

## 고심도 지반환경 조사 - 비파괴 물리탐사의 적용 (II)

손호용\* · 이승희\*\* · 김형수\*\*\*

\*배재대학교 공과대학 토목환경공학과

\*\*Electromagnetic Instruments Inc.

\*\*\*한국수자원공사 수자원연구소 책임연구원

## Geotechnical Environment Survey (II)

Howoong Shon · Seunghee Lee · Huyng-Soo Kim

### 요 약

지하의 수없이 매설된 지하매설물의 효율적인 관리는 도시의 원활한 운영을 위한 중요과제가 되어가고 있다. 지하 매설물의 위치 및 깊이를 조사하기 위한 지구물리탐사방법으로서 GPR탐사 및 유도전류탐사 등이 주로 적용되고 있으나, 가탐심도가 매우 낮으며, 지하매질이 불균질 하거나 점토, 염분, 자갈 등의 지반 및 전자기적 잡음이 심한 곳에서는 조사가 안 되는 경우가 많다. 본 연구에서는 지반조건 및 고심도 때문에 지하매설물을 탐지할 수 없는 지역에서 지하매설물 탐지를 효율적으로 수행할 수 있는 비파괴적인 전자탐사기법으로서 고주파수대역 전자탐사법을 적용하였으며, 광역상수관이 천부 및 심부에 다수 매설되어 있으나 열악한 지반환경 때문에, 물리탐사방법으로 지하매설물의 탐지가 여의치 않은 지역에 고주파수대역 전자탐사법의 효용성 확인을 위해 적용하였다. 연구결과 기존의 지구물리탐사방법으로는 위치확인을 할 수 없었던 지하매설관에 대해서 고주파수대역 전자탐사법의 적용은 매우 성공적이었으며, 비저항값을 함께 유추할 수 있었다. 따라서 본 고주파수대역 전자탐사법은 고심도 지하매설물의 정밀 지구물리탐사에 효과적으로 적용할 수 있으며, 문화재유물 등의 조사에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 주요어

물리탐사, 지하매설물, 심부, 천부, 고주파수대역 전자탐사

### ABSTRACT

Lots of various utilities are buried under the surface. The effective management of underground utilities is becoming the very important subject for the harmonious administration of the city. Ground Penetrating Radar(GPR) survey including other various underground survey methods, is mainly used to detect the position and depth of buried underground utilities. However, GPR is not applicable, under the circumstances of shallow depth and places, where subsurface materials are inhomogeneous and are composed of clay, salt and gravels. The aim of this study is to overcome these limitations of GPR and other underground surveys. High-frequency electromagnetic (HFEM) method is developed for the non-destructive precise deep surveying of underground utilities. The method is applied in the site where current underground surveys are useless to detect the underground big pipes, because of poor geotechnical environment. As a result, HFEM survey was very successful in detecting the buried shallow and deep underground pipes and in obtaining the geotechnical information, although other underground surveys including GPR were not applicable. Therefore this method is a promising new technique in the lots of fields, such as underground surveying and archaeology.

### Key words

underground surveying, non-destructive, underground utilities, deep, shallow, high-frequency electromagnetic (HFEM) survey

Corresponding Author : Howoong Shon(hshon@mail.pcu.ac.kr)

원고접수일 : 2003년 9월 8일      게재승인일 : 2003년 11월 5일

## 1. 서론

고도의 산업, 정보화 사회가 될수록 지하에 각종 시설물이 매설되게 된다. 즉, 현대화 된 도시일수록 상수도, 하수도, 가스, 난방, 지하도, 지하철 등의 각종 지하매설물들이 도시의 생명선을 유지하게 되었으며, 지상에 설치되었던 전선, 통신선 등도 안전관리를 위하여 지하에 매설되고 있다. 따라서 이러한 지하매설물의 효율적인 관리는 도시의 원활한 운영을 위한 중요 과제가 되어가고 있다. 지하의 각종 매설물을 통합적으로 운영관리하기 위한 공동구가 선진국을 중심으로 보편화되어 가고 있으며, 국내에서도 일부 시행되고는 있으나, 아직은 복잡하게 매설된 다양한 지하 시설물을 효율적으로 관리할 필요가 있다.

효율적인 지하 시설물의 관리를 위해서는 매설물의 위치, 깊이, 형태 및 재질 등이 기본적인 중요 자료가 되며, 이를 데이터베이스 하여야만 한다. 현재 각종 지하매설물의 관리는 각 시설물의 주관 부서에서 담당하고 있어서 통합 운영되지 않고 있는 실정이며, 각 기관에서 관리하고 있는 매설물에 관한 정보, 즉 매설물의 위치 및 깊이 자료 또한 부정확하여 공사 중에 사고가 빈번히 발생하고 있다. 예를 들어, 1994년 서울 북아현동에서 발생한 도시가스 폭발사고, 100여명의 사상자를 낸 대구 도시가스 폭발사고 및 1997년의 서울 공덕동 지하철 공사장에서의 사고로 인한 지중 통신 케이블의 파손사고 등, 수많은 사례가 있다.

지하굴착에 의한 대, 소규모의 사고는 아직도 발생할 가능성이 매우 높다. 이러한 위험은 많은 인명피해 뿐만 아니라 경제적 피해가 크에도 불구하고 이에 대한 합리적인 방재대책이 아직 완벽히 구축되지 못한 결과이다.

한편, 지하 시설물의 매설초기에는 지하시설물의 양이 많지 않았고, 시설물의 노후화 문제점도 거의 없었으나, 시간이 경과함에 따라 시설물의 양적 팽창과 더불어 노후화 문제가 함께 대두되어, 관리의 어려움이 한층 증가되었다.

상기한 바와 같이 각종 지하매설물의 관리주체가 분산되어 있고, 매설도면이 공유되어 있지 않을 뿐만 아니라, 있다 하더라도 대부분의 매설물 위치와 깊이가 잘못 기재되어 있어서 도로 및 굴착공사 중에 많은 인명과 재산의 피해를 가져오는 사고가 빈번히 발생하

고 있다. 이러한 이유로 지하시설물의 정확한 매설위치를 신속히 결정하기 위한 지구물리탐사방법의 개발과 도입은 매우 중요하다(이강원 등, 2003).

지하매설물의 위치 및 깊이를 확인하기 위한 지구물리탐사방법으로는 GPR(Ground Penetrating Radar) 탐사 및 유도전류법을 이용한 조사방법이 국내외적으로 가장 많이 활용되고는 있으나, 지하매질이 매우 불균질하며 점토, 염분, 자갈 등이 많거나 전자기적 잡음이 심한 곳에서는 조사가 안 되는 경우가 빈번하고, 가탐심도(可探深度; skin depth)가 매우 낮아서 일반적으로 5m이상의 심도에 매설된 지중 매설물은 탐사가 안되고 있다(이강원 등, 2003, 손호웅 등, 2000).

본 연구에서는 고심도의 지하매설물 확인을 위한 물리탐사로서, 천부임에도 불구하고 지반환경 때문에 지하매설물을 탐지할 수 없는 지역에서 해상도를 높여 지하매설물을 효과적으로 탐지할 수 있는 비파괴 전자(電磁; electromagnetic)법을 개발, 적용하였다(손호웅 등, 2002). 본 비파괴 전자탐사법의 효용성을 확인하기 위해 광역상수도관이 천부 및 심부에 다수 매설되어 있으나 열악한 지반환경 때문에 기존의 물리탐사방법으로는 천부와 심부의 지하매설물을 정확히 탐지할 수 없는 지역에서(손호웅 등, 2000; 한국공항, 1999), 기존의 다양한 지구물리탐사방법과 함께 고주파수대역 전자탐사법의 효용성과 가능성을 비교 분석하였다(손호웅 등, 2004).

## 2. 연구지역

연구지역은 서울특별시 동작구 노량진동에 위치하고 있으며, Fig. 1의 항공사진에 표시한 바와 같이 서울한강철교 북단의 올림픽대로와 노들길사이에 조성된 조경지로서 양옆의 다짐한 도로와는 달리 단순히 매립하여 조성되었다. 조경지의 지하 천부 및 심부에는  $\emptyset$  2000mm, 2200mm 등의 많은 광역상수관이 매설되어 있으나, 위치 및 깊이는 도면과 일치하지 않는다.

다짐이 안된 토양에 차량교통에 의한 지반진동과 광역상수관에 큰 하중이 걸림에 따라 상수관의 빈번한 파열이 발생하고 있으나, 이들 상수관의 정확한 위치 파악이 선행되어야 파열에 따른 조치를 취할 수 있기 때문에 우선 GPR탐사 및 유도전류법 등을 이용하여

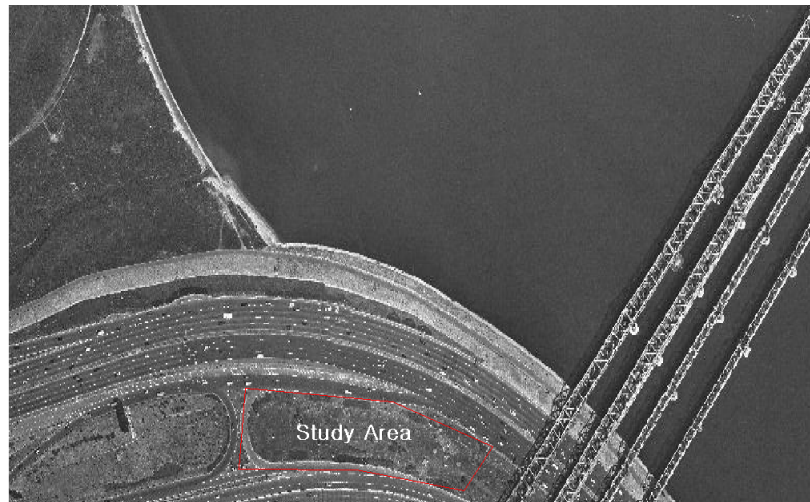


Fig. 1 연구지역의 항공사진

천부와 심부에 매설된 광역상수관을 탐지하기 위한 상기 방법을 수행하였으나, 확인할 수 없었다(한국공항, 1999).

탐지가 안 되는 이유를 알아보기 위하여 일차적으로 연구지역의 지반특성을 조사하기 위하여 흙시료를 시험하였다. 분석결과, 연구지역의 토양은 자갈과 실트질이 주를 이루는 GM으로 분석되었다. 자갈은 전자파 및 탄성파의 산란 및 감쇠를 가중시키는 원인으로 작용하였으며, 실트질 토양은 전자파의 감쇠를 크게 일으키게 되므로, 본 연구지역은 고심도의 고해상 물리탐사를 수행하기에는 열악한 지반환경으로 판단된다.

이러한 지반환경은 연구지역 뿐만 아니라 국내의 천부지반에 널리 분포하고 있기 때문에 정도의 차이만 있을 뿐 기존의 물리탐사방법으로는 고심도 및 열악한 지반환경하에서는 정밀 물리탐사에 한계가 있게 된다.

### 3. 기존 지구물리탐사방법의 적용

대부분의 중요 지하 매설물은 도심지에 위치하게 된다. 도심지는 아스팔트나 콘크리트로 포장되기 때문에 효율적인 지구물리탐사를 위해서는 비파괴적인 방법을 적용해야 한다. 본연구에서는 다양한 비파괴적인 지구물리탐사방법을 적용하였으며, “고심도 지하 매설물의 효율적 탐지-지반조사(I)”에서 살펴보았다. 여기서, 협의의 비파괴적인 방법은 시추나 굴착 등을 사용

하지 않고 지반이나 지하매설물에 관한 정보를 얻는 것이지만, 광의로는 물리탐사를 위하여 시추나 굴착 등의 규모는 아니지만 전극이나 수신기를 접지시키기 위하여 아스팔트나 콘크리트 일부도 손상시키지 않는 것으로 본 논문에서는 정의하였다.

위에서 언급한 바와 같이, 본 연구지역은 고심도의 고해상 물리탐사를 수행하기에는 부적합한 지반환경이다. 이러한 환경 하에서의 효율적인 지구물리탐사방법을 찾기 위하여 기존의 각종 물리탐사방법을 적용하였으며, 광의의 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법을 모두 적용하였으나 협의의 파괴적인 방법은 제외하였다. 즉, 굴착이나 시추에 의한 방법은 지하매설물의 정확한 위치를 알고 있지 않은 상황에서는 그 자체가 지하매설물에 손상을 줄 수 있는 위험성이 있으며, 지하매설물의 탐지에 이런 고가의 방법 적용은 현실적으로 상당한 무리가 있기 때문이다.

본 연구에서는 중력탐사, 자력탐사, GPR탐사, 탄성파 굴절법탐사, 탄성파 반사법탐사, 전기탐사 등의 기존의 지구물리탐사방법을 적용하였으며, 모든 조사는 연구지역 내의 동일 측선에서 실시하였다.

자력탐사 및 중력탐사를 위한 자기장이나 중력장은 포텐셜 장(potential field)으로서, 두 장 사이에는 상관관계가 성립한다. 따라서 자력값과 중력값의 두 측정결과를 비교한 결과, 자력값이 중력값에 비하여 보다 안정적인 것은 중력값의 경우, 측정시의 주변의 차량진동 등을 통제할 수 없었기 때문이다. 한편, 연구지

역의 토질이 매우 불균질하고 매설물의 위치와 깊이에 관한 정보가 충분하지 않기에 modeling을 위한 변수가 부족하거나 모호하므로 중자력탐사 결과로는 어느 위치에 지하매설물이 존재할 것 같다는 추측만이 가능하였다.

GPR탐사는 100MHz의 안테나를 사용한 GPR탐사결과에서 확인 할 수 있는 지하의 2개의 이상체를 제외하고는 다른 주파수의 안테나를 사용한 GPR탐사에서 는 지하의 매설관 탐지가 거의 불가능하였다.

전기탐사는 지하매설물의 위치, 심도 및 크기를 어느 정도 파악할 수 있으나, 분해능이 좋다고는 할 수 없었다. 이를 개선하기 위해서는 전극간격을 좁힐 수 있으나, 전극간격을 좁힐수록 가탐심도는 줄어들기 때문에 전기탐사에는 한계가 있었다. 한편, 본 연구지역 이 차량이 통행하는 차도로 들러 싸여 협소하고 전극을 충분히 전개할 수 없는 관계로 지하에 관한 정보를 제한된 구간에서만 확보할 수 있었다. 지하매설관의 위치, 심도 및 크기 등의 정보가 다른 기존 지구물리 탐사에 비하여 향상된 것을 확인 할 수 있으나, 전극을 아스팔트에 접지시켜야 하는 부수적인 문제가 있었다.

탄성파 굴절법탐사에 의한 지하탐사 결과는 연구지역 지하의 대체적인 지하매질의 구성에 관한 정보를 제공하고는 있으나 지하매설물에 관한 정보는 거의 제

공하고 있지 못하였다. 이유는 본 연구지역의 자갈과 실트의 간극비가 높은 매질로 구성되어 있어서 탄성파의 감쇠가 심하여 지하매설물을 찾을 수 있는 고주파수영역의 탄성파가 거의 상실된 것으로 판단된다. 반사법 탄성파탐사 또한 지하에 많은 포물선이 존재하여 지하매설물의 존재를 생각할 수는 있으나 결론에 이르기에는 무리가 있었다.

#### 4. 고주파수대역 전자탐사에 의한 물리탐사법

지표에서 발신된 전자기장은 지하의 지층 비저항 구조에 따라 다른 수신 전자기장을 유도하게된다. 이러한 유도 전자기장은 발신된 전자기장의 주파수와 지하 지층의 비저항 분포에 따라 변화하게되고 이러한 변화를 감지하여 지하의 지층에 대한 정보를 얻는 것이 전자(電磁; electromagnetics)탐사의 목적이다.

고주파수대역 전자탐사(high frequency electromagnetics; HFEM)는 전자탐사의 일종으로 지표로부터 발신된 전자기장에 의한 2차 전기장의 세기(intensity) 및 위상(phase)을 측정하며, 이와 더불어 유도전류를 함께 측정함으로써, 지하의 비저항 분포를 추정하는 방법이다. Fig. 2는 HFEM탐사 모식도를 보여준다.

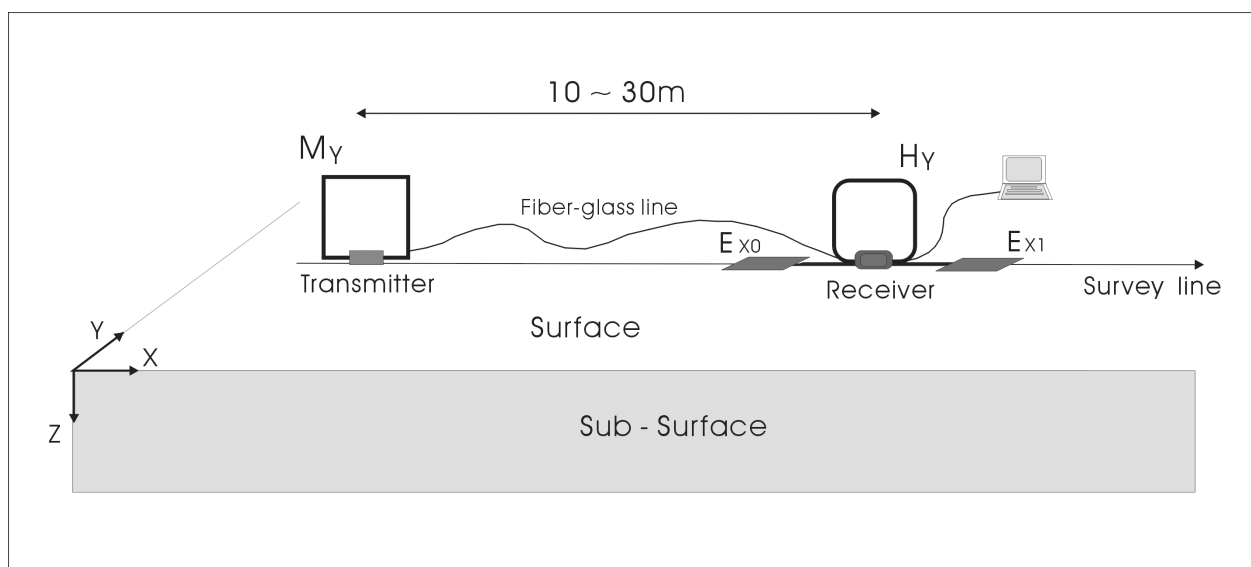


Fig. 2 고주파수대역 전자탐사장비 모식도 및 측량방법

전자기장은 정현파의 형태를 갖으며, 다음의 Maxwell 방정식을 만족한다.

$$\nabla \times E = -i\omega\mu H \quad (8)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + i\omega\epsilon E \quad (9)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (11)$$

여기에서  $\vec{E}$ 는 전기장,  $\vec{H}$ 은 자기장이며,  $i$ 는  $\sqrt{-1}$ 이다. 또한  $\epsilon$ 은 전기유전율(electrical permittivity);  $\mu$ 는 자기투자율(magnetic permeability);  $\sigma$ 는 전기전도도(electrical conductivity)로서 전기비저항(electrical resistivity)  $\rho$ 의 역수이다(손호웅 등, 2000; Cagniard, 1953; Telford *et al.*, 1992).

식 (9)의 우변 첫 번째 항과 두 번째 항은 각각 전도전류(conduction current) 및 변위전류(displacement current)를 나타내며, 이들 전류의 비율은

$$\frac{-\omega\epsilon}{\sigma} \approx \frac{1}{2} \frac{\rho}{T} 10^{-10} \quad (12)$$

로 표현되는데, HFEM 탐사에서 활용되는 일반적인 주파수 대역이 수백 kHz를 넘지 못하고, 지층의 비저항 역시 10,000 ohm-m를 넘지 못하므로 두 번째 항인 변위전류 관련 항은 무시할 수 있으므로, 위의 Maxwell 방정식을 아래와 같은 유사 정상상태(quasi-stationary)로 다룰 수 있다.

$$\nabla \times E = -i\omega\mu H \quad (13)$$

$$\nabla \times H = \sigma E \quad (14)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (15)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (16)$$

위의 Maxwell 방정식들을 각 성분별로 비교하고, y 축 주향방향에 대한 전자기장의 변화를 무시하는 2차원 문제로 단순화시키면,  $E_y$  및  $H_y$ 를 다음의 식 (17) 및 (18) 형태의 분산방정식(diffusion equation)으로 단순화할 수 있다.

$$\nabla^2 E_y + k^2 E_y = 0 \quad (17)$$

$$\nabla^2 H_y + k^2 H_y = 0 \quad (18)$$

여기서  $k^2 = -i\omega\mu\sigma$ 로서  $k$ 는 복소파수(complex wave-number) 또는 전파상수(propagation constant)라고 한다. 이 식들은 HFEM에 대한 2차원 문제의 기본적인 지배방정식이 되며, 미분방정식에 대한 해석을 통해 2차원 지하 비저항 구조로부터 유도되는 전자기장을 계산할 수 있다. 지하 비저항이 균질 등방성 매질로 되어있는 경우, 지표에서 측정되는 직교하는 전기장과 자기장의 비율로부터 간단히 매질의 전기 비저항을 구할 수 있으며, 이때, 전기비저항은 다음의 식 (19)로 표현되며, 측정되는 전기장과 자기장의 위상차는 식 (20)과 같이 표현된다.

$$\rho = \frac{|Z_{xy}|^2}{2\pi f\mu} = \frac{|Z_{yx}|^2}{2\pi f\mu} \quad (19)$$

$$\Phi = Arg(Z_{xy}) = Arg(Z_{yx}) + \pi \quad (20)$$

여기에서 임피던스  $Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = -Z_{yx} = -\frac{E_y}{H_x}$  이다 (Swift, 1987; Torres 등, 1992; Ward 등, 1988; Vozoff, 1991).

실제로 지표에서 특정 주파수에 대해 전기장과 자기장을 측정하는 경우, 지하의 매질을 균질 등방성 매질로 가정하여 일차적인 겉보기 비저항(apparent resistivity)을 구하게 되며, 주파수별로 이들 겉보기 비저항의 변화를 관찰하여 지하 심도별 비저항을 변화를 추정하게 된다. 조사에 활용된 주파수는 고주파일수록 근접 지표에 대한 정보를 부각시키고, 저주파일수록 심부 지표의 정보를 부각시키게 되므로 심도에 대한 지층의 전기 비저항 분포를 관찰할 수 있게된다 (Swift, 1987). Constable 등(1987)은 1차원 층상구조에 대한 지하지층의 비저항과 층 두께에 따라 나타나는 겉보기 비저항과 임피던스 및 위상차이를 다음과 같이 설명하고 있다.

$$\rho_a = 2\pi f\mu c_1^2 \quad (21)$$

$$\Phi = \tan^{-1} \left( \frac{Re(c_1)}{-Im(c_1)} \right) \quad (22)$$

여기서  $c_1$ 은  $2\pi f\mu Z$ 이며,  $c_1$ 은 아래의 귀납관계(recursive relations)에 의해 결정되어 진다. 즉,

Results of TM Mode by HFEM in the Nearby Han-River

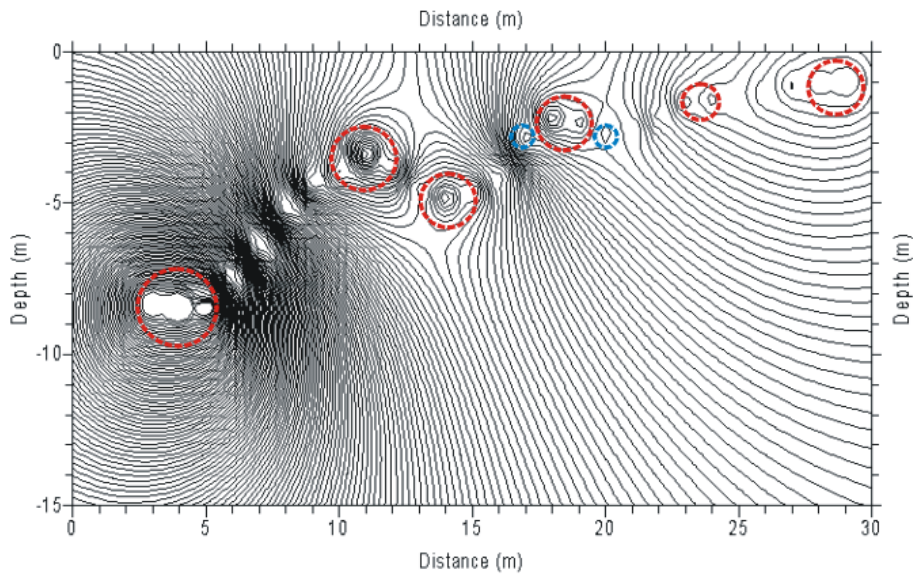


Fig. 3 고주파수대역 전자탐사 결과

$$\begin{aligned}
 c_{i-1} &= \frac{1}{k_{i-1}} \frac{(k_{n-1} c_n + 1) + (k_{n-1} c_n - 1) \exp(-2 k_{n-1} t_{n-1})}{(k_{n-1} c_n + 1) - (k_{n-1} c_n - 1) \exp(-2 k_{n-1} t_{n-1})} \\
 c_{i-1} &= \frac{1}{k_{i-1}} \frac{(k_{n-1} c_n + 1) + (k_{n-1} c_n - 1) \exp(-2 k_{n-1} t_{n-1})}{(k_{n-1} c_n + 1) - (k_{n-1} c_n - 1) \exp(-2 k_{n-1} t_{n-1})} \\
 c_n &= \frac{1}{k_n}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

여기서  $k_j = \sqrt{\frac{2\pi\mu f}{\rho_j}}$  이며,  $\rho_j$ 는 j번째 층의 비저항이며,  $t_j$ 는 j번째 층의 두께이다.

결국, 주파수별로 길보기 비저항의 분포와 위상 차이를 측정하게 되면, 지하의 비저항 분포를 조사할 수 있게된다. 최근 연구, 개발된 HFEM탐사법은 지하정보를 극대화하기 위하여 상기한 바와 같이 전기장, 즉 전위차를 측정한다. 기존의 전기장 측정을 위해서는 전극을 땅에 접지시켜야 하므로 접지에 시간이 걸리고, 지반상황에 따라서는 접지가 어렵거나 불가능한 경우가 발생한다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 HFEM탐사법은 비접촉 용량전극(capacitive-coupled electrode)을 채용하여 측정시간을 대폭 줄일 수 있었으며, 콘크리트나 아스팔트로 포장되어 접지가 어려운 지역에서도 탐사가 가능한 장점을 가지고 있다. HFEM

탐사는 주파수대역 탐사이며, 인공적으로 에너지원(源)을 방출하는 능동적인(active) 탐사방법으로서 주파수 영역은 2MHz~4MHz이며 가탐심도는 약 30m 정도이다. 또한 중첩(stack)에 의해 고압선 등에 의한 잡음을 감소시킬 수 있다. 지하의 매질물 탐사를 위해 널리 사용되고 있는 레이더 탐사는 가탐심도가 실제로 5-10m 내외로서, 천부의 정보만을 제공한다(손호웅 등, 2002). 따라서 HFEM탐사는 GPR탐사의 보완적인 기능을 하게되면 자료해석의 정도가 높아질 것으로 기대된다. 한편, HFEM탐사 결과로부터 비저항 분포, 즉 지반상태를 파악할 수 있으므로, 지하매질물, 지반조사 및 유적지 조사 등에 유용하게 적용할 수 있다.

Fig. 3은 HFEM탐사에 의해 얻은 탐사결과로서 측선상에서 30m만 실시하였으며, 15m심도까지 조사하



였다. 고주파수대역인 관계로 신속한 조사가 가능하며, 100MHz를 이용한 GPR탐사로 2m에 깊이에 있는 매설관 2개 정도를 겨우 파악할 수 있었으나, HFEM탐사에서는 모든 매설관을 탐지할 수 있었으며 관경도 유추할 수 있었다. 특히, 좋은 조건 하에서도 기존의 물리탐사법으로는 8~9m이상의 심도의 매설관을 찾기가 힘들으나 본 조사에서는 가능한 것을 확인할 수 있었다. 그림에서 볼 수 있듯이 GPR에서 볼 수 있었던 축선 좌측 절반은 매우 교란되고 다짐이 안된 토양으로 구성되어 있는데 비하여, 우측 절반은 어느 정도 다짐이 된 토양임을 보여주는 양상을 잘 보여주고 있다.

## 5. 결 론

지하에 매설된 각종 시설물의 위치 및 깊이를 조사하기 위한 지구물리탐사 방법으로서 GPR탐사법이 많이 활용되고 있으며, 표 1에 요약한 바와 같이, 이외에도 많은 탐사방법들이 있으나, 가탐심도가 낮으며, 지하매질에 많은 제약을 받는다. 본 연구에서는 이러한 기존의 물리탐사 방법의 제약을 극복하고자, 효과적으로 지하매설물을 탐지할 수 있는 새로운 비파괴 전자탐사법을 개발 적용하였다.

기존의 물리탐사 방법의 제약을 극복하고자, 본 연구에서는 고심도 정밀 지구물리탐사에 효과적으로 지하매설물을 탐지할 수 방법으로서 고주파수대역 전자탐사를 적용하였다. 고주파수대역 전자탐사는 주파수대역 탐사이며, 인공적으로 에너지원(源)을 방출하는 능동적인 탐사방법으로서, 주파수 영역은 2MHz~4MHz이며 가탐심도는 약 30m 정도의 고심도를 탐사할 수 있다. 고주파대역 전자탐사에서는 지하정보를 극대화하기 위하여 서로 수직인 전기장과 자기장을 측정하며, 측정 하부의 수직적 전기비저항 분포를 해석한다. 전기장을 측정하기 위한 전기탐사에서는 전극을 땅에 접지시켜야 하지만, 비접촉 용량전극을 채택하여 측정 시간을 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트, 아스팔트 및 잡석으로 포장된 지역에서도 조사가 용이하며, 중첩에 의해 고압선 등에 의한 잡음을 대폭 감소시킬 수 있게 되었다.

연구지역에서의 적용결과, 다른 물리탐사 방법으로는 발견할 수 없었던 지하매설관에 대해서 본 고주파

수대역 전자탐사는 성공적인 결과를 얻을 수 있었으며, 지반환경을 유추할 수 있었다. 따라서 본 연구방법을 지하매설물의 위치 및 깊이확인을 위한 정밀 물리탐사 및 문화 유적지의 발굴 등에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구지원비(KRF-2000-DP0434)에 의해 이루어졌다. 각종 탐사자료의 취득과 분석에 도움을 주신 삼보지오텍의 김병철 사장님과 조사 및 자료처리에 많은 도움을 준 배재대학교 토목환경공학과 지반조사공학연구실의 연구원들에게 감사사를 드린다.

## 참고문헌

- 김정호 (1987), 이차원 전기비저항 탐사자료의 역산, 박사학위논문, 서울대학교.
- 민경덕, 서정희, 권병두 (1994), 응용지구물리학, 우성문화사, 252 p.
- 박상규 (1998), GPR탐사해석시 흙의 유전상수 결정방법에 관한 연구, 석사학위논문, 건국대학교.
- 손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수 (2000), 지반환경물리탐사, 시그마프레스.
- 손호웅, 이승희, 이강원 (2002) 비파괴 전자탐사에 의한 지하매설물의 정밀탐지, 비파괴검사학회지, 22, 3, pp. 275-283.
- 이강원, 손호웅 (2003), 지하시설물조사 및 탐사, 청문각 (in printing).
- 한국공항 (1999), 고심도 광역상수관로 탐사결과 보고, 결과보고서, 한국공항(주) GIS사업본부.
- Annan, A. P. (1992), Ground Penetrating Radar Workshop, GPR Workshop.
- Burger, H. R. (1992), Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface, Prentice-Hall.
- Cagniard, L. (1953), Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical exploration, Geophysics, 18.
- Davis, J. L., Annan, A. P. (1989), Ground Penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geophy. Prosp. 37.
- Dobrin, M. B., Savit, C. H. (1988), Introduction to Geophysical Prospecting, 4th ed, McGraw-Hill.
- Loke, M. H. (1999), Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using

the least-squares method, Geomatics, INC.  
Nichols, E. A., Morrison H. F., Lee, S. (1994), Controlled source magnetotellurics for ground water, Abstr, 64th Annu, Mtg., Soc. Explor. Geophys., pp. 553-554.  
Placky, G. J., Resistivity Characteristics of Geologic Targets, in Nabighian, M. N. (Ed.), Electromagnetic methods in Applied Geophysics 1., pp. 53-129.  
Smith, D. G., Jol, H. M., "Ground penetrating radar investigation of a lake Bonneville delta, provo level, Brigham Cith, Utah", Geology, Vol.20, 1992.  
Swift, C. M.(1987), A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States, in Nabighian, M.N. (Ed.), Electromagnetic methods in Applied

Geophysics 1. SEG.  
Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1992), Applied Geophysics, 2nd Ed, Cambridge Univ. Press.  
Torres, V. C., Bostick Jr., F.X. (1992), Principles of spatial surface electric field filtering in magnetotellurics: electromagnetic array profiling(EMAP), Geophysics, 57, pp. 603-622.  
Ward, S. H., Homann, G. W. (1988), Electromagnetic theory for geophysical plication, in Nabighian, M. N. (Ed.), Electromagnetic methods in Applied Geophysics 1, SEG.  
Vozoff, K. (1991), The magnetotelluric method, in Nabighian, M. N.(Ed.), Electromagnetic method in Applied Geophysics, 2B. Society of Exploration geophysicists, pp. 641-711.  
Yilmaz, O., Seismic Data Processing, SEG.

---