

## 토양종류에 따른 임펄스전압에 의한 이온화 현상

박건훈, 김희구, 김정철, 김기복, 이복희  
인하대학교

### Ionization Phenomena caused by Impulse Voltages in various soils

Geon-Hun Park, Hoe-Gu Kim, Jung-Cheol Kim, Ki-Bok Kim, Bok-Hee Lee  
INHA University

**Abstract** - The resistivity of soils around ground electrodes is changed considerably according to the factors such as soil types, water contents, grain size, temperature and pressure. In this study, ionization characteristics of different soil types containing the same amount of water content due to the impulse voltages are investigated. In order to analyze soil ionization phenomena, critical electric field intensity for ionization and pre-ionization and post-ionization resistances are measured and discussed.

#### 1. 서 론

접지전극이 매설되는 토양은 각 지역, 계절, 환경에 따라 저항률이 다양하게 변화하며 토양특성 또한 다르게 나타난다.[1] 특히, 토양의 종류, 수분함유량, 입자크기, 온도, 압력, 전해질 함유 정도에 따라 다르게 발생하는 접지전극 주변에서의 방전현상으로 인해 접지의 효과도 크게 달라지게 된다. 하지만 각 토양에서 발생하는 토중방전 메커니즘에 관한 연구는 아직 미흡한 상태이며, 접지시스템의 중요성이 부각되는 현 시점에서 각 토양의 방전 특성에 관한 분석이 필요하다. 특히, 국내의 지형은 주로 산악지역, 평야지역과 해안지역 등으로 이루어져 있어 각 지역의 대표적인 토양에 관한 방전특성의 이해가 필요하다. 이전의 논문에서는 접지시스템에 뇌임펄스전압이 인가될 때, 접지전극 주변의 토양에 이온화 현상이 발생함을 확인하였다.[2] 토양의 이온화는 뇌서지의 방출을 더욱 용이하게 하여 전위상승을 최대한 억제함으로써 위험전압으로부터 인체와 각종 장비를 보호하는데 효과적인 역할을 한다.[3] 따라서 본 논문에서는 각 토양에서 임펄스전압의 극성과 토양 저항률에 따른 토양의 이온화 임계전계강도와 이온화 전과 후의 저항변화 등을 분석하여 각 토양에서 발생하는 토양이온화 현상이 접지임피던스에 미치는 영향을 분석하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 실험계 구성 및 방법

###### 2.1.1 실험계 구성

임펄스전압에 의한 토양이온화 현상을 관찰하기 위해 사용된 임펄스전압 발생장치, 전극계 구성 및 전압과 전류 측정장치 등을 그림 1에 나타내었다. 전극계를 구성하기 위하여 대지구조를 모의하고 전계 계산이 용이하도록 지름이 300 [mm]인 반구형 실험 용기 중앙에 지름이 25.4 [mm]인 구형 금속전극을 1/2만 매설되도록 설치하였다. 실험 용기와 전극간의 거리는 137.3 [mm]이며 실험 용기는 분류저항을 통해 접지로 연결하였다. 20 [kJ], 400 [kVp]까지 인가할 수 있는 임펄스전압발생장치를 이용하여 1.2/50 [ $\mu$ s] 표준뇌임펄스전압을 접지전극을 모의한 구형 금속전극에 인가하였다. 용량성 분압기와 감쇠기를 연결하여 10,000:1의

비율로 전압을 측정하였고, 0.02 [V/A]의 응답감도를 갖는 분류기를 이용하여 전류를 측정하였으며, 모든 파형은 오실로스코프(BW 500 [MHz], 2.5 [GS/s] 4채널)를 사용하여 관측하였다.

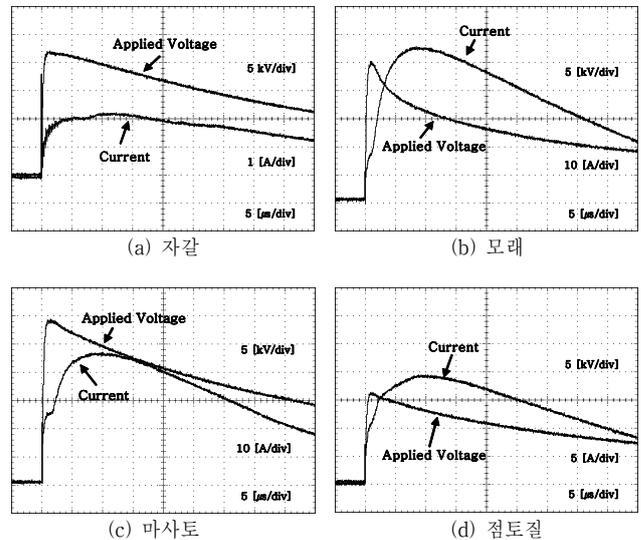
##### 2.1.2 실험방법

실험에 사용된 토양은 자갈, 모래, 점토질, 마사토로 선정하였다. 토양 이온화는 적절한 수분의 함유가 필요하므로 각 토양을 건조시킨 후 저항률이 70 [ $\Omega \cdot m$ ]인 수돗물을 사용하여 모든 토양의 수분함유량을 6 [%]로 일치시켰다. 모든 토양에 골고루 수분이 흡수되도록 적절하게 혼합하였고, 수분의 증발에 따른 오차를 최소화하기 위해 수분함유량을 조절한 직후 실험을 진행하였다. 모래입자 사이의 공극에 의해 토양이온화에 미치는 영향을 피하기 위해 모든 시료에 일정한 압력을 주도록 압력장치를 사용하여 5 [kPa]의 압력을 인가한 뒤 실험을 수행하였다.

##### 2.2 이온화 현상의 분석

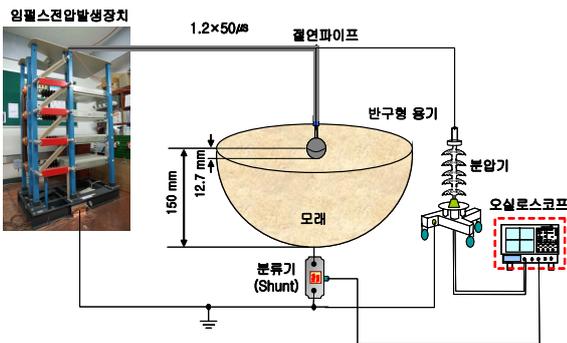
###### 2.2.1 이온화 전압과 전류 파형

각 토양에 이온화 임계전계 이상의 뇌임펄스전압을 인가할 때, 절연과 파괴 직전에 발생하는 토양이온화 현상을 나타내는 전압과 전류 파형의 예를 그림 2에 나타내었다.



<그림 2> 이온화 전압과 전류 파형

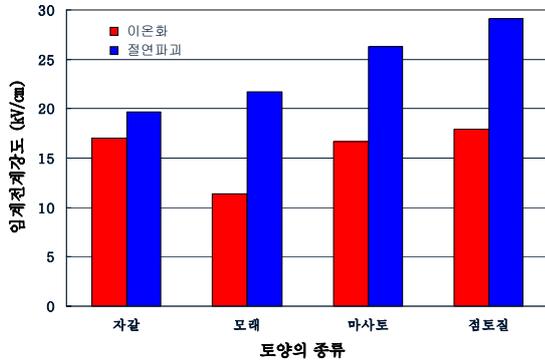
각 토양에서의 이온화 전압과 전류 파형은 다양한 형태로 관찰되었으며, 전류의 크기도 토양에 따라 다르게 나타났다. 모든 토양의 전류파형에서는 첫 번째 피크전류와 두 번째 피크전류가 관찰되었으며, 전압 파형에서는 전위강화가 관찰되었다. 그림 2(a)에서 자갈은 전류의 크기가 비교적 작으며, 이온화에 의한 번극점이 불규칙하게 관찰되었다. 이것은 자갈의 입자 크기가 불규칙하고 입자 사이의 공극의 크기가 다른 토양에 비해 상당히 크므로 이온화에 의한 스트리머의 진전이 불규칙하게 나타나기 때문이라고 판단된다. 모래는 입자의 크기가 균등하여 이온화에 의한 스트리머의 진전이 규칙적으로 진행되었음을 그림 2(b)에서 확인할 수 있다. 마사토와 점토질 또한 전압, 전류의 파형이 모래의 파형과 비슷하게 관찰되었으나, 단지 이온화전류 피크크기와 전압의 전위강하에만 다소 차이가 나타났다.



<그림 1> 실험계의 구성

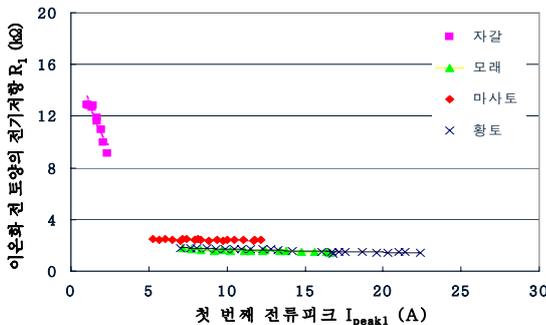
### 2.2.2 이온화 및 절연파괴 임계전계강도

동일한 조건에서 이온화 및 절연파괴 임계전계강도( $E_c$ )를 구하기 위하여 승강법을 이용하여 임펄스전압을 10회씩 각 토양에 인가한 후 임계전압을 측정하였다. 그림 3은 정극성에서 6%의 수분함유량을 갖는 각 토양의 전극 표면에서 전계강도를 계산하는 산출식을 이용한 이온화 및 절연파괴 임계전계강도( $E_c$ )를 나타낸다.

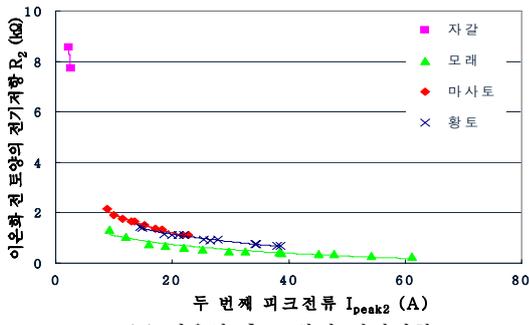


〈그림 3〉 토양종류에 따른 이온화 및 절연파괴 임계전계강도

모래의 이온화 임계전계강도가 11.39 [kV/cm]로 가장 낮았으며 나머지 토양은 약 17 [kV/cm]로 비슷하게 나타났다. 모래가 6 [%]의 수분을 함유한 토양에서 이온화가 가장 쉽게 일어나지만 이 크기로 다른 토양과 상대적인 비교는 할 수 없다고 판단된다. 각 토양에는 수분의 양을 하부로 배수되지 않고 최대 수 용할 수 있는 포장용수량이 존재하는데, 중량함수비로 점토질의 포장용수량은 약 32 [%], 모래는 약 12 [%]이며 자갈은 약 5 [%] 이하이다.[4] 모래는 동일한 수분함유에서 더 낮은 전압에서 이온화가 발생되지만, 점토질에 비해 많은 수분을 함유하지 못한다. 하지만 점토질의 토양은 6 [%]의 수분함유에서는 생장저해 수분점 이하의 수분함유량이기 때문에 토양과 수분의 혼합이 완전하지 못하다. 실제 비가 많이 내리는 날에 너서지가 발생할 확률이 더 크기 때문에, 추후에 각 토양의 포장용수량이 혼합된 토양에서 실험을 진행할 예정이다. 절연파괴 임계전계강도는 자갈이 가장 낮게 나타났으며 점토질에서 가장 크게 나타났다. 자갈은 가장 큰 공극을 가지고 있으므로, 이온화가 발생하여 절연파괴가 이르는 전압의 범위가 가장 좁게 나타났다. 반면에, 점토질에서는 수분이 혼합되면 토양입자와 물분자간에 작용하는 흡착력



(a) 이온화 전 토양의 전기저항



(b) 이온화 후 토양의 전기저항

〈그림 4〉 토양종류에 따른 이온화 전후의 전기저항

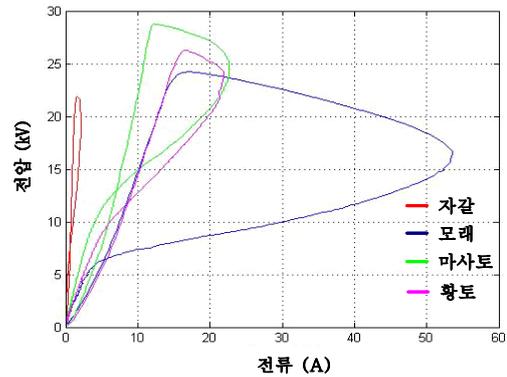
이 강하기 때문에 공극이 매우 작아 절연파괴 전압이 가장 크게 나타났다.

### 2.2.3 이온화 전과 이온화 후의 전기저항

그림 4는 6 [%]의 수분을 함유한 각 토양에서 전류크기에 따른 이온화 전과 이온화 후의 전기저항을 나타낸다. 자갈을 제외하면 수분함유가 증가할수록 전류크기에 따른 이온화 이전의 전기저항  $R_1$ 은 거의 일정하고, 단지 토양의 종류에 따라서 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 여기에서 전류피크점에서의 전기저항을 이온화 전후의 전기저항으로 정의하였다. 이온화가 일어나기 전의 토양의 전기저항이므로 토양의 저항률과 수분에 의한 전도전류에 의해서만 영향을 받기 때문에 각 토양에 따라  $R_1$ 이 다르게 나타난다고 판단된다. 전류 크기가 증가함에 따라 이온화 이후의 전기저항  $R_2$ 가 감소하는 현상은 그림 4(b)에 나타나 있다. 동일한 수분함유에서는 모래의 저항이 가장 낮게 나타났고, 자갈이 가장 높게 나타났다. 이렇게 저항이 감소하는 이유는 수분에 의해 이온성 전도전류가 흐르고, 토양 입자 사이의 공극에서 발생하는 이온화현상 때문이라고 판단된다. 토양의 이온화에 의해 유효 점지전극의 반경이 확장되고 그 결과 점지전극 주변 토양의 저항이 감소하게 된다. 토양의 종류에 따라 공극의 크기에 차이가 있고 수분을 흡수하는 능력이 다르기 때문에  $R_2$ 가 각 토양에서 다르게 나타났다.

### 2.2.4 I-V 곡선

전압파형과 전류파형을 기초로 산출한 각 토양의 I-V 곡선을 그림 5에 나타내었다. 페루프 원점과 페루프곡선의 한점을 잇는 직선의 기울기는 저항을 나타내므로 이온화 전의 저항은 자갈이 가장 크고 다른 토양은 비슷하게 나타났으며 이온화 후의 저항은 모래가 가장 작게 나타났다. 각 토양의 이온화 현상으로 인해 페루프곡선이 생성되었고 자갈의 면적이 가장 작으며 모래의 면적이 가장 크게 나타났다.



〈그림 5〉 동일한 수분함유에서 토양종류에 따른 I-V 곡선

## 3. 결 론

본 논문에서는 임펄스전압에 의한 반구형 대지 모의 실험장치에서 동일한 수분함유량을 갖는 다양한 토양의 토양이온화 현상에 대해 분석하였다. 각 토양에 이온화가 발생된 전압, 전류 파형은 다양하게 관찰되었으며 모든 토양에서 첫 번째 피크전류와 두 번째 피크전류가 관찰되었다. 토양에 따라 절연파괴 임계전계강도는 자갈이 가장 낮고, 점토가 가장 높으며 이온화 임계전계강도는 모래가 가장 낮게 나타났다. 피크전류의 증가에 따라 이온화 전과 후 저항은 자갈이 가장 크게 나타났다. 이온화 전 저항은 각 토양의 저항률에 비례하여 나타났고, 이온화 후 저항은 두 번째 이온화 전류의 크기에 따라 다소 차이가 나지만 모래, 마사토, 점토는 거의 비슷한 저항특성을 보였다. 각 토양의 I-V 곡선에서 자갈의 기울기가 가장 크고, 모래가 가장 작게 나타났으며, 자갈은 이온화가 잘 나타나지 않았으나 다른 토양은 페루프곡선을 띄고 있어 이온화 현상이 잘 나타났다고 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술", 의제, 2판, pp.37-104, 1999.
- [2] 박건훈, 김희구, 최종혁, 양순만, 이복희, "임펄스전압에 의한 토양이온화 현상의 분석", 한국조명전기설비학회 2008춘계학술대회 논문집, pp.305-308, 5월, 2008.
- [3] 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.
- [4] C.W.Fetter, "Applied Hydrogeology," Prentice Hall, pp. 173-194, 1994.