

## 긴 전극을 사용하는 전기비저항 탐사

조인기\* · 이근수 · 김연정 · 김래영

강원대학교 지질 · 지구물리학과

### Resistivity Survey Using Long Electrodes

In-Ky Cho\*, Keun-Soo Lee, Yeon-Jung Kim, and Rae-Young Kim

*Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University*

**Abstract:** Generally, a point source has been routinely used in the electrical resistivity measurements because of easy installation. If steel-cased wells are used as long electrodes, we can expect the better depth of investigation. However, the resistivity data with long electrodes can not be processed with a conventional inversion algorithm because a long electrode produces the different primary potential distribution compared with the point source. In this study, we proposed a new technique to process the electrical resistivity data with long electrodes by replacing the long electrode with a sequence of point electrodes. Comparing the potentials obtained from the technique with the analytic/numerical solution, we ensure that the proposed technique can be used for the numerical resistivity modeling based on the finite difference or finite element method.

**Keywords:** electrical resistivity, long electrode, point source, resistivity modeling

**요 약:** 일반적으로 전기비저항 탐사에서는 편의상 점 전원을 사용한다. 만약 철제 케이싱과 같이 긴 전극을 사용한다면 전기비저항 탐사의 탐사 깊이가 증가할 것으로 기대된다. 그러나 긴 전극을 사용하여 획득된 전기비저항 탐사 자료는 통상적인 자료 해석 프로그램으로 처리할 수 없다. 이는 긴 전극에 의해 생성된 1차 전위가 점 전원에 의한 1차 전위와는 서로 다르기 때문이다. 이 연구에서는 긴 전극을 여러 개의 연속된 점 전원으로 대체하는 새로운 전기비저항 탐사 자료 처리 방법을 제안하였다. 이 방법에 의한 전위 분포를 해석적/수치적 해와 비교한 결과, 유한 차분법이나 유한 요소법에 의한 긴 전극을 사용하는 전기비저항 탐사 모델링이 가능함을 확인하였다.

**주요어:** 전기비저항, 긴 전극, 점 전원, 전기비저항 탐사 모델링

## 서 론

전기비저항 탐사는 기본적으로 2개의 전류 전극을 통하여 지하에 전류를 주입한 다음, 2개의 전위 전극 사이의 전위차를 측정하여 지하의 전기비저항 분포를 영상화하는 기법이다. 일반적으로 전기비저항 탐사에서는 막대 전극을 사용하며, 해석 과정에서는 점 전원(point source)으로 가정한다. 대부분의

전기비저항 탐사에서는 측정 사이의 간격에 비하여 전극의 길이가 매우 작기 때문에 점 전원 가정을 만족한다. 그러나 전극의 길이가 측정 간격에 비하여 무시할 수 없을 정도로 긴 경우에는 점 전원 가정에 위배된다. 이러한 문제는 전기비저항 수직 탐사(vertical sounding)에서 전류 전극과 전위 전극 사이의 간격이 작을 때 전극을 얇게 매설해야 하는 이유가 되기도 한다.

긴 전극을 사용하면 탐사 깊이(depth of investigation)를 늘릴 수 있다. 긴 전극(long electrode)은 점 전극에 비하여 깊은 곳에 있는 이상체 가까운 곳에 송·수신원이 위치하는 효과를 나타낼 것이며, 이 경우 적어도 긴 전극 근처에 있는 심부 이상체에 의한 이상(anomaly)의 크기가 증가하는 효과가 발생하게 된다. 따라서 긴 전극은 설치에 어려움이 있으나 전기비저항 탐사의 탐사 깊이를 증가시키는 효과가 있을 것으로 판단된다. 한편, 전기비저항 탐사 지역 내에 시추공이 존재할 수 있다. 대개 시추공

Received: 4 February 2016; Revised: 17 February 2016;

Accepted: 18 February 2016

\*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, Kangwon-do, 200-701, Korea

©2016, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

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.

을 유지하기 위하여 상부에 철제 케이싱(steel casing)이 설치되며, 이 철제 케이싱은 오히려 전기비저항 탐사 자료의 역산 결과를 왜곡시키는 원인이 되고 있다. 그러나 철제 케이싱을 하나의 전극으로 사용하게 되면 접지가 매우 양호하며, 보다 큰 탐사 깊이를 확보할 수 있다는 장점이 있다.

한편 긴 전극을 사용할 경우에는 다음과 같은 문제점이 발생한다. 우선 대부분의 상업용 전기비저항 해석 프로그램은 점 전원을 가정한 역산 기법에 기반하고 있다. 그러나 긴 전극에 의해 생성되는 1차 전위(primary potential) 분포는 점 전원에 의한 1차 전위 분포와는 상당한 차이를 보인다. 따라서 긴 전극을 사용하여 얻은 자료를 점 전원을 가정한 역산 프로그램을 사용하여 처리하면 왜곡된 해석 결과를 받게 된다. 긴 전극을 사용하는 전기비저항 탐사에 관한 연구는 흔하지 않다. Johnston *et al.* (1987)은 철제 케이싱이 전기비저항 탐사에 미치는 영향을 분석하였다. Rucker *et al.* (2010)은 유류 탱크에서 발생하는 유류 오염대의 조사를 위하여 시추공 케이싱을 긴 전극으로 사용하는 전기비저항 탐사를 적용하였다. 또한 Rucker *et al.* (2011)은 긴 전극을 사용하는 전기비저항 모니터링 자료에 대하여 시간 경과 역산(time-lapse inversion)을 시도하였다. 그러나 이들은 철제 케이싱을 전기전도도가 매우 높은 모델링 요소로 설정하는 방법을 사용하였다. 이 경우 케이싱의 크기가 작기 때문에 요소 분할을 아주 작게 해야 하므로 기억 용량의 한계 및 계산 시간이 너무 많이 소요된다는 문제점을 가지고 있다. 또한 2차원 문제에는 적용할 수 없게 된다.

이 연구에서는 긴 전극을 사용할 경우, 전위 계산에 대한 이론 및 이를 유한 차분법(finite difference method)이나 유한 요소법(finite element method)을 사용하는 전기비저항 탐사 모델링에 도입하는 방법을 제시하고자 하였다.

## 전위 분포

전기비저항  $\rho_b$ 인 균질 반무한 공간에 길이  $z_1$ 인 전극이 매설된 경우를 가정하자. 이 전극을 통하여 전류  $I$ 를 주입하면 임의의 점  $P$ 에서의 전위는 다음과 같다(Keller and Frischknecht, 1966).

$$V(r, z) = \frac{\rho_b I}{4\pi z_1} \int_{-z_1}^{z_1} \frac{dz'}{\sqrt{r^2 + (z' - z)^2}} \\ = \frac{\rho_b I}{4\pi z_1} \ln \left| \frac{(z_1 - z) + \sqrt{r^2 + (z_1 - z)^2}}{-(z_1 + z) + \sqrt{r^2 + (z_1 + z)^2}} \right|. \quad (1)$$

(1)식에서  $r$ 은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 전류 전극과 측정점 사이의 수평 거리이며, 전류 전극의 길이가 0에 근접하면 점 전원에 의한 전위가 된다. 만약 전류원으로 점 전극을 사용하고 긴 전극에서 측정이 이루어질 경우에는 상반성(reciprocity)을 이용하여 전위를 계산할 수 있다.

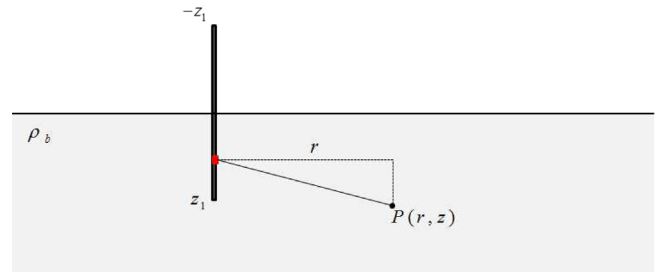


Fig. 1. Geometrical configuration of a vertical long electrode with a length of  $z_1$  extending along the  $z$ -axis.

(1)식을 사용하여 긴 전극에 의한 모든 점에서의 전위를 계산할 수 있다. Fig. 2(a)는 점 전원에 의한 전위 및 전류 밀도(current density)의 분포 양상이며, Fig. 2(b)는 길이 30 m 인 긴 전극에 의한 전위 및 전류 밀도의 분포 양상이다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 긴 전극을 사용한 경우에 전위 분포는 Fig. 2(a)의 점 전극에 의한 전위 분포와는 차이가 크다는 것을 알 수 있다, 우선 긴 전극의 경우에는 전극을 따라 전위가 높은 값을 보이며, 특히 점 전극에 비하여 심부에서의 전위가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 지표면에서의 전위는 점 전극에 비하여 긴 전극의 전위가 작게 나타나고 있다. 이러한 전위 분포의 차이는 결과적으로 전류 밀도의 방향 및 크기를 변화시키게 된다. 이는 긴 전극의 경우에 전류가 긴 전극을 따라 분산되기 때문인 것으로 해석된다.

Fig. 3(a)는 점 전극과 긴 전극에 의한 전위 분포 양상을 비교하기 위하여 30 m 길이의 긴 전극에 의한 전위를 점 전극에 의한 전위로 정규화한 전위 비(potential ratio)를 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 상부에서는 전위 비가 1보다 작은 값을 보이며, 심부에서는 1보다 큰 값을 나타내고 있다. 특히 긴 전극을 따라서는 지표 근처를 제외하고는 거의 전위 비가 1보다 큰 값을 나타내고 있어 긴 전극 주변 및 심부에 위치한 이상체의 탐지에 긴 전극을 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

이러한 전위 분포가 전기비저항 탐사에 미치는 영향을 알아보기 위하여 적분 방정식법(Beasley and Ward, 1986; Cho, 1988)을 사용하여 감도 분석을 수행하였다. 사용된 모델은 Fig. 3(a)와 (b)에 도시된 바와 같이 100 ohm-m의 반무한 공간에 크기 20 m × 20 m × 20 m, 전기비저항 1 ohm-m인 이상체를 설정하고 단극 배열(pole-pole array)을 사용하여 지표에서 획득된 겉보기 전기비저항에 대한 감도를 계산하였다. 긴 전선에 의한 1차 전위의 계산은 (1)식을 사용하였다. Fig. 3(a), (b), (c)는 이상체가 점 전극에 비하여 긴 전극에 의한 전위가 낮은 영역에 존재할 때의 모델, 겉보기 전기비저항, 감도를 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 점 전극이 긴 전극에 비하여 약간 더 큰 감도를 나타내고 있다. 이는 천부 이상체의 경우에 긴 전극을 사용하는 것은 효과가 거의 없음을 의미한다. 반면 Fig. 3(d), (e), (f)에 주어진 바와 같이 이상체가 전위 비가 1보

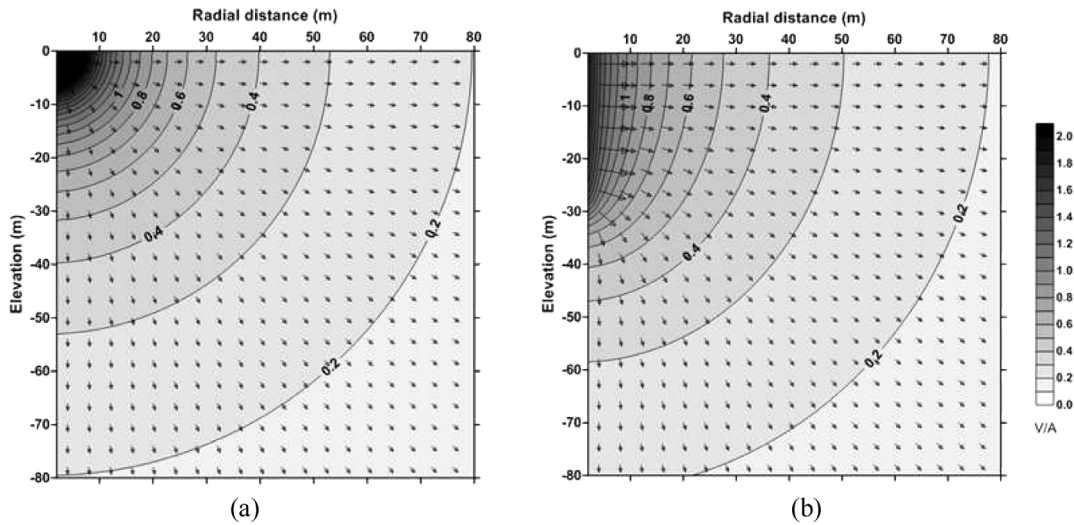


Fig. 2. Distribution of equipotential and current density (arrows) caused by a current source embedded in a homogeneous half-space of 100 ohm-m.: (a) a point electrode and (b) a long electrode (30 m long).

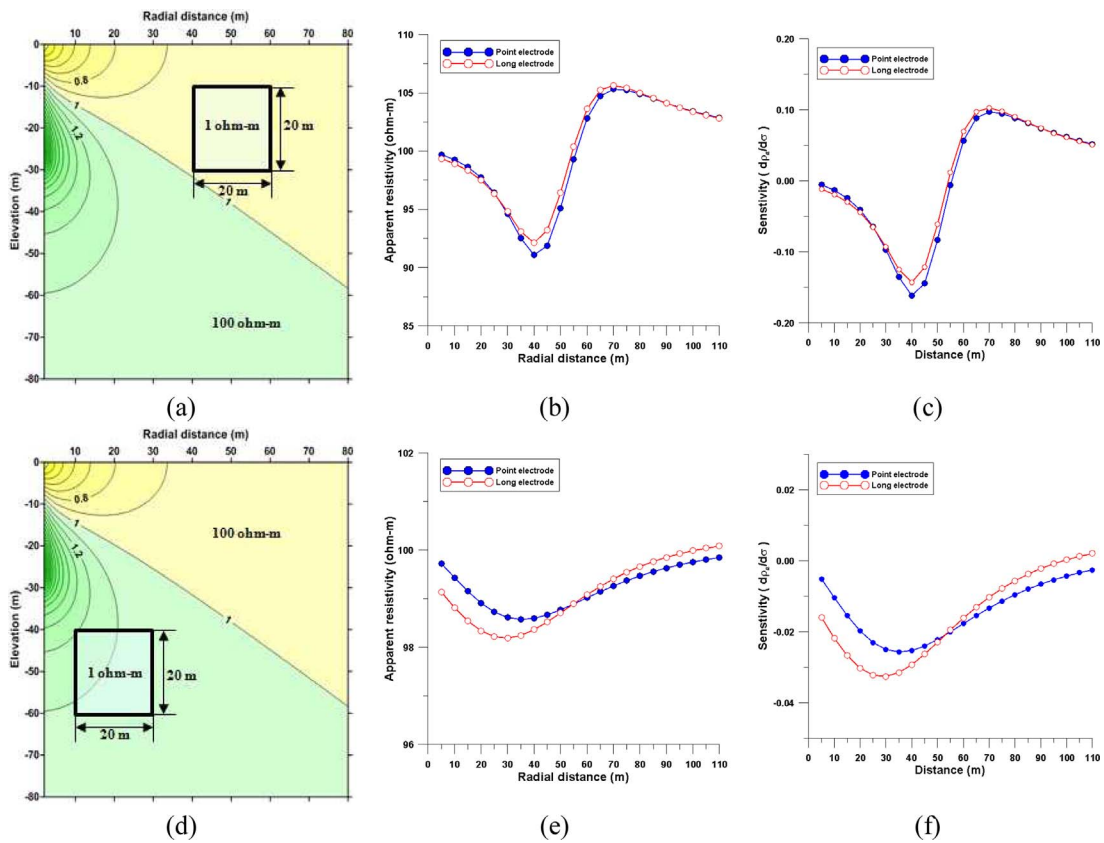


Fig. 3. Sensitivity analysis for a point source vs. a long electrode: (a), (d) Model with potential ratio distribution, (b), (e) apparent resistivity curves and (c), (f) sensitivity curves.

다 큰 영역인 심부에 위치하는 경우에는 이상체 상부에서 긴 전극이 점 전극에 비하여 큰 감도를 나타내고 있다. 반면 이상체에서 수평적으로 거리가 증가함에 따라 점 전극에 비하여 급격하게 감도가 감소하는 양상을 보이고 있다. 이는 심부에 위치한 이상체의 탐지에 긴 전극을 사용하는 것이 이상의 크

기는 물론 분해능의 측면에서도 효과적임을 의미한다.

### 수치 모델링

현재 널리 사용되고 있는 전기비저항 탐사 해석 프로그램은

미분 방정식의 해를 구하는 유한 차분법 혹은 유한 요소법을 모델링 기법으로 채택하고 있으며, 역산에서는 이에 기반한 최소 제곱 역산(least-squares inversion) 방법이 사용되고 있다. 일반적으로 유한 차분법이나 유한 요소법에서는 요소의 질점에 신호원이나 측정점이 위치해야 한다. 그러나 긴 전극을 전류원으로 사용하는 경우에는 전류가 전극을 따라 연속적으로 흘러나가므로 유한 차분법이나 유한 요소법에 의한 모델링을 수행하는 데 한계가 있다. 앞 절에서 설명한 적분 방정식법의 경우에는 긴 전극 전류원에 의한 1차 전위를 계산할 수 있으므로 이러한 문제가 발생하지 않는다. 따라서 미분 방정식법에 근거한 수치 모델링 기법에서는 긴 전선을 전류원으로 사용하는 것이 용이하지 않으며, 결과적으로 긴 전극을 사용하여 자료를 획득할 경우에는 기존의 역산 프로그램을 사용하여 역산을 수행할 수 없게 된다.

전기비저항 탐사 모델링의 지배 방정식은 다음과 같이 임의의 점  $(x_s, y_s, z_s)$ 에 위치한 점 전원에 의한 임의의 한 점  $(x, y, z)$ 에서의 전위 분포를 구하는 Poisson 방정식으로 표현된다 (Dey and Morrison, 1979).

$$-\nabla[\sigma(x, y, z)\nabla V(x, y, z)] = I\delta(x-x_s)(y-y_s)(z-z_s). \quad (2)$$

여기서  $\sigma$ 는 전기전도도,  $V$ 는 전위,  $I$ 는 전류를 나타낸다. (2)식에 유한 차분법이나 유한 요소법을 적용하면 전위는 다음의 선형 방정식을 만족한다.

$$\mathbf{KV} = \mathbf{S}. \quad (3)$$

(3)식에서  $\mathbf{K}$ 는 capacitance 행렬이며,  $\mathbf{S}$ 는 전위 벡터이다. 유한 차분법이나 유한 요소법에서는 각 절점에서 전원이 존재하는 것으로 가정하기 때문에 긴 전극을 전위 벡터로 표현할 수 없다는 문제가 발생한다. 결국 긴 전극을 사용하는 전기비저항 탐사의 모델링을 위해서는 긴 전극을 (3)식의 전위 벡터에 해당하는 점 전원으로 대체해 주어야 한다.

대개 긴 전극은 전도성이 주변 매질에 비하여 매우 높은 금속성 재질로 제작된다. 따라서 거의 전극의 모든 지점에서 같은 크기의 전류가 흘러나간다고 가정할 수 있다. 이제 Fig. 4에서와 같이 긴 전극을 여러 개의 연속된 점 전극으로 대체하고, 각 점 전극에서는 점 전극 사이의 거리에 비례하는 양 만큼의 전류가 주변 매질로 흘러나간다고 가정하자. 만약 이러한 가정이 성립한다면 긴 전선을 유한 차분법이나 유한 요소법을 사용하는 전기비저항 탐사 모델링에 포함시킬 수 있다. 즉 여러 개의 점 전원에 의한 전위를 모두 더하여 원하는 지점에서의 전위를 계산할 수 있으며, 이는 통상적인 유한 차분법이 유한 요소법에서 단순히 (3)식에 주어진 전위 벡터항  $\mathbf{S}$ 에 여러 개의 점 전원이 존재하는 것으로 가정하고 이들에 의한 전위 값을 더하면 된다. 이상과 같이 긴 전극을 여러 개의 점 전원으로 대체하게 되면 기존의 유한 차분법이나 유한 요소법을 사용하는 모델링 알고리즘을 사용하여 전기비저항 탐사 모델

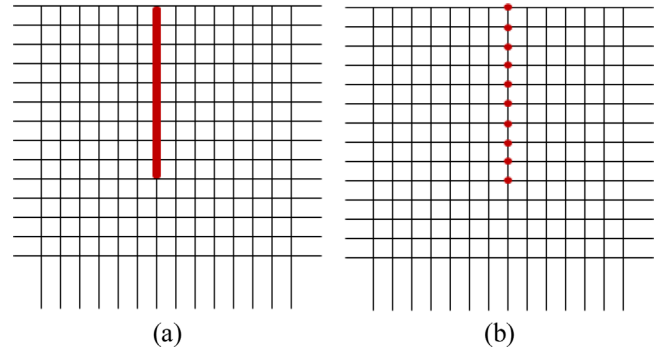


Fig. 4. (a) A long electrode and (b) sequence of point electrodes.

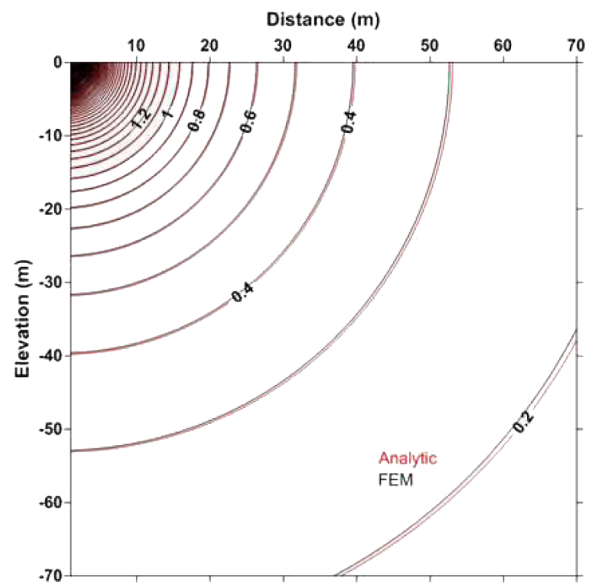
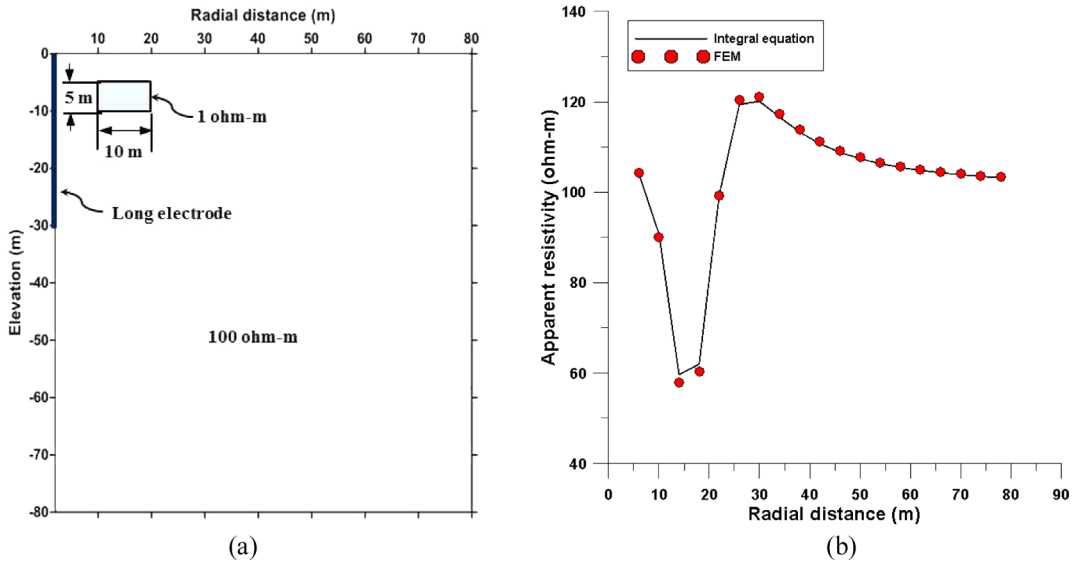


Fig. 5. Potential distribution caused by a long electrode embedded in 100 ohm-m half-space. Red and black lines indicate the equipotential lines from analytic solution and 3D finite element solution, respectively.

링이 가능하다.

Fig. 5는 이러한 가정의 타당성을 검토하기 위하여 100 ohm-m의 균질 반무한 공간에 설치된 긴 전극에 의한 1차 전위를 (1)식을 이용하여 해석적으로 계산한 값과 긴 전극을 일련의 점 전원으로 대체하고 유한 요소법을 사용하여 수치적으로 계산한 값을 함께 나타낸 것이다. 긴 전극의 길이는 30 m로 설정하였으며, 측정 간격 2 m인 전기비저항 탐사를 가정하여 요소의 크기는 0.5 m로 설정하여 측정 간격 당 4개의 요소가 존재하도록 하였다. 점 전원은 각 절점에 위치하는 것으로 가정하였다. 거의 모든 영역에서 해석해와 수치해와 잘 일치하고 있다. 다만 전극에서 거리가 먼 지점에서 약간의 차이가 나타나고 있으나 이는 점 전원의 수를 증가시키면 상당 부분 해결될 것으로 보인다. 또한 오차의 일부는 유한 요소법의 경계 조건 설정에 따른 수치 오차로 해석된다. 따라서 긴 전극을 일련의 점 전원으로 대체하여도 수치 모델링에는 큰 문제



**Fig. 6.** Comparison of pole-dipole apparent resistivity curves calculated from the integral equation method (solid line) and finite element method (solid circle). A long electrode (30 m) is used as a current electrode and the station spacing is 4 m: (a) a long electrode and subsurface model, and (b) apparent resistivity curves.

는 없을 것으로 판단된다.

Fig. 6은 전기비저항 100 ohm-m인 반무한 공간에 크기 10 m × 10 m × 5 m, 전기비저항 1 ohm-m인 이상체가 존재하는 모델에 대하여 긴 전극을 하나의 전류 전극으로 사용하여 단극-쌍극자 배열 겉보기 전기비저항을 적분 방정식법과 유한 요소법으로 계산한 결과이다. 측정 간격은 4 m로 설정하였다. 앞의 경우와 동일하게 유한 요소법을 사용하는 경우에는 긴 전극을 여러 개의 점 전원으로 대체하여 겉보기 전기비저항을 계산하였다. 그림에 나타난 바와 같이 적분 방정식법으로 얻어진 겉보기 전기비저항과 유한 요소법을 사용하여 계산된 겉보기 전기비저항이 잘 일치하고 있어 긴 전극을 여러 개의 연속된 점 전원으로 대체하여도 큰 문제가 없음을 잘 보여주고 있다.

이 논문에서는 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 주로 긴 전극을 사용하는 전기비저항 탐사 3차원 모델링에 적용하였으나, 2차원 모델링에도 별 문제없이 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 모델링 문제가 해결되면 이를 바탕으로 하는 역산으로 쉽게 확장할 수 있다. 철제 케이싱이 설치된 시추공이 존재하는 지역에서 전기비저항 탐사를 실시할 경우 철제 케이싱을 하나의 전극으로 사용할 수 있을 것이며, 이를 통하여 심부의 전기비저항 분포에 관한 보다 정밀한 영상의 획득이 가능해 질 것으로 기대된다.

## 결론

전기비저항 탐사가 수행되는 현장에는 시추공이 굴착되어 있는 경우가 많다. 이들 시추공은 지하 토양이나 암석 및 지하

수의 시료 채취, 지층의 발달 상황, 이상대의 확인을 위해 굴착된다. 그러나 이들 시추공은 차후에 각종 계측이나 시추공 물리 탐사에 사용되기도 한다. 따라서 시추공 붕괴를 막기 위하여 흔히 상부에 철제 케이싱이 설치된다. 전기비저항 탐사의 관점에서 보면 이들 철제 케이싱은 역산 잡음의 원인이 되기도 한다. 이 연구에서는 이들 철제 케이싱을 전기비저항 탐사에서 하나의 전극으로 활용하는 방법론을 제시하였다. 전기전도도가 높은 금속성 재료의 케이싱을 하나의 긴 전극으로 간주하고, 이를 다시 연속된 여러 개의 점 전원으로 대체하는 방법을 제안하였다. 이 방법을 적용하면 긴 전극을 사용하는 전기비저항 탐사의 수치 모델링이 가능해진다. 또한 기존의 역산 알고리즘을 약간 수정하면 큰 무리 없이 역산으로 확장할 수 있다. 따라서 케이싱을 전극으로 활용할 경우 탐사 깊이가 증가하기 때문에 심부의 전기비저항 분포에 관한 보다 정밀한 정보의 획득이 가능해 질 것으로 기대된다.

그러나 이 방법은 아직도 고려해야 할 여러 가지 문제점이 남아 있다. 제안된 방법에서는 긴 전극을 통하여 전류가 균질하게 주변 매질로 흘러나가는 것으로 가정하였다. 그러나 실제로 긴 전극 주변 매질의 전기 저항(electric resistance)은 깊이에 따라 달라지기 때문에 전기 저항값이 다르고, 결과적으로는 흘러나가는 전류의 양이 달라질 수 있다. 이 문제의 해결을 위해서는 주변 매질의 전기비저항까지 고려하는 알고리즘의 개발이 필요해 보인다. 또 한 가지 심각하게 고려되어야 하는 점은 대개의 시추공은 철제 케이싱 하부에도 시추공이 연장되어 있으며, 철제 케이싱은 하부의 공내수와 직접적으로 연결되어 있다는 점이다. 공내수의 전기비저항은 일반적으로 주변 매질에 비하여 매우 낮기 때문에 상당량의 전류가 공내수를 따라

집중되는 현상이 발생하게 될 것이다. 이러한 공내수의 영향은 이 논문에서 고려되지 않았기 때문에 실제와는 차이를 보일지도 모른다. 향후 이러한 부수적인 문제점에 대한 연구가 이루어지면 케이싱을 전극으로 사용하는 전기비저항 탐사법은 전기비저항 탐사법의 탐사 깊이 향상에 일조할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부의 2015년 토양·지하수 오염방지 기술개발사업에서 지원받았습니다. 또한 2015년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였습니다(과제번호-D1000426-01-01).

### References

- Beasley, C. W., and Ward, S. H., 1986, Three-dimensional mise-à-la-masse modeling applied to mapping fracture zones, *Geophysics*, **51**, 98-113.
- Cho, I. K., 1988, *Three-dimensional modeling and interpretation of cross-hole resistivity and magnetometric resistivity method*, Ph. D thesis, Seoul National University.
- Dey, A., and Morrison, H. F., 1979, Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional structures, *Geophysics*, **44**, 753-780.
- Johnston, R. H., Trofimenkoff, F. N., and Hasslett, J. W., 1987, Resistivity response of a homogeneous earth with a finite-length contained vertical conductor, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **GE-25**, 414-421.
- Keller, G. V., and Frischnecht, F. C., 1966, *Electrical Methods in Geophysical Prospecting, International Series of Monographs in Electromagnetic Waves*, vol. **10**. Pergamon Press, New York, 525.
- Rucker, D. F., Fink, J. B., and Loke, M. H., 2011, Environmental monitoring of leaks using time-lapsed long electrode electrical resistivity, *Journal of Applied Geophysics*, **74**, 242-254.
- Rucker, D. F., Loke, M. H., Noonan, G. E., and Levitt, M. T., 2010, Electrical resistivity characterization of an industrial site using long electrodes, *Geophysics*, **75**(4), WA95-WA104.