

인체전류를 기반으로 하는 감전의 위험성 평가방법

(A Method for Evaluating Electric Shock Hazards Based on Human Body Current)

이복희* · 유양우 · 최종혁

(Bok-Hee Lee · Yang-Woo Yoo · Jong-Hyuk Choi)

Abstract

In order to mitigate the possible hazards from electric shock due to the touch and step voltages, the high resistivity material such as gravel is often spread on the earth's surface in substations. When the grounding electrode is installed in two-layer soil structures, the surface layer soil resistivity is different with the resistivity of the soil contacted with the grounding electrodes. The design of large-sized grounding systems is fundamentally based on assuring safety from dangerous voltages within a grounding grid area. The performance of the grounding system is evaluated by tolerable touch and step voltages. Since the floor surface conditions near equipment to be grounded are changed after a grounding system has been constructed, it may be difficult to determine the tolerable touch and step voltage criteria. In this paper, to propose an accurate and convenient method for evaluating the protective performance of grounding systems, the propriety of the method for evaluating the current flowing through the human body around on a counterpoise buried in two-layer soils is presented. As a result, it is reasonable that the grounding system performance would be evaluated by measuring and analyzing the current flowing through the human body based on dangerous voltages such as the touch or step voltages and the contact resistance between the ground surface and feet.

Key Words : Electric Shock Hazard, Ground Surface Potential Rise, Human Body Current, Touch Voltage, Step Voltage, Two-Layer Soil Structure

1. 서 론

접지를 하는 궁극적인 목적은 인체의 감전을 방지하여 전기·전자 기기의 사용에 대한 안전성을 확보하는 것이다. 감전이란 외부에서 인가된 전원에 의해서 인체로 전류가 통과되는 것을 말하며, 누전 또는 절연 파괴 등의 사고로 전로의 충전부가 기기의 철대 또는 외함 등에 접촉되었을 때 대지전위를 낮추어 사용자 혹은 작업자의 인체를 통하여 전류가 흐르지 않도록

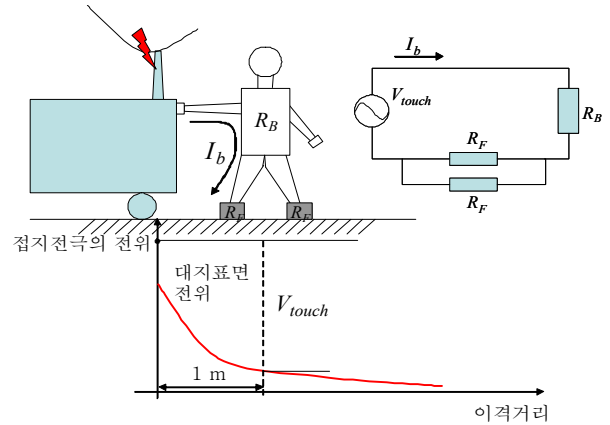
* 주저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2011년 3월 31일
1차심사 : 2011년 4월 5일
심사완료 : 2011년 4월 25일

하여 감전을 방지하는 것이 보안용 접지의 기본 역할이다[1-3]. 감전으로 인해 나타날 수 있는 인체의 위험성에 대한 접지의 보호성능은 주로 접촉전압 및 보폭전압으로 평가하며, 여러 문헌에 접촉전압 및 보폭전압에 대한 평가방법 및 측정결과들이 제시되어 있다[4-9]. 또한 IEEE Std. 80에서는 인체에 흐를 수 있는 허용전류의 계산식과 접촉전압 및 보폭전압을 평가하는 방법 등을 제시하고 있으며, 추가적으로 변전소와 같은 접지시스템에서 위험성을 낮추기 위해 자갈과 같이 저항률이 매우 높은 물질로 대지의 표면을 처리하는 방법 등 감전의 위험성을 저감시키는 대책을 제시하고 있다[10].

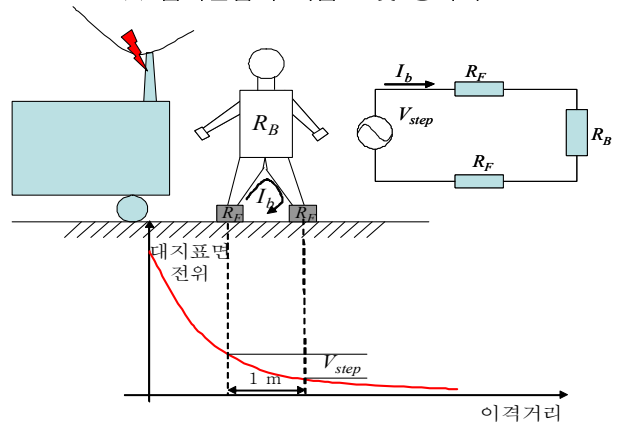
소규모 접지설비의 시설조건이나 전기설비 주변의 바닥면 조건을 모르는 경우 접촉전압 또는 보폭전압만을 측정하여 검사하는 경우 허용기준을 산정할 수 없으므로 적합성 여부의 판정이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 접지시스템의 감전에 대한 성능을 정확하고 편리하게 평가하는 방법을 검토할 목적으로 IEEE Std. 80에 제시되어 있는 접지의 안전성 평가에 대한 기법을 이용하여 2층 대지구조의 토양에서 대지표면전위의 변화와 인체의 발의 접촉저항의 변화를 고려하는 인체전류 기반의 감전에 대한 위험성을 평가하였다. 2층 대지구조에 설치된 매설지선을 모의하여 대지저항률에 따른 접촉전압, 보폭전압, 접촉전류, 보폭전류 등을 평가하고 검토하였다.

2. 관련이론

접지전극에 고장전류가 흐르게 되면 접지전극의 주변에는 위험전압이 발생하게 된다. 위험전압으로 사람이 고장전류가 흐르는 접지된 충전부를 접촉할 때 접지전극의 전위상승과 사람이 서 있는 대지표면의 전위차를 나타내는 접촉전압과 사람이 대지와 접촉하고 있을 때 양발 사이(1[m])의 전위차를 나타내는 보폭전압 등이 있다[3,10-11]. 접촉전압과 보폭전압의 개념도와 인체의 저항 및 대지의 접촉저항을 고려한 등가회로를 그림 1에 나타내었다.



(a) 접촉전압의 개념도 및 등가회로



(b) 보폭전압의 개념도 및 등가회로

그림 1. 접촉전압과 보폭전압에 대한 개념도 및 등가회로
Fig. 1. Conceptual diagram and equivalent circuit of the touch and step voltages

IEEE Std. 80-2000의 규정에서는 그림 1의 등가회로에서 고장전류가 흐를 때 인체에 흐를 수 있는 전류 I_b 는 다음과 같다[10].

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (1)$$

여기서

V_{Th} 는 위험전압(접촉전압 또는 보폭전압)

R_B 는 인체의 저항 (IEEE 규정에서는 1,000[Ω]으로 산정)

Z_{Th} 는 테브난의 등가저항이다.

접촉전압을 산정할 때 등가저항 Z_{Th} 는

인체전류를 기반으로 하는 감전의 위험성 평가방법

$$Z_{Th} = \frac{R_f}{2} \quad (2)$$

이며, 보폭전압을 산정할 때 등가저항 Z_{Th} 는

$$Z_{Th} = 2R_f \quad (3)$$

이다. 여기서 R_f 는 발의 접촉저항으로

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (4)$$

이다.

여기서 ρ 는 대지저항률을 나타내며,

b 는 발을 나타내는 금속 디스크로서 반경 0.08[m]로 산정한다[11].

IEEE Std. 80 규정에서는 위에 제안된 수식을 이용하여 허용접촉전압 및 허용보폭전압을 다음과 같이 규정하고 있으며, 위험성 정도를 허용위험전압으로 평가하고 있다.

$$\text{허용접촉전압} : E_{touch} = I_B(R_B + 1.5\rho) \quad (5)$$

$$\text{허용보폭전압} : E_{step} = I_B(R_B + 6.0\rho) \quad (6)$$

여기서 I_B 는 인체에 흐를 수 있는 허용전류를 나타내며, 결국 허용위험전압은 인체에 흐를 수 있는 전류와 인체가 나타내는 저항의 곱으로 표현된다.

2층 대지구조의 경우 식 (4)에 나타낸 발의 접촉저항에 대한 식을 식 (8)에서 주어지는 대지 표면층의 감쇠 요소를 대입하여 식 (7)과 같이 바꾸어 계산식에 대입하여 허용접촉전압 및 허용보폭전압을 계산할 수 있다.

$$R_f = \left[\frac{\rho_s}{4b} \right] C_s \quad (7)$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (8)$$

여기서

C_s 는 대지 표면층의 감쇠계수

ρ_s 는 대지 표면층의 저항률

h_s 는 대지 표면층의 두께이다.

위에 주어진 식을 이용하여 2층 대지구조에서도 허용위험전압을 구할 수 있으며, IEEE Std. 80 및 여러 문헌에서는 감전의 위험성을 낮추기 위해 표면층의 저항률을 매우 크게 하여 허용위험전압을 높이는 방법을 제시하고 있다[10].

인체에 흐를 수 있는 허용전류는 인체의 체중과 통전시간에 관련되며, 체중이 50[kg]인 경우 통전시간 0.03~3.0[초] 범위에서[10]

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} [A] \quad (9)$$

이며, $t_s = 1$ [초]일 때 116[mA], $t_s = 0.1$ [초]일 때 367[mA]이다. 또한 체중이 70[kg]인 경우

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} [A] \quad (10)$$

이다. 따라서 허용접촉전압과 허용보폭전압은 인체의 전기저항이 1,000[Ω]일 때 다음 식과 같다.

체중이 50[kg]인 경우

허용접촉전압 :

$$E_{touch} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (11)$$

허용보폭전압 :

$$E_{step} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (12)$$

체중이 70[kg]인 경우

허용접촉전압 :

$$E_{touch} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (13)$$

허용보폭전압 :

$$E_{step} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (14)$$

본 논문에서는 2층 대지구조에서 위험성 저감을 평가하는 기준을 인체에 흐를 수 있는 전류와 상관없이 위험전압이 발생하였을 때 인체에 흐르는 전류로 평가하였다. 즉 식 (1)을 이용하여 단일 대지구조에 대한 2층 대지구조에서의 위험성을 비교·평가하였다. 이러한 경우 표면층을 높은 저항률의 토양으로 처리하는 경우 식 (1)에서 분모인 인체모델의 저항이 매우 커지게 되나, 분자인 위험전압도 역시 평균 대지저항률의 증가에 의해 높아지게 된다. 허용위험전압만을 평가한 경우 평균대지저항률 변화에 따른 접촉전압과 보폭전압의 증가로 인한 인체에 흐르는 전류의 변화는 고려되지 않게 된다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)의 인체에 흐르는 전류를 비교하여 대지구조에 따른 위험성을 보다 정확하고 편리하게 평가하는 방법에 대하여 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

2층 대지구조에서 대지저항률에 따른 감전에 대한 위험성 분석을 위해서 그림 2와 같이 대지저항률이 $100[\Omega \cdot m]$ 으로 균질의 대지에 1.5[m] 깊이에 길이 20[m]인 매설지선(25[mm²])을 시설한 것을 가정하였으며, 깊이 1[m]까지의 상층부의 대지저항률을 하층부의 0.1배와 10배로 구분하여 균질의 대지에서의 위험성과 비교·분석하였다.

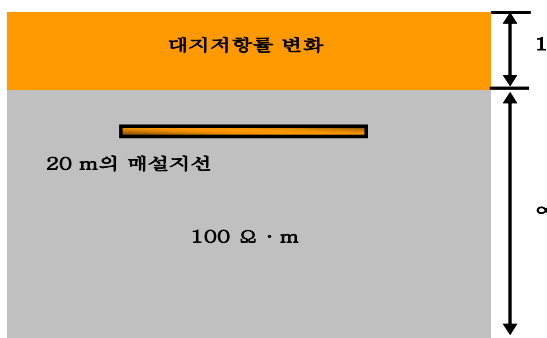


그림 2. 대지구조에 따른 감전의 위험성 평가를 위한 모의조건

Fig. 2. Modelling condition for evaluating the electric shock hazards relevant to the soil structure

그림 2의 모의조건에 대하여 CDEGS 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한 결과로서 접지전극에 1[A]의 전류가 인가되었을 때 상층과 하층의 대지저항의 비율별 접지전극으로부터의 이격거리에 따른 대지표면전위를 그림 3에 나타내었다.

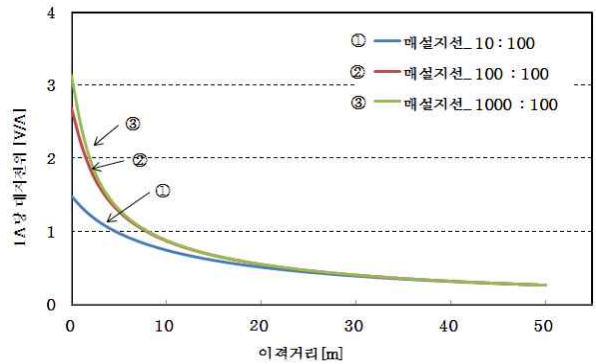


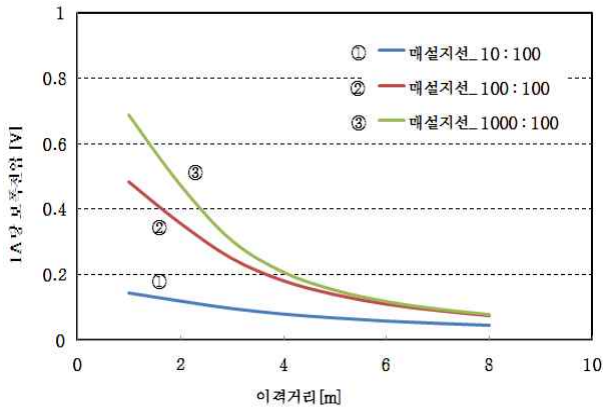
그림 3. 접지전극으로부터 이격거리에 따른 접지전류 1[A]당 대지전위

Fig. 3. Ground potential rise per the ground current of 1[A] as a function of the distance from the grounding electrode

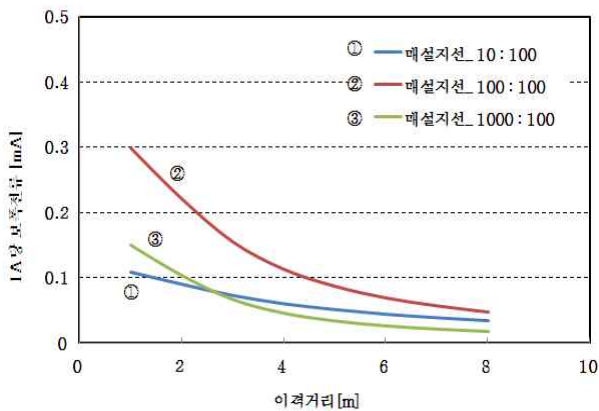
접지전류 1[A]당의 대지표면전위는 상층부의 대지저항률이 클수록 높게 나타났으며, 이는 상층부의 대지저항률이 클수록 평균 대지저항률이 커지기 때문에 1[A]의 인가전류에 대해 접지전극의 전위가 상승하므로 대지표면전위도 높게 나타나는 것을 의미한다. 그림 3에 나타난 이격거리에 따른 접지전류 1[A]당 대지전위를 기초로 산출한 이격거리별 보폭전압 및 식 (1)을 이용하여 계산한 보폭전압에 의해 인체에 흐르는 전류(보폭전류)에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4 (a)의 보폭전압의 경우 대지표면전위와 마찬가지로 표면층의 대지저항률이 클수록 높게 나타났다. IEEE Std. 80에서 위험성을 낮추기 위해 대지표면에 자갈과 같이 대지저항률이 큰 물질로 표면처리를 하는 방법을 단순히 대지표면전위, 접촉전압 및 보폭전압으로 감전의 위험성을 검사하는 경우 접지시설조건을 모르거나 표면층 등의 저항률이 변동하면 잘못된 결과를 초래할 수도 있다. 허용접촉전압 및 허용보폭전압만을 측정하여 검사하는 경우 접지시스템의 시공

이 완료된 상태에서 설계시의 조건과 변동될 수도 있으므로 접촉전류 및 보폭전류를 측정하여 검사하는 것이 보다 정확하고 편리할 수도 있다.



(a) 보폭전압



(b) 보폭전압에 의해 인체에 흐르는 전류(보폭전류)

그림 4. 대지구조별 접지전극으로부터의 이격거리에 따른 보폭전압 및 보폭전류

Fig. 4. Step voltage and current as a function of the distance from the grounding electrode by soil structures

반면 식 (1)을 이용하여 산출한 인체에 흐르는 보폭전류의 경우 표면의 대지저항률이 10배 큰 경우가 가장 작게 나타났으며, 표면의 대지저항률이 1/10배로 작은 경우 역시 단일 층에 비해 작게 나타났다. 이러한 원인은 표면층의 대지저항률이 큰 경우 사람의 발과 대지표면 사이의 접촉저항이 커져 인체에 흐르는 전류가 작아지는 효과가 보폭전압이 높아진 영향에

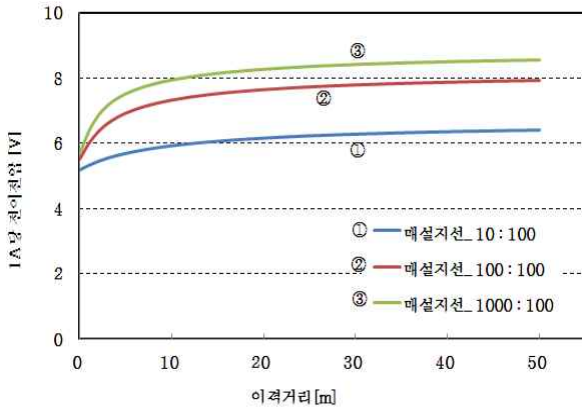
비해 크게 나타났기 때문이다. 이에 반해 대지표면의 저항률이 1/10배로 작은 경우 접지전극의 전위 및 대지표면 전위가 크게 낮아져 보폭전압 자체가 낮아졌으며, 보폭전압의 저감된 영향이 사람 발의 접촉저항이 작아지는 영향에 비해 크게 작용하기 때문이라 판단된다.

보폭전압에 의한 위험성과 마찬가지로 접촉전압에 의한 위험성으로 볼 수 있는 접지전극으로부터의 이격거리에 따른 이행전압을 분석하였다. 이행전압은 접지전극의 전위와 대지표면과의 전위차를 나타내며 고장전류가 흐르는 충전부를 사람이 접촉하였을 때 사람에게 인가되는 전압을 나타낸다. 그리고 1[m]에서의 이행전압은 특별히 접촉전압을 의미하게 된다.

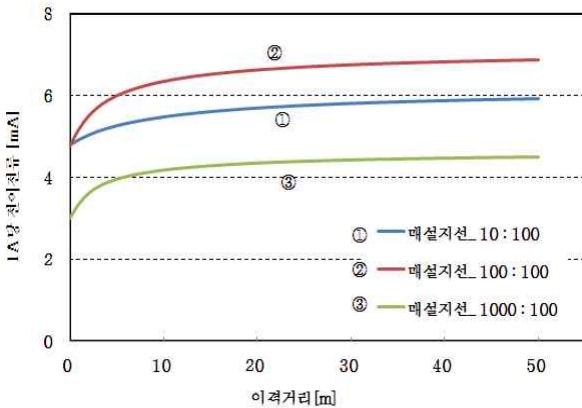
그림 5는 대지구조별 접지전극으로부터의 이격거리에 따른 이행전압과 이행전압에 의한 사람의 인체에 흐르는 전류(접촉전류)를 나타낸다. 이행전압의 경우에도 대지표면전위 및 보폭전압과 마찬가지로 표면층에 저항률이 클수록 크게 나타났다. 이행전압의 경우 대지표면전위와 접지전극의 전위차이기 때문에 평균 대지저항률이 커질수록 대지표면전위와 접지전극의 전위가 모두 커지나 접지전극의 전위가 상대적으로 더욱 크게 증가하기 때문에 표면층의 대지저항률이 큰 경우에서 크게 나타나게 된다. 반면에 이행전압에 의해 인체에 흐르는 전류의 경우 보폭전류와 마찬가지로 표면층의 대지저항률이 10배 큰 경우에서 가장 작게 나타났으며, 표면층이 없는 단일 구조에서 가장 크게 나타났다. 이러한 원인은 보폭전류의 경우와 마찬가지로 표면층이 높은 경우 이행전압은 높아지나 사람 발의 접촉저항이 상대적으로 더 커지기 때문이며, 표면층의 대지저항률이 낮은 경우 이행전압 자체가 매우 낮게 나타나기 때문이다.

그림 4와 그림 5의 결과를 볼 때 대지구조에 따른 감전의 위험성을 분석함에 있어 단순히 위험전압을 분석하는 것은 무의미하다는 것을 알 수 있다. IEEE Std. 80에서 제안한 허용위험전압을 고려하는 것이 의미 있다고 볼 수 있으나 이 경우에도 대지구조가 바뀌는 것에 따른 위험전압(접촉전압과 보폭전압)은 고려되지 않기 때문에 접촉전압과 보폭전압에 의해 인체

에 흐르는 전류를 평가하여 위험전압의 변화 및 인체의 접지저항을 동시에 고려하여 위험성을 분석하는 것이 타당하다고 판단된다.



(a) 이행전압



(b) 이행전압에 의해 인체에 흐르는 전류(접촉전류)

그림 5. 대지구조별 접지전극으로부터의 이격거리에 따른 접촉전압 및 접촉전류

Fig. 5. Touch voltage and current as a function of the distance from the grounding electrode by soil structures

즉 현장에서 시공된 접지시스템의 성능의 확인을 위한 검사에서 접촉전압이나 보폭전압과 같은 위험전압만의 측정으로는 안전성의 판단기준이 불명확하므로 위험전압에 의해 인체에 흐르는 전류를 측정하여 평가하는 것이 보다 합리적인 방법이라고 볼 수 있다. 평가방법에 따른 위험성의 차이를 보다 정량적으로 나타내기 위해 그림 2의 조건에 대하여 위험전압, 위

험전류 및 위험성의 요인의 분석결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 대지구조별 감전에 대한 위험성 평가요소의 비교
Table 1. Comparison of the evaluation factors for electric shock hazards by soil structures

상층-하층의 대지저항률 [$\Omega \cdot m$]	10	100	1,000
	-100	-100	-100
접지전위 [V]	6.66	8.20	8.81
접촉전압 [V]	5.33	5.99	6.37
단일 대지구조에 대한 접촉전압의 비율	0.89	-	1.06
접촉전압에 의해 인체에 흐르는 전류 [mA]	5.22	5.18	2.55
단일 대지구조에 대한 접촉전류의 비율 [%]	100.8	-	49.2
보폭전압 [V]	0.14	0.48	0.69
단일 대지구조에 대한 비율	0.30	-	1.42
보폭전압에 의해 인체에 흐르는 전류 [mA]	0.13	0.3	0.1
단일 대지구조에 대한 보폭전류의 비율 [%]	44.3	-	32.9

표 1에서 대지표면의 저항률이 커질수록 접지전극의 전위는 높아지는 것으로 나타났으며, 그에 따라 접촉전압 및 보폭전압 역시 표면층의 대지저항률이 클수록 높게 나타났다. 하지만 이격거리 1[m]의 이행전류로 산출한 접촉전류의 경우 단일 대지구조에 비해 표면층의 대지저항률이 낮은 경우 0.8[%] 증가하여 위험성이 그만큼 커졌다고 볼 수 있으며, 표면층의 대지저항률이 큰 경우 접촉전류는 단일 대지구조에 비해 약 50[%]까지 감소하여 위험성이 50[%]정도 저감되었다고 판단할 수 있다.

또한 보폭전류의 경우에는 표면층의 저항률이 10배 큰 경우와 1/10배로 작은 경우 모두 단일 대지구조에 비해 크게 감소하였지만 표면층의 대지저항률이 큰 경우가 더욱 효과적인 것으로 나타났다. 이러한 분석결과를 미루어 보아 2층 대지구조를 포함하여 접지된 기기의 감전에 대한 위험성을 검사할 때 바닥면의 표면상태 및 접지시스템의 시설조건을 모르는 경우 접촉전압 및 보폭전압만을 측정하는 것보다는 접촉전류 및 보폭전류 등을 측정하는 방법이 편리하고 합리적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 인체에 흐르는 전류를 기반으로 접지 시스템에 대한 감전의 위험성을 평가하는 방법에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

접지된 전기설비의 주변에서 사람의 발과 바닥면 사이의 접촉저항과 바닥면의 조건에 따라 표면전위가 변화하기 때문에 그에 따른 인체에 흐를 수 있는 전류를 측정하여 감전의 위험성을 평가하는 것이 편리하고 합리적이다. 바닥면의 저항률이 높은 경우 발의 접촉저항이 커져 인체에 흐르는 전류가 감소하지만 평균적인 저항률의 증가로 위험전압이 증가할 수 있기 때문에 접지시스템을 검사할 때에도 인체에 흐르는 전류를 기반으로 하는 것이 바람직하다. 본 연구 결과는 최근 공통/통합접지방식의 적용에 따른 검사방법의 개발에 적용될 것으로 기대된다.

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

References

- [1] 이복희, 이승철, “접지의 핵심 기초 기술”, 도서출판 의제, pp.25-64, 1999.
- [2] International Standard IEC 61936-1, “Power installations exceeding 1 kV a.c. - Part 1: Common rules”, 2nd ed. pp.84-88, 2010.
- [3] 高橋健彦, “接地・等電位ボツァデザイン設計の實務知識”, オム社, pp.27-48, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] H. Zhao, H. Griffiths, A. Haddad, A. Ainsley, “Safety-limit curves for earthing system designs: appraisal of standard recommendations”, IEE Proc.-Gener. Transn. Distrib. Vol. 152, No. 6, pp.871-879, 2005.

- [7] C. H. Lee and AP. Sakis Meliopoulos, “Comparison of touch and step voltages between IEEE Std 80 and IEC 479-1”, IEE Proc.-Gener. Transn. Distrib. Vol. 146, No. 6, pp.593-601, 1999.
- [8] 최종혁, 최영철, 이복희, “수직 접지전극의 접지임피던스 측정에서 도전유도에 의한 오차 평가”, 대한전기학회 논문지, Vol. 58 No. 9, pp.1778-1783, 2009.
- [9] 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.
- [10] IEEE Std. 80-2000, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, pp. 16~29, 2000.
- [11] 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.

◆ 저자소개 ◆



이복희(李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경 대학 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



유양우(柳良佑)

1958년 2월 2일생. 2009년 2월 인하대 공학대학원 정보전기공학과 졸업(석사). 1983~2010년 기초전력연구원, 현재 KD 파워주식회사 연구개발사업본부장. 인하대학교 대학원 박사과정.
Tel : +82-2-6336-3772
Fax : +82-2-6336-3789
http://kdpower.co.kr
E-mail : yookd@kdpower.co.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