

반구형 전극계에서 뇌임펄스전압에 의한 토양의 종류별 이온화 특성

論 文

58-1-19

Ionization Behaviors by Types of Soil due to Lightning Impulse Voltages in a Hemispherical Electrode System

李圭善* · 朴建勳** · 金會九** · 李福熙†

(Kyu-Sun Lee · Geon-Hun Park · Hoe-Gu Kim · Bok-Hee Lee)

Abstract - This paper deals with the characteristics of soil ionization affecting the dynamic performance of grounding systems under lightning impulse voltage. A concentric hemispherical electrode system was employed in order to facilitate the field calculation and analysis of the experimental results. The parameters such as the ionization threshold and breakdown field intensity, the pre-ionization and the post-ionization resistances, the time-lag to ionization, the transient impedance, the equivalent ionized radius for various soil media were measured and analyzed. The dynamic characteristics of ionization processes under lightning impulse voltage are strongly dependent on the types of soil and water content. As a result, a soil ionization reduces the ground resistance and there is a little effect of applied impulse polarity on the soil ionization threshold field intensity. Although the ionization threshold field intensity of wet clay with 30 % water content is the highest, its ionized zone was found to be the smallest amongst the test samples.

Key Words : Soil ionization, Transient ground impedance, Time lag to ionization, Ionization threshold field intensity

1. 서 론

접지전극이 매설되는 토양은 각 지역, 계절, 환경에 따라 저항률이 다르며, 토양의 특성 또한 다양하다. 특히 높은 전압이 인가된 접지전극 주변에서의 방전현상은 토양의 종류, 수분함유량, 입자의 크기, 온도, 압력, 조밀도, 전해질의 함유 정도 등에 따라 다르며, 접지의 효과에 큰 영향을 준다 [1-2]. 하지만 여러 가지 토양의 조건에서 발생하는 토중방전 메커니즘에 관한 연구는 아직 충분하지 않은 상태이며, 접지시스템의 중요성이 부각되는 현 시점에서 토양의 방전 특성에 관한 상세한 분석이 필요하다. 우리나라의 지형은 주로 산악지역, 평야지역과 해안지역 등으로 이루어져 있어 각 지역의 대표적인 토양에 관한 방전특성의 이해가 필요하다. 이전의 연구에서 접지전극시스템에 임펄스전압이 인가될 때, 접지전극 주변의 토양에 이온화 현상이 발생됨을 확인하였다[3-5]. 토양의 이온화 작용은 뇌서지전류의 방출을 더욱 용이하게 하여 접지전극의 전위상승을 억제함으로써 접지설비에 발생하는 위험전압으로부터 인체와 각종 전기전자장비를 보호하는데 효과적인 역할을 한다. 토양의 이온화가 발생하기 쉬운 토양의 형태를 찾고, 그 형태의 토양에 접지전극을 매설하면 접지시스템의 효과를 더 향상시킬 수 있다고 판단된다. 따라서 본 논문에서는 반구형 접지전극에

표준뇌임펄스 전압을 인가하여 토양의 종류에 따른 임펄스 전압의 극성과 이온화 임계전계강도 및 이온화 전과 후의 접지저항변화 등을 관찰한 결과를 바탕으로 각 토양에서 발생하는 이온화 현상이 접지임피던스에 미치는 영향을 분석/검토하였다.

2. 실험계의 구성 및 방법

뇌임펄스전압에 의해서 발생하는 토중방전 현상을 관찰하기 위해 사용된 임펄스전압 발생장치, 전극계 구성 및 전압-전류 측정장치 등의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 본 연구에서는 동축 반구형 접지전극시스템으로 지름이 300 [mm]인 반구형 실험 용기의 중앙에 지름 25.4 [mm]인 구형 금속전극을 토양에 반만 매설되도록 설치하였다. 이러한 반구형 접지전극시스템은 대지구조를 축소 모의하는 가장 간단한 방법으로 해석적 전계 계산이 가능하며 토양의 표면에 과도한 전계가 발생하는 것을 방지할 수 있으므로 선정하였다. 충전에너지 20 [kJ], 최대 발생전압 400 [kV]인 임펄스전압발생장치를 이용하여 1.2/50 [μ s] 표준뇌임펄스전압을 접지전극을 모의한 반구형 금속전극에 인가하였다. 10,000:1 용량성 분압기와 감쇠기를 연결하여 전압을 측정하였고, 0.02 [Ω]의 분류기를 이용하여 전류를 측정하였다. 데이터 획득을 위해 4채널의 오실로스코프(BW 500 [MHz], 2.5 [GS/s])로 전압 및 전류 파형을 측정하고 Matlab 프로그램을 이용하여 데이터를 분석하였다. 제어장치와 데이터취득장치는 차폐함에 내장시켰고, 측정장치의 전원부에는 잡음과 외란에 대한 영향을 피하기 위해 절연변압기를 설치하였다.

† 교신저자, 正會員 : 仁荷大學校 電氣工學部 教授
E-mail : bhlee@inha.ac.kr

* 正會員 : 仁荷大學校 電氣工學部 博士課程

** 準會員 : 仁荷大學校 電氣工學部 碩士課程

接受日字 : 2008年 9月 23日

最終完了 : 2008年 10月 20日

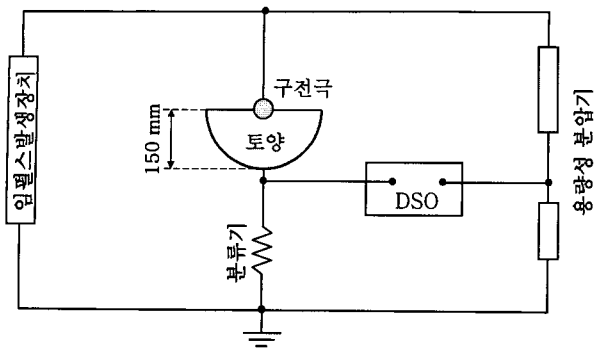


그림 1 실험장치의 개략도
Fig. 1 Block diagram of the experimental setup

실험에 사용된 토양은 국내에 많이 분포되어 있는 자갈, 모래, 황토, 마사토로 선정하였으며, KS A 5101에 규정된 표준체로 측정된 입도의 토양을 시료로 사용하였다. 자갈의 입도는 9.5 mm의 표준체망을 통과하고 16 mm 체망을 통과하지 않은 즉, 9.5~16 mm의 크기이다. 모래의 입도는 2~4.75 mm, 마사토의 입도는 0.425~2 mm, 황토의 입도는 0.425 mm 미만이다.

본 연구에 사용된 토양의 종류별 포장용수량인 수분함유량을 표 1에 나타내었다. 또한 실제 비가 내리는 환경을 모의하기 위해 도전율이 454.5 $\mu\text{S}/\text{m}$ 인 빗물을 각 토양에 혼합하였다. 모든 토양에 골고루 수분이 흡수되도록 적절하게 혼합하였고, 수분의 증발에 따른 오차를 최소화하기 위해 수분함유량을 조절한 직후 실험을 진행하였다. 토양입자사이의 치밀도와 접지전극과의 접촉상태를 정량적으로 나타내기는 매우 어려우며, 토양입자 사이의 공극이 토양이온화에 미치는 영향을 피하기 위해 압력장치를 사용하여 5 [kPa]의 일정한 압력을 모든 시료에 인가한 뒤 실험을 수행하였다.

표 1 토양의 종류별 수분함유량
Table 1 Water content by types of soil

수분의 형태	도전율 $[\mu\text{S}/\text{m}]$	수분함유량 [%]			
		자갈	모래	마사토	황토
빗물	454.5	5	15	24	32

입펄스시험은 각 토양에 대해 15 [kV]에서 100 [kV]범위의 전압으로 수행하였다. 토양의 이온화 현상과 관련된 전압과 전류 파형, 물리적, 전기적 파라미터로서 이온화 및 절연파괴 임계전계강도와 이온화 전과 후의 저항변화, 과도임피던스 등을 분석하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 전압과 전류파형

토양에는 비가 내리고 일정한 시간이 경과한 후 증력배수에 의해 수분이 하부로 배수되지 않고 최대 수용할 수 있는 포장용수량이 존재하는데, 중량함수비로 점토질인 황토의

포장용수량은 약 32 [%], 마사토는 약 24 [%], 모래는 약 12 [%]이며 자갈은 약 5 [%] 이하이다[6]. 실제로 내리는 비가 내리는 날에 대부분 발생되기 때문에 접지전극시스템이 매설깊이 0.5 [m]이내에는 빗물에 의해 흠뻑 젖게 될 수도 있다. 따라서 본 실험에서는 도전율이 454.5 $\mu\text{S}/\text{m}$ 인 실제 빗물을 사용하여 각 토양의 포장용수량에 맞추어 토양과 혼합하였고, 실제의 환경과 동일한 조건으로 축소모델 장치를 설정하였다.

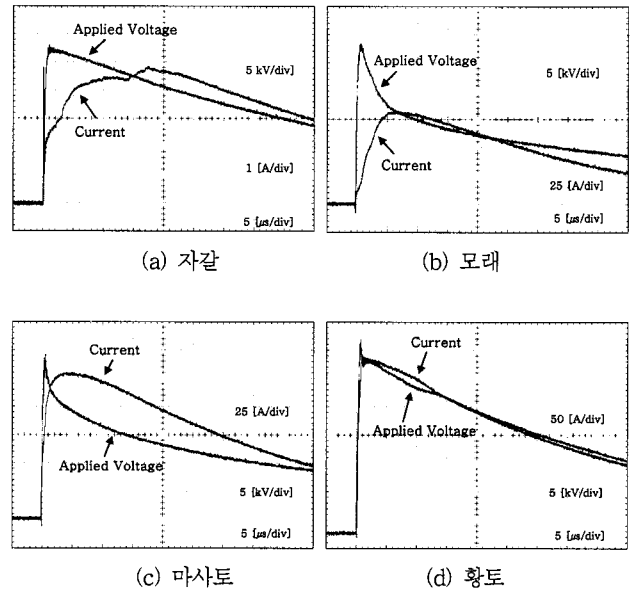


그림 2 토양의 종류별 대표적인 전압 및 전류 파형
Fig. 2 Typical voltage and current traces by types of soil

각 토양에서 뇌임펄스전압에 의한 이온화 발생 시에 나타나는 전압과 전류 파형은 그림 2와 같이 다양한 형태로 관찰되었으며, 전류의 크기도 토양에 따라 큰 차이가 나타났다. 모든 토양의 전류파형에서는 첫 번째 피크전류와 두 번째 피크전류가 관찰되었으며, 전압 파형에서는 전위강하가 관찰되었다.

그림 2(a)에 나타난 자갈은 전류의 크기가 비교적 작으며, 이온화에 의한 변곡점이 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. 마사토 또한 전압과 전류의 파형이 모래의 파형과 비슷하게 관찰되었으나, 단지 이온화 전류의 크기와 전위강하에만 약간의 차이가 나타났다. 황토의 경우에는 그림 2(d)와 같이 이온화가 파형의 피크 부분에서만 진행되었고, 그 이후 시간에는 선형적인 모습이 관찰되었다.

모든 시료의 토양에서 낮은 인가전압에서는 파미 부분에서 전류의 변곡점이 관찰되었으나 인가전압이 상승할수록 이온화가 발생하는 시간이 짧아져서 파두 부분에서 발생하였음을 확인하였다.

3.2 이온화 특성 파라미터의 정의

토양에 이온화 임계전계 이상의 전압을 인가할 때 나타나는 전형적인 전압과 전류 파형을 그림 3에 나타내었다. 일반적으로 토양의 비선형 특성은 두 번째 피크전류가 관찰될 때 발생된다고 알려져 있다. 토양의 이온화 현상으로 인해 전위가 낮아짐에 따라 전류가 급격하게 상승하여 결국 토양의 저항이 감소하는 현상이 나타나게 된다. 두 개의 피크전류는 열적효과와 이온화 과정에 의해 기인된다고 판단된다 [3].

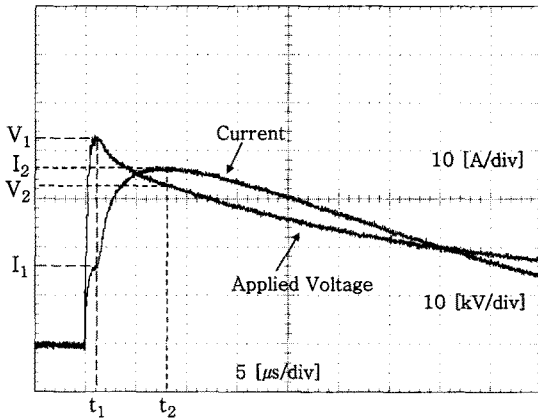


그림 3 토양이온화에 관련된 전형적인 전압과 전류 파형 및 특성파라미터의 정의

Fig. 3 Typical voltage and current traces and the definition of characteristic parameters in relation to soil ionization

그림 3의 전류파형은 전압이 인가되어 이온화가 일어나기 이전까지의 첫 번째 구간과, 이온화가 일어난 후의 두 번째 구간 즉, t_1 의 전후 2구간으로 나눌 수 있다. 이온화 임계전압 이상의 임펄스전압이 접지전극에 인가될 때, 스트리머는 반구형 접지전극의 표면에서 시작하여 토양매질을 통과해 반구형 시험 용기를 향해 진전해 간다. 두 번째 피크전류 (I_2)는 이러한 스트리머의 발생으로 인해 형성된 방전전류를 포함한다. 전류 파형에서 변곡점 t_1 을 기준으로 t_1 은 이온화 개시시간, t_2 는 이온화 전류 피크시간으로 정의한다. 이온화 전 토양의 전기저항(R_1)은 시간 t_1 에서의 저항으로 정의하며, 이온화 후 토양의 전기저항(R_2)은 시간 t_2 에서의 저항으로 정의한다.

각 실험조건에서 이온화 임계전계강도를 구하기 위해서 승강법을 이용하여 임펄스전압을 10회씩 토양에 인가한 후 이온화임계전압을 측정하였다. 이온화 임계전계강도는 반구형 대지 축소 모의실험장치에서 다음과 같이 전극 표면에서 전계강도의 산출식을 이용하여 계산하였다[7].

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

여기서

r_1 : 반구형 접지전극의 반경

r_2 : 반구형 용기의 반경

V_0 : 접지전극에 인가된 전압

을 나타낸다. 토양 내부에서 이온화 반경을 측정하기가 어렵기 때문에 이온화 영역을 반구로 가정하여 이온화 반경을 계산하였다.

3.3 토양의 이온화 특성

3.3.1 이온화 임계전계강도

정극성에서 포장용수량의 수분을 함유한 각 토양의 이온화와 절연파괴 임계전계강도(E_c)를 그림 4에 나타내었다. 마사토의 경우 입자의 크기는 거의 모래와 비슷하나 보습성도 양호하기 때문에 더 이온화가 잘 발생된다고 판단된다. 황토의 경우에는 수분의 함유로 인해 공극이 매우 작아져 이온화가 발생하는데 높은 전계가 필요한 것으로 판단된다. 토양의 이온화 임계전계강도와 비교하기 위해 계산된 절연파괴 임계전계강도에서는 자갈이 가장 낮게 나타났고 황토에서 가장 크게 나타났다. 공극을 포함하는 토양시료 표면을 따른 연면의 절연내력이 수분의 절연내력보다 낮기 때문에 공극이 상대적으로 큰 자갈이 절연파괴 임계전계강도가 낮게 나타났고 공극의 크기가 작아질수록 크게 나타난 것으로 판단된다.

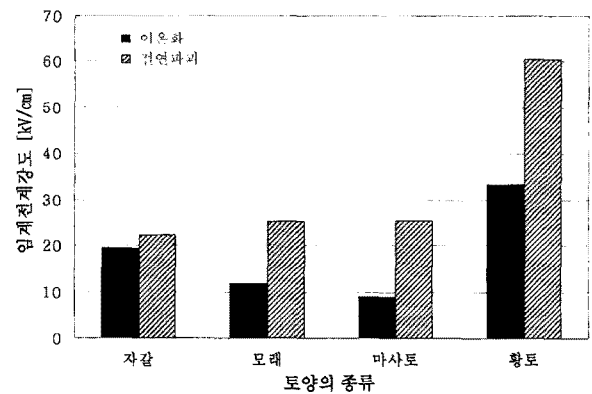


그림 4 토양의 종류별 이온화 및 절연파괴 임계전계강도
Fig. 4 Ionization threshold and breakdown field intensity by types of soil

정극성과 부극성의 임펄스전압에 대한 이온화 임계전계강도를 그림 5에 나타내었다. 정극성에 비해 부극성의 이온화 임계전계강도가 모든 토양에서 다소 높게 나타났다. 이것은 기중방전현상에서 부극성에 비해 정극성이 더 낮은 인가전압에서 방전이 나타나는 현상으로 설명할 수 있다. 토양 내부의 방전현상은 주로 입자 사이의 공극에서 일어나기 때문에 기중방전 현상과 비슷한 원인에 기인된 것으로 설명할 수 있다.

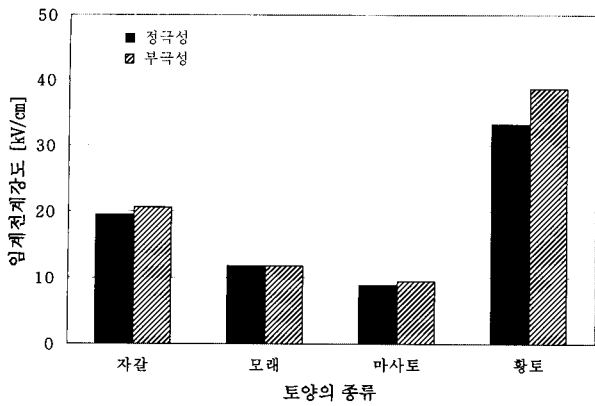


그림 5 이온화 임계전계강도의 극성의존성
Fig. 5 Polarity dependence of ionization threshold field intensity

3.3.2 이온화 개시시간

토양의 이온화현상으로 인해 전류 파형에는 두 개의 피크 시간을 구분 할 수 있는 변곡점이 발생하며, 원점에서 변곡점까지의 시간을 이온화 개시시간 t_1 으로 정의하였다. 포장용수량의 수분을 함유하는 토양에서 전압크기에 따른 이온화 개시시간 t_1 에 대한 측정결과를 그림 6에 나타내었다.

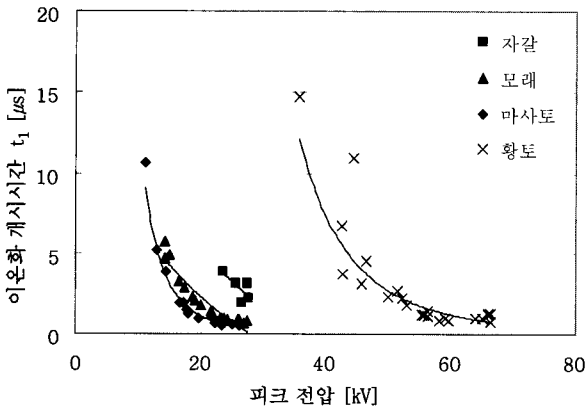


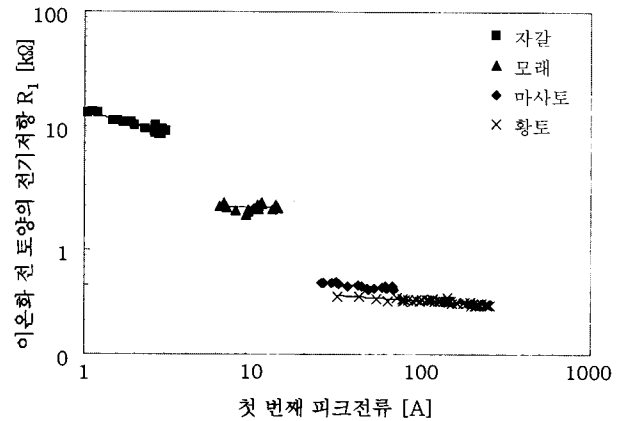
그림 6 이온화 개시시간
Fig. 6 Time-lag to ionization threshold

모든 토양에서 전압이 증가함에 따라 이온화 개시시간이 감소하였다. 낮은 전압에서 각 토양의 이온화 개시시간은 다르지만 모두 과미시간에서 이온화가 발생하였다. 인가전압이 증가함에 따라 이온화 개시시간이 빨라지며 높은 전압에서 이온화가 과두시간에서 발생하였다. 이온화가 과두시간에 발생한다는 것은 인가전압의 피크전압을 저감하여 위험전압을 낮출 수 있음을 의미한다. 또한 이온화 개시시간 t_1 은 부극성에 비해 정극성이 더 빠르게 나타났다.

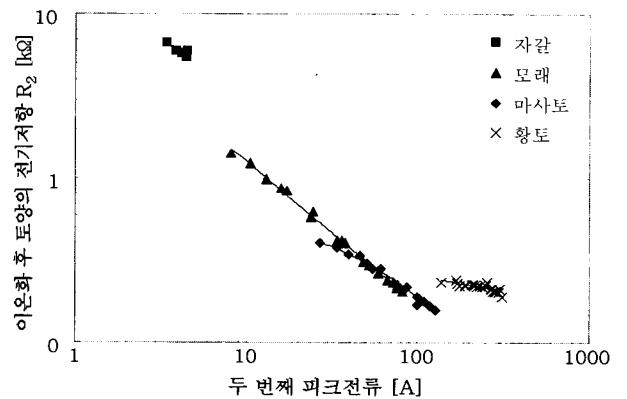
3.3.3 이온화 전과 후의 토양의 전기저항

포장용수량의 수분을 함유한 각 토양에서 전류크기에 따

른 이온화 전과 이온화 후의 전기저항을 그림 7에 나타내었다. 전류크기에 따른 이온화 전의 전기저항 R_1 은 각 토양의 정상상태 저항률과 비슷한 결과로 나타났다. 자갈이 가장 크게 나타났고 모래, 마사토 및 황토 순으로 작아졌다. 전류의 크기가 증가함에 따라 이온화 전의 전기저항은 크게 변동하지 않았다. 이온화가 일어나기 전의 토양의 전기저항이므로 주로 토양에 함유된 수분에 의한 전도전류에 의한 영향을 받기 때문에 각 토양에 따라 R_1 이 다르게 나타난다고 판단된다. 때때로, R_1 이 불규칙하게 나타나는 현상은 과도한 전류가 오히려 토양 내부의 수분을 증발시켜 나타나는 현상이라 분석된다.



(a) 이온화 전 저항(R_1)



(b) 이온화 후 저항(R_2)

그림 7 토양의 종류별 이온화 전과 후의 전기저항
Fig. 7 Pre-ionization and post-ionization resistances by types of soil

따라서 실험을 수행할 때 최소한의 임펠전류를 인가하여 수분의 증발을 억제함으로써 토양 내부의 수분함유를 일정하게 유지하도록 하였다. 이온화 이후의 토양의 전기저항 R_2 는 그림 7과 같이 전류 크기가 증가함에 따라 감소하는 현상을 나타내고 있다. 자갈과 황토에서 저항의 감소폭이 작게 나타났고, 모래에서 저항의 감소폭이 가장 크게 나타났다. 이렇게 저항이 감소하는 이유는 수분에 의해 이온성 전

도전류가 흐르는 도중에 이온화 임계전계 이상의 전압이 인가되면 토양 입자 사이의 공극에서 이온화가 발생하여 전류 증가의 폭이 급격하게 커지기 때문이라고 판단된다.

토양의 이온화에 의해 유효 접지전극의 반경이 확장되고 그 결과 접지저항이 감소하게 된다. 토양의 종류에 따라 입자간 공극의 크기와 수분 흡수력에 차이가 있기 때문에 이온화 저항 R_2 의 변화가 토양에 따라 다르게 나타난다. 부극성에서도 정극성과 마찬가지로 R_1 과 R_2 의 값은 전류가 증가함에 따라 감소하였다. 두 극성 모두 R_2 의 값이 R_1 의 값보다 항상 작게 나타났다.

반구형 접지전극시스템의 접지저항은 다음과 같은 수식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

여기서

r_1 : 반구형 접지전극의 반경

r_2 : 반구형 용기의 반경

ρ : 정상상태의 토양저항률

을 나타낸다. 이 조건에서 토양저항률은 이온화 전 저항 R_1 을 이용하여 산출하였고, 측정된 저항률은 표 2에 나타내었다.

표 2 토양의 종류별 측정된 토양저항률

Table 2 Measured soil resistivities by types of soil

토양의 종류	자갈	모래	마사토	황토
저항률 $\Omega \cdot m$	734.7	155.1	31.8	22.2

이온화 후 전기저항 R_2 는 토양의 이온화 영역의 증가와 이온화 영역의 저항률 변화와 밀접하게 관련된다. 두 번째 피크전류는 접지전극의 표면에서 스트리머의 발생으로 생기게 된다. 스트리머가 발생하는 영역에서 토양저항률은 거의 0까지 떨어지게 된다[8]. 이것은 접지전극의 실효반경이 확장됨을 의미하게 된다.

전류의 크기에 의존하는 이온화 영역은 중심이 같은 반구형 등전위 표면을 갖는 이온화의 등가반경으로 형성되고, 토양의 이온화가 진행되는 동안 대칭성이 계속 유지됨을 가정함으로써 간단히 평가할 수 있다. 스트리머는 높은 전위의 전극으로부터 낮은 전위의 전극을 향하여 뻗어 나가기 때문에 토양 내부에서의 방전현상은 접지전극표면에서부터 실험 용기를 향하는 가지가 형성되어 확장되는 일반적인 방전현상과 유사하게 나타났다고 판단된다. 모래와 황토에서 이온화 영역의 모델 단면도를 그림 8에 나타내었다. 모래의 경우 균일한 공극으로 인해 이온화의 반경이 상당히 확장되었지만 황토에서는 공극이 거의 없고 매우 낮은 저항률 때문에 전도성 전류가 많이 흘러 이온화의 반경이 접지전극 근방에서만 미세하게 확장되었다.

이온화 후 전기저항 R_2 는 토양이온화 영역의 확장에 의해 설명될 수 있다. 이온화 영역이 균등하게 확장된다고 가정하면 등가이온화 반경은 다음의 수식과 같이 이온화 후

전기저항 R_2 를 이용하여 계산할 수 있다.

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (3)$$

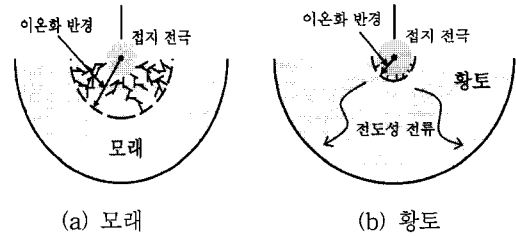


그림 8 이온화 영역에 대한 반구형 모델
Fig. 8 Hemispherical model for ionization region

여기서

r_i : 등가 이온화 반경

을 나타낸다. 이 조건에서 등가이온화 반경은 이온화 후 저항 R_2 를 이용하여 산출하였고, 측정된 각 토양의 이온화 영역의 등가반경을 그림 9에 나타내었다.

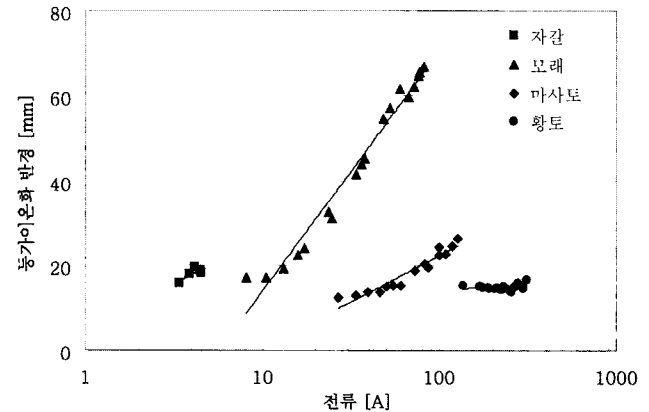
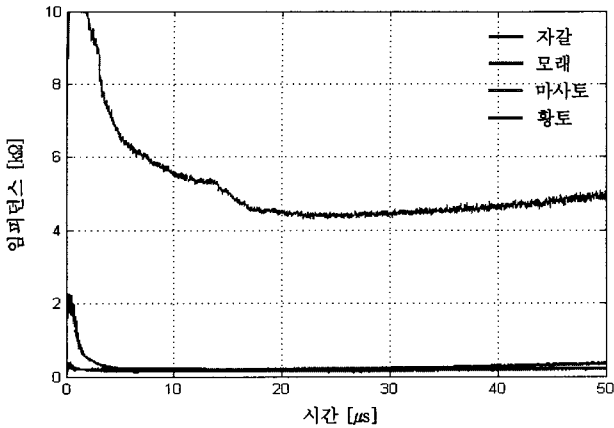


그림 9 전류의 크기에 따른 이온화 영역의 등가반경
Fig. 9 Equivalent radius of ionization region against the amplitude of current

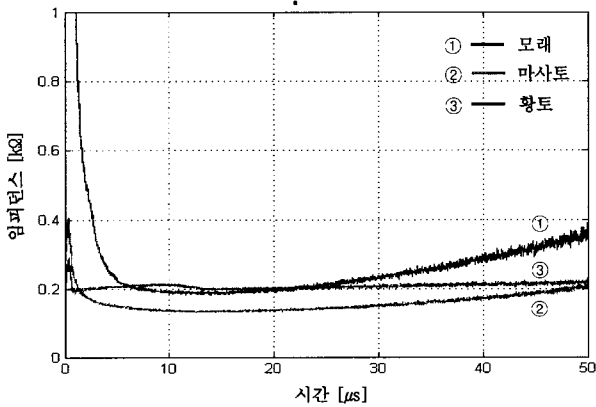
이 분석에서는 토양의 이온화가 반구형 접지전극 표면에서 균등하게 발생된다고 가정하였다. 그러나 전계는 매설된 반구형 접지전극 표면과 입자의 알갱이 사이의 공간에 집중되며, 그곳에서 이온화가 시작되어 반대편 전극으로 향하게 된다. 모래와 마사토에서는 전류크기가 증가함에 따라 등가이온화 반경이 증가하였지만 자갈과 황토에서는 거의 변화가 없었다. 모래에서 등가이온화 반경이 가장 크게 확장되었고, 자갈과 황토에서는 거의 확장되지 않았으며, 그 이유는 다음과 같이 생각된다. 자갈과 황토의 경우 이온화가 일어나면 곧 자갈표면을 따른 연면방전으로의 이행에 의해 절연과피에 이르며, 황토의 흡수율이 높아 토양입자와 수분의 치밀도가 높아 국부적인 스트리머방전의 진전이 어려우므로 이온화 영역이 좁은 것으로 추측된다.

3.3.4 과도접지임피던스

이온화 영역의 등가반경이 최대가 될 때, 포장용수량의 수분을 함유한 각 토양의 과도접지임피던스를 그림 10에 나타내었다. 과도임피던스특성곡선은 시작부분인 전도성 구간, 임피던스가 감소하는 이온화 구간, 임피던스가 초기의 상태로 다시 돌아가는 탈이온화 구간으로 나눌 수 있다[8].



(a) 전반적 특성



(b) 모래, 마사토, 황토 특성의 확대도

그림 10 토양의 종류별 과도접지임피던스의 예
Fig. 10 Examples of transient grounding impedances by types of soil

토양의 이온화 현상이 나타나지 않는다고 가정하면, 첫 번째의 전도성 구간이 지속되어 임피던스가 일정하게 유지된다. 하지만 토양의 이온화 현상으로 인해 전도성 전류뿐만 아니라 이온화 전류가 함께 흐르기 때문에 토양의 임피던스는 급격히 감소한다.

이온화 전류가 최대 크기에 도달했을 때 임피던스는 최저로 감소하고, 그 이후에는 이온들이 재결합하는 탈이온화 현상으로 인해 임피던스가 다시 초기의 임피던스로 돌아가게 된다. 전도성 구간은 각 토양의 저항성분에 의존하며 자갈의 경우에는 상대적으로 다른 토양에 비해 저항이 커서 이온화에 의한 임피던스의 감소가 크게 나타난다. 반면에 모래나 마사토의 경우에는 전기저항이 매우 작아 상대적으로

임피던스의 변화는 작았지만 다른 토양과 마찬가지로 이온화 구간이 관찰되었다. 따라서 임피던스의 변화는 초기의 크기와 최저 크기로 변화를 나타내며, 모래와 같이 균등하고 입자사이의 작은 공극을 가지고 있는 토양에서는 임피던스의 변화율이 가장 크게 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 뇌임펄스전압에 의한 반구형 대지 축소 모의 실험장치를 이용하여 포장용수량(자갈: 5%, 모래: 15%, 마사토: 24%, 황토: 32%)의 수분을 함유한 표준체망으로 측정된 자갈 9.5~16 mm, 모래 2~4.75 mm, 마사토 0.425~2 mm, 황토 0.425 mm 미만의 입도인 토양의 이온화 현상에 대해 분석하였다. 토양의 종류에 따라 이온화가 발생된 전압과 전류 파형은 다양하게 관찰되었으며 모든 토양에서 첫 번째 피크전류(I_1)와 두 번째 피크전류(I_2)가 관찰되었다. 이온화 임계전계강도는 모래와 마사토가 비교적 낮게 나타났고, 황토가 가장 높으며 절연파괴 임계전계강도는 자갈이 가장 낮게 나타났다. 이온화 전 저항은 토양의 저항률에 비례하여 거의 일정하게 나타났고, 이온화 후 저항은 두 번째 이온화 전류의 크기에 따라 차이가 나며 모래, 마사토의 감소폭이 크게 나타났다. 토양의 등가이온화 반경으로 평가한 이온화 영역은 모래가 가장 크게 확장됨을 확인하였고 자갈과 황토에서는 확장이 거의 이루어지지 않았다. 이온화 개시시간은 인가전압이 상승함에 따라 빨라졌고 높은 전압에서는 이온화가 파두 부근에서 발생하였다. 토양의 이온화 현상으로 인해 임피던스가 감소하며, 모래의 경우 감소가 가장 크게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 한국전기안전공사(과제번호 R-2007-1-014) 주관으로 수행된 과제 의해 작성되었습니다.

참고 문헌

- [1] 이복희, 이승철, “접지의 핵심 기초기술”, 의제, pp.40-42, 1999.
- [2] IEEE Standards Board, “ANSI/IEEE Std 80-2000; An American National Standard/IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp.49~68, 2000.
- [3] N. Mohamad Nor, A. Haddad, H. Griffiths, “Characterization of Ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses”, IEEE Trans. on power delivery, Vol.21, No.1, pp. 353-361, 2006.
- [4] K. Seki, T. Shinohe, K. Okumura, “Decrease characteristics of Rod Electrode Earthing Resistance in soil”, K-J Joint Symposium, pp. 71-74, 2007.
- [5] I. F. Genos, I.A. Stathopoulos, “Soil ionization under

lightning impulse voltages," IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., vol.151, pp. 343-346, 2004.

[6] C.W.Fetter, "Applied Hydrogeology," Prentice Hall, pp. 173-194, 1994.

[7] 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. 2108-2113, July 2005.

[8] 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.



이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수. 한국조명전기설비학회 부회장, 당학회 학술이사, Tel. (032) 860-7398, Fax. (032) 863-5822, e-mail : bhlee@inha.ac.kr

저 자 소 개



이규선 (李圭善)

1954년 9월 17일생, 2004년 8월 한국교육개발원 전기공학과 졸업. 인하대 공대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel. (032) 551-0482
Fax. (032) 860-7398,
e-mail: leeks0482@hanmail.net



박건훈 (朴建勳)

1982년 4월 28일생. 2007년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel. (032) 860-7398
Fax. (032) 863-5822
e-mail : changeeyes@hanmail.net



김희구 (金會九)

1983년 7월 27일생. 2007년 2월 한국교육개발원 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel. (032) 860-7398
Fax. (032) 863-5822
e-mail : jackals7@naver.com