

## 3-D 지층의 굴절 및 반사 주시곡선 해석 연구

양승진\* · 유해수\*\* · 박석재\*

### A Study on Interpretation of Seismic Refraction and Reflection Travelttime Curves in 3-D Layers

Seung-Jin Yang\*, Hai-Soo You\*\* and Suk-Jae Park\*

**ABSTRACT:** An Interpretation technique is presented to determine strike, dip, velocity and depth of 3-D planar layers from refraction or reflection travelttime curve. This interpretation technique determines the direction of emerging ray from the slope of the travelttime curve and traces the emerging ray to the refractor or reflector. The ray direction in the last layer is used to decide the normal vector to the refractor or reflector from which its dip, strike and velocity are calculated. The vertical depth to the refractor or reflector is computed by using the intercept or zero-offset time and the ray direction in each layer.

Some tests on the interpretation method are performed for the synthetic travelttimes generated in 3-D model layers and show that the paramerters of the model layers are accurately determined.

## 서 론

각 층의 주향과 경사가 다른 3차원 지층에 대한 탄성파 굴절 및 반사 주시곡선은 측선 방향에 따라 다르기 때문에 이 주시곡선을 간단한 수평층 해석공식(예, Dobrin, 1976)이나 2-D 경사층 해석법(Kurihara, 1960; 양, 1979; Palmer, 1980 and 1981)으로 해석하면 측선 방향에 따라 해석 결과가 다르고 실제 지층 상태가 다르게 해석되며 주향이 결정될 수 없기 때문에 정확한 해석을 위해서는 3차원적 해석을 시행할 필요가 있다.

3차원 지층해석은 반복적 연산법(tomographic inversion)에 의해 한 측선의 주시자료 또는 임의로 산재된 수진점에서의 주시자료를 해석할 수 있으나 이 방법은 역산에 관한 전문 지식과 정교한 전산 프로그램을 필요로 하고 또한 많은 전산시간이 소요되어 쉽게 이용될 수 없다. 본 논문에서 기술하는 3차원 해석법은 tomography 법이 아닌 주시곡선의 3차원적 직접 해석법에 관한 것이다.

굴절 주시의 3차원적 직접해석은 최근 몇 학자(Russel et al., 1982; Aldridge, 1989; 양 등, 1991)에 의해 연구된 바 있고, CDP 반사자료에 대한 3차원적 직접 해석에 관

해서는 여러 학자(Hubral and Krey, 1980; Hubral, 1976, 양, 1984 및 1985)에 의해 연구된 바 있다.

본 논문에서는 3차원적 평면 다층 구조에서의 굴절 및 반사자료를 직접 해석하는 방법을 종합적으로 기술하며 특히 심도 결정을 효율적으로 결정하는 방법을 제시한다.

굴절법 주시 해석은 한 측선에 대한 양단 발파주시와 각 발파시 이측선에 교차하는 측선에서의 주시 자료를 이용하며, 반사법 해석은 교차하는 두 측선의 각각에서 발파점과 수진점들을 이동하며 탐사된 주시자료를 이용한다.

본 해석 방법은 교차하는 두 측선에서의 주시곡선 기울기에서 굴절 또는 반사파(수직 반사파)의 지표에서의 파선 방향을 결정하고 이로부터 파선추적(ray tracing)에 의해 굴절 또는 반사층의 주향, 경사, 속도를 결정하며 절점주시 또는 영주시에서 심도를 계산하는바, 본 논문에서는 이 각 과정을 순서적으로 기술한다. 그리고 가정된 3차원 모형지층에 대해 계산적으로 구한 합성 주시자료를 본 해석 방법으로 해석하여 모형 지층의 요소가 결정되는가를 시험해 봄으로써 해석 방법의 타당성을 입증해 보기로 한다.

## 출현 파선 방향 결정

수평층 상의 임의의 측선 또는 주향이 일정한 2-D 경

\*한양대학교 자원공학과(Dept. of Resources Eng., Hanyang Univ. Seoul 133-791, Korea).

\*\*한국해양연구소(Korea Ocean Reseach and Development Institute).

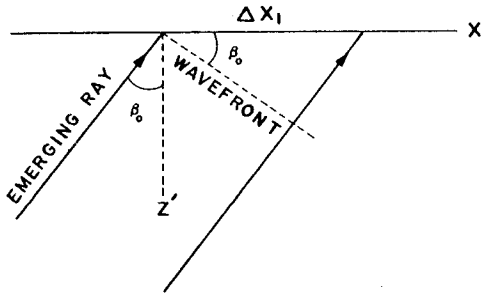


Fig. 1. Emerging ray and its wavefront.

사층에서 주향에 직각인 축선상의 여러 지점에 도달되는 파(출현파) 즉, 평행한 여러 파선들(임계 굴절 파선 또는 수직 반사파선)은 각 파선이 축선을 내포하는 수직면 내에 있기 때문에 한 축선에 대한 주시곡선의 기울기에서 그 파선의 지표에 수직선과의 각(출현각) 및 이에 의한 파선 방향을 구할수 있으나, 3차원 지층의 경우에는 출현파선이 수직면 내에 있지 않기 때문에 한 지점에 도달되는 출현 파의 파선 방향을 결정하기 위해서는 그 지점에서 교차하는 두 축선에서의 주시 곡선 기울기가 필요하다. Fig. 1과 같이 한 축선( $x_1$ )에 도달하는 출현 파선들이 이루는 면(파선면)내의 축선에 직각인 선( $z'$ )과 출현파선이 이루는 출현각  $\beta_0$ 는 주시곡선의 기울기  $g_1$  및 제 1층 속도  $V_1$ 과

$$g_1 (= \frac{\Delta t}{\Delta x_1}) = \frac{\sin \beta_0}{V_1} \quad (1)$$

의 관계가 있다. 위 식에서

$$\beta_0 = \sin^{-1}(g_1 V_1) \quad (2)$$

마찬가지로 제 2축선( $x_2$ )에서의 주시곡선 기울기

$g_2 (= \frac{dt}{dx_2})$ 로부터 이 축선에 대한 출현각  $\beta'_0$ 는

$$\beta'_0 = \sin^{-1}(g_2 V_1) \quad (3)$$

Fig. 2에서와 같이 축선  $x_1$ 의 북(y)으로 부터의 방위각을  $\theta$ ,  $x_1$ 과  $x_2$ 의 각을  $\Delta\theta$ , 출현파선에 직각인 면(출현파면)의 주향에 직각인 지표상의 선의 방향(dip direction)  $x_d$ 와  $x_1$ 의 각을  $\Phi$ , 출현파면의 주향과 경사를  $\xi$  및  $\delta$ 라 할 때

$$\sin \beta_0 = \cos \Phi \sin \delta \quad (4)$$

$$\sin \beta'_0 = \cos(\Phi + \Delta\theta) \sin \delta \quad (5)$$

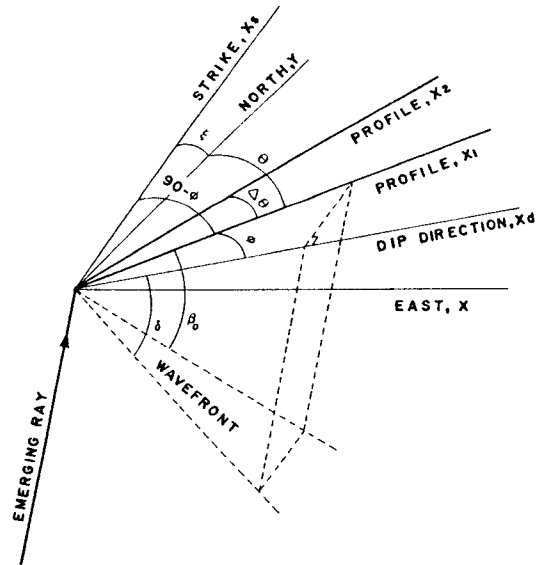


Fig. 2. Relation between emerging angle  $\beta_0$  and dip of emerging wavefront,  $\delta$ .

(5)를 (4)로 나눈 후 (2) 및 (3)식을 대입하면

$$\Phi = \tan^{-1}(\cot \Delta\theta - \frac{g_2}{g_1 \sin \Delta\theta}) \quad (6)$$

(4)에서 파면의 경사는

$$\delta = \sin^{-1}(\sin \beta_0 / \cos \Phi) \quad (7)$$

이고, 파면의 주향은(Fig. 2참조)

$$\xi = (90 - \Phi) - \theta \quad (8)$$

출현 파면에 직각인 출현파선의 단위 벡터  $\hat{r}_1$ 은

$$\hat{r}_1 = \cos \xi \sin \delta \hat{x} + \sin \xi \sin \delta \hat{y} + \cos \delta \hat{z} \quad (9)$$

이다. 여기서  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{z}$ 는 x(동), y(북), z(수직 상향)방향의 단위 벡터이다.

굴절주시 곡선의 n층 주시 기울기에서 결정된  $\hat{r}_1$ 은  $n^{\text{th}}$  경계면에 따라 임계 굴절된 후 축선에 도달되는 파의 제 1층에서의 파선 방향이고,  $n^{\text{th}}$ 층면에 대한 반사파 영주시  $t_{0,n}$ 의 기울기에서 결정된  $\hat{r}_1$ 은  $n^{\text{th}}$ 면에 수직으로 입사 및 반사된 파의 제 1층에서의 파선 방향이다.

굴절법의 한 축선에 대한 일단 발파 주시곡선에서 구한 출현파 방향을  $\hat{r}_1$ 이라 하고 그 축선에 대한 역발파 주시 곡선에서 구한 출현파 방향을  $\hat{r}'_1$ 이라 하고, 반사법의 일방

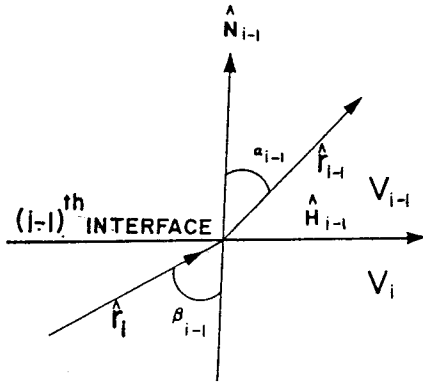


Fig. 3. Incident and transmitted rays at  $(i-1)^{\text{th}}$  interface.

발파 주시곡선에서 구한 수직 반사파의 출현파 방향을  $\hat{r}_i$  이라 할 때 이  $\hat{r}_i$  및  $\hat{r}_i'$ 을 다음과 같이  $n$ 층까지 파선 추적하여 지층요소를 결정한다.

### 파선추적 및 속도, 주향, 경사 결정

$(i-1)$ 층에서의 파선방향  $\hat{r}_{i-1}$ 이 알려졌을 시  $i$ 층에서의 파선방향  $\hat{r}_i$ 는(Fig. 3참조)

$$\hat{r}_i = \sin \beta_{i-1} \hat{H}_{i-1} + \cos \beta_{i-1} \hat{N}_{i-1} \quad (10)$$

이때 여기서  $\hat{N}_{i-1}$  및  $\hat{H}_{i-1}$ 는  $(i-1)^{\text{th}}$ 면의 수선 및 이에 직각 방향 단위 벡터이고  $\beta_{i-1}$ 는 입사각이다.  $\beta_{i-1}$ 는 Snell법칙에 의해  $(i-1)$  및  $i$ 층의 속도  $V_{i-1}$  및  $V_i$ 로 부터

$$\beta_{i-1} = \sin^{-1} \left\{ \left( \frac{V_i}{V_{i-1}} \right) \sin \alpha_{i-1} \right\} \quad (11)$$

이때 여기서 굴절각  $\alpha_{i-1}$ 는

$$\alpha_{i-1} = \cos^{-1} (\hat{r}_{i-1} \cdot \hat{N}_{i-1}) \quad (12)$$

이다. 그리고 (10)의  $\hat{H}_{i-1}$ 는

$$\hat{H}_{i-1} = (\hat{r}_{i-1} - \cos \alpha_{i-1} \hat{N}_{i-1}) / \sin \alpha_{i-1} \quad (13)$$

법의 경우  $\hat{r}_i$  및  $\hat{r}_i'$ 을  $n$ 층까지 파선추적하여  $\hat{r}_n$  및  $\hat{r}_n'$ 을 구하면  $\hat{r}_n$  및  $\hat{r}_n'$ 과  $\hat{N}_n$ 의 각  $\alpha_n$  및  $\alpha_n'$ 은 임계각임으로 같으며 그 각은(Fig. 4참조)

$$\alpha_n = \frac{\cos^{-1} (\hat{r}_n \cdot \hat{r}_n')}{2} \quad (14)$$

이다. 그리고  $n^{\text{th}}$ 면의 수선  $\hat{N}_n$ 는

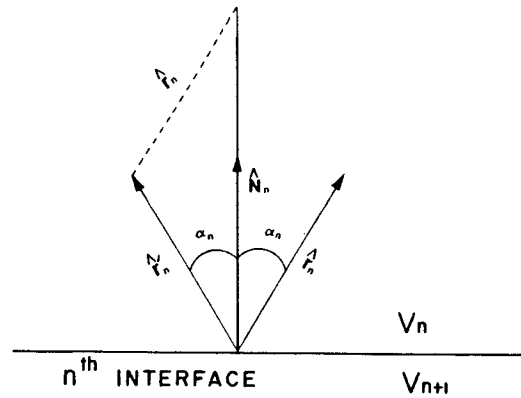


Fig. 4. Critically refracted rays at the  $n^{\text{th}}$  interface.

$$\hat{N}_n = \frac{\hat{r}_n + \hat{r}_n'}{2 \cos \alpha_n} \quad (15)$$

$\hat{N}_n$ 의  $x, y, z$  성분  $N_x, N_y, N_z$ 는 (9)에서와 같이  $N^{\text{th}}$ 면의 주향  $\xi$  및 경사  $\delta$ 의 함수임으로

$$\xi = \tan^{-1} \frac{N_y}{N_x} \quad (16)$$

$$\delta = \cos^{-1} N_z \quad (17)$$

그리고  $n+1$ 층의 속도  $V_{n+1}$ 은 임계각  $\alpha_n$ 으로 부터

$$V_{n+1} = \frac{V_n}{\sin \alpha_n} \quad (18)$$

반사법의 경우에는 교차하는 두 축선의 각각에서 연속 측정(continuous profiling)한 주시자료에서  $n^{\text{th}}$  반사면에 대한 영주시의 각 축선에서의 기울기에서  $\hat{r}_i$ 을 결정하고 이를  $n$ 층까지 추적하여  $\hat{r}_n$ 을 결정하면 이것이 수직 반사 파임으로  $\hat{r}_n = \hat{N}_n$ 이다. 따라서 이 경우는  $\hat{r}_n'$  및 이에 의한  $\hat{r}_n'$  결정을 위한 역발파는 불필요하다. 단, 반사법의 경우에는 전술한 굴절법 해석법과 달리 다음과 같은 방법으로  $n$ 층 요소를 결정한다.

한 CDP에서의  $n^{\text{th}}$ 면에 대한 반사주시는

$$t(x) = t_{0,n} + \frac{x^2}{\bar{V}_n^2} \quad (19)$$

이다. 여기서  $t_{0,n}$ 은 CDP에서의 수직 반사파의 왕복주시(영주시)이고  $\bar{V}_n$ 는 중합속도이다.  $\bar{V}_n$ 은 속도 스펙트럼 또는  $t^2 - x^2$  직선의 기울기에서 결정될 수 있다. 단, 한 음원에 대한 여러 수진기별 기록(trace sequential record)

의 주시를 이용시에는

$$(t(x) - \frac{\sin \beta_0}{V_1} x)^2 = (t(x) - g_1 x)^2 = t_{0,n}^2 + \frac{x^2}{\bar{V}_n^2} \quad (20)$$

의 관계식에서 도식적 또는 최소자승법에 의해  $t_{0,n}$ 과  $\bar{V}_n$ 을 결정한다. 여기서  $t_{0,n}$ 은 음원에서의 영주시이고  $\beta_0$ 은 수직반사파의 출현각이고  $g_1$ 은 영주시의 기울기( $dt_0/dx$ )이다.  $t_{0,n}$ 과  $\bar{V}_n$  및 (11), (12)으로 결정된  $\alpha_i$  및  $\beta_i$ 를 이용하여

$$V_n = [c / (1 + c \sin^2 \alpha_{n-1} V_{n-1}^2)]^{1/2} \quad (21)$$

$$c = (\bar{V}_n t_{0,n} \cos^2 \beta_0 - \sum_{j=1}^{n-1} V_j^2 \Delta t_j \prod_{k=0}^{j-1} \frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k}) /$$

$$(\Delta t_n \cos^2 \alpha_{n-1} \cdot \prod_{k=0}^{n-2} \frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k}) \quad (22)$$

이다(Hubral and Krey, 1980). 여기서  $\Delta t_j$ 는 수직 반사파의  $j$ 층에서의 왕복주시이다.  $j=1 \sim n-1$ 에 대한  $\Delta t_j$ 는  $(j-1)$ 면 까지의 파선 경로의 합벡터  $\bar{Q}_{j-1}$  ( $\sum_{i=1}^{j-1} \bar{r}_i$ )의  $x$ ,  $y$ ,  $z$  성분  $Q_x$ ,  $Q_y$ ,  $Q_z$ 를 이용하여 구할 수 있다. 즉,  $j$ 면의 법선 벡터  $\hat{N}$ 의 성분을  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$ 라 하고 원점(CDP 또는 음원)에서  $j$ 면까지의 수직 심도를  $Z_j$ 라 할때  $j$ 면의 식은

$$N_x x + N_y (z - z_j) = 0 \quad (23)$$

임으로 ( $Q_x$ ,  $Q_y$ ,  $Q_z$ )에서  $j$ 면까지의 수선의 길이  $\Delta Z_j'$ 는

$$\Delta Z_j' = Z_j - \frac{N_x Q_x + N_y Q_y}{N_z} - Q_z \quad (24)$$

이다. 따라서  $j$ 층에서의 파선 길이  $\bar{r}_j$ 는

$$\bar{r}_j = \Delta Z_j' \cdot \hat{N}_j / \hat{N}_j \cdot \hat{r}_j \quad (25)$$

이며  $j$ 층에서의 왕복주시  $\Delta t_j$ 는

$$\Delta t_j = 2\bar{r}_j / V_j \quad (26)$$

이다. 단, 반사층( $n$ 층)에서의  $\Delta t_n$ 은

$$\Delta t_n = t_{0,n} - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \bar{r}_i / V_i \quad (27)$$

(21)에 의해  $V_n$ 을 알면 (11)에 의해  $\beta_{n-1}$ 을 알 수 있고 (10)에 의해  $\bar{r}_n (= \bar{N}_n)$ 을 알 수 있으므로 (16) 및 (17)에 의해  $n$ 면의 주향과 경사를 결정한다.

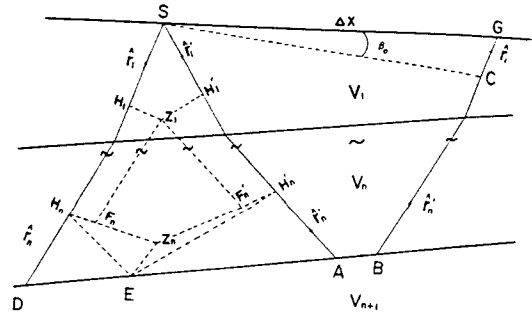


Fig. 5. Ray path and wavefront of the critically refracted ray at the  $n$ th interface.

## 심도 결정

심도는  $x=0$ 에서의 시간 즉, 굴절주시의 절점주시 또는 반사주시의 영주시를 심도의 함수로 표현함으로써  $x=0$ 에서의 심도를 결정할 수 있다. 굴절주시는

$$t(x) = t_{0,n} + \frac{\sin \beta_0}{V_1} x \quad (28)$$

이며 여기서 절점주시  $t_{0,n}$ 은 Fig. 5에서 보듯이 음원 S를 지나는  $\hat{r}_1$ 의 파면과  $\bar{r}_1$ 의 교점을 C라 할 때  $t_{0,n} = t_{S-C}$ 이다.  $n$ 면 상의 굴절파선의 연장선 상의 점 D에서  $\hat{r}_n \cdots \hat{r}_1$ 과 평행한 파선이 음원 S에 도달한다고 할 때  $t_{D-S} = t_{D-C}$ 이기 때문에

$$t_{0,n} (= t_{S-C} = t_{SA} + t_{A-C} = t_{SA} + t_{D-C} - t_{DA}) = t_{SA} + t_{SD} - t_{DA} \quad (29)$$

여기서 S에서의 수선과  $n$ 면의 교점  $Z_n$ 을 지나는  $\bar{r}_n$  및  $\bar{r}_n'$ 의 파면들과  $\hat{r}_n$ ,  $\hat{r}_n'$ , DA와의 교점을 각각  $H_n$ ,  $H_n'$  및 E라 할 때 (Fig. 5참조)  $t_{DE} = t_{DH_n}$ ,  $t_{EA} = t_{AH_n'}$ 임으로

$$t_{0,n} = t_{SH_n} + t_{SH_n'} \quad (30)$$

Fig. 6과 같이 S에서의 수선과  $i$ 면의 교점  $Z_i$ 를 지나는 파면과  $\bar{r}_i$  및  $\bar{r}_i'$ 의 교점을  $H_i$  및  $H_i'$ 이라 하고  $Z_{i-1}$ 에서  $\bar{r}_i$  및  $\bar{r}_i'$ 에 평행한 선과  $Z_i H_i$  및  $Z_i H_i'$ 과의 교점을  $F_i$  및  $F_i'$ 이라 할 때  $t_{H_{i-1} H_i} = t_{Z_{i-1} F_i}$ ,  $t_{H_i' - 1 H_i'} = t_{Z_{i-1} F_i'}$  임으로

$$t_{0,n} = \sum_{i=1}^n (Z_{i-1} F_i + Z_{i-1} F_i') / V_i = \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \{ \hat{Z} \cdot (\hat{r}_i + \hat{r}_i') / V_i \} \quad (31)$$

이다. 여기서  $\Delta Z_i$ 는 음원( $S=z_0$ )하부에서의  $i$ 층의 수직두께 ( $\Delta Z_i = Z_i - Z_{i-1}$ )이다. 따라서  $(n-1)$ 층까지의 심도가 알려졌을시  $n$ 층의 수직두께  $\Delta Z_n$ 는

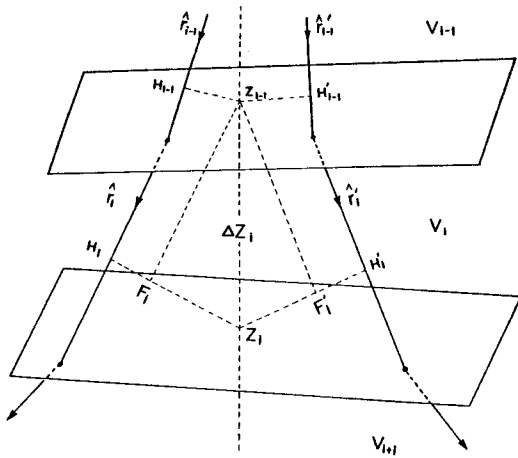


Fig. 6. Ray paths in the  $(i-1)^{th}$  and  $i^{th}$  layers and their wavefronts passing the points  $Z_{i-1}$  and  $Z_i$  where the vertical line from a source intersects the  $(i-1)^{th}$  and  $i^{th}$  interfaces, respectively.

$$\Delta Z_n = [t_{0n} - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta Z_i \{ \hat{Z} \cdot (\hat{r}_i + \hat{r}_i') \} / V_i] V_n / \{ \hat{Z} \cdot (\hat{r}_n + \hat{r}_n') \} \quad (32)$$

반사자료의 경우에는  $n$ 층에 대한 영주시  $t_{0n}$ 이 수직왕복 주시임으로 (27)에서  $\hat{r}_i = \hat{r}_i'$ 이기 때문에

$$\Delta Z_n = \left[ \frac{t_{0n}}{2} - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta Z_i (\hat{Z} \cdot \hat{r}_i) / V_i \right] V_n / (\hat{Z} \cdot \hat{r}_n) \quad (33)$$

$$Z_n = Z_{n-1} + \Delta Z_n \quad (34)$$

이다. 또는 (10), (21), (27)에서  $\bar{r}_n (= \hat{r}_n \Delta t_n V_n / 2)$ 를 구하고,  $\bar{Q}_n (= \sum_{i=1}^n \bar{r}_i)$ 로부터

$$Z_n = \bar{Q}_n \cdot \hat{N}_n / \hat{N}_n \cdot \hat{Z}$$

에 의해 구해되 된다.

### 합성 주시자료 해석 시험 및 고찰

앞에서 기술한 해석방법에 의한 해석결과의 정확성을 검토해 보기 위해 가상 모형 지층에 대한 합성주시자료를 작성하여 이 주시자료를 해석함으로써 모형 지층의 요소들이 정확히 해석되는가를 시험해 보기로 한다.

삼차원 지층상의 특정 음원과 수신기 사이의 굴절 또는 반사주시를 작성하기 위해서는 음원에서 출발하여 수신기에 도달되는 파의 경로를 알아야 되는 바, 이 경로는

Table 1. Model of three dimensional planar 4-layer.

Layer	Strike	Dip	Depth (meters)	Velocity (m/sec)
1	N 8°E	5°NW	200	1300
2	N16°E	10°SE	400	2200
4	N24°E	25°SE	600	4700
4	-	-	-	8800

사전에 알 수가 없기 때문에 이를 임의로 가정 후 반복적으로 경로를 수정해야 한다. 반복적 파선 경로 수정법에는 음원에서 임의의 각도로 출발한 파를 Snell 법칙에 따라 추적하여 이것이 수신기에 도달되지 않을 때는 수신기에 도달될 때까지 출발각을 반복적으로 변경하는 방법 (Shooting method: Hubral and Krey, 1980)과 파선경로를 가정 후 이 경로가 Fermat원리를 만족하도록 경로와 지층면의 교점을 반복적으로 수정하는 방법(bending method; Chander, 1973) 등이 있다. 본 논문에서는 후자의 방법으로 모형지층에 대한 굴절 및 반사 주시곡선을 작성하였다.

Table 1은 주향과 경사를 달리하는 4층 3차원 평면 모형 지층이다. 이 모형 지층상의 N70°E 방향의 제 1층선(총 길이 1.99 km)에 대한 양단 발파 주시곡선은 Fig. 7과 같다. 그리고 이 층선의 양 끝( $x=0$  및  $x=1.99$  km)에서 이 층선과 70°의 각을 갖는(즉, 북쪽 방향) 제 2층선에 대한 주시 곡선은 Fig. 8과 같다. 본 그림에서  $x=0$ 은 두 층선의 교차점이다. 제 1층선에 대한 각 층의 굴절 주시곡선은 거의 직선이나 Fig. 8과 같이 제 1층선에 교차하는 층선 즉, 음원을 지나지 않는 제 2층선에 대한 주시 곡선은 곡선이다. 따라서 이 제 2층선의 주시곡선 기울기는 제 1층선과의 교차점에서 주시곡선에 접선을 그려 그 기울기로부터 결정한다. 이 기울기는 도식적으로 결정하거나 또는 더 정밀히 결정하려면 주시곡선을 다항식  $(t(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i)$ 으로 fitting하여 교차점에서의 기울기  $a_1 (= \frac{dt}{dx} |_{x=0})$

을 결정한다. 여러 모형 지층에 대한 실험결과 3차식( $m=3$ )으로 fitting하면 파선방향( $\hat{r}_1$ )이 정확히 결정되며 2차식( $m=2$ )으로 fitting해도  $\hat{r}_1$ 이 거의 정확히 결정되며 두 지점의 주시로부터 1차식으로 구한 기울기를 이용하면 개략적인  $\hat{r}_1$ 이 결정된다.

Table 2는 Fig. 7의 제 1층선에서의 양단 주시곡선의 기울기 및  $x=0$ 에서의 절점 주시와 Fig. 8의 제 2층선(교차층선)에 대한 주시곡선을 2차식으로 fitting하여 구한 기울기에 의해

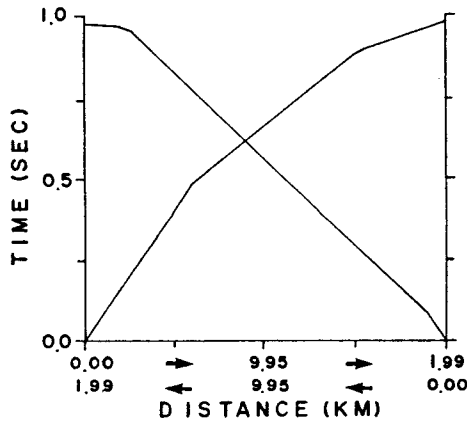


Fig. 7. Reciprocal traveltimes curves of refraction for the first profile of N70°E direction on the model layers.

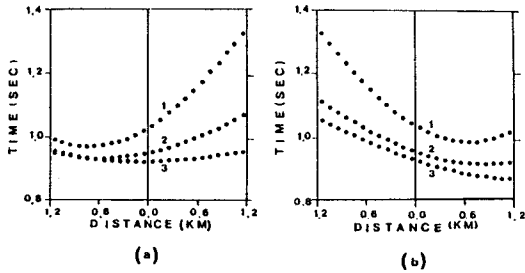


Fig. 8. Traveltimes curves of refraction for the second (cross) profiles of north direction on the model layer. (a) shot at  $x=0$  and cross-line at  $x=1.99$  km. (b) reverse shot at  $x=1.99$  km and cross-line at  $x=0$ .

해석한 결과로써 이 해석결과는 Table 1의 실제 지층요소와 거의 같다.

Fig. 9은 제 1측선(N70°E)에 대한 CDP반사 주시자료이다. 이 주시자료를 (19)으로 fitting하여 구한  $t_{0,n}$  및  $\bar{V}_n$ 와 제 1 및 제 2측선에 대한  $t_{0,n}$ 의 기울기를 이용하여 계산한 지층요소들은 Table 3과 같다. 이 해석결과는 실제 지층요소(Table 1)과 대략 같으나 굴절법 해석 결과(Table 2)보다는 오차가 크다. 반사 자료해석에 오차가 생기는 원인은 반사 주시곡선이 완전한 쌍곡선이 아닌데 이를 (19)의 쌍곡선으로 간주하여 해석함에 기인한다.

굴절법 및 반사법의 제 2측선 설정에 있어서 몇가지 유의해야 할 사항을 고찰해 보기로 한다.

Fig. 8의 제 2측선에 대한 주시곡선은 계산된 주시자료임으로 한 곳(측선 끝점)에서의 교차 측선에서 각 층(2, 3, 4층)의 굴절주시를 구할수 있었으나 실제탐사시에는 3 및 4 층으로부터의 굴절파가 2 및 3 층에서의 굴절파 도달 이후에 도달

Table 2. Interpreted results of refraction traveltimes curves in Fig. 7 and 8.

Layer	Strike	Dip	Depth (meters)	Velocity (m/sec)
1	N 8.00°E	5.00°NW	200.00	1300.00
2	N15.99°E	0.99°SE	400.00	2199.99
3	N24.00°E	25.00°SE	600.00	4699.98
4	-	-	-	8799.86

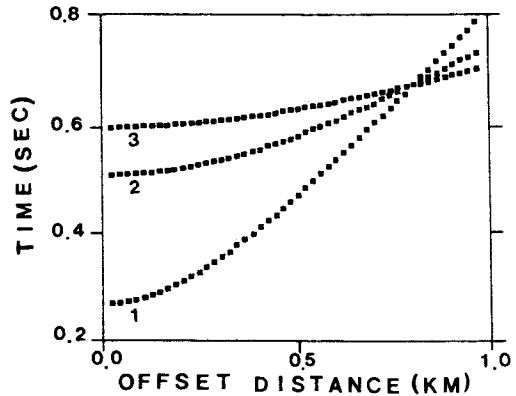


Fig. 9. Traveltimes curve of CDP reflection for profile 1 on the model layers.

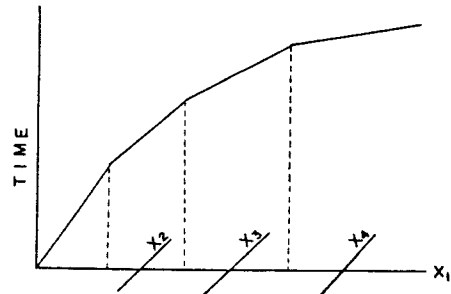


Fig. 10. Second profiles  $x_2$ ,  $x_3$  and  $x_4$  crossing the main profile  $x_1$  at the regions where critical refractions are identified as the first arrivals.

됨으로 그 확인이 곤란하다. 따라서 실제 탐사시의 교차 측선은 Fig. 10과 같이 각 층의 굴절파가 초동으로 나타나는 구역내에 설정하거나 또는 Fig. 11와 같이 Fan shooting에 의해 음원을 지나는 몇 개 측선에 대한 주시자료에서 각 층의 굴절파가 초동으로 나타나는 구역에서 교차선을 그려 각 측선과 교차 측선과의 교차점에서의 주시를 결정해야 한다.

아주 정밀한 해석을 위해서는 일단 발파 및 역발파의 각각에서 교차측선에 대한 주시자료부터 출현파  $\hat{r}_1$  및  $\hat{r}'_1$ 을 결정해야 하나 일반적으로는 역발파시의 교차측선에 대한 주시

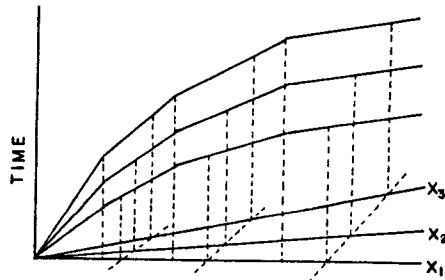


Fig. 11. Traveltimes for cross-lines are determined from those for fan shooting profiles at region where head waves appear.

측정은 안해도  $\hat{r}_1'$  결정이 가능하다. 즉,  $x_1$  축선에 대한 주시 곡선이 직선이라는 사실은  $x_1$ 과  $\hat{r}_1$  및  $\hat{r}_1'$ 이 이루는 면(출현파선면)이 거의 같음을 의미하며 이 면내의  $x_1$ 에 직각인 선  $\hat{z}_1' [ = (\hat{r}_1 \times \hat{x}_1) \times \hat{x}_1 / |(\hat{r}_1 \times \hat{x}_1) \times \hat{x}_1| ]$ 을 알 수 있으므로  $\hat{r}_1'$ 의 성분은

$$\begin{aligned} r'_{x_1} &= \sin \beta_0' \\ r'_{y_1} &= \cos \beta_0' (\hat{z}' \cdot \hat{y}_1) \\ r'_{z_1} &= \cos \beta_0' (\hat{z}' \cdot \hat{z}_1) [ = (1 - r'^2_{x_1} + r'^2_{y_1})^{1/2} ] \end{aligned}$$

이다. 여기서  $\beta_0'$ 은 역발파시의 주축선( $x_1$ )에 대한 주시 기울기에서 결정된 출현각이며  $y_1$ 은  $x_1$ 에 직각인 지표상의 선이다.

### 결 론

본 논문에서는 3차원 평면 지층 구조에서의 굴절 또는 반사 주시곡선으로부터 각 지층요소 들을 결정하는 방법을 종합 정리하였다. 이 해석방법은 서로 교차하는 두 축선에서의 굴절과 또는 반사파 영주시의 기울기에서 출현파 방향을 결정하고 이로부터 주향, 경사 및 속도를 계산한다. 심도는 굴절과의 절점주시 또는 반사파 영주시와 각 층에서의 파선방향을 이용하여 계산한다.

가정된 3차원 모형지층에 대해 계산된 굴절 및 반사파의 합성 주시자료를 위 해석방법으로 해석한 결과 모형 지층의 요소들이 정확히 해석되었으며, 이는 본 해석 방법이

Table 3. Interpreted results of CDP reflection traveltime curves in Fig. 9.

Layer	Strike	Dip	Depth (meters)	Velocity (m/sec)
1	N 8.00°E	5.00°NW	200.00	1300.00
2	N15.92°E	10.31°SE	409.04	2269.70
3	N23.78°E	25.76°SE	616.53	4845.77
4	-	-	-	-

타당함을 입증한다.

### 참고문헌

양승진 (1979) 탄성과 굴절법 해석. 대한 광산 학회지, 16권, p. 1-9.  
 양승진, 최상문 (1985) 곡면 지층에서의 CDP 탄성과 탐사 자료 해석. 대한 광산학회지, 22권, p. 81-89.  
 양승진 (1984) 삼차원 평면 지층에서의 CDP 탄성과 반사법 탐사자료 해석. 대한 광산학회지, 21권, 4호, p. 259-278.  
 양승진, 황세호, 고진석 (1991) 삼차원 다층구조의 굴절주시 곡선 해석. 한국자원 공학회지, 28권, 2호, p. 104-112.  
 Aldridge, D. F. (1989) Attitude, velocity and depth of plane reflector from two line profiles. Geophysics, v. 54, no. 9, p. 1199-1203.  
 Chander, R. (1977) On tracing seismic rays with specified end point in layers of constant velocity and interface. Geophysical Prospecting, v. 25, p. 120-124.  
 Dobrin, M. B. (1976) Introduction to geophysical prospecting. McGraw Hill, p. 630.  
 Hubral, P. (1976) Interval velocities from surface measurement in the three dimensional plane layer case. Geophysics, v. 41., p. 233-242.  
 Kurihara, J. S. (1960) 굴절법 주시곡선의 선정법 및 영주시에 의한 굴절주시의 해석법. 일본 구주 광산 학회지, 28권, 4호, p. 144-168.  
 Palmer, D. (1980) The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation, SEG Monograph.  
 Palmer, D. (1981) An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. Geophysics, v. 46, p. 1508-1518.  
 Russel, D. R., Keller, G. R. and Brail, L. W. (1982) A technique to determine the three dimensional attitude and true velocity of a refractor. Geophysics, v. 47, p. 1331-1334.