

지반조사를 위한 전자탐사의 적용

조인기^{*1)}, 송윤호²⁾

¹⁾강원대학교 지구물리학과, ²⁾한국자원연구소 자원연구부

Application of electromagnetic survey to geotechnical problems

*In-Ky Cho^{*1)}, and Yoonho Song²⁾*

¹⁾Department of Geophysics, Kangwon National University; ²⁾Geophysical Exploration and Mining Division, Korea Institute of Geology, Mining & Materials

요약: 전자탐사는 매우 다양한 탐사 방법론 및 탐사장비가 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. 그러나 이러한 전자탐사 방법의 다양성은 주어진 문제를 해결할 수 있는 여러가지 기술 중 가장 적절한 방법을 선택할 수 있는 기회를 부여하므로 전자탐사의 중요한 장점중의 하나이다. 또한 현대의 전자탐사 측정장비는 그 복잡성에 비추어 장비의 이동성이 뛰어나다. 전자탐사는 최근 급속한 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 정확한 모델링 및 정밀 해석기술이 계속 개발됨에 따라 그 적용이 확대되고 있으며, 특히 지반조사 및 환경분야에의 적용이 활발히 추진되고 있다. 여기서는 다양한 전자탐사 방법 중에서 환경분야 및 지반조사에 효과적이고 현재 국내에서 수행 가능한 방법 및 조속한 시일 내에 국내에 도입 가능한 기술에 대하여 현장자료를 위주로 소개한다.

주요어: 전자탐사, 전자탐사 측정장비, 지반조사

Abstract: Among the geophysical exploration methods, electromagnetic (EM) survey must have the broadest range of instrumental systems and remarkable range of applications. There is a plethora of available techniques and instruments, and the depth of investigation and resolution are highly dependent on the particular systems used according to their operating frequency and source-receiver configuration. This diversity of EM systems, however, provides a wide range of instruments or methodologies to choose in order to select the most appropriate tool for the task in hand. This rather than being a disadvantage, would be a major strength of EM methods. Modern EM equipments are remarkably portable, considering their sophistication. Coupled with major advances in recent computer technology, accurate modeling and interpretation techniques are on the way of continuous development and upgrade which, in turn, make the EM methods to become much more heavily used, especially for engineering and environmental applications. We aim to provide a brief theoretical principles, survey techniques and case histories of some selected EM methods that can be applied to geotechnical and environmental problems in Korea.

Keywords: electromagnetic survey, EM system, geotechnical application.

1. 서론

전자탐사 (electromagnetic survey)는 현존하는 모든 물리탐사 기술 중에서 가장 다양한 탐사방법이 개발되어 있으며, 그 적용 분야 또한 매우 다양하다. 운송수단 및 정보통신이 발달하지 못한 1900년대 중반에 지역에 따라서 다양한 전자탐사 이론 및 측정기기가 개발되어 지역별로 사용되어 왔는데, 예를 들어 유럽, 북미, 호주 등은 초기에는 서로 다른 탐사장비를 사용하여 탐사를 수행하였으며, 각 지역마다 사용이 간단하고 휴대가 용이한 측정기기의 개발이 이루어졌다. 이러한 측정기기의 다양성은 수요자의 입장에서는 주어진 탐사목적에 따라 탐사장비 선택의 폭이 넓음을 의미하므로 전자탐사가 지니는 장점 중의 하나이다. 전자탐사의 효시는 1900년대 초 스웨덴에서 Karl Sundberg (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 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 근자에는 정밀탐사기법 및 해석기술이 개발됨에 따라 지반조사 및 환경분야로 그 적용범위를 확대해 가고 있으며 특히 지하 파쇄대 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 시추공을 이용하는 토모그래피의 경우 플라스틱 케이싱이 설치된 시추공에서도 조사가 가능하다는 점도 지반조사에 전자탐사의 적용성을 높여주는 큰 요인 중의 하나이다. 그러나 이러한 강점에도 불구하고 전자탐사를 이용한 지반조사는 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 소개하겠으며, 이론 및 방법론에 관한 자세한 내용은 민경덕 등 (1987), 손호웅 등 (1999)과 Nabighian (1988; 1991)을 참고하기 바란다.

2. 원리 및 방법

전자탐사는 지표 또는 시추공내에서 전기 또는 자기장을 측정하여 지하 지질구조의 위치, 크기, 형상 및 물성 등에 관한 정보를 알아내는 물리탐사 기술의 일종이다. 이 방법은 송신원의 유무, 전자기장의 측정방식, 탐사대상 심도 등에 따라 매우 다양한 방법론이 개발되어 사용되고 있다. 모든 전자탐사 방법은 이론적으로 맥스웰 방정식에 근거하며, 사용주파수, 송·수신 거리, 대지의 전기전도도 등에 따라 통상적인 전자기 유도법칙에 근거하는 유도영역 (induction regime)과 전자기파의 파동특성을 이용하는 파동영역 (propagation regime)으로 크게 나누어진다. 전자의 경우에는 소위 분산방정식을 만족하며, 후자의 경우에는 파동방정식을 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 사용 주파수, 땅의 전자기적 물성 (투자율 μ , 전기전도도 σ 및 유전율 ϵ), 송·수신 간격 등에 따라 달라지며 평면 전자기파 (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 지질구조 및 매설물의 탐지에 이용되는 반면 레이다탐사의 경우에는 천부 (10 m 내외)의 정밀 지질구조 조사 및 정밀 비파괴 검사기법으로 널리 사용되고 있다. 그러나 침투심도 및 해상도는 사용 주파수뿐만 아니라 땅의 전기전도도 등 다른 변수들의 영향을 받게 되므로 주파수 기준만으로 구분할 수는 없다.

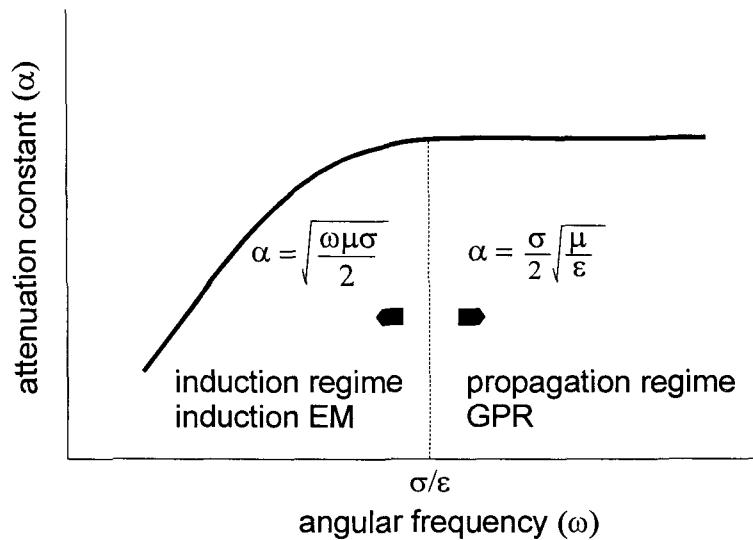


Fig. 1. Variation of EM energy attenuation with frequency.

통상적으로 전자탐사라 함은 분산방정식을 만족하는 유도영역 전자탐사를 말하며 파동방정식을 만족하는 전자탐사는 레이다탐사로 분리하여 다루기 때문에 여기서도 유도영역 전자탐사에 관하여 기술한다. 송신 코일에 교류전류를 흘려주면 암페어의 법칙에 의해 자기장 (1차장, primary field)이 발생하고, 이 자기장이 전기 전도성인 지하 매질 또는 이상체를 통과하면서 유도전류 (induction current)를 발생시키게 된다. 이 유도전류는 소위 2차 자기장 및 전기장 (secondary field)을 발생시키며, 전자탐사는 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 복합된 산란전류 (scattering current)로 나타나게 되는데, 이는 사용 주파수, 이상체의 형상 및 전도도 차이에 따라 매우 복잡한 양상을 띠며 전자탐사의 정확한 모델링 및 해석을 상대적으로 어렵게 하는 원인이 된다. 어쨌든 지하에 유도되는 유도전류

의 크기는 지하 매질의 전기전도도에 크게 좌우되므로 전자탐사는 원리적으로 전기전도도가 높은 양도체의 탐지에 유리하다.

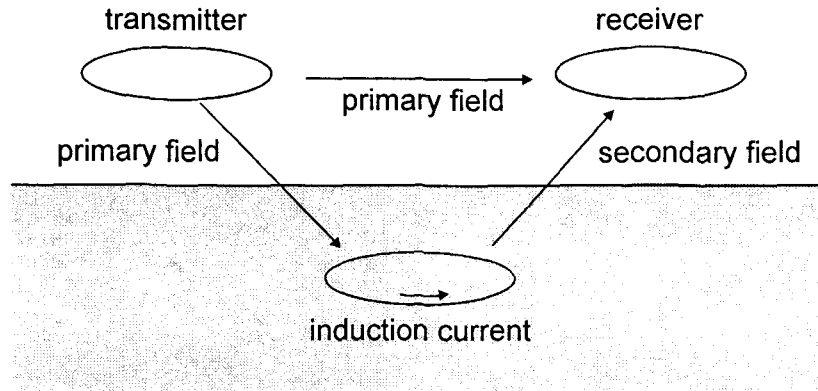


Fig. 2. Sketch of an electromagnetic induction prospecting system. The transmitter produces a primary field which induces induction currents in the subsurface. The receiver measures the resultant of the primary field and the secondary field induced by the induction current.

전자탐사는 송신원, 측정량, 송·수신 배열 등에 따라 매우 다양한 탐사법으로 나뉘어진다. 대표적인 분류방법은 송신원에 따른 분류로 주파수영역 (frequency domain EM)과 시간영역 (time domain EM)으로 나뉘어진다. 주파수영역 전자탐사는 일정 주파수를 갖는 전류를 코일 등의 송신원에 공급하여 1차장을 생성한 다음, 수신기에서 2차 자기장을 측정하여 지하의 지질구조를 해석하는 방법이다. 주파수영역 전자탐사는 특정 주파수를 사용하므로 필터링 기법 등에 의하여 신호 대 잡음비를 높일 수 있다는 장점이 있다. 주파수영역 전자탐사에서 주파수를 f , 대지의 전기비저항 (전기전도도의 역수)을 ρ 라 하면 평면 전자기파의 침투심도 또는 표피심도 (skin depth) $\delta \approx 500 \sqrt{\rho/f}$ 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.

전자탐사에서는 전기비저항탐사에서와 마찬가지로 수평 (profiling) 및 수직탐사 (sounding)가 가능하다. 수평탐사의 경우 일정 송·수신 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 기하학적 수직탐사 (geometric sounding)와 주파수를 변화시키면서 수행하는 주파수 수직탐사 (parametric sounding)가 있다. 그러나 지

반조사의 경우에는 대개 지하 전기비저항의 2차원적 분포 영상이 요구되므로 전자탐사에서는 대개 측선상의 측정점별로 여러 개의 주파수에 대한 전자기장을 측정하여 심도에 따른 전기비저항 분포 단면을 추출하게 된다.

현재 국내에서 사용되고 있는 전자탐사 방법으로는 Table 1 에 주어진 바와 같이 VLF (very low frequency)법, 소형 루프법, 시간영역 전자탐사법 (TEM), 자기지전류법 (magnetotelluric; MT) 및 인공송신원 MT (controlled source MT; CSMT)법 등이 있다. 이 중 VLF 탐사는 대개 50 m 이내의 천부 지하수 탐사를 위하여 사용되고 있으므로 여기서는 생략한다. 또한 다음에 설명할 전자탐사의 결과도 지반조사 목적으로 수행된 결과가 아니라 주로 지하수 탐사나 지하 매장물 탐사 등 다른 목적을 위하여 수행된 결과임을 밝혀둔다. 그러나 탐사목적에 관계없이 조사대상지역 하부의 전기비저항 분포를 제시해 줄 수 있으므로 큰 문제없이 지반조사에의 적용이 가능하리라 기대된다.

Table 1. A classification of electrical and electromagnetic systems.

| Transmitter | | Receiver | | |
|-------------|---------------|--|--|---|
| | | Grounded wire | Both wire and small coil | Small coil |
| DC | Natural field | SP (self-potential) | | |
| | Grounded wire | Resistivity IP (induced polarization) | | MMR (magnetometric resistivity) MIP (magnetic IP) |
| AC | Grounded wire | | CSAMT (controlled source audio-frequency MT) | |
| | 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 |

3. 소형 루프 전자탐사 (small loop EM)

소형 루프법은 송·수신기로 모두 소형 루프를 사용하는 방법이다. 주파수 및 시간영역 탐사 기기가 모두 개발되어 있으며 현장작업이 간편하여 전자탐사법 중 가장 널리 사용되고 있

다. 이 방법은 수평 및 수직탐사가 가능하며, 송·수신 루프의 방향에 따라 수평 루프법 (horizontal loop EM; HLEM) 등 다양한 배열이 가능하다. 초기에는 주로 단일 주파수 및 2개의 주파수를 사용하는 방법이 사용되었으나 근년에는 다중 주파수를 사용하는 탐사기법이 개발되어 지하의 2차원 영상을 얻을 수 있다. 대지와외의 직접적 접촉을 통하지 않으므로 비교적 신속하게 현장자료획득이 가능하다. 또한 80년대에 송·수신 루프를 막대로 연결하여 송·수신 간격을 항상 정확히 유지시키면서 정밀한 자료획득이 가능해져 지반조사 및 환경분야에의 적용가능성을 높이고 있다 (McNeil, 1980; Won *et al.*, 1996). 그러나 이 방법은 소형 루프를 송신원으로 사용하므로 송신출력이 낮아 가탐심도가 낮고 주변의 전자기적 인공잡음에 취약하다는 단점이 있다. 일반적으로 소형 루프법의 가탐심도는 50 m 이상을 기대하기 어렵다.

Fig. 3은 지하 매장물 탐지를 위해 동일 측선에서 수행된 쌍극자배열 전기비저항탐사 및 다중 주파수 전자탐사 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 전기비저항탐사 결과와 매우 유사한 결과를 나타내고 있어 전자탐사가 전기비저항탐사를 적용하기 어려운 지역에서 훌륭한 대안이 될 수 있음을 시사하고 있다. 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 (ground probing radar) 탐사에 비하여 해상도는 떨어지지만, 지하 매질의 전기전도도가 높아 송신 전자기파의 극심한 감쇠로 인하여 GPR 탐사의 적용이 곤란한 지역에서도 적용 가능하다는 장점이 있다.

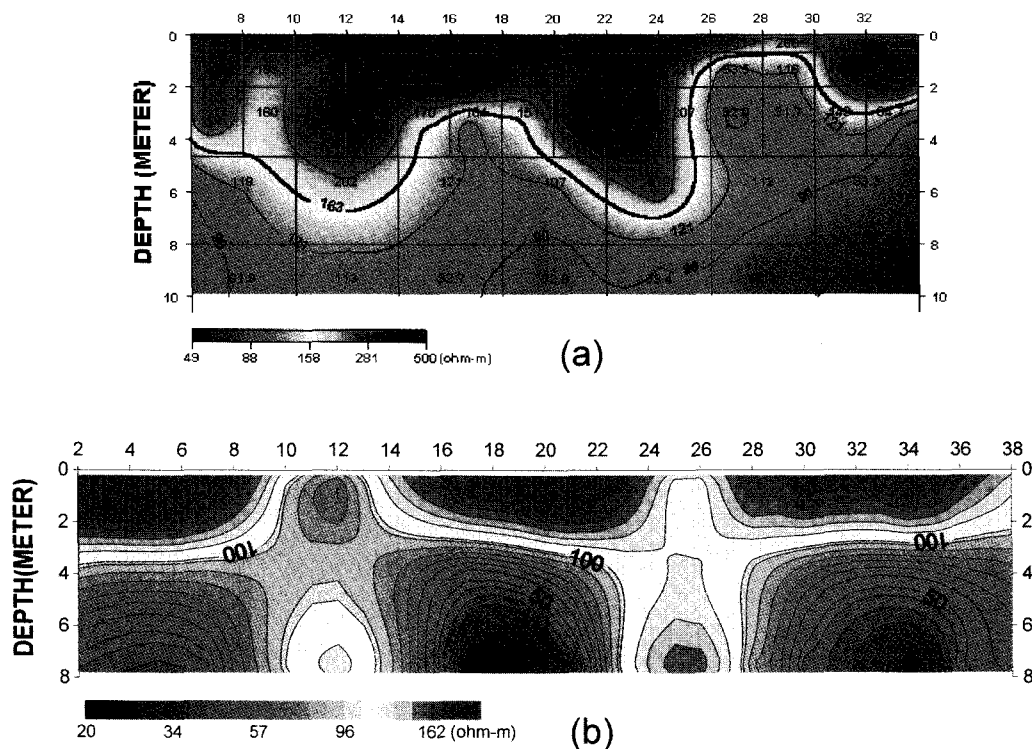


Fig. 3. Comparison of (a) a dipole-dipole resistivity and (b) a small loop EM results along the same survey line.

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 대형 루프를 사용하여 중간 심도 내지 심부의 무연탄 자원의 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 환경 분야에의 적용이 기대되는 방법이다.

최근에는 소형루프를 송신기와 두 개의 수신기로 사용하는 수직구배 TEM 탐사법이 개발되어 지하에 매설된 금속성 배관망, 3차원 금속체 등의 탐지에 효과적으로 적용된 바 있다. Fig. 4는 한국자원연구소 내에 설치된 시험장에서 수행한 통상적인 소형 루프 TEM 탐사결과와 새로운 수직구배 TEM 탐사결과 (이상규 등, 1996)를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 수직구배 TEM 탐사결과에서는 기존의 TEM 탐사결과에서 탐지가 불가능한 철제 드럼통이나 배관망의 위치를 매우 정확히 나타내 주고 있다.

5. MT 및 CSMT 탐사

MT 및 CSMT 탐사법은 현존하는 전기, 전자탐사법 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 위하여 10 - 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 있으며, 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 - 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. 그러나 이 방법은 당초 심부탐사를 위하여 개발된 방법이므로 아직까지 국내에서 지반조사에 적용된 사례가 발표된 바 없다. 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 어려

운 전기비저항탐사의 대안으로 자리잡아 가고 있다.

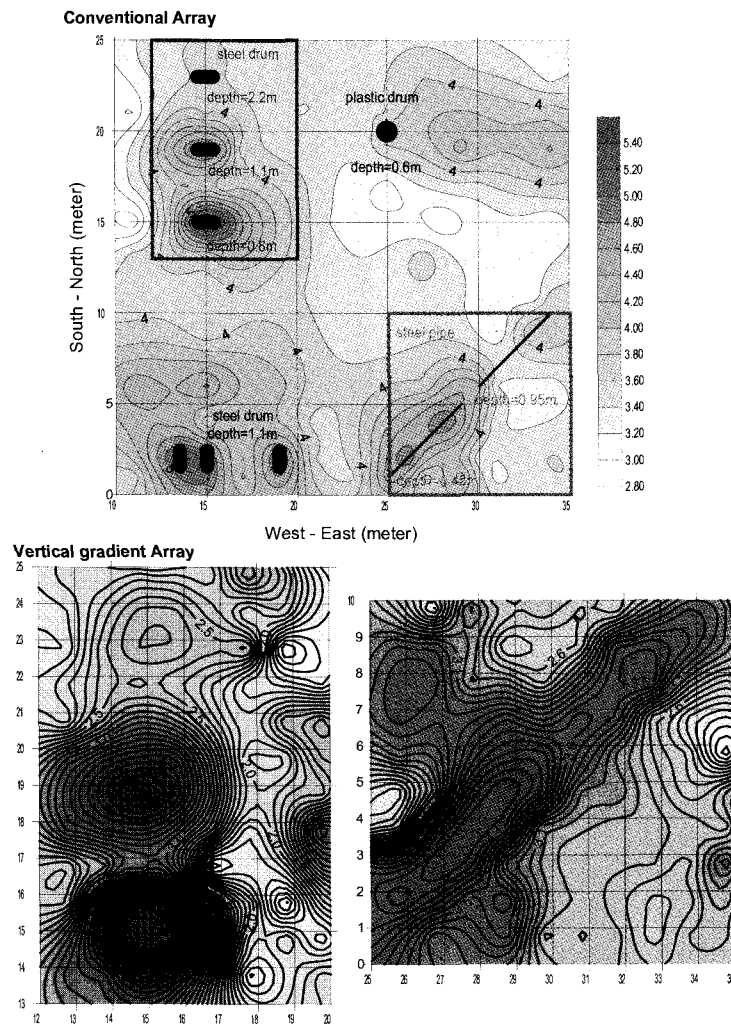
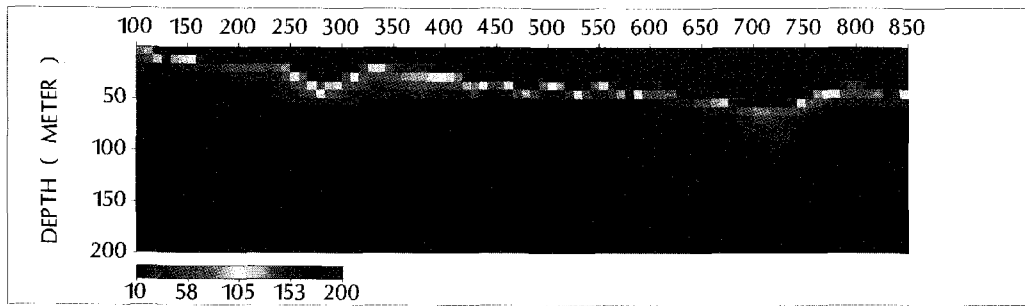
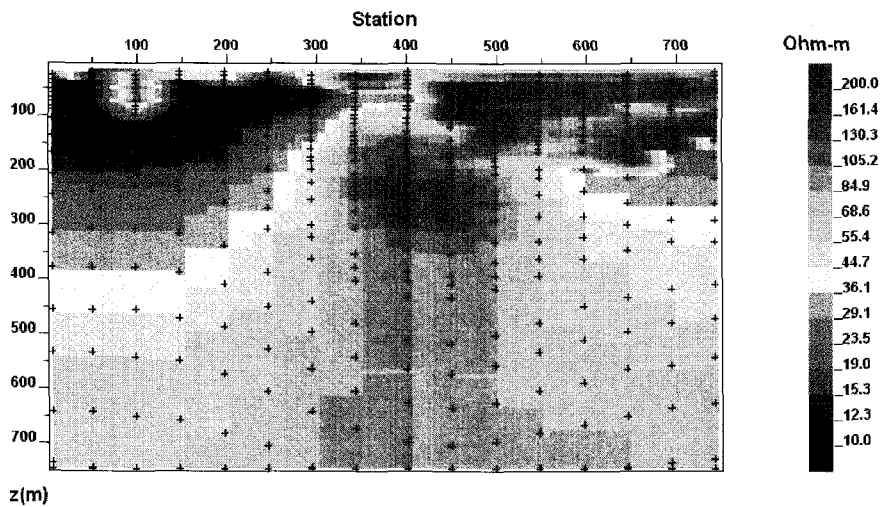


Fig. 4. Results of the conventional array TEM and the vertical gradient array TEM survey for the detection of buried metal conductors (이상규 등, 1996).

Fig. 5는 강원도 모 지역에서 지하수 탐사를 위하여 수행된 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과와 $10 - 10^5$ Hz 대역의 주파수를 사용하는 AMT 탐사 결과를 나타낸 것이다. 전기비저항탐사에서는 천부에 부존하는 전기 전도성 지층으로 인하여 자료획득 자체가 어려웠으며 해석결과에서도 30 m 이상 심도의 지질구조에 대한 아무런 정보를 얻을 수 없었다. 그러나 AMT 탐사는 전도성 지층 상부의 지질구조에 대한 정보는 물론 그 하부의 심부 지질구조에 대한 영상을 잘 보여주고 있다. 이는 전기비저항탐사가 전도성 지층에서 측정되는 전위차가 매우 낮아 자료획득과 해석에 어려움이 있는 데 반하여, AMT 또는 CSMT 탐사법은 전도성 환경 하에서도 사용 주파수를 조절함으로써 매우 효과적으로 지하의 지질구조를 규명할 수 있다는 것을 잘 보여주는 예이다.



(a) dipole-dipole resistivity



(b) AMT

Fig. 5. Images of the resistivity distributions from (a) the dipole-dipole resistivity (b) AMT surveys. The depth of investigation of AMT is much greater than that of the dipole-dipole resistivity method.

6. 전자탐사 토모그래피 (EM tomography)

일반적으로 토목이나 환경분야에 요구되는 정밀탐사를 위해서는 토모그래피 탐사가 주로 이용된다. 전자탐사 토모그래피는 송신원과 수신기를 서로 다른 시추공에 위치시키고, 여러 개의 주파수 및 다양한 송·수신 위치의 조합에 의한 반응을 측정하여 지하의 전기비저항 분포 영상을 획득하는 방법이다. EM 토모그래피는 수 Hz에서 수 MHz까지 주파수를 사용할 수 있으며, 송·수신 시추공 간격, 시추공 사이의 평균 전기전도도, 주변의 잡음 수준 등 다양한 탐사조건에 따라 적정 주파수를 선정하여 사용하게 된다. EM 토모그래피는 전기비저항 토모그래피와 동일하게 조사 대상지역의 전기전도도 분포에 관한 정보를 얻게 되지만, PVC 케이싱이 설치된 시추공에서도 자료의 획득이 가능하며, 전기비저항 토모그래피의 적용이 어려운 전도도가 매우 높은 환경에서도 효과적으로 적용 가능하다. 또한 시추공에 공내수가 없을 경우에도 측정이 용이하다는 점도 빼 놓을 수 없는 EM 토모그래피의 장점이다. 한편 현재 해상도가 가장 뛰어난 것으로 알려진 레이더 토모그래피의 경우 수십 MHz 이상의 고주파를 사용하기 때문에 전도성 매질에서 감쇠가 극심하므로 시추공 간격이 넓은 경우에는

적용이 어렵게 된다. 이러한 경우 EM 토모그래피는 매우 훌륭한 대안이 될 수 있다.

EM 토모그래피는 탄성파, 레이더 및 전기비저항 토모그래피법과 함께 매우 중요한 정밀탐사 기술로 다양한 연구결과가 보고되고 있다 (Alumbaugh and Morrison, 1995; Torres-Verdin and Habashy, 1994; Wilt *et al.*, 1995; 조인기와 심현미, 1998). Fig. 6은 미국 California 중부 유전지대에서 석유 2차 회수율 증대를 위해 실시된 증기 주입 전 및 후에 수행된 EM 토모그래피 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 송수신 시추공 사이의 전기전도도 영상을 잘 나타내고 있으며, 증기 주입 전후의 전기전도도 분포 차이로부터 증기의 전파 방향 및 추이를 해석할 수 있다. 그러나 EM 토모그래피는 다른 지표 전자탐사법과 마찬가지로 아직 국내에서 지반조사에 적용된 바 없다. 이는 EM 토모그래피를 위한 상업용 측정기기가 도입되지 않았기 때문이나, 본 방법의 잠재능력을 고려할 때 조기에 측정기기가 도입될 것이며 매우 중요한 정밀 탐사기술로 부상될 것으로 기대된다.

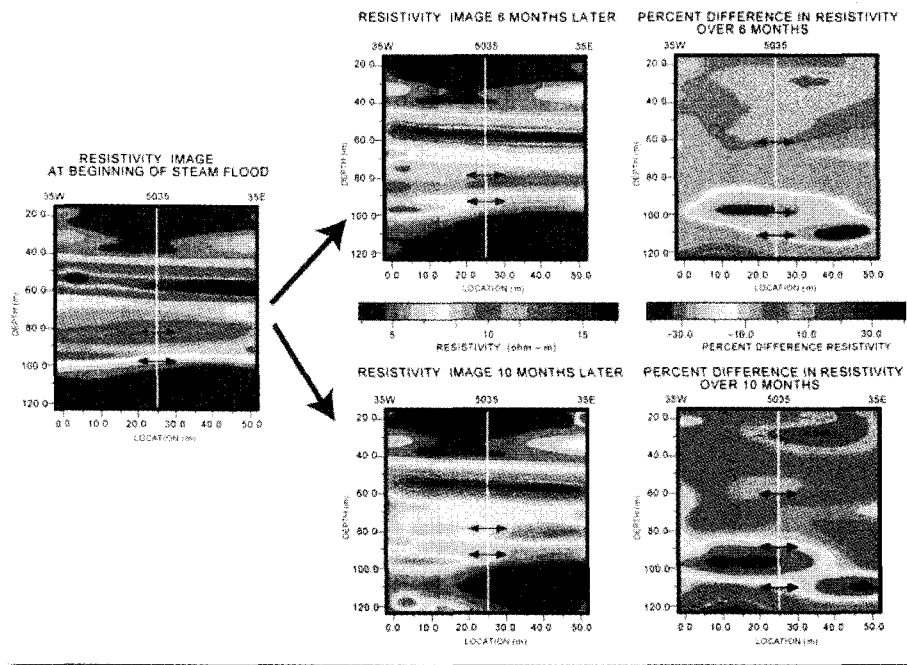


Fig. 6. Conductivity images from crosswell EM tomography before and after steam injection in an oil field, central California, USA (Electromagnetic Instruments, Inc., 1998).

7. 향후 기술동향 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 필요 경비, 기간 등을 고려하여 다양한 선택이 가능하다. 또한 전기비저항탐사나 레이더탐사의 적용이 어려운 여건 하에서 효과적인 대안으로 적용될 수 있다. 이러한 여러 장점에도 불구하고 전자탐사가 지반조사 분야에 아직 널리 보급되지 못한 이유는 전자탐사에 대한 인식부족과 이제까지의 지반조사가 전력선

이 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, 전자탐사에서 잡음억제기술도 급속한 발전을 보이고 있어 전자탐사는 지반조사에 매우 중요한 탐사기술로 자리잡을 것으로 기대된다.

한편 전자탐사 분야에서도 다른 물리탐사 기술과 마찬가지로 3차원 자료획득 및 해석기술에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Zhdanov and Fang, 1996). 전자탐사는 다른 물리탐사 기술에 비하여 비교적 이론이 복잡하여 3차원 해석기술의 개발에 어려움이 있으나 3차원 전자탐사에 관한 지속적인 이론연구와 급속한 컴퓨터의 발달에 힘입어 전자탐사 기술을 이용하여 지하의 3차원 영상의 획득도 조기에 가능해질 것으로 보인다. 따라서 전자탐사는 조만간 정밀 지반조사 기법 중의 하나로 대두될 것으로 기대되며 이를 위해서는 국내 연구진들의 지속적인 노력과 적극적 홍보가 요망된다.

참고문헌

- 민경덕, 권병두, 서정희, 1987, 응용지구물리학, 우성문화사.
- 손호응, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 1999, 지반환경물리탐사, 시그마프레스.
- 이상규, 임무택, 송무영, 김동찬, 1996, 금속성 매설물 탐지에 효과적인 물리탐사: 한국자원공학회 제68회 학술발표회 논문집, 1-6.
- 조인기, 심현미, 1998, 확장된 Born 근사에 의한 EM 토모그래피: 물리탐사, 1, 155-160.
- Electromagnetic Instruments, Inc., 1998, Borehole EM technology, <http://www.emiinc.com>.
- McNeil, J. D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers: TN-6, Geonics Ltd., Canada.
- Nabighian, M. N., Ed., 1988, Electromagnetic methods in applied geophysics-Theory: Vol 1, Soc. Expl. Geophys.
- Nabighian, M. N., Ed., 1991, Electromagnetic methods in applied geophysics-Applications: Vol. 2, Soc. Expl. Geophys.
- 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.