

## 주시 토모그래피와 음향 2차원 전파형 역산의 적용성에 관한 연구\*

한현철<sup>1)</sup> · 조창수<sup>2)</sup> · 서정희<sup>2)</sup> · 이두성<sup>3)</sup>

### Acoustic 2-D Full-waveform Inversion with Initial Guess Estimated by Traveltime Tomography

Han, Hyun Chul, Cho, Chang Soo, Suh, Jung Hee and Lee, Doo Sung

**요 약** : 탄성파토모그래피는 고해상의 자료분석을 필요로 하는 환경이나 토목 등 공학적 응용분야에서 지하구조를 결정하기 위해 널리 사용되는 방법이다. 지금까지의 탄성파토모그래피는 대부분 주시역산에 의존해 왔으나 최근에는 파형정보를 이용하는 역산기법들이 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 이러한 파형정보를 이용하여 음파 매질에서의 이차원 전파형 역산 알고리즘을 개발하였다. 전파형 역산은 Born역산의 약산란장 가정이나 주시역산의 고 주파수 가정이 필요 없는, 분해능이 가장 좋은 방법이다. 그러나 초기추정값이 실제 모델과 많이 다를 경우 국부 최소값에 빠진다는 단점이 있다. 본 연구에서는 주시역산을 통해 배경값을 추정하고 이를 초기추정값으로 주어 전 파형 역산을 수행하는 알고리즘을 개발하였다. 본 알고리즘을 인공탄성파 자료에 적용한 결과, 주시 역산 결과를 전파형 역산의 초기치로 사용할 경우 오차의 수렴속도가 매우 빠르고 분해능이 뛰어난 영상을 제공함을 확인할 수 있었다. 이는 주시역산을 통한 배경값 추정이 전파형 역산의 국부 최소값 문제와 계산 시간의 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 방안을 시사한다. 또한 축소모형실험자료에 대하여 본 알고리즘을 적용한 결과 재구성된 속도구조가 실제 모형과 잘 일치함을 알 수 있었고, 이를 통하여 현장자료에 대한 적용가능성을 확인하였다.

**주요어** : 탄성파 토모그래피, 주시역산, 초기 추정값, 전 파형 역산

**Abstract** : Seismic tomography has been widely used as high resolution subsurface imaging techniques in engineering applications. Although most of the techniques have been using travel time inversion, waveform method is being driven forward owing to the progress of computational environments. Although full-waveform inversion method has been known as the best method in terms of model resolving power without high-frequency restriction and weak scattering approximation, it has practical disadvantage that it is apt to get stuck in local minimum if the initial guess is far from the actual model and it consumes so much time to calculate. In this study, 2-D full-waveform inversion algorithm in acoustic medium is developed, which uses result of traveltime tomography as initial model. From the application on synthetic data, it is proved that this approach can efficiently reduce the problem of conventional approaches: our algorithm shows much faster convergence rate and improvement of model resolution. Result of application on physical modeling data also shows much improvement. It is expected that this algorithm can be applicable to real data.

**Keywords** : traveltime tomography, initial guess, full-waveform inversion

## 서 론

탄성파에 있어서 주시 토모그래피는 선형·비선형성에 관하여 많은 연구가 진행되었으며 현장자료에 적용하여서도 훌륭한 결과를 보여주었다(Dines *et al.*, 1979; Ivansson, 1985; 김중렬 등, 1991; 임해룡, 1992). 주시 토모그래피는 계산 시간의 측면에서 매우 효과적이지만, 고주파수 가정이 필요하며 암영대가 존재하는 경우 파선추적이 실패할 수도 있다는 단점을 가지고 있다. 또한 주시역산으로부터 재구성된 모델은 전 파형 역산에 비해 그 분해능이 현저히 떨어진다(Luo & Shuster,

1991).

이에 비하여 전파형 역산법은 Tarantola(1984)에 의해 반사법자료에 대하여 적용된 이래 다양한 기법들이 개발되었으며 또한 여러 현장 적용 사례들이 있었는데 그 결과는 상당한 고해상의 결과를 보여 주었다(Mora, 1987; Pica *et al.*, 1990; Pratt & Worthington, 1990). 전 파형 역산은 파선토모그래피의 고주파수 가정이라든가 Born역산의 약산란장 가정이 필요 없고 고분해능이라는 장점을 가지고 있다. 그러나 초기 값과 자료의 잡음에 민감하며 초기 추정값이 실제모델과 많이 다를 경우 국부 최소값에 빠지기 쉽다는 단점이 있다

\*1998년 4월 20일 접수

1) 코오롱상사

2) 서울대학교 자원공학과(Department of Mineral & Petroleum Engineering, Seoul National University)

3) 한성대학교 정보공학과(Department of Information Engineering, Hansung University)

(Zhou *et al.*, 1995).

또한 전 파형 역산은 송신점에서 송신원의 전파(propagation)와 수신점에서 파형잔차의 역시간 전파(reverse-time propagation), 그리고 이 두 전파과정 중에 모든 격자점들에서 상관(correlation)값을 계산해야 하므로 많은 기억용량과 긴 계산시간이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 전파형 역산의 계산시간과 국부 최소값에 빠지는 단점을 극복하기 위하여 비선형 파선토모그래피의 역산결과를 초기추정값으로 사용하는 알고리즘을 사용하고자 하였다. 이때 모형반응계산은 계산시간이 적게 들고 정확성을 기할 수 있는 4차근사 유한차분법(김현섭, 1992)을 채택하였으며 역산시 역산은 최대경사법(steepest descent method)을 이용하였다.

## 이 론

전 파형 역산은 실제 송신원의 전파, 파형잔차(waveform residuals)의 역시간 전파, 그리고 이를 통해 얻어지는 파동장들의 상관값을 얻는 세 가지 과정으로 이루어져 있다.

### 파동방정식의 유한차분

2차원 음파매질(acoustic medium)에서 파동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2(x, z)} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + f(t) \cdot \delta(x - x_s) \delta(z - z_s) \quad (1)$$

여기서  $p$ 는 스칼라 파동장,  $c(x, z)$ 는 매질의 속도 함수,  $f(t)$ 는 송신파형이다. 그리고  $\delta$ 는 Kronecker delta,  $x_s$ 와  $z_s$ 는 각각 송신원의 좌표이다. (1)식을 공간에 대해서는 4차근사 그리고 시간에 대해서는 중앙차분하면 다음과 같은 유한차분식을 얻을 수 있다.

$$p_{ij}^{n+1} = \frac{c^2 \Delta t^2}{\Delta x^2} [\omega_1 (p_{i-2,j}^n + p_{i+2,j}^n + p_{i,j-2}^n + p_{i,j+2}^n) + \omega_2 (p_{i-1,j}^n + p_{i+1,j}^n + p_{i,j-1}^n + p_{i,j+1}^n) + \omega_3 p_{ij}^n] + 2p_{ij}^n - p_{ij}^{n-1} \quad (2)$$

여기서  $\omega_1 = -\frac{1}{12}$ ,  $\omega_2 = \frac{4}{3}$ ,  $\omega_3 = -5$ 이다.

한편 유한차분법을 이용한 모형반응계산에서는 인위적 경계면에 의해 반사파가 발생하므로 이를 제거할 필요가 있다. 본 논문에서는 지표반사파의 영향을 제거할 수 있다는 조건하에서 모든 방향에 감쇠경계조건(sponge boundary condition)을 설정하였으며, 이 경계조건을 고려한 차분식은 다음과 같다.

$$p_{ij}^{n+1} = f_{i,j} \frac{c^2 \Delta t^2}{\Delta x^2} [\omega_1 (p_{i-2,j}^n + p_{i+2,j}^n + p_{i,j-2}^n + p_{i,j+2}^n) + \omega_2 (p_{i-1,j}^n + p_{i+1,j}^n + p_{i,j-1}^n + p_{i,j+1}^n) + \omega_3 p_{ij}^n] + 2f_{i,j} p_{ij}^n + (1 - 2f_{i,j}) p_{ij}^{n-1} \quad (3)$$

여기서  $f$ 는 감쇠계수이며, 1에서 0.99까지 변화도록 값을

설정하였다.

### 역산문제

역산문제에 있어서 오차함수는 다음과 같이 파형잔차의 제곱으로 설정하였다.

$$S = \frac{1}{2} \sum_s \sum_r \int dt \delta p_{rs}(t) \cdot \delta p_{rs}(t) \quad (4)$$

$$\delta p_{rs}(t) = p(x_r, t | x_s)_{obs} - p(x_r, t | x_s)_{cal}$$

여기서  $\delta p_{rs}(t)$ 는 파형잔차로서 관측자료  $p(x_r, t | x_s)_{obs}$ 와 모델자료  $p(x_r, t | x_s)_{cal}$ 와의 오차를 나타낸다. (4)식을 최소화하는 방법으로서 다음과 같이 최대경사법(steepest descent method)을 사용하였다.

$$c_{k+1}(x) = c_k(x) + \alpha \cdot \gamma_k(x) \quad (5)$$

$$\gamma_k(x) = -\frac{\partial S}{\partial c_k(x)} = \delta p_{rs}(t) \frac{\partial p(x_r, t | x_s)_{cal}}{\partial c(x)}$$

(5)식에서  $c(x)$ 는 현재 모델의 속도구조,  $\alpha_k$ 는 거리계수, 그리고  $\gamma_k(x)$ 는 오차함수  $S$ 를 속도함수에 대하여 미분한 최대경사방향함을 나타낸다.

음파매질에서 파동장의 Fréchet미분은 (6)식과 같이 주어진다(Lou & Schuster *et al.*, 1995).

$$\frac{\partial p(x_r, t | x_s)_{cal}}{\partial c} = \frac{2}{c(x)^3} \dot{g}(x, t | x_r) * \dot{p}(x, t | x_s) \quad (6)$$

위의 식에서  $\dot{g}(x, t | x_r)$ 는 (1)식의 파동방정식에 대한 그린함수로서 송신점에서 단위충격함수가 존재할 때 임의의 공간에서 시간에 따라 측정되는 파동장이다. 또한 (5)식과 (6)식을 결합하고  $\int dt [f(t) * g(t)] h(t) = \int dt g(t) [f(-t) * h(t)]$ 의 관계를 이용하면 (Tarantola, 1987) 다음과 같은 (7)식을 얻을 수 있다.

$$\gamma(x) = \frac{2}{c(x)^3} \sum_s \int dt \dot{p}(x, t | x_s) \sum_r \dot{g}(x, -t | x_r, 0) * \delta p_{rs} \quad (7)$$

위의 (7)식을 풀기 위해선, 각 송신점에서의 송신파형의 전파와 수신점들에서의 파형잔차의 역시간전파 과정(Gauthier *et al.*, 1986)이 필요하다.

마지막으로 (5)식에서의 계수  $\alpha_k$ 를 추정하기 위해서 모델링과정이 한번 더 필요하다. 본 알고리즘에서는 중앙에 있는 하나의 송신점을 선택하여 송신파형을 전파하는 방법을 사용하였으며, 이때 거리계수  $\alpha_k$ 의 수식적 표현은 아래와 같은 수식으로 표현된다(Pica *et al.*, 1990).

$$\alpha_k = \frac{[F_n \gamma_n]^T [p(x_r, t | x_s)_{obs} - p(x_r, t | x_s)_{cal}]}{[F_n \gamma_n]^T [F_n \gamma_n]} \quad (8)$$

$$F_n \delta m = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{p(m + \epsilon \delta m)_{cal} - p(m)_{cal}}{\epsilon}, \max(\epsilon \gamma_n) \leq \frac{\max(m_n)}{100}$$

(8)식을 이용하여  $\alpha_k$ 를 계산하기 위해서는 현재 모델에서 최대 속도를 찾아 그 값의 1% 이하의 값을 더해 주어 파동방

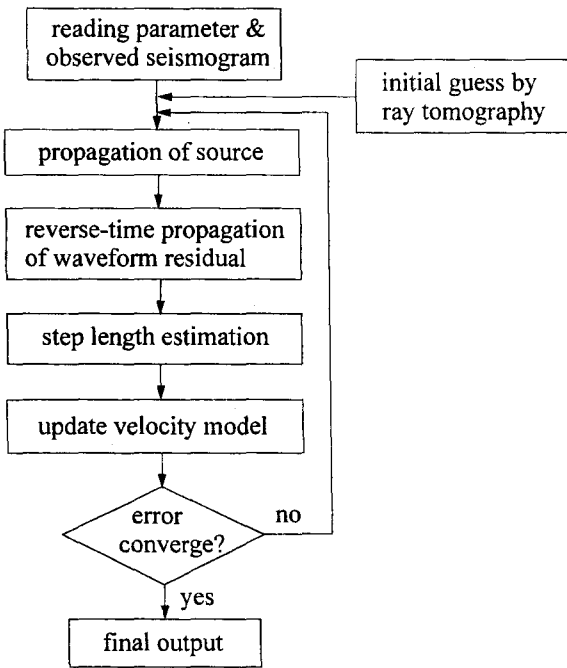


Fig. 1. Flowchart of this algorithm.

정식을 풀어야 한다.

지금까지 서술한 과정들을 나타낸 알고리즘의 흐름도가 Fig. 1에 제시되어 있다.

### 인공합성 자료에의 적용

#### 3층 구조에 대한 역산

3층 모델에 대하여 본 알고리즘을 적용시킨 결과가 Fig. 2에 제시되어 있다. 각층의 속도는 그림의 아래에서부터

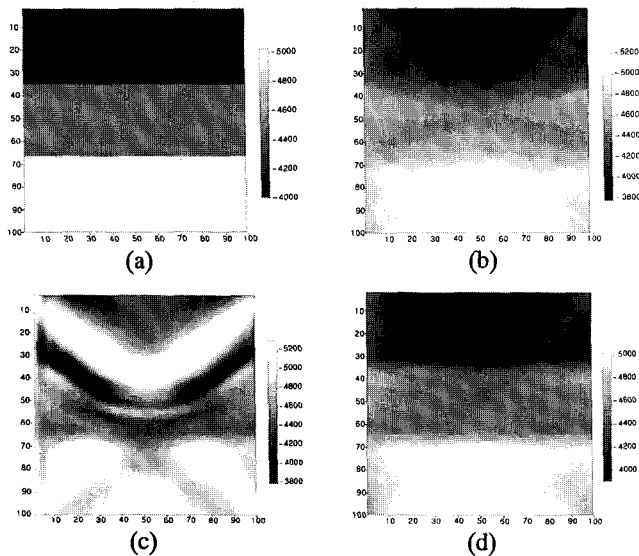


Fig. 2. Three layer model and the reconstructed images: (a) velocity structure, (b) by nonlinear ray tomography, (c) by full-wave inversion with homogeneous initial guess, and (d) by full-wave inversion with the initial guess of (b).

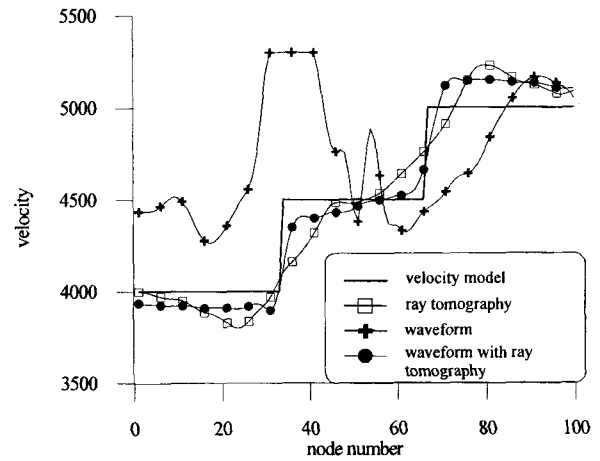


Fig. 3. Velocity distribution along the vertical line crossing the center of the model.

4000, 4500, 5000 m/s이며, 송·수신원은 1 m 간격으로 각각 50개를 사용하였고, 격자간격은 0.5 m이며 송신파형은 주 주 파수가 500 Hz인 2-loop Ricker파형이다. 파선토모그래피의 역산결과 Fig. 2(b)는 각 층의 속도값과 경계면들이 완만하게 나타나고 있음을 보여준다. 또한 Fig. 2(c)에서 볼 수 있듯이 전 파형 역산만을 수행하였을 때는 해의 수렴이 완전히 실패하고 있지만, Fig. 2(d)에서 보는 바와 같이 파선토모그래피의 결과를 함께 사용할 때는 각 층의 경계면들과 속도값들이 정확하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 수직해상도를 나타낸다. 특히 전 파형 역산만을 수행하였을 경우 첫 번째 층과 두 번째 층의 속도값이 실제의 속도값과 완전히 다르게 나타나고 있지만 파선토모그래피의 결과를 이용할 경우 반사이벤트의 존재로 인하여 각층의 경계면이 명확히 나타나며, 속도값이 실제의 모델값을 잘 찾아가고 있다. 이 두 가지 역산결과에 대하여 파형오차를 그려보면 Fig. 4와 같으며, 오차값을 비교하여 보면 수십 배 이상 차이가 나며 또한 수렴속도도 더 빠름을 알 수 있다.

앞에서 균일한 속도구조로 초기 추정값을 주었을 때 역산 결과가 매우 좋지 않음을 확인하였다. 이에 대하여 해의 수렴이 실패하는 이유가 초기 추정값의 영향때문이라는 것을 명

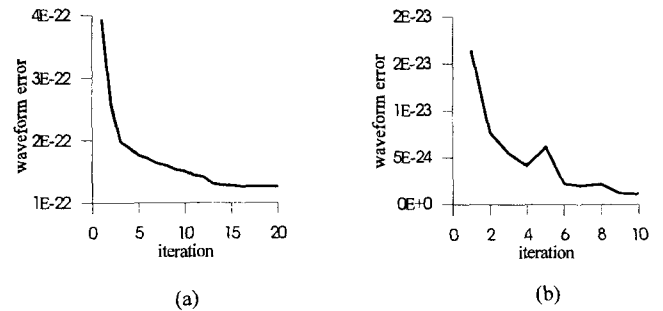
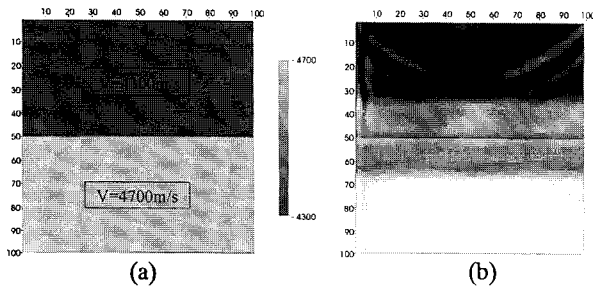
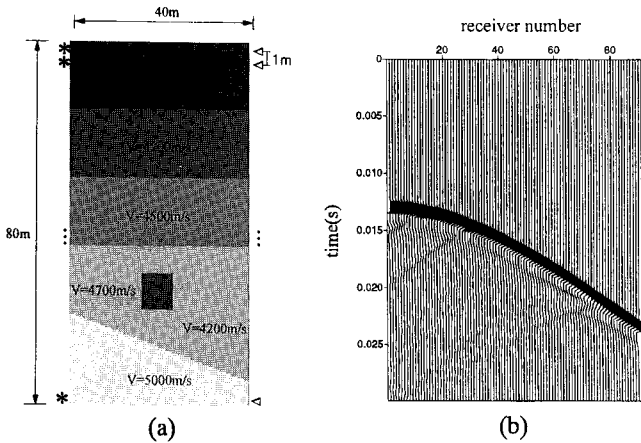


Fig. 4. Waveform error versus iteration for three layer model. (a) waveform inversion with the homogeneous initial guess (b) waveform inversion with the initial from ray tomography



**Fig. 5.** Full-wave inversion for the three layer model (Fig. 7(a)) with two layer initial guess. (a) velocity structure of initial model (b) reconstructed image



**Fig. 6.** An isolated square body embedded in layered model. (a) velocity structure (b) CSP gather for first source

확히 보이기 위하여 Fig. 5(a)와 같이 초기모델을 2층구조로 설정하였다. 20번 반복 역산한 결과, Fig. 5(b)와 같이 각 층의 경계면을 정확히 찾아가는 것을 확인할 수 있었다. 첫 번째 층의 역산결과를 보면 Fig. 2(c)와 같이 원형으로 떨리는 현상이 약하게 남아있는 것을 볼 수 있지만 대체적으로 속도구조를 잘 찾아가는 것을 볼 수 있다.

**고립이상체를 포함한 층서구조**

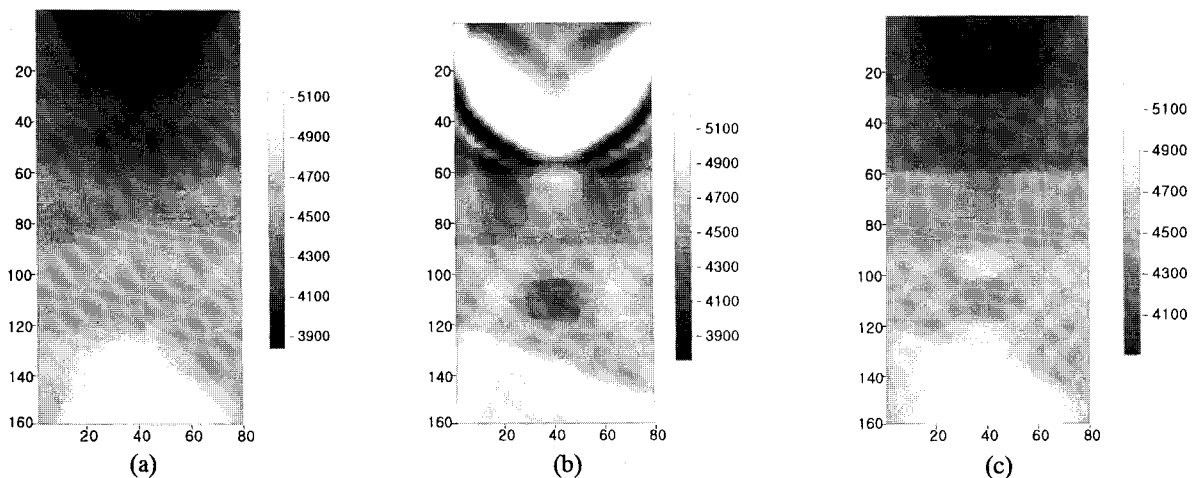
모델의 크기는 가로가 40 m, 세로가 80 m이며 격자간격은 0.5 m이다. 또한 송신원과 수신원은 1 m간격으로 각각 80개이다. 모두 5개의 층서구조와 고립이상체로 되어 있고 각층의 속도들은 Fig. 6(a)에 제시되어 있다. Fig. 6(b)는 첫 번째 송신원에 대한 공통송신점 자료들이다. 각 층들에서의 반사 이벤트들이 보이고 있다.

이 모델에 대한 역산결과는 Fig. 7에 도시되어 있다. 파선 토모그래피의 역산결과인 Fig. 7(a)의 경우 주시토모그래피의 낮은 해상도의 해를 주는 특징으로 각 반사면들은 대략적으로 나타나며 경사면과 고립이상체가 거의 보이지 않는다. 반면에 Fig. 7(b)는 전파형 역산을 수행한 결과로서 이는 어느 정도 해를 찾아가지만 두 번째 층의 해를 찾아가지 못함을 알 수 있다. 이에 반하여 Fig. 7(c)는 Fig. 7(a)의 결과를 초기 추정값으로 주고 완전 파형역산을 수행한 결과이며 이 경우 모든 경계면들과 고립이상체가 명확히 찾아주고 있음을 알 수 있다. 또한 수렴속도와 수렴정도를 확인하기 위하여 두가지 전 파형 역산결과에 대한 파형 오차 값을 Fig. 8에 나타내었다. 그 상대적인 파형오차의 값도 수십 배 이상 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 그리고 수렴 속도도 더 빠르게 수렴하고 있음을 알 수 있다.

**단층구조**

Fig. 9(a)에서와 같이 수직적인 속도변화와 함께 수평적인 속도변화를 갖는 단층구조 모델에 대하여 본 알고리즘을 적용하였다. 모델의 크기, 격자간격 및 송신파형 그리고 송·수신원 간격은 앞의 3층 구조와 같다. 첫 번째 송신원에 대한 공통송신점 자료가 Fig. 9(b)에 나타나 있다.

Fig. 10(a)는 주시토모그래피에 의한 역산 결과이며, 실제 모델에 존재하는 네 개의 경사면 중 세 개의 경사면을 대략적으로 찾아가는 것을 볼 수 있다. 시추공-시추공 배열이라



**Fig. 7.** Reconstructed images for the model shown in Fig. 6: (a) by nonlinear ray tomography, (b) by full-wave inversion with homogeneous initial guess, and (c) by full-wave inversion with the initial guess (a)

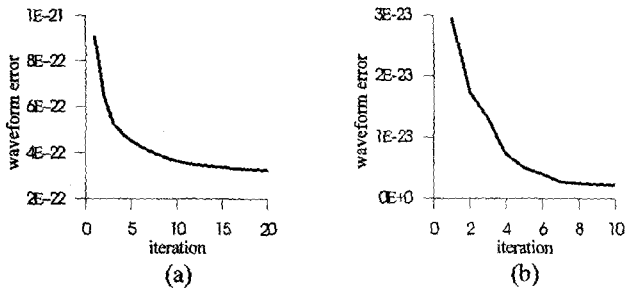


Fig. 8. Plot of waveform error versus iteration for the model shown in Fig. 6(a). (a) waveform inversion with the homogeneous initial guess, (b) waveform inversion with the initial guess from ray tomography

는 송·수신원의 한계 때문에 수직방향의 경사면은 전혀 찾아가지 못하고 있다. Fig. 10(b)는 초기추정값을  $V=4600$  m/s로 균일하게 주었을 때의 전 파형 역산 결과로서, 앞의 층서구조의 역산결과처럼 해의 수렴에 실패하고 있음을 알 수 있다. 반면 파선토모그래피의 결과인 Fig. 10(a)를 초기추정값

으로 주어 전파형 역산을 수행한 결과 Fig. 10(c)를 얻었으며 수직방향의 경사면을 제외한 세 개의 경계면이 명확히 나타나고 있다.

**모형오차(model fitting error)의 비교**

다음으로 파선토모그래피의 역산결과를 초기추정값으로 주어 전 파형 역산을 수행할 때 얼마나 모형오차값이 줄어드는가를 정량적으로 확인하였다. 여기서 모형오차 계산에는 다음의 수식을 사용하였다.

$$E_m = \frac{[x_i - \hat{x}_i]^{1/2}}{[x_i - \bar{x}_i]^{1/2}}$$

$x_i$ : 이론 모형의 속도,  $\hat{x}_i$ : 재구성한 모형의 속도  
 $\bar{x}_i$ :  $x_i$ 의 평균치

앞의 세 가지 모델에 대하여 모형오차값은 Table 1과 같다. 도표로부터 모형오차값을 비교하면, 3층구조 모델의 경우

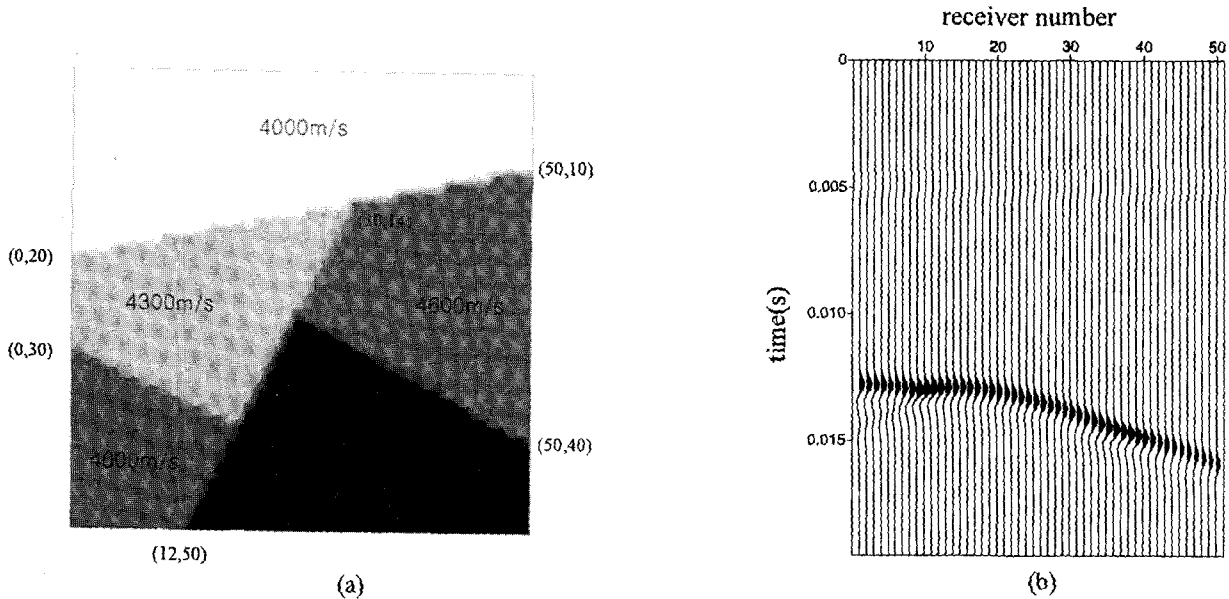


Fig. 9. Fault model. (a) Velocity structure and (b) CSP gather for first source

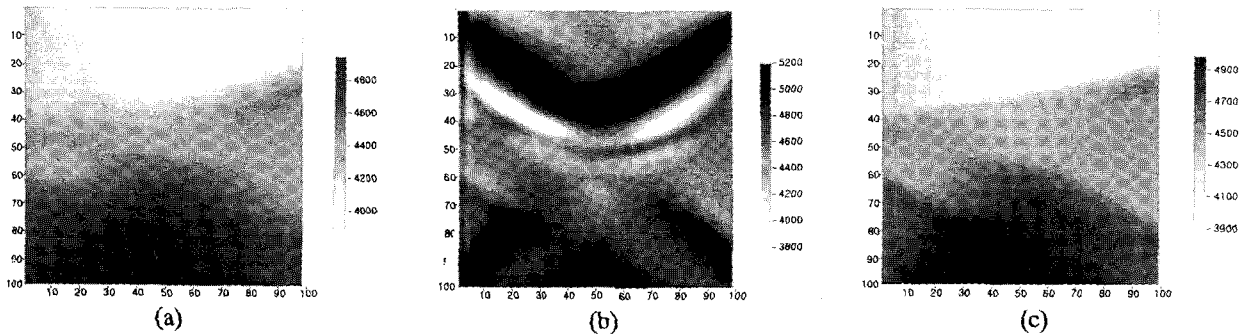


Fig. 10. Fault model and the reconstructed images: (a) by nonlinear ray tomography, (b) by full-wave inversion with the homogeneous initial guess, and (c) by full-wave inversion with the initial guess of (a)

**Table 1. Model fitting error for three models**

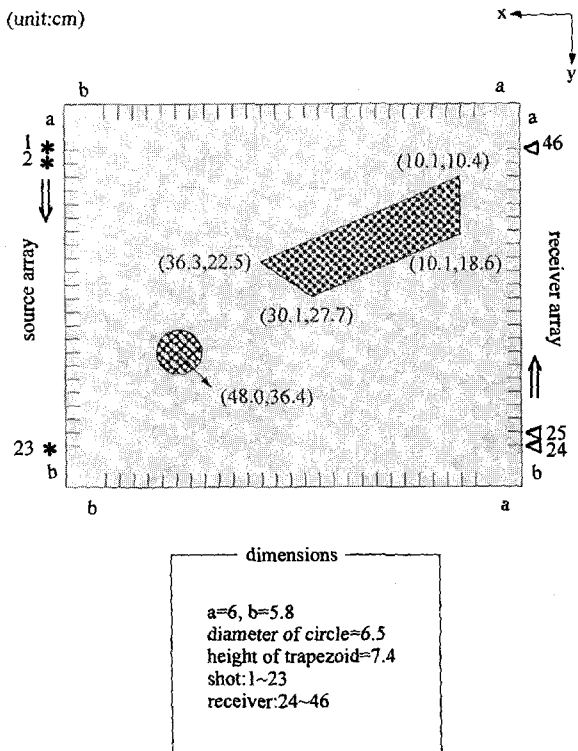
모델	모형오차		오차값의 비
	파선토모그래피 $E_1$	전파형역산 $E_2$	$(1-E_2/E_1) \times 100\%$
3층구조	0.3058	0.2418	20.93%
복합구조	0.3552	0.3032	14.64%
단층구조	0.5039	0.4671	7.30%

파선토모그래피에 비하여 전 파형 역산이 20% 이상 낮은 모형오차값을 가지며, 고립이상체를 포함한 층서구조나 단층구조의 경우 7~15% 정도 낮은 모형오차값을 갖는 것을 알 수 있다.

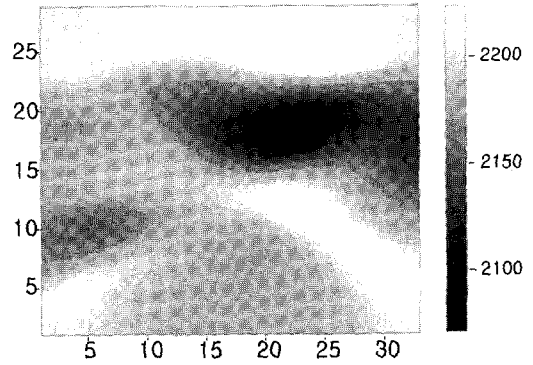
**축소모형실험자료에의 적용**

인공합성 자료에 대한 역산결과 본 알고리즘이 모델오차와 자료오차의 수렴이 뛰어나다는 것을 확인할 수 있었다. 실제 현장자료에 대한 전 파형 역산의 적용성을 검토하기 위하여 축소모형실험자료를 이용하였다.

사용된 모형은 Fig. 11에 제시되어 있으며 축소모형의 재질은 아크릴이며 인위적으로 저속도를 만들어주기 위해 사다리꼴과 원형부분에 천공을 하였다. 모형비가 1000:1 이라는 사실을 고려하면, 모델은 560 m×640 m의 크기와 약 0.46 sec/km의 역속도를 가지고 있으며, 매질내에 약 15%의 사다리꼴 저속도 이상대와 약 21%의 원형 저속도 이상대를 가진다. 송신원 및 수신원은 20 m간격으로 50개씩 4면에 걸쳐 위치하



**Fig. 11. Physical modeling. A measuring procedure is illustrated.**



**Fig. 12. Reconstructed image using ray tomography. This result can be used as the estimation of scale factor and the initial guess model for full-wave inversion.**

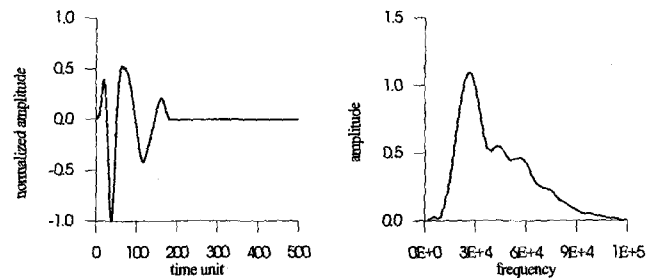
지만(김중렬 등, 1991; 임해룡, 1992) 본 연구에서는 시추공 대신 시추공 배열만 고려하였기 때문에 23개씩만 사용하였다.

Fig. 12는 초동의 도달 시간을 이용하여 파선토모그래피로 재구성된 영상이다. 재구성된 사다리꼴 저속도 이상대의 모양은 수평방향으로 늘어진 결과를 보여주며, 원형저속도 이상대는 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

송신파형으로는 관측자료 가운데 중에서 가장 깨끗한 트레이스를 선택하여 사용하였으며, 송신파형 및 주파수분석 결과가 Fig. 13에 나타나 있다. 주파수 분석 결과 주주파수는 약 30 kHz이며 최대주파수는 약 100 kHz임을 알 수 있고, 이를 통해 유한차분시의 분산조건을 고려하여 격자간격은 0.004m, 측정 시간간격은 1 μs로 정하였다.

Fig. 14는 11번 송신원에 대한 공통송신점 자료이다. 관측자료인 Fig. 14(a)를 보면, 14번 수신원부터 파형이 왜곡되는 현상이 나타나고 있음을 볼 수 있는데 이는 사다리꼴 저속도 이상대에 의한 영향으로 추정된다. Fig. 14(b)는 파선토모그래피의 역산 결과인 Fig. 13의 속도매질에 앞에서 선택한 송신원을 전파시켜 얻어진 계산자료이다. 본 논문에서는 진폭의 크기를 조정하기 위하여 다음과 같이 하였다. 관측자료의 진폭 A-B와 계산자료의 진폭 C-D를 비교하여 그 진폭비를 scale factor로 정하였다. 비교시에 관측자료 중에서 11, 13번 송신원에 대한 공통송신점 자료를 사용하였다.

본 알고리즘을 이용하여 재구성된 속도구조가 과연 타당한가를 검증하기 위하여, 앞에서 선택한 송신파형을 이용해



**Fig. 13. Characteristics of the source. (a) Source used and (b) amplitude spectrum.**

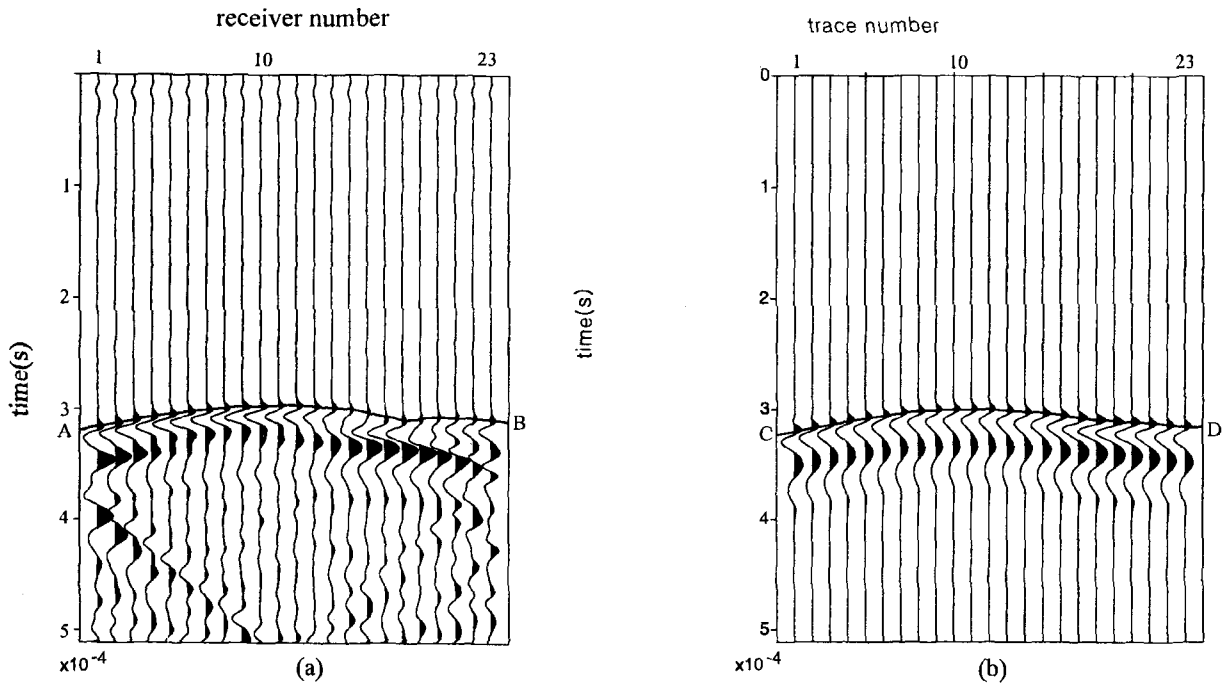


Fig. 14. The estimation of the scale factor. (a) observed seismogram derived from shot 11, (b) synthetic seismogram calculated by FDM

Fig. 15와 같이 수치모델링을 실시하였다. 대략적인 배경속도와 저속도층의 속도 및 위치를 알고 있으므로 Fig. 15(a)와 같이 속도모형을 구성하였다. 11번 송신원에 대한 공동송신점 자료가 Fig. 15(b)에 나타나 있으며 관측자료인 Fig. 16(a)와 비교해보면, 인위적인 반사면에 의한 이벤트를 제외하고 모든 파형이 서로 유사함을 알 수 있다.

송신원으로 선택된 송신파형과 scale factor, 그리고 초기 추정값인 파선토모그래피의 결과를 이용하여 얻은 전파형 역산결과가 Fig. 16(a)에 나타나 있다. 그리고 수치모델링 결과로 얻어진 계산자료로부터 본 알고리즘을 이용하여 재구성한

속도구조가 Fig. 16(b)에 나타나 있다.

본 알고리즘으로 얻어진 역산결과인 Fig. 16(a)를 보면 파선토모그래피에서는 거의 나타나지 않던 원형 저속도 이상대가 더 잘 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만 원형 저속도 이상대의 위치를 정확히 찾지 못하고 있는데 이는 대상체가 송신원 근처에 존재하기 때문인 것으로 생각된다. 수치모델링 결과를 이용한 역산결과인 Fig. 16(b)에서도 역시 원형 저속도 이상체의 위치를 정확히 찾아가지 못하는 것을 보면, 자료질의 문제나 인위적 경계면에 의한 반사파의 영향이 아닌 것을 알 수 있기 때문이다.

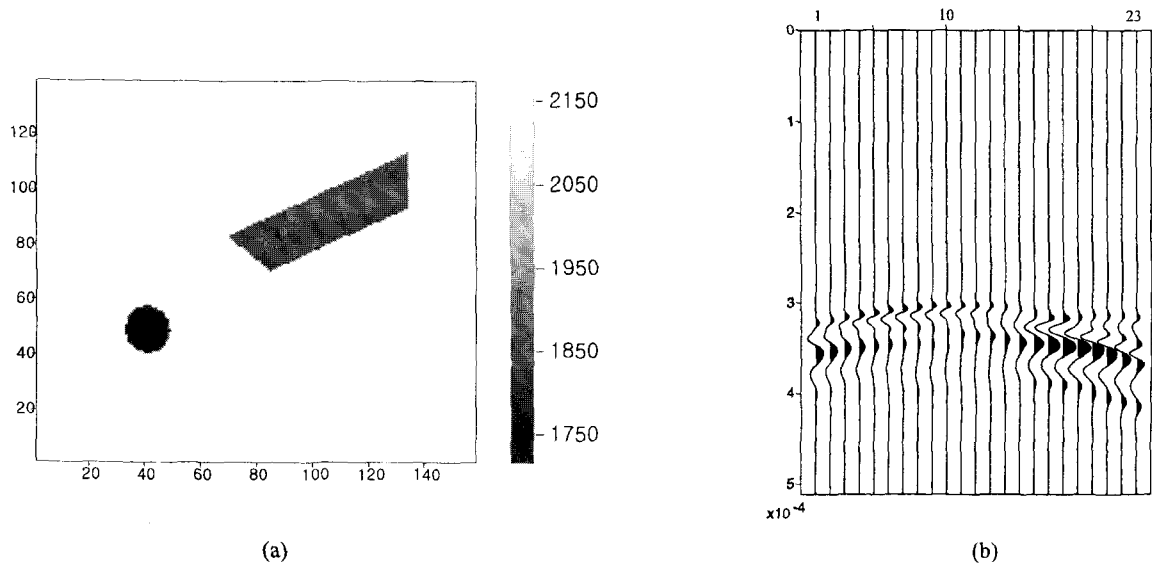


Fig. 15. Verification of full-wave inversion result. (a) Numerical model, (b) CSP gather for source number 11

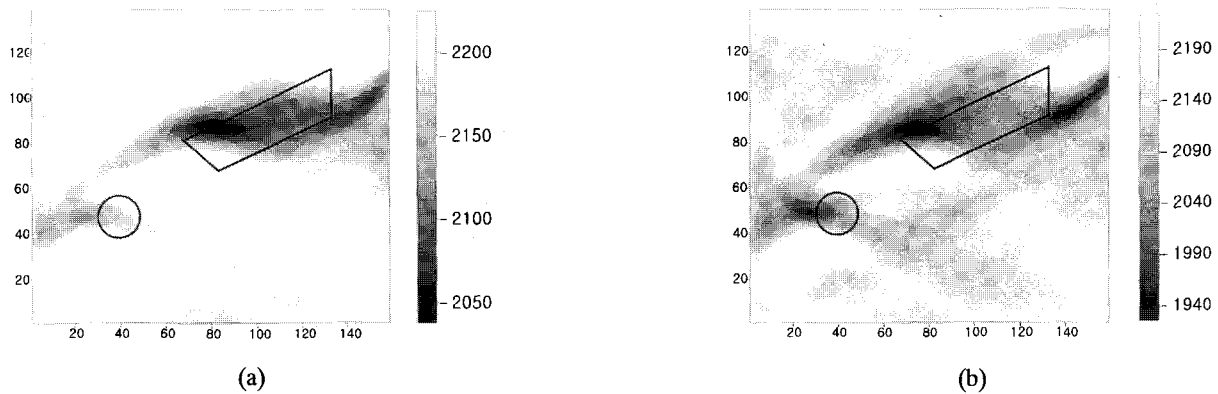


Fig. 16. Reconstructed image using (a) observed data and (b) synthetic data.

## 결론

파형정보를 이용하는 전파형 역산은 국부 최소값에 빠지기 쉬우며 주시역산에 비해 계산시간이 길다는 단점이 있다. 따라서 이러한 국부 최소값문제와 계산시간문제를 효과적으로 해결하는 것이 전 파형 역산에서 매우 중요하다.

본 연구에서는 음파매질에서의 이차원 전 파형 역산 알고리즘을 개발하고 파선토모그래피로 초기추정값을 주어 위의 두가지 문제점을 해결하고자 개발된 알고리즘을 이용하여 유한차분자료와 축소모형실험자료에 적용하여 본 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

(1) 인공합성 자료에 본 논문에서 개발된 알고리즘을 적용한 결과 파선토모그래피에서 얻을 수 없었던 고해상의 역산 결과를 얻을 수 있는 것을 판명되었다.

(2) 또한 모든 모델에 대한 자료오차의 수렴속도는, 초기추정값이 균일한 경우에 비해 파선토모그래피의 결과를 초기추정값으로 주었을 경우가 수렴속도가 세배이상 빠른 것을 확인할 수 있었고 역산시 정확도가 더 높아짐을 알 수 있었다.

(3) 축소모형 실험자료중 가장 깨끗하다고 생각되는 트레이스를 선택하여 scale추정을 하고 본 알고리즘을 적용한 결과, 파선토모그래피에서는 거의 나타나지 않던 원형 저속도 이상대가 잘 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 이를 통하여 현장자료에 대한 적용성을 확인하였다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 앞으로 송신파형 추정이 적절히 이루어진다면 본 알고리즘을 현장자료에 적용이 가능할 것으로 기대되며 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 사사

본 논문을 쓰는데 조언을 아끼시지 않으신 서울대학교 신창수 교수님 그리고 연구 하는데 있어서 많은 토론으로 많은 정보를 제공해주신 서울대학교 물리탐사 실험실원들에게 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 본 연구는 과학재단 특정과제

“탄성과 탐사법에 의한 지하구조 영상화” 연구 지원의 일부 지원을 받았다. 이 기관에 감사한다.

## 참고문헌

1. 김중렬, 현해자, 김기석, 김유성, 성낙훈, 1991, Geotomography에 의한 암반구조 연구(I): 한국자원연구소, 과학기술처 보고서.
2. 김현섭, 1992, 고차근사 유한차분법을 이용한 합성탄성과 기록의 작성: 공학석사학위논문, 서울대학교.
3. 임해룡, 1992, Fermat원리 및 수정된 파선통로를 이용한 비선형 파선토모그래피 연구: 공학박사학위논문, 서울대학교.
4. Dines, K. and Lytle, R., 1979, Computerized geophysical tomography: Proc. IEEE, **67**, 1065-1072.
5. Gauthier, O., Verieux, J. and Tarantola, A., 1986, Two-dimensional nonlinear inversion of seismic waveforms: numerical results: Geophysics, **51**, 1387-1403.
6. Ivansson, S., 1985, A study of methods for tomographic velocity estimation in the presence of low-velocity zones: Geophysics, **50**, 969-988.
7. Lou, Y. and Schuster, G., 1991, Wave-equation travelttime inversion: Geophysics, **56**, 645-653.
8. Mora, P., 1987, Nonlinear two-dimensional elastic inversion of multi offset seismic data: Geophysics, **52**, 1211-1228.
9. Pica, A., Diet, J. P. and Tarantola, A., 1990, Nonlinear inversion of seismic reflection data in a laterally invariant medium: Geophysics, **55**, 284-292.
10. Tarantola, A., 1984, Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation: Geophysics, **49**, 1259-1266.
11. Pratt, R. G. and Worthington, M. H., 1990, Inverse theory applied to multi-source cross-hole tomography. Part 1:Acoustic wave-equation method: Geophysical Prospecting, **38**, 287-310.
12. Zhou, C., Cai, W., Lou, Y., Schuster, G. T. and Hsanzadeh, S., 1995, Acoustic wave-equation travelttime and waveform inversion of crosshole seismic data: Geophysics, **60**, 765-773.