

전자탐사를 이용한 지하 이상대 영상화

조인기* · 김학수**
*강원대학교 지구물리학과
**지오제니 컨설턴트(주)

요 약

전자탐사는 매우 다양한 탐사 방법론 및 탐사 장비가 개발되어 있으며 그 적용 분야 또한 매우 넓다. 전자탐사는 탐사기법 및 사용되는 기기 즉, 특정 송·수신 배열이나 사용 주파수 대역 등에 따라 탐사심도 및 분해능이 서로 다른 결과를 제공한다. 또한 현대의 전자탐사 측정장비는 그 복잡성에 비추어 장비의 이동성이 뛰어나므로 지반조사 및 환경 오염대의 조사와 같은 지반·환경 물리탐사에 적용이 용이하다. 비록 전자탐사는 이론이 복잡하지만, 최근 급속한 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 정확한 모델링 및 역산 기법이 지속적으로 개발되고 있다. 여기서는 다양한 전자탐사 방법 중에서 환경분야 및 지반조사에 효과적이고 현재 국내에서 수행 가능한 방법 및 조속한 시일 내에 국내에 도입 가능한 전자탐사법의 원리 및 방법을 간략하게 소개하고 각 방법에 대한 현장자료를 소개한다.

주요어: 전자탐사, 지반·환경 물리탐사

In-Ky Cho and Hak-Soo Kim, 2002, Subsurface imaging by electromagnetic method. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 5, n. 2, p. 99-109

ABSTRACT: Among the geophysical exploration methods, electromagnetic method(EM) has the broadest range of instrumental systems and remarkable range of applications. There are a lot of available techniques and instruments which have different depth of investigation and resolution depending on the operating frequency and source-receiver configuration. Furthermore, it is very easy to apply on the engineering and environmental problems since modern EM equipments are remarkably portable, considering their sophistication. Even though electromagnetic theory is very complex and not easy to understand, rapid advances in recent computer technology have made it possible to conduct accurate forward modeling and inversion of various EM exploration data. Here, we are going to provide brief theoretical principles, survey techniques and case histories of some selected EM methods that can be applied to geotechnical and environmental problems in Korea.

Key words: electromagnetic method, engineering and environmental application

(In-Ky Cho, Department of Geophysics, College of Natural Science, Kangwon National University, 192-1, Hyoja 2-dong, Chunchon, Kangwon, E-mail: choik@kangwon.ac.kr; Hak-Soo Kim, Geogeny Consultants, 938-7, Bangbae, Suhcho, Seoul, E-mail: kcloud@geogeny.com)

1. 서 론

전자탐사법은 현존하는 모든 물리탐사 기술 중에서 가장 다양한 탐사방법이 개발되어 있으며, 그 적용 분야 또한 매우 다양하다. 이러한 측정기기의 다양성은 수요자의 입장에서 볼 때 주어진 탐사목적에 따라 탐사장비 선택의 폭이 넓다는

것을 의미하므로 전자탐사가 지니는 큰 장점 중의 하나이다. 전자탐사의 효시는 1900년대 초 스웨덴에서 Sundberg(1931)가 광물탐사에 적용한 것이며, 2차 세계대전 이후에 상업용 장비가 개발되면서 급속한 발전을 이루게 되었다. 최근에는 각종 전자기술과 컴퓨터의 비약적인 발전에 힘입어 보다 정밀한 현장자료 획득이 가능해지고, 복잡한

전자기 유도 현상에 대한 이론 및 수치 모델링, 역산 등의 해석기술이 개발됨에 따라 이론의 복잡성에도 불구하고 탐사능력의 향상 및 새로운 탐사법의 개발이 지속적으로 이루어지고 있다.

전자탐사는 지난 수십 년간 주로 지하 광물자원 및 지하수 자원의 탐사에 널리 이용되어왔다. 그러나 근년에는 정밀탐사기법 및 해석기술이 개발됨에 따라 지반조사 및 환경분야로 그 적용범위를 확대해 가고 있으며 특히 지하 과쇄대 탐지, 쓰레기 매립지 조사, 환경 오염대 조사, 지하 매설물 조사 등에 적용성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 한편 전자탐사의 큰 장점중의 하나는 방법론에 따라서는 전기비저항탐사에서와 같이 대지에 전극을 직접 설치하지 않아도 적용이 가능하다는 점이다. 따라서 현장 자료획득시간을 줄여줄 뿐 아니라 전극의 설치가 어려운 암반지역이나 아스팔트 포장도로 등에서도 탐사가 가능하다. 또한 조사 대상지역의 전기전도도가 높아 실질적으로 전기비저항 탐사의 적용이 어려운 지역에서도 양질의 자료획득이 가능하다는 점도 지반조사 및 환경 오염대 조사에 전자탐사의 적용성을 높여주는 큰 요인 중의 하나이다. 그러나 이러한 강점에도 불구하고 전자탐사를 이용한 지반조사 및 환경 오염대 조사는 아직까지 매우 미미한 실정이다. 이는 전자탐사에 대한 인식부족과 전문인력의 부족, 탐사장비, 자료처리 및 해석기술의 부재 때문이다. 여기서는 다양한 전자탐사 방법 중에서 현재 국내에서 수행 가능한 방법 및 조속한 시일 내에 국내에 도입 가능한 전자탐사 기술에 대하여 현장자료를 위주로 소개하고자 한다.

2. 원리 및 방법

전자탐사는 지표 또는 시추공내에서 전기장 및 자기장을 측정하여 지하 지질 이상대의 위치, 크기, 형상 및 물성 등에 관한 정보를 알아내는 물리탐사 기술의 일종이다. 이 방법은 송신원의 유무, 전·자기장의 측정방식, 탐사대상 심도 등에 따라 매우 다양한 방법론이 개발되어 사용되고 있다. 모든 전자탐사 방법은 이론적으로 맥스웰 방정식에 근거하며, 사용주파수, 송·수신 거리, 대지

의 전기전도도 등에 따라 통상적인 전자기 유도법칙에 근거하는 유도영역(induction regime)과 전자기파의 파동특성을 이용하는 파동영역(propagation regime)으로 크게 나누어진다. 전자의 경우에는 소위 분산방정식(diffusion equation)을 만족하며, 후자의 경우에는 파동방정식(wave equation)을 만족시키므로 동일한 맥스웰 방정식을 이론적 근거로 하지만 개념적으로는 상당한 차이가 있다. 유도영역 전자탐사는 앞서 설명한 바와 같이 매우 다양한 탐사 방법이 개발되어 있으며, 파동영역의 대표적인 탐사법은 레이다탐사이다. 전자탐사에서 가탐심도(depth of investigation)는 전자기파의 침투심도(penetration depth)에 좌우된다. 침투심도는 사용주파수, 땅의 전자기적 물성(투자율 μ , 전기전도도 σ 및 유전율 ϵ), 송·수신 간격 등에 따라 달라지며 평면파(plane wave)를 가정할 경우 사용 주파수에 따른 전자기파 에너지의 감쇠정도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 유도영역 전자탐사는 상대적으로 저주파 대역의 전자기파를 사용하므로 가탐심도는 크지만 해상도가 상대적으로 낮으며, 레이다탐사의 경우에는 수십 MHz 이상의 고주파를 사용하므로 해상도는 뛰어나지만 상대적으로 가탐심도가 작다. 따라서 유도영역 전자탐사는 상대적으로 심부의 지질 구조 및 매설물의 탐지에 이용되는 반면 레이다탐사의 경우에는 천부(10 m 내외)의 정밀 지질 구조 조사 및 정밀 비파괴 검사기법으로 널리 사용되고 있다. 그러나 침투심도 및 해상도는 사용주파수뿐만 아니라 땅의 전기전도도 등 다른 변수들의 영향을 받게 되므로 주파수 기준만으로 구분할 수는 없다.

일반적으로 전자탐사는 분산방정식을 만족하는 유도영역 전자탐사를 말하며, 파동방정식을 만족하는 전자탐사는 레이다탐사로 분리하여 다루기 때문에 여기서는 유도영역 전자탐사에 관하여 기술한다. 송신 코일에 교류전류를 흘려주면 암페어의 법칙에 의해 자기장(1차장, primary field)이 발생하고, 이 자기장이 전기 전도성인 지하 매질 또는 이상대를 통과하면서 유도전류(induction current)를 발생시키게 된다. 이 유도전류는 소위 2차 자기장 및 전기장(secondary field)을 발생시키며, 전

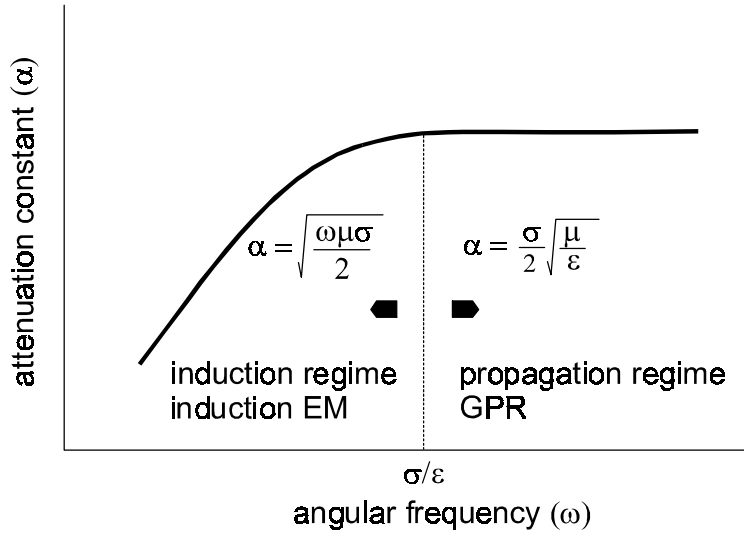


Fig. 1. Variation of EM energy attenuation with frequency.

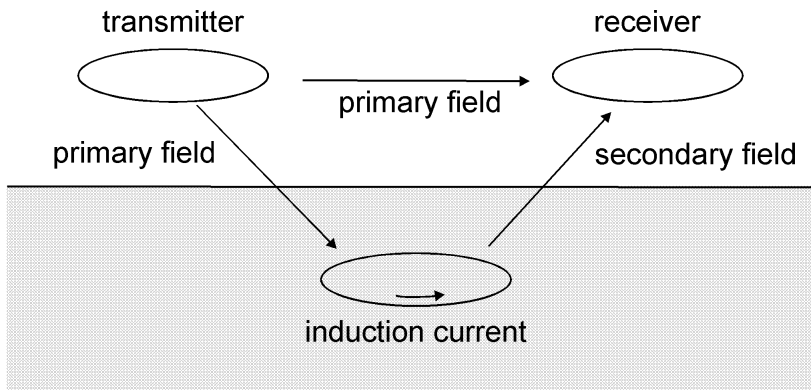


Fig. 2. Sketch of an electromagnetic induction prospecting system.

자탐사는 유도전류에 의한 2차장을 측정하여 지하의 전기전도도 분포에 관한 정보를 얻어내는 방법이다(Fig. 2). 실제로 지하에 전기전도도 이상체가 존재할 경우 유도전류는 전자기 유도에 의해 이상체 내부에 발생하는 맴돌이 전류(vortex current) 및 이상체와 주변 매질이 전기적으로 접촉됨으로써 존재하는 전도전류(conduction current)가 복잡한 산란전류(scattering current)로 나타나게 되는데, 이는 사용주파수, 이상체의 형상 및 전도도 차이에 따라 매우 복잡한 양상을 띠며 전자탐사의 정확한 모델링 및 해석을 상대적으로 어렵게 하는

원인이 된다. 어쨌든 지하에 유도되는 유도전류의 크기는 지하 매질의 전기전도도에 크게 좌우되므로 전자탐사는 원리적으로 전기전도도가 높은 양도체의 탐지에 유리하다.

전자탐사는 송신원, 측정량, 송·수신 배열 등에 따라 매우 다양한 탐사법으로 나누어진다. 대표적인 분류방법은 송신원에 따른 분류로 주파수영역(frequency domain EM)과 시간영역(time domain EM)으로 나누어진다. 주파수영역 전자탐사는 일정 주파수를 갖는 전류를 코일 등의 송신원에 공급하여 1차장을 생성한 다음, 수신기에서 2차 자기장

을 측정하여 지하의 지질구조를 해석하는 방법이다. 주파수영역 전자탐사는 특정 주파수를 사용하므로 필터링 기법 등에 의하여 신호 대 잡음비(signal to noise ratio; S/N)를 높일 수 있다는 장점이 있다. 주파수영역 전자탐사에서 주파수를 f , 대지의 전기비저항 (전기전도도의 역수)을 ρ 라 하면 평면 전자기파의 침투심도 또는 표피심도(skin depth)는 $\delta \approx 500 \sqrt{\rho/f}$ 이므로, 고주파수의 자료는 천부의 정보를, 저주파수의 자료는 심부의 정보를 나타낸다. 반면 시간영역 전자탐사는 일정시간 송신원에 전류를 공급하다가 갑자기 차단한 다음, 지하에서 일어나는 전자기 유도현상에 의한 2차장의 시간에 따른 변화를 측정하는 방법이다. 1차장이 없는 상태에서 지하 이상체에 의한 2차장만을 측정한다는 장점이 있으며, 초기 시간대의 자료는 천부의 정보를 후기 시간대는 심부의 정보를 내포하고 있다. 따라서 시간영역 전자탐사는 이론적으로 광대역 주파수에 걸쳐 주파수영역 전자탐사를 수행한 것과 같은 효과가 있다.

전자탐사에서 전기비저항탐사와 마찬가지로 수평탐사(profiling)와 수직탐사(sounding)가 모

두 가능하다. 수평탐사의 경우 일정 송·수신 간격을 유지하면서 이동하는 이동 송신기법(moving source)과, 송신기는 고정하고 수신기만 이동시키는 고정 송신기법(fixed source)으로 나누어진다. 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 기하학적 수직탐사(geometric sounding)와 주파수를 변화시키면서 수행하는 주파수 수직탐사(parametric sounding)가 있다. 그러나 지반조사의 경우에는 대개 지하 전기비저항의 2차원적 분포 영상이 요구되므로 전자탐사에서는 대개 축선상의 측정점 별로 여러 개의 주파수에 대한 전자기장을 측정하여 심도에 따른 전기비저항 분포 단면을 추출하게 된다.

현재 국내에서 사용되고 있는 전자탐사 방법으로는 Table 1에 주어진 바와 같이 VLF(very low frequency)법, 소형루프법, 시간영역 전자탐사법(time domain EM; TEM), 자기지전류법(magneto-telluric; MT) 및 인공송신원 MT(controlled source

Table 1. A classification of electrical and electromagnetic methods.

Transmitter	Receiver		
	Grounded wire	Both wire and small coil	Small coil
DC	Natural field	SP (self-potential)	
	Grounded wire	Resistivity IP (induced polarization)	
	Grounded wire	CSAMT (controlled source audio-frequency MT)	
AC	Small Loop	Slingram HLEM (horizontal loop EM) VLEM (vertical loop EM) GCM (ground conductivity meter) TEM EM tomography	
	Large loop	CSMT (controlled source MT)	Sundberg Turam TEM borehole EM
	Plane wave	VLF-resistivity MT	VLF

로 송·수신 코일 직하부의 전기전도도만을 반영한다. 따라서 수평루프법은 수직루프법에 비하여 상대적으로 심부의 정보를, 수직루프법은 천부 표토층의 전기전도도 분포를 파악하기 위하여 적용된다. 이 방법은 매우 빠른 속도로 넓은 지역의 전기전도도 분포를 파악할 수 있으며, 전기비저항 탐사와는 달리 접지가 곤란한 지역에서도 효과적으로 자료를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 이 방법은 배경 매질의 전기전도도가 높은 경우에도 효과적으로 적용 가능하므로 쓰레기 매립장과 같이 전기비저항이 너무 낮아 전기비저항 탐사가 곤란한 환경 오염대 지역의 조사에 전기비저항 탐사의 훌륭한 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 4는 생활 쓰레기 매립지에서 수행된 자유도상수 전자탐사 결과이다. 이 지역의 전기 전도도 배경값은 10 mS/m 정도로 일반적인 국내 토양의 전기비저항에 비하여 매우 낮은 값을 보이고 있으며, 전기 전도도가 20 mS/m 이상인 지

역은 침출수에 의해 상당히 오염이 진행된 지역을 의미한다. 또한 침출수에 의한 오염이 좌상부의 매립지(침출수 처리장)에서 출발하여 우하부로 진행하다가 두 방향으로 갈라져 진행되는 것으로 해석된다. 이상과 같이 자유도상수 전자탐사법은 오염지역의 광역적, 수평적 분포 현황의 파악에 매우 효과적인 것으로 보인다.

한편 최근에 개발된 소형 루프 전자탐사 기기는 다중 주파수를 신호원으로 사용하여 심도에 관한 정보를 제공할 수 있도록 제작되어 있다. 따라서 소형루프 전자탐사를 수행하게 되면 측선 하부의 2차원적 전기전도도 분포 단면을 제공할 수 있다는 장점이 있다. 이는 최근에 각종 지반조사 및 환경오염대 조사에 널리 사용되고 있는 전기비저항탐사의 적용이 곤란할 경우 이 방법이 효과적으로 적용될 수 있음을 의미한다. 예를 들어 국내 쓰레기 매립장의 경우 일반적으로 전기비저항이 상당히 낮은 전도성 매질이며, 주 오염원인 침출수도 전기전도도가 매우 높은 것으로 알려

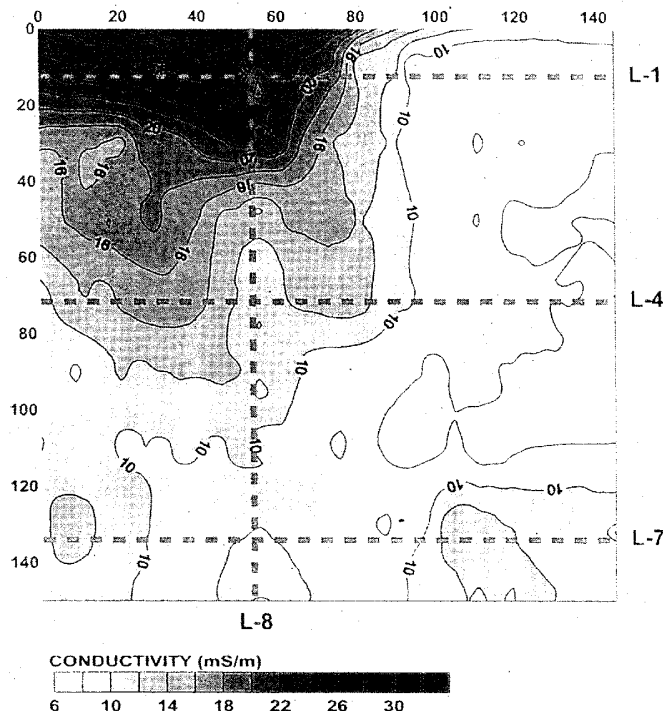


Fig. 4. Apparent conductivity map around a landfill site(장현삼 등, 1998).

다. 이 경우 환경오염대 조사에 널리 적용되고 있는 쌍극자 배열 전기비저항탐사는 측정값이 너무 작아 현장자료 획득 자체가 불가능하게 된다. 물론 최근에는 신호의 크기를 향상시키기 위한 각종 변형된 전극배열법이 개발되어 적용되고 있기는 하지만 근본적으로 전도성 매질에서 전기비저항 탐사를 수행할 경우 양질의 자료획득이 쉽지 않다. 하지만 소형 루프 전자탐사의 경우에는 이러한 전도성 환경하에서도 아무런 문제없이 자료획득이 가능하며, 다중 주파수를 사용하여 축선하부의 2차원 나아가서는 3차원적 전기전도도 분포를 파악할 수 있으므로, 쓰레기 매립장의 수평, 수직적 범위 및 침출수의 유동방향의 탐지에 효과적으로 적용 가능할 것으로 기대된다. 또한 전자탐사의 특성상 지하에 매몰된 금속성 전도체의 탐지에는 전기비저항탐사에 비하여 비교 우위에 있으므로 지하의 배관망, 금속성 폐기물의 탐지에도 매우 효과적인 방법이다. 물론 전자탐사는 지하 매설물의 탐지에 널리 사용되고 있는 GPR 탐사에 비하여 해상도는 떨어지지만, 지하 매질의 전기전도도가 높아 송신 전자기파의 극심한 감쇠로 인하여 GPR 탐사의 적용이 곤란한 지역에서도 적용 가능하다는 장점이 있다.

4. 시간영역 전자탐사(Time domain EM; TEM)

시간영역 전자탐사는 1차장이 없는 상태에서 이상체에 의한 2차장만을 측정하며 한번의 측정으로 광대역 주파수의 반응을 획득한 것과 같은 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 국내의 경우 이 방법은 1980년대에 널리 사용된 방법으로 대형루프를 사용하여 중간 심도 내지 심부 석탄자원의 조사에 적용되었으며 이후 지하수 탐사, 금속광물자원 탐사 등에 적용된 바 있다. 또한 지하수의 오염대 조사, 해수 침입대 조사 및 지하의 파쇄대 탐지에도 효과적이다. 이 방법은 다른 전자탐사 방법과 동일하게 지하 전기비저항의 2차원적 분포양상을 획득할 수 있으며, 특히 전도성 이상체의 탐지에 매우 뛰어나 향후 지반조사 및 환경분야에의 적용이 기대되는 방법이다.

호주 Wiso Basin을 가로지르는 Alice Springs

와 Darwin 사이의 철로를 따라 산재하는 함몰대(sinkhole) 즉, 돌리네(doline)의 분포 상황을 조사하기 위하여 동일 루프법을 사용하는 TEM 탐사를 수행하였다(Nelson · Haigh, 1990). 이 지역은 상당수의 함몰대가 발달되어 있으며, 1982년 갑작스런 붕괴로 인하여 Buchanan 고속도로에서 대형사고가 발생하였으며, 이를 계기로 대규모의 지반 안정성 조사가 수행되었다. 적정 탐사방법의 선정을 위하여 함몰대의 생성 원인에 대한 조사가 수행되었다. 지층내의 규암질(silica)이 용해되어 빠져나가고 응집력이 떨어지는 점토만 남아 상부 토양층을 지지하고 있다. 이 용해된 영역은 지하 30 m까지 발달하면서 공극률이 매우 높은 함수대를 형성한다. 우기에 강우가 집중되면 이 함수대가 붕괴하면서 상부 토양층도 함께 붕괴하게 된다. 이와 같은 생성기원을 갖는 함몰대는 대개 점토 및 각종 쇄석으로 충전되어 있어 낮은 전기비저항을 보이므로 TEM 탐사법을 적용하게 되었다. TEM 탐사에서 송신 루프의 크기는 25 m이며 강력한 신호 발생을 위하여 루프당 권선수를 4로 하였으며, 축선 간격은 25 m 이다. Fig. 5는 이 지역에 대한 겹보기 비저항 분포도로 두 개의 지점에 함몰대가 존재한다. Fig. 5에 HV4와 HV5로 나타난 이 함몰대는 1982년 한밤중에 갑자기 붕괴되었으며, 이로 인하여 고속도로를 그림에 나타난 것처럼 옆으로 이전하였다. 그러나 (90 m E, 40 m N) 좌표 지점에 10 ohm-m 의 낮은 겹보기 비저항을 보이는 이상대가 나타나고 있다. 참고로 이 이상대는 탄성과 굴절법 주시 자료에서도 속도가 느리고 감쇠가 심한 이상을 나타나고 있어, 조만간 붕괴될 수 있는 잠재 함몰대로 해석되었다.

5. 인공송신원 MT 탐사 (Controlled source MT : CSMT)

MT 및 CSMT 탐사법은 현존하는 전기, 전자 탐사법 중 가장 가탐심도가 큰 탐사법으로 주로 심부탐사에 사용된다. MT법은 지구상에 자연적으로 존재하는 전기장 및 자기장을 측정하여 심부 지질구조를 해석하는 방법으로 10^3 - 10^4 Hz의 광대역 주파수를 사용하며, 최근에는 천부탐사를

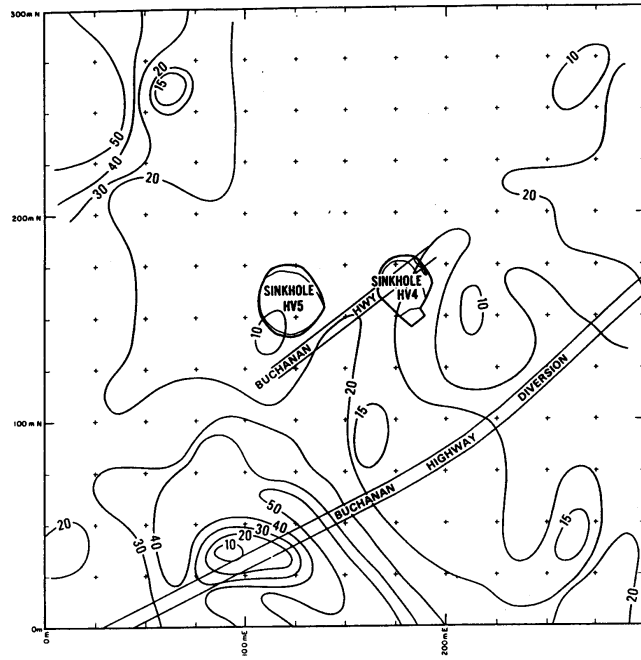


Fig. 5. TEM apparent resistivity anomaly map over part of the Buchanan Highway test site, Northern Territory, Australia (Nelson · Haigh, 1990).

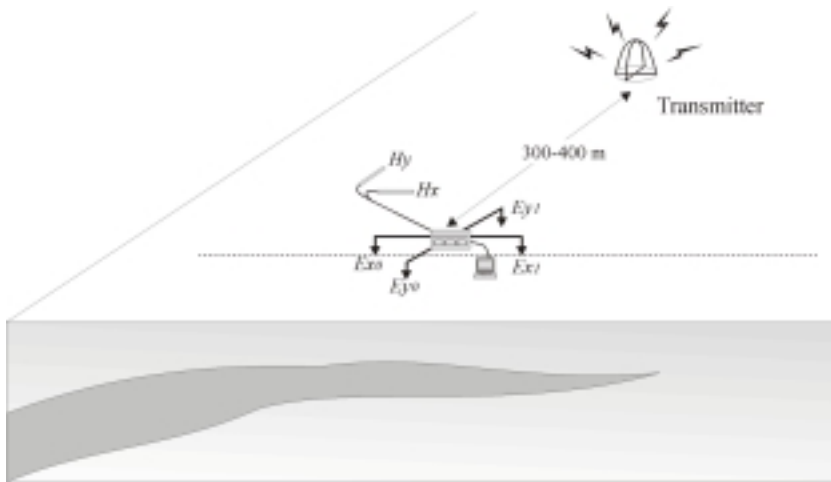


Fig. 6. Field layout for a CSMT survey.

위하여 $10\text{-}10^5$ Hz의 고주파대역 AMT(audio-frequency MT) 장비가 개발되어 사용되고 있다. MT탐사는 자연장을 측정하는 방법이므로 전자기적 잡음에 취약하다는 단점이 있으나 자료획득 및 처리기술의 개발로 그 적용범위가 확대되고 있는

며, 잡음에 취약한 MT 탐사의 약점을 보완하기 위하여 인공 송신원을 사용하는 CSMT 탐사법이 개발되어 사용되고 있다. CSMT 탐사는 조사 지역으로부터 표피심도의 4배 이상 떨어진 지점에서 전극을 통하여 강력한 교류전류를 흘려주거나

루프에 전류를 흘려 발생하는 전자기장을 신호원으로 사용하며 조사지역에서 주파수별로 서로 직교하는 전기장과 자기장의 크기 및 위상차를 측정하여 지하의 전기비저항 분포 영상을 얻는 방법으로서 원래 CSAMT(controlled source AMT)라 하였으나 최근 기기의 발달로 사용주파수 대역이 넓어지면서 CSMT로 불리우는 추세이다. 사용되는 주파수 대역은 조사목적에 따라 다양하며 국내에서의 지반조사용으로는 $10\text{-}10^5$ Hz 대역의 고주파를 이용하는 방법이 추천된다. 물론 보다 천부의 자료를 확보하기 위해서는 고주파를 사용하는 것이 바람직하다.

CSMT 탐사법은 송·수신 배열 방식에 따라 다양한 방법이 개발되어 있으며, 국내에서의 적용사례도 다수 보고된 바 있다. 최근에 300 m 이상 고심도 터널시공을 위한 지반조사에 이 방법이 시도되고 있으며, 지형조건 등 탐사여건이 열악한 지역 또는 해수침투 지역이나 탄층이 발달한 지역에서 그 하부의 정보를 획득하기 어려운 전기비저항탐사의 대안으로 자리잡아 가고 있다. Fig. 7은 강원도 평안계 퇴적층 지역에서 심층 지하수 탐사를 위하여 수행된 쌍극자 배열 전기비저항탐사 결과와 $10\text{-}10^5$ Hz 대역의 주파수를 사용하는 CSMT 탐사 결과를 나타낸 것이다. 전기비저항탐사에서는 천부에 부존하는 전도성 지층으로 인하여 자료획득시 전극전개수 4 이상에서는 자료획득

의 거의 불가능하였으며, 전극전개수 4이하의 경우에도 측정값이 불안정하여 얻어진 결과의 신뢰도가 매우 낮았다. 비록 전기비저항탐사의 역산 결과에서는 비교적 그럴듯하게 지하 지질구조에 대한 영상을 제시하고 있지만 그 결과는 믿을 수 없다. 반면 CSMT 탐사결과는 550 m 지점에서 200 m 지점 방향으로 상당한 경사를 갖고 발달한 탄층의 부존 범위 잘 보여주고 있으며, 550 m에서 650 m 지점까지는 상대적으로 탄질성분이 적은 평안계 퇴적층이 분포하고 있음을 잘 보여주고 있다. CSMT 탐사 결과의 경우 측선 길이의 제한으로 인하여 하부에 나타나는 수 100 ohm-m 의 고비저항층을 그림에 나타내지 못하였으나 원자료에서는 이러한 고비저항층을 확인할 수 있었다. 이는 전기비저항탐사가 전도성 지층에서 측정되는 전위차가 매우 낮아 자료획득과 해석에 어려움이 있는 데 반하여, CSMT 탐사법은 전기전도도가 높은 환경 하에서도 사용 주파수를 조절함으로써 매우 효과적으로 지하의 지질구조를 규명할 수 있다는 것을 잘 보여주는 예이다.

Fig. 8은 고심도 루프식 철도 터널 공사를 위한 지반조사에 적용된 CSMT 탐사의 결과이다. 이 지역의 지질은 대체적으로 평안계 퇴적층이 지표 근처에 부존하고 있으며, 그 하부에 조선계 석회암층이 분포하고 있다. 평안계 퇴적층은 대표적인 함탄층으로 다수의 석탄층이 나타나고 있어 전기

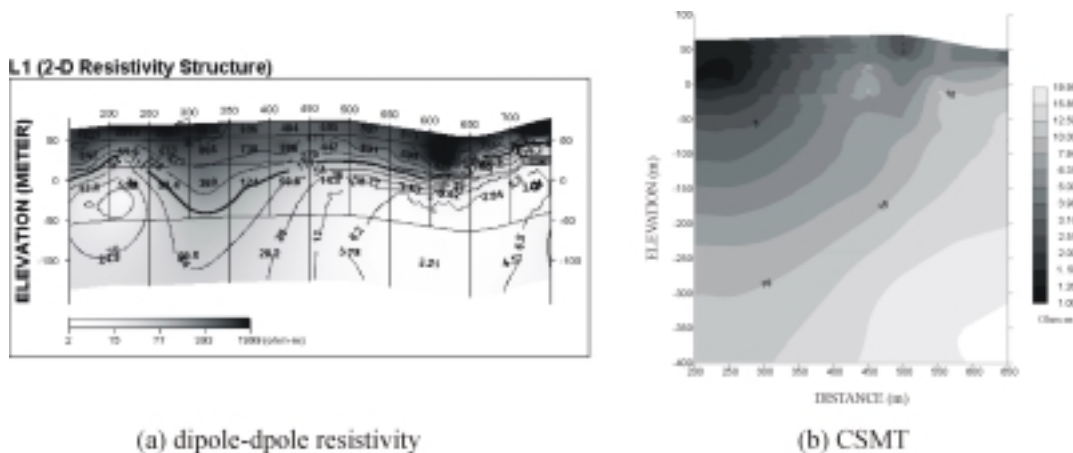


Fig. 7. 2D resistivity section obtained from (a) dipole-dipole resistivity and (b) CSMT survey over a conductive coal bearing sedimentary layer.

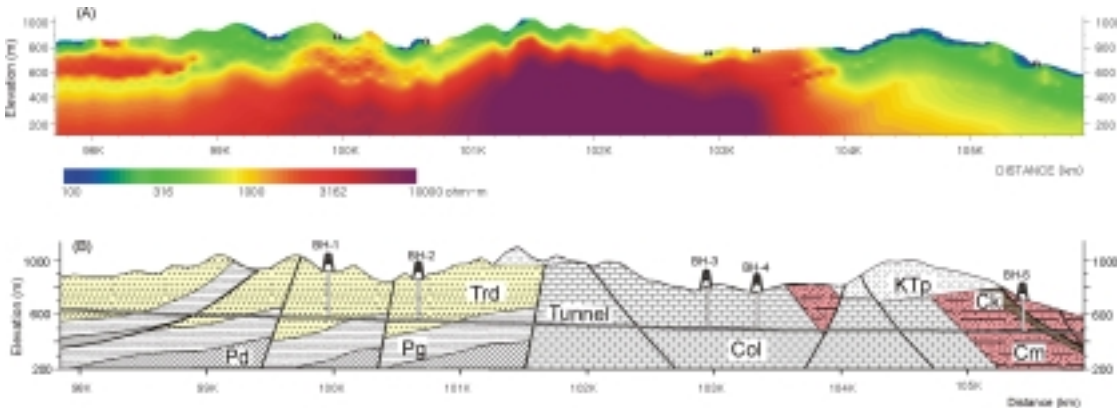


Fig. 8. (A) 2D resistivity section obtained from CSMT survey and (B) interpreted geologic section along the proposed loop tunnel alignment in a high mountain area.

비저항이 매우 낮은 경우가 대부분이다. 따라서 이 지역에서 전기비저항 탐사의 적용이 곤란하였으며, 터널의 심도가 300 m 이상으로 매우 깊기 때문에 전기비저항 탐사를 통하여 터널 주변의 지질구조 및 연약대 분포에 관한 해석이 불가능한 지역에 해당된다. Fig. 8은 이와 같은 지질 환경 하에서 적용된 CSMT 탐사 결과 및 그 해석 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 평안계 퇴적층에서는 상대적으로 낮은 전기비저항을 보이는데 반하여, 석회암 지대의 경우에는 매우 높은 전기비저항을 보이고 있어, 두 퇴적층의 부존 범위를 명확히 구분해 주고 있다. 또한 이 지역에 발달한 다수의 단층, 파쇄대의 분포 양상도 잘 보여주고 있어, 산악지대에서의 고심도 터널의 지반조사에 CSMT 탐사법이 성공적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다.

6. 향후 기술 동향 및 토의

이상에서 언급한 방법 이외에도 전자탐사 기술은 매우 다양한 방법이 개발되어 있다. 따라서 전자탐사는 지반조사시 선택의 폭이 넓으며, 각 방법은 나름대로 장점을 갖고 있어 주어진 지질조건 및 탐사여건에 따라 최적의 탐사 방법을 선택하여 사용할 수 있다는 장점이 있다. 즉 개략탐사에서부터 정밀탐사에 이르기까지 소요 경비, 기간 등을 고려하여 다양한 선택이 가능하다. 또한 전

기비저항탐사나 레이더탐사의 적용이 어려운 여건 하에서도 효과적인 대안으로 적용될 수 있다. 이러한 여러 장점에도 불구하고 전자탐사가 지반조사 분야에 아직 널리 보급되지 못한 이유는 전자탐사에 대한 인식부족과 이제까지의 지반조사가 전력선이 지나가는 도로주변과 같이 전자기적 잡음이 심한 지역에서 이루어 졌기 때문으로 보인다. 그러나 최근의 토목시공이 용지문제로 인하여 터널이나 장대교 등을 선호하는 경향이 있어 상대적으로 잡음에 대한 부담이 작아졌으며, 전자탐사에서의 잡음억제기술도 급속한 발전을 보이고 있어 전자탐사는 지반조사에 매우 중요한 탐사기술로 자리잡을 것으로 기대된다.

한편 전자탐사법도 탄성파탐사, 전기비저항탐사법 등과 같이 시추공을 이용하는 토모그래피 탐사 등의 정밀조사가 가능하다. EM 토모그래피의 경우 장비개발의 문제로 인하여 아직까지는 국내에서 적용된 예가 없지만 이 방법에 대한 이론적 연구(Alumbaugh · Morrison, 1995; Torres-Verdin · Habashy, 1994; 조인기 · 심현미, 1998) 및 시험적 현장조사 사례(Wilt *et al.*, 1995)가 발표되고 있다. EM 토모그래피의 경우 국내에도 장비가 도입될 전망이며, 다른 토모그래피법과 함께 정밀탐사의 수준을 한 단계 향상시키는 계기가 될 것으로 기대된다. 또한 전자탐사법의 3차원 자료 획득 및 해석기술에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Zhdanov · Fang, 1996). 비록 전자탐사

가 다른 물리탐사 기술에 비하여 상대적으로 이론이 복잡하여 3차원 해석기술의 개발에 어려움이 있으나, 최근의 3차원 전자탐사에 관한 지속적인 이론 연구와 급속한 컴퓨터의 발달에 힘입어 3차원 전자탐사도 조기에 가능해질 것으로 전망된다.

이상에서 전자탐사는 개략조사 단계에서 정밀조사 단계에 이르기까지 지반조사를 중요한 물리탐사 기법 중의 하나로 대두될 것으로 예상되며, 이를 위해서는 국내 연구진들의 지속적인 연구 개발 노력과 적극적 홍보가 요망된다.

참고문헌

장현삼, 임해룡, 홍재호, 1998, 쓰레기 매립장의 토양오염 조사를 위한 전자탐사 및 전기탐사, 물리탐사, 1, 87-91.
 조인기, 심현미, 1998, 확장된 Born 근사에 의한 EM 토모그래피, 물리탐사, 1, 155-160.
 Alumbaugh, D.L., and Morrison, H.F., 1995, Crosswell electromagnetic tomography. Theoretical and Practical considerations for cylindrical geometry, Geophysics, 60, 846-870.
 McNeil, J. D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers, TN-6, Geonics Ltd., Canada.

Nelson, R.G., and Haigh, J.H., 1990, Geophysical investigations of sinkholes in lateritic terrains, In Ward, S.H. Eds, Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume 3, SEG, 133-153
 Sundberg, K., 1931, Gerlands Beitr: Geoph., Ergänzungs-Hefte, 1, 298-361.
 Torres-Verdin, C., and Habashy, T. M., 1994, Rapid 2.5 dimensional forward modeling and inversion via a new nonlinear scattering approximation, Radio Science, 29, 1051-1079.
 Wilt, M., Alumbaugh, D. L., Morrison, H. F., Becker, A., Lee, K. H., and Deszcz-Pan, M., 1995, Crosswell electromagnetic tomography, System design considerations and field results: Geophysics, 60, 871-885.
 Won, I. J., Keiswetter, D. A., Fields, G. R. A., and Sutton, L. C., 1996, GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor, J. Env. Eng. Geophys., 1, 129-137.
 Zhou, Q., Becker, A., and Morrison, H. F., 1993, Audio-frequency electromagnetic tomography in 2-D, Geophysics, 58, 482-495.
 Zhdanov, M. S., and Fang, S., 1996, Three-dimensional quasi-linear electromagnetic inversion, Radio Science, 31, 741-754.

2002년 4월 1일 원고접수
 2002년 6월 21일 원고채택