

접지시스템의 설계를 위한 대지저항률의 합리적인 측정방법 고찰

(Examinations on the Reasonable Measuring Methods of the Soil Resistivity for Design of Grounding System)

이복희* · 김기복 · 이승훈 · 최종혁

(Bok-Hee Lee · Ki-Bok Kim · Seung-Hoon Lee · Jong-Hyuk Choi)

Abstract

In order to design effectively the grounding system, it is very important to determine the optimum soil resistivity at the desired location of the connection to earth. This paper deals with the reasonable methods of measuring the soil resistivity where grounding electrodes are buried. The soil resistivity at three test sites with different resistivity of soil were measured as functions of the spacing between the test probes in the Wenner's four-point method and the length of test ground rod in the three-point method. In the case of the three-point method, the length of test ground rod of 2-10[m] in length was appropriate in two-layered soil structure. In the length range of 2-10[m], the results measured by the three-point method using the test ground rod with the length corresponding to the spacing between the test probes of the Wenner's four-point method are in good agreement with the data obtained from the Wenner's four-point method.

Key Words : Design of Grounding System, Soil Resistivity, Wenner's Four-Point Method, Three-Point Method, Soil Structure

1. 서 론

접지저항은 접지전극의 형상과 접지전극이 매설되는 위치의 대지저항률에 의해 결정되기 때문에 대지저항률의 정확한 측정은 접지설계 및 안전성 확보에 있어 기술적·경제적으로 매우 중요한 요소이다[1-3]. 일반적으로 대지저항률의 측정에는 3전극법과 4전

극법이 널리 사용되고 있다. 3전극법은 측정용 수직 접지전극을 측정하고자 하는 위치에 시공하고 접지저항을 측정한 후 접지저항으로부터 대지저항률을 역산으로 산출하는 방법이며, 4전극법은 전류보조전극과 전위보조전극을 설치하여 접지저항을 측정한 후 전극 간격에 따른 대지저항률을 계산하는 방법이다. 4전극법은 보조전극을 배치하는 방법에 따라 Wenner법, Schlumberger-Palmer법, Dipole-dipole법 등으로 분류되며, 보조전극을 동일한 간격으로 배치하는 Wenner 4전극법이 가장 널리 사용되고 있다[4-5].

접지전극이 설치될 위치의 대지저항률을 정확하게

* 주저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2011년 1월 27일
1차심사 : 2011년 2월 9일
심사완료 : 2011년 3월 31일

결정하기 위해서 3전극법은 얼마의 길이로 대지저항률을 측정할 것인가? 그리고 Wenner 4전극법의 경우 보조전극의 간격을 얼마로 하며 다층 구조인 경우 어떤 값을 접지설계에 반영하여야 하는지에 대한 정확한 평가가 필요하다. 따라서 경제적이고 합리적인 접지설계를 위해서는 3전극법 또는 Wenner 4전극법으로 접지전극이 매설되는 위치의 대지저항률을 적정하게 측정하여야 한다.

본 논문에서는 접지전극이 매설되는 위치의 대지저항률을 결정하는 방법을 제안하기 위해서 3곳의 부지에 대하여 3전극법과 Wenner 4전극법으로 측정한 결과를 비교·분석하여 2가지 측정방법의 타당성과 접지설계를 위해 합리적으로 대지저항률을 측정하는 방법을 제시하였다. 3전극법의 측정용 접지전극의 길이에 따른 대지저항률의 측정결과와 Wenner 4전극법의 보조전극의 간격에 따른 측정결과와의 상관성을 검토하였다.

2. 측정이론

2.1 3전극법

3전극법은 접지저항이 접지전극 주변의 대지저항률에 비례하는 관계를 이용하는 것으로 길이와 반경을 알고 있는 봉형 접지전극을 수직으로 설치하고, 이 접지전극의 접지저항을 측정하여 대지저항률을 산출하는 방법이다. 봉형 접지전극을 수직으로 설치한 경우 접지저항은 이론적으로

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

과 같이 표현된다[6-7]. 여기서 $R[\Omega]$ 은 접지저항, $\rho[\Omega \cdot m]$ 은 대지저항률, $l[m]$ 은 봉형 접지전극의 길이, $a[m]$ 는 봉형 접지전극의 반경이다. 따라서 식 (1)로부터 대지저항률은

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

와 같이 산출한다.

산출된 대지저항률은 합성 대지저항률이며, 매설된 봉형 접지전극의 길이에 따라 대지저항률의 값은 달라진다. 이 방법으로는 독립 접지전극으로 시설하는 소규모 접지설비의 설계를 위한 비교적 대지저항률이 낮은 국소적인 장소의 정보를 얻게 된다[8].

2.2 Wenner 4전극법

4개의 전극을 일직선상에 동일한 간격으로 대지에 설치하고 양측 바깥쪽의 전극 간에 흐르는 전류 I 와 안쪽 2개의 전극 간에 유도되는 전위 V 를 측정하여 대지저항률을 산출하는 방법이다. 외측의 두 접지전극 사이에 전원을 공급하여 대지에 전류를 흘리고, 이때 안쪽의 두 접지전극 사이에 생기는 전위차를 측정하면 V/I 로부터 접지저항 $R[\Omega]$ 을 구할 수 있다. 또한 보조전극의 간격을 $a[m]$ 라 하면 대지저항률 $\rho[\Omega \cdot m]$ 는

$$\rho = 2\pi a R \quad (3)$$

으로 산출된다[4].

식 (3)은 대체적으로 깊이 $(0.7 \sim 1)a$ 인 지점까지 토양의 평균 대지저항률을 나타낸다. 보조전극의 간격 a 를 크게 하면 측정용 전류가 침투하는 깊이까지의 대지저항률의 평균값을 측정할 수 있게 된다.

3. 실험

3.1 실험계의 구성 및 방법

3전극법에 의한 대지저항률의 측정은 그림 1과 같이 수직으로 설치한 봉형 접지전극의 접지저항을 측정하는 전위강하법을 이용하였다. 전류보조전극을 측정대상 접지전극으로부터 50[m] 떨어진 위치에 설치하고 전위보조전극을 일직선상의 61.8[%] 지점에 배치시켜 측정한 접지저항으로부터 식 (2)로 대지저항률을 산출하였다.

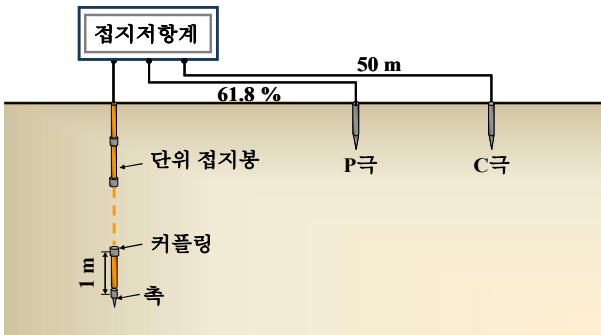


그림 1. 3전극법을 이용한 대지저항률의 측정회로
Fig. 1. Measuring circuit of the soil resistivity using the three-point method

토양의 종류와 특성, 지층 구조가 다른 3곳의 실험장 부지에 심매설 접지방식으로 수직 접지전극의 길이를 1[m]에서 10[m]까지 1[m] 단위로 증가시키면서 접지전극의 접지저항을 측정하고, 대지저항률을 산출하였다. 측정용 수직 접지전극의 설치 1[m] 단위 길이의 접지봉을 커플링을 이용하여 접속한 후 향타기로 접지전극을 대지에 박아 넣는 방식을 사용하였다.

3전극법과 Wenner 4전극법의 측정과라미터에 따른 대지저항률의 측정결과를 비교·분석하기 위해 Wenner 4전극법을 이용하는 대지저항률의 측정계는 3전극법의 측정용 접지전극이 설치될 위치를 중앙으로 하여 그림 2와 같이 구성하였다. 보조전극의 간격 a 를 0.5[m]에서 20[m]까지 0.5[m]씩 증가시키며 접지저항을 측정하고, 식 (3)으로 대지저항률을 산출하였다.

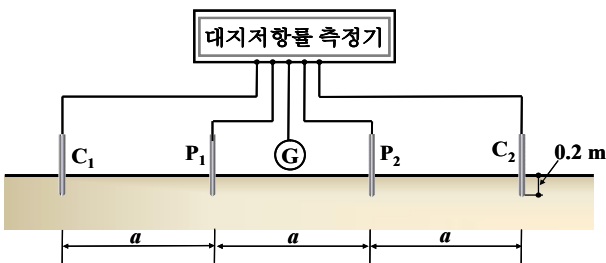


그림 2. Wenner 4 전극법을 이용한 대지저항률의 측정회로
Fig. 2. Measuring circuit of the soil resistivity using the Wenner's four-point method

3.2 측정장비

3전극법과 Wenner 4전극법에 의한 대지저항률의 측정에는 접지저항계(C.A 6470)를 이용하였으며, 측정기의 성능은 표 1과 같다.

표 1. 접지저항 및 대지저항률 측정기의 규격
Table 1. Specifications of the tester for measuring the ground resistance and soil resistivity

항 목	규 격	
3전극법에 의한 접지저항	측정저항	0.01[Ω]~100[kΩ]
	측정전압	16~32[Vrms]
	측정 주파수	41~512[Hz]
	보조전극의 저항	0.01[Ω]~100[kΩ]
4전극법에 의한 대지저항률	측정저항	0.01[Ω]~100[kΩ]
	측정전압	16~32[Vrms]
	측정 주파수	41~128[Hz]

4. 결과 및 고찰

4.1 2층 대지구조

4.1.1 상층부의 대지저항률이 하층부보다 높은 경우

대지저항률이 비교적 낮은 매립지의 부지를 대상으로 Wenner 4전극법으로 측정한 $\rho-a$ 곡선과 3전극법으로 측정한 측정용 수직 접지전극의 길이에 대한 대지저항률의 비교를 위해서 함께 그림 3에 나타내었다. 측정용 접지전극의 영향이 포함되지 않도록 4전극법으로 측정한 후에 3전극법으로의 측정을 수행하였다.

접지전극의 길이가 길어질수록 대지저항률이 낮아지는 것으로 나타났으며, Wenner 4전극법에서 검출용 보조전극의 간격 a 가 증가할 때 ρ 가 감소하는 경향은 3전극법에서 접지전극의 길이 l 이 증가함에 따른 ρ 의 변동과 거의 유사하게 나타났다. 이들 결과로부터 하층부로 갈수록 대지저항률이 낮은 지층 구조임을 알 수 있다[9]. Wenner 4전극법의 경우 보조전극의 간격 a 와 3전극법의 경우 측정용 접지전극의 길이 l 에 따라 측정한 대지저항률은 접지전극의 길이 2~10[m]

의 범위에서 어느 정도 일치하는 경향의 상관성으로 나타났다. 그림 3의 결과를 보아 지표면에서 2[m] 이상의 깊이에서부터 저항률이 낮은 토양으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

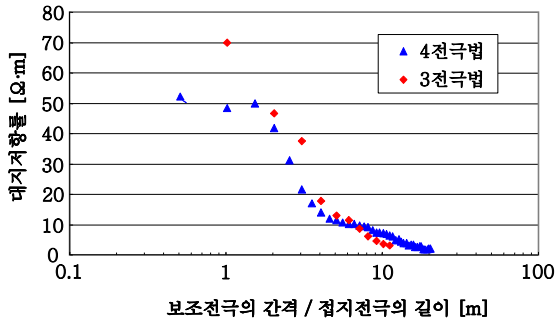


그림 3. 2층 대지구조인 장소(1)에서 3전극법과 4전극법으로 측정된 결과의 비교
Fig. 3. Comparison between the results measured by the three-point method and the four-point method at the test site of 2-layered soil structure(1)

측정용 접지전극의 길이 1[m]인 경우 3전극법으로 측정된 결과는 Wenner 4전극법으로 측정된 결과보다 상당히 크게 나타났으며, 이는 수직 접지전극이 설치된 국소적 위치의 토질의 상태를 조사한 바 자갈이 토양에 많이 포함되어 있어 접지전극과 토양의 접촉상태가 양호하지 못한 것으로 확인되었으며, 그 이상의 길이에 대하여는 이러한 요인의 영향은 작은 것으로 보인다.

Wenner 4전극법을 이용하는 경우는 접지전극을 대략 매설할 위치의 깊이만큼의 보조전극의 간격 a 를 선정하여 측정된 대지저항률을 접지설계에 반영하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 또한 3전극법으로 대지저항률을 측정하는 경우 국소적인 위치의 저항률이 측정되므로 측정용 접지전극의 길이를 길게 하여 접지전극을 매설할 장소의 여러 곳에서 측정된 값의 평균을 취하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 그림 3에 나타난 경향성의 대지특성을 갖는 장소에서는 가급적 깊게 접지전극을 매설하는 것이 우수한 성능의 구현이 가능하며, 시공비용을 고려한 경제적인 접지전극이 매설될 위치를 선정하는 것이

최적의 접지설계라 볼 수 있다.

4.1.2 상층부의 대지저항률이 하층부보다 낮은 경우

대지저항률과 구조가 다른 실험장의 동일한 위치 및 날짜에 Wenner 4전극법으로 대지저항률을 측정된 후 3전극법으로 측정용 접지전극의 길이 10[m]까지에 대하여 측정된 결과를 비교하였다. Wenner 4전극법으로 측정된 $\rho-a$ 곡선과 3전극법으로 측정된 접지전극의 길이에 따른 대지저항률의 측정결과를 그림 4에 나타내었다. 지표면에서 2-3[m]까지는 저항률이 약 70 $[\Omega \cdot m]$ 인 토양이나 그 이상의 깊이의 토양의 저항률은 매우 높은 것으로 추정된다.

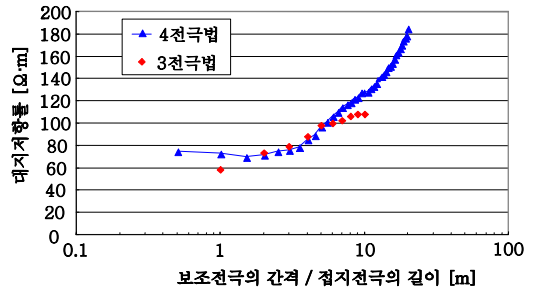


그림 4. 2층 대지구조인 장소(2)에서 3전극법과 4전극법으로 측정된 결과의 비교
Fig. 4. Comparison between the results measured by the three-point method and the four-point method at the test site of 2-layered soil structure(2)

Wenner 4전극법의 측정결과에서 보조전극의 간격 a 가 4[m] 이상에서 대지저항률이 증가하는 것으로 나타나 하층부의 대지저항률이 높은 2층 구조의 대지임을 알 수 있다[9]. 이 실험장에서도 3전극법의 측정결과를 보면 측정용 접지전극의 길이가 1[m]의 경우 Wenner 4전극법으로 측정된 결과보다 낮은 값을 나타내었으며, 이것 또한 지표면 부근의 국부적인 위치의 토질의 특성에 관련된 불확실성으로 볼 수 있다. 하지만 측정용 접지전극의 길이가 2[m]에서 5[m]까지의 대지저항률의 측정결과를 Wenner 4전극법으로 측정용 접지전극의 길이에 상응하는 보조전극의 간격 a 에서 측정된 결과 거의 일치하는 값을 나타내었다.

6[m] 이상에서도 접지전극의 길이가 길어질수록 대지 저항률이 증가하여 $\rho-a$ 곡선과 비슷한 경향성을 나타내었다. 2가지 방법으로 측정된 $\rho-a$ 곡선과 측정용 접지전극의 길이에 따른 대지저항률은 측정용 접지전극의 길이가 2~5[m]의 범위에서는 거의 같지만 6[m]를 넘는 범위에서는 4전극법으로 측정된 결과가 약간 크게 나타났다. 이는 보조전극의 간격이나 측정용 접지전극의 길이가 짧은 경우는 접지저항의 형성영역이 협소하지만 긴 경우는 접지저항의 형성영역이 광범위해지므로 차이가 발생하는 것으로 볼 수 있다. 그림 4와 같은 대지의 특성을 갖는 장소에서 접지전극은 가급적 4[m] 이내의 깊이에 매설하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

4.2 3층 대지구조

대지저항률이 비교적 높고 지층 구조가 다소 복잡한 실험장을 선정하여 3전극법과 Wenner 4전극법으로 측정된 대지저항률을 그림 5에 나타내었다. Wenner 4전극법으로 측정된 $\rho-a$ 곡선을 보면 중간층의 대지저항률이 가장 낮은 3층 구조의 대지임을 알 수 있다[9].

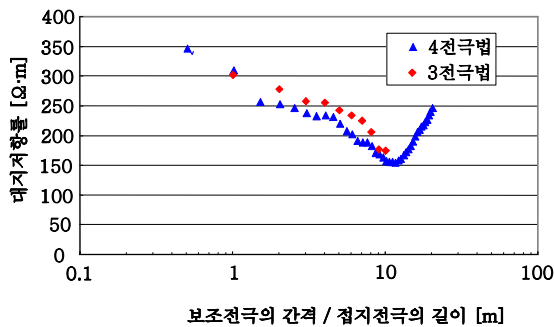


그림 5. 3층 대지구조인 장소에서 3전극법과 4전극법으로 측정된 결과의 비교

Fig. 5. Comparison between the results measured by the three-point method and the four-point method at the test site of 3-layered soil structure

Wenner 4전극법의 경우 보조전극의 간격 $a=0.5$ [m] 일 때 대지저항률은 약 $350[\Omega \cdot m]$ 로 매우 높은 값을 나타내었으며, 보조전극의 간격이 11.5[m]까지 증가함

에 따라 대지저항률은 $156[\Omega \cdot m]$ 까지 낮아진 후 그 이상의 보조전극의 간격에서 다시 증가하는 것으로 나타났다. 3전극법으로 측정된 결과 역시 측정용 접지전극의 길이 l 이 1[m]에서 약 $303[\Omega \cdot m]$ 의 대지저항률을 나타낸 후 접지전극의 길이가 길어짐에 따라 낮아져 10[m]에서 $176[\Omega \cdot m]$ 로 나타났다. 3전극법으로 측정된 결과는 Wenner 4전극법의 보조전극의 간격 a 에 따른 대지저항률보다 약간 높게 나타났으나 그 경향성은 매우 유사하다. 대지구조가 3층 구조인 경우 두 방법으로 측정된 결과의 차이가 가장 크게 나타났으며 이러한 원인은 다층 구조에서 접지전류의 분포가 각 지층의 저항률에 따라 변동하기 때문에 기인된 결과인 것으로 판단된다[4].

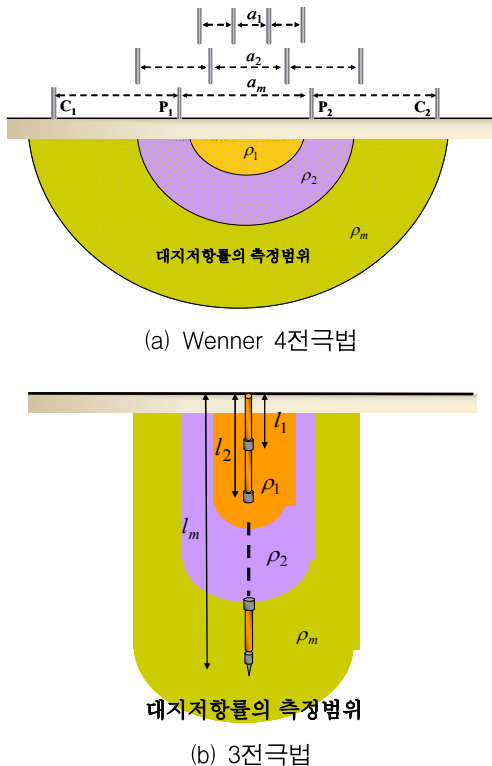
전반적으로 2층 구조 및 3층 구조의 대지를 대상으로 하여 Wenner 4전극법의 $\rho-a$ 곡선과 3전극법으로 측정된 접지전극의 길이에 따른 대지저항률의 변동 추세를 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4.3 결 토

Wenner 4전극법으로 보조전극의 간격 a 에 따른 $\rho-a$ 곡선과 3전극법의 측정용 접지전극의 길이 l 에 따라 측정된 대지저항률이 어느 범위에서는 잘 일치하며, 어느 길이 이상 증가하게 되면 측정결과에는 차이를 나타내지만 유사한 경향을 나타내는 점에 대한 도식적 설명을 그림 6에 나타내었다. 그림 6 (a)와 같이 Wenner 4전극법의 경우 보조전극의 간격이 멀어질수록 측정되는 대지의 범위가 수직 방향에 비해 수평 방향으로 증가하는 반면, 그림 6 (b)의 3전극법의 경우 수직 접지전극을 측정용 접지전극으로 사용하기 때문에 접지전극의 길이가 길어질수록 대지저항률의 측정되는 범위가 수평 방향에 비해 수직 방향으로 더욱 증가하기 때문이라 판단된다.

측정방법에 따라 보조전극의 간격과 측정용 접지전극의 길이 및 대지구조에 따라 약간의 차이가 발생하게 되지만, 2~5[m]의 범위에서 비교적 잘 일치하며, 접지전극이 매설될 깊이에 따라 적절한 측정조건으로 4전극법 또는 3전극법으로 측정된 대지저항률을 접지설계에 반영하여야 경제적이고 성능이 우수한 접지시

스텝을 구축할 수 있다. Wenner 4전극법으로 대지저항률을 측정하는 경우 지층의 두께를 $\rho-a$ 곡선으로 산출하여야 되지만 3전극법의 경우는 깊이에 따른 토양의 저항률을 비교적 쉽게 추정할 수 있다.



(a) Wenner 4전극법

(b) 3전극법

그림 6. 대지저항률의 측정방법에 따른 측정범위
Fig. 6. Measured region associated with the methods for measuring the soil resistivity

5. 결 론

본 논문은 접지설계에서 가장 중요한 요소로 작용하는 대지저항률의 합리적인 측정에 관한 것으로, Wenner 4전극법과 3전극법으로 대지구조가 다른 장소에서 대지저항률을 측정하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다층 구조의 대지에서 Wenner 4전극법의 $\rho-a$ 곡선과 3전극법으로 측정한 접지전극의 길이에 따른 대지저항률의 측정결과와의 변동 추세는 거의 동일한 경향이었으며, 측정범위에 대한 상관

성이 있음이 밝혀졌다.

- (2) Wenner 4전극법으로 보조전극의 간격 2~5[m] 범위에서 측정한 $\rho-a$ 곡선과 3전극법으로 측정한 접지전극의 길이에 따른 대지저항률은 잘 일치하였으며, 3전극법의 경우 국소적인 위치의 대지저항률이 측정되므로 접지전극의 길이가 1[m] 이하와 6[m] 이상의 범위에서 측정한 결과는 Wenner 4 전극법으로 측정한 결과와 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.
- (3) 3전극법으로 대지저항률을 평가할 때 측정용 접지전극의 길이는 2~5[m] 정도로 하며, 여러 개소에서 측정한 값의 평균을 취하는 것이 합리적이다.
- (4) 접지설계에 있어 Wenner 4전극법으로 $\rho-a$ 곡선을 산출하거나 3전극법으로 측정용 접지전극의 길이에 따른 대지저항률을 측정하여 접지전극이 매설될 최적의 위치를 결정하는 것이 바람직하다.

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 한국전기안전공사 (과제번호 : R-2007-1-014)주관으로 수행된 과제임.

References

- [1] International Standard IEC 61936-1, "Power installations exceeding 1 kV a.c. - Part 1: Common rules", 2nd ed. pp.84-88, 2010.
- [2] IEEE Standard 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", pp.71-80, 2000.
- [3] 이복희, 정현욱, 백영환, "대지구조에 따른 접지봉 주변의 대지표면전위분포", 조명·전기설비학회 논문지, Vol.21, No.1, pp.142~147, 2007. 1.
- [4] 이승훈, "대지저항률 측정의 정확성 평가", 인하대학교 공학대학원 석사졸업 논문, pp.10~26, 2011.
- [5] G. Vijayaraghavan, M. Brown and M. Barnes, Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection, Newnes, Amsterdam, pp.62~72, 2004.
- [6] 高橋健彦, 接地・等電位ボンディング設計の實務知識, オーム社, pp. 89-91, 2003.
- [7] IEEE Std. 81-1993, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", pp.10~23, 1993.
- [8] IEEE Std 142-2007, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Green Book, pp.161-181, 2007.

[9] 이복희, 이승철, 접지의 핵심 기초 기술, 도서출판 의제, pp.52~64, 2009.

◆ 저자소개 ◆



이복희(李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.
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



이승훈(李承勳)

1982년 6월 25일생. 2007년 한국산업기술대학교 전자공학과 졸업. 2011년 2월 인하대 공학대학원 정보전기공학과 졸업(석사).
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : th2814@empal.com



최종혁(崔鍾赫)

1980년 5월 12일생. 2006년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 2008년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : chjohy80@naver.com