

## 수분 함유량에 따른 모래의 지중방전 특성 분석

(Analysis of soil discharge characteristics in sand with water content)

이복희 · 김희구\* · 박건훈 · 이규선 · 안창환\*\*

( Bok-Hee Lee · Hoe-Gu Kim · Geon-Hun Park · Kyu-Sun Lee · chang-Hwan Ahn

Inha university, Inha technical collage\*\*

### Abstract

It has been known that the value of soil resistance drops when a high impulse current is injected into a grounding electrode. In this paper, impulse generator is used to investigate the dry soil and wet soil characteristics in cylindrical test cell. The impulse resistances and breakdown characteristics were discussed based on its voltage and current traces. As a result, sand resistances are decreased with increasing the applied currents. It was thought that a decrease in resistance of dry sand with increasing current is due to both thermal and ionization processes. On the other hand, in case there is no water presence in the soil, the reduction in resistance as the currents are of dry sand increased is mainly due to the ionization process.

## 1. 서론

접지전극에 뇌격전류와 같은 대전류가 유입하게 되면 접지전극 주변의 전위가 상승하게 되고, 이로 인해 인체의 안전과 각종기들이 위협을 받게 된다. 이러한 위험성을 줄이기 위한 효과적인 접지 시스템을 구축하기 위해서는 임펄스가 접지극에 인가된 후 나타나는 지중방전특성을 이해하는 것이 필요하다. 접지전극이 매설되는 지점의 대지 저항률은 접지의 효과를 크게 좌우하게 된다. 저항률이 작은 장소일수록 낮은 접지저항을 얻기 쉬우므로 접지의 설계와 시공에 있어서 토양의 방전특성과 저항을 낮추게 되는 이온화현상을 정확하게 파악하는 것이 대단히 중요하다. 접지를 시공하는 장소의 대지 저항률은 토질이나 토양내에 함유되어 있는 화학물질, 염분, 수분의 함유량등에 따라 상당히 변화하므로 이들의 특성에 따른 접지저항은 변동하게 된다. 특히 토양의 대지 저항률은 수분함유량에 의해 지배적으로 영향을 받게 된다.<sup>[1]</sup> 따라서 본 논문에서는 건조모래와 수분을 함유한 모래에 1.2/50 [ $\mu$ s] 표준 뇌임펄스 전압을 인가하여 모래에 발생하는 이온화현상 및 지중방전특성을 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1 측정계의 구성

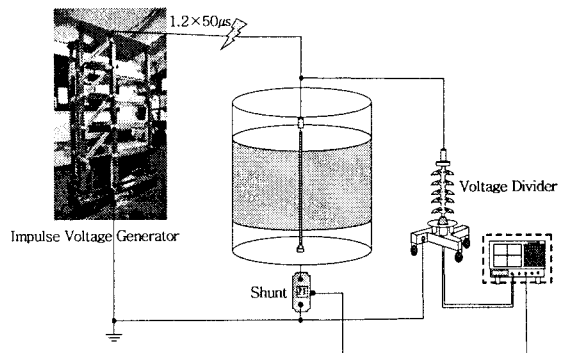


그림 2 실험계 구성

Figure 1 Configuration of the experimental setup

그림 1은 본 실험에 사용된 실험장치 및 측정시스템의 전체적인 구성을 나타낸다. 건조모래와 젖은 모래를 실린더형 용기안에 채우고 정·부극성 뇌임펄스 전압을 인가하였다. 실험장치는 내경 180 [mm]의 스테인레스강을 이용하여 실린더형으로 제작하였으며, 지름이 2.4 [mm]의 원주형 전극을 실험용기의 중앙에 고정시키고, 전극 끝단에서 방전되는 것을 방지하기 위하여 전극을 용기 밖으로 빼내어 설치하였다. 내부전극에 전압을 인가하기 위하여 최대 20 [kJ], 400 [kV]까지 인가할 수 있는 임펄스전압발생기를 사용하였다. 전극에 인가되는 전압은 용량성 분압기(분압비 10,000:1)를 통해 측정하였고, 전류는 0.02 [ $\Omega$ ]의 분류기를 이용하여

전류를 측정하였으며, 모든 파형은 오실로스코프 (BW 500 [MHZ], 2.5 [GS/s])를 사용하여 관찰하였다.

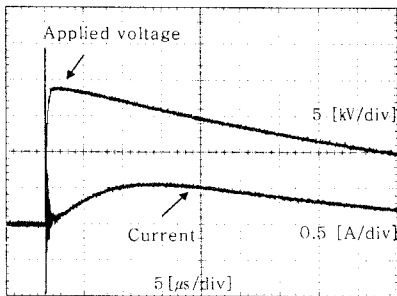
## 2.2 측정방법

본 연구에서는 뇌임펄스전압을 정극성과 부극성으로 바꾸어 가며 실험을 수행하였으며, 토양의 종류는 수분변화가 용이하고 알갱이의 크기를 쉽게 분류할 수 있는 모래로 선정하였다. 토양에 함유되는 수분의 양은 토양을 구성하고 있는 입자의 크기와 조밀도에 의존하기 때문에 한국산업규격 (KSA 5101)에 맞추어 알갱이가 0.425 [mm] ~ 2 [mm]의 중간크기를 갖는 모래로 선정하여 사용하였고, 일정한 압력을 주기 위해 5000 [kPa]의 압력장치를 이용해 압력을 주었다. 수분의 함유는 저항률이 70 [ $\Omega$ ]인 수돗물을 사용하여 모래와 적절하게 혼합하였다.

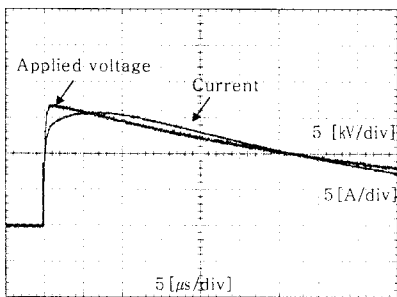
## 2.3 측정결과

### 2.3.1 전압·전류의 파형

실린더형 용기에서 건조모래 또는 젖은 모래를 넣고 임펄스전압을 인가한 때의 대표적인 전압·전류파형의 예를 그림 2에 나타내었다.



(a) dry sand



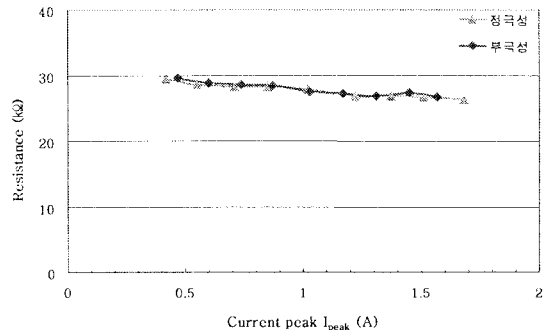
(b) wet sand

그림 2 인가전압 20 [kV]에서 나타나는 전압·전류파형 Figure 2 Voltage and current waveform at the applied voltage of 20 [kV] 건조모래와 젖은 모래에 빠른 상승시간을 갖는

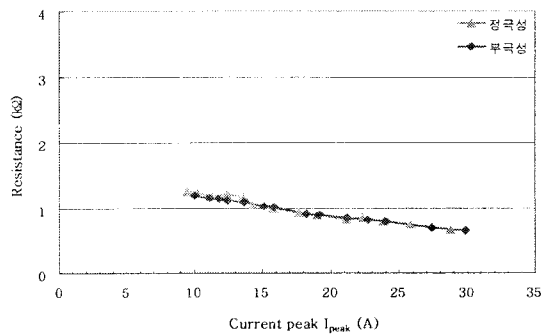
20 [kV]의 임펄스전압을 각각 인가하였다. 건조모래는 매우 작은 전류가 흘러 파형이 완만하게 상승하는 반면 젖은 모래는 수분으로 인해 전도성 전류가 크게 흐르는 것으로 나타났다. 건조모래는 도입부분에 진동성 성분이 나타나게 되는데 이는 전극과 모래의 알갱이 사이의 작은 공극에서 존재하는 캐패시턴스 영향 때문에 발생하는 것이라 생각된다.<sup>[2]</sup> 그리고, 젖은 모래에서는 그림(b)과 같이 전압·전류 파형이 비선형적인 모습을 보이고 있다. 이러한 현상은 인가전압이 높을수록 더욱 뚜렷이 나타났다. 이처럼 임펄스 전압에 따른 전압과 전류 파형이 비선형 곡선을 이루는 것은 토양 알갱이 사이의 공극에서 발생하는 이온화현상에 의한 것으로 판단된다. 또한, 부극성에서의 건조모래와 젖은 모래 모두 정극성과 비슷한 전압·전류파형을 나타냈다.

### 2.3.2 전류피크값에 따른 저항의 변화

그림 3은 건조모래 또는 젖은모래의 피크전류인 순간의 전압값을 측정하여 저항을 산출하였으며, 저항식은 (1)과 같다.



(a) dry sand



(b) wet sand

그림 3 건조모래와 젖은 모래의 전류피크 크기에 따른 저항

Figure 3 Dry and wet soil resistance of as a function of current peak

$$R_1 = \frac{V_{I_{peak}}}{I_{peak}} \quad (1)$$

그림 3에서 볼 수 있듯이 건조모래가 젖은 모래보다 저항이 상당히 높게 나타났고, 두 모래 모두 저항이 감소하는 추세가 나타났다. 하지만 극성에 따른 저항은 변하지 않음을 알 수 있다. 이처럼 저항값이 내려가는 이유는 토양 알갱이 사이의 공극에서 생기는 이온화현상 때문이다. 건조모래에서는 수분이 없기 때문에 이온화현상에 의한 영향으로만 해석해 볼 수 있다. 토양의 알갱이 사이에는 주로 공기로 이루어지게 되는데 전압이 인가되면 전계가 형성되고, 알갱이 사이 공극에서 코로나가 발생하여 결과적으로 토양의 저항이 감소하게 된다.<sup>[3]</sup> 수분을 함유한 모래의 전류는 알갱이 사이의 수분을 따라 흐르고, 이때 열이 발생하여 수분의 온도가 증가하면서 상대적으로 저항은 감소하게 된다. 따라서, 전압을 높일수록 접지전극 주변의 토양은 이온화 영역이 확장됨으로써 저항이 줄어들게 되는 것이다.<sup>[4]</sup>

### 2.3.3 전류피크값에 따른 전류피크까지의 시간분석

전류피크에 따른 전류피크까지의 시간지연을 그림 4에 나타내었다. 건조모래에서는 전류 크기에 따라 시간의 변화는 없고, 젖은 모래에서 전류가 증가할수록 시간이 점차 늦어짐을 알 수 있다. 이렇게 피크까지의 시간지연이 늘어나는 것은 인가 전압을 높였을때, 수분의 함유로 인해 공기와 수분의 이온화가 동시에 일어나면서 이온화 반경이 커지고, 시간 또한 길어지는 것으로 판단된다. 그리고 건조모래와 젖은모래 모두 극성에 따른 큰 차이는 보이지 않았다.

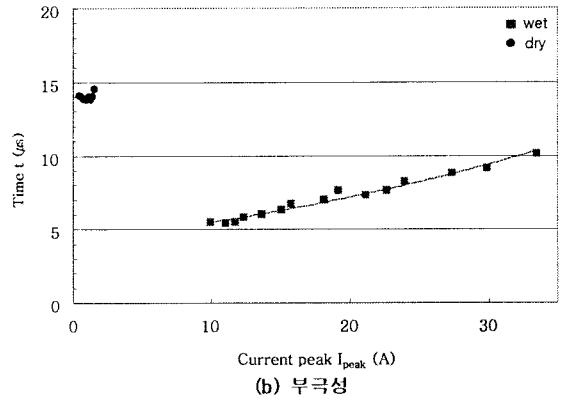
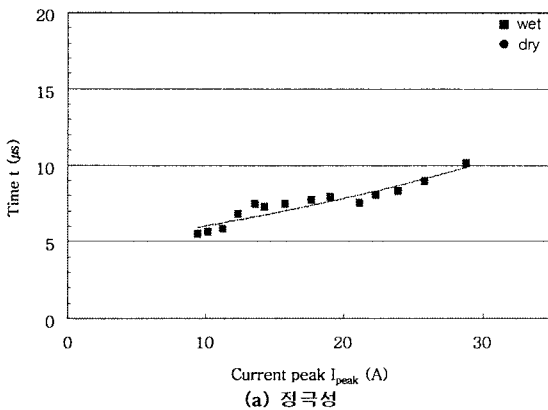


그림 4 정·부극성에 따른 전류피크 시간  
Figure 4 Current peak time( $\mu s$ ) of as a function of positive and negative

### 2.3.4 절연파괴 특성

실린더형 용기에서 건조모래 또는 젖은 모래의 대표적인 절연파괴시 전압과 전류파형의 예를 그림 5에 나타내었다.

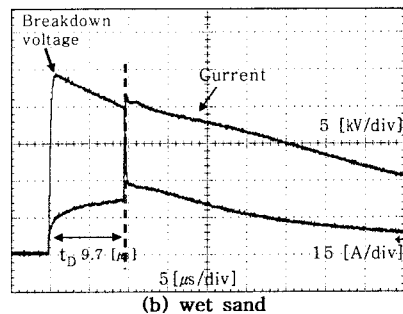
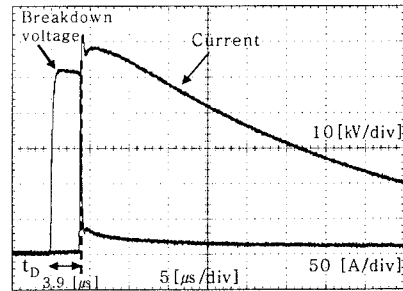


그림 5 절연파괴전압-전류 파형(인가전압 건조모래 59(kV), 젖은 모래 29(kV))  
Figure 5 Breakdown voltage and current waveform

건조모래와 젖은 모래 모두 절연파괴시 전압이 급격히 떨어지고 전류가 상승하는 것으로 나타났다. 건조모래와 젖은 모래의 절연파괴전압은 건조모래일 때 52.6 [kV], 젖은 모래 24.6 [kV]로 건조 상태에서 상당히 전압이 높았고, 절연파괴까지의

시간 또한 빠르게 나타났다. 수분은 공기보다 절연 내력이 높지만 모래에 소량의 수분이 함유되면서 복합유전체로 작용하게 된다. 따라서 방전 시 전류는 물을 따라 흐르게 되는데 그림 (b)에서 볼수 있듯이 앞단에 전류파형이 수분으로 인해 전도성 전류가 흐르면서 절연과피에 이르는 시간은 늦어지게 되고 낮은 전압에서 절연과피가 일어난다. 건조모래는 모래알갱이 사이에 공기가 존재하게 되므로 방전이론은 연면방전과 거의 동일하다고 판단된다. 또한, 실린더형 용기에서는 전계해석이 가능하기 때문에 절연과피임계장도( $E_c$ )를 IEC-60-1을 기준으로 승강법을 사용하여 산출하였다. 그 결과 건조모래는 55.4 [kV], 젖은모래는 24.3 [kV] 평균 절연과피전압값을 얻었다. 계산식은 실린더형 대지 축소 모의 실험장치에서 전계를 구하는 식을 이용하여 계산하였으며, 다음과 같은 전극 표면의 정극성 절연과피 임계전계장도를 산출하였다.

$$E = \frac{V}{r_i \ln \left[ \frac{r_o}{r_i} \right]} \quad (2)$$

$V$  : 절연과피전압

$r_i$  : 전극의 반지름

$r_o$  : 실린더용기의 반지름

건조모래일 때의 전극에 가해지는 전계의 세기는 107.04 [kV/cm]이고, 젖은 모래는 47.05 [kV/cm]로서 절연과피시 임계전계장도가 건조모래에서 더욱 크게 나타났다.

### 3. 결 론

실린더형 모의실험 장치에서 건조모래와 젖은 모래의 전기전도 현상과 절연과피 특성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 임펄스전압이 인가되었을때 건조모래는 전류 초기부분에서 진동하는 모습이 나타나고, 젖은 모래에서는 수분의 영향으로 전도성 전류가 흘렀으며, 전압과 전류 파형은 비선형적이었다. 이러한 현상은 인가전압을 높일수록 더 뚜렷이 나타났다.

(2) 건조모래와 젖은 모래에서의 전류피크에 따른 저항은 극성에 상관없이 인가전류가 증가할수록

감소하는 추세를 보였다.

(3) 건조모래에서는 전류피크에 따른 시간의 변화는 없었지만, 젖은 모래에서는 전압을 높일수록 전류피크에 도달하는 시간이 길어졌다.

(4) 건조모래와 젖은 모래 모두 절연과피시 전압이 급격히 낮아지고 전류가 상승하면서 섬락에 이르렀다. 절연과피전압은 젖은 모래보다 건조모래에서 더 높았고, 시간 또한 건조 모래에서 더 빨랐으며 두모래 모두 극성에 따른 큰 차이는 보이지 않았다.

### 참 고 문 헌

- [1] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술", 의재, 2판, pp.37-104, 1999.
- [2] N. A. Idris, N. Mohamad Nor and H. Ahmad. "Effects of Moisture Contents in Soil and Impulse Polarity of Earth Electrode Under High Impulse Conditions", IEEE 2006
- [3] N. Mohamad Nor and A. Ramli. "Electrical Properties of Dry Soil Under High Impulse Currents", ScienceDirect Trans. Journal of Electrostatics 65 (2007) 500-505
- [4] Shozo Sekioka, Maria I. Lorentzou, Maria p. Philippakou, and Jojn MP rousalidis. "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, January 2006.
- [5] R. Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar. "Experimental Study of Transient Ground Impedances", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 11, November 1981.
- [6] Abdul M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents Into Concentrated Electrodes", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994.
- [7] Patrick Espel, Ricardo R. Diaz, A Bonamy, and J. N. Silva, A. Wetz, "Electrical Parameters Associated with Discharges in Resistive Soils", IEEE Trans, on power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004.