물리탐사
Vol. 5, No. 1, 2002, p. 46~55

모델변수 제약을 통한 주시토모그래피 영상화 향상

조창수[1] · 이희일[1] · 서정희[2]

Enhancement of Traveltime Tomogram Using Block Constraint

Chang Soo Cho[1], Hee Il Lee[1] and Jung Hee Suh[2]

요 약 : 시추공 탄성파 토모그래피법에서 널리 이용되는 주시 토모그래피 역산에 미치는 요소와 영상화 향상을 할 수 있는 기법들에 대하여 살펴보았다. 주시 토모그래피에서 모델변수 값과 모델변수 영역의 크기를 제약함으로써 사전정보에 대한 정보를 모델변수에 설정할 수 있어 영상화를 향상시킬 수 있다. 또한 송신원의 시간지연에 의해 발생되는 영상화 왜곡을 제거하기 위해 지연시간을 모델 변수화하였다.

Abstract : We investigated the distorting factors of velocity structure reconstructed by traveltime inversion. The set of models that fit the data in a numerical sense usually contains unrealistic models. Reconstructed velocity structure was enhanced because unreasonable models were eliminated by defining constraint of variable grid using a priori information. To correct time delay of source explosion, which distorts traveltime tomograms, terms for correction of time delay was formulated into equation of travel time tomography.

Keywords :

서 론

탄성파 토모그래피(Seismic tomography)는 지하구조를 규명하기 위한 물리탐사 방법으로 많은 연구 결과와 현장자료에 대한 적용의 용이성으로 인하여 주시 토모그래피법이 주로 이용되고 있다. 주시 토모그래피는 파선 이론을 기초로 파의 전파시간과 파선의 경로, 파선이 통과하는 매질의 속도와의 관계를 이용하여 대상단면의 속도구조를 영상으로 재구성하게 된다. 주시 토모그래피는 종종 낮은 신호대 잡음비가 문제시되는 경우가 있으며, 이와 같은 낮은 신호대 잡음비를 해결하기 위하여 공간적 평활화(이호영, 1990) 또는 파선 폭의 확장(Myerholtz *et al.*, 1989; 임해룡, 1992)이 이용되기도 하였다. Harlan(1990)은 파동경로(Wavepath)와 동일한 개념을 갖는 Fresnel 영역을 설정하여 이를 이용하여 역산을 시도한 적이 있다. 또한 Fresnel 영역의 면적을 파선으로 나타내고 역산은 SIRT(Simultaneous iterative reconstruction techniques) 방법으로 신호대 잡음비를 해결하는 방법이 연구되었다(조창수 외, 1998). 모델 변수의 크기를 조절함으로써 영상화의 향상을 적용한 경우도 있다(이두성, 1998). 하지만 주시 토모그래피는 그 분해능이 회절토모그래피나 영상화 기법인 구조보정(migration) 기법과 비교하여 한계성을 가지게 된다(Schuster, 1996).

주시 토모그래피의 분해능과 해의 안정성을 위하여 모델변수영역의 기존정보와 모델변수의 크기의 조절과 모델변수에 대한 제약을 통하여 주시 토모그래피의 결과를 향상시키고자 하였다. 일반적으로 송신원의 시간지연에 의한 영상화의 왜곡을 최소화하기 위해 송신원의 시간지연을 모델변수화하여 송신원 지연시간을 제거하고자 하였다. 또한 주시 토모그래피에서 모델변수의 크기와 제약을 할 수 있는 모델 생성 프로그램을 개발하고자 하였다.

마지막으로 본 연구에서 적용된 알고리듬의 현장적용성을 평가하기 위하여 실질 모형과 유사한 이론모형에 대한 연구결과를 살펴보았고, 국내의 철도이설과 관련하여 획득된 시추공 탄성파 자료에 대하여 영상화를 시도하여 고해상의 지하구조 영상을 얻을 수 있었다.

이 론

비선형 주시 토모그래피

주시 토모그래피는 송신원-수신점 사이의 파의 도달시간(t)으로부터 지하매질의 속도분포($s = 1/v$)를 구하는 방법으로 도달시간, 매질의 속도 그리고 파선의 길이(l) 사이에는 다음과

*2001년 12월 3일 접수
1) 한국지질자원연구원 (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)
2) 서울대학교 지구환경시스템공학부

같은 관계식이 성립한다.

$$t = \int sdl(s) \tag{1}$$

위의 지배방정식을 기준 파선 길이 모델($\mathbf{L_0}$)에 대해 Taylor 시리즈를 전개한 후 첫 번째 오차항만을 취하면 다음과 같은 선형문제로 근사 될 수 있다.

$$\mathbf{\Delta t = L_0 \Delta s} \tag{2}$$

(2) 식을 이용하여 주시 잔차 $\Delta\mathbf{t}$로부터 기준 모델 $\mathbf{L_0}$에서의 역 속도 차이 $\Delta\mathbf{s}$를 구하는 반복적 선형 토모그래피를 수행하게 된다. 이러한 반복적인 선형 토모그래피에 있어서 파의 도달시간과 파선의 계산이 필요하다.

송신원에서 수신기까지의 도달시간과 파선경로를 계산하여야하므로 Vidale(1988)의 유한 차분법을 파면 확장법(Wavefront expanding method)으로 개선한 Qin 등(1992)의 알고리듬을 이용하였다. 파면 확장법은 일정한 시간을 설정하고 이들 시간 내에 해당하는 영역 내에서 각 지점의 최소 주시를 찾는 방법이다. 파선 경로는 위에서 얻어진 주시로부터 산출할 수 있으며 이두성(1995)이 제안한 방법(약칭으로 FD-FD 법)을 사용하였다.

일반적으로 식 (2)에서 역속도의 차이, 즉 $\Delta\mathbf{s}$를 구하기 위해서는 방대한 기억장치가 필요하므로 이를 줄이기 위해 SIRT 법과 같은 반복적 역산방법이 적용되고 있다.

L_∞ norm을 취하여 k번째 반복에서 j번째 요소의 역속도를 s_j^k라 하면 도달 시간 오차 Δt_i^k로부터 역 속도 보정치는 다음과 같이 얻게 된다(Dines and Lytle, 1979).

$$\Delta s_j^k = \frac{1}{N}\sum_i \frac{\Delta t_i^k}{L_i} \tag{3}$$

여기서, N_j는 j번째 요소를 통과하는 파선의 개수, L_i는 i번째 파선의 길이를 각각 나타낸다. 일반적인 역산에서는 (3)식을 이용하여 속도 구조를 구할 수 있다. 본 연구에서는 송신원의 지연시간을 보정하기 위하여 k번째 송신원에 의한 i번째 파선의 시간은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$t_i = \sum_{j=1}^{M} l_{ij} s_j + t_{s_k} \tag{4}$$

송신원 지연시간을 구하기 위하여 (4)식을 다시 구성하면

$$t_{s_k} = \Delta t_i = t_i - \sum_{j=1}^{M} l_{ij} s_j \tag{5}$$

(5)식과 같다. 그러므로 해가 수렴한 후의 오차가 바로 송신원의 지연시간에 의한 오차임을 알 수 있다. n번째 송신원에 의한 파선의 수가 n_k개라고 가정하면 k번째 송신원의 지연시

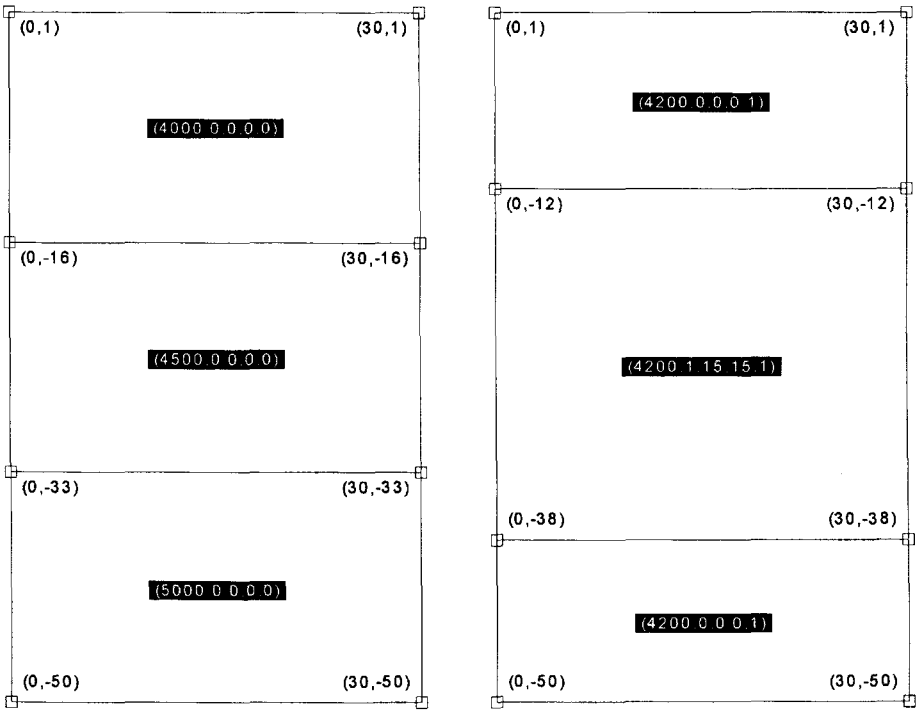

Fig. 1. Model properties of true model (a) and initial model (b) for travel-time tomography. The numbers in parenthesis are represented as velocity, mesh flag, no. of block grid for x-direction, no. of block grid for z-direction, inversion flag. If mesh flag is 1, the block is divided by no. of block grid of x and z direction. Velocity of block can be updated or fixed according to as this flag.

간은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$t_{s_k} = \sum_{i=1}^{n_k} \Delta t_i / n_k \tag{6}$$

통상적인 주시 토모그래피에서는 역산의 매개변수인 역속도의 구조를 동일한 격자구조를 구성하여 역산을 수행한다. 이에 반하여 본 연구에서는 역산 매개변수인 역속도의 모양과 값의 제약을 통하여 역속도의 영상화 구조를 향상시키고자 하였다. Fig. 1(a)에는 합성 주시를 위한 모형을 설정한 것이며 이러한 모형에 대하여 모형의 모양과 값의 제약을 설정하기 위한 그림이 Fig. 1(b)에 보이고 있다. Fig. 1(b)에서 각 블록에는 역산을 위한 블록에 대한 특성을 표시하고 있다. 각 블록의 특성은 (속도, 격자 플래그, 가로 방향의 격자 개수, 세로 방향의 격자 개수, 역산 플래그)로 구성된다.

Fig 1(b)에서 주시 토모그래피를 위한 가운데 블록의 물성을 살펴보면 (4200,1,15,15,1)이다. 속도가 4200 이므로 이 블록의 속도 값을 4200 m/s로 설정한다는 것이다. 격자 플래그가 1이면 블록의 가로방향의 최대좌표에서 최소좌표를 뺀 길이에 대하여 가로방향의 격자로 나누고 세로방향의 최대좌표에서 최소좌표를 뺀 길이에 대하여 세로방향의 격자 격자로 나누어 이루어진 작은 여러 개의 블록으로 분할한다는 것을 의미한다. 만약에 격자 플래그가 0이면 이 블록을 한 개의 블록 변수로 설정한다. 가로 방향의 격자 개수는 앞에서 설명한 것처럼 블록의 가로방향의 최대좌표에서 최소좌표를 뺀 길이에 대하여 가로방향의 격자로 나누는 것이다. 세로방향의 격자 개수는 가로방향의 격자 개수와 동일한 방법이 적용된다. 역산 플래그는 앞에서 설정된 블록들을 이용하여 역산할 때 각 블록들을 제약하는 것으로 1이면 각 블록의 속도 값을 역산 반복시 변화시키는 것이고 0이면 블록의 속도 값을 역산 반복시 고정시켜 각 블록을 제약한다.

모형 실험 및 현장자료 적용

주시 토모그래피에서 발생할 수 있는 영상화의 왜곡과 역산 매개변수의 설정에 의한 영상화 향상에 대하여 알아보았고 송신원 지연시간에 의한 영상화 왜곡과 지연시간 보정에 대하여 살펴보았다. 알고리듬의 현장적용성을 평가하기 위하여 실질 모형과 유사한 이론모형에 대하여 연구결과를 살펴보았고, 현장자료에 대하여 영상화를 시도하였다.

경사지층구조

속도 대비와 속도 구조에 따른 주시 토모그래피 알고리듬의 검증을 위하여 Fig. 2(a)와 같이 쐐기 모양 및 경사지층으로 이루어진, 그리고 각 층의 속도가 1500 m/s, 2500 m/s, 3500 m/s인 모델을 설정하였다. 주시 모형반응 계산을 위한 속도 구조의 크기는 수평으로 0 m에서 30 m이고 수직으로는 -1 m에서 51 m이다. 이러한 속도 구조에 대하여 송신원의 기하학적 배열은 수평방향으로 0 m 위치에 두고 수직으로 1 m에서 49 m

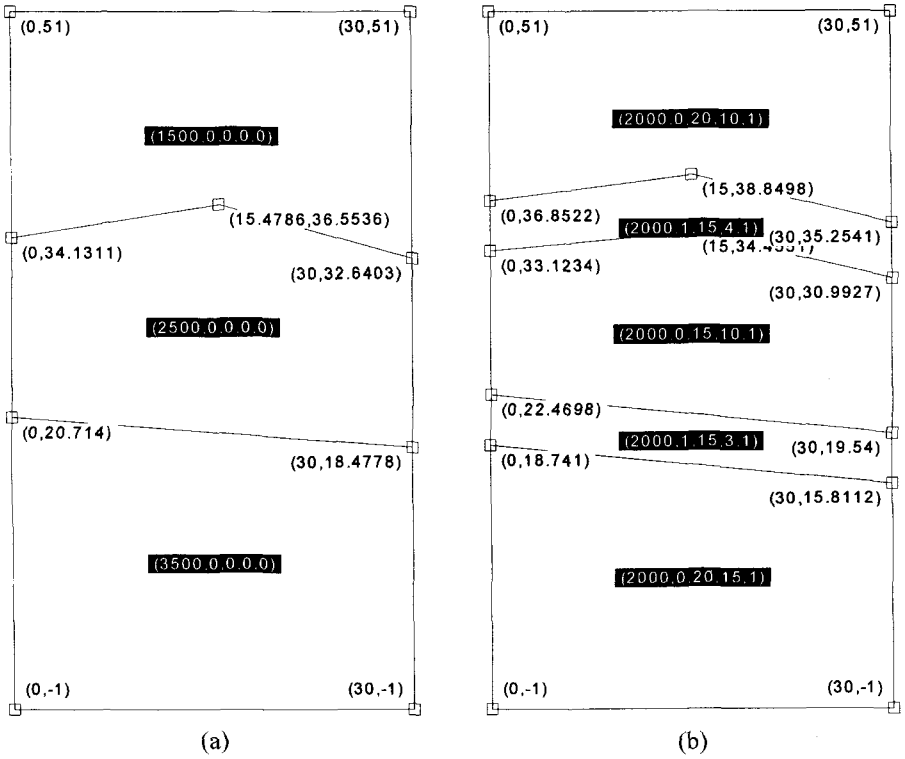

Fig. 2. True Velocity structure (a) and initial velocity structure (b) of variable grid. Variable grid is designed to reduce region distortable.

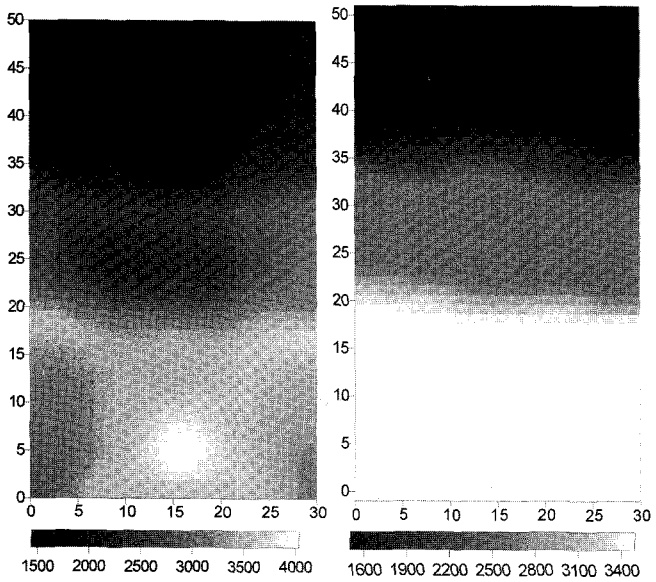

Fig. 3. Inversion result (b) of variable grid of Fig. 2(b) is much better than that of conventional grid (a).

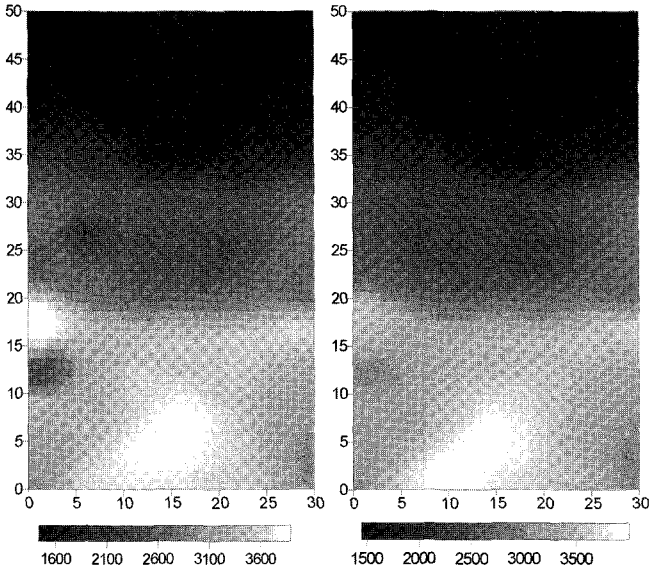

Fig. 4. Result of inversion (a) is fulfilled with conventional grid under delay time (2 ms) of source position (12 m, 25 m, 34 m). And result of correction of source delay time (b) is shown. Correction of delay time is adjusted until 20 iterations after 10 iterations.

까지 1 m 간격으로 49개를 설정하였다. 각 송신원에 대하여 수진기의 배열은 수평으로 30 m 위치에 수직으로 1 m에서 49 m까지 1 m 간격으로 49개를 설치하였다. 주시의 계산은 Qin 등의 파면 확장법(1992)을 이용하였다.

모델을 크기가 일정한 격자(1.5 m × 1 m)로 나누고 초기 속도값을 2000 m/s으로 가정하고 계산한 역산결과가 Fig. 3(a)이다. 그림에서 속도 구조가 재구성되지 못함을 알 수 있는데, 이는 커버리지가 부족한 공간에서의 왜곡이 재구성을 해야하는 다른 속도 구조에 영향을 미치고 있다는 것을 반영한다. 주시 토모그래피에서는 일반적으로 수평거리의 1/2인 수직 영역의 최상부와 최하부 영역에서 이러한 왜곡은 심하게 나타남을 알 수 있다. 주시 토모그래피에서 커버리지가 부족한 영역의 문제는 공간 연산자나 가중치를 통하여 극복하는 방법(하희상, 1993; 조창수 등, 1998)으로 어느 정도 극복할 수 있으나 커버리지 영역의 문제를 완전히 해결할 수는 없다.

영상의 왜곡을 줄이기 위하여 Fig. 2(b)와 같이 매개변수를 설정하여 역산한 결과를 Fig. 3(b)에 나타낸 것이다. 매개변수 설정에서 상부 영역과 하부영역 그리고 가운데 영역을 하나의 블록으로 설정하고 경계면에서는 격자 구조를 구성하였다. 그리고 주시 토모그래피의 초기치에 대한 수렴성을 살펴보기 위하여 속도 값을 동일하게 2000 m/s로 설정을 하였다. 역산의 결과는 속도 값과 구조면에서 상당한 향상이 이루어졌음을 알 수 있다. 그림 (a)와 같이 상·하부의 왜곡이 일어날 수 있는 부분은 매개 변수 블록화를 이용하여 역산의 왜곡을 줄이고자 하였다. 커버리지가 부족한 영역의 왜곡을 줄임으로써 그림 (b)와 같이 분해능이 향상된 역산 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 중앙의 구조 경계면 부근에서 속도구조의 재구성은 제대로 이루어지지 않아 여전히 영상이 왜곡되어 나타남을 알 수 있다. 이러한 왜곡은 주시 토모그래피 분해능의 한계인 것으로 사료된다.

송신원 지연에 의한 효과를 살펴보기 위하여 Fig. 4(a)는 Fig. 2(a)의 속도 구조에 의하여 계산되어진 주시에 12 m, 25 m, 34 m 지점의 송신원에 대해 2 ms의 지연 시간을 주고 Fig. 3(a)와 동일한 조건하에서 계산된 결과를 나타낸 것이다. 송신원 지연에 의한 영향이 송신원 부근에서 뚜렷이 관찰되는 것을 알 수 있다. 특히 고속도 층의 송신원 부근에서 왜곡이 더 심하게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 고속도로 인하여 시간지연에 의한 주시와 실제 주행주시의 비율이 상대적으로 높기 때문이다. 송신원 지연 문제는 일반적으로 이러한 현상을 보이지는 않지만 본 연구에서는 송신원의 지연에 따른 영향을 살펴보기 위하여 위와 같이 설정하였다.

주시 역산시 송신원 지연을 감안하기 위하여 속도구조에 대한 역산만 10번 수행한 후 송신원 지연 보정을 20번까지 수행하였을 때의 결과가 Fig. 4(b)이다. 지연보정을 하지 않은 역산 결과와 비교하여 송신원 지연시간에 의하여 발생한 왜곡이 송신원 부근에서 상당히 제거되었음을 알 수 있다.

블록설정을 Fig. 2(b)와 같이 설정하고 송신원에서 시간지연을 포함한 자료에 대하여 역산한 결과를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 그리고 그림 (b)는 송신원 지연 보정 역산을 Fig. 5(b)와 동일하게 적용하였을 때의 결과를 보여준다. 역산 결과를 살펴보면 영상화에서는 뚜렷한 송신원 지연에 의한 영향을 보여주지는 않고 있다. 송신원의 시간지연에 의한 오차는 매개변수 블록을 크게 설정함으로써 그 영향이 감소한 것으로 보인다. 이 같은 결과로 볼 때 블록설정에 의하여 송신원 지연에 의한 영

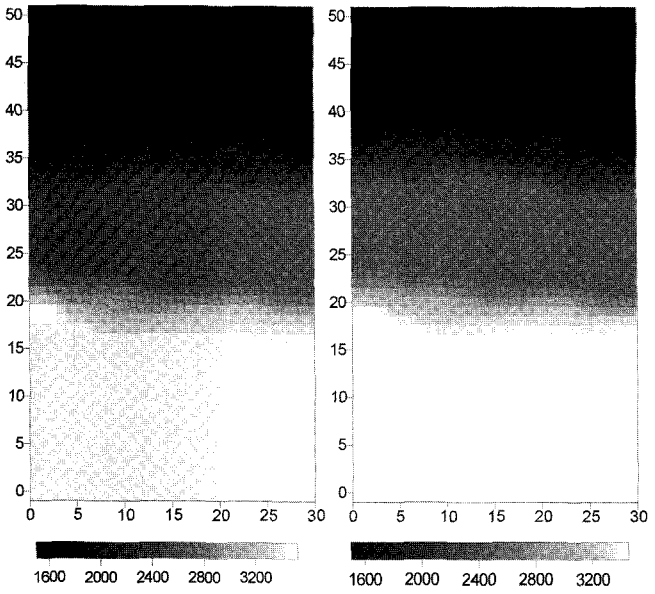

Fig. 5. Result of inversion (a) is fulfilled with variable grid of Fig. 2(b) under delay time (2 ms) of source position (12 m, 25 m, 34 m). And result (b) of correction of source delay time for (a) is shown. Application of Correction of delay time is the same to Fig. 4(b).

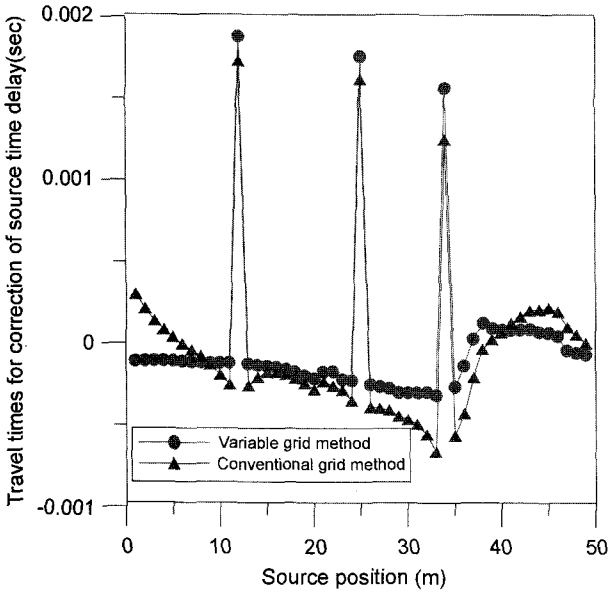

Fig. 6. Delay times of source correction using inversion of conventional grid and variable grid of Fig. 4(b) after iteration no. 20 are shown. Time of delay of inversion of variable grid is more exact than that of regular grid.

향을 어느 정도 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

송신원 지연시간 보정역산을 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)처럼 하였을 때 각 송신원 지연시간을 도시한 것이 Fig. 6이다. 그림에서 보여지듯이 송신원 지연시간의 역산도 일반적인 격자 구조를 이용한 방법보다 블록설정을 이용한 역산시 더 정확하게 나타남을 알 수 있다. 지연시간이 있는 송신원 이외의 송신원

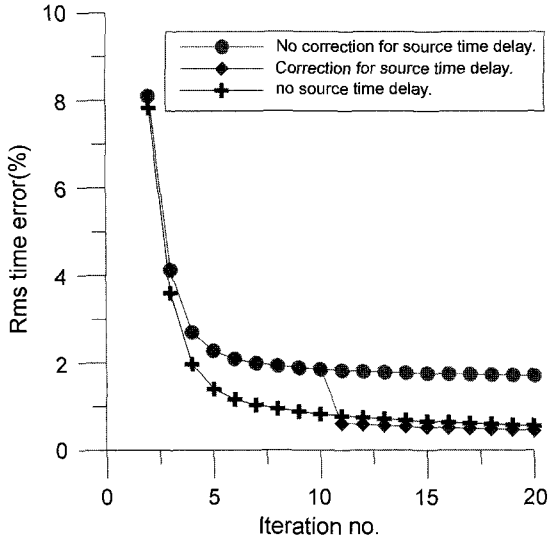

Fig. 7. Each Curve of RMS time error is calculated for Fig. 3(b) and Fig. 5. Conversion of RMS time error in case of correction of time delay after iteration no. 10 is similar to that of no inclusion of delay time.

주시는 역산에서 속도구조를 재구성하여야하는 잔차를 나타낸다. 역산시 송신원 시간보정에 의하여 오차를 발생시키는 요인이 될 것이다. 그러나 이들의 주시 잔차는 전체 주시에 비하여 그 오차는 매우 적다고 할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 2(b)처럼 매개변수를 설정하였을 때 역산에 따른 주시오차를 도시한 것으로 관측된 자료에 대하여 주시잔차를 RMS(Root Mean Square)로 계산하여 백분율(%)로 표시한 것이다. 역산의 반복 횟수가 진행함에 따라 송신원 지연시간이 있는 경우의 오차는 어느 정도 수렴한 이후 오차가 더 이상 줄어들지 않음을 알 수 있다. 이에 비하여 송신원 지연시간이 없는 경우 오차의 수렴이 상당한 수준까지 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그리고 송신원 지연시간 보정 역산을 수행 할 경우 보정 전까지는 오차가 어느정도 수렴한 이후에 더 이상 수렴을 하지 않다가 보정이 수행된 이후에는 오차가 송신원 지연시간이 없는 경우처럼 급격히 수렴하는 것을 볼 수 있다.

위의 결과들을 토대로 볼 때 주시 역산시 초기치 속도에는 둔감하지만 역산 블록의 설정은 역산의 결과에 상당한 영향을 주는 것을 알 수 있다. 주시 역산의 결과를 향상시키기 위해서는 일반적인 격자 방식을 이용한 역산 결과의 정보와 다른 사전 정보를 이용하여 역산 블록의 격자를 구성하는 것이 필요하다. 또한 매개변수 블록설정을 통하여 송신원 시간지연에 의한 왜곡을 줄일 수 있음을 알 수 있고 시간 지연 보정을 통하여 영상화를 향상시킬 수 있었다.

복잡한 구조에 대한 적용

실제 지층구조와 유사한 모형을 이용하여 알고리듬의 유용성을 현장 적용 측면에서 평가하고자 하였다. 실제 지하구조와

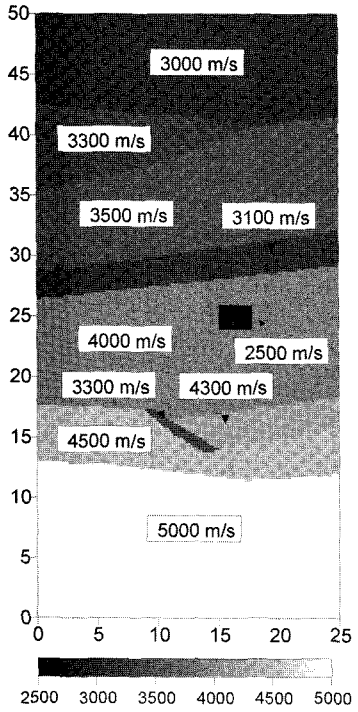

Fig. 8. Theoretical model similar to real velocity structure. Fracture and cavity are included.

유사한 구조를 구현하기 위하여 파쇄대와 공동, 석탄층과 같은 얇은 속도층, 풍화대라 생각되는 상부층, 그리고 하부층의 기반암 등을 고려하여 속도구조 모형을 설정하였다(Fig. 8).

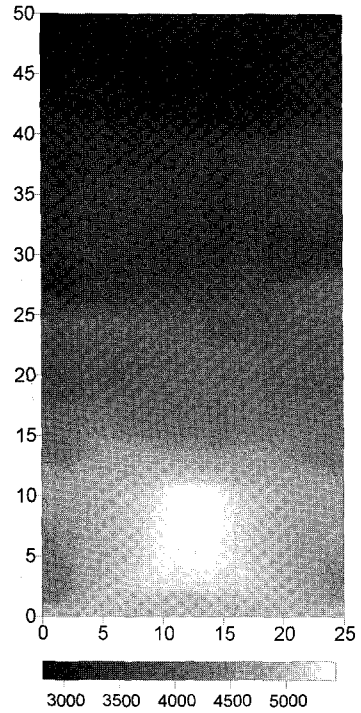

Fig. 9. Tomogram of travel time inversion using conventional grid. Observed travel times were picked from synthetic waveform.

모형 반응계산시 송신원은 (0 m, 1 m)에서 (0 m, 49 m)까지 2 m간격으로 25개를, 수진기는 (25 m, 1 m)에서 (25 m, 49 m)까지 1 m간격으로 49개가 배열되어 있는 것으로 가정하였으며 송신파형은 주 주파수가 600 Hz인 리커파형을 사용하였다. 초동은 합성탄성파로부터 발췌하였다.

속도 매개변수 격자 크기를 1x1 m로 설정했을 경우의 주시 역산 결과가 Fig. 9에 보여진다. 그림에서 중앙부근의 저속도층의 경우 크기가 원래보다 크게 나타나며 상부의 속도구조로의 침입현상을 보이고 있다. 그리고 하부의 파쇄대 모형은 결과에서 거의 나타나지 않음을 알 수 있는데 이는 분해능의 한계로 인하여 파쇄대 주변의 속도보다 약간 낮은 영역으로 나타난다. 공동의 모형의 경우 공동의 존재인지 아니면 상부의 저속도 층의 영향인지 구별이 되지 않는다.

통상적인 주시 역산결과인 Fig. 9를 토대로 매개변수를 설정하여 나타낸 것이 Fig. 10이다. Fig. 9에서 하나의 블록으로 해석할 수 있는 영역은 하나의 매개변수로 설정하였고 경계면에 대한 정보를 얻는 영역에 대하여는 세분화하여 격자들로 나누었다.

주시역산 결과인 Fig. 11은 Fig. 10의 매개변수를 사용하여 얻은 것이다. 주시역산을 한 결과는 Fig. 9에서 잘 보이지 않

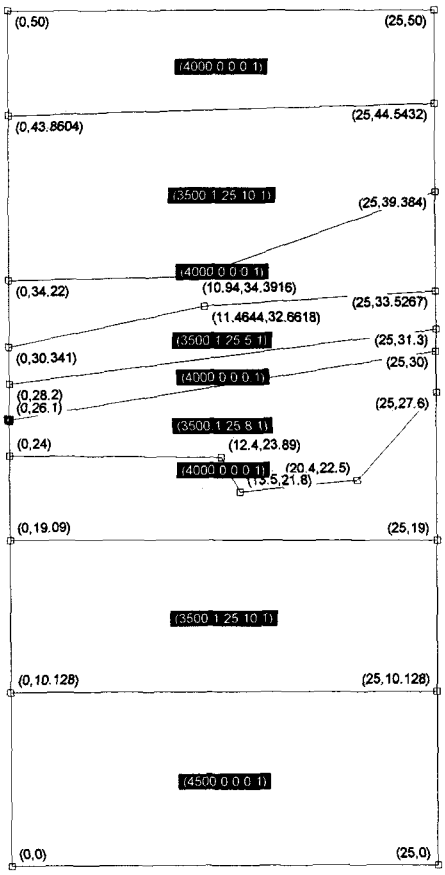

Fig. 10. Variable grid is set up based on the tomogram shown in Fig. 9.

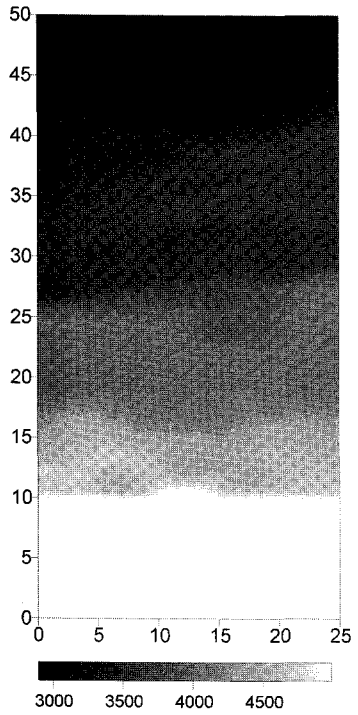

Fig. 11. Tomograms of travel time inversion with a starting model shown in Fig. 10.

던 하부의 경계면이 조금씩 나타나 보이고 상부의 경계면도 앞서의 결과와 비교하여 나아졌음을 알 수 있다. 그러나 여전히 파쇄대와 공동의 존재는 모호하며 중앙의 저속도 층의 왜곡은 여전히 나타나고 있다. 이러한 영상화의 왜곡에 미칠 수 있는 요소를 살펴보면 초동의 발췌에서의 오차와 영상화의 기하학적 배열과 분해능의 한계 그리고 커버리지의 부족이 될 것이다.

현장자료의 적용과 고찰

본 연구에서 적용된 알고리듬의 현장자료에 대한 적용성을 평가하기 위하여 영동선 철도이설 건설공사구간의 터널 시공 예정 지역에서 얻은 탐사자료에 대하여 적용하여 보았다. 이 지역에서 자료를 획득하기 위한 장비로는 독일 DMT사의 48 채널의 기록장비를 사용하였으며, 샘플 갯수와 샘플링 시간은 각각 1024, 0.03125 ms(1/32 ms)이다. 송신원은 특수제작된 뇌관을 사용하였고 수진기는 하이드로폰을 사용하였다.

효율적인 현장자료처리를 자료로부터 초동을 발췌한 후 주시역산을 하였다. 주시 역산의 결과를 토대로 구조보정(migration)을 하여 이벤트면과 토모그램의 경계를 이용하여 1차적인 해석을 유도한다. 그 다음 이 결과를 토대로 블록을 이용한 주시 토모그래피를 수행하여 더 좋은 역산 결과를 도출하고자 하였다.

현장에서 취득된 시추공의 기하학적 배열을 살펴보면 송신부의 깊이는 지표면에서부터 179 m이고 수신부의 깊이는 178

Table 1. Data acquisition geometry.

	Array 1	Array 2	Array 3	Array 4	Array 5
Source	126~179 m	93~145 m	57~108 m	25~71 m	13~31 m
Receiver	131~178 m	98~145 m	61~108 m	24~71 m	1~47 m

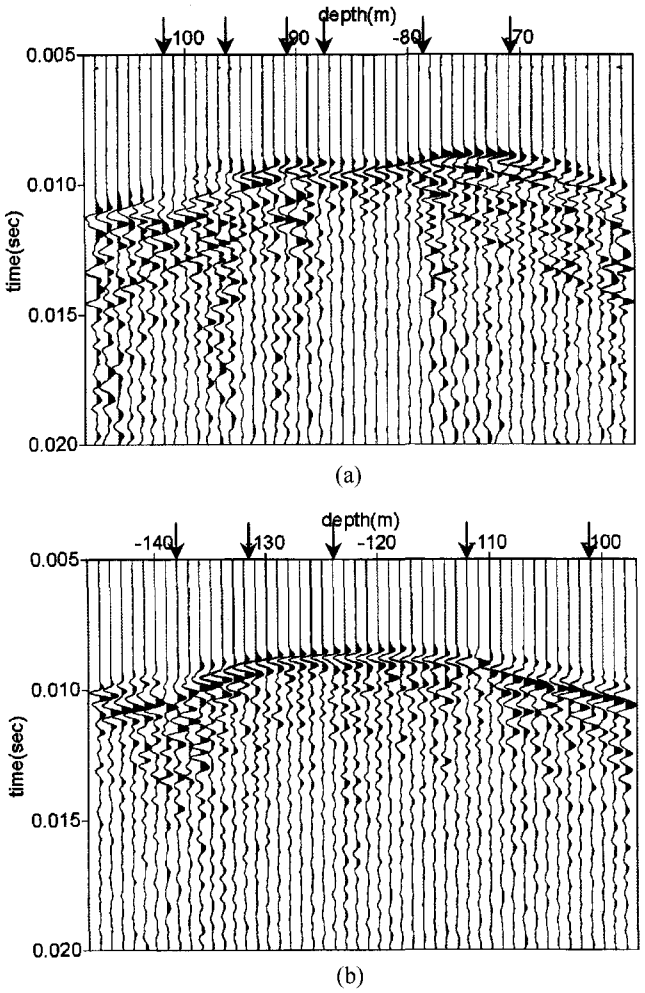

Fig. 12. Common shot gather for source position of −80 m (a) and −120 m (b). Arrows indicated anomalous parts.

m이며 시추공 사이의 거리는 39 m이다. 이러한 시추공의 기하학적 모양에 대하여 총 5번에 걸쳐서 수진기를 움직여서 전체영역에 대한 자료를 취득하였다. 자료 획득을 위한 송 · 수신 배열은 Table 1과 같으며 각 배열에서 송신원과 수진기는 모두 1 m간격으로 하였다. 본 연구에서는 얻어진 자료 양이 많아서 이 중에서 일부분인 배열 2와 3만을 사용하여 자료처리를 하고자 하였다.

Fig. 12(a)는 지표면에서 −80 m인 위치에서 송신원을 발생시켰을 때 지표면에서 −61~−108 m 구간에서 수신한 자료를 트레이스별로 정규화(trace normalization)하여 나타낸 것이다. 그림에서 −96~−102 m 구간에서는 초동파의 진폭이 다른 구간에 비해 상대적으로 작게 나타나 있으며, −76~−108 m 구간

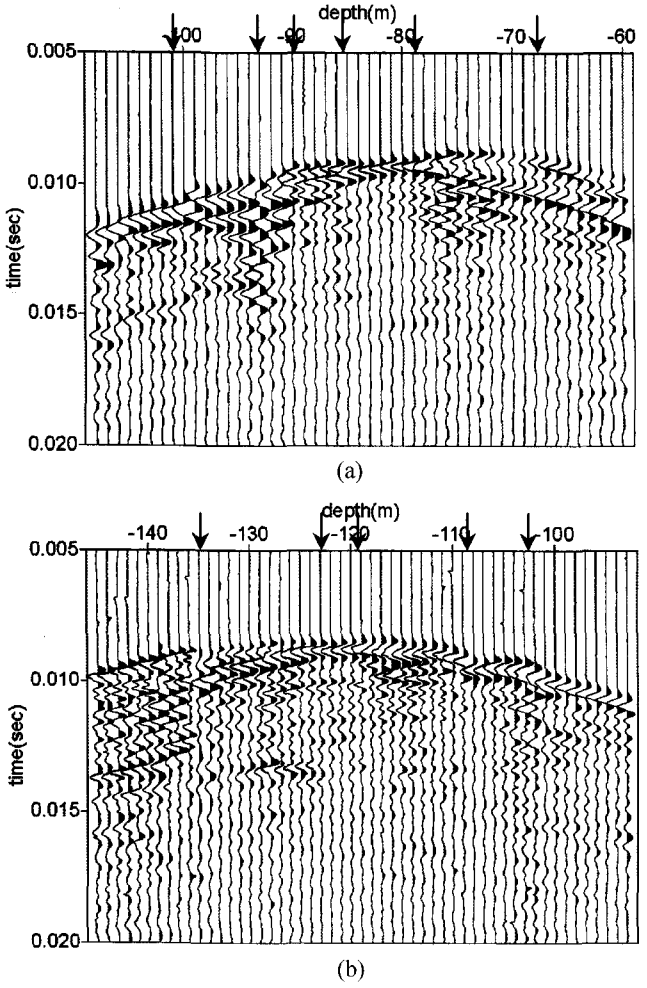

Fig. 13. Common receiver gather for receiver position of −80 m (a) and −120 m (b). Arrows indicated anomalous parts.

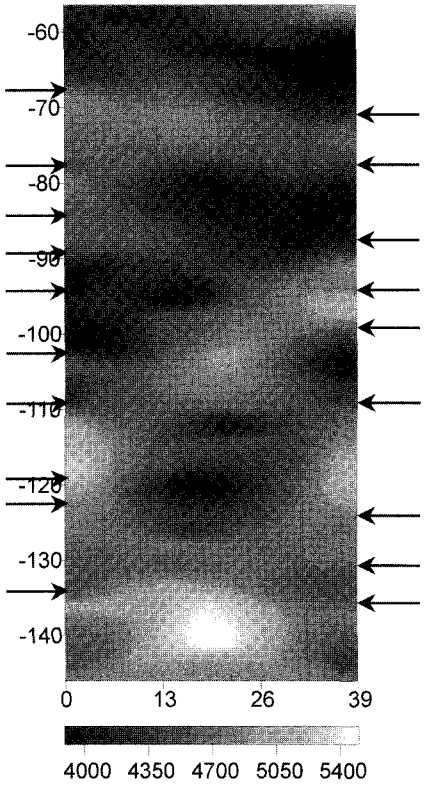

Fig. 14. Travel time tomogram with conventional grid after 20 iterations. Arrows was shown in Fig. 12 and Fig. 13.

에는 초동파에 이어 강한 반사파가 나타남을 알 수 있다. 또한 약 −90 m 위치에서부터 −60 m 구간에도 반사 이벤트가 존재하는 것으로 보아 대략 −90 m 위치와 −76 m 위치에 반사면이 존재하는 것으로 보인다. Fig. 12(b)는 지표면에서 −120 m 위치에서 송신원을 발생시켰을 때 지표면에서 −98~−145 m 구간에서 측정한 기록을 정규화하여 나타낸 것이다. 그림에서 수진기위치 −110 m와 −138 m인 곳에 이상대가 존재하는 것으로 보인다. Fig. 13(a)는 수진기 위치 −80 m에서 모든 송신원에 대한 기록을 정규화하여 나타낸 탄성파 기록이다. 자료를 이와 같이 도시하는 이유는 송신원이 지연시간을 갖는지를 조사하기 위한 것으로 지연시간이 존재하는 자료는 다른 자료보다 들쑥날쑥하게 된다. 그러나 위의 자료들을 살펴보면 송신원의 지연시간은 거의 없는 것으로 사료된다. 송신원이 −99 m인 기록은 다른 송신원 자료보다 빠른 시간에 파형이 발생하여 송신원 지연시간이 있는 것으로 사료되었으나 다른 수진기의 위치에서 살펴보았을 때 이의 지연시간은 없었다. 공통 수진점 자료인 Fig. 13(a)에서 이상대를 살펴보면 −90 m와 −80 m에서 이상 신호가 보이고 있고 −100 m와 −70 m 위치에서도 이상대가 존재하는 것으로 보인다. Fig. 13(b)는 −98~−145 m 구간에서 발생시킨 탄성파 신호를 지표면으로부터 −120 m 지점에서 측정한 기록으로, −135 m, −125 m 그리고 −108 m 지점에서 이상신호를 관찰할 수 있다.

Fig. 14는 대상구간을 수평으로 2 m 그리고 수직으로 1 m의 격자를 구성하여 초동 발췌한 자료를 역산하여 얻은 토모그램이다. 역산 결과에서 앞서 살펴본 공통 수신점과 공통 송신원 기록에 도시한 화살표의 위치와 토모그램에서 시추공 주변에서 속도 값의 변화가 있는 위치가 일치하는 것을 볼 수 있다.

튜브파(tube wave)는 구조보정에서 영상을 왜곡시키므로 앞서의 기록에 도시된 공통 수신점에서 보이는 튜브파는 제거되어야 한다. 본 연구에서는 튜브파를 제거하기 위하여 경사필터를 적용하였다. 그리고 기록된 자료를 살펴보면 주파수 대역이 300~3000 Hz에 존재하므로 그 이외의 주파수 성분은 필터링을 하여 제거하였다.

자료처리를 수행한 후에 Fig. 14의 토모그램 속도를 이용하여 시추공 Kirchhoff 구조보정을 수행한 단면과 토모그램으로부터 반사 이벤트 면을 해석한 결과가 Fig. 15이며, 시추코어로부터 산정한 RQD(Rock Quality Designation)를 함께 도시하였다. 시추결과에 의하면 본 조사구간에 존재하는 암석은 대부분 사암으로 심도별로 사질 세일, 흑색 세일, 석회암등이 국

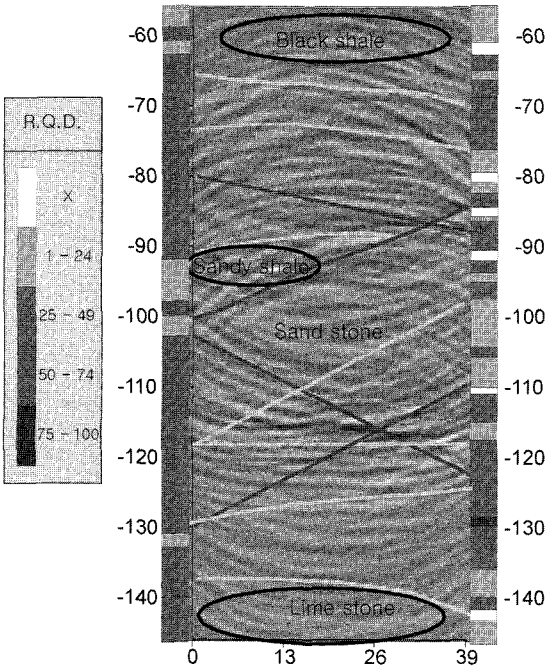

Fig. 15. Event lines are extracted from migration image and tomogram of Fig. 14 and RQD of bore hole. Yellow lines may be boundary of layers and green lines may be fractures and red line may be fault.

부적으로 존재하는 것으로 판명되었는데 시추 자료를 토대로 시추공에 암석의 존재 영역을 표시하였다. 이들 영역은 반사 이벤트와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 사질 셰일 영역은 속도값으로 보아 보통암으로 판단되며 다른 영역에 비하여 저속도 값을 보인다. 송신원 시추공 –108 m 위치에서부터 수진기 시추공 –88 m 지점까지 선형적으로 나타나 있는 이벤트가 단층인 것으로 판단된다. 그리고 –66 m 부근에서는 흑색 셰일이 존재하는데 이의 속도 값은 약 4200 m/s인 것으로 판단된다. 그리고 –135 m 하부에는 석회암이 존재하는데 이 영역에서는 기록상에서 신호특성이 고주파이고 속도값이 높은 것으로 보아 경암인 것으로 사료된다.

이상의 해석 결과를 토대로 모델의 상하부 영역과 Fig. 14의 토모그램에서 하나의 영역이라고 생각되어지는 부분을 Fig. 16처럼 영역으로 구분하였다. 이와 같이 설정한 격자 영역을 이용하여 주시역산을 20번 반복한 후 얻어진 결과가 Fig. 17(a)이다. Fig. 14와 비교하였을 때 전체적으로 역산 결과에 있어 이상체간의 대비가 더 나음을 알 수 있다. Fig. 15에서 –110 m와 –120 m 사이의 가운데 구간에서 보여지는 3개의 이벤트의 크기를 살펴보면 가운데 이벤트보다 하부의 이벤트가 크게 보인다. 이는 이상체간의 속도대비가 크기 때문에 생기는 것으로 이는 Fig. 17(a)의 토모그램에서도 하부에서 이벤트라고 생각되는 부분의 속도대비가 크다. 두 토모그램에서 그 외의 영역은 큰 차이를 보여주지는 않는다.

앞의 해석 결과를 토대로 만들어진 격자구성에 대하여 송신

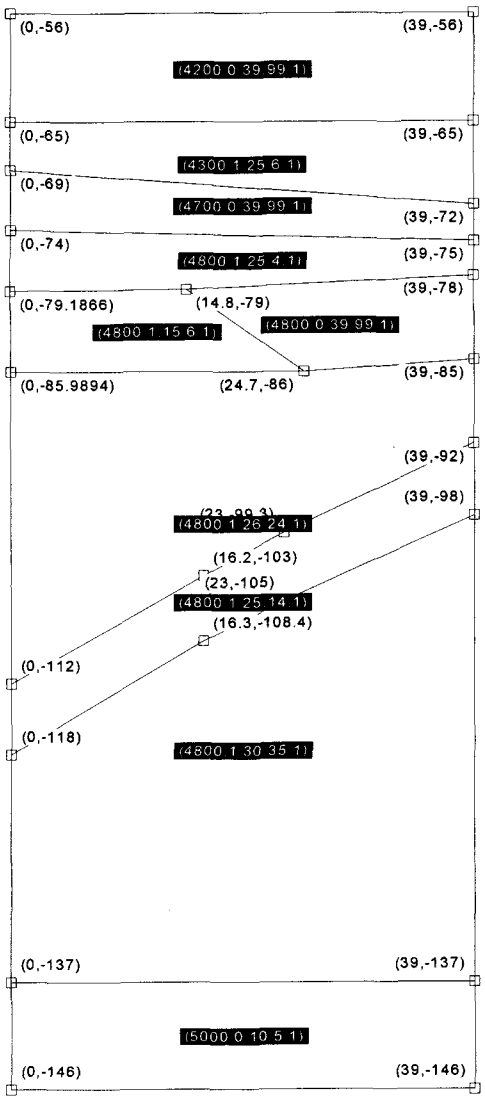

Fig. 16. Variable grid is set up from migration image of Fig. 15 and tomogram of Fig. 14.

원 지연시간 보정을 실시한 결과가 Fig. 17(b)이다. 영상화의 결과는 송신원 지연시간 보정전에는 송신원 근처에 국부적으로 이상대를 보였던 부분들, 특히 –108 m 부근과 –92 m 부근의 국부적 이상대가 어느 정도 제거되어 있음을 알 수 있다.

결 론

지하구조물의 위치선정과 지반조사 등에 널리 활용되고 있는 시추공 간 탄성파 탐사에서 고분해능의 지하구조 영상을 얻을 수 있는 주시 토모그래피법은 커버리지 등의 문제로 인하여 영상화 왜곡이 발생한다.

이 연구에서는 모델변수의 크기와 값을 제약하여 영상화에서 발생하는 왜곡을 줄일 수 있었다. 또한 모형설정 프로그램을 개발하여 모형변수의 크기와 제약에 편의를 도모하였다. 토

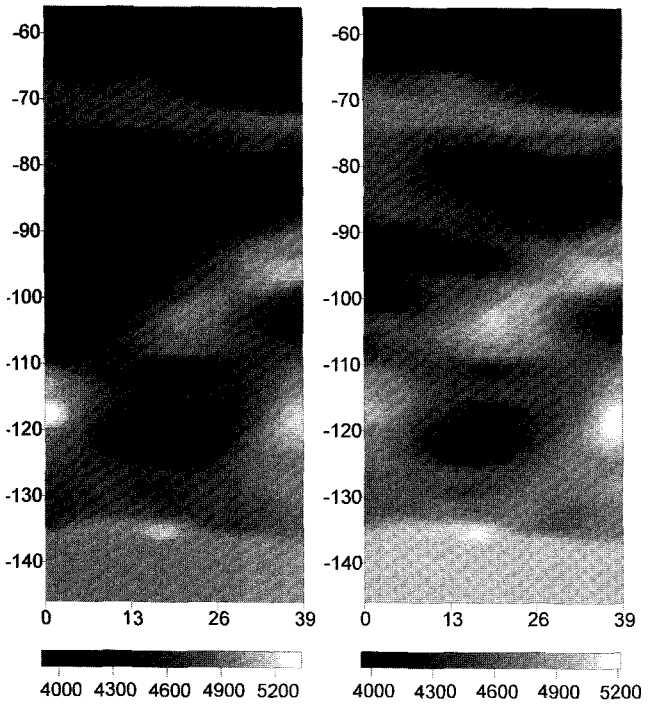

Fig. 17. Tomograms of travel time inversion with a starting model of variable grid of Fig. 16 after 20 iterations were calculated without (a) and with (b) correction of source time delay.

모그램에서 송신원 지연시간에 의하여 영상화의 왜곡이 발생하는데 이를 제거하기 위하여 송신원의 지연시간을 변수화하여 역산에서 보정하는 방법을 취하여 보정을 실현할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이 연구를 통해 개발된 알고리듬을 현장자료에 적용하여 일반적인 토모그램보다 나은 영상을 얻을 수 있었다. 앞으로 모델변수의 제약을 통한 주시 토모그래피법은 바로 현장에 적용할 수 있어 기존의 알고리듬보다 좋은 결과를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

이두성, 1995, 유한 차분법에 기초한 파선 경로 계산 알고리듬: 자원공학회지, **31**, 150-155.

이두성, 1998, 지하공동 충전효과 평가를 위한 시차 공대공 탄성파 토모그래피 연구: 물리탐사, **1**, 25-30.

이호영, 1990, CG, SIRT와 DLSQ방법을 이용한 지오토모그래피의 역산: 자원공학회지, **27**, 222-233.

임해룡, 1992, Fermat 원리 및 수정된 파선경로를 이용한 비선형 파선포모그래피 연구: 박사학위논문, 서울대학교.

조창수, 지 준, 이 두성, 1998, Fresnel 영역을 고려한 비선형 주시 토모그래피: 물리탐사, **1**, 43-48.

하희상, 1993, 탄성파 파선토모그래피에 있어서 DLSQ법과 평활화 제한법의 비교 연구: 석사학위논문, 서울대학교.

Dines, K. A., and Lyttle, R. J., 1979, Computerized geophysical tomography: *Proc. IEEE*, **67**, 1065-1073.

Harlan, W. S., 1990, Tomographic estimation of shear velocities from shallow cross-well seismic data: 60th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., *Expanded Abstracts*, 86-89.

Meyerholtz, K. A., Pavlis, G. L., and Szpakowski, S. A. 1989, Convolutional quelling in seismic tomography: *Geophysics*, **54**, 570-580.

Qin, F., Olsen, K. B., Cai, W., and Schuster, G. T., 1992, Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts: *Geophysics*, **57**, 478-487.

Schuster, G. T., 1996, Resolution limits for crosswell migration and traveltime tomography: *Geophys. J. Int.*, **127**, 427-440.

Vidale, J., 1988, Finite-difference calculation of travel times: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **78**, 2062-2076.