

## 지반 공학에서의 지오토모그래피의 응용

서 백수\*<sup>1</sup>, 김 학수\*<sup>2</sup>, 권 병두\*<sup>3</sup>

\*1 : 강원대 공과대학 자원공학과 교수

\*2 : 동부 건설 기술연구소, 선임 연구원

\*3 : 서울대 공과대학 지구과학 교육학과 교수

### 1. 머리말

최근 지하 공간의 활용이 증대되는 추세에 이와 관련되어 지하 구조물의 시공전 또는 시공 중에 있어 시공 전략 수립, 장비 결정, 안정성 및 경제성 등을 위해 암반 내의 파쇄대나 균열대의 발달 및 분포에 대한 탐사는 필수적으로 선행되어야 한다. 이러한 탐사에는 분해능이 매우 높은 탐사 기술이 요구되며, 일반적으로 시추공이나 지하 갱도를 이용한 탄성과 탐사나 지오레이다(georadar) 탐사를 많이 사용하고, 자료해석을 위한 역산 기법으로는 지오토모그래피(geotomography)가 필수적인 기법으로 인식되고 있다.

지오토모그래피는 의학에서 이용되는 토모그래피의 원리를 물리탐사에 적용한 것으로 80년대 이후 전세계적으로 급격한 연구가 시작되었으며, 국내에서도 많은 이론 논문과 함께 현장 자료 처리에서 얻은 훌륭한 결과들을 발표하고 있다. 지오토모그래피는 주로 탄성과 탐사에서 활용되었으나, 최근에는 지오레이다, 전기비저항 탐사 등에서도 탐사 기법이나 자료 처리 기법을 도입하여 토모그래피를 수행함으로써, 현재 지오토모그래피라 함은 지하를 영상화(imaging)할 수 있는 모든 탐사 기법이나 자료 처리 기법으로 의미가 넓혀져 사용되고 있다.

### 2. 지오토모그래피법의 분류 및 이론

지오토모그래피는 탄성과 탐사에서 시작되어 적용 탐사 방법이 확대됨에 따라 그 분류도 매우 복잡하지만 여기서는 다음과 같이 분류하여 보았다.

- 자료 획득 방법에 의한 분류
- 적용 이론에 의한 분류
- 적용 탐사 방법에 의한 분류

#### 2.1. 자료 획득 방법에 의한 분류

의학의 토모그래피에 비해 물리탐사에서 지오토모그래피의 해상도가 떨어지는 가장 큰

이유는 자료 획득의 한계 때문이다. 의학에서의 토모그래피는 측정에 제한이 없는 반면 지오토모그래피는 지표, 시추공, 지하 갱도를 주어진 여건에 따라 한정적으로 이용할 수밖에 없다.

대부분의 지오토모그래피는 투과파(transmitted wave)를 이용하는 시추공-시추공(hole-to-hole) 탐사, 반사파(reflected wave)를 이용하는 SRP(Surface Reflection Profile) 탐사, 두 방법의 중간자적인 VSP(Vertical Seismic Profile) 탐사에 의해 수행되며, 그때의 송수신기의 배열에 따른 개략도는 그림 1.과 같다. 자료의 해상도를 높이기 위해서는 투과파와 반사파를 모두 이용하여 측정각(의학에서는 360°)을 최대한 크게 하여야 하지만 현장 여건과 경제성 등으로 인하여 제한을 받게 된다.

## 2.2. 적용 이론에 의한 분류

### - 파선 토모그래피 ( ray tomography )

파선 토모그래피의 기본 원리는 그림 2에 나타낸 바와 같이 송신원 배열과 수신기 배열을 지하 시추공이나 갱도 또는 지표상에 설치하여 수많은 파들의 초기 도달 시간(first arrival time)을 측정하여 이들로부터 지하 단면의 속도 구조를 영상(Image)으로 재구성하는 것이다.

만약 획득한 도달 시간 자료가 M개이고 얻고자 하는 지하 단면을 그림 2와 같이 N개의 일정한 역속도를 가지는 요소(cell)로 나누었을 경우 파선 토모그래피는 다음과 같은 연립 방정식의 해를 구하는 문제로 귀착된다.

$$b_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j \quad (i = 1, 2, \dots, M), \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \begin{cases} b_i : i \text{ 번째 파선의 도달시간 (travel time),} \\ x_j : j \text{ 번째 요소의 역속도 (slowness),} \\ A_{ij} : i \text{ 번째 파선이 } j \text{ 번째 요소를 통과하는 길이.} \end{cases}$$

이를 행렬로 표시하면 다음과 같으며,

$$B = A X \quad (2)$$

하나의 파선이 통과하는 요소의 개수는 매우 적으므로 행렬 A는 매우 산재(sparse)한 행렬이 된다.

파선 토모그래피는 결국 위의 연립 방정식 (2)식의 해 x를 구하는 문제로 귀착될 수 있

고, 그 구체적 방법에 따라 CG법(conjugate gradient), ART(arithmetic reconstruction technique), SIRT법(simultaneous iterative reconstruction technique), LSQR법(least square method) 등으로 나뉘는데 LSQR법의 경우 직접 역행렬을 구하는 방법으로써 컴퓨터 기억용량과 계산 시간이 거대하여 슈퍼 컴퓨터에서나 가능한 반면에 CG나 ART, SIRT법은 반복적으로 해를 구하는 방법이므로 기억용량과 계산 시간 면에서 매우 경제적이다.

한편 위식에서 이론적으로 행렬 A는 속도 구조 X에 의해 결정된다. 따라서 위식의 해를 구하는 것은 불가능하다. 그러나 만약 파가 직진한다고 가정하면(이는 매질 내에서 속도 차가 매우 작은 경우에만 적용될 수 있다.) 행렬 A는 속도 구조 X에 무관하게 결정될 수 있으며, 따라서 (2)식의 해를 구할 수 있게 되는데 이를 선형 토모그래피(Linear Tomography)라 한다.

그러나 매질의 속도 차가 어느 정도 있게 되면 파선 경로를 직선으로 가정하는 것은 상당한 오차를 수반하게 되며 실제 구조와 달리 왜곡되어 나타나게 된다. 따라서 파선의 굴곡을 고려한 비선형 토모그래피(Nonlinear Tomography)가 필요하게 된다. 또 비선형 토모그래피에서는 (2)식의 해를 바로 구할 수는 없으므로, 초기 모형을 가정하여 파선 추적으로부터 A행렬을 구하고 이로부터 (2)식의 해를 구한 후 다시 파선 추적을 실시하여 A행렬을 구하는 식으로 반복적으로 해를 구해 나가게 된다. 그러나 이러한 비선형 토모그래피에서는 매 반복 때마다 A행렬을 구하기 위한 파선 추적을 실시하여야 하므로 계산 시간이 극히 많이 소요되게 되며 이러한 파선 추적에 대부분의 계산 시간이 사용되게 되어서 파선 추적 알고리즘의 효율성이 이 방법의 적용성 여부를 좌우하게 된다.

#### - 회절 토모그래피

회절 토모그래피는 파의 회절, 산란 등 파선의 가정이 곤란한 경우 또는 파형으로부터 보다 많은 정보를 얻을 수 있는 새로운 방법들(완전 파형 역산 등)이 시도되고 있는 현 추세에 그 사용이 기대되는 방법이다.

회절 토모그래피는 파동방정식의 선형해에 기반을 둔 것으로 스칼라 파동방정식에서 출발하여 다음과 같은 Schrödinger 방정식에서

$$(\nabla^2 + k_0^2) U_s(\vec{r}) = k_0^2 U(\vec{r}) O(\vec{r}) \quad (3)$$

$$\text{여기서, } \left\{ \begin{array}{l} k_0^2 : \text{가정된 균질매질에서의 파수(wave number),} \\ U_s, U : \text{산란장(scattering field), 전체장(total field)} \\ O : \text{목적함수(object function)} \end{array} \right.$$

산란장과 공간 주파수영역의 목적함수 사이의 관계로부터 영상 재구성식을 유도할 수 있다. 이 때 (3)식을 직접적으로 풀 수는 없고 1종 Fredholm 적분방정식의 형태를 통하여 전체장에 대한 가정이 필요하게 되며, 이러한 전체장에 대한 가정에 따라 크게 Born 근사와 Rytov 근사에 의한 회절 토모그래피로 대별된다.

따라서, 회절 토모그래피에 의한 자료처리는 송신파형의 추정, 산란장의 근사 등에 큰 영향을 받아 현장적용 사례들이 많이 발표되고 있지는 않으나, 점차 현장적용의 시도가 증가하고 있다.

- **진폭 토모그래피(amplitude tomography)/감쇠 토모그래피(attenuation tomography)**

진폭 토모그래피는 파선과 파형의 성질을 공유하는 것으로 수신파의 진폭은 암상이나 유체포화율, 공극율, 투수율, 점성등에 관련이 있다.

지하매질의 감쇠특성을 추정하는 진폭 토모그래피는 진폭을 직접 이용하는 방법과 진폭에 비해 안정적인 시간정보와 주파수 정보를 이용하는 방법이 널리 쓰이고 있으나 국내에서는 아직 연구 단계에 있는 방법이다.

### 2.3. 적용 탐사방법에 의한 분류

지반 공학적 측면에서 현장에 적용되고 있는 토모그래피 탐사방법은 탄성과 탐사, 전자파 탐사(지오레이다 탐사), 전기비저항 탐사로 나눌 수 있다. 앞절에서 소개된 방법들의 대부분은 탄성과 탐사를 근간으로 개발된 것으로 지오레이다 토모그래피에서도 같은 방법으로 응용될 수 있다.

그러나, 전기비저항 토모그래피는 앞의 방법들과는 다른 넓은 의미의 토모그래피법으로 자료획득 기법은 유사하나 자료처리 기법은 유한차분법이나 유한요소법을 정모델링(forward modeling)로 한 비선형 역산(inversion)을 수행하거나 알파센터 기법등으로 지하를 영상화하는 방법이다. 이 방법은 일본에서 활발히 연구되고 있는 분야로 국내에서는 유한차분법을 이용한 비선형 역산에 대한 이론적 연구가 발표된적이 있다.

## 3. 결과 비교

- **파선과 진폭 토모그래피의 비교**

그림 3

- **파선과 회절 토모그래피의 비교**

그림 4

- **탄성파와 전기 비저항 토모그래피의 비교**

그림 5

## 4. 맺음말

최근 물리 탐사 분야에 있어 지하의 영상화는 소프트웨어 및 하드웨어의 발달에 힘입어 지반공학이나 환경 등과 같은 고해상의 자료분석을 요하는 분야에서 많은 발전을 보이고 있다. 이중 지오토모그래피는 지하 영상화를 위한 대표적인 방법으로 특히 탄성파 탐사에 의한 파선 지오토모그래피는 대규모 프로젝트나 위험성이 내재되어 있는 사업의 경우 필수적인 지하조사 방법으로 정착되고 있다.

지반공학 분야에 있어서 지오토모그래피의 응용이 확대되는 시기에 보다 고해상의 자료 처리와 정량적 해석을 위해 다음과 같은 연구가 지속적으로 이루어져야겠다.

1) 복합 탐사 및 복합 자료 처리가 필요하다. 탐사의 복합 적용은 자료의 신뢰도를 높일 수 있고, 지하 매질의 물리적 특성에 대한 복합 해석이 가능하므로 보다 정량적 해석이 용이하다. 특히, 전기 비저항 토모그래피는 타 탐사법에 비해 자료 획득과 해석이 쉽다는 장점을 가지므로 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한, 단일 탐사의 경우에도 자료 처리 기법을 복합 적용시킴으로서 자료의 해상도를 높일 수 있다.

2) 보다 정량적 해석을 위해서 시추공으로 부터 가능한 많은 정보를 얻어야 한다. 예를 들어 음파 검층, 시추공 텔레뷰어, 밀도검층 등과 같은 검층 분야의 적용은 자료의 질을 한층 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- 김학수, 1994, 변형된 Born근사를 이용한 회절 지오토모그래피에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교
- 윤왕중, 1990, 대수적 영상재구성법에 의한 탄성파 지오토모그래피의 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교
- 이명중, 1994, 시추공간 전기비저항 탐사자료의 영상화, 공학석사 학위논문, 서울대학교
- 임해룡, 1992, Fermat 원리 및 수정된 파선경로를 이용한 비선형 파선토모그래피 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교
- 하희상, 1993, 탄성파 파선토모그래피에 있어서 DLSQ법과 평활화 제한법의 비교 연구, 공학석사 학위논문, 서울대학교

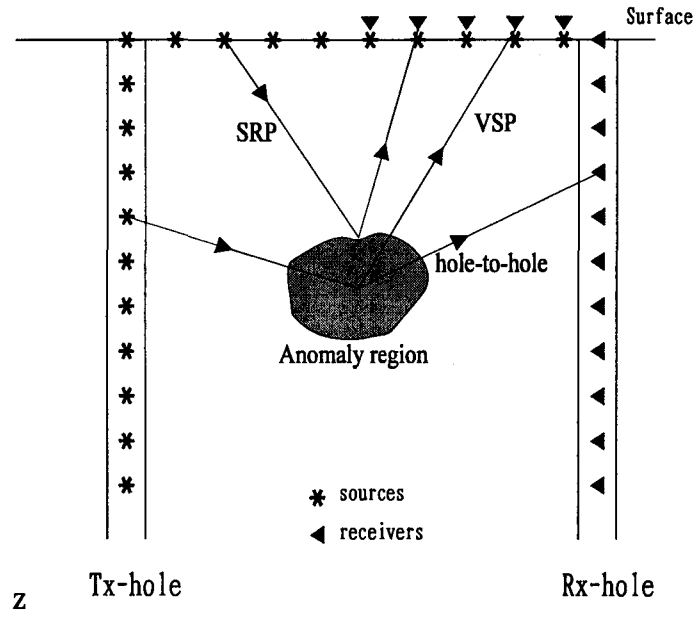


Fig.1 The geometry of the hole-to-hole, VSP and SRP configurations.

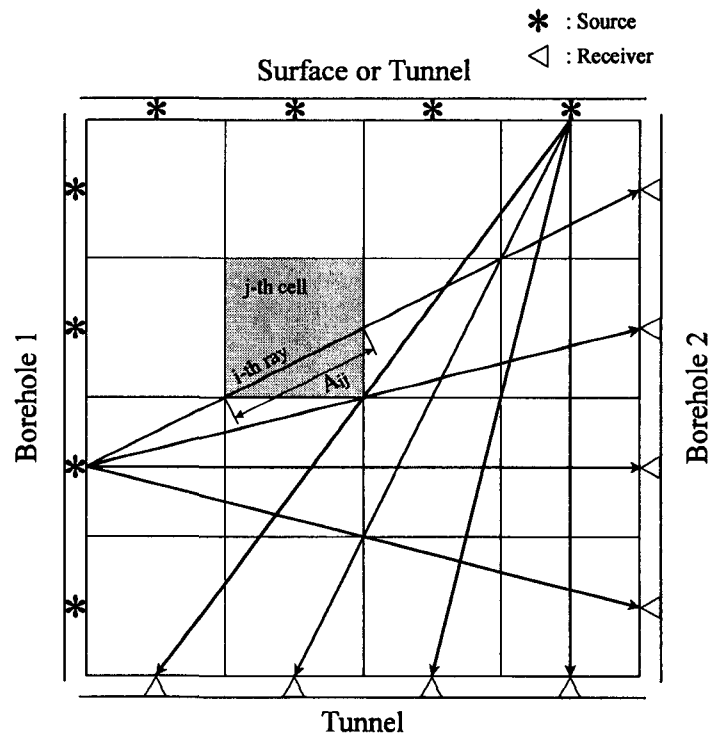


Fig.2 Schematic diagram of the model with cells and typical raypaths for ray tomography.

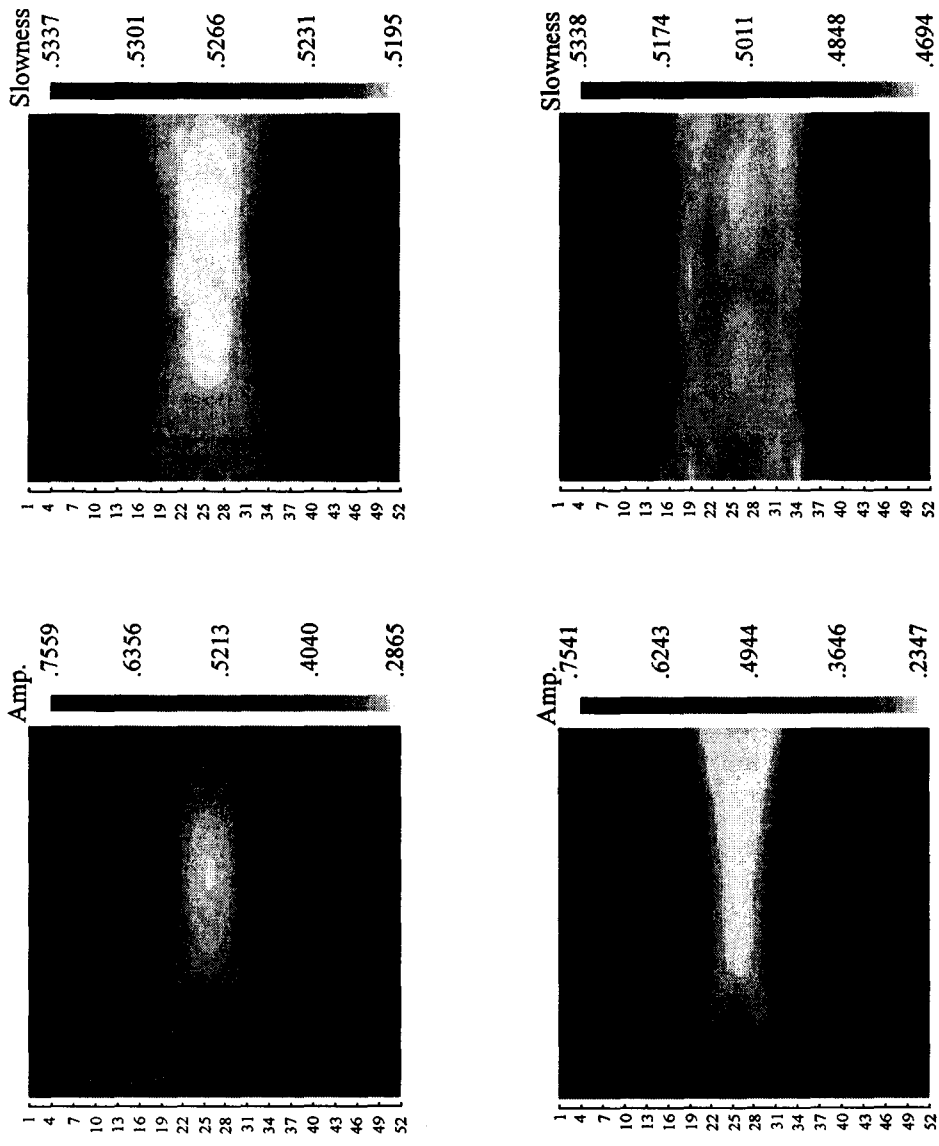
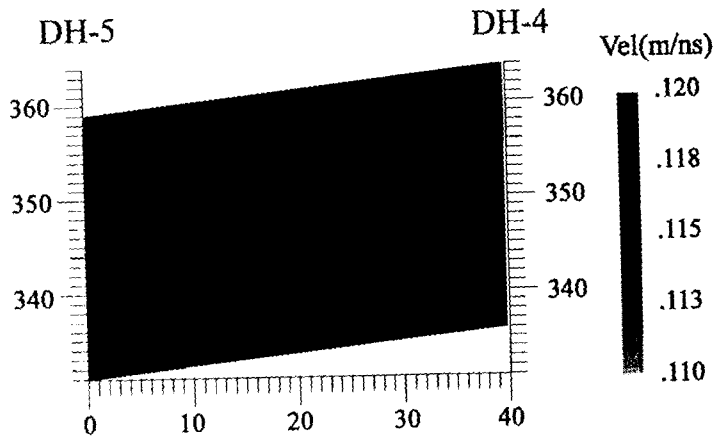
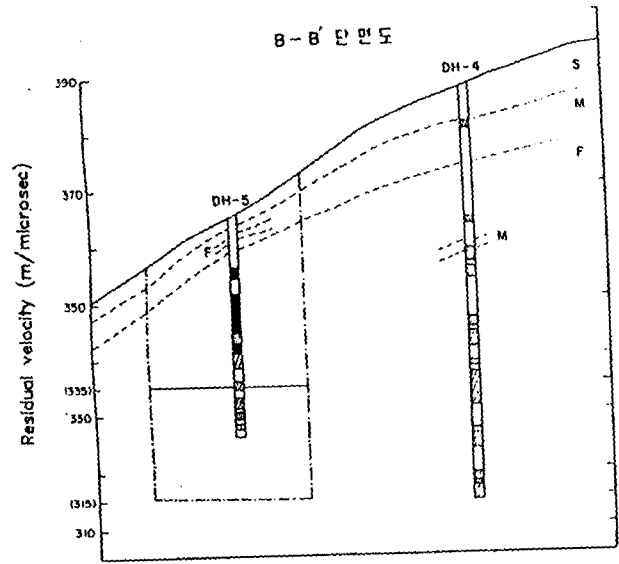


Fig.3 Comparison of ray tomography with amplitude tomography



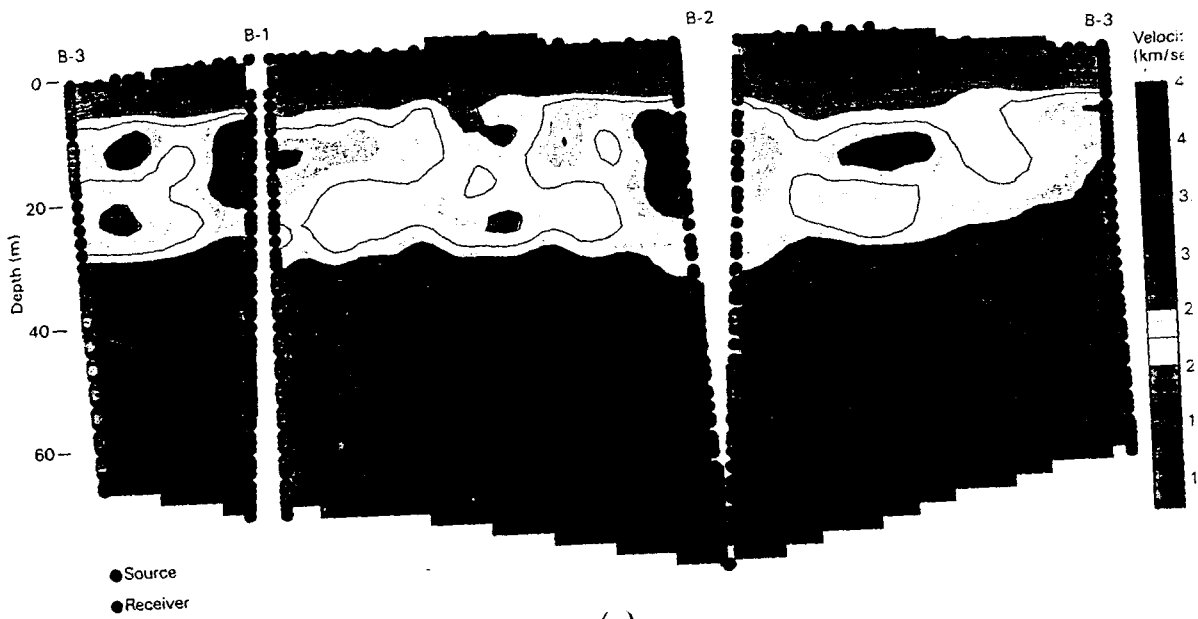
(a)



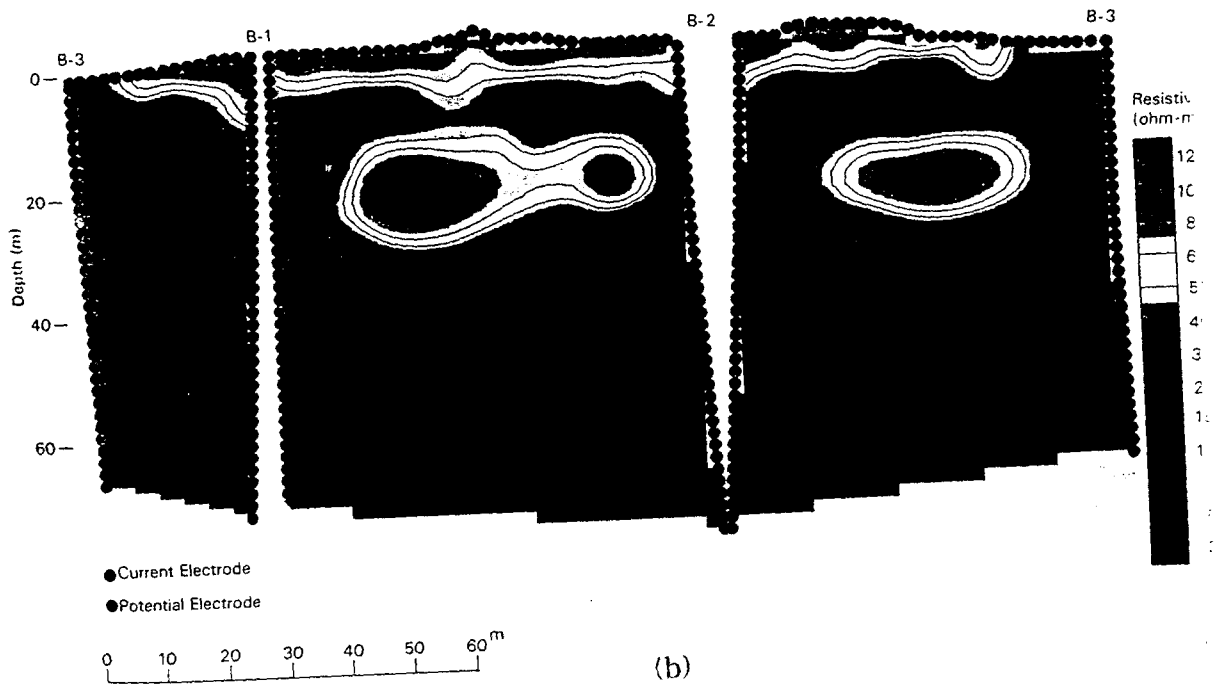
(b)

Fig. 4 a) Velocity tomogram and  
b) geological columnar section





(a)



(b)

그림 5 탄성파와 전기 비저항 토모그래피의 비교