

ERT을 이용한 제주지역 대지저항률 영상복원

부창진¹, 김호찬², 강민재^{3*}

¹제주국제대학교 전기공학과, ²제주대학교 전기공학과, ³제주대학교 전자공학과

Image restoration of earth resistivity in Jeju area using ERT

Chang-Jin Boo¹, Ho-Chan Kim², Min-Jae Kang^{3*}

¹Department of Electrical Engineering, Juju International. University

²Department of Electrical Engineering, Juju National University

³Department of Electronic Engineering, Juju National University

요약 본 ERT를 이용하여 제주지역의 대지저항률 지하모형을 4권역으로 나누어 영상화하였다. 제주지역은 화산활동으로 대지구조가 복잡하고 다양한 토양으로 이루어져 있으며 크게 4권역으로 나뉜다. 기존의 접지시스템을 설계할 때 사용하는 간략한 방법은 지하구조가 수평한 다층구조라고 가정하고 사용하는 방법이다. 제주지역의 접지설계는 이런 방법이 적당하지 않고 좀 더 정밀한 지하모형이 필요하다. 농암갈색 화산회토 지역 실험을 위해 선택된 제주 지방청사근처의 지하구조는 수평 다층구조와 비슷한 구조를 보이지만 이 지역을 제외한 다른 지역에서는 상당히 다른 지하구조와 대지저항률 분포를 보이고 있다. ERT를 이용한 대지저항률 지하영상복원방법은 제주지역과 같이 지하구조가 복잡하고 다양한 토양들로 구성된 곳에서 접지저항설계 시에 필요한 도구로 사용할 수 있다고 판단된다. 데이터측정은 웨너법을 사용하였으며 역산알고리즘은 Gauss Netown법을 사용하였다. 측정오차를 고려하여 잡음은 측정데이터에 3%의 노이즈를 첨가하였다. 그리고 역행렬을 계산할 때에 Hessian 행렬의 비정칙성 문제를 완화하기 위한 방법으로 첨가된 정규화항의 가중치 λ 를 30으로 하였다. 이 수치는 여러 번의 실험을 통해 가장 효율적인 값으로 선택한 것이다.

Abstract Using ERT, the ground resistivity underground model of Jeju was divided into four regions and imaged. Owing to volcanic activity, the Jeju region has a complex land structure composed of various soils and is divided into four major regions. The simple method used when designing the existing grounding system is the method used under the assumption that the underground structure is a horizontal multi-layer structure. For grounding design in Jeju, this method is unsuitable, and a more precise underground model is required. The underground structure near the Jeju Provincial Government Complex, which was selected for the experiment in the dark brown volcanic ash region, has a structure similar to that of the horizontal multi-layered structure, but in other regions except for this region, the underground structure and the earth resistivity distribution were quite different. The earth resistivity underground image restoration method using ERT can be a necessary tool for earth resistance design in places with complex underground structures and various soils, such as the Jeju area. The Wenner method was used for data measurement, and the Gauss Netown method was used for the inversion algorithm. Considering the measurement error, a noise of 3% was added to the measurement data.

Keywords : ERT, Grounding System, Horizontal Multi-Layer Structure, Wenner Method, Gauss-Newton Method

「본 연구는 2018년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구 재단의 이공분야기초연구사업지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (NRF-2018R1D1A1B07045976) 그리고 “이 논문은 2020학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음”

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

email: minjk@jejunu.ac.kr

Received July 5, 2021

Accepted August 5, 2021

Revised July 23, 2021

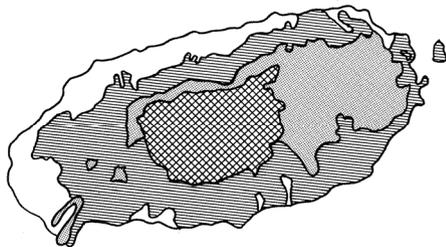
Published August 31, 2021

1. 서론

접지 시공을 위한 대지 분석은 주로 지하구조를 수평 다층 구조로 간략화하여 접지저항을 계산한다. 각층의 깊이와 저항률을 계산하기 위하여 겘보기대지저항률 데이터가 필요하다. 직류 또는 저주파수의 교류를 이용하여 전극배열에 따라 수평방향으로 데이터를 측정한다. 일반적으로 4개의 전극을 단계적으로 이동시키면서 측정 데이터를 취득하고, 다양한 분석방법으로 대지 모델대한 각 층의 저항률이나 두께를 추론한다. 이를 통해 최적의 시공지점을 선정한다[1].

표준곡선이나 모델링을 이용하여 현재 사용하고 있는 시행착오법 혹은 컴퓨터를 이용한 해석은 지하구조가 주로 수평 다층 구조라는 가정 하에 이루어진다. 지층은 수평적으로 퇴적물이 쌓이면서 형성되므로 지하구조를 수평 구조로 많은 경우에 가정할 수 있다. 그러나 화산활동이나 다른 지각변동에 의해 수평적 지하구조가 변경될 수 있어 항상 수평 다층구조로 해석하는 것은 해석상 오류를 많이 범할 수 있다.

제주지역은 화산활동으로 대지구조와 토양은 복잡하고 다양하다. 이런 지역에서는 기존의 방법으로 대지저항률을 모델링하는 것은 쉽게 오류를 범할 수 있다. 제주도 토양의 정밀조사에 의하면 제주도 토양은 Fig. 1과 같이 4개 토양군(토양색에 의한 암갈색 비화산회토, 농암갈색 화산회토, 흑색 화산회토, 산악지 화산회토)으로 구분되며 약 80%가 화산회토의 특성을 띠고 있다. 제주의 토양들은 전세계의 토양이 모두 집합해 있다고 할 수 있을 만큼 토양군 사이의 성질의 차이가 매우 크다[2].



□ dark brown non-volcanic soil,
 ▨ dark brown volcanic soil,
 □ black volcanic soil, ▩ mountainous volcanic soil.

Fig. 1. Soil map of Jeju Island.

본 논문에서는 제주지역의 4개 토양군에 대한 대지저항률 지하구조를 분석하기 위하여 ERT(Electrical Resistance Tomography)방법을 사용하였다. 대지저

항률에 대한 영상재구성을 위하여 Gauss-Newton 역산알고리즘을 사용한다. 영상복원알고리즘에 필요한 겘보기대지저항률 데이터측정은 웨너법을 사용하였다.

2. 겘보기대지저항률 측정방법

겘보기저항률(apparent resistivity)은 대지위에 측정 전극을 수평적으로 배열하고 외부에서 전류를 주입하고 인가된 전압을 측정하고, 이를 이용하여 계산된 값이다 [3]. 이 저항률 값들로부터 대지의 각층 두께 및 대지저항률은 겘보기저항률을 이용하여 역산알고리즘에 의하여 구할 수 있다. 겘보기저항률의 측정은 쌍극자측정방법, 솔렘버거 측정방법 그리고 웨너 측정방법을 가장 많이 사용한다. 이 논문에서는 웨너 측정방법을 사용하였다.

웨너 측정방법은 Fig. 2와 같이 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 겘보기 대지고유저항률 ρ 에 비례하며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

편의를 위하여 다수의 전극을 배치하고 프로그램을 이

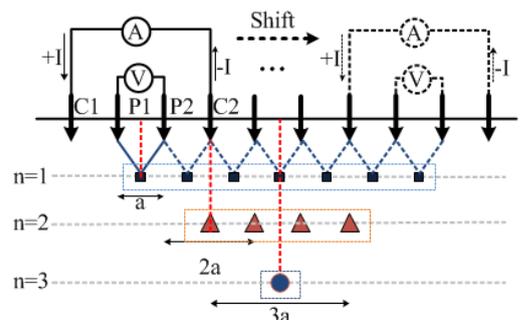


Fig. 2. Wenner measurement for apparent resistivity.

용하여 자동으로 측정할 수 있다. 이 경우에 우측 방향으로 차례로 전류와 전위전극을 이동하게 되며, a가 1[m]인 경우($n=1$) 7개, a가 2[m]인 경우($n=2$) 4개, a가 3[m]인 경우($n=3$) 1개의 측정값을 얻을 수 있다.

3. Guess-Newton 영상복원 역산 알고리즘

지하대지 모델에서 대지저항률을 추정문제는 기본적으로 순방향문제(forward problem)와 역방향문제(inverse problem)로 구성된다. 순방향문제는 이전에 가정했거나 이전에 계산된 대지저항률을 사용하여 Poisson 방정식에서 대지 지하 및 경계에서의 전위를 찾는다. 역방향문제는 계산된 전위와 측정된 전위가 최소 제곱 오차로 최소화될 수 있도록 다양한 방법을 통해 대지저항률을 수정하고, 이러한 과정은 오차가 만족하는 정도가 될 때까지 반복된다.

불균질한 대지의 대지저항률 분포의 영상재구성(image reconstruction)을 위해 이론적인 전위와 측정된 전위의 오차를 줄이는 역산 방법을 적용하고 오차가 충분히 작을 때 과정을 종료시킨다. 여기서 대지저항 분포의 영상을 재구성하기 위한 역산 방법으로 TLS(truncated least squares), SIRT(simultaneous iterative reconstruction technique), TSVD(truncated singular value decomposition), Gauss-Newton방법들이 있다[4].

위에서 제시한 영상복원 방법들을 비교 분석한 결과, Loke와 Dahlin은 Gauss-Newton 방법이 다른 방법들에 비해 잔류 오차, 수렴 속도등의 면에서 상대적으로 좋은 성능을 보였다고 발표하였다.[5] Gauss-Newton법에서 최소화되어야 하는 목적함수는 식(3)과 같이 오차제곱합으로 정의된다.

$$\Phi_d = \sum_i^N \left(\frac{d_i - f_i(\rho)}{\epsilon_i} \right)^2 = \|(D(d - f(\rho)))\|_2^2 = \Phi_d^* \quad (3)$$

$$, D = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\epsilon_1}, \dots, \frac{1}{\epsilon_N} \right\}$$

여기서 d 와 $f(\rho)$ 는 각각 수집된 데이터 및 모델 순방향 응답이며 D 는 데이터 가중치 행렬을 나타낸다. 이 경우, 식(3)과 같이 주어진 모델 제약함수를 최소화하여 모델 ρ 을 찾는다. 식(3)로 주어지는 목적함수를 최소화하는 문제는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Phi_d' = - [f'(\rho)]^T D^T D [d - f(\rho)] = 0 \quad (4)$$

식(4)는 선형이 아니므로 다음과 같이 반복 선형화를 통해 푼다.

$$\Phi_d'(\rho_{k+1}) \approx \Phi_d'(\rho_k) + \Phi_d''(\rho_k)(\rho_{k+1} - \rho_k) = 0 \quad (5)$$

여기서 Φ_d'' 은 Hessian 행렬이며, 다음과 같다.

$$\Phi_d'' = [f'(\rho)]^T D^T D f'(\rho) + [f''(\rho)]^T \{I \otimes [d - f(\rho)]\} \quad (6)$$

이때 \otimes 는 Kronecker 행렬 곱을 나타낸다.

$f''(\rho)$ 은 계산하기 어렵고 상대적으로 작은 양이므로, 위 방정식의 두 번째 항은 일반적으로 무시된다. 고로 Hessian 행렬은 다음과 같다.

$$\Phi_d'' = [f'(\rho)]^T D^T D f'(\rho) \quad (7)$$

위의 식들을 재정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\Delta \rho_k = \rho_{k+1} - \rho_k = H^{-1} \{S^T [d - f(\rho_k)]\} \quad (8)$$

여기서 Hessian 행렬 H 는 다음과 같이 표현되고

$$H = S^T D^T D S \quad (9)$$

S 는 요소들의 감도(sensitivity)이며, 이는 자코비안(Jacobian) 행렬을 나타내고, 각 성분은 다음과 같다.

$$s_{ij} = \frac{\partial f_i(\rho)}{\partial \rho_j} \quad (10)$$

Gauss-Newton 방법에서는 비선형 특성의 선형화와 Hessian 행렬의 비정치성으로 인한 모델링오차로 인해 만족스러운 영상을 얻기가 쉽지 않다. 특히, Hessian 행렬의 비정치성은 역행렬을 계산할 때 부정확한 결과를 초래하고 영상복원 성능을 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다음과 같이 목적함수에 정규화(regularization) 항을 포함시킨다[6].

$$\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_\rho = \|(D(d - f(\rho)))\|_2^2 + \lambda \|(C(\rho - \rho_0))\|_2^2 \quad (11)$$

여기서 ρ_0 는 사전지식을 통해 알려진 참조모델이고 C 는 모델 가중치 행렬을 나타낸다. 라그랑지 승수(Lagrange multiplier) λ 는 모델과 데이터 함수 $\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_\rho$ 를 결합하는데 사용된다. 일반적으로 목표값 Φ_d^* 는 데이터 n_d 의 수와 같으며 데이터는 표준편차 내에서 조정된다. Gauss-Newton방법을 사용하여 $\rho_{k+1} = \rho_k + \Delta \rho_k$

로 반복하고 Φ 를 최소화하도록 한다.

한편 데이터 d 는 다음과 같이 모델 ρ_{true} 의 순방향 응답에 잡음 n 이 포함되어 있다고 가정하면 데이터는 식(12)와 같이 표현될 수 있다[7].

$$d = f(\rho_{true}) + n \quad (12)$$

4. 제주지역 현장데이터 측정 및 대지저항률 지하영상모형

실험은 제주지역을 4개 권역으로 분류하고 즉, 암갈색 비화산회토, 농암갈색화산회토, 흑색 화산회토, 산악지 화산회토에 대한 대지저항률 지하모형을 2차원 영상복원으로 실시하였다.

이를 위해 이호지역, 종합청사지역, 아라지역, 서귀포 산간지역 4지역을 선택하여 실험을 진행하였다. 2차원 대지모형을 영상복원하기 위한 데이터측정은 Wenner 배열을 사용하였다. 영상복원은 Gauss Netown법을 사용하였으며, 식(12)의 잡음은 측정데이터에 3%의 노이즈

를 첨가하여 측정시 오류에 대한 부분을 고려하였다. 그리고 식(11)의 정규화항의 가중치 λ 를 30으로 고정하여 실험을 진행하였다.

Fig. 3a, b는 이호지역의 측정된 데이터와 노이즈가 첨가된 데이터 그리고 Fig. 3c는 복원된 대지저항률이다. 이호지역은 비화산회토에 대한 실험을 하기 위해 선택되었다. 비화산회토는 제주북부와 서부의 해안가에 근접하여 분포하고 있다. Fig. 3c에서 알 수 있듯이 대지가 깊어갈수록 대지저항률이 감소하는 것을 보여 주고 있다. 이는 해안지역이어서 대지가 깊어지면서 바닷물이 영향을 끼친 것으로 해석할 수 있다. 지표면 부분에 우측의 11전극에서 18전극 사이의 대지저항률이 상대적으로 높다. 그러나 최대값이 $158\Omega m$ 이므로 접지시공에 문제가 없는 지역으로 판단된다.

Fig. 4는 제주시 종합청사지역에 대한 대지모형 영상 복원이다. 대지저항률은 표토에서도 높고 깊이가 깊어질수록 증가함을 확인 할 수 있다. 이 지역은 농암갈색화산회토에 대한 실험을 위해 선택되었다. 농암갈색 화산회토는 제주도에 가장 넓게 분포하고 있는데, 비화산회토와 접하면서 일주도변에 전체적으로 분포되어 있다.

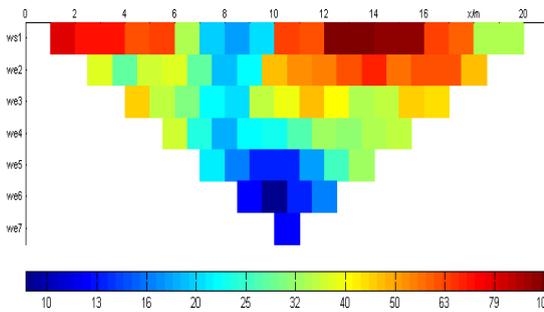


Fig. 3a. Measurement data

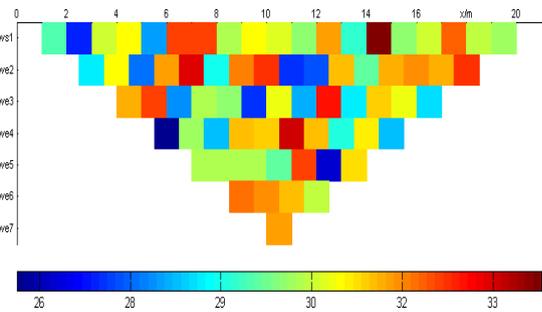


Fig. 3b. Measurement data with 3% noise added

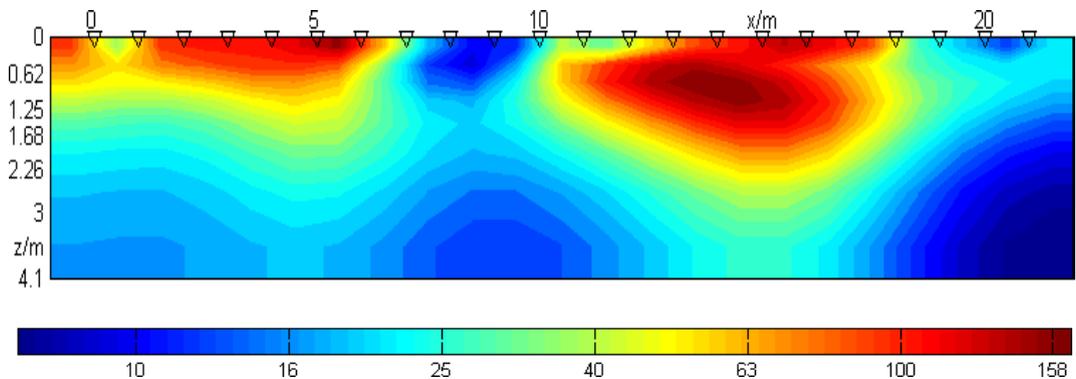


Fig. 3c. Earth resistivity and subsurface model of Iho area.

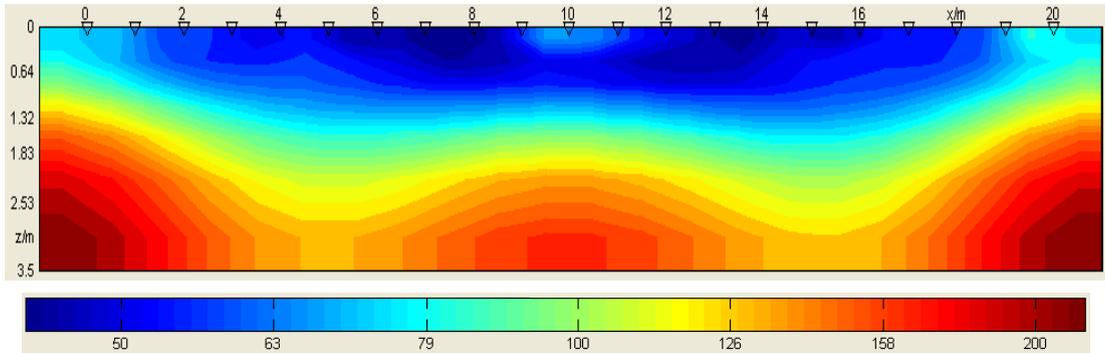


Fig. 4. Earth resistivity and subsurface model near Jeju Government Complex.

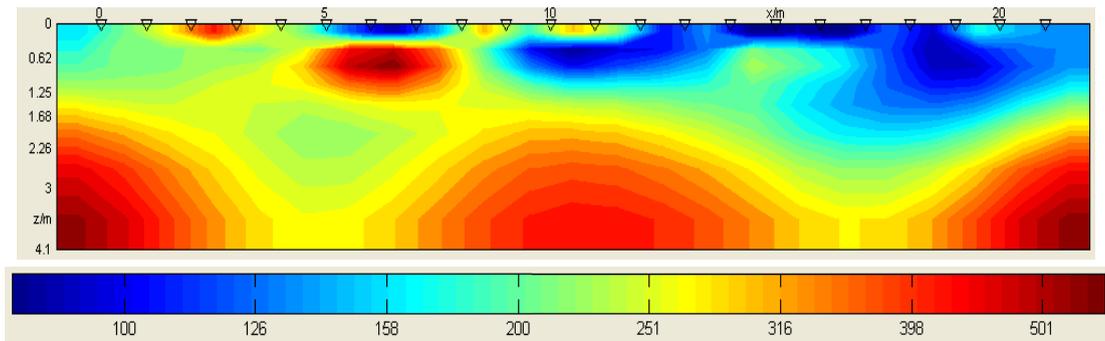


Fig. 5. Earth resistivity and subsurface model of Aradong area.

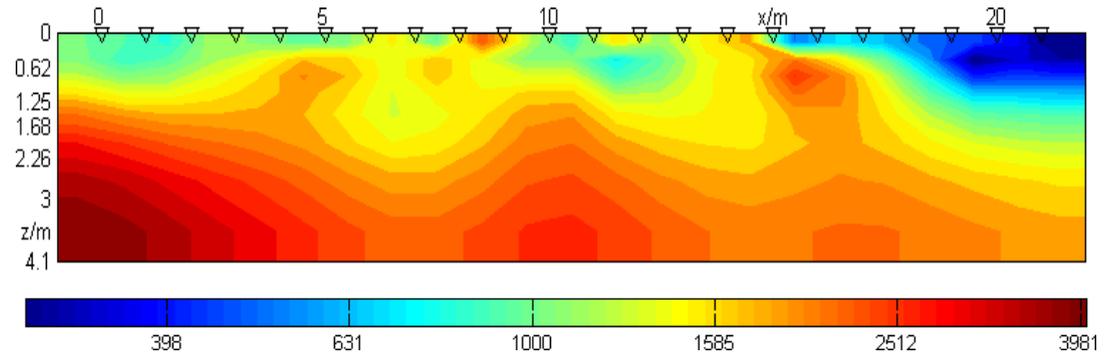


Fig. 6. Earth resistivity and subsurface model of Segupo area

데이터측정과 영상복원은 이호지역과 동일한 방법으로 수행되었으며 측정된 데이터 그림은 생략하고 복원된 지하모델만 보여주고 있다. 이 지역은 화산회토지역이나 화산이 분화한 한라산으로부터 떨어져 있어서 낮은 지하에는 암반이 존재하지 않은 것으로 보인다. 대지저항률은 대지가 깊어지면서 고르게 증가하는 것을 볼 수있다. 최대값은 200여 Ωm 으로 접지시공에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 제주시 아라지역에 대한 대지모델 영상복원이다. 이 지역은 흑색화산회토에 대한 실험을 위해 선택되었다. 흑색 화산회토는 제주북부지역에서는 농암갈색 화산회토와 산악지화산회토 사이에 분포하고 동부지역에서는 산악지 화산회토와 접해서 넓게 전체적으로 분포되어 있다. 데이터측정과 영상복원은 상기 지역과 같은 방법으로 수행하였다. 농암지갈색화산회토지역과 비슷하게 대지가 깊이 들어갈수록 대지저항률이 증가하는 것을 보

여 주고 있다. 그러나 대지저항률은 500여 Ωm 까지 증가하는 것을 볼 수 있고 대지저항률 분포도 고르지 못하다. 이는 부분 부분 암반이 존재하는 것으로 해석된다. 이 지역에서의 접지시공은 시설물의 시방에 만족하는 접지저항을 구하기 위해서는 지역에 따라 어려움이 발생할 수도 있을 것으로 고려된다.

Fig. 6은 서귀포 산간지역에 대한 대지모델 영상복원이다. 이 지역은 산악지 화산회토에 대한 실험을 위해 선택되었다. 산악지 화산회토는 한라산을 중심으로 산간지역에 분포되어 있다. 데이터측정과 영상복원은 다른 지역과 같은 방법으로 수행하였다. 전체적으로 심토로 갈수록 높은 대지저항률 (최고 4000여 Ωm)분포를 나타내고 있다. 접지시공 측면에서는 바람직하지 않아 정밀한 측정을 통한 역산 후 최적의 접지 시공지점 선정이 필요하다.

5. 결론

본 논문에서는 제주지역의 대지저항률 지하모델을 ERT을 이용하여 2차원 영상복원하였다. 데이터측정은 웨너법을 사용하였으며 역산알고리즘은 Gauss Netown 법을 사용하였다. 측정오차를 고려하여 잡음은 측정데이터에 3%의 노이즈를 첨가하였다. 그리고 역행렬을 계산할 때에 Hessian 행렬의 비정치성 문제를 완화하기 위한 방법으로 첨가된 정규화항의 가중치 λ 를 30으로 하였다. 이 수치는 여러 번의 실험을 통해 가장 효율적인 값으로 선택한 것이다.

실험은 제주지역의 토양성분에 따라 4개 권역으로 나누어 실시하였다. 실험에서 알 수 있듯이 제주지역의 접지저항설계는 기존의 간략한 접지저항계산방법으로 쉽지 않음을 알 수 있었다. 기존의 간략한 방법은 대지의 지하구조가 주로 수평 다층구조라는 가정 하에 적용하는 방식이다. 농암갈색화산회토지역 실험을 위해 선택된 지방청사근처의 지하구조는 이와 비슷한 구조를 보이지만 이 지역을 제외한 다른 지역에서는 상당히 다른 지하구조와 대지저항률 분포를 보이고 있다.

ERT를 이용한 대지저항률 지하영상복원방법은 제주지역과 같이 지하구조가 복잡하고 다양한 토양들로 구성된 곳에서 접지저항설계 시에 필요한 도구로 사용할 수 있다고 판단된다.

References

- [1] Keon-Bo Shim:Won-Bae Kim:Gil-Mo Seo:Geum-Bae Cho "The Variations of Grounding Resistance of the Vertical Electrodes by Soil Models," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 26(9) : 57 ~ 63, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2012.26.9.057>
- [2] Gi-Won Ko, Jun-beom Park "Volcanic activity in Jeju Island," *J. Geol. Soc. Korea*, v. 49, no. 2, pp. 209-230, April. 2013.
- [3] F. Dawalibi, "Earth resistivity measurement interpretation techniques," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 103, pp. 374-382, Feb. 1984.
- [4] Sanwar Ahmad, Taufiqar Khan, "Comparison of statistical inversion with iteratively regularized Gauss Newton method for image reconstruction in electrical impedance tomography," *Applied Mathematics and Computation* 358, pp. 436-439, 2019.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.amc.2019.03.063>
- [5] M. H. Loke, "Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies—A practical guide to 2D and 3D surveys." *Short training course lecture notes, Universiti Sains Malaysia*, Malaysia, 1997.
- [6] M.H. Loke , T. Dahlin, "A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion," *Journal of Applied Geophysics* 49, pp.149 - 162, 2002.
DOI: [http://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00106-9](http://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00106-9)
- [7] T. Hohage, Axel Munk, "Iteratively Regularized Gauss-Newton Method for Nonlinear Inverse Problems with Random Noise," *SIAM Journal on Numerical Analysis* 47(3), pp.1827-1846, 2009.
DOI: <http://doi.org/10.1137/080721789>

부 창 진(Chang-Jin Boo)

[중신회원]



- 2003년 2월 : 제주대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 제주대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 제주국체대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

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 : 미국 펜스테이트 방문교수
- 1995년 9월 ~ 현재 : 제주대학교 전기공학과 교수

〈관심분야〉

신재생에너지, 접지시스템 설계, 에너지효율

강 민 제(Min-Jae Kang)

[정회원]



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

〈관심분야〉

딥러닝, ERT영상복원, 접지시스템 설계