

2층 대지모델에서 대지저항률의 비율에 따른 접촉전류에 의한 감전의 위험성 분석

(Analysis of Electric Shock Hazards due to Touch Current According to Soil Resistivity Ratio in Two-layer Earth Model)

이복희* · 김태기 · 조용승 · 최종혁

(Bok-Hee Lee · Tae-Ki Kim · Yong-Seung Cho · Jong-Hyuk Choi)

Abstract

The touch or step voltages which exist in the vicinity of a grounding electrode are closely related to the earth structure and resistivity and the ground current. The grounding design approach is required to determine the grounding electrode location where the hazardous voltages are minimized. In this paper, in order to propose a method of mitigating the electric shock hazards caused by the ground surface potential rise in the vicinity of a counterpoise, the hazards relevant to touch voltage were evaluated as a function of the soil resistivity ratio ρ_2/ρ_1 for several practical values of two-layer earth structures. The touch voltage and current on the ground surface just above the test electrode are calculated with CDEGS program. As a consequence, it was found that burying a grounding electrode in the soil with low resistivity is effective to reduce the electric shock hazards. In the case that the bottom layer soil where a counterpoise is buried has lower resistivity than the upper layer soil, when the upper layer soil resistivity is increased, the surface potential is slightly raised, but the current through the human body is reduced with increasing the upper layer soil resistivity because of the greater contact resistance between the earth surface and the feet. The electric shock hazard in the vicinity of grounding electrodes is closely related to soil structure and resistivity and are reduced with increasing the ration of the upper layer resistivity to the bottom layer resistivity in two-layer soil.

Key Words : Soil Resistivity, Touch Voltage, Two-Layer Earth Model, Counterpoise,
Ground Surface Potential Rise

1. 서 론

전력계통이나 기기의 지락사고와 뇌격의 침입에 의해서 접지전극에 전류가 흐르게 되면 접지전극 주변의 대지표면전위는 상승하게 되며 이에 따른 접촉전

* 주저자 : 인하대학교 IT공과대학 전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2011년 3월 22일
1차심사 : 2011년 3월 25일
심사완료 : 2011년 4월 12일

압과 보폭전압이 나타나게 된다. 접촉전압은 접지를 한 시설물 또는 구조물에 고장전류가 흘렀을 때, 접촉한 구조물의 전위와 사람이 서 있는 대지표면의 전위 차로 정의되며 보폭전압은 사람이 서 있는 지표면에서 사람의 양발사이에 인가되는 전압으로 정의된다 [1-3]. 피뢰설비에 관한 KS C IEC 62305 표준에서도 피뢰설비용 접지전극에 뇌격전류가 흐르게 되면 대지 표면전위가 상승하여 감전의 위험이 생기므로 접지전극 주변에서의 접촉전압과 보폭전압에 대하여 안전성을 강화하였다[4]. 접지전극으로 고장전류나 뇌격전류가 유입되었을 때 접지전극 주변의 대지전위를 평가하는 것은 매우 중요하며 접지전극이 묻힌 대지구조 및 주변 환경을 고려한 평가가 이루어져야 한다[5]. 이러한 평가방법으로는 접지전극 주변의 위험전압에 관련된 안전성 평가방법은 IEEE Std. 80-2000에 제시되어 있으며, 대지구조에 따른 위험성 평가 및 위험성을 낮추기 위한 기법도 일부 제시하고 있다[6-8].

근본적으로 접지저항으로 감전에 대한 인체의 안전을 보장할 수 없으므로 접지전극 주변에서 전위상승에 대한 인체의 안전성을 평가하여야 한다. 접지전극 주변의 전위상승은 대지저항률과 접지전류에 직접 비례하므로 접촉전압과 보폭전압에 의한 위험성을 대지구조와 저항률 및 접지전류에 관련하여 평가하여야 한다. 본 논문에서는 대지구조와 저항률에 관련하여 접지전극의 매설위치에 따른 접지시스템의 안전성을 인체에 위험을 주는 직접적인 요인인 접촉전류를 기반으로 평가하는 기법을 제안하기 위하여 2층 대지구조에서 층별 대지저항률의 비율에 따른 감전의 위험성을 평가하였으며, 위험성을 낮출 수 있는 조건을 제시하였다.

2. 대지구조를 고려한 접지전극 주변에서 위험성 평가

접지전극에 고장전류가 흐르게 되면 접지전극 주변의 대지표면에는 위험전압이 발생하며 이로 인해 인체에 전류가 흐르게 되어 감전의 위험을 야기시킬 수 있다. 접지된 금속체에 대한 접촉전압의 개념도와 인

체의 저항 및 대지표면과의 접촉저항을 고려한 등가회로는 그림 1과 같다[3].

고장점에 사람이 접촉된 경우 손과 양발을 경유하여 인체에 흐르는 전류 I_b 는 다음의 식 (1) 표현된다[3,9].

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \tag{1}$$

여기서

V_{Th} 는 접촉전압이고, R_B 는 인체의 저항이며 IEEE 규정에서는 1,000[Ω]으로 산정한다. 또한 Z_{Th} 는 테프난의 등가저항이다.

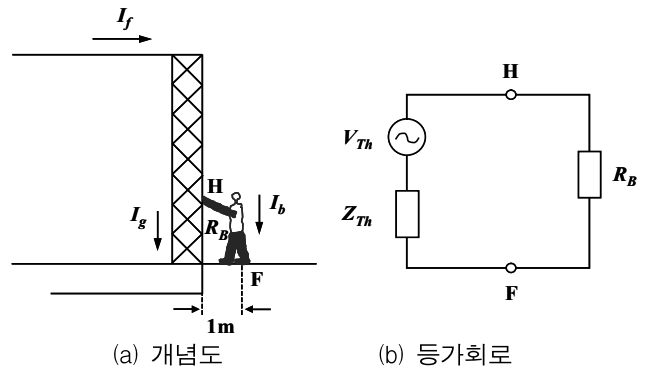


그림 1. 접촉전압의 개념도 및 등가회로
Fig. 1. Conceptual diagram of touch voltage and equivalent circuit

대지와와의 접촉임피던스인 테프난의 등가저항 Z_{Th} 는

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2} \tag{2}$$

이며, R_f 는 발의 접지저항으로

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \tag{3}$$

이다. 여기서 ρ 는 대지저항률이고, b 는 발을 나타내는 금속 디스크로서 반경 0.08[m]인 원으로 산정한다 [3,10].

IEEE Std. 80-2000에 제시된 지표면층을 높은 대지저항률을 처리할 경우 식 (1)에서 분모인 접촉등가저

항이 커지게 되나, 분자인 위험전압도 역시 평균 대지 저항률의 증가에 의해 높아지게 된다[1]. 때문에 최대 허용위험전압만으로 평가한 경우 평균대지저항률 변화에 따른 접촉전압과 보폭전압의 증가만을 고려하게 되며 인체에 흐르는 전류의 변동은 충분히 반영되지 않게 된다. 따라서 본 논문에서는 위험전압의 변동은 물론 식 (1)의 인체에 흐르는 전류의 비율을 반영하여 대지구조에 따른 위험성을 평가하는 방법과 위험성을 줄일 수 있는 조건을 시뮬레이션을 통하여 산출한 결과를 제시하였다.

3. 분석대상 모델 및 방법

2층 대지구조에서 대지저항률과 매설지선이 매설 위치에 따른 대지표면에서의 접촉전압에 의한 감전의 위험성에 대하여 중점적으로 평가·분석하였다. 본 연구에서 분석대상으로 한 2층 대지구조와 접지전극의 매설위치의 개략도를 그림 2에 나타내었으며, 상부층의 두께는 1[m], 하부층의 두께는 무한대인 것으로 가정하였다.

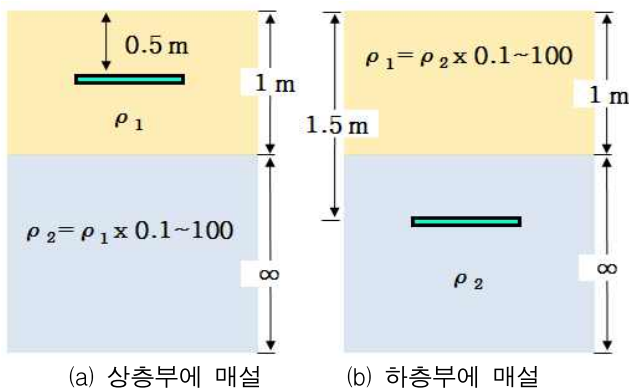


그림 2. 2층 대지모델과 매설지선의 매설위치
Fig. 2. Two-layer soil model and the buried location of counterpoise

그림 2 (a)는 단면적 25[mm²], 길이 20[m]인 나동선의 매설지선을 대지표면에서 0.5[m]의 깊이인 2층 대지구조의 상층부에 설치하였고 상층부의 대지저항률 ρ_1 을 보통 토양이 가질 수 있는 저항률 100, 200, 500,

1000[$\Omega \cdot m$]로 고정하고, 상층부의 대지저항률에 따라 하층부와 상층부의 대지저항률의 비율 $\rho_1 : \rho_2 = 1 : 0.1 \sim 100$ 배인 조건을 분석대상으로 하였다. 또한 그림 2 (b)는 길이 20[m] 매설지선을 지표면에서 1.5[m] 깊이인 2층 대지구조의 하층부에 설치하였고 하층부의 대지저항률 ρ_2 를 일반적인 토양의 저항률 100, 200, 500, 1000[$\Omega \cdot m$]로 고정하고, 하층부의 대지저항률에 따라 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율 $\rho_1 : \rho_2 = 1 : 0.1 \sim 100$ 배인 조건을 상정하였다. 고장전류가 접지전극에 인가될 경우를 모의하기 위해 매설지선의 끝단에 1[A]의 상용주파수전류를 인가하는 조건에 대하여 모의하였다.

CDEGS프로그램을 이용하여 2층 대지구조에서 대지표면전위를 구하고 이를 기반으로 위험전압(V_{th})을 산출하였다. 식 (1)을 이용한 2층 대지구조에서 대지저항률에 따라 인체에 흐르는 전류를 기반으로 위험성을 저감시킬 수 있는 접지설계 및 시공방법에 대하여 검토하였다.

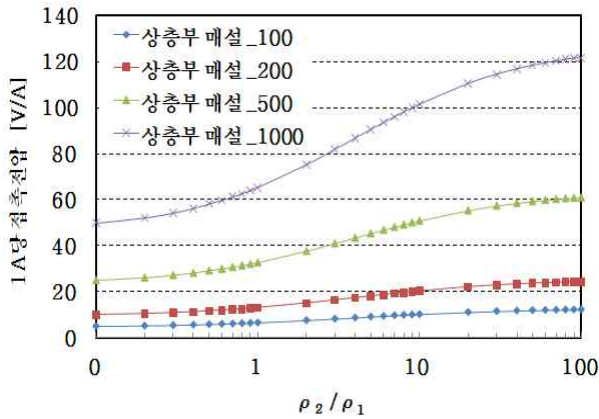
4. 결과 및 고찰

4.1 접지전극을 상층부에 매설한 경우

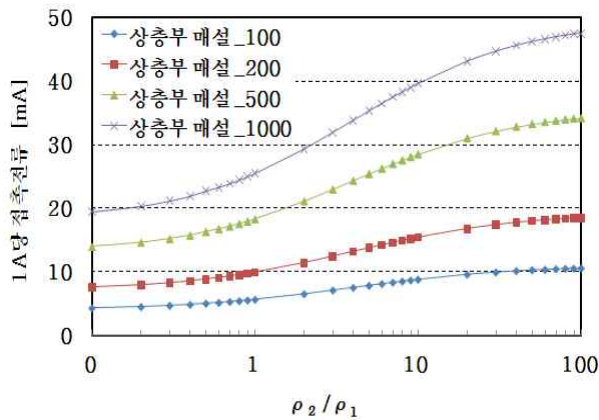
접지전극이 매설된 장소의 대지표면에서 접촉전압에 의한 감전의 위험성을 분석함에 있어 단순히 최대 허용전압을 고려하는 것보다는 위험전압과 인체의 접촉저항을 동시에 반영하여 인체에 흐르는 전류로 감전의 위험성을 분석하는 것이 합리적이다. 접촉전압에 의한 감전의 위험이 보폭전압에 의한 것보다 훨씬 크므로 접지설계에서도 접촉전압에 의한 요건을 충족하면 보폭전압에 대한 평가는 하지 않으므로[11] 본 논문에서는 접촉전압에 의한 위험성만을 분석대상으로 하였다.

그림 2 (a)의 모의조건과 같이 매설지선이 2층 대지구조의 상층부에 매설된 경우, 접지전류 1 A 당 대지표면전위로부터 산출한 하층부와 상층부의 대지저항률의 비율에 따른 접촉전압과 식 (1)을 이용하여 산출한 접촉전압에 의한 사람의 인체에 흐

르는 전류(접촉전류)에 대한 결과를 그림 3에 나타내었다.



(a) 접촉전압



(b) 접촉전압에 의해 인체에 흐르는 전류(접촉전류)

그림 3. 접지전극을 상층 토양에 매설한 경우, 하층부와 상층부의 대지저항률의 비율에 따른 접촉전압과 접촉전류

Fig. 3. Touch voltage and current according to the lower and upper soil resistivity ratio when the counterpoise was buried in the upper layer soil

상층부의 대지저항률이 증가함에 따라 접촉전압과 그에 따른 접촉전류는 증가하였으며, 하층부와 상층부의 대지저항률의 비율이 증가함에 따라 접촉전압과 그에 따른 접촉전류도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 접촉전압의 경우 대지표면전위와 접지전극의 전위 차이기 때문에 평균 대지저항률이 커질수록 대지표면

전위와 접지전극의 전위가 모두 커지나 접지전극의 전위가 상대적으로 더욱 크게 증가하기 때문에 표면층의 대지저항률이 큰 경우 더욱 높게 나타나게 된다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 대지저항률이 증가하면 접촉전압과 테브난 등가저항 Z_{Tn} 이 동시에 증가하지만 접촉전압이 테브난 등가저항 Z_{Tn} 보다 상대적으로 더 크게 증가하기 때문에 1 A당 접촉전류도 하층부와 상층부의 대지저항률의 비율이 증가함에 따라 증가하게 된다.

그림 3 (b)에서 산출된 접촉전류를 다음의 식 (2)에 의하여 단일 대지구조에 비하여 2층 대지구도에서 접촉전류의 변동특성을 평가한 결과를 그림 4에 나타내었다. 즉 하층부의 대지저항률(ρ_2)과 상층부의 대지저항률(ρ_1)의 비율에 따라 변동하는 비율을 나타낸다.

접촉전류의 비율

$$= \frac{\rho_2/\rho_1 \text{의 비율에 따른 접촉전류}}{\rho_2 = \rho_1 \text{인 경우의 접촉전류}} \quad (4)$$

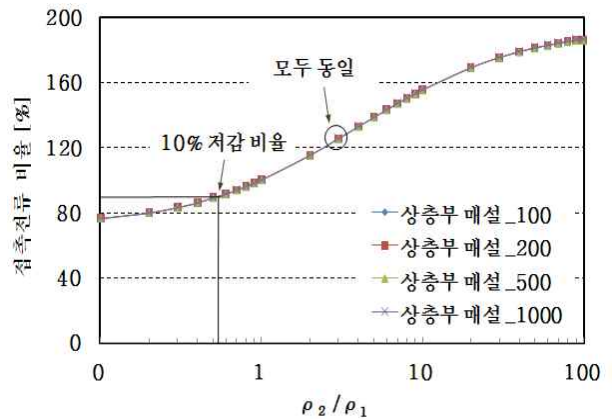


그림 4. 접지전극을 상층 토양에 매설한 경우, 하층부와 상층부의 대지저항률의 비율에 따른 단일 대지구조의 접촉전류에 대한 2층 대지모델의 접촉전류의 비율

Fig. 4. Ratio of the touch current in two-layer soil to the current in a homogeneous soil according to the lower and upper soil resistivity ratio when the counterpoise was buried in the upper layer soil

하층부와 상층부의 대지저항률이 같은(단일층) 경

우의 접촉전류를 기준으로 한 하층부와 상층부의 대지저항률의 비율에 따라 접촉전류가 증가 또는 감소하는 비율은 접지전극이 매설된 상층부의 대지저항률이 일정하므로 하층부의 대지저항률의 변화에 따라 변화한다. 모의해석결과, 하층부의 대지저항률이 상층부의 대지저항률 보다 작은 경우 하층부와 상층부의 대지저항률이 같은 경우의 접촉전류보다 감소함을 알 수 있으며, 상층부의 모든 저항률에 대하여 2층 대지구조의 대지저항률의 비율에 따른 접촉전류의 변동특성은 동일하여 모두 겹치는 그래프로 표시되어 있다.

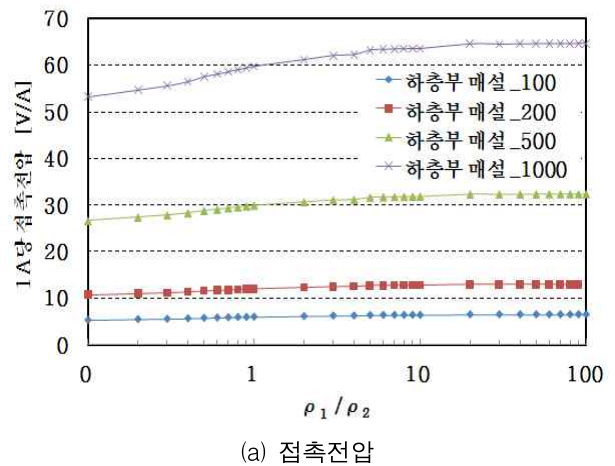
4.2 접지전극을 하층부에 매설한 경우

그림 2 (b)의 모의조건과 같이 매설지선이 2층 대지모델의 하층부에 매설된 경우 접지전류 1 A당 대지표면전위로부터 산출한 하층부와 상층부의 대지저항률의 비율에 따른 접촉전압과 식 (1)을 이용하여 산출한 접촉전압에 의한 사람의 인체에 흐르는 전류(접촉전류)에 대한 해석결과를 그림 5에 나타내었다.

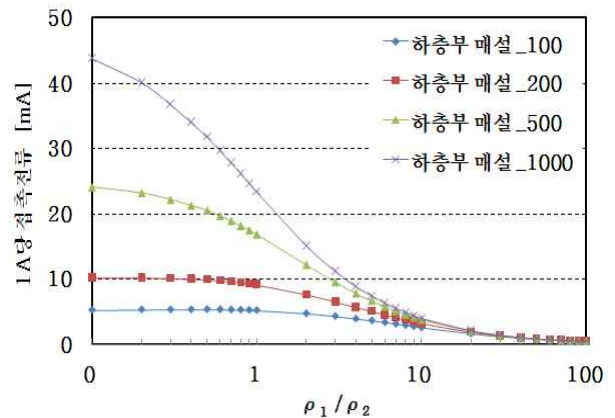
하층부의 대지저항률이 증가함에 따라 접촉전압은 크게 증가하였으며, 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율이 증가함에 따라 접촉전압은 완만하게 증가하는 양상을 나타내었다. 이는 접지전극을 하층부에 매설한 경우의 접촉전압은 접지전극전위와 대지표면전위의 전위차이며 하층부의 두께가 무한대이기 때문에 상층부의 대지저항률이 크게 변하더라도 평균 대지저항률이 변화가 완만하다. 접지전극의 전위와 대지표면전위의 크기가 완만하게 변하기 때문에 접촉전압은 그림 5 (a)처럼 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율이 크게 증가하여도 접촉전압은 아주 완만하게 증가한다.

그림 5 (b)의 접촉전류의 경우에는 하층부의 대지저항률이 클수록 접촉전류는 크게 나타났으며, 접지전극이 매설된 하층부의 대지저항률을 고정하고 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율이 커짐에 따라 접촉전류는 감소하여 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율이 20이상에서 하층부의 대지저항률의 값에 상관

없이 거의 일정한 값으로 수렴하였다. 이러한 원인은 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율이 커짐에 따라 사람의 두 발과 대지사이의 테브난 등가저항 Z_{Th} 이 접촉전압이 커진 영향에 비해 더 크게 작용하기 때문이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 대지저항률이 증가하면 접촉전압과 테브난 등가저항 Z_{Th} 가 동시에 증가하지만 테브난 등가저항 Z_{Th} 가 접촉전압보다 상대적으로 크게 증가하기 때문에 접지전류 1 A당 접촉전류는



(a) 접촉전압



(b) 접촉전압에 의해 인체에 흐르는 전류(접촉전류)

그림 5. 접지전극을 하층 토양에 매설한 경우, 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율에 따른 접촉전압과 접촉전류

Fig. 5. Touch voltage and current according to the upper and lower soil resistivity ratio when the counterpoise was buried in the lower layer soil

상층부와 하층부의 대지저항률의 비율이 증가함에 따라 감소하게 된다. 그림 5 (b)에 나타난 접촉전류율식 (4)에 의하여 산출한 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율에 따른 접촉전류의 변동률을 그림 6에 나타내었다.

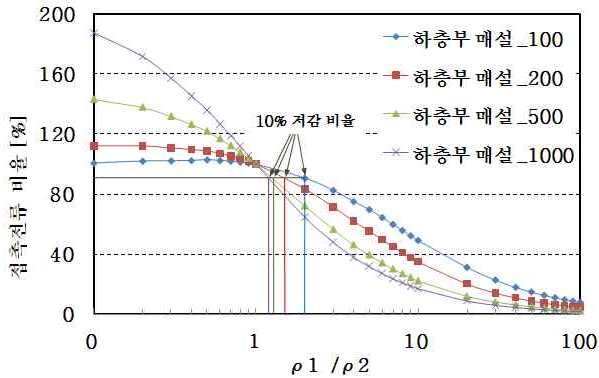


그림 6. 접지전극을 하층 토양에 매설한 경우, 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율에 따른 단일 대지구조의 접촉전류에 대한 2층 대지모델의 접촉전류의 비율

Fig. 6. Ratio of the touch current in a homogeneous soil model to the current in a homogeneous soil according to the upper and lower soil resistivity ratio when the counterpoise was buried in the lower layer soil

상층부와 하층부의 대지저항률이 같은 경우(단일층)의 접촉전류를 기준으로 한 상층부와 하층부의 대지저항률의 비율에 따른 접촉전류의 비율은 접지전극이 매설된 하층부의 대지저항률이 일정하기 때문에 상층부의 대지저항률의 변화에 따라 변화한다. 시뮬레이션한 결과를 종합해 보면 하층부 토양의 저항률이 낮을수록 접촉전류가 낮고 변동량도 적어 안전성이 향상되는 것으로 볼 수 있다. 또한 상층부의 대지저항률이 하층부의 대지저항률의 2배 이상이면 접촉전류는 상층부와 하층부의 대지저항률이 같은 경우(단일층)의 접촉전류보다 10[%] 이상 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 2층 대지모델에 매설지선을 시설한 경우

대지저항률 비율에 따른 접촉전압에 의한 감전의 위험성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2층 대지모델에 매설지선이 상층부에 매설되었을 때 접촉전류는 하층부의 대지저항률이 상층부의 1/2이하이면 하층부와 상층부의 대지저항률이 같은 단일층의 경우보다 10[%] 이상 감소함을 알 수 있었다.
- (2) 2층 대지모델에서 전극이 하층부에 매설되었을 때 상층부의 대지저항률이 하층부의 2배 이상이면 접촉전압에 의해 인체에 흐르는 전류는 단일층의 접촉전류보다 10[%] 이상 감소되었을 알 수 있었다.
- (3) 2층 대지모델에서 하층부의 대지저항률이 상층부 보다 낮을수록 위험성이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 접지전극 주변의 위험성은 대지구조와 밀접한 상관성을 가지므로 접지시스템을 설계할 때 인체에 흐르는 전류의 평가를 통한 위험성을 검토하여 접지전극이 매설되는 위치를 선정하는 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 Board, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedence, and Earth Surface Potentials of a Ground System", IEEE Std 81, pp.24-26. 1983.
- [3] IEEE. Standard Board, "IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding". IEEE Std 80, pp.16-29. 2000.
- [4] KS C IEC 62305-3, "피뢰시스템 - 제3부 : 구조물의 물리적 손상 및 인명위험", pp.249-268, 2007.
- [5] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술", 도서출판 의제, pp.27-64, 1999.
- [6] F. P. Dawalibi and D. Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in two-layer earth structure - Part I, Analytical study", IEEE Trans. PAS, Vol.94, No.2, pp.252-261, 1975.
- [7] Kostic, M.B. "Parametric analysis of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil", IEEE Trans. Power

- Del., Vol.9, No.3, pp.1406-1411, 1994.
- [8] Kosztaluk, R., Mukhedkar, R. Gervais, Y., "Field Measurements of Touch And Step Voltages", IEEE Trans. on PAS, Vol 103, No. 11, pp.3286-3294, 1984.
- [9] Chow, Y.L., Salama, M.M.A., Djogo, G., "Thevenin source resistances of the touch, transferred and step voltages of a grounding system", IEE PGTD, Vo. 146, No. 2, pp.107-114, 1999.
- [10] IEEE. Standard Board, "IEEE Guide for Measurement of Impedence and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding System", IEEE Std 81-2, pp.51-56. 1991.
- [11] European Committee for Electrotechnical Standardization, "Power installations exceeding 1 kV a.c.", HD 637 S1, pp.75-85, 1999.



김태기(金泰己)

1970년 7월 12일생. 2008년 8월 인하대 공학대학원 정보전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (02) 3393-7671

Fax : (02) 3393-7689

E-mail : ktk@electricity.or.kr



조용승(趙鏞承)

1986년 7월 9일생. 2010년 2월 한국교육개발원 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : dreams86@nate.com

◇ 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. 당 학회 회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



최중혁(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