있다(Arakingi *et al.*, 1991).

본 논문의 목적은 화강암 전단대를 포함하는 두 개의 시추공에서 획득한 고해상 탄성과 자료로부터 시추공 간 탄성과 속도 토모그래프를 도출하고 시추공에서 측정된 전단대의 투수율과 탄성과 속도를 비교, 분석함으로써 탄성과 속도 정보가 시추공 간 영역의 투수율 분포 규명에 유용한 기초자료가 될 수 있는지 여부를 고찰한 사례연구이다. 본 시추공 간 탄성과 자료의 특징은 일반적인 지반조사나 저류층 조사에 적용한 자료에 비하여 시간/공간적으로 매우 고해상 자료이다. 즉 기록의 주파수는 10 KHz 이상이고 공간거리는 대략 1.5 m 이다.

### 투수율 시험

두 개의 시추공 GAM98-02와 TPF95-01에서 투수율 및 시추공 간 탄성과 실험이 수행되었다(Fig. 2). 시추공 간 탄성과 실험은 GAM98-02를 수신공, TPF95-01을 송신공으로 사용하였다. 투수율은 암반 내 유체를 통과시키는 척도를 정량화한 계수로서 중요한 암반 고유의 물성 중 하나이다. 투수율은 다시(Darcy) 단위로 표현하는데 1 다시는 1 기압의 압력차인 환경에서 1 cm<sup>3</sup> 크기 암석 내 유체가 1 cm<sup>3</sup>/sec의 유량으로 흐를 때의 비례상수이다.

반면 토양 또는 암석의 투수율을 측정하는 다른 계수로 수리전도도(hydraulic conductivity)가 있다. 수리전도도(K)는 물이 토양 또는 암석을 통과하는 정도를 표시하는 계수로서 단위는(m/s) 으로 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{\kappa \gamma}{\mu} \quad (1)$$

여기서  $\kappa$ 는 토양/암석의 고유 투수율(intrinsic permeability),

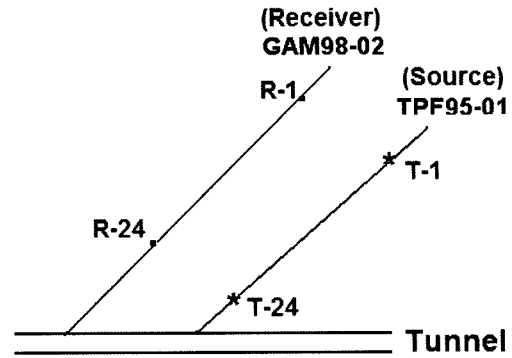


Fig. 2. Seismic and hydraulic experiments are conducted in two boreholes, GAM98-02 and TPF95-01. For the crosswell experiment, the sources are located in well TPF95-01 (T-1 ~ T-24), and the receivers are deployed in the GAM98-02 well (R-1 ~ R-24).

Table 1. Hydraulic conductivity at the shear zones.

Source Well (TFP95-01)		Receiver Well (GAM98-02)	
Interval	Hydraulic conductivity (m/s)	Interval	Hydraulic conductivity (m/s)
T16 ~ T-22	A $3.6 \times 10^{-9}$	R-19 ~ R-21	C $9.0 \times 10^{-10}$
T-6 ~ T-12	B $5.0 \times 10^{-9}$	R-6 ~ R-8	D $1.7 \times 10^{-7}$

$\gamma$ 는 물의 비중(specific weight), 그리고  $\mu$ 는 물의 동점도(dynamic viscosity)이다. 따라서 투수율이라 함은 암석의 고유 물성이며 수리전도도는 동일 암석에서도 유체의 물성에 따라 다를 수 있다. 본 논문에서는 암석물성으로 투수율 용어를 사용하기로 한다.

두 개의 시추공에서 구간별 암석의 투수율 측정 결과에 의하면 신선한 화강암에서 수리전도도는 대략  $1.3 \times 10^{-12} \sim 7.9 \times 10^{-11}$  (m/s)이고 전단대에서는  $9.0 \times 10^{-10} \sim 1.7 \times 10^{-7}$  (m/s)이다. 이 자료는 상압주입회수법(constant pressure injection/recovery)에 의한 수치이다(Table 1, 오바야시사 제공).

두 시추공 간격은 1.5 m 정도로 매우 근접하여 있다. 만일 전단대 A와 C 그리고 B와 D가 동일 전단대라면 전단대에서 투수율의 공간적 변화는 매우 크고(4 ~ 34배), 또한 전단대 폭의 변화도 상당하다(2 ~ 3배). 따라서 시추공에서 측정된 투수율 정보로부터 시추공 간 영역의 균열분포 또는 투수율 분포를 파악하기 위해서는 공간적으로 보다 균질한 정보를 제공할 수 있는 자료가 필요하며 탄성과 토모그래피는 그 중 하나의 유력한 수단이 될 수 있다. 탄성과 속도와 투수율과의 관계를 설정할 수 있다면 투수율 분포 도출에 적용되는 크리깅(kriging) 또는 코크리깅(cokriging) 과정에 시추공 간 탄성과 속도정보는 유용한 자료로 사용될 수 있다(Doyen, 1988).

### 시추공 간 탄성과 토모그래피

본 논문에서 사용한 자료획득 파라미터는 시추공 간격이 대

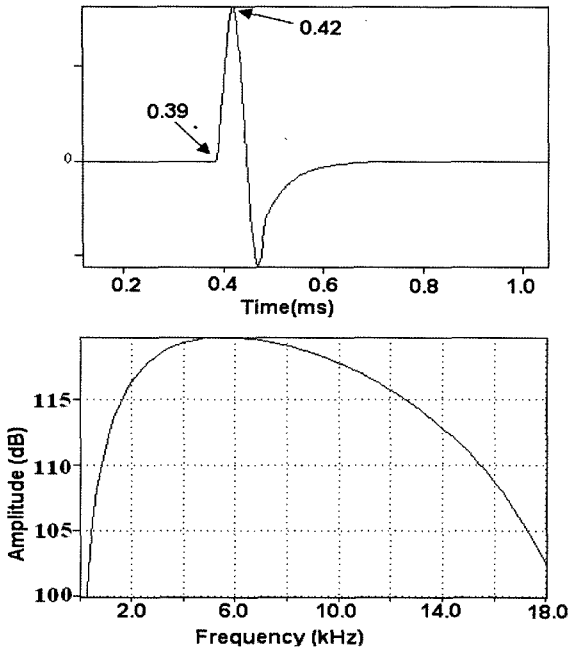


Fig. 3. Source waveform and its amplitude spectrum.

략 1.5 m, 탐사구간이 4.6 m 이며 송신 및 수신기 간격은 모두 0.2 m 이고 기록의 시간 샘플간격은 0.004 ms, 기록 길이는 1024 샘플이다. 사용한 진원은 주파수 제어가 가능한 형태로 이 연구에서 사용한 발진기의 주 주파수(dominant frequency)는 10 kHz 이다. Fig. 3에 송신원 모니터 채널에 기록된 송신 신호의 파형과 진폭 스펙트럼을 제시하였다. 진폭 스펙트럼에 의하면 신호의 최대 진폭은 대략 6 kHz 이며 2~12 kHz 구간의 진폭 감쇠는 대략 5 dB 이내로 평활하다. 본 연구에서의 탄성과 기록은 일반적인 저류층 조사나 지반조사 목적으로 수행하는 탄성과 자료에 비하여 상당히 고주파 성분이고, 시추공 간 거리 또한 짧아서 주시토모그래피의 측면에서 보면 시간/공간 영역의 해상도가 높은 고해상 토모그래피 도출에 적절한 자료로 생각할 수 있다.

자료 분석의 편의를 위하여 송수신 배열의 좌표 체계를 Fig. 4와 같이 설정하였다. 송신공을 기준으로 하였을 때 수신공은 탐사 길이 4.6 m에서 대략 0.26 m 정도 심도에 따라 편향되어 있어 토모그래피에서는 이를 고려하였다(Fig. 4).

공동 송신원 기록(송신원 T-1)을 Fig. 5a에 도시하였다. 이 데이터는 송신신호의 시작시간(零時)을 기록의 0.42 ms 즉, 송신원 신호의 진폭이 최대가 되는 시점(Fig. 3)으로 보고 조정된 결과이다. 송신신호 시작시간은 송신원 모니터채널 기록에서 발췌하였다. 근거리(近距離) 기록에서 초동은 비교적 잘 관찰할 수 있으나 원거리(遠距離) 기록에서는 신호 대 잡음비가 현저히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 주시토모그래피에서는 초동발체 오차를 줄이기 위하여 초동의 신호 대 잡음비를 높이는 전처리 과정이 매우 중요하다. 일반적으로 사용하는 전처리 과정은 대역필터이다. Fig. 5b는 Fig. 3의 송신원 스펙트럼

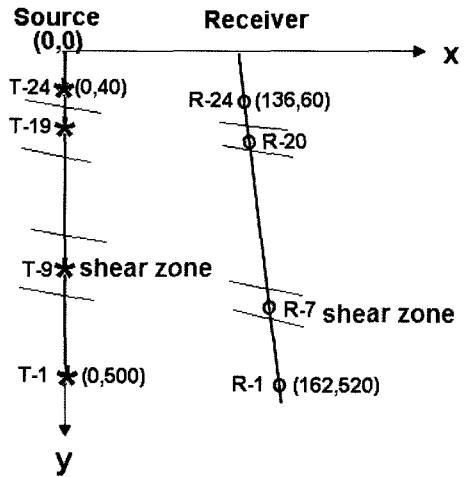


Fig. 4. Source and receiver geometry for the crosswell tomography. Unit of the coordinates shown in the figure is cm. Both the source and receiver interval are equally 20 cm.

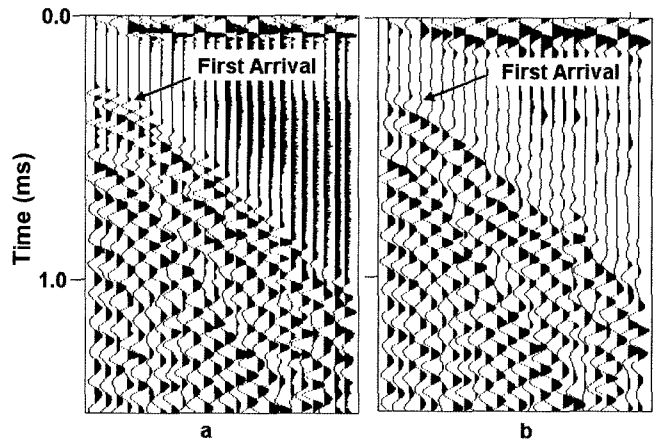


Fig. 5. Raw data (a) and a bandpass (2~14 kHz) filter applied (b).

을 고려하여 2~14 kHz 대역필터(bandpass filter)를 적용한 결과이다. 여기서 보면 잡음은 현저히 감소하였으나 Fig. 5a에서 초동으로 인식할 수 있는 피크(peak, 화살표 참조)가 대부분의 기록에서 뚜렷하지 못한 사실을 볼 수 있다.

단순한 대역필터 대신 원시기록 중 송신원 주파수 대역에 있는 주파수 성분만 필터링 하기 위하여 원시기록(Fig. 5a)과 송신원 신호(Fig. 3)와 상호상관(cross-correlation)하였다(Fig. 6). 여기서 보면 초동 부근의 잡음이 현저하게 감소되고 초동 신호의 피크가 대부분의 트레이스(trace)에서 일관되게 형성되고 있어서 초동발체에 양호한 상태를 알 수 있다. 일반적으로 초동발체는 초동의 시작시간보다는 이에 근접한 피크 또는 트라프(trough)를 발체한다는 사실을 고려할 때 여기서 상호상관은 좋은 전처리 과정의 하나로 볼 수 있다.

위의 두 기록의 관계는 다음과 같은 연산을 통하여 설명될 수 있다. Fig. 5a 기록  $x(t)$  및 Fig. 6의 기록  $y(t)$ 는 상호상관과 컨볼루션 관계를 이용하여 다음의 식으로 표현할 수 있다.

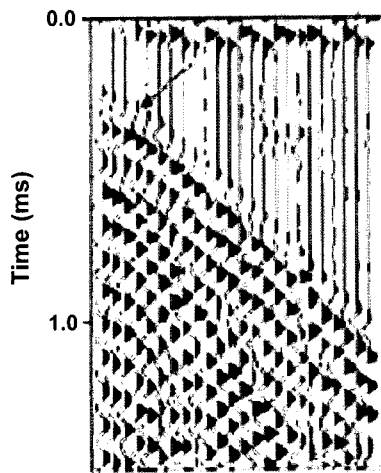


Fig. 6. Data shown in Fig. 5a are cross-correlated with the source signal in Fig. 3.

$$x(t) = s(t) * e(t) + n(t) \tag{2}$$

$$y(t) = s(t) \times x(t) \tag{3}$$

$$= s(t) \times (s(t) * e(t) + n(t))$$

$$= R_{ss}(t) * e(t) + s(t) \times n(t)$$

여기서,  $s(t)$ 는 송신원 신호,  $e(t)$ 는 매질반응(earth response),  $R_{ss}(t)$ 는 송신원 자기상관 (auto-correlation), 그리고  $n(t)$ 는 잡음이다. 그리고 \*와  $\times$ 는 각각 상호상관과 컨볼루션 연산자이다. 만일 잡음이 무작위 (random)이고 잡음과 송신원과 상관되지 않다고 (uncorrelated) 가정하면 식 (3)에서  $s(t) \times n(t)$ 는 크지 않은 무작위 잡음으로 볼 수 있으며 따라서  $y(t)$ 는 송신원 신호  $s(t)$ 의 자기상관( $R_{ss}(t)$ )이 송신원인 기록으로 볼 수 있다.

원시 데이터와 상호상관 데이터의 초동을 비교하면, 대응하는 트레이스에서 대체로 원시기록 초동신호의 시작시간과 상호상관 데이터의 초동 피크 시간이 일치함을 관찰할 수 있다. 이러한 차이는 상호상관 데이터의 송신신호  $R_{ss}(t)$ 는 영 위상 (zero phase)인 것과 관련이 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 바이브로사이스 같이 영 위상인 기록의 초동발체는 피크를 초동으로 발체한다(Sheriff and Geldart, 1985).

공동공 탄성과 자료를 사용하여 매질의 탄성과 속도분포를 분석하기 위하여 모든 기록의 초동을 발체하고 이로부터 시추공 간 탄성과 속도 토모그램을 작성하였다. 초동발체와 토모그래프 작성에는 EZTOMO(최재경, 이두성, 2004) 소프트웨어를 사용하였다.

### 탄성과 속도영상

암석의 투수율은 암석 내 공극과 균열의 크기 및 배열에 관계된다. 유체를 포함한 다공질 암석에서 탄성과 속도는 간단한 Wyllie 식(Bourbie, et al., 1987)이나 저주파수 영역에서 Gassman 식을 사용할 수 있고, 10 KHz 이상의 고주파 영역에

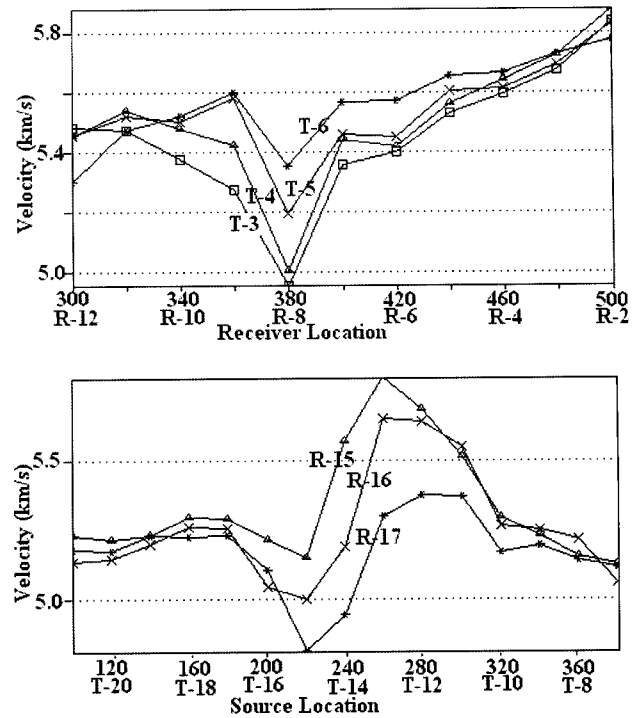
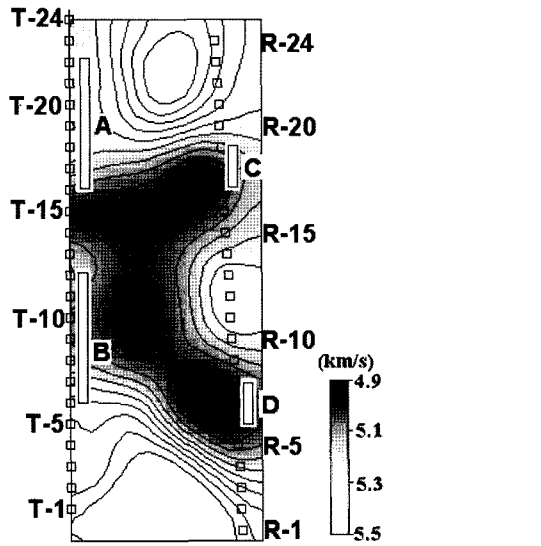


Fig. 7. Average velocities derived from the common source gathers at T-3 ~ T-6 to the receivers in the interval between R-2(500) ~ R-12(300) (a) and from the common receiver gathers of the receivers at R-15 ~ R-17 (b). The velocities are calculated assuming the rays are straight.

서는 Biot 또는 Geertsma 등의 식을 사용할 수 있다(White, 1983).

균열을 포함한 전단대에서 암석의 공극률이 주위 암석에 비하여 상당히 크다면 그 부분에서 탄성과 속도의 감소를 예측할 수 있다. 전단대의 균열특성과 탄성과 속도와의 관계를 분석하기 위하여 초동을 사용한 구간별 탄성과 속도를 산출하였다. 신선한 암반구간에 위치한 송신원 T-3, T-4, T-5, 와 T-6에서 발생한 탄성파가 수신점 R-2 ~ R-12 구간에 도착한 시간을 사용한 구간별 평균속도를 Fig. 7a에 제시하였다. 모든 기록에서 수신점 R-8(380) 부근에 분명한 저속도(低速度)대를 관찰할 수 있는데 이 구간은 Table 1에 제시한 4개의 전단대 중 수리 전도도가 타 구간에 비하여 현저히 높은 구간이다. 3개의 공통수신점 기록(R-15, R-16, R-17) 으로부터 T-20 ~ T-8 구간의 평균속도를 계산하여 Fig. 7b에 도시하였다. 여기서 보면 T-15 부근에서 속도가 다소 감소하고 있는데 이 부분은 송신공에서 확인된 전단대 위치와는 다소 차이가 있다(Fig. 8).

시추공 간 영역의 탄성과 속도분포는 속도 토모그램에서 체계적으로 관찰할 수 있다. Fig. 4에 표시된 단면을 균일격자 (10×10 cm) 모델로 설정하여 주시토모그래피를 실시하여 탄성과 속도 토모그램을 도출하였다. Fig. 8에 제시한 토모그램은 초기 속도모델을 5.0 km/s 상속도 모델로 25회 반복 역산한 결과이다. 탄성과 속도 토모그램에서 보면 매질의 속도는



결론

두 개의 시추공에서 획득한 화강암 내의 전단대 정보로부터 시추공 간 영역의 전단대 특성규명을 위한 탄성과 속도영상의 효용성을 검토하고자 시추공 간 탄성과 토모그래피를 실시하였다. 초동인식 과정에서 초동발체 오차를 줄이기 위한 전처리 과정으로서 송신신호와의 상호상관을 적용하였다.

시추공 투수를 자료와 탄성과 속도영상에 표출된 속도분포를 대비, 분석하여 전단대와 저속도 이상대와의 상관관계를 도출하였다. 이를 위해 고해상 탄성과 속도영상을 도출하고 시추공에서 확인된 전단대와 탄성과 토모그램에서의 탄성과 속도 변화를 대비함으로써 전단대의 연장성 및 공간적 분포 특성에 대한 해석을 시도하였다.

두 개의 시추공에서 전단대로 확인된 4개소 중에서 탄성과 토모그래피에 의한 저속도 이상대는 3개소로 나타났다. 시추공에서 확인된 4개의 전단대 및 그 연장성을 고려할 때, 2조의 전단대가 존재할 것으로 추정되며 하부의 저속도 이상대는 측정 가능한 수준의 탄성과 속도변화를 인지할 수 있으며 따라서 전단대에서 투수율 또는 균열빈도의 공간적 변화 상태와 양호한 상관관계를 가지는 것으로 판단된다. 반면 상부의 저속도 이상대는 시추공에서 확인된 전단대와 다소 상이한 위치에 형성되고 있다. 탄성과 속도의 감소는 암석내의 공극률의 함수이므로 전단대라도 균열의 폭이 극히 작아서 균열이 이 구간 암석의 공극률에 미치는 영향이 미약할 경우 탄성과 속도 감소는 측정하기 어려울 수도 있을 것이다.

이상의 고찰로부터 시추공에서 확인된 전단대 정보와 연계하여 시추공 간 영역의 전단대 분포 특성 규명에 고해상 탄성과 토모그래피 기법이 유용하게 사용될 수 있다고 생각된다.

사사

본 논문에서 사용한 탄성과 및 전단대 영역의 투수율 자료는 일본 오바야시 사에서 제공하였다. 이에 감사한다. 이 연구는 2006년도 한성대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

최재경, 이두성, 2004, Windows용 시추공 탄성과 토모그래피 소프트웨어, 2004년 대한지구물리 학회 한국물리탐사학회 공동 학술대회 초록집, 291-295.  
 Araktingi, U. G., Bashore, W. M., Tran, T. T., and Hewett, T. A., 1991, "Integration of Seismic and Well Log Data in Reservoir Modeling", *Proceed. Third International Reservoir-Characterization Tech. Conf. Tulsa, Oklahoma*, 515-554.  
 Bourbie, T., Coussy, O., and Zinsner, B., 1987, "Velocity and Porosity": *acoustics of porous media*, Gulf Publishing Co,

Fig. 8. Velocity tomogram. Four shear zones, A ~ D, are displayed in the figure.

대체로 5.2 km/s 이상이며 5 km/s 이하의 저속도대가 2곳(쇄선으로 표시)에서 확인된다. 탄성과 저속도 이상대와 Table 1에 제시된 전단대 4곳(흰 막대형 직사각형)을 대비하였다.

Table 1에 제시한 4개 전단대를 A, B, C, D로 중복 도시하였고 전단대 영역과 토모그램과의 대비에 의해 다음과 같은 특징을 인지할 수 있다.

1. 4개의 전단대 중 B, C, D 부근에서 저속도 이상대가 확인되고 최저속도 이상대가 B 부근에 형성된다. 전단대 B는 투수율이 타 구간보다 현저히 높은 구간이다.
2. 전단대 A와 C가 동일한 전단대라면 A와 C 연장방향으로 저속도 이상대가 형성될 것으로 예측되나 토모그램에서는 T-15에서 C 방향으로 저속도대가 형성되므로 전단대와의 상관관계를 명확히 판단하기는 어렵다. 이러한 T-15 부근의 저속도대는 3개의 공동수신점 기록(R-15, R-16, R-17)에서 도출한 평균속도(Fig. 7b)에서 도출된다.
3. B와 D 방향으로 형성된 저속도대(쇄선으로 표시)는 시추공에서 확인된 전단대와 양호한 상관관계를 보여주며 따라서 이상대는 전단대에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 따라서 저속도 이상대로 나타나는 탄성과 속도의 변화는 이 구간 암반의 물성(균열 발달상태) 변화를 나타낸다고 생각할 수 있다. 또한 탄성과 토모그램에서는 두 시추공 중앙부근에 균열빈도가 적은 구간이 있는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 해석은 Fig. 7a에서도 확인할 수 있다. 여기서 보면 각 기록의 평균속도는 단지 R-8 부근에서만 작은 값을 보이고 있다. 만일 D부근의 저속도대가 B 방향으로 연장되었다면, 저속도대를 통과한 파선들 즉 R-12 ~ R-9 구간의 기록에서도 저속도가 확인되어야 할 것이다. 그러나 여기서는 저속도 구간을 확인할 수 없다. 따라서 전단대는 B 부근에서 국부적으로 균열빈도가 특히 높고 중앙부근이 가장 낮은 것으로 해석할 수 있다.

230.

Doyen, P. M., 1988, Porosity from Seismic Data: A Geostatistical Approach, *Geophysics*, **53**, 1263-1275.

Geology at the GTS, <http://www.grimself.com/>

Kickmaier, Wolfgang, 2002, *Grimself Test Site Phase V: Overview of the ongoing programme 1997-2004*, [http://www.grimself.com/pdfs/bu34\\_art2.pdf](http://www.grimself.com/pdfs/bu34_art2.pdf).

Sheriff, R. E. and Geldart, L. P., 1985, *Exploration Seismology* v. II, 39.

White, J. E., 1983, "Biot Theory of Fluid-Saturated Media": *Underground Sound Application of Seismic Waves*, Elsevier, 58-81.