

# 역산이론을 이용한 공내하향 탄성파시험 결과의 해석

Analysis of Downhole Seismic Data Using Inversion Method

목 영 진\*  
Mok, Young-Jin

---

---

## Abstract

A new method of analyzing downhole seismic data is presented. The method is based upon inverse theory and can be used to resolve wave velocity profiles to a much greater accuracy than possible with conventional analysis methods such as direct or interval measurements. In addition, use of inverse theory permits a rational basis for judging the quality of the velocity profile. Five case studies are presented to illustrate application of the inversion method at various geological formations.

## 요 지

공내하향 탄성파시험(downhole seismic tests) 결과를 해석하는 새로운 방법을 소개하였다. 이 방법은 역산이론(inverse theory)에 근거 하며, 직접산출법(direct measurements)과 간접산출법(indirect measurements)과 같은 기존 방법으로는 불가능한 정도의 자세한 탄성파 속도 프로파일(profile)을 얻을 수 있다. 더욱이, 이 방법은 속도 프로파일의 신뢰도를 평가 할 수 있는 장점이 있다. 지반구조가 서로 다른 5개소의 현장에서 이 방법의 적용성을 검증하였다.

---

---

## 1. 서 론

공내하향 탄성파시험(downhole seismic tests)은 지반의 동적 토성치(압축파 속도, 전단파 속도) 측정에 널리 사용하는 방법이다. 그림 1과 같이, 발진자(source)를 지표위에 설치하고, 감지기는 검측공내 계획된 측정 깊이에 설치한다. 발진자에 충격을 가해 진동을 유

발시키는데, 연직방향으로 충격을 가하면 압축파(compressional waves)성분이, 수평방향으로 충격을 가하면 전단파(shear waves)성분이 풍부한 진동이 각각 발생한다.

시험 중에, 발진자와 감지기를 해당 탄성파(압축파나 전단파)를 계측하도록 배열하여 그 해당 탄성파의 도달 시간(initial arrival time)을 명확하게 판독할 수 있도록 해야한다.

직접산출법(direct measurements)에서는,

---

\*정회원, 상지대학교 이공대학 토목공학과 조교수

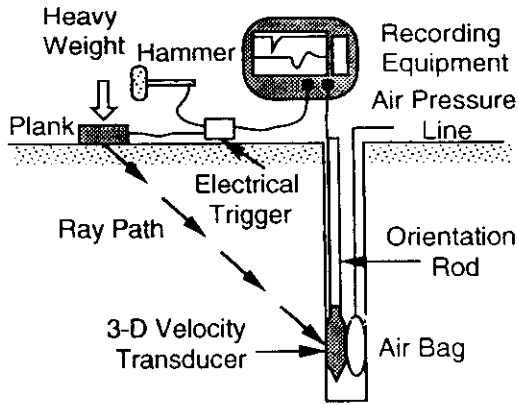


Fig. 1 Typical downhole test set-up direct measurement

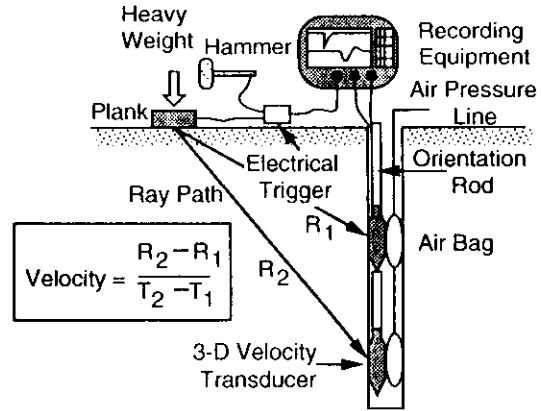


Fig. 2 Typical downhole test set-up indirect measurement

발전자에서 출발한 탄성파가 발전자와 감지기 사이의 경사거리(전파경로)를 주파하는데 걸리는 시간을 측정한다. 이 직접 통과시간(direct travel time,  $T$ )으로부터 지표면에서 측정 깊이(감지기)까지의 연직거리를 통과하는데 걸리는 시간으로 보정한다. 이 보정 통과시간(corrected direct travel time,  $T_c$ )은 아래와 같다.

$$T_c = D \frac{T}{R} \quad (1)$$

여기서,  $D$ 는 감지기 설치 깊이이고,  $R$ 은 경사진 전파경로의 거리,  $T$ 는 탄성파가 경사진 전파경로를 통과 하는데 걸리는 시간이다. 이 보정 통과시간( $T_c$ )을 각 측정깊이에 따라 플롯(plot)하고, 이 측정점을 연결한 일련의 직선을 그린다. 각 지층의 탄성파 속도는 각 직선의 기울기의 역수이다(이를 직접산출법이라 한다).

간접산출법(indirect measurements)은, 두 감지기를 서로 다른 깊이에 설치하여 발전자와 각 감지기 사이의 직접 통과시간을 측정한다(그림2 참조).

두 감지기 사이의 지반의 탄성파 속도( $V$ )는 다음과 같이 계산한다.

$$V = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

여기서  $R_1$ ,  $R_2$ 는 각각 발전자와 윗 감지기 사이의 직선거리, 발전자와 아래 감지기 사이의 직선거리이다.

이상과 같이 기존 방법은 매우 단순한 방법으로, 공내 수평 탄성파 시험(crosshole seismic test) 결과에 비해 정확도가 떨어진다.<sup>5)</sup> 이러한 정확도의 상실은, 저렴하고 지표면에서 간단한 발전자를 사용할 수 있는(따라서, 시험방법이 쉬움) 공내하향 탄성파시험의 장점을 무색케 할 수 있다. 이러한 공내하향 탄성파시험의 장점을 살리고 탄성파 속도의 산출에 있어 정확도를 높이고자, 역산이론을 적용한 탄성파 속도 산출방법(이하 역산방법이라 칭한다)을 개발하였다.<sup>3), 4)</sup> 이 방법의 이론적 배경과, 5개의 현장에 적용한 사례를 소개하였다.

## 2. 역산방법

공내하향 탄성파시험의 데이터 분석에 역산이론을 적용하려면, 시험지반을 그림 3과 같이 각 층이 서로 상이한 균질한 매질로 이루어진 다층 구조로 모델링(modelling)하였다. 첫번째 모델에서는, 발전자와 감지기를 잇는 탄성파 전파경로를 직선으로 가정한다. 두번째 모델에서는, 탄성파가 한 매질에서 다른 매질로 입사할 때 Snell의 법칙을 따라 굴절하는 전파경로

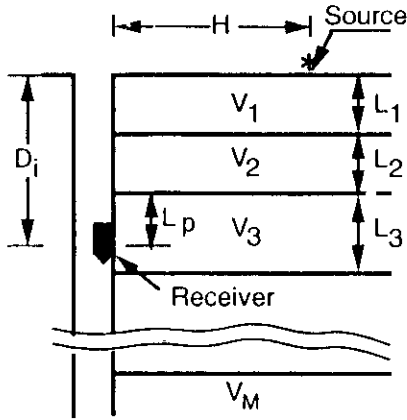


Fig. 3 Layered model used in developing the inversion method

를 고려한다.

### 2.1 직선-전파경로 모델

이 모델의 개념도는 그림 4a와 같다. 통과시간,  $T_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 와 가정한 탄성과 속도,  $V_j (j = 1, 2, 3, \dots, M)$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^p \frac{L_j / \cos \theta_i}{V_j} = T_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (3)$$

여기서,  $p$ 는 감지기가 설치된  $p$ -번째 지층을 나타내고,  $L_j$ 는 각 지층의 두께이고,  $\theta_i$ 는 연직선에 대한 전파경로의 경사각이다.  $L_p$ 와  $\theta_i$ 의 값은 다음 식으로 결정한다.

$$L_p = D_i - \sum_{j=1}^{p-1} L_j \quad (4)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{H}{D_i} \right) \quad (5)$$

여기서,  $D_i$ 는 감지기의 설치 깊이이고,  $H$ 는 발진자와 검측공 내벽 사이의 수평거리이다.

계산의 편의상, 모델의 변수(parameters)를 아래와 같이 속도의 역수로 정의한 지연도(slowness,  $m$ )로 백하였다.

$$m_i = \frac{1}{V_i} \quad (6)$$

지연도와 통과시간 사이의 관계는 다음과 같

다.

$$G_{ij} m_j = d, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (7)$$

여기서  $G$ 는 그림 4a와 같이 모델의 기하학적 제원에 의해 결정되는 행렬이다.<sup>3)</sup> 또한  $m$ 은 지연도가 원소를 이루는 열행렬(vector)로서 아래와 같다.

$$m = \left[ \frac{1}{V_1}, \frac{1}{V_2}, \frac{1}{V_3}, \dots, \frac{1}{V_M} \right]^T \quad (8)$$

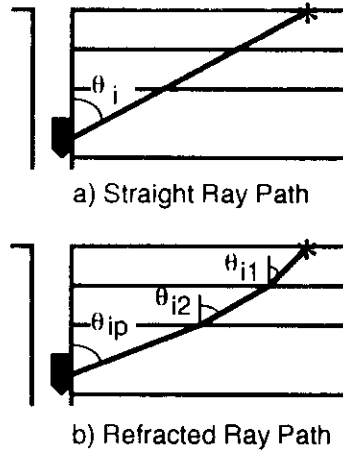


Fig. 4 Ray path geometry used to invert downhole data

$d$ 는 측정된 통과시간(travel time)으로 구성된 아래와 같은 열행렬이다.

$$d = [T_1, T_2, T_3, \dots, T_N]^T \quad (9)$$

보다 정확한 탄성과 속도 프로파일을 얻으려면, 지층수보다 많은 수의 통과시간 데이터를 측정해야 한다. 이 경우, 과다결정(overdetermined)문제가 되어, 데이터의 수가 미지수의 수를 초과한다. 그러므로 식 (7)의 해를 얻기 위해 최소자승법을 적용하고, 미지수(여기서는 지연도)는 모두 양수이어야 한다는 조건을 부여한다. 이러한 조건 없이는 인접 두 지층의 강성도(stiffness)가 현저히 다를 때(예를 들면, 암반위에 연약한 토사층), 종종 음수의 모델 변수가 얻어지는데 이는 물리적으로 불합리한 해이다. 직선 전파경로 모델에서 결정된 탄성과 속도 프로파일을 다음의 굴절 전파경로

모델의 일차 가정치로 사용한다.

## 2.2 굴절-전파경로 모델

다층 매질에서는, 여러층을 통과하는 탄성과의 전파경로는 직선이 될 수 없다. 두 지층 접 측면에서 탄성파는 Snell의 법칙에 따라 굴절하고 2.1절에서 언급한 직선경로보다 긴 굴절-전파경로를 따라 전파한다. 그러므로 2.1절에서 가정한 발진자-감지기 사이의 직선-전파경로를 수정하여야 한다. 이 수정은 직선-전파경로에서 계산한 탄성과 속도 프로파일에 대하여 Snell법칙을 적용한다.  $i$ 번째 계층( $D_i$ , 깊이)에서, 굴절된 전파경로는 아래와 같다.

$$\frac{\sin\theta_{i1}}{V_1} = \frac{\sin\theta_{i2}}{V_2} = \dots = \frac{\sin\theta_{ij}}{V_j} = \dots = \frac{\sin\theta_{ip}}{V_p} \quad (10)$$

$$L_1 \tan\theta_{i1} + \dots + L_j \tan\theta_{ij} + \dots + L_p \tan\theta_{ip} = H \quad (11)$$

여기서, 첨자  $i$ 는  $i$ 번째 계층점을 표시하고 첨자  $j$ 는 그림 3과 4b에 나타난 바와 같이 지층번호를 가리킨다. 그리고,  $\theta_{i1}$ 는 앞의 직선-전파경로에서 결정한 각  $\theta$ 이다. 나머지 굴절각,  $\theta_{ij}$  ( $j = 2, 3, \dots, p$ )는 식 (10)으로부터 결정한다. 식 (11)의 좌변을 계산하고 우변과 비교한다. 상기 과정을 식 (11)의 좌우변 값의 차이가 설정된 한계 이내가 될 때까지 각 층의 탄성과 속도를 변화시켜 가며 반복한다. 이 연구에서 설정한 한계치는  $\pm 0.01\text{ft}$  ( $\pm 0.3\text{cm}$ )이다. 이와 같은 방법으로 추정된 탄성과 속도를 갖는 지층구조에서 각 굴절-전파경로를 결정한다.

각 굴절 전파경로가 결정되면, 식 (7)의 행렬  $G$ 를 형성할 수 있다. 새로운 탄성과 속도 프로파일을 식 (7)에서 미지수는 모두 양수라는 조건과 함께 최소자승법의 개념으로 결정한다. 이 계산된 속도 프로파일에서 다시 굴절-전파경로를 결정하고,  $G$  매트릭스를 형성하여 다시 수정된 속도 프로파일을 산출한다. 이러한 과정을, 가정한 프로파일과 계산한 프로파일의 근접할 때까지 반복한다. 근접 한계치는, 속도 가정치와 계산치의 차를 제공하여 합한 값으로  $\pm 1(\text{ft}/\text{sec})^2$  ( $\pm 0.09(\text{m}/\text{sec})^2$ )로 설정하였다.

상기 과정의 최종 탄성과 속도 프로파일로부터 데이터의 신뢰도를 반영시키고, 미지수가 양수라는 조건을 해제시켜 경중 최소 자승법(weighted least square solution)의 형태로 최종 탄성과 속도 프로파일을 계산한다. 이 해의 형태는 다음과 같다.

$$m^{\text{est}} = [G^T W G]^{-1} G^T W d \quad (12)$$

여기서,  $m^{\text{est}}$ 는 각 층의 지연도로 이루어진 열행렬이고,  $W$ 는 데이터의 질을 반영시키는 경중 매트릭스(weighting matrix)이다. 이 데이터의 질을 평가하는 경중치는 0.5(불량한 데이터)와 1.0(우수한 데이터) 사이의 값을 사용한다.

## 2.3 해의 평가

이 역산방법은 역산결과(최종 탄성과 속도 프로파일)의 신뢰도를 평가할 수 있는 장점이 있다. 해석 결과의 신뢰도는, 예측오차(prediction error), 데이터 해상도 매트릭스(data resolution matrix), 모델 해상도 매트릭스(model resolution matrix)를 통해 평가된다. 이에 대한 간략한 설명은 아래와 같으며, 상세한 설명은 Menke(1984)<sup>2)</sup>를 참조하길 바란다.

1) 예측오차(prediction error): 과다결정 문제(overdetermined problem)의 해석 결과에 대한 신뢰도는 예측오차를 구함으로써 평가할 수 있다. 이 예측오차는 최종 속도 프로파일로부터 계산된 통과시간과 실제 계층치와의 차를 제공하여 더한 다음 이중근을 취한 값이다(통상  $L_2$  Norm이라 부른다).

2) 데이터 해상도 매트릭스: 이 매트릭스는 계층한 데이터와 상기 모델로부터 예측한 데이터와의 상관 관계를 나타낸다. 이 매트릭스는 계산된 도달시간(모델로부터)이 실측치와 얼마나 잘 일치하는지를 나타낸다. 이 매트릭스가 Identity 매트릭스와 같다면, 그 모델로 계산한 도달시간이 실측치와 같고, 예측오차는 영(0)이다. 매트릭스의 대각선 원소들이 1에 가깝고 그외의 원소가 영(0)에 가까우면, 속도 프로파일 계산에 사용한 모델이 실측치(데이

터)를 잘 반영한 모델임을 의미한다.

3) 모델 해상도 매트릭스: 이 매트릭스는 모델 변수(model parameters)의 추정치와 참값(알 수는 없지만)과의 근접정도를 나타낸다. 만약 이 매트릭스가 identity 매트릭스이면, 각 모델 변수값이 유일한 값이라는 것을 나타낸다. 즉, 대각선 원소들이 1에 가깝고 그외의 원소가 영(0)에 가까우면, 사용한 모델이 적합하다는 것을 나타낸다.

### 3. 적용 사례

#### 3.1 미국 캘리포니아주 파크필드 현장

가까운 장래에 지진이 발생할 때 지반의 반응과 지반의 액상화(liquefaction)에 대한 연구를 수행하고자 캘리포니아주, 파크필드 근처에 연구현장을 지정하였다.<sup>1)</sup> 이 연구현장의 특성을 규명하고자 공내하향 탄성파시험과 공내 수평 탄성파시험을 포함한 현장 시험을 실시하였다. 공내하향 시험치(통과시간)로부터 지반의 탄성과 속도 프로파일을 역산하고자, 이 지반을 9층의 다층구조로 모델링하였다. 이 9층 다층구조는 CPT(cone penetration test)결과와 시추 주상도와 같은 기존지식(a priori)을 이용하여 모델링 한 것이다. 역산에 이용된 데이터는 깊이 1ft(0.3m)와 50.7ft(15.5m)사이의 각 측정 깊이에서 기록한 전단파의 직접 통과시간(source-to-receiver)이다.

그림 5는 이 연구에서 개발된 역산방법으로 추정된 전단파 속도 프로파일(실선)과, 공내 수평 탄성파시험 결과를 함께 나타낸 것이다. 두 프로파일이 매우 근접하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 깊이 14.8ft(4.5m)와 17.8ft(5.4m) 사이에 있는 느슨한 실트질 모래층이 지진중 액상화 가능성이 큰 층이다. 이 층의 표준관입 시험치(N치)는 약 4 정도로, 이 역산방법으로부터 이 층을 잘 식별할 수 있음을 보여준다. 한편, 그림 6에서는 본 연구의 역산방법과 기존의 직접산출법(direct measurements)과 간접산출법(indirect measurements)으로 결정

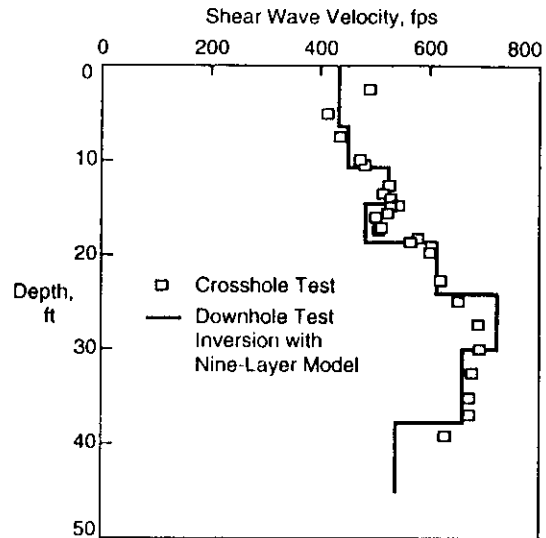


Fig. 5 Comparison of velocity profiles from crosshole tests and from inversion of downhole data

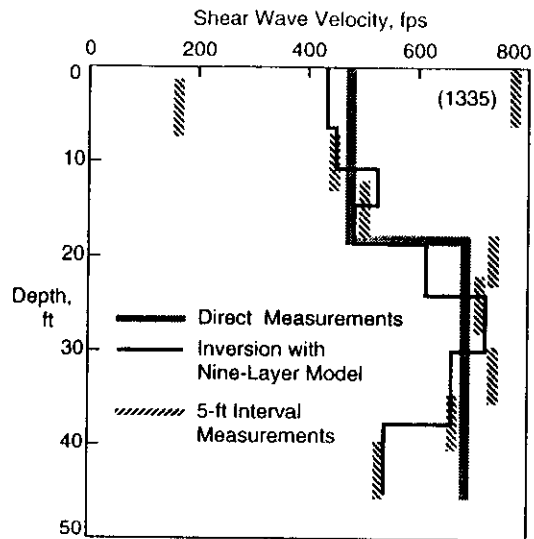


Fig. 6 Comparison of velocity profiles from downhole tests using direct, and interval measurements<sup>1)</sup> and inversion

한 전단파속도 프로파일을 비교하였다. 직접산출법은 상세치 못한 프로파일이 얻어졌고, 간접산출법으로는 전단파 속도가 상당히 산만하

게 분포된 프로파일이 얻어졌다. 특히 심도가 얇은 층에서 그 정도가 심하게 나타났다. 이 결과는 이 연구의 역산방법이 기존의 데이터 분석 방법보다 우수함을 확실하게 입증하는 것이다.

그림 5에 플롯한 역산방법으로 결정된 전단 파속도 프로파일의 신뢰도(질)를 평가 하고자, 예측오차, 데이터 해상도 매트릭스, 모델 해상도 매트릭스를 구하였다. 예측오차는  $0.22 \times 10^{-3} \text{sec}$  이었다. 이 값은 모든 데이터의 합(모든 측정까지의 도달시간의 합)의 0.45%에 해당한다. 이 9층 모델의 데이터 해상도 매트릭스는 그림 7과 같다. 이 그림은 이 모델로부터 계산한 도달시간 추정치가 예측치의 평균값, 특히 매트릭스 대각선 주변 데이터에 치중하여 평균(weighted average)한 값을 나타낸다. 다시

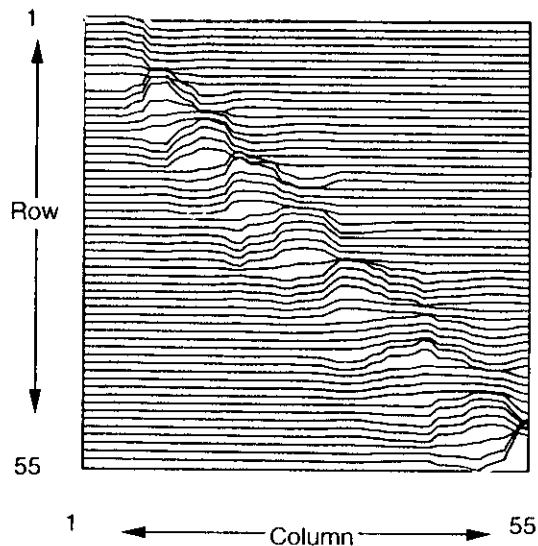


Fig. 7 Data resolution matrix of nine-layer model for Parkfield site

말하면, 한 깊이의 추정 도달시간은, 그 깊이가 소속된 층내의 도달시간 실측치에 치중된 평균치이다. 모델 해상도 매트릭스는 그림 8과 같다. 대각선상의 원소의 값은 0.98~1이고 그 외의 원소는  $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 이다. 이 사실은 계산된 속도 프로파일은 유일한 해이며 사용한 모델이 적합함을 나타낸다.

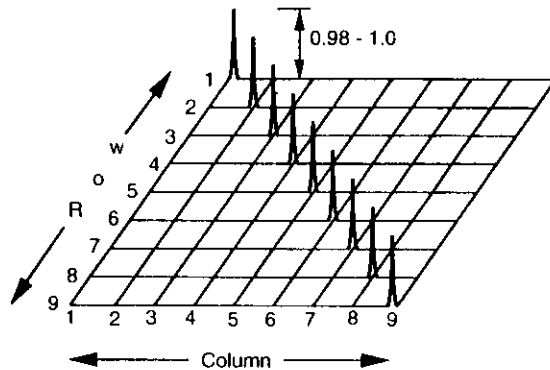


Fig. 8 Model resolution matrix of nine-layer model for Parkfield site

### 3.2 오클라호마주, 레드오크 현장

오클라호마주, 레드오크 인근 현장에서 공내 하향 시험과 공내수평 탄성파시험을 실시하였다. 전단파 통과시간 실측치로부터 속도 프로파일을 역산하고자 4층-모델을 적용하였다. 그림 9와 같이 지반의 시추 주상도를 참조하여 이 모델을 택하였다. 데이터는 깊이 1.0ft에서 25ft(0.3m~15.5m)사이의 18개소의 깊이에서 측정된 전단파 통과시간이다. 데이터수 18개로는 4층 이상의 지층구조로 역산하기에는 부족하다.

Depth, ft	Soil Symbol	Description of Stratum
0	[Symbol]	Stiff tan silty clay
5	[Symbol]	Very stiff sandy clay with abundant iron ore & stone
10	[Symbol]	Soft clay shale
15	[Symbol]	Moderately hard gray shale
20	[Symbol]	
25	[Symbol]	

Fig. 9 Geotechnical profile at Red Oak, Oklahoma

그림 10에는 각 측정 깊이의 직접통과시간을 나타낸 것이다(직접산출법). 이 직접통과시간은 식 (1)을 이용하여 경사 전파경로의 통과시간을 연직 전파경로의 통과시간으로 환산한 값이다. 직접산출법은 지층 변화에 의하여 굴절하는 전파경로를 고려하지 않고 발진자와 감지기를 잇는 직선전파경로를 전제로 한 산출방법이다. 그림 10에서 측정점을 연결한 일련의 직선의 기울기는 각 층의 전단파 속도의 역수에 해당된다.

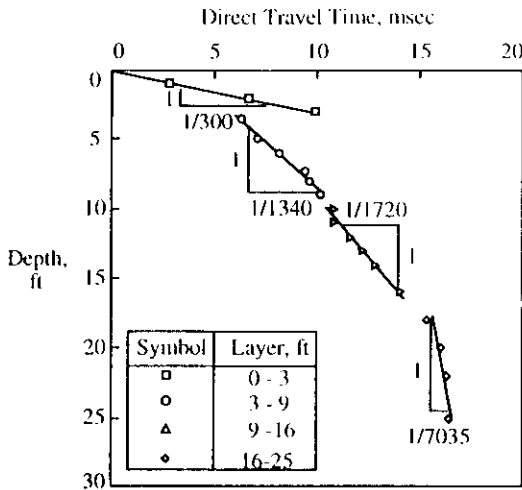


Fig. 10 Shear wave velocity profile from direct measurements at Red Oak, Oklahoma

그림 11에는 역산방법으로 결정된 전단파 속도 프로파일(실선)과 함께, 공내수평 시험 결과 및 그림 10에서 결정된(직접산출법) 전단파 속도 프로파일을 비교하여 나타내었다. 역산방법으로 구한 프로파일은 공내수평 탄성파시험 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 이 지반처럼 두 인접한 지층의 탄성파 속도(강성도)가 현저히 다를 때, 굴절-전파경로와 직선-전파경로는 상당한 차이가 있으므로 직선-전파경로를 바탕으로 한 계산결과(직접산출방법)는 큰 오차를 보이고 있다. 물성치가 깊이에 따라 일정하거나 점진적으로 변할 때는, 직접산출법에 의한 결과는 자세하지는 않더라도 비교적 타당

한 프로파일을 얻을 수 있다.

굴절-전파경로를 사용할 필요성은 표 1을 통하여 보다 명확히 설명할 수 있다. 역산방법에서 직선-전파경로 모델을 적용하여 계산한 전단파 속도는 오차가 매우 크다. 반면에, 굴절-전파경로를 적용할 때는, 첫번째 계산치가 이미 최종 계산치(여섯 번째 반복 계산 결과)와 꽤 근접함을 알 수 있다. 최종 결과와 바로 전의 계산 결과의 차이는 매우 근소하였다(탄성파 속도차를 제공하여 더한 다음 이중근을 구한 값이  $\pm 0.09\text{m/sec}$  였다).

예측오차는  $0.18 \times 10^{-6}\text{sec}$ 로서 이는 모든 실측치의 합의 1.47%에 해당한다. 모델 해상도 매트릭스와 데이터 해상도 매트릭스도 앞의 사례와 비슷하였다.

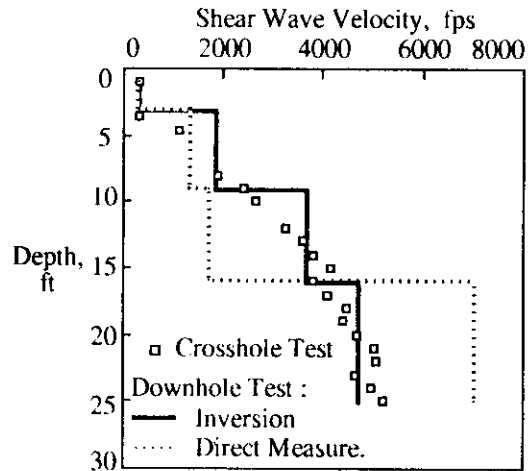


Fig. 11 Comparison of velocity profiles from crosshole and downhole tests

Table 1. Wave velocities at various calculation stages

Layer		Inversion Calculation Stage		
No.	Depth (ft)	Straight Ray Path	Refracted Ray Path	
			1st Iteration	Final Iteration
1	0-3	365fps	322fps	323fps
2	3-9	4856fps	1987fps	1870fps
3	9-16	1471fps	4775fps	4737fps
4	16-25	6335fps	3748fps	4737fps

fps = ft / sec

### 3.3 테네시주, 채펠힐 현장

테네시주, 채펠힐 북쪽 약 3.6km 철도 부근의 한 현장에서 1987년 7월 3일~8일 동안 지반진동을 계측하였다.<sup>7)</sup> 이 진동 계측은 Superconducting Super Collider의 후보지 경합에 응모하고자 수행한 것이다. 공내-하향 탄성파 시험도 시행하여 압축파 속도 프로파일을 결정하였다. 이 프로파일은 장래 동적 해석에 사용할 목적으로 구한 것이다. TVA(tennessee valley authority)가 소유한 압축파 발진자 "Betsy"를 사용하였고, 깊이 50ft(15m) 이내에서는 4.5Hz 3-D 속도 감지기를 50ft(15m)이상에서는 1Hz 속도 감지기를 병용하였다.

계산된 압축파 속도 프로파일은 그림 12와 같다. 이 프로파일은 40개의 발진자-감지기 통과시간 계측치를 역산하여 얻은 것이다. 이 프로파일에 의하면 이 지반은 15ft(4.5m) 두께의 토사층과 암반으로 이루어진 것으로 추정할 수 있다. 이 암반은 매우 치밀하여 콘크리트와

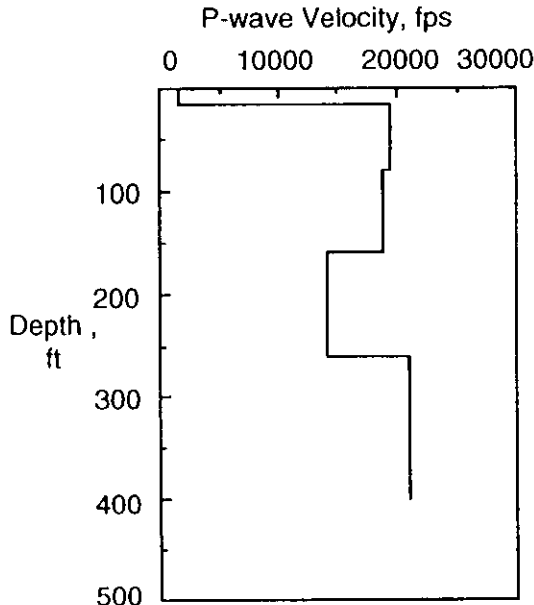


Fig. 12 Compression wave velocity profile from inversion of downhole test, Chapel Hill, Tennessee

같은 압축파 속도를 갖고 있다(13,500ft/sec (4110m/sec)).

### 3.4 뉴-멕시코주, 화이트샌드 미사일 기지

뉴-멕시코주, 화이트샌드 미사일 기지 내에 한 부지의 포괄적 지반조사를 위해 공내하향 탄성파 시험과 공내수평 탄성파 시험을 시행하였다.<sup>6)</sup> 11층의 다층구조 모델로부터 구한 전단파 속도 프로파일은 그림 13과 같다. 역산한 속도 프로파일이 공내수평 탄성파 시험 결과와 잘 일치하고 있다. 특히 깊이 100ft(30m) 이내에서 잘 일치하고 있다. 그 이상의 깊이에서는 데이터의 수와 신뢰도가 감소하여, 역산된 프로파일의 정확도가 깊이가 증가함에 따라 감소하고 있다.

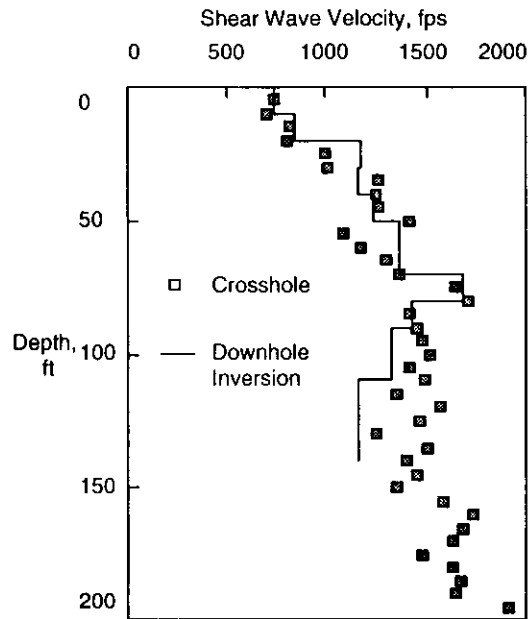


Fig. 13 Comparison of shear wave velocity profiles from crosshole and downhole tests, White Sands, N.M.

### 3.5 텍사스주, 혼스비벤드 현장

오스틴시 쓰레기 소각 및 전기 발전소 계획에 관련하여 탄성파 시험을 시행하였다.<sup>8)</sup> 그림



14에는 7층 구조 모델을 적용하여 역산된 전단파 속도와 속도 프로파일과 공내 수평 탄성과 시험 결과를 함께 나타내었다. 놀랍게도 굳은층 사이에 낀 연약한 층이 잘 확인되고 있다.

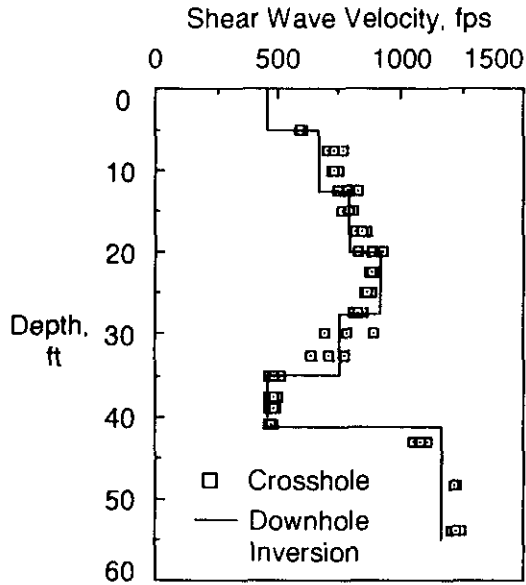


Fig. 14 Shear wave velocity profiles Hornsby Bend, Texas

#### 4. 결론

공내하향 탄성과 시험 데이터를 분석하는 새로운 방법(역산방법)을 소개하고 5개의 사례 연구를 통하여 그 적용성을 검증하였다. 이 방법은 기존공내하향 탄성과시험 데이터 분석 방법보다 정확하고 자세한 탄성과 속도 프로파일을 구할 수 있다. 또한 계산된 탄성과 속도 프로파일의 신뢰도를 평가할 수 있는 장점이 있다.

#### 참고 문헌

1. Holzer, T. L., Bennett, M. M., Youd, T. L. & Chen, A. T. L.(1986), "Field Investigation to Identify a Site for Monitoring Liquefaction, Cholame Valley, California," Open File Report 86-346, United States Geological Survey, Menlo Park, California.
2. Menke, W.(1984), Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory, Academic Press, Inc., Orlando, Florida, 260p.
3. Mok, Y. J.(1987), "Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin. 266p.
4. Mok, Y. J., Stokoe, II, K. H. & Wilson, C. R. (1988), "Analysis of Downhole Seismic Data Using Inverse Theory," Proceedings, 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. III, PP. 65-70, Tokyo, Japan, August, 1988.
5. Patel, N.S.(1981), "Generation and Attenuation of Seismic Waves in Downhole Testing", M.S. Thesis, The University of Texas at Austin, 411p.
6. Stokoe, II, K. H. & Mok, Y. J.(1988), "In Situ Seismic Wave Velocities: White Sands Missile Range, New Mexico", Report for Applied Research Associates.
7. Stokoe, II, K. H., Rix, J. G. & Mok, Y. J. (1987), "Field Measurement of Ground Born Vibrations Resulting from Railroad Operation near Chapel Hill, Tennessee", Geotechnical Engineering Report, GR87-6, The University of Texas at Austin.
8. Stokoe, II, K. H., Nazarian, S., Mok, Y. J., & Ni, T.(1985), "In Situ Seismic Wave Velocities at Hornsby Bend Site", Report for Southwestern Laboratories, Inc.

(접수일자 1994. 5. 2)