

다성분 복소 트레이스 분석법을 이용한 지진파 입자운동 연구

이소영* · 김기영* · 김한준**

*강원대학교 지구물리학과 · **한국해양연구소 해양지질연구단

요 약

다성분 복소 트레이스 분석법을 이용하여 지진에 의한 지면운동을 밝히고자 컴퓨터 합성 탄성파 자료와 자연 지진 자료를 대상으로 파선방향의 입자운동을 분석하였다. 합성 탄성파 자료에 적용시킨 결과, 실제파 합성 부분에서는 도달시간, 지속시간, 접근각 등을 정확히 찾을 수 있으며, 레일리파도 쉽게 인지된다. 규모 7.3의 심발 지진 자료로부터 입자운동의 분극특성을 계산한 결과, 종파의 수직성분과 수평성분의 순간위상차, 순간역타원율, 접근각은 각각 약 $\pm 180^\circ$, $0 \sim 0.25$, $-30^\circ \sim -45^\circ$ 의 값을 가지며, 이러한 분극특성으로부터 진원시간함수는 6~7 s 정도 지속되는 것으로 분석된다. 횡파의 경우는 순간위상차가 일정하지 않으며, 0~0.3의 순간역타원율과 거의 수직의 접근각을 나타낸다. 횡파 도달 직전에 기록된 비교적 저주파의 신호는 분극특성으로부터 횡파와는 구별되는 종파의 일종으로 해석된다. 종파와 횡파의 도달시간을 이용하여 구한 속도와 파선변수는 각각 8.633 km/s, 4.762 km/s와 0.074 s/km, 0.197 s/km이며 동포와송비는 0.281로 계산된다.

주요어: 다성분 복소 트레이스 분석법, 지면운동, 순간위상차, 접근각, 순간역타원율

Lee, So Young, Kim, Ki Young, and Kim, Han-Joon, 2000, Seismic Studies on Ground Motion using the Multicomponent Complex Trace Analysis Method. *Journal of the Korean Geophysical Society*, v. 3, n. 1, p. 37-48.

ABSTRACT: In order to investigate in-line ground motions caused by earthquakes, we examine the multicomponent complex trace analysis method (MCTAM) for the synthetic data and apply it to real earthquake data. An experimental result for synthetic data gives correct information on the arrival times, duration of individual phases, and approaching angles for body waves. Rayleigh waves are also easily identified with the MCTAM. A deep earthquake with magnitude of 7.3 was chosen to test various polarization attributes of ground motions. For P waves, instantaneous phase difference between the vertical and the in-line horizontal components $\phi(t)$, instantaneous reciprocal ellipticity $\rho(t)$, and approaching angle $\tau(t)$ are computed to be $\pm 180^\circ$, $0 \sim 0.25$, and $-30^\circ \sim -45^\circ$, respectively. For S waves, $\phi(t)$ tends to vary while $\rho(t)$ have values of $0 \sim 0.3$ and $\tau(t)$ remains near vertical, respectively. A relatively low frequency signal registered just prior to the S wave event is interpreted as a P-wave phase based on its polarization characteristics. Velocities of P and S waves are computed to be 8.633 km/s and 4.762 km/s, and their raypath parameters 0.074 s/km and 0.197 s/km. Dynamic Poisson's ratio is obtained as 0.281 from the velocities of P and S waves.

Key words: multicomponent complex trace analysis method, ground motion, instantaneous phase difference, approaching angle, instantaneous reciprocal ellipticity

(Lee, So Young and Kim, Ki Young, Kangwon National University, 192 Hyoja-2-dong, Chunchon 200-701, Korea; Kim, Han-Joon, Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea. email: white@mirae.kangwon.ac.kr)

1. 서 론

복소 트레이스 분석방법은 복소 신호분석 통신이론(complex signal analysis communication theory)이라는 일반적인 명칭으로 통신분야에서 먼저 연구되었다. 복소 분석신호(complex analytic signal)라는 용어는 Gabor (1946)가 라디오나 TV 송신에 필요한 최소 주파수 대역을 예측하기 위한 연구에서 처음 정의하였고, 이후 'pre-envelope' (Whalen, 1971; Roden, 1972) 또는 'complex envelope' (Helstrom, 1968; Farnbach, 1975)라고 불리기도 했다.

이러한 복소 트레이스 분석법은 Farnbach (1975)와 Taner *et al.* (1979)에 의해 이론 및 응용 지구물리분야에서 본격적으로 사용되었다. Farnbach (1975)는 자연 지진 수치 자료에 복소 신호분석법을 적용시켜서, 여러 위상의 도착시간을 구체적으로 정의하기 위한 목적으로 진폭(envelope)과 순간위상(instantaneous phase) 트레이스를 계산하였다. Taner · Sheriff (1977)와 Taner *et al.* (1979)은 공심점 반사법으로 얻은 단성분 지진파 자료에 복소 트레이스 분석법을 적용시켰으며, 반사강도, 반사극성, 가중평균 주파수, 순간주파수 등의 탄성과 속성을 소개하였다. Bodine (1984)은 반응위상(response phase)과 반응주파수(response frequency)를 정의하였고, Goebel (1984)은 지진파 트레이스 자료의 동상성분(real part)과 이상성분(imaginary part)을 합성함으로써 수직성분과 수평성분을 만들었다.

다성분 지진파 자료는 대부분 지진을 연구하기 위한 목적으로 기록되며, 그 외에도 시추공과 지표 탄성과 탐사 등에서도 얻어진다. 복소 트레이스 분석 방법은 René *et al.* (1986)에 의해 지표 다성분 지진파 탐사자료에 처음 적용되었다. 그들은 동상성분과 힐버트변환(Hilbert transform)으로 만들어진 이상성분을 가진 다성분 복소 트레이스를 정의하고, 위상차(phase difference), 역타원율(reciprocal ellipticity), 접근각(tilt angle)이 포함된 '순간' 또는 '평균된' 분극특성을 이용하여 인공 지진파에 의한 지면운동을 연구하였다. Kim (1987)은 René *et al.* (1986)의 다성분 복소 트레이스 분석법을 이용하여 여러 가지 분극필터를 개발하였다.

이 연구는 파선방향의 지진파의 위상을 보다 정확하게 인지하기 위한 방법개발을 목적으로 실시하였다. 이를 위하여 다성분 복소 트레이스 분석법의 정확성과 문제점을 컴퓨터 합성 시험 자료를 이용하여 고찰하였으며, 3성분 시험 자료를 대상

으로 순간위상차, 순간역타원율, 접근각 등의 입자운동 속성들을 분석하였다. 시험 자료로는 비교적 신호대 잡음비가 높으면서 3성분으로 기록된 자연 지진 자료를 이용하였다. SH파는 입자운동이 파선 방향에 놓이지 않아 본 연구의 대상에서는 제외하였다.

2. 배경이론 고찰

다성분 복소 트레이스는 다음과 같이 정의된다 (René *et al.*, 1986).

$$\vec{c}(t) = \vec{r}(t) + i\vec{q}(t) \quad (1)$$

여기서 동상 트레이스인 \vec{r} 은 실제로 기록된 직각의 다성분 자료(orthogonal multicomponent data)가 포함된 벡터량이다. 이상 트레이스(quadrature trace) \vec{q} 는 동상 트레이스를 힐버트변환하여 얻은 것으로, 동상 트레이스와 위상만 90° 차이가 있을 뿐 진폭은 동일하다.

각 성분별 지진파 트레이스의 순간진폭과 순간 위상은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$A(t) = [r^2(t) + q^2(t)]^{1/2} \quad (2)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{q(t)}{r(t)} \quad (3)$$

순간위상은 벡터 모델의 회전과정에서의 벡터와 동상성분 평면(real plane)의 사이각으로 정의된다 (Taner *et al.*, 1979).

순간위상차(instantaneous phase difference) $\phi(t)$ 는 수직성분 위상 θ_v 와 수평성분 위상 θ_h 의 차이로 다음과 같이 정의된다.

$$\phi(t) = \theta_v(t) - \theta_h(t) \quad (4)$$

표면파의 수직성분과 수평성분의 순간위상 차이 $\theta_v - \theta_h$ 는 시간의 함수로서 타원형 입자운동의 방향 및 모습을 지지하는 방법으로 사용된다.

순간위상은 역탄젠트(inverse tangent)로서 계산되기 때문에 -180° 에서 +180° 의 구간에서 정의되며, 따라서 ±180° 부근에서는 -180° 와 +180° 사이의 겹보기 도약(apparent jumping)을 한다. 이러

한 위상감기(phase wrapping) 문제를 근본적으로 해결하기 위하여 이 연구에서는 Shatilo (1992)가 제시한 방식을 이용하여 위상풀기(phase unwrapping)를 실시하였다. 한편 역탄젠트 함수는 $-\pi < \phi < \pi$ 의 범위에서 구해지므로, FORTRAN에서 이 값은 두 개의 독립변수를 사용하는 내장함수 ATAN2로 얻을 수 있다.

수직성분 및 파선방향 수평성분 자료의 순간진폭과 순간위상을 각각 구한 후, 다음 관계식을 이용하여 Stoke 매개변수들(Born · Wolf, 1959)을 구하였다.

$$S_0(t) = A_v^2(t) + A_h^2(t) \quad (5)$$

$$S_1(t) = A_v^2(t) - A_h^2(t) \quad (6)$$

$$S_2(t) = 2 A_v(t) A_h(t) \cos[\phi(t)] \quad (7)$$

여기서 S_0 , S_1 , S_2 는 Stoke 매개변수이고, $A_v(t)$ 와 $A_h(t)$ 는 앞에서 기술한 바와 같이 입자의 수직과 수평성분의 순간진폭이다.

입자운동의 분극특성을 밝히기 위하여 입자운동의 준장축(semimajor axis)이 수직축과 이루는 각

도 $\tau(t)$, 즉 접근각(approaching angle) 혹은 입사각을 Stoke 매개변수들의 함수로 계산하였다.

$$\tau(t) = \tan^{-1} \left[\frac{S_2}{S_1} \right] / 2 \quad (8)$$

이 접근각과 제1층의 속도 V_1 을 이용하여 다음과 같이 파선변수(ray parameter) p 를 구할 수 있다.

$$p = \frac{\sin \tau}{V_1} \quad (9)$$

입자운동을 이해하는 데 사용된 또 하나의 분극 특성은 순간역타원율(instantaneous reciprocal ellipticity)로서, 다음과 같이 순간준장축 길이 $a(t)$ 에 대한 순간준단축 길이 $b(t)$ 의 비로서 나타낼 수 있다(René *et al.*, 1986). 이 순간역타원율은 선형 운동인 경우에는 0의 값을, 원운동인 경우에는 1의 값을 갖는다.

$$\rho(t) = b(t)/a(t) \quad (10)$$

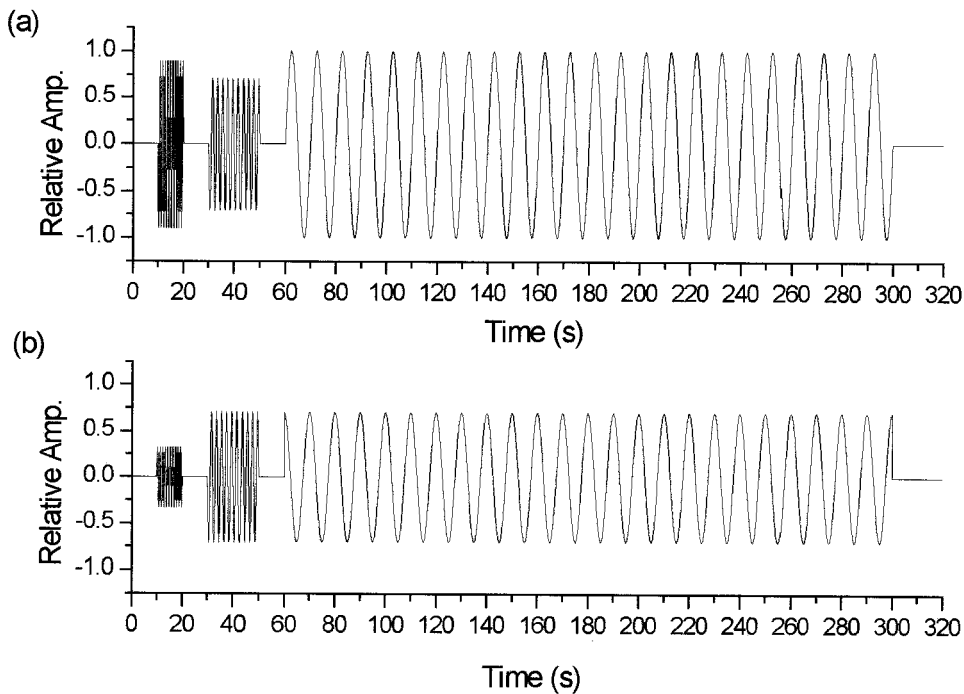


Fig. 1. Multicomponent synthetic seismic data (a) vertical and (b) horizontal components, respectively.

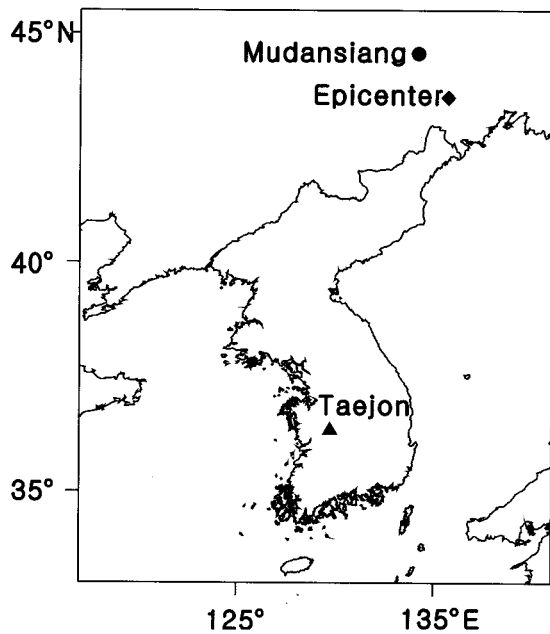


Fig. 2. Location map showing the epicenter of the earthquake and the recording station in Taejon.

한편 순간준장축 길이 $a(t)$ 와 순간준단축의 길이 $b(t)$ 는 다음과 같이 Stoke 매개변수들의 함수로 표시된다.

$$a(t) = \sqrt{\frac{S_0(t) + [S_1^2(t) + S_2^2(t)]^{1/2}}{2}} \quad (11)$$

$$b(t) = \sqrt{\frac{S_0(t) - [S_1^2(t) + S_2^2(t)]^{1/2}}{2}} \quad (12)$$

3. 시험 자료

3.1. 합성 지진 자료

자료처리과정에서 사용된 컴퓨터 프로그램의 결과 검증 및 지진파의 입자운동에 대한 보다 명확한 이해를 위하여 종파, 횡파, 레일리파 입자운동을 가정한 합성과 자료(synthetic seismic data)를 조화파를 이용하여 작성하였다(Fig. 1). 종파는 주기 $T=1$ s, 접근각 $\tau=20^\circ$, 지속시간 $L=10$ s, 횡파는 $T=2$ s, $\tau=45^\circ$, $L=20$ s, 레일리파는 $T=10$ s, τ

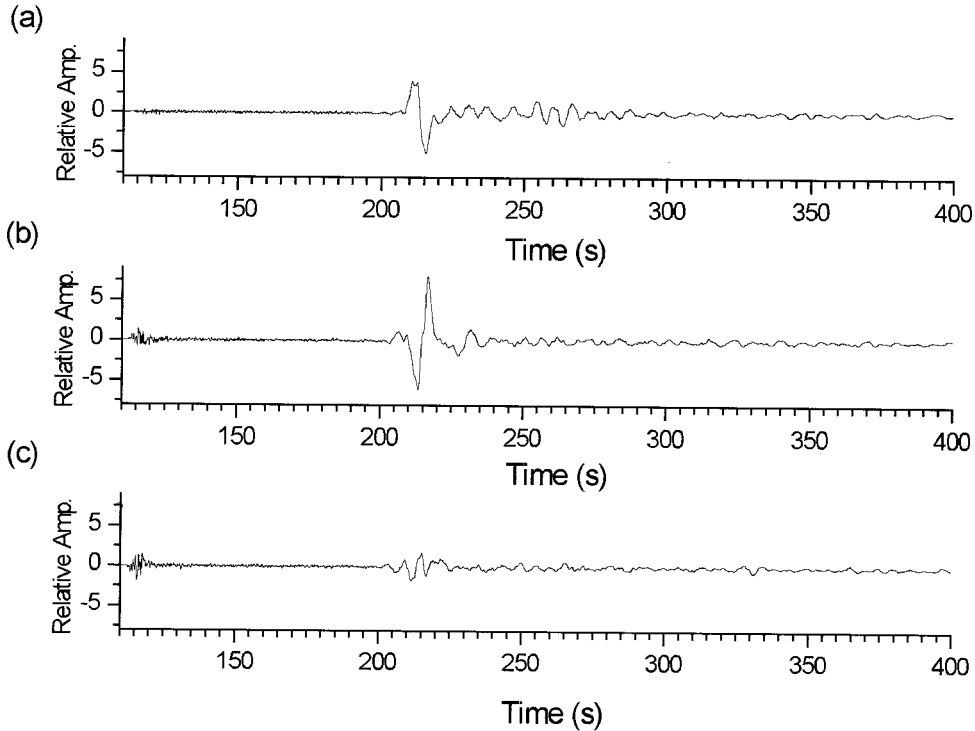


Fig. 3. Ground motions in three components: (a) vertical, (b) east-west, (c) north-south motions, respectively.

=70°, L=240 s를 가정하였다. 종파 및 횡파의 경우, 수직과 수평 성분의 위상차 ϕ 를 각각 180°와 0°로, 레일리파는 위상차를 -90°로 가정하고 합성하였다. 종파의 수직 및 수평성분 진폭은 약 0.93과 0.34, 횡파의 경우는 수직 및 수평성분이 모두 약 0.7이다. 레일리파의 경우 수직성분에 대한 수평성분의 진폭을 0.7로 정하였다.

3.2. 자연 지진 자료

본 연구에 사용된 자연 지진 자료는 1999년 4월

8일, 중국 모단강시(牡丹江市) 남동쪽 약 150 km 지역(북위 43°36.42', 동경 130°21')에서 발생한 규모 7.3의 지진을 기상청 대전 관측소에서 기록한 것이다(Fig. 2). 미국립지질조사소(USGS)에 의하면 이 지진은 진원깊이가 565 km인 심발지진에 속한다. 기록된 자료 중, 이 연구에 사용한 자료가 기록된 기상청 대전 관측소는 진앙거리 842 km로써 북위 36°22.36', 동경 127°22.25'에 위치한다.

자료기록에 사용된 STS-2 지진센서는 서로 직각인 3축이 수직으로부터 54° 기울어져 있어서 각 성

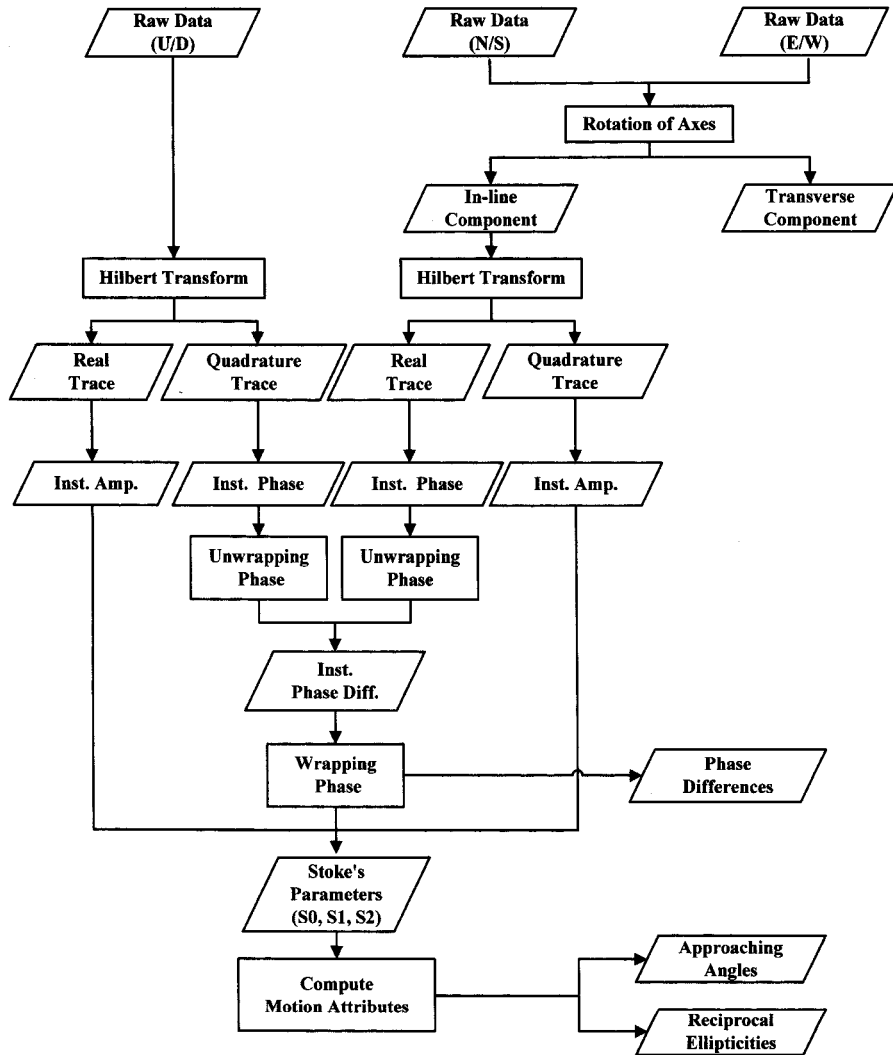


Fig. 4. Flowchart illustrating the processing sequence for the multicomponent complex trace analysis method.

분별 진폭 및 위상반응이 동일하다. 이 지진계는 내부적 처리과정을 거쳐서 수직성분과 동서 및 남북의 두 수평성분으로 출력한다. 이 지진계는 140 dB 이상이 되는 동적 기록범위(dynamic range)를 가지고 있으며, 주파수 범위는 수 mHz에서부터 50 Hz 이상으로 고주파에 잘 반응한다. 광대역에 해당하는 이 지진계는 원거리 지진뿐만 아니라 지역 또는 국지 지진의 관측에도 유용하게 사용이 된다.

실제 얻은 원시 자료는 남북방향운동, 동서방향운동, 상하운동을 하는 3성분 지진 자료로서 이미 회전시킨 자료이다(Fig. 3). 원시 자료의 기록시작 시각(starting time)은 상하, 남북, 동서 성분이 각각 13시 10분 49.47초, 13시 10분 33.60초, 13시 10분 55.09초이고, 지속시간(time duration)은 각각 611 s, 651 s, 625 s이다. 3조의 지진 자료 샘플률은 모두 100 Hz이다.

4. 자료처리

자료처리는 주로 PC와 워크스테이션에 장착된 SU (Seismic Unix) 소프트웨어를 사용하였다. 주요

처리과정은 회전보정, 힐버트변환, 순간위상차, 순간역타원을 및 접근각 계산 등의 순서로 이루어졌으며 합성 지진 자료는 회전보정 과정을 생략하고 수행하였다. 실제 지진파 자료에 적용시킨 순서는 Fig. 4와 같다.

4.1. 회전보정

상하, 남북, 동서의 세 방향으로 회전된 자료 중 두 수평성분을 파선의 주향방향(in-line) 및 이에 수직인 방향(transverse)으로 다시 회전시켰다. 두 수평성분 트레이스로부터 가장 먼저 들어온 신호를 선택한 후, 식 (13)을 이용하여 자료를 1° 간격으로 차례로 회전시키면서 신호의 진폭이 최대가 되는 회전각을 구하였다(김기영 · 김현규, 1997).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 x, y 는 좌표축 변환 전의 진폭이고 x', y' 는 변환 후의 진폭이다. 또한 θ 는 회전각을 뜻한다. 자연 지진 자료에서의 회전각은 354°로 계

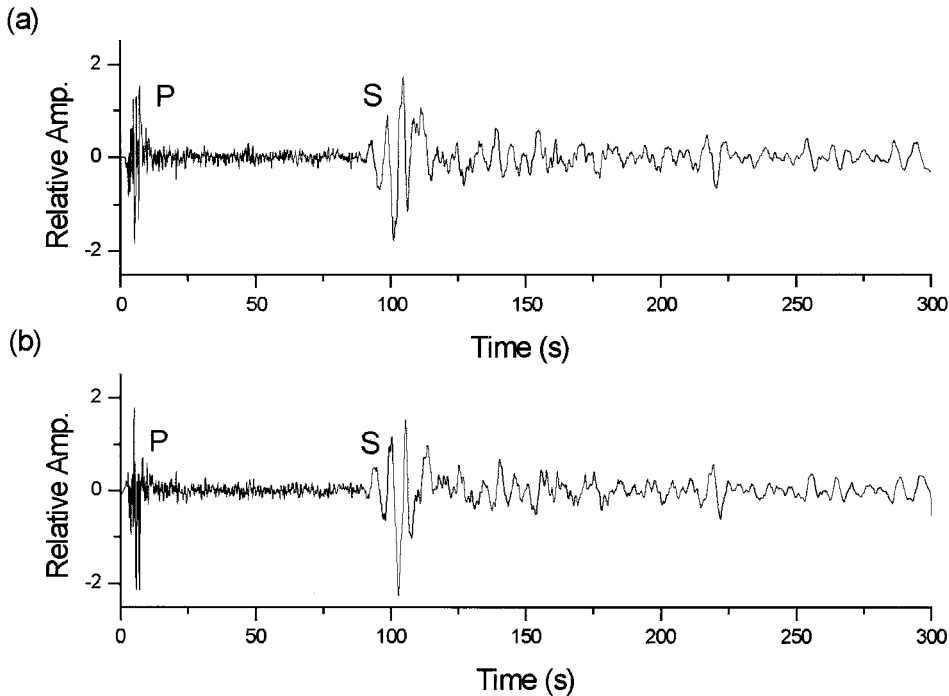


Fig. 5. (a) Real and (b) quadrature traces of the vertical component of the Mudansiang earthquake data.

산되며, 구해진 이 회전각을 다시 식 (13)에 대입하여 보정된 트레이스를 얻었다.

4.2. 힐버트변환

회전보정된 트레이스를 우선 푸리에변환하여 시간영역을 주파수영역으로 바꾼 후, 양수부의 값에는 두 배를 취하고 음수부의 값에는 0을 대입하였다(René *et al.*, 1986). 이 계산된 값을 역푸리에변환하여 허수부를 취하면 이상 트레이스를 얻을 수 있으며, 이 트레이스는 힐버트변환하기 전의 트레이스인 동상 트레이스와 진폭의 포락선은 같고 위상만 90° 차이가 난다. Fig. 5는 수직성분 자료를 힐버트변환하여 구한 동상(Fig. 5a)과 이상 트레이스(Fig. 5b)를 보여준다.

4.3. 순간위상차

기록된 자료로부터 P파 및 S파, 레일리파의 위상을 구하기 위해 René *et al.* (1986)이 사용한 다성분 복소 트레이스 분석법을 적용하였다. 수직 및 주향 방향 수평성분 자료의 순간진폭과 순간위상을 구한

후, 두 성분의 순간위상으로부터 순간위상차를 FORTRAN 내장함수인 ATAN2를 이용하여 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 범위에서 구하였다(René *et al.*, 1986). 따라서 이 내장함수를 이용하여 구한 순간위상은 -180° 와 $+180^\circ$ 사이의 값만을 갖게 되므로 길보기 도약을 하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 앞에서도 언급했듯이 위상풀기를 수행하였으며, Fig. 6은 Fig. 5의 수직성분 자료를 대상으로 위상풀기 프로그램을 수행하기 전과 후의 모습을 보여준다. 위상풀기를 실행시킨 후, 두 순간위상의 차를 계산하였다(Fig. 7a). 순간위상차를 구한 후, 정밀 분석을 위하여 -180° 에서 $+180^\circ$ 값을 갖도록 다시 위상감기를 실행시켰다(Fig. 7b).

4.4. 순간역타원을 및 접근각 계산

위의 과정에서 구한 순간위상차와 순간진폭을 이용하여 이로부터 Stoke 매개변수들을 구하였다. 또한 구해진 Stoke 매개변수들의 함수를 이용하여 입자운동의 준장축에 대한 준단축의 길이의 비율인 순간역타원을과 준장축이 수직축과 이루는 각

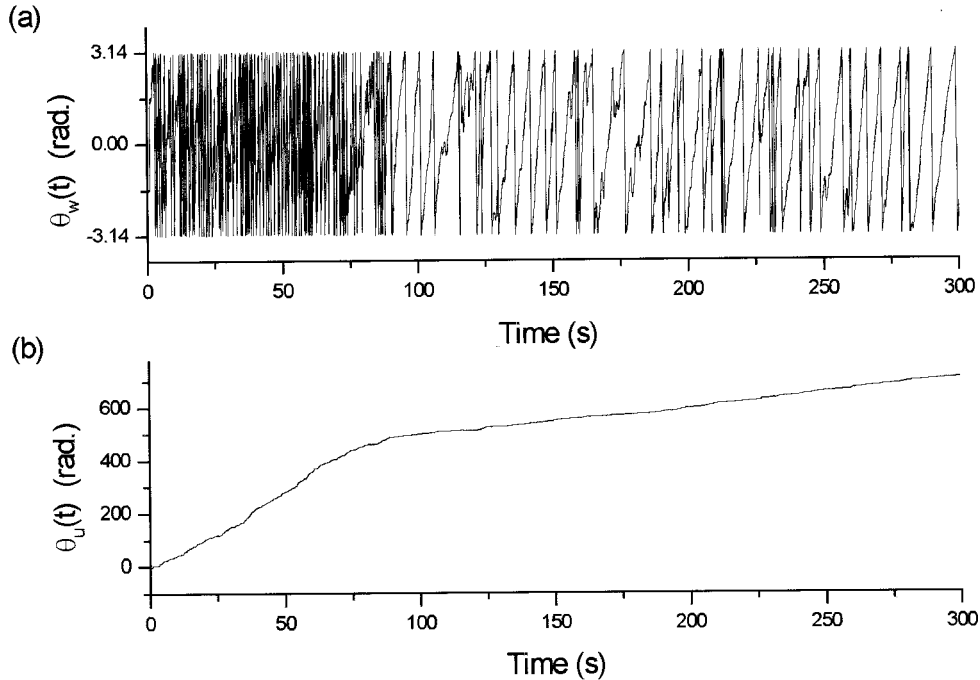


Fig. 6. Instantaneous phase for the vertical component of the earthquake data; (a) wrapped $\theta_w(t)$ and (b) unwrapped $\theta_u(t)$.

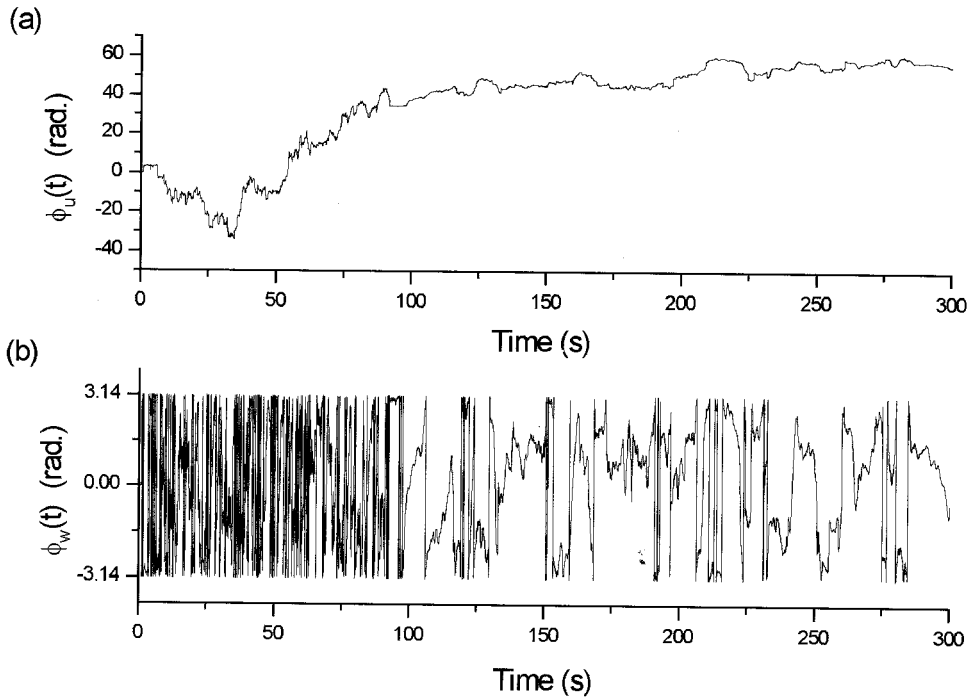


Fig. 7. Instantaneous phase difference between the vertical and in-line horizontal components of the earthquake data: (a) unwrapped $\phi_u(t)$ and (b) wrapped $\phi_w(t)$.

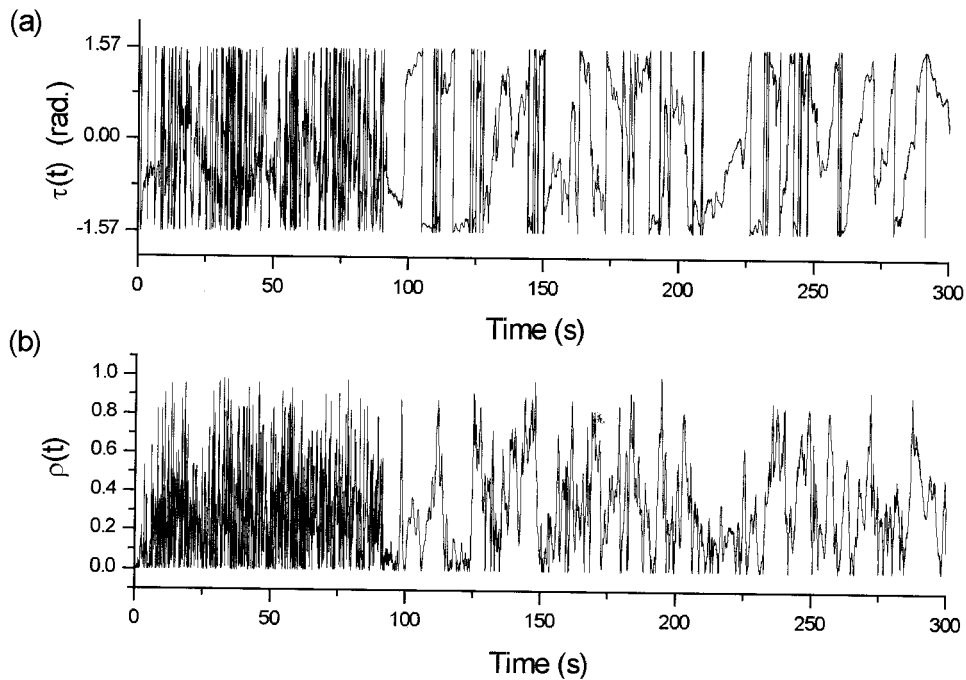


Fig. 8. Ground motion attributes: (a) approaching angle $\tau(t)$ and (b) reciprocal ellipticity $\rho(t)$ for the earthquake data.

도, 즉 접근각을 Stoke 매개변수들의 함수로 구하였다. Fig. 8a와 8b는 각각 계산된 접근각과 순간 역타원율을 도시한 것이다.

5. 자료분석

5.1. 합성 지진 자료

합성 지진 자료와 실제 발생한 중국 지진 자료에 다성분 복소 트레이스 분석법을 적용시켜 순간 위상차, 접근각, 순간역타원율 등의 분극특성을 분

석하고 이 분극특성으로 종파와 횡파, 레일리파의 위상을 인지하였다.

Fig. 9은 합성 지진 자료와 분극특성을 나타내는 속성들을 함께 보여준다. 종파 입자운동을 하는 10 s에서 20 s 신호의 순간위상차는 $\pm 180^\circ$ 값을, 순간역타원율은 0에 근접한 값을 보이며, 접근각은 -20° 로 지진파 자료 합성 시 입력한 값과 정확히 일치한다. 횡파 구간인 30 s에서 50 s 신호의 순간위상차와 순간역타원율은 0에 근접한 값을 보이며, 접근각 또한 45° 로 합성 시 입력한 값

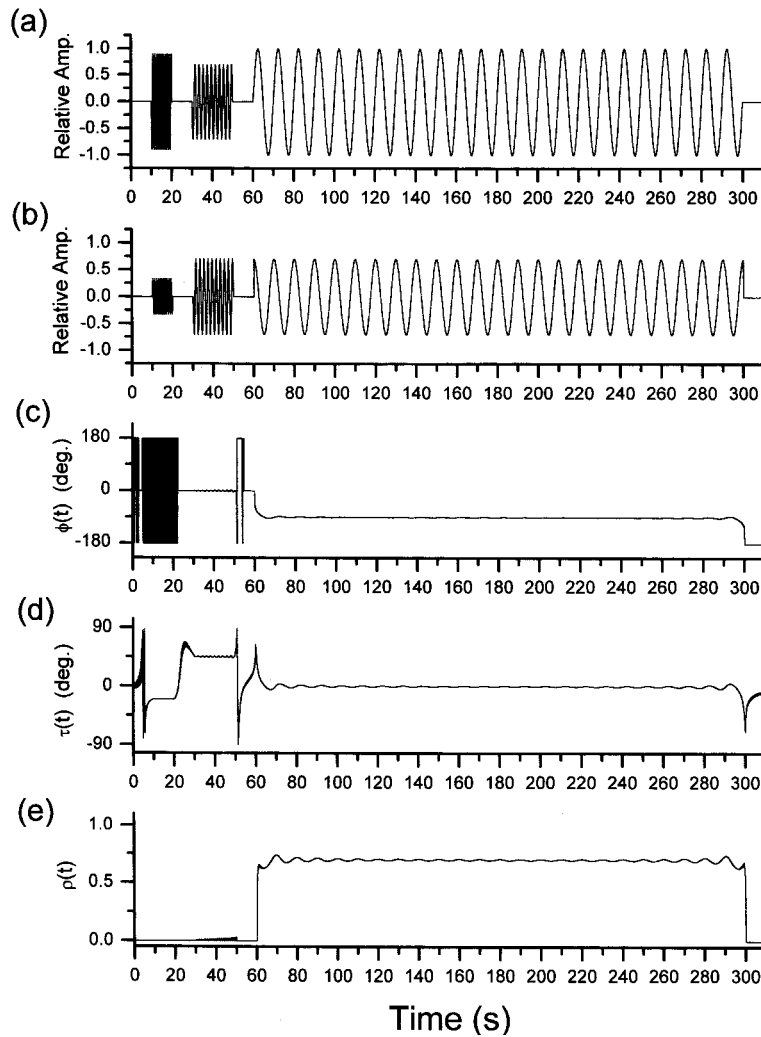


Fig. 9. Synthetic data and their ground motion attributes; (a) vertical component, (b) in-line horizontal component, (c) instantaneous phase difference $\phi(t)$, (d) approaching angle $\tau(t)$, and (e) instantaneous reciprocal ellipticity $\rho(t)$, respectively.

과 잘 일치한다. 레일리파를 가산한 60 s에서 300 s 사이 합성신호의 순간위상차도 -90° 로 합성 시 입력한 값과 잘 일치하며, 순간역타원율은 약 0.7 정도로 계산된다. 접근각의 경우는 선형운동의 계산식을 사용하였기 때문에 입력값과 전혀 무관한 값으로 계산되나, 지표를 따라 타원운동을 하는 레일리파의 경우 접근각이 90° 에 가까우므로 정확한 값을 얻기 위한 더 이상의 노력은 없었다. 종파, 횡파, 레일리파의 순간위상차나 접근각, 순간

역타원율을 모두 양 끝에 집스현상이 나타난다.

5.2. 자연 지진 자료

자연 지진 자료를 분극특성을 나타내는 속성들과 함께 종파와 횡파 도달시간대별로 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 나타내었다. 약 117 s에서 124 s 사이에는 일관된 신호가 들어오는데 이때의 순간위상차는 약 $\pm 180^\circ$ 에 근접한 값을 보인다. 접근각의 경우 -30° 에서 -40° 사이의 값을 가지며, 순간역타원율은 극

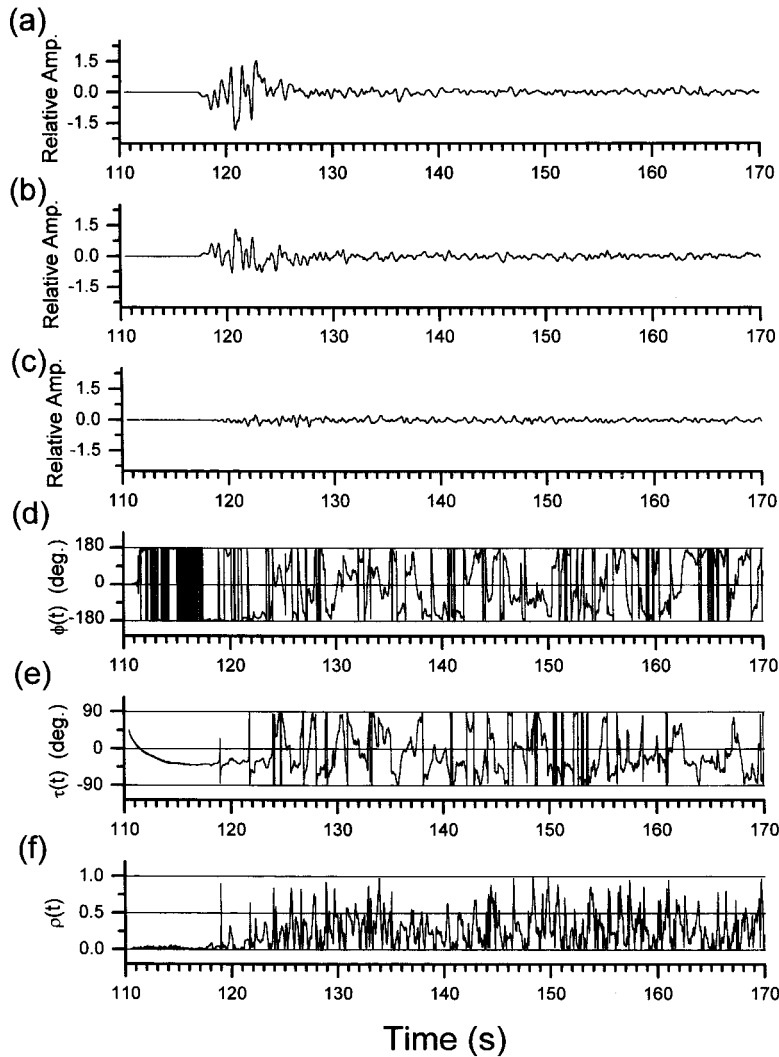


Fig. 10. The earthquake data and their ground motion attributes for the time window of 110-170 s: (a) vertical component, (b) in-line horizontal component, (c) transverse horizontal component, (d) instantaneous phase difference $\phi(t)$, (e) approaching angle $\tau(t)$, and (f) instantaneous reciprocal ellipticity $\rho(t)$, respectively.

대값이 몇 개 발견되기도 하지만 대략 0과 0.25 사이의 작은 값을 나타낸다. 이러한 분극특성을 볼 때 7 s 정도의 진원시간함수(source time function)를 갖는 종파가 지속되는 것으로 분석된다. 약 207 s 부근부터 213 s까지 약 6 s간의 신호는 기록된 지진 자료만으로 뒤따라오는 횡파와의 위상구분이 어려우나, -180° 에서 $+180^\circ$ 사이를 왕복하는 순간위상차와 -45° 의 접근각, 0.1 이하의 역타원율 등의 분극특성은 6 s 정도의 진원시간함수를 갖는 다른 종류의 종파가 기록되었음을 강력히 시사한다. 213 s에

서 접근각이 갑자기 증가하는데 이러한 수평방향에 가까운 입자운동으로 보아 종파와는 성격이 다른 파가 기록되었음을 알 수 있다. 213 s에서 238 s까지 지속되는 이 신호는 순간위상차가 종파와 달리 일정하지 않고, 접근각이 거의 수직이며, 순간역타원율은 214 s와 227 s 부근을 제외하고는 0.3보다 작은 값을 나타내어 25 s의 진원시간함수를 갖는 횡파가 주로 기록된 것으로 해석된다(Fig. 11). 이 지진 자료는 심발지진 기록 자료이므로 표면파의 일종인 레일리파는 거의 발생되지 않아 본 연구에

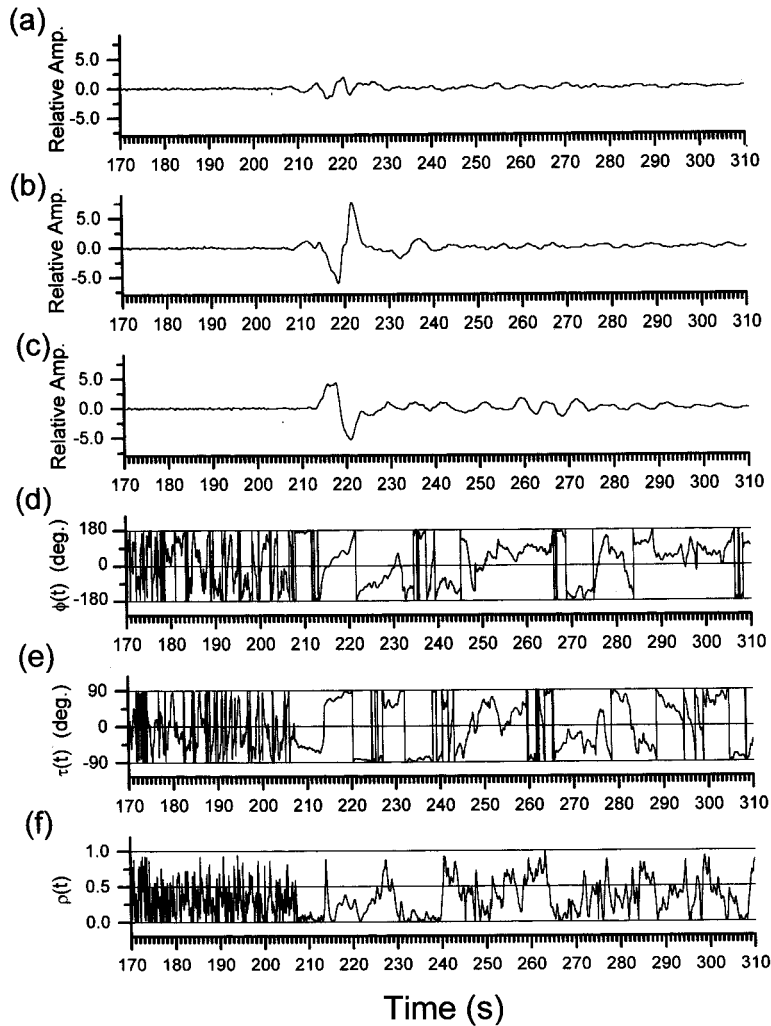


Fig. 11. The earthquake data and their ground motion attributes for the time window of 170-310 s: (a) vertical component, (b) in-line horizontal component, (c) transverse horizontal component, (d) instantaneous phase difference $\phi(t)$, (e) approaching angle $\tau(t)$, and (f) instantaneous reciprocal ellipticity $\rho(t)$, respectively.

서 사용한 기록에서는 인지되지 않는다.

종파 및 횡파의 도달시각을 이용하여 구한 속도는 각각 8.633 km/s와 4.762 km/s이며, V_p/V_s 는 1.183이다. 이를 이용하여 구한 동포와송비(dynamic Poisson's ratio)는 0.281이며, 지구곡률을 무시하고 구한 파선변수 p 는 종파와 횡파 각각 0.074 s/km, 0.197 s/km로 계산된다.

6. 결론 및 토의

다성분 복소 트레이스 분석법을 합성 지진 자료와 자연 지진 자료에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 합성 지진 자료를 대상으로 분석한 결과, 종파 및 횡파의 구별, 도달시간, 접근각 등을 정확히 분석할 수 있다. 한편 타원형 입자운동의 경우에는 접근각 계산이 불가능하며, 각 지진파 위상의 시작과 끝 부분에는 깃스 현상이 나타났으며 이는 경사함수를 사용하면 줄일 수 있을 것으로 생각된다.
2. 중국 모단강시에서 발생한 자연 지진파를 대전에서 기록한 자료를 대상으로 분석한 결과, 종파의 경우는 순간위상차가 -180° 에서 $+180^\circ$ 사이를 왕복하며 45° 보다 작은 접근각과 대체적으로 작은 순간역타원율을 갖는다. SV형 지진파의 경우에는 접근각이 거의 수직의 값을 나타내며 순간위상차가 일정하지 않고 순간역타원율은 종파와 마찬가지로 작은 값을 갖는 것으로 분석된다. 종파와 횡파의 도달시각을 이용하여 구한 속도와 지구곡률을 무시하고 구한 파선변수 p 는 각각 8.633 km/s, 4.762 km/s와 0.074 s/km, 0.197 s/km이며 동포와송비는 0.281로 계산된다.
3. SV형 횡파운동을 본 연구에서는 제외된 SH파의 입자운동과 연관시켜 분석하면, 횡파 이방성 등에 관한 연구에 도움이 될 수 있을 것이라 기대된다.

사 사

이 연구는 한국해양연구소의 기관고유사업으로 수행된 동해분지의 해양환경변화와 지구조 진화연구의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 강원대학교 자원개발연구소의 부분적 지원에 감사드립니다. 아울러 귀중한 지진 자료의 사용을 허락하여 주신

기상청 류용규 연구사님과 여러 가지 참고자료를 제공하여 주신 한국자원연구소의 지현철 박사님께 감사의 뜻을 전합니다. 또한 위상구분 및 해석부분에 좋은 의견을 주신 서울대학교 이기화 교수님, 한양대학교 김소구 교수님, 경상대학교 김우한 교수님, 한국자원연구소의 전명순 박사님과 논문 내용을 읽고 수정하여 주신 김지수 교수님께도 고마운 마음으로 감사드립니다.

참고문헌

- 김기영, 김현규, 1997, 풍암분지 퇴적층의 지진파 속도 및 탄성계수 산출, 지질학회지, 33, 111-116.
- Bodine, J.H., 1984, Waveform analysis with seismic attributes, Annual Meeting Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, Atlanta.
- Born, M. and Wolf, E., 1959, Principles of optics, Pergamon Press.
- Farnbach, J.S., 1975, The complex envelope in seismic signal analysis, Bulletin of the Seismological Society America, 65, 951-962.
- Gabor, D., 1946, Theory of communication, J. Inst. Electr. Electron. Eng., 46, 429-457.
- Goebel, V., 1984, Polarization and ground roll suppression, Annual Meeting Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, Atlanta.
- Helstrom, C.W., 1968, Statistical theory of signal detection, 2nd ed., Pergamon Press.
- Kim, K.Y., 1987, Polarization studies of multicomponent seismic data. Ph. D. Thesis, University of Oklahoma.
- René, R.M., Fitter, J.L., Forsyth, P.M., 1986, Multicomponent seismic studies using complex trace analysis, Geophysics, 51, 1235-1251.
- Roden, M.S., 1972, Introduction to communication theory, Pergamon Press.
- Shatilo, A.P., 1992, Seismic phase unwrapping: Methods, results, problems, Geophysical Prospecting, 40, 211-225.
- Taner, M.T., Koehler, F., Sheriff, R.E., 1979, Complex seismic trace analysis, Geophysics, 44, 1041-1063.
- Taner, M.T. and Sheriff, R.E., 1977, Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination: in Payton, C. E., Ed., Applications to hydrocarbon exploration. Am. Assn. Petr. Geol., Memoir 26, 301-327.
- Whalen, A.D., 1971, Detection of signals in noise, Academic Press.

1999년 10월 25일 원고접수
2000년 3월 21일 원고채택