

## 지하공간 개발에 있어서 물리탐사의 역할

정승환<sup>1)</sup>

Roles of Geophysical Methods applied  
for the Underground Space Utilization Projects

Seung-Hwan Chung<sup>1)</sup>

### 1. 서 론

대도시권의 지표공간 제한으로 지하 생활공간의 확보, 교통체증 해결을 위한 지하철 및 지하차도 건설, 심각한 환경문제로 대두되고 있는 핵폐기물의 저장시설, 석유 및 가스 지하 저장시설, 고속전철의 터널공사, 심야전력을 이용한 양수발전소 건설 등 지하공간 개발 요구가 급증하고 있는 추세이다. 이러한 지하공간의 건설에 있어 사전에 지하의 지질적인 정보를 정확하게 파악하지 못하여 지하공간 건설도중이나 건설후 지하공간 활용중에 지하공간이 붕괴되거나 누수로 인해 보수되어야만 할 경우, 엄청난 복구비 및 보수비는 물론 그에 대한 인명 및 재산피해는 이루말할 수 없이 크다고 할수 있다. 특히 핵폐기물 저장시설과 같은

중요 시설물에 대해서 철저한 지질적인 조사 및 탐사가 뒷받침되지 않는다면 우리나라는 물론 전인류에 다시는 돌이킬 수 없는 엄청난 피해를 입히게 될 것이다. 따라서 지하공간은 거의 영구적으로 보존되어야 하기 때문에 그에 대한 안정성이 충분히 고려되어야 한다. 이러한 안정된 지하공간 설계를 위해서는 광역 물리탐사 방법을 동원하여 지하공간을 건설할 수 있는 양호한 암반의 분포 및 주된 지질 구조선을 우선적으로 규명하여야 하고, 선정된 지역에서는 정밀 지표 물리탐사 및 시추공 탐사를 통하여 암반내의 단층 및 파쇄대를 mapping 하고 지하공간 설계에 필수적인 지하수 흐름의 해석에 필요한 자료가 제공되어야 한다. 이러한 각종 물리탐사 방법을 동원하여 얻은 자료를 종합하여 지하공간 설계에 필수적인 지하의

\*1992年 6月 接受

1) 正會員, 한국자원연구소

정밀한 지질적인 정보를 제공하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## 2. 지하공간 부지선정(site selection)을 위한 광역 물리탐사

지하공간 시설을 거의 영구적으로 안전하게 유지하기 위해서는 파쇄대 발달 및 지질적인 구조의 변화가 적은 지역이 지하공간 부지로 추천되는 것이 바람직하다. 이러한 지역의 선정을 위해서는 광역적인 지질 분포 양상 및 지질구조선을 파악 할 수 있는 광역 물리탐사 방법에 의하여 선행되어야 한다. 현재 널리 사용되고 있는 탐사법으로는 중력, 자력, 항공 감마 스펙트럼 및 EM 탐사 등이 있다.

### ○ 중력 탐사

일반적으로 중력값은 결정질 암석에서 높게 나타나기 때문에 중력탐사는 화강암 분포 양상, 지하의 주요 구조선 및 퇴적층 하부의 기반암까지의 심도를 규명하는데 사용된다. 중력탐사 결과는 탐사측선에서 얻어진 현장자료를 컴퓨터로 계산된 이론자료와 서로 일치되도록 지하 모델을 추정해나가는 역산 방법을 사용하여 해석이 이루어지게 된다(그림 1).

### ○ 자력 탐사

자력탐사는 해상, 육상 또는 공중에서 지구 자장을 측정하여 이를 토대로 지하의 자성체 분포를 파악함으로써 지하구조, 암질 등을 조사하는 물리탐사 방법중 하나이다. 자력탐사의 결과 도면(그림 2)은 화성암들은 자성이 강하게 나타나기 때문에 자성이 약한 주변의 퇴적층과의 경계가 뚜렷하게 나타나며 단층과 같은 지질구조선 및 지하 기반암의 기복에 관한 심부 및 천부의 정보를 얻을 수 있다.

### ○ 항공 EM 탐사

항공 EM 탐사로부터 얻을 수 있는 정보는 지표부근의 수직적인 파쇄대의 위치, 표토층의 비저항(resistivity) 및 표토층의 심도 등이다.

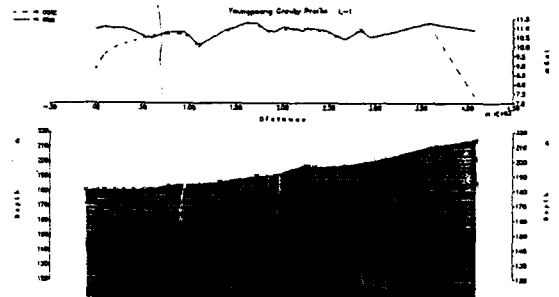


Fig. 1 탐사측선의 중력 이상 및 전산해석 좌측부에 파쇄대와 관련된 dyke로 보이는 저밀도 구조가 보인다.

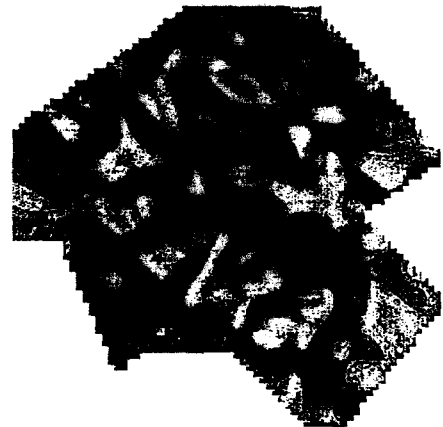


Fig. 2 탐사 지역의 총자력강도를 도시한 음영도 자력 구조선을 쉽게 인지할 수 있다.

## 3. 지하공간 부지의 정밀 지표 물리탐사

광역 물리탐사를 통하여 지하공간을 건설할 부지가 선정되면 지하공간 설계에 필수적인 정보인 기반암의 심도 및 기복, 지하의 단층 및 파쇄대의 위치, 지하수의 위치 및 흐름을 파악할 수 있는 지표 물리탐사가 뒤따르게 된다. 이러한 지표 물리탐사에는 VLF-EM, 전기

비저항탐사, MT탐사, Radar탐사, 탄성파탐사 등이 있다. 각 탐사방법에서 얻을 수 있는 정보는 다음과 같다.

○ VLF 전자탐사

VLF 전자탐사(very low frequency electromagnetic method)란 접지된 수백 피트 높이의 수직 안테나에 강력한 교류를 통하여 발생되는 대잠수함용의 15-25KHz의 주파수 대역의 전자파를 송신원으로 사용하여 수진기만을 갖고 지하의 수직적인 단층이나 파쇄대를 탐사하는 방법이다. 대개 단층이나 파쇄대는 clay나 물과 같은 전도성이 좋은 물질로 충전되어 있어 하나의 전도성 물체로 간주될 수 있다. 따라서 VLF 전자탐사법은 지표 부근의 수직적인 경향이 있는 단층이나 파쇄대를 탐지하는데 유용한 방법이다(그림 3).

○ 전기 비저항탐사

전기 비저항탐사중 국내에서 지하수 탐지에 성공적으로 적용되어온 방법은 쌍극자(dipole-dipole)전기 비저항탐사이다. 쌍극자 전기 비저항탐사는 전류, 전위전극의 간격을 탐사목적 및 정밀도 등을 고려하여 결정하고 이를 단계적으로 이동하면서 전위차를 측정하여 겹보기 비저항 값을 계산한다. 이러한 쌍극자배열의 전기 비저항탐사 결과 획득된 겹보기 비저항 단면(그림 4)을 가단면도(pseudo-section)라고 하는데, 이 가단면도에 나타난 겹보기 비저항값은 암석의 전기 비저항값을 나타내는 것이 아니고 아울러 겹보기 비저항값이 표시된 점도 실제 심도를 나타내는 것이 아니기 때문에 컴퓨터에 의한 해석 프로그램을 이용하여 가단면도를 진비저항 단면도로 만들게 된다.

표토층과 기반암사이의 접촉부에서는 비저항의 비가 매우 크기 때문에 전기 비저항탐사는 기반암과 표토층의 경계를 규명할 수 있고, 또

한 기반암내의 지하수 역시 낮은 비저항값을 나타내므로 지하수 탐지에 유용한 방법이라 할 수 있다.

○ 지표 Radar 탐사

Radar 탐사는 20-120 MHz의 고주파수 전자파 송신원을 이용하게 되므로 세밀한 천부 지하구조를 규명하는데 가장 유용한 방법으로 표토층의 심도와 지하수면의 위치를 파악할 수 있다. radar 특성상 전기전도도가 좋은 물질에서는 에너지가 멀리까지 전파될 수 없으므로 표토층의 전기전도도에 따라 탐사심도가 결정되게 된다. 특히 이러한 특성때문에 지하수면의 정확한 심도를 파악하는데 지표 radar탐사가 가장 유용한 방법이다.

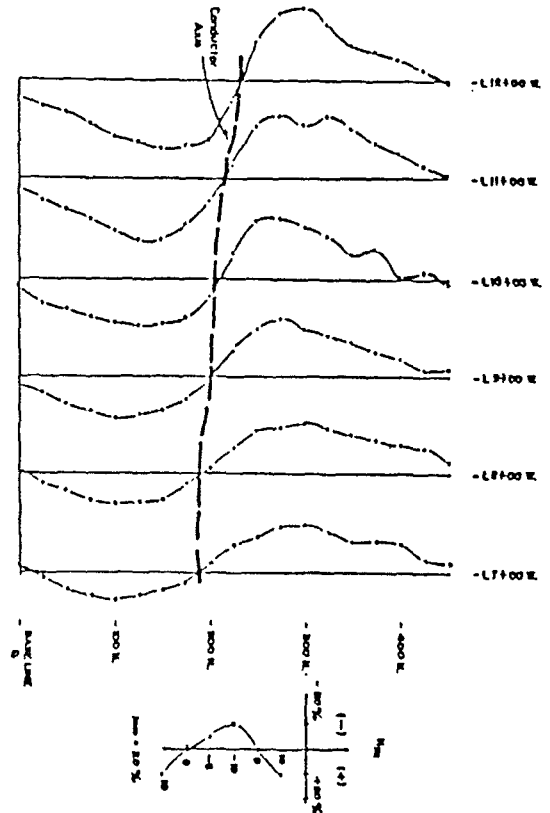


Fig. 3 VLF 탐사측선 프로파일

○ 탄성과 탐사

지표 탄성과 탐사는 크게 굴절법과 반사법으로 구분할 수 있다. 굴절법 탄성과탐사는 발생원으로 부터 전파된 탄성파가 지층 경계면에서 굴절하여 수신기에 도달된 파를 분석하여 포도층과 기반암의 탄성파속도 및 심도를 알 수 있는 방법이다. 또한 반사법 탄성과탐사는 발생원과 여러개의 수신기의 배열을 결정하여 이러한 배열을 일정한 간격으로 이동하면서 측정하는 방법으로 지하의 지질구조(예 : 단층, 습곡, 파쇄대 등)를 파악할 수 있는 탄성과 단면도

(그림 5)를 얻어내는 방법이다. 대개 암석의 P, S파의 속도, 진폭, 주파수 등은 암석의 역학적인 특성에 관한 정보를 제공할 수 있다. 예를 들어 암반의 파쇄가 심한 지역과 암반이 거의 파쇄되지 않은 지역의 탄성파의 속도, 진폭, 주파수는 서로 매우 다르게 나타난다. 따라서 탄성과 탐사는 지하공간 설계에 필요한 수평적인 파쇄대의 위치를 탐지하고, 암석의 역학적인 특성을 규명할 수 있으며, 포토층의 심도를 파악할 수 있는 매우 유용한 방법이다.

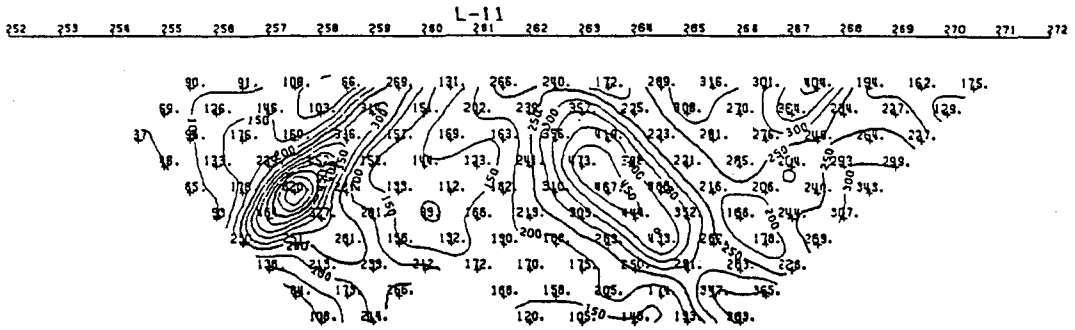


Fig. 4 쌍극자 배열 전기 비저항탐사 가단면도

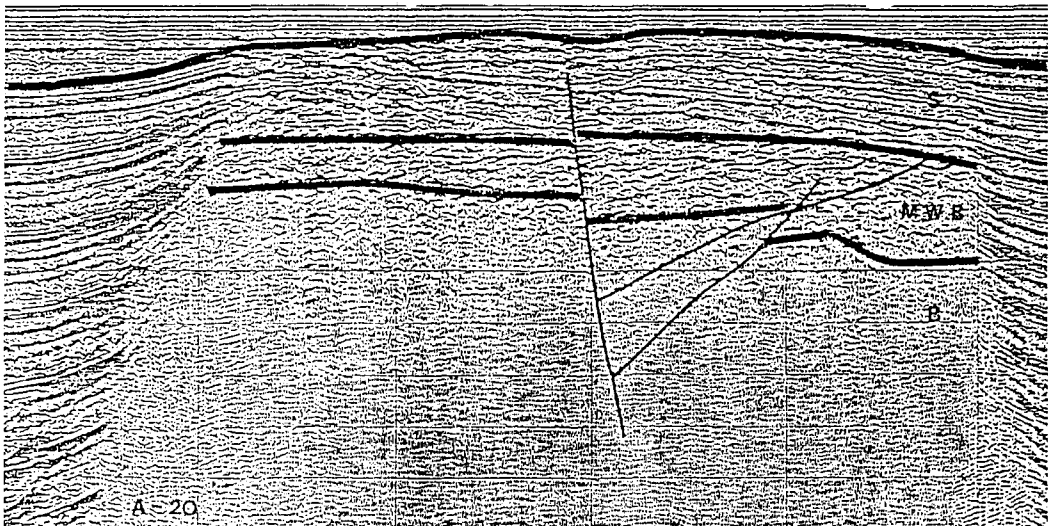


Fig. 5 탄성과 단면도

S : Sediments, WB : Weathered bedrock

MWB : Moderately weathered rock and B : Fresh bedrock

#### 4. 시추공 물리탐사

지표 물리탐사로 얻을 수 없었던 지질학적인 정보는 시추공을 이용하여 지하에 직접 물리탐사기기를 설치함으로써 얻을 수 있다. 특히 도시에 지하공간을 건설하는 경우에는 많은 건축물 때문에 탐사구역이 제한될 뿐만아니라 교통이 혼잡한 도로상에서 지표 정밀 물리탐사를 하기에는 어려운 점이 많기 때문에 시추공을 이용한 물리탐사 방법이 유망하다고 하겠다. 이러한 시추공 물리탐사는 직접적으로 지하의 정보를 얻을 수 있기 때문에 지하공간의 설계에 매우 중요한 정보를 제공하는 역할을 하게 될 것이다. 시추공을 이용한 물리탐사에는 시추공내의 각종 물성을 측정할 수 있는 다양한 종류의 logging, 시추 코아 샘플에서 정확하게 판단할 수 없는 파쇄대의 위치, 크기 및 방향을 파악하기 위한 시추공 scanner, 단일 시추공을 이용하여 시추공 주변의 미세한 파쇄대를 mapping할 수 있는 radar 탐사, 지표에 탄성과 발생원을 위치시키고 시추공 주변의 지질구조를 파악할 수 있는 VSP 탐사, 두개의 시추공사이에서 암석의 P, S파 속도를 측정하는 방법, 두개 시추공사이의 지질적인 정보를 정밀하게 얻을 수 있는 탄성과, radar 및 비저항 crosshole tomography 등이 있다.

##### 4-1. Logging

Logging에는 어떠한 물성을 측정하느냐에 따라 많은 종류의 방법들이 있다. 그 종류들을 나열하면 전기 비저항, 자연전위(Self Potential : SP), 중성자(Neutron), 밀도(density), sonic, gammar logging 등 다양하다. 이러한 logging 방법들은 대개 파쇄대의 위치, 시추공 fluid의 salinity 및 암상변화를 mapping 할 수 있다. 특히 Temperature logging은 대개

탄성과 반사 자료와 더불어 암석의 온도 gradient로부터 지하공간 설계에 가장 중요한 요소인 각 파쇄대내 또는 파쇄대 사이에서의 지하수 흐름 특성 및 방향을 해석하는 자료로 많이 사용된다.

##### 4-2. 시추공 scanner

일반적으로 시추조사를 수행하게 되면 시추코아를 채취하여 암상의 변화, 파쇄대의 위치 및 규모를 파악하게 된다. 그러나 시추코아를 채취하기 어려운 지역이나 시추코아 샘플에서 파악하기 어려운 파쇄대의 정확한 방향을 규명하기 위해서는 직접 시추공내를 촬영할 수 있는 downhole television를 사용하게 된다. 그러나 downhole television은 시추공내의 상황에 따라 그 분해능이 좋지 않은 경우가 많으므로 근래에는 수 mm정도의 분해능을 갖는 시추공 acoustic scanner를 많이 사용한다. 그림 6은 시추공 acoustic scanner의 측정 자료를 전산처리하여 시추공내의 벽면을 영상화한 것이다.

##### 4-3. 단일 시추공 radar 탐사

위에서 설명한 logging방법들은 시추공벽에서의 물리적인 현상 및 물성만을 파악할 수 있는 것이 대부분이라 할 수 있다. 그러나 시추공내에서 발견된 파쇄대의 방향 및 범위를 알기 위해서는 시추공으로부터 어느 정도 거리까지의 정보를 얻을 수 있는 방법이 필요하다. 시추공 radar탐사는 시추공주변의 암반의 상태 및 전기전도도에 따라 radar의 전파 범위가 결정된다. 보통 신선한 암반에서의 가탐 범위는 시추공으로부터 약 100m내의 정도이다. 따라서 시추공 radar탐사는 미세한 파쇄대의 위치, 범위 및 방향을 mapping하는데 매우 효과적인 방법이다. 그림 7은 시추공 radar 측정 방법 및 파쇄대나 지하공동에 의해 나타나는

전형적인 pattern을 나타낸 모식도 이다. 그림 8은 현장의 측정공내에서 측정된 radar 단면으로 미세한 파쇄대의 위치 및 방향 등을 훌륭하게 나타내고 있다.

#### 4-4. 탄성파 VSP(vertical seismic profiling) 탐사

지표 탄성파탐사로는 분해능이 좋지 않아 지질구조를 파악이 어려운 경우에 지표에 탄성파 발생원을 위치시키고 시추공내에 수신기들을 배열하여 측정함으로써 시추공 주변의 음향적 특성(acoustic characteristics)을 상세히 규명하여 암상해석을 가능하게 하는 방법이 탄성파 VSP 탐사법이다. 이 방법으로 탄성파의 속도 및 감쇠율의 분포를 알아내어 지하공간 설계시 사용한다. 그림 9는 VSP 탐사 방법의 모식도와 기록단면을 보여주고 있다.

#### 4-5. Crosshole 탄성파 속도 측정

지하공간을 설계하는데 암석의 P, S파 속도는 암석의 물성을 파악하는데 중요한 요소이다. 특히 S파의 두 성분인 SH, SV파의 속도는 암석이 등방성인지 이방성인지를 파악할 수 있는 척도가 되는 것이다. 대개 두개의 시추공을 이용하여 한쪽 시추공에 발생원, 다른쪽 시추공에 수신기를 설치하여 탄성파를 측정함으로써 P 및 S파의 속도 및 진폭을 측정하게 된다. 근래에는 P, S파의 속도를 시추공을 따라 연속적으로 측정하는 시스템이 개발되어 보다 효율적으로 암석의 물성을 규명할 수 있게 되었다.

#### 4-6. Geotomography 탐사 기술

지표 물리탐사로는 분해능(resolution)의 한계 때문에 미세한 지질적인 정보를 얻을 수 없는 경우, 두개의 시추공 사이의 가장 정밀한 지질적인 정보를 얻을 수 있는 방법으로 의학계에서 많이 이용되는 CT(Computer Tomography)촬영의 원리를 지구물리에 적용한

Geotomography기술이 있다. 현재 가장 널리 사용되는 Geotomography에는 탄성파, Radar 및 비저항 tomography가 있다. 탄성파와 radar에서 사용되는 역산의 원리는 동일하나 탄성파와 Radar의 전파 특성에 따라 가탐범위와 분해능이 서로 다르다. 즉 탄성파는 주파수의 범위가 수백 Hz, radar는 20-120 MHz를 사용하기 때문에 탄성파의 전파범위는 radar보다 넓다고 할 수 있으나 분해능이 radar의 경우보다 떨어지기 때문에 탄성파 tomography는 시추공간 거리가 먼 경우의 전체적인 지질정보를 얻는데 효율적이라 할 수 있고 radar tomography는 미세한 파쇄대 및 세밀한 지질적인 정보를 얻는데 효율적이라 할 수 있다. 탄성파 및 radar tomography 탐사로 부터 얻어진 결과인 tomogram은 두가지 형태로 나타낼 수 있다. 그 하나는 시추공과 시추공사이의 단면을 탄성파속도나 radar 전파속도로 표현하는 것으로 이는 단지 수신기에 도달되는 초동주시만을 이용하여 역산한 결과이다. 다른 하나는 수신기에 도달된 진폭을 이용하여 시추공간의 단면을 암반의 감쇠 인자(attenuation factor)로 나타내는 것이다. 그림 10(a)는 탄성파 tomography의 측정에서 발생원과 수신기간의 배열 및 파의 진행을 나타내며 그림 10(b)는 초동주시만을 이용하여 역산한 결과로 단면에 나타나는 지질구조를 그에 대한 탄성파 속도로 표현한 것이다. 그림 11은 radar tomography에서의 측정방법 및 그에 대한 역산결과(residual-attenuation)를 나타낸 것이다. 이러한 속도분포나 감쇠인자로 표현되는 단면으로부터 지하공간 설계에 필요한 정보인 파쇄대 분포 및 암석의 역학적인 특성을 파악할 수 있다.

또한 비저항 tomography는 시추공내의 전류전극 및 전위전극을 설치하여 측정된 자료로

부터 시추공사이 단면의 비저항 분포를 역산하는 방법으로 토목 구조물의 정밀 지반조사, 방사능 폐기물의 처분을 위한 암반조사, 기타 정밀을 요구하는 탐사에 많이 사용된다. 그림 12

는 시추공내의 전류 및 전위전극 배열과 측정된 결과로부터 역산된 비저항 단면을 나타내고 있다.

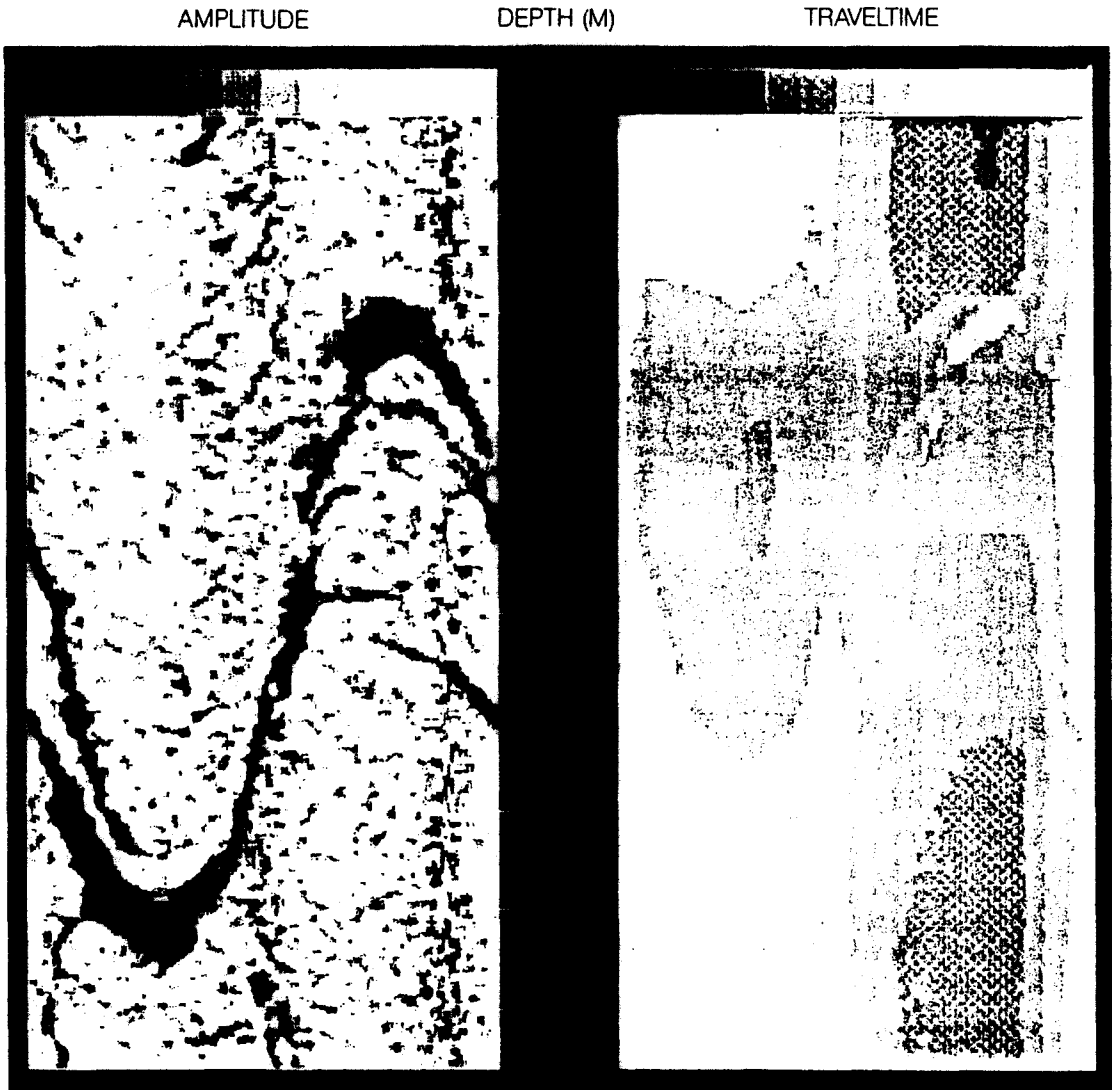


Fig. 6 시추공 acoustic scanner 측정 자료를 전산처리한 시추공벽 영상 단면

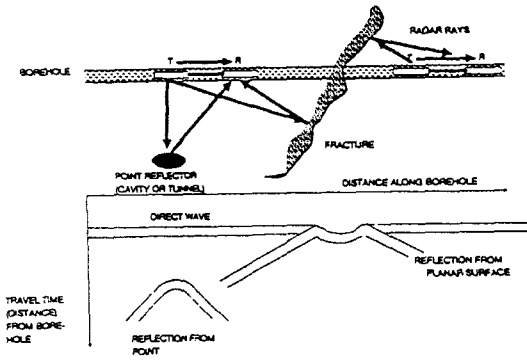


Fig. 7 시추공 radar 탐사 측정 방법 및 파쇄대나 지하공동의 전형적인 pattern을 나타내는 모식도

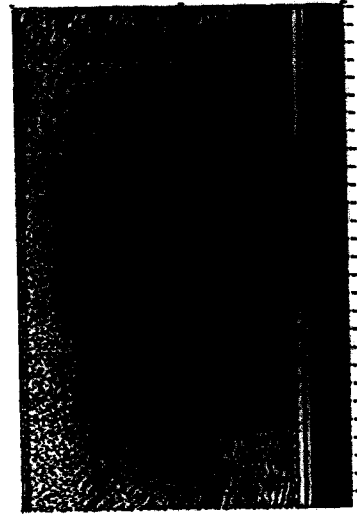


Fig. 8 시추공 radar 현장 탐사 결과 단면

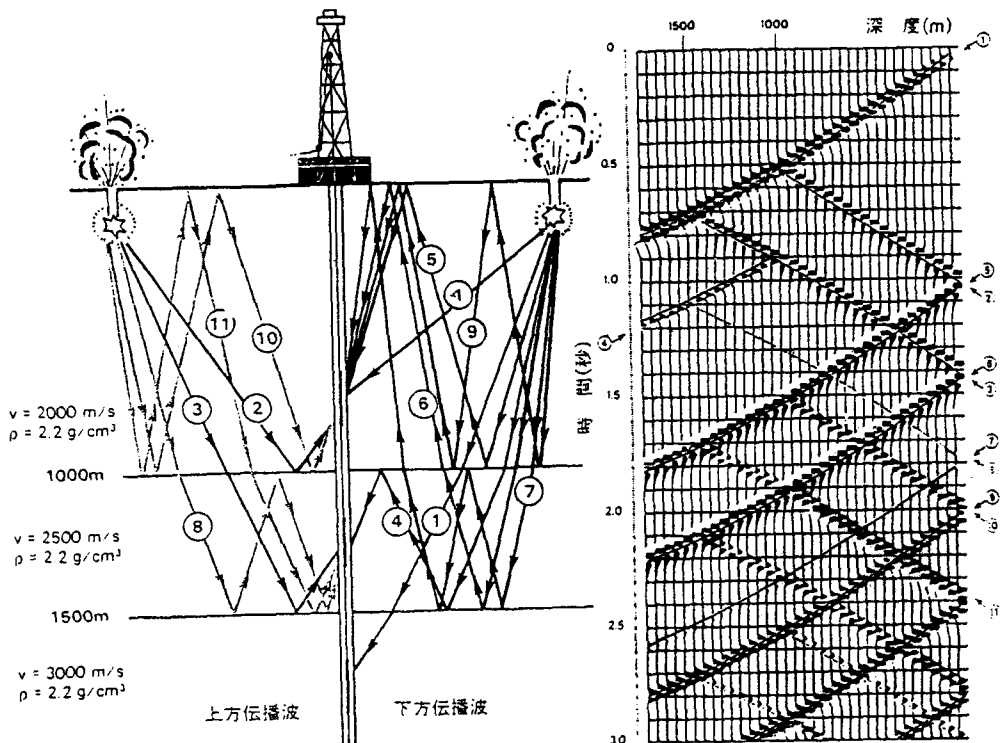
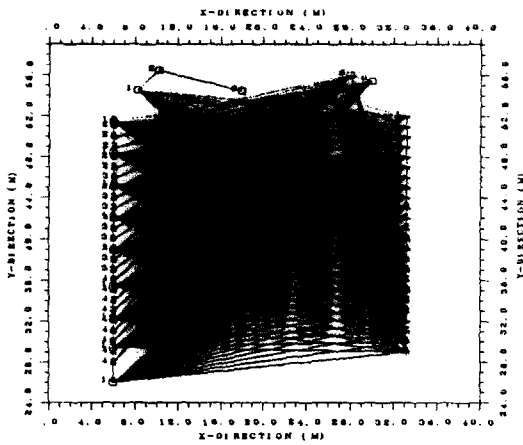


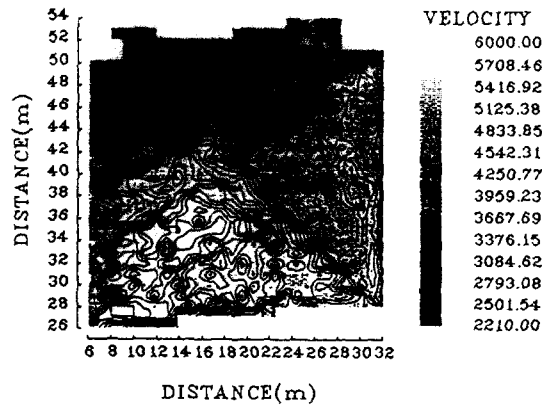
Fig. 9 탄성파 VSP 탐사 방법의 모식도 및 기록단면

지표에 탄성파 발생원을 위치시키고 시추공내에서 탄성파를 기록하게 된다. 시추공의 좌우는 상향 전파하는 파 및 하향 전파하는 파의 파선이 모식적으로 표시되어 있다. 우측 그림은 기록단면으로 횡축은 수진기의 심도, 종축은 시간을 표시한다.





(a)

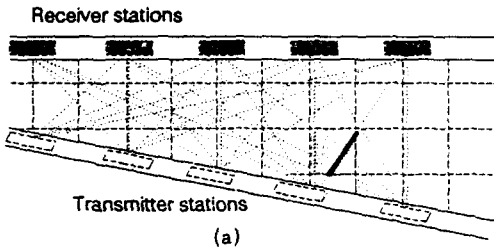


(b)

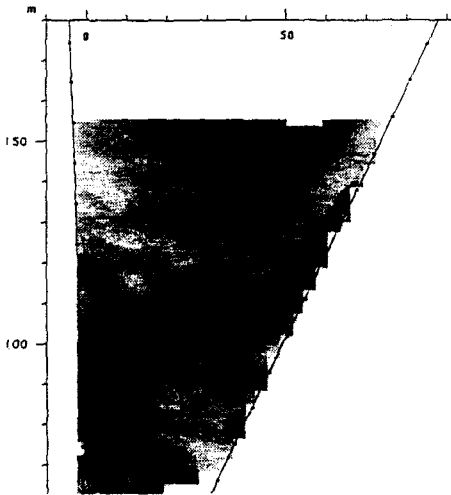
Fig. 10 탄성과 tomography

(a) 발생원과 수진기 배열의 geometry

(b) 탄성과 속도로 역산된 tomogram



(a)

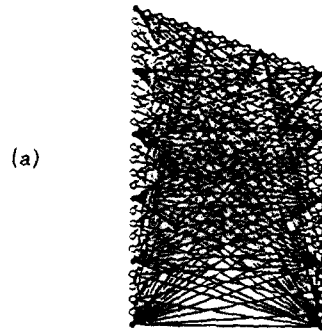


(b)

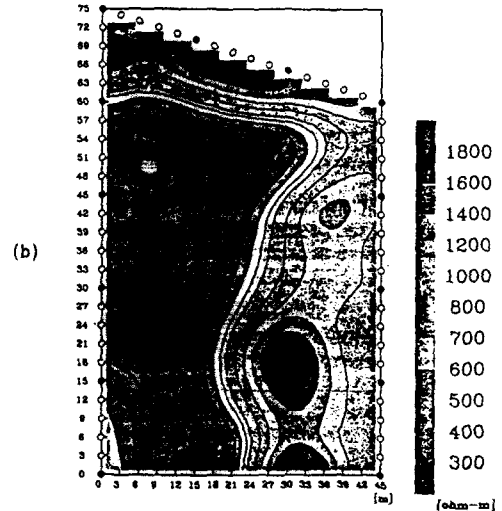
Fig. 11 radar tomography

(a) 발생원과 수진기 배열의 geometry

(b) residual-attenuation tomogram



(a)



(b)

Fig. 12 비저항 tomography

(a) 전류 및 전위전극 배열의 geometry

(b) 비저항 분포로 역산된 tomogram

## 5. 결 론

지하공간은 사람들의 생활공간, 교통수단, 중요 시설물, 각종 저장시설등으로 활용되기 때문에 지하공간을 건설하는데 있어 그에 대한 안정성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 지하공간의 안정성을 고려하여 설계하기 위해서는 지하공간이 위치할 지하의 지질적인 정보가 대단히 중요하다고 하겠다. 광역 물리탐사, 정밀 지표 물리탐사, 시추공 물리탐사를 통하여

얻은 모든 지질적인 정보를 데이터 베이스화하여 지층의 암반분포, 파쇄대 및 지하수의 흐름 등을 3차원적으로 작성하여 이를 토대로 지하공간을 설계한다면 안전한 지하공간의 설계는 물론 건설단계에서 예견치 못한 지질조건으로 공사기간의 연장 및 건설비의 증대를 극소화함으로써 효율적으로 건설비를 운영할 수 있다고 하겠다. 따라서 지하공간의 개발에 있어 물리탐사의 역할은 필수적인 것이라 할 수 있다.