

## Poynting Vector를 이용한 역시간 구조보정

윤광진<sup>1)</sup>, 홍순덕<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(주)골든오일

### 1. 서론

파동방정식 구조보정은 다중경로 및 위상변화 등으로 발생하는 영상화 문제를 해결 할 수 있다. Hyperbolic wave equation을 이용하여 음원파와 관측파를 순 전파( forward propagation ) 및 역 전파( backward propagation )시키는 역시간 구조보정( Hemon, 1978; Baysal et al., 1983; Whitmore, 1983; McMechan, 1983 )은 하향연속( downward propagation )에 의한 일방향 파동방정식 구조보정과 달리 영상화의 경사면에 대한 제한이 없다. 역시간 구조보정을 위해 hyperbolic wave equation의 수치 해를 구하는 것은 Kirchhoff 및 일방향 파동방정식 구조보정보다 비용이 많이 들지만, 급속히 발전하는 컴퓨터 성능을 감안할 때 큰 문제는 아니다. 또한 고차유한차분식이나 가변격자( Mufti et al., 1996; Wu et al., 1996 ), 그리고 pseudo spectral method( Kosloff and Baysal, 1982; Fornberg, 1987 )등의 방법을 통하여 역시간 구조보정에 필요한 계산시간 및 메모리를 줄일 수 있다( Yoon et al., 2003 ).

역시간 구조보정은 경사면의 제한이 없다는 Kirchhoff 구조보정의 장점과, 다중경로 및 위상변화 등의 문제를 해결할 수 있는 일방향 파동방정식 구조보정의 장점을 모두 가지고 있지만, 영상화조건에 따른 인위적 영상( artifacts )의 발생은 피할 수 없다. 지표나 해상, 해저면, 시추공 등에서 관측된 자료는 음원으로부터 전파된 파동 중 일부분에 지나지 않으므로, 이 관측 자료를 역전파하여 영상화를 수행하는 데는 영상의 품질을 저하시키는 인위적 영상이 발생하게 된다. 이 논문에서는 역시간 구조보정의 영상화에 발생하는 인위적 영상들과 몇 가지 해결책에 대해 알아보하고자 한다.

### 2. 역시간 구조보정의 인위적 영상들

$$\int_0^{tmax} S(x, y, z, t)R(x, y, z, t)dt \quad (1)$$

역시간 구조보정의 영상화조건은 식 (1)과 같다. 여기서  $tmax$ 는 최대기록시간,  $S(x, y, z, t)$ 와  $R(x, y, z, t)$ 은 hyperbolic wave equation을 이용해 음원으로부터 전파된 파동장과 수신기에서 관측된 자료를  $tmax$ 부터 역시간으로 전파한 파동장이다. 음원으로부터 전파된 파동과 관측점으로부터 역 전파된 파동을 모든  $(x, y, z)$ 지점에서 상호상관하는 식 (1)의 영상화 조건은 굴절파, 산란파 등과의 상호상관에 의한 인위적 영상을 수반한다. 영상의 품질을 저하시키는 이러한 인위적 영상은 특히 심도가 얇은 부분과 암염과 같은 큰 반사계수를 갖는 상부에서 주로 발생한다.

Fig. 1은 한 음원모음자료의 역시간 구조보정결과이다. Fig. 1 (a)는 모든 관측자료를 이용한 영상으로 원거리에서 수신된 굴절파 및 직접도달파가 영상화하고자 하는 반사면이 아닌 인위적 영상을 형성하여 영상의 품질을 저하시키고 있음을 알 수 있다. 이 같은 인위적인 영상은 구조보정 이전에는 muting을 통하여 그리고 구조보정 후에는 필터링을 통하

여 제거할 수 있다( Mulder and Plessix, 2003 ). muting을 이용할 경우에는 반사파를 제거하지 않도록 주의해야 하고, 구조보정 후 필터링을 할 경우에는 저주파의 인위적 영상은 제거할 수 있지만 고주파의 인위적 영상은 제거하기 어려운 단점이 있다. (b)는 상 속도  $v = 1.2\text{km/sec}$ 로 muting하여 원거리 수진기에 수진된 상향굴절파 및 직접도달파를 제거한 자료를 이용한 영상으로 큰 진폭의 인위적 영상이 제거되었음을 알 수 있다.

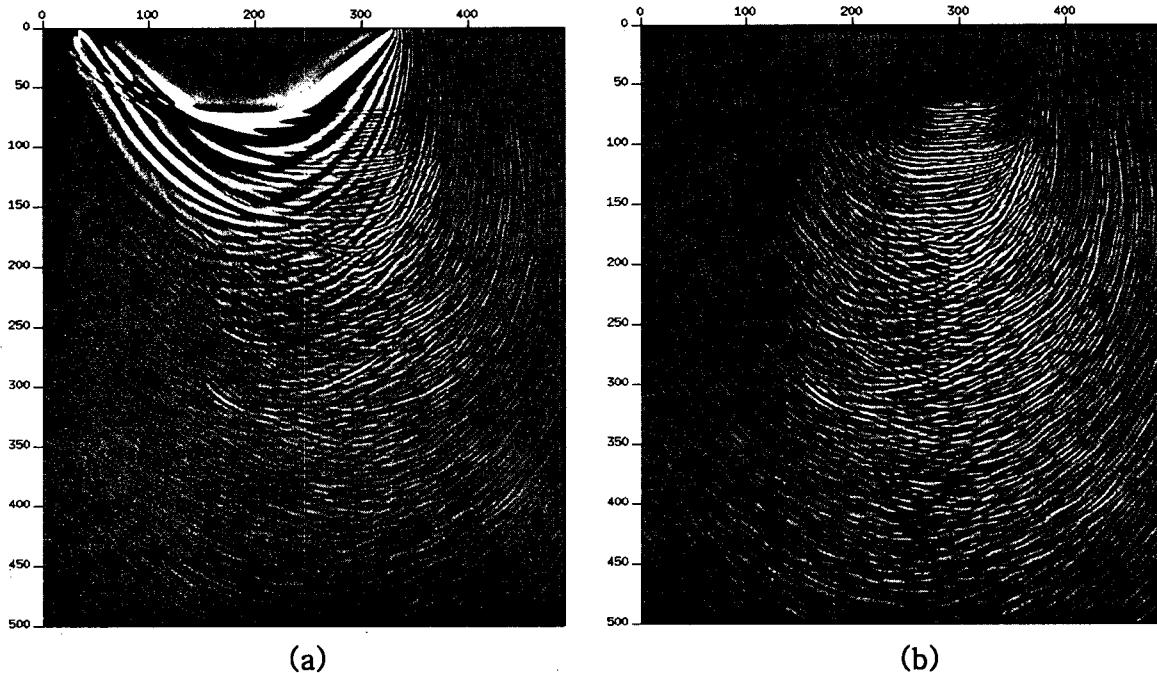


Fig. 1. Reverse-time migration images (a) contaminated with artifact produced by correlation of source wavefield to head waves and direct turning waves recorded dominantly at far offset (b) obtained after muting.

Fig. 1(a)의 인위적 영상은 심도에 따라 속도가 점진적으로 증가하는 일반적인 지층의 모델에서 나타나는데 반해, 속도의 변화가 큰 반사면이 존재할 경우에는 이 반사면에 의한 역 산란파가 인위적 영상을 만든다. Fig. 2는 암염의 상부에서 취득한 한 음원모음자료의 역시간 구조보정 결과이다. Fig. 2(a)는 식 (1)의 영상화 조건을 이용한 결과이다. 암염 상부의 인위적 영상은 음원으로부터 하향 전파되는 파와 수진기에서 역 전파되어 암염에서 반사된 상향 산란파와의 상호상관, 그리고 음원으로부터 전파되어 암염에서 반사된 상향 산란파와 수진기에서 역 전파되는 하향파와의 상호상관에 의해 발생한 인위적 영상이다. 이러한 인위적 영상을 제거하기 위해서는 반사면으로부터 산란되어 되돌아오는 파를 제거해야 한다. 밀도와 속도의 곱으로 표현되는 반사계수  $\rho v$ 를 일정하게 만드는 impedance matching은 산란파를 줄일 수 있으나 입사각이 수직일 때만 효과가 있다( Baysal et al., 1984 ). Fig 2(b)는 식 (1)의 영상화 조건과 impedance matching을 이용한 결과로 음원모음자료 구조보정의 인위적인 영상을 제거하는 데는 효과적이지 못함을 보이고 있다. 반사면으로부터의 산란파를 제거하기 위해 파의 도달시간을 이용할 수 있다. 음원으로부터 전파되는 파의 초기도달시간 이후의 작은 시간 창( time window )을 두어 그 시간 창 이외에서는 파의 진폭을 0으로 만듦으로써 산란파를 어느 정도 제거할 수 있다. Fig 2(c)는 식 (1)의 영상화 조건과 시간창을 이용한 결과이다. 음원으로부터 전파되어 반사면에서 산란된 상향파를 제거한 결과, 암염 상부의 인위적 영상 중

우측부분이 없어진 것을 확인할 수 있다. 암염 상부 좌측의 인위적 영상은 수진기에서 역 전파되고 반사면에서 산란된 상향파를 제거하여 없앨 수 있으나, 역 전파 된 파에 대해서 시간 창을 적용하는 것은 수진기가 여러 개 이므로 용이하지 않다.

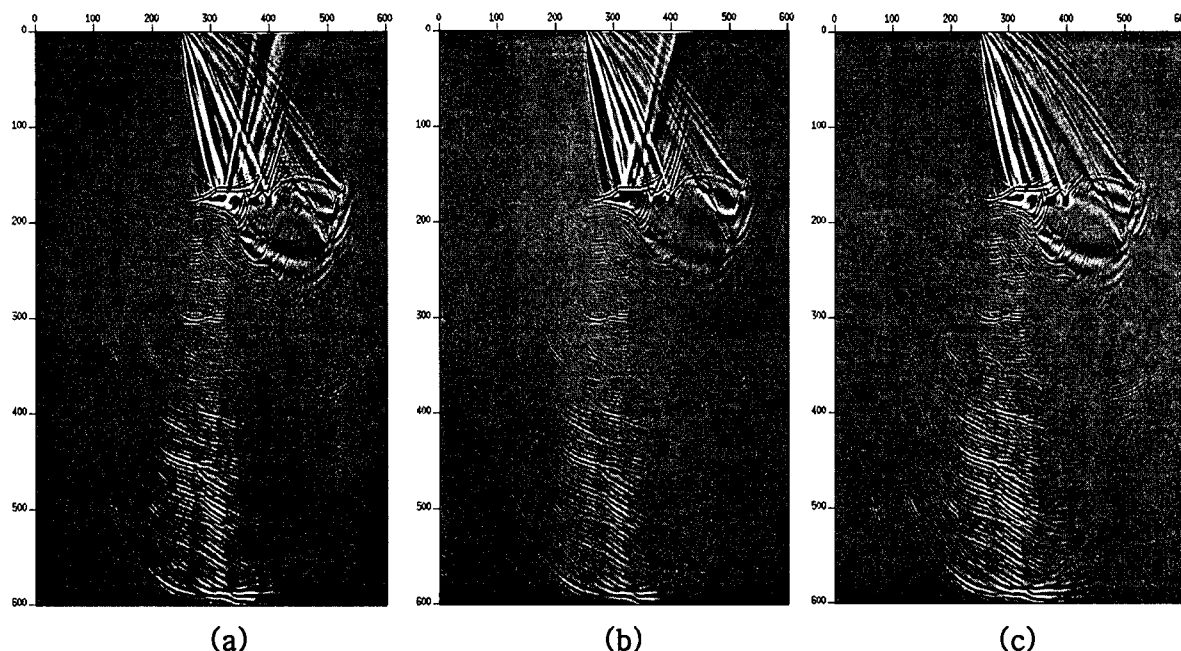


Fig. 2. Reverse-time migration image using (a) the imaging condition in equation (1), (b) the imaging condition in equation (1) and impedance matching technique and (c) the imaging condition in equation (1) and windowed cross correlation.

### 3. Poynting vector를 이용한 영상화 조건

위에서 언급된 인위적 영상들은 상호상관되는 두 파동의 전파방향이 서로 정 반대방향에 가까워 두 파동의 전파방향이 이루는 각도가  $180^\circ$ 에 가까운 반면, 영상화하고자 하는 반사파의 경우 두 파동이 이루는 각도는 일정한 범위( 예를 들면  $0^\circ \sim 120^\circ$ )를 넘지 않는다. 적용하기 쉬운 muting이나 시간 창을 이용한 상호상관도 역시간 구조보정의 인위적 영상을 제거하는데 효과적이기는 하나, 보다 일반적인 방법은 파동의 전파방향을 계산하여 상호상관하는 두 파동장이 이루는 사이 각에 따라 가중치를 주는 방법이다. 파동의 전파방향은 Poynting vector를 이용하여 구할 수 있는데, 에너지의 이동 또는 파동의 전파방향을 나타내는 Poynting vector는 음향파에 있어서 다음과 같이 주어진다.

$$\text{Poynting vector} \equiv -\vec{V}(t) \partial P(t) / \partial t \quad (2)$$

여기서  $P(t)$ 는 압력( Pressure ),  $\vec{V}(t) = \nabla P(t)$ 는 Particle velocity를 나타낸다. Fig. 3과 Fig. 4는 각 음원으로부터 전파된 파동장  $S(t)$  및  $S(t)$ 의 Poynting vector 그리고 수진기에서 역 전파된 파동장  $R(t)$  및  $R(t)$ 의 Poynting vector를 나타낸 것이다.

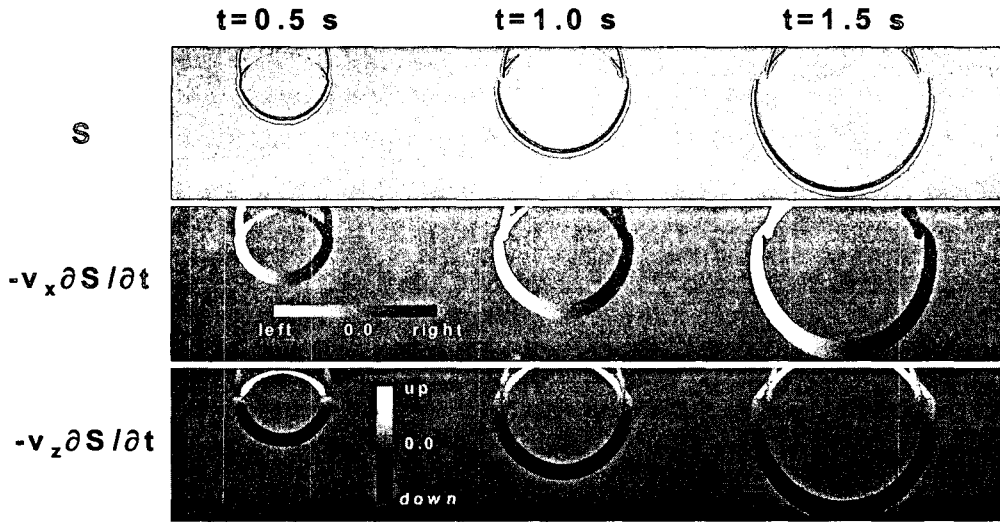


Fig. 3. (top) Source wavefield  $S(t)$ , (center) x-component unit Poynting vector of  $S(t)$  and (bottom) z-component unit Poynting vector of  $S(t)$ .

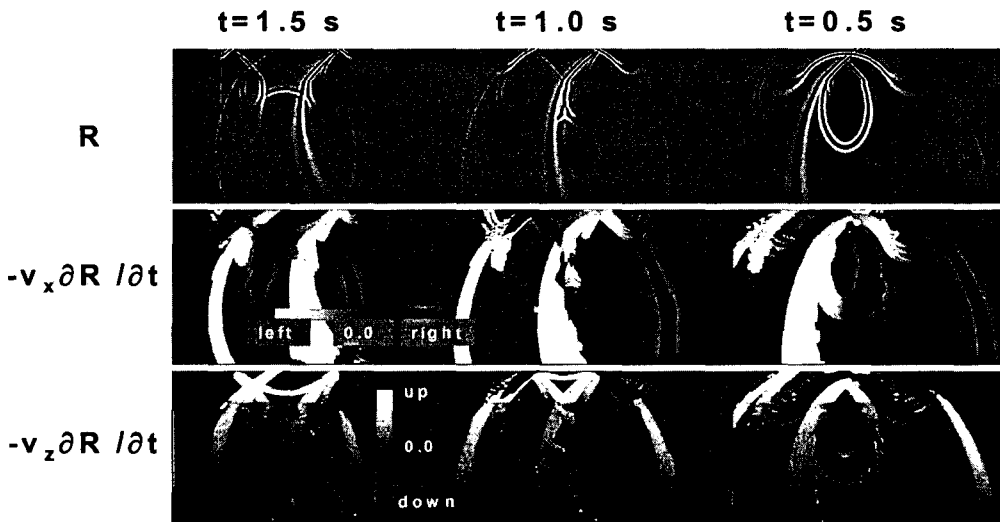


Fig. 4. (top) Back propagated receiver wavefield  $R(t)$ , (center) x-component unit Poynting vector of  $R(t)$  and (bottom) z-component unit Poynting vector of  $R(t)$ .

파동의 Poynting vector를 이용하여 두 파동장의 사이 각이 일정한 범위보다 큰 경우에는 가중치를 0으로 하여 인위적인 영상을 제거할 수 있다. Fig. 5(a)는 식 (1)의 영상화 조건을 이용한 구조보정 영상이며, Fig. 5(b)는 상호상관되는 두 파동장의 사이 각이  $0 \sim 120^\circ$ 인 경우에는 가중치를 1로 하고,  $120^\circ \sim 180^\circ$ 인 경우는 가중치를 0으로 한 구조보정 결과이다. Fig. 5(b)에서 보듯이 암염 상부의 인위적인 영상이 거의 제거되었음을 알 수 있다. 또한 Poynting vector를 이용한 역시간 구조보정을 통하여 파동방정식을 이용한 구조보정에서도 반사각에 따른 영상 및 진폭분석도 수행할 수 있는 이점이 있다.

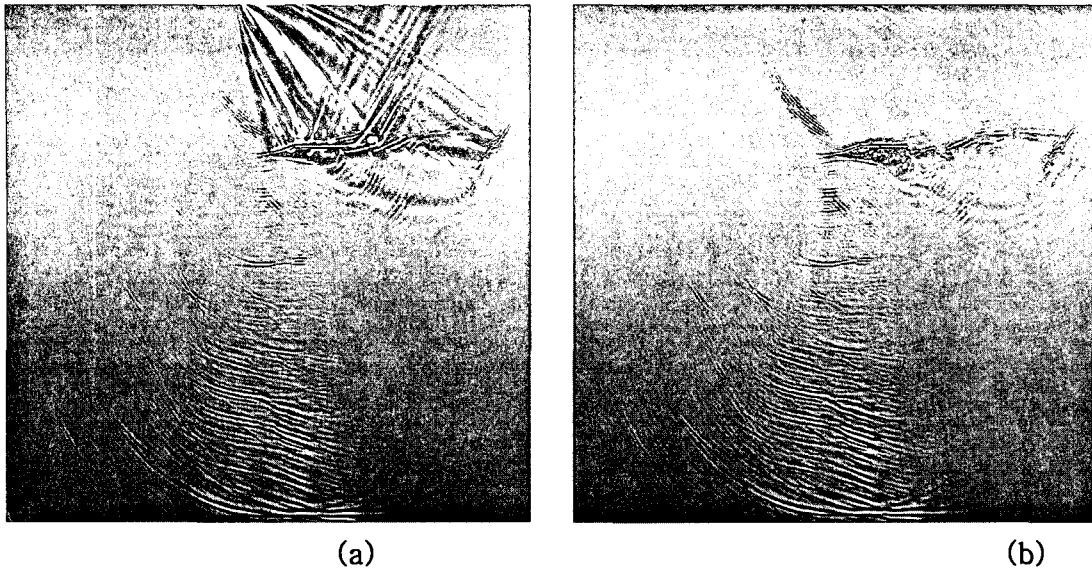


Fig. 5. Reverse-time migration image using (a) the conventional imaging condition in equation (1) and (b) new imaging condition of cross correlation using Poynting vector.

#### 참고문헌

- Baysal, E., Kosloff, D. D. and Sherwood, J. W. C., 1983, Reverse-time migration: *Geophysics*, **48**, 1514-1524.
- Baysal, E., Kosloff, D. D. and Sherwood, J. W. C., 1984, A two-way nonreflecting wave equation: *Geophysics*, **49**, 132-141.
- Fornberg, B., 1987, The pseudo-spectral method: Comparisons with finite-difference for elastic wave equation: *Geophysics*, **52**, 483-501.
- Hemon, C., 1978, Equations d'onde et modeles: *Geophys. Prosp.*, **26**, 790-821.
- Kosloff, D. D. and Baysal, E., 1982, Forward modeling by a Fourier method: *Geophysics*, **47**, 1402-1412.
- Loewenthal, D. and Mufti, I. R., 1983, Reversed time migration in spatial frequency domain: *Geophysics*, **48**, 627-635.
- McMechan, G. A., 1983, Migration by extrapolation of time-dependent boundary values: *Geophys. Prosp.*, **31**, 413-420.
- Mufti, I. R., Pita, J. A. and Huntley, R. W., 1996, Finite-difference depth migration of exploration-scale 3-D seismic data: *Geophysics*, **61**, 776-794.
- Mulder, W. and Plessix, R., 2003, One-way and two-way wave-equation migration: 73rd Ann. Internat. Mtg., Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1292-1295.
- Whitemore, N. D., 1983, Iterative depth imaging by backward time propagation: 53th Ann. Internat. Mtg., Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 382-384.
- Wu, W., Lines, L. R. and Lu, H., 1996, Analysis of higher order, finite-difference schemes in 3-D reverse-time migration: *Geophysics*, **61**, 845-856.
- Yoon, K., Shin, C., Suh, S. Lines, L. R. and Hong, S., 2003, 3D reverse-time migration using acoustic wave equation: An experience with the SEG/EAGE data set: *The Leading Edge*, **22**, 38-41.