Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 23, No.6, pp. 78~84 June 2009

논문 23-6-10

# 토양의 이온화영역에서 소규모 접지전극의 과도접지임피던스 특성 분석

## (Characteristic Analysis of Transient Impedances of Small-sized Ground Electrodes in a Ionization Region of Soil)

유양우* · 엄주홍 · 조성철 · 이태형 · 이복희

(Yang-Woo Yoo · Ju-Hong Eom · Sung-Chul Cho · Tae-Hyung Lee · Bok-Hee Lee)

## 요 약

본 논문은 토양의 방전 영역에서 소규모 접지전극의 과도접지임피던스의 측정결과를 제시한다. 접지전극 주변에서 이온화 특성을 사실적으로 분석하기 위해서 세 가지 형상의 접지전극을 실외에 설치하고, 고전압 임펄스 발생기를 사용하여 시험전류를 인가하였다. 접지전극에서 대지로 흐르는 전류와 응답 전압을 분석한 결과, 접지전극 주변의 이온화는 높은 대지저항률의 토양에서 접지임피던스 감소에 기여하며 대지전위상승을 효과적으로 제한하는 것이 확인된다. 하지만 낮은 대지저항률의 토양에서는 이온화 임계전계강도가 작아서 전극 형상이 과도접지임피던스에 거의 영향을 주지 못한다. 그리고 전극형상에 따른 실험결과, 판전극보다 침부봉전극이 이온화 영역 전압범위 내에서 과도접지임피던스 저감에 보다 효과적이다.

## Abstract

This paper presents measurement results of transient impedance for small-sized ground electrodes in a discharge region of soil. For a realistic analysis of ionization characteristics near the ground electrode, three types of ground rod installed outdoors and high voltage impulse generator were used for injecting test current. From the analysis of response voltage and current flowing ground electrode to earth, it is verified that the ionization near the ground electrode contributes to reduction of ground impedance and limits the ground potential rise effectively in high resistivity soil. As a threshold electric field density for ionization is small in low resistivity soil, the shape of ground electrode rarely contributes to the transient impedance. And, from the experiment result with shape of ground electrode, the rod with needles is more effective to reduce the transient impedance than the plate electrode in the voltage range including with ionization regions of soil.

Key Words : Ionization in soil, Transient impedance, Threshold electric field, Ground electrode

* 주저자 : 인하대학교 전기공학과 박사과정
Tel : 02-885-9443, Fax : 02-883-0827
E-mail : yyw57@snu.ac.kr
접수일자 : 2009년 3월 31일
1차심사 : 2009년 4월 6일
심사완료 : 2009년 4월 24일

## 1. 서 론

접지임피던스의 측정 및 평가에 있어서 중요하게 다루어지고 있는 것이 뇌격전류에 의한 접지전극의 과도응답특성이다. 과도응답특성은 뇌격전류와 같은 빠른 임펄스 전류를 접지전극에 인가하였을 때 나타나는 특성이지만 그동안 토양의 이온화 영역에서의 특성은 크게 고려되지 않았다. 일반적으로 낙뢰가 발생하는 대부분의 경우, 강우를 수반하기 때문에 대지 표면과 토양 속에 다량의 수분을 포함하고 있어 접지전극 주위에서 이온화 혹은 방전이 발생한다. 따라서 접지전극의 과도응답특성을 분석할 때 토양의 이온화를 고려해야 할 필요성이 제기된다. 하지만 토양의 종류와 조건에 따라 높은 임펄스 전압 혹은 낙뢰 크기와 유사한 대전류가 필요하여 실험적인 연구가 어려웠다. 또한 토양의 수분함량이 많은 상태에서 접지전극 주위 토양의 이온화가 접지전위 상승에 미치는 영향이나 과도접지임피던스 특성에 기여하는 효과에 대한 선행적 연구 사례가 많지 않았다.

최근 대전류가 접지전극에 인가되었을 때, 접지전극 주위에서 발생하는 이온화특성에 대하여 관심이 높아지면서 실험을 동반한 연구가 진행되고 있다[1-3]. 하지만 전극형상과 대지구조에 따른 토양의 방전영역에서 접지전극의 과도접지임피던스에 관한 특성연구는 활발히 수행되지 않고 있다. 접지전극 주위에서 발생하는 이온화 특성은 전극의 형상에 따라 달라지기 때문에 접지성능을 높일 수 있도록 접지전극의 형상에 대한 연구가 필요하다. 또한 대지구조에 따른 대지저항율 변화는 이온화 특성과 직접적인 영향을 주기 때문에 과도접지임피던스와의 상관관계는 중요한 의미를 갖는다.

본 연구에서는 토양의 종류와 접지전극의 형상을 고려하여 실험실 외부에 실제 접지전극의 이온화 특성을 분석할 수 있게 실험계를 구성하여 연구를 수행하였다. 대지저항률이 다른 토양과 접지전극의 형상이 다른 소규모 접지전극에서의 과도접지임피던스를 인가전압에 따라 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 방전 영역에서의 과도접지임피던스

과도접지임피던스는 그림 1과 같이 영역별로 분류되어진다. 접지저항영역은 측정을 위한 전류와 접지전위상승 파형이 동위상을 이루므로 저항으로 표현된다. 또한 접지극에 유입되는 상용주파 전압이 낮아 접지전극 주위 토양에서 방전이 발생하지 않으므로 접지극을 통해 방류되는 접지전류와 접지전극의 전위상승에 의해 접지저항이 결정된다. 이 영역은 상용주파수 영역이며 낮은 전압 영역이므로 대규모 시스템을 제외하면 접지저항으로 성능평가가 이루어진다.

과도접지임피더스 영역은 접지극에 인가되는 과도전압의 크기에 따라 방전을 수반하지 않는 영역과 방전을 수반하는 영역으로 구분되며, 두 가지 영역 모두 영점에서부터 측정용 전류파형과 접지전위상승 파형의 피크값 도달시간에 차이가 발생한다. 접지극 주위 지중에서 토양에 인가되는 전계강도가 토양의 방전을 발생시키는 임계전계강도보다 낮은 비방전 영역에서는 피크값 도달 시간차가 주로 리액턴스 성분에 의해 발생하며 접지시스템에 포함되어 있는 인덕턴스나 캐패시턴스 성분이 주요 원인이 된다. 이에 반하여 방전 영역에서의 전압과 전류 피크값 도달 시간차는 접지극 주위 토양에서의 이온화 또는 방전에 의해 전압파형이 비선형적으로 감소하며 이에 따라 전류파형이 이상 증가하는 현상에 기인한다. 인가전압이 높은 경우에 토중방전이 활성화 되면 이러한 특성이 보다 현격하게 나타나며 마치 접지시스템에 인덕턴스 성분이 크게 포함된 것과 유사한 특성을 보인다.

접지전극 주위의 토양 이온화 또는 방전에 대한 영역별 구성은 그림 2와 같다. 지중방전 영역은 크게 네 가지로 구분되는데 불꽃방전 영역(sparking region), 이온화 영역(ionization region), 탈이온화 영역(deionization region), 비이온화 영역(non-ionizatio region)으로 구분된다[4-5].

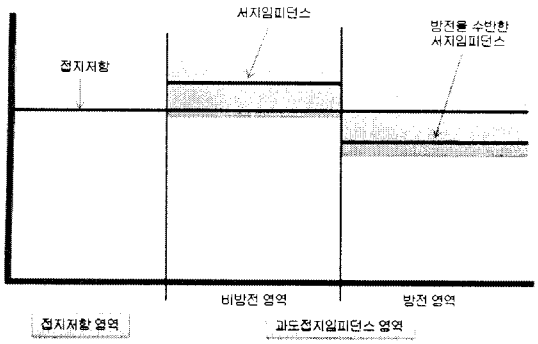



**그림 1. 접지임피던스의 영역별 특성**
**Fig. 1. Regional characteristics of ground impedance**

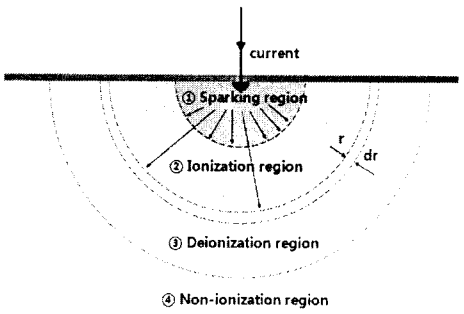



**그림 2. 토양의 이온화 영역**
**Fig. 2. Ionization region of soil**

토양은 흙의 종류와 알갱이 크기, 함습정도, 포함된 무기물의 종류 등에 따라 저항률과 유전율이 변화하며, 이온화 임계전계강도 역시 달라진다. 토중에서 이온화를 발생시키는 임계전계강도는 기존의 문헌들에서는 70~2,700[kV/m]로 광범위한 값으로 임계전계강도를 표현하고 있지만, 최근 새롭게 제안된 임계전계강도는 일반토양에서 약 300~400[kV/m]이다.

## 2.2 실험계 구성

실제 접지전극의 과도접지임피던스를 측정하는 실험계 구성이 힘들기 때문에 소규모 접지전극의 과도접지임피던스를 측정할 수 있게 실험계를 구성하였다. 전극 형상에 따른 특성 분석을 위해서 봉전극과 침부봉전극을 모의하였고, 접지전극의 면적과 과도접지임피던스의 관계를 분석하기 위해서 판전극을 모의하였다. 그리고 접지전극이 설치되는 대지의 대지저항률 변화에 따른 과도접지임피던스를 분석하기 위해서 소규모 실험장을 제작하여, 토양의 종류와 수분의 함유량에 따른 다양한 경우의 대지저항률을 모의하였다. 소규모 접지전극의 방전영역에서의 과도접지임피던스 측정을 위해 그림 3과 같이 실험계를 구성하였다.

과도접지임피던스 측정을 위한 전원장치는 일반토양의 이온화 임계전계강도 이상의 전압을 인가할 수 있는 800[kV]급 임펄스 전압발생기를 사용하였다. 8단으로 구성된 임펄스 전압발생기는 2~8단으로 구성이 가능하여 토양의 종류에 따라 방전이 발생하는 다양한 임계전압을 인가할 수 있게끔 하였다. 과도접지임피던스 분석을 위해서 접지전극의 전위와 접지전극을 통하여 방류되는 전류를 측정하기 위하여 분압기와 션트저항을 사용하였다. 분압기는 1057.4:1의 용량성 분압기를 사용했으며, 션트는 0.019[Ω]의 저항을 갖으며 최대 25[kA]까지 측정가능하다. 분압기와 션트의 측정불확도는 모두 0.2[%] 이하이다.

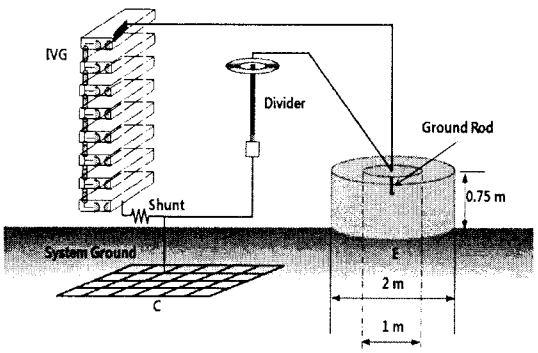
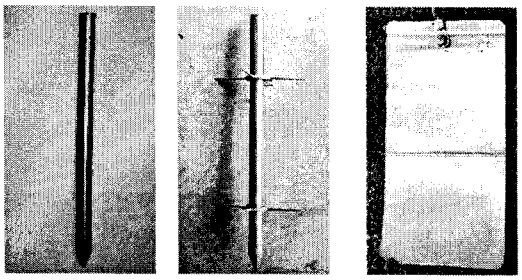



**그림 3. 실험계의 구성**
**Fig. 3. Configuration of the experimental set-up**

지중에 매설된 접지전극 주위의 방전특성 및 방전영역에서의 과도접지임피던스 분석을 위해 치환용 토양과 토양을 담을 수 있는 콘크리트 블록조 시험장을 옥외에 구축하였다. 방전시험장은 직경 2[m] 크기로 제작하였으며, 지면에서의 높이는 0.75[m]이다. 실험에 사용된 토양은 갯벌토와 사토이며, 갯벌토를 이용한 1층 구조와 갯벌토와 사토를 이용한

2층 구조를 구성하였다. 실험에 사용된 갯벌토의 저항률은 12[Ω · m]이며, 30[%]의 수분을 함양한 사토는 35[Ω · m]이다.



(a) 봉전극 (b) 침부봉전극 (c) 판전극

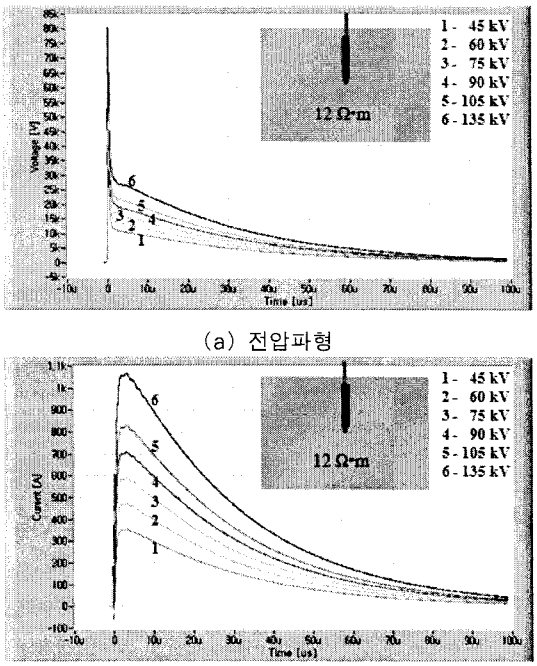
**그림 4. 실험에 사용된 접지전극**
**Fig. 4. Ground electrodes used in this work**

실험에 사용된 접지전극은 지중방전 실험장의 크기를 고려한 소규모 봉전극, 침부봉전극 그리고 판전극을 사용하였다. 봉전극은 지름 12[㎜], 길이 300[㎜], 1.5[㎟]의 단면적을 가지며, 침부봉전극은 침상전극을 모의하기 위해 봉전극에 30[㎜]의 침 8개를 접속하여 제작되었다. 판전극은 두께 0.5[㎜]인 동판을 사용하여 100×200[㎟]의 크기로 제작하였다. 실험에 사용된 접지전극의 사진은 그림 4와 같다.

본 연구에 적용한 임펄스 발생기와 측정시스템이 동일 접지상에서 등전위를 이루도록 본딩되어 있어서 2전극법을 적용하였다. 2전극법에서는 C극와 P극을 동일전극으로 사용하므로 전위측정용 분압기와 임펄스 발생기의 접지가 동일한 전위기준점에 접속되어 임펄스 고전압 측정이 매우 안정적으로 이루어진다. 단지 C극의 접지저항이 E극의 접지저항에 비해 충분히 작다는 조건을 만족하여야 하며 E극과 C극의 합성저항에 대한 C극의 접지저항 비에 해당하는 만큼의 오차를 항상 포함한다는 단점이 있다. 본 연구에서 적용한 접지전극 중 사토 토양에 시설한 봉전극의 경우 접지저항은 약 1[kΩ]이며, C극으로 사용된 시스템 접지저항은 0.5[Ω]이다. 이러한 조건에서 2전극법의 적용에서 C극의 접지저항에 의한 오차요소는 거의 무시할 수 있는 수준이다.

## 2.3 임펄스전류에 의한 접지전극의 응답파형

토양의 구조는 중량비로 계산한 50[%] 수분함량으로 저항률이 12[Ω · m]인 갯벌토 1층 구조, 30[%]의 수분함량으로 저항률이 35[Ω · m]인 사토와 갯벌토의 2층 구조에 대하여 실험을 진행 하였다.

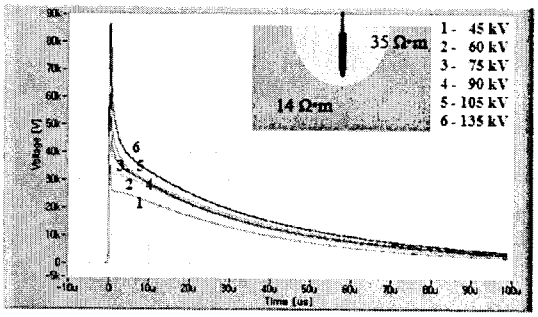



(a) 전압파형

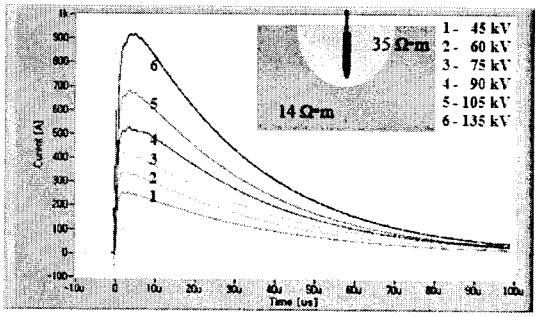
(b) 전류파형

**그림 5. 임펄스전류에 의한 봉전극의 응답전압 파형**
**Fig. 5. Response voltage waveforms of the rod to impulse current**

갯벌토 1층 구조에서는 전압파형의 피크값이 135[kV]의 인가전압에 대하여 약 80[kV]로 측정되었으며, 이때의 방전전류는 1,070[A]로 측정되었다. 그림 5 (a)의 전압파형에서 피크값 이후 급격하게 감소하여 파미부분을 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 토양의 이온화에 의한 영향임을 알 수 있다. 45[kV]에서 135[kV]까지 거의 동일한 전압 · 전류파형을 보이는 것으로 보아 이온화 임계전계강도는 45[kV] 이하라고 볼 수 있다. 침부봉전극과 판전극에서도 거의 동일한 결과가 나타났는데, 대지저항률

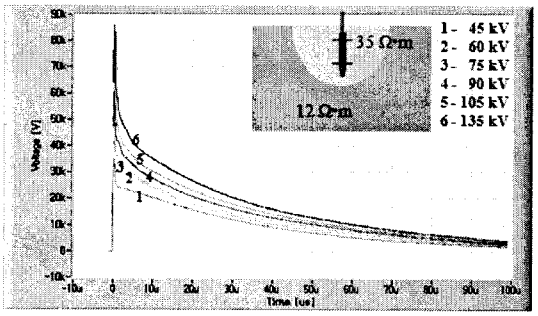



(a) 전압파형

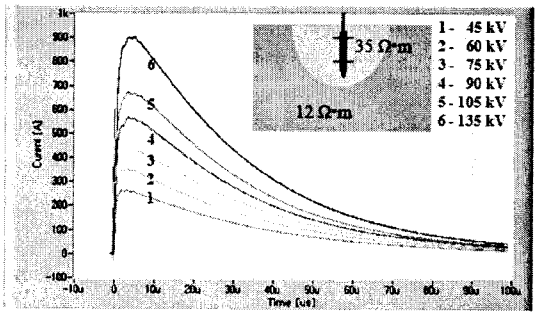



(b) 전류파형

**그림 6. 임펄스전류에 의한 봉전극의 응답전압 파형**
**Fig. 6. Response voltage waveforms of the rod to impulse current**




(a) 전압파형




(b) 전류파형

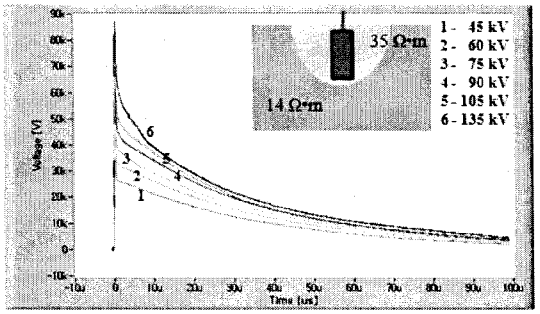
**그림 7. 임펄스전류에 의한 침부봉전극의 응답전압 파형**
**Fig. 7. Response voltage waveforms of the rod with needles to impulse current**

이 낮은 토양에서는 접지전극의 형상이 과도응답특성에 큰 영향을 주지 않음을 의미한다. 이것은 접지전극의 과도접지임피던스를 분석했을 때 보다 정확히 확인할 수 있다.

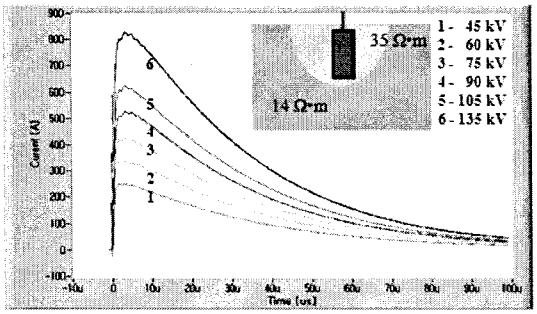
수분함유량이 30[%]인 사토와 갯벌토의 2층 구조의 토양에서의 봉전극의 전압과 전류 파형을 그림 6에 나타내었다. 135[kV]의 인가전압에 대하여 접지전위 파형의 피크값은 85[kV], 전류는 900[A]를 나타내었다. 그림 5 (a)의 전압파형과 비교해 보았을 때 전압피크값은 큰 차이를 보이지 않지만 피크값 이후에서 감소되는 부분이 작은 것을 알 수 있다. 이것은 이온화가 발생하는 임계전계강도가 1층 구조일 때 보다 더 높아 임계전계강도보다 낮은 전압에서는 이온화가 발생하지 않아 본래의 접지저항값의 특성을 보인 것이다.

수분함유량이 30[%]인 사토와 갯벌토의 2층 구조의 토양에서의 침부봉전극의 전압과 전류 파형을 그림 7에 나타내었다. 봉전극의 전압·전류파형과 비교해보았을 때 비슷한 이온화 특성을 보이지만 90[kV] 이하의 인가전압에서 전류가 봉전극보다 더 크게 나타났다. 이것은 낮은 인가전압에서도 이온화 영역이 봉전극보다 더 활성화되기 때문이다.

수분함유량이 30[%]인 사토와 갯벌토의 2층 구조의 토양에서의 판전극의 전압과 전류 파형을 그림 8에 나타내었다. 인가전압이 105[kV]일 때까지 봉전극과 비슷한 결과를 보였지만 135[kV]일 때 약 8[$\mu$s] 지점에서 전압파형이 갑자기 떨어지는 구간이 발생하였다. 이것은 135[kV]의 전압이 가해졌을 때 파미부분에서 급격한 이온화가 발생한 것으로 전류 피크값이 5번과 6번 사이에서 가장 크게 변화된 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 전류의 급격한 상승을 유발하지 않으면서 국지적으로 불꽃방전(sparking)이 발생할 때 나타나며 전압파형의 변화를 초래한다.




(a) 전압파형



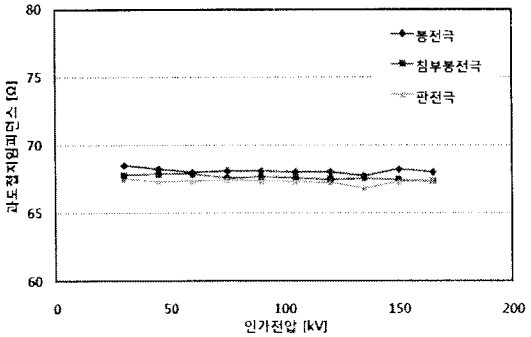

(b) 전류파형

**그림 8. 임펄스전류에 의한 판전극의 응답전압 파형**
**Fig. 8. Response voltage waveforms of the plate electrode to impulse current**

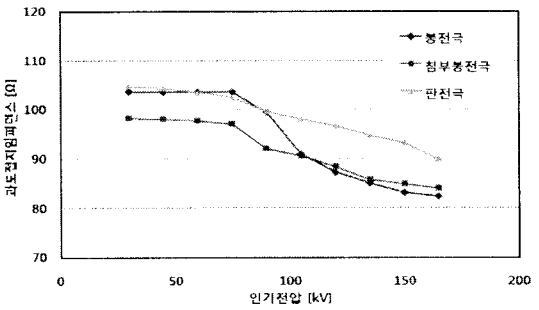
## 2.4 접지전극의 과도접지임피던스

소규모 접지전극에서 방전을 수반한 과도접지임피던스를 비교하여 그림 9에 나타내었다. 갯벌토 12[Ω · m]의 1층 구조인 경우에 인가전압이 증가하여도 과도접지임피던스값은 모든 접지전극에서 거의 일정하였다. 이는 이온화 발생 임계전계강도가 30[kV] 이하이고 더 이상 이온화 영역이 커지지 않기 때문에 더 큰 전압이 인가하더라도 이온화에 의한 접지임피던스 변화에 영향을 주지 못했다. 또한 임계전계강도 이상의 전압이 인가되더라도 전압 피크점 근처에서 이온화가 활성화되므로 전압의 초기 피크가 큰 값을 유지하여 접지전극의 과도접지임피던스는 접지전극 형상의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

갯벌토와 사토의 2층 구조에서는 인가전압이 증가함에 따라 모든 전극에서 과도접지임피던스값이 일




(a) 갯벌토 1층 구조




(b) 갯벌토+사토 2층 구조

**그림 9. 과도접지임피던스 비교**
**Fig. 9. comparison of transient ground impedance**

정하게 유지되다가 점점 작아지는 경향을 보였다. 실험에 사용된 2층 구조는 약 75[kV]를 이온화 임계전계강도라고 볼 수 있다. 봉전극과 판전극은 30[kV]일 때부터 과도접지임피던스값이 비슷하지만 75[kV] 이상부터 점점 감소하기 시작한다. 하지만 봉전극보다 판전극이 인가전압이 높아질수록 과도접지임피던스 감소폭이 작은 것을 알 수 있다. 이것은 방출되는 경로가 봉전극은 봉 말단부 하나의 지점에 집중되는데 반하여 판전극이나 침부봉전극은 꼭지점이나 다수의 침에 의해 분산되어 나타나는 특성으로 분석된다.

또한 인가전압이 75[kV] 이하일 때 침부봉전극이 가장 낮은 과도접지임피던스값을 유지하다가 75[kV] 이상일 때 봉전극과 비슷한 결과를 보인다. 이것은 침부봉전극의 작은 8개의 침이 낮은 전압범위에서 이온화에 영향을 주어 임피던스가 낮게 측정되었지만 105[kV] 이상의 전압범위에서는 이온화를

통해 전압강하에 기여하는 영향이 감소함을 의미한다.

실험에 사용된 접지전극의 과도접지임피던스를 비교했을 때 낮은 인가전압범위에서 침부봉전극이 과도접지임피던스가 제일 낮게 측정되었지만, 이온화 임계전계강도 이상일 때는 봉전극과 비슷한 결과를 보였다. 토양과 가장 접촉면이 많은 판전극은 이온화 임계전계강도 이상일 때 봉전극보다 더 높은 과도접지임피던스를 보이는 것은 이온화에 의한 영향이 봉전극보다 작다고 할 수 있다. 향후 침부봉전극과 유사한 기존 제품과 비교 실험을 통해서 과도접지임피던스 특성을 분석할 예정이다.

## 3. 결 론

본 연구는 토양의 방전 영역에서 토양의 구조와 접지전극의 형상에 따른 소규모 접지전극의 과도접지임피던스 특성 분석을 수행하였을 때 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 접지전극 주변의 이온화는 높은 대지저항률의 토양에서 접지임피던스 감소에 기여하며 효과적으로 대지전위상승을 제한한다.

(2) 대지저항률이 낮은 토양에서는 상대적으로 낮은 인가전압에서 방전영역에 도달하여 전극 형상이 과도접지임피던스에 미치는 영향은 작다.

(3) 침부봉전극은 낮은 전압범위에서 이온화 활성화에 유리하며 전압이 상승함에 따라 과도접지임피던스는 봉전극과 유사한 특성을 보인다.

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

## References

[1] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Determination of Threshold Electric Field EC of Soil Under High Impulse Currents", IEEE Trans. Power Delivery, vol.20, pp.2108-2111, July. 2005.

[2] Parick Espel, Ricardo R. Diaz, Senior Member, "Electrical Parameters Assosiated with Discharges in Resistive Soils", IEEE Trans. Power Delivery, vol.19, pp.1174-1182, July. 2004.

[3] I.F. Genos, I.A. Stathopulos, "Soil ionization under lightning impulse voltages", IEEE Proc.-Sci, vol.151, pp.343-346, Sept. 2004.

[4] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Characterization of ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses", IEEE Trans. Power Delivery, vol.21, pp.353-361, Jan. 2006.

[5] T.K. Manna and P. Chowdhuri, "Generalized equation of soil critical electric field EC based on impulse tests and measured soil electrical parameters", IET Gener. Transm. Distrib. pp.811-817, 2007.

[6] Junping Wang, Ah Choy Liew, and Mat Darveniza, "Extension of Dynamic <odel of Impulse Behavior of Concentrated Grounds at High Currents", IEEE Trans. Power Delivery, vol.20. pp.2160-2165, July, 2005.

## ◇ 저자소개 ◇

**유양우** (柳良佑)
1958년 2월 2일생. 2009년 2월 인하대 공학대학원 정보전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 기초전력연구원 실장.
Tel : (02)885-9443
E-mail : yyw57@snu.ac.kr

**엄주홍** (嚴柱弘)
1972년 9월 5일생. 1998년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 기초전력연구원 책임연구원.
Tel : (02)885-9443
E-mail : eommas@snu.ac.kr

**조성철** (趙成哲)
1977년 12월 16일생. 2003년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업. 현재 기초전력연구원 전임연구원.
Tel : (02)885-9443
E-mail : canfeel@snu.ac.kr

**이태형** (李泰炯)
1978년 6월 21일생. 2004년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2006년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업. 현재 기초전력연구원 전임연구원.
Tel : (02)885-9443
E-mail : tanghi@snu.ac.kr

**이복희** (李福熙)
1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수. 본 학회 부처장.
Tel : (032)860-7398
E-mail : bhlee@inha.ac.kr