

선두파 중합을 이용한 천부지층의 영상화

박정재¹⁾ · 고승원¹⁾ · 신창수¹⁾ · 서정희¹⁾

Subsurface Imaging using Headwave Stacking

Jung-Jae Park¹⁾, Seung-Won Ko¹⁾, Chang-Soo Shin¹⁾ and Jung-Hee Suh¹⁾

요 약 : 탄성파굴절법 탐사는 절차가 단순하고 경제적이기 때문에 대형 구조물 건설을 위한 지반조사나 지질조사에 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 굴절법 탐사자료에 Kirchhoff 구조보정 방법을 적용하여 다양한 모형자료의 반응을 알아보고, 이에 대한 결과를 고찰하여 굴절법 탐사 자료를 이용한 지하 경계면 영상화 기법의 적용성을 파악해보고자 하였다. 모형반응 계산에 필요한 인공주시곡선의 작성에는 Vidale(1988)이 제시한 알고리즘을 사용하였고, 모형에 따른 반응을 살펴보기 위해 2층, 3층 모형 및 불규칙한 지표면을 가지는 모형 등에 대해 다양하게 살펴보았다. 구조보정을 위한 초기 속도 모형으로는 실제 구조와 같은 모형, 토모그래피에 의한 역산 단면, 실제 구조를 평활화한 모형 등을 사용해 초기 속도 모형이 달라질 때 결과에 어떤 영향을 미치는가 살펴보았다. 각각의 모형에 본 연구에 사용된 기법을 적용해 본 결과 반사법 구조보정에 비해 초기 속도 모형에 더욱 민감하다는 것을 확인할 수 있었으며, 현장 자료에 적용되기 위해서는 적절한 초기속도모형을 결정해야 할 것임을 알 수 있었다.

주요어 : 탄성파 굴절법 탐사, 구조보정, 초기 속도 모형, 경계면, 영상화

Abstract : For economy and convenience, seismic refraction survey is widely used in surveying for large civil engineering work. The purpose of this study is to obtain the numerical responses of various models using Kirchhoff migration, and to analyze its application to the real data processing. Synthetic traveltimes were calculated by vidale's algorithm, and various models such as 2 or 3 layer model and irregular topography model are tested to simulate the response of real structure. In order to compare the effect of initial velocity model, true velocity models, inversion results by tomography, smooth velocity models are used as an initial guess. The responses of model data show that the algorithm of this study is more sensitive to initial velocity model than the reflection survey, so choosing a suitable initial velocity model will be the most important thing in real data processing.

Keywords : seismic refraction survey, migration, initial velocity model, imaging, interface

서 론

탄성파 굴절법 탐사는 반사법 탄성파 탐사법에 비해 지하 매질에 대한 속도와 심도 정보를 손쉽게 제공하고, 보다 경제적이기 때문에 전기비저항 탐사와 함께 땅이나 도로 등 대규모 구조물 설치를 위한 지반조사 및 지질조사, 지하수탐사, 광물탐사 등에 널리 이용되어왔다. 하지만 기존의 자료처리 방법들은 매질의 속도정보에 비해 경계면에 대한 정보를 효과적으로 제시해 주지 못하였다. 그에 따라 굴절법 탐사의 실효성을 높이기 위해 천부 지층의 경계면을 영상화 할 수 있는 기법의 필요성이 대두되게 되었다.

Landa(1995)는 반사법 탐사 자료처리과정에서 널리 사용되는 Kirchhoff 구조보정 방법과 유사한 방법으로 굴절파 주시곡선을 따라 선두파 신호를 중합하여 천부지층을 영상화하는 기

법을 시도하였다. 그러나 이 연구는 비교적 간단한 모형에 국한되었고, 복잡한 모형이나 불규칙한 지형을 가지는 모형은 고려하지 못하였다.

이 연구에서는 우선 간단한 층서 모델에 대해 모형 응답 반응을 구하고 그 적용성을 살펴본 후, 현장자료의 효과를 얻기 위해 모형을 지표면이 복잡한 경우까지 확장해보았다. 인공주시곡선을 작성하기 위해서 선두파의 주시 계산이 가능하다고 알려진 Vidale의 방법을 사용하였고, 이를 이용하여 결과 단면과 입력 모형과의 비교를 통해 미 알고리즘의 정확도를 검증하였다. 구조보정의 초기 모형으로는 실제구조, 토모그래피 기법을 이용한 역산단면, 실제구조를 평활화한 단면 등을 사용하여 본 알고리즘의 타당성을 검증해 보았다. 수평층, 경사층 및 불규칙한 지층과 지표효과 등 다양한 형태의 모형에 본 알고리즘을 적용해 봄으로써 지층 구조 및 초기 속도모델

*2002년 7월 8일 접수

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부

이 결과에 미치는 영향과 그 정확도는 어느 정도인지 파악하고자 하였다.

Kirchhoff 구조보정

매질 내 임의의 점에서의 영상은 그 점의 물성치에 대한 편미분 파동장과 파동장 사이의 상호상관을 통해 얻어진다(신창수 등, 1999). 즉, \mathbf{r} 을 영상벡터, \mathbf{d} 를 파동장, \mathbf{J} 를 편미분 파동장이라고 하면 이들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립하며

$$\mathbf{r} = \mathbf{J}^T \mathbf{d} \quad (1)$$

위 식을 적분형태로 나타내면 다음과 같다.

$$r_i = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_0^{t_{\max}} \frac{\partial u(x, t)}{\partial p_i} d(x, t) dx dt \quad (2)$$

여기서 r_i 는 영상벡터 \mathbf{r} 의 i 번째 원소, $\partial u(x, t)/\partial p_i$ 는 i 번째 점에서의 물성값에 대한 편미분 파동장, x 는 수평 오프셋, t 는 시간, $d(x, t)$ 는 파동장을 나타낸다.

일반적인 Kirchhoff 구조보정에서는 편미분 파동장의 진폭은 무시하고 도달시간만을 고려하여 편미분 파동장을 초동시간에서의 멜타함수로 가정하므로 식 (2)는 다음과 같이 표현된다.

$$r_i = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_0^{t_{\max}} d(x, t) \delta\left(t - \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}}\right) dx dt \quad (3)$$

이때 t_0 는 송신원에서 수신원에 도달하는 최소시간, v 는 속도, δ 는 멜타함수이다.

한편 굴절법 탐사에서는 반사법 탐사에서와 달리 초동 주시곡선이 속도의 역수를 기울기로 가지는 직선의 형태를 가지므로, 식 (3)을 교차시간 t_0 , 중합 속도 v_s 의 항으로 나타내면 다음과 같다.

$$r_i = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_0^{t_{\max}} d(x, t) \delta\left(t - t_0 - \frac{x}{v_s}\right) dx dt \quad (4)$$

이 식을 적용하는데 있어 우선 Vidale의 알고리즘을 이용해 매질 내 모든 격자에 도달하는 초동시간을 구한 후 상반성 원리를 이용하여 송신원에서 매질 내 임의의 격자를 거쳐 수신원에 도달한 주시 $d(x, t)$ 를 결정하고, 초기 속도 모형에 대해 동일한 방법으로 구한 주시를 이용해 편미분 파동장 $\partial u(x, t)/\partial p_i$ 를 구하여 두 성분의 상호상관을 통해 해당 격자점의 영상을 얻는다.

초기 속도 모형을 실제와 같은 모형으로 주면 파동장 $d(x, t)$ 와 편미분 파동장 $\partial u(x, t)/\partial p_i$ 의 주시가 같아지기 때문에 상호상관을 통한 영상화 단면은 실제 모형과 거의 같게 된다. 그러나 현실적으로 실제 구조와 같은 초기 속도 모형을 설정한다는 것은 거의 불가능하므로, 본 연구에서는 토모그래피를 이

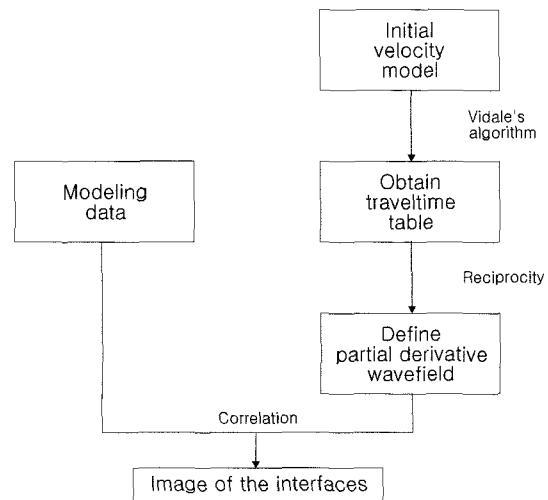


Fig. 1. Flow chart of the algorithm employed in this study.

용한 역산단면이나 실제 모형을 평활화한 모형을 초기 속도 모형으로 사용해 보았다. Fig. 1에 개략적인 모형 응답 반응 계산 과정을 나타냈다.

모형반응에 대한 고찰

모형자료에 대해 본 알고리즘의 적용성을 검증하고자 우선 간단한 2층 모델의 경우에 대해 모형응답반응을 측정하였고 이를 경사층, 디층 모형과 불규칙한 지표를 가지는 모형의 경우로 확장해 보았다. 이후 실제 탐사 현장자료를 모사한 자료에 대해 어느 정도의 적용성을 가지는지 점검해 보고자 하였다. 모형자료의 경우 2층 모형에서는 수평거리 100m, 심도 30m의 비교적 규모가 작은 모형에 대해 계산을 시행하였으며, 디층모델에서는 보다 깊은 대상물체의 영상화를 위하여 수평거리 200m, 심도 50m의 모형을 사용하였다.

2층 모형

알고리즘의 정확성을 검증하기 위해 먼저 Fig. 2(A)와 같은 간단한 수평 2층구조의 모형에 대해 경계면의 영상화를 시도해 보았다. 사용된 모델은 가로 100m, 세로 30m의 모형으로, 깊이 15m 지점에 놓인 경계면을 중심으로 상부는 1000 m/s의 속도를, 하부는 2000 m/s의 속도를 가지고 있다. Fig. 2(B)는 Fig. 2(A)에 대한 반응의 영상화 단면이다. 실제 모형과 초기 모형이 같기 때문에 그림에서 보여지듯 심도 15m 지점의 경계면이 매우 선명하게 보인다. 다만 송신원이 가로 0m에서 100m 사이에 존재하기 때문에 실제 영상이 얹어지는 영역은 모형보다 작아지게 된다. 지표부근에 나타나는 희미한 영상은 송신원에서 가까운 수진기에서 얹어지는 직접파에 의한 것으로 지하 경계면을 영상화하는데 있어서는 불필요한 것이나, 그 부분만을 선택적으로 제거하기는 어렵다. 하지만 일반적인 지

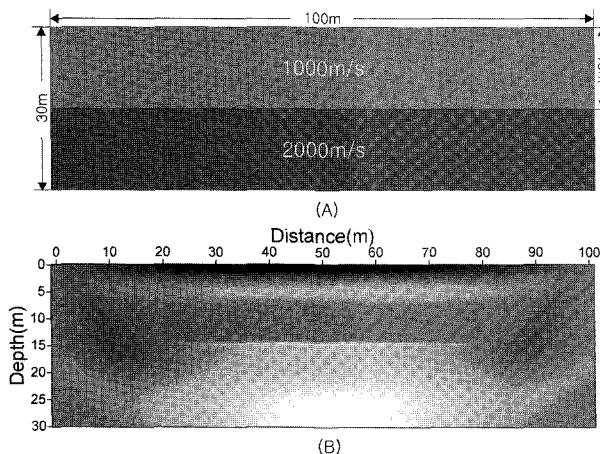


Fig. 2. The Migrated image for the horizontal two layered model.
 (A) True velocity model.
 (B) Migrated image provided from the same initial velocity model
 (A).

층에서 심도 5m 정도까지의 영역은 표토층으로 이루어진 경우가 많으므로, 현장자료의 처리 결과에 있어서 미치는 영향은 그리 크지 않을 것으로 사료된다. Fig. 2에서 보듯 실제 구조와 초기 모형이 같을 경우 경계면의 영상이 잘 얻어짐을 알 수 있었다.

초기 속도 모형이 실제 구조와 달라질 경우 경계면 영상화에 미치는 영향을 알아보기 위해 다음과 같은 초기 속도 모형에 대해 본 알고리즘을 적용하여 보았다. 지층의 속도가 실제 구조와 같으나 경계면의 위치가 달라지거나(Fig. 3(A), (B)), 경계면의 위치는 같으나 그 속도가 다른 경우(Fig. 3(C), (D)) 본 알고리즘은 경계면의 영상을 얻어내는데 실패하였다. 이는 실

제 구조와 상당히 다른 초기 속도모형(예를 들어 심도에 따라 속도가 증가하는 모형)을 사용해도 결과를 얻을 수 있는 반사법 Kirchhoff 구조보정에 대해 굴절법 Kirchhoff 구조보정이 가지는 약점이다. 왜 그런 차이가 발생하는지에 대해선 정확히 알 수는 없지만 반사법의 경우 매질 내의 임의의 점이 경계면상의 점인지 아닌지에 상관없이 그 점에 도달하는 파선의 차이가 없지만 굴절법의 경우 경계면 상에 있는 점과 그렇지 않은 점에 도달하는 초동 파선이 다르기 때문이 아닌가 사료된다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 구조보정 이전에 실제 구조와 유사한 초기 속도 모형을 얻어야 한다. 그를 위해, 현장 자료처리과정에서 주로 사용되는 토모그래피 방법을 이용하여 실제 구조와 유사한 초기속도모형을 결정하고, 이를 본 알고리즘에 적용하는 방법을 사용하였다. Fig. 4(A)는 Fig. 2(A)의 모형에서 얻어진 자료를 토모그래피 기법으로 역산한 단면이다. 그림을 보면 전체적인 속도 구조는 실제 구조와 유사하지만 관심 대상인 심도 15m 부근에서 속도구조가 심도에 따라 완만하게 변하기 때문에 경계면을 결정하기 어려운 상황이다. 이 단면을 초기 속도모델로 사용하여 구조보정한 결과가 Fig. 4(B)에 나타나 있다. 백색 파선으로 표현된 실제 경계면에 비해 약 1 내지 2m 정도 오차가 있긴 하지만 구조보정 전의 초기모델(Fig. 4(A))에 비해 보다 나은 경계면의 영상을 제공하고 있다. 반면 영상화된 영역은 그림 2에 비해 줄어들어 있는데, 이는 초기 속도 모형을 역산하는 과정에서 영역이 줄어들고 다시 이를 구조보정 하는 과정에서 영역이 줄어들기 때문이다. 실제 Fig. 4(B)에서 올바른 경계면 영역은 수평거리 30~70m 사이 약 40m 정도이다.

다음으로 수평층이 아닌 경사층 모형에 대해서 살펴보았다.

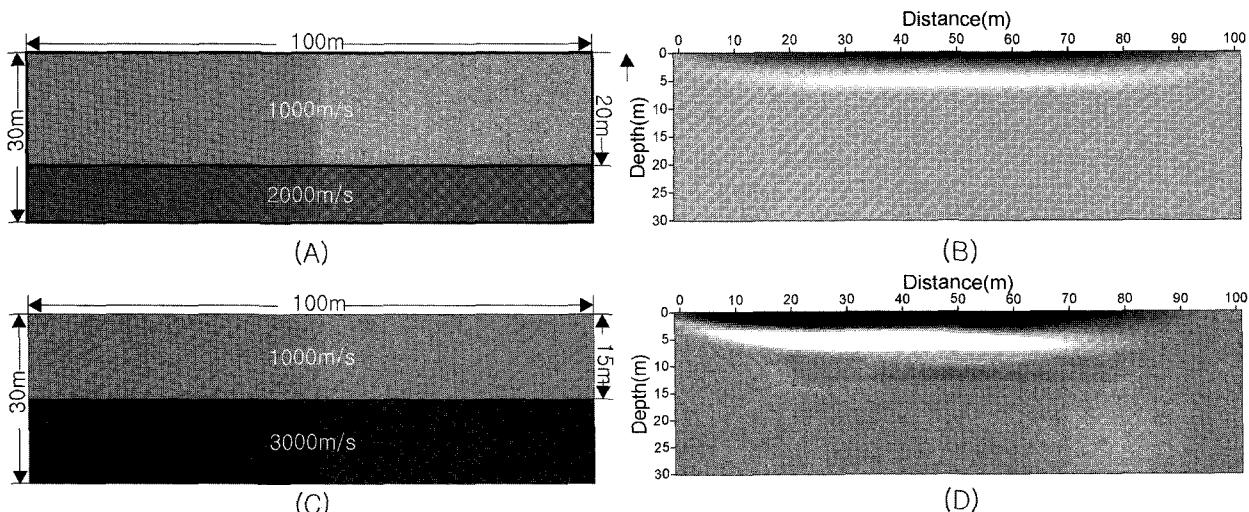


Fig. 3. Migrated results for the velocity model different from the true model in Figure 2(A).
 (A) Initial velocity model. Interval velocity is 1000 m/s for upper layer, 2000 m/s for lower layer.
 (B) Migrated result.
 (C) Initial velocity model. Interval velocity is 1000 m/s for upper layer, 3000 m/s for lower layer.
 (D) Migrated result.

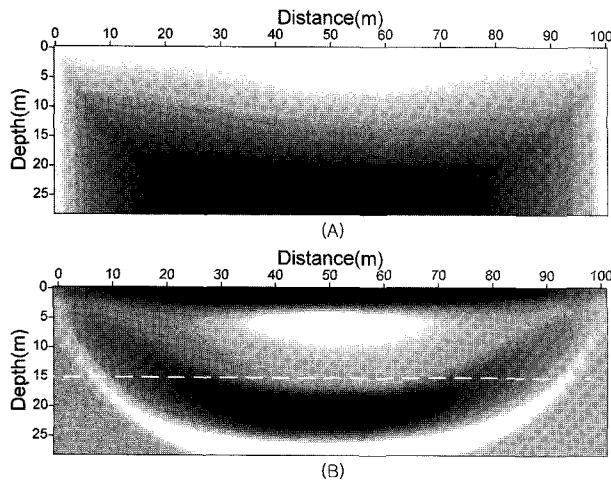


Fig. 4. Velocity model and result image for the input of Figure 2(A). Grid spacing is set 2m for each direction.
 (A) Initial velocity obtained by cell tomography
 (B) Migrated image. The dashed white line is the true interface.

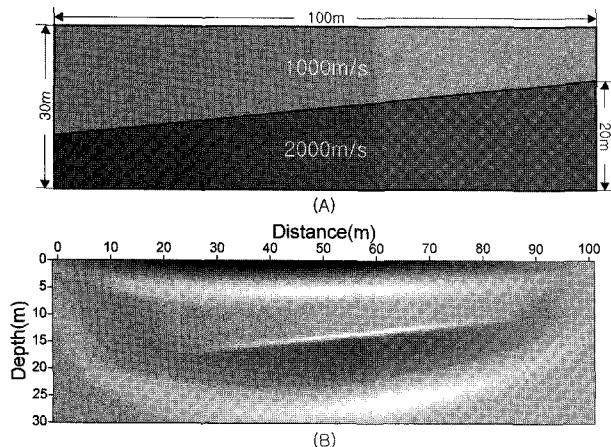


Fig. 5. Migrated result for a dipping layered model.
 (A) True velocity model.
 (B) Migrated result for the velocity model (A).

Fig. 5(A)는 Fig. 2(A)와 크기는 같지만 경계면이 지층에 대해 약 5.7° 정도 기울어진 모형이다. 이와 동일한 초기 속도 모형을 주고 구조보정한 결과가 (B)에 나타나 있다. 전반적으로 경계면의 영상은 수평층의 경우와 마찬가지로 선명하였고, 경계면의 위치 역시 수평층 경우와 같이 정확히 나타나 있다. 이 모형을 토모그래피를 이용하여 Fig. 6(A)를 얻고, 이를 구조보정하여 Fig. 6(B)를 얻어내었다. Fig. 4와 비교하여 볼 때, 역산단면 (A)은 수평층 역산단면(Fig. 4(A))에 비해 구조의 연속성이 떨어지고 보다 부정확해 보이며, 구조보정 결과 (B) 역시 수평층의 경우에 비해 경계면 영상이 모호해 보이긴 하지만 비슷한 수준의 오차를 가지고 기울어진 경계면을 나타내주고 있다. 2층구조 모형에 대한 결과들을 살펴볼 때 실제 구조와 유사한 초기속도 모형이 결정되면 경계면을 성공적으로 영상화 할 수 있음을 알 수 있었으며, 처리과정이 늘어남에 따라

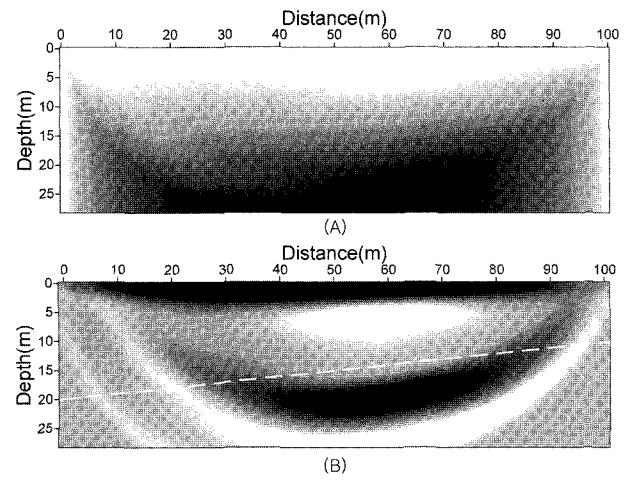


Fig. 6. Velocity model and the migrated image for the input of Figure 5(A).
 (A) The initial velocity model obtained by cell tomography
 (B) Migrated image. The dashed white line is the true interface.

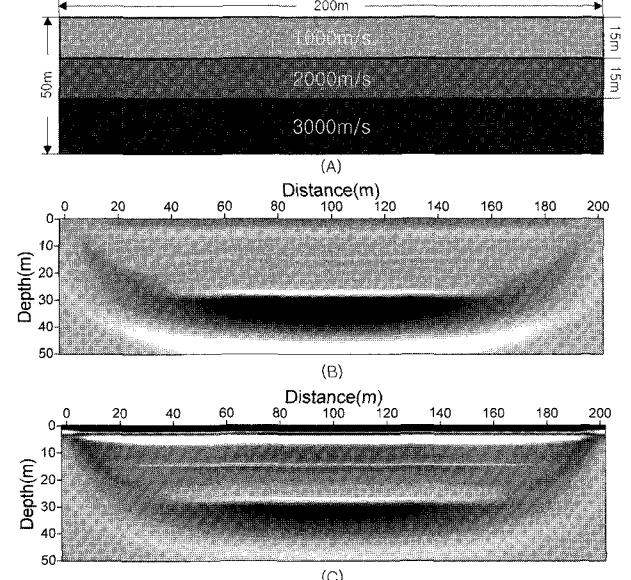


Fig. 7. The migrated image for the horizontal three layer model.
 (A) True velocity model.
 (B) Migrated image for the input of (A).
 (C) Migrated image with amplitude decaying applied

영상화 영역이 줄어들어 같은 영역을 영상화하기 위해서는 측선 길이가 보다 길어져야 함을 알 수 있었다.

3층 모형

앞에서 살펴본 2층 모형에 대한 결과를 확장하여 수평 3층 모형에 대해 본 알고리즘을 적용시켜 보았다. 사용된 모델은 수평거리 200m, 심도 50m의 3층 모형으로 각각 1000 m/s, 2000 m/s, 3000 m/s의 속도를 가지고 있다. 2층 모형에서와 마찬가지로 실제 구조와 같은 초기속도모형을 사용할 경우 Fig.

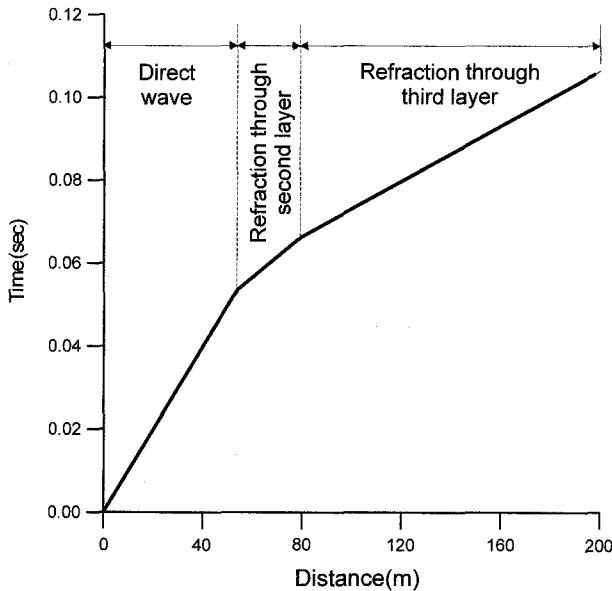


Fig. 8. Traveltime curve of 1st shot for the model in Figure 7(A).

7(B)에서 보여지듯 경계면의 영상을 잘 얻어낼 수 있었다. Fig. 7(B)를 좀 더 살펴보면 하부 경계면에 비해 상부 경계면의 영상이 약하게 나타났음을 알 수 있다. 이는 상부 경계면에서 굴절된 파를 초동으로 잡는 수진기 수가 하부 경계면에서 굴절된 파를 초동으로 잡는 수진기 수에 비해 적기 때문이다. Fig. 8은 첫 번째 송신원에 대한 신호의 초동을 발췌하여 작성한 주시곡선이다. 경계면의 영상은 이 주시곡선을 따라 신호를 중합하여 얻게 되는데, 하부 굴절파의 초동을 나타내는 직선에 비해 상부 굴절파의 초동을 나타내는 직선의 길이가 짧기 때문에, 이 길이에 비례하는 경계면의 영상 역시 약하게 나타나게 된다. 이런 문제를 감안하여 구조보정시 각 격자점의 영상을 송신원으로부터 격자점까지의 거리로 나누어보았다. 그 결과 하부 경계면의 영상은 약해지고 상부 경계면의 영상은 상대적으로 강해져 총의 경계면을 보다 확실히 구분할 수 있게 되었다.

2층 모형의 경우에서와 마찬가지로 토모그래피를 통해 얻은 초기모형으로 구조보정을 시행해 보았다. 역산 결과는 Fig. 9(A)와 같다. Fig. 9(B)는 이 결과를 초기속도모형으로 사용하여 구조보정한 결과이다. 백색 파선으로 표현된 실제 경계면과 비교해 볼 때 심도 15m 지점의 경계면은 잘 나타나 있으나 심도 30m 지점의 경계면의 영상은 얻지 못하였다. 이는 상부 경계면의 경우 심도가 얕아서 실제 모형에서 얻은 주시곡선과 초기 모형에서 얻은 주시곡선 사이의 차가 그리 크지 않지만, 심도가 깊어질수록 주시 오차가 누적되어 발생하는 문제라고 생각된다.

다음으로, 경사층과 수평층이 동시에 존재하는 모형에 대해 영상화 알고리즘을 적용하였다. 사용한 모형의 크기와 속도는 수평 3층 모형의 경우와 같으나, 1층과 2층의 경계면이 기울

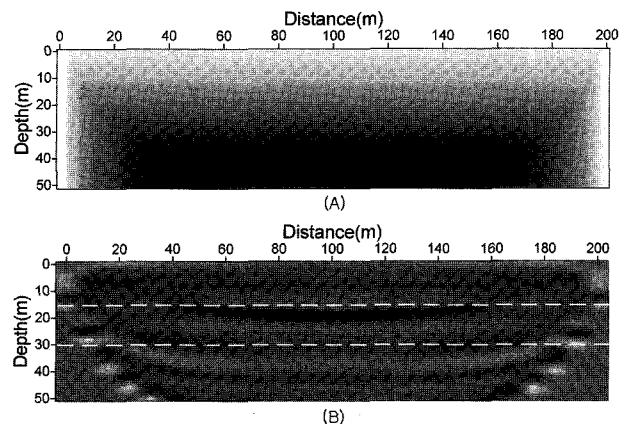


Fig. 9. Velocity model and result image for the input of Figure 7(A).
 (A) Initial velocity obtained by cell tomography
 (B) Migrated image. The dashed white line is the true interface.

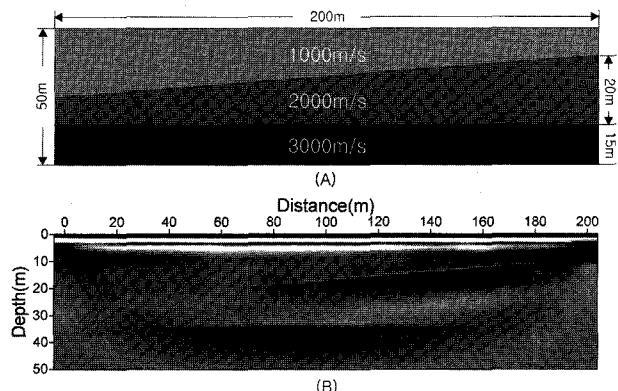


Fig. 10. The migrated result for a mixed layer model.
 (A) True velocity model.
 (B) Migrated result for the velocity model (A).

여져 있는 형태이다. 앞에서와 마찬가지로 실제 구조와 같은 초기모형을 사용할 경우 경사면과 수평 경계면의 영상을 잘 얻어낼 수가 있었다(Fig. 10(B)). 그러나 여기에서 얻은 자료로 토모그래피를 이용해 얻은 단면(Fig. 11(A))을 이용해 구조보정한 결과는 좋지 않았다. Fig. 11(B)에서 보듯이 하부의 수평 경계면의 영상은 얻지 못했으며, 상부 경계면의 영상 역시 실제 구조와는 차이가 있었다. 이러한 문제는 알고리즘 자체의 문제일 수도 있지만 Fig. 11(A)의 역산단면을 살펴볼 때 하부의 경사층에 의해 하부 수평층의 속도구조가 왜곡되어 있는 것으로 보아 역산단면이 실제 구조를 잘 반영하지 못하고 있기 때문이라 생각된다. 그래서 실제 구조에 잘 부합되는 역산 단면을 가정하기 위해 Fig. 10(A)의 속도구조를 평활화 시킨 단면을 초기 속도모형으로 사용하여 보았다. 초기 속도모형으로 Fig. 12(A)와 같은 평활화된 모형을 사용한 결과 Fig. 12(B)에서처럼 실제 구조와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 12(B)에서 볼 수 있듯이, 경계면 사이의 거리가 가까울수록 상부 경계면의 영상이 약하게 나타나는데, 이는 경계면의

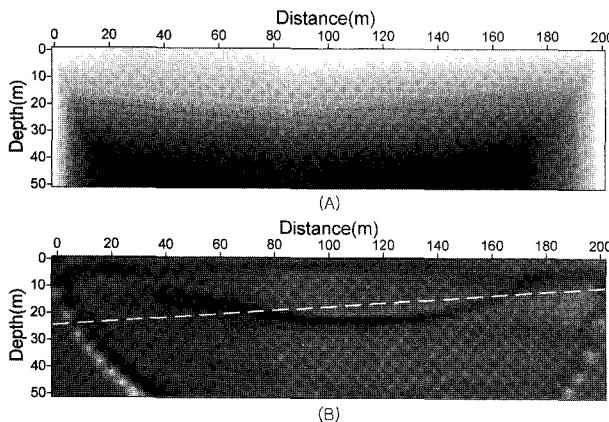


Fig. 11. Initial velocity model and result image for the input of Figure 10(A).
 (A) Initial velocity obtained by cell tomography
 (B) Migrated image. The dashed white line is the true interface.

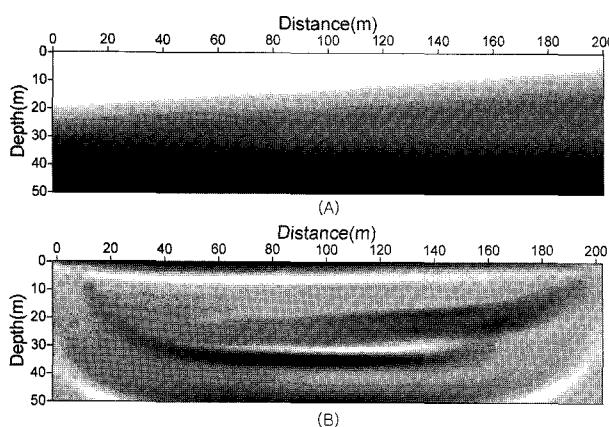


Fig. 12. Initial velocity model and result image for the input of Figure 10(A).
 (A) Initial velocity obtained by smoothing the true velocity model in Figure 9(A).
 (B) Migrated image.

영상이 주시곡선의 길이에 비례하는 본 알고리즘의 한계점이라 사료된다.

전반적으로 3층 구조에 대한 결과는 2층구조에서의 결과에 비해 좋지 못했으며, 이는 본 알고리즘이 초기 속도 모형에 매우 민감하다는 것을 나타내주는 것이다. 그러므로 본 알고리즘을 이용해 경계면을 영상화하기 위해서는 실제 구조에 잘 부합되는 속도모형을 설정하는 것이 무엇보다 중요하리라 여겨진다.

불규칙한 모형

Fig. 13(A)는 지표면이 평탄하지 않고 불규칙한 경우의 모형이다. 3층모형으로 구성되어 있지만 송신원과 수신기가 1층과 2층의 경계면 사이에 위치하기 때문에 실제로는 2층 모형이다. 지표면 위의 1층은 공기층으로 340 m/s의 속도를 주었으며 아

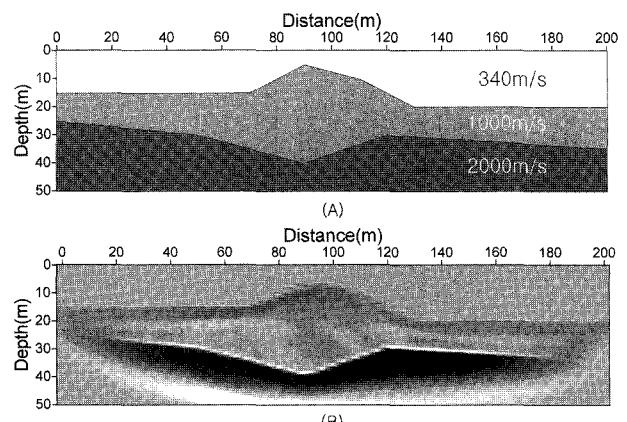


Fig. 13. Migrated result for an irregular topography model.
 (A) True velocity model.
 (B) Migrated result when using the same initial velocity model as (A).

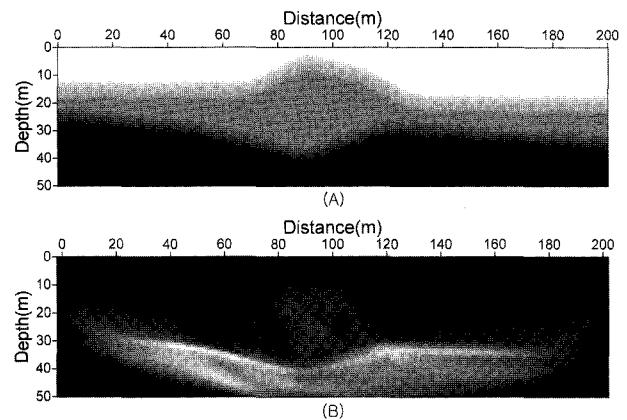


Fig. 14. Initial velocity model and result image for the input of Figure 13(A).
 (A) Initial velocity obtained by smoothing the true velocity model in Figure 13(A).
 (B) Migrated image.

래의 두 층은 각각 1000 m/s, 2000 m/s의 속도를 주었다. Fig. 13(B)는 실제 구조와 같은 초기모형을 사용했을 경우의 결과이다. 공기층 아래의 지표 경계면이 잘 묘사되어 있으며 하부의 경계면 역시 약간의 오차가 있긴 하지만 전체적으로 좋은 영상을 얻어내었다. 매질 내부의 경계면에 비해 지표 경계면의 영상이 상대적으로 약하게 나오는데, 이는 앞에서 밝힌 바와 같이 중합 전에 송신원으로부터 격자점까지의 거리로 나누어 줌으로써 어느 정도 해결할 수 있지만, 그럴 경우 지표 경계면의 영상이 너무 강해져 정작 중요한 지하 경계면의 영상이 흐려질 수 있으므로 선택적으로 적용해야 할 것으로 생각된다.

위 모형에 대해 실제 자료처리 과정을 모사하기 위해 Fig. 13(A)에 주어진 실제 속도구조를 평활화한 Fig. 14(A)의 모형을 초기속도구조로 주고 구조보정을 실시해 보았다(Fig. 14(B)). Fig. 13(B)에 비해 지표 경계면의 영상이 흐리고 지하 경계면 역시 선명하지 못하긴 하지만 실제 구조와 유사한 단

면을 얻어낼 수 있었다.

실제 탐사시 주로 접하게 되는 불규칙한 지면의 경우에 대해서도 본 알고리즘을 통해 지표면과 지하 경계면의 영상을 얻어 낼 수 있었으며, 실제 구조를 평활화시킨 초기 속도 모형을 사용한 경우에도 비교적 정확한 결과를 얻어낼 수 있었다.

결 롬

본 연구에서는 굴절법 자료에 Kirchhoff 구조보정 기법을 적용하여 경계면에서 굴절된 선두파를 중합하므로써 매질 내 경계면을 영상화해보고자 하였다. 사용된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 수평층 모형과 경사층 모형, 3층 모형 밑 불규칙한 지표면을 갖는 모형 등 다양한 모형자료에 대해 본 알고리즘을 적용하여 보았다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 선두파 중합을 통해 천부지층의 영상화가 가능함을 알 수 있었다. 2층 및 3층 구조 모형에 대해 모두 경계면을 영상화 할 수 있고, 3층 구조 모형의 경우 파동의 감쇄를 고려해 경계면의 영상을 향상시킬 수 있었다.

2) 불규칙한 경계면을 가지는 모형에 대해서도 지표면과 경계면의 영상을 얻어낼 수 있었다.

3) 다양한 초기 속도 모형에 적용해본 결과 본 알고리즘은 초기 속도 모형에 매우 민감하다는 것을 알 수 있었다. 토모그래피 결과를 초기 속도 모형으로 사용했을 경우 수평층에 대해서는 어느정도 타당한 결과를 보여주었으나, 경사층에 대해서는 그리 좋은 결과를 얻지 못했다. 하지만 실제 모형을 평활화하여 사용했을 경우에는 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- 한현철, 조창수, 서정희, 이두성, 1998, 주시토모그래피와 음향 2 차원 전파형 역산의 적용성에 관한 연구: 물리탐사, 제1권 제 1호, 49-56.
- Landa, E., Keydar, S., and Kravtsov, A., 1995, Determination of a shallow velocity-depth model from seismic refraction data by coherence inversion: *Geophysical Prospecting*, **43**, 177-190.
- Apostoiu-Marin, I. and Ehinger, A., 1997, Kinematic interpretation in the prestack depth-migrated domain: *Geophysics*, **62**, 1226-1237.
- Bleistein, N. and Gray, S. H., 1985, An extension of the Born inversion method to a depth dependent reference profile: *Geophysical Prospecting*, **33**, 999-1022.
- Gardner, G. H. F., French, W. S., and Marzuk, T., 1974, Elements of migration and velocity analysis: *Geophysics*, **39**, 811-825.
- Pratt, R. G., Shin, C., and Hicks, J. G., 1998, Gauss-Newton and full Newton method in frequency-space seismic waveform inversion: *Geophys. J. Int.*, **133**, 341-362.
- Shin, C., 1988, Nonlinear elastic wave inversion by blocky parameterization, Ph. D. thesis, Univ. of Tulsa.
- Shin, C. and Chung, S., 1999, Understanding CMP stacking hyperbola in terms of partial derivative wavefield: *Geophysics*, **64**, 678-700.
- Gray, S. H., 1997, True-amplitude seismic migration: A comparison of three approaches: *Geophysics*, **62**, 929-936.
- Vidale, J. E., 1988, Finite-difference calculation of travel times: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **78**, 2062-2076.