

## 속도 이방성 조사를 위한 다방위 역수직 탄성과 현장 실험

이두성<sup>1)</sup> · 김현규<sup>1)</sup>

### Field Experiment of a Multi-azimuth Inverse VSP for Investigating Velocity Anisotropy

Doo Sung Lee and Hyoungyu Kim

**요 약** : 다방위 역수직 탄성과 기록을 사용하여 매질의 속도 이방성을 분석하고자 한 개의 시추공 내의 120개 진원으로 부터 발생한 탄성파를 지표상의 5개의 측정점에서 동시에 기록하였다. 본 실험에서 방위가 다른 측정점에서 기록의 초동을 비교하여 속도 이방성을 산출하고자 하였다. 그러한 목적을 달성하기 위해서는 초동을 피킹하기 전에 수신점 정보정이 필요한데, 수신점의 수가 제한적인 역수직 탄성과인 경우는 신뢰할만한 정보정 값을 얻기가 어렵다. 따라서 본 실험에서는 초동을 측정하는 대신에 각 기록의 무브아웃 속도를 산출하고자 하였다. 본 실험에서 각 방위에서, 측정할만한 속도 차이를 발견했으며, 이 속도 이방성은 본 지역에서 과거에 실시된 이방성 연구 결과와 일치함을 확인하였다.

**Abstract** : In order to estimate the anisotropy of the medium, we deployed a series of 120-sources in a borehole, and simultaneously recorded 3-component seismic data at 5 locations on the surface. We have tried to estimate the directional velocities by comparing the first arrivals at different receivers. For that purpose, the receiver statics must be corrected prior to pick the first arrivals. However, in an IVSP with a limited number of receiver points, it may not possible to estimate a reliable receiver statics, therefore, instead of using individual first arrival times, we tried to estimate the move-out velocity at each records. From this analysis, we have found that there exists a measurable amount of difference in directional velocities, and confirmed that the velocity anisotropy agrees with the results of the previous studies conducted in this area.

**Keywords** : Inverse VSP, Multi-azimuth, Anisotropy, Velocity anisotropy

## 서 론

지하 암석의 이방성 탄성 특성은 탄성파의 다방위 속도로부터 산출될 수 있다. 지각을 구성하는 결정질 암반의 이방성은 암반 내에 존재하는 균열에 기인하는 경우가 많아 최근에 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다(Crampin, 1988; Lee, 1988; Douma, 1989; Thomsen, 1991; Lee, et al., 1994; Meadow and Winterstein, 1994; Lee, 1996). 이 경우 균열은 일반적으로 수직 또는 수직에 가까운 서로 평행한 균열이 많은데 이는 주로 수평 응력의 차이에 의한 것으로 인식되고 있다. 수평 응력의 차이 또는 평행한 수직 균열의 존재로 인한 이방성 매질은 가장 간단한 이방성인 transverse isotropy(TI) 매질로 고려할 수 있다. TI 이방성은 다방위 P 파의 속도로부터 분석할 수 있다.

연구 지역은 이두성(1998)에 의하여 이방성 연구가 이루어진 곳이다. 이두성(1998)은 P 파의 분극 방향과 파선 방향의 차이를 분석함으로써 매질의 이방성 상수를 산출하였다. 본 연구에서는 방위에 따른 속도 이방성을 분석하고자, 이전 실험에

서와 방위가 다른 3개의 축선에서 3성분 기록을 획득하였다. 자료 분석 결과, 속도 이방성은 전반 연구 결과로 제시한 이방성과 대체로 일치함을 확인하였다.

## 자료 획득

현장 조사는 충남대학교 내에 착정(鑿井)된 직경 100 mm의 시험 시추공에서 실시되었으며, 구성 암석은 흑운모 화강암이다. 이 지역은 이두성(1998)에 의하여 이방성 연구가 이루어진 곳으로서 이전의 연구 결과를 확인하고 보완하기 위하여 자료 획득 파라미터를 설정하였다.

다방위 다성분 자료 획득을 위하여 시추공을 중심으로 하여 3방위로 5곳에 3성분 지오폰을 설치하였다(Fig. 1). A와 B 지오폰은 S22°E방향, C와 D 지오폰은 S60°W 방향, 그리고 E 지오폰은 S15°W 방향에 놓이도록 각각 배치하였다. 시추공 BH로부터 B와 C 지오폰까지의 수평 거리는 20 m이고 A, D, E 지오폰까지의 수평 거리는 28 m가 되도록 하였다. 이 중 A, B,

\*1999년 4월 22일 접수

1) 소속

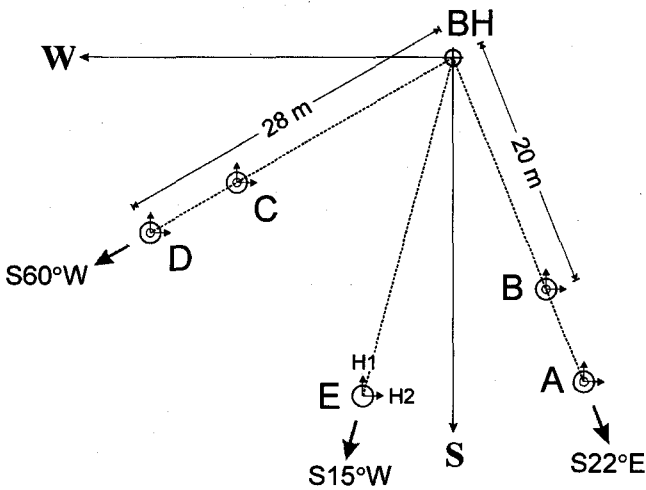


Fig. 1. Survey layout for the inverse VSP. At locations A, B, C, and D, 3-component geophones are planted, and at E two single component geophones are planted horizontally. A series of sources were generated by an air gun in the borehole BH.

C, D 지오폰은 3 성분 지오폰이며 E에는 두 개의 單成分 지오폰을 수평으로 埋設하였다. 지오폰의 수평 성분 방향은 모두 H1이 북쪽, H2가 동쪽을 향하도록 조정하였다. 시추공 내 설치된 진원 장치는 에어건(model 5500, Bolt)으로서 에너지를 발생하기 위한 압축 질소의 최대 압력은 120 kgf/cm<sup>2</sup>이다. 또한 지표에 설치된 수신기의 고유 주파수( $f_0$ )는 3성분의 경우 28 Hz, 단성분의 경우 14 Hz이다. 지표로부터 깊이 20 m에서 80 m 구간에서 0.5 m 간격으로 에어건을 이용한 탄성파를 발생시켰으며, 0.5 ms의 샘플률(sample rate)로 512 ms 동안 기록하였다.

자료 처리 및 분석

Fig. 2는 측정점 D에서 기록된 자료로서 100 ms까지만 도시하였다. 여기서 (a)는 H1 성분 자료이며 (b)는 H2 성분, (c)는 수직 성분 자료이다. 진원 발생 심도가 증가할수록 수직 변위가 수평 변위보다 커지게 되므로 천부에서는 수평 성분이, 심부로 갈수록 수직 성분이 보다 양호하게 기록되고 있다. 모든 기록에서 약 35 m 깊이까지 잡음 수준이 매우 높게 기록되어 있어 천부의 분석에 어려움을 가져왔다. A~A' 으로 표시한 wave train은 직접파의 초동으로서 약 5,680 m/s의 move-out 속도를 가진다. H2 성분이 파선에 가까우므로 초동의 진폭이 H1보다 크울 알 수 있다. B~B' 은 약 1,430 m/s 속도의 tube wave로서 진원으로부터 시추공을 따라 아래로 전파되다가 지하 약 75 m 깊이에서 반사되어 지표에 도달한 파로 분석된다. 만일 이 심도에서 공경의 변화가 없다면 이 부근에 파쇄대가 존재함을 예상할 수 있다.

주파수 성분을 분석하기 위하여 지오폰에 기록된 진폭 스펙트럼을 도시하였다. Fig. 3은 다성분 지오폰의 진폭 스펙트럼이며 Fig. 4는 단성분 지오폰의 스펙트럼으로서 수직 성분과

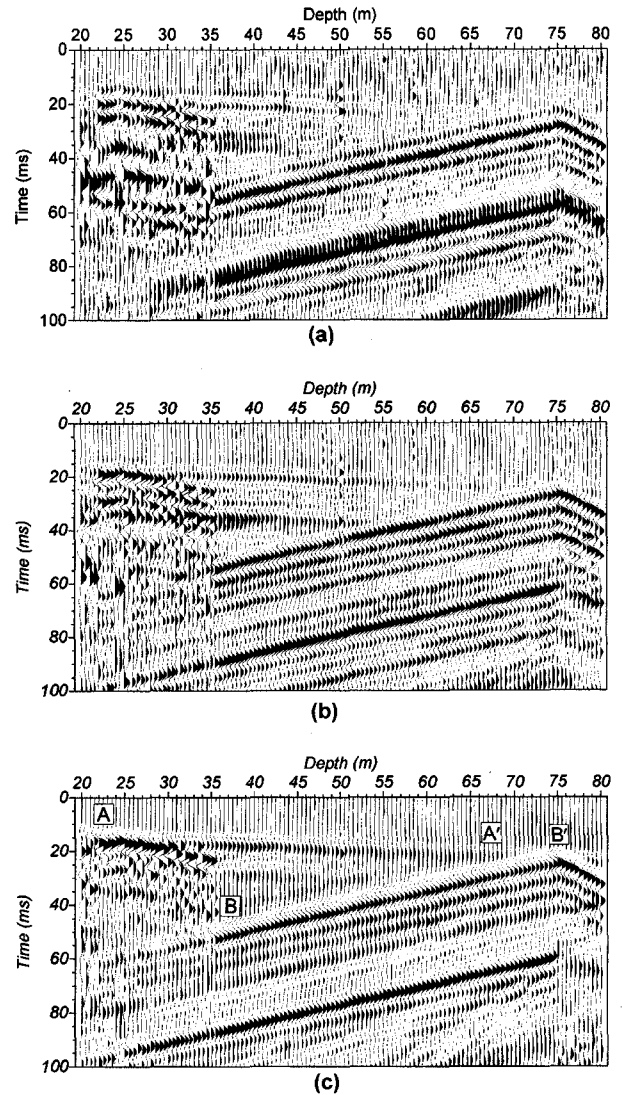


Fig. 2. Raw data acquired at location D. (a) and (b) are horizontal components and (c) is vertical component.

수평 성분 간의 차이는 거의 없다. 다성분 기록에서는 대부분의 에너지가 200 Hz 이하에 집중되어 있으며, 약 60 Hz 이하에 잡음이 강하게 기록되어 있다. 따라서 자료 처리 시 50~400 Hz의 band-pass filter를 적용하였다. 단성분 지오폰의 기록에는 저주파수 성분이 강하며, 200 Hz 이상의 고주파수의 감쇠가 심하다. 이러한 원인은 다성분 지오폰( $f_0=28$  Hz)과 단성분 지오폰 ( $f_0=14$  Hz) 사이의 고유 정수 차이로 해석된다.

입자 운동 방향 분석

매질의 이방성을 분석하기 위하여 초동의 입자 운동 방향을 hodogram으로 작성하여 측정하였다. Fig. 5는 진원점 심도 36 m에서 파동을 발생시켜 수신점 A, D, E에서 기록한 입자의 운동을 도시한 것이다. 수신점 A, D, E에서 초동의 파형이 비교적 양호하게 기록된 진원 깊이 36 m에서 49 m까지 27개의 자

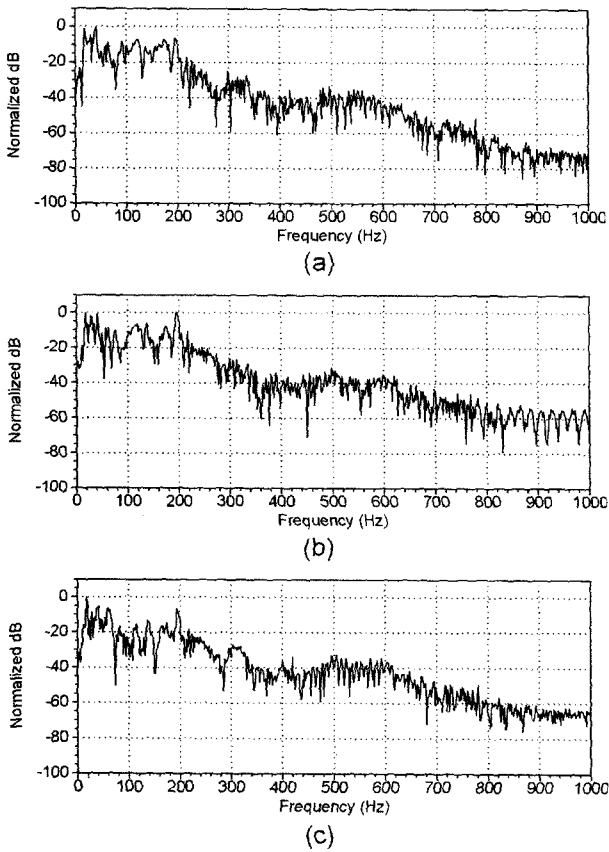


Fig. 3. Amplitude spectra of multi-component geophone at location D. Vertical component (a), H1 (b) and H2 (c) components are displayed.

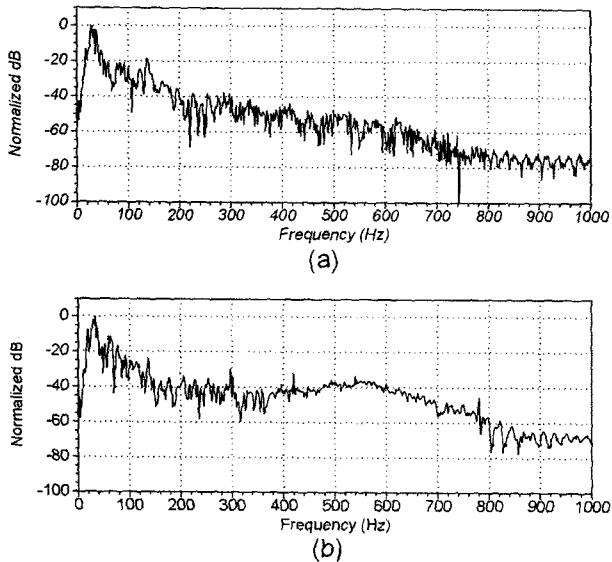


Fig. 4. Amplitude spectra of single component geophone at location E. H1 (a) and H2 (b) components are displayed.

료를 택하여 분석하였다. 그러나, 잡음으로 인하여 초동의 입자 운동이 선형을 이루지 않는 경우가 많아 hodogram으로부터 정확한 분극 방향을 결정하는 것은 매우 어려웠다. 이러한

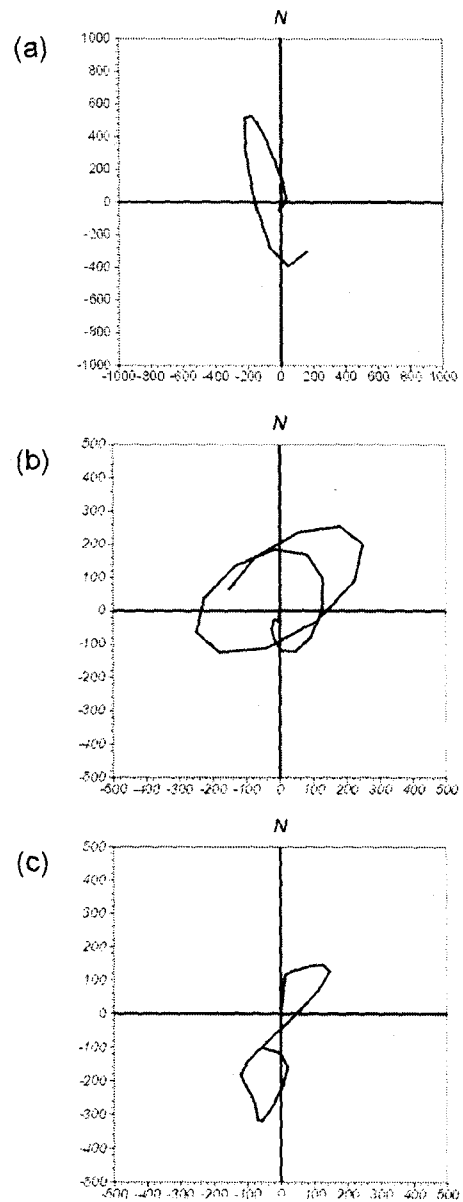
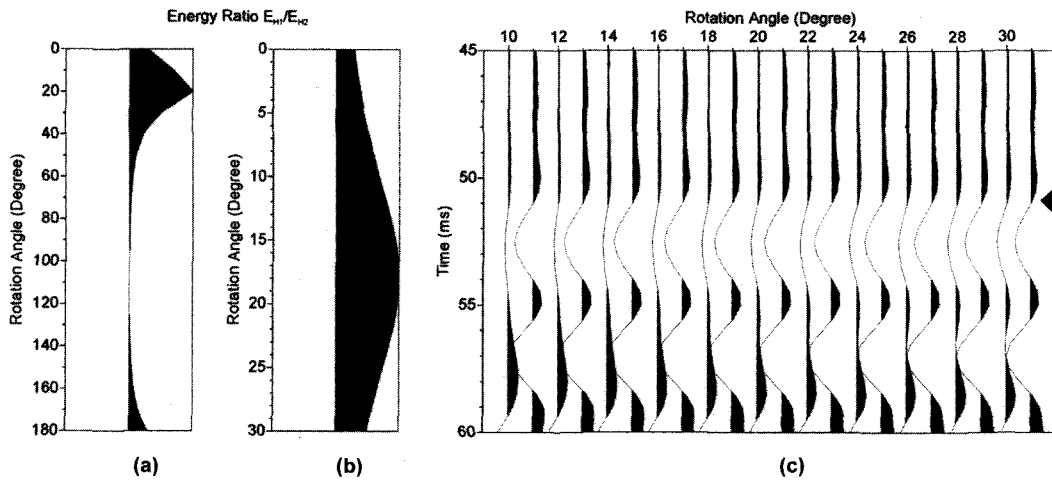


Fig. 5. Hodograms showing particle motions of direct P wave arrived at geophones A (a), D (b), and E (c). The P wave is generated at source depth 36 m.

현상은 주로 1) 신호 대 잡음비가 낮거나, 2) 초동 도달 시간을 정확히 선정하지 못했을 경우, 또는 3) 분석 구간이 적절하지 않아 이차 이벤트가 포함되었을 때 일어날 수 있다(Knowlton and Spencer, 1996). 따라서, 두 수평 성분 자료로부터 지오폰 축을 회전시키면서 H1 성분의 에너지가 최대이고 H2 성분의 에너지가 최소가 되는, 즉 에너지 비(energy ratio)가 최대값을 갖는 각을 측정하여 분극 방향을 구하였다. Fig. 6에 측정점 A에서 진원 깊이 37 m일 때의 분석 장면을 예시하였다. Fig. 6a는 수평축을 10° 간격으로 180°까지 회전시키면서 에너지 비를 구한 것이다. 약 20° 부근에서 최대값을 가지는 것을 알 수 있으며, 정확한 각도를 구하기 위해 다시 1° 간격으로 0°에서 30°



**Fig. 6.** A process to find polarization angle of P wave. Energy ratio of H1 to H2 is computed as the horizontal axes of geophone A are rotated with intervals  $10^\circ$  (a) and  $1^\circ$  (b) to find the exact angle of  $18^\circ$ . Traces are also plotted to confirm the result (c). Odd traces are component H2 and even traces H1. Arrow indicates the first break.

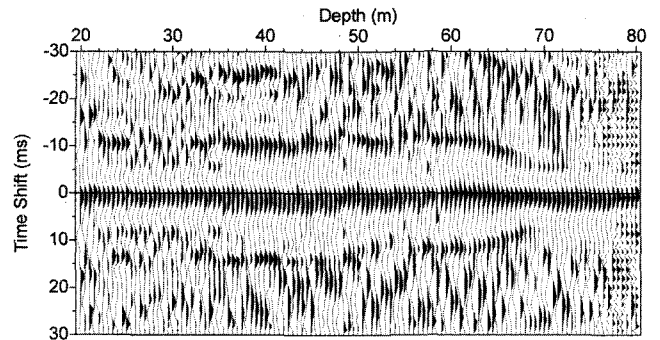
까지 회전하여  $18^\circ$ 의 최적치를 얻었다(Fig. 6b). Fig. 6c는 실제 트레이스를  $2^\circ$  간격으로 회전하여 도시한 것이다. 홀수 트레이스는 H2 성분이고 짝수 트레이스는 H1 성분으로서  $18^\circ$ 에서 H1 성분이 최대가 됨을 확인할 수 있다.

이와 같은 방법으로 산출한 평균 입자 운동 방향은 측정 A에서 약  $S19^\circ E$ , D에서 약  $S56^\circ W$ , 그리고 E에서 약  $S17.5^\circ W$ 로서 파선의 방향과는 각각  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $2.5^\circ$ 의 차이를 보인다. 이는  $N24^\circ W$  방향과  $N54^\circ E$  방향에서 각각  $3^\circ$ 와  $4^\circ$ 로 측정된 이두성(1998)의 결과와 거의 일치한다.

**속도 이방성**

방위에 따른 속도 변화를 측정하기 위해 초동의 주행 시간을 비교하였다. 먼저 수진점 A와 D, B와 C 기록의 상호 상관(cross-correlation) 함수를 계산하여 시간 지연 여부를 조사하였다. Fig. 7은 A와 D 기록에서 초동 도달 시간을 전후한 30ms 구간을 취하여 상호 상관을 실시한 결과이다. A를 기준으로 하여 D를 상관시킨 결과 양의 방향으로의 시간 이동(time shift)이 관찰되므로 D에서의 도달 시간이 A보다 약간 빠름을 알 수 있으며, 평균 0.94 ms의 시간차를 보인다. B와 C에서도 같은 현상을 나타내며 지연 시간은 평균 0.83 ms이다. 즉,  $S60^\circ W$  방향으로의 전파 속도가  $S22^\circ E$ 로의 속도보다 빠르며 이러한 속도 이방성은 이전에 실시된 연구 결과(이두성, 1998; Synn *et al.*, 1994)와 부합된다.

측점 E에서는 두 개의 단성분 지오폰을 사용했다. 따라서, 수직 성분 기록이 없으므로 수평 성분 기록에서 대신 P 파의 초동을 picking하였다. 같은 거리의 지오폰 A와 D에서도 비교를 위해 수평 성분을 picking하였으며, 이 때 파선 방향과 지오폰 축이 각각 다르므로 인해 생기는 위상차를 없애기 위해 모든 지오폰의 H1 성분 축을 파선 방향(in-line direction)으로 회전시켜 주었다. 회전 후 H1 성분 초동의 도달 시간을 비교



**Fig. 7.** Cross-correlation of the seismograms recorded at A and D.

해 본 결과 측정 E에서 가장 빠르고 D에서 가장 느리게 측정되었다. 이 현상은 기존의 연구 결과와 상치하는 현상이다. 이러한 현상의 원인으로서는 첫째로 수진점 정보정(receiver statics), 둘째로 Fig. 5와 Fig. 6에서 본 바와 같이 단성분 지오폰과 다성분 지오폰과의 고유 특성 차이에서 오는 위상차 등을 들 수 있다.

속도 이방성 분석에서 초동에 의한 평균 속도를 측정할 경우 수진점의 정보정이 선행되어야 한다고 생각한다. 그러나 IVSP의 경우 지표 탄성파와는 달리 한정된 측정 기록으로부터 신뢰할만한 정보정치를 산출하기가 불가능하다. 따라서 방위에 따른 속도 변화를 관찰하기 위한 탐사의 경우 직접 초동을 사용하는 것보다는 각 기록의 초동의 move-out 속도로부터 평균 속도를 산출하는 것이 바람직하다고 생각한다.

지오폰 A, B, C, D에서 수직 성분에 기록된 P 파 초동을 picking한 후 선형 회귀(linear regression)에 의한 방법으로 move-out 속도를 계산하였다. 측정 A에서 5,272 m/s, B에서 5,255 m/s, C에서 5,624 m/s, D에서 5,680 m/s으로서 모두  $S60^\circ W$  방향에서 빠른 속도를 나타내었으며, 이 결과는 이전의 연구 결과와 일치한다. 그리고 H1 성분의 초동으로부터 구한 move-out 속도는 A, D, E에서 각각 5,890 m/s, 5,933 m/s, 5,809 m/s로

**Table 1.** Comparison of the velocity ratios, computed and measured

Velocity Ratio	Computed	Measured (Vertical)	Measured (Horizontal)
D/A	1.109	1.077	1.007
D/E	1.121	-	1.021

측정되어 역시 S60°W 방향에서 최대 속도를 보여 준다. 수평과 수직 성분에서 도출한 move-out 속도의 차이를 볼 수 있으나, 수평 성분 기록이 수직 성분 기록에 비하여 불량하므로 수직 성분에서 도출한 속도비가 더 신뢰할만하다고 생각한다.

**이전 연구 결과와 비교**

Table 1은 위에서 측정된 속도를 이용하여 방향별 速度比를 구한 것이다. 수직 성분에서 구한 속도비는 1.077, 수평 성분으로부터 구한 속도비는 각각 D/A가 1.007, D/E가 1.021로 계산된다. 위 표에서 계산값은 이두성(1998)이 같은 장소에서 분극각으로부터 계산한 이방성 계수  $\epsilon$  과  $\delta$  를 Thomsen(1991)이 제시한 다음의 식에 대입하여 얻은 것이다.

$$V(\theta) = \alpha \sqrt{1 + 2\delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + 2\epsilon \cos^4 \theta}$$

여기서  $\theta$ 는 최대 응력 방향과 wave-front normal이 이루는 각이며,  $\alpha$ 는 최대 응력 방향과 직각 방향의 종파 속도이다. 본 실험에서 얻은 측정값 비가 전번 실험에서 도출한 이방성 상수를 사용하여 산출한 속도비보다 작게 나타났다. 수직 성분의 경우 측정값이 산출값과 약간의 차이를 보이며 수평 성분의 경우는 다소 큰 차이를 보인다. 그 이유로는 우선 수평 성분의 경우는 기록의 불량에 기인한 것으로 고려되며, 또한 산출된 속도는 수평 방향으로의 속도인데 비하여 측정된 속도가 수평 방향의 속도가 아닌 경사진 방향으로의 속도이므로 수직 방향으로의 속도 성분이 포함되어져 있기 때문인 것으로 생각된다. 두 실험 결과를 비교하면 정량적 비교에는 약간의 차이를 발견했으나 이방성 방향, 즉 정성적인 비교는 서로 일치함을 확인하였다.

**결 론**

암반의 이방성 규명을 위한 시도로서 역수직 탄성과 탐사법을 이용하여 방위별 3 성분 탄성과 자료를 획득하였다. 먼저, hodogram과 에너지 비를 이용하여 입자의 분극 방향을 분석하였으나, 수평 성분 잡음의 영향으로 측정값의 편차가 심해 신뢰성 있는 결과를 얻지 못하였다. 두 번째로, 방향에 따른 P 파의 속도 이방성을 관찰하였으며, 수직 및 수평 성분에서 구한 move-out 속도의 비를 구한 결과, 수직 성분에서 1.077, 수평 성분에서 1.007과 1.021의 값을 얻었다. 이로부터 대칭축의 방향이 북쪽에 가까움을 확인하였고, 최대 수평 응력 방향이 대략 EW라는 보고(Synn *et al.*, 1994)와도 附合됨을 알 수 있

다. 이러한 결과는 이두성(1998)의 연구 결과와도 거의 일치하는 것이다.

이방성 분석을 위한 역수직 탄성과 탐사의 경우 수평 성분의 기록이 불량할 경우 다방위 P 파의 속도만을 분석함으로써 매질의 이방성을 규명할 수 있으며, 이 경우 수진점 정보정의 산출이 어려운 점을 고려할 때 초동 주시를 직접 이용해서 속도를 산출하는 것보다는 초동의 move-out 속도를 사용함으로써 보다 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있다.

**사 사**

이 연구는 과학 재단 특정 과제 “탄성과 탐사에 의한 지하 구조 영상화” 지원에 의하여 수행하였다. 이 기관에 감사한다. 또한 이 논문을 읽고 좋은 의견을 제시하여 주신 심사위원들께 감사드린다.

**참고문헌**

1. 이두성, 1998, 역수직 탄성과법을 이용한 화성암 이방성 연구: 한국자원공학회지, **35**, 177-183.
2. Crampin, S., 1984, Effective anisotropy elastic constant for wave propagation through cracked solids: Geoph. J. R. Astr. Soc., **76**, 135-145.
3. Douma, J., 1989, The representability of cracked media by periodically layered media: Geophys. Prosp., **37**, 831-849.
4. Knowlton, K. B. and Spencer, T. W., 1996, Polarization measurement uncertainty on three-component VSP: Geophysics, **61**, 594-599.
5. Lee, D. S., 1988, Multicomponent vertical seismic profiling using impulsive P and S wave source: 58th ann. internat. SEG mtg. Extended Abstract, **S6. 6**, 819-822.
6. Lee, D. S., 1993, The P-wave particle motion in fractured media: Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers, **30**, 521-525.
7. Lee, D. S., 1996, P-wave anisotropy observed in multi-azimuth borehole seismic survey in fractured media: Butsuri-Tansa, **49**, 266-272.
8. Lee, D. S., Walden, A. F. and Wachi, N., 1994, Fracture characterization of the Monterey Formation using VSP: J. Seismic Exploration, 335-350.
9. Meadow, M. A. and Winterstein, D. F., 1994, Seismic detection of a hydraulic fracture from shear wave VSP data at Lost Hill Field, California: Geophysics, **59**, 11-26.
10. Synn, J. H., Shin, H. S., Choi, S. O. and Lee, H. K., 1994, Estimation of in-situ stress and effect of a pre-existing inclined fracture by hydraulic fracturing: Journal of Korean Rock Mechanics Society, **4**, 55-62.
11. Thomsen, L. A., 1991, Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock: SEG Research Workshop on Lithology: Relating Elastic Properties to Lithology at all scale.