

대지구조 모델에 따른 봉형 접지전극의 접지저항값 변화

(The Variations of Grounding Resistance of the Vertical Electrodes by Soil Models)

심건보* · 김원배 · 서길모 · 조금배

(Keon-Bo Shim · Won-Bae Kim · Gil-Mo Seo · Geum-Bae Cho)

Abstract

The basic purpose of grounding is for human safety and normal operation of system related to electrical shock hazard by faults of electrical equipments. A grounding electrode is defined as a conducting element that connects electrical systems and/or equipment to the earth. The lowest possible resistance connection to the earth is sought from the grounding electrode. The grounding electrode is the foundation of the electrical safety system. The resistance to ground of vertical electrodes buried in the two deference soil structures has been analyzed for a length of electrodes and soil parameters. The equation of ground resistance of vertical electrodes are Tagg's equation for uniform soil models, and modified equation of Dwight equation for two-layer soil model. In this paper, compared with results of two equations are calculated values of vertical electrode in uniform and two-layer soil models.

Key Words : Grounding Resistance, Grounding Design, Soil Models, Grounding Electrodes

1. 서 론

전력설비에서 지락고장이 발생하면 고장전류가 접지전극 등을 통하여 대지로 흐르고, 고장전류에 의하여 전기설비의 구내 및 주변에 전위차가 나타나게 되어 인체의 안전이나 설비의 절연에 위험을 초래하게 된다. 더욱 최근에 전력사용의 수요가 급속하게 성장함에 따라 전력설비도 증대되어 전력설비

의 고장용량도 증가하고 있으므로 상대적으로 고장 전류에 의한 대지전위의 상승이 커져서 인체의 안전이나 설비의 절연 등에 미치는 위험도 증대되고 있는 실정이다. 이러한 위험에 대비하기 위한 것이 전기설비의 접지시스템으로서 접지저항의 크기만으로도 충분히 감전 보호용 접지의 기능을 달성한 것으로 평가할 수 있다.

일반적으로 현장에서 접지전극의 목표 접지저항을 얻기 위한 접지전극은 여러 가지 종류의 공사방법이 적용되고 있다. 여러 종류의 공사방법 중에서 봉형 접지 전극은 한정된 좁은 부지에서 접지시스템의 목표를 달성하기 위하여 목표 접지저항을 얻기 위한 방법으로서 가장 일반적으로 이용되는 접지전극이다.

접지전극을 설계하거나 해석하는 과정에서 가장 중

* 주저자 : 홍익대학교 산업기술연구소 책임연구원
* Main author : Hongik University, Research Institute of Industry Technology Senior Researcher
Tel : 02-2290-1328, Fax : 02-2274-7522
E-mail : kbshim@dreamwiz.com
접수일자 : 2012년 7월 25일
1차심사 : 2012년 7월 28일
심사완료 : 2012년 8월 16일

요한 입력 자료가 대지 파라미터이다. 대지 파라미터는 각 지층의 대지 저항률과 깊이를 의미하는 것으로서, 접지전극의 접지 저항의 크기나 전위 분포 등에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다. 현재 국내에서는 접지시스템의 목적을 달성하기 위하여 접지전극의 설치를 위한 설계 단계에서 적용하고 있는 접지전극의 접지저항 계산을 위한 계산식은 일반적으로 단일 지층구조의 대지 파라미터인 대지 저항률만을 고려한 계산식을 적용하고 있다. 그러나 현장에서 측정된 대지와 관련된 특성은 단일 지층구조가 아니며, 다층구조의 복잡한 대지 파라미터를 갖는다. 따라서 설치되는 접지전극의 저항값의 크기를 정확하게 계산하거나 전위분포 등을 해석하기 위해서는 다층구조의 대지 파라미터를 고려한 계산식이나 시뮬레이션 기법이 적용되어야 한다.

본 논문에서는 현재 대지구조의 변화에 대한 접지저항의 변화 특성을 해석하기 위하여 접지전극의 설계시에 적용하고 있는 단일지층의 등가 대지 저항률에 의한 설계가 잘못 적용되고 있음을 사례연구를 통하여 입증하고자 한다. 특히 본 논문에서는 봉형의 접지전극에 대한 저항의 크기를 계산하는 계산식을 단일지층에 대한 계산식과 등가 2층 구조에 대한 계산식의 결과를 비교하였으며, 대지구조를 등가 2층 구조로 가정한 경우에 단일지층의 대지 저항률로 표현하기 위한 등가 대지 저항률의 계산식에 대한 변화 특성도 비교·분석하였다.

2. 등가 대지 저항률의 추정

접지전극을 설계하거나 해석하는 과정에서 가장 중요한 입력 자료가 대지 파라미터로서, 각 지층의 대지 저항률과 깊이를 의미하는 것이고, 접지전극의 접지 저항의 크기나 전위 분포 등에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다. 따라서 다층구조로 이루어진 대지모델에 대하여 각각의 지층에 대한 정확한 대지 저항률과 깊이를 파악해야 한다. 그러나 현재 국내에서 일반적으로 접지시스템을 설계하거나 해석하는 경우에 대지 모델을 단일지층 구조의 대지모델을 사용하고 있으며, 이때 다층구조의 대지모델을 단일지층 구조의

대지모델로 등가화하는 모델링이 필요하게 된다.

다층구조의 대지모델을 단일지층 구조의 대지모델로 변환하는 방법은 평균적 대지저항률 또는 등가적 대지 저항률로 환산하는 방법[1]~[4]이 일반적으로 알려져 있다.

2.1 평균 대지저항률

봉형 전극이 있는 다층구조의 대지 저항률을 환산할 때 봉형 전극이 다층 구조의 대지에 매설되어 있는 것으로 가정하여 그 대지의 평균 대지 저항률을 구할 수 있다.

대지가 다층일 경우에는 봉상전극 표면으로부터 대지로 유출하는 전류가 동일하다고 할 수 없다. 따라서 다층구조 대지에 있어서 봉상전극 표면으로부터 대지로 유출하는 전류, 즉 전류밀도가 대지저항률 ρ 에 반비례한다고 가정하고, 각 지층 내에서 전류가 균등하다고 생각할 수 있다[3,4]. 수평 구조 대지모델에서 전극의 길이를 l , 전극에 흐르는 전류를 I , 제 n 층의 지층 깊이를 h_n , 대지 저항률을 ρ_n , n 지층에 존재하는 전류원을 I_n , 단일 지층일 때의 대지 저항률을 ρ_a 라고 하면,

$$\rho_1 I_1 = \rho_2 I_2 = \rho_3 I_3 = \dots + \rho_n I_n = \rho_a I \quad (1)$$

$$I_1 h_1 + I_2 h_2 + \dots + I_{n-1} h_{n-1} + I_n (l - h_1 - h_2 - \dots - h_{n-1}) = I l \quad (2)$$

와 같이 표현되고, 식 (1)과 (2)로부터 단층 구조의 평균 대지저항률 ρ_a 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_a &= \frac{1}{\frac{1}{\rho_1} \times \frac{h_1}{l} + \frac{1}{\rho_2} \times \frac{h_2}{l} + \dots + \frac{1}{\rho_n} \times \frac{h_n}{l}} \quad (3) \\ &= \frac{l}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n}} \end{aligned}$$

여기서, ρ_i : i 층의 대지고유저항 $\Omega \cdot m$
 h_i : i 지층의 두께 m

l : 전극의 길이 ($l = h_1 + h_2 + \dots + h_n$) m

2.2 등가 대지저항률

단일지층 구조의 등가 대지 저항률은 등가 깊이 l 을 지정하여, 그 깊이까지의 대지 저항률로 다층구조의 등가 대지 저항률 ρ_{eq} 로 표현하는 방법이다.

$$\rho_{eq} = \frac{l}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{l - \sum_{i=1}^{n-1} h_i}{\rho_n}} \quad (4)$$

그러나 이러한 평균 혹은 등가 대지 저항률은 실제 접지전극을 설계하는 관점에서 많은 가정을 포함하는 것으로서 설계단계에 많은 오류가 나타날 수 있음을 의미한다.

3. 봉형 접지전극의 저항의 계산

그림 1과 같이 단일지층에 매설된 봉형 접지전극에 대한 접지 저항값은 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

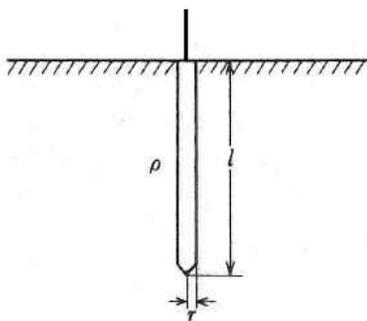


그림 1. 단일지층의 봉형 전극
Fig. 1. Vertical Electrode in Uniform Layered Earth

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad (5)$$

그림 2의 2지층 구조에서의 봉형 접지전극에 대한 접지 저항값은 접지전극의 위치에 따라 식 (6)과 (7)로

부터 구할 수 있다[1-3]. 여기서, k 는 반사계수이다.

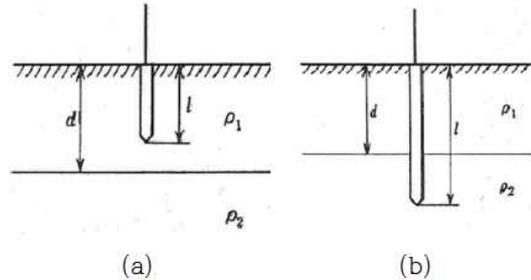


그림 2. 2지층 구조의 봉형 전극
Fig. 2. Vertical Electrode in Two-Layered Earth

- 접지전극이 상층에 있는 (a)의 경우 :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \left\{ \frac{1 + \frac{l}{2\pi d}}{1 - \frac{l}{2\pi d}} \right\} \right] \quad (6)$$

- 접지전극이 하층까지 있는 (b)의 경우 :

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \cdot \frac{1+k}{1-k+2k\frac{d}{l}} \left[\ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \frac{2nd+l}{(2n-2)d+1} \right] \quad (7)$$

4. 사례 연구

다층구조의 대지구조에 매설된 봉형 접지전극의 접지저항 값을 계산하기 위하여 사용되는 계산식은 일반적으로 단일지층 구조의 등가 대지 저항률을 적용하고 있으나, 실제의 대지구조는 다층 대지구조를 하고 있으므로 본 논문에서는 다층 구조의 대지 파라미터를 단일지층 구조로 변환하는 등가 대지 저항률과 변환된 등가 대지 저항률에 의한 접지저항과 등가 2층 구조의 대지모델에 의한 대지 파라미터를 적용한 접지저항의 계산결과를 비교하였다.

4.1 대지 구조 모델

다층 구조를 단일지층 구조로 변환하는 등가 대지

대지구조 모델에 따른 봉형 접지전극의 접지저항값 변화

저항률과 등가 2층 구조의 대지모델에 의한 대지 저항률에 의한 봉형 접지전극의 접지저항 크기를 비교하기 위하여 위층의 대지 저항률 ρ_1 이 $100\Omega \cdot m$, 아래층의 대지 저항률 ρ_2 이 $1000\Omega \cdot m$ 인 모델 I(그림 3)과 위층의 대지 저항률 ρ_1 이 $1000\Omega \cdot m$, 아래층의 대지 저항률 ρ_2 이 $100\Omega \cdot m$ 인 모델 II(그림 4)의 2층 구조 대지모델(위층의 깊이 h 는 모두 1.5m)을 적용하였다.

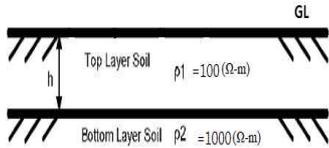


그림 3. 대지구조 모델 I
Fig. 3. Soil Model I

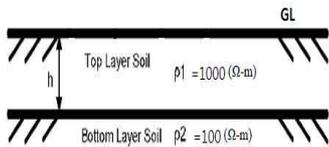


그림 4. 대지구조 모델 II
Fig. 4. Soil Model II

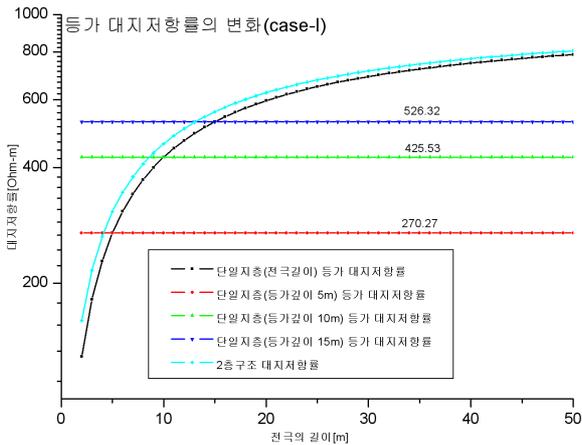


그림 5. 등가 및 평균 대지 저항률의 변화(모델 I)
Fig. 5. Equivalent Soil Resistivity(Model I)

식 (4)를 이용한 등가 깊이 l 에 의한 등가 대지 저항률은 각각의 대지구조 모델에서 등가깊이 $l=5m$ 일 때 270.27과 $136.99\Omega \cdot m$, $l=10m$ 일 때 425.53과 115.61

$\Omega \cdot m$ 및 $l=15m$ 일 때 526.32와 $109.89\Omega \cdot m$ 를 각각 나타냈으며, 그림 5는 대지구조 모델 I에 대한 식 (4)를 이용한 등가 깊이별 등가 대지 저항률과 식 (3)을 이용한 전극 길이별 평균 대지 저항률 및 2층 대지구조의 접지저항으로부터 변환한 등가 대지 저항률을 비교한 것이다.

그림 6은 대지구조 모델 II에 대한 등가 깊이별 등가 대지 저항률과 전극 길이별 평균 대지 저항률 및 2층 대지구조의 접지저항으로부터 변환한 등가 대지 저항률을 비교한 것이다.

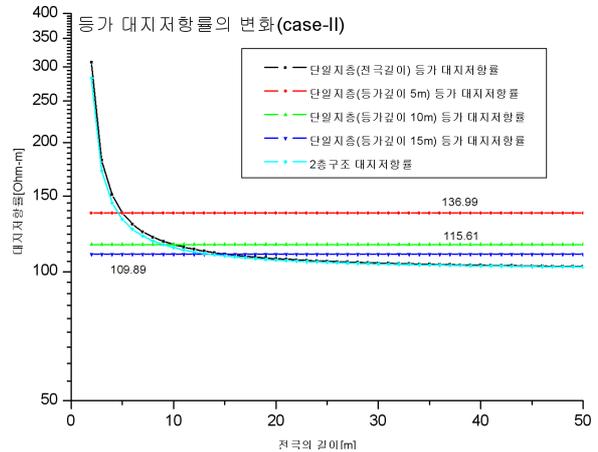


그림 6. 등가 및 평균 대지 저항률의 변화(모델 II)
Fig. 6. Equivalent Soil Resistivity(Model II)

그림 5와 6에서 보는 바와 같이 등가 대지 저항률의 차이가 대지구조 모델과 등가 깊이 혹은 전극 길이의 변화에 따라 차이가 큰 차이를 확인할 수 있다. 그림 3과 4의 대지구조 모델에서 2층 구조의 대지구조에 대한 접지저항으로부터 환산한 등가 대지 저항률의 차이가 가장 작게 나타난 것은 전극 길이를 등가 깊이로 변환한 값을 확인할 수 있다. 따라서 단일 지층구조로 등가 대지 저항률을 환산하는 경우에는 전극의 길이를 등가 깊이로 사용하여야 할 것이다.

4.2 봉형 접지전극의 접지저항 변화

단일 지층구조로 각각의 방법으로 등가화한 대지 저

항률을 적용하여 봉형 접지전극의 접지저항을 계산한 결과와 2층 대지구조에서 계산된 접지저항 결과를 비교하였다.

그림 7은 대지구조 모델 I에 대하여 식 (4)를 이용한 등가 깊이별 등가 대지 저항률과 식 (3)을 이용한 전극 길이별 평균 대지 저항률을 적용한 접지저항과 2층 대지구조에서의 접지저항 계산식을 이용한 결과를 비교한 것으로서, 전극 길이별 등가 대지 저항률에 의한 접지저항 값이 2층 구조에서의 접지저항 계산값과 크기가 비슷한 반면에 다른 등가 대지 저항률에 의한 접지저항 값은 차이가 많이 나타난다.

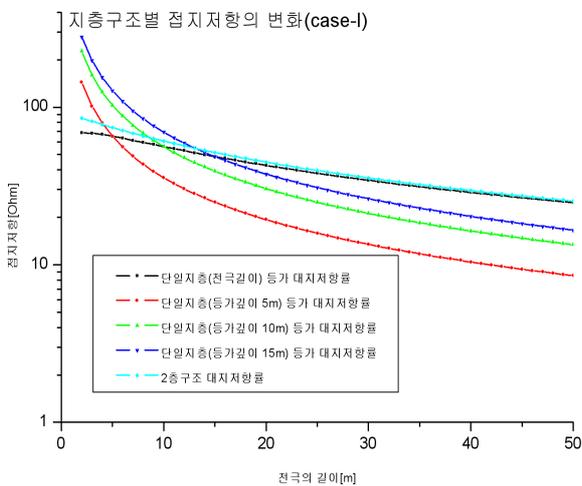


그림 7. 접지저항 크기의 변화(모델 I)
Fig. 7. Variation of Ground Resistance(Model I)

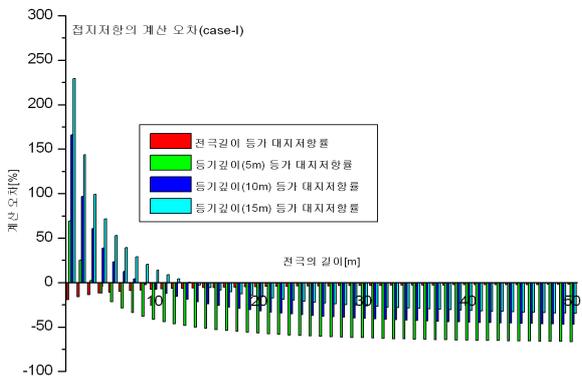


그림 8. 접지저항 크기의 계산 오차(모델 I)
Fig. 8. Error Value of Ground Resistance(Model I)

그림 8은 대지구조 모델 I에서 등가 대지 저항률별 봉형 접지전극의 접지저항 크기의 계산값을 2층 대지구조 모델의 접지저항 계산식 (6)과 (7)을 이용한 계산 결과를 기준으로 오차를 환산한 결과이다. 전극 길이별 등가 대지 저항률을 적용한 접지저항 크기의 오차가 -19.0~25%를, 등가 깊이 5, 10 및 15m의 등가 대지 저항률에 의한 계산 결과는 각각 69.0~65.0%, 166.0~45.0% 및 229.0~32.0%의 오차를 보이고 있어서 전극 길이별 등가 대지 저항률을 적용하는 방법이 가장 오차가 작은 것을 확인할 수 있다.

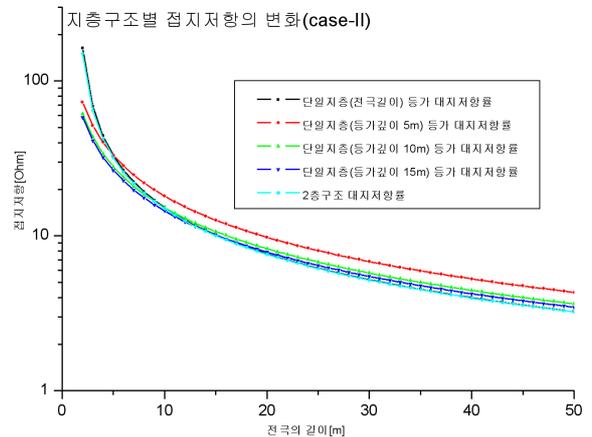


그림 9. 접지저항 크기의 변화(모델 II)
Fig. 9. Variation of Ground Resistance(Model II)

그림 9는 대지구조 모델 II에 대하여 등가 깊이별 등가 대지 저항률과 전극 길이별 평균 대지 저항률을 적용한 접지저항과 2층 대지구조에서의 접지저항 계산식을 이용한 결과를 비교한 것으로서, 전극 길이별 등가 대지 저항률 및 등가 깊이별 등가 대지저항률에 의한 계산값이 2층 구조에서의 접지저항 계산값과 크기가 비슷하게 나타나고 있어서 대지구조 모델의 특성에 따라 접지저항 값은 차이를 확인할 수 있다.

또한 그림 10은 대지구조 모델 II에서 등가 대지 저항률별 봉형 접지전극의 접지저항 크기의 계산값을 2층 대지구조 모델의 접지저항 계산식을 이용한 계산 결과를 기준으로 오차를 환산한 결과이다. 전극 길이별 등가 대지 저항률을 적용한 접지저항 크기의 오차가 8.9~0.0%를, 등가 깊이별 등가 대지 저항률에 의한 계산 결과는 각각 69.0~65.0%, 166.0~45.0% 및 229.0~32.0%의 오차를 보이고 있어서 전극 길이별 등가 대지 저항률을 적용하는 방법이 가장 오차가 작은 것을 확인할 수 있다.

대지구조 모델에 따른 봉형 접지전극의 접지저항값 변화

항률에 의한 계산 결과는 각각 -51.5~32.9%, -59.0~12.4% 및 -61.0~6.7%의 오차를 보이고 있어서 대지구조 모델 II에서도 전극 길이별 등가 대지 저항률을 적용하는 방법이 가장 오차가 작은 것을 확인할 수 있다.

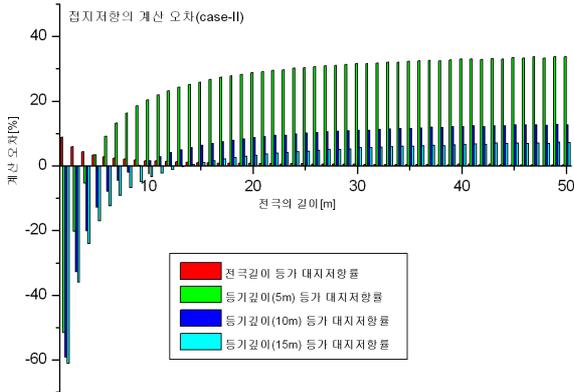


그림 10. 접지저항 크기의 계산 오차(모델 II)
Fig. 10. Error Value of Ground Resistance(Model II)

4.3 검토 결과 및 분석

다층구조의 대지 파라미터를 단일지층 구조의 대지 저항률로 변환하는 경우에 등가 변환하는 계산 방식에 따라 등가 대지 저항률의 크기가 대지구조 모델과 등가 깊이 혹은 전극 길이의 변화에 따라 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 사례 대지구조 모델에서 2층 대지구조에 대한 접지저항으로부터 환산한 등가 대지 저항률의 차이가 가장 작게 나타난 것은 전극 길이를 등가 깊이로 변환한 값을 확인할 수 있다. 따라서 다층구조의 대지 파라미터를 단일 지층구조로 등가 대지 저항률을 환산하는 경우에는 전극의 길이를 등가 깊이로 사용해야 한다.

봉형 접지전극의 접지저항 값에 대하여는 대지구조 모델 I에 대하여 전극 길이별 등가 대지 저항률에 의한 접지저항 값이 2층 구조에서의 접지저항 계산값과 크기가 비슷한 반면에 다른 등가 대지 저항률에 의한 접지저항 값은 차이가 많이 나타났으

며, 대지구조 모델 II에 대하여는 전극 길이별 등가 대지 저항률 및 등가 깊이별 등가 대지 저항률에 의한 계산값이 2층 구조에서의 접지저항 계산값과 크기가 비슷하게 나타나고 있어서 대지구조 모델의 특성에 따라 접지저항 값은 차이가 많음을 확인할 수 있다.

5. 결론

접지전극을 설계하거나 해석하는 과정에서 가장 중요한 입력 자료가 각 지층의 대지 저항률과 깊이로 나타내는 대지 파라미터이다. 현재 국내에서는 일반적으로 대지구조가 다층 구조의 복잡한 대지구조임에도 불구하고, 접지전극의 접지저항 계산을 위한 계산식은 일반적으로 단일 지층구조의 대지 파라미터인 대지 저항률만을 고려한 계산식을 적용하고 있다.

본 논문에서는 접지전극의 설계 혹은 해석을 하는 경우(접지저항의 크기 계산)에 적용하고 있는 단일지층의 등가 대지 저항률에 의한 설계가 잘못 적용되고 있음을 사례연구를 통하여 입증하기 위하여, 먼저 대지구조를 등가 2층 구조로 가정한 경우에 단일지층의 대지 저항률로 표현하기 위한 등가 대지 저항률의 계산식에 대한 변화 특성도 비교·분석하였으며, 봉형의 접지전극에 대한 저항의 크기를 계산하는 계산식을 단일지층에 대한 계산식과 등가 2층 구조에 대한 계산식의 결과를 비교하였다.

봉형 접지전극을 설계하거나 해석하는 과정(접지저항의 크기 계산)에서 다층 대지구조의 대지 파라미터를 단일 지층구조의 등가 대지 저항률을 환산하는 경우에는 전극의 길이를 등가 깊이로 사용해야 하며, 또한 대지구조를 다층(2층)구조에 의한 봉형 접지전극의 접지저항과 단일 지층구조로 변환하는 등가 대지저항률 계산 방법에 따라 접지저항의 계산 값이 차이가 나는 것을 확인할 수 있으므로 봉형 접지전극을 설계하거나 해석하는 과정에서는 실제의 지층 구조와 같은 다층구조의 대지특성을 반영하여야 할 것이다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2011년도 추계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

이 논문은 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

References

- [1] Sunde, E. D., Earth Conduction effects in Transmission Systems, Dover Pub. 1968.
- [2] Tagg, G. F., Earth Resistance, George Newnes Limited, 1964.
- [3] T. Takahasi, Introduction to Grounding System Design, Ohmsha, 1986.
- [4] T. Takahasi, Introduction to Grounding System Technology, Ohmsha, 1984.
- [5] Keon-Bo Shim, Kie-Bong Oh, etc., "The Effects of Soil Model in the Grounding System Design", Proceedings of KIEE Annual Conference 2002, pp. 313-318, 2002. 11. 6.



김원배 (金源培)

1958년 7월 15일생. 1995년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 송원대학교 전기전자공학과 부교수.



서길모 (徐吉摸)

1957년 6월 2일생. 현재 조선대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한화 케미칼(주) 계전팀 전기과 과장.



조금배 (曹錦培)

1954년 1월 18일생. 1995년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998~1999년 미국 Oregon State University 교환 방문교수 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

◇ 저자소개 ◇



심건보 (沈建輔)

1957년 2월 1일생. 1980년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 홍익대학교 산업기술연구소 책임연구원.