

## 비파괴 전자탐사에 의한 지하 매설물의 정밀탐지

### Precise Detection of Buried Underground Utilities by Non-destructive Electromagnetic Survey

손호웅\*<sup>†</sup>, 이승희\*\*, 이강원\*\*\*

Howoong Shon\*<sup>†</sup>, Seunghee Lee\*\* and Kang Won Lee\*\*\*

초 록 지하에 매설된 각종 시설물의 위치 및 깊이를 조사하기 위한 비파괴적인 조사방법으로 GPR(Ground Penetrating Radar; 지하투과레이더; 지하레이더) 탐사법이 국내외적으로 많이 활용되고 있으나, 가탐심도가 일반적으로 5m 이내로서 낮으며, 지하매질이 불균질하거나 점토, 염분, 자갈 등이 많은 곳 및 주변의 전자기적 잡음이 심한 곳에서는 조사가 안 되는 경우가 많다. 본 연구에서는 이러한 비파괴 GPR 탐사법의 제약을 극복하고자 일반적인 매설심도(물리탐사적으로는 얇은 곳)에 위치한 지하매설물임에도 불구하고 탐지가 안 되는 지역을 선정하여, 토질분석에 의해 탐사가 되지 않는 원인구명과 함께 효과적으로 지하매설물을 탐지할 수 있는 새로운 비파괴 전자(電磁)탐사법을 제시하였다.

본 연구에서는 2kHz-4MHz 대역의 지하조사를 위한 고주파수대역 전자탐사법을 개발, 적용하였다. 고주파수대역 전자탐사는 주파수대역 탐사이며, 인공적으로 에너지원(源)을 방출하는 능동적인 탐사법으로서 가탐심도는 약 30m 정도이다. 서로 수직인 전기장과 자기장을 측정하여 임피던스를 계산하며, 이로부터 측정 하부의 수직적인 전기비저항 분포를 해석하게 된다. 또한, 비점촉 용량전극을 채택하여 측정시간을 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트, 아스팔트 및 잡석으로 포장된 지역에서도 조사가 용이하며, 신호증폭에 의해 고압선 등에 의한 잡음을 감소시킬 수 있게 되었다. 다른 탐사방법으로는 발견할 수 없었던 지하매설관에 대해서 본 고주파수대역 전자탐사를 성공적으로 정밀하게 적용할 수 있었다. 본 연구 결과를 지하매설물의 위치 및 깊이 확인을 위한 정밀 지하측량, 지반조사 및 문화 유적지조사 등에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

**주요용어:** 지하매설물, 지하투과레이더, 고주파수대역 전자탐사, 토질시험, 감쇠, 가탐심도

**Abstract** To detect the position and depth of buried underground utilities, method of Ground Penetrating Radar(GPR) survey is the most commonly used. However, the skin-depth of GPR is very shallow, and in the places where subsurface materials are not homogeneous and are composed of clays and/or salts and gravels, GPR method has limitations in application and interpretation.

The aim of this study is to overcome these limitations of GPR survey. For this purpose the site where the GPR survey is unsuccessful to detect the underground big pipes is selected, and soil tests were conducted to confirm the reason why GPR method was not applicable. Non-destructive high-frequency electromagnetic(HFEM) survey was newly developed and was applied in the study area to prove the effectiveness of this new technique. The frequency ranges 2kHz~4MHz and the skin depth is about 30m. The HFEM measures the electric field and magnetic field per-

pendicular to each other to get the impedance from which vertical electric resistivity distribution at the measured point can be deduced. By adopting the capacitive coupled electrodes, it can make the measuring time shorter, and can be applied to the places covered by asphalt and/or concrete. In addition to the above mentioned advantages, noise due to high-voltage power line is much reduced by stacking the signals. As a result, the HFEM was successful in detecting the buried underground objects. Therefore this method is a promising new technique that can be applied in the lots of fields, such as geotechnical and archaeological surveys.

**Keywords:** buried objects, ground penetrating radar, high frequency electromagnetic survey, soil analysis, attenuation, skin depth

## 1. 서 론

고도화된 산업 및 정보화 사회가 될수록 지하에 각종 매설물이 설치되게 된다. 즉, 현대화된 도시는 상수도, 하수도, 가스, 난방, 지하도, 지하철 등의 각종 시설물들이 도시의 생명선을 유지하게 되며, 지상에 설치되었던 전선, 통신선 등도 안전과 관리측면에서 지하에 매설되게 되었다. 이러한 각종 지하매설물을 통합운영관리하기 위한 공동구가 선진국에서는 보편화되어 있으며, 국내에서도 일부 시행되고 있으나, 아직은 과정 중에 있으므로, 현재로서는 이러한 복잡하고 다양한 지하 매설물의 관리는 매우 중요하다고 할 수 있다.

지하에 매설된 시설물의 효율적인 관리를 위해서는 시설물의 위치, 깊이 및 형태 등이 기본적인 중요자료가 되며, 이들 자료를 데이터베이스화하여야만 지하시설물의 종합관리를 효율적으로 수행할 수 있게 된다[1].

현재의 각종 지하매설물의 관리주체가 다양화되어 있으며, 각 기관의 지하매설물에 관한 정보가 공유되지 않는 경우가 많기 때문에 종합적으로 통합 운영되지 않고 있는 실정이다. 또한, 각 관리기관에서의 매설물의 지하 정보(위치, 깊이, 재질, 관경 등) 자체도 매우 부정확한 것 또한 현실이다.

이러한 이유들로 인하여 1994년 말의 서울 북아현동에서 발생한 도시가스 폭발사고, 100여명의 사상자를 낸 대구 도시가스 폭발사고 및 1997년의 서울 마포구 공덕동 로터리 지하철공사장에서의 사고로 인한 지중통신케이블 1천5백회선 1개, 1천8백회선 2개, 2천4백회선 2개, 광케이블 2개가 파손되는 사고를 비롯한 대, 소규모의 지하굴착에 의한 심각한 사고들이 일어났으며, 언제나 이런 유형의 중대형 사고가 발생할 높은 가능성을 안고 있는 것이다. 이러한 사고는 경제적 피해가 매우 크고, 많은 인명

피해를 야기하는데 비하여, 그에 대한 합리적인 방재대책이 완벽하게 구축되지 못한 결과이다.

한편, 도시 시설물의 매설 초기에는 지하시설물의 양이 많지 않았고, 시설물의 노후화 문제점이 크게 발생하지 않았으나, 시간경과에 따라 시설물의 양적 팽창과 더불어 시설물의 노후화 문제가 함께 대두되어, 관리의 어려움이 점차 증가되고 있다.

상기한 바와 같이 각종 지하매설물의 관리주체가 각 기관으로 분산, 관리되고 있고, 매설도면이 공유되어 있지 않으며, 도면자체도 대부분 매설물의 위치와 깊이가 잘못 기재되어 있어서 도로 및 터널공사 등의 굴착공사 중에 많은 인명과 재산의 피해를 가져오는 사고가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 이유로 지하매설물의 정확한 매설위치를 신속히 결정하기 위한 비파괴 조사방법의 개발과 도입은 매우 중요하다고 할 수 있다.

지하매설물의 정확한 위치확인을 위해서는 파괴적인 방법으로서 굴착에 의한 확인이 가장 정확하지만, 과도한 굴착비용과 굴착을 위한 도로차단에 따른 엄청난 사회간접비용의 손실 및 굴착도중 발생할 수 있는 지하매설물의 파손에 의한 경제적, 인명손실 가능성 때문에 긴급한 상황을 제외하고는 비파괴적인 방법을 사용하여야만 한다[1].

지하매설물의 위치 및 깊이를 조사하기 위한 비파괴적인 조사방법으로는 GPR(Ground Penetrating Radar; 지표투과레이다 혹은 지하레이다) 탐사법 및 유도전류법을 이용한 조사방법이 국내외적으로 가장 많이 활용되고 있다. 그러나 GPR탐사법 등은 일반적으로 5m내외의 심도까지 탐사할 수 있으며, 경험적으로 정확한 해석은 이보다 낮은 2-3m 정도만 가능하다. 그러나 실제 지하매설물은 심도 10m 정도에도 존재하므로 지하매설물의 위치와 깊이를 탐지하기 위한 GPR의 가탐심도(可探深度; skin depth)는 매우 낮다고 할 수 있다. 한편, 지하매질이 매우 불균

질하거나 점토, 염분, 자갈 등이 많은 곳 및 주변의 전자 기적 잡음이 심한 곳에서는 조사가 안 되는 경우가 많다.

본 연구에서는 이러한 비파괴검사의 제약을 극복하고자 얇은 심도의 지하매설물임에도 불구하고 탐지가 안 되는 지역을 선정하여, 토질분석을 통한 불탐(不探)원인의 규명과 함께 효과적으로 지하매설물을 탐지할 수 있는 새로운 비파괴 전자(電磁 electromagnetic)탐사법을 제시하고자 하였다.

## 2. 연구지역

연구지역은 서울특별시 동작구에 위치하고 있으며, Fig. 1 (a)의 항공사진에 표시한 바와 같이 서울 한강철교 북단의 올림픽대로와 노들길사이에 조성된 조경지로서 양옆의 다잡한 도로와는 달리 단순히 매립하여 조성되었다. 조경지의 지하 2~8m의 심도에는  $\phi 2200\text{mm}$ , 2800mm의 광역상수관이 다수 매설되어 있으나, 정확한 위치 및 깊이는 알려져 있지 않다.

다잡이 안된 토양에 차량교통에 의한 지반진동과 광역상수관의 큰 하중이 작용함에 따라 상수관의 빈번한 파열이 발생하고 있으나, 이 들 상수관의 정확한 위치 파악이 선행되어야 파열에 따른 신속한 조치를 취할 수 있기에 많은 탐사방법을 이 지역에 적용하였으나, 얇은 심도

임에도 불구하고 만족할 만한 결과를 얻을 수 없었다[2].

## 3. GPR탐사법의 적용

### 3.1. GPR탐사법

GPR탐사법은 10MHz~수GHz 주파수 대역의 전자기파를 이용하여 천부의 지하구조를 파악하는 방법으로서, 짧은 파장의 전자기파를 사용하므로 다른 탐사법에 비하여 분해능이 높으며, 매질간 유전율 차이에 의한 전자기파의 반사와 회절현상 등을 측정하고 이를 해석하여 지하구조를 파악한다[3]. GPR탐사법의 가장 큰 장점은 다른 탐사 방법에 비하여 사용이 간편하고, 고주파수의 전자파를 사용하므로 분해능이 상대적으로 높은 비파괴 탐사법이다[3].

GPR탐사법은 개발된 지 20~30년 된 비교적 최근의 기법이며 탐사심도가 얇은 환경오염조사, 지반조사 또는 구조물의 비파괴 검사분야에 뛰어난 적용성을 가지는 탐사법이다. GPR탐사법은 고주파수대역의 전자기파를 송신원으로 사용하므로 빙하지대, 사암, 기반암 또는 순수한 물과 같이 매질의 전기전도도가 낮은 지역에서 가장 큰 효율을 나타내며, 전기전도도가 큰 매질인 점토층이나 염수 등에서는 전자기파의 감쇠특성으로 인하여 적용이 어렵다[3-7].

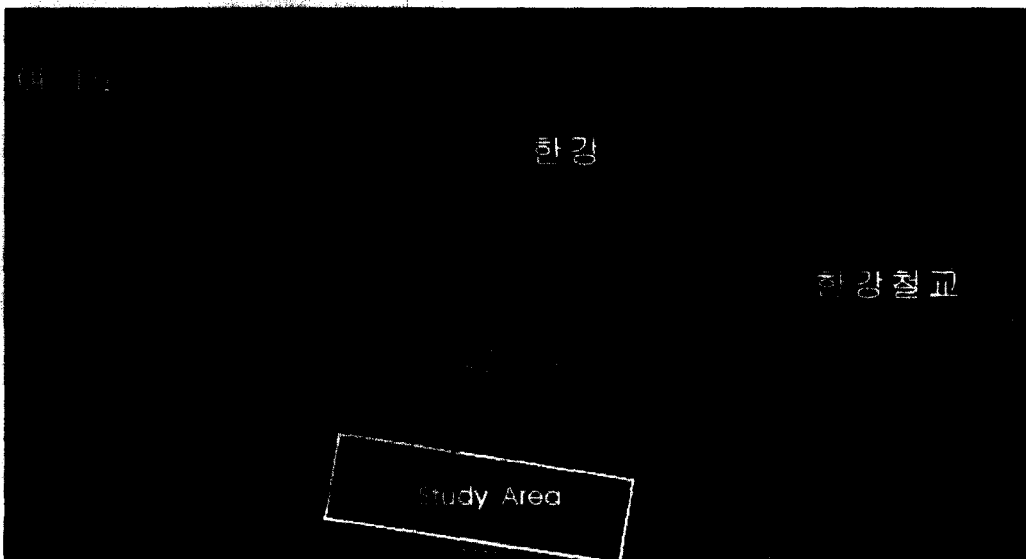


Fig. 1 Aerial photograph of the study area. The study area is located nearby Han River in Seoul, Korea. Rail road in the right side is the rail-road bridge of Han River

GPR탐사는 10MHz~수GHz의 주파수 범위 중, 특정 중심주파수를 사용한다. 10MHz~GHz의 고주파수대역은 전도전류에 비해 변위전류가 우세한 전파영역에 속하게 되어 전자기장의 거동은 파동방정식의 지배를 받는다. 전파영역에서 레이다파의 거동특성 중, 주된 관심은 감쇠도 및 속도이다. 평면 전자파를 가정할 경우 전파영역에서 감쇠상수 및 위상상수는 다음과 같이 주어진다[3].

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (\text{dB/m}), \quad \beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (\text{rad/m}) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 전기전도도(S/m),  $\epsilon$ 은 유전율(F/m),  $\mu$ 는 투자율(H/m),  $\omega$ 는 각주파수이다.

따라서 레이다파는 매질의 전도도가 클수록, 유전율이 작을수록 감쇠가 심하며 주파수에 무관하다.

그러나 100MHz 이상의 대역에서는 소위 10GHz에서 발생하는 물 이완효과에 의해 감쇠상수가 급격히 증가하므로 100MHz 이상의 주파수를 사용하는 GPR탐사기의 가탐심도는 급격히 작아진다[5].

한편, 지하를 구성하는 암석의 투자율을 진공에서의 값과 같다고 가정하면( $\mu = \mu_0$ ), 레이다파의 속도는

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{m/ns}) \quad (2)$$

가 되어 레이다파의 전파속도는 주파수에 무관하며 단지 매질의 유전율에 좌우됨을 알 수 있다. 여기서,  $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ 로 상대 유전율,  $c$ 는 진공에서의 전자기파의 속도로 0.3m/ns이다.

한편, 레이다파의 파장은

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{m}) \quad (3)$$

이다. 여기서, 주파수  $f$ 의 단위는 MHz이다.

지하를 구성하는 암석의 상대 유전율은 일반적으로 3~30의 범위내의 값을 가지므로 레이다파의 속도는 0.06~0.175m/ns이다. 그러나 물의 상대 유전율은 80으로 다른 물질에 비하여 매우 크므로 지하 매질내의 수분 함량은 레이다파의 거동에 큰 영향을 미치게 된다[3].

### 3.2. GPR탐사법의 적용

GPR탐사를 Fig. 1의 연구지역에서 좌측 끝에서 우측 끝으로의 횡단측선에서 실시하였으며, 캐나다 Sensors and Software사의 PulseEKKO GPR을 사용하였다. 225,

450, 900MHz의 기본 주파수외에 100MHz의 GeoRadar탐사를 수행하였다. GPR탐사는 측선의 좌측에서 우측으로 진행되었으므로, GPR탐사 단면도는 좌측이 남서쪽이 되며 우측이 북동쪽이 된다.

Fig. 2는 GPR탐사 결과단면으로서 주파수가 높은 안테나를 사용할수록 가탐심도가 낮아지며 해석 가능한 심도도 낮아지는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 해석 가능한 심도가 급격히 낮은 것은 이 지역의 토질이 실트와 자갈 등, GPR탐사에 유리하지 않은 매질로 구성되어 있기 때문이다. GPR탐사 결과단면의 전체적인 양상은, 특히

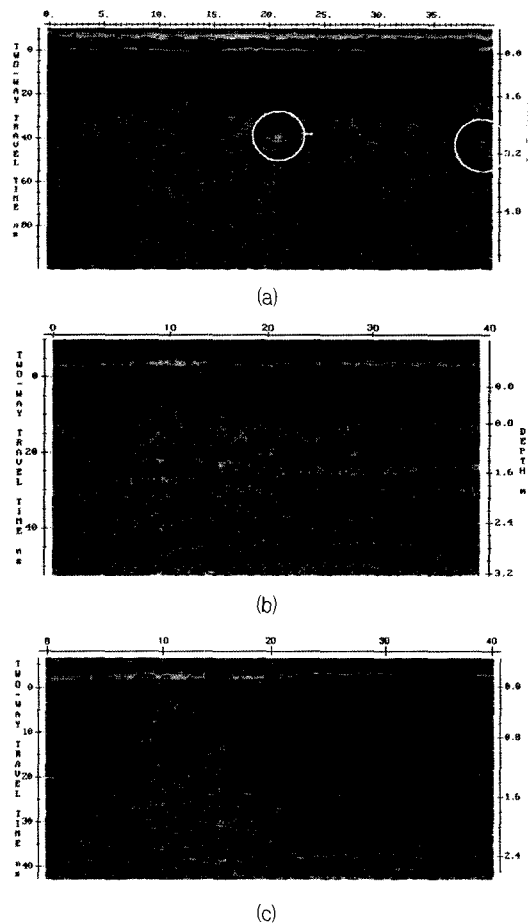


Fig. 2 Cross-section of subsurface achieved by GPR survey. In this study, PulseEKKO GPR made by Sensors and Software, Canada was used. Results are shown, used by (a)100, (b)225, (c)450, and (d)900 MHz antennas. Circles in (a) are the expected pipes in the study area.

Fig. 2 (c)의 450MHz의 안테나를 사용한 GPR탐사결과가 보여 주듯이, 연구지역의 서쪽 절반은 매우 교란되고 다짐이 안된 토양으로 구성되어 있는데 비하여, 동쪽 절반은 어느 정도 다짐이 된 토양임을 보여주고 있다. 그러나 연구지역의 동쪽 절반도 Fig. 2 (c)와 (d)의 450MHz 및 900MHz의 안테나를 사용한 GPR탐사결과에서 보는 바와 같이 약 40~50cm심도에 자갈들이 있음을 보여주는 포물선들이 있다.

Fig. 2 (a)의 100MHz의 안테나를 사용한 GPR탐사결과에서 원(圓)으로 표시한 2개의 이상체를 제외하고는 다른 주파수의 안테나를 사용한 GPR탐사에서는 지하의 상수관 탐지가 거의 불가능한 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 연구지역의 토질분석

본 연구지역에서 상기한 GPR탐사법 및 유도전류탐사법 등의 비파괴검사에 의한 지하 매설관 측, 직경  $\Phi 2200$ ,  $\Phi 2800$ mm의 광역상수관 탐지에 적용하였으나, 지중매설물의 위치 및 깊이를 확인할 수가 없어서, 그 원인을 찾아보기 위하여 본 연구지역의 지반특성을 조사하였다. 지반은 다짐하지 않은 흙으로 구성되어 있으며, 3개의 흙시료를 채취하였다. 시료 1과 시료 2는 교란시료이며, 시료 3은 불교란 시료이다.

Table 1 (a)는 각 체(sieve)에 대한 누가통과율이며, 이를 그래프로 도시한 것이 Fig. 3이다. 입경의 분포는 자갈과 실트질 모래가 주를 이루고 있는 것을 확인할 수 있다. Table 1 (b)의  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ 은 각각 누가통과율 10%, 30%, 60%에 해당하는 입경(mm)이다. Table 1 (c)는 시료의 균등계수(coefficient of uniformity;  $C_u$ )와 곡률계수(coefficient of curvature;  $C_g$ ) 값으로서, 다음과 같이 정의된다[8,9].

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (4)$$

$$C_g = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}} \quad (5)$$

균등계수 ( $C_u$ )는 모래의 경우 6보다 크고 자갈의 경우 4보다 크면 입도분포가 좋으며(Well graded), 곡률계수 ( $C_g$ )는 1과 3사이이면 입도가 좋다. 시료 1의 경우,  $C_u$ 가 6보다는 크나  $C_g$ 는 1과 3사이에 속하지 않으므로 입도가 양호하지 않다. 시료 2는  $C_u$ 가 6보다는 크고  $C_g$

는 1과 3사이에 속하므로 입도가 양호하다. 시료 3은 시료 1과 비슷한 결과를 보여주고 있다. Table 1 (d)는 각 시료의 함수비(water content;  $\omega_n$ )를 나타낸 것으로서, 각 시료는 11~12%의 거의 동일한 함수비를 보여주고 있다. Table 1 (e)는 각 시료의 비중(specific gravity;  $G_s$ )을 나타낸 것으로서, 2.72정도의 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 위의 토질시험 결과를 토대로, 통일분류법(USCS)에 의해 흙을 분류한 결과, 모든 시료가 GM(Gravel & silty)으로 판정되었다.

시료 3은 불교란 시료이므로 Table 2의 결과를 추가로 구할 수 있었다. 그 결과는 습윤단위중량(wet density;  $\gamma_t$ ) 1.938 [ $t/m^3$ ], 건조단위중량(dry density;  $\gamma_d$ ) 1.733 [ $t/m^3$ ], 간극비(void ratio) 0.57, 포화도(degree of saturation) 56.3의 값을 얻었다.

시료 3의 경우는 불교란 시료이므로 다른 시료들보다 대상지역의 환경과 가장 비슷하다고 할 수 있으므로, 연구지역의 지반특성 파악에 있어서 시료 3에 가중치를 주어야 할 것으로 판단된다.

상기한 분석결과, 연구지역의 토양은 주로 자갈과 실트질로 구성된 GM으로 분석되었다. 자갈은 전자파의 산란을 가중시키는 원인으로서 작용하였으며, 전기전도도가 큰 매질인 실트질 토양에서는 전자기파의 큰 감쇠를 일으킨 것으로 판단된다[3,5,6]. 따라서 이러한 토질특성이 GPR탐사법과 같은 비파괴검사방법의 적용을 어렵게 한 것으로 판단된다.

이러한 토질은 연구지역에만 한정되는 것이 아니라 아스팔트로 포장된 도심지의 지하에 거의 유사하게 분포되었으므로 일부 경우를 제외하고는 비파괴검사를 위한 GPR탐사법의 적용에 한계가 있게 되어 일반적으로 가탐심도가 매우 낮아져서 현실적인 적용이 불가능하거나 분해능이 낮아져서 지하매설물의 위치확인이 힘들어지게 된다.

#### 5. 고주파수대역 전자탐사법의 적용

교류전류를 루프(loop)에 흘려주면 전자기장이 발생한다. 이러한 1차 전자기장(primary field)을 송신원(transmitter)으로 하여 전파시키면, 지하에 전파되면서 양도체(conductor)를 만나면 양도체에 유도전류(induction current)가 발생하게 된다. 이 유도전류에 의해 전자기장이 생성되며 이를 2차장(secondary field)이라 한다. 전자(electromagnetic; EM)탐사는 이러한 2차장 또는 1차장과

2차장의 합성장 세기 및 위상으로부터 지하 매질물 등의 이상체(anomalous body)에 관한 정보를 얻는 방법이다 [3,10,11].

고주파수대역 전자탐사(high frequency electromagnetic; HFEM)는 EM탐사의 한 방법으로서, 2차장의 세기 및 위상뿐만 아니라 지반의 유도전류를 측정함으로써 지하 이상체의 위치, 형태 및 전기비저항값을 유추해 내는 방법이다.

Fig. 4의 모식도와 같이 서로 수직한 전기장( $E_x$ )과 자기장( $H_y$ )을 측정하며, 같은 주파수에서의 전기장 및 자기장 성분의 비인 임피던스(impedance;  $Z=E_x/H_y$ )를 계산하게 된다[12-14]. 만약 지반의 전기비저항이 수직적으로만 변화는 수평 층서구조이면 전기비저항과 임피던스간에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\rho = \frac{1}{\omega \mu} |Z|^2, \psi = \psi_E - \psi_H \quad (6)$$

여기서,  $\omega$ 는 각주파수(angular frequency),  $\mu$ 는 투자율(magnetic permeability),  $\psi$ 는 전기장과 자기장간의 위상차이다. 위의 식에서 볼 수 있듯이 전기비저항은 단순히

임피던스와 주파수의 함수가 된다.

전자파는 주파수에 따라 침투할 수 있는 심도가 달라지며, 표피 심도(skin depth)는

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (m) \quad (7)$$

로 주어진다. 여기서,  $\sigma$ 는 지반의 전기전도도,  $\rho$ 는 전기비저항,  $f$ 는 주파수이다. 따라서 주파수대역에 대한 자료를 이용하여 측정 하부의 수직적인 전기비저항 분포를 해석하게 된다.

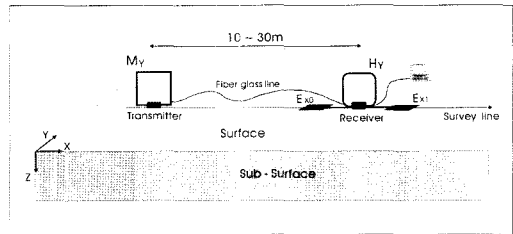


Fig. 4 Configuration of ZHF for the HFEM survey

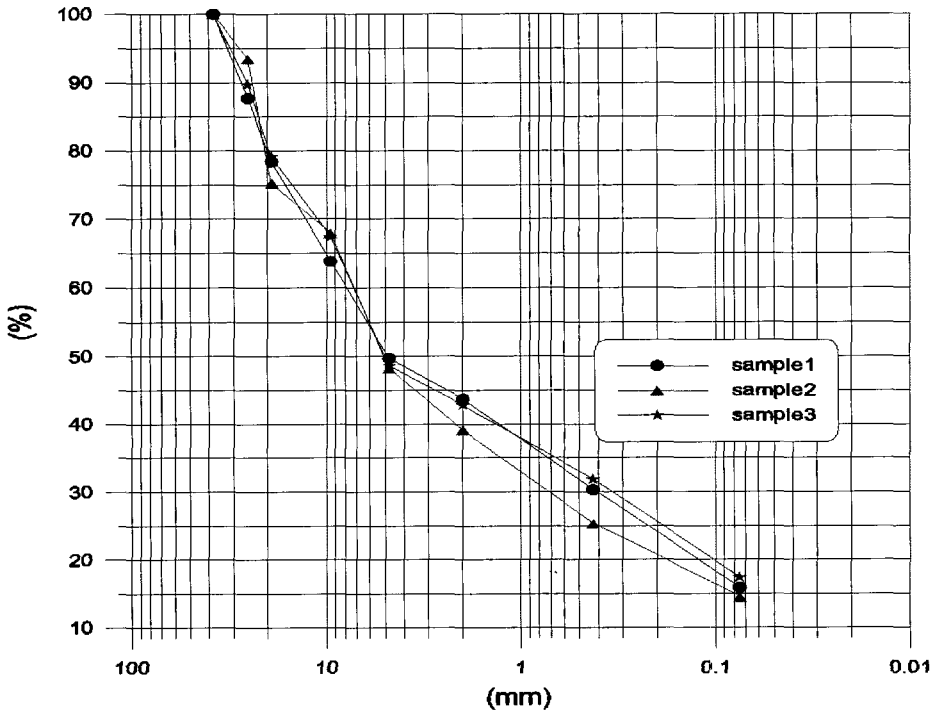


Fig. 3 Cumulative grain-size distribution curves of soil samples

본 연구에서는 고주파수대역 전자탐사를 위하여 미국 EMI사의 ZHF를 사용하였다. ZHF탐사기는 지하정보를 극대화하기 위하여 전기장, 즉 전위차를 측정한다. 기존의 전기장 측정을 위해서는 전극을 땅에 접지 시켜야 하고 이에 따른 전선을 전개시키기 위하여 많은 시간을 필요로 했다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 비접촉 용량 전극(capacitive-coupled electrode)을 채택하여 전위차를 측정함으로써 측정시간을 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트, 아스팔트 및 잡석으로 포장된 지역에서도 조사가 용이한 장점을 가지고 있다.

ZHF탐사기에 의한 고주파수대역 전자탐사는 주파수대역 탐사이며, 인공적으로 수직 loop에 의한 수평자기장(pulse)을 방출하는 능동적인 탐사방법으로서 주파수 영역은 2kHz~4MHz이며 가탐심도는 약 30m 정도이다.

지하 매설물의 탐지를 위해 널리 사용되고 있는 GPR 탐사는 가탐심도가 도심지에서 일반적으로 5m 내외의 극히 천부의 정보만을 제공하며, 흙의 종류와 다짐정도의 상태에 따라서 탐사의 제약이 많게 된다. 따라서 고주파수대역 전자탐사가 GPR탐사의 보완적인 기능을 하게되면 자료해석의 정도가 높아질 것으로 기대된다. 한편, 중첩(stack)에 의해 고압선 등에 의한 잡음을 감소시킬 수 있다.

Fig. 5는 고주파수대역 전자탐사로부터 얻어진 탐사결과로서 GPR탐사와 같은 축선에서 수행하였으며, 축선상에서 30m만 실시하였다. 탐사심도는 15m로 조정하여 조사하였다. HFEM보다 고주파수를 사용한 GPR탐사에 비해 측정속도는 다소 떨어지지만, 본 조사의 경우에 전체 측정시간이 약 15분 정도로서 매우 신속한 조사가 이루어졌다.

GPR탐사로는 관의 중심이 2.5m 내외에 있는 매설관 2개 정도를 위치 파악할 수 있었으나, 고주파수대역 전자탐사에서는 5개의 광역상수관 및 2개의 계수변을 탐지할 수 있었으며 관경도 유추할 수 있었다. 한편, 좋은 지반 조건 하에서도 GPR탐사로는 5m이상의 심도에 매설된 관을 찾기가 힘들으나 본 HFEM조사에서는 가능한 것을 확인할 수 있었다.

이들 조사결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 맨홀과 굴착에 의해 일부 매설관의 위치와 심도를 직접 확인할 수 있었으며, 이들 직접 확인된 매설관은 Fig. 5의 탐사단면도에 A와 B로 표시하였다. Fig. 6 (a)의 맨홀은 8m 심도에 매설된 관을 관리하기 위한 것이며, 맨홀의 대체적인 윤곽이 Fig. 5의 탐사결과에 나타나 있다. 이것은 축선이

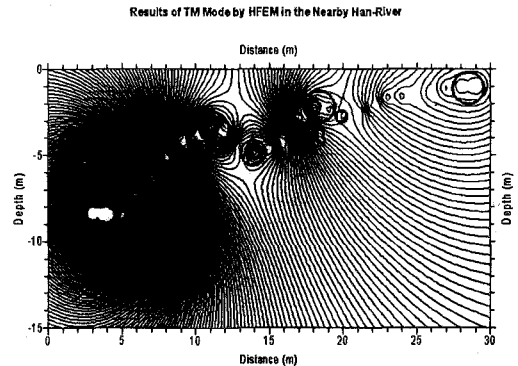


Fig. 5 Result section obtained by HFEM survey. Circles are big water-supply pipes. Circles pointed by arrows are water-supply pipes directly found by manhole and excavation. Box is a part of manhole. Small two circles near the big circle pointed by arrow are sluice gate pipes.

맨홀의 일부를 통과하는 관계로 맨홀의 상부는 결과 단면도에 나타나 있지 않다. Fig. 6 (b)는 상수관 파열공사를 위한 굴착으로 상수관의 위치와 깊이를 확인한 것으로서 현장성격상 전체 상수관을 굴착, 확인할 수는 없었다. Fig. 6 (c)는 (b)의 상수관 옆에 위치한 계수변으로서 Fig. 5의 소형원이 이에 해당한다. 맨홀과 굴착에 의한 위치와 심도 확인결과, 관의 중심이 8m에 있는 상수관의 경우에 약 5cm이내의 오차를 보였으며, 관의 중심이 2.5m에 있는 상수관의 경우에 약 2.5cm의 오차를 보여 심도대비 0.5-1.0%의 오차를 보였다. 이는 지하매설물법에서 정한 심도에 대한 10%의 허용오차에 비하여 매우 낮은 오차로서 지하와 관련된 다른 탐사법들과 비교할 때, 매우 정밀한 탐사라고 할 수 있다.

한편, GPR에서 볼 수 있었던 연구지역의 서쪽 절반은 매우 교란되고 다짐이 안된 토양으로 구성되어 있는데 비하여, 동쪽 절반은 어느 정도 다짐이 된 토양임을 보여주는 양상의 전기비저항값을 잘 보여주고 있다. 고주파수대역 전자탐사 결과로부터 얻어지는 지반의 전기비저항값은 토질과 흙의 간극비, 함수율 등에 의해 변화하기 때문에 전기비저항값의 분포로부터 토질과 지반환경을 유추할 수 있다[15-17]. 이상의 결과로부터 고주파수대역 전자탐사의 효율성을 확인할 수 있으며, 취득정보로부터 지하매질 및 매설물뿐만 아니라 문화 유적지 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) manhole to manage the deep buried big water-supply pipe,



(b) big water-supply pipe exposed by excavation,



(c) sluice gate near the big water-supply pipe in (b).

Fig. 6 Photographs from which the effectiveness of HFEM was proved.

## 5. 결 론

지하에 매설된 각종 시설물의 위치 및 깊이를 조사하기 위한 비파괴적인 조사방법으로 GPR탐사법이 가장 많이 활용되고 있으나, 가탐심도가 매우 낮으며, 지하매질에 많은 제약을 받는다. 본 연구에서는 이러한 비파괴 GPR탐사법의 제약을 극복하고자, 효과적으로 지하매설물을 탐지할 수 있는 새로운 비파괴 전자탐사법을 연구, 적용하였다.

고주파수대역 전자탐사는 주파수대역 탐사이며, 인공적으로 에너지원(源)을 방출하는 능동적인 탐사방법으로서 주파수 대역은 2kHz~4MHz이며 가탐심도는 약 30m 정도이다. 고주파수대역 전자탐사에서는 지하정보를 극대화하기 위하여 서로 수직인 전기장과 자기장을 측정하며, 같은 주파수에서의 전기장 및 자기장 성분의 비인 임피던스를 계산하며, 전기비저항은 임피던스와 주파수의 함수이므로 주파수대역에 대한 자료를 이용하여 측정 하부의 수직적인 전기비저항 분포를 해석하게 된다. 전기장 즉 전위차를 측정하기 위한 전기탐사에서는 전극을 땅에 접지시켜야 하지만, 비접촉 용량전극을 채택하여 측정시간을 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트, 아스팔트 및 잡석으로 포장된 지역에서도 조사가 용이하며, 중첩에 의해 고압선 등에 의한 잡음을 감소시킬 수 있게 되었다.

다른 비파괴 탐사방법으로는 발견할 수 없었던 지하매설관에 대해서 본 고주파수대역 전자탐사를 적용하여 성공적으로 심도대비 1%오차 이하의 매우 정밀한 탐사 결과를 얻을 수 있었으며, 지반환경을 유추할 수 있었다. 따라서 본 연구방법을 지하매설물의 위치 및 깊이확인을 위한 정밀 지하측량, 지반조사 및 문화 유적지조사 등에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구지원비(KRF-2000-DF0434)에 의해 이루어졌으며, 각종 탐사자료의 취득과 분석에 도움을 준 배재대학교 토목환경공학과 지반조사연구실의 이대근, 김상규 군에게 감사를 드린다.

본 연구결과는 2001년도 측량협회 주최 신기술 경진대회에서 대상으로 건설교통부장관상을 수상하였다.



## 참고문헌

- [1] 이강원, "지하시설물조사 및 탐사", chapter 1, pp. 3-15, 청문각, (2002) (인쇄중)
- [2] 한국공항, "고심도 광역상수관로 탐사결과 보고", pp. 1-2, 한국공항(주) GIS사업본부, (1999)
- [3] 손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수, "지반환경물리탐사", chapter 9, pp. 623-649, 시그마프레스, (2000)
- [4] 박상규, "GPR탐사해석시 흙의 유전상수 결정방법에 관한 연구", 석사학위논문, pp. 3-57, 건국대학교 (1998)
- [5] J. L. Davis, A. P. Annan, "Ground Penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy," *Geophysical Prospecting*, Vol. 37, No. 3, pp. 463-473, (1989)
- [6] A. P. Annan, "Ground Penetrating Radar Workshop Note," pp. 3-75, Sensors & Software Inc., (1992)
- [7] D. G. Smith, H. M. Jol, "Ground penetrating radar investigation of a lake Bonneville delta, provo level, Brigham City, Utah," *Geology*, Vol. 20, No. 2, pp. 156-165, (1992)
- [8] B.M.Das, "Principles of Geotechnical Engineering," 4th ed., chapter 3, pp. 82-103, PWS Publ. Co., (1998)
- [9] C. Liu, J. B. Evett, "Soils and Foundations," 5th ed., chapter 2, pp. 9-46, Prentice Hall, (2001)
- [10] M. B. Dobrin, C. H. Savit, "Introduction to Geophysical Prospecting", 4th ed, chapter 18, pp. 750-846, McGraw-Hill, (1988)
- [11] W. M. Telford, L. P. Geldart, R. E. Sheriff, "Applied Geophysics", 2nd ed, chapter 7, pp. 343-521, Cambridge Univ. Press, (1992)
- [12] E. A. Nichols, H. F. Morrison, S. Lee, "Controlled source magnetotellurics for ground water", *Abstr. 64th Annu. Mtg., Soc. Explor. Geophys.*, Los Angeles, CA, pp. 553-554, (1994)
- [13] K. Vozoff, "The magnetotelluric method," *Electromagnetic method in Applied Geophysics*, 2B. in: Nabighian, M.N.,(Ed.), pp. 641-711, Society of Exploration geophysicists, Tulsa, OK, (1991)
- [14] S. H. Ward, G. W. Homann, "Electromagnetic theory for geophysical application", in Nabighian, M. N., Ed., *Electromagnetic methods in Applied Geophysics*, Vol. 1-Theory and Practice, pp. 456-478, (1988)
- [15] G. J. Placky, "Resistivity Characteristics of Geologic Targets", in: Nabighian, M. N.,(Ed.), *Electromagnetic methods in Applied Geophysics*, 1. , pp. 53-129, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, (1987)
- [16] J. M. Reynolds, "An introduction to applied and environmental geophysics," pp. 65-87, John Wiley and Sons, (1997)
- [17] S. H. Ward, "Resistivity and induced polarization methods", in: Ward, S. H., ed., *Geotechnical and environmental geophysics*, Vol. 1. pp. 147-189, (1990)