

다양한 측정방법을 적용한 대지의 전기적 구조해석

조성철, 이태형, 엄주홍, 이복희*
기초전력연구원, 인하대학교*

Electrical Structure Analysis of Ground using Various Methods for Resistivity Measurement

Sung-Chul Jo, Tae-Hyung Lee, Ju-Hong Eom, Bok-Hee Lee*
KESRI, Inha University*

Abstract - Wenner 4-probe arrangement is used most widely by the method to measure soil resistivity and the measured data with the Wenner method are apparent resistivities of the soil. Therefore, the soil structure can be analyzed easily from the measured apparent resistivity, but the real soil resistivity is difficult to know correctly at a particular depth or at a specific location on earth surface. This paper introduces a method that can be used to decide the suitable burial depth and the electrode scale of a grounding rod effectively using soil structure analysis method based on the dipole-dipole method.

1. 서 론

접지저항은 접지전극이 매설된 대지를 구성하는 토양의 종류와 물리적 조건, 토양의 구조 등에 따라 변화하는데, 특히 대지저항률이 직접적으로 큰 영향을 미친다. 접지전극이 매설되는 지점에서 토양의 저항률 또는 대지저항률이 접지의 성능을 크게 좌우하게 되므로 대지저항률이 낮은 장소일 수록 낮은 접지저항을 얻기 쉽다. 따라서 접지의 설계와 시공에 있어서 접지전극 매설지점의 대지저항률과 지층의 구조를 정확하게 측정하는 절차가 필요하다.

일반적으로 대지표면에서 깊은 지점까지 동일한 토질로 이루어진 단층 구조의 대지는 거의 없고 대단히 복잡한 지층, 지형으로 이루어져 있는 경우가 보통이므로 대지 표면의 지층을 비롯하여 지하층의 대지저항률을 정확하게 측정할 필요가 있다. 현재 국내에서는 Wenner의 4전극법을 이용하여 대지저항률을 측정하는 방법이 사용되고 있으며, 정확도가 우수하고 측정이 간편한 방법으로 인식되어 있다. 이러한 Wenner의 4전극법은 Wenner가 발표한 3가지 방법 중 alpha법에 해당하며, 이 외에도 beta법, gamma법이 있다. 또한 Wenner의 4전극법 이외에도 Schlumber법과 Pole-pole법, Dipole-dipole법이 있으며, 특히 Dipole-dipole법의 경우에는 전기분야 이외의 토목공학이나 지질학 분야에서 지하의 특이한 지질구조 해석에 널리 사용되어 왔다.

본 논문에서는 국내에서 널리 사용되는 Wenner의 4전극법(alpha법) 이외에 Wenner beta법, gamma법, Pole-pole법, 그리고 Dipole-dipole법을 사용하여 대지의 전기적 구조를 분석하였으며, 각각의 측정방법을 이용하여 측정된 결과를 비교하였다. 특히, Dipole-dipole법에 의한 2-D 형태의 대지구조 해석결과를 바탕으로 한 접지전극의 시공위치 결정, 접지저항 예측 결과를 Wenner의 alpha법과 비교하였다.

2. 본 론

2.1. 측정원리

2.1.1 Wenner의 4전극법

Wenner의 4전극법은 Frank Wenner가 1915년에 발표한 4개의 전극을 직선상의 동일한 간격으로 배치하는 방법으로서 현재 대지저항률의 측정방법으로 널리 사용되고 있다. 이 방법은 그림 1에 나타난 바와 같이 4개의 전극을 지표면에 설치하고 바깥쪽의 두 전극간에 흐르는 전류 I와 안쪽 두 전극간에 나타나는 전압 V를 측정하여 대지저항률을 산출하는 방법이다. 전극 간격을 a [m]라고 하면 대지저항률 ρ [Ω · m]은 식(1)로부터 계산된다.

$$\rho = 2\pi a R \tag{1}$$

식 (1)에 의해 계산된 대지저항률은 겉보기 대지저항률로 ρ_a로 나타내기도 한다. 이 계산법은 측정용 접지전극의 매설깊이(d)가 전극간 거리에 비해서 대단히 작은 경우 즉, d << a의 조건에서 적용되며, 측정용 전압 또는 전류 접지전극 C₁, C₂, P₁, P₂의 접지저항에는 관계없이 대지저항률이 산출된다.

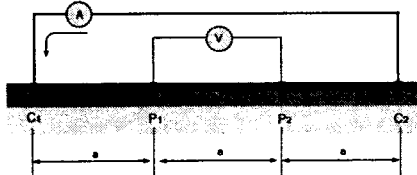


그림 1. Wenner 4전극법
Fig. 1. Wenner's 4 electrode method

Wenner의 4전극법은 전극간격 a를 크게 함으로써 좀 더 깊은 영역에까

지 측정전류가 침투하는 깊이의 대지저항률의 평균값을 측정할 수 있게 된다. 지중에 수도관이나 가스관 등 금속관이 매설되어 있으면 측정용 전류가 이들 금속 도체를 통하여 흐를 수도 있으므로 측정에 오차를 가져올 수도 있다. 따라서 4전극법을 이용하여 대지저항률의 정확한 측정을 위해서는 4전극의 배열 방향과 간격을 변화시켜가면서 여러 회 반복 측정하여 그 결과를 접지설계에 사용한다.

2.1.2 Dipole-dipole법

Dipole-dipole 법은 그림 2와 같이 Wenner 법의 응용예인 Wenner beta 법에서 측정의 편의성을 도모하기 위해 C₁ 전극과 P₁ 전극의 거리를 C₁ 전극과 C₂ 전극 또는 P₁ 전극과 P₂ 전극간 거리의 정수배가 되도록 배치한 방법이다. 그림 2의 (a)는 Wenner의 beta법으로 그림과 같이 C₂, C₁, P₁, P₂의 순서로 전극을 배치하여 대지저항률을 측정하는 방법이다. 이 방법을 보다 발전시킨 것이 Dipole-dipole법으로 등간격 배치에서 C₁, P₁ 전극 사이의 거리를 a의 정수배로 확장시킨 방법이다.

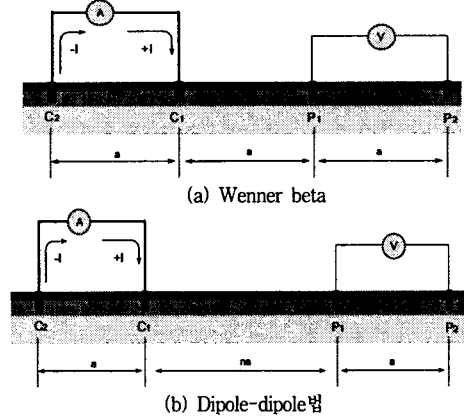


그림 2. Wenner beta법과 Dipole-dipole 법
Fig. 2. Wenner's beta and Dipole-dipole method

Wenner beta법과 Dipole-dipole법에서의 대지저항률은 다음과 같이 계산된다. 그림 2 (b)에서 C₁과 C₂전극에 흐르는 전류에 의해 P₁과 P₂ 전극에 나타나는 전위 V₁, V₂는 각각 식 (2)와 (3)과 같다.

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{na} - \frac{1}{(n+1)a} \right) \tag{2}$$

$$V_2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{(n+1)a} - \frac{1}{(n+2)a} \right) \tag{3}$$

따라서 P₁전극과 P₂전극 사이의 전위차 V는

$$V = V_1 - V_2 = \frac{\rho I}{\pi} \left(\frac{1}{n(n+1)(n+2)a} \right) \tag{4}$$

가 된다.

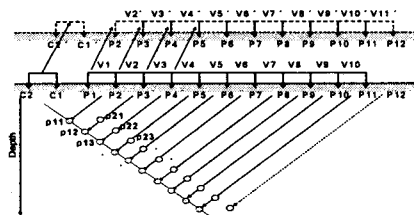


그림 3. Dipole-dipole법에 의한 대지저항률 측정
Fig. 3. Ground resistivity measurement using the Dipole-dipole method

식 (4)로부터 Dipole-dipole 법에 의해 측정되는 대지저항률은 식 (5)와

같이 표현된다. $n=1$ 인 경우, 즉, 등간격인 경우 Wenner beta 법이 되며 이때의 대지저항률은 식 (6)과 같다.

$$\rho = n(n+1)(n+2)\pi aR \quad (5)$$

$$\rho = 6\pi aR \quad (6)$$

Dipole-dipole법에 의한 대지저항률 측정은 전류 인가 전극 C_1, C_2 를 이동시키지 않으면서 전위를 인가하는 폐회로 외측에 존재하는 P_1, P_2 전극을 등간격으로 멀리 이동시켜 보다 깊은 영역까지 대지저항률을 측정할 수 있다. 따라서 그림 3에 나타난 바와 같이 전극간 거리 a 를 일정하게 고정시키고 n 을 변화시키는 방법으로 다수의 등간격을 이루는 전위 측정점을 통해 짧은 시간에 많은 수의 측정 데이터를 확보할 수 있다.

2.1.3 측정전극 배치 유형에 따른 계산

Wenner alpha, beta법과 Dipole-dipole법 이외에 대지저항률 측정에 사용될 수 있는 전극배치 형태 및 각각의 방법에 의한 대지저항률 계산식을 그림 4에 나타내었다. 일반적으로 Wenner alpha 법을 많이 사용하지만 경우에 따라서는 Pole-pole법이나 Dipole-dipole 법이 대지의 전기적 구조를 해석할 때 효과적으로 사용되기도 한다. 각각의 측정 방법은 측정 장소의 조건에 따라 측정자가 선정하여 사용할 수 있으며, 정확한 전극 배치를 통하여 얻어진 인가 전류와 지표면의 전위분포로부터 대지저항률을 계산하면 된다. 그림 4(b)는 Dipole-dipole 법과 유사하나 C_2 전극과 P_2 전극을 $C_1 \sim P_1$ 사이의 거리 a 보다 충분히 멀리 위치시켜 각각 하나의 독립된 pole로 간주할 수 있는 경우이다.

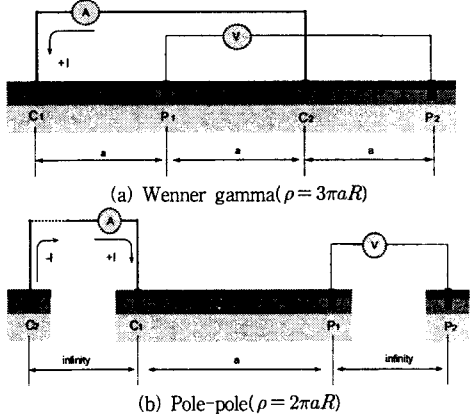


그림 4. Wenner gamma법과 Pole-pole법에서의 전극배치
Fig. 4. Electrodes arrangement for Wenner's beta and Pole-pole method

2.2 대지저항률 측정결과

2.2.1 Wenner법과 Pole-pole법에 의한 측정결과

Wenner의 3가지 측정방법과 Pole-pole법에 의한 대지저항률 측정결과를 그림 5에 나타내었다. 측정결과에서 4가지 방법 모두 지표면의 거리 a 가 증가함에 따라 약 25 [$\Omega \cdot m$]로 근접하는 값을 얻었다. 즉, 지표면의 측정거리가 증가함에 따라 보다 깊은 위치까지의 대지저항률의 평균적인 값은 4가지 방법 모두에서 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

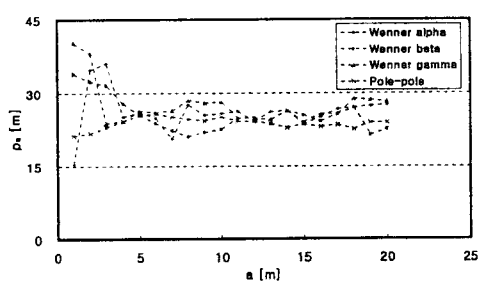


그림 5. Wenner의 3가지 방법과 Pole-pole법에 의한 측정결과
Fig. 5. Measurement results using Wenner's methods and pole-pole method

측정결과에서 알 수 있듯이 최초 측정거리 1~3 [m]의 결과는 다소 변동이 크게 나타나고 있다. 이는 각 측정방법의 전극배치도에서 알 수 있듯이 전위를 측정하기 위한 전극의 위치와 간격에 영향을 받기 때문이다. 최초 전위측정 기준위치에 Wenner의 alpha법에서 내부의 두 전극인 P_1, P_2 전극의 중심점이 되며, 두 전극의 거리는 a 와 동일한 1 [m]가 된다. 하지만 Wenner beta법에서는 전위측정 전극의 위치가 alpha법에 비해 우측으로 1 [m] 이동한 위치이며, gamma법에서는 전극간 거리가 $2a$ 인 2 [m]가 된다. 따라서 대지표면에서 나타날 수 있는 토양의 건조상태 차이, 수평방향으로 나타날 수 있는 대지저항률 차이 등이 크게 영향을 미치고 있다고 분석할 수 있다. 또한 전극간 거리 a 에 비하여 상대적으로 큰 측정전극 매설 깊이 d 에 의한 영향도 무시할 수 없다. 이러한 미세한 대지의 수직 및 수

평구조의 변화에 따른 대지저항률의 변화는 일반적인 측정방법에서 측정거리 a 가 작은 범위 외에는 나타나지 않으며, 측정거리 a 가 증가함에 따라 평균화된 결과로 대지저항률로 나타난다. 따라서 본 논문에서는 보다 많은 측정데이터를 활용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 대지의 2-D 구조분석에 사용되는 Dipole-dipole법을 적용하여 보다 세밀한 대지의 전기적 구조를 분석하였다.

2.2.2 Dipole-dipole법에 의한 측정결과

그림 6에는 Dipole-dipole법에 의해 측정된 대지의 전기적 구조를 나타내었다. 측정결과는 2-D 맵 형태로 대지저항률의 수평 및 수직 방향에 대한 변화를 자세하게 알 수 있다. 이러한 측정방법은 약 500~1000 여개 또는 그 이상의 측정데이터를 이용하여 실제의 대지깊이에 따른 대지저항률을 분석하게 되므로 일반적인 Wenner법에 비해 접지전극 설계나 접지저항 측에 효과적으로 사용될 수 있다.

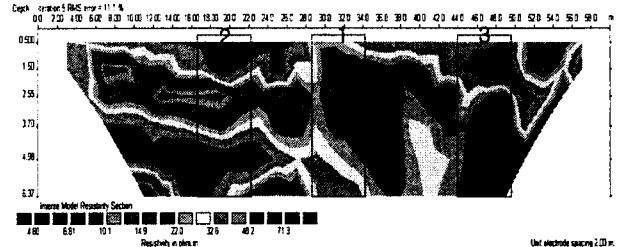


그림 6. Dipole-dipole법에 의한 측정결과
Fig. 6. Measurement results using Dipole-dipole method

2.2.3 Wenner법 및 Dipole-dipole법에 의한 접지저항 계산

표 1에는 Wenner의 4전극법에 의해 측정된 결과를 바탕으로 CDEGS 프로그램에서 대지구조를 분석한 후 1, 1.8, 2.4 [m] 봉전극에 대한 접지저항 계산결과를 나타내었다. 또한 그림 6에 나타난 3가지 위치에 접지봉을 시설할 경우에 예상되는 접지저항 값을 비교하여 나타내었다. 일반적인 Wenner 법에서는 전체 대지의 평균화된 대지저항률이 측정되며, CDEGS를 이용해 대지구조를 분석하면 단순 수평층 구조로 나타난다. 봉전극과 같은 접지전극을 시설할 경우에 시설위치에 따라 접지저항이 매우 크게 차이를 나타내지만 설계과정에서 여러 위치에서의 접지저항 예측은 불가능하다. 그러므로 실제로 대지저항률을 측정하고 이에 따라 예상되는 접지저항을 계산하여 접지전극을 설계하고 시공하더라도 측정값과는 큰 차이를 보이는 경우가 많다. 이에 반하여 Dipole-dipole법에 의한 대지구조의 2-D 분석은 봉전극이나 봉전극과 같이 수직으로 매설하는 접지전극의 경우 시설 위치에 따른 접지저항을 다양하게 예측할 수 있다. 시설위치에 따라 대지의 층구조를 달리할 수 있으며, 각각의 층구조에 따라 접지저항의 계산값이 다양하게 산출된다. 따라서 Dipole-dipole법에 의한 대지의 전기적 구조분석은 접지전극 설계 시에 보다 접지저항을 낮게 할 수 있는 위치를 선정하거나, 시설하고자 하는 위치에서 정확한 접지저항을 예측하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

표 1. 대지저항률들을 이용한 봉전극의 접지저항 계산

Table 1. Resistance calculation of grounding rod using the ground resistivity

구 분 깊이 [m]	접지저항 계산값 [Ω]			
	Wenner alpha	Dipole-dipole		
		Case 1	Case 2	Case 3
1	17.5	15.8	30.9	37.3
1.8	10.8	9.9	13.9	20.5
2.4	8.5	7.8	10.2	12.3

3. 결 론

대지저항률 측정을 통해 대지의 전기적 구조를 해석할 수 있는 측정방법에 대하여 다각도로 접근하였으며, 실측결과를 제시하였다. 여러 측정방법들은 각각의 특성에 따라 적용할 수 있으며, 실측결과를 활용하여 접지저항을 계산하는 과정에서는 Dipole-dipole법에 의한 대지구조의 2-D 분석이 매우 효과적임을 알 수 있었다. 따라서 앞으로 대지저항률의 측정과 분석에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호: R-2005-7-113)주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Std. 81-1983, 1983.
- [2] M. H. Loke, 2-D and 3-D electrical imaging surveys, Instrument Tutorial, 2003.
- [3] N. Harid, H. Griffiths, A. Haddad and K. Walker, "Soil resistivity mapping of non-homogeneous soils," proc. of ISH 2003, Rotterdam, Netherlands, 2003.