

Analyses of Earth Surface Potentials Depending on Soil Structures

李 福 熙^{*} · 白 英 煥^{*} · 鄭 鉉 郁^{**}

(Bok-Hee Lee · Young-Hwan Baek · Hyun-Wook Jung)

Abstract - This paper presents electric potential rise on the surface of the earth due to ground currents. It is the aim of this paper to propose fundamental data relevant to the earth surface potentials depending on the soil structures. The earth potential rise, touch and step voltages in the immediate vicinity of the ground rod of a distribution pole were measured and analyzed. The results described in this paper are based on laboratory measurements which were intended to simulate conditions existing in actual installations. As a result, the earth surface potential rise, touch and step voltages strongly depend on the soil structure. The highest earth surface potential occurred in the vicinity of the top of ground rod. When the ground rod was installed in the distance range of 1~1.5 m from distribution pole, the highest touch voltages appeared near the place of 1 m on the straight line connecting the distribution pole to ground rod.

Key Words : Ground Rod, Touch Voltage, Step Voltage, Earth Potential Rise, Soil Structure

1. 서 론

전원계통의 1선 지락고장, 낙뢰, 절연파괴 등에 의해 지락 사고가 발생하여 접지전극으로 고장전류가 유입하게 되면 접지전극은 물론이고 접지전극 주변의 대지표면에 전위가 상승하게 된다. 이때 형성되는 전위분포는 다른 설비에의 영향과 인체의 감전사고 등을 고려하여 일반적으로 대지표면에서의 값으로 나타내며 접지전극의 형상, 대지구조나 토양의 성분과 성질 및 균질성, 접지전류의 크기 및 지속시간 등에 의해 영향을 받게 된다[1]. 그러나 국내에서 접지전극의 대지전위상승에 의한 접촉전압과 보폭전압에 대한 인식은 부족한 상태이다.

접지전극은 지지물의 종류에 따라 설계기준이 다르며, 지표면으로부터 0.75 m 이상의 깊이에 시설하여야 한다. 철근 콘크리트 전주에 근접하여 시설하는 경우, 지지물에 접촉되지 않도록 시설하되 가능한 한 이격하여야 한다. 철탑, 강관주 및 철주와 같은 금속체 지지물의 경우, 금속체 지지물로부터 1 m 이상 이격시키도록 되어 있다[2].

낙뢰 또는 지락사고 등에 의해서 접지전극에 고장전류가 유입되면 접지전극이 매설된 주변에 전위경도가 형성되며 접촉전압과 보폭전압이 나타나게 된다. 이때 접지전극으로

유입된 접지전류의 경로 및 전류선의 밀도는 대지저항률과 대지의 구조에 의해 변화하기 때문에 대지표면의 전위분포 산출이 간단하지는 않다. 따라서 합리적인 접지설계를 위해서 대지저항률과 대지구조가 보폭전압, 접촉전압 및 전위분포의 특성에 미치는 영향을 알아볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 접지전극에 유입되는 전류에 의한 접지전극 주변의 대지표면전위상승, 접촉전압, 보폭전압에 미치는 대지구조의 영향을 분석하기 위한 목적으로 실규모 모델을 이용한 실험적 연구를 수행하였다. 즉, 배전용 전주 근방에 설치하는 접지봉의 설치위치에 따른 대지표면전위분포를 측정하고, 대지구조에 따른 접촉전압과 보폭전압을 산출하고 검토하였다.

2. 위험전압

인체의 감전에 대한 위험전압을 일률적으로 나타낼 수 없지만 위험성의 한계 즉, 위험전압은 크게 접촉전압과 보폭전압 2가지로 나누며, 이들 위험전압의 개념적 설명을 그림 1에 나타내었다[3,4].

접촉전압은 전기계통의 충전 부분과 인체의 접촉으로 인하여 인체에 인가될 수 있는 전압이며, 보통 사람의 손과 다른 신체의 일부 사이에 인가되는 위험전압이다. 누전이나 기기의 절연파괴로 인하여 외함에 전압이 인가된 상태에 사람이 접촉하게 되는 경우 감전사고를 일으키므로 접지를 통하여 위험전압을 제한시키는 것이 중요하다. 접지전극을 통하여 접지전류가 대지로 유입되면 접지전극 주변의 대지표면에 전위경도가 형성되고 전위차가 발생하여 사람의 양발 사이에 전압이 인가되는데 이것을 보폭전압이라고 한다.

* 교신저자, 正 會 員 : 仁 荷 大 學 校 電 子 · 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

* 正 會 員 : 仁 荷 大 工 大 電 子 電 氣 工 學 部 博 士 課 程

** 正 會 員 : 仁 荷 大 工 大 電 子 電 氣 工 學 部 碩 士 課 程

接 受 日 字 : 2007 年 6 月 5 日

最 終 完 了 : 2007 年 7 月 23 日

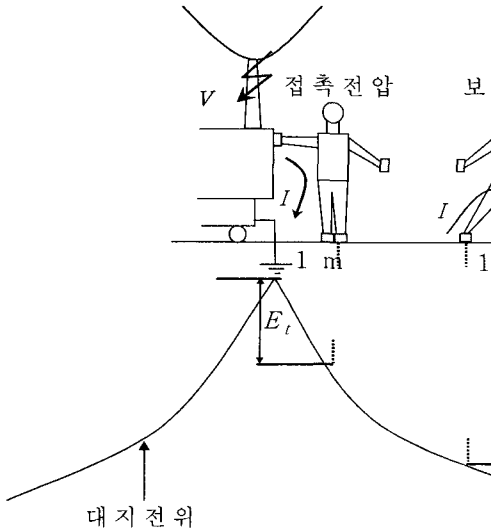


그림 1 접촉전압과 보폭전압의 개념적 설명
 Fig. 1 Conceptual explanation for touch and step voltages

이러한 접촉전압과 보폭전압은 인체 각부의 대지와와의 접촉조건, 지표면 부근의 대지저항률 등에 따라 복잡하게 변화한다. 특히 접지전극 주변의 지표면에 형성되는 대지표면전위상승(earth surface potential rise)은 접지전극의 시설과 직접적으로 연관되므로 접지의 설계와 시공에 고려해야 한다.

3. 실험장치 및 방법

실규모 모델실험을 위해서 도심지 가공배전선로의 지지물로 많이 사용되는 16 m 철근콘크리트 전주를 시설하였으며, 대지전위상승을 측정하기 위한 실험회로를 그림 2에 나타내었다.

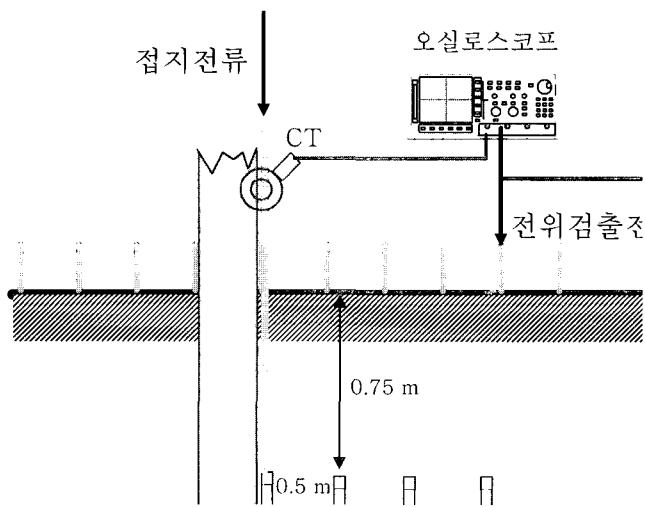


그림 2. 대지전위상승을 측정을 위한 실험계
 Fig. 2. Experimental setup of measuring the earth surface potential rise

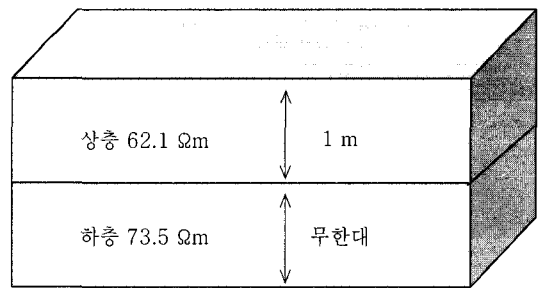
길이 1 m의 접지봉을 전주로부터 0, 0.5, 1.0, 1.5 m 떨어진 위치에 대지표면으로부터 0.75 m의 깊이에 설치하였다. 전위검출을 위한 기준전위보조전극을 전주에서 30 m 떨어진 장소에 설치하였으며, 접지전류의 유입을 위한 전류보조전극은 기준전위보조전극의 맞은편에 전주에서 30 m 떨어진 점에 설치하였다.

접지전류의 측정에는 대역폭이 5 Hz ~ 100 kHz, 최대 1.3 kA까지 측정할 수 있는 전류프로브를 이용하였다. 대지표면전위는 대역폭이 DC ~ 100 MHz, 1.3 kV_{peak}까지 측정이 가능한 차동프로브를 검출하여 400 MHz의 대역폭의 4 채널 오실로스코프로 파형을 관측하였다. 지지물로는 철근콘크리트전주를 사용하였으며, 접지전극에 상용주파수 접지전류를 유입시켰을 때 대지표면의 전위상승을 측정 1 ~ 측정 4의 4방향에 대하여 측정하였다. 또한 대지표면전위상승, 접촉전압, 보폭전압 등 위험전압의 분포를 분석하였다.

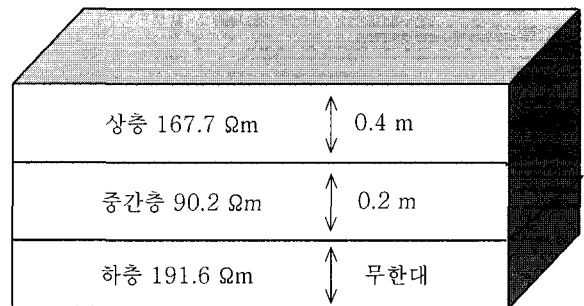
4. 결과 및 고찰

4.1 실험장의 대지구조

Wenner의 4전극법으로 측정된 대지저항률을 통해 얻은 $\rho-a$ 곡선과 대지구조해석용 프로그램을 이용하여 측정장소 2곳의 대지구조를 분석하였으며[1], 각 실험장의 대지구조는 그림 3과 같다. 그 결과 1 실험장의 대지구조는 2층 구조, 2 실험장은 3층 구조로 나타났다[5].



(a) 1 실험장의 대지구조

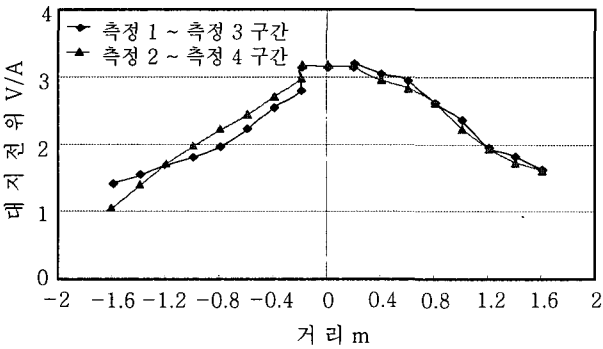


(b) 2 실험장의 대지구조

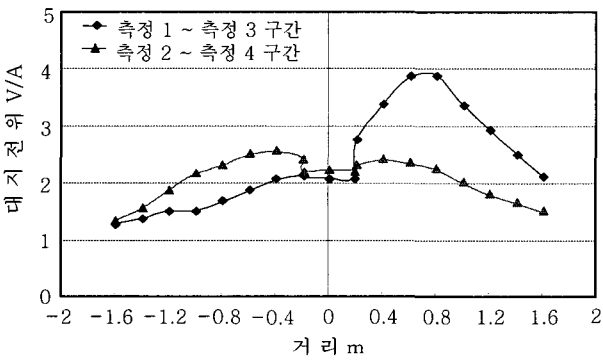
그림 3 실험장소의 대지구조
 Fig. 3 Soil structures of the test sites

4.2 대지표면전위분포

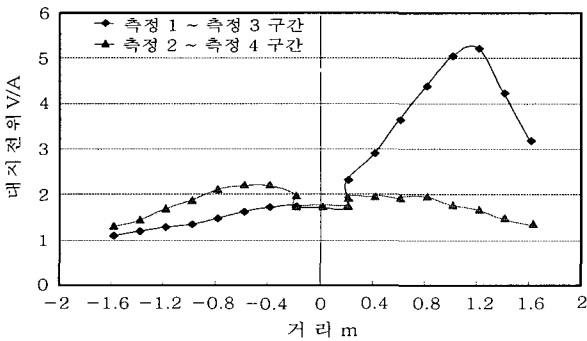
철근콘크리트전주와 접지전극의 이격거리가 0, 0.5, 1 m 인 경우 2층 구조의 1 실험장에서 측정한 대지전위분포의 예를 그림 4에 나타내었다. 여기서 이격거리 0 m인 경우 접지전극은 전주에 접촉되지 않도록 근접시켜 설치하였다. 측정점은 접지전류를 유입시키는 접지봉을 기준으로 하였으며, 전주의 반경이 약 0.2 m이므로 그래프상의 거리는 약 0.2 m 씩 좌우로 이동된 것으로 표시되었다.



(a) 이격거리 : 0 m



(b) 이격거리 : 0.5 m



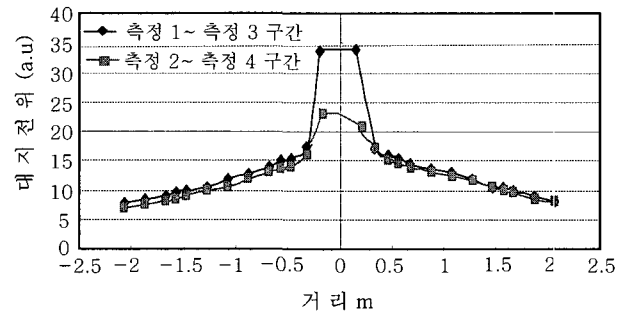
(c) 이격거리 : 1 m

그림 4 전주와 접지전극의 이격거리에 따른 1 실험장의 전위분포

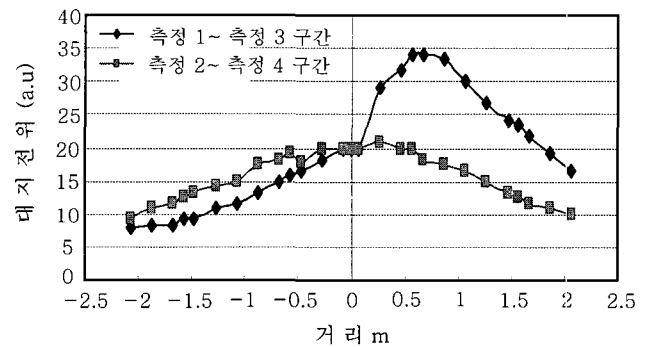
Fig. 4 Earth surface potential profiles at the test site 1 as a function of the distance between the distribution pole and ground rod

그림 4의 그래프에서 0 m 위치에 반경이 0.2 m인 철근콘크리트전주가 설치되어 있으므로 전위분포곡선은 평탄한 형태를 보였으며 상부와 하부의 대지저항률이 비교적 낮은 2층 구조로 되어 있기 때문에 전체적으로 지표면의 전위는 낮은 것으로 나타났다. 또한 접지전극이 전주로부터 이격될 수록 측정 1, 측정 2, 측정 4 방향의 대지전위는 낮게 나타났으며 접지전극이 설치된 측정 3 방향의 전위는 높게 나타났다.

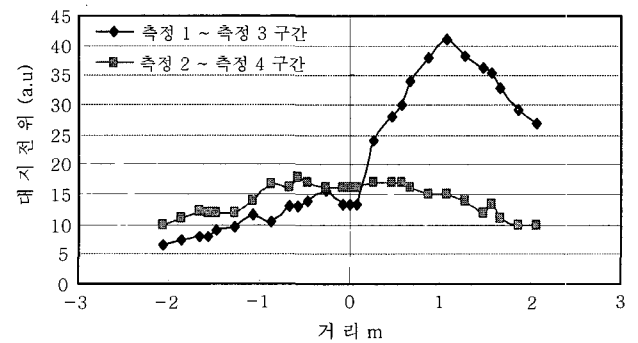
철근콘크리트전주와 접지전극의 이격거리가 0, 0.5, 1 m인 경우 3층 구조의 2 실험장에서 측정된 대지전위분포를 그림 5에 나타내었다. 전체적인 대지전위는 2층 구조의 1 실험장



(a) 이격거리 : 0 m



(b) 이격거리 : 0.5 m



(c) 이격거리 : 1 m

그림 5 전주와 접지전극의 이격거리에 따른 2 실험장의 전위분포

Fig. 5 Earth surface potential profiles at the test site 2 as a function of the distance between the distribution pole and ground rod

에 비해서 매우 높게 나타났다. 철근콘크리트전주로부터 접지전극의 매설위치가 멀어짐에 따라 측정 1, 측정 2, 측정 4 방향의 전위분포는 감소하는 경향을 보였지만 접지전극이 매설되어 있는 방향인 측정 3 방향의 대지표면전위는 높게 나타났다.

대지구조에서 알 수 있듯이 1 실험장의 경우 대지저항률이 비교적 낮으며, 2층 구조라고 하더라도 비교적 대지저항률의 차이가 그다지 크지 않으므로 접지전류가 대지로 흐르는 분포가 균일할 것으로 볼 수 있다. 그러나 2 실험장의 대지구조는 상층부의 대지저항률이 하층부의 대지저항률에 비해서 낮으므로 상층부에 많은 접지전류가 집중적으로 분포되어 대지표면전위가 높게 나타난 것으로 판단된다. 즉, 두 실험장의 대지표면전위분포의 차이는 대지구조와 이를 구성하는 토양의 대지저항률이 다르고 대지로 흐르는 접지전류의 분포가 다르기 때문에 생긴 결과로 볼 수 있다.

4.3 접촉전압과 보폭전압

4.3.1 접촉전압

대지표면 전위분포를 이용하여 전주와 접지전극의 매설위치에 따라 산출한 접촉전압을 그림 6에 나타내었다. 여기서 접촉전압은 지지물과 지지물로부터 1 m 떨어진 대지표면전위의 차로 산출하였다.

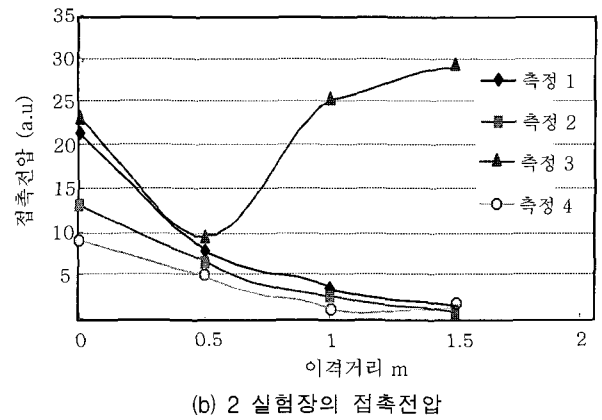
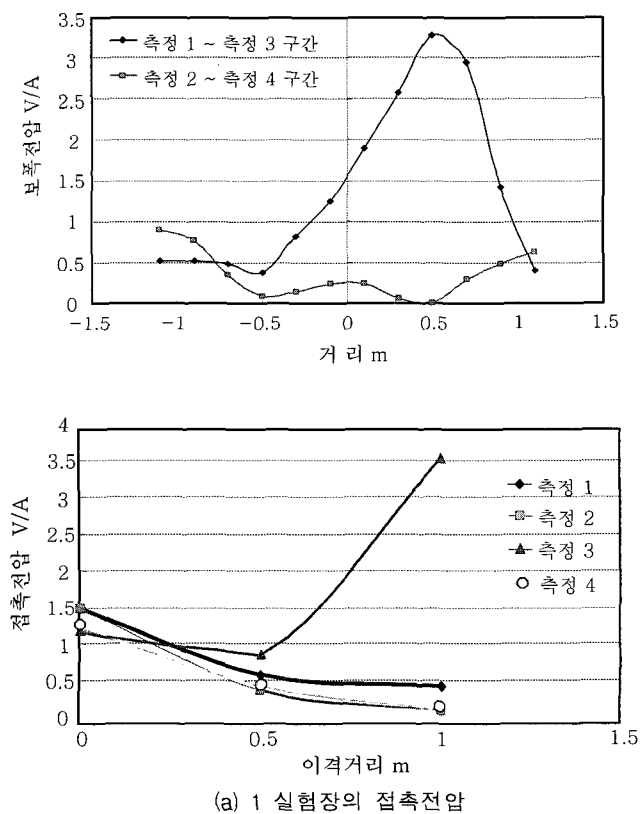


그림 6 각 실험장의 접촉전압

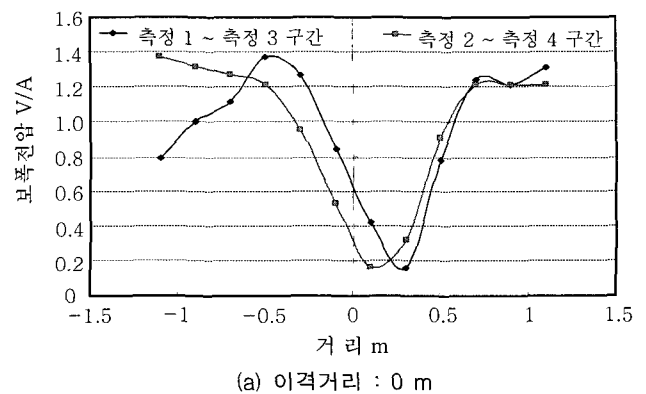
Fig. 6 Touch voltages at each test sites

두 실험장 모두 전주로부터 접지전극이 1 m 이격된 경우 접지전극이 매설되어 있는 측정 3 방향의 접촉전압이 높게 나타났다. 또한 다른 측정방향에서의 접촉전압은 전주와 접지전극의 이격거리가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

두 실험장의 접촉전압 크기의 현저한 차이는 대지구조에 따른 대지표면전위에 기인된 것으로 접촉전압의 전반적인 특성은 거의 비슷한 양상을 나타내었다. 다시 말하면 철근콘크리트전주로부터 접지전극의 매설위치가 멀어짐에 따라 접촉전압은 감소하며, 접지전극이 설치된 근방의 접촉전압이 가장 높은 것으로 나타났다.

4.3.2 보폭전압

각 실험장에서 철근콘크리트전주에서 접지전극까지의 거리에 따른 보폭전압을 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 사람이 서 있고 양 발 사이의 간격이 1 m인 경우의 전위차를 보폭전압으로 나타내었으며[6], 그래프에서의 표시는 사람의 양발 중앙점으로 나타내었다. 사람의 한쪽 발이 접지전극이 매설되어 있는 지점의 대지표면에 위치한 경우에 가장 높은 보폭전압이 나타났다.



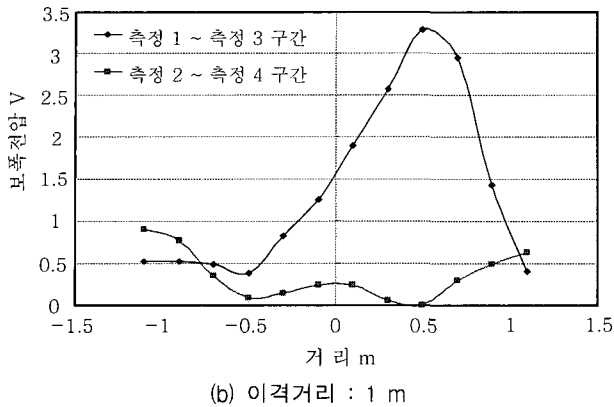
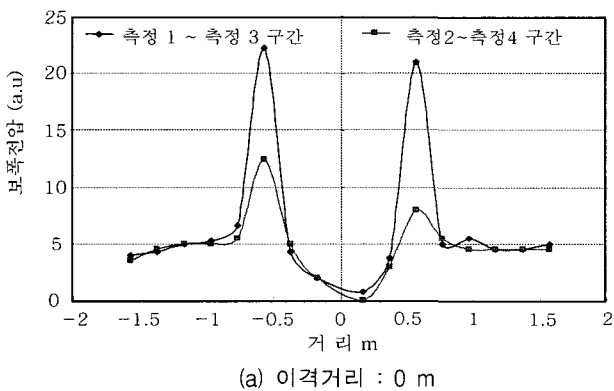
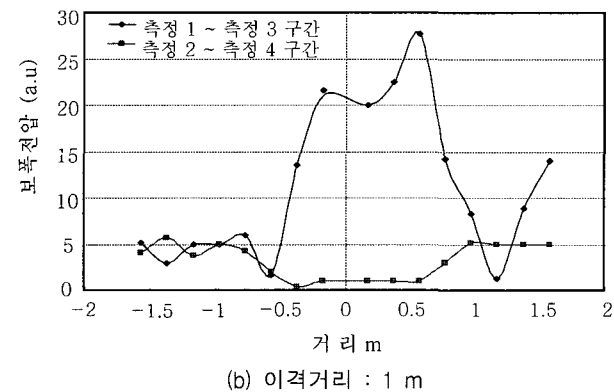


그림 7 1 실험장에서 보폭전압
Fig. 7 Step voltage at the test site 1

즉, 접지전극이 전주로부터 0 m와 1 m 떨어진 위치에 매설된 경우 중앙점인 0.5 m인 위치의 보폭전압이 높게 나타났다. 이것은 접지전극 주변의 대지전위분포에서 접지전극이 매설된 위치의 대지전위가 가장 높기 때문이다. 접지전극을 전주에 붙여서 설치한 경우(이격거리 0 m인 경우) 측정방향에 관계없이 보폭전압은 높게 측정되었으며, 그리고 접지전극이 매설되어 있는 대지표면에서의 보폭전압이 높게 측정되었다.



(a) 이격거리 : 0 m



(b) 이격거리 : 1 m

그림 8 2 실험장에서 보폭전압
Fig. 8 Step voltage at the test site 2

그림 8 (a), (b)의 결과를 보면 전주로부터의 이격거리에 따른 보폭전압의 양상이 다른 형태로 나타났다. 접지전극의 설치조건과 측정방법은 동일하며 대지구조만이 다른 것으로 볼 수 있다. 이와 같은 이격거리에 따른 보폭전압 분포의 차이는 실험조건상 대지구조에 따른 것으로 생각된다. 즉, 접지전극에 유입된 전류가 대지로 분산되는 양상이 지층의 저항률에 따라 변하기 때문이며, 3층 구조의 경우 최하층부의 저항률이 커서 높아 접지전류가 상층부의 수평방향으로 분산되는 비율이 높아 보폭전압이 높고 분포도 완만한 것으로 사료된다.

결과적으로 보폭전압의 양상도 대지구조에 따라 크게 영향을 받으며, 접지전극이 설치된 대지표면에서 비교적 높게 나타났다. 따라서 배전용 전주의 근방에 접지전극을 설치하는 경우 접지전극이 설치된 지점의 대지표면에서 접촉전압과 보폭전압이 높게 나타나기 때문에 접지전극은 사람이 접근하기 어려운 방향의 위치에 매설하는 것이 바람직하다. 또한 가스관이나 수도관이 있게 되면 이들 시설물로부터도 가급적 이격될 수 있는 위치에 접지전극을 설치하는 것이 접지전류에 의한 전도성 유도전압의 영향을 감소시키는 데 효과적일 것으로 본다.

5. 결 론

대지구조에 따른 배전용 전주의 접지전극에 접지전류가 유입되었을 때 대지전위분포를 측정하고 접촉전압과 보폭전압을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 봉형 접지전극에 접지전류가 유입된 경우 대지표면전위, 접촉전압과 보폭전압은 대지구조에 크게 의존함이 밝혀졌다. 따라서 단순한 접지저항만의 측정으로 접촉전압과 보폭전압과 같은 위험전압에 대한 평가는 정확성이 매우 낮을 것으로 예상된다.
- (2) 철근콘크리트전주와 접지전극의 이격거리가 증가함에 따라서 접지전극이 매설되어 있는 방향의 전위를 제외한 전위분포는 감소하였다.
- (3) 접촉전압은 접지전극이 매설된 위치에서 가장 높으며, 접지전극이 전주로부터 이격되지 않고 시설된 경우 접촉위치에 관계없이 접촉전압이 비교적 높게 나타났다.
- (4) 보폭전압은 사람의 한 쪽 발이 접지전극이 매설되어 있는 지점에 위치한 경우 가장 높게 나타났다.
- (5) 접촉전압과 보폭전압의 위험성을 고려했을 때, 배전용 철근콘크리트전주의 접지전극은 사람이 접근하기 어려운 위치에 설치하는 것이 바람직하다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] 이복희, 이승철, 접지의 핵심기초기술, 도서출판 의제, pp.27-64, 1999.
- [2] 한국전력공사, 배전편 설계기준 3500 접지공사, pp.9-11, 2005.
- [3] ANSI/IEEE Std. 81-1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp.25-26, 1983
- [4] EPRI, Transmission, Line Grounding, Vol.1, pp.8-1~12. 1982.
- [5] 이복희, 정현욱, 백영환, "대지구조에 따른 접지봉 주변의 대지표면전위분포", 조명전기설비학회 논문지, 제21권, 1호, pp.142-147, 2007. 1.
- [6] IEEE Std. 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp.23-29, 2000.

저 자 소 개



이 복 희 (李 福 熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수. 한국 조명전기설비학회 부회장, 당학회 학술이사

Tel. (032) 860-7398, Fax. (032) 863-5822
e-mail : bhlee@inha.ac.kr



백 영 환 (白 英 煥)

1959년 12월 8일생, 2002년 2월 서울산업대학교 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 산업대학원 전기공학과 졸업, 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정, (주)효성전기안전 대표, Tel : (032) 860-7398, Fax. (032) 860-7398, e-mail: sky4u6006@hanmail.net



정 현 욱 (鄭 鉉 郁)

1978년 5월 26일생, 2004년 8월 인하대 공대 전기공학과 졸업 2006년 8월 동 대학원 전기공학과 석사졸업. Tel: (032) 860-8847, Fax: (032) 860-7398, e-mail: uka55577@hotmail.com