

## 이상대 판정기법을 활용한 지하매설물 탐사

류희환<sup>1</sup> · 김경열<sup>2</sup> · 이강렬<sup>3</sup> · 이대수<sup>4</sup> · 조계춘<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국전력연구원 송변전연구소 선임연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국전력연구원 송변전연구소 책임연구원

<sup>3</sup>비회원, 한국전력연구원 연구운영팀 일반연구원

<sup>4</sup>정회원, 한국전력연구원 송변전연구소 수석연구원

<sup>5</sup>정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 교수

### Exploration of underground utilities using method predicting an anomaly

Hee-Hwan Ryu<sup>1</sup>, Kyoung-Yul Kim<sup>2</sup>, Kang-Ryel Lee<sup>3</sup>, Dae-Soo Lee<sup>4</sup>, Gye-Chun Cho<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Senior researcher, Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institute, Korea

<sup>2</sup>Member, Principal researcher, Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institute, Korea

<sup>3</sup>Researcher, R&D Strategy & Policy Office, KEPCO Research Institute, Korea

<sup>4</sup>Member, Chief researcher, Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institute, Korea

<sup>5</sup>Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Korea

**ABSTRACT:** Rapid urbanization and industrialization have caused increased demand for underground structures such as cable, and other utility tunnels. Recently, it has become very difficult to construct new underground structures in downtown areas because of civil complaints, and engineering problems related to insufficient information about existing underground structures, cable tunnels in particular. This lack of information about the location and direction-of-travel of cable tunnels is causing many problems. To solve these problems, this study was focused on the use of geophysical exploration of the ground in a way that is theoretically, different from previous electrical resistivity surveys. An electric field analysis was performed on the ground with cable tunnels using Gauss' law and the Laplace equation. The electrical resistivity equation, which is a function of the cable tunnel direction, the cable tunnel location, and the electrical conductivity of the cable tunnel, can be obtained through electrical field analysis. A field test was performed for the verification of this theoretical approach. A field test results provided meaningful data.

**Keywords:** Underground utilities, electrical resistivity, electric field analysis

**초 록:** 급격한 도시화 및 산업화는 전력구를 비롯한 공동구의 수요를 증가시키고 있다. 하지만 기존 지하매설물, 특히 전력구에 대한 불충분한 정보와 지하매설물의 무분별한 건설로 인해 최근 도심지 내 새로운 지하매설물을 건설하는 것이 매우 어렵다. 뿐만 아니라, 전력구를 비롯한 지하매설물이 건설된 위치와 방향에 대한 부족한 정보는 신규 지하매설물의 계획노선을 설정하는데 많은 문제를 야기시키고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 기존의 전기비저항 탐사방법과는 다른 이론적 방법으로 해결하고자 하였다. 전력구를 비롯한 지하매설물이 건설된 지반에서 가우스 법칙과 라플라스식을 이용하여 전기장 해석이 수행하였다. 전력구의 방향, 전력구의 위치, 전력구의 전기전도도 등의 함수로 표현된 전기비저항 이론식은 전기장해석을 통해서 획득하였다. 이론식을 검증하기 위해서 현장실험이 수행되었으며 현장실험 결과, 지반 내 지하매설물의 위치와 방향을 오차범위 내에서 예측하였다.

**주요어:** 지하매설물, 전기비저항, 전기장 해석

\*Corresponding author: Gye-Chun Cho

E-mail: gyechn@kaist.edu

Received March 18, 2015; Revised March 30, 2015;

Accepted April 1, 2015

Copyright ©2015, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

공동구, 전력구, 터널 등 지하매설물을 건설 시, 지반 하부의 상태를 평가하기 위해서 지반조사는 반드시 수행된다. 지반조사를 수행하여, 지반 하부에 존재하는 암반, 흙, 지하수 등의 특징을 파악하고 이를 설계에 반영하여 공사비, 공사일정 등을 결정한다. 하지만, 지반조사를 수행함에도 불구하고 지하매설물을 시공하면서 예측하지 못한 지하매설물 및 이상대 출현으로 공사가 중단되는 사례가 많이 보고되고 있다. 뿐만 아니라, 기 매설된 지하매설물의 설계도면이 존재하지 않아, 지하매설물 노선계획을 수립하는데 많은 어려움이 있으며 공사 도중 그릇된 정보로 인해 기 매설된 지하매설물을 손상시키는 사고가 빈번히 발생한다.

일반적으로 지반조사를 하기 위해서 사용되는 방법은 시추 및 물리탐사 방법이 있으며, 주로 사용되는 물리탐사는 탄성과 탐사, 전기비저항 탐사, 전자탐사, 자력탐사, GPR 등이 있다. 시추를 하여 지반조사를 수행하면 시추 지점의 정확한 정보를 획득할 수 있는 장점은 있으나, 시추간 일정 간격을 두고 조사를 수행하기 때문에 연속적인 정보를 획득할 수 없다. 특히 지하매설물이 많이 존재하는 도심지의 경우, 시추로 인한 과도한 비용과 많은 민원이 발생할 수 있다. 물리탐사방법 중 상대적으로 정확도가 높은 탄성과 탐사는 시추 조사의 단점은 해결할 수 있지만, 지반 하부 지하매설물의 방향과 위치, 크기를 예측하기에는 발파 등으로 인한 민원, 3차원 해석 및 측선 설치 등 다양한 어려움이 존재한다.

종래 기술이 가진 어려움을 해결하고 지반 하부에 존재하는 지하매설물의 위치와 방향, 특징을 예측하기 위해서, 본 논문에서는 지반매질과 지하매설물의 전기전도도가 상대적으로 큰 차이가 있음을 이용하여 지반 하부에 존재하는 매설물의 상태를 파악하고자 한다. 전류는 상대적으로 전기비저항이 작은 지역으로 많이 흐르며 지표면에서 측정되는 전기저항값은

관련 정보를 포함하게 된다. 기존 연구(Ryu et al., 2008; Ryu, 2010)에서 절리암반에서의 전기장 해석, 이상영역(구형이상영역, 파쇄대)이 존재할 때 전기장 해석이 수행된 바 있다. 관련 전기장 해석식을 바탕으로 지하매설물의 기하학적 형상이 구형이상영역(구형)이 연속적으로 이어져 있는 형상으로 가정하여 이론식을 유도하였다. 이를 통해서 지하 매설물(전력구, 관로 등)의 위치와 방향을 오차범위(20%) 내에서 예측하였다.

## 2. 전기장 해석

지하매설물이 포함된 지반 하부에 형성되는 전기장의 해석은 기존에 개발된 이론식(Ryu et al., 2008; Ryu, 2010)을 바탕으로 하였다. 기존에 개발된 이론식은 터널 전방에 이상영역(구형연약대, 판형파쇄대)이 존재 시, 전기장 해석을 통해 획득된 이론식이다. 기존 전기비저항 탐사 방법과는 다르게, 터널 막장에 센서를 부착하여(센서의 배열방법과는 상관없이) 탐사범위(터널 크기의 4배, 40~50 m) 내에서 상대적으로 가장 전기적 성질이 강하거나 낮은 지역 1군데를 예측하는 방법이다. 터널 막장에 부착된 센서에 10V 이상의 직류 전압을 보내고, 여러 센서들로부터 전기저항 값을 측정하여 유전알고리즘, Monte Carlo equation을 이용한 역해석 프로그램을 통해, 국부적 이상대의 위치좌표, 크기, 주변지반과 유전율 비 등을 예측한다. 기존의 전기비저항 탐사법과 같이 특정 대상 지반의 전반적인 전기비저항 값 분포는 알 수 없지만 국부적으로 존재하는 이상영역의 정확한 위치와 크기를 예측할 수 있으며, 센서 간 최대 거리(측선)의 4배~5배까지(터널 가로 크기가 10 m이면 최대 40 m~50 m까지 탐사 가능) 예측하고 측정부터 예측까지 총 2시간 정도 소요된다.

Fig. 1과 같이 지반 위 두 전극이 설치되어 있고 지반 하부에 구형의 이상영역(전력구 및 관로 단면)이 존재하면 두 전극에 의해 구형 이상영역에 형성되는

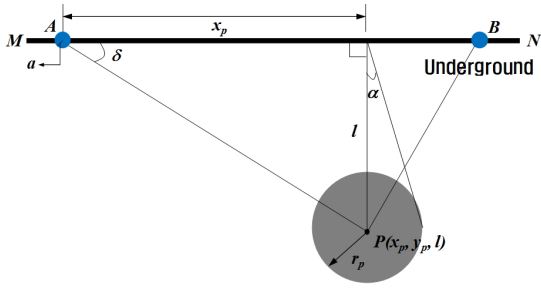


Fig. 1. Electric field in underground

전기장은 쿨롱의 법칙에 의해 식 (1), 식 (2), 식 (3)과 같이 표현 가능하다.

$$\overline{E}_{+q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_g} \frac{Q}{x^2 + l^2} \cdot \hat{\chi} \quad (1)$$

$$\overline{E}_{-q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_g} \frac{Q}{x^2 + (L-x)^2} \cdot \hat{\chi} \quad (2)$$

$$(E_{+q} + E_{-q})_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_g} \left( \frac{x}{(x^2 + l^2)^{3/2}} + \frac{L-x}{(x^2 + (L-x)^2)^{3/2}} \right) \quad (3)$$

여기서,  $\overline{E}_{+q}$ 는 전극 A에 의해 임의의 점  $P(x_p, y_p, l)$ 에 형성된 전기장,  $\overline{E}_{-q}$ 는 전극 B에 의해 임의의 점  $P(x_p, y_p, l)$ 에 형성된 전기장,  $\epsilon_g$ 는 주변매질(예: 흙)의 유전율,  $Q$ 는 전하량,  $L$ 은 두 전극사이의 거리,  $\hat{\chi}$ 는  $x$ 축 방향의 단위벡터이다.

전류는 시간이 경과하는 동안에 임의의 단면적을 전하가 통과하는 량을 의미한다. 국소적인 관점에서 도체 내부의 임의의 점에서 전류의 분포는 전류밀도( $J$ ) 개념을 사용하여 표현할 수 있다. 전류밀도는 전류를 면적으로 정규화한 값이며, 전기전도도( $\sigma$ )와 전기장( $\overline{E}$ )의 곱으로 표현 가능하다. 전류밀도와 전류의 일반적인 관계를 구하면 다음과 같다(Reitz et al., 2008).

$$I = - \oint_S \overline{J} \cdot \overline{n} \, da = - \oint_S \sigma \overline{E} \cdot \overline{n} \, da \quad (4)$$

여기서,  $da$ 는 표면  $S$ 의 임의의 면적요소,  $\overline{n}$ 은  $da$ 에 수직인 단위벡터이다. A 전극으로 전압을 주면 지반 하부에 전기장이 형성되고 지하매설물을 만나면서 변형된다. 따라서 B 전극에서부터 측정되는 전류는 구형 지하매설물과 지표면 사이( $0 \sim l - r_p$ )에 흐르는 전류와 구형 지하매설물에 흐르는 전류( $l - r_p \sim l + r_p$ ), 구형 지하매설물 주변에 흐르는 전류( $l - r_p \sim l + r_p$ ), 구형 지하매설물 아래로 흐르는 전류( $l + r_p \sim \infty$ )( $l + r_p \sim \infty$ )의 합으로 표현 가능하다.

( $x_p, y_p, l$ )일 경우,

$$I_{s-p(1)} = \int_0^{l-r_p} \sigma_s \overline{E}_s \cdot \pi l \, dl + \int_{l-r_p}^{l+r_p} \sigma_p \overline{E}_p \cdot a \, dl + \int_{l-r_p}^{l+r_p} \sigma_s \overline{E}_s \cdot (\pi - a) l \, dl + \int_{l+r_p}^{\infty} \sigma_s \overline{E}_s \cdot \pi l \, dl \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_s$ 는 주변매질의 전기전도도,  $r_p$ 는 지하매설물의 반지름(전력구 혹은 관로의 반지름),  $\sigma_p$ 는 지하매설물의 전기전도도,  $E_p$ 는 지하매설물에서 형성된 전기장,  $E_s$ 는 주변 매질에서 형성된 전기장,  $l$ 은 지하매설물의 중심과 지표면 사이 거리,  $a$ 는  $2\sin^{-1}(r_p/l)$ 이다. 식 (5)는 지하매설물의 중심좌표가( $x_p, y_p, l$ )일 경우 계산되는 전류식이다. Fig. 2는 지반 하부에 지하매설물(Fig. 2의 회색부분)이 존재할 때, 설치된

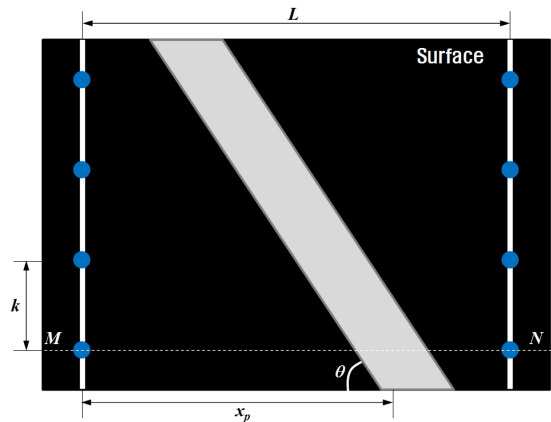


Fig. 2. Arrangement of sensors

센서와 지하매설물과의 기하학적 관계를 보여준다. 위에서 언급하였듯이 지하매설물(전력구 및 관로)이 구형의 연속체라고 가정할 경우 기준 센서(Fig. 2의 M)에서 거리  $k$ 만큼 떨어진 센서,  $2k$ 만큼 떨어진 센서,  $3k$ 만큼 떨어진 센서에서 측정되는 전류는 다음 식과 같이 표현 가능하다.

$$\left(x_p - \frac{k}{\tan\theta}, y_p + k, l\right) \text{ 일 경우,}$$

$$I_{s-p(2)} = \int_0^{l-r_p} \sigma_s \overline{E}_s \cdot \pi l \, dl + \int_{l-r_p}^{1+r_p} \sigma_p \overline{E}_p \cdot a \, dl$$

$$+ \int_{l-r_p}^{1+r_p} \sigma_s \overline{E}_s \cdot (\pi - a)l \, dl + \int_{l+r_p}^{\infty} \sigma_s \overline{E}_s \cdot \pi l \, dl \quad (6)$$

$$\left(x_p - \frac{2k}{\tan\theta}, y_p + 2k, l\right) \text{ 일 경우,}$$

$$I_{s-p(3)} = \int_0^{l-r_p} \sigma_s \overline{E}_s \cdot \pi l \, dl + \int_{l-r_p}^{1+r_p} \sigma_p \overline{E}_p \cdot a \, dl$$

$$+ \int_{l-r_p}^{1+r_p} \sigma_s \overline{E}_s \cdot (\pi - a)l \, dl + \int_{l+r_p}^{\infty} \sigma_s \overline{E}_s \cdot \pi l \, dl \quad (7)$$

$$\left(x_p - \frac{3k}{\tan\theta}, y_p + 3k, l\right) \text{ 일 경우,}$$

$$I_{s-p(4)} = \int_0^{l-r_p} \sigma_s \overline{E}_s \cdot \pi l \, dl + \int_{l-r_p}^{1+r_p} \sigma_p \overline{E}_p \cdot a \, dl$$

$$+ \int_{l-r_p}^{1+r_p} \sigma_s \overline{E}_s \cdot (\pi - a)l \, dl + \int_{l+r_p}^{\infty} \sigma_s \overline{E}_s \cdot \pi l \, dl \quad (8)$$

여기서,  $\theta$ 는 지하매설물의 방향이다. 주변 매질의 전기장과 지하 매설물의 전기장은 기존 연구(Ryu et al., 2008; Ryu, 2010)에 의해서 식 (9)와 같이 표현 된다.

$$\overline{E}_p = \frac{3}{K_p + 2} \overline{E}_s \quad (9)$$

여기서,  $K_p$ 는 주변매질의 유전율( $\epsilon_s$ )과 구형 이상영역 유전율( $\epsilon_p$ )의 비( $\epsilon_s / \epsilon_p$ )이다. 전극표면에서의 전압( $V_s$ )은 두 전극 사이의 전압( $V$ )의 절반과 동일하다.

이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q = 2\pi\epsilon_s a V \quad (10)$$

여기서,  $a$ 는 전극의 반지름이다. 식 (10)과 식 (9)를 식 (6), 식 (7), 식 (8) 대입하여 정리하면 다음과 같이 지표면 내 지하매설물이 존재할 경우 측정되는 전기 저항식이 획득가능하다.

$$R_{s-p} = \frac{2}{a \left( \pi\sigma_s f_1 + \left( \frac{3a\sigma_p}{K_p + 2} + (\pi - a)\sigma_s \right) f_2 \right)} \quad (11)$$

여기서,  $f_1, f_2, f(x)$ 는 다음과 같다.

$$f_1 = 2 + \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{l+r_p}{f(x)}\right)\right) + \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{l+r_p}{L-f(x)}\right)\right) - \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{l+r_p}{f(x)}\right)\right) - \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{l+r_p}{L-f(x)}\right)\right) \quad (12)$$

$$f_2 = \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{l+r_p}{f(x)}\right)\right) + \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{l+r_p}{L-f(x)}\right)\right) - \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{l+r_p}{f(x)}\right)\right) - \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{l+r_p}{L-f(x)}\right)\right) \quad (13)$$

$$f(x) = x - \frac{nk}{\tan\theta} \quad (14)$$

여기서,  $n$ 은 지표면 상 배열된 전극의 번호이다. 식 (11)에서 알 수 있듯이 지표면 위 센서들로부터 획득되는 전기저항값은 지하매설물의 중심좌표( $x_p, y_p, l$ ), 지하매설물의 반지름( $r_p$ ), 지하매설물의 전기전도도( $\sigma_p$ ), 주변 매질의 전기전도도( $\sigma_s$ ), 유전율비( $K_p$ ), 센서의 반지름( $a$ ), 센서들 사이의 거리( $k$ ), 센서 개수( $n$ )의 함수로 이루어져 있다. 이 중에서 현장/실내실험을 수행할 시 사전에 알 수 있는 변수는 센서의 반지름( $a$ ), 센서들 사이의 거리( $k$ ), 센서 개수( $n$ )이며, 측정장비로부터 획득되는 전기저항값( $R_{s-p}$ ) 역시 알 수 있는

변수이다. 식 (11)을 통해서 획득하고자 하는 변수를 얻기 위해서는 다음과 같은 과정이 필요하다.

- (1) 지표면 위에 센서선 두 개를 설치하고 각 선마다 최소 8개의 센서를 설치한다. 이때 주의사항은 개략적으로 예상되는 지하매설물의 범위보다 넓게(Fig. 2의 L 안에 지하매설물이 들어올 수 있도록) 센서 선을 설치해야 한다.
- (2) 소스 센서에 전압을 주어 반대편 대응하는 리시버 센서에서부터 전류를 측정하여 전기저항값을 측정한다.
- (3) 같은 센서선 위의 다른 소스 센서를 선택하여 2)의 과정을 반복한다.
- (4) 식 (11)을 통해 획득하고자 하는 변수가 8개(지하매설물의 전기전도도( $\sigma_p$ ), 주변 매질의 전기전도도( $\sigma_s$ ), 유전율비( $K_p$ ), 이상영역의 중심좌표( $x_p, y_p, l$ ), 지하매설물의 반지름( $r_p$ ), 지하매설물의 방향( $\theta$ ))이기 때문에 최소 8개 전기저항값을 획득한다.

- (5) 역해석 알고리즘(유전알고리즘, Monte Carlo 방법 등)을 이용하여 예측하고자 하는 변수를 획득한다.

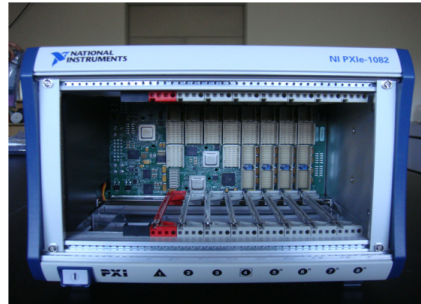
위 과정을 통해서 지표면 지하매설물의 위치와 크기, 방향, 주변과의 상대적 연약정도 등을 획득할 수 있으며 지하매설물 설계 노선 결정 등 관련 설계 및 시공에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

### 3. 실험장비 개발

식 (11)을 검증하기 위해서 현장/실내실험 적용용 전기저항 측정장비를 개발하였다(Fig. 3). Fig. 3의 각각 기기에 대한 설명은 Table 1과 같다. 전압은 0.01V~30V까지 출력가능하며, 위에서 언급되었듯이 주로 10V 직류 전압을 사용하여 전기저항값을 측정가능토록 구성하였다. 개발된 기술은 지반 하부에 상대적으로 약한 구역을 예측하는 원리이기 때문에 기존 탐사장비와는 다르게 측정장비의 내부저항



(a) Unified exploration equipment



(b) DAQ



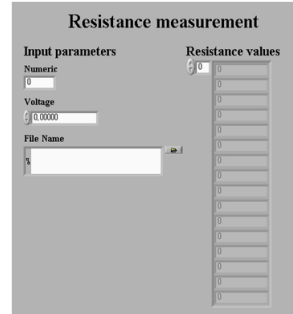
(c) DMM



(d) Power Supply



(e) Switch Controller



(f) Analysis program



(g) Sensors(rock)



(h) Sensors(soil)

Fig. 3. Measurement equipment

및 주변 잡음, 지하수위 등은 결과값에 큰 영향을 주지 못한다. 지표면에 설치된 여러 센서들로부터 전기저항값을 측정할 수 있으며 측정된 전기저항값과 역해석 프로그램을 이용하여 예측하고자 하는 지하매설물의 매설 깊이와 방향을 예측할 수 있다.

## 4. 현장실험

### 4.1 상수관로 위치 탐사

개발된 이론 및 실험장비의 현장 적용을 위해 현장 실험을 수행하였다. 현장실험은 서울 ○○천 하부에

Table 1. Names and roles of exploration equipment

Contents	Names	Roles	Spec.
Fig. 3(a)	Unified exploration equipment	To obtain the unknown parameters of underground structure, and measure the electrical resistivity values	-
Fig. 3(b)	DAQ (Data Acquisition)	To obtain the data, and transmit the measured electrical resistance values to the inverse program	-
Fig. 3(c)	DMM (Digital Multimeter)	To measure the electrical resistance values	1mA ~ 1A, 6 1/2 digits
Fig. 3(d)	Power Supply	To control the voltage	0.01V ~ 30V
Fig. 3(e)	Switch Controller	To define the arrangement of sensors	4×32 Channel
Fig. 3(f)	Analysis program	To obtain the unknown parameters(location, size, direction of underground structures)	
Fig. 3(g)	Sensors(rock)	Measurement sensors installed in rock	30 cm(Measurement part 10 cm)
Fig. 3(h)	Sensors(soil)	Measurement sensors installed in soil	30 cm(Measurement part 10 cm)



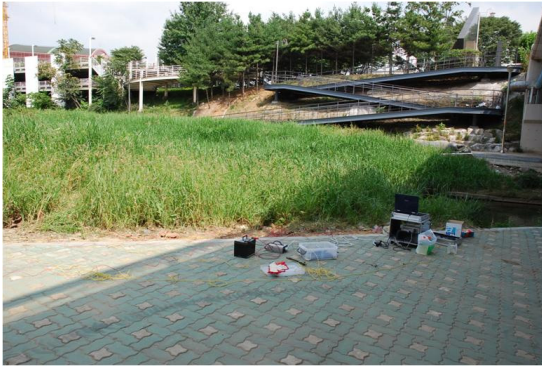


Fig. 4. ○○ river

매설된 상수관로의 깊이와 노선 위치를 파악하기 위해서 수행되었다(Fig. 4). 상수관로가 지나가는 지역은 ○○천과 ○○천 하부이며 ○○천 주위의 2지역과 도로상으로 연결되는 계단, 도로상에서 각각 1회

실험을 수행하였다. 지표면 상부에 센서를 설치하고 (Fig. 5~8의 측선의 각 교차점) 10V의 직류전압을 기준센서(Fig. 5~9의 measurement location, (10, 10))에 흘려주어 다른 센서들로부터 전기저항값을 획득하였다. 기존 논문((Ryu et al., 2008; Ryu, 2010)의 역해석 프로그램(유전알고리즘, Monte Carlo equation)을 이용하여 역해석을 수행하였으며 역해석 결과 구형이상대의 분포를 예측하여 상수관로의 위치를 확인하였다.

○○천 주변(site 1)에서  $3,885\Omega \sim 10,055\Omega$  범위 내 56개의 전기저항값을 측정하였으며(Table 2), 역해석 결과 구형이상영역이 3개 예측되어 구형이상영역을 서로 연결하면 Fig 5와 같다. 예측된 구형이상영역의 x, y좌표에 의해 최소 4 m에서 최대 7.2 m 내 상수관로가 건설된 것으로 판단된다.

Table 2. Measured electrical resistance values at Site 1

Coordinate of source sensor	Coordinate of receiver sensor	Electrical resistance values(W)	Coordinate of source sensor	Coordinate of receiver sensor	Electrical resistance values(W)
(10, 10)	(8, 10)	6,080	(10, 14)	(10, 10)	6,893
(10, 10)	(6, 10)	6,999	(10, 14)	(8, 10)	4,657
(10, 10)	(10, 12)	8,345	(10, 14)	(6, 10)	5,435
(10, 10)	(10, 14)	7,672	(10, 14)	(10, 12)	6,726
(10, 10)	(8, 14)	7,538	(10, 14)	(8, 14)	5,915
(10, 10)	(6, 14)	10,055	(10, 14)	(6, 14)	8,266
(10, 10)	(6, 12)	8,774	(10, 14)	(6, 12)	7,080
(8, 10)	(10, 10)	5,420	(8, 10)	(10, 10)	6,908
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

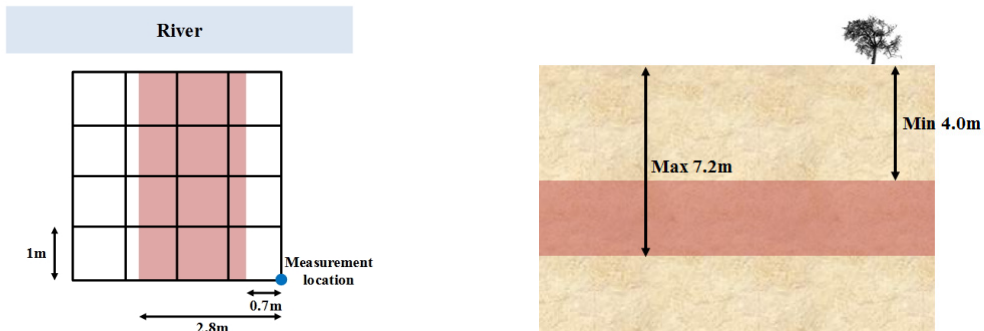


Fig. 5. Inversion results (Site 1)

Site 1과 ○○천 기준으로 반대편인 Site 2에서 7,350Ω ~ 135,564Ω 범위 내 56개의 전기저항값을 측정하였으며, 역해석 결과 구형이상영역이 3개 예측되어 구형이상영역을 서로 연결하면 Fig. 6과 같다. 예측된 구형이상영역의 x, y좌표에 의해 최소 3.9 m에서 최대 7.8 m 내 상수관로가 건설될 것으로 판단된다.

도로상으로 연결되는 계(Site 3)에서 1,262Ω ~ 11,196Ω 범위 내 56개의 전기저항값을 측정하였으며, 역해석 결과 구형이상영역이 4개 예측되어 구형이상영역을 서로 연결하면 Fig. 7과 같다. 예측된 구형이상영역의 x, y좌표에 의해 최소 5.1 m에서 최대 9.3 m 내 상수관로가 건설될 것으로 판단된다.



Fig. 6. Inversion results (Site 2)



Fig. 7. Inversion results (Site 3)

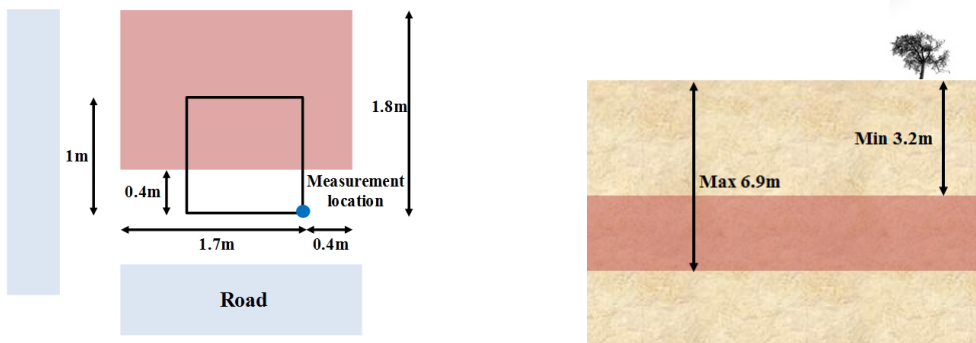


Fig. 8. Inversion results (Site 4)



도로상(Site 4)에서 8,743Ω ~ 105,647Ω 범위 내 12개의 전기저항값을 측정하였으며, 역해석 결과 구형이상영역이 4개 예측되어 구형이상영역을 서로 연결하면 Fig. 7과 같다. 예측된 구형이상영역의 x, y좌표에 의해 최소 3.2 m에서 최대 6.9 m 내 상수관로가 건설된 것으로 판단된다.

- (1) 기존 실험을 통해 예측된 상수관로의 위치와 지질 구조를 참조할 때, 최소 깊이로 예측된 상수관로의 깊이는 풍화층의 경계면을 예측한 것으로 사료된다.
- (2) 예측된 최대 깊이가 상수관로의 깊이로 판단된다.
- (3) 예측된 상수관로의 깊이(Fig. 5~Fig. 8)를 연결하면 상수관로가 건설된 깊이와 방향을 예측할 수 있다. 실제 상수관로가 건설된 위치를 확인할 수는 없었지만 기존 설계도면과 비교하였을 때, 상수관로의 위치와 방향이 거의 일치함(오차범위 10% 이내, 최대 ±1 m)을 알 수 있었다.

## 4.2 전력구 위치 탐사

전력구가 놓여진 깊이와 위치를 파악하고 이론적 해석 및 실험장비를 검증하기 위해서 현장실험을 수행하였다(Fig. 9). 전력구 냉각시스템 실증 시험을 위해 한국전력공사 고창전력시험센터 내 설치된 전력구(Fig. 9(a))에서 현장실험을 수행하였으며, 설치된 전력구의 크기는 24 m × 24 m(Fig. 9(b)), 전력구 상부에서 지표면까지 깊이는 4 m이다(Fig. 9(c), (d)). 현장실험은 30여분, 역해석 시간은 2시간 정도 소요되었다. 전력구가 설치된 성토지반 상부에 센서를 8개 설치한 후, 2V의 전압을 흘려주어 총 16개의 전기저항값을 획득하였다. 기존 논문(Ryu et al., 2008; Ryu, 2010)의 역해석 프로그램(유전알고리즘, Monte Carlo equation)을 이용하여 역해석을 수행하였으며 역해석 결과 구형이상대의 분포를 예측하여 전력구의 위치를 확인하

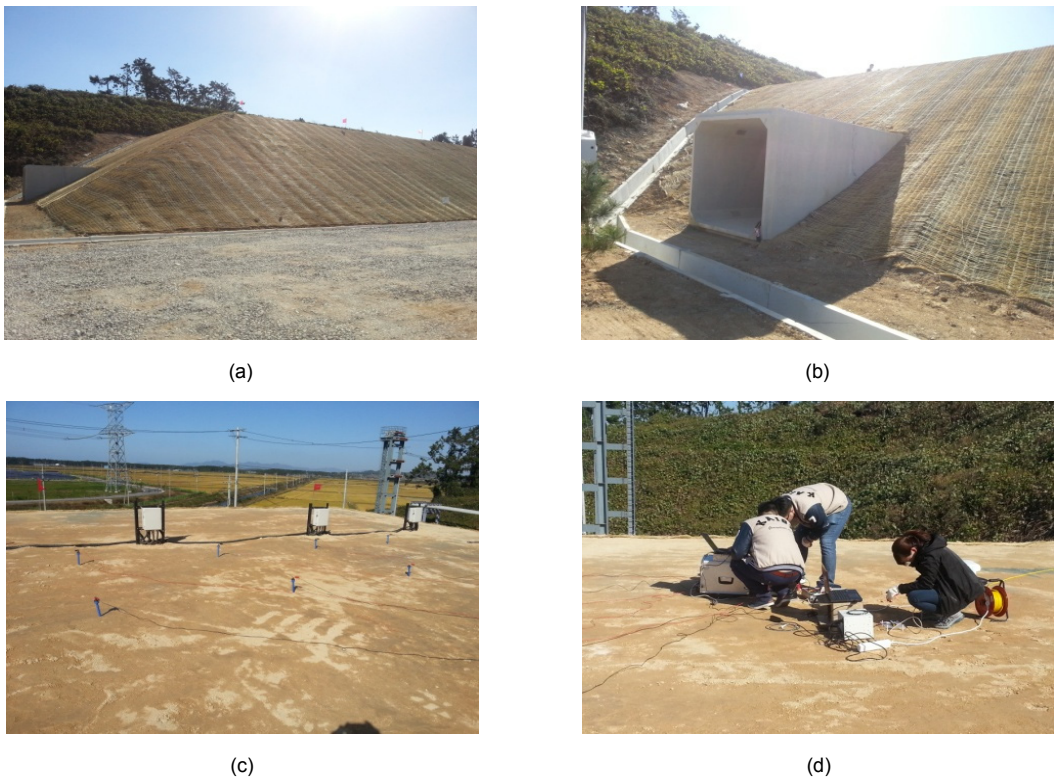


Fig. 9. Cable tunnel in KEPCO PT Center

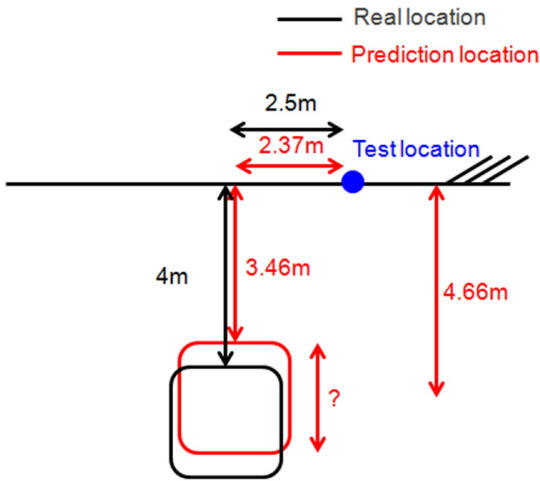


Fig. 10. Test Results (Cable tunnel)

였다. 예측된 결과는 Fig. 10과 같다. 예측 결과 중, 전력구의 크기는 예측할 수 없었으나, Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 실제 전력구가 건설된 깊이와 위치의 예측값이 실제값과 오차 범위 20% 이내로 일치함을 알 수 있다.

## 5. 결론

도심지 내 지하매설물이 건설된 위치와 크기, 방향을 예측하기 위해서 전기장 해석을 통해 전기비저항 이론식을 개발하였다. 개발된 이론식은 지하매설물이 건설된 위치, 크기, 방향의 함수로 된 식이다. 현장에서 전기저항값을 측정하기 위해서 통합장비를 구성하였으며, 개발된 이론식 및 통합장비의 검증을 위해서 현장실험을 수행하였다. 현장실험 결과, 개발된 이론식 및 통합장비의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 하지만

현장실험 결과 도출 시, 지하 하부에 매설된 지하매설물(상수관로, 전력구)의 크기는 정확히 예측할 수 없었다. 이에 역해석 방법 및 프로그램을 수정하여 보완이 필요할 것으로 판단된다.

본 논문에서 제안된 이론식과 탐사장비 개발로 인해 지하매설물이 놓여진 깊이와 설계자료가 남겨지지 않은 여러 관로의 깊이 및 방향을 예측 가능할 것으로 판단된다. 또한 기존에 여러 지하매설물의 위치를 알 수 없어 설계노선대로 공사를 진행하다가 일어났던 여러 사고를 미연에 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20131010501790).

## References

1. Reitz, J.R., Milford, F.J., Christy, R.W. (2008), Foundation of electromagnetic theory 4<sup>th</sup> edition, Addison Wiley, USA.
2. Ryu, H.H. (2010), "Development of a tunnel electrical resistivity prospecting system and its application", Ph.D. Thesis, KAIST, Daejeon, Korea.
3. Ryu, H.H., Cho, G.C., Sim, Y.J., Lee, I.M. (2008), "Detection of anomalies in particulate materials using electrical resistivity survey-enhanced algorithm", Modern Physics Letters B, Vol. 22, No. 11, pp. 1093-1098.