

2차원 전기저항률 측정에서 전극배열법의 비교

부 창 진* · 김 호 찬* · 강 민 제*

A Comparison of Electrode Arrays in Two-Dimensional Resistivity Measurement

Chang-Jin Boo* · Ho-Chan Kim* · Min-Jae Kang*

ABSTRACT

Electrical resistance tomography(ERT) maps resistivity values of the soil subspace and characterizes buried objects. The characterization includes location, size, and resistivity of buried objects. In this paper, we have made numerical experiments to compare the performance of the Wenner, Schlumberger, pole-pole, and dipole-dipole electrode arrays for two-dimensional resistivity measurement in ERT. In general, the SNR(signal to noise ratio) of resistivity measurement is directly to the measurement voltage level. The pole-pole and Wenner arrays can give the highest signal level. Results of numerical experiments in ERT solved by four electrode array types are presented and compared using Gauss-Newton inversion algorithm.

Key words : Electrical resistance tomography, resistivity measurement, electrode array, inversion algorithm, Gauss-Newton method

1. 서 론

지하의 고분해능 영상을 획득하는 토모그래피 기법의 발전은 전기, 토목, 자원, 환경 등의 다양한 분야에서의 필요성에 의한 결과이다. 토모그래피 기술은 탄성파의 전파 및 감쇠 현상을 이용하는 탄성파 토모그래피에 의하여 선도되었으나, 전기저항률(resistivity) 및 유전율과 같은 전기적인 물성의 영상의 필요성에 의하여 전기, 전자 토모그래피 기술로 확대되었다. 전기, 전자 토모그래피는 주파수에 의하여 전기

저항률, 전자탐사, 레이더 토모그래피로 나누어질 수 있다. electrical resistance tomography(ERT)는 시간에 따른 변화가 없는 정적 전기장(static electric field)를 이용하므로 파동장을 이용하는 탄성파 및 레이더 탐사에 비해 근본적인 해상도의 한계를 갖는다. 반면 ERT의 기본이론은 간단하며, 따라서 대상 단면의 영상화에 있어서 더 정확한 계산방법을 동원할 수 있는 장점이 있다. 즉, ERT는 근사적 해법이 아닌 정확한 역산(inversion)기법을 동원하여 측정자료로부터 지하구조의 영상을 구해내는 것이 가능하다 [1]. 이러한 이유로 ERT라는 용어 대신에 전기저항률 영상화(resistivity imaging)라는 용어를 사용하여 차별화하기도 한다.

ERT는 전극간격에 따라 최대 가탐심도(depth of

* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소
Faculty of Electrical & Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.

investigation)가 결정된다. 비록 해석 소프트웨어의 종류에 따라 최대 가탐심도에 다소의 차이는 있지만 전극간격을 넓게 하면 가탐심도가 증가하는 반면에 분해능이 떨어지며, 전극간격을 좁게 하면 분해능이 좋아지는 반면에 가탐심도가 낮게 된다. 따라서 탐사의 목적과 지반조건 등을 고려하여 전극간격의 조절이 필요하다. 또한 전극배열(electrode array) 방법에 따라 Wenner, Schlumberger, 단극자(pole-pole) 그리고 쌍극자(dipole-dipole) 배열 등이 있다 [2].

일반적으로 Wenner 배열은 지표면에서 깊이 않은 곳에 위치하는 지하물체의 영상화에 적합한 전극배열이고 Schlumberger 배열은 상대적으로 깊은 곳의 탐사에 적합한 전극배열이다. Wenner 배열은 Schlumberger 배열에 비하여 측정전위차가 매우 높으므로, 즉 SNR(signal to noise ratio)이 매우 높으므로, 지하매질이 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. 쌍극자 배열은 다양한 전극배열법 중에서 가장 분해능이 뛰어난 장점이 있지만 측정 자료의 질을 의미하는 SNR이 낮아 잡음의 영향을 받기 쉬운 단점도 갖고 있다. 단극자 배열은 SNR은 가장 높으나 분해능은 낮은 배열이다. 그리고 단극 배열은 측선상에 설치하는 전극 외에 측선으로부터 상당히 떨어진 위치에 원거리 전극을 설치하고 전선을 부설하여야 하므로 사전에 지형조건이나 용지 상황을 검토해 둘 필요가 있다.

본 논문에서는 ERT에서 서로 다른 4개의 전극배열에 대하여 측정자료를 얻고 일반적인 Gauss-Newton 역산 알고리즘을 동원하여 지하물체의 영상을 구하도록 하고 구한 영상과 실제 영상의 정확도에 관해 비교분석해 보도록 한다.

II. 전기저항률 측정방법

대지의 전기저항률은 토양의 종류, 습도, 계절 및 온도변화에 따라 큰 차이가 발생하고 있으며 대지의 깊이, 위치에 따라서 다르기 때문에 토양에 대한 전기적 특성을 결정한다는 것은 대단히 어렵다. 실제적

으로 여러층으로 구분된 토양구조를 단일구조의 등가 모델로 변환하여 접지설계에 적용한다. 그러나 이것은 실질적으로 토양이 균등하게 분포할 경우에만 비교적 정확한 해를 얻을 수 있어 현실에 가깝도록 2지층 또는 3지층구조로 토양을 모델링하는 것이 현실적으로 적합하다.

토양의 특성이 다양하고 복잡하여 토양의 구조를 결정하는데 많은 측정방법과 측정기술이 검토되어 왔다. 측정방법은 크게 직접측정과 간접측정의 2가지로 분류할 수 있다. 직접측정방법은 각종 깊이로 토양의 견본을 추출하여 전문화된 실험실에서 측정하는 방법으로 정확하고 직접적인 측정방법이나 값비싼 보링작업이 필요하다.

간접측정방법은 전압 V 를 인가하여 대지의 응답치인 R 을 측정하여 대지의 구조를 해석하는 것이다. 알려진 대지의 전기저항률 ρ 와 대지 파라미터를 이용하여 가장 근접한 대지구조를 결정하는 것이다. 통상적으로 전극배열법 가운데 2차원 탐사에 사용될 수 있는 전극배열로는 단극자, 단극-쌍극자(pole-dipole), 쌍극자, Wenner 및 Schlumberger 배열을 들 수 있다 [3].

본 논문에서는 현재 간접측정방법으로 가장 널리 쓰이는 Wenner 전극배열법, Schlumberger 전극배열법, 단극자 전극배열법과 쌍극자 전극배열법의 특징에 대해 살펴보고 성능을 비교분석하도록 한다.

2.1. Wenner 전극배열법

대개의 전기저항률 측정기술은 Frank Wenner가 처음으로 제안한 등간격 4전극법을 변형시킨 기술이다. Wenner 전극배열법은 전극간격이 멀 때 전위전극에서 발생하는 전위차가 매우 작아 깊이 않는 전극간격이 요구될 때 적용되어 왔다. 이 측정법은 사용되는 기기가 다양하고 측정결과와 해석방법이 간단하므로 적당한 전기저항률 측정법으로 이용되어 왔다.

Wenner 4전극법 배열은 Fig. 1과 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 $R = \frac{\Delta V}{I} (\Omega)$ 를 구한다. 이 대지저항 R 은 전극간격 a 일 때 겉보기 전기저항률 ρ 에 비례하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = K \cdot \frac{V}{I} = K \cdot R \quad (1)$$

여기서 K 는 전극간격 거리계수로 Wenner 전극배열법인 경우 $K=2\pi a$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

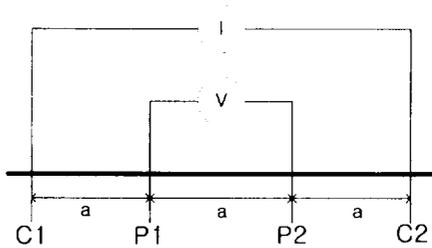


Fig. 1 Wenner configuration

2.2 Schlumberger 전극배열법

Schlumberger 전극배열법은 측정선의 일직선상에서 내부에 전위전극 (P_1-P_2) 외부에 전류전극 (C_1-C_2)를 설치하고 전위전극 (P_1-P_2)의 간격 a 가 전류전극 (C_1-C_2)의 간격 (L)의 $\frac{1}{5}$ 을 초과하지 않도록 한다. 외부전극 (C_1-C_2)에 전류 I 를 주입시키고 내부의 전위전극 (P_1-P_2)간의 전위차 V 를 측정하여 대지저항 $R = \frac{\Delta V}{I} (\Omega)$ 을 구하고, 이 대지저항 R 과 겉보기 전기저항률 ρ 와의 관계식은 Wenner 전극배열법과 동일하다. 다만 전극배열 기하학적 계수가 $K = \frac{L(L+a)\pi}{a}$ 이므로 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$\rho = K \cdot R = \frac{L(L+a)\pi}{a} R \quad (3)$$

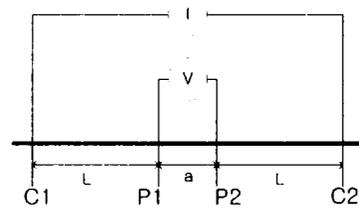


Fig. 2 Schlumberger configuration

2.3. 단극자 전극배열법

단극자배열법은 Fig. 3에서와 같이 하나의 전류전극 C_1 에서 전류를 흘려보내고 다른 전위전극 P_1 으로는 전위분포를 측정하는 원리인데, 이때 (-)전극으로 간주되는 또 다른 전류전극 C_2 와 전위전극 P_2 는 축선으로부터 충분히 멀리 떨어진 지점 (일반적으로 최대 전극간격의 10배 이상되는 지점)에 고정 설치하며 이를 원전극(遠電極)이라고 한다.

단극자배열법은 위의 다른 배열법과 마찬가지로 4개의 전극을 이용하며 거리계수가 $K=2\pi a$ 이므로 Wenner 전극배열법과 같으므로 겉보기 전기저항률은

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

로 나타낼 수 있다.

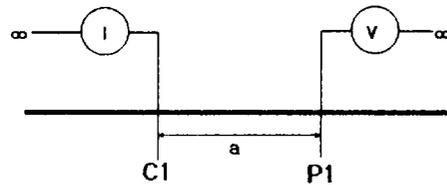


Fig. 3 Pole-pole configuration

2.4. 쌍극자 전극배열법

쌍극자배열법은 Fig. 4에서와 같이 일직선상의 한 쪽편에 전류전극 C_1, C_2 를 고정시킨 후 전위전극

P_1, P_2 를 등전극 간격(a)을 유지하며 C_1, C_2 와 P_1, P_2 의 사이를 $a, 2a, \dots, na$ 간격이 되도록 단계적으로 이동하여 전위차 부호 V 를 측정하여 겘보기 전기저항률을 계산한다. 여기서 전극간격 a 는 탐사목적, 정밀도 등을 고려하여 결정한다. 쌍극자배열의 거리계수가 $K = n(n+1)(n+2)\pi a$ 가 되므로 겘보기 전기저항률은

$$\rho = K \cdot R = n(n+1)(n+2)\pi a R \quad (5)$$

가 된다.

쌍극자배열법으로 얻어진 측정값은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 전위전극 중심과 전류전극의 중심에서 45°로 비스듬히 선을 그어 만나는 점에 기록한다. 현장에서 측정된 값은 전기저항($\Delta V/I$)이므로, 거리계수 K 를 곱하여 겘보기 전기저항률 단면을 얻을 수 있다.

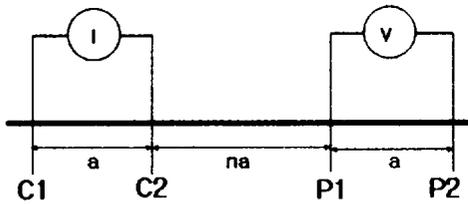


Fig. 4 Dipole-dipole configuration

III. ERT 영상복원 이론

ERT에서 DC(direct current) 방법은 인위적으로 지하에 전류를 흐르게 하여 발생하는 저항을 측정하는데, 여기에는 전류를 주입시키는데 사용하는 두 개의 전류전극과 전류에 의해 발생하는 전위의 반응측정을 볼트미터로 측정하기 위한 두 개의 전위전극을 합하여 총 4개의 전극이 사용된다. 비저항은 전극의 모양과 전극들 간의 거리, 그리고 주입한 전류와 측정된 전압에 의해 계산할 수 있다. DC 방법은 지하수자원의 탐사에 1930년대부터 적용해 오고 있으며 근래에는 오염지반의 탐사에 이르기까지 다양하게 사용하고 있다. DC 방법은 전류전극과 전위전극의 배치형태에 따라 구분되는데 1960년대까지는 Wenner,

Schlumberger, 단극자, 그리고 쌍극자 배열등이 있다.

일반적으로 ERT 모델링에 사용되는 수치해석에는 유한차분법(finite difference method), 유한요소법(finite element method), 적분방정식법(integral equation method), 신경망해법(network analog method) 등이 있으며, 본 논문에서는 2차원 토모그래피 역산알고리즘을 개발하기 위해 지형기복의 표현이 용이한 유한요소법을 모델링의 근간으로 채택하였다.

3.1. ERT의 수학적 모델

표적의 경계면에서 여러 개의 전극을 통하여 전류를 주입하고 이미 알고 있는 저항률의 경계면에 유기되는 전압은 다음과 같이 Poisson 방정식으로 나타낼 수 있다 [4].

$$-\nabla \cdot (\rho^{-1} \nabla \phi) = \nabla \cdot I \quad (6)$$

여기서 ρ 는 전기저항률(electrical resistivity), ϕ 는 전위(electric potential), 그리고 I 는 주입되는 전류소스를 나타낸다. 위의 지배방정식에 대하여 일반적인 유한요소법의 절차에 따라 지하구조를 요소로 분할하고 유한요소방정식을 전개한 후, 경계조건을 적용하고, 각 요소에 대한 결점에 대하여 조합하면 다음과 같은 유한요소 행렬식을 얻게 된다.

$$YU_c = I_c \quad (7)$$

여기서 Y 는 캐패시턴스 행렬 또는 결합계수행렬, U_c 는 전위벡터, 그리고 I_c 는 전류벡터를 나타낸다. 이때 결합계수 행렬 Y 는 유한요소방정식에 사용된 요소의 형상과 전기저항률 만의 함수로 표시되며, 전체 절점수가 N 인 경우 그 크기는 $N \times N$ 의 일정한 락을 가지는 거대한 대칭 희소(sparse) 행렬이다. 경계조건으로는 지표에서의 전기장의 수직성분이 0인 노이만(Neumann) 조건과 인위적인 경계면에 대해서는 혼합경계조건을 적용하였다.

위의 노이만 형의 경계조건을 갖는 비선형 Poisson

방정식의 해석적인 해는 구하기가 매우 어려우므로 본 논문에서는 Fig. 5와 같이 위에서 살펴본 Wenner, Schlumberger, 단극자와 쌍극자와 같은 전극배열을 통한 포워드(forward) 응답 메쉬를 통한 유한요소법을 사용하도록 한다. 전극배열에 따른 영향을 분석하기 위해 4개의 전극배열에 대한 데이터 포인트를 생성하였다. Wenner 배열의 경우 총 183개의 데이터 포인트, Schlumberger 배열은 198개의 데이터 포인트, 단극자의 경우 가장 많은 223개의 데이터 포인트, 그리고 쌍극자의 경우 213개의 데이터 포인트를 가지게 된다. 생성된 데이터에 포워드 계산은 13×96 을 계산한 1248 셀에 대한 계산을 하게 된다.

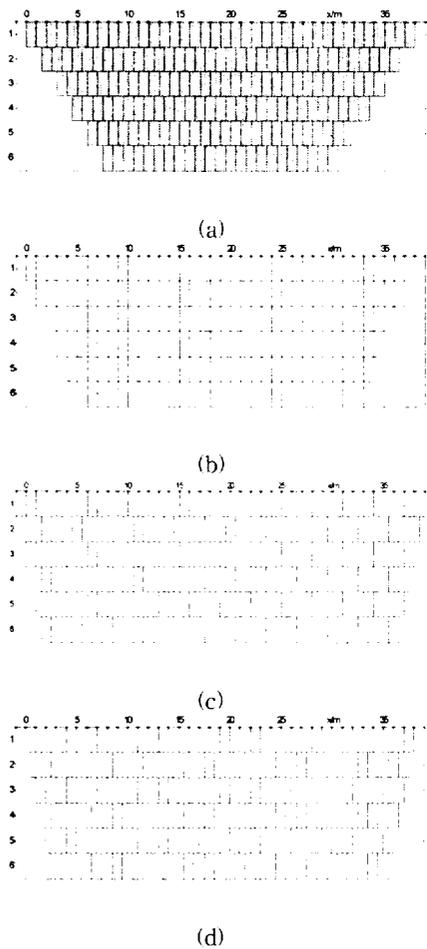


Fig. 5 Finite element mesh of the four electrode configuration (a) Wenner (b) Schlumberger (c) pole-pole (d) dipole-dipole

3.2. ERT 영상복원 알고리즘

ERT 방법에서 불균질한 지반의 전기저항률 분포에 대한 영상복원 위하여 반복적 역산 알고리즘을 적용한다. 반복적 역산 알고리즘에 의하여 이론전위와 측정전위 사이의 오차를 줄여가게 되며 오차가 충분히 줄어든 경우 역산 알고리즘을 종료시킨다. 토양의 구조를 해석하는데 사용되는 대부분의 비선형 역산문제들은 비고유(non-unique)나 비정치성(ill-posed)을 가지게 되는데, 전기저항률 분포에 대한 영상을 복원하기 위하여 역산 알고리즘으로 Gauss-Newton 알고리즘을 적용하도록 한다.

Loke 등 [5]은 다양한 복원 알고리즘들을 비교 분석한 결과 Gauss-Newton 법이 다른 알고리즘에 비해 수렴 속도(convergence rate), 잔류 오차(residual error) 등의 측면에서 비교적 좋은 성능을 나타냄을 발표하였다. Gauss-Newton 법에서 최소화시켜야 할 목적 함수는 다음과 같이 오차의 제곱의 합으로 정의된다.

$$\Phi_d = \sum_i^{n_d} \left(\frac{d_i - f_i(\rho)}{\epsilon_i} \right)^2 = \| (Dd - f(\rho)) \|_2^2 = \Phi_d^* \quad (8)$$

여기서 d 와 $f(\rho)$ 는 각각 수집한 데이터와 모델 포워드 응답이고 D 는 데이터 가중행렬을 나타낸다. 이때 식 (8)에서 주어진 모델 제약함수를 최소화함으로써 모델 ρ 를 찾는 것이다. 식 (8)로 주어지는 목적 함수를 최소화시키는 문제를 다음과 같이 변환한다.

$$\Phi_d' = - [f'(\rho)]^T D^T D [d - f(\rho)] = 0 \quad (9)$$

위의 식 (9)은 비선형이므로 다음과 같이 반복적인 선형화를 하여 푼다.

$$\Phi_d'(\rho_{k-1}) \approx \Phi_d'(\rho_k) + \Phi_d''(\rho_k)(\rho_{k+1} - \rho_k) = 0 \quad (10)$$

여기서 Φ_d'' 은 Hessian 행렬이라 부르며, 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_{d''} = [f']^T D^T D f' + [f']^T \{I \otimes [d - f]\} \quad (11)$$

이때 \otimes 는 Kronecker 행렬 곱을 나타낸다. f' 은 계산하기 어렵고 상대적으로 작은 양이므로, 위 식에서 두 번째 항은 보통 무시된다. 따라서 Hessian 행렬은 다음과 같이 된다.

$$\Phi_{d''} = [f']^T D^T D f' \quad (12)$$

위의 식들을 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\Delta \rho_k = \rho_{k+1} - \rho_k = H^{-1} \{S^T [d - f(\rho_k)]\} \quad (13)$$

여기서 Hessian 행렬 H 는 다음과 같이 정의되고

$$H = S^T D^T D S \quad (14)$$

S 는 자코비안(Jacobian) 또는 요소들의 감도(sensitivity) 행렬을 나타내고, 각 성분은 다음과 같이 주어진다.

$$S_{ij} = \frac{\partial f_i(\rho)}{\partial \rho_j} \quad (15)$$

Gauss-Newton법은 비선형 특성의 선형화에 따른 모델링 오차(modeling error)와 Hessian 행렬의 비정칙성 때문에 만족스러운 영상을 얻기가 쉽지 않다. 특히, Hessian 행렬의 비정칙성은 역행렬 계산 시 부정확한 결과를 야기시켜 영상복원의 성능을 저하시킨다. 이러한 문제를 완화하기 위하여 본 논문에서는 다음과 같이 목적함수에 regularization 항을 포함시키도록 한다 [6].

$$\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_\rho = \|(D(d - f(\rho)))\|_2^2 + \lambda \|(C(\rho - \rho_0))\|_2^2 \quad (16)$$

여기서 ρ_0 는 사전지식을 통해 알고 있는 기준모델이고 C 는 모델 가중행렬(weighting matrix)을 나타낸다.

라그랑지 곱수(Lagrange multiplier) λ 는 모델과 데이터 함수 $\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_\rho$ 를 결합하는데 사용된다.

일반적으로 대상(target) 값 Φ_d^* 는 데이터 n_d 의 수와 같고 그 데이터는 표준편차 내에서 조정된다. Gauss-Newton법을 사용하여 $\rho_{k+1} = \rho_k + \Delta \rho_k$ 로 반복하고 Φ 를 최소화하도록 한다. 모든 반복 k 에서 잘 알려진 정규화 일반식은 다음의 식으로 풀 수 있다 [7].

$$((DS)^T DS + \lambda C^T C) \cdot \Delta \rho_k = (DS)^T D(d - f(\rho_k)) - \lambda C^T C(\rho_k - \rho_0) \quad (17)$$

식 (17)에서 $\mathfrak{S} = DS$ 과 일반적인 역행렬(generalized inverse matrix) \mathfrak{S}^* , C^* 을 사용하면 다음의 결과를 얻는다.

$$\Delta \rho_k = \mathfrak{S}^* D(d - f(\rho_k)) - C^* C(\rho_k - \rho_0) \quad (18)$$

여기서 $\mathfrak{S}^* = (\mathfrak{S}^T \mathfrak{S} + \lambda C^T C)^{-1} \mathfrak{S}^T$ 와 $C^* = \lambda (\mathfrak{S}^T \mathfrak{S} + \lambda C^T C)^{-1}$ 이고 $\mathfrak{S}^T \mathfrak{S} + C^T C = I$ 의 관계를 만족한다.

한편 데이터 d 는 다음과 같이 모델 ρ_{me} 의 포워드 응답에 잡음 n 이 곱친 것으로 가정할 수 있는데,

$$d = f(\rho_{me}) + n \quad (19)$$

이때 k 스텝에서 모델 ρ_k 이 모델에 이미 근접했다고 가정하면 선형화 영역은 다음과 같다.

$$d = f(\rho_k) + S(\rho_{me} - \rho_k) + n \quad (20)$$

식 (20)을 식 (18)에 대입하면 추정모델 ρ_{est} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_{est} &= \rho_k + \mathfrak{S}^* D S (\rho_{me} - \rho_k) - C^* C (\rho_k - \rho_0) + \mathfrak{S}^* D n \\ &= \rho_k + \mathfrak{S}^* \mathfrak{S} \rho_{me} - (\mathfrak{S}^* \mathfrak{S} + C^* C) \rho_k + C^* C \rho_0 + \mathfrak{S}^* D n \\ &= R^M \rho_{me} + (I - R^M) \rho_0 + \mathfrak{S}^* D n \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 $R^M = \mathfrak{S}^* \mathfrak{S}$ 이다.

추정모델 ρ_{est} 는 원형모델과 기준모델, 그리고 잡음 포함된 것에 의해 재구성된다. 이때 R^M 는 일반화된 역행렬 J 을 포함하므로 추정모델의 해상도와 민감도를 결정하는 중요한 행렬이 된다.

Gauss-Newton 알고리즘을 이용하여 지하구조를 영상화하기 위해서 대지 지하의 저항률 값이 각각 하나의 파라미터가 되어야 하므로 추정하여야 할 파라미터 벡터는 모든 내부저항률 값을 원소로 포함해야 한다. 따라서 유한요소법의 총 노드수가 증가할수록 추정할 파라미터의 개수는 증가하고 계산시간은 상당히 늘어난다. 목적함수는 모든 개체에 대해 계산되는데, 주어진 역산 방법을 이용한 영상복원 과정은 Fig. 6과 같다.

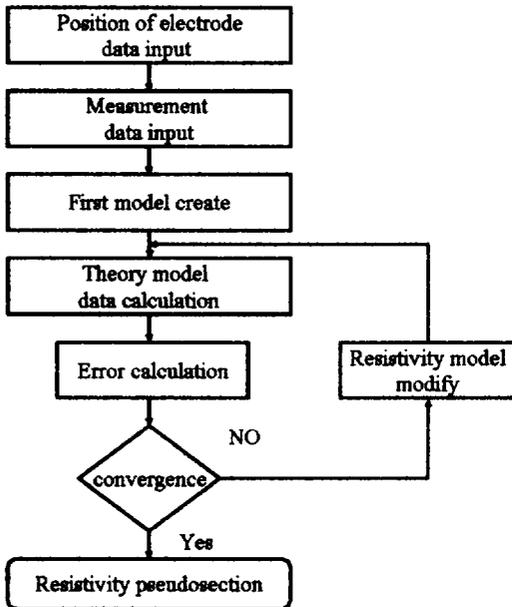


Fig. 6 Flowchart of ERT algorithm.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서는 ERT 방법을 사용하여 대지의 저항률에 따른 지하물체의 영상을 복원하기 위하여 Gauss-Newton 역산 알고리즘을 적용하였으며 포워드 모델은 모든 전극에 대한 주위셀 2, 경계셀 4를 사용한 유한요소를 사용하였다. Table 1과 같이 주어

진 모델은 Wenner, Schlumberger, 단극자 및 쌍극자 배열에서 얻은 데이터들을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 이때 복원되어 얻어지는 지하물체의 영상 특성들을 비교분석하였다. 41개의 전극은 1m 간격으로 설치하였고 6층의 수평구조인 대지에 대하여 최대 6m인 로그스케일인 저항률을 사용하였다.

Table 1. Definition of data set

Electrode arrangement	Wenner(Schlumberger, pole-pole, dipole-dipole)
Number of electrode	41
Position of first electrode	-1m
Electrode spacing	1m
Separation n	1 to 6
Error estimate	3%+0.1mv at 100 mA current
Number of data	183(198,225,213)

2차원 지하물체는 Fig. 7과 같이 6층의 수평구조인 대지의 배경저항률(background resistivity)을 $100 \Omega \cdot m$ 로 균등하게 설정하였고 사용된 가상의 지하물체는 배경저항률 보다 낮은 저항률과 높은 저항률에 따른 영상복원의 성능을 비교분석하기 위해 $50 \Omega \cdot m$ 과 $200 \Omega \cdot m$ 의 원형모델(true model)을 생성하였다.

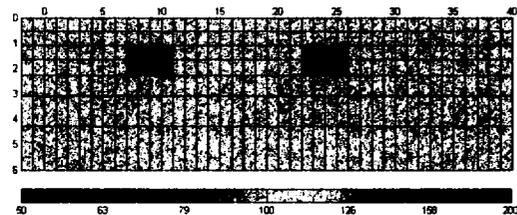


Fig. 7 Model parameterization and synthetic model consisting of 2 bodies with $50 \Omega m$ and $200 \Omega m$ in a homogeneous half-space of $100 \Omega m$

Fig. 7과 같이 생성된 원형모델에 대하여 Wenner, Schlumberger, 단극자 및 쌍극자 배열을 사용하고 추정오차 부분을 추가하기 위해 3%의 잡음과 100mA에서 0.1mV를 최소한의 전압으로 설정한 경우의 포워드 응답을 나타낸 결과는 Fig. 8과 같다. 여기에 온도, 습도 및 다양한 외부환경에 따른 대지

저항률의 변화를 고려하기 위해 식 (19)에서 추정잡음 부분에 외부잡음을 추가하기 시작하면 포워드 응답이 나빠지기 시작한다.

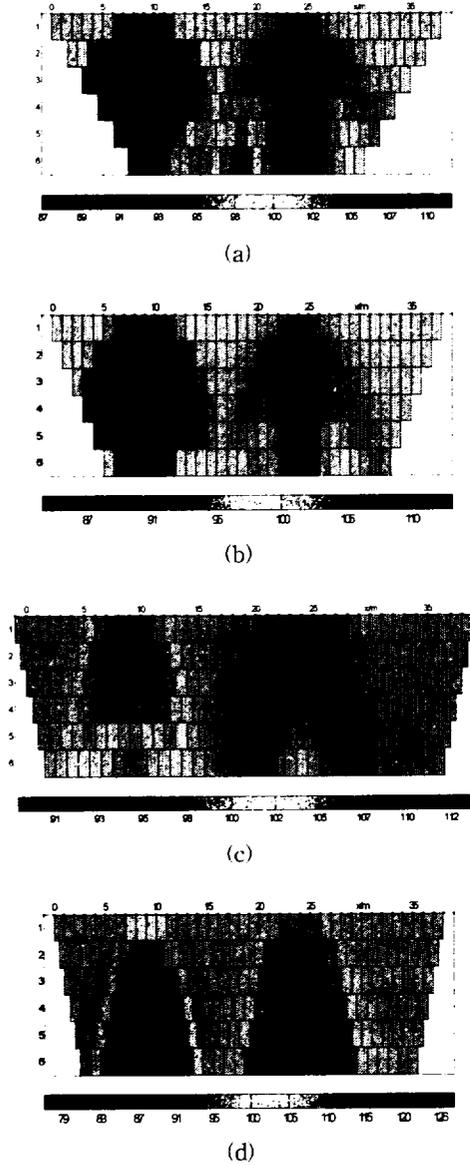


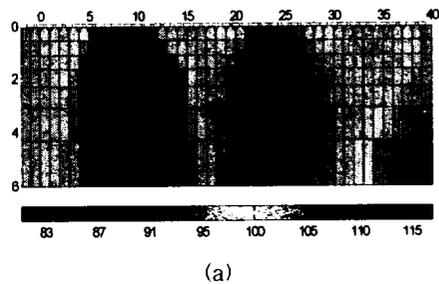
Fig. 8 Forward response of the true model for (a) Wenner (b) Schlumberger (c) pole-pole (d) dipole-dipole (without noise)

Fig. 9는 외부잡음이 없는 이상적인 환경에서 각각 Wenner, Schlumberger, 단극자 및 쌍극자 배열

을 사용하는 전극배열에서 대지저항률에 따른 2차원 지하물체의 영상복원을 위하여 조정값을 $\lambda=30$ 으로 놓고 Gauss-Newton 역산 알고리즘을 적용한 결과들을 나타내었다. 나타난 결과들을 살펴보면 Gauss-Newton 알고리즘을 통해 얻은 영상은 4가지 전극배열법 모두에서 골고루 퍼져서 나타나 선명도가 낮지만, 전체적인 영상은 복원할 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 단극자 전극 배열 방법은 상대적으로 지하물체의 영상을 훨씬 선명하게 복원함을 알 수 있다.

복원된 영상의 성능을 구체적으로 비교분석하기 위해 원형모델과 알고리즘을 통해 얻은 모델과의 오차를 RMS(root mean squares) 값을 사용하도록 하였다. Fig. 10과 Table 2는 외부잡음이 없는 이상적인 환경과 측정부분에 2% 외부잡음이 존재하는 경우에 각각 제시한 4가지 전극배열을 대상으로 Gauss-Newton 역산 알고리즘을 적용하여 대지저항률에 따른 2차원 지하물체의 영상복원을 수행한 결과들을 나타내었다.

Fig. 10은 Gauss-Newton 역산 알고리즘을 대해 각각 Wenner, Schlumberger, 단극자 그리고 쌍극자 전극배열에 적용한 경우의 RMS 오차값들을 나타내었는데, 외부잡음의 유무에 관계없이 단극자 배열법에서 RMS 오차값은 다른 배열법에 비해 처음부터 수렴할 때 까지 상대적으로 제일 좋은 결과를 나타내었다. 그리고 그 다음으로 Wenner, Schlumberger 그리고 쌍극자 전극배열순으로 결과가 좋게 나타남을 알 수 있었다. Table 2는 Fig. 9과 10에 나타낸 결과를 수치적으로 나타내었는데 단극자 배열법에서 Gauss-Newton 알고리즘이 가장 작은 RMS 오차값을 갖는 것을 확인할 수 있고 외부잡음이 존재하는 경우에 RMS 오차값이 증가함을 알 수 있다.



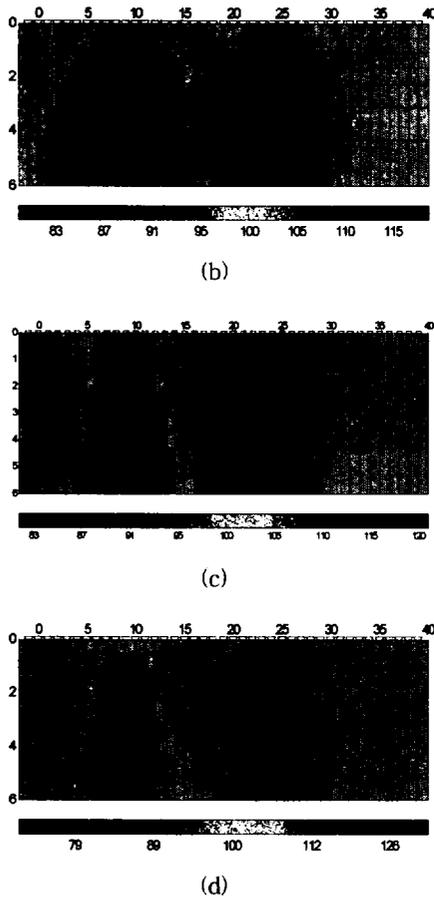
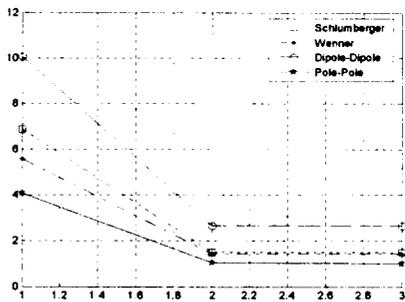
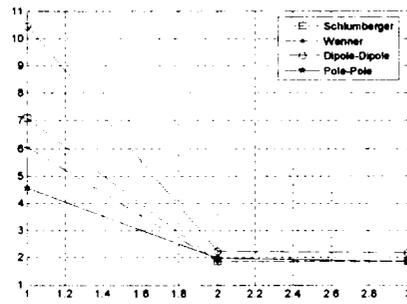


Fig. 9 Inversion results for (a) Wenner (b) Schlumberger (c) pole-pole (d) dipole-dipole using Gauss-Newton algorithm (without noise)



(a) without noise



(b) with 2% noise

Fig. 10 RMS errors of estimated and synthetic model for Gauss-Newton using 4 data sets

Table 2. Comparison of RMS errors

Measurement noise(%)	Electrode array	Initial	Final
0	Wenner	5.5524	1.4305
	Schlumberger	6.8424	1.4881
	pole-pole	4.0635	0.9896
	dipole-dipole	10.043	2.6649
2	Wenner	6.0375	1.8678
	Schlumberger	7.0930	1.8516
	pole-pole	4.5541	1.8519
	dipole-dipole	10.449	2.1931

VI. 결 론

본 논문에서는 ERT를 이용한 2차원 전기저항률 측정에서 Gauss-Newton 역산 알고리즘을 Wenner, Schlumberger, 단극자 그리고 쌍극자 전극배열에 적용하였을 경우의 특징에 대해 살펴보았다. 일반적으로 ERT의 영상복원에 있어 많이 사용되는 역산 알고리즘은 Gauss-Newton 방법으로써 단극자 전극배열법에서 물체를 선명하게 영상복원시키는 것을 알 수 있었다. 비선형성이 아주 강한 역산알고리즘의 성능은 전극을 배열시키는 방법과 주어지는 외부잡음에 따라 상당한 민감하게 반응을 하지만 Gauss-Newton 알고리즘은 다양한 전극배열법에서 ERT의 영상복원 알고리즘으로 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다. 주어진 방법을 실제 환경에서 적용하기 위해서는

역산 알고리즘의 민감도와 수렴성 등에 대해서도 좀 더 많은 고려가 있어야 하겠다.

참고문헌

- 1) Sasaki, Y, "Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation," *Geophysical Prospecting*, vol. 57, pp. 1270-1281, 1992.
- 2) Oldenberg, D. W. and Y. Li, "Estimating of investigation in DC resistivity and IP survey," *Geophysics*, vol. 64, no. 2, pp. 403-416, 1999.
- 3) Dey, A., Meyer, W. H., Morrison, H. F., and Dolan, W. M., "Electric field response of two-dimensional inhomogeneities to unipolar and bipolar electrode configuration," *Geophysics*, vol. 40, no. 4, pp. 630-640, 1975.
- 4) Tripp, A. C., G. W. Hohmann, and C. M. Swift Jr., "Two-dimensional resistivity inversion," *Geophysics*, vol. 49, pp. 1708-1717, 1984.
- 5) Loke, M. H. and Dahlin, T., "A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 49, pp. 149-162, 2002.
- 6) Vogel, C. R., *Computational methods for inverse problems*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- 7) Tarantola, A. and B. Valette, "Generalized nonlinear inverse problems solved using least squares criterion," *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 20, pp. 219-232, 1982.