

제주토양 목업시스템을 사용한 접지저항 및 대지저항률 분석

부창진¹, 고봉운¹, 김정혁¹, 오성보^{2*}
¹제주국제대학교 전기공학과, ²제주대학교 전기공학과

Analysis of Grounding Resistance and Soil Resistivity Using Mock-up System in Jeju Soil

Chang-Jin Boo¹, Bong-Woon Ko¹, Jeong-Hyuk Kim¹, Seong-Bo Oh^{2*}

¹Department of Electrical Engineering, Jeju International University

²Department of Electrical Engineering, Jeju National University

요약 접지 시스템은 전력설비의 안전적 운영을 위해 필수적이며, 주요 고려대상인 대지저항률은 토양 종류, 수분, 온도에 따라 변하기 때문에 접지 시스템 설계에서 가장 중요하다. 제주의 지질구조는 화산지역의 특성상 다층구조를 형성하고 있어 지질구조에 따른 접지 저항값은 동일한 접지시스템 구축 지역이라도 지층구조에 따라 접지저항값이 다르게 나타날 수 있다. 본 논문에서는 제주의 대표적인 3종류의 토양에 접지를 설치하였을 때 접지저항 특성 변화를 분석하기 위해 3층 구조의 토양 목업 시스템을 구성하였다. 구성된 토양 목업 시스템에서 웨너법을 사용하여 대지저항률을 측정하였으며, 대지모델을 수치적으로 분석할 수 있는 역산방법으로 Gauss-Newton 알고리즘을 사용하여 대지모델을 생성하였다. 기존 접지분야에서 사용되는 1차원 대지분석이 아닌 2차원 역산방법을 적용한 결과 실제 토양 목업에 구성된 3종류 층상 구조와 같은 3층 대지구조로 나타날 수 있었다. 또한 일반적으로 접지에 사용되는 동봉, 동관, 탄소봉을 사용하여 접지의 변화특성을 분석한 결과 수분 공급 상태에 따른 접지저항 변화폭은 동봉은 2.9[Ω], 동관은 16.5[Ω], 탄소봉의 경우 20.1[Ω]으로 나타났으며, 수분의 영향으로 .탄소봉의 접지저항이 141[Ω]으로 가장 낮게 나타남을 확인 하였다.

Abstract The installation of grounding systems is important for the safe operation of power systems, and the soil resistivity is an important design consideration for such systems. It varies markedly with the soil type, moisture content and temperature. The Jeju geological structure is formed in a multi-layered structure characteristic of volcanic areas and, and the geological ground resistance values can appear even constructed the same areas ground system different from the soil structure. In this study, a mock-up system using representative soil from Jeju was constructed to analyze the variation of the grounding resistance. The mock-up system was configured using the Gauss-Newton algorithm inversion method to analyze the model numerically using the Wenner method through the soil resistivity measurements used to create the ground model. Also, we analyzed the change in the general ground resistance characteristics of the copper rod, copper pipe, and carbon rod that are used for grounding. The variation of the grounding resistance with the hydration status was found to be 2.9[Ω], 16.5[Ω] and 20.1[Ω] for the copper rod, copper pipes, and carbon rod, respectively, and the influence of the ground moisture resistance of the carbon rod was found to be the lowest with a value of 141[Ω].

Keywords : Grounding resistance, Gauss-Newton, Inversion, Mock-up system, Soil resistivity

이 논문은 2015년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Seong-Bo Oh(Jeju National Univ.)

Tel: +82-64-754-3672 email: sboh@jejunu.ac.kr

Received July 1, 2016

Revised July 26, 2016

Accepted August 11, 2016

Published August 31, 2016

1. 서론

제주특별자치도는 풍력, 태양광 등의 신재생에너지 보급 활성화와 스마트그리드, 전기자동차 인프라 확산 등을 통해 탄소제로 섬을 구현하기 위해 지속적으로 노력하고 있다.

이를 구현하기 위해서는 전력설비의 고도화와 시스템 확장이 요구되며, 전력 장치 및 시설의 효율적이고 안정적인 운용을 통한 전력품질 확보와 오동작 방지를 위한 안정적 접지시스템 구축이 필요하다. 이러한 접지시스템의 목적을 달성하기 위해서는 최적의 접지전극의 배치에 대한 설계와 시공이 필요하며, 또한 접지저항에 가장 큰 영향을 미치는 대지에 대한 분석이 필요하다. 대지의 구조를 파악하기 위해서는 전류전극과 전위전극을 이용한 대지저항률 측정과 분석을 통해 접지저항과 전위분포 특성을 결정하여야 한다. 대지저항률은 대지 내부의 지질 구조, 온도, 습도등과 같은 변화 요인에 따라 큰 차이를 나타낸다[1,2]. 제주의 지질구조는 화산지역의 특성상 다층구조를 형성하고 있어 지질구조에 따른 접지저항값은 동일한 접지시스템 구축 지역이라도 지층구조에 따라 접지저항값이 다르게 나타날 수 있다. 또한 접지저항 값의 변화는 대지의 습도 함유량에 따른 대지저항률, 재질에 따른 저항률, 토양의 종류에 따른 저항률, 대지의 계절별 저항률 그리고 온도 및 습도에 따른 대지저항률 변화가 발생할 수 있다.

이러한 대지의 특성을 분석하기 위해서는 현장의 정확한 대지저항률 측정이 필요하며 대지에 접지 매질을 매설하는 접지시스템에서 요구하는 접지저항을 확보하기 위해서는 정확한 대지의 구조를 분석하여 접지저항값을 최소화 할 수 있는 위치 선정의 중요한 요소가 된다. 일반적으로 대지의 구조 파악을 위해 전류를 인가하여 전압을 측정하는 간접측정법인 웨너법(Wenner method)과 슬럼프거법(Schlumberger method)이 사용되고 있다 [3]. 현장여건에 따라 사전에 데이터 측정 지점과 측정전극의 수량에 따라 측정법을 선택하며, 기존의 최소의 데이터를 확보하여 그래프 방식으로 대지의 구조를 파악하는 1차원 대지저항률 분석은 데이터의 수가 작아 정밀한 다층구조 대지 해석에 어려움을 주고 있다[4].

본 논문에서는 제주의 대표 토양에 대해 접지시스템 설계 시 접지가 매설되는 대지의 특성을 분석하기 위해 대지저항률 측정에 가장 많이 사용하고 있는 웨너법을

적용할 수 있도록 일정 간격의 전극을 다수 설치하고 다수의 대지저항률 데이터를 취득하고, 설치된 대지저항률 전극을 활용하여 거리에 따른 접지저항을 측정 할 수 있도록 구성하였다. 취득된 대지저항률 데이터를 역산하기 위해 Gauss-Newton 알고리즘을 적용하였으며, 대지모델을 분석하고 동봉, 동관, 탄소봉 접지를 설치하여 접지저항을 비교함으로써 제주에 접지 시스템 적용 시에 접지시스템 설계의 정확도를 높일 수 있는 방법을 검토하였다.

2. 대지저항률 분석

2.1 대지저항률 측정

대지의 특성을 파악하기 위해서는 접지시스템이 설치될 지역에 대한 측정방법을 선정하고 측정 전극배열을 통한 이론적인 대지모델을 생성한 후 현장에서 측정 전극간격을 변화시켜가면서 외부에서 전류를 인가하여 나타나는 전압을 측정하고, 이 값을 저항으로 환산하여 대지의 깊이에 대한 대지파라미터를 통해 역산을 통해 대지의 깊이와 대지저항률을 분석 하여야 한다. Fig. 1과 같이 반경이 r 이고 두께가 dr 인 균일한 토양에 전류 I 를 인가하게 되면 인가된 전류는 균일토양을 통해 흐르면서 전압강하 ΔV 가 나타나며 반구에서 저항은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

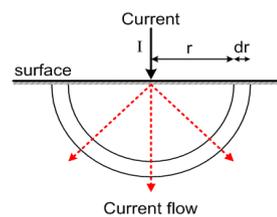


Fig. 1. Electrical current inject in a half-space

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

현장에서 측정된 대지저항률 값으로부터 대지파라미터를 해석하는 것은 고도의 기술을 요하는 작업이다. 실제의 대지구조는 지층별로 서로 다르기 때문에 이 저항률의 변화가 발생하여 전극간격에 따른 함수로 나타내는 겉보기저항률이 변하게 된다. 대지내부의 특성은 토양을

시추하여 지층을 분석하는 직접적인 방법을 사용하거나 전류를 주입하여 전압강하를 측정하여 대지저항률로 변환하여 그 값을 역산방법을 사용하여 분석하는 방법을 사용한다.

대지저항률을 측정하는 방법 중에 경제성, 간편성 때문에 현재 많이 사용하는 방법은 측정위치나 방법 등에 따라 측정값이 다르게 나타나므로 측정 전극간격을 변화시켜 다수의 측정 결과 취득하여야 한다.

대지내부의 저항률 분포를 분석하기 위한 간접측정방법은 대부분 전류를 인가하는 2개의 전류인가 전극과 2개의 전위차를 측정하기 위한 2개의 전극을 이용하여 대지저항률 분포를 알아내는 4전극법을 일반적으로 사용하고 있으며 다수의 측정 전극을 배열 구조로 설계하여 스위칭 장치를 통해 2차원 및 3차원 데이터를 확보할 수 있다.

웨너법은 Fig. 2와 같이 측정선 일직선상에 안쪽에 전위전극 P1, P2를 두고 외부에 전류전극 C1, C2를 설치하여 각각의 전극의 거리(a)를 등간격이 되도록 한다[5].

외부전류 전극(C1, C2)에 전류 I를 인가하고 내부의 전위전극(P1 - P2)간의 전위차 ΔV를 측정하여 대지저항 R을 계산한다. 이 대지저항 R은 전극간격 a일 때 길보기 대지고유저항률 ρ에 비례하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = 2\pi a \cdot \frac{V}{I} = 2\pi a \cdot R \quad (2)$$

다수의 전극을 이용하여 배열을 구성 할 경우 초기의 4전극을 기준으로 우측방향으로 순차적으로 전류와 전위 측정전극을 이동하게 되며, 11개의 측정전극을 사용한 배열 설계를 한 경우 전극 간 등간격 a가 1[m]인 경우(n=1) 8개, 2[m]인 경우(n=2) 5개, 3[m]인 경우(n=3) 2개의 측정값을 얻을 수 있다.

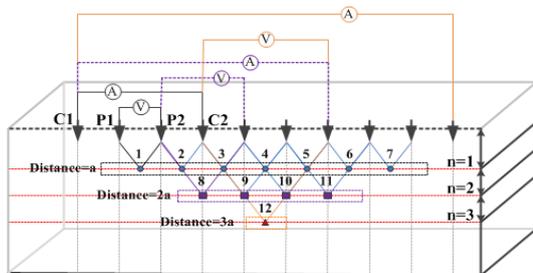


Fig. 2. Wenner array configuration for resistivity measurement

2.2 접지저항 측정

분석된 대지저항률을 기반으로 저항률이 낮은 지점에 접지를 시공하게 되는데 접지전극을 설치된 접지전극의 접지저항을 측정하기 위한 방법으로 3점 전위차 측정법이 일반적으로 사용되고 있다. 측정방법은 전극 C1과 C2에 전류를 인가하여 C1과 P2의 전위값을 측정하여 접지저항값으로 환산하게 된다. 시설된 접지전극 C1과 보조전극 P2의 거리가 멀어지면 접지저항값은 증가하고 이격된 전류전극 C2가 충분히 이격되지 않을 경우 접지저항은 평탄한 부분을 나타내지 않는다. 이 곡선에 나타난 평탄한 부분은 타설된 접지봉과 전류가 귀환하는 전극의 영향을 받지 않는 곳이며, 측정대상 접지전극의 접지저항 값이 된다. 일반적으로 시설된 접지전극 C1과 전류전극 C2 이격거리 61.8% 지점 P1의 저항값을 접지저항으로 선택한다[6].

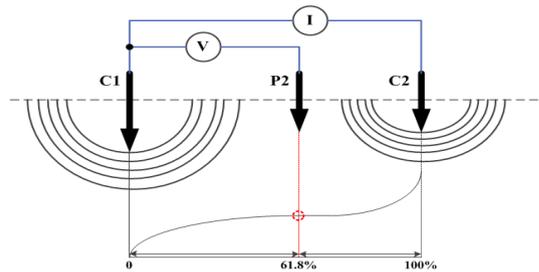


Fig. 3. Distance from driven rod resistance

2.3 Gauss-Newton 알고리즘 적용

측정된 대지저항률 데이터를 1차원 층상구조가 아닌 2차원 구조로 분석하기 위해서는 측정된 대지저항률 데이터와 동일한 전극배열 데이터에 대한 유한요소법 등을 사용한 forward 모델 설계가 필요하다. 선정된 대지 모델에 적용되는 역산 알고리즘은 이론적으로 계산되는 전위와 측정전위 사이의 오차를 줄이기 위해 반복적 계산을 수행하며, 설정한 오차범위일 경우 역산을 과정 종료하여 대지구조를 나타내게 된다. 대지의 구조를 해석하는데 사용되는 대부분의 비선형 역산문제들은 비고유성(non-unique)이나 ill-posed 문제를 가지게 되는데, 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 역산 방법으로 Gauss-Newton 알고리즘을 적용하도록 한다.

대지의 특성 p에 영향을 받는 측정전극배열에 따른 데이터 계측을 N번째까지의 데이터를 계측하여 벡터로 나타내면 $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T$ 로 나타낼 수 있다. 데이

터 계측을 위해 11전극을 사용한 경우 웨너법의 경우 $N=15$ 이다. 대지의 특성에 대한 공간 파라미터 분포 (spatial parameter distribution) $p(\vec{r})$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$p(\vec{r}) = \sum_{i=1}^M m_i \phi_i(\vec{r}) \quad (3)$$

여기서 계산 되는 대지모델 파라미터 m_i 는 모델벡터로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T \quad (4)$$

대지저항률 역산은 측정된 대지저항률 데이터 d 를 대지모델 m 으로 추정하는 것으로서 forward의 계산 $f(m)$ 을 통해 측정된 데이터와 모델을 최소화 시키는 것이다.

$$f(m) = (f_1(m), f_2(m), \dots, f_M(m)) \quad (5)$$

대지저항률 역산을 위해 사용할 Gauss-Newton 방법을 적용하기 위해 다음과 같이 목적함수를 정의하여야 한다[8].

$$\Phi_d(m) = \sum_i^N \left(\frac{d_i - f_i(m)}{\epsilon_i} \right)^2 = \|(D(d - f(m)))\|_2^2 \quad (6)$$

여기서 $f(m)$ 모델에 대한 forward 응답이며, D 는 데이터 측정 포인트에 대한 오차 ϵ_i 를 포함한 가중행렬로써 $D = \text{diag}(1/\epsilon_i)$ 로 나타낸다.

Gauss-Newton 알고리즘은 비선형 특성의 선형화에 따른 모델링 오차와 Hessian 행렬의 부정치성 때문에 대지구조에 정확한 대지구조를 파악하기가 쉽지 않다. Hessian 행렬의 부정치성은 역행렬 계산 시 부정확한 결과로 대지저항률 역산 결과의 선명도를 저하시킨다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 본 논문에서는 기존 목적함수에 추가적인 모델함수를 조정(regularization)할 수 있는 파라미터를 추가한다[9].

$$\Phi = \|(D(d - f(m)))\|_2^2 + \lambda \|(C(m - m^0))\|_2^2 \quad (7)$$

여기서 m^0 는 사전에 알고 있는 기준모델이고 C 는 모델 가중행렬을 나타낸다.

라그랑지 곱수(Lagrange multiplier) λ 는 모델과 데이터 함수 $\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_m$ 의 최적화에 사용되며 대지 모델 벡터를 갱신하기 위해 식 (8)과 같이 반복 절차를 수행하게 된다.

$$m^{k+1} = m^k + \tau^k \Delta m^k \quad (8)$$

여기서 τ^k 는 설정한 forward 모델을 순차적인 탐색과라미터이고 k 는 반복횟수를 나타낸다.

최종적으로 Gauss-Newton 알고리즘의 Φ 의 최소화는 다음과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$\begin{aligned} (S^T D^T D S + \lambda C^T C) \cdot \Delta m^k \\ = S^T D^T D (d - f(m^k)) - \lambda C^T C (m^k - m^0) \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$S_{ij}(m^k) = \frac{\partial f_i(m^k)}{\partial m_j} \quad (10)$$

Fig. 4는 11개의 측정전극을 사용한 배열 설계를 한 경우 전극 간 등간격 a 가 0.5[m]인 경우($N=1$), 1[m]인 경우($N=2$), 1.5[m]인 경우($N=3$) 깊이에 대한 감도를 나타낸 것으로 $P1$ 과 $P2$ 의 감도가 높으며, 지표와 가까울수록 감도가 높게 나타난다.

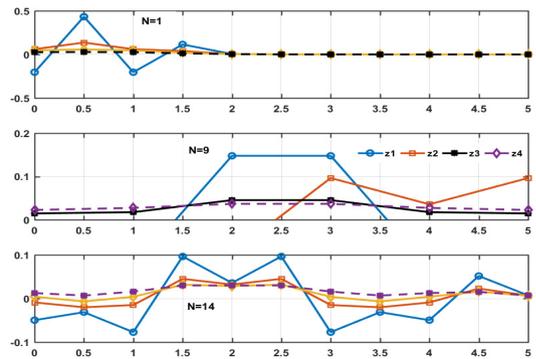


Fig. 4. Sensitivity for depth

Gauss-Newton 알고리즘을 적용하여 대지모델을 영상을 복원하기 위해서 대지 구조 각각 저항률 값이 하나의 매개변수가 되어야 하므로 추정하여야할 매개변수 벡터는 모든 대지저항률 값을 원소로 포함해야 한다. Fig.

5에 역산알고리즘 적용하여 대지모형을 나타내는 절차를 나타내었다.

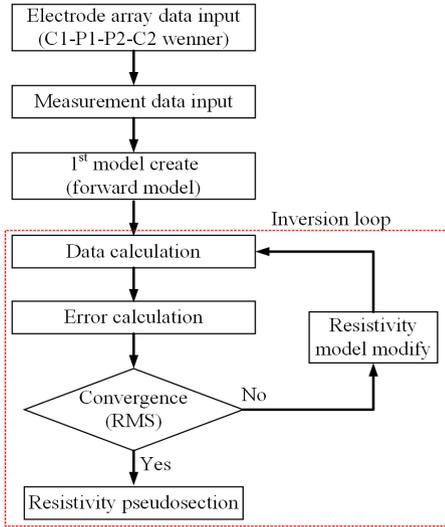


Fig. 5. Flowchart of soil resistivity inversion

3. 대지저항률 분석 및 접지측정

3.1 현장 Mock-up 시스템 구축

제주 대표 토양의 환경변화에 따른 대지저항률과 접지저항의 특성을 분석하기 위해 다양한 접지 매질의 접지전극 및 측정용 전극을 설치할 수 있도록 3층 구조의 목업 시스템을 구축하였으며, Fig. 6에 나타난 제주의 대표적인 흑색 화산회토, 농암갈색 화산회토, 암갈색 비화산회토를 확보하여 3층구조 20[cm] 깊이로 매설하였다. Fig. 7과 같이 토양 목업 시스템 구성은 물 공급을 위한 스프링쿨러, 토양의 온도조절을 위한 전열설비, 접지와 대지저항 측정을 위한 측정용 전극으로 3개의 라인으로 구성하였으며, 공간을 최대한 활용한 많은 데이터를 확보하기 위한 배치를 하였다.

실험을 위해 Fig. 8과 같이 동봉, 동관, 소형으로 제작된 탄소봉을 설치하였다. 대지저항률 및 접지저항 측정을 위한 측정전극의 설치공간을 고려하여 측정전극을 11개로 선정하였다. 웨너법의 경우 11개의 전극으로 등간격 0.5[m]를 사용한 경우 총 15개의 측정값을 취득할 수 있으며, 0.5[m]에서 8개, 1[m]에서 5개, 1.5[m]에서 2개의 데이터가 측정이 가능하다.



Fig. 6. Soil type in Jeju

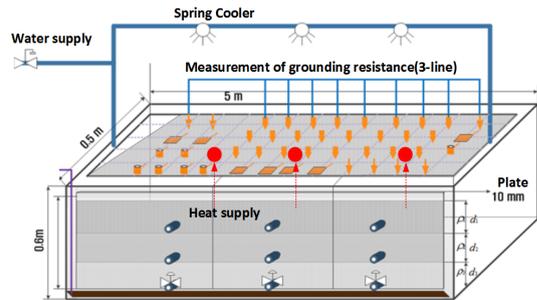


Fig. 7. Mock-up system design



Fig. 8. Grounding copper rod, plate, and carbon rod set-up

Fig 9는 설치된 토양 목업 시스템에서 측정된 대지저항률을 나타낸 것으로 제주의 대표 3종류의 토양을 3층을 구성하였으나, 각각의 공급 및 구성비율의 영향으로 다른 특성을 보임을 확인 할 수 있다. 대지저항률 측정은 3개의 라인을 설정하여 각각 15개의 측정데이터를 취득하게 되며, 각 라인은 2차원 대지저항률 분석을 하였다.

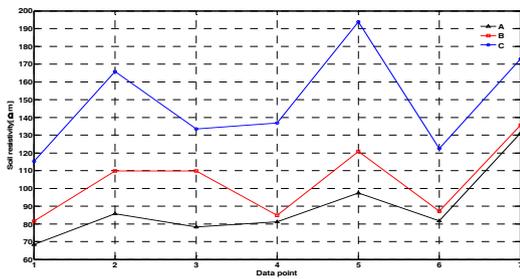


Fig. 9. Comparison of apparent resistivity lines

4. 측정결과 분석

Fig. 10은 측정 라인별 대지저항률 값을 나타낸 것으로 데이터 포인트 1에서의 값이 가장 높게 나타나고 측정 포인트 8에서 두 번째 높게 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 토양 목업 시스템의 시작과 끝 부분에서 인가전류 전극의 분포에 영향이라고 할 수 있다. x 축은 설치된 전극의 위치를 나타내고, y 축은 대지의 깊이를 나타내며, 깊이파라미터는 실제 목업에 구성된 깊이와 같은 0.2, 0.4, 0.6[m]로 설정하였고, 깊이에 따른 3[%]의 에러를 추가하여 Gauss-Newton 알고리즘을 적용하여 모델을 생성하였으며 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 역산의 결과를 살펴보면 상층 부의 저항률이 높고 하층부의 저항률이 낮게 나타남을 확인할 수 있다. 접지저항 테스트를 위해 3종의 접지전극을 설치한 표토 부분의 가장 높은 저항률을 나타내었으며 동일 토양의 층으로 구성되었으나 2.5[m] 전극을 기준으로 대지의 분포가 다르게 나타났다. 웨너법 측정의 특성으로 1층인 표토의 경우 대지 모델의 형상이 뚜렷하게 나타나지만, 3층인 심토의 경우 2층인 중간토의 구분이 명확하지 않음을 확인할 수 있었으며, 측정라인 1의 RMS 값이 6.59[%]로 가장 낮게 나타났다.

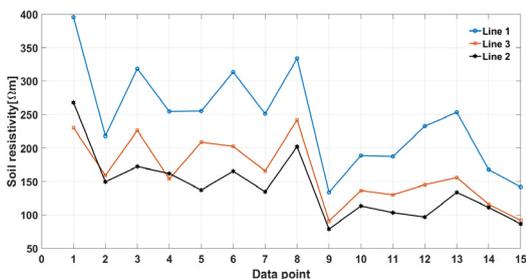
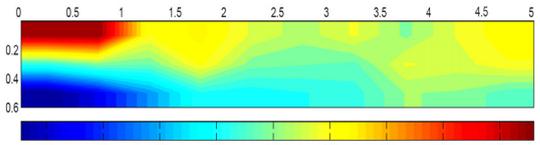
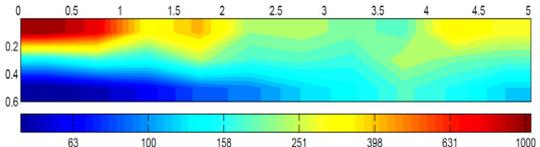


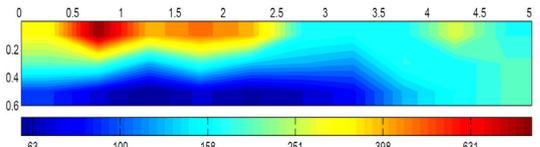
Fig. 10. Comparison of apparent resistivity lines



(a)



(b)



(c)

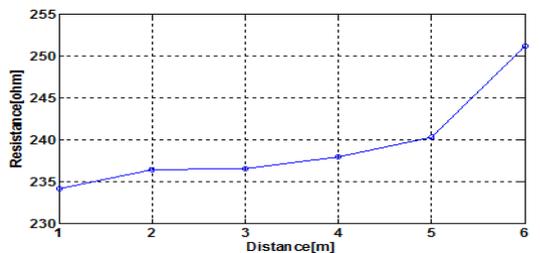
Fig. 11. Distance from driven rod resistance, (a) line 1, (b) line 2, (c) line 3

Table 1. Comparison of RMS value

RMS[%]	1	2	3	4	5	6	7
Line 1	37.43	10.84	9.37	9.05	7.83	7.49	6.59
Line 2	34.36	12.53	10.41	9.18	8.40	7.95	7.45
Line 3	31.27	14.45	10.57	8.25	8.24	8.20	-

접지저항 측정은 3점 전위강하법을 사용하여 탄소봉, 동봉, 동관에 대한 측정을 수행하였다.

초기의 접지저항 측정값을 Fig. 12에 나타내었으며, 접지저항이 안정적인 측정 포인트 3과 4지점의 값을 비교해 보면 동관의 경우 154[Ω]으로 가장 낮게 나타났으며, 탄소봉의 경우 340[Ω]으로 가장 높게 나타났다. 이는 초기에 토양과의 접촉으로 인한 특성에 기인한 것으로 예상된다.



(a)

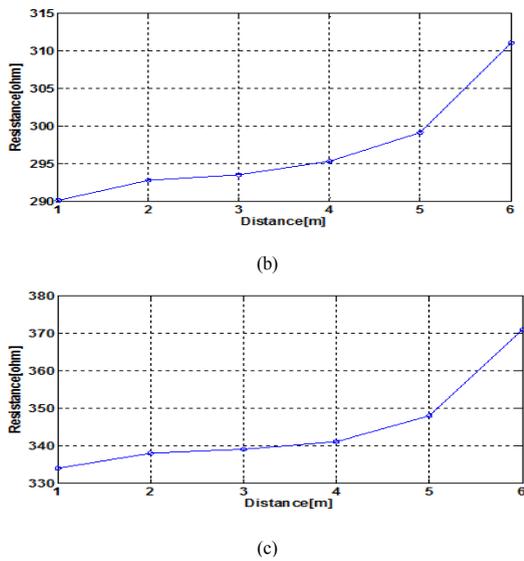


Fig. 12. Comparison of grounding resistance, (a) copper pipe, (b) copper rod, (c) carbon rod

표 2는 초기 설치 후 7일 후에 대한 접지저항 측정값을 나타낸 것으로, 시간경과 후 2.5 지점의 접지저항값을 비교해 보면 동봉과 동관의 경우 초기설치 시 접지저항값이 크게 변화하지 않음을 확인할 수 있다. 탄소봉의 경우 건조한 날의 경우 180.8 [Ω]으로 낮아지는 것을 확인할 수 있고, 또한 시간이 경과 후 토양의 수분이 높은 날 측정된 접지저항값은 162 [Ω]으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Comparison of grounding resistance [Ω]

Dis.(m)	Carbon rod		Copper rod		Copper pipe	
1	163.6	147.40	245.3	225.00	248.5	193.80
1.5	172.6	155.50	251.8	231.00	255.1	199.80
2	178.9	160.50	256.0	234.50	258.5	202.60
2.5	180.8	162.00	257.0	235.40	259.9	203.30
3	183.9	164.40	259.4	237.20	262.1	204.90
3.5	194.2	172.20	264.2	241.40	265.6	207.60
4	217.5	190.80	279.9	252.80	277.3	218.40

Fig. 13 은 스프링클러를 사용하여 5분 단위로 2l의 4차례 물을 공급하였을 때의 접지저항 변화를 나타낸 것으로 동봉의 경우 187.6, 186.8, 185.4, 184.7 [Ω]로 접지저항 변화가 가장 작게 나타났으며, 탄소봉의 경우 161.1, 146.8, 143.5, 141.0 [Ω]으로 나타났고 동관의 경우 183.4, 178.8, 167.8, 166.9 [Ω]으로 초기 변화폭

이 크지만 점차적으로 접지저항값의 변화가 적어짐을 확인할 수 있다.

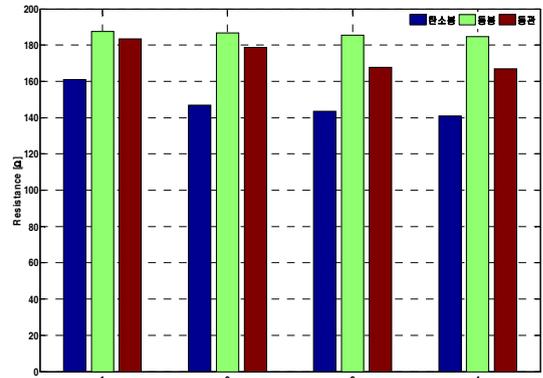


Fig. 13. Comparison of grounding resistance with water supply condition

5. 결론

본 논문에서는 제주의 대표토양의 대지저항률과 접지저항의 변화특성을 분석하기 위해 제주의 대표적인 토양 3종을 확보하여 목업 시스템을 구성하고 2차원 대지모델 생성과 제주에서 많이 사용하고 있는 동봉, 동관봉, 탄소봉에 대한 접지저항의 특성을 비교하였다. 축소된 3층의 대지구조에 대해 측정결과를 바탕으로 Gauss-Newton 역산방법으로 생성한 2원 대지모델은 실제 층상과 같이 3층으로 나타낼 수 있었으며, 수분 공급 상태에 따른 접지저항 변화폭은 동봉은 2.9 [Ω], 동관은 16.5 [Ω], 탄소봉의 경우 20.1 [Ω]으로 나타났으며, 수분의 영향으로 탄소봉의 경우 가장 낮은 접지저항 값을 나타내었다. 향후 실제 현장을 선정하여 측정 포인트를 확장하여 2차원 대지모델로 분석하여 최적의 접지 매설 지역을 선정하여 접지를 설치하여 경년변화를 실험한다면, 복잡한 대지 특성을 보이는 제주에서도 안정적인 경제적인 접지 시스템을 위한 접지시스템 설계 및 시공이 가능하리라 기대된다.

References

[1] P. Simonds, "Designing and testing low-resistance grounding systems," IEEE Power Engineering Review,

vol. 20, pp. 19-21, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/39.876880>

- [2] H.S. Lee, Introduction of grounding system, Dong Il, 1995.
- [3] Y. Sasaki, "Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation," Geophysical Prospecting, vol. 57, pp. 1270-1281, 1992.
- [4] D.W. Oldenberg and Y. Li, "Estimating of investigation in DC resistivity and IP survey," Geophysics, vol. 64, no. 2, pp. 403-416, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1444545>
- [5] G. F. Tagg, Earth Resistance, George Newnes Ltd., 1964.
- [6] F. Dawalibi 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>
- [7] 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)
- [8] A.C. Tripp, 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>
- [9] Anil Kumar Khambampati and Kyung Youn Kim, "Three-Dimensional Subsurface Resistivity Profile using Electrical Resistance Tomography for Designing Grounding Grid", Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 53, pp. 117-128, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5573/ieie.2016.53.4.117>
- [10] Irfan Akca, "ELRIS2D: A MATLAB Package for the 2D Inversion of DC Resistivity/IP Data", Acta Geophysica, vol. 64, pp. 443-462, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/acgeo-2015-0071>

부 창 진(Chang-Jin Boo) [정회원]



- 2003년 2월 : 제주대학교 전기전자 공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 제주대학교 전기전자 공학과(공학박사)
- 2014년 4월 ~ 현재 : 제주국제대학교 전기공학과 조교수

<관심분야>
접지시스템, 스마트그리드, 신재생에너지, 에너지효율

고 봉 운(Bong-Woon Ko) [정회원]



- 1991년 8월 : 건국대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 건국대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 제주국제대학교 전기공학과 교수

<관심분야>
스마트그리드, 제어 및 생체공학, 접지시스템

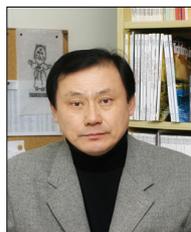
김 정 혁(Jeong-Hyuk Kim) [정회원]



- 2005년 8월 : 제주대학교 전기공학과(공학석사)
- 2013년 8월 : 제주대학교 전기공학과(공학박사)
- 2013년 8월 ~ 현재 : (주)대륜엔지니어링 부대표
- 2014년 10월 ~ 현재 : 제주국제대학교 전기공학과 겸임조교수

<관심분야>
에너지효율, 건물에너지, 스마트그리드, 접지시스템

오 성 보(Seong-Bo Oh) [정회원]



- 1976년 2월 : 중앙대학교 전기공학과 졸업
- 1988년 2월 : 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사)
- 1987년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 전기공학과 교수

<관심분야>
접지시스템, 조명공학, 생태조명계획