

## 수평적 속도변화대에서 자동속도분석 알고리즘을 이용한 속도분석 실험연구

윤광진\* · 양승진\*

### An Experimental Study on Velocity Analysis by Automatic Velocity Analysis Algorithms in Layers Having Lateral Velocity Anomaly

Kwang Jin Yoon\* and Seung Jin Yang\*

**ABSTRACT** : In the conventional velocity analysis, the peaks of a semblance panel are picked and the stacking velocities of the peaks are assumed as RMS velocities from which interval velocities are determined. This velocity analysis technique is correct only for horizontal homogeneous layers and incurs error in a layer whose velocity varies laterally. Tediousness of peak picking and error in velocity analysis can be reduced by automatic velocity analysis techniques. An automatic velocity analysis algorithm has been presented in order to improve these problems by considering the stacking velocity from the view point of interval velocity model and by relating the stacking velocity and the interval velocity with the traveltimes. In this paper, we apply the automatic velocity analysis method to simple models having lateral velocity anomaly to verify the effectivenesses and limits of this method. From the results of numerical experiments, we can determine the interval velocities without pickings of the stacking velocities in the one-dimensional velocity analysis and the general patterns of the laterally varying interval velocities appear in the two-dimensional case. However, the interval velocity and the depth of velocity anomaly determined by two-dimensional automatic velocity analysis are somewhat discrepant in those of the theoretical model.

## 서 론

반사법 탄성과 자료에 대한 속도분석은 일반적으로 다음과 같은 3단계 과정으로 이루어진다.

1) 한 중심점 (CMP, common mid-point)에 대해 취합된 자료에 대해서, 시간-거리 좌표상에서 쌍곡선 상에 위치한 자료들의 상호상관도를 측정한다. 상호상관도를 측정하는 방법은 여러 가지가 있으나 (Neidell, Taner, 1971), 여기서는 1969년 Taner와 Koehler가 제안한 후, 일반적으로 사용되고 있는 Semblance에 의한 상호상관도 측정방법을 이용하였다.

2) 중합속도와 영주시 (zero-offset traveltime)상의 Semblance 평면 상에서, 각 영주시에 대해 Semblance의 최대값에 해당하는 중합속도를 선별한다.

3) 각 영주시에 대해 선별된 중합속도로부터 Dix 방정식 (Dix, 1955)이나 파면곡률법 (wavefront curvature

method, Hubral, Krey, 1980) 등을 이용하여 지층의 구간속도를 구한다.

이러한 3단계 속도분석 과정은 몇 가지 문제점을 안고 있다. 첫번째로 중합속도를 선별하는 두 번째 단계가 지층모델에 대한 고려없이 행해짐에 따라 부적당한 중합속도의 선별로 인해서 다음 단계에서 물리적으로 합당하지 못한 구간속도 결과가 나타날 수 있다. 두번째로 중합속도를 기초로 한 구간속도 결정은 중합속도가 RMS 속도와 같다는 가정 하에 이루어진다. 그러나 수평적으로 속도변화가 있을 때나 속도의 수직변화가 심할 경우, 그리고 음원-수진기 거리가 깊이에 비해 상대적으로 큰 경우에는 이러한 가정이 유효하지 않아서 구간속도 결과가 큰 오차를 갖게 된다 (Al Chalabi, 1974).

첫 번째 문제점은 중합속도를 선별하는 속도분석의 두 번째 단계에서 지층모델을 고려하여 중합속도를 선별함으로써 개선될 수 있다. 두 번째 문제점은 중합속도를 RMS 속도와 다른 속도라고 해석하는 방법이나 구간속도를 계산할 때 중합속도 대신 다른 측정치 (예, 주시)를 이용하는 방법으로 개선될 수 있다. 그러나 주시를 기초로 구간속도를 결

\* 한양대학교 자원환경공학과 (Department of Natural Resources & Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

정하는 방법 (Bishop *et al.*, 1985; Stork, Clayton, 1985)은 어떠한 주시가 적합한 것인지 알 수 없다는 동일한 문제점을 안고 있어서 선별된 주시대신 탄성과 자료를 직접 이용하는 방법도 연구되었다 (Ronen *et al.*, 1985; Sherwood *et al.*, 1986). 반면 주시를 기초로한 방법에 비해 중합속도를 기초로한 방법은, 중합속도는 탄성과 자료처리 과정에서 일반적으로 구해지므로 별도의 계산작업이 필요하지 않다는 점, 잡음이 심한 자료에 대해서는 중합속도를 선별하는 것이 주시를 선별하는 것보다 오차를 줄일 수 있다는 점 그리고 탄성과 자료의 매 트레이스마다 주시를 선별해야하는 번거로움이 중합속도 선별에는 필요하지 않다는 점 등의 장점이 있어서 쉽고 빠르게 적용할 수 있다.

Toldi (1989)는 속도분석과정의 문제점들을 극복하고자 중합속도를 구간속도 모델의 관점에서 보고, 중합속도와 구간속도를 주시를 매개로하여 선형화한 관계식을 기초로한 자동속도분석 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 Semblance의 최대값에 해당하는 중합속도를 결정함에 있어서, 중합속도를 구간속도 모델로부터 계산하고, 이 중합속도가 Semblance의 최대값을 찾아가도록 구간속도 모델을 반복적으로 변화시켜 나감으로써 속도분석 과정 중 2단계와 3단계를 통합할 수 있는 방법이다. 이 논문에서는 수치 및 수평적 속도변화대에 대한 속도분석에 적용할 수 있는 이 자동속도분석 알고리즘을 간단한 수치모델에 대해 적용하여, 그 적용성과 한계점을 분석해 보았다.

### 자동속도분석 알고리즘

지층의 각 층이 수평한 등방성매질로 이루어져 있다고 가정하고 지표로부터  $i$ 번째 지층의 구간속도를  $v_i$ 라 하면, 이 지층모델은 구간속도의 역수 ( $m_i=1/v_i$ )들로 이루어진 벡터  $\mathbf{m}$ 으로 표현할 수 있다. 한 중심점 (CMP) 취합자료에 대해, 중합속도 ( $V_s$ )가 RMS속도 ( $V_{RMS}$ )와 같다고 가정하면, 이 지층모델  $\mathbf{m}$ 에 대한 중합지연도 (stacking slowness) 벡터  $\mathbf{w}$ 는, 영주시 (zero-offset time)  $\tau$ 에서의 중합속도의 역수 ( $w_i=1/V_s$ )로 이루어진다. 따라서 이러한 지층모델에 대한  $w_i$ 는

$$V_{RMS} = \left[ \frac{1}{\tau_i} \sum_{j=1}^i v_j^2 (\tau_j - \tau_{j-1}) \right]^{1/2} \quad (1)$$

$V_{RMS}$ 의 계산식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$w_i(\mathbf{m}) = \frac{1}{[V_{RMS}(\mathbf{m})]_i} = \left[ \frac{\tau_i}{\sum_{j=1}^i \frac{(\tau_j - \tau_{j-1})}{m_j^2}} \right]^{1/2} \quad (2)$$

위 모델에서 중심점취합한 자료들에 대한 주시  $t$ 는 거리-영주시 ( $x-t$ ) 좌표상에서 식 (3)과 같이 쌍곡선 방정식으로 주어지며, 이 식에 의한 쌍곡선체적에 따라

$$t^2 = \tau^2 + w_i(\mathbf{m})\chi^2 \quad (3)$$

각 트레이스들의 자료들을 중합함으로써 신호의 일관성을 측정한다. 이러한 신호의 일관성을 측정하는 한 방법으로 Semblance가 일반적으로 사용되는데, 한 영주시  $\tau$ 에서의 Semblance는 다음 식으로 구한다.

$$S(w_i(\mathbf{m}), \tau) = \frac{\left[ \sum_{\chi} D(\chi, t = (\tau^2 + w_i(\mathbf{m})\chi^2)^{1/2}) \right]^2}{\sum_{\chi} \left[ D(\chi, t = (\tau^2 + w_i(\mathbf{m})\chi^2)^{1/2}) \right]^2} \quad (4)$$

이 Semblance값을 전체 영주시에 대해 더한 값이 모델  $\mathbf{m}$ 에 대한 자료의 일관성을 나타낸다. 즉,

$$Q(\mathbf{m}) = \sum_i S(w_i(\mathbf{m}), \tau) \quad (5)$$

여기서  $Q(\mathbf{m})$ 은 모델  $\mathbf{m}$ 에 대한 자료의 전체적인 일관성을 나타낸다.  $Q(\mathbf{m})$ 이 클수록  $\mathbf{m}$ 은 자료를 잘 설명할 수 있는 모델이 된다. 따라서 자동속도분석 알고리즘은 초기의  $\mathbf{m}$ 을 가정한 후 이에 대한 목적함수  $Q(\mathbf{m})$ 을 계산하고,  $Q(\mathbf{m})$ 이 최대값을 갖도록 모델을 반복적으로 변화시켜 나가는 방법이다. 여기서 지층모델을 수정하면서 목적함수의 최대값에 수렴하도록 하는 방법으로는 최적화기법 중의 하나인 conjugate-gradient method (Arora, 1989)를 이용하였으며, 전체적인 알고리즘은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 모델  $\hat{\mathbf{m}}$ 에서  $\nabla_{\hat{\mathbf{m}}} Q$ 를 구한다.
2.  $Q(\hat{\mathbf{m}} + \alpha \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} Q)$ 가 최대값이 되는  $\alpha$ 를 찾는다.
3.  $\hat{\mathbf{m}} = \hat{\mathbf{m}} + \alpha \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} Q$ 가 되도록 모델을 변화시킨다.
4. 알고리즘이 수렴하지 않았으면 1단계로 돌아간다.

이 알고리즘의 방향벡터  $\nabla_{\hat{\mathbf{m}}} Q$ 는 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} (\nabla_{\hat{\mathbf{m}}} Q)_j &= \frac{\partial Q}{\partial m_j} \Big|_{\mathbf{m}=\hat{\mathbf{m}}} \\ &= \sum_{i=0}^{nr} \frac{\partial Q}{\partial w_i} \Big|_{\mathbf{w}=\mathbf{w}(\hat{\mathbf{m}})} \cdot \frac{\partial w_i}{\partial m_j} \Big|_{\mathbf{m}=\hat{\mathbf{m}}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $m_j$ 는  $j$ 번째 층의 구간지연도 (interval slowness)를,  $w_i$ 는 영주시  $\tau$ 에서의 중합지연도 (stacking slowness)를 나타낸다. 식 (2)로부터

$$\left. \frac{\partial w_i}{\partial m_j} \right|_{m=\hat{m}} = G_{ij} = \frac{\tau_j - \tau_{j-1}}{\tau_i} \left[ \frac{w_i(\mathbf{m})}{m_j} \right]^3 \quad \text{for } j \leq i$$

$$= 0 \quad \text{for } j > i \quad (7)$$

$j > i$ 인 경우  $w_i$ 는 그 하부층에 해당하는  $m_j$ 의 영향을 받지 않으므로 미분값이 0이 된다. 따라서  $\nabla \hat{\mathbf{m}} \mathbf{Q}$ 는

$$(\nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q})_j = \sum_{i=0}^{i=nr} \frac{\partial Q}{\partial w_i} \bigg|_{w(\mathbf{m})=w(\hat{\mathbf{m}})} G_{ij}$$

$$= \sum_{i=0}^{i=nr} (\nabla_w Q)_i G_{ij} \quad (8)$$

여기서  $G_{ij}$ 로 이루어진 행렬을  $\mathbf{G}$ 라 하면  $\nabla \hat{\mathbf{m}} \mathbf{Q}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q} = \mathbf{G}^T \nabla_w \mathbf{Q} \quad (9)$$

위 식의  $\nabla_w \mathbf{Q}$ 는 영주시-중합지연도 좌표상의 Semblance로부터 차분근사식을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\nabla_w Q_i = \frac{\partial Q}{\partial w_i} \approx \frac{1}{\Delta w} [S(w_i(\hat{\mathbf{m}}) + \Delta w, \tau_i) - S(w_i(\hat{\mathbf{m}}), \tau_i)] \quad (10)$$

식 (7)과 식 (10)으로부터 식 (9)를 이용하여 방향벡터를 구한 후, 이 방향벡터를 따라서 line search를 하여  $\mathbf{Q}(\hat{\mathbf{m}} + \alpha \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q})$ 가 최대값을 갖는  $\alpha$ 를 결정한다. 그러나,  $\mathbf{Q}(\mathbf{m})$ 은 영주시와 중합지연도의 좌표상에 있기 때문에, 실제로는  $\mathbf{Q}(\mathbf{w}(\hat{\mathbf{m}} + \alpha \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q}))$ 를 최대값이 되게 하는  $\alpha$ 를 구한다. 이 line search 과정은  $\mathbf{m} = \hat{\mathbf{m}} + \delta \hat{\mathbf{m}}$ 일 때, 중합지연도를 1차 Taylor급수 전개로 선형근사시킨 식,  $\mathbf{w}(\mathbf{m}) \approx \mathbf{w}(\hat{\mathbf{m}}) + \mathbf{G} \delta \hat{\mathbf{m}}$ , 을 이용하므로써 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\mathbf{Q}(\mathbf{w}(\hat{\mathbf{m}} + \alpha \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q})) \approx \mathbf{Q}(\hat{\mathbf{m}}) + \alpha \mathbf{G} \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q} \quad (11)$$

이상의 관련식을 토대로 자동속도분석 알고리즘을 구성해 보면 다음과 같다.

초기모델  $\mathbf{m}$ 을 설정한다;  $\mathbf{m} = \hat{\mathbf{m}}$

초기모델  $\mathbf{m}$ 에서의  $\mathbf{w}$ 를 계산한다;  $\mathbf{w} = \mathbf{w}(\hat{\mathbf{m}})$

초기모델  $\mathbf{m}$ 에서의  $\mathbf{G}$ 를 계산한다.

### Loop 시작

1. 현재 모델  $\mathbf{m}$ 에서  $\nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q}$ 를 구한다;

$$\nabla_w Q_i = \frac{1}{\Delta w} [S(w_i(\mathbf{m}) + \Delta w, \tau_i) - S(w_i(\mathbf{m}), \tau_i)]$$

$$\nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q} = \mathbf{G}^T \nabla_w \mathbf{Q}$$

2. Line search를 통해서  $\mathbf{Q}(\mathbf{m} + \alpha \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q})$ 의 최대값에 해당하는  $\alpha$ 를 구한다.

$$\nabla(\mathbf{m} - \alpha \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q}) = \mathbf{Q}(\mathbf{w}(\mathbf{m}) + \alpha \mathbf{G} \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q})$$

3. 모델을 수정한다.

$$\mathbf{m} = \mathbf{m} + \alpha \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q}$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{w} + \alpha \mathbf{G} \nabla_w \mathbf{Q}$$

수정된 모델  $\mathbf{m}$ 에서  $\mathbf{G}$ 를 다시 계산한다

### Loop 끝

이 자동속도분석 알고리즘은 Semblance의 최대값을 찾아가는 것이지만 실제 탐사자료는 잡음으로 인해서 Semblance가 그대로 지층모델을 설명하고 있다고 볼 수는 없다. 따라서 초기의 모델로부터 너무 동떨어져 물리적으로 합당하지 못한 지층모델로 수렴하는 것을 방지하기 위하여 다음과 같이 a priori condition을 부과하여 수정한 목적함수와 방향벡터를 이용하고 있다.

$$\dot{\mathbf{Q}}(\mathbf{m}) = \sum_i (w_i(\mathbf{m}), \tau_i) - \beta \delta \mathbf{m} \text{Tri}(-1, 2, -1) \delta \mathbf{m} \quad (12)$$

$$\nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \dot{\mathbf{Q}}(\mathbf{m}) = \nabla_{\hat{\mathbf{m}}} \mathbf{Q}(\mathbf{m}) - \beta \text{Tri}(-1, 2, -1) \delta \mathbf{m} \quad (13)$$

여기서  $\delta \mathbf{m}$ 은  $\mathbf{m} - \hat{\mathbf{m}}$ 을 나타내고,  $\beta$ 는 가중치를 나타내는 상수이다. 그리고  $\text{Tri}(-1, 2, -1)$ 은 대각선 요소가 2인 tridiagonal matrix이며,  $\mathbf{m}$ 은 초기모델을 말한다.

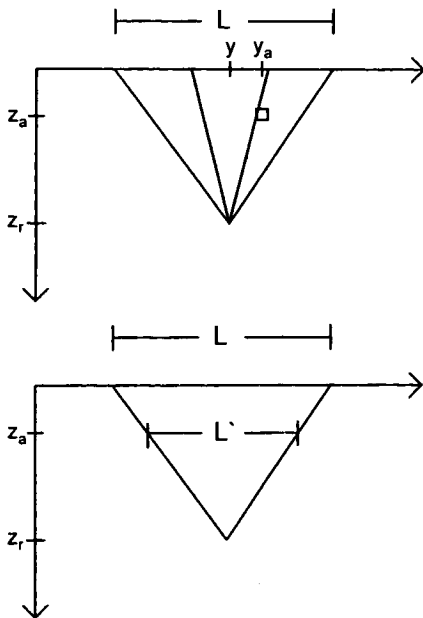
앞에서는 한 중심점으로 취합된 자료를 토대로 그 중심점 하부의 수직속도분포를 밝히는 1차원 자동속도분석 알고리즘이 논의되었다. 2차원 속도분석은 1차원 속도분석과 기본적인 알고리즘은 동일하다. 그러나 일반적인 속도 분석이나 앞에서 논의된 1차원 자동속도분석에서는 중합속도 ( $V_s$ )를 RMS속도 ( $V_{\text{RMS}}$ )와 동일하다고 보고 이를 이용하여 구간속도를 구하는데, 이는 수평적인 속도변화가 있을 때는 유효하지 않다. 수평적인 속도변화가 있는 구간에 대해서 자동속도분석 알고리즘을 적용하기 위해서는 구간지연도 (interval slowness)와 중합지연도 (stacking slowness,  $\mathbf{w}(\mathbf{m})$ )사이의 관계를 수평적인 속도변화를 고려하여 연관시켜야 한다. Toldi (1989, 1985)는 중합속도를 RMS속도와 동일하다고 보지 않고, 시간-거리 좌표상의 쌍곡선궤적을 나타내는 한 변수로 고려한다. 그리고 Semblance의 최대값에 해당하는 중합속도값은

주시에 의해서 결정되므로, 주시를 구간지연도와 중합지연도를 연결시키는 매개변수로 생각하여  $\mathbf{w}(\mathbf{m})$ 을  $\mathbf{w}(t(\mathbf{m}))$ 로 해석하므로써 이 자동속도분석 알고리즘을 수평적인 속도변화에 적용할 수 있게 하였다. 이 2차원 속도분석에서는 1차원 속도분석 알고리즘에서와 같이  $\mathbf{w}(t(\mathbf{m}))$ 를 선형 근사시킨 Linear theory를 기초로 관계식이 다음과 같이 유도된다.

Fig. 1에 나타난 그림은 한 중심점취합한 자료의 파선 경로들을 보이고 있다.  $(y_a, z_a)$ 에 위치한 작은 사각형에서 일어나는 구간속도의 변화는 이 사각형을 지나는 파선의 주시를 변하게 하고, 이 주시에 가장 잘맞는 쌍곡선계적도 변하게 되어, 결국 이 쌍곡선계적을 결정하는 중합속도를 변하게 한다. 따라서, 깊이가  $z$ 인 반사면에 대해, 한 중심점  $y$ 에서 중합지연도의 변화는 중심점취합된 자료의 파선경로에 포함된 구간지연도 변화의 적분형태로 표시된다.

$$\nabla(y, z) = \int_{y_a} \int_{z_a} Q(y, z, y_a, z_a) \nabla_{in}(y_a, z_a) dz_a dy_a \quad (14)$$

여기서,  $\Delta w_{in}(y_a, z_a)$ 는  $(y_a, z_a)$ 에서의 구간지연도의 변화량이고,  $G(y, z, y_a, z_a)$ 는 impulse response로 Toldi (1989)의 결과식에 의해 다음과 같이 주어진다.



**Fig. 1.** Geometry for a constant velocity and a flat reflector. Shown are a few raypaths for the CMP gather at  $y$ . The maximum offset is  $L$  and the projection of  $L$  to depth  $z_a$  is  $L'$ . The impulse of anomalous interval velocity has coordinates  $(y_a, z_a)$ .

$$G(y, z, y_a, z_a) = \frac{15z}{L^2 L'} \left[ 3 \left( \frac{2(y_a - y)}{L'} \right)^2 - 1 \right] \left[ 1 + \frac{L^2}{4z^2} \left( \frac{2(y_a - y)}{L'} \right)^2 \right] \quad (15)$$

$$= 0 \quad \text{for } |y_a - y| > \frac{L'}{2}$$

그리고  $w_{in}(y_a, z_a)$ 는  $y$ 방향으로 Fourier 급수 전개한 함수로 보아서, 이 급수의 basis 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w_{in}(y_a, z_a) = \sum_k m_k h_k(y_a, z_a) \quad (16)$$

여기서,  $m_k$ 는 확장계수 (expansion coefficient)이고,  $h_k(y_a, z_a)$ 는 sine 함수와 cosine 함수로 구성되는 basis 함수이다. 식 (16)을 식 (14)에 대입하면 다음과 같이 이산화된 중합지연도 관계식을 구할 수 있다.

$$w_{ij}(\mathbf{m}) = w_{ij}(\hat{\mathbf{m}}) + \sum_k G_{ijk}(m_k - \hat{m}_k) \quad (17)$$

여기서,  $i$ 는 깊이  $z_i$ 의 반사면,  $j$ 는 중심점  $y_j$ 를 나타내고,  $G_{ijk}$ 는 다음과 같다.

$$G_{ijk} = \int_{y_a} \int_{z_a} G(y, z, y_a, z_a) h_k(y_a, z_a) dz_a dy_a \quad (18)$$

그리고 2차원 자동속도분석의 목적함수는 식 (19)에 표현된 것처럼, 한 영주시  $\tau_i$ 에 대해 중합속도-중심점 좌표상에 표현된  $w_{ij}(\mathbf{m})$ 에 해당하는 Semblance 값들의 합이 되고, 이 때  $\nabla_w Q$ 는 식 (20)을 이용하여 구한다.

$$Q = \sum_i \sum_j S(w_{ij}(\mathbf{m}), \tau_i, y_j) \quad (19)$$

$$\nabla_w Q = \frac{1}{\Delta w} [S(w_{ij}(\mathbf{m}) + \Delta w, \tau_i, y_j) - S(w_{ij}(\mathbf{m}), \tau_i, y_j)] \quad (20)$$

### 수치모형실험

이 자동속도분석 알고리즘의 적용성과 한계성을 검토해 보기 위해서 Fig. 2의 간단한 수평층모델에 대하여 파선추적법을 이용하여 주시를 구한 후, 인공탄성파기록을 만들고 이에 대하여 1차원 및 2차원 자동속도분석을 실행하였다. 주시를 구하기 위한 파선추적법은 유한요소법을

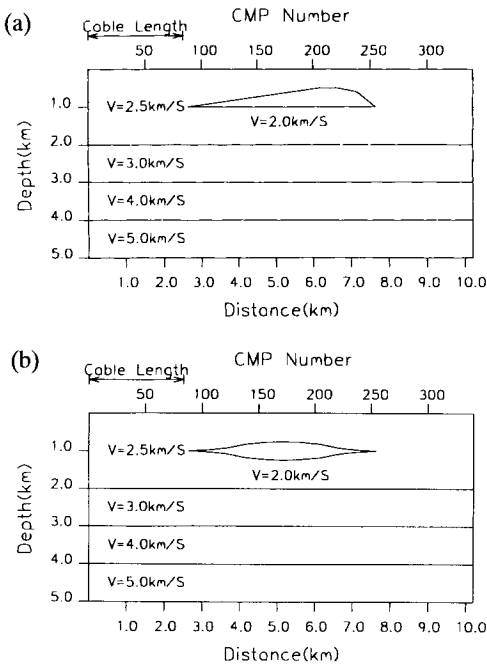


Fig. 2. Models to compute traveltimes by ray-tracing method. Each model has a lateral velocity anomaly in the first layer.

이용한 파선추적법 (윤일권 등, 1997)을 이용하였다. Fig. 2의 제 1층에 존재하는 구간속도 2.0km/S의 속도가 상대는 수평적인 속도변화를 주기 위한 구조이므로, 이

부분에 대한 속도분석결과는 고려하지 않겠다.

Fig. 3은 Fig. 2 (a)의 모델에 대해 파선추적법을 통해 주시를 구하여 음원파형을 convolution한 후, 각 중심점에 대해 취합한 것이다. Fig. 4는 Fig. 3의 자료에 대한 Semblance와 1차원 속도분석결과를 나타낸 것이다. 구간속도는 지표에서 2.5 km/S이고 깊이에 비례하여 일정하게 증가하는 모델을 초기값으로 주었다. Fig. 5에서 직선으로 나타난 것이 초기모델이고, 이 초기모델에 대한 RMS속도가 Fig. 4에 보이는 직선이다. 이 RMS속도를 중합속도라 가정하고 자동속도분석 알고리즘을 이용하여 각 중심점자료에 대해 속도분석한 결과가 Fig. 4과 Fig. 5에 보이는 굵은 실선이다. 이 그림들의 여러개의 가는 실선들은 중합속도와 구간속도가 반복적으로 수렴해 가는 과정의 값들이다. Fig. 5의 속도분석의 결과를 보면, 속도가상대에서 멀리 떨어진 중심점 1과 301에서의 구간속도 결과는 모형의 구간속도와 매우 근사함을 알 수 있으나, 속도가상대의 영향으로 중심점 101과 201에서의 결과는 하부지층의 구간속도가 크게 나타난다. 특히 중심점 201의 경우에는 영주시 2초를 전후해서 다른 중심점의 속도가 3.0 km/S 정도인데 반해 4.0 km/S 정도의 결과를 보이며, 그 하부에서는 오히려 속도가 줄고 있다. 중심점 201에서 영주시 2.5초 이후에 구간속도가 줄어드는 것은 Fig. 4(c)에서 영주시 2.9초에 나타나는 Semblance의 정점을 제대로 찾아 수렴하지 못했기 때문이다. 이 정점은 초기모델로부터 너무 동떨어

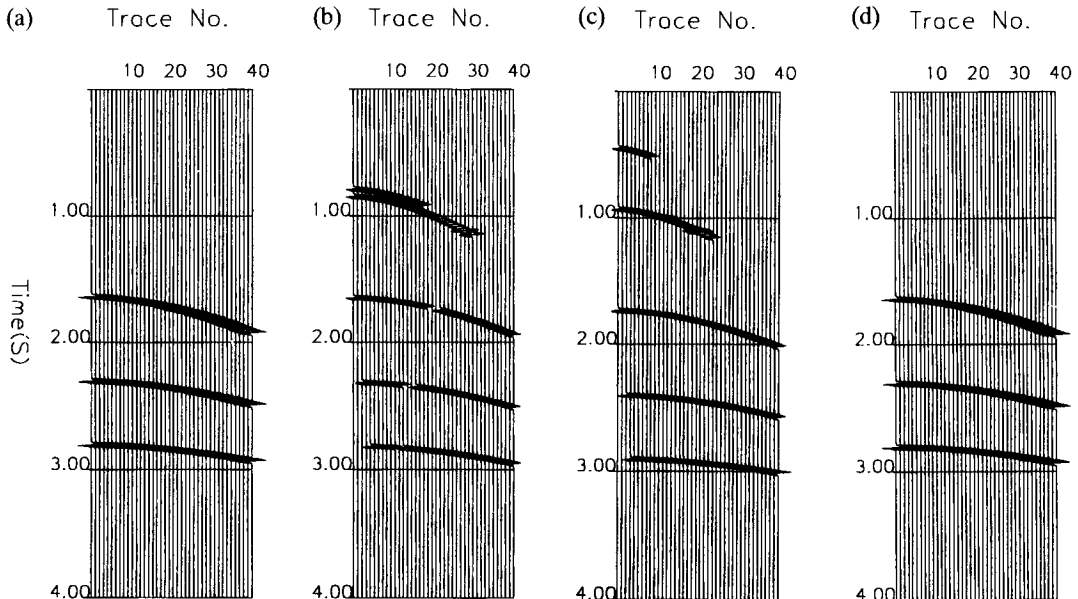
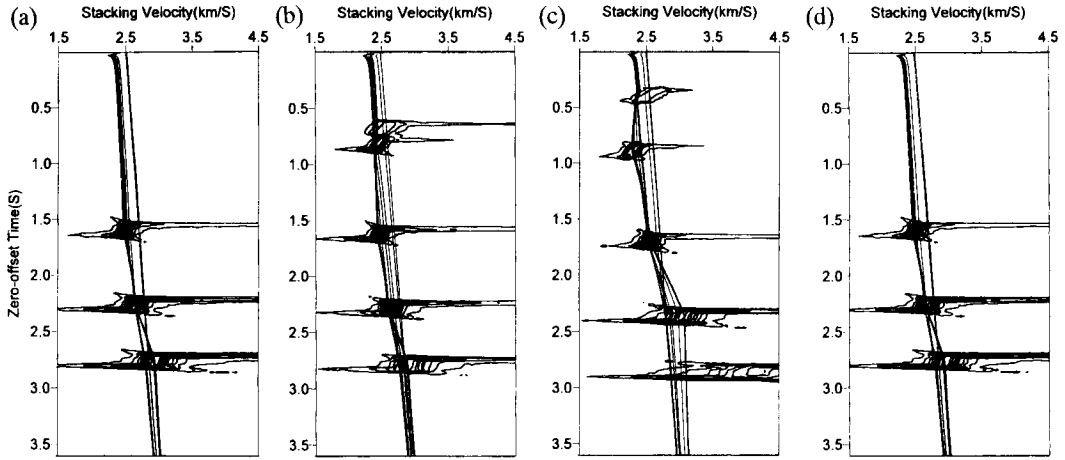


Fig. 3. Synthetic seismograms, which are generated by convolution of source wavelet to the traveltimes, at CMPs. (a) at CMP 1, (b) at CMP 101, (c) at CMP 201, (d) at CMP 301.

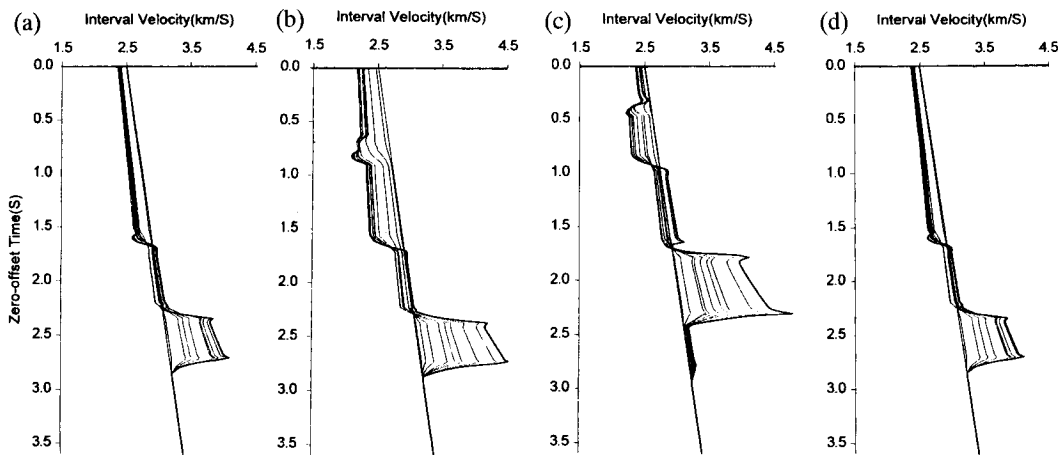


**Fig. 4.** Semblance contour plots and overlaid stacking velocity curves for each iteration in the one-dimensional automatic velocity analysis. The solid thick curve indicates the stacking velocity at final iteration. (a) at CMP 1, (b) at CMP 101, (c) at CMP 201, (d) at CMP 301.

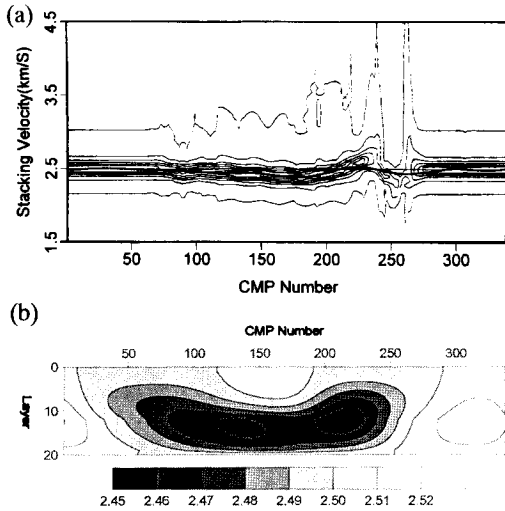
저 있기 때문이기도 하지만, 영주시 2.9초에 해당하는 반사면을 갖는 지층은 그 상부의 주시에 전혀 영향을 못 미치기 때문에 이 정점에 대한 수렴이 늦는 것이다. 이 알고리즘에 의한 속도분석은 이러한 기록시간의 끝 부분에 해당하는 정점으로의 수렴이 늦다. Fig. 5에서 영주시 3.0초 이후에 구간속도가 초기값으로부터 전혀 변화가 없는 것은 이 하부에는 지층의 반사기록이 없기 때문이다.

앞의 1차원 속도분석의 결과를 보면 구간속도의 결과가 수평적으로 속도변화가 있는 지역에서는 오차가 큰 것을 알 수 있다. 이 수평적인 속도변화를 알아보기 위하여 영주시 1.6초 부근에서 Semblance를 수평으로 절단하여 중합

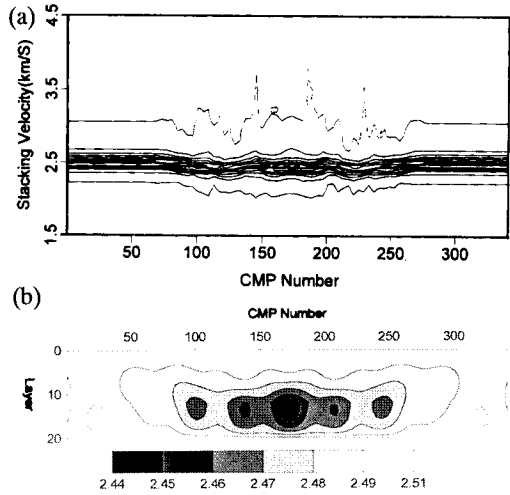
속도-중심점 좌표에 나타낸 것이 Fig. 6(a)이다. Fig. 6(a)의 Semblance를 보면 중심점 100부근부터 250 정도까지 수평적으로 변화가 있다. 중심점 250정도에서 Semblance의 정점이 심하게 진동하는 것은 속도의 변화가 큰 것을 나타낸다. 이 Semblance에 2차원 자동속도분석을 실행한 결과가 Fig. 6(a)에 굵은 실선으로 보이는 것이고, 초기값은 2.5 km/S로 가는 실선의 직선으로 나타낸다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)의 Semblance에 대한 반사면까지의 지층을 20개의 층으로 나눈 후, 각 지층을 2.5 km/S의 균일한 구간속도를 갖도록 초기모델을 설정하여 자동속도분석을 실행한 구간속도 결과이다. Fig. 6 (b)의 구간속도 결과를



**Fig. 5.** Interval velocity models from starting to final iteration. The solid thick curve is the final model. (a) at CMP 1, (b) at CMP 101, (c) at CMP 201, (d) at CMP 301.



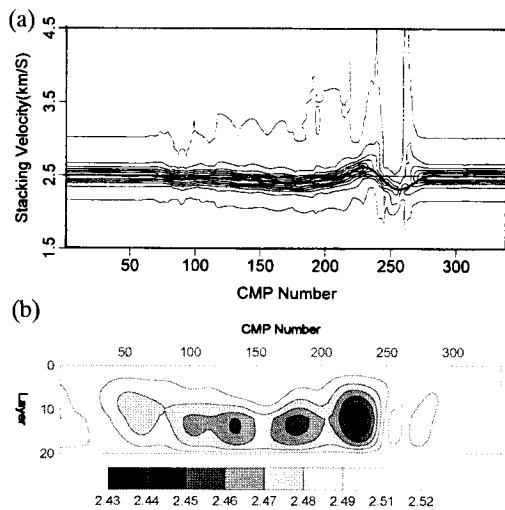
**Fig. 6.** Results of two-dimensional velocity analysis for the synthetic seismograms generated for the model in Fig. 2(a). (a) Semblance contour plot as a function of stacking velocity and midpoint. Initial stacking velocity is shown as a thin solid line and final result as a thick solid line. (b) Interval velocity model at final iteration. The shortest wavelength of basis function used in the velocity analysis is 2 km.



**Fig. 8.** Results of two-dimensional velocity analysis for the synthetic seismograms generated for the model in Fig. 2(b). (a) Semblance contour plot as a function of stacking velocity and midpoint. Initial stacking velocity is shown as a thin solid line and final result as a thick solid line. (b) Interval velocity model at final iteration. The shortest wavelength of basis function used in the velocity analysis is 1 km.

Fig. 2 (a)의 구간속도 분포와 비교해보면, 절대적인 구간 속도값은 오차가 크지만 상대적인 속도의 변화는 잘 나타

나고 있다. 그러나 속도 이상대의 두께나 깊이에 있어서는 속도 변화를 잘 나타내지는 못하고 있다. Fig. 6은 basis함수들의 최소과장을 2km로 하였는데, 이 최소과장을 1km로 하여 속도분석을 한 결과가 Fig. 7이다. Fig. 7(a)는 Fig. 6(a)에 비해 중합속도가 Semblance의 정점을 잘 찾아가지만, Fig. 7(b)의 구간속도는 그 크기가 거리에 따라서 진동하는 경향을 보인다. 이는 최종으로 수렴한 중합속도가 중심점 250 부근에서 심하게 진동하여 이로 인한 영향으로 보이며, Fig. 7(b)의 구간속도 역시 중심점 250을 전후로 해서 심하게 변하는 모습을 보인다. 이 알고리즘은 기본적으로 중합속도를 토대로 하기 때문에 중합속도의 변화 형태가 구간속도의 변화에 영향을 미쳐 이러한 결과가 나타나게 되며, basis함수의 설정에도 결과가 민감한 영향을 받는다. Fig. 8은 Fig. 2(b)의 모형에 대한 속도분석결과로 속도이상대의 구조가 좌우대칭으로 Fig. 8(a)의 Semblance의 정점도 좌우대칭의 형태를 보이며, Fig. 8(b)의 구간속도도 대칭형태로 나타나고 있다. 앞의 결과와 마찬가지로 전반적인 속도변화는 잘 나타나고 있으나, 그 변화의 크기나 깊이나 변화대의 깊이는 다소 오차가 있다.



**Fig. 7.** Results of two-dimensional velocity analysis for the synthetic seismograms generated for the model in Fig. 2(a). (a) Semblance contour plot as for a function of stacking velocity and midpoint. Initial stacking velocity is shown as a thin solid line and final result as a thick solid line. (b) Interval velocity model at final iteration. The shortest wavelength of basis function used in the velocity analysis is 1 km.

## 결론

자동속도분석 알고리즘을 간단한 모형의 인공탄성파기

록에 대해 적용해 본 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 일반적인 속도분석과정의 문제점인 수작업을 통한 중합속도의 선별과정없이 속도분석을 실행함으로써 선별 작업의 번거로움과 부적당한 중합속도의 선별이라는 문제점을 개선할 수 있었다. 또한 구간속도의 수평적변화는 수직속도분석으로는 알 수가 없으나, 2차원 자동속도분석을 통해서 구간속도의 전반적인 분포를 알 수 있었다. 그리고 이 속도분석방법은 중합속도를 기반으로 하기 때문에 적용이 쉽고 빠르다. 그러나 중합속도를 기반으로 하므로 2차원 속도분석에 있어서 중합속도의 변화형태가 구간속도의 변화형태에 크게 영향을 미치며, 반사면의 깊이 변화에 따른 중합속도의 변화는 고려할 수 없다는 단점이 있다. 그리고 2차원 속도분석을 통해서, 속도이상대의 수평적인 범위와 그 변화형태는 비교적 잘 알 수가 있으나 그 깊이에 대한 정보는 그대로 받아들이기에는 문제점이 있는 것으로 보인다.

### 참고문헌

윤일권, 서정희, 신창수 (1997) 유한요소 파선추적법을 이용한 반사 토모그래피. 한국자원공학회 제 68회 학술발표회, p. 105-109.  
 Al Chalabi, M. (1974) An analysis of stacking, RMS, average and interval velocities over a horizontally layered round. Geophy. Prosp., v. 22, p. 458-475.

Arora, J.A. (1989) Introduction to optimum design. McGraw-Hill Book Company, Inc.  
 Bishop, T.N., Bube, K.P., Kutler, R.T., Langan, R.T., Love, P.L., Resnick, J.R., Shuey, R.T., Spindler, D.A., and Wyld, H.W. (1985) Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media. Geophysics, v. 50, p. 903-923.  
 Dix, C.H. (1955) Seismic velocities from surface measurements. Geophysics, v. 20, p. 68-86.  
 Hubral, P., and Krey, T. (1980) Interval velocities from seismic reflection time measurements. SEG.  
 Neidell, N.S. and Taner, M.T. (1971) Semblance and other coherency measures for multichannel data. Geophysics, v. 36, p. 482-497.  
 Ronen, S., and Claerbout, J.F. (1985) Surface-consistent residual statics estimation by stack-power maximization. Geophysics, v. 50, p. 2759-2767.  
 Sherwood, J.W.C., and Chen, K.C., and Wood, M. (1986) Depth and interval velocities from seismic reflection data for low relief structures. Presented at the 18th Ann. Offshore Technology Conference.  
 Stork, C., and Clayton, R.W. (1985) Iterative tomographic and migration reconstruction of seismic images. 55th Ann. Int'l Mtg., SEG, Expanded Abstracts, p. 610-613.  
 Taner, M.T., and Koehler, F. (1969) Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions. Geophysics, v. 34, p. 859-881.  
 Toldi, J. (1985) Velocity analysis without picking. Ph.D. thesis, Stanford Univ.  
 Toldi, J. (1989) Velocity analysis without picking. Geophysics, v. 54, p. 191-199.

---

1997년 10월 8일 원고접수