

# 임펄스전압에 의한 토양이온화 현상의 분석

(Analysis of Ionization Phenomena in Soils under Impulse Voltages)

박건훈\* · 김희구 · 최종혁 · 양순만 · 이복희

( Geon-Hun Park · Hoe-Gu Kim · Jong-Hyuk Choi · Soon-Man Yang · Bok-Hee Lee )

인하대학교 IT공과대학 전기공학부

## Abstract

This paper presents characteristics of soil ionization when high currents such as lightning and switching surge currents are injected into a grounding rod. Soil ionization phenomena are investigated by using both voltage and current signals recorded by oscilloscope. As a result, a critical electric field intensity( $E_c$ ) for ionization is decreased with reduction of grain size. The pre-ionization resistance( $R_i$ ) and post-ionization resistance( $R_e$ ) at the sand with fine grain size are getting lower with increasing current magnitude. Finally, the time to ionization( $t_i$ ) and ionization current peak( $t_e$ ) of fine grain size are significantly shorter than those of medium grain size.

## 1. 서론

접지시스템에 뇌서지 전류와 같은 대전류가 유입될 때, 접지전극 주변의 토양에 발생하는 이온화 현상에 관한 많은 연구가 진행되었지만 아직 미미한 단계이며, 토양의 이온화 메커니즘에 대한 이론이 정확하게 정립되어 있지 않은 실정이다. 특히, 토중방전은 기중과 수중방전처럼 시각적인 관찰이 어렵고, 토양의 수분함유, 입자크기, 온도, 압력 등의 토양 내부 상태를 정확하게 예측할 수가 없으므로 토양 내부의 방전현상을 정확하게 관찰하기 어렵다. 토양 내부의 상태에 따라 토양은 다양한 저항률로 변화하며, 지역, 계절, 환경적인 영향을 많이 받는다.[1],[2] 따라서 토양이온화 현상에 영향을 주는 환경적인 요인을 분석하고 이온화현상과 과도임피던스의 상관관계에 대한 포괄적인 연구가 필요하다.

최근의 토중방전에 관한 연구는 토양의 비선형 특성 메커니즘을 2가지 전기적 전도메커니즘으로 제안하였다. [3]~[5] 첫째는 수분을 함유한 모래에서 과도전류에 의한 열적효과이고, 둘째는 토양입자 내부 공극의 전계 강화로 인한 이온화현상이다. 본 논문에서는 두 가지 제안된 메커니즘을 바탕으로 빠른 상승시간을 갖는 표준 임펄스 전압을 인가하여 일정한 수분함유를 갖는 모래에서 입자크기에 따른 토중방전 특성을 분석하였다.

## 2. 본론

### 2.1. 측정계의 구성

그림 1은 토양이온화 특성을 관찰하기 위해 사용된

임펄스전압 발생장치, 전극계 구성, 전압-전류 측정장치 등을 나타내고 있다. 대기구조를 축소 모의하고 전계 계산이 용이하도록 지름이 300 [mm]인 반구형 실험 용기와 25.4 [mm]인 반구형 금속전극을 설치하였다. 실험 용기와 전극간의 거리가 137 [mm]를 유지하도록 금속전극을 용기의 중앙에 설치하였다. 20 [kJ], 400 [kV]까지 인가할 수 있는 임펄스전압발생장치를 이용하여 1.2/50 [ $\mu$ s] 임펄스전압을 반구형 금속전극에 인가하였다. 10,000:1의 용량성 분압기와 0.02 [ $\Omega$ ]의 분류기를 이용하여 전압과 전류를 측정하였으며, 모든 파형은 오실로스코프(BW 500 [MHz], 2.5 [GS/s])를 사용하여 관측하였다.

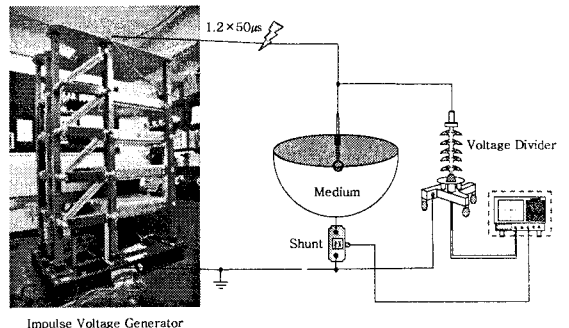


그림 1. 실험계 구성

Fig. 1. Configuration of the experimental set-up

### 2.2. 측정방법

실험에 사용된 토양은 수분함유량의 조정이 용이하고, 입자크기를 쉽게 분류할 수 있는 모래로 선정하였

다. 모래의 입자크기에 따른 이온화현상을 분석하기 위해 ASTM(D 422)와 KS A 5101에서 규정하고 있는 기준을 이용하여 모래의 입자크기를 표 1과 같이 2가지 형태로 구분하였다.[6]

표 1. 입자크기에 따른 모래의 분류

Table 1. Classification of sand according to grain size

모래의 형태	입자 직경 [mm]
중간 모래	0.425 ~ 2
미세 모래	0.425 이하

수돗물(저항률 70 [ $\Omega \cdot m$ ])을 사용하여 토양의 수분함유량을 6 %로 일정하게 유지되도록 하였다. 토양과 수분은 모든 토양에 골고루 수분이 흡수되도록 적절하게 혼합하였고, 수분의 증발에 따른 오차를 최소화하기 위해 수분함유량을 조절한 후 빠르게 실험을 진행하였다. 토양의 이온화는 모래입자 사이의 공극에 의한 영향이 크기 때문에 모든 시료에 일정한 압력을 주기 위해 일정한 무게를 갖는 압력장치를 사용하여 5,000 [kPa]의 압력을 인가한 뒤 실험을 수행하였다.

### 2.3. 측정결과

토양의 이온화 현상을 분석하기 위하여 토양에 임펄스 전압을 인가할 때 나타나는 전압과 전류 파형을 그림 2에 나타내었다.

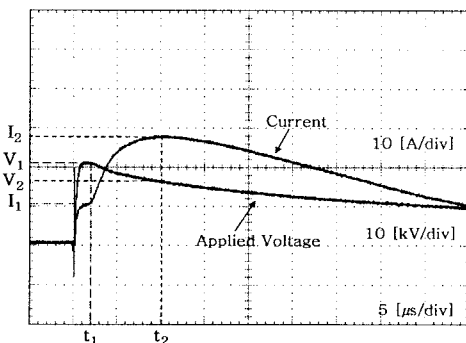


그림 2. 이온화 분석파라미터  
Fig. 2. Analysis parameters of ionization

그림 2의 파형은 전압이 인가되어 이온화가 일어나기 이전까지의 첫째 구간과, 이온화가 일어난 둘째 구간으로 나눌 수 있다. 전류 파형에서 변곡점  $t_1$ 을 기준으로  $t_1$ 은 이온화 개시시간,  $t_2$ 는 이온화 전류 피크시간으로 정의하였다.  $R_1$ 은  $t_1$ 일 때 저항이고,  $R_2$ 는  $t_2$ 일 때 저항을 의미하며,  $R_1$ 은 이온화 전 토양의 전기저항이고  $R_2$

는 이온화 후 토양의 전기저항으로 정의된다.

모래의 입자크기에 따른 이온화 임계전계강도( $E_c$ )를 구하기 위해서 수분함유량 6 %를 갖는 모래에 승강법을 이용하여 임펄스 전압을 10회씩 인가한 후 이온화임계전압을 측정하였다. 이온화 임계전계강도( $E_c$ )는 반구형 대기 축소 모의실험 장치에서 다음과 같이 전극 표면에서 전계강도의 산출식을 이용하여 계산하였다..

$$E(r_1) = \frac{V_0}{r_1^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (1)$$

여기서

$r_1$  : 접지전극의 반경

$r_2$  : 반구형 용기의 반경

$V_0$  : 접지전극에 인가된 전압

을 나타낸다. 토양 내부에서 이온화 반경을 측정하기가 어렵기 때문에 이온화 반경을 접지전극의 반경으로 근사하여 적용하였다.

표 2. 입자크기별 이온화 및 절연파괴 임계전계강도

Table 2. Critical electric field intensities for ionization and breakdown by grain size

모래의 형태	이온화 임계전계강도 [kV/cm]		절연파괴 임계전계강도 [kV/cm]	
	정극성	부극성	정극성	부극성
	중간 모래	11.4	12.3	21.4
미세 모래	10.2	11	25.3	26.2

표 2는 정극성에서 입자크기에 따른 모래의 이온화, 절연파괴 임계전계강도를 나타낸다. 두 입자크기에서 임펄스 전압에 의한 전압, 전류 파형이 모두 비슷하게 나타났다. 미세 모래의 이온화 임계전계강도는 10.2 [kV/cm]로 중간모래보다 더 낮은 전계에서 이온화가 발생하였다. 이것은 미세모래가 입자 속의 공극이 중간모래에 비해 더 작으므로 수분에 의한 전도성 전류가 더 많이 흐르고, 작은 공극은 이온화가 발생되는데 더 낮은 전계가 필요하기 때문에 이온화 임계전계강도가 더 낮다고 판단된다. 반면에, 절연파괴 임계전계강도는 미세모래가 중간모래보다 더 크게 나타났다. 모래의 입자 사이에는 저항률이 70 [ $\Omega \cdot m$ ]인 수돗물과 공기가 혼합된 복합유전체의 성질을 가지고 있기 때문에 공극이 작은 미세모래에서 더 큰 절연파괴 임계전계강도가 나타난 것으로 판단된다. 동일한 조건에서 부극성에서도 정극

성과 마찬가지로 미세모래는 중간모래에 비해 이온화 임계전계강도는 더 낮게 나타났고 절연과피 임계전계강도는 더 크게 나타났다.

토양의 이온화현상으로 인해 첫 번째 피크전류와 두 번째 피크전류가 형성되고, 이온화 전 저항( $R_1$ )과 이온화 후 저항( $R_2$ )을 구할 수 있다. 이 저항은 두 개의 피크전류값과 그 때의 순시전압값을 이용하여 산출하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$R_1 = \frac{V_{I_{peak1}}}{I_{peak1}} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{V_{I_{peak2}}}{I_{peak2}} \quad (3)$$

그림 3은 정극성에서 6 %의 수분을 함유한 모래의 피크전류에 따른 이온화 전과 후의 저항을 나타내었다. 전류크기가 증가함에 따라  $R_1$ ,  $R_2$ 가 모두 감소하였다. 이온화 전 저항  $R_1$ 은 미세모래가 중간모래에 비해 작게 나타났고, 이온화 후 저항  $R_2$ 는 더 큰 전류피크에서 저항이 낮게 나타났다. 이렇게 저항이 감소하는 이유는 수분에 의해 이온성 전도전류가 흐르고, 모래 입자 사이의 공극에서 발생하는 이온화현상 때문이라고 판단된다. 사실상, 토양의 이온화에 의해 유효 접지전극의 반경이 확장되고 그 결과 접지전극 주변 토양의 저항이 감소하게 된다. 부극성에서도 정극성과 마찬가지로  $R_1$ 과  $R_2$ 의 값이 전류피크에 따라 감소하고,  $R_2$ 의 값이  $R_1$ 의 값보다 항상 작게 나타났다.

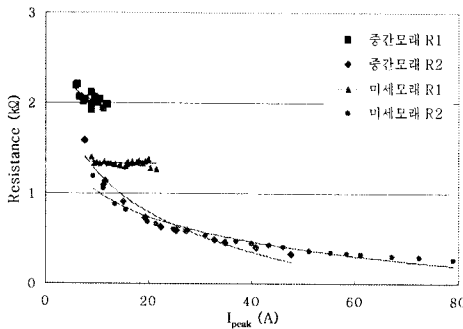
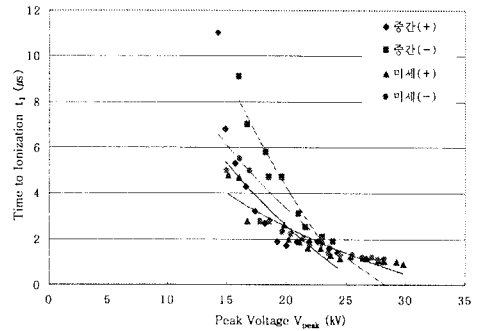


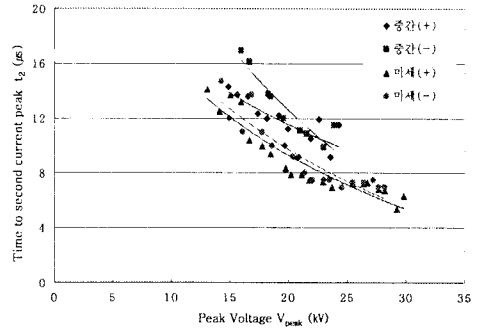
그림 3. 전류피크에 따른 이온화 전·후의 저항  
Fig. 3. Pre-ionization and post-ionization resistances according to current peak

토양의 이온화현상으로 인해 두 개의 피크전류가 나타남에 따라 모래의 전압, 전류 파형을 이용하여 이온화 개시시간  $t_1$ 과 이온화 피크전류시간  $t_2$ 를 분석하였다. 그림 4(a)와 (b)는 6 %의 수분함유량을 갖는 모래

에서 전압크기에 따른 이온화 개시시간  $t_1$ 과 이온화 피크전류시간  $t_2$ 를 나타내었다. 전압크기가 증가함에 따라 두 지연시간이 모두 감소하였다. 미세모래는 이온화 개시시간과 이온화 전류피크시간이 중간모래에 비해 더 빠른 시간에 나타났다. 이것은 낮은 전압과 전도도가 낮은 토양에서는 이온화 현상이 잘 발생하지 않아 토양의 이온화영역이 더 작게 만들어지기 때문이라고 판단된다.  $t_1$ ,  $t_2$  모두 부극성에 비해 정극성이 더 빠른 시간에서 진행되었다. 또한 전압크기가 절연과피전압에 도달할수록 임펄스 파형의 과두시간 근처에서 이온화가 시작되는 것을 확인하였다.



(a) 이온화 개시시간( $t_1$ )



(b) 이온화 전류피크시간( $t_2$ )

그림 4. 전압에 따른 토양이온화 시간 파라미터  
Fig. 4. Time parameters for soil ionization against voltage

그림 5(a)~(c)는 동일한 수분함유 6 %와 인가전압 25 kV에서 모래의 입자크기에 따른 전압 파형, 전류 파형, 임피던스 곡선을 나타내었다. 전압파형은 이온화가 일어나는 시간 범위에서 미세모래가 중간모래에 비해 더 큰 전압강하가 나타났고, 더 작은 피크전압이 관찰되었다. 전압파형을 통해 이온화가 더 잘 일어나는 토양에서는 위험전압과 전위강하 측면에서 더 효과적임을 확인할 수 있다. 전류파형에서는 미세모래가 이온화 개시시간과 이온화 피크시간이 더 빨리 나타났고, 동일한 인가전압에서 전류도 더 크게 나타났다. 전압파형과 전류파형을 이용한 임피던스 특성곡선은 임피던스 곡선의

시작부분인 전도성 구간, 임피던스가 감소하는 이온화 구간, 임피던스가 처음 크기로 다시 돌아오는 탈이온화 구간으로 나눌 수 있다.

미세모래는 중간모래보다 이온화가 빠르게 시작되고, 이온화의 지속시간이 길며, 회복속도는 오히려 늦어지는 것을 나타낸다.

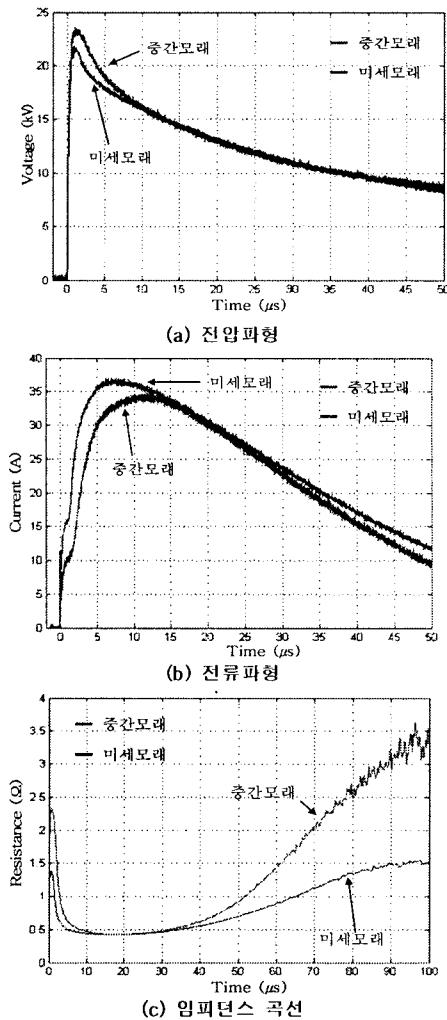


그림 5. 수분함율 6 %와 인가전압 25 kV에서 입자크기에 따른 전압과 전류파형 및 임피던스 곡선  
 Fig. 5. Voltage and current waveforms and impedance curves for different grain sizes at 25 kV and water content of 6 %

토양의 이온화 현상이 나타나지 않는다고 가정하면, 첫 번째의 전도성구간이 지속되어 임피던스가 일정하게 유지된다. 하지만 토양의 이온화 현상으로 인해 전도성 전류뿐만 아니라 이온성 전류가 함께 흐르기 때문에 토양의 임피던스는 감소한다. 이온화 전류가 최대 크기에 도달했을 때 임피던스는 최저로 감소하고, 그 이후에는 이온들이 재결합하는 탈이온화 현상으로 인해 임피던스가 다시 처음 임피던스 크기로 돌아오게 된다.[7] 미세모래는 이온화가 중간모래에 비해 빠르게 진행되고, 탈이온화는 더 천천히 진행되는 것을 확인할 수 있다. 즉,

### 3. 결론

임펄스 전압에 의한 반구형 대지 축소 모의 실험장치에서 모래의 입자크기에 따른 이온화 현상을 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

전압, 전류 파형을 이용하여 관찰한 미세모래와 중간모래의 방전현상은 유사한 현상이 나타났다. 미세모래의 이온화 임계전계강도는 중간모래보다 더 낮았으며, 반면에 절연과피 임계전계강도는 더 높게 나타났다. 또한 미세모래는 이온화 전과 후의 저항이 중간모래보다 더 작게 나타났다. 이온화 개시시간과 이온화전류 피크 시간도 미세모래가 중간모래보다 더 빠르게 나타났으며, 부극성보다 정극성에서 더 빠르게 진행되었다. 이온화가 한번 진행되면 토양의 임피던스가 상당히 감소하였다가 시간이 지나면 처음의 임피던스로 회복되는 특성이 파악되었다. 미세모래가 중간모래에 비해 이온화는 더 빨리 시작되고, 탈이온화는 서서히 진행되는 것을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술", 의제, 2판, pp.37-104, 1999.
- [2] ANSI/IEEE Std 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", pp. 49-68.
- [3] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H Griffiths, New Orleans, USA, "Factors Affecting Soil Characteristics under Fast Transients", International Conference on Power Systems Transients, 2003.
- [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] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H Griffiths, "Determination of Threshold Electric Field  $E_c$  of Soil Under High Impulse Currents," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, pp. 2108-2113, July. 2005.
- [6] Robert D. Holtz, William D. Kovacs, "An Introduction to Geotechnical Engineering", Prentice Hall, pp. 25-31, Jan. 1981.
- [7] Shozo Sekioka, Maria I. Lorentzou, Maria P. Philippakou, and John M. Prousalidis, "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 21, pp. 194-201, Jan. 2006.