

# 동결 토양에서 지중방전을 고려한 소규모 전극의 과도접지임피던스 특성

(Transient Ground Impedance of Small-sized Ground Electrode considering Underground Discharge in Frozen Soil)

이태형 · 조성철 · 임주홍 · 이복희

(Tae-Hyung Lee · Sung-Chul Cho · Ju-hong Eom · Bok-Hee Lee)

## Abstract

This paper presents the transient impedance in a discharge region when high voltage lightning impulse is applied to small-sized ground electrodes in frozen soil. For a realistic analysis of ionization characteristics near the ground electrode in the soil, ground rod installed outdoors and high voltage impulse voltage generator were used. From the analysis of response voltage and current flowing ground electrode to earth, it was verified that the ionization near the ground electrode contributes to reduction of ground impedance and limits the ground potential rise effectively under high impulse voltage.

## 1. 서 론

뇌서지 전류가 접지전극에서 대지로 흐를 때 접지전극에는 높은 전위가 발생한다. 이 전위상승은 접지임피던스에 의해 발생하며, 인체의 안전과 각종 기기의 안정적인 동작을 위협한다. 토양의 이온화는 접지임피던스를 감소시키는 작용을 하며, 뇌서지 전류가 보다 쉽게 대지로 흘러나가도록 도와준다. 지금까지 접지시스템에 큰 뇌서지 전류가 유입될 때 접지전극 주변 토양에서 발생하는 이온화 특성에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만 대부분의 연구는 접지시스템의 성능에 영향을 주는 계절 변화에 따른 토양의 상태를 고려하지 않았다.

일반적으로 동일한 장소에 설치되어있는 접지전극일지라도 계절의 변화에 따라 접지전극의 성능은 다르게 나타난다. 기온이 높고 습도가 많은 여름철은 접지저항이 낮게, 기온이 낮은 겨울철은 접지저항이 높게 나타난다. 문헌에 보고된 바에 따르면 동계의 대지저항률은 하계의 대지저항률보다 약 85 % 높은 것으로 나타난다 [1]. 이는 영하의 기온에 의해 토양 내의 수분이 동결상태로 존재하는 것이 가장 큰 영향이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 소규모 접지전극이 설치되어있는 토양이 동결상태가 되었을 때 지중방전을 고려한 과도접지임피던스를 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 이온화 현상에 따른 과도접지임피던스

접지전극의 과도접지임피던스는 접지극에 인가되는 과도전압의 크기에 따라 방전을 수반하지 않는 영역과 방전을 수반하는 영역으로 구분되며, 두 가지 영역 모두 측정용 전류파형과 접지전위상승 파형의 피크값 도달시간에 차이가 발생한다. 정현파 전압과 전류에서의 위상차에 해당하는 피크값 도달 시간차는 접지시스템의 회로정수와 방전에 의해 발생한다. 접지극 주위 지중에서 토양에 인가되는 전계강도가 토양의 방전을 발생시키는 임계전계강도보다 낮은 비방전 영역에서는 리액턴스 성분에 의해 피크값 도달 시간차가 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.

### 2.2 실험계 구성

동결토양의 방전영역에서의 과도접지임피던스 측정을 위해 그림 1과 같이 실험계를 구성하였다. 과도접지임피던스 측정을 위한 전원장치로는 800 kV급 임펄스 전압발생기를 사용하였다. 임펄스 전압발생기는 표준 뇌임펄스 파형인 1.2/50  $\mu$ s의 전압을 발생시키며 최대 충전에너지량은 60 kJ이다.

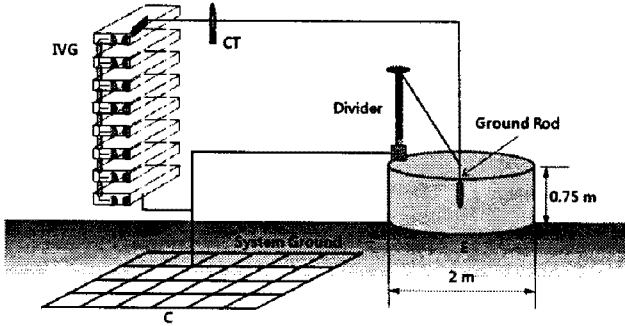


그림 1. 실험계 구성  
Fig. 1. Configuration of test set-up

지중에 매설된 접지전극 주위의 방전특성 및 방전영역에서의 과도접지임피던스 분석을 위해 치환용 토양과 토양을 담을 수 있는 직경 2 m 크기의 전용 시험장을 사용하였다.

실험에 사용된 토양의 종류는 사토이며 실제적인 동결 상태의 토양에서 실험을 수행하기 위해 옥외에 시험전극을 시설하고 일주일 가량 평균 최저기온이  $-6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 영하의 기온에서 고전압 임펄스 발생장치를 사용하여 다양한 전압레벨을 인가하여 실험하였다. 이 때의 접지저항은 약  $900\ \Omega$  이었고 동일 조건에서 상온일 때 측정된 접지전극의 접지저항인  $280\ \Omega$  보다 3배 가량 높게 측정되었다. 실험에 사용된 접지전극은 지중방전 시험장의 크기를 고려하여 봉형상의 지름 12 mm, 길이 300 mm의 전극을 사용하였다.

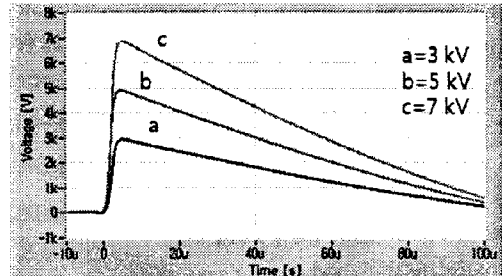
## 2.2 실험방법

본 연구에서는 과도접지임피던스의 영역을 방전영역까지 확대하여 실험을 진행하기 때문에 그림 1에와 같이 간단하고 안정적인 측정계를 사용하였다. 방전영역을 고려한 과도접지임피던스의 측정에는 높은 전압의 임펄스가 사용되게 되며 E극과 C극의 접지저항에 의해 인가전압이 분압된다. 높은 전압을 측정하는 분압기의 경우 대부분이 접지식 구조로 되어 있으며 임펄스 발생기와 같은 전위기준점을 가지도록 본딩되어 사용된다. 따라서 기존의 전위강하법을 사용하여 P극을 기준전위점으로 삼게 되면 P극의 기준전위와 임펄스 발생기의 기준전위인 C극의 전위가 서로 차이를 나타내어 측정시스템에 오류 또는 고장을 유발하게 된다. 본 연구에 적용한 임펄스 발생기는 800 kV급 접지방식으로 설계가 되어 있으며, 모든 측정시스템이 동일 접지상에서 등전위를 이루도록 본딩되어 있으므로 그림 1과 같이 2전극법을 적용하였다. 2전극법에서는 C극과 P극을 동일전극으로 사용하므로 전위측정용 분압기와 임펄스 발생기의 접지가 동일한 전위기준점에 접속되어 임펄스 고전압 측정이 매우 안정적으로 이루어진다[2].

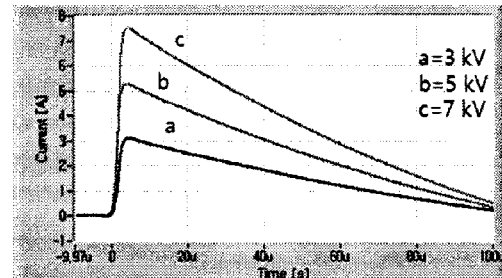
## 3. 결과 및 검토

### 3.1 측정전류와 접지전위상승 파형

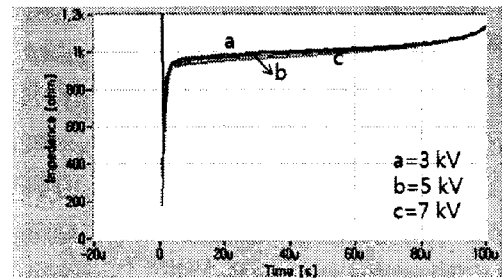
서지발생기를 사용하여 충전전압을 3 kV에서 7 kV까지 점진적으로 증가시키면서 접지전극에서 측정된 전압과 전류 파형을 그림 2에 나타내었다. 그림 2(d)에서 나타난 것과 같이 낮은 전압의 임펄스에서는 v-i 곡선이 일정한 기울기를 유지하는 것으로 나타났다.



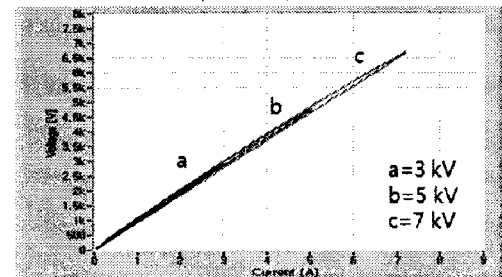
(a) 전압



(b) 전류



(c) impedance,  $v(t)/i(t)$



(d) v-i curve

그림 2. 접지전극에서 측정된 전압과 전류 파형  
Fig. 2. Voltage and current waveforms measured on the ground electrode

임펄스 발생기의 충전전압을 15 kV까지 증가시키기에 따라 그림 3(b)에서 f, g 파형과 같이 전류파형에서 비선형적인 증가가 나타난다. 이 때의 그림 3(a)에서 보듯이 전압파형에서는 변화가 거의 없다. 이것은 9~15 kV 범위의 전압에서 이온화 현상이 발생하기 때문에 수십  $\mu\text{s}$  동안 그림 3(c)에서와 같이 일시적으로 접지임피던

스가 감소한 것으로 보인다. 이러한 현상은 그림 3(d)에 서와 같이 v-i 그래프를 통해서도 확인할 수 있다. d, e 번 곡선에서는 기울기의 변화가 거의 없으나 f, g번 곡 선에서 기울기의 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

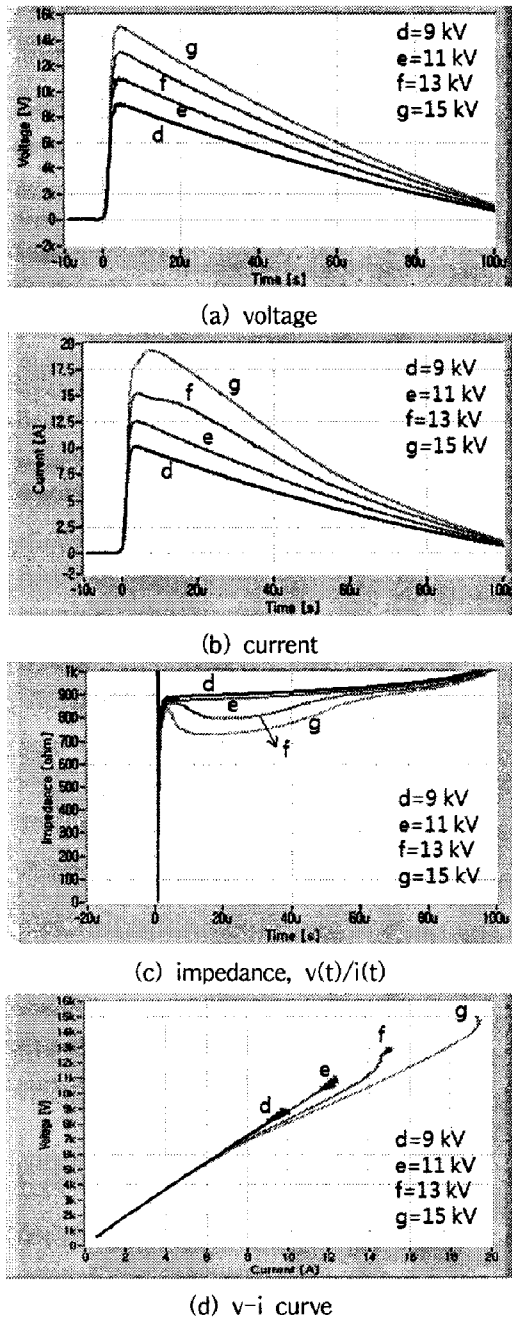


그림 3. 접지전극에서 측정된 전압과 전류 파형  
Fig. 3. Voltage and current waveforms measured on the ground electrode

이러한 임피던스 변화는 충전전압 25 kV까지 나타났 다. 충전전압 26 kV 이상에서는 그림 4(b)에서 i 파형과 같이 전류파형에서 변곡점이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 그림 4(c)의 임피던스 그래프에서 i 임피던스곡선 이 수십  $\mu$ s 동안 임피던스가 급격히 감소하는 것을 확 인할 수 있었다. 충전전압이 증가할수록 임피던스는 급 격히 감소하고 이는 그림 4(d)의 v-i 그래프에서 충전

전압이 높아질수록 v-i 그래프의 기울기가 감소하는 것 으로 확인할 수 있다. 이는 단지 접지전극 주위의 이온 화 현상으로 인해 접지전류가 급격히 증가하였다고 보 긴 어렵다. 26 kV 이상의 인가전압이 방전을 일으키는 전계강도라고 가정한다면 방전으로 인해 그림 4(a)의 전압파형에서 나타나는 전압강하가 나타난 것을 설명할 수 있다. 그러므로 동결토양의 입자 공극사이에서 발생 한 방전으로 임피던스가 급격히 감소하는 것으로 판단 된다.

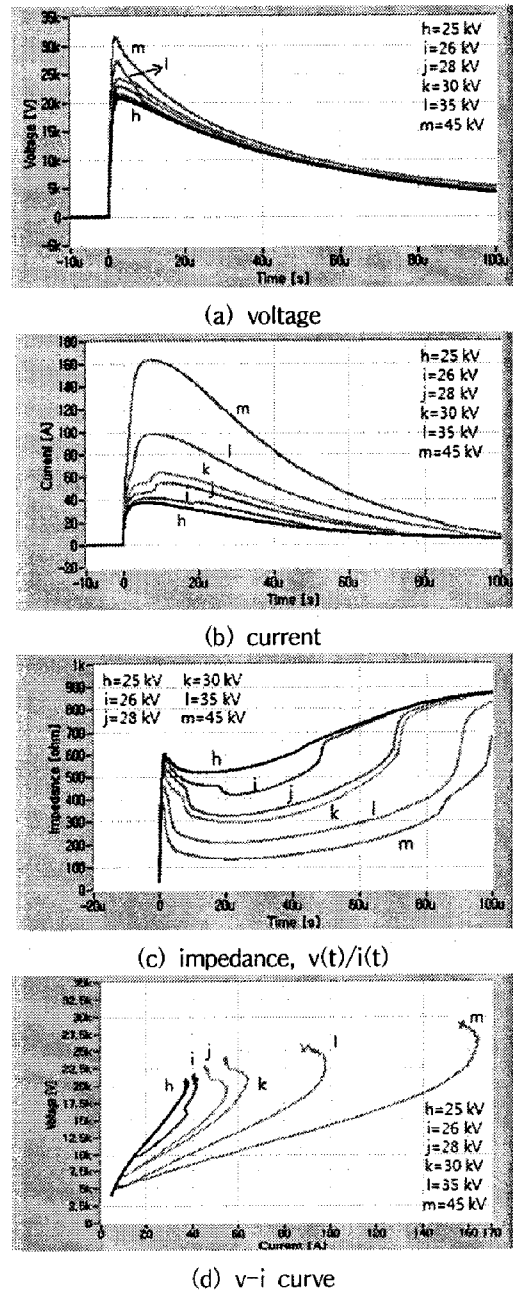
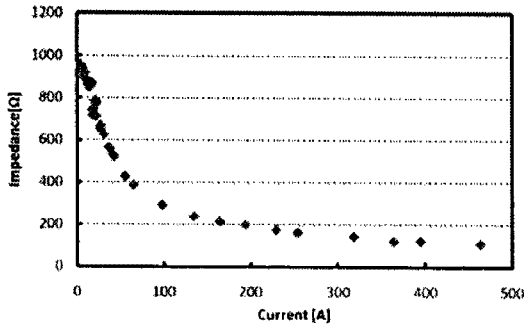


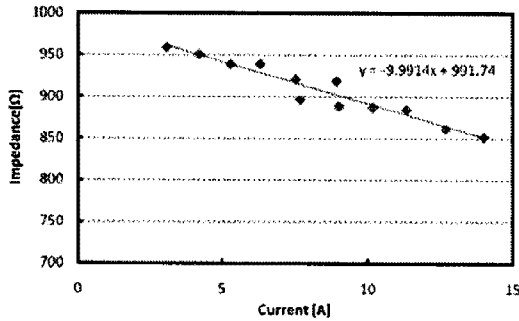
그림 4. 접지전극에서 측정된 전압과 전류 파형  
Fig. 4. Voltage and current waveforms measured on the ground electrode

전압강하는 높은 인가전압에서 동시에 전류를 증가시 키기 때문에 접지임피던스의 감소는 전류와 전압 모두

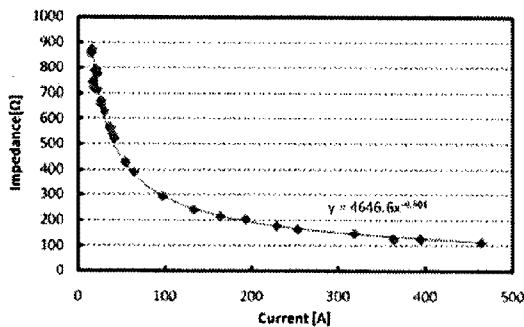
의 특성에 의존적으로 보인다. 그림 4(a)와 (b)에서 충전전압과 측정전압을 비교하면 전압강하가 낮은 전압영역에서와 다르게 상당히 감소하였고 전류피크가 상당히 증가하였음을 알 수 있다. 전류의 증가와 전압의 감소는 접지전극의 과도응답특성에 영향을 주고 그림 4(c)에서 보인 것과 같이 임피던스를 일시적으로 정상상태의 접지저항보다 45 kV의 충전전압에서 약 15 %로 감소시키는 결과를 나타냈다.



(a) 전류피크에 증가에 따른 과도접지임피던스 변화



(b) 이온화영역에서의 과도접지임피던스



(c) 방전을 수반한 이온화영역에서의 과도접지임피던스  
그림 5. 방전을 수반한 이온화 영역에서 임펄스 전류에 의한 과도접지임피던스

Fig. 5. Transient ground impedance to impulse current in ionization region with sparking

과도접지임피던스는 그림 5와 같이 전류 피크에 대한 식  $Z = \frac{V_p}{I_p}$ 에 의해 정의된다. 충전전압이 12 kV까지 증가함에 따라 임피던스 측정값은 959 Ω에서 852 Ω으로 선형적으로 감소하였다. 12 kV 이상의 충전전압에서 과도접지임피던스는 이온화영역의 확장파와 토양에서의 방전에 의해 상당히 감소하여 약 113 Ω에 이르렀다.

접지전극에서의 전압은 일반적으로 IVG의 충전전압에 의존적이지만 토양의 이온화가 접지임피던스를 변화시켜서 접지전류를 크게 흐르게 한다. 그것은 충전전압의 변화에 따른 과도접지임피던스의 분석이 이온화에 따른 접지전류의 급격한 증가를 설명하진 못하고 이 불연속성은 26 kV 이상의 충전전압에서 접지전극의 전압강하에 의해 나타난다. 그러므로 이온화영역에서 접지저항이나 접지임피던스의 효과적인 분석을 위해 접지전류 피크값에 따른 과도접지임피던스를 그림 5와 같이 나타내었다.

접지전류 피크값에 따른 과도접지임피던스 그래프는 그림 5(b)와 (c)에서와 같이 두 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째 영역은 전류가 증가에 따른 선형적인 함수로서 과도임피던스가 반비례한다. 한편 두 번째 영역은 과도임피던스가 경험적인 관계식  $Z = kI_p^a$ 에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 동결토양에서 지중방전을 고려한 소규모 접지전극의 과도접지임피던스를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 약 25 kV 이하의 낮은 인가전압에서 이온화 영역이 나타났다. 이 영역에서는 전압파형에 왜곡이 발생하지 않으며, 전류파형에서의 왜곡은 미비하였다.
- (2) 약 25 kV 이상의 높은 인가전압에서 방전영역이 나타났다. 이 영역에서는 전압과 전류파형의 왜곡이 크게 나타났으며, 방전에 의한 변곡점이 전류파형에 뚜렷이 나타났다.
- (3) 과도접지임피던스는 접지전류가 증가함에 따라 이온화영역에서는 선형적으로 감소하며, 방전영역에서는 지수함수적으로 감소하였다.

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

#### 참고 문헌

- [1] 高橋健彦, “接地・等電位ボンディング設計の實務知識”, ohmsha, 2003
- [2] Yang-Woo Yoo 외, “Ionization Characteristics of a Ground Rod with radial needles under Lightning Impulse”, Asia Lightning Protection Forum, 2008
- [3] Yaqing Liu, Nelson Theethayi, Raul M. Gonzalez and Rajeev Thottappillil, “The Residual Resistivity in Soil Ionization Region Around Grounding System for Different Experimental Results”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol. 2, pp.794-799, 2003