

## 탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지반의 속도분포 해석

조창수<sup>1)</sup> · 이희일<sup>1)</sup> · 서정희<sup>2)</sup>

### Interpretation on the Subsurface Velocity Structure by Seismic Refraction Tomography

Chang Soo Cho<sup>1)</sup>, Hee Il Lee<sup>1)</sup> and Jung Hee Suh<sup>2)</sup>

**요 약 :** 지형기복에 적용할 수 있는 굴절법 토모그래피법을 개발 및 적용하여 자료해석에 용이성을 주고자하였다. 굴절법 토모그래피의 적용에 있어서 중요한 요소인 측선길이 및 배치, 수신점과 송신점 간격 및 배치, 지형기복 여부를 살펴보기 위하여 모형자료에 대한 결과를 살펴보았다. 또한 하부의 저속도 층의 규명을 위하여 VSP자료와 동시역산을 수행한 결과 시추공 주변의 저속도 층을 구별할 수 있었다. 택지개발 지역의 탐사 자료에 토모그래피법의 적용한 결과 두 측선에서 얻어진 속도구조의 연속성이 좋았고 또한 속도분포에 대하여 정량적으로 굴삭난이도를 평가하여 공학적으로 이용하고자 하였다.

**주요어 :** 굴절법 토모그래피, 속도구조

**Abstract :** Refraction tomography was developed to interpret subsurface velocity structure easily in topographic conditions. It was applied to synthetic refraction data to find the factors for optimization of applicability of refraction tomography such as configuration of profiling and its length, spacing of geophones and sources and topographic conditions. Also, low velocity layer near VSP hole could be detected by joint inversion with refraction and VSP data. Continuity of subsurface velocity structure in two different spread lines for area of house land development was good in case of applying our algorithm and velocity structure was classified quantitatively to evaluate rippability for engineering works.

**Keywords :** Refraction tomography, velocity structure

## 서 론

탄성과 굴절법 탐사는 선두파(head wave)를 이용하여 지하구조를 규명하는 탐사법으로 탄성과 탐사시 반사법 자료의 풍화대 보정, 댐·도로공사 등을 비롯한 구조물설치를 위한 지반조사, 지하수 탐사, 천해저 지질조사 등에 널리 활용되고 있다.

선두파의 초동을 이용한 해석법은 매우 복잡하고 불균질한 천부의 속도변화를 파악하기 위한 손쉽고 적용성이 편리한 방법이다. 과거에는 주시지연법(Delay Time Method)(Gardner, 1967; Scott, 1973)과 GRM(Generalized Reciprocal Method)(Palmer, 1980; 김종필, 1991)법을 이용한 방법이 연구되어졌으며 최근 국내에서는 블록 매개변수법(blocky parameterization)을 이용한 굴절법 역산이 시도되었다(정상용, 1995; 하정희, 1998).

그러나 이들 방법은 주시곡선에서 파악할 수 있는 정보인

층서구조 가정하에 지하구조를 해석한다는 한계를 가진다. 이들 방법은 주시곡선에서 각 지층에 대한 정보를 사전에 알아야 한다는 한계 뿐만 아니라 지형이나 지하구조가 복잡하게 되면 해석 결과의 오차가 커지게 됨은 불가피한 현실이다.

예를 들어, 터널지역의 경우 터널부에 해당하는 압반 분포상황의 파악이 곤란하다거나, 대절토 사면부나 토목 건축부지 조성지역의 경우 압반의 발파 여부 등 공사물량 계산을 위한 풍화암과 연암의 경계부를 통상적인 굴절법 해석으로는 명확하게 제시해주지 못한다는 것이다. 그러므로 이러한 제반 문제점을 극복하고 토목 지질조사 분야에서 보다 효과적으로 이용할 수 있고 활용가치가 높은 양질의 기초자료를 제공하는 방법이 요구된다.

위와 같은 한계를 극복하기 위하여 McMechan 등(1989)은 굴절법 자료의 해석에서 하부로 갈수록 속도가 조금씩 증가하는 초기치를 설정하고 시추공의 주시 토모그래피법을 적용하였다. Zhang 등(1998)은 그래프(graph) 이론을 이용한 주시계

\*2001년 6월 28일 접수

1) 한국지질자원연구원 (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

2) 서울대학교 지구환경시스템공학부

산과 평활화 제한과 불확실성 측정을 통하여 역산의 결과를 향상시키고자 하였다.

본 연구에서는 탄성과 굴절법 토모그래피 역산을 위하여 굴절파의 주시에 좋은 결과를 주는 파면 확장법(Qin *et al.*, 1992)을 사용하고 역산은 통상적으로 적용되는 SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Techniques, Dines and Lytle, 1979)법을 사용하여 지형이 있는 조건하에서도 역산을 수행할 수 있도록 하였다. 통상적인 굴절법 탐사 자료처리 및 해석에서 야기되는 지형요철, 지하 굴절 경계면의 복잡성, 지반구조 세분화의 한계성 등의 문제점에 대하여 굴절법 주시 역산 알고리즘을 적용하여 해결하고자 하였다. 먼저 이론 모형에 대하여 송신원 배열에 따른 역산의 결과를 논하고 굴절법과 VSP 배열의 자료를 동시 역산함으로써 지하의 저속도구조를 밝히 고자 하였다. 또한 지형변화가 있는 이론적인 지형모형을 설정하여 적용성을 고찰하였다. 마지막으로 택지개발지역에서 수행한 굴절법 탐사 결과를 이용하여 탄성과 속도에 따른 암반을 분류하고 이를 통하여 토목공사시 평가자료로 활용할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

### 굴절법 주시역산 이론

주시 토모그래피는 지하 구조의 물성 중 속도를 구하는 방법으로 속도와 파선의 길이, 파의 도달 시간을 이용하여 지배방정식을 구성하게 된다. Fig. 1에서처럼 역산을 위한 매개변수인 역속도를 다양한 크기로 설정하였을 때, 송신원으로부터 수신점에 도달한 시간을 파선의 길이와 역속도에 대한 지배방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$t_i = \int s dl(s) \tag{1}$$

이들을 이산치의 모델 파라미터의 형태로 표현하면 아래와 같다.

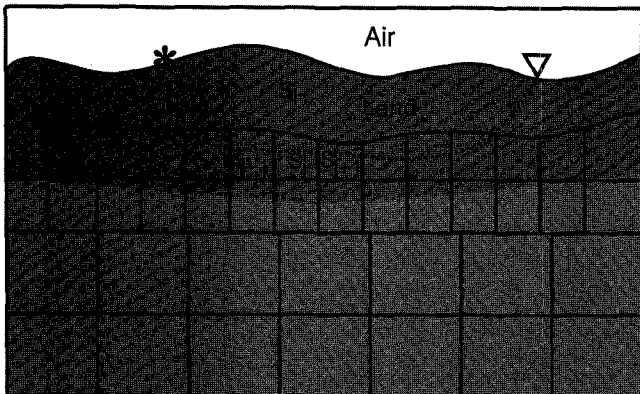


Fig. 1. A schematic diagram for the refraction tomography. Size of cells is set to be variable.

$$t_i = \sum_{j=1}^M l_{ij} s_j \tag{2}$$

여기서  $t_i$  :  $i$ 번째 파선의 주시  
 $s_j$  :  $j$ 번째 격자의 역속도  
 $l_{ij}$  :  $i$ 번째 파선이  $j$ 번째 격자를 지나는 파선의 길이  
 $M$  : 격자의 총 갯수

(2) 식에서  $l_{ij}$ 는  $s_j$ 의 함수이다. 이를 행렬로 표현하면

$$\mathbf{t} = \mathbf{Ls} \tag{3}$$

시추공 토모그래피에서 적용되는 방정식과 동일한 형태가 된다. 굴절법 토모그래피에서 파선은 속도에 대한 함수이므로 비선형 주시 토모그래피가 요구된다.

비선형 주시 토모그래피 역산은 주어진 속도구조에서 반복적으로 송신원과 수신점 사이의 도달시간과 파선경로가 요구된다. 도달시간의 계산은 일반적인 속도 모형에 대하여도 빠르게 계산할 수 있는 파면 확장을 이용한 유한차분법(Qin *et al.*, 1992)을 이용하였으며 파선의 경로추적은 평면파에 기초하여 파선경로를 계산하는 방법(Berryman, 1991; 이두성, 1995)이 사용되었다. 도달시간계산을 위하여 역속도는 균일한 격자를 가진 역속도 구조로 변환하기 위하여 1차선형 내삽을 수행하였다. 역산은 반복적 선형 역투영법인 SIRT법을 적용하였다.

SIRT법은 Kaczmarz(1937)가 제시한 사영법(projection method)에 기초를 둔 ART(Algebraic Reconstruction Techniques)법을 변형한 것으로 모든 파선에 대한 각 격자의 보정치를 구하여 이들의 평균치로 보정을 해 주는 방법이다.  $L-\infty$  norm를 취하여  $k$ 번째 반복에서  $j$ 번째 격자의 역속도를  $s_j^k$ 라 하면 도달 시간 오차  $\Delta t_i^k$ 로부터 역속도 보정치  $\Delta s_j^k$ 는 다음과 같이 얻어진다(Dines and Lytle, 1979).

$$\Delta s_j^k = \frac{1}{N_j} \sum_i \frac{\Delta t_i^k}{L_i} \tag{5}$$

여기서,  $N_j$ 는  $j$ 번째 격자를 통과하는 파선의 갯수를  $L_i$ 는  $i$ 번째 파선의 길이를 각각 나타낸다.

굴절법 토모그래피의 역산에 있어서 초기치의 설정은 매우 중요하다. 초기치가 저속도로 균일하게 설정이 되면 하부로 파선경로가 지나가지 않아 정확한 해로 수렴하지 않는다. 그러므로 Zhu 등(1989)에서와 같이 하부로 갈수록 조금씩 속도를 증가시키거나 아니면 고속도 값으로 설정하여 파선이 하부의 속도를 재구성할 수 있게 해주는 것이 필요하다.

### 이론 모형에 대한 굴절법 토모그래피 알고리즘의 적용

#### 축선에 따른 역산결과

토목지질조사에서 굴절법 탐사를 실시하기 위해서는 조사지

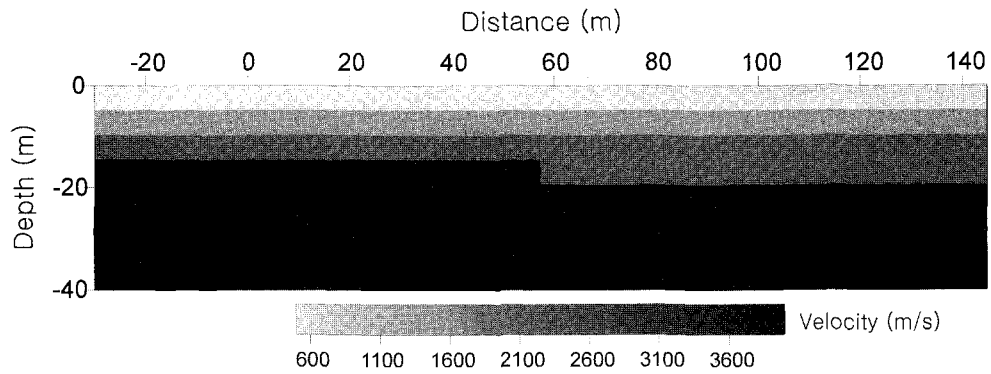


Fig. 2. Fault model for investigating the effects in terms of the number of shots.

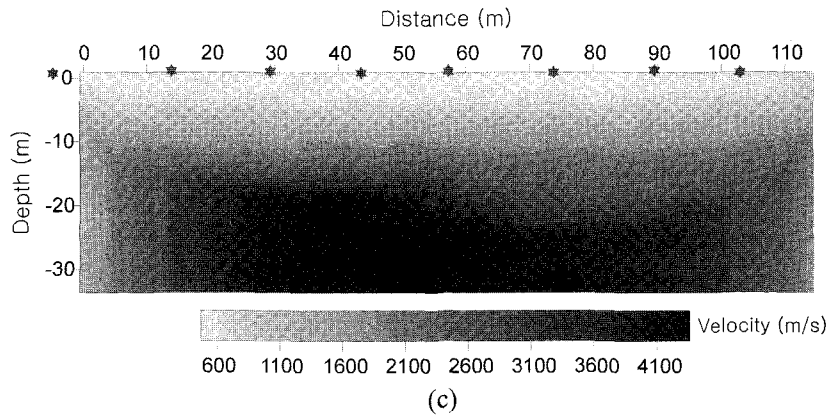
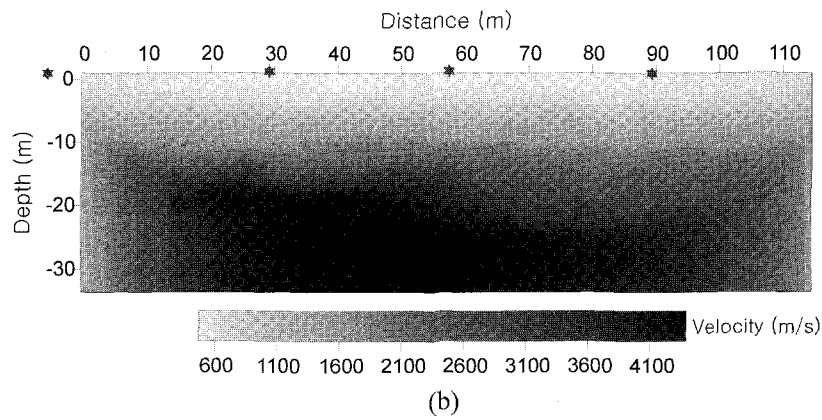
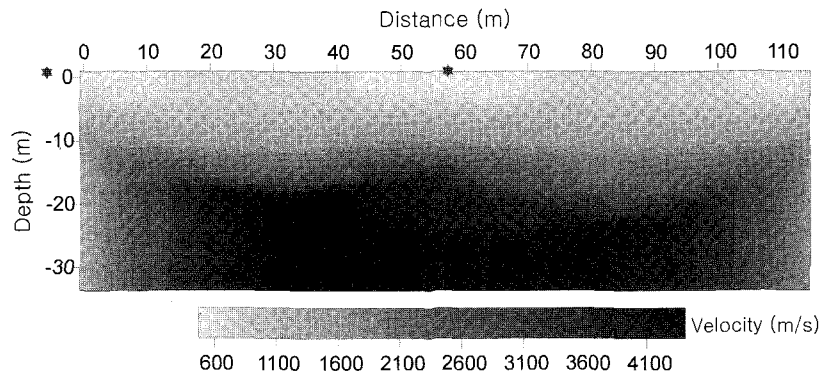


Fig. 3. Inversion results using the number of (a) 3 shots, (b) 5 shots and (c) 9 shots for the model of Fig. 2. The symbol \* represents the location of the shot point.

역의 지형이나 지질 등의 상황을 고려하여 조사목적에 적합한 조사계획을 수립할 필요가 있다. 조사결과에 중요한 영향을 미치는 일차적인 요소는 양질의 현장 자료취득과 적절한 해석법이다. 특히 우리나라 대부분의 조사대상 지역은 지형의 기복이 심하여 양질의 현장자료 취득을 위한 측선 설계가 필요하다. 그러므로 측선의 설계시 필요한 송신원 배열에 따른 역산결과를 살펴보고자 하였다.

Fig. 2와 같은 이론 모형에 대하여 수신기는 모두 24개로 0

m에서 115m까지 5m 간격으로 설정하였다. 이 때 각 송신원의 위치와 갯수에 따른 결과를 살펴보기 위하여 격자의 크기는 가로 5m, 세로 1m로 설정하였을 때, 송신원을 3개, 5개, 9개를 사용하였을 때의 역산 결과를 Fig. 3에 보여주고 있다. 송신원이 많으면 자료의 증가로 인하여 역산의 결과가 좋아지는 것은 당연하다고 볼 수 있다. 하지만 자료가 포화상태에 이르면 그 이상의 자료는 무의미하므로 본 연구의 결과를 근거로 살펴보면 그림 (b), (c)와 같이 설정하였을 때 대략 송신원

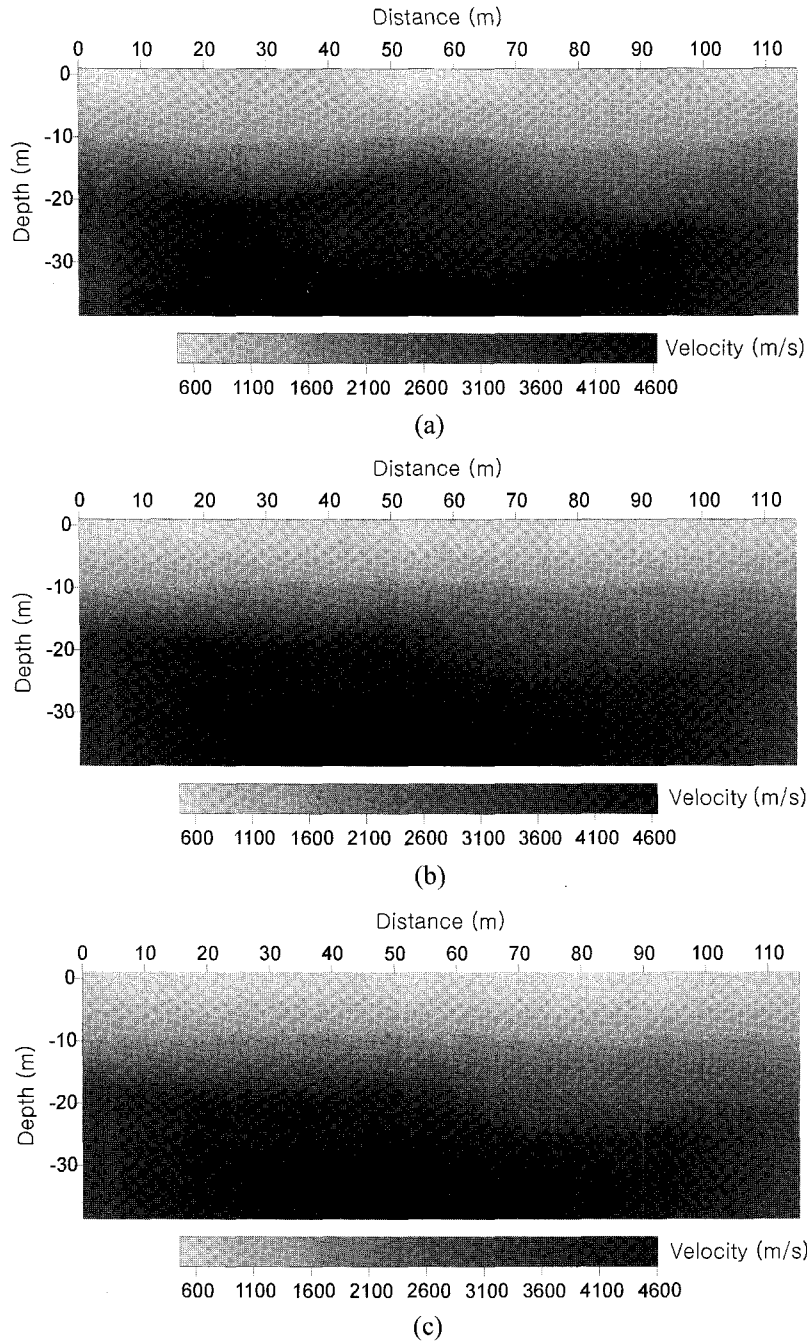


Fig. 4. Inversion results for remote shots of 20m distance from the end points of the line. The shot points are the same as the ones in the Figure 3.

개수는 5개에서 9개 정도면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

동일한 측선내에서 역산의 결과를 높이기 위한 또 하나의 방법은 원거리 송신원의 설정이다. Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건하에서 원거리의 송신원을 20 m로 각 측선의 양단 끝에 설정하였을 때의 결과를 보여주고 있다. 원거리의 송신원을 사용할 경우 심부에 대한 정보를 더 많이 제공할 수 있어 추측으로도 원거리의 송신원을 사용할 경우 더욱 좋은 결과를 기

대할 수 있다. 또한 이 연구의 결과도 역시 원거리 송신원을 사용할 경우 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

위의 결과로 볼 때 측선의 배열에서 수신기의 배열은 대략 3~5 m이고 원거리의 송신원은 수신기 4개 정도 간격의 거리, 측선 내부의 송신원은 대략 5~9개 간격으로 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 일반적으로 수신기의 배열과 송신원의 개수는 매질의 구조와 밀접한 관련이 있어 최적 조건에 관한 연구가 더 이루어져야 할 것으로 보인다.

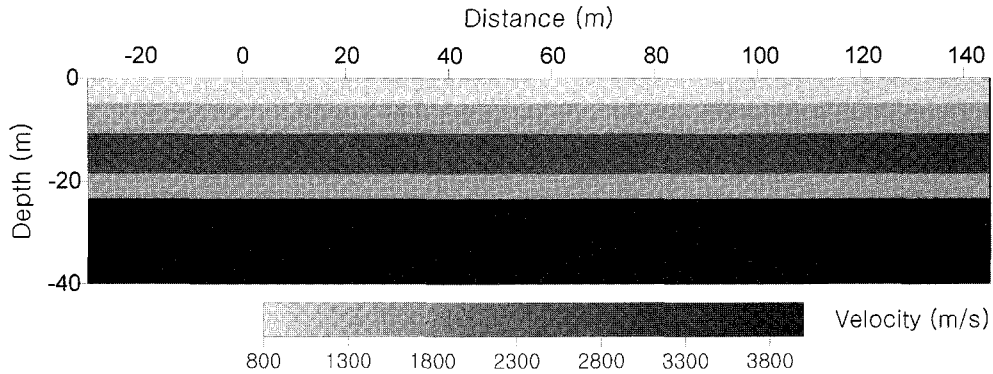


Fig. 5. Model embedding the low velocity layer.

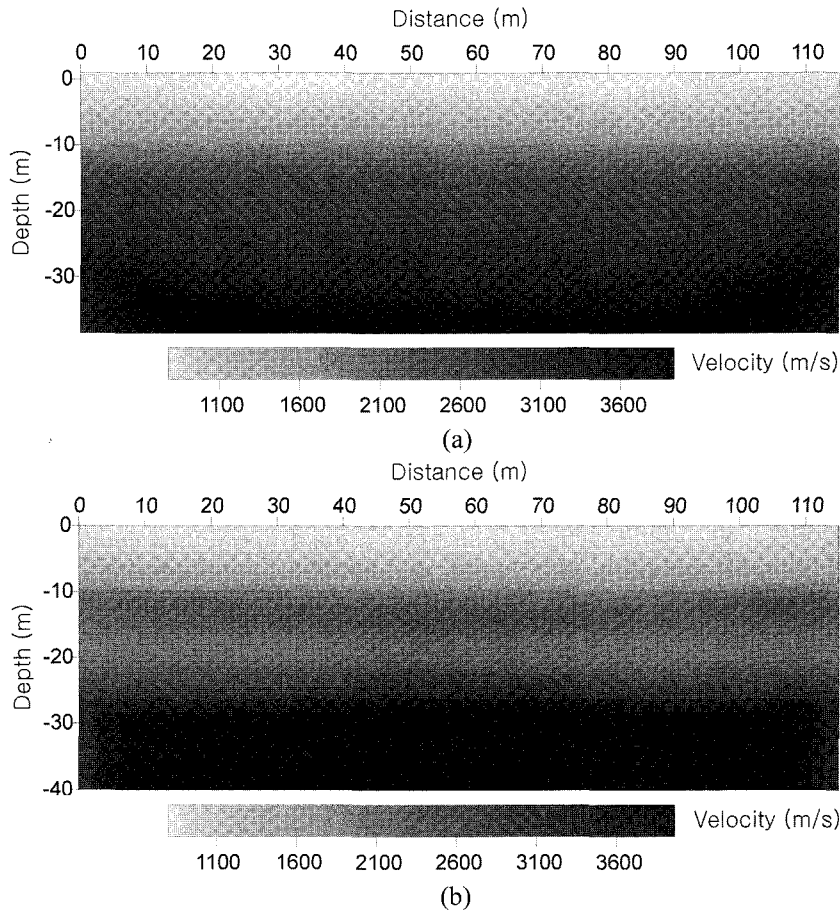


Fig. 6. Results of inversion for the unknown model (a) and A priori model embedding low velocity layer (b).

### 굴절법 자료와 VSP 자료의 동시 역산

굴절법을 이용할 경우 일반적으로 하부에 저속도 층이 존재하는 경우 저속도 영역에 대한 정보를 얻는 것이 어렵다고 알려져 있다. 이러한 저속도 모형에 대하여 굴절법 토모그래피 결과를 살펴보고 이를 탐지할 수 있는 방법에 대하여 살펴보고자 하였다.

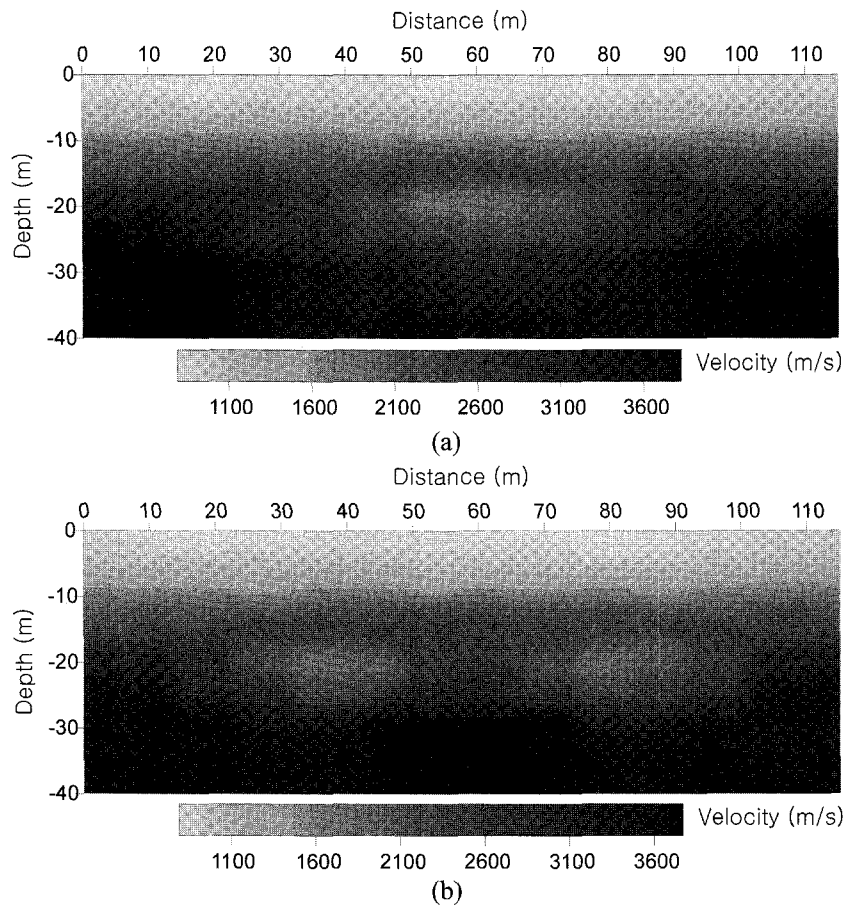
층서모형에 저속도의 수평층이 있을 경우를 설정한 것이 Fig. 5이다. 일반적으로 이러한 모형에서 굴절법의 정보로는 저속도에 대한 정보를 획득하기 어려운 것으로 알려져 있다. Fig. 5의 모형에 대하여 수신기는 24개로 0 m에서 115 m까지 5 m 간격으로 설정하였다. 각 수신기에 대하여 원거리 송신원은 양단의 수신점으로부터 20 m 떨어진 곳에 설치하였고 내부의 송신원은 Fig. 3(c)와 같은 배열을 사용하여 9개의 송신원을 설치하였다. 또한 역산을 위한 격자의 크기는 가로 5 m, 세로 1 m의 격자로 구성하였다.

지하의 구조에 대하여 사전정보가 없는 경우에 대하여 초기치를 점진적으로 증가하는 속도를 주었을 때 역산 결과가 Fig. 6(a)에 보여지고 있다. 결과에서 보듯이 층서구조내의 저속도

층을 구분해내지를 못하는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)의 경우 사전정보로 층서내에 저속도의 위치를 안다는 가정하에서의 결과를 보여주고 있다. 이러한 경우 역산의 결과는 저속도에 대한 정보를 얻을 수 있으나 실제로는 이러한 사전정보가 없다.

이 연구에서는 층서내의 저속도 층을 알아내기 위하여 VSP(Vertical Seismic Profiling) 자료를 상정하여 역산을 수행하여 그 결과를 얻었다. Fig. 7(a)는 시추공의 위치가 수평으로 60 m에 위치하며 수신기가 수직으로 -1 m부터 -30 m까지 30 개가 있다는 가정하에 Fig. 6과 동일한 조건에서의 결과를 보여준다. 또한 Fig. 7(b)는 VSP를 위한 시추공 수평위치가 각각 40 m와 80 m 위치에 있을 때의 결과를 보여준다. 두 경우 모두 저속도층에 대한 결과를 보여주고 있지만 시추공 근처에서만 저속도분포의 파악이 가능하고 그 연장선상의 저속도층의 연계성은 알 수가 없다. 그러므로 광역적인 저속도층의 자료를 얻기 위해서는 시추공대 시추공 토모그래피가 필요할 것으로 사료된다.

일반적으로 하부에 저속도 층이 존재할 경우 존재의 유무를



**Fig. 7.** Inversion results starting from initial guess of unknown model for the refraction and VSP data (a) that are acquired with an interval of 1 m from -1 m to -30 m at the position of horizontal 60 m and (b) refraction and two VSP data that are acquired with an interval of 1 m from -1 m to -30 m at the position 40 and 80 m.

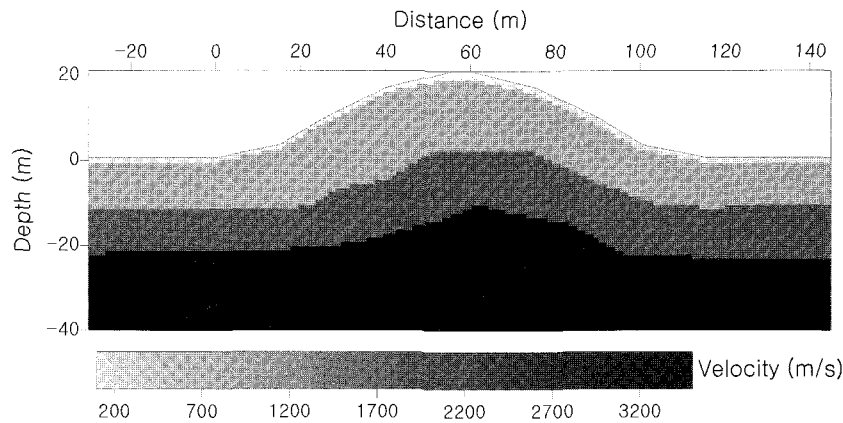


Fig. 8. Model with variation of terrain.

판단하기 어려우며 저속도 층의 존재를 확인하기 위해서는 VSP 자료와의 동시 역산을 할 경우 가능한 것으로 판단된다. 하지만 시추공 주변에서만 파악이 가능하므로 상세한 저속도 층에 대한 존재의 파악은 시추공대 시추공자료가 필요한 것으로 사료된다.

#### 지형 모형에 대한 역산

국내의 현장에서 자료를 획득할 경우 대부분이 지형이 경사지고 복잡하다. 굴절법 해석에서 이러한 지형의 영향이 커지게 되므로 측정 자료에 대한 지형보정이 필요하다. 그러나 측정 자료에서 지형 영향을 제거하기가 쉽지 않기 때문에 본 연구에서는 지형에 의한 영향을 보정하지 않고 지형정보를 모델변수 모형에 포함하여 역산을 수행하고자 하였다.

지형을 Fig. 8과 같이 가정된 3층의 층서 모형에 대하여 수신기는 24개로 0m에서 115m까지 5m 간격으로 설정하였다. 그리고 송신원은 Fig. 3(b)와 같은 배열로 설치하였으며 원거리 송신원은 양단의 수신기에서 20m 떨어진 곳에 역시 설치하였다. 총 송신원의 개수는 7개로 설정하였다.

지형이 평탄하다는 가정하에서 굴절법 토모그래피를 수행한 결과가 Fig. 9(a)이다. 지형의 영향에 의하여 지하의 구조는 상당한 왜곡현상을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과에 대하여 지형의 영향을 고려하여 역산의 결과에 지형의 높이로 수직으로 이동한다고 하여도 그 결과는 상당히 왜곡된 결과를 보여준다. Fig. 9(b)에는 수신기와 송신점에 대한 정확한 위치 정보를 가지고 지형모형에 대한 매개변수를 설정한 역산한 결과를 보여준다. 역산 결과를 보면 3층 구조의 속도가 재구성되는 것을 알 수 있다. 위와 같이 지형을 설정한 모형을 적용하여 역산을 하면 결과가 지형을 그대로 반영하기 때문에 해석시에도 용이하다. 상부에는 공기 층으로 설정한 속도 값이 첫 번째층의 상부에 공간적인 필터링에 의하여 그 영향이 조금은 보이고 있다.

지형에 의한 효과는 무시할 수 없을 만큼 역산시 왜곡이 되는 것을 알 수 있었다. 실제 현장에서도 지형의 차이는 상당히

크므로 이로 인한 영향이 클 것으로 생각된다. 그러므로 역산시 지형을 모델 모형에 반영하고 송·수신기의 위치를 사용하면 현장자료에서도 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

#### 토목지질조사에서의 적용 사례

경기도 용인시 택지개발 조성지역에 대한 지반조사 일환으로 탄성과 굴절법 탐사를 절토 사면부에서 실시하고 이로부터 탄성과 속도분포에 의한 지하구조 해석, 지반분류, 굴삭난이도(rippability)를 파악하였다. 토지조성에 있어서 탄성과 탐사의 목적은 지반의 시공성, 연약층의 분포 등을 파악하는 것이다. 이때 측선 배열의 주안점은 시추자료와 비교하기 위해 시추공 위치와 연계하여 설정하였다.

현장 조사장비는 24 채널 탄성과 탐사기(StrataView R24, Geometrics Inc., USA), 수신기( $f_0 = 14$  Hz), 해머(무게 4.5 kg), 화약이다. 해머 타격의 경우 5회 이상의 중합을 시도하였으며, 화약 사용시 장약량은 양단 송신점의 경우 125 g, 전개내에서는 60 g 정도 순간발파 뇌관을 사용하였다. 측정조건은 샘플링 시간이 125  $\mu$ s, 측정시간은 256 ms이다. 현장자료 취득조건은 Table 1과 같이 “in-line” 방식으로 측선을 배열하여 각 전개마다 송신점을 5점, 7점씩하여 얻었으며 자료처리 및 해석은 새로 개발된 토모그래피 기법을 적용하였다. 지형기록 영향을 포함한 자료처리를 위해 각각의 수신점 및 송신점에 대하여 고도측량을 실시하였다.

측선은 주요 지점의 시추공 위치와 교차하면서 절토 사면부와 평행/직교하게 설정하였다. Fig. 10은 조사지역에서 굴절법 탐사를 시행한 구간별 측선도이며 Fig. 11은 토모그래피 기법을 적용하여 구간별로 자료처리한 결과를 도시한 토모그래피이다. Fig. 11의 (A)는 조사 1구간에서 절토부와 평행하게 측선을 설정하였고 측선의 양단에 시추공번 CB-45와 CB-46이 위치한다. 전개 JS-2와 JS-4는 7개의 송신원, 그리고 JS-3은 5개의 송신원을 이용하여 자료를 취득하였다. 여기서 속도분포 범위에 따른 채색 분포를 보면 황색계통인 속도 200~800 m/s는

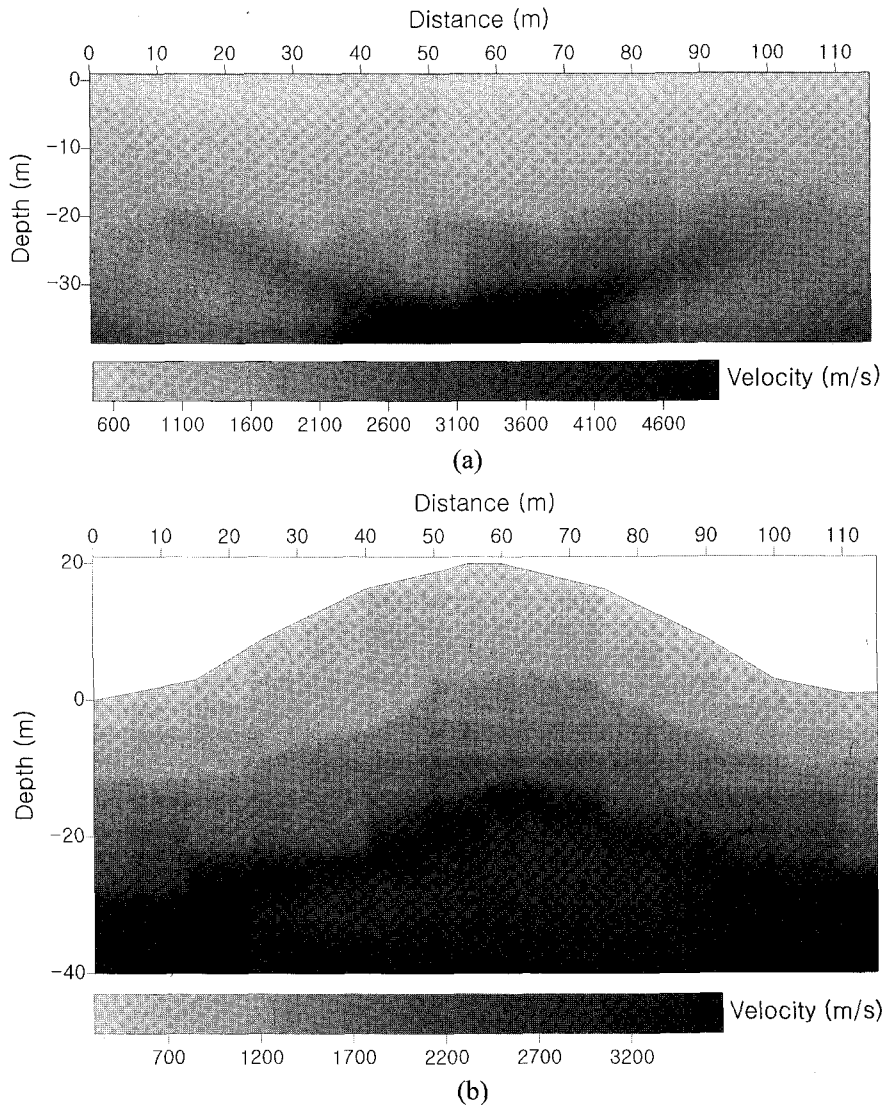


Fig. 9. Inversion results without (a) and with (b) utilizing the information of topology.

Table 1. The condition of the data acquisition of each survey area

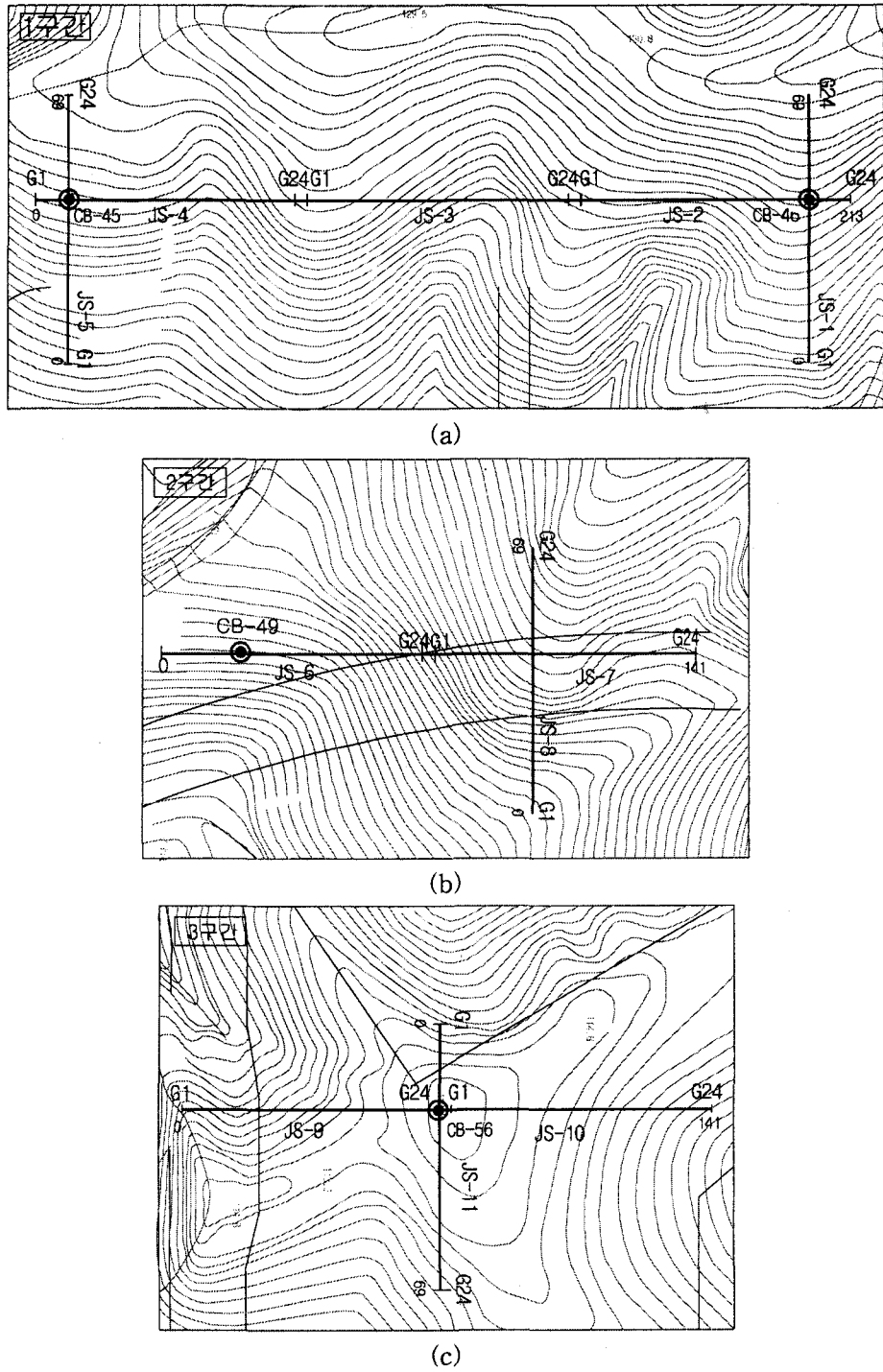
구 분	락지조성
위 치	경기도 용인시
측선배열	사면부에 평행/직교
수신점 간격	3m
송신점 간격	15m
전개당 송신점수	5~7점
송신방법	함머(5회 이상 중합) 최대 수신거리: 92m

전반적으로 지형을 따라가면서 지층의 층후변화를 보이고 있고, 적회색 하부경계인 속도 1,800 m/s는 거리 159 m 하부를 제외하고는 황색계통과 거의 유사한 층후 변화를 보인다. 그러나 적색계통인 2,800 m/s 이상에서는 수평적으로 극심한 속도 변화를 보이는 데 이는 하부로 갈수록 각각의 송신점에서 송신된 파선들이 격자를 통과한 것이 부족하기 때문이다. 그래서

이 지층에 해당되는 속도 2,800 m/s 이상의 지층 경계부는 전개 구간과 수평적으로 속도변화가 심한 구간은 상호 연결하게 되면 이 지층의 속도분포 경향을 파악할 수 있다. 따라서 전술한 바와 같이 전개구간당 송신점 수를 늘리면 심도의 증가에 따른 지층 분해능도 향상될 수 있다. 그리고 그림 (B)의 경우는 (A)의 측선 양단부에서 직교로 배열한 단일 전개 측선에 대한 토모그램이다.

Fig. 11의 (C)와 (D)는 각각 Fig. 10의 조사 2, 3구간에서 시추공번 CB-49, CB-56에 맞추어서 배열한 측선으로 측선거리 141 m에 해당되는 것은 2개의 spread를 연계하여 설정된 것이다. 이들을 보면 각각의 전개 연결부에서 속도 1,200 m/s 이상에 해당되는 지층이 뚜렷하게 분리되는 것처럼 보인다. 이들 측선은 각 전개별 양단 수신점에서 이격거리가 1.5 m로 연결되는 전개구간에서의 송신점이 전혀 없는 구간이다. 이 때문에 전개별 하부층의 속도 분포 연속성이 없어 보인다. 따라서 이

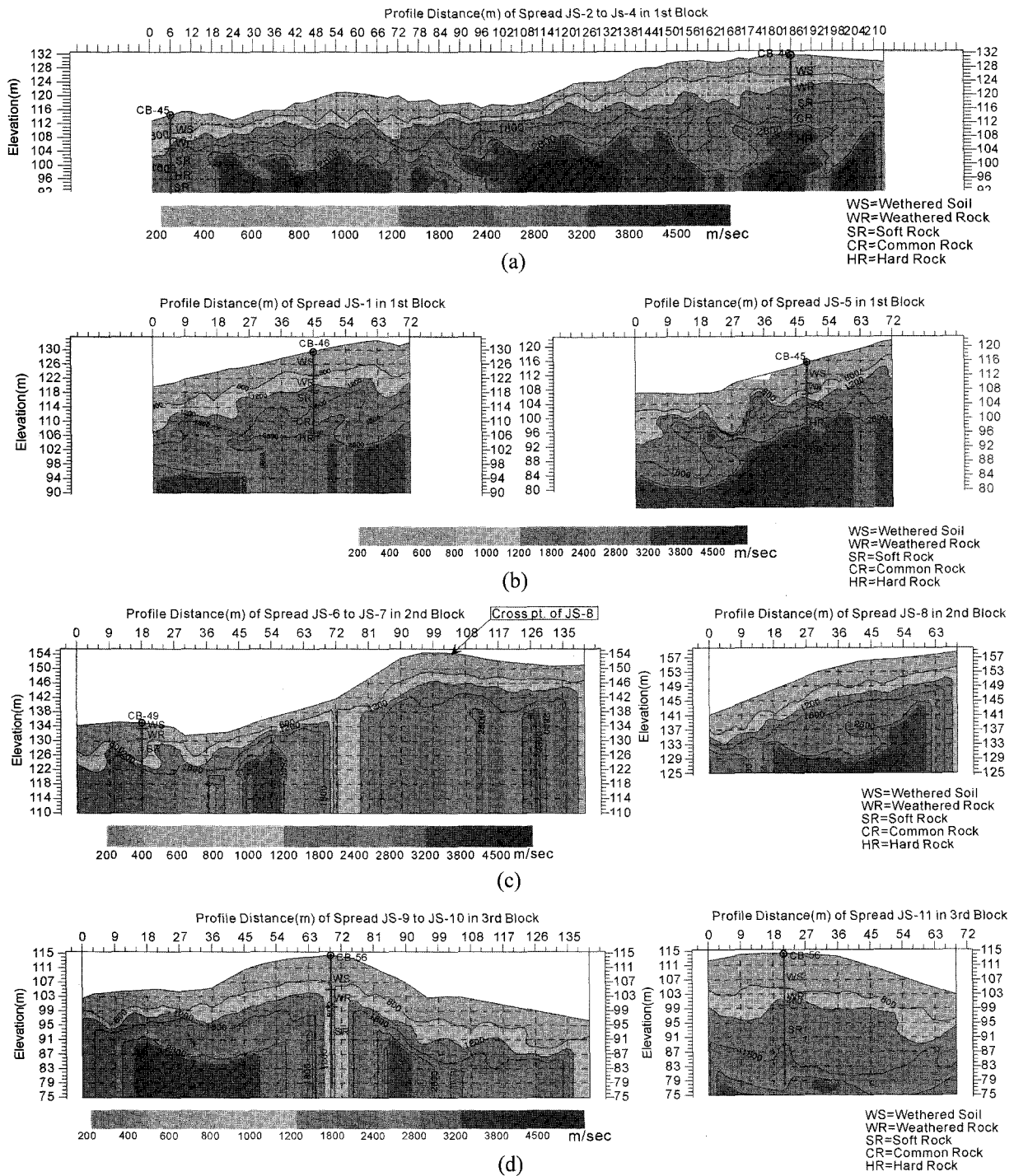




**Fig. 10.** Configurations of seismic refraction survey of land slope area in site of house land development. (a) Profile JS-1 to JS-5 at site 1. (b) Profile JS-6 to JS-8 at site 2. (c) Profile JS-9 to JS-11 at site 3.

러한 경우는 최종적으로 암종별 속도분포를 해석자가 기존에 조사된 자료를 참고하여 지층을 구분하면 효과적으로 지반공학 자료 도출에 활용될 수 있다. 본 조사 당시의 자료취득은 전통적인 해석방법을 적용하기 위해 실시한 것이므로 토모그래피 해석기법을 이용하기 위해서는 이에 맞도록 원경 송신원을 추가로 사용하는 자료취득 방법을 택해야 할 것이다.

본 지역에서 굴절법 탐사 해석결과는 전술한 것처럼 토목공사에 있어서 절토 사면부의 토공량 및 시공법, 공사비 산출에 있다. 따라서 시추자료에 의한 단일 지점에서의 풍화암과 연암, 보통암 이상의 지반분류를 굴절법 탐사 측선 전개구간 전체에 까지 연계하여 리퍼빌리티를 결정해야 한다. Table 2와 Table 3을 비교하여 속도 1,200 m/s, 즉 풍화암을 경계로 그 이하일



**Fig. 11.** The results of seismic refraction tomography of land slope area in site of house land development. (a) Profile JS-2 to JS-4 in Site 1. (b) Profile JS-1 to JS-5 in Site 1. (c) Profile JS-6 to JS-8 in Site 2. (d) Profile JS-9 to JS-11 in Site 3.

때는 리핑암, 이상일 때는 발파암으로 분류하는 것이 타당하다고 본다. 시추지점에서의 굴절법 탐사 결과와 비교할 때 이의 경계는 전체 축선에서 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

따라서 향후 대규모 토지조성 지역에서 굴절법 탐사 자료를 이용한 굴절법 토모그래피법은 지하의 구조와 굴삭난이도 평

가를 위한 하나의 방법으로 자리잡을 것으로 보인다.

### 결론

탄성과 굴절법 탐사가 터널, 댐, 도로, 택지조성 등 토목구조물 기초지반 조사에 효율적으로 활용하기 위해서는 표토층 및

**Table 2.** The classification of rock by the P-wave velocity and discontinuity frequency (Korea Highway Corporation, 1996)

구 분		토 공 작 업		
		토 사	리 핑 압	발 파 압
탄성과 P파 속도(m/s)	A그룹	700 이하	700~1,200	1,200 이상
	B그룹	1,000 이하	1,000~1,800	1,800 이상
표준관입시험치(N)		50/10 미만	50/10 이상	-
불연속면 발달빈도	RX	-	TCR=5% 이하	TCR=5~10% 이상
		-	RQD=0	RQD=0~10%
	NX	-	TCR=25% 이하	TCR=25% 이상
		-	RQD=0	RQD=0~10% 이상

**Table 3.** The rock classification of rippability (Bell, 1992)

암 질	매우양호	양호	보통	불량	매우불량
풍화도	신선	다소풍화	보통풍화	많이풍화	완전풍화
P파 속도(m/s)	>2,150	1,850~2,150	1,500~1,850	1,200~1,500	450~1,200
Rippability	발파	리핑 극히 곤란, 발파	리핑 매우 어려움	리핑 어려움	쉽게 리핑

풍화대 깊이, 연암 또는 기반암의 깊이와 형상, 단층 파쇄대나 연약지반의 위치 및 규모, 폭, 지질경계의 위치, 지반의 공학적 분류, 굴삭난이도 등을 정량적으로 평가할 수 있어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 탄성과 굴절법 토모그래피법을 개발하여 굴절법 자료의 해석을 용이하게 하고 정량적인 평가를 할 수 있도록 하였다.

또한 모형자료에 대한 결과를 고찰해보면 조사목적과 탐사 심도에 맞는 축선길이 및 배치, 수신점과 송신점 간격 및 배치, 지형기복 여부 등 현장조사 파라미터 설정이 중요하다는 것을 알 수 있다. 탐사목적과 관련하여 수신점 간격은 유동적이거나 국내의 천부의 지각구조의 변화가 심하므로 일반적으로 수신점의 간격은 3~5 m가 적합하다고 볼 수 있다. 축선의 길이는 굴절파가 발생할 수 있는 정도가 되어야 한다. 일반적으로 굴절파가 발생하기 위한 축선의 길이는 최소한 탐사하고자 하는 심도의 4배 정도를 전제하여야 한다. 굴절법 토모그래피 해석기법을 적용할 경우 송신점은 대략 원거리 송신점을 포함하여 7개에서 9개의 송신점이 적당할 것으로 생각된다. 또한 지형경사가 있는 경우 지형경사의 정보를 가지고 해석하는 알고리즘을 적용할 경우 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

택지조성 지역에서 굴절법 토모그래피 해석기법을 적용하고 시추자료의 암종 분류와 비교한 결과 굴삭난이도는 탄성과 P파 속도가 700~1,200 m/s 범위의 풍화암을 리핑암, 그리고 그 이상의 연암을 발파암으로 평가할 수 있었다.

그러므로 향후 역산시 분해능 향상에 관한 연구가 더 이루어지면 현장적용 간편성과 해의 정확성으로 인하여 공학적 적용에 있어 토모그래피법이 굴절법 탐사에 있어 기본 해석법으로 자리 잡을 것으로 사료된다.

## 사 사

이 연구에 사용된 현장자료를 제공하여 주신 대한석탄공사의 유인걸 박사님과 유영준 박사님에게 감사드립니다.

## 참고문헌

김종필, 1991, GRM을 이용한 탄성과 굴절법 탐사자료 해석연구: 서울대학교, 석사학위논문.

이두성, 1995, 유한차분법에 기초한 파선경로계산 알고리즘: 한국지반공학회, **31**, 150-155.

정상용, 1995, 굴절법 탄성과 탐사자료의 유사파형 및 주시역산: 한양대학교, 박사학위논문.

하정희, 1998, 블록 매개변수화를 이용한 굴절법자료의 주시역산: 서울대학교, 석사학위논문.

한국지반공학회, 1997, 구조물기초 설계기준: 한국지반공학회, 507.

Bell, F. G., 1992, Engineering in rock masses: Oxford, England.

Berryman, J. G., 1991, Lecture notes on nonlinear inversion and tomography: [http:// sepwww.stanford.edu/sep/berryman/](http://sepwww.stanford.edu/sep/berryman/)

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

Gardner, L. W., 1967, Refraction seismograph profile interpretation, in Musgrave, A. W., Ed., Seismic refraction prospecting: *Soc. Exp. Geo.*, 338-347.

Kaczmarz, S., 1937, Angen herte Aufl sung von Systemen linearer Gleichungen: *Bull. Acad. Polon. Sci. Lett. A.*, **35**, 355-357.

Palmer, 1980, An introduction to the generalize reciprocal method of seismic refraction interpretation: *Geophysics*, **46**, 1508-1518.

Qin, F., Olsen, K. B., Cai, W., and Shuster, G. T., 1992, Finite-

- difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts: *Geophysics*, **57**, 478-487.
- Redpath, B. B., 1973, Seismic refraction exploration for engineering site investigation: *Nat. Tech. Inform. Serv.*
- Scott, J. H. 1973, Seismic refraction modeling by computer: *Geophysics*, **38**, 271-284.
- Zhang, J., and Toksöz, M. N., 1998, Nonlinear refraction travelttime tomography: *Geophysics*, **63**, 1726-1737.
- Zhu, X., and McMechan, G. A., 1989, Estimation of two-dimensional seismic compressional -wave velocity distribution by iterative tomographic imaging: *Int. J. Imag. Sys. Tech.*, **1**, 13-17.