

## 3전극과 4전극 전위강하법으로 측정한 대지저항률의 비교

(Comparison of the Earth Resistivity Measured by the 3-Electrode and 4-Electrode Fall-of-Potential Methods)

이복희\* · 김기복

(Bok-Hee Lee · Ki-Bok Kim)

### Abstract

This paper presents the comparison of the earth resistivity obtained from the measurements made with the three-electrode and four-electrode fall-of-potential techniques. The  $\rho-a$  curve obtained from Wenner four-electrode method in undisturbed earth is in good agreement with the  $\rho-l$  curve obtained from the three-electrode method based on the fall-of-potential method. However, The  $\rho-a$  curve in disturbed earth with moisture and freezing is significantly different with the  $\rho-l$  curve. The  $\rho-a$  curve is considerably sensitive to the freezing and the moisture present in the earth surface compared to the  $\rho-l$  curve. Thus to determine the actual earth resistivity, it is necessary to take into account the earth surface conditions when measuring the earth resistivity.

Key Words : Earth Resistance, Earth Resistivity, Wenner Four-Electrode Method, Three-Electrode Method, Fall-of-Potential Method,  $\rho-a$  Curve

### 1. 서 론

접지시스템의 성능에 가장 크게 영향을 미치는 요인이 대지저항률이므로 접지의 설계와 시공에 있어서 대지저항률을 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다. 대지저항률을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으며 [1-3], 일반적으로 흔히 사용되는 대지저항률의 측정

법은 4전극법과 전위강하법을 기반으로 하는 3전극법이다. 3전극법은 수직 접지극을 측정하고자 하는 장소에 설치하고 전위강하법으로 접지저항을 측정 한 후, 접지저항의 이론적 산출식으로부터 대지저항률을 역산하는 방법이다. 또한 4전극법은 전류보조극과 전위보조극을 설치하여 접지저항을 측정한 후 전극간격에 따라 대지저항률을 계산하는 방법이다. 4전극법은 측정용 전류보조극과 전위보조극을 배치하는 방법에 따라 Wenner법, Schlumberger-Palmer 법, Dipole-Dipole법 등으로 분류된다[4-6]. 보조전극을 동일한 간격으로 배치하는 Wenner 4전극법이 가장 널리 이용되고 있으며, 대지구조가 균질이거나 잘 정리된 경우 정확도가 우수하다. 그러나 대지저항률

\* 주(교신)저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수  
\* Main(Corresponding) author : School of Electrical Engineering, Inha University, Professor  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2012년 12월 13일  
1차심사 : 2012년 12월 18일  
심사완료 : 2013년 1월 18일

### 3전극과 4전극 전위강하법으로 측정된 대지저항률의 비교

은 대지표면상태, 함유되어 있는 화학성분, 대지구조 등 여러 가지 요인에 의존적이므로 측정에서도 세심한 고려가 필요하다. 통상 접지극을 설치하고자 하는 장소의 실제 대지구조는 불규칙하며, 주변 시설물과 조건이 다르며, 계절 또는 날씨에 따라 표면상태도 다르다[7]. 접지극을 설치하고자 하는 장소의 주변조건과 표면상태의 영향이 작은 측정방법으로 대지저항률을 평가할 필요가 있다.

본 논문에서는 접지설계를 할 때 정확한 대지저항률의 적용과 현장상황에 따라 측정된 대지저항률의 분석을 위해 고려해야 할 요소와 검토기법을 제안할 목적으로 실증적 연구를 수행하였다. 실제의 접지설계를 위하여 대지저항률을 측정하는 경우 계절적으로 지표면의 상태와 주변 조건이 다를 때 전위강하법을 기반으로 하는 3전극법과 Wenner 4전극법으로 측정된 대지저항률을 비교·분석하여 접지설계에 반영할 경우 고려하여야 할 요소에 대하여 검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1 측정방법

#### 2.1.1 3전극법

3전극법은 그림 1에 나타난 바와 같이 측정하고자 하는 장소에 봉형 접지극(ground rod)을 수직으로 설치하고, 접지극의 접지저항을 측정할 후 이론식을 적용하여 대지저항률을 산출하는 방법이다.

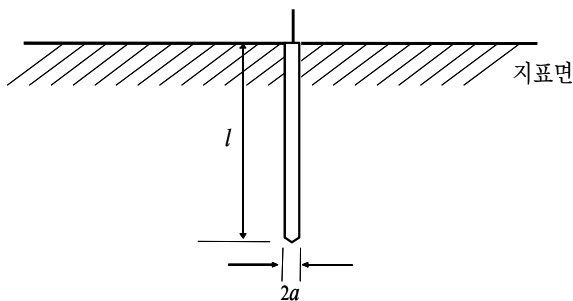


그림 1. 수직으로 설치한 봉형 접지극  
Fig. 1. Vertically-buried ground rod

봉형 접지극의 상단이 대지의 지표면에 위치하도록 설치한 경우 접지저항은 이론적으로 다음과 같다[8].

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{a} \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 접지저항,  $\rho$ 은 대지저항률,  $l$ 은 봉형 접지극의 매입깊이,  $a$ 은 봉형 접지극의 반경이다. 따라서 식 (1)로부터 대지저항률은 다음과 같이 산출된다.

$$\rho = \frac{2\pi l R}{\ln \frac{2l}{a}} \quad (2)$$

이 방법은 측정하고자 하는 깊이까지 측정전류가 흐르도록 접지극의 길이를 길게 하여 측정하므로 깊이변경법(variation-of-depth method)라고도 하며, 접지극 근방 토양의 특성에 관한 정보를 얻을 수 있다[2,9].

수직으로 설치한 봉형 접지극의 접지저항은 그림 2와 같은 측정회로를 구성하여 전위강하법으로 측정한다. 전류보조극을 측정대상 접지극으로부터 50m 떨어진 위치에 설치하고 전위보조극을 일직선상의 61.8% 지점에 배치시켜 측정할 접지저항을 식 (2)에 대입하여 대지저항률을 산출하였다.

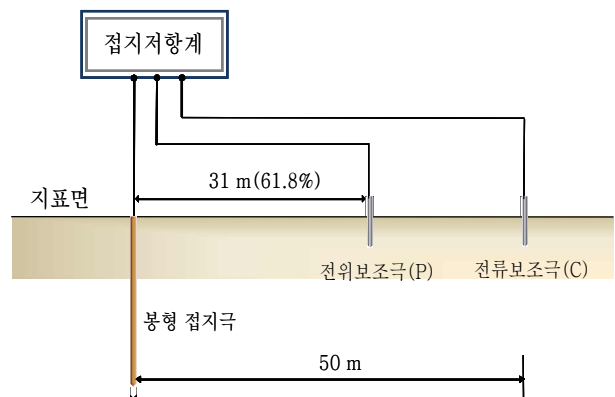


그림 2. 전위강하법을 이용한 접지저항의 측정회로  
Fig. 2. Measuring circuit of the earth resistance using fall-of-potential method

수직 접지극의 길이는 설치의 한계 때문에 1m에서 10m까지 1m씩로 증가시키면서 접지극의 접지저항을 측정하고, 대지저항률을 산출하였다. 측정용 수직 접지극은 1m씩 커플링을 이용하여 접속한 후 항타기로 대지에 타봉하는 방법으로 설치하였다.

### 2.1.2 Wenner 4전극법

Wenner 4전극법은 4개의 측정용 전극을 직선상의 동일한 간격으로 배치하는 방법으로써 그림 3과 같이 4개의 전극을 대지에 설치하고 바깥쪽 전극 간(C1-C2)에 흐르는 전류  $I$ 와 안쪽 전극 간(P1-P2)에 유도되는 전압  $V$ 를 측정하여 대지저항률을 산출하는 방법이다. 외측의 두 전극 C1과 C2 사이에 전원을 공급하여 대지에 전류를 흘리고, 이 때 안쪽의 두 전극 P1과 P2 사이의 전위차를 측정하여  $V/I$ 로부터 접지저항  $R$ 을 구한다. 또한 전극간격을  $a$ 라 하면 대지저항률  $\rho$ 은 식 (3)으로부터 산출되며, 대략 깊이  $a$ 까지의 평균 대지저항률을 나타낸다[2].

$$\rho = 2\pi aR \tag{3}$$

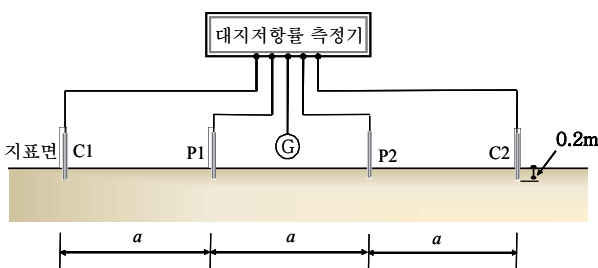


그림 3. Wenner 4전극법에 의한 대지저항률의 측정회로  
Fig. 3. Measuring circuit of the earth resistivity using Wenner 4-electrode method

측정용 전극 C1, C2, P1, P2의 접지저항에는 관계없이 대지저항률이 산출된다. 전극간격  $a$ 를 크게 하면 측정용 전류가 침투하는 깊이까지의 대지저항률의 평균값을 측정할 수 있게 된다. 3전극법과 Wenner 4전극법으로 측정된 대지저항률을 비교·분석하기 위해 Wenner 4전극법을 이용하는 대지저항률의 측정위치는 3전극법의 측정용 접지전극이 설치된 점을 중앙으로 하여 측정회로를 구성하였다. 측정용 전극의 간격

$a$ 를 0.5m에서 20m까지 0.5m씩 증가시키며 측정하고, 식 (3)으로 대지저항률을 산출하였다.

## 2.2 측정범위 및 측정기

토양의 종류와 특성, 지층 구조가 다르고 주변에 도랑이 있는 3곳의 실험장 부지를 평가의 대상으로 선정하였다. 또한 대지표면의 건조 상태와 결빙상태에서의 측정결과와 분석을 위해 하절기와 동절기로 구분하여 실험하였다. 측정의 정확도가 우수한 전위강하법으로 접지저항을 측정하는 3전극법으로 봉형 접지극의 길이에 따른 대지저항률의 관계를 나타내는  $\rho-l$ 곡선과 Wenner 4전극법으로 측정전극 사이의 거리에 따른 대지저항률로 나타낸  $\rho-a$ 곡선을 산출하고 비교·검토하는 것을 주요 내용으로 수행하였다.

측정의 대상으로 대지구조가 알려진 장소의 토양의 저항률을 측정하여 평가대상의 측정방법의 타당성과 상관성을 검토하였다. 또한 대지표면이 습한 상태, 결빙된 상태 등 대지표면상태가 측정결과에 미치는 영향을 분석하였으며, 측정하고자 하는 장소 주변에 도랑과 같은 시설물과 이의 조건이 대지저항률의 측정결과에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 3전극법과 Wenner 4전극법에 의한 방법에 따라 접지저항계(C.A 6470)를 이용하여 대지저항률을 측정하였으며, 접지저항계의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 접지저항 및 대지저항률 측정기의 사양  
Table 1. Specifications of the tester of measuring the earth resistance and earth resistivity

항목		규격
3전극법	측정저항	0.01Ω~100kΩ
	측정전압	16~32V
	측정주파수	41~512Hz
	보조극의 저항	0.01Ω~100kΩ
Wenner 4 전극법	측정저항	0.01Ω~100kΩ
	측정전압	16~32V
	측정주파수	41~128Hz

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 정형화된 대지의 $\rho-a$ 곡선

3전극법과 Wenner 4전극법으로 대지저항률을 측정할 경우 측정하고자 하는 장소의 대지표면의 건습, 결빙 또는 주변의 조건이 측정결과에 미치는 영향을 분석하기 위해서 그림 4에 나타난 정형화된 대지에서 실측실험을 수행하였다.

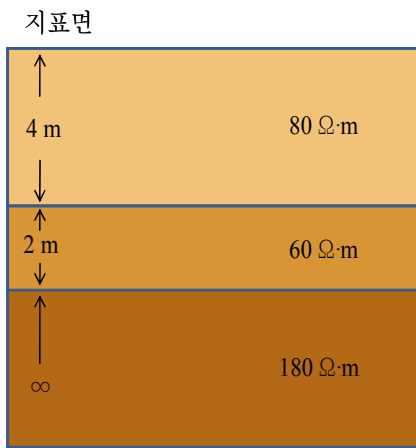


그림 4. 측정장소의 대지구조  
Fig. 4. Soil structure of the test site

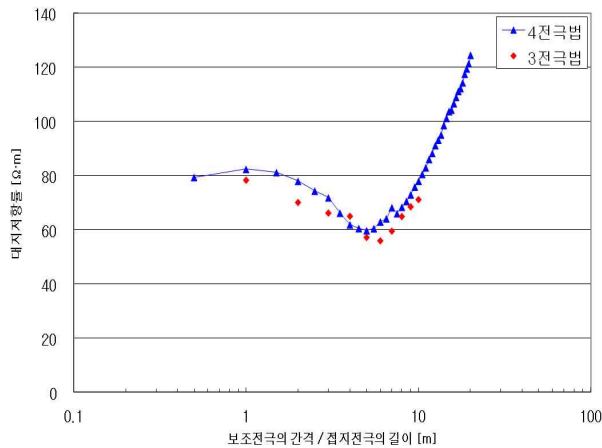


그림 5. 정형화된 대지에서 3전극법과 Wenner 4전극법으로 측정된 결과의 비교  
Fig. 5. Comparison between the results measured by three-electrode and Wenner 4-electrode methods at the undisturbed earth

측정 장소는 충남에 위치한 지자체의 운동장을 건설할 때 인위적으로 조성한 3층 구조로 정형화되어 있다. 3전극법으로 측정된 대지저항률과 Wenner 4전극법으로 측정된 결과의 비교를 그림 5에 나타내었다. 3전극법으로 측정된 결과는 대지저항률-접지극의 길이의 관계인  $\rho-l$  곡선으로 나타내었으며, Wenner 4전극법으로 측정된 결과는 대지저항률-측정전극 간격의 관계인  $\rho-a$  곡선으로 나타내었다. 측정 당시의 날씨는 맑고, 기온은 27°C이며 대지표면은 건조한 상태였다.

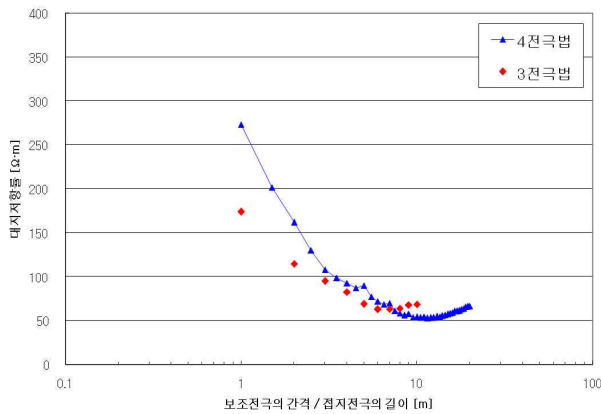
수직 접지극을 10m 이상의 길이로 설치하는 것이 어려우므로 모든 범위에 대한 비교는 나타낼 수 없었지만 두 가지 방법으로 측정된  $\rho-l$  곡선과  $\rho-a$  곡선은 거의 일치하는 결과를 나타내었으며, 그림 4의 3층 구조의 특성을 비교적 잘 나타내고 있다. 대지표면이 건조하고 지층이 정형화된 대지에서는 3전극법 또는 Wenner 4전극법 중 어느 방법으로 측정하든지 이론적으로 대지구조의 해석이 가능하고, 측정결과와 신뢰성이 확보되는 것으로 볼 수 있다. 또한 이미 보고된 연구에서도 다층 구조의 대지에서 Wenner 4전극법의  $\rho-a$  곡선과 3전극법으로 측정된 접지전극의 길이에 따른 대지저항률의 측정결과와 변동 추세를 거의 동일한 경향이었으며, 측정범위에 대한 상관성이 있음이 밝혀졌다[8].

#### 3.2 대지표면상태에 따른 $\rho-a$ 곡선

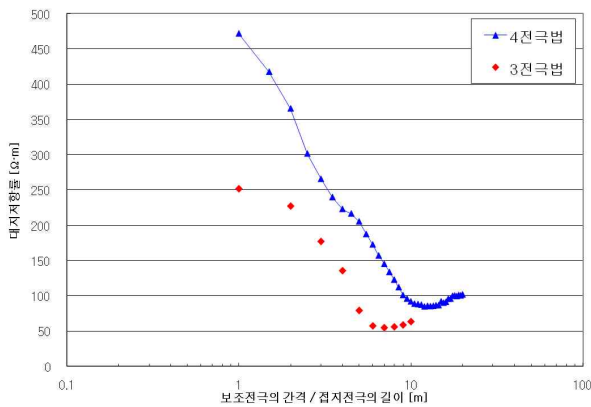
측정하고자 하는 장소의 대지표면상태에 따른 3전극법과 Wenner 4전극법으로 측정된 결과를 비교·분석하기 위해서 대지표면의 건습 또는 결빙 상태 및 대지표면의 주변에 있는 시설물과 이의 조건에 따른 대지저항률의 측정결과와 분석을 위한 실증적 실험을 수행하였다. 동일한 실험장에서 하절기에 대지표면이 건조한 경우와 동절기에 대지표면이 결빙된 상태에서 측정된  $\rho-l$  곡선과  $\rho-a$  곡선의 비교를 그림 6에 나타내었다.

그림 6의  $\rho-a$  곡선으로부터 대지표면을 포함하여 상부층의 대지저항률이 크고, 하부층의 대지저항률이 작은 2층 대지구조로 추정된다. 건조한 상태에서는 매

설깊이 2m 이하의 표토층을 제외하고  $\rho-l$ 곡선과  $\rho-a$ 곡선은 대체로 일치하고 있으며, 2m 이하의 표토층에 대한 결과는 표토층이 다양한 토양과 불규칙한 두께로 이루어져 있어 큰 차이가 발생한 것으로 추정된다. 대지표면이 결빙된 상태에서 측정한  $\rho-l$ 곡선과  $\rho-a$ 곡선은 큰 차이를 나타내었으며, 3전극법으로 측정한 결과가 Wenner 4전극법으로 측정한 결과보다 대략 2배 정도 낮게 나타났다.



(a) 대지표면이 건조한 상태

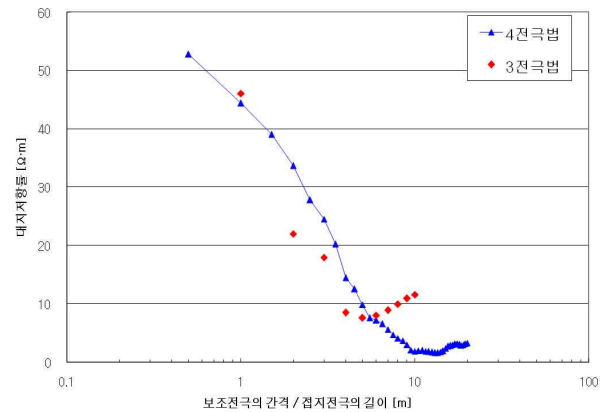


(b) 대지표면이 결빙된 상태

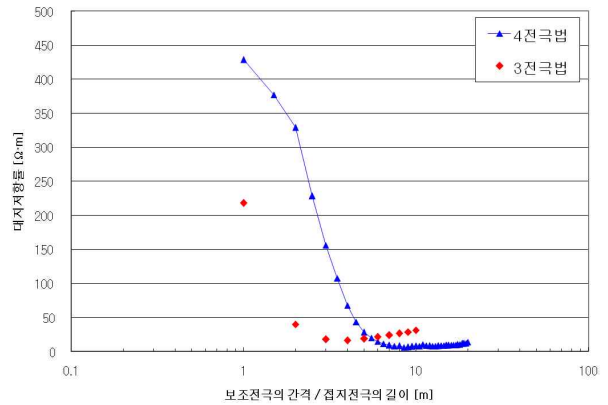
그림 6. 대지표면상태에 따른  $\rho-l$ 곡선과  $\rho-a$ 곡선의 비교  
Fig. 6. Comparison between  $\rho-l$  and  $\rho-a$  curves according to earth surface conditions

측정이론상 봉형 접지극을 이용하는 3전극법은 접지극이 매설된 위치의 국부적인 토양의 저항률이 검출되지만 Wenner 4전극법의 경우 측정범위가 보다

넓으므로 대지표면상태의 영향이 크게 나타나는 것으로 여겨진다[9]. 측정 장소 주변의 조건과 시설물의 영향을 검토하기 위해서 주변에 도랑이 있는 장소에서 토양의 저항률을 측정한 결과를 그림 7에 나타내었다.



(a) 주변의 도랑에 물이 있는 경우



(b) 대지표면과 주변의 도랑이 결빙된 경우

그림 7. 측정장소의 주변 상태에 따른  $\rho-l$ 곡선과  $\rho-a$ 곡선의 비교

Fig. 7. Comparison between  $\rho-l$  and  $\rho-a$  curves according to earth surface conditions around the test site

이 측정 장소 또한 상부층이 저항률이 크고 하부층의 저항률이 작은 2층 구조임을 나타내고 있다. 그림 7 (a)에는 측정장소 주변의 도랑에 물이 있는 경우에 측정한  $\rho-l$ 곡선과  $\rho-a$ 곡선의 비교를 나타낸 것으로 측정거리 약 6m까지는 비교적 일치하였으나 그 이상에서는 큰 차이를 나타내었다. 측정거리가 비교적 짧

### 3전극과 4전극 전위강하법으로 측정된 대지저항률의 비교

은 때는 도랑에 흐르는 물의 영향으로 비교적 토양의 저항률이 작게 나타났으며, 하부층의 저항률이 매우 낮은 것으로 추정된다.

또한 그림 7 (b)는 대지표면과 주변의 도랑이 결빙된 동절기에 측정된 결과로 Wenner 4전극법으로 측정된  $\rho-l$  곡선의 변동이 현저하게 나타났다. 3전극법으로 측정된  $\rho-l$  곡선은 측정깊이 2m 이상에서는 주변의 상황에 따른 변동이 매우 작았으나 Wenner 4전극법으로 측정된  $\rho-a$  곡선은 측정거리 5m 이하에서 매우 크게 증가하여 대지표면 및 주변의 조건에 따른 큰 의존성을 나타내었다. 특히  $\rho-a$  곡선은 측정거리 3m 이하에서 약 10배 정도 크게 측정되었다.

대지표면의 습기가 대지저항률의 측정결과에 미치는 영향을 조사하기 위해서 비온 후 대지표면이 축축하게 젖은 상태일 때의 측정된  $\rho-l$  곡선과  $\rho-a$  곡선의 비교를 그림 8에 나타내었다.

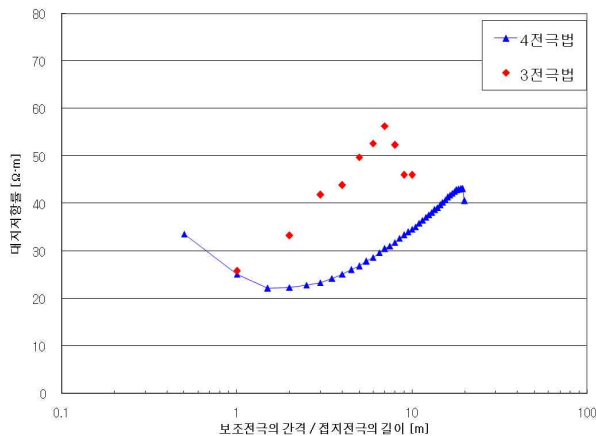


그림 8. 대지표면이 젖은 상태에서 측정된  $\rho-l$  곡선과  $\rho-a$  곡선의 비교

Fig. 8. Comparison between  $\rho-l$  and  $\rho-a$  curves measured in moist earth surface conditions

이 경우 3전극법과 Wenner 4전극법으로 측정된 결과는 상당히 다르게 나타났으며, 그림 8의 결과를 보면 3전극법으로 측정된  $\rho-l$  곡선은 상층부보다 하층부의 저항률이 큰 것으로 보이며, Wenner 4전극법으로 측정된  $\rho-a$  곡선은 상층부와 하층부의 중간층보다 저항률이 큰 토양으로 구성된 3층 대지구조임을 나타내고 있다. 또한 토양의 저항률도 Wenner 4전극법의

로 측정된 결과가 전체적으로 작게 나타났으며, 이는 측정전류가 습도가 높은 표토층으로 집중적으로 흘러 초래된 결과인 것으로 추정된다. 심층부에서의 조건은 명확히 알 수 없으나 습기가 많은 대지표면의 외견상의 조건을 고려해 보면 접지극의 길이에 따른 저항률을 검출하는 3전극법보다 전극간 거리를 기반으로 측정하는 Wenner 4전극법이 대지표면상태의 영향을 많이 받은 것으로 생각된다.

이상과 같이 대지표면상태 또는 주변의 조건이 대지저항률의 측정결과에 미치는 영향은 전반적으로 대지저항률을 Wenner 4전극법으로 측정하는 경우 대지표면상태의 영향이 큰 것으로 나타났다. 특히 상부층의 대지저항률이 클수록  $\rho-a$  곡선의 대지표면상태의 영향이 크게 나타난 것으로 보인다. 따라서 통상 측정하고자 하는 장소의 대지표면상태가 계절적 영향으로 항상 건조하고 안정된 환경이 아니기 때문에 접지설계를 하기 위해서 현장의 대지저항률을 측정하고 분석할 때 대지표면이 건조한 상태가 유지되어 안정된 조건에서 측정하는 것이 바람직하며, 장마철이나 동절기 등 계절적 변동요인이 포함될 수 있는 경우에는 측정대상인 장소의 주변 여건과 대지표면상태를 고려하여 측정결과를 분석함이 요망된다. 또한 대지표면상태에 따라 3전극법과 Wenner 4전극법을 병용하여 검토하는 것도 하나의 방법으로 생각된다.

## 4. 결 론

본 논문은 접지설계를 할 때 대지저항률의 분석에 가장 많이 사용되고 있는 측정방법인 Wenner 4전극법으로 측정된 결과에 미치는 대지표면상태의 영향을 분석하고자 전위강하법을 기반으로 하는 3전극법의 측정된 결과를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대지표면이 건조하고 안정화된 대지구조일 경우 Wenner 4전극법으로 측정된  $\rho-a$  곡선과 3전극법으로 측정된  $\rho-l$  곡선은 비교적 잘 일치하여 측정의 정확도가 양호한 것으로 확인되었다.
- (2) 대지표면이 습한 상태 또는 결빙 상태이거나 주변에 시설물이 있는 경우 Wenner 4전극법의  $\rho-a$  곡

선과 3전극법의  $\rho-l$  곡선은 큰 차이를 나타내었다.

(3) Wenner 4전극법으로 측정된  $\rho-a$  곡선은 3전극법으로 측정된  $\rho-l$  곡선에 비하여 대지표면상태에 의한 영향이 보다 현저한 것으로 나타났다.

(4) 계절적 요인으로 대지표면상태가 수분이 함유되거나 결빙 등으로 교란되어 있는 경우 대지저항률의 측정과 대지구조의 해석에 심도 있는 검토가 요망되며, 3전극법과 4전극법으로의 측정을 통해 측정결과의 적합성을 분석하는 것도 권장되는 방안의 하나로 제안된다.

### References

- [1] IEEE Standards Board, "IEEE Guide for measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", IEEE 81.2-1991, pp. 12-17, 1991.
- [2] IEEE Standards Board, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", ANSI/IEEE Std 81-1983, pp.10-15, 1983.
- [3] British Standard Institute, Code of practice for earthing, BS 7430, pp.8-11, 1998.
- [4] Bok-Hee Lee and Seung-Chil Lee, The Major Foundational Technics for Grounding Systems, Uije Publication Ltd., pp. 45-51, 1999.
- [5] Sung-Chul Jo, Tae-Hyung Lee, Ju-Hong Eom, and Bok-Hee Lee, "Electrical structure Analysis of Ground using Various Methods for Resistivity Measurement, Proceeding of 2006 KIEE Summer Conference, Vol.C, pp.1492-1493, 2006.
- [6] A. Phillips, Guide for Transmission Line Grounding- A Roadmap for Design, Testing, and Remediation: Part 1 - Theory Book, EPRI, pp.4.14-4.25, 2006.
- [7] IEEE Standard 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", pp.71-80, 2000.
- [8] Bok-Hee Lee, Ko-Bok Kim, Seung-Hoon Lee and Jong-Hyuk Choi, "Examinations on the Reasonable Measuring Methods of the Soil Resistivity for Design of Grounding System", J. KIEE, Vol.25, No. 5, pp.255-256, 2011.
- [9] IEEE Std 142-2007, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Green Book, pp.161-181, 2007.

### ◇ 저자소개 ◇



#### 이복희(李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 객원연구원. 1999년 Cincinnati 대학 방문교수. 2010년 1월~2011년 12월 당 학회 회장, 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수.

Tel : (032) 860-7398

Fax : (032) 863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



#### 김기복(金基福)

1970년 9월 30일생. 2006년 2월 한밭대 공대 전기공학과 졸업. 2008년 2월 인하대 공학대학원 정보전기공학과 졸업(석사) 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : kibok7@yahoo.co.kr