물리탐사
Vol. 2, No. 4, 1999, p. 209~214

트렌치를 이용한 S 파 발생 현장실험

이두성[1] · 김현규[1]

Field Experiment Generating Shear Waves by Using Trench Method

Doo Sung Lee and Hyeongyu Kim

요 약 : 트렌치를 이용하여 다성분 탄성파 탐사에 필요한 횡파를 발생시키는 현장 실험을 2개소에서 실시하였다. 실험결과 1개소에서는 트렌치 연장 방향에 직각 방향으로 양호하게 분극된 횡파를 얻을 수 있었으며 다른 한 곳에서는 횡파 생성에 실패하였다. 시추공 내에 설치한 3성분 지오폰 기록을 필터링, 에너지 balancing, 수평 및 수직 성분 자료의 加·減算 등 전처리 과정을 거쳐 *P* 파와 *S* 파를 분리하였고, *S* 파의 직접파 이벤트를 분석하여 매질의 이방성을 관측할 수 있었다. 분석결과에 의하면 SH_{max} 방향이 남북 방향이었으며 이는 시추코어에서 관찰된 파쇄대 절리 방향과 같다는 사실을 확인하였다.

Abstract : A field experiment generating shear waves by trench method was conducted at two places in Taejun area. We were able to separate the P- and S-waves by summing and subtracting the vertical and horizontal component of the data recorded at a three component downhole geophone in the borehole. The analysis of the records revealed that the shear waves were polarized to NS and EW directions. The faster shear waves were polarized to NS direction. The NS direction generally agrees with the dominant joints direction observed from the cores collected from the borehole.

Keywords : Shear wave, polarization

서 론

탄성파 탐사에서 가장 흔히 나타나는 이방성의 형태는 transverse isotropy(TI)이다. 이러한 이방성은 수직 또는 거의 수직의 열린 균열(open fracture)이나 일정 방향으로 정렬된 미세 균열(microcrack)에 기인하는 경우가 많으며 균열의 방향성은 그 지역의 최대 수평응력(SH_{max}) 방향과 일치하는 것으로 알려져 있다.

S 파는 다음과 같은 두 가지 이유로 암석의 방향성에 대한 지시자로서 *P* 파보다 더 신뢰할 수 있는 것으로 여겨지고 있다(Lynn *et al.*, 1995). 첫째, 탄성파 속도의 이방성 관찰 측면에서 보면 *S* 파의 경우 분극방향이 다른 두 개의 *S* 파 주시를 실질적으로 같은 파동전파 경로를 따라 측정할 수 있는 반면, *P* 파의 경우는 서로 다른 방위를 따라 측정하고 비교하여야 하며, 이는 필연적으로 파의 이동 경로 차이에 의한 이질성(heterogeneity)이 도입될 가능성이 크다. 이러한 특성적 차이는 수직 균열의 조사에 있어 특히 중요하다. 둘째, *S* 파의 분극은 암석의 "자연 좌표(natural coordinates)"에 의해 결정된다. 그러므로, *S* 파의 분극은 열린 균열의 우세 방위와 직접적인 연관이 있다. 따라서 이방성 연구에서 *S* 파를 측정하는 것은 매우 중요하며, 여기에 분극된 *S* 파를 발생시키기 위한 장치의 필요성이 대두된다. 일반적으로 *S* 파의 발생은 고가의 특수장비를 사용하여야 하며 험준한 지역의 탐사시에는 장비운반이 어려운 측면이 있다.

본 연구에서는 다성분 수직 탄성파 탐사(vertical seismic profiling)를 목적으로 primary *S* 파 발생을 위한 트렌치법 사용 가능성을 검토하고자 충남대학교와 한국자원연구소에 위치한 시험 시추공에서 현장 실험을 실시하였다. 한국자원연구소 시추공에서 취득한 데이터에서는 *S* 파의 분리가 성공적이었으나 충남대 시추공에서의 기록은 매우 불량하였다. 특히 수평성분은 인식하기 어려울 정도로 미약하였으며 *S*파 성분을 확인할 수 없었다. 트렌치법은 Puzyrev(1962)를 비롯한 구 소련 과학자들이 사용한 발파패턴으로서, 이를 불란서 CGG 사에서 Syslap이란 상호로 상용화한 기술이다.

자료 획득

서론에서 언급한 바와 같이 충남대 시추공에서의 기록은 매우 불량하여 *S* 파의 인식에 실패하였다. 그 이유는 시추공용 지오폰과 시추공 사이의 접착 불량으로 사료된다. 이 논문에서 취급하고자 하는 주제는 한국자원연구소 내에 위치한 시험 시

*1999년 10월 16일 접수
1) 한성대학교 영상화기술연구실

Table 1. Acquisition parameters for the VSP survey

Source Type	4.5 kg hammer
Receiver Type	3-component borehole geophone
Minimum Depth	30 m
Maximum Depth	60 m
Depth Interval	1 m
Record Length	256 ms
Sample Rate	0.25 ms

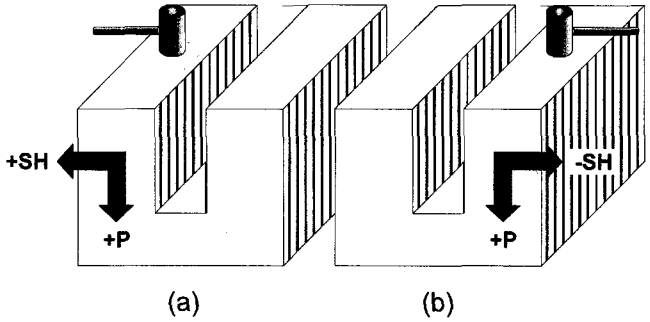

Fig. 1. Schematic depiction of the trench method for *P*- and *S*-wave generation. A sledgehammer is pounded sequentially on a plate placed nearby either side of the trench to generate *SH* waves of opposite polarity and *P* waves of the same polarity.

추공에서 실시한 실험이다. 시험 시추공의 전체 깊이는 301.5 m이고 케이싱(casing)은 13 m 깊이까지 설치되어 있다. 시추 코어(core) 분석에 의하면 이 지역의 지질은 대부분 중립질의 복운모 화강암으로 이루어져 있으며, 전 구간에 걸쳐 페그마타이트(pegmatite) 및 반화강암맥(aplite dyke)이 발달되어 있다(신희순 等, 1998). 본 실험에서 진원으로 4.5 kg의 해머를 알루미늄 플레이트에 타격함으로써 탄성파를 발생시켰으며, 수진기는 GeoStuff의 시추공용 3 성분 지오폰 (BHG-3)을 사용하였다. 기록 장치로는 Geometrics의 StrataView R24를 사용하였고 기록의 샘플 간격(sample rate)은 0.25 ms이며 기록 시간은 256 ms이다. 자료 획득은 지하 30 m 지점에서부터 지오폰을 1 m 간격으로 내리면서 60 m 깊이까지 총 30 m 구간의 기록을 취득하였으며, Table 1에 자료 획득 변수를 요약하였다.

일반적으로 불균질한 매질에서는 충격 파원(impulsive source) 만으로도 *P* 파와 함께 *S* 파가 발생하지만, primary *S* 파를 발생시키기 위하여 본 연구에서는 트렌치(trench)를 이용한 방법을 적용하였다. 이 방법은 진원점 부근의 지표에 어느 정도의 깊이를 갖는 불균질 매질, 즉 도랑(pit or trench)과 같이 주변과 현격한 물성차를 갖는 경계면이 존재할 때 산란 효과(scattering effect)에 의해 *SH* 파가 우세하게 발생한다는 현상을 이용한 것이다(狐崎 · Okuzumi, 1992). *S* 파 발생 방법은 트렌치의 양쪽에서 차례로 충격을 가하여 전단 특성(shear property)의 지역적 비대칭성으로 인해 서로 반대의 극성을 가지는 SH 파를 얻는 것이다(Fig. 1). 이 때 *P* 파도 같이 발생되며 이 *P* 파는 각 트레이스에서 같은 극성을 가진다. 따라서, Fig. 2와 같이 트렌치 양쪽의 두 진원점에서 얻은 기록을

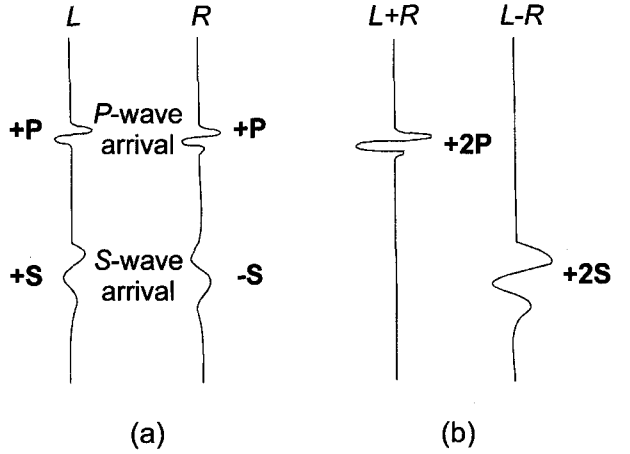

Fig. 2. Illustration of how adding and subtracting traces made from trench method works on similarly polarized method, to produce separate *P*- and *SH*-wave traces (after Tatham and McCormack, 1991).

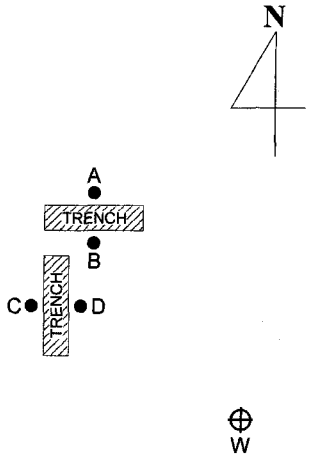

Fig. 3. Survey layout for the multicomponent VSP. A 4.5-kg hammer was pounded on a plate located at A, B, C, and D sequentially. A 3-component geophone was positioned at various locations in the borehole, W.

서로 빼줌으로써 *S* 파는 증가되고 *P* 파는 상쇄되며, 반대로 더해주면 *P* 파가 증대되고 *S* 파가 제거되므로 *P* 파와 *S* 파를 서로 분리할 수 있다. 이 연구에서는 시추공의 북서쪽에 남북 및 동서 방향으로 두 개의 트렌치를 파고, 속을 채우지 않은 상태에서 이들 트렌치의 양쪽 편에서 타격을 가하였다(Fig. 3). 각 타격점과 시추공과의 수평 거리는 각각 A가 6.6 m, B가 5.8 m, C가 5.6 m, D가 5.0 m이다. 이로써 남북 방향과 동서 방향으로 각각 분극된 두 set의 횡파 자료를 얻을 수 있었다.

자료 처리 및 분석

전처리 과정

StrataView에서 SEG-2 형식으로 기록된 자료를 자료 처리

소프트웨어인 SU(Seismic Unix)에서 사용하기 위하여 SEG-Y 형식으로 변환하였다. 초기 자료는 공통 발파점(common shot point) 자료이므로 수평 성분과 수직 성분 자료를 분리하기 위해 채널별로 분류하는 과정을 거쳤다. 약 290 Hz 이상의 주파수를 가지는 고주파 잡음이 원시 자료 전체를 masking하고 있어 200 Hz의 고주파 차단 필터(high-cut filter)를 적용하여 제거하였다(Fig. 4). 수평 성분 자료의 합과 차에 의한 종파 및 횡파의 재구성은 같은 세기의 힘이 작용했을 경우에 가능한 것이나, 이 연구에서와 같이 해머를 사용했을 경우 항상 타격 에너지를 같게 할 수 없다. 따라서, 이러한 힘의 불균형에 의한 영향을 제거하기 위해 전체 기록 길이를 윈도우로 하는 AGC(automatic gain control)를 적용시켜 에너지의 균형을 맞추었다. Fig. 5에 수평 및 수직 성분 자료를 더하거나 뺌으로써 얻은 자료를 나타내었다. 여기서 (a)는 수평 성분 자료 중 남북 방향 자료의 差이고 (b)는 동서 방향 자료의 差이며, (c)는 수직 성분 자료의 合이다. 50 m 이하 자료의 質이 좋지 않으나, 각각의 자료에서 P 파 및 S 파의 직접파 이벤트를 명확히 관찰할 수 있다.

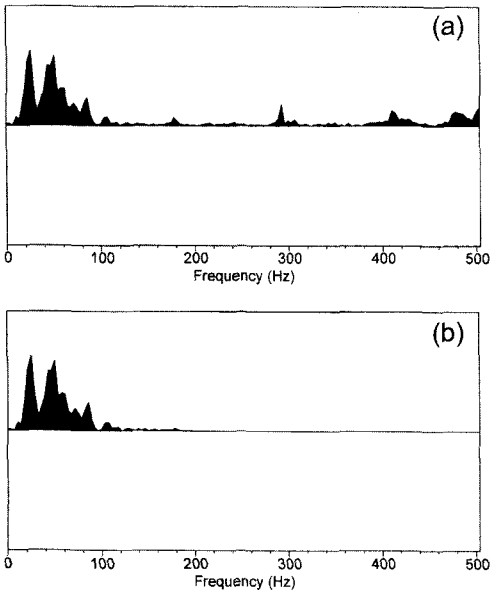

Fig. 4. Frequency filtering. High frequency noise of the raw data (a) is removed by a high-cut filter with corner frequencies of 150 and 200 Hz (b).

이들이 P 파와 S 파임을 확인하기 위하여 복소 트레이스 분석법(complex trace analysis)을 이용하여 입자 운동의 경사각(tilt angle)과 상승각(rise angle)을 구하였다. 분극 타원(polarization ellipse)에서 준장축(semimajor axis)이 수직선과 이루는 각이 경사각, τ 이며 수평선과 이루는 각이 상승각, γ 로서 다음 식과 같이 계산된다(René *et al.*, 1986).

$$\tau(t) = \frac{1}{2}\arctan\frac{S_2(t)}{S_1(t)}$$

$$\Upsilon(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \tau(t); & 0 \le \tau(t) \le \frac{\pi}{2} \\ -\frac{\pi}{2} - \tau(t); & -\frac{\pi}{2} \le \tau(t) < 0 \end{cases}$$

S_1과 S_2는 Stoke's parameter로서 다음과 같이 주어진다.

$$S_1(t) = A_v^2(t) - A_h^2(t),$$

$$S_2(t) = 2A_v(t)A_h(t)\cos[\phi(t)]$$

여기서 A_v와 A_h는 수직 및 수평 성분 자료의 순간 진폭(instantaneous amplitude)이며, ϕ는 순간 위상차(instantaneous phase difference)이다. Fig. 6은 남북 방향 자료의 경사각과 상승각이며 Fig. 7은 동서 방향 자료에 대한 경사각과 상승

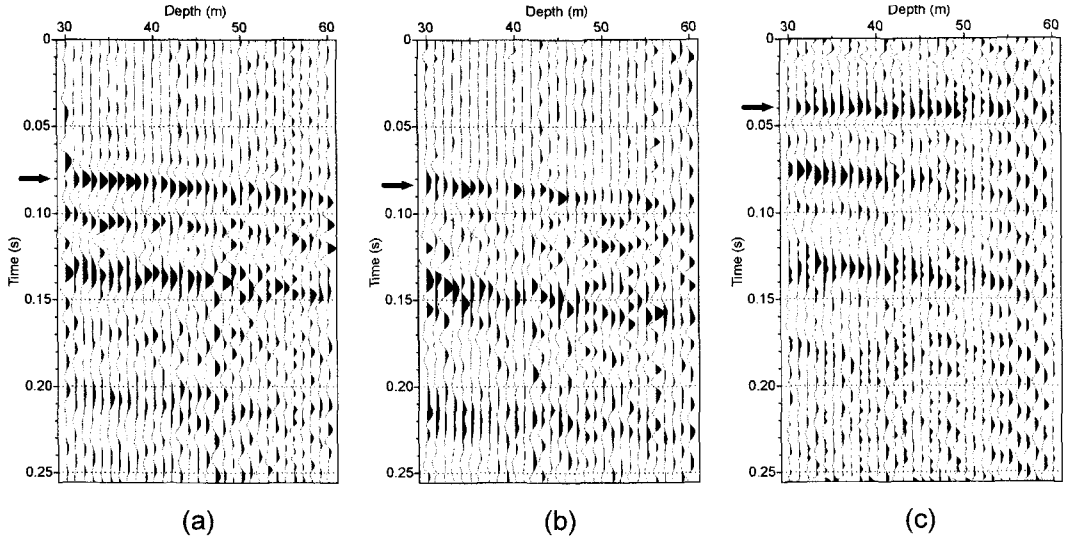

Fig. 5. Multicomponent VSP data after energy balancing. (a) and (b) correspond to horizontal components in North-South and East-West directions, respectively, and (c) vertical components. Arrows indicate first breaks of P (c) and S waves (a, b).

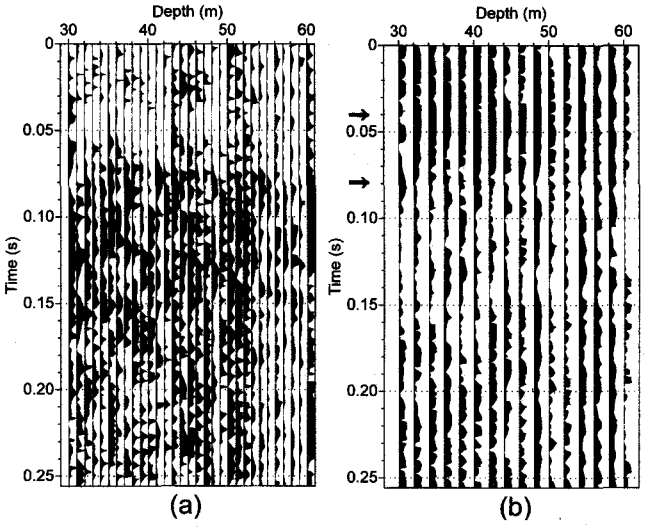

Fig. 6. Tilt (a) and rise angles (b) of the VSP data in North-South direction. Trace spacings are 90 degrees. Rise angles are plotted every other traces. Upper arrow indicates *P* wave and the lower arrow indicates *S* wave (compare with those in Fig. 5).

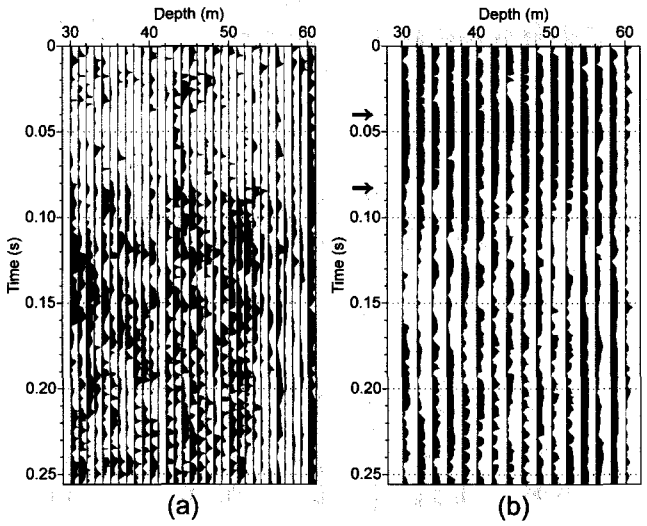

Fig. 7. Tilt (a) and rise angles (b) of the VSP data in East-West direction. Trace spacings are 90 degrees. Rise angles are plotted every other traces. Upper arrow indicates *P* wave and lower arrow *S* wave (compare with those in Fig. 5).

각이다. 상승각에서 *P* 파와 *S* 파를 더 잘 구분할 수 있으며, 각이 클수록 입자 운동이 수직에 가까우므로 *P* 파를 의미하고 각이 작을수록 *S* 파를 나타낸다. 따라서, Fig. 5의 *P* 파 및 *S* 파와 비교해보면 이들을 정확히 인지했음을 알 수 있다. 또한, 횡파의 분극을 확인하기 위해 Fig. 5a와 5b로부터 직접파의 입자 운동을 호도그램(hodogram)으로 도시하였다 (Fig. 8). 호도그램 분석에 사용된 data는 초동주시에서 12 ms이다. 호도그램에서 보면 *S* 파가 선형으로 분극이 이루어지고 있음을 볼 수 있으며 남북 또는 동서로의 방향성도 쉽게 인식할 수 있다.

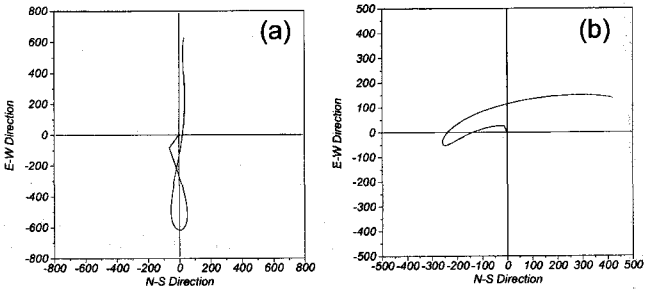

Fig. 8. Hodograms showing particle motions of horizontal components recorded at the depth of 45 m. (a) corresponds to North-South direction and (b) East-West direction.

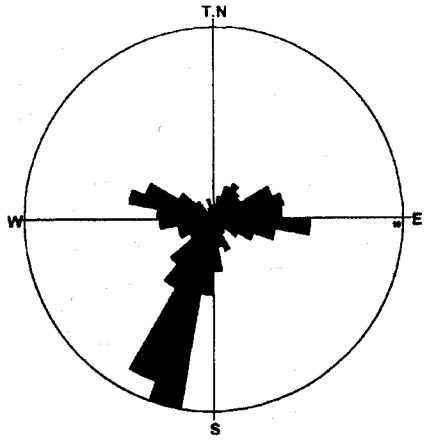

Fig. 9. A rose-diagram demononstrating dominant directions of discontinuities observed from core samples collected from the borehole (from Shin *et al.*, 1998).

매질의 탄성특성 분석

Fig. 5에서 인지된 직접파들의 move-out 속도는 *P* 파(V_P)가 3,475 m/s, 남북 방향의 *S* 파($V_{S,NS}$)가 2,060 m/s, 동서 방향의 *S* 파($V_{S,EW}$)가 1,710 m/s로 각각 관측된다. 횡파의 속도가 방향에 따라 다른 것은 매질의 이방성을 제시한다고 하겠다. 평행한 수직 균열 또는 수평 응력의 이방성에 의한 transverse isotropy를 가정할 경우 $V_{S,NS}$가 $V_{S,EW}$보다 크므로 균열의 방향 또는 매질의 최대 수평 응력 방향은 남북 방향으로 예측된다. 신희순等(1998)에 의하면 시추 코어에 나타난 파쇄대 및 절리 등 각종 불연속면(discontinuity)의 방향성이 N160°~170°W에서 우세하게 나타나므로(Fig. 9), 이 해석이 타당하다고 할 수 있다. 이 결과는 大田 지방의 광역 최대 수평 응력(regional H_{max}) 방향이 대략 동서 방향이라는 이전의 조사 연구(Synn *et al.*, 1994; 이 두성, 1998)와는 배치되는 것이다. 따라서, 이 연구에 나타난 균열의 방향은 시추공 주변의 국지적인 응력 상태를 나타내는 것이며, 광역적 응력 구조와 차이를 나타내는 예라 하겠다. 이러한 예는 외국의 조사에서도 볼 수 있다 (Lee, 1994).

상향파와 하향파를 분리하고 잡음 등에 의한 주시(travel-time) 측정의 오류를 배제하기 위해 *f-k*(frequency-wavenumber) 영역에서 필터를 적용하였다. 이로부터 *P* 파와 *S* 파의 주시를

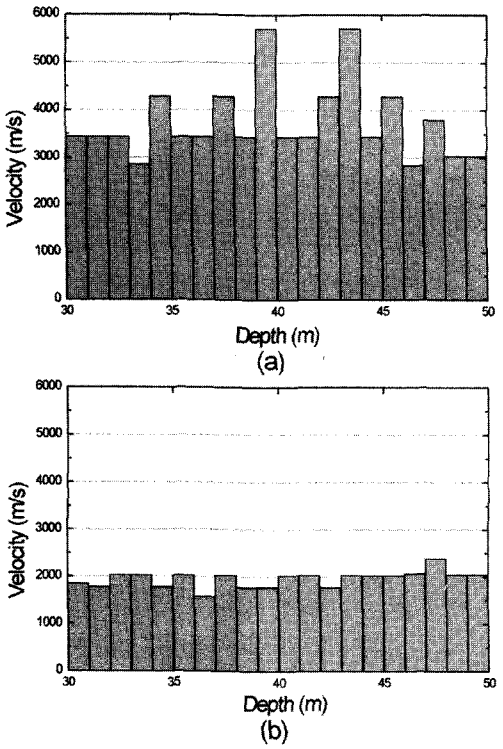

Fig. 10. Interval velocities of (a) *P* wave and (b) *S* wave, derived from travel-time differences for each depth steps.

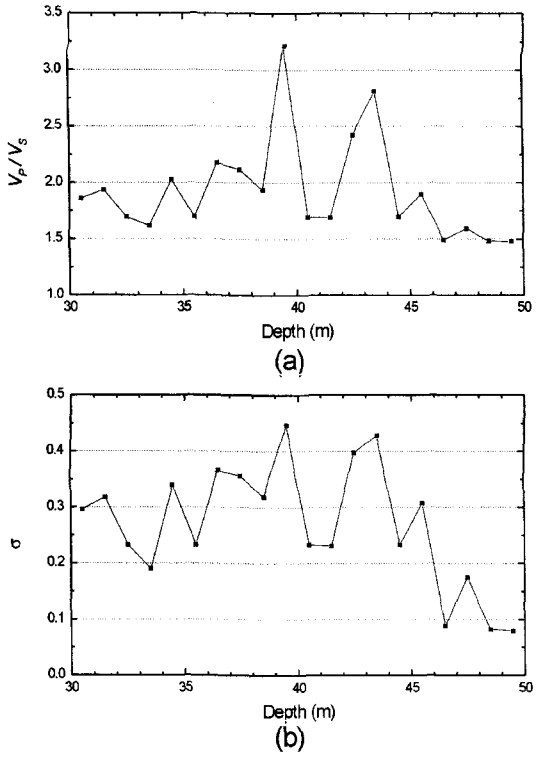

Fig. 11. (a) Velocity ratio of *P* wave to *S* wave and (b) Poisson's ratio derived from *P*- and *S*-wave velocities.

측정하여 깊이별 구간 속도(interval velocity)를 계산하였으며 (Fig. 10), 이 때 수직전파(vertical propagation)를 가정하였다. P 파 및 남북 방향 S 파의 평균 구간 속도는 약 3,754 m/s와 1,956 m/s로 각각 구해진다. Fig. 11에 이 구간 속도들로부터 구한 $V_{P/VS,NS}$ 비와 포아송 비(Poisson's ratio)를 각각 도시하였다. 그러나, *f-k* 필터는 평활화(smoothing) 효과를 가져오므로 이 값들의 해상도는 상대적으로 낮아지게 되었다. 남북 방향으로의 포아송 비, σ_{NS}는 다음의 일반적인 식으로부터 도출하였다.

$$\sigma_{NS} = \frac{V_P^2 - V_{S,NS}^2}{2(V_P^2 - V_{S,NS}^2)}$$

$V_P/V_{S,NS}$ 비와 포아송 비의 평균은 각각 1.926과 0.267이다.

결 론

특수장비를 사용하지 않고 트렌치법에 의한 primary *S* 파 발생 가능성을 검토하기 위하여 한국자원연구소 내에 있는 시험 시추공에서 다성분 수직 탄성파 탐사를 실시하였다. 필터링, 에너지 balancing, 수평 및 수직 성분 자료의 가·감산 등 전처리 과정을 거쳐 *P* 파와 *S* 파를 분리하였고, 복소 트레이스 분석법을 이용하여 입자 운동의 경사각과 상승각을 산출함으로써 이들의 직접파 이벤트를 인지하였다. 또한, 호도그램을 통하여 입자 운동의 분극과 방향성이 양호함을 확인하였다.

본 연구에서 *S* 파 분극방향이 광역 응력 구조와 상이함을 알 수 있었으며 이는 국지적인 변형 작용에 의한 국부적인 최대 응력방향이 *NS* 방향이라고 해석이 되며 이 결과는 시추코어에서 관찰된 절리의 방향과 일치한다. *F-k* 필터를 적용하여 상향파를 제거한 후 *P* 파와 *S* 파의 구간 속도를 측정하였으며 이들의 평균속도는 각각 3,754 m/s와 1,956 m/s 이다. 이를 이용하여 깊이에 따른 속도비(V_P/V_S) 및 포아송 비를 계산하였으며, 대략 1.926과 0.267의 평균값을 얻었다. 이 연구에서 획득한 다성분 수직 탄성파 탐사자료의 수평 성분을 이용하여 매질의 이방성을, 종파와 횡파의 속도를 이용하여 포아송 비를 산출할 수 있었다. 차후에 밀도 검층 자료를 획득하면 이 연구에서 구한 값들을 이용하여 매질의 깊이에 따른 탄성 계수 값을 계산할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 한국 과학 기술 평가원(KISTEP)의 국가 지정 연구실(NRL)과제, "탄성파 영상화 기술 연구개발 및 응용"의 일부 지원에 의하여 수행하였다. 이 기관에 감사한다.

참고문헌

1. 신희순 外 8人, 1998, 지하 에너지 저장 처리 구축 및 유지 기술 연구: 과학 기술부 '98 기관 고유 연차 보고서.
2. 이두성, 1998, 역수직 탄성파법을 이용한 화성암 이방성 연구: 한국자원공학회지, **35**, 177-183.

3. 狐崎長琅, Okuzumi K., 1992, 鉛直加震によるSH波の發生(2)－現象の様相と發生源: 物理探査, **45**, 273-285.
4. Lee, D. S., 1994, Fracture characterization of the Monterey Formation using VSP: J. Seis. Expl., **3**, 335-350.
5. Lynn, H. B., Simon, K. M., Bates, C. R., Layman, M., Schneider, R. and Jones, M., 1995, Use of anisotropy in P-wave and S-wave data for fracture characterization in a naturally fractured gas reservoir: The Leading Edge, **14**, 887-893.
6. Puzyrev, N. N., 1962, Experimental investigations of shear waves and converted shear waves: Inst. Geol. and Geophys., USSR Acad. Sci., Novosibirsk.
7. René, R. M., Fitter, J. L., Forsyth, P. M., Kim, K. Y., Murray, D. J., Walters, J. K. and Westerman, J. D., 1986, Multicomponent seismic studies using complex trace analysis: Geophysics, **51**, 1235-1251.
8. 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.
9. Tatham, R. H. and McCormack, M. D., 1991, Multicomponent seismology in petroleum exploration: Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK.