

## 탄성파 VSP 와 Crosswell 방법에 의한 암반의 자연상태의 균열특성에 관한 연구 사례

### FRACTURE CHARACTERIZATION USING INVERSE VSP AND CROSSWELL SEISMIC TECHNOLOGY

이두성<sup>1)</sup>, Doo Sung Lee, 지준<sup>2)</sup>, Jun Ji, 유영준<sup>3)</sup>, 장성준<sup>4)</sup>

<sup>1), 2)</sup> 한성대학교 정보공학과, Dept. of Information Engineering, Univ. Han Sung

<sup>3)</sup> 대한광업진흥공사, Korea Mining Promotion Corp.

<sup>4)</sup> 서울대학교 대학원 지질과학과, Dept. of Geological Science, Seoul National University

**SYNOPSIS** : In situ fracture characterization is a crucial task in a site investigation for major structures. A system of parallel vertical fractures caused by a stress difference in a region can be characterized by using multicomponent seismic data. Anisotropic behavior of the P-waves in a fracture induced anisotropic medium can be utilized to characterize a common fracture system in the earth crust. Using the inverse VSP and crosswell seismic data, the fracture orientation and fracture density of a medium was analysed.

**KEYWORDS** : 균열특성화, Anisotropy, IVSP, Crosswell seismic

## 1. 서론

지하 암석 내에 분포한 균열의 특성을 파악하는 일은 지상 및 지하 주요 구조물 건설 설계시 꼭 필요한 과제 중 하나이다. 균열의 특성은 그 방향과 밀도에 의하여 정의되며, 지하의 균열 방향성은 간접적인 방법으로 지표의 노두에서 확인되는 균열의 분석, 지진 또는 시추공 파쇄 등 지하 암석의 응력방향 분석에 의한 방법이 있으며 (이두성, 1995a) 보다 적극적인 방법으로 시추 코어를 분석하거나 시추공 영상 검층법과 탄성파 S-파를 이용한 방법이 있다 (Lee et al, 1994). 시추공 영상 검층법으로는 미소비저항 검층장비인 FMS, 와 음파검층장비인 BHTV 나 CBIL (이두성, 1995b, 1995c) 이 있다.

암석 내에 분포한 균열이나 암석의 탄성특성은 시추코어나 시추공 영상 검층법 등 직접관찰을 통해서 분석할 수 있으나 이러한 방법은 다음 두 가지 이유로 신뢰도에 대한 다소 부정적인 측면이 있다. 첫째로, 코어의 대표성 문제이다. 즉 작은 크기의 코어샘플이 얼마나 잘 암반을 대표할 수 있느냐하는 문제이다. 실제로 대부분의 경우 관심 대상인 파쇄 구간에서는 실내실험에 적합한 코어샘플을 취득하기가 쉽지 않다. 둘째로 실내 실험환경이 자연상태와 상이함이다. 특히 세일 등 연약한 암석의 탄성계수는 작용된 응력의 변화에 민감하므로, 실험실에서 얻은 수치는 실제 자연상태에서 계측되는 값과 상당히 다를 수 있다.

본 논문에서는 탄성파 탐사에 의한 암반의 탄성특성을 규명함으로써 자연 상태의 균열

특성을 규명하고자 하였다. 매질의 탄성계수는 여러 방향의 탄성과 속도로부터 산출할 수 있으며 매질의 자연상태의 탄성과 속도는 시추공 탄성과 탐사법에 의하여 효율적으로 측정할 수 있다 (Lee, 1996). 본 연구에 사용된 탄성과 자료는 충남대학교 연구용 시추공에서 수행한 역수직탄성과 (Inverse vertical seismic profiling) 와 공대공 탄성과 자료이다.

## 2. 이론적 배경

암반 내에 존재하는 균열은 일반적으로 수직 또는 수직에 가까운 평행한 균열이 많은데 이는 주로 수평응력의 차이로 인한 것으로 인식되고 있다. 이러한 경우 매질을 통과하는 탄성파는 이방성을 보이며 이때 매질의 이방성은 방향에 따른 탄성과 속도의 변화와 입자운동 방향의 변화를 측정함으로써 규명할 수 있다. 응력 이방성에 의한 균열방향은 대체로 최대 응력 방향과 평행하며 이 방향은 탄성과 횡파의 복굴절 현상을 관찰함으로써 알 수 있다 (Douma, 1987, Lee, 1988, Crampin, 1989). 현재까지 이와 관련된 많은 연구자료가 발표되었으며 수직균열의 방향 즉 최대응력 방향은 빠른 횡파의 입자운동 방향과 평행하다는 사실이 인정되고 있다 (Meadow and Winterstein, 1994, Lee et al., 1994).

횡파를 이용한 이방성 탐사법은 지표 탄성과 탐사나 다성분 VSP에서 주로 사용되고 있으며 균열탐사에 가장 많이 사용되는 탐사법이다. 횡파의 복굴절 자료를 취득하려면 횡파를 발생시킬 특별한 장비가 필요하며 대체로 높은 탐사경비를 요구한다. 따라서 본 연구에서는 그러한 특수장비 없이도 자료취득이 가능한 다성분 종파 (P-wave)를 이용하여 균열특성을 분석하고자 하였다. Transverse isotropic(TI) 매질에서의 탄성과 종파의 거동은 Postma (1955)에 의해서 연구되었으며 이 이론에 근거한 평행한 수직 균열을 포함한 암석에서 탄성과 종파 입자운동 방향과 균열파라미터와의 관계식이 Lee (1993)에 의하여 제시되었으며 이 관계식을 이용한 파쇄대 특성 규명 방법의 개발 과 실제 적용 사례가 발표된 바 있다 (Lee, 1996).

평행한 수직균열에 의한 수평면상에서 P파의 속도변화는 Transverse isotropy (TI) 매질의 대칭면에서 방위에 따른 속도의 변화를 고찰함으로써 예측할 수 있다. Thomsen (1991) 모델에 의하면 P파의 속도는 다음과 같이 표시된다.

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

수직균열 모델을 식 (1)로 표시하면, 대칭면은 수평면이고,  $\theta$  는 균열면과 파선이 이루는 각이며  $\alpha$  는 균열에 직각 방향의 종파 속도이다. 균열 모델과 이방성 계수  $\delta$  와  $\epsilon$  과의 이론적인 관계식은 여러 학자들에 의하여 발표되었다 (Garbin and Knopoff (1973), Hudson (1981), Nishizawa (1982), Crampin (1984), Douma(1989), and Thomsen (1991)). Thomsen (1991)이 제시한 이론식 중 균열이 유체로 충전되었으며 균열에 의한 공극율이 모암의 공극율에 비하여 현저히 작을 경우는 다음의 식으로 표시된다.

$$\delta = 2\epsilon(1 - \sigma_s) - 2\gamma \frac{(1 - 2\sigma_s)}{(1 - \sigma_s)} \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{8}{3}(1 - K_f/K_s)^2 D \eta_c \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{8}{3} \frac{(1 - \sigma_s)}{(2 - \sigma_s)} \eta_c \quad (4)$$

여기서 유체 상수 D는

$$D = \left[ 1 - \frac{K_f}{K_s} + \frac{K_f}{K_s} \left( \frac{3}{2} \frac{1 - \sigma_s}{2 - \sigma_s} \frac{\phi_p}{\phi} + \frac{16}{9} \frac{1 - \sigma_s^2}{1 - 2\sigma_s} \frac{\eta_c}{\phi} \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

이며,  $\sigma_c$  는 Poisson's ratio,  $\eta_c$  는 균열밀도(crack density),  $K_s$   $K_f$ 는 각각 모암과 유체의 incompressibility 이고,  $\phi_p$  와  $\phi$  는 각각 모암 공극률 및 전체 공극률이다. 균열밀도는 부피가 V 인 암석에 직경이 a 인 균열이 N개 있을 때  $Na^3/V$ 로 정의된다.

등방성 (Isotropic) 매질에서는 종파의 에너지진파(ray) 방향과 입자운동 (polarization) 방향은 일치한다. 그러나 이방성 (anisotropic) 매질에서는 두 방향이 달라진다. TI 매질의 대칭면 즉 수직균열을 포함한 매질의 수평면에서 이들 방향은 다음과 같이 표시된다 (Lee, 1993).

$$\tan^2 \psi = \frac{1 - (1 + 2\epsilon) \cos^2 \theta / R - (\beta_0 / \alpha_0)^2 \sin^2 \theta / R}{1 - \sin^2 \theta / R - (\beta_0 / \alpha_0)^2 \cos^2 \theta / R} \quad (6)$$

$$\tan \phi = \frac{\tan \theta + 0.5(\delta \sin 4\theta - 8\epsilon \cos^3 \theta \sin \theta) / R}{1 - 0.5 \tan \theta (\delta \sin 4\theta - 8\epsilon \cos^3 \theta \sin \theta) / R} \quad (7)$$

여기서,  $R = 1 + 2\delta \cdot \sin^2 \theta \cos^2 \theta + 2\epsilon \cdot \cos^4 \theta$  이고,  $\theta$ 는 균열면과 wavefront normal 과 이루는 각이고,  $\psi$  와  $\phi$  는 각각 균열면과 입자운동방향, 균열면과 ray가 이루는 각이다. 실제 탄성과 탐사에서  $\phi$ 는 진원과 수신점을 잇는 방향이고, 이 방향과 입자운동 방향의 편차는 3성분 기록의 두 수평성분을 분석함으로써 산출할 수 있으며 그 편차각의 크기는 균열특성 즉 균열 방향과 균열밀도의 함수이다.

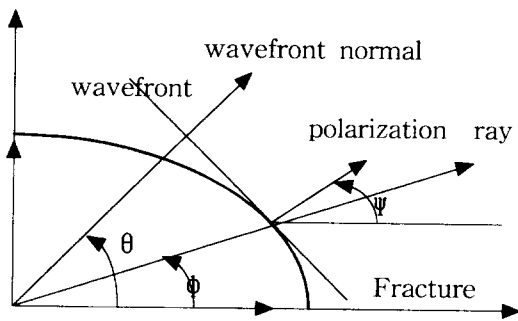


Fig.1 Schematic diagram to show the direction of the wavefront normal, ray and polarization.

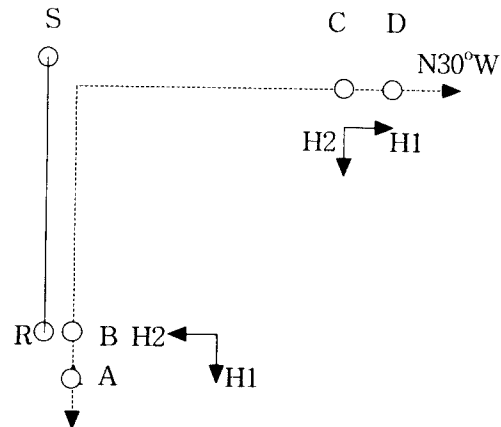


Fig. 2. IVSP and Crosswell seismic survey layout

### 3. 탄성과 자료취득

본 연구지역에서 취득한 탄성과 데이터는 다성분 역수직탄성과 (Multicomponent inverse VSP: 이하 IVSP) 와 다방위 단성분 VSP, 근거리 와 원거리 다성분 VSP, 그리고 공대공 탄성과 (Crosswell seismic: 이하 CS) 이다. 본 논문에서 토의될 자료는 이중 IVSP 와 CS 이다. CS는 수평거리 48.3m 떨어진 두 개의 수직 시추공을 이용하여 심도 22-90m 구간에서 실시하였다. 탐사장비로는 24-channel Hydrophone 과 airgun 을 사용하였으며 수신점 간격은 1m 이며 발진점 간격은 0.5m 이다. IVSP는 시추공 내에 위치한 진원으로부터 발

생한 음파를 지표상의 여러 측정점에서 기록하는 방법이다. 사용된 탄성과 진원은 시추공용 Airgun 이며 수신기는 단성분 및 3성분 지오폰이다. 기록은 수신공 내의 심도 22 - 90m 구간에 매 1m 간격으로 위치한 발진점과 지표 상에 서로 직각으로 배열한 두 측선 상에 설치된 총 12 개의 단성분 지오폰과 4개의 3성분 지오폰을 사용하였다. 본논문에서는 이중 측정점 B 와 C 위치한 다성분 자료만 사용하였다 (Fig. 2). 두 측정점의 위치는 발진공에서 수평거리 대략 50m 떨어진 곳에 위치하며 3성분 지오폰의 수평성분 극성은 Fig. 2 에 표시된 바와 같고 수직성분은 지하방향이 (+) 방향이다. 그림에서 S 와 R은 각각 CS의 발진공 및 수신공을 나타낸다.

#### 4. 자료분석

Fig. 2에서 제시한 바와 같이 3성분 기록은 4개가 있는데 측정점D 에서의 기록이 불량하여 사용하지 않았으며, 대칭성을 살리기 위해서 측정점 B와 C의 자료를 선택하여 분석하였다. B 와 C의 3-성분은 Fig. 3에 제시하였다. 두 측정점에서 기록한 데이터로부터 종파의 입자운동 방향과 파선방향과의 편차 (fracture indicator)를 산출하고자 두 기록에서 진원심도 41m에서 59m까지 19개씩의 표본을 취하여 각 기록의 초동(first arrival)의 수평성분으로 Hodogram을 작성하였다.

Fig. 4에 심도 42m의 진원에 의한 두 기록의 Hodogram이 제시되어 있다. Hodogram은 두 수평성분 즉 H1- 과 H2-성분의 진폭으로부터 입자의 수평면에서의 운동방향을 측정하는 한 방법이다. 여기서 수직 수평축은 각각 H1- 및 H2-방향에 평행한 방향이다. Hodogram으로부터 산출한 입자운동방향은 측정점B 에서는 대략 N50°E, 측정점 C에서는 N21°W 이다. 이들 탄성과의 ray 방향은 진원과 각 측정점을 잇는 방향으로 각각 N54°E 와 N24°W 이다. 따라서 측정점B 에서의 편차는 4° 이고 측정점 C에서의 편차는 3° 이며 이 현상은 매질이 이방성임을 나타낸다고 볼 수 있다. (Fig. 5)

측정된 편차에 의한 TI매질의 이방성 분석은 다음과 같다. 우선 입자운동방향은 ray 방향으로부터 균열면에서 멀어지는 방향으로 편향한다는 사실로부터 균열방향은 두 측선의 바깥쪽에 위치할 것이며, 측선 B에서의 편차가 다소 크므로 측선 B와의 균열과의 사이 각이 측선 C 와의 각보다 작다 따라서 대략적으로 EW방향이라는 사실을 추론할 수 있다. 균열방향이 EW라는 가정 하에 식 (6) 과 (7)을 사용하여 ray 와 입자운동간의 편차 각이 각각 3° 과 4° 가되는 경우의 균열밀도는 Lee(1996)에서 제시된 방법에 의하여 대략 1.83으로 산출되었다. 여기서 사용된 암석의 매개변수는 공극률=0.15  $V_p/V_s=1.85$   $K_f/K_s=0.05$  이다.

Crosswell seismic (CS) 데이터는 매질의 수평방향의 전파속도를 측정할 수 있다. 일반적으로 CS method는 기록의 초동주시(first arrival time)를 이용한 속도 토모그램으로부터 매질의 한 단면상에서의 탄성과 속도분포를 관찰하는 수단으로 사용되고 있다. Fig. 6에 심도 66m 에서 기록된 Common receiver gather (CRG) 와 Common source gather (CSG)가 제시되었다. CRG 는 수신공의 한 수신기에서 얻은 기록으로 발진공 내의 여러 발진점으로부터 발생한 탄성과 기록의 모음이고, CSG는 발진공의 한 지점에서 발생한 탄성과를 수신공 내의 여러 측정점에서 기록한 데이터의 모음이다. 이 두 기록은 동일단면을 서로 다른방향으로 주사한 탄성과 기록에 해당한다.

CSG66 과 CRG66 에서보면 기록에서 보면 심도 38m, 55m, 74m 부근에서 진폭이 큰 튜브파가 발생한 것을 인식할 수 있는데 이는 대체로 공경의 변화가 있는곳 (hydrophone string의 끝 부분), 또는 공 근처 매질의 속도 변화에 의한 것인 경우가 많으며, 파쇄대 부근에서도 발생한다. 튜브파의 발생만으로는 균열밀도의 변화에 의한 것으로 판정할 수 없다. 심도에 따른 매질의 속도 변화를 보기 위하여 모든 기록 중 수평방향으로 전파되는 파 즉 진원 과 수신점의 심도가 같은 기록만을 발췌하여 Fig. 7에 제시하였다.

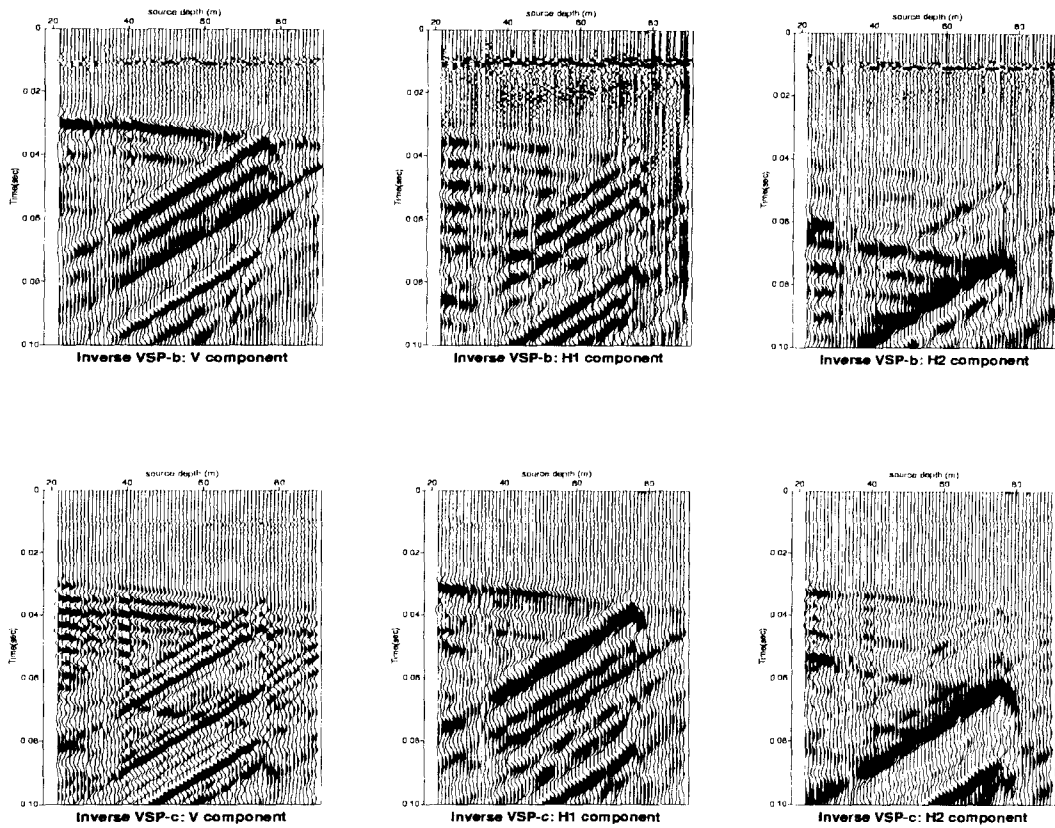


Fig. 3. Three-component data recorded at station B and C. The top row is from station B and the bottom row is from station C. From left the vertical-, inline-, and crossline-components.

그림에서 보면 매질의 속도는 대체로 심도가 증가함에 따라 증가하는 현상을 인식할 수 있다. 두 시추공이 수직하다 는 가정 하에 매질의 속도는 22m 에서 대략 5,100 m/sec 이고 90m에서 대략 5,800 m/sec이다. 이 그림에서 보면 몇몇 구간에서 국부적으로 초동이 0.3 - 0.4 msec 지연된 것을 볼 수 있으며 이는 그 구간의 속도가 주위보다 낮음을 나타낸다. 이들 구간은 심도 35m, 68m 부근이다. 이 저속도 구간은 암상의 변화 또는 균열밀도가 다소 높은 구간일 가능성이 있다.

## 5. 결론

지층에 발달한 균열이 지반에 미치는 영향을 과학적이고 체계적으로 평가하려면 구성암석의 탄성특성을 규명하여야 하겠다. 일반적 방법인 코어를 이용한 분석법에는 두 가지 문제점이 있다. 첫째로, 코어의 대표성 문제이다. 즉 작은 크기의 코어샘플이 얼마나 잘 암반을 대표할 수 있는지는 문제이다. 둘째로 실내 실험환경이 자연상태와 상이함이다. 따라서 자연 상태에서 측정함이 바람직하며 이 목적으로 다성분 VSP 법이 많이 사용되고 있다. 그러나 VSP 법은 한 번의 발파로 1-5 개의 기록만을 얻을 수 있어 자료취득에 많은 시간이 필요하며 또한 공내 지오폰의 오리에테이션 등 다소 어려운 면이 있다. 그러나 Inverse VSP는

시추공용 진원 만 있으면 상술한 문제가 없이 신속하게 다량의 oriented 된 자료를 취득할 수 있는 장점이 있다.

Inverse VSP 와 Crosswell 자료를 사용하여 균열특성을 분석하였다. 이 계산에는 탄성과 자료로부터 얻을 수 있는 Ray 방향, 입자운동방향, 종파와 횡파의 속도비 이외에도 암석의 공극율, 균열 포화상태 등 매질의 물성에 대한 자료를 필요로 한다. 따라서 본 논문에서 제시한 균열밀도에 대한 분석에는 다소 불확실한 면이 있으나 균열방향에 대한 분석은 2개 이상의 축선 설정으로 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

## 사사

본 연구는 학술진흥재단 1996년도 학술연구조성비에 의한 일부 지원과 대한광업진흥공사 지원에 의해 수행되었기에 이 기관에 사의를 표한다.

## 참고문헌

1. 이두성, 1995a, Hydraulic fracturing process monitoring을 위한 지구 물리탐사법 현장실험: 석유 64, 97-113.
2. 이두성, 1996b, 균열탐지를 위한 물리검층법: 석유 65, 132-145.
3. 이두성, 1995c, 물리검층에 의한 균열 특성화 사례연구: 석유 66, 75-91.
4. Crampin, S., 1984, Effective anisotropic elastic constant for wave propagation through cracked solids: Geoph. J.R. Astr. Soc., 76, 135-145.
5. Douma, J., 1989, The representability of cracked media by periodically layered media: Geophys. Prosp., 37, 831-849.
6. Garbin, H.D. and Knopoff, L., 1973, The compressional modulus of a material permeated by a random distribution of circular cracks: Quarterly of applied mathematics, 33, 453.
7. Hudson, J.A., 1981, Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks: Geophys. J.R. Astr. Soc., 64, 133-150.
8. 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.
9. Lee, D.S., 1993, The P-wave particle motion in fractured media: 한국자원공학회지, 30, 521-525.
10. Lee, D.S., 1996, P-wave anisotropy observed in multi-azimuth borehole seismic survey in fractured media: Geophysical Exploration, 49, 4., 266-272.
11. Lee, D.S., Walden, A.F., Wachi, N., 1994, Fracture characterization of the Monterey Formation using VSP: J. Seismic Exploration, 335-350.
12. 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.
13. Nishizawa, O., 1982, Seismic velocity anisotropy in a medium containing oriented cracks-Transversely isotropic case: J. Phys. Earth, 30, 331-347.
14. Postma, G.W., 1955, Wave propagation in a stratified medium: Geophysics, 20, 780-806.
15. Thomsen, L.A., 1986, Weak anisotropy: Geophysics, 51, 1954-1966.
16. Thomsen, L.A., 1991, Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock, presented at the SEG Research Workshop on Lithology: Relating Elastic Properties

to Lithology at all scale.

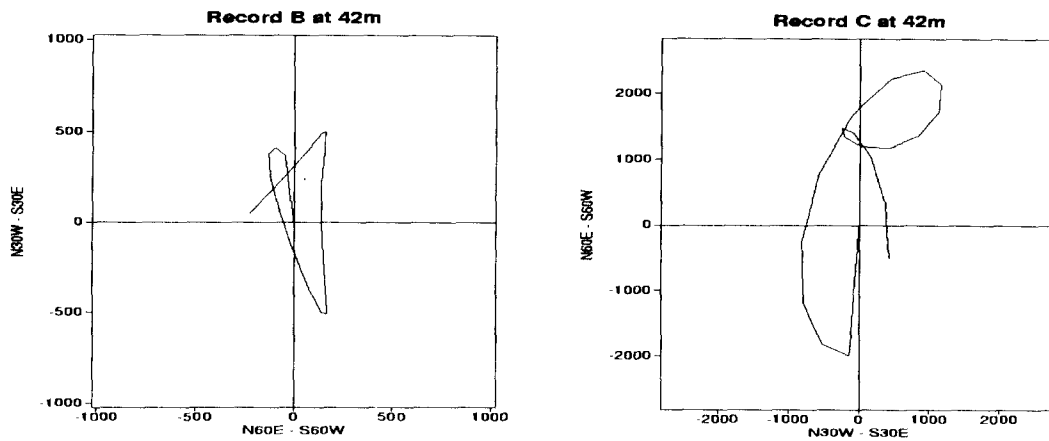


Fig. 4. The particle motion of the P-wave recorded at station B and C. The source is at depth 42m in the source well.

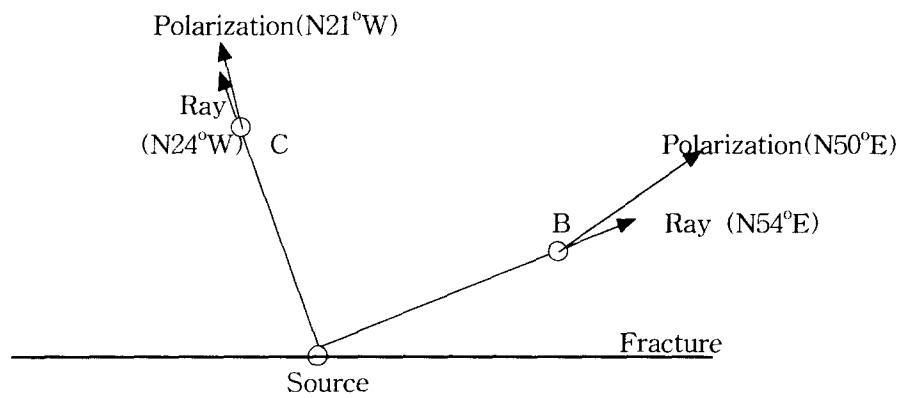


Fig. 5. Schematic diagram showing the directions of the particle motion (polarization) and the corresponding ray.

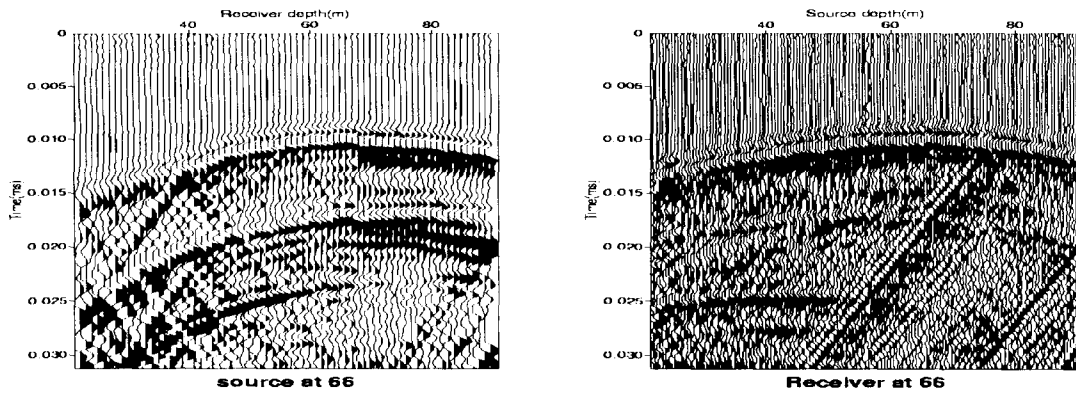


Fig. 6. Common source and common receiver gather acquired at depth 66m.

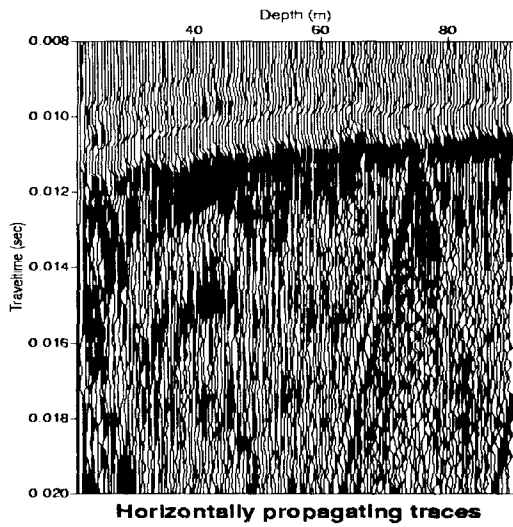


Fig. 7. Horizontally propagating traces