

접지시스템 설계를 위한 통합 측정시스템 개발

부창진¹

¹ 제주대학교 첨단기술연구소

Development of Total Measurement System for Grounding System Designs

Chang-Jin Boo¹

¹Research institute of Advanced Technology, Jeju
National University, Jeju 690-756, South Korea

Abstract

The grounding system design is considered as the single most important parameter to determine the grounding fault behaviour in a power system. The accurate measurement of soil resistivity and grounding resistance is fundamental to electrical safety. However, geological and meteorological factors can have a considerable effect on the accuracy of conventional measurements and the validity of the measurement methods. This paper propose the DC resistivity data measurement system of a multi-layer soil resistivity and grounding resistance. Computer simulation and experimental results demonstrate the effectiveness of a layer soil resistivity.

Keywords : grounding resistance, apparent resistivity, inversion method , soil resistivity

I. 서 론

접지시스템 설계에 있어서 접지체를 시설하는 지역의

토양 구성 및 전기적 특성이 어떻게 구성되어 있는가에 대한 것은 접지 성능 결정에 기반이 되는 요소이다. 이러한 토양의 전기적 특성은 단위체적당 대지가 지니고 있는 고유한 대지의 체적 저항을 의미하는 대지저항률이라는 파라미터로써 특징지어지므로 접지체를 시설하고자 한다면 설치지역의 토양특성을 파악하여 그 특성에 맞도록 효과적인 접지시스템 구축을 설계하여야 한다[1]. 따라서 현장의 정확한 대지저항률의 측정은 접지 시스템 구성에 가장 기본적인 요소이며, 전력설비의 지락보호 같은 안전, 잡음을 적게하여 통신을 명료하게 하기 위함, 그리고 대지를 회로의 일부로서 이용하려는 안정을 위한 접지의 목적을 달성하기 위한 가장 중요한 데이터이다 [2]. 대표적인 대지저항률 측정법은 전기검층법을 통한 직접 측정법과 간접측정법인 웨너법(Wenner method)과 슈렘버거법(Schlumberger method)이 있으며 규모있는 측정방법으로 쌍극자법(Dipole-dipole method)등이 사용되고 있다[3]. 간접 측정법의 경우 현장여건을 고려하여 측정하여야 하며 반복적인 측정 적용을 통해 해석의 신뢰성을 보장하여야 한다.

본 논문에서는 접지시스템설계 시 대지저항률 측정에 가장 많이 사용하고 있는 대표적인 측정법을 사용하여 계측된 데이터를 역산 알고리즘을 사용하여 층상 구조의 대지저항률을 분석수행하며, 특정지점에 설치한 접지매체에 대한 접지저항값을 3점법으로 측정하여 접지 저항값의 변화를 해석하고자 한다. 또한 현재 대지저항률과 접지저항 측정으로 각각 분리된 시스템을 통합할 수 있는 시스템과 수직구조에 대한 측정을 할 수 있는 계측시스템 설계방법을 제안하고자 한다. 제안한 시스템을 이용하여 데이터를 취득한 후 대지분석과 실제 접지매체 지역의 데이터를 비교하여 접지시스템 설계에서 요구하는 접지저항값 확보에 대한 신뢰성을 보장할 수 있는지를 분석하고자 한다.

II. 대지저항률 측정과 분석

2.1 대지저항률 측정방법

어떤 물체의 양단에 걸어준 전압과 그 물체에 흐르는 전류는 서로 비례하는 성질이 있다. 인가하는 전압이 크면 클수록 흐르는 전류량은 많아지게 되는데, 이러한 음

의 법칙을 수식으로 표현하면 $V=IR$ 이 되므로 대지저항률은 $\rho = \frac{A}{L}R = \frac{A}{L} \frac{\Delta V}{I}$ 로 표현된다. Fig. 1에서 대지에 전극 C1, C2에 일정한 전류를 인가한 후 전압 P1, P2에서 전위차를 측정하는 방법으로 대지의 대지저항률 분포를 확인할 수 있다. 즉 전류전극과 전위전극의 위치, 인가한 전류량과 측정된 전위차를 이용하면 균질한 대지의 정확한 대지저항률 값을 알 수 있게 된다[4].

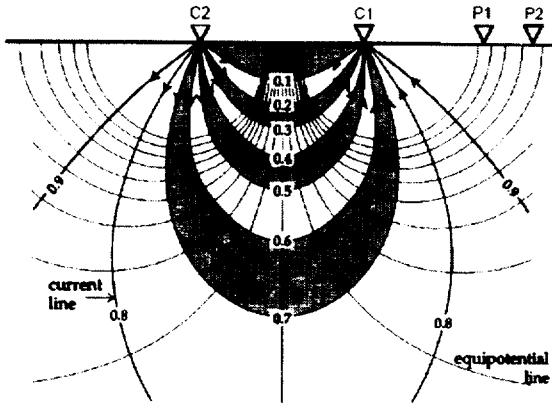


Fig. 1. Electrical distribution of current lines

반무한 공간에서의 전류의 흐름에 대해 고려해 보면, 반지름이 r 인 반구상에서 전류는 방사상으로 흐르게 되므로 위의 대지저항률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = 2\pi r \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

전류전극 C1과 C2에 의해서 생기는 전위 전극 P1, P2 사이의 전위차는 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_2P_1} - \frac{1}{C_1P_2} + \frac{1}{C_2P_2} \right) \quad (2)$$

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_2P_1} - \frac{1}{C_1P_2} + \frac{1}{C_2P_2} \right)} \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

4전극 측정법 중 웨너법과 슬럼버거법은 전류전극과 전위전극의 위치가 같으나 쌍극자법의 경우 전류전극과 전압전극의 위치가 다르게 배치된다. 각각의 측정법에 대하여 Fig. 2에 나타내었다. 웨너법의 경우 각각의 전극간 거리가 등간격이므로 식(1)에서와 같다.

슬럼버거법의 경우 웨너법과 유사하지만 C와 D전극을 중심으로 A와 D전극이 대칭형으로 위치하게 된다.

$$\rho_u = \frac{\pi(L^2 + s^2)}{2s} \frac{\Delta V_{CD}}{I} \quad (4)$$

여기서 s 와 L 은 각각 전류전극과 전위전극의 절반을 의미하며 $2L \gg 2s$ 경우의 겹보기 저항률은 다음과 같이 계산되어진다.

$$\rho \approx \frac{\pi L^2}{2s} \frac{\Delta V_{CD}}{I} \quad (5)$$

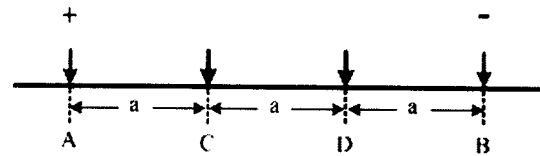
여기서 $\pi L^2/2$ 는 배열 상수이다.

쌍극자법의 경우 전류전극과 전위전극 사이의 거리는 같으나 쌍극자간의 거리의 정수만큼의 거리 na 로 나타낸다. 전극간 거리가 늘어남에 따라 보다 깊은 지점에 대한 데이터를 취득할 수 있고, 웨너법에 비해 짧은 연결 케이블을 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이때의 대지저항률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

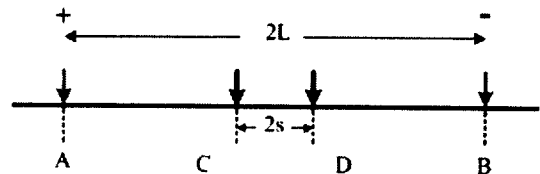
$$\rho_u = \frac{\pi(L^2 + s^2)}{2s} \frac{\Delta V_{CD}}{I} \quad (6)$$

슬럼버거법의 경우 웨너법과 유사하지만 C와 D전극을 중심으로 A와 D전극이 대칭형으로 위치하게 된다.

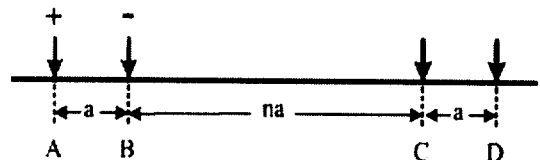
$$\rho_u = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta V_{CD}}{I} \quad (7)$$



(a) Wenner



(b) Schlumberger



(c) Dipole-dipole

Fig. 2. Configuration of electrode array

2.2 대지저항률 역산

대지 표면의 물리적 속성 p 에 영향을 받는 N 번의 측정은 데이터 벡터 $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T$ 로 나타낼 수 있고

공간 파라미터 분포(spatial parameter distribution) $p(\vec{r})$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$p(\vec{r}) = \sum_{i=1}^M m_i \phi_i(\vec{r}) \quad (8)$$

여기서 m_i 는 대지모델 파라미터이며 다음과 같이 모델 벡터로 정의할 수 있으며, 이때 거리계수가 $2\pi a$ 이므로 대지고유저항률 ρ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T \quad (9)$$

역산의 경우 대지모델 m 과 $f(m)$ 을 통해 실제 데이터 포인트의 측정값과 모델을 근사화 시키는 것이다[5].

$$f(m) = F_m \quad (10)$$

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

$$f(m^k + \Delta m^k) = f(m^k) + \frac{\partial f(m^k)}{\partial m} \Delta m^k + \dots \approx f(m^k) + S \Delta m^k \quad (12)$$

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

$$S \Delta m = d - f(m) \quad (14)$$

$$\Phi_d(m) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{d_i - f_i(m)}{\epsilon_i} \right|^p = \|D(d - f(m))\|_p^p \quad (15)$$

일반적으로 물리적인 속성 p 의 값은 외부 노이즈 특성을 결정하는데 사용되어 진다 [6].

$$\Phi_d = [D(d - f(m))]^T [D(d - f(m))] \\ = (d - f(m))^T D^T D (d - f(m)) \quad (16)$$

여기서 $D^T D$ 는 표준편차 ϵ_i 와 편차 ϵ_i^2 무상관의 경우 Tarantola 의해 사용된 데이터 공분산행렬 C_d 의 역을 나타낸다[7][8].

역산알고리즘에 사용된 가우스 뉴턴법은 대지모델 과 갱신모델 $m + \Delta m$ 의 함수 Φ 에 대한 2차 테일러급수로 나타낼 수 있다[9][10].

$$\Phi(m + \Delta m) \approx \tilde{\Phi}(m + \Delta m) \quad (17)$$

$$\Phi(m + \Delta m) = \tilde{\Phi}(m) + (\nabla_m \Phi(m))^T \Delta m + \frac{1}{2} \Delta m^T (\nabla_m^2 \Phi(m)) \Delta m + \dots \quad (18)$$

여기서 ∇_m^2 는 요소들의 헤시안(Hessian) 행렬을 나타낸다.

$$(\nabla_m^2 \Phi)_{ij} = (\nabla_m \nabla_m^T \Phi)_{ij} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial m_i \partial m_j} \quad (19)$$

2차 $\tilde{\Phi}$ 를 근사화하여 나타내면 다음과 같아 나타낼 수 있다.

$$\nabla_m \Phi(m) + \nabla_m^2 \Phi(m) \Delta m = 0 \quad (20)$$

또한 모델 갱신 Δm^k 는 다음의 식으로 알 수 있다.

$$(\nabla_m^2 \Phi) \Delta m^k = - \nabla_m \Phi \quad (21)$$

2.3 접지저항

접지의 문제는 반공간으로서 반구모양의 전극이 이론적인 취급이 용이하기 때문에 접지이론의 기초가 되며, 일반적으로 3점 전위차 측정법을 사용한다. 이 방법은 설치된 접지매체로부터 측정용 보조전극까지의 저항의 변화를 통해 접지저항값을 산출하게 된다. Fig. 3은 접지 저항값의 변화를 나타낸 것으로 설치된 접지매체에서 멀어질 수로 접지저항값이 증가하는 것을 알 수 있다. 이 곡선에 나타난 평탄한 부분은 설치된 접지봉과 전류 귀환하는 전극의 영향을 받지 않는 곳이며, 측정대상 접지전극의 접지저항 값이 된다. 일반적으로 측정하고자 하는 접지봉으로부터 이격거리의 약 62[%]가 되는 곳의 값을 접지저항값으로 사용한다.

수직 봉상 전극의 경우 Tagg식, Dwight식 Laurent식 등이 있는데 일반적으로 사용하는 dwight식을 살펴보면 다음과 같다[3].

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left\{ \ln \frac{4l}{r} - 1 \right\} \quad (22)$$

여기서 ρ 는 대지저항률[Ωm], l 은 접지봉의 길이[m], r 은 접지전극의 반경[m]를 나타낸다.

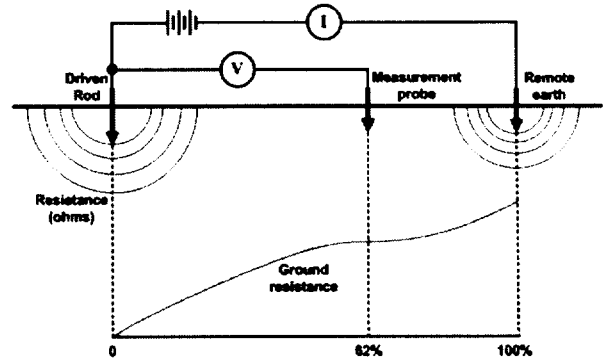


Fig. 3 Grounding resistance measurement method

III. 측정시스템 설계

본 논문에서는 기존에 대지저항률과 접지저항을 분리하여 측정하는 방식을 개선하여 동시에 측정가능한 시스템을 설계하여 현장에 적용하였다. 측정을 위한 데이터 포인트는 웨너법의 경우 동간격 a, 2a, 3a, 4a 의 총 26개의 데이터 포인트, 슈렘버거법의 경우 C-D의 간격을 1m로 유지시키고 A-B를 1~6[m] 이동시키면 36데이터 포인트를 설정하고, 쌍극법의 경우 1[m] 간격의 전극을 설치하여 총 66개의 데이터 포인트를 설정하였으며, Fig. 4에서와 같이 측정 데이터 포인트 7~10[m] 사이의 지점(p1-p4)에 길이 1[m]의 접지매체를 설치하였으며 또한 측정지점 7~8 사이에 Fig. 5와 같이 설계한 수직형 측정 전극을 설치하였다. 이는 실제 대지저항률 데이터 측정과 접지 저항 측정을 동시에 측정하여 비교를 하기 위한 시스템이다. 측정에 사용된 측정 데이터 포인트는 쌍극자의 경우 1.5[m] 와 3.5[m] 사이를 가장 먼저 측정하게 되고 순차적으로 스위칭 동작을 수행하여 설정된 데이터 포인트만큼 측정을 하였다.

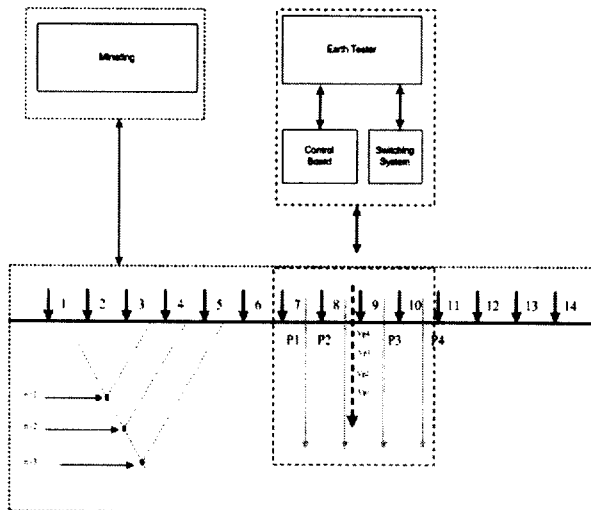


Fig. 4. Configuration of measurement

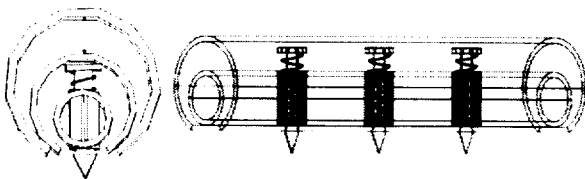


Fig. 5. Vertical type grounding resistance sensor

IV. 측정결과 및 해석

본 논문에서 제안한 대지저항률과 접지저항 동시 측정 시스템을 사용하여 측정된 데이터를 해석하기 위해 현장측정 결과를 Gauss-Newton 방법으로 역산하여 대지모델의 검증을 수행하였으며, 각각의 측정방법에 따른 측정 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

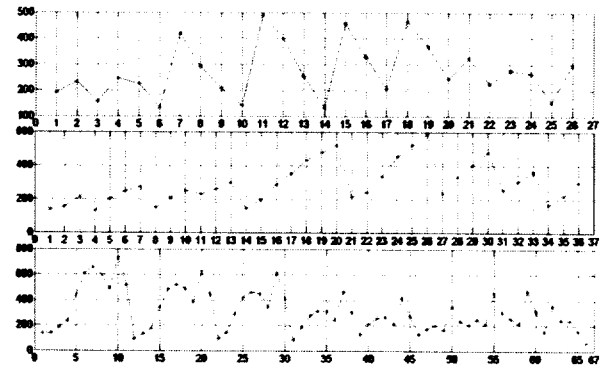


Fig. 6. Measurement resistivity data

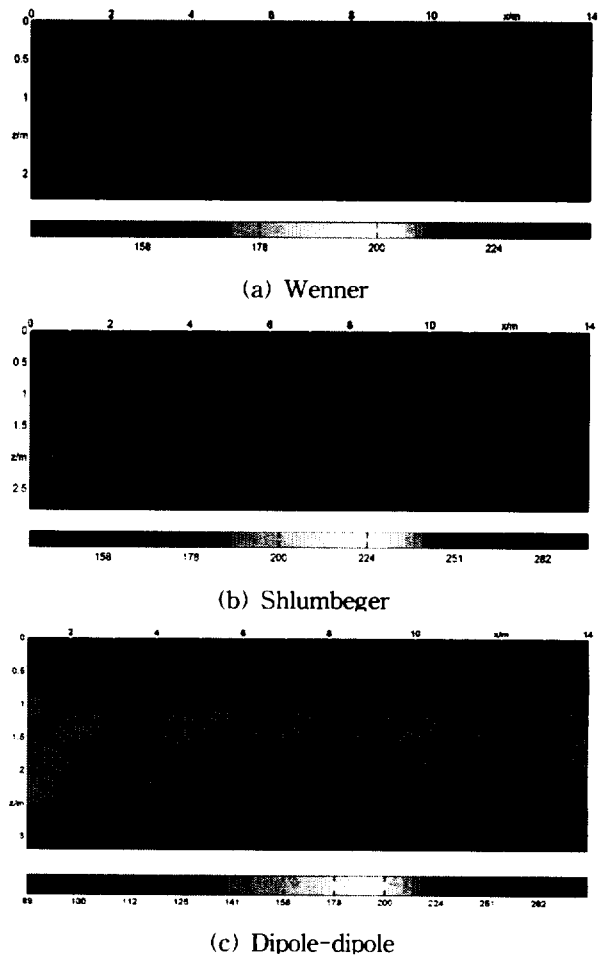


Fig. 7. Inversion results of measurement method

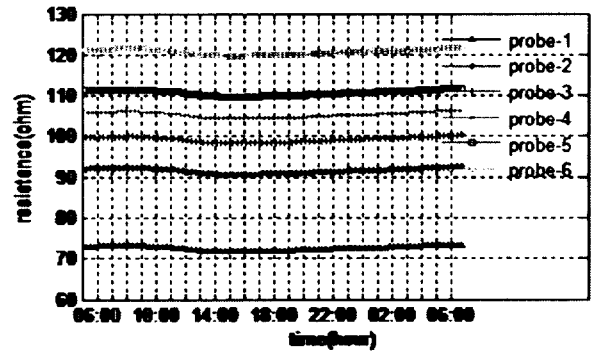
측정된 데이터에 대한 역산알고리즘을 적용하여 해석한 결과를 Fig. 7과 Table 1에 나타내었다. 웨너법의 경우 2층구조, 슬렘버거법의 경우 3층구조, 쌍극자법의 경우 5층구조로 나타났으며 각각의 측정법에 따른 깊이와 대지저항률 최대값은 각각 2.3[m]에서 246[Ωm], 2.8[m] 299[Ωm], 3.2[m]에서 314[Ωm]로 나타났다.

웨너법과 슬렘버거법의 경우 중앙을 중심으로 데이터 포인트가 설정되기 때문에 쌍극자법에 비해 상대적으로 낮은 층으로 해석되고 있다. 설치되는 접지매체의 접지저항값 계산에는 적은층으로 해석되는 것이 용이하나 최적지점에 대한 위치선정에는 어려움이 존재한다. 전체적으로 대지 내부 깊이 1.5[m] 이상의 지점에서 대지저항률이 크게 변동하고 있으므로 접지매체는 1[m] 지점에 설치하는 것이 바람직하다. 하지만 실제 접지매체 설치시에는 10[m] 이상의 깊이에 대한 측정 및 분석 후 최적지점에 접지매체를 매설하여야 한다.

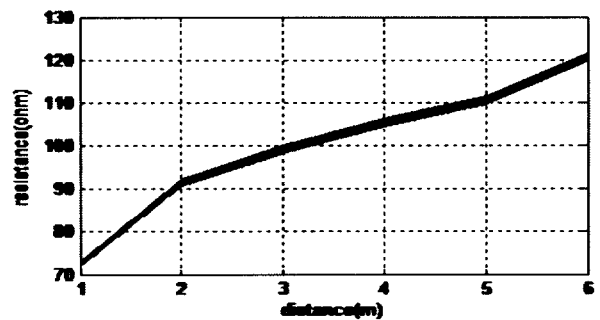
Table 1 Inversion results of measurement method

Measurement Method	Depth(m)				
	Resistivity(Ωm)				
Wenner (14 electrode)	1.6	2.3			
	142	246			
Schlumberger (14 electrode)	1.5	2.0	2.8		
	144	187	299		
Dipole-dipole (14 electrode)	0.7	0.8	1.0	2.5	3.2
	89.0	111	146	213	314

접지매체에 설치하는 E극과 원거리에서 설치하는 C전극 사이에 보조전극을 통한 접지저항 측정데이터는 보조전극의 설치 거리에 따라 접지저항값의 변동을 확인할 수 있다. 제안한 측정시스템은 실시간 측정이 가능하며 측정된 데이터는 각 전극에 대한 보조전극 데이터 6개씩 각각의 접지체에 대해 측정을 해야 하기 때문에 1시간에 3.5번 정도의 측정이 가능하였다. 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. 측정결과 접지전극에 가까울수록 낮은 접지저항값을 나타내었으며 안정화된 곡선형태에 판단이 다소 어려우므로 C극을 확장하여 측정을 수행할 경우 신뢰성 높은 접지저항값을 얻을 수 있을 것이다. 수직형의 접지저항 측정 결과는 Fig. 9와 같으며 각각의 측정전극이 동일한 패턴을 보이고 있음을 확인하며 전체적으로 접지저항값의 크게 나타나고 있다.



(a) Probe measurement



(b) Grounding resistance curve

Fig. 8. Measurement of grounding resistance

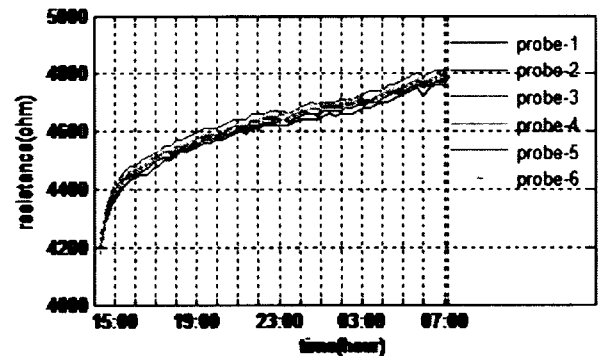


Fig. 9. Vertical type grounding resistance

V. 결 론

본 논문에서는 접지시스템 설계시 사용되는 웨너법과 슬렘버거법 외에 쌍극자법을 사용하여 현장데이터를 측정하여 다층구조 대지에 대한 층상구조를 분석하였다. 기존에 대지저항률 측정과 접지저항 측정은 분리하여 측정하는 시스템을 사용하고 있으나, 본 논문에서는 동시에 측정할 수 있는 시스템을 제안하였다. 또한 수직형

접지저항을 계측할 수 있는 시스템을 추가하여 그 성능을 검증하였다. 적용결과 실제 접지매체 시공 시점에 신뢰성 데이터 확보와 분석을 통해 접지시스템의 설계에 적용이 가능함을 확인하였다. 현재 접지에서 대지저항 측정시 사용하는 측정 데이터의 부족으로 인한 다층구조 해석의 어려움을 쌍극자법을 활용하게 되면, 층상구조의 분석 정확성을 향상 시켜 접지매설 지역등의 정확한 접지시공 지점을 파악할 수 있으리라 기대된다. 또한 같은 지역이라 하더라도 측정법에 따른 해석이 다르게 이루어 질수 있으므로 향후 접지저항계에서 제공하는 웨너법과 슬램버거법 두 가지 측정법을 조합하여 측정하고 측정 데이터 포인트를 확장하여 좀더 깊은 지점에 대한 대지저항률 데이터를 취득하게 되면 보다 정밀한 대지구조에 대한 모델을 생성할 수 있을 것이다. 그리고 본 논문에서 제안한 수직 접지측정 방법을 전극의 간격과 측정전극의 확장에 대한 연구와 모델에 대한 노이즈를 추가한 시뮬레이션이 진행 된다면 접지의 성능을 높이기 위해 사용되는 저감제의 분포에 대한 특성도 파악할 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 설동화, 장성권, 김명생, 정보통신 접지기술과 단체표준, 도서출판 삼보, (2006).
- [2] 최홍규, 최병숙, 송영주, 접지설비 및 설계, 성안당, (2004).
- [3] Tagg, G. F., Earth Resistance, London, U.K.: George Newnes Ltd., (1964.).
- [4] 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, March/April (1975).
- [5] C. R. Vogel, Computational methods for inverse problems, Society for Industrial and Applied Mathematics, (2002)
- [6] 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).
- [7] Tarantola, A., Inverse Problem Theory., Elsevier, (1978).
- [8] R. Herman, "An introduction to electrical resistivity in geophysics," Am. J. Phys., vol. 69, no. 9, pp. 943-952, (2001).
- [9] Jegen, M. D., M. E. Everett, and A. Schultz, Using homotopy to invert geophysical data., Geophysics, vol. 66, no. 6, pp. 1749-1760, (2001).
- [10] A. Dey, W. H. Meyer, H. F. Morrison, and W. M. Dolan, "Electric field response of two-dimensional inhomogeneities to unipolar and bipolar electrode configuration," Geophysics, vol. 40, no. 4, pp. 630-640, (1975).