

## ERT를 이용한 2차원 대지모델 영상복원

부창진<sup>1</sup>, 김호찬<sup>1</sup>, 강민제<sup>2\*</sup>  
<sup>1</sup>제주대학교 전기공학과, <sup>2</sup>제주대학교 전자공학과

## 2D Image Reconstruction of Earth Model by Electrical Resistance Tomography

Chang-Jin Boo<sup>1</sup>, Ho-Chan Kim<sup>1</sup> and Min-Jae Kang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Juju National University

<sup>2</sup>Department of Electronic Engineering, Juju National University

**요약** 본 논문에서는 2차원 대지구조를 분석하기 위해 ERT(electrical resistance tomography) 방법을 사용하여 대지 모델을 영상복원하는 방법들을 수치적인 실험방법들을 통해 비교분석한다. 영상복원을 위한 역산방법으로는 Gauss-Newton, TLS(truncated least squares), 그리고 SIRT(simultaneous iterative reconstruction technique) 알고리즘들이 제시되고 대지저항을 측정하기 위한 전극법은 대표적인 웨너와 슬럼버거 측정방법을 사용한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 Gauss-Newton과 TLS 알고리즘이 대지모델의 2차원 영상복원에서 적합하다는 것을 보인다.

**Abstract** The In this paper, we have made numerical experiments to compare 2D image reconstruction algorithm of earth model by electrical resistance tomography (ERT). Gauss-Newton, simultaneous iterative reconstruction technique (SIRT) and truncated least squares (TLS) approaches for Wenner and Schlumberger electrode arrays are presented for the solution of the ERT image reconstruction. Computer simulations show that the Gauss-Newton and TLS approach in ERT are proper for 2D image reconstruction of an earth model.

**Key Words** : Electrical resistance tomography, Gauss-Newton method, Image reconstruction, SIRT method, TLS method

### 1. 서론

전기분야의 접지(grounding)기술은 낙뢰나 지락사고등의 전기적 위험으로부터 설비 및 사람을 보호하기 위해 필요한 기술이다. 이러한 접지 기술은 대지표면 아래에 접지 도체를 매설하여 대지 내부로 고장전류 등을 흘러 보내는 방식으로 매설되는 전극의 저항, 전극과 대지의 접촉저항, 대지저항 등에 의해 안전한 접지저항에 대한 규정값이 결정된다[1]. 일반적으로 접지저항은 매설되는 전극의 저항은 도체의 종류와 크기에 따라 정해지는 아주 작은 값이고, 대지와 매설전극간의 접촉저항 또한 무

시할 수 있을 정도로 낮은 값을 나타내기 때문에 접지저항에 가장 큰 영향을 주는 요인은 대지 내부의 대지저항률(soil resistivity)값 이라고 할 수 있다[2]. 전기적 관점에서 대지내부는 다양한 모양, 크기, 그리고 서로 다른 저항률을 가진 물질들이 분포되어 있다. 이러한 이유로 안전한 접지설계 시 대지의 깊이를 나타내는 지층간의 두께와 대지저항률값을 계산하기 위한 전류와 전압으로 표현이 가능한 수학적 모델이 필요하다. 대지 내부의 대지저항률은 토양의 비균질성, 즉 토양내의 점토, 자갈, 모래, 암반등의 서로 다른 인자들의 비균질한 혼합으로 이를 정확히 측정한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 아직까

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0025438).

\*Corresponding Author : Min-Jae Kang(Jeju National Univ.)

Tel: +82-64-754-3666 email: minjk@jejunu.ac.kr

Received June 10, 2013

Revised July 10, 2013

Accepted July 11, 2013

지는 비균질한 대지를 점토층, 모래층, 자갈층 등의 균질한 층들의 병렬로 구성되어 있다고 가정하고 각 대지층의 대지저항률, 두께, 반사율 등의 대지파라미터를 구하고 이를 이용하여 대지저항률을 계산하는 방법을 사용하고 있다. ERT 기술을 사용하게 되면 기존 전기분야에서 사용한 1차원 대지에 대한 근사적 해법이 아닌 정확한 역산(inversion) 알고리즘을 사용하여 측정된 자료로 부터 대지의 내부 구조의 2차원 영상을 구해내는 것이 가능하다[3].

ERT는 기본이론이 쉽고 대상 단면의 영상화에 있어서 더 정확한 계산방법을 동원할 수 있는 장점이 있고, 전극 간격에 따라 최대 가탐심도가 결정되기 때문에 관련 해석 소프트웨어의 종류에 따라 최대 가탐심도에 차이는 있지만 전극간격을 넓게 하면 가탐심도가 증가하고 분해능은 떨어지며, 전극간격을 좁게 하면 분해능은 향상되지만 가탐심도가 낮아진다. 따라서 접지의 매설 깊이와 압반등의 대지의 조건등을 고려하여 전극간격의 조절이 필요하다.

전극배열 방법에 따라 웨너(Wenner), 슈렘버거(Schlumberger), 단극자(pole-pole), 쌍극자(dipole-dipole) 측정방법 등이 사용되고 있으며, 최근에는 대지내부의 저항률 분포를 가정하지 않고 단극-쌍극자(pole-dipole) 배열 방법을 통해 데이터 정보를 최대화 시키는 방법도 개발되었다[4].

일반적으로 웨너 배열은 지표면에서 깊지 않은 곳에 위치하는 지하물체의 영상화에 적합한 전극배열이고 슈렘버거 배열은 상대적으로 깊은 곳의 탐사에 적합한 전극배열이다. 웨너 측정방법은 슈렘버거 측정방법에 비하여 측정전위차가 매우 높으므로, 즉 신호대비 잡음비율이 매우 높으므로, 지하 매질이 전기가 잘 통하는 지역에서 적합하나 매 측정마다 전위전극의 위치가 이동되므로 지표의 국부적인 이상에 의하여 측정 곡선이 왜곡될 우려가 매우 높으며 분해능이 상대적으로 낮다는 단점이 있다.

ERT 영상복원 알고리즘에는 steepest descent 방법과 Gauss-Newton 방법, 유전자알고리즘[5], 등 다양한 기법들이 있으며, Loke와 Dahlin은 다양한 영상복원 알고리즘들을 비교 분석하여 수렴 속도, 잔류오차 등의 측면에 대한 결과를 발표하였고, 비선형 특성의 선형화에 따른 모델링 오차, 측정전압의 낮은 신호 대 잡음비율 및 Hessian 행렬의 부정치성(ill-posedness) 특성들로 인해 목표하는 영상을 얻기가 쉽지 않기 때문에 Hessian 행렬의 부정치성 문제를 해결하기 위해 다양한 조정(regularization) 방법도 제시되었다[6].

본 논문에서는 전기분야에서 대지저항률 측정에 사용

되고 있는 웨너 측정방법과 슈렘버거 측정방법에 대한 기존에 많이 사용되고 있는 3가지 ERT 영상복원 알고리즘의 성능을 비교하고자한다. 대지저항률에 대한 영상복원을 위한 역산은 현재 많이 사용되고 있는 Gauss-Newton 알고리즘과 Hessian의 역산을 직접적으로 수행하지 않고 반복적인 방법으로 해를 구하는 TLS와 SIRT 알고리즘을 적용한다. 1차원 층상구조와 2차원 형상을 동시에 가진 대지모델을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하며 제안한 방법들에 대한 영상복원성능을 확인하도록 한다.

## 2. 대지저항률 측정방법

### 2.1 겉보기대지저항률

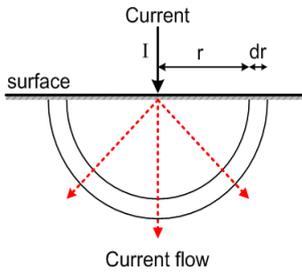
대지파라미터를 구하는 방법은 전극간격을 변화시켜 가면서 외부에서 전류를 인가하여 나타나는 전압을 측정하고, 이 값을 저항으로 환산해 구하는 데 이 값을 겉보기저항률(apparent resistivity)이라 한다[7]. 이 저항률 값들로부터 대지의 두께 및 대지저항률을 역산하기 위해서는 저항률 값과 각 파라미터 사이의 관계를 파악하여야 한다. 전기분야에서 겉보기저항률의 측정은 여러 측정법 중 웨너 측정방법과 슈렘버거 측정방법을 가장 많이 사용한다.

Fig. 1과 같이 지름이  $r$ 인 반구형의 전극을 균일한 토양에 매설한다고 가정할 때, 구형 대칭으로 등전위선은 반구상에 존재하여 대지저항  $R$ 은 식(1)로 정의되며 또한 전압차  $\Delta V$ 는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho dr}{2\pi r^2} = \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi r^2} dr \quad (2)$$

현장에서 측정된 대지저항률 값으로부터 대지파라미터를 해석하는 것은 고도의 기술을 요하는 작업이다. 실제의 대지구조는 지층별로 서로 다르기 때문에 이 저항률의 변화가 발행하여 전극간격에 따른 함수로 나타내는 겉보기저항률이 변하게 된다. 대지저항률은 통상 비균질(inhomogeneous) 특성 때문에 측정 장비를 이용하여 직접 측정할 수는 없으므로, 땅을 파서 지층을 분석하는 직접적인 방법을 사용하거나 대지저항률 측정기로 측정된 값을 역산하여 구하는 방법을 사용한다[8].



[Fig. 1] Electrical current flow in a half-space

이 방법 중에 경제성, 간편성 때문에 현재 많이 사용하는 방법은 후자인 간접적인 측정방법인데, 이 방법은 측정위치나 방법 등에 따라 측정값이 다르게 나타나므로 전극간격을 달리한 다수의 측정 결과를 필요로 한다.

### 2.2 대지저항률 측정방법

대지저항률 측정방법은 대부분 전류전극과 전위전극을 이용하여 대지내부의 대지저항률 분포를 알아내는 4전극방법을 사용하고 있으며 2차원 구조의 측정을 위해 다수의 전극을 사용하여 배열 구조를 만들어 스위칭 장치를 통해 측정을 하게 된다.

웨너 측정방법은 Fig. 2와 같이 측정선 일직선상에 안쪽에 전위전극  $P_1, P_2$ 를 두고 외부에 전류전극  $C_1, C_2$ 를 설치하여  $C_1 - P_1, P_1 - P_2, P_2 - C_2$ 의 거리( $a$ )를 등간격이 되도록 한다.

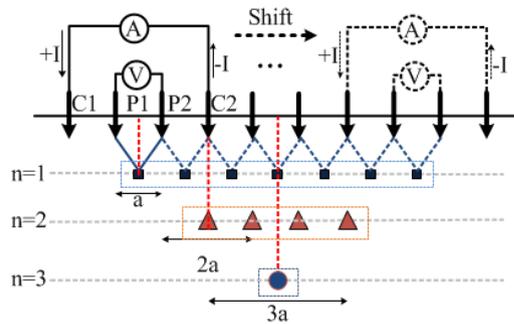
외부전류 전극( $C_1, C_2$ )에 전류  $I$ 를 주입시키고 내부의 전위전극( $P_1 - P_2$ )간의 전위차  $V$ 를 측정하여 대지저항  $R$ 을 구한다. 이 대지저항  $R$ 은 전극간격  $a$ 일 때 겉보기 대지고유저항률  $\rho$ 에 비례하며 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = k \cdot \frac{V}{I} = k \cdot R \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 전극간격 거리계수이며 웨너 측정방법인 경우 거리계수 값이  $2\pi a$ 이므로 대지고유저항률  $\rho$ 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = 2\pi a R \quad (4)$$

다수의 전극을 이용하는 배열을 사용할 경우 우측 수평방향으로 순차적으로 전류와 전위 측정전극을 이동하게 되며,  $a$ 가 1[m]인 경우( $n=1$ ) 7개,  $a$ 가 2[m]인 경우( $n=2$ ) 4개,  $a$ 가 3[m]인 경우( $n=3$ ) 1개의 측정값을 얻을 수 있다.

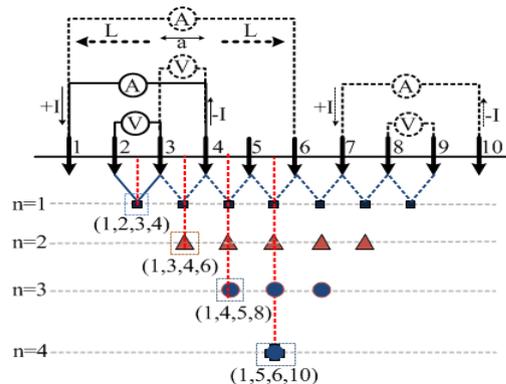


[Fig. 2] Wenner array configuration for resistivity measurement

슬럼버저 측정방법은 Fig. 3과 같이 측정선의 일직선상에 전위전극( $P_1 - P_2$ )과 전류전극( $C_1 - C_2$ )을 설치하고 전위전극( $P_1 - P_2$ )의 간격  $a$ [m]를 고정하고 전류전극( $C_1 - C_2$ )의 간격( $L$ )을 조정하여 외부전극( $C_1 - C_2$ )에 전류  $I$ 를 주입시키고 내부의 전위전극( $P_1 - P_2$ )간의 전위차  $V$ 를 측정하여 대지저항

$R = \frac{V}{I} [\Omega]$ 을 구하며, 이 대지저항  $R$ 과 겉보기 대지저항률  $\rho$ 와의 관계식은 웨너 측정방법과 동일하다. 슬럼버저 측정방법의 경우의 전극배열 거리계수  $k$ 는  $\pi \left(\frac{L}{a} + a^2\right)^2$  이므로 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = k \cdot R = \pi \left(\frac{L}{a} + a^2\right)^2 R \quad (5)$$



[Fig. 3] Schlumberger array configuration for resistivity measurement

다수의 전극을 이용하는 배열을 사용할 경우  $n=1$ 인 경우 웨너 측정방법과 동일한 7개,  $n=2$ 인 경우 전류

전극의 경우 전위전극과 2[m]가 되고 전위전극 간격은 1[m]를 유지하며 5개,  $n=3$ 인 경우 전류전극의 경우 전위전극과 3[m]가 되고 전위전극 간격은 1[m]를 유지하며 3개,  $n=4$ 인 경우 전류전극의 경우 전위전극과 4[m]가 되고 전위전극 간격은 1[m]를 유지하며 1개의 측정값을 얻을 수 있다.

### 3. ERT 영상복원 알고리즘

ERT 영상복원 알고리즘을 적용하려면 측정된 겹보기 저항률 데이터와 동일한 전극배열 데이터에 대한 유한요소법 등을 사용한 포워드 모델 설계가 반드시 필요하다. 역산 알고리즘은 이론적으로 계산되는 전위와 측정전위 사이의 오차를 줄이기 위해 반복적 계산을 수행하며, 오차가 충분히 줄어든 경우 역산을 과정 종료하여 대지구조에 대한 영상을 복원하게 된다. 대지의 구조를 해석하는데 사용되는 대부분의 비선형 역산문제들은 비고유(non-unique)나 ill-posed 문제를 가지게 되는데, 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 역산 방법으로 Gauss-Newton, TLS, SIRT 알고리즘을 적용하도록 한다.

대지표면의 물리적인 속성  $p$ 에 영향을 받는 전극배열에 따른 데이터 측정의  $N$ 번째까지의 데이터를 측정하여 벡터로 나타내면  $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T$ 로 나타낼 수 있다. 측정을 위해 10전극을 사용한 경우 웨너 측정방법의 경우  $N=12$ 이고 솔렘버거 측정방법인 경우  $N=16$ 이 된다. 공간 파라미터 분포(spatial parameter distribution)  $p(\vec{r})$ 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\vec{r}) = \sum_{i=1}^M m_i \phi_i(\vec{r}) \quad (6)$$

여기서  $m_i$ 는 계산되는 대지모델 파라미터이며 다음과 같은 모델 벡터로 정의할 수 있다.

$$m = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T \quad (7)$$

역산의 목적은 측정된 데이터  $d$ 에 대한 대지모델  $m$ 을 추정하는 것으로서 포워드의 계산  $f(m)$ 을 통해 측정된 데이터와 모델을 최소화 시키는 것이다.

$$f(m) = (f_1(m), f_2(m), \dots, f_M(m)) \quad (8)$$

#### 3.1 Gauss-Newton 알고리즘

Gauss-Newton 방법을 적용하기 위해서는 최소화시켜야 할 목적 함수를 정의 하면 다음과 같다[9].

$$\Phi_d(m) = \sum_i^N \left( \frac{d_i - f_i(m)}{\epsilon_i} \right)^2 = \|D(d - f(m))\|_2^2 \quad (9)$$

여기서  $d$ 와  $f(m)$ 는 각각 측정 데이터와 모델 포워드 응답이고  $D$ 는 데이터 측정 포인트에 대한 오차  $\epsilon_i$ 를 포함한 가중행렬을  $D = \text{diag}(1/\epsilon_i)$ 로 나타낸다.

Gauss-Newton법은 비선형 특성의 선형화에 따른 모델링 오차와 Hessian 행렬의 부정치성 때문에 만족스러운 영상을 얻기 쉽지 않다. 특히, Hessian 행렬의 부정치성은 역 행렬 계산 시 부정확한 결과를 야기 시켜 영상복원의 성능을 저하시킨다. 이러한 문제를 완화하기 위하여 본 논문에서는 기존 목적함수에 추가적인 모델함수를 조정할 수 있는 파라미터를 추가한다[10].

$$\Phi = \|D(d - f(m))\|_2^2 + \lambda \|C(m - m^0)\|_2^2 \quad (10)$$

여기서  $m^0$ 는 사전지식을 통해 알고 있는 기준모델이고  $C$ 는 모델 가중행렬을 나타낸다.

라그랑지 곱수(Lagrange multiplier)  $\lambda$ 는 모델과 데이터 함수  $\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_m$ 의 최적화에 사용된다. 모델벡터의 업데이트는 식(11)과 같이 반복 절차를 수행하게 된다.

$$m^{k+1} = m^k + \tau^k \Delta m^k \quad (11)$$

여기서  $\tau^k$ 는 구성된 포워드 모델에 순차적인 탐색파라미터이고  $k$ 는 반복횟수를 나타낸다.

최종적으로 Gauss-Newton 알고리즘의  $\Phi$ 의 최소화는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다[11].

$$\begin{aligned} & (S^T D^T D S + \lambda C^T C) \cdot \Delta m^k \\ & = S^T D^T D (d - f(m^k)) - \lambda C^T C (m^k - m^0) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $S$ 는 자코비안(Jacobian) 또는 요소들의 감도(sensitivity) 행렬  $S \in R^{N \times M}$ 을 나타내고, 각 성분은 식(13)과 같이 주어진다.

$$S_{ij}(m^k) = \frac{\partial f_i(m^k)}{\partial m_j} \quad (13)$$

### 3.2 TLS 알고리즘

식 (13)에서의 해  $\Delta m_k$ 는 행렬  $S, D, C$ ,  $\Delta d_k = d - f(\rho_k)$ 와  $m^k - m^0$ 에 의해 결정된다. 일반적으로 행렬  $S$ 는 정칙이지만,  $D$ 와  $C$ 는 정칙이 아닌 경우가 존재하고 모델 파라미터나 데이터의 개수가 많아지면 행렬의 크기가 커지기 때문에 직접 역행렬을 구하기가 힘들어진다. 이를 해결하기 위해 역행렬을 구하는 대신 반복적인 방법을 사용하여 역행렬을 구하도록 한다.

일반적으로 식(14)와 같이 주어지는 정규방정식을 conjugate gradient 알고리즘 형태로 나타낸다.

$$(A^T A + \lambda I)x = A^T b \tag{14}$$

여기서 기본방정식의 나머지를 나타내는 변수  $z = Ax - b$ 와 정규방정식의 나머지를 나타내는 변수  $r = A^T z - \lambda x$ 를 이용하여 반복적인 TLS 알고리즘을 수행할 수 있다.

### 3.3 SIRT 알고리즘

일반적으로 모델 파라미터나 데이터의 개수가 적절히 제한되는 경우에는 Gauss-Newton 알고리즘을 사용하여 대지저항률을 구하나 모델 파라미터나 데이터의 수가 많은 경우에는 행렬의 크기가 커져 직접 역행렬을 구하기가 쉽지 않기 때문에 TLS 알고리즘을 많이 사용한다. 행렬이 비정칙성을 고려하여 조정 등을 포함한 TLS 알고리즘을 수행하기 위해서는 계산시간이 많이 필요하므로 수렴속도를 빠르게 하기 위해 SIRT 알고리즘을 사용한다. SIRT 알고리즘에서는 조정 과정을 사용하지 않고 가중치 행렬을 사용하게 되며, 측정된 겐보기대지저항률 데이터  $d_i$ 는 다음과 같이 모델의 저항률 분포  $\rho(r)$ 를 이용하여 나타낼 수 있다 [12].

$$d_i = \int_{\Omega} W_i(r, \rho) \rho(r) d^2r, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{15}$$

여기서 가중치 커널(kernel) 행렬  $W$ 는 파라미터  $\rho(r)$ 에 대응하는 겐보기 저항률  $d_i$ 의 프레제 미분값들을 포함하고  $N$ 은 측정데이터의 갯수를 나타낸다.

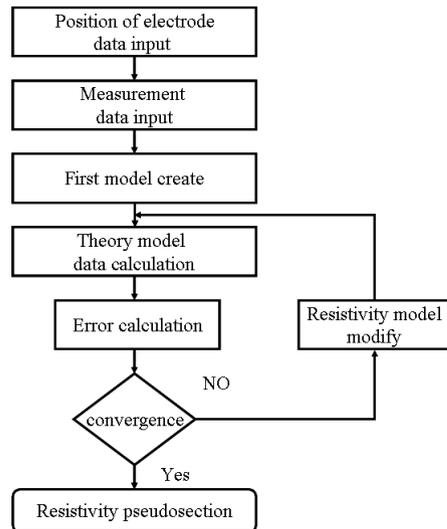
대지모델의 대지저항률 추정치  $\rho_i (j = 1, 2, \dots, M)$ 는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$\rho_{k+1}^j = \rho_k^j + \frac{\sum_{i=1}^N w_{ij} (d_i - d_i^{(n)})}{\sum_{i=1}^N |w_{ij}|}, \quad m_0^j = \bar{d}, \forall j \tag{16}$$

$$d_i^{(n)} = \sum_{j=1}^M w_{ij} m_n^j, \quad m_0^j = \bar{d}, \forall j$$

### 3.4 영상복원 알고리즘 수행절차

Gauss-Newton, TLS, SIRT 알고리즘을 이용한 대지모델 영상복원은 대지 구조에 대한 각각의 저항률 값이 하나의 매개변수가 되어야하기 때문에 추정하여야할 매개변수 벡터는 모든 대지저항률 값을 요소로 포함해야 한다. Fig. 4에 ERT 영상복원 알고리즘 수행 절차를 나타낸 것이며, 첫 번째로 전극의 위치와 측정방법과 관련된 파라미터를 입력한 후 측정데이터를 입력하여 대지모델을 생성한다. 이론적인 모델에 대한 계산을 수행하여 오차를 확인하여 설정한 수렴조건을 만족하는 경우 수행을 종료한다[14].



[Fig. 4.] Flowchart of ERT algorithm

## 4. 컴퓨터 시뮬레이션

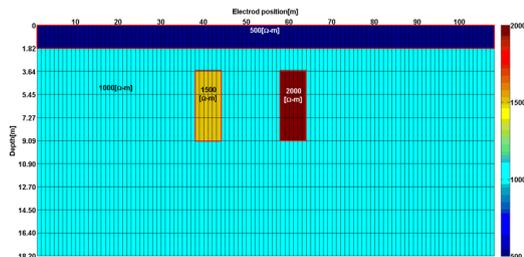
대지의 저항률에 대한 영상을 복원하기 위하여 역산 알고리즘으로 Gauss-Newton, TLS, SIRT 알고리즘을 적용하였으며, 포워드 모델은 모든 전극에 대한 2개의 주위셀, 4개의 경계셀을 적용한 유한요소법을 사용하였다. 제주도내의 고저항률의 대지를 모델링하기 위해 측정전극

구성은 웨너 측정방법과 슬렘버저 측정방법에 대한 전극 배열을 적용하고, 전극수는 108개, 전극간격은 1[m], 대지의 최대 깊이는 20.6[m]로 설정하였으며, 관련 파라미터를 Table 1에 나타내었다.

[Table 1] Definition of data set

Variable	Value	
Electrode Arrangement	Wenner	Schlumberger
Number of electrodes	108	108
Position of first electrode	0m	0m
Electrode spacing	1m	1m
Separation n	35	55
Error estimate	3%+0.1mV (100mA)	3%+0.1mV (100mA)

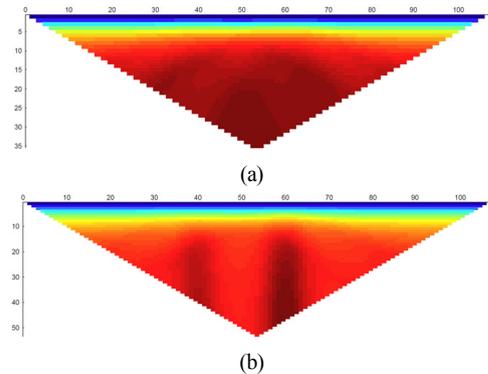
대지구조에서 표면의 1차원 구조와 내부의 2차원 구조에서 배경저항률 보다 높은 저항률에 대한 영상복원의 성능을 비교분석하기 위해 대지구조에 대한 원형을 생성하기 위해 배경(background) 저항률은 균등한 1000 [ $\Omega \cdot m$ ], 표면의 경우 500 [ $\Omega \cdot m$ ]의 1차원 층상구조, 대지 내부에 1500 [ $\Omega \cdot m$ ]과 2000 [ $\Omega \cdot m$ ]의 2차원 원형모델을 Fig. 5와 같이 생성하였다. 웨너 측정방법의 경우 사용된 전체 데이터 개수는 1890개이며 깊이에 따른 오차율은 3.3~7.0[%]이며, 슬렘버저 측정방법의 경우 2809개의 데이터와 오차율 5.2~7.0[%]을 가진다.



[Fig. 5] True model for inversion algorithm

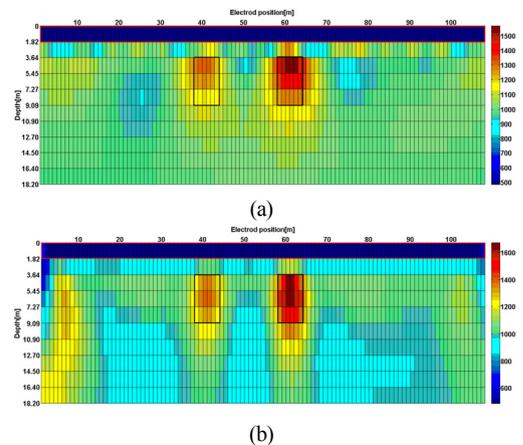
생성된 원형모델은 포워드 계산을 통해 측정방법에 적합한 데이터로 변환이 되며 현장을 고려하여 3[%] 잡음 100[mA]에서 0.1[mV]를 최소한의 전압으로 설정한 후 에러 추정치를 계산된 포워드에 추가하게 되며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 계산된 결과를 보면 500 [ $\Omega \cdot m$ ] 표면의 층상모델의 영향으로 내부의 2차원 구조의 영상은 확인하기 어렵다.

포워드계산 후 영상복원 알고리즘을 수행하게 되는데 각각의 알고리즘은  $\lambda$ 값을 조정하여 반복적인 해를 구하게 된다.



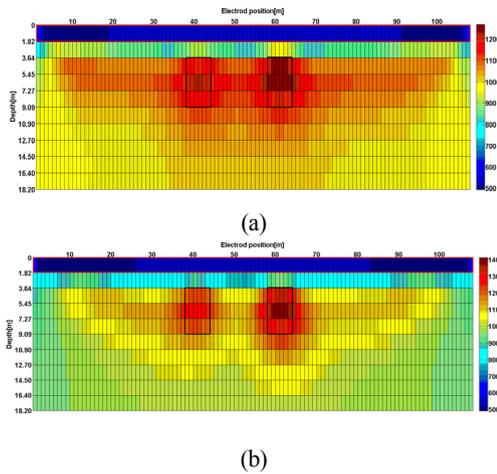
[Fig. 6] Calculated forward data  
(a) Wenner method (b) Schlumberger method

Gauss-Newton 알고리즘을 사용하여 수행한 경우의 결과가 Fig. 7에 나타나 있으며, 계산된 RMS 오차값은 웨너 측정방법 0.35[%], 슬렘버저 측정방법 0.31[%]이다. 복원된 영상에서 슬렘버저 측정방법을 사용한 경우가 더 선명한 복원 결과를 나타내었다.



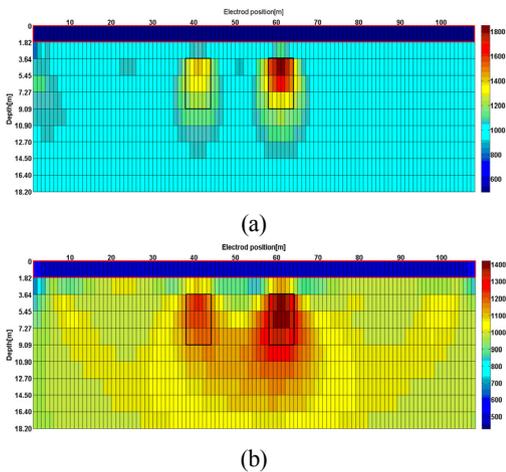
[Fig. 7] Inversion result for Gauss-Newton algorithm  
(a) Wenner method (b) Schlumberger method

두 번째로 SIRT 알고리즘을 적용한 경우의 결과가 Fig. 8에 나타냈으며, 계산된 RMS 오차값은 웨너측정방법 1.58[%], 슬렘버저 측정방법 1.31[%]로 계산되었다. 높은 저항률 모델의 경우 슬렘버저 측정방법이 웨너 측정방법에 비해 영상의 해상도가 상대적으로 높으나, 원형 모델에 비해 상당히 낮은 저항률값을 나타내고 있으며, 각각의 측정법에서 경계에 대한 구분이 선명하지 않아 Gauss-Newton 알고리즘에 비해 영상복원 성능이 좋지않게 나타났다.



[Fig. 8] Inversion result for SIRT algorithm  
(a) Wenner method (b) Schlumberger method

마지막으로 TLS 알고리즘을 적용할 경우의 영상복원 결과를 Fig. 9에 나타내었는데, 계산된 RMS 오차값은 웨너 측정방법 0.07%, 슈렘버거 측정방법 0.17%로 웨너 측정방법의 경우가 오차율이 낮게 나타났다. 슈렘버거 측정방법을 사용한 영상의 경우 원형영상과 유사하게 보이지만 대지의 깊이 7.27[m]에서 9.09[m]에서 주변 경계값과 구분이 어려우며, 웨너 측정방법 경우 RMS 오차율은 Gauss-Newton 알고리즘보다 작은 값을 보이지만, 전체적인 영상복원에서의 선명도는 낮게 나타났다.



[Fig. 9] Inversion result for TLS algorithm  
(a) Wenner method (b) Schlumberger method

[Table 2] RMS errors of several algorithms

Algorithm	M.	Init. [%]	medi. [%]	Last [%]
GN	Wen.	26.64	1.21	0.35
	Shl.	25.93	1.12	0.31
TLS	Wen.	26.64	0.26	0.07
	Shl.	25.93	0.28	0.17
SIRT	Wen.	26.64	1.59	1.58
	Shl.	25.93	2.78	1.31

## 5. 결론

본 논문에서는 ERT 기법을 이용하여 대지에 대한 1차원 모델과 2차원 대지모델이 존재할 경우에 대한 웨너 측정방법과 슈렘버거 측정방법에 대한 영상복원 알고리즘을 적용하였으며, 그 성능을 Gauss-Newton 방법과 비교하였다. TLS 알고리즘의 경우 웨너 측정방법에서 RMS 오차값이 가장 낮게 나타났으나, 영상측면에서는 대지의 깊이 7.27[m]이하에서 주변 경계와 구분이 선명하지 않음을 확인하였다. Gauss-Newton 알고리즘의 경우 웨너 측정방법에서 우수한 성능을 보였으며, SIRT는 전체적으로 영상복원에 대한 성능이 가장 좋지 않게 나타났다. TLS 알고리즘의 경우 민감도와 수렴성 등에 대한 최적화를 적용한다면 ERT의 영상복원 알고리즘으로 유용하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 향후 시험 현장을 선정하여 간접측정이 아닌 직접 시추를 수행하여 관련 깊이별 대지의 구성 샘플을 확보하여 영상복원 알고리즘의 성능을 검증하게 되면 기존 사용되는 1차원 분석방법과 더불어 ERT 기술이 접지시스템 설계에 반영할 수 있으리라 기대된다.

## References

- [1] IEEE STD-80, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1996.
- [2] Lee, H. S., *Introduction of grounding system*. Dong Il, pp. 62-63, 1995.
- [3] Maurer, H., A. Curtis, and D. E. Boerner, "Recent advances in optimized geophysical survey design", *Geophysics*, vol. 75, no. 5, pp. 75A177-75A194, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1190/1.3484194>
- [4] Blome, M., H. Maurer, and S. Greenhalgh, "Geoelectric experimental design - Efficient acquisition and exploitation of complete pole-bipole data sets", *Geophysics*, vol. 76, no. 1, pp. 76F15-F26, 2011.

- DOI: <http://dx.doi.org/10.1190/1.3511350>
- [5] Başokur, A. T. and I. Akca, "Object-based model verification by a genetic algorithm approach: application in archeological targets", *Journal of Applied Geophysics*, vol. 74, no. 4, pp. 167-174, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.05.004>
- [6] M.H. Loke, and T. Dahlin, "A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion", *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 49, pp. 149-162, 2002.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00106-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00106-9)
- [7] Tagg, G. F., Earth Resistance, George Newnes Ltd., 1964.
- [8] Dawalibi, F. and D. Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in two-layer earth structure - Part II comparison between theoretical and experimental results", *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, no. 2, pp. 262-266, 1975.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/T-PAS.1975.31850>
- [9] Tripp, A. C., G. W. Hohmann, and C. M. Swift Jr., "Two-dimensional resistivity inversion", *Geophysics*, vol. 49, pp. 1708-1717, 1984.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1441578>
- [10] Farquharson, C. G. and D. W. Oldenburg, "Non-linear inversion using general measures of data misfit and model structure", *Geophysical Journal International*, vol. 134, pp. 213-227, 1998.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00555.x>
- [11] C.R. Vogel, Computational methods for inverse problems, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1137/1.9780898717570>
- [12] Park, S. K. and G. P. Van, "Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes", *Geophysics*, vol. 56, no. 7, pp. 951-960, 1991.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1443128>
- [13] Brunner, I., S. Friedel, F. Jacobs, and E. Danckwardt, "Investigation of a Tertiary maar structure using three-dimensional resistivity imaging", *Geophysical Journal International*, vol. 136, pp. 771-780, 1999.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00770.x>
- [14] Chang-Jin Boo, Ho-Chan Kim, Yoon-Joon Lee, "A Comparison of Image Reconstruction Techniques for Electrical Resistance Tomography", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 19, no. 3, pp. 119-126, 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2005.19.3.119>

**부 창 진(Chang-Jin Boo)****[정회원]**

- 2003년 2월 : 제주대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 제주대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2007년 12월 ~ 2008년 12월 : 미국베일러대학교 방문연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 전기공학과 시간강사

&lt;관심분야&gt;

접지시스템 설계, 스마트그리드, 제어시스템

**김 호 찬(Ho-Chan Kim)****[정회원]**

- 1989년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 (공학박사)
- 2008년 2월 ~ 2009년 2월 : 미국펜스태이트 방문교수
- 1995년 9월 ~ 현재 : 제주대학교 전기공학과 교수

&lt;관심분야&gt;

신재생에너지, 풍력발전, 접지시스템 설계, 에너지효율

**강 민 제(Min-Jae Kang)****[정회원]**

- 1982년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 미국 루이빌대 전기공학과 (공학박사)
- 2003년 2월 ~ 2004년 2월 : 미국 일리노이주립대학 방문교수
- 1992년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 전자공학과 교수

&lt;관심분야&gt;

신경회로망, 접지시스템 설계, 풍력발전제어