

토목 기술자를 위한 암반공학(II)

조 인 기*1
장 보 안*2

2. 암반조사 및 시험-물리탐사

2.1 토목 물리탐사의 역할

현재 우리 나라는 도시 지하철건설사업, 고속전철사업, 각종 도로 확포장사업과 같은 대규모 사회간접자본 사업을 위시하여 유류 및 농수산물 지하 비축시설, 핵폐기물 처리시설 등 지하 공간 개발을 위한 지반굴착 및 대형 토목공사가 급격히 증가하고 있다. 이러한 대형 건설공사의 설계 및 시공에 있어서 부실시공 방지와 효과적인 공정진행을 위해서는 철저한 기초지반조사가 요구된다. 또한 최근 불안정한 지반조건에 기인한 빈번한 안전사고 및 환경오염 방지를 위한 규제사항의 강화로 토목 및 환경분야에서 지반조사의 중요성에 대한 인식이 확대되고 있다. 물리탐사는 현장에서 얻어진 자료를 해석하여 지질구조 파악 및 현장상태의 암석물성을 산출 가능한 지반조사 방법의 하나로 그 적용이 날로 확대되어 가고 있다.

물리탐사는 지하를 구성하는 지층 및 암석의 물리적 성질의 차이로 인하여 발생하는 물리적 현상을 지표 및 시추공내에서 측정하여 지하의 지질구조 및 암석의 분포상황 등에 관한 정보를 얻어내는 기술이다. 물리탐사는 지난 수십 년간 석유 및 석탄 탐사, 지하수 탐사

및 각종 광물자원의 탐사에 널리 적용되었으며, 최근에는 토목 및 환경분야에의 적용이 확대되어가고 있다. 토목 물리탐사(engineering geophysics)는 토목공사에 필요한 정보를 얻기 위한 물리탐사로 정의되며 지하구조뿐 아니라 탄성특성 등과 같은 물리적 성질을 규명하는 것이 보통이다(현병구, 1994). 대개 기반암의 깊이, 퇴적층의 강도, 암석의 견고성, 파쇄정도 등을 결정하고 지하공동이나 매설물의 위치 파악 등이 토목 물리탐사의 주요 적용대상이다. 일반적인 대상 깊이는 대략 300m 이내이다.

토목 물리탐사는 건설 및 시공이 이루어지는 특정 부지의 지질학적 및 지구물리학적 조건을 파악하기 위해 사용되는 물리탐사법이다. 토목 물리탐사는 최근 탐사이론 및 측정 장비의 급속한 발달로 인하여 그 적용범위가 날로 확장되어가고 있는 추세이다. 토목물리탐사의 실질적인 목적은 주어진 지질상황에 시공을 했을 때 발생하는 현상을 예측하는 데 필요한 기초정보를 추출하는 것이다. 즉 지반은 토목 시공으로 인하여 지압, 지하수의 경로 등이 변화하게 되며 토목물리탐사의 목적은 토목 시공 및 설계와 관련된 지반의 구조, 암석의 물성 및 조성을 파악하고 시공과정이나 시공 후에 나타날 지반의 변형 거동을 예측하는 데 필요한 기본적 지반의 변수를 제공하는 데 있다.

*1 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과 조교수

*2 정희원, 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과 부교수

토목 물리탐사는 (1) 최적의 건설부지 선정, (2) 시공을 위한 부지의 지질 규명을 위하여 적용된다. 건축 구조물은 부지의 자연적인 지반조건에 가장 적합해야 한다. 즉 건축물에 의하여 지질조건이 더 이상 변화하지 않거나, 변화해도 조절이 가능한 한도를 넘어서는 안 된다. 이 점이 대규모 토목시공에서 부지, 공정 및 시공방법의 선정시 지반조사를 통한 지반조건이 고려되어야 하는 이유이다. 특히 지하수의 유동에 관여된 수문지질학적 조건의 파악은 매우 중요하다.

설계 및 시공 이전에 충분한 물리탐사를 통하여 예상치 못한 열악한 지질조건에 기인한 공기의 지연, 설계 변경에 의한 예산의 낭비를 미연에 방지할 수 있고, 나아가서는 각종 안전사고를 획기적으로 줄일 수 있다. 이러한 지반조사가 충분히 이루어지지 않는 이유는 (1)예산의 부족, (2)짧은 공기, (3)전문인력의 미확보 등에 있다. 또한 설계 및 시공자의 물리탐사에 대한 인식부족도 지반조사를 어렵게 하는 주된 요인 중의 하나이다.

한편 지구물리학자들도 토목공학, 지질공학, 토질역학 등에 관한 기본지식의 부족으로 인하여 물리탐사가 토목설계 및 시공에 제공할 수 있는 장점을 제대로 파악하지 못한 점도 토목 물리탐사가 널리 적용되지 못한 원인이다. 물리탐사의 장점 중 하나는 현장에서 직접 측정된 자료(insitu data)를 사용하여 지질구조 및 암석의 탄성계수 등 물성을 산출한다는 점이다. 현재 대부분의 토목 설계가 암석의 실험실 내 시험자료를 근거로 입력변수를 산정하고 있으나 시험편의 추출, 이동 및 시험과정을 거치면서 현장에서와 동일한 조건을 유지할 수 없는 데서 비롯되는 각종 오차를 피할 수 없다. 현장에서 직접 자료를 획득하는 물리탐사는 이러한 문제점을 근본적으로 해결해 준다. 또한 물리탐사는 측정자료가 특정점의 자료가 아니라 조사지점 주변의 종합적인 지질조건 및 암석의 물성을 반영한다는 점이다. 시추조사의 경우 시추지점의 지질 및 물성은 정확하게 알

수 있으나 이는 단지 일점의 자료에 지나지 않는다. 예를 들어 기반암의 심도를 결정하는 문제에서 단순히 시추자료에 의존한다면 풍화암 사이에 독립적으로 존재하는 경암에 의하여 조사지역의 기반암 심도와는 전혀 다른 결과를 보일 수도 있다. 이러한 문제점은 다수의 시추조사를 통하여 해결 가능하나 예산 및 시간이 많이 들며 최근에는 환경 규제의 강화로 시추 자체가 어려운 경우도 많다. 이에 비하여 물리탐사는 비교적 적은 경비로 단시간 내에 조사지역 전체의 지질조건 및 암석특성을 파악할 수 있으며 환경 파괴가 없다는 장점이 있다.

그러나 물리탐사가 지반조사의 전부를 의미하지는 않는다. 물리탐사 자료는 지질조사, 시추조사 등의 결과와 종합적으로 해석되어야만 성공적인 결과를 얻을 수 있다. 중요한 점은 물리탐사법은 용이하게 다른 지반조사 자료와 종합적인 해석이 가능하다는 점이다. 본 강좌에서는 현재 국내에서 사용되고 있는 각종 물리탐사법의 원리 및 방법을 간단히 기술하고 토목 분야에의 적용례를 소개하므로써 앞으로 토목 설계 및 시공에 필요한 지반조사 기법의 하나인 토목 물리탐사법의 정착에 기여하고자 한다.

2.2 토목 물리탐사의 분류

물리탐사법을 분류하는 기준에는 여러 가지가 있으나 가장 보편적인 분류기준인 측정 대상물성을 기준으로 하면 표1과 같다. 이들 각 방법은 측정이 이루어지는 위치(지표, 시추공동), 사용되는 송신원, 송, 수신기의 배열, 측정 방법 등에 따라 다시 수많은 방법으로 세분된다. 각 방법은 나름대로 장, 단점을 갖고 있으므로 조사 대상지의 탐사여건 및 목적에 가장 부합되는 탐사방법의 선정이 중요하며, 가능하면 여러 개의 탐사방법을 동시에 적용하는 종합적인 물리탐사의 수행이 요구된다.

한편 현재까지 토목분야에 가장 널리 적용되고 있는 탐사방법은 전기 비저항탐사, 탄성

파 탐사 등이며, 최근에는 레이더 탐사 및 검층도 중요한 탐사기술로 자리잡아 가고 있다. 여기서는 현재 토목 물리탐사에서 널리 사용되고 있는 탄성과 굴절파 탐사 및 전기 비저항

탐사법 등을 비교적 상세히 기술하고 나머지 탐사기법에 관해서는 간단히 기술한다.

표 1. 물리탐사법의 분류(현병구, 1994)

물리탐사방법	대비 물성	측정에 이용되는 현상
중력(重力)탐사	밀도	중력 가속도
자력(磁力)탐사	대자율	정적 자기장
전기(電氣)탐사	전기전도도, 전기화학적 특성	겔보기 전기비저항, 전위차
전자(電磁)탐사	전기전도도, 투자율	전, 자기장의 세기, 위상
탄성파(彈性波)탐사	탄성계수, 밀도	탄성파 전달 속도
방사능(放射能)탐사	방사능 원소의 함량	γ 선 및 α 입자의 방사량

2.3 중력 및 자력탐사

중력 및 자력탐사는 모두 포텐셜 이론에 근거한다. 중력탐사는 지하를 구성하는 암석의 밀도 차에 기인한 중력이상(gravity anomaly)을, 자력탐사는 대자율의 변화로 인한 자화강도를 측정하여 지하의 지질구조에 관한 정보를 획득하는 방법이다. 다른 물리탐사법에 비해 해상도는 낮으나 가탐심도는 매우 크다. 따라서 소규모 부지의 지반조사보다는, 조사대상 지역을 포함하는 광역적인 대규모 지질구조의 파악에 주로 이용된다.

2.4 전기탐사

전기탐사법은 대부분 대지에 전류전극을 통하여 전류를 흘려주면 전류가 흐르는 통로상의 암석이나 지층의 전기 전도도 차이에 기인하여 발생하는 전위분포를 전위전극에서 측정하여 지하의 지질구조를 해석하는 방법이다. 전기탐사법은 다시 자연전위(SP:self potential)법, 전기 비저항 탐사, 유도분극(IP:induced polarization)탐사 등으로 나뉘어진다.

2.4.1 자연전위 탐사

자연전위 탐사법은 지하에 자연적으로 존재

하는 전위차를 지표에서 측정하여 지하의 지하자원, 지열자원, 지하수 유동경로 등을 탐지하는 방법이다. 자연전위의 발생기구는 아직 정확히 밝혀지지 않았으나 일반적으로 전기화학적, 전기역학적 또는 열전기적 효과에 기인한 것으로 알려져 있다. 이 방법은 송신원이 없으므로 현장 측정이 간단하다는 장점이 있으나 정량적인 자료해석 방법이 없다는 단점이 있다. 국내에서의 방조제 누수부위 탐지 등 토목분야에 적용된 바 있으며(정현기 등, 1989), 해안가의 염수침입, 쓰레기 매립지 침출수 유동경로 등의 환경문제에 적용이 시도되고 있다.

2.4.2 전기 비저항 탐사

전기 비저항법은 인공적으로 지하에 직류전류를 흘려주어 지하의 전기 비저항 분포에 좌우되는 전기저항을 측정하여, 지질구조 및 암석의 전기적 물성에 관한 정보를 해석하는 탐사법이다. 전기 비저항 탐사법은 지난 수십 년간 각종 광물탐사, 지하수 조사 및 지반조사 등에 널리 사용되어 왔다. 최근 불안정한 지반 조건에 기인한 빈번한 안전사고 및 환경문제에 관한 관심이 고조되면서 토목 및 환경분야에 전기 비저항 탐사법의 적용이 확대되고 있다.

전기 비저항 탐사법의 1차적인 목적은 조사 대상지역의 전기 비저항 분포를 얻어내는 것이며, 이 비저항 분포를 해석하여 지하의 층서

및 파쇄대 등과 같은 지질구조의 파악이 가능하며, 나아가서는 암상, 공극률, 투수율 등에 관한 정보를 얻어낼 수 있다.

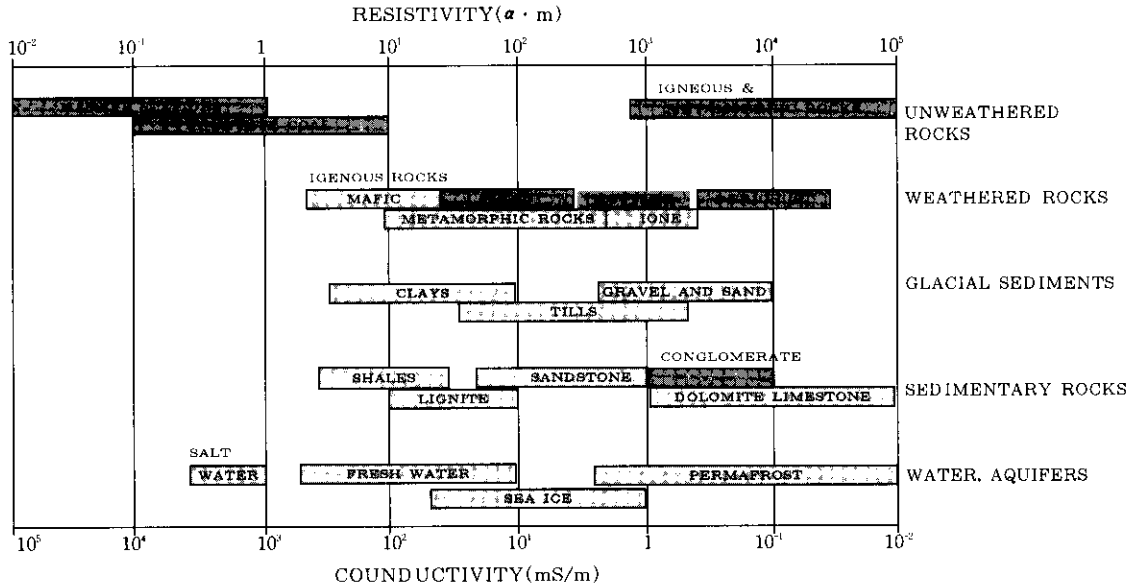


그림 1. 주요 암석의 전기 비저항(Palacky, 1988)

전기 비저항은 전기 전도도의 반대 개념으로 전류의 흐름을 방해하는 정도를 나타내는 척도이다. 즉 전기 비저항이란 단위체적 물질이 갖는 전기 저항이라고 정의할 수 있다. 암석의 전기 비저항에 영향을 주는 요소는 (1) 암석내의 유체 함량 및 공극의 연결성, (2) 유체의 이온 농도, (3) 유체의 온도, (4) 점토광물의 함량 등이다. 이 중 유체 함량 및 공극의 연결성은 암석의 종류 및 지질학적 변형에 크게 좌우되므로 전기 비저항 탐사에서 가장 중요하게 고려되어야 할 사항이다. 그림 1은 암석의 종류에 따른 대략적인 전기 비저항을 나타낸 것이다.

전기 비저항 탐사법은 크게 조사 목적에 따라 수평탐사(profiling)와 수직탐사(sounding)로 분류된다. 수평탐사는 전기 비저항 분포의 수평적 변화를 조사하기 위한 것이고, 수직탐

사는 수직적 분포를 알아내기 위한 탐사법이다. 전기 비저항 탐사법에서는 두 개의 전류전극과 전위를 측정하는 전위전극을 사용하며, 이들 전극의 배열방법에 따라 슬럼버저(Schlumberger), 웨너(Wenner), 쌍극자(Dipole-Dipole) 배열법 등 다양한 배열방법이 개발되어 있다(그림 2). 슬럼버저 배열 및 웨너 배열은 측선을 따라 지하 지질의 수평적 변화를 탐지하기 위한 profiling이나 일점에서의 수직적 지질구조 해석을 위해서 사용되는 반면, 쌍극자 배열은 수직적 및 수평적 전기 비저항 분포를 동시에 파악할 수 있으므로 현재 국내에서 가장 널리 사용되고 있다. 즉 쌍극자 배열 탐사 결과에서 얻어지는 결과는 지하의 전기 비저항 분포에 관한 2차원적인 영상이므로 조사지역의 2차원적인 지질구조에 관한 해석이 가능하다.

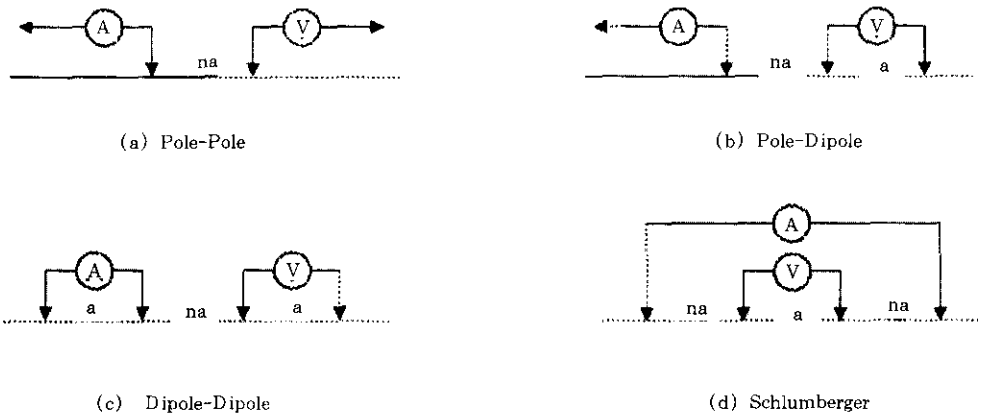


그림 2. 전기 비저항 탐사에 사용되는 각종 배열

전기 비저항 탐사에서 얻어진 겉보기 비저항 자료는 지하의 진 비저항 분포로 변환되어야 한다. 이 변환은 모델링에 의한 시행착오법과 역산법으로 대별된다. 모델링법은 해석자가 지질조사 결과 등 알려진 정보를 고려하여 조사 대상지역의 지하 모형을 가정하고 수치모델링 또는 축소모형실험(physical scale modeling)을 통하여 가상 모델에 대한 이론자료를 얻어 이를 현장 측정 자료와 비교 검토하여 지하의 지질구조를 해석하는 방법이다. 이 방법은 가상 모델에 의한 이론 자료와 현장자료가 거의 일치할 때까지 모델을 바꾸어 가면서 반복해야 하므로 시행착오법에 속한다. 한편 역산법은 이론자료와 현장자료를 비교하여 새로운 모델을 가상하는 과정을 컴퓨터가 대신하는 방법이다. 모델링 방법에 비하여 시간과 노력을 절약할 수 있을 뿐 아니라 정확하다는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 수학적 방법이므로 해석자가 주변의 지질정보 등을 가미하여 해석할 수 없다는 단점도 있다. 현재 대부분의 전기 비저항 탐사 자료는 이 역산법에 의한 상업용 프로그램(DIPRO 및 SOUNDPRO 등)이 널리 이용되고 있다.

전기 비저항 탐사의 토목분야에의 적용은 매우 다양하다. 90년대 초까지는 주로 대규모 부지의 기반암 심도 파악, 파쇄대 조사 등에

사용되어 왔으나, 근간에는 터널 예정구간의 연약대 조사(그림 3), 토취장의 토취량 산정에 적용된 바 있다(정연문 등, 1998). 또한 댐의 누수위치 탐지에도 효과적인 것으로 보고되었으며(정승환 등, 1988), 환경분야에서는 쓰레기 매립지의 오염대 조사, 해안가의 염수침입 조사 등에도 적용 가능하다. 최근 전기 비저항 토모그래피법의 개발에 의해 지반침하의 원인이 되는 지하공동(폐갱도)의 탐지에도 적용된 바 있다(정승환 등, 1995). 그 밖에도 송전선의 접지에 필요한 지하의 접지저항 산출에도 적용할 수 있다. 이상 전기 비저항법은 거의 모든 지반조사 분야에 물리탐사법 중 가장 무난하게 적용 가능한 방법이다. 이는 전기 비저항 탐사법이 잡음에 강하고 또한 대부분 국내 대지의 전기 비저항이 외국의 것에 비하여 매우 높기 때문에 안정된 자료획득이 가능하기 때문인 것으로 보인다. 현재 전기 비저항 자료와 토목 설계에서 필요로 하는 암석의 물성에 관한 각종 입력변수의 산출에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이미 자료산출에 상당한 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 앞으로 보다 체계적인 연구 및 자료의 분석을 통해 보다 정량적인 물성의 산출이 가능해 진다면 그 적용성은 더욱 높아질 것으로 기대된다.

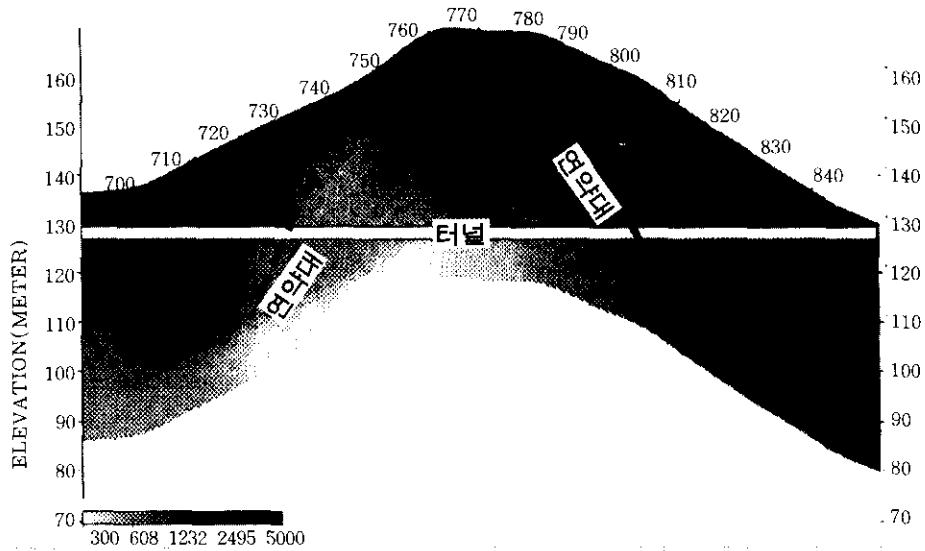


그림 3. 터널 예정구간 지반조사를 위한 전기 비저항 탐사

2.4.3 유도분극 탐사

전기 비저항 탐사에서와 같이 2개의 전류전극을 통하여 지하에 전류를 공급하다가 어느 순간 전류 공급을 중단하면 전위전극에서 측정되는 전위차는 순간적으로 소멸하지 않고 수 초 내지 수 분간에 걸쳐 서서히 소멸한다. 이러한 현상을 유도분극이라 하며 유도분극 탐사법은 이 현상을 측정 해석하여 지하의 특성을 파악하는 탐사법이다. 유도분극의 발생기구는 지하의 점토광물에 기인하는 막분극(membrane polarization)과 금속입자에 기인한 전극분극(electrode polarization)으로 나누어진다. 이 탐사법은 측정방법에 따라 시간영역과 주파수 영역으로 나누어진다. 사용되는 전극배열은 전기 비저항법과 동일하며, 측정값(겉보기 비저항, 충전성 등)은 프로파일이나 가단면도를 작성하여 해석하게 된다. 현장 자료획득은 전기 비저항 탐사법과 거의 유사하나 정밀한 자료획득을 위해서는 가능한 다량의 전류를 지하에 흘려주어야 하므로 전류전극의 접지문제에 주의해야 하며, 측정도 비분극전극을 이용해야 하므로 시간과 경비가 더 많이 소요된다는 단점

이 있다. 그러나 유도분극 탐사법은 발생기구 자체가 전기 화학적 성격을 띠고 있어 앞으로 환경분야에의 적용이 높아 질 것으로 예상된다.

2.5 전자탐사

송신 코일에 교류전류를 흘려주면 암페어의 법칙에 의해 자기장(1차장, primary field)이 발생하고, 이 자기장이 지하의 전도성 매질을 통과하면서 유도전류(induction current)를 발생하게 된다. 이 유도전류는 소위 2차 자기장 및 전기장(secondary field)을 발생시키게 된다. 전자탐사법은 유도전류에 의한 2차장을 측정하여 지하의 전도도 분포에 관한 정보를 얻어내는 방법이다(그림 4). 지하에 유도되는 유도전류의 크기는 지하 매질의 전도도에 좌우되므로 전자 탐사는 원리적으로 전도도가 높은 양도체의 탐지에 유리하다.

전자탐사법은 송신원, 측정량, 송·수신 배열 등에 따라 매우 다양한 탐사법으로 나누어진다. 대표적인 분류방법은 송신원에 따른 분류로 주파수 영역(frequency domain EM)과 시

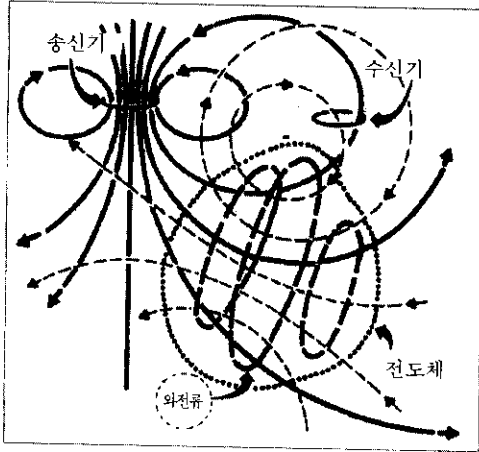


그림 4. 전자탐사의 원리(민경덕 등, 1986)

간영역(time domain EM)으로 나뉘어진다. 주파수 영역 전자탐사는 일정 주파수를 갖는 전류를 코일 등의 송신원에 공급하여 1차장을 생성한 다음, 수신기에서 1차 자기장과 2차 자기장의 비를 측정하여 지하의 지질구조를 해석하는 방법이다. 주파수 영역 전자탐사법은 일정 주파수를 사용하므로 필터링 기법 등에 의하여 신호 대 잡음비를 높일 수 있다는 장점이 있다.

주파수 영역 전자탐사에서 주파수를 f , 대지의 전기 비저항을 ρ 라 하면 전자파의 침투심도(skin depth) $\delta = 500 \sqrt{\rho/f}$ (meter)이므로, 고주파는 천부의 정보를 저주파는 심부의 정보를 나타낸다. 반면 시간 영역 전자탐사법은 일정 시간 송신원에 전류를 공급하다가 갑자기 차단한 다음 지하에서 일어나는 전자기 유도현상에 의한 2차장의 시간에 따른 변화를 측정하는 방법이다. 1차장이 없는 상태에서 2차장만을 측정한다는 장점이 있으며, 초기 시간대의 자료는 천부의 정보를 후기 시간대는 심부의 정보를 내포하고 있다. 따라서 시간영역 전자탐사법은 이론적으로 광대역 주파수에 전자탐사를 수행한 것과 같은 효과가 있다.

전자 탐사법에서는 전기 비저항법에서와 마찬가지로 수평(profiling) 및 수직탐사(sounding)가 가능하다. 수평탐사의 경우 일정 송, 수신기의 간격을 유지하면서 이동하는 이동 송신기법

(moving source)과, 송신기는 고정하고 수신기만 이동시키는 고정 송신기법(fixed source)으로 나뉘어진다. 일반적으로 송신원의 크기가 작을 경우에는 이동 송신기법이, 클 경우에는 고정 송신기법이 사용된다. 한편 수직탐사의 경우 소형루프를 사용할 때는 측정점을 중심으로 송,수신 간격을 넓히면서 조사를 수행하는 geometric sounding과 주파수를 변화시키면서 수행하는 parametric sounding이 있다.

현재 국내에서 사용되고 있는 전자탐사법은 VLF(Very Low Frequency)법, 소형 루프법, 대형 루프법, MT 및 CSAMT법 등이 있다. VLF 탐사법은 전 세계에 산재한 VLF 송신소에서 송출하는 15 - 30kHz대역의 전자파를 신호원으로 사용하는 방법으로 천부 지하수 탐사 등에 널리 사용되는 주파수 영역 전자 탐사법이다. 측정은 대개 두 개의 서로 수직한 방향의 자기장을 측정하며, 경우에 따라서는 전기장을 측정하기도 한다. 가탐심도는 국내에서 대략 50m 내외인 것으로 알려져 있다. 이 방법은 별도의 송신원이 없으므로 현장조사가 간편하다는 장점이 있으나 잡음에 취약하다는 단점이 있다.

소형 루프법은 송, 수신기로 모두 소형 루프를 사용하는 방법이다. 주파수 및 시간영역 탐사기가 모두 개발되어 있으며 현장작업이 간편하여 전자 탐사법 중 가장 널리 사용되고 있다. 이 방법은 수평 및 수직탐사가 가능하며, 송수신 루프의 방향에 따라 수평 루프법(horizontal loop EM) 등 다양한 배열이 가능하다. 80년대 말에 송, 수신 루프를 막대로 연결하여 정밀한 자료획득이 가능한 LIN(low induction number)장비가 개발되어 천부의 전기 비저항 분포의 파악이 가능해지므로써 쓰레기 매립지의 오염대 파악 등에 적용된 바 있다.

또한 이 방법은 현재 국내에서 지하에 매설된 파이프의 탐지에 효과적으로 응용되고 있다(그림 5). 소위 파이프 탐지기(pipe locator)는 직접적으로 파이프에 일정 주파수의 전류를 흘려주거나 송신코일을 이용하여 파이프에 유도

된 전류에 의한 2차장을 지표에서 측정하여 파이프의 평면적 위치 및 심도를 파악하는 기술이다. 따라서 파이프 탐지기는 주파수 영역 소형루프 전자탐사법의 일종이다.

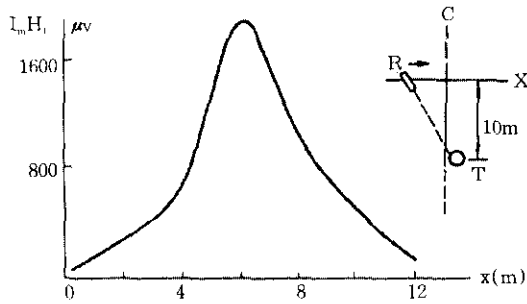


그림 5. 파이프 탐사 결과(파이프의 심도는 2m, 위치는 6m 지점)(Chen 등, 1990).

대형 루프법은 시간영역 및 주파수 영역에서의 수직 및 수평탐사 모두 가능하다. 소형 루프법에 비하여 신호원이 강력하다는 장점이 있으나 현장작업이 번거롭다는 단점도 있다. 주로 심부 지질조사에 사용된다.

MT 및 CSAMT 탐사법은 현존하는 전기 전자탐사법 중 가장 가탐심도가 큰 탐사법으로 극 심부 탐사에 사용된다. MT법은 지하에 자연적으로 존재하는 전기장 및 자기장을 측정하여 심부 지질구조를 해석하는 방법으로 10^{-3} - 10^2 Hz의 광대역 주파수를 사용한다. 인공 송신원이 없으므로 전자기적 잡음에 취약하다. 최근에는 천부탐사를 위하여 10 - 10^5 Hz의 고주파대역 MT 장비가 개발되어 사용되기도 한다. CSAMT 탐사는 잡음에 취약한 MT 탐사법의 약점을 보완하기 위하여 개발된 방법으로 송신원으로 조사 지역에서 멀리 떨어진 지점(대략 5-10km)에 1-2km의 선 전류원(long grounded wire)을 설치하고 강력한 전류를 지하에 흘려준 다음 조사 지역에서 서로 수직한 전기장 및 자기장을 측정하는 방법이다. 사용되는 주파수 대역은 대략 10^{-1} - 10^2 Hz 정도이다. 이들 방법은 수백 m 이상의 심부 탐사를 위한 방법이다

로 천부 지반조사용으로 부적합하며 조사지역의 전반적인 지질구조의 파악에 유리하다. 그러나 최근 10^3 - 10^6 Hz 대역의 고주파를 이용하는 탐사장비의 개발로 천부에도 적용이 가능해질 것으로 보인다.

전자탐사법은 이상에서 언급한 방법 이외에도 매우 다양한 방법이 개발되어 있다. 따라서 전자탐사법은 지반조사시 선택의 폭이 넓으며, 각 방법은 나름대로 장, 단점을 갖고 있어 주어진 지질조건 및 탐사여건에 따라 최적의 탐사법을 선택하는 것이 중요하다. 일반적으로 볼 때 전기 전도도가 높은 조건에서는 전자 탐사법이, 낮은 지역에서는 전기 비저항 탐사법이 유리한 것으로 알려져 있다.

2.6 탄성과 탐사

탄성파는 지층의 탄성 특성에 따라 서로 다른 속도를 보인다. 암석의 탄성 특성은 암석의 밀도, 조암광물의 특성, 지층의 심도에 따라 변화한다. 일반적으로 심도가 증가함에 따라 탄성과 속도가 증가하는 데, 이는 지압의 증가 및 변성작용에 의한 공극률의 감소가 주된 원인으로 알려져 있다. 암석의 탄성과 속도는 지역에 따라 큰 편차를 나타낸다. 퇴적암의 탄성과 속도에 관해서는 많은 연구결과가 있으나 화성기원의 암석에 대한 자료는 흔치 않다. 이는 탄성과 탐사가 퇴적기원의 지층에 부존하는 석유탐사에 널리 적용되었기 때문인 것으로 보인다. 그림 6은 각종 암석의 탄성과 속도를 나타낸 것이다.

탄성과 탐사는 크게 굴절법(seismic refraction method)과 반사법(seismic reflection method)으로 나뉘어진다. 송신원에서 발생한 탄성파는 지층의 기하학적, 물리적 성질이 달라지는 경계면에서 반사, 굴절, 회절 등의 현상을 일으키면서 경로를 달리한다. 이 때 반사 및 굴절되는 정도는 Snell의 법칙을 따르게 되며 탄성과 탐사는 이 반사 및 굴절파의 도달시간 및 파형을 분석하여 지하의 지질구조 및 지층의 탄성

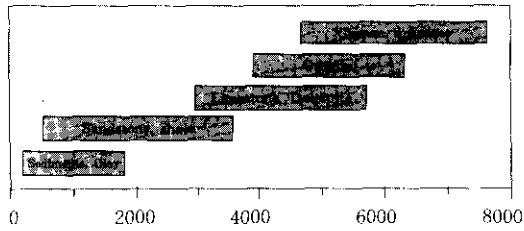


그림 6. 각종 암석의 탄성과 속도(m/sec)
(민경덕 등, 1986)

파 속도에 관한 정보를 얻어내는 방법으로 굴절파를 이용하는 굴절파 탐사와 반사파를 이용하는 반사법 탐사로 나누어진다.

2.6.1 굴절파 탐사

탄성과 속도가 서로 다른 두 매질의 경계면에 입사하면 에너지의 일부를 하부 매질로 투과하고 일부는 경계면에서 반사한다. 그러나 속도가 낮은 상부층(v_1)에서 속도가 높은 하부층(v_2)으로 임계각(critical angle, $\theta_c = v_1/v_2$)으로 입사한 파는 굴절되어 경계면 바로 아래를 따라 하부층의 속도 v_2 로 전파하다가 상부 매질로 재굴절하여 지표에 도달하게 되는 데, 이를 선두파(head wave)라 한다. 굴절파 탐사는 지하 매질을 통과하여 지표에 도달하는 직접파 및 선두파의 도달시간을 측정하여 지하의 지질구조 및 지층의 탄성과 속도를 알아내는 방법이다. 이 굴절파 탐사는 토목분야에서 기반암의 심도조사에 가장 일반적으로 사용되고 있는 잘 알려진 탐사법이다.

굴절파 탐사에서 사용되는 송신원(seismic source)으로는 육상의 경우 화약발파, 해머, weight drop 등이 있으며 수신기는 geophone을 사용한다. 탐사기기는 신호대 잡음비를 향상시키기 위한 중첩(stack)기능을 갖춘 다중 채널 디지털형을 사용한다. 일반적으로 발파점과 수신기를 일직선상에 배열하는 동일선법이 적용되며 측정간격은 탐사심도나 해상도에 의해

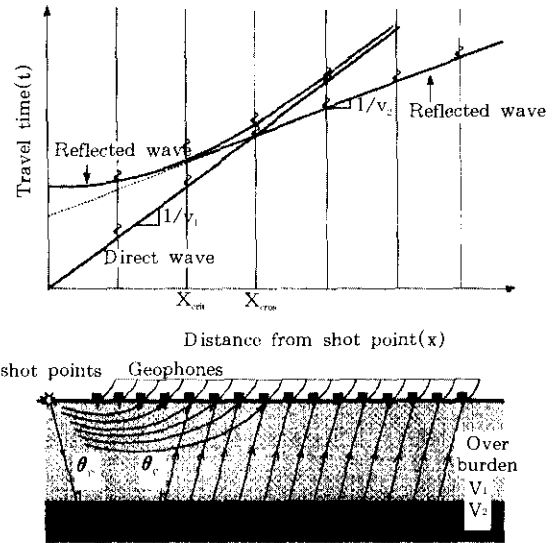


그림 7. 탄성과 굴절파 탐사 주시곡선(상) 및 탐사 모식도(하)

결정된다. 단순한 지질구조의 조사에는 수신기 전개의 양단에서 발파하는 왕복측정방식이 적용되나, 복잡한 지질구조의 조사에는 중앙점 및 수신기 전개 양단에서 멀리 떨어진 점 등 5개 정도의 발파가 이루어져야 양호한 결과를 얻을 수 있다.

탐사기록에서 각 수신점에 가장 먼저 도달한 초동(first arrival)의 시각을 읽은 다음 주시곡선(time distance curve)을 작성하여 그 기울기로부터 지층의 속도를 계산한다. 수평으로 발달한 지층의 경우에는 주시곡선이 직선으로 나타나므로 간단히 각 층의 속도를 계산할 수 있으나, 경사층이나 지질구조가 복잡한 경우에는 주시곡선이 직선이 아니라 곡선의 형태를 보이게 되므로 GRM(generalized Reciprocal Method) 등과 같은 보다 일반적인 해석방법이 동원된다. 지반조사 측면에서 굴절파 탐사의 장점은 현장측정을 통하여 지층의 포아송비 및 영계수(Young's modulus) 등의 탄성상수(elastic constant)를 산출할 수 있다는 점이다(민경덕 등, 1986).

2.6.2 반사법 탐사

굴절법 탐사에서는 선두파의 초동 주시를 측정하는 데 반하여 반사법 탐사는 반사된 탄성파의 도달시간 및 진폭변화를 측정하여 지질구조를 해석하는 기술이다. 이 방법은 굴절파 탐사에 비하여 높은 분해능과 가탐심도를 보이므로 현재 각종 대형 토목공사의 지반조사 방법으로 그 적용이 증가하고 있는 추세이다. 음원으로는 주로 화약발파가 이용되어 왔다. 이는 화약발파에 의한 신호는 파형이 거의 스파이크 형태로 탄성파 탐사에 가장 효과적이며 강력한 신호이기 때문이다. 그러나 천부 지반조사의 경우 안전문제로 인하여 비록 그 에너지가 약하고 신호의 주파수 특성이 좋지 않으나 weight drop 발생원이 많이 사용된다. 자료 획득은 측선상에 등간격으로 수신기를 설치하고 한 쪽 끝에서 발파를 수행하는 방식을 사용한다. 또한 신호대 잡음을 향상시키기 위하여 발생원과 수신기 배열을 측선을 따라 등간격으로 이동시키면서 측정하는 CDP(common depth point)법이 이용된다.

현장에서 얻어진 자료는 각종 자료처리를 통하여 보다 실제 지하구조에 가까운 단면을 작성하게 된다. 반사법 탐사자료는 deconvolution, 공심점 취합(CDP stacking), 구조보정(migration) 및 보조자료처리 과정을 거쳐야 한다. 반사법 탐사자료는 매우 방대하지만 최근 컴퓨터의 발달에 힘입어 비교적 단 시간내에 처리가 가능해졌다. 구조보정까지 이루어진 반사법 단면은 지층에 존재하는 각종 반사면을 잘 보여주므로 효과적인 지질구조의 해석이 가능하다. 반사법은 각종 물리탐사법 중 해상도의 관점에서 매우 우수한 탐사법이므로 정밀 지반조사 방법으로 매우 중요한 역할이 기대된다. 현재까지 비교적 높은 탐사비용으로 인하여 그 효과에 비하여 적용사례는 적은 편이나 대형 토목공사에서는 필히 수행되어야 할 것으로 보인다.

2.7 GPR(Ground Probing Radar) 탐사

GPR 탐사는 수 MHz에서 수 GHz 주파수의 전자파를 송신원으로 하여 매질의 물성이 바뀌는 경계면에서 반사된 전자파가 수신기까지 도달하는데 걸리는 시간을 측정하여 지질구조 및 지하에 존재하는 각종 구조물의 위치 및 형상을 해석하는 탐사법이다. 전자파는 주파수가 낮을 경우에는 앞서 설명한 전자기 유도에 의한 전자탐사의 영역(induction zone)에 속하게 되며, 고주파 대역에서는 파동에 의한 전파영역(propagation zone)에 속한다. 따라서 레이더 탐사는 신호원으로 전자파를 사용하지만 탐사원리는 반사법 탐사와 유사하다. 그러나 탄성파 탐사에 비하여 장비가 간편하고 현장 작업이 용이하며 해상도가 더 높다는 큰 장점이 있다. 레이더 탐사에서 가장 중요한 변수는 지하 매질을 전파하는 전자파의 속도 및 감쇠정도이다. 특히 감쇠는 레이더 탐사의 성패를 좌우하는 주요한 변수로서 감쇠정수(attenuation constant)는 매질의 전기 전도도 및 유전율에 좌우되며, 특히 전도도가 높은 지역에서는 심한 감쇠로 이 방법의 적용 자체가 어렵게 된다.

GPR 탐사는 주로 지표상에서 측선을 따라 송, 수신 안테나를 함께 이동시키면서 자료를 획득한다. 조사 대상체의 심도에 따라 다양한 주파수의 안테나가 사용되며 주파수가 높을수록 가탐심도는 감소하고 해상도는 향상된다. 현장 측정은 고주파 신호를 측정하므로 매우 신속하게 진행된다. 획득된 자료는 탄성파 반사법 자료처리와 유사한 자료처리 과정을 거쳐 해석된다. GPR 탐사는 목적에 따라서 시추공 내에서 수행되기도 하며 이 경우는 시추공 반사법 탐사로 명명된다.

레이더 탐사법은 고주파의 전자파를 신호원으로 사용하므로 해상도의 측면에서 다른 물리탐사법에 비하여 월등히 뛰어나다. 이 높은 해상도로 인하여 현재 국내에서 파이프, 지중 케이블 등 지하 매질물 조사, 천부 정밀 지반조사 및 토목 구조물의 비파괴 검사 등에 매우 다양하게 응용되고 있다. 한편 이 방법은 고주파를 사용하기 때문에 침투심도가 작아 전도가

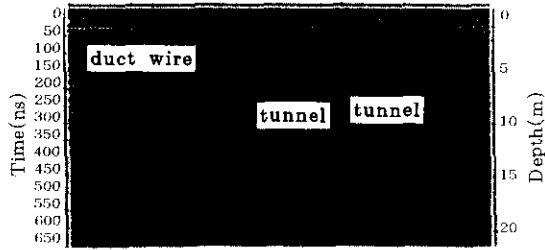


그림 8. GPR 탐사에 의한 터널 및 케이블. 관로의 탐사결과

높은 지질조건에서는 가탐심도가 수 m도 안된다는 약점이 있다. 특히 지표 레이다 탐사의 경우 표토층의 전기 전도도가 높기 때문에 10m 이상의 가탐심도를 확보하기 어려운 경우가 많다.

2.8 지오토모그래피(Geotomography)

지오토모그래피는 의학에서 단층 촬영(CT, Computerized Tomography) 기술을 지구물리 분야에 응용한 것으로, 두 시추공 사이의 기하학적 지질구조 및 물성에 관한 해석이 가능하므로 정밀 지반조사용으로 각광을 받고 있다. 그러나 의학에서의 CT촬영 기법은 대상체를 모든 방향에서 투시할 수 있고, 인체구조에 대한 대략적인 정보를 알고 있으나 물리탐사에서 사용되는 지오토모그래피의 경우는 시추공-시추공 및 시추공-지표에서만 송, 수신이 가능하므로 투사각의 제한으로 인하여 대상물의 영상을 구현하는 데 한계가 있다. 지반조사용 지오토모그래피의 현장측정은 송신 시추공에 송신기를 고정시키고 수신 시추공에서 수신기를 이동시키면서 측정한다. 송신기를 다음 위치로 이동하여 동일한 작업을 반복하여 수행하는 방법이다(그림 9). 송,수신기는 시추공내에서 작동하므로 원치가 필요하며 장비의 손상을 피하기 위한 세심한 주의가 요구된다. 현재 토모그래피탐사는 탄성파, 레이다, 전기 비저항 토모그래피 기술이 개발되어 국내에서 사용되고

있으며 EM 토모그래피에 관한 연구가 진행 중에 있다. 각 방법은 서로의 장점과 단점이 있으며 탐사여건 및 목적에 따라 적합한 방법을 선택해야만 양호한 결과를 기대할 수 있다.

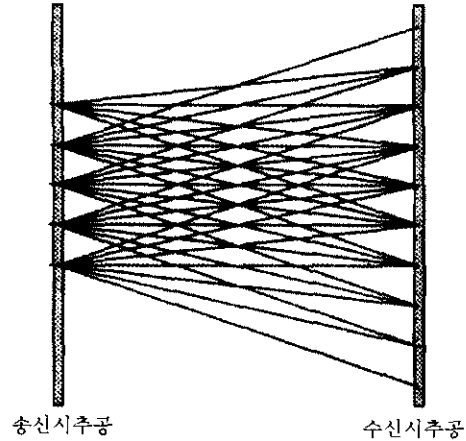


그림 9. 지오토모그래피 측정방법

현재 지오토모그래피 기술은 지반조사시 가장 해상도가 높은 탐사기술로 각광을 받고 있다. 특히 터널 시점 및 종점부근의 지질구조 및 암석의 각종 물성자료의 산출에 가장 확실한 방법으로 대두되고 있으며, 교각하부의 공동(cavity)의 존재 유무, 대규모 공장 부지의 정밀 지반조사 등 응용분야가 비약적으로 증대되고 있다.

2.8.1 탄성파 토모그래피

탄성파 토모그래피는 송신원에 발생한 탄성파가 지나온 경로상의 매질의 물성 분포를 수학적으로 재구성하여 영상으로 구현하는 방법이다. 이 방법은 탄성파의 초동 도달시간을 측정하여 탄성파의 속도분포를 재구성하는 속도 토모그래피(velocity tomography)와, 진폭으로부터 감쇠분포를 재구성하는 감쇠 토모그래피(attenuation tomography)로 구분된다. 현재는

속도 토모그래피가 주로 사용되고 있으나 감쇠법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 송신원으로는 시추공 해머(down-hole hammer), 전기뇌관, 압전 트랜스듀서(piezo-electric transducer) 등이 사용되며 수신기는 hydrophone 또는 geophone이 사용된다. 특히 발파형 송신기는 시추공을 파괴할 우려가 있으므로 세심한 주의가 요구된다. 얻어진 자료는 각 송·수신 조합에 대한 초동시간 또는 진폭을 샘플링하여 역산과정을 거쳐 지하영상을 구현하게 된다.

탄성과 토모그래피는 직접적으로 지하 매질의 탄성과 속도에 관한 정보를 제공하므로 다른 방법에 비하여 토목용 지반조사에 강점이 있다. 그러나 아직도 보다 효과적인 송신원의 개발, 지하 매질의 이방성, 역산 방법의 향상을 위한 연구가 필요하며, 지하매질의 감쇠가 심한 경우에는 가탐심도가 작아지며 hydrophone을 수신기로 사용할 경우 시추공에 공내수가 없을 경우에는 적용이 불가능하다. 이 방법은 이미 구포 열차전복 사고 지반침하의 원인 규명, 폐광지역 폐갱도의 탐사(김중열, 1995), 대형 건축물 부지 지반조사(김중열 등, 1995) 등 다양한 적용사례가 발표된 바 있다.

2.8.2 레이더 토모그래피

레이더 토모그래피는 송신원으로 수습에서

수 백 MHz의 전자파를 사용한다는 점을 제외하면 자료처리 및 해석과정이 탄성과 토모그래피와 매우 유사한 방법이다. 송신원이 전자파이므로 얻어지는 결과도 전자파의 속도 및 감쇠 분포에 관한 영상이다. 지하 암석의 전기 전도도는 지표의 그것에 비해 매우 낮으므로 지표 레이더 탐사의 경우보다 감쇠가 적어 상당한 가탐심도의 확보가 가능하다.

이 방법의 최대 약점은 매질의 전기 전도도가 높은 지역에서 적용이 불가능하다는 점이 감쇠를 줄이기 위하여 저주파를 사용하는 방법이 있으나 너무 낮은 주파수를 사용할 경우 분산(diffusion)특성을 무시할 수 없으므로 제약이 따른다. 현재 속도 토모그래피 및 감쇠 토모그래피 기술이 개발되어 사용되고 있으며 대형 공장 구조물의 설치를 위한 부지조사(김정호 등, 1995) 등에 성공적으로 적용된 바 있으며, 고해상도 정밀 지반조사 기술로 확고한 자리를 잡아가고 있다.

2.8.3 전기 비저항 토모그래피

전기 비저항 토모그래피는 파동 현상을 이용하여 파선 경로상의 속도 또는 감쇠율 분포를 영상화하는 탄성파나 레이더 탐사와는 달리 전기 비저항 탐사의 원리에 근거한 송·수신 전극(전류 및 전위전극) 주변의 광범위한 비

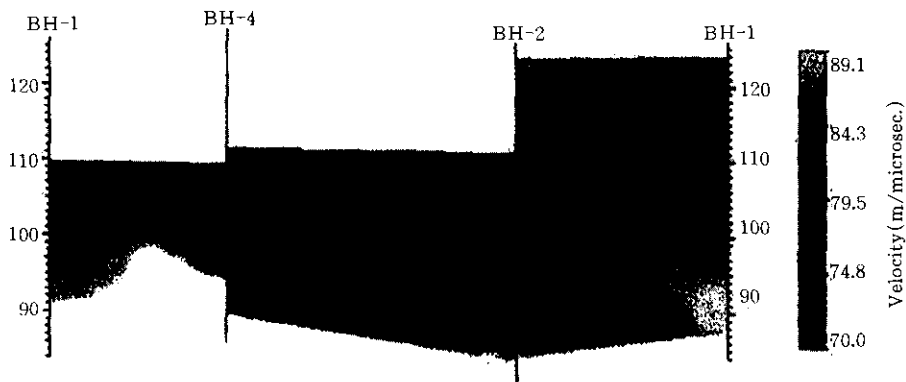


그림 10. 레이더 토모그래피 탐사 결과(김정호 등, 1995)

저항 분포를 영상화하는 방법이다. 이 방법은 해상도의 측면에서는 탄성파나 레이더 토모그래피에 비하여 떨어지지만, 기본이론이 간단하여 역산시 정확한 계산방법을 동원할 수 있으며(정승환 등, 1995), 탐사여건에 큰 제약이 없다는 장점이 있다. 즉 파쇄가 심하고 전기 전도도가 높은 지역에서는 탄성파나 레이더 토모그래피의 적용이 불가능하지만 전기 비저항 토모그래피법은 적용 가능하다. 또한 조사 대상 지역의 파쇄대, 단층 및 광화대와 같이 주변

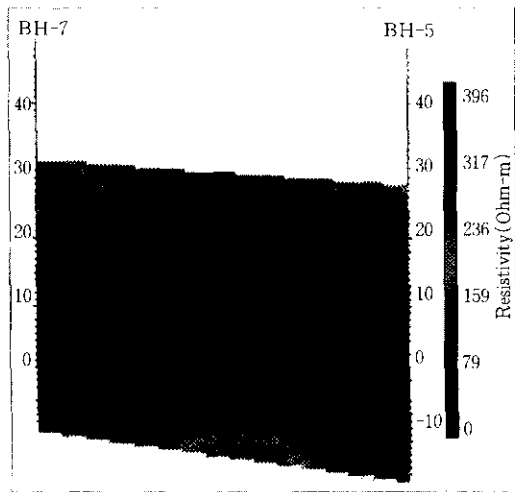


그림 11. 전기 비저항 토모그래피 탐사결과도 (김정호 등 1996)

지질과 큰 비저항 차이를 보이는 지질구조의 탐지에 매우 유용하다.

전극배열은 대개 단극배열(pole-pole array)이 주로 이용되며, 시추공 주변의 해상도를 높이기 위하여 동일 시추공 자료 및 지표-시추공 자료가 추가되기도 한다(김정호 등, 1996). 측정된 전위는 겉보기 비저항 자료를 환산한 다음, 역산 과정을 거쳐 두 시추공 사이의 전기 비저항 영상을 획득한다. 전기 비저항 토모그래피법은 공장부지 지반조사, 터널 입구 지반조사, 연약대의 정밀조사 등 각종 지반조사에 활발하게 적용되고 있다. 향후 보다 효과적인 지반조사 방법으로 확립시키기 위해서는 자동

측정기술의 향상, 공내수의 영향 보정(조인기 등, 1998), 전극배열(조인기 등, 1997) 등에 관한 다양한 연구 및 현장실험이 계속되어야 할 것이다.

2.9 기타 물리탐사

본 강좌에서는 현재 지표에서 수행되는 각종 토목 물리탐사 기술을 위주로 기술하였다. 그러나 지반조사에서는 시추공을 이용한 각종 물리탐사가 현재 활발히 적용되고 있다. 시추공을 이용하는 물리탐사법 중 대표적인 방법으로 검층이 있으며 검층은 앞서 물리탐사의 분류에서 사용되는 거의 모든 방법의 원리를 이용하여 시추공 주변의 물성 변화에 관한 정보를 얻어낼 수 있다. 또한 최근 개발된 시추공 카메라 검층(정현기 등, 1995), 텔리 비우어(televiwer) 검층(김중열 1995)은 기존의 검층법과 함께 중요한 지반조사 기술의 하나로 확립되고 있다. 이들은 시추공 주변의 암상을 가시적인 영상으로 제공하며 암석의 물성을 현장에서 측정한다는 장점을 갖고 있다. 검층은 방법론 자체만 해도 방대한 설명을 요하므로 여기서는 생략한다. 또한 시추공을 이용하는 각종 물리탐사법도 지반조사에 매우 중요한 역할을 수행하고 있으나 검층과 같은 이유로 생략한다.

2.10 결 언

이상에서 설명한 바와 같이 물리탐사는 토목분야에 매우 성공적으로 적용되고 있으며 그 적용범위가 확대되어 가고 있는 추세이다. 물리탐사는 다양한 방법론이 개발되어 있어 조사 목적 및 여건에 따라 최적의 탐사 방법을 선정할 수 있으므로 지반조사에 적용성이 매우 뛰어나며, 여기서 얻어진 대부분의 물리탐사 자료는 용이하게 다른 지반조사 자료와 함께 종합해석이 가능하다. 특히 물리탐사는 현장에서 직접 토목설계에서 필요한 암석의 물성자료(insitu data)를 제공하며, 일점의 자료가 아니

라 조사지역 전반의 지질구조 및 물성분포를 제공할 수 있다는 점에서 지반조사에서 매우 중요한 역할을 담당할 것으로 기대된다. 또한 지반조사를 목적으로 하는 탐사기기들이 속속 개발되어 가고 있으며 이에 따른 현장 측정기술 및 자료처리, 해석기술이 보강됨에 따라 토목 물리탐사의 발전은 더욱 가속화 될 것이다. 이러한 물리탐사의 성공적인 적용을 위해서는 우선적으로 물리탐사에 대한 올바른 이해와 지반조사시 물리탐사 전문인력의 확보를 통한 철저한 품질관리가 해결되어야 할 가장 시급한 문제인 것으로 생각된다. 또한 이제까지 얻어진 각종 물리탐사 자료의 분석 및 현장 적용사례에 대한 논의가 활성화되면 물리탐사는 토목 설계 및 시공에 필요한 지하 지질구조 및 각종 암석물성에 관한 정보를 제공해주는 가장 확실한 지반조사 방법 중의 하나로 자리잡을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 김정호, 송윤호, (1995), 지표 및 시추공 레이 다 탐사에 의한 석회암 지대에서의 지반특성 조사: 한국자원공학회 특별심포지움 논문집, '지반사고 예방을 위한 물리탐사의 활용', p.162-175.
2. 김정호, 정승환, 이명중, (1996), 전기비저항 영상화 기법의 토목분야의 적용: 제1회 한화기술 심포지움 논문집, p.112-125.
3. 김정호, 이명중, 조성준, 정승환, 이희일, (1996), 시추공 효과가 전기비저항 토모그래피에 미치는 영향에 관한 연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-96(C)-10, p.3-60.
4. 김중열, (1995), 지반침하 조사를 위한 물리탐사 사례연구: 한국자원공학회 특별심포지움 논문집, '지반사고 예방을 위한 물리탐사의 활용', p.91-132.
5. 김중열, 김유성, 현혜자, Schepers, J., Plessmann, J., (1995), LG 강남타워 신축부지 Geotomography 조사 : 한국자원연구소, LG건설(주)
6. 민경덕, 서정희, 권병두, (1986), 응용지구물리학, 우성문화사.
7. 정승환, 김용태, 안대영, (1995), 전기 비저항 토모그래피에 의한 지하영상화 및 적용사례: 한국자원공학회 특별심포지움 논문집, '지반사고 예방을 위한 물리탐사의 활용', p.133-140.
8. 정승환, 김정호, 서재영, (1988), 지하지질 및 누수조사 전담연구: 한국자원연구소 용역보고서, 농어촌진흥공사
9. 정연문, 이영남, 김정호, 조인기, (1998), 전기 비저항 영상화 기법을 이용한 토목 및 환경분야 지반조사: 지반공학회지, 심사중.
10. 정현기, 강동훈, 김기석, 김중열, 최종호, (1995), 시추공 TV 검층기 국내개발 및 현장적용사례: 한국자원공학회 특별심포지움 논문집, '지반사고 예방을 위한 물리탐사의 활용', p.221-232.
11. 정현기, 최종호, 김정호, 정승환, 신인철, (1989), 자동연속기록 및 PC 전송 가능한 SP 측정기 개발 및 응용연구: 한국자원연구소 연구보고서, KR-89-(B)-26, 과학기술처.
12. 조인기, 정승환, 김정호, 송윤호, (1997), 전기 비저항 토모그래피에서의 전극배열 비교: 한국자원공학회지, 34, p.18-26.
13. 조인기, 김정호, 정승환, (1997), 전기비저항 토모그래피에서의 공내수의 영향: 한국자원공학회지, 34, p.531-538.
14. 현병구, (1995), 물리탐사 용어사전, 선일문화사.
15. Chen, H., Xu, H. and Yang, X., (1990), Detection underground cables and metal conducting pipes by using EM methods in Ward, S. H. Geotechnical and Environmental Geophysics, v3-Geotechnical, p.229-237.
16. Palacky, G. J., (1988), Resistivity characteristics of geologic target. in Nabighian, M.N., Electromagnetic methods in applied geophysics-Theory, p.53-129.