Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 22, No.9, pp. 32~39 September 2008 논문 22-9-5

임펄스전압에 의한 동심원통형 전극계에서 토양 이온화특성 분석

(Analysis of Soil Ionization Characteristics in Concentric Cylindrical Electrode System under Impulse Voltages)

김회구* · 박건훈 · 이복희
(Hoe-Gu Kim · Geon-Hun Park · Bok-Hee Lee)

요 약

본 논문은 뇌임펄스전압에 의한 토양의 이온화 현상과 모델접지시스템의 과도적 특성에 관련된 파라미터에 관한 것으로 건조 모래와 습한 모래에 대한 이온화 특성을 치수가 다른 동심원통형 전극계의 실험 용기를 이용하여 연구하였다. 결과로써, 높은 임펄스전압이 인가된 모래의 비선형 전기적 특성은 이온화 과정에 의해 발생하였다. 모래의 과도임피던스는 수분의 함유량과 인가임펄스전압의 크기에 의존하며, 수분의 함유량과 인가전압의 크기의 증가에 따라 접지임피던스는 감소하였다. 본 연구결과는 뇌서지에 대하여 우수한 성능을 가지는 접지시스템의 설계에 유용한 정보가 될 것이다.

Abstract

This paper presents the soil ionization phenomena and the parameters with the transient characteristics of model grounding system under lightning impulse voltages. Ionization properties of dry and wet sands were investigated by using two test cells of concentric cylindrical electrode system with different dimensions. As a result, non-linear electrical behavior of sand under high impulse voltage is caused by ionization process. The transient impedance of sand depends not only on the water content but also on the magnitude of applied impulse voltages. The grounding impedance is decreased with increasing the water content and the magnitude of applied voltages. The results presented in this paper will provide useful information on the design of high performance grounding systems against lightning surge.

Key Words : Soil Ionization, V-I Curve, Soil Resistivity, Impulse Voltage, Transient Grounding Impedance

1. 서 론

일반적으로 접지시스템에서 접지저항은 저주파수의 전원이 대지에 인가될 때 발생되는 대지전위상승을 측정하여 계산한다. 현행법상 접지시스템의 성능은 접지저항으로 평가하며, 뇌격전류 또는 개폐서지와 같이 고주파수를 포함하는 전류가 접지시스템에

* 주저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : jackals7@naver.com
접수일자 : 2008년 6월 3일
1차심사 : 2008년 6월 9일
심사완료 : 2008년 7월 3일

입사할 때의 성능에 대하여는 평가하지 않는다. 또한, 접지전극에 뇌격전류와 같은 대전류가 유입하게 되면 접지전극 주변의 전위가 상승하게 되고, 이로 인해 인체의 안전과 각종 기기들이 위협을 받게 된다. 뇌서지나 전자계로 부터 이러한 위험 요소를 억제하기 위해서는 유입된 이상전압을 저감시키기 위하여 접지임피던스를 낮추어야 한다. 따라서 고전압이 유입될 수 있는 접지시스템의 설계와 시공에 있어서 접지임피던스를 낮추게 되는 이온화 현상 및 지중방전특성의 분석이 선행될 필요가 있다. 접지시스템을 시공하는 장소의 저항률은 토질이나 토양 내에 함유되어 있는 화학물질, 염분, 수분의 함유량 등에 따라 상당히 변화한다. 특히, 토양의 저항률은 수분함유량에 의해 지배적으로 영향을 받게 된다[1]. 고주파 성분을 함유하는 과도전류에 대한 접지시스템의 임피던스는 주로 대지저항률의 주파수의존성과 토양의 이온화 특성과 밀접한 관련성을 가진다[00-11]. 따라서 접지임피던스에 영향을 미치는 토양의 이온화 현상과 접지시스템의 성능에 관련된 파라미터를 분석할 목적으로 모델접지시스템을 이용하는 실험적 연구를 수행하였다. 서로 크기가 다른 두 개의 실린더용기를 이용하여 1.2/50[μs] 표준뇌임펄스전압 인가하였을 때 수분함유량에 따른 모래의 이온화 특성을 나타내는 전압과 전류 파형을 측정하고, 이를 기초로 하여 V-I곡선 및 과도적 임피던스특성에 관련된 파라미터를 산출하고 분석하였다.

2. 실험계의 구성 및 방법

2.1 실험계의 구성

본 실험에 사용된 실험장치 및 측정시스템의 전체적인 구성을 그림 1에 나타내었다.

크기가 다른 원통형 용기에 수분함유량에 따라 모래를 채우고 정극성과 부극성의 뇌임펄스전압을 인가하여 실험하였다. 실험용기는 내경 180[mm]와 300[mm]의 스테인레스강을 이용하여 원통형으로 제작하였으며, 직경 2.4[mm]인 원주형 전극을 실험용기 중앙에 축방향으로 고정시키고, 전극 끝단에서 전계가 집중되는 것을 방지하기 위하여 전극 끝단을 용기 밖으로 빼내었다. 내부전극에 실험전압의 인가에는 최대 20[kJ], 400[kV]까지 발생하는 임펄스전압발생장치를 사용하였다. 전극에 인가된 전압은 용량성 분압기(분압비 10,000 : 1)로 측정하였고, 전류는 0.02[Ω]의 응답감도를 갖는 분류기로 측정하였으며, 모든 파형은 오실로스코프(BW 500[MHz], 2.5[GS/s])로 관측하고 분석하였다.

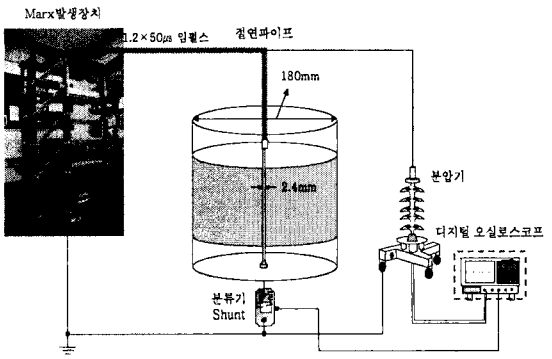


그림 1. 실험계 구성
Fig. 1. Configuration of the experimental setup

2.2 실험방법

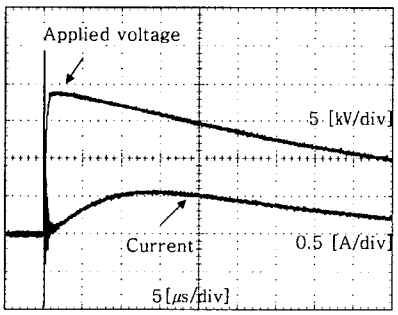
본 연구는 원통형 용기의 크기와 모래의 수분함유량에 따른 이온화현상 및 과도접지임피던스의 특성을 파악하기 위해 전압, 전류 파형 및 전기적 파라미터를 측정/분석하고 이들 결과에 대하여 검토하였다. 토양으로는 수분함유량의 조정이 용이하고 알갱이의 크기를 쉽게 분류할 수 있는 모래로 선정하였다. 토양에 함유되는 수분의 양은 토양을 구성하고 있는 입자의 크기와 조밀도에 의존하기 때문에 한국산업규격(KSA 5101)에 맞추어 알갱이가 0.425~2[mm]의 중간크기를 갖는 모래로 사용하였고, 일정한 조밀도의 확보를 위해 압력장치를 이용하여 5 kPa의 압력을 인가하였다. 수분의 함유량은 저항률이 70[Ω]인 수돗물로 조절하였으며, 중량함수비 0, 2, 4, 6, 8[%]에 대하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

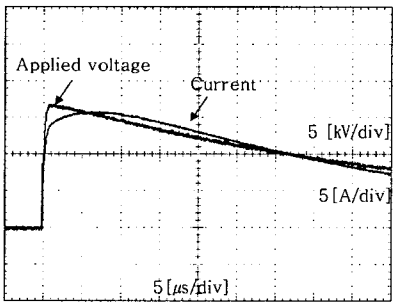
3.1 건조모래와 습한 모래의 방전특성

3.1.1 전압과 전류 파형의 특성

원통형 실험용기 안에 건조모래와 습한 모래를 넣고 임펄스전압을 인가한 때 이온화 현상이 발생한 경우의 대표적인 전압과 전류파형의 예를 그림 2에 나타내었다. 건조모래와 습한 모래에 1.2[μs]의 상승시간을 갖는 20[kV]의 임펄스전압을 각각 인가하였다. 건조모래에는 크기가 작고 완만하게 상승하는 전류가 흐르는 반면에 습한 모래에는 수분으로 인해 전도성 전류가 크게 흐르는 것으로 나타났다. 건조모래에서는 전압이 인가되는 초기부분에 진동성 성분이 나타나게 되는데 이는 전극과 모래의 알갱이 사이의 작은 공극에서 존재하는 커패시턴스 영향 때문에 발생한 것으로 분석된다[2]. 그리고 수분함유량 2[%] 모래에서는 그림 2 (b)와 같이 전압과 전류 파형이 비선형적인 모양을 보이고 있다. 이처럼 전압과 전류 파형이 비선형 곡선을 이루는 것은 토양의 알갱이 사이의 공극에서 발생하는 이온화현상 및 열적 효과에 의한 것으로 판단된다. 또한, 부극성에서의 건조모래와 젖은 모래 모두 정극성과 비슷한 전압과 전류 파형을 나타냈다.



(a) 건조모래



(b) 수분함유량 2[%] 모래

그림 2. 인가전압 20[kV]에서 나타나는 전압과 전류 파형

Fig. 2. Voltage and current wavesforms at the applied voltage of 20[kV]

3.1.2 피크전류값에 따른 임피던스의 변화

이온화에 따른 토양의 임피던스를 평가하기 위하여 식 (1)과 같이 피크전류 순간의 전압값을 피크전류로 나눈 값을 이온화 후의 접지임피던스라 정의하였다.

$$Z_i = \frac{V_{Ipeak}}{I_{peak}} \tag{1}$$

건조모래와 수분함유량 2[%] 모래에 대한 이온화 후의 접지임피던스를 그림 3에 나타내었으며, 건조모래가 습한 모래보다 임피던스는 상당히 크게 나타났고, 두 모래 모두 전류피크값의 증가에 따라 임피던스는 감소하는 추세로 나타났다. 하지만 극성에 따른 임피던스의 변화는 나타나지 않았다. 또한, 이온화 이전의 대지저항률과 이온화 영향으로 인한 절연파괴 이전 대지저항률을 측정한 결과 건조모래는 6441.6[Ω · m]에서 5948.1[Ω · m]으로 수분함유량 2[%]의 모래는 259.6.[Ω · m]에서 127.7[Ω · m]으로 모두 감소하였다. 이처럼 토양의 임피던스가 피크전류가 증가함에 따라 감소하는 이유는 토양의 알갱이 사이의 공극에서 발생하는 이온화현상에 의한 영향으로만 볼 수 있다.

건조모래는 토양의 알갱이 사이에 주로 공기로 이루어지게 되는데 전압이 인가되면 전계가 형성되고, 알갱이 사이 공극에서 코로나가 발생하여 결과적으로 임피던스를 낮추는 요인이 된다[3]. 이에 반해 수분을 함유한 모래의 전도성 전류는 알갱이 사이의 수분을 통하여 흐르게 되고, 수분에 함유된 이온에 의한 이온성 전도전류와 공극에서 발생하는 이온화전류와 함께 흐르므로 임피던스가 감소한다. 따라서 전압을 높일수록 접지전극 주변의 토양은 이온화 영역이 확장되므로 임피던스가 감소하는 것으로 분석된다[4].

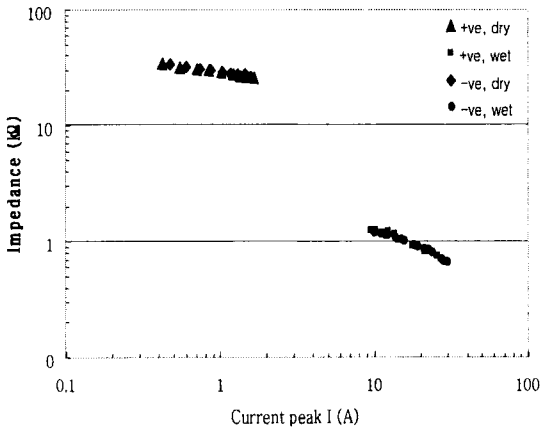


그림 3. 건조모래와 수분함유량 2[%]인 모래의 피크전류에 따른 임피던스

Fig. 3. Impedances of dry sand and wet sand with water content of 2[%] as a function of current peak

3.1.3 피크전류의 크기에 따전류피크까의 지연시간 분석

정극성과 부극성 임펄스전압에 대한 전류의 크기에 따른 전류피크까지의 시간지연에 대한 결과를 그림 4에 나타내었다. 건조모래에서는 피크전류의 크기에 따라 전류피크까지 지연되는 시간의 변화는 거의 없고, 수분함유량 2[%]인 모래에서는 전류가 증가할수록 지연시간이 점차 늦어짐을 알 수 있다.

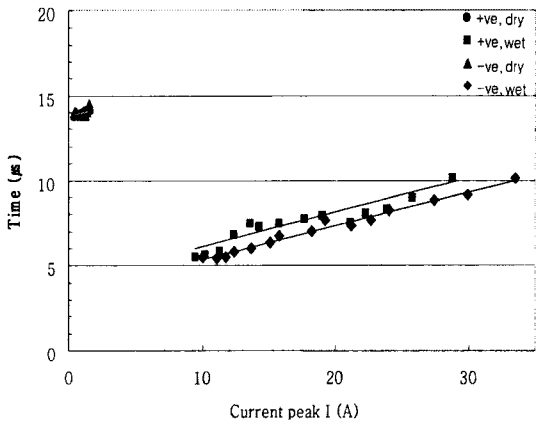


그림 4. 정극성과 부극성 임펄스전압에 따른 전류피크까지의 지연시간

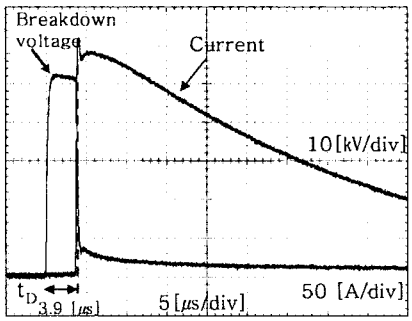
Fig. 4. Time-lags to current peak for the positive and nagative impulse voltages

이렇게 전류피크까지의 상승시간의 지연이 증가하는 것은 인가전압을 높였을 때, 수분의 함유로 인해 공기와 수분의 이온화가 동시에 일어나면서 이온화 반경이 확장되고 피크까지의 시간 또한 길어지는 것으로 판단된다. 건조모래와 습한 모래 모두 인가전압의 극성에 따른 큰 차이는 보이지 않았다.

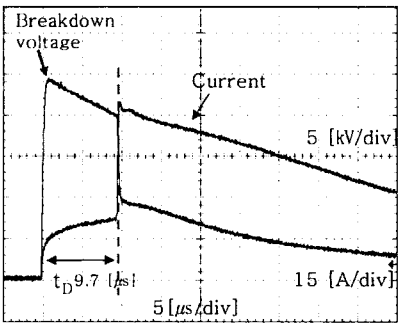
3.1.4 절연파괴 특성

원통형 실험용기에서 건조모래와 수분함유량 2[%] 모래에서 절연파괴가 발생한 때의 전형적인 전압과 전류파형의 예를 그림 5에 나타내었다.

건조모래와 습한 모래 모두 절연파괴가 일어날 때 전압이 급격히 떨어지고 전류가 상승하는 것으로 나타났다. 건조모래와 습한 모래의 절연파괴전압은 건



(a) 건조모래



(b) 수분함유량 2[%] 모래

그림 5. 건조모래와 수분함유량 2[%] 모래의 절연파괴전압-전류 파형의 예

Fig. 5. Examples of breakdown voltage and current waveforms for dry sand and wet sand with the water content of 2[%]

조모래일 때 52.6[kV], 습한 모래는 24.6[kV]로 건조 상태가 습한 상태 보다 2배 이상 높게 나타났고, 절연파괴까지의 시간 또한 빠르게 나타났다. 수분은 공기보다 절연내력이 높지만 모래에 수분이 함유되면서 복합유전체로 작용하게 된다. 따라서 방전과정 동안 전류는 물을 따라 흐르게 되며, 그림 5 (b)에서와 같이 전류파형의 앞부분에 수분으로 인해 이온성 전도전류가 흐르면서 절연파괴에 이르는 시간은 늦어지게 되고 낮은 전압에서 절연파괴가 발생한다. 건조모래는 모래알갱이 사이에 공기가 존재하게 되므로 모래알갱이 표면을 따라 진전하는 연면방전과 거의 동일하다고 판단된다. 또한, 원통형 실험용기에서는 전계계산이 해석적으로 할 수 있으므로 절연파괴임계강도(Ec)를 KS C IEC-60060-1을 기준으로 승강법을 사용하여 산출하였다.

평균 절연파괴전압은 각각 건조모래는 55.4[kV], 습한 모래는 24.3[kV]이었다. 절연파괴 임계전계강도는 식 (2)과 같은 원통형 모의 실험용기에 대한 이론적 계산식을 적용하여 산출하였다[2].

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

V : 절연파괴전압

r_i : 전극의 반경

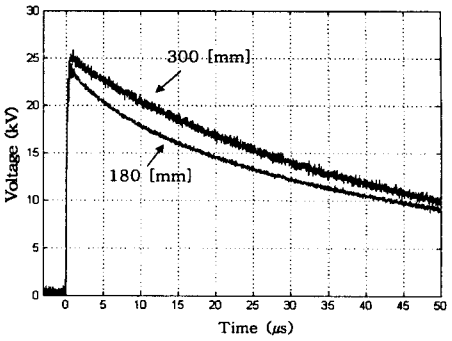
r_o : 원통형 실험용기의 내반경

건조모래의 절연파괴 임계전계강도는 107[kV/cm]이며, 습한 모래는 47[kV/cm]로서 건조모래의 1/2 이하로 낮게 나타났다.

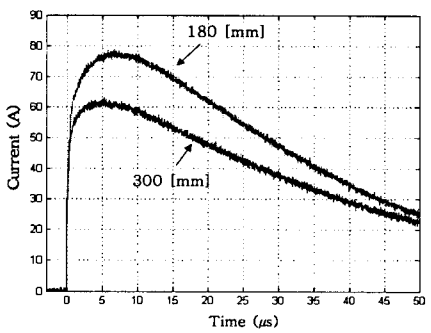
3.2 실험용기의 크기에 따른 이온화특성

3.2.1 전압과 전류 파형의 특성

원통형 실험용기 안에 수분 6[%]를 함유한 모래를 넣고, 34[kV]의 임펄스전압을 인가한 경우 원통형 실험용기의 크기에 따른 전압과 전류 파형의 예를 그림 6에 나타내었다.



(a) 전압 파형



(b) 전류 파형

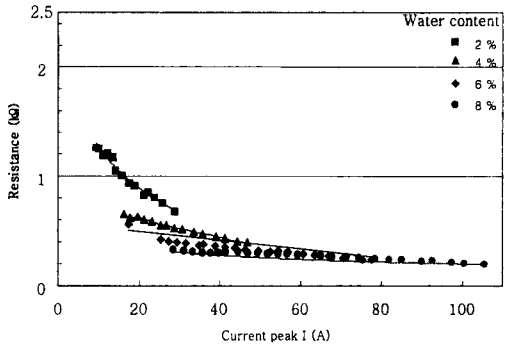
그림 6. 수분함유 6[%] 모래의 원통형 실험용기 크기별 전압과 전류 파형의 예

Fig. 6. Examples of voltage and current wavesforms by the size of cylindrical test cell for the wet sand with water content of 6[%]

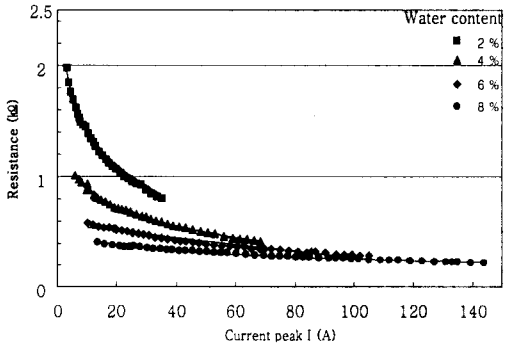
그림 2에서처럼 전압과 전류파형은 비선형적인 모양을 보였으며, 비선형성은 인가전압이 높을수록 더욱 뚜렷이 나타났다. 전압 파형은 전류가 최대 시점에서 내경 180[mm] 용기가 300[mm]에 비해 전압강하가 크게 나타나고, 피크전압은 더욱 낮게 측정되었다. 전류의 피크값은 내경 180[mm]와 300[mm] 실험용기 각각 78.5[A], 63[A]이다. 내경 180[mm] 실험용기의 경우 동일한 인가전압에서 더 많은 전류가 흘렀고, 피크전류 시간도 더 늦게 나타났다.

3.2.2 전류피크값에 따른 임피던스의 변화

원통형 실험용기 크기에 따라 모래의 수분함유량을 변화시키면서 절연파괴 이전 피크전류에 상응하는 임피던스를 산출한 결과를 그림 7에 나타내었다.



(a) 내경 180[mm]의 실험용기



(b) 내경 300[mm]인 실험용기

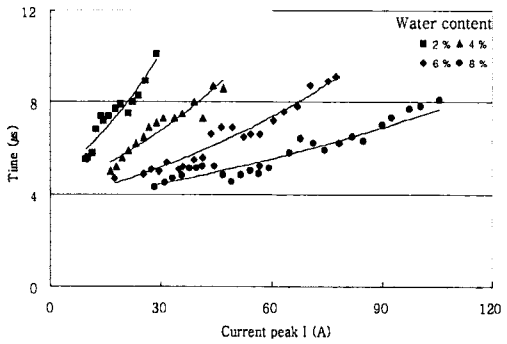
그림 7. 전류피크에 따른 임피던스
Fig. 7. Impedances as a function of current peak

원통형 실험용기의 실린더 크기에 상관없이 전류크기가 증가함에 따라 임피던스는 모두 감소하였고, 내경 180[mm] 실험용기에서의 임피던스는 300[mm] 실험용기보다 더 낮게 나타났다. 또한, 수분함유량이 증가할수록 두 실험용기 모두 임피던스가 더 낮은 값을 나타내었다. 이때의 대지저항률을 절연파괴 이전 값을 측정한 결과 180[mm] 실험용기는 120.9 [Ω · m]에서 52.1[Ω · m]으로 300[mm] 실험용기는 113.8[Ω · m]에서 56.1[Ω · m]까지 감소하였다. 이처럼 수분함유량이 증가함에 따라 모래의 임피던스는 낮아지게 되고, 공극사이에는 수분이 채워져 수분 속에 함유된 이온에 의해 이온성 전도전류가 흘러 임피던스가 감소하게 된다. 전류크기에 따른 임피던스의 감소는 전류가 증가할수록 전극 주변에 강한 전계가 형성되어 이온화 전류를 포함하게 되고 이 때 전류의 증가가 커져 임피던스와 함께 대지저항률 또한 점차 작아지는 것으로 분석된다.

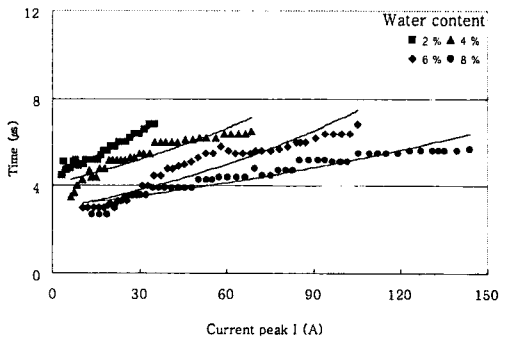
3.2.3 실험용기의 크기에 따른 전류피크까지의 지연시간 분석

실험용기의 크기에 따라 절연파괴 이전 전류피크까지의 지연시간을 그림 8에 나타내었다. 내경 180[mm]인 실험용기보다 300[mm] 실험용기에서 전류크기는 작으나 피크까지의 시간은 더 짧게 나타났고, 두 실험용기 모두 수분의 함유량이 많아질수록 전류피크에 도달하는 시간은 짧아졌다.

이는 같이 수분함유량이 증가할수록 이온화되는 시간은 짧아지고 전압피크도 낮아져 수분의 증가가 안전에 유리함을 의미한다. 또한, 두 실험용기 모두에서 전류가 증가함에 따라 전류피크까지의 시간이 점차 길어짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 인가전압이 높아질수록 이온화전류의 반경이 확장되어 전



(a) 내경 180[mm]의 실험용기



(b) 내경 300[mm]의 실험용기

그림 8. 전류크기에 따른 전류피크 까지의 지연시간
Fig. 8. Time-lags to the current peak as a function of current magnitude

류피크까지의 시간 또한 길어지는 것으로 판단된다.

3.2.4 V-I곡선 및 임피던스곡선

실험용기 안에 수분 6[%]를 함유한 모래를 넣고, 34[kV]의 임펄스전압을 인가한 경우 실험용기의 크기에 따른 전압과 전류 파형으로부터 산출한 V-I곡선 및 임피던스곡선을 그림 9와 그림 10에 나타내었다.

그림 9는 그림 6에서와 같이 전압과 전류 파형이 비선형적이며, 전압과 전류 파형의 파두시간과 감쇠시간이 다르기 때문에 두 곡선 모두 폐루프 형태로

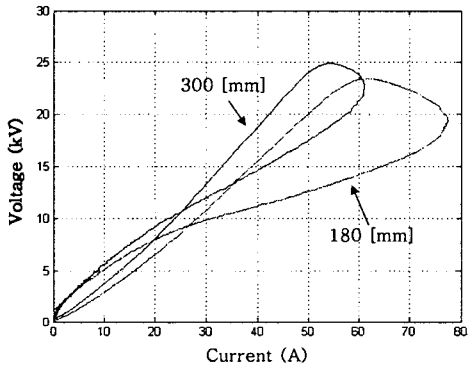


그림 9. 수분함유 6[%] 모래의 인가전압 34[kV]에서 V-I곡선

Fig. 9. V-I curves for the sand with the water content of 6[%] at the applied voltage of 34[kV]

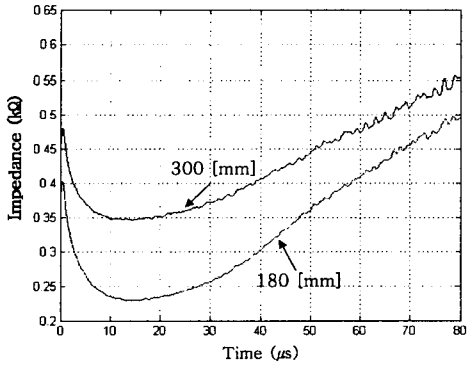


그림 10. 수분함유 6[%] 모래의 인가전압 34[kV]에서 V-I곡선

Fig. 10. Impedance curves for the sand with the water content of 6[%] at the applied voltage of 34[kV]

나타났다. 하지만 내경 180[mm] 실험용기의 경우 300[mm] 실험용기보다 폐루프의 면적이 크게 나타났다.

이것은 180[mm] 실험용기의 경우 300[mm] 실험용기보다 더 많은 에너지가 유입됨을 의미한다. 그림 10의 임피던스곡선 또한 180[mm] 실험용기에서 임피던스가 큰 폭으로 감소하고 전류피크까지의 시간이 길게 나타나는 것으로 보아 용기가 작을수록 이온화가 더 잘 진행됨을 알 수 있다.

임피던스곡선은 초기부분인 전도성 구간, 임피던스가 감소하는 이온화 구간, 이온들이 재결합하여 임피던스가 처음 크기로 다시 돌아오는 탈이온화 구간으로 나눌 수 있다. 토양의 이온화 현상이 나타나지 않는 경우 전도성 구간이 지속되어 임피던스가 일정하게 유지된다. 하지만 토양의 이온화 현상으로 인해 이온성 전도전류뿐만 아니라 이온화 전류가 함께 흐르기 때문에 토양의 임피던스는 급격하게 감소하게 되는 것이다[3].

4. 결 론

원통형 모의실험용기를 이용하여 건조모래와 습한 모래에 임펄스전압이 인가된 경우 수분함유량에 따른 이온화현상의 분석을 위한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 임펄스전압이 인가되었을 때 건조모래는 전류 초기부분에서 진동성분이 나타나고, 습한 모래에서는 수분의 영향으로 전도성 전류가 흘렀으며, 전압과 전류 파형은 비선형적이었다. 이러한 현상은 인가전압을 높일수록 더욱 뚜렷이 나타났다.

(2) 건조모래의 절연파괴전압은 습한 모래보다 높았고, 절연파괴까지의 지연시간은 건조모래에서 더 짧았으며 두 모래 모두 인가전압의 극성에 따른 차이는 나타나지 않았다.

(3) 토양의 임피던스는 인가전류가 증가할수록 감소하는 추세를 보였고, 수분함유량이 증가함에 따라 더 낮은 임피던스로 나타내었다.

(4) 내경 180[mm] 실험용기와 300[mm] 실험용기 모두 전압을 높일수록 전류피크에 도달하는

시간이 길어지고, 수분의 함유량이 증가할수록 전류피크에 도달하는 시간이 짧아졌다. 또한, 동일한 전압을 인가했을 때 180[mm] 실험용기에서 폐루프곡선의 면적이 크며, 임피던스는 큰 폭으로 감소하게 되어 이온화 반경이 커짐을 알 수 있다.

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

References

[1] 이복희, 이승칠, "접지의 핵심 기초 기술", 의제, 2판, pp.37-104, 1999.

[2] N. Mohamad Nor and A. Ramli "Effects of Moisture content, impulse polarity and earth electrode's dimension on dry and wet sand under high voltage conditions", Euro. Trans. Electr. Power, John Wiley & Sons, Ltd, DOI; 10.1002, 2007.

[3] Shozo Sekioka. Maria I. Lorentzou, Maria p. Philppakou, and Jojn M.P rousalidis. "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Trans. on Power Deliverry, Vol. 21, No. 1, pp.194-201, 2006.

[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, 2006.

[5] 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, pp.1174-1182, 2004.

[6] Abdul M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents Into Concentrated Electrodes", IEEE Trans. on Power Deliverry, Vol. 9, No. 3, pp.1669-1677, 1994.

[7] R. Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar. "Experimental Study of Transient Ground Impedances", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 11, pp.4653-4660, 1981.

[8] 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, 2005.

[9] Robert D. Holtz, William D. Kovacs, "An Introduction to Geotechnical Engineering", Prentice Hall, pp. 25-31, 1981.

◇ 저자소개 ◇

김회구 (金會九)
1983년 7월 27일생. 2007년 2월 한국교육개발원 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : jackals7@naver.com

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

이복희 (李福熙)
1954년 6월 29일생 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사).1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinati대학 방문교수. 현재 인하대공대 전자전기공학부 교수. 본 학회 부회장.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr