2006 대한지구물리학회 · 한국물리탐사학회 공동학술대회
2006 년 6 월 8 일(목) ~ 9 일(금), 대전대학교 혜화문화관

다성분 복소트레이스를 이용한 분극필터

김기영[1], 이소영[1]

[1]강원대학교 지구물리학과, kykim@kangwon.ac.kr

Polarization Filters Using the Multicomponent Complex Trace Analysis

Ki Young Kim[1], So Young Lee[1]

[1]Department of Geophysics, Kangwon National University

요약 : 다성분 탄성파 자료의 신호/잡음비를 높이기 위한 방법의 일환으로 다성분 복소트레이스 분석법을 이용한 분극필터를 개발하였다. 이 필터는 기존의 방법과는 달리, 실체파 신호의 수평/수직 진폭비와 레일리파 타원율을 이용하여 각 시간 샘플의 선형 및 타원형 성분이 정량적으로 계산되며 낮은 신호/잡음비에도 이상적으로 작동하는 특징이 있다. 합성파 뿐만 아니라 실제 자료에 적용시킨 결과, 기존 분극필터보다 타원형 입자운동의 레일리파가 잘 제거되어 선형의 P파 및 S파 신호를 효과적으로 인지할 수 있음을 보인다.
주요어 : 분극필터, 다성분 복소트레이스 분석법, 실체파, 레일리파, 신호/잡음비

Abstract : In order to increase the signal-to-noise ratio in multi-component seismic data, we developed new polarization filters based on the method of multicomponent complex trace analysis. Unlike the previous polarization filters, the present filters separately compute linear and elliptic components at each time sample using amplitude ratio of horizontal and vertical components of body waves and ellipticity of Rayleigh waves. The polarization filters work ideally even with low S/N data. Application of the filters to both synthetic and real seismic data shows that Rayleigh waves of elliptic motions are effectively eliminated and both P and S waves of linear motions are well separated each other.
Keywords : polarization filter, multicomponent complex trace analysis, body waves, Rayleigh waves, signal-to-noise ratio

1. 서론

탄성파 자료로부터 암석학적 정보 즉 지층의 공극률, 암상, 공극수 등을 얻고 분해능(spatial resolution)을 향상시키기 위하여 다성분 수신기를 사용하여 벡터 파형을 기록하는 것이 바람직하다. 그러나 다성분 수신기를 사용할 경우 야외 조사에서 수신기배열을 사용하는 데 어려움이 있기 때문에 공간 해상력이 증가되는 대신 신호/잡음비(S/N ratio)는 낮아지는 문제가 있다. 따라서 다성분 지진파 자료 사용을 위하여 공분산법(covariance method; Gal'perin and Frolova, 1960; Archambeau et al., 1965;

Flinn, 1965; Kanasewich, 1981)과 복소트레이스 분석법(René et al., 1987; Kim, 1987; 김기영 · 이소영, 2005)에 기초한 분극필터들이 개발되었다. 공분산법 분극필터는 최근 특이해 분해(singular value decomposition, SVD) 알고리즘을 접목한 방법(Lui, 1999; Franco and Musacchio, 2001; Meersman and Kendall, 2005)으로 확대 · 발전되고 있다. 이러한 분극필터들은 선형으로 분극되는 실체파의 입자운동과 타원형으로 분극되는 레일리파 입자운동의 차이에 기초한 것으로, 공분산법은 선형도(rectilinearity), 다성분 복소트레이스법은 수직과 수평성분 사이의 순간위상차, 순간접근각, 순간역타원율 등을 이용하여 신호를 분리한다. 그러나 현재까지 개발된 모든 분극필터는 비슷한 크기의 진폭을 가진 파형들이 중첩되었을 때, 효과적이지 못하다.

이 논문에서는 선형 및 타원형 입자운동의 양들을 각 시간 샘플에서 정량적으로 분리하여 계산하는 새로운 분극필터를 다성분 복소 트레이스법에 기초하여 개발하고, 간단한 조화파 및 실제자료에 적용한 결과를 소개한다.

2. 이론

(1) PPRR 필터(P−pass & R−reject filter)

P파가 레일리파와 함께 기록이 되면, 기록된 실제 자료의 수직과 수평성분의 트레이스는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_v(t) = r_{vp}(t) + r_{vr}(t), \tag{1}$$

$$r_h(t) = r_{hp}(t) + r_{hr}(t). \tag{2}$$

이때의 수직과 수평성분의 이상트레이스는

$$q_v(t) = q_{vp}(t) + q_{vr}(t), \tag{3}$$

와

$$q_h(t) = q_{hp}(t) + q_{hr}(t) \tag{4}$$

로 각각 나타낼 수 있다.

P파와 레일리파의 수평 대 수직성분의 진폭비 C_1과 C_2는 아래의 식과 같이 정의되며,

$$C_1 = \frac{A_{hp}}{A_{vp}}, \tag{5}$$

$$C_2 = \frac{A_{hr}}{A_{vr}} \tag{6}$$

위의 식을 이용하여 구한 P파의 수직성분과 수평성분은

$$r_{vp}(t) = r_v(t) - \{C_1^2 r_v(t) - C_1 r_h(t) - C_1 C_2 q_v(t) + C_2 q_h(t)\}/(C_1^2 + C_2^2), \tag{7}$$

와

$$r_{hp}(t) = r_h(t) + C_2[q_v(t) - \{q_h(t) - C_2 r_{vr}(t)\}/C_1], \tag{8}$$

로 표현된다.

(2) SPRR 필터(S−pass & R−reject filter)

SV파가 레일리파와 함께 기록된 경우, SV파의 수평과 수직성분 자료는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$r_{vs}(t) = r_v(t) - \{C_3^2 r_v(t) + C_3 r_h(t) + C_3 C_2 q_v(t) + C_2 q_h(t)\}/(C_3^2 + C_2^2), \tag{9}$$

$$r_{hs}(t) = -C_3 r_{vs}(t), \quad (10)$$

여기서 C_3는 S파의 수평성분에 대한 수직성분의 진폭비, 즉

$$C_3 = \frac{A_{hs}}{A_{vs}}, \quad (11)$$

로 정의된다. 등방성 매질인 경우 SV파는 P파와 같은 경로를 갖게 되므로 진폭비 C_3는 간단하게 C_1의 역수를 취하여 구할 수 있다.

3. 합성자료 적용

(1) 시험 자료

분극필터의 성능 및 지진파 입자운동에 대한 명확한 이해를 위하여 단주기 조화파를 가정한 지진파자료를 합성하여 시험하였다. 선형 입자운동을 하는 P파의 경우에는 주파수는 30 Hz이고 C_1이 $1/\sqrt{3}$이 되도록 합성하였고, S파의 경우는 주파수 20 Hz, $C_3 = \sqrt{3}$을 가정하였다. 타원형의 레일리파 경우는, 주파수 10 Hz, C_2는 0.7의 값을 갖도록 합성하였다(Fig. 1). 또한 이들이 중첩된 경우를 가정하여, 각각의 성분들을 서로 더함으로써 간섭효과를 나타내는 트레이스를 생성하였다(Figs. 2a & 2b).

(2) 분극필터 적용

P파와 레일리파(Fig. 2a) 및 S파와 레일리파(Fig. 2b) 간섭을 가정한 자료의 두 군으로 나누어 PPRR 필터와 SPRR 필터를 각각 적용시켰다. P파와 레일리파가 중첩된 자료(Fig. 2a)는 PPRR 필터 통과 후에 레일리파가 완전히 제거되고 순수한 P파 입자운동만을 갖는 선형분극 형태의 파형으로 바뀌었다(Fig. 2c). 마찬가지로 S파와 레일리파가 중첩된 자료Fig. 2b)도 SPRR 필터 통과 후에는 레일리파가 완전히 제거되고 선형분극 형태의 순수한 S파 입자운동만이 남아있는 결과를 보인다(Fig. 2d).

(3) 기존 분극필터와 비교

기존에 개발된 SVD 분극필터와 복소트레이스 분극필터를 간섭자료(Figs. 2a & b)에 적용하여 비교하였다. SVD 분극필터는 선형으로 분극된 신호가 타원의 주축을 구성할 것이라는 가정 하에, 주축 성분만 추출하면 원치 않는 타원형 입자운동을 제거할 수 있다는 이론에 근거한다. Fig. 3a는 각각 P파와 레일리파, Fig. 3b는 각각 S파와 레일리파가 서로 중첩되어 간섭을 일으킨 자료에 대해 SVD 필터를 적용시킨 결과이다. 시간에 따라 변화하는 수직성분(실선)과 수평성분(점선)을 나타낸 왼쪽에 나타내고 이들의 호도그램을 오른쪽에 도시하였다. 필터된 파형 모습이나 호도그램 형태를 이상적인 결과값과 비교할 때 저주파 성분이 유입되어 있으며, 입자운동 축 방향에 10° 정도 오차가 있다.

순간위상의 위상풀기(phase unwrapping)를 하지 않은 상태에서 복소트레이스 분극필터(김기영·이소영, 2005)를 적용한 결과(Figs. 3c & d)는 파형이나 호도그램의 모습이 이상적인 입자운동과 상당한 차이가 있음을 보이는데, 이는 순간위상차 값이 두루마리(wrap around)되어 나타난 결과로 해석된다.

4. 실제자료 적용

(1) 자료획득

필터 성능을 시험하기 위해서, 강원도 인제군 인제읍 남면 가로리의 소양호 상류지역에서

탄성파 탐사를 실시하고 시험자료를 기록하였다. 손망치를 사용하여 1 m 간격으로 타격하였으며, 1 m 간격의 10 Hz 3성분 지오폰으로 수신하고, 수직 및 수평 성분별로 24채널의 자료를 기록하였다. 신호발생은 Omnipulse 방법(Tatham and McCormack, 1991)을 응용한 타격방법(홍명호 외, 2005)을 적용하였으며, 한 트레이스 당 0.5 ms의 샘플률로 1024개의 자료를 획득하였다.

(2) 필터 적용 전과 후

기록된 시험자료에 지형정보만을 입력 한 후 PPRR 필터를 적용시켰다. 레일리파를 정확하게 추출하고 뚜렷한 P파의 신호를 인지하기 위해서는 기록자료에서 먼저 레일리파가 기록되는 구역을 나누고 이 구역 내의 모든 샘플마다 C_1, C_2, C_3상수를 구하여야 한다. 연구가 진행중인 현 단계에서는 전체 자료의 공통옾셋모음에서 구한 C_1과 C_2의 대략적인 값, 0.425, 0.752을 적용시켰다. PPRR 필터 결과(Fig. 4c)는 10~20번 채널의 10~20 ms에 P파 굴절파 신호가 뚜렷하게 나타나며, 15번 채널의 30 ms부근에 기록된 반사파 신호도 입력자료보다 강화된 모습을 보인다. 또한 입력자료의 수직성분(Fig. 4a)의 레일리파가 필터 후(Fig. 4c)에는 상당히 약화된 양상을 볼 수 있다. C_1과 C_2가 정확하지 않음에도 불구하고 필터 후에 신호/잡음비가 크게 향상된 것으로 판단된다.

5. 결론 및 토론

다성분 탄성파 탐사 자료에서 신호/잡음비를 높이기 위해 다성분 복소트레이스 분석법을 이용한 분극필터를 개발하였다. 이 필터는 기존의 방법과는 차별화된 것으로 제거하고자 하는 레일리파의 타원형 입자운동이 각 시간 샘플에서 정량적으로 계산되며 레일리파의 진폭이 선형 분극된 신호에 비해 상당히 큰 경우에도 실체파와 레일리파의 수평/수직 진폭비를 알고 있을 경우에 이상적으로 작동한다. 합성파 뿐만 아니라 실제 자료에 적용시킨 결과, 기존 분극필터보다 타원형 입자운동을 하는 레일리파가 잘 제거되어 선형의 신호를 효과적으로 인지할 수 있는 것으로 분석된다. 정확한 C_1, C_2, C_3값 결정을 위한 효과적 방법 강구는 계속 연구해야 할 과제이다.

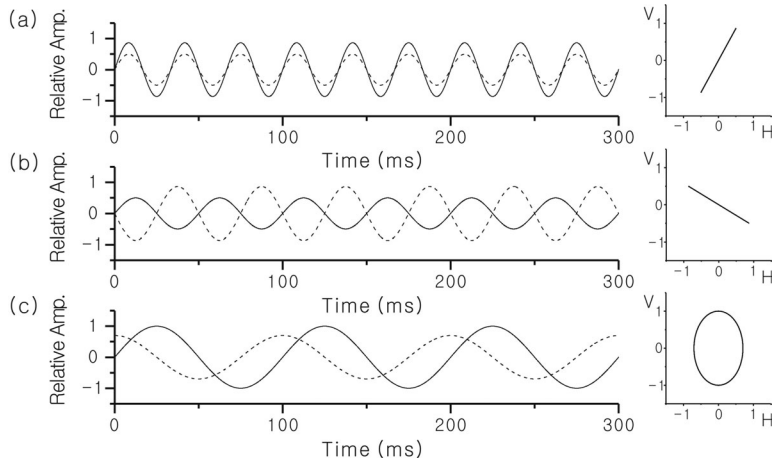


Fig. 1. (a) Multicomponent synthetic data simulating (a) linear P−wave, (b) linear S−wave, and (c) elliptic Rayleigh−wave motions. The solid and dashed lines indicate vertical and horizontal components, respectively.

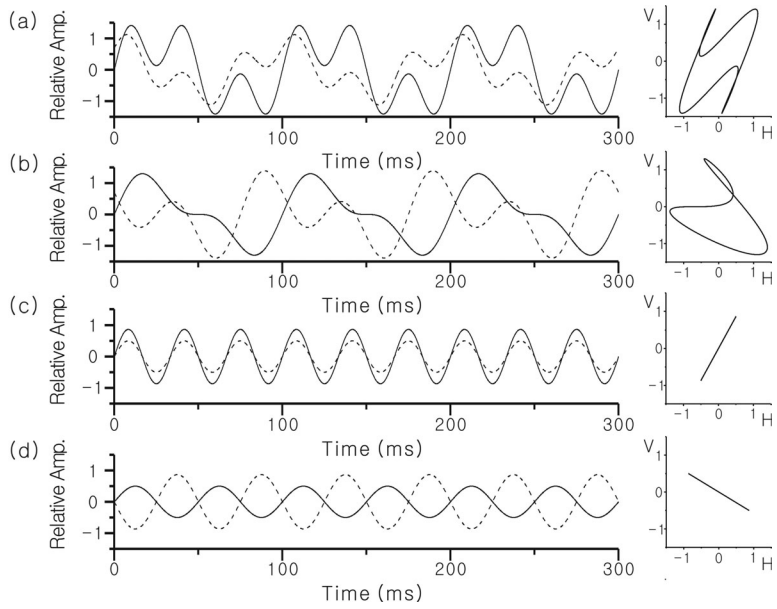


Fig. 2. Application of the polarization filters to overlapped sinusoids. Compared with the input data sets comprising (a) P and Rayleigh waves and (b) S and Rayleigh waves, the corresponding output data in (c) and (d) indicate ideal performance of the filter. The solid and dashed lines indicate vertical and horizontal components, respectively.

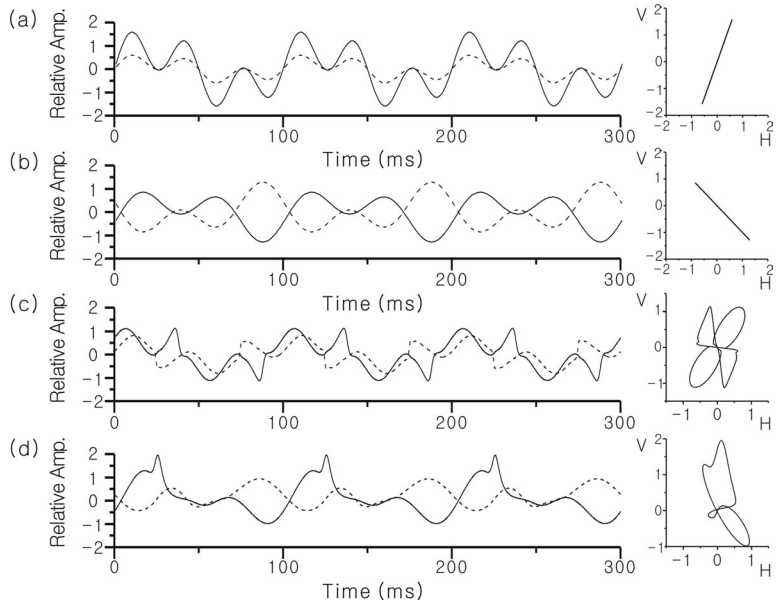
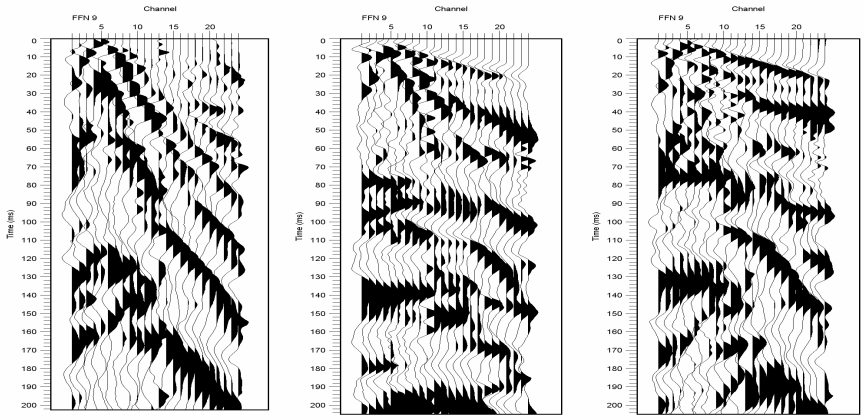


Fig. 3. (a) Output data sets after application of (a) the SVD filter and (b) multicomponent complex trace filter to the overlapped sinusoids in Figures 2a and 2b, respectively. Both filters do not work well with the overlapped sinusoids.



(a) (b) (c)

Fig. 4. Real data : (a) vertical and (b) horizontal components of the input data set, and (c) the filtered output.

참고문헌

김기영, 이소영, 2005, 복소트레이스 분극필터를 이용한 다성분 탄성파자료 신호분리, 지구물리, 8, 35-38.

Archambeau, C. B., Bradford, J. C., Brome, P. W., Dean, W. C., Flinn, E. A., and Sax, R. L., 1965, Data processing techniques for detection and interpretation of teleseismic signals, *Proc. IEEE*, 53, 1860-1884.

Flinn, E. A., 1965, Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion, *Proc. IEEE*, 12, 1874-1876.

Franco, R. and Musacchio, G., 2001, Polarization filter with singular value decomposition, *Geophysics*, 66, 932-938.

Gal'perin, E. I. and Frolova, A. V., 1960, *Azimuth-phase correction for elliptically polarized waves*, Izv. Spv. Acad. Sci. Geophy. Series, 2, 195-208.

Kanasewich, E. R., 1981, *Time sequence analysis in geophysics*, Univ. of Alberta Press.

Kim, K. Y., 1987, *Polarization studies of multicomponent seismic data*, Ph. D. Dissertation, University of Oklahoma.

Lui, X., 1999, Ground roll suppression using the Karhunen-Loeve transfrom, Geophysics, 64, 564-566.

Meersman, K. D. and Kendall, R., 2005, A complex SVD-polarization filter for ground roll attenuation on multi-component data, presented at the EAGE 67th Conference and Exhibition held I Madrid, Spain during 13-16 of June, 2005.

René, R. M., Fitter, J. L., Forsyth, P. M., Kim, K. Y., Murray, D. J., Walters, J. K., and Westerman, J. D., 1987, Multicomponent seismic studies using complex trace analysis, Geophysics, 51, 1235-1251.

Tatham, R. H. and McCormack, M. D., 1991, *Multicomponent Seismology in petroleum exploration*, Society of Exploration Geophysicists.