이방성 조사를 위한 다방위 역수직 탄성파

이 두성 · 김 현규[1)]

1. 서론

지하 암석의 이방성 탄성 특성 파악은 지상 및 지하의 주요 구조물 건설 설계 시 필수 과제 중의 하나이다. 지각을 구성하는 암반의 이방성은 암반 내에 존재하는 균열에 기인하는 경우가 많아 최근에 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이 경우 균열은 일반적으로 수직 또는 수직에 가까운 서로 평행한 균열이 많은데 이는 주로 수평 응력의 차이에 의한 것으로 인식되고 있다.

본 연구에서는 시추공용 에어건 (air gun)을 이용한 다방위 다성분 역수직 탄성파 (Inverse Vertical Seismic Profiling; 이하 IVSP라 칭함) 자료를 사용하여 매질의 이방성을 조사하고자 하였다. IVSP법은 시추공 내의 진원과 지표의 지오폰에 의한 자료 취득법으로 시추공용 진원만 있으면 VSP법과 달리 비교적 신속하게 다량의 방위 조절이 가능한 3 성분 자료를 취득할 수 있는 장점이 있다 (이 두성, 1998).

2. 자료 획득

조사는 충남 대학교 내에 착정 (鑿井)된 시험 시추공에서 실시되었으며, 이 지역은 이 두성 (1998)에 의하여 이방성 연구가 이루어진 곳으로서 이전의 연구 결과를 확인하고 보완하기 위하여 자료 획득 파라메터를 설정하였다.

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

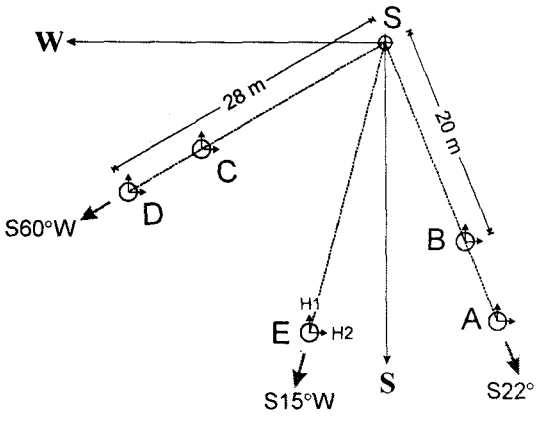

Fig. 1. Survey layout for the inverse VSP. A, B, C, and D are 3-component geophones, and E consists of two vertical geophones buried horizontally. A borehole air-gun was shot at source well, S.

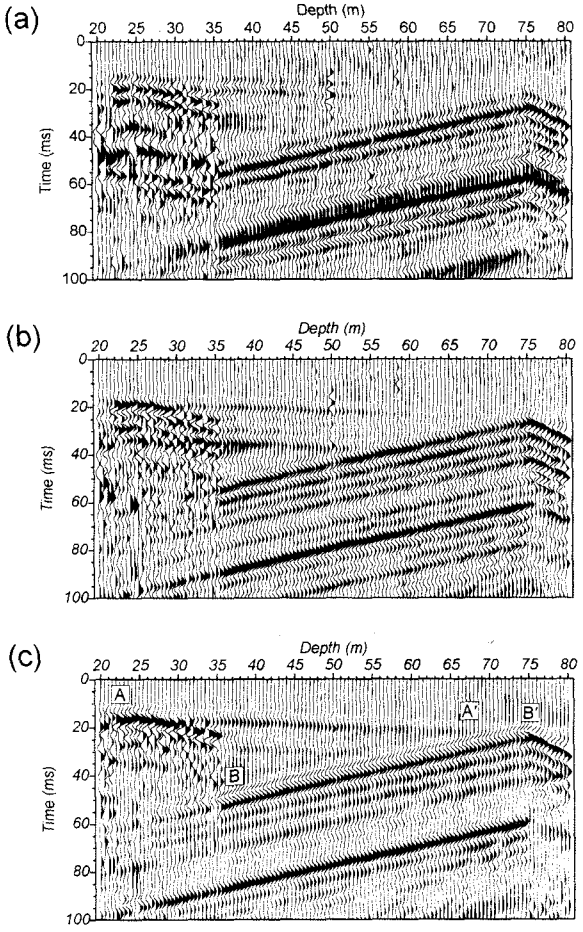

Fig. 2. Raw data acquired at station D. (a) and (b) are horizontal components and (c) is vertical component.

1) 한성 대학교 정보 처리 연구소

A, D, E 지오폰까지의 수평 거리는 28 m가 되도록 하였다. 이 중 A, B, 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. 시추공용 에어건을 진원으로 하여 깊이 20 m에서 80 m까지 구간에서 0.5 m 간격으로 발파하였으며, 0.5 ms의 샘플률 (sample rate)로 512 ms 동안 기록하였다.

3. 자료 처리 및 분석

Fig. 2는 측점 D에서 기록된 자료로서 100 ms까지만 도시하였다. 여기서 (a)는 H1 성분 자료이며 (b)는 H2 성분, (c)는 수직 성분 자료이다. A~A′ 으로 표시한 wave train은 직접파의 초동으로서 약 4,400 m/s의 moveout 속도를 가진다. H2 성분이 파선에 가까우므로 초동의 진폭이 H1보다 큼을 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.

매질의 속도 이방성을 검토하기 위하여 방향에 따른 초동의 도달 시간을 비교하였다. 먼저 측점 A와 D, 측점 B와 C 기록의 상호 상관 (cross-correlation) 함수를 계산하여 시간 지연 여부를 조사하였다. Fig. 3은 A와 D 기록에서 초동 도달 시간을 전후한 30 ms 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°W 방향으로의 전파 속도가 S22°E로의 속도보다 빠르며 이러한 속도 이방성은 이전에 실시된 연구 결과 (이 두성, 1998; Synn *et al.*, 1994)와 부합된다. 이 두 방향으로의 초동 주시 자료에서 도출한 평균 속도의 비에서도 이 사실을 확인할 수 있으며 (Fig. 4), 여기서 방향에 따른 속도비는 평균 1.03이다.

두 번째로, 초동의 수평 성분들로부터 hodogram을 작성하여 입자 운동의 방향을 측정하였다. 초동의 파형이 비교적 양호하게 기록된 진원 깊이 36 m에서 49 m까지 27개의 자료를 택하여 분석하였다. 그러나, 잡음으로 인하여 초동의 입자 운동이 선형을 이루지 않는 경우가 많아 hodogram으로부터 정확한 분극 방향을 결정하는 것은 매우 어려우며, 특히 측점 D에서 가장 심하였다. 이러한 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. 5에 측점 A에서 진원 깊이 37 m일 때의 분석 장면을 예시하였다. Fig. 5a는 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°까지 회전하여 18° 의 최적치를 얻었다 (Fig. 5b). Fig. 5c는 실제 트레이스를 2° 간격으로 회전하여 도시한 것이다. 홀수 트레이스는 H2 성분이고 짝수 트레이스는

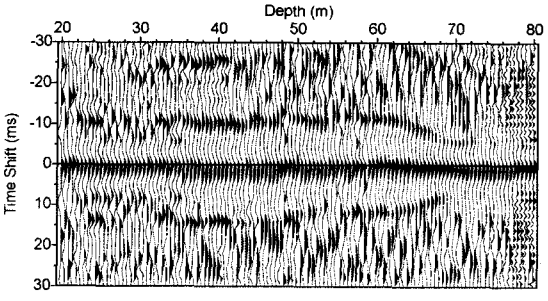

Fig. 3. Cross-correlation functions of the first arrivals recorded at A with those at D with depth.

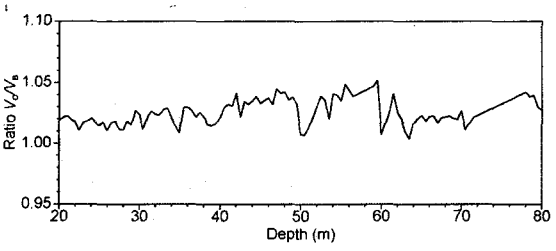

Fig. 4. Ratios of average velocities at station C to B with depth, which show *P*-wave anisotropy.

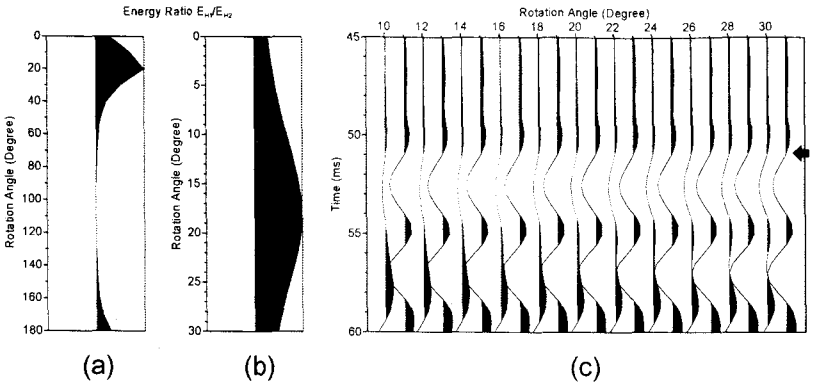

Fig. 5. A process to find polarization angle of *P* wave. Energy ratio of H1 to H2 is computed as the horizontal axes of geophone A are rotated with 10° interval (a) and 1° interval (b) to find the exact angle of 18°. Traces are also plotted to confirm the result (c). Odd traces are H2 components and even traces are H1 components. Arrow indicates the first break.

H1 성분으로서 18°에서 H1 성분이 최대가 됨을 확인할 수 있다. 이와 같은 방법으로 산출한 평균 입자 운동 방향은 측점 A에서 약 S19°E, D에서 약 S56°W, 그리고 E에서 약 S17.5°W로서 파선의 방향과는 각각 3°, 4°, 2.5°의 차이를 보인다. 이는 이 두성 (1998)의 결과와 거의 일치하는 것이며, 매질이 이방성임을 나타내는 단서가 된다. 즉, 등방성 매질에서는 *P* 파의 에너지 진행 방향 (파선 방향)과 분극 방향이 모두 파면에 직각이지만 이방성 매질에서는 둘의 방향이 달라지게 된다. 또한, 평행한 균열에 의한 이방성 매질에서는 파선과 균열면 사이의 각이 입자 운동 방향과 균열면이 이루는 각보다 항상 작으므로 (Lee, 1993), 위의 분석으로부터 이 지역에서의 균열면의 방향은 대체로 동서 방향임을 짐작할 수 있다. 다만, 측점 E에서는 단성분 지오폰을 매설하였으므로 측정 방향에 다소 오차가 있는 것으로 사료된다.

4. 결론

평행한 수직 균열에 의한 transverse isotropy 상태에서의 암반의 이방성 규명을 위한 시도로서 역수직 탄성파 탐사법을 이용하여 방위별 3 성분 지진파 자료를 획득하였다. 방향에 따른 *P* 파의 속도 이방성이 관찰되었고, 동서 방향으로의 속도가 남북 방향으로의 속도보다 빠르므로 최대 수평 응력 방향이 대략 EW라는 보고 (Synn *et al.*, 1994)와 附合됨을 알 수 있다. 또한, hodogram과 에너지 비를 이용하여 입자의 분극 방향을 분석한 결과 두 방향의 측점에서 파선보다 북쪽으로 편향하는 것으로 관측되었으며, 이 역시 균열면 방향이 EW임을 지시한다. 이러한 결과는 이 두성 (1998)의 연구 결과와 거의 일치하는 것이다. 그러나, 입자 운동이 선형을 이루지 않는 경우가 많아 정확한 각도를 얻는 데는 한계가 있었다. 따라서, 수평 응력 또는 수직 균열에 의한 매질의 이방성을 분석하는 경우 다방위 역수직 탄성파법을 사용하여 속도 이방성을 측정함으로써 매질의 이방성을 비교적 간단히 분석할 수 있다.

5. 참고 문헌

1. 이 두성, 1998, "역수직 탄성파법을 이용한 화성암 이방성 연구", 한국 자원 공학 회지, Vol. 35, No. 2, pp. 177-183.
2. Knowlton, K. B. and Spencer, T. W., 1996, "Polarization measurement uncertainty on three-component VSP", *Geophysics*, Vol. 61, pp. 594-599.
3. Lee, D. S., 1993, "The *P*-wave particle motion in fractured media", *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 30, No. 6, pp. 521-525.
4. 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*, Vol. 4, pp. 55-62.