

임펄스전류에 의한 토양의 절연파괴특성

(Breakdown Characteristics of Soils Caused by Impulse Currents)

이복희* · 이강수 · 김회구

(Bok-Hee Lee · Kang-Soo Lee · Hoe-Gu Kim)

요 약

이 논문은 동축원통형 전극계에서 임펄스전류에 의한 토양의 절연파괴특성에 관한 것으로 4종의 토양에 대한 절연파괴전압과 전류를 측정하고, 절연파괴를 일으키는 전계의 세기, 절연파괴까지의 지연시간과 전압-전류곡선을 분석하고 검토하였다. 그 결과, 절연파괴전압과 전류 파형은 토양입자의 크기에 의존하며, 자갈과 모래의 절연파괴 전압과 전류 파형은 마사토와 황토의 파형과는 다르게 나타났다. 절연파괴를 일으키는 전계의 세기는 자갈, 모래, 황토, 마사토의 순으로 높았으며, 모든 시료의 전압-전류곡선은 ∞ 모양의 교차폐곡선을 나타내었다. 또한 자갈과 모래의 절연파괴까지의 시간지연은 마사토나 황토보다 길게 나타났다. 본 연구 결과는 토양의 이온화를 고려하여 낙뢰전류가 입사되는 접지전극시스템의 과도적 성능의 향상을 위한 설계에 유용한 정보가 될 것이다.

Abstract

In this paper, breakdown characteristics of soil in a coaxial cylindrical electrode system stressed by impulse currents were experimentally investigated. The breakdown voltage and current waveforms for 4 types of soils were measured, and the threshold electric field intensity, the time-lag to breakdown and the voltage-current ($V-I$) curves were analyzed and discussed. As a result, the breakdown voltage and current waveforms are strongly dependent on the grain size of soil, and the voltage and current waveforms for gravel and sand differ from those for silt and loess. The threshold electric field intensity E_c is increased in the order of gravel, sand, loess and silt. The $V-I$ curves for all test samples show a 'cross-closed loop' of ∞ -shape. Also, the time-lag to breakdown for gravel and sand are longer than those for silt and loess. It is expected that the results presented in this paper will provide useful information on the design of improving transient performance of a grounding electrode system subjected to lightning current considering the soil ionization.

Key Words : Soil Ionization, $V-I$ Curve, Breakdown Voltage, Lightning Current,
Transient Grounding Impedance, Time-Lag To Breakdown

* 주저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822, E-mail : bhlee@inha.ac.kr

접수일자 : 2009년 12월 4일, 1차심사 : 2009년 12월 14일, 심사완료 : 2010년 1월 11일

1. 서 론

우리나라의 대지는 대부분 진흙, 점토, 모래, 자갈, 암반 등 여러 형태의 토양으로 구성되어 있으며, 지질의 성분과 지형 및 장소에 따라 토양의 저항률이 다르다. 접지저항은 접지전극의 형상과 재료, 크기, 접지전극이 매설된 위치의 대지구조, 토양의 형태와 조건 등에 의존한다. 특히, 접지전극에서 방전이 발생하면 접지임피던스는 과도적으로 변화한다[1-3]. 토중방전은 기중방전이나 수중방전과 다르게 시각적인 관찰이 어렵고, 토양의 수분함유량, 입자의 크기, 온도, 압력 등의 토양 내부 상태를 정확하게 알 수가 없으므로 정량적인 해석이 불가능하다. 현재 임펄스전류에 의한 토양의 이온화 특성에 대하여는 많은 연구가 진행되어 왔지만 토양의 종류와 성질에 따른 이온화 특성 및 절연파괴에 대한 이론이 명확하게 정립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 급준성이며 대단히 큰 크기의 뇌서지전류에 대한 과도접지임피던스의 해석을 위해서는 토양의 이온화 현상과 절연파괴특성에 대한 기초자료가 필요하다[4-6].

본 논문에서는 뇌임펄스전류에 의한 토양의 이온화 현상 및 절연파괴특성이 과도접지임피던스에 미치는 영향과 접지시스템의 과도적 성능에 관련된 파라미터를 분석할 목적으로 동축원통형 모델 접지시스템을 이용하여 실험적으로 수행한 연구결과에 대하여 기술하였다. 건조한 상태의 토양과 중량함수비 4[%] 수분을 함유시킨 토양으로 분류하여 모래, 황토, 마사토, 자갈 등의 토양에 1.2/50[μ s] 표준 뇌임펄스전압을 인가하였을 때 절연파괴특성을 나타내는 전압과 전류의 파형을 측정하고, 이를 기초로 하여 절연파괴가 발생하는 임계전계의 세기, 절연파괴전압-시간특성과 이온화에 따른 전압-전류특성, 임피던스-시간특성을 평가하고, 접지전극시스템의 과도적인 임피던스에 대하여 분석하였다.

2. 실험계의 구성 및 방법

2.1 실험계의 구성

본 연구에서는 뇌임펄스전압에 의한 토양의 이온화에 따른 과도적인 임피던스의 특성을 분석하기 위해 임펄스전압발생장치, 동축원통형 접지전극계 및 전압과 전류의 파형을 관측하는 장치 등으로 이루어진 실험계를 그림 1과 같이 구성하였다.

봉상 또는 매설지선의 접지전극을 모의하는 이온화가 전극계의 축과 직각의 방사상의 방향으로 진전되도록 동축원통형 전극계로 구성하였다. 실험 용기는 내경 180[mm] 스테인리스강을 이용하여 원주형으로 단말부에서의 전계집중에 의한 이온화를 방지하기 위해서 끝단을 환상으로 제작하였다. 내부 전극으로 직경 2.4[mm]인 원주형 동선을 실험용기 중앙에 축방향으로 고정시켰다. 내부 전극의 한 쪽 끝단에는 실험전압이 인가되며, 다른 쪽 끝단은 전계집중에 의한 이온화의 발생을 방지하기 위하여 전극 끝단을 용기 밖으로 배치하고 구형 전극으로 단말 처리하였다.

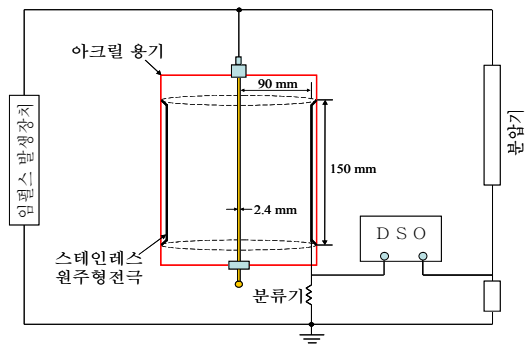


그림 1. 실험계의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

접지전극을 모의한 원주형 내부 전극을 임펄스전압 발생장치에 접속하였고, 원주형 용기를 전류측정용 분류기를 경유시켜 접지하였다. 실험전압은 최대 400 [kV], 20[kJ]의 전압이 발생하는 Marx형 임펄스전압 발생장치로 인가하였으며, 시료전극에 인가되는 전압은 용량성 분압기(분압비 10,000 : 1)를 이용하여 측정하

였다. 또한, 전극과 접지 사이에 직류에서 15[MHz]까지의 주파수대역인 0.02[Ω]의 동축형 분류기로 방전전류를 측정하였으며, 전압과 전류 파형의 분석을 위해 4채널, (BW, 2.5[GS/s]), 500[MHz]의 오실로스코프와 디지털 임펄스파형분석장치(MIAS 100-14/B, IMS23)를 사용하였다.

2.2 실험방법

토양의 절연파괴특성과 과도임피던스를 자갈, 모래, 마사토, 황토 4가지의 시료에 대하여 측정하였다. 각 토양의 시료를 원주형 용기 안에 채우고 정·부극성 뇌임펄스전압을 인가하였다. 토양의 조건으로는 절연 파괴특성에 대하여는 완전히 건조된 상태 그리고 이온화 현상을 분석할 때는 저항률이 220[Ω·m]인 빗물을 이용하여 각 시료마다 4[%]의 중량함수비의 수

분을 혼합시킨 상태에서 실험하였다. 또한, 토양의 조밀도는 토양입자의 크기와 압력에 의해 결정되므로 동일한 압력의 조건에서 실험하기 위해 시료에 5[kPa]에 해당하는 압력장치를 이용하여 조밀도를 조정후 실험을 수행하였다.

각 토양에 대해 절연파괴전압과 전류의 파형 및 전기적 파라미터를 산출하고, 이들 결과를 토대로 절연 파괴 임계전계의 세기, 절연파괴전압-시간특성 및 과도임피던스를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 절연파괴전압 및 전류 파형

접지전극이 매설되는 토양의 저항률은 지형, 계절, 환경 등에 따라 변화하고, 토양의 성질 또한 다르게 나

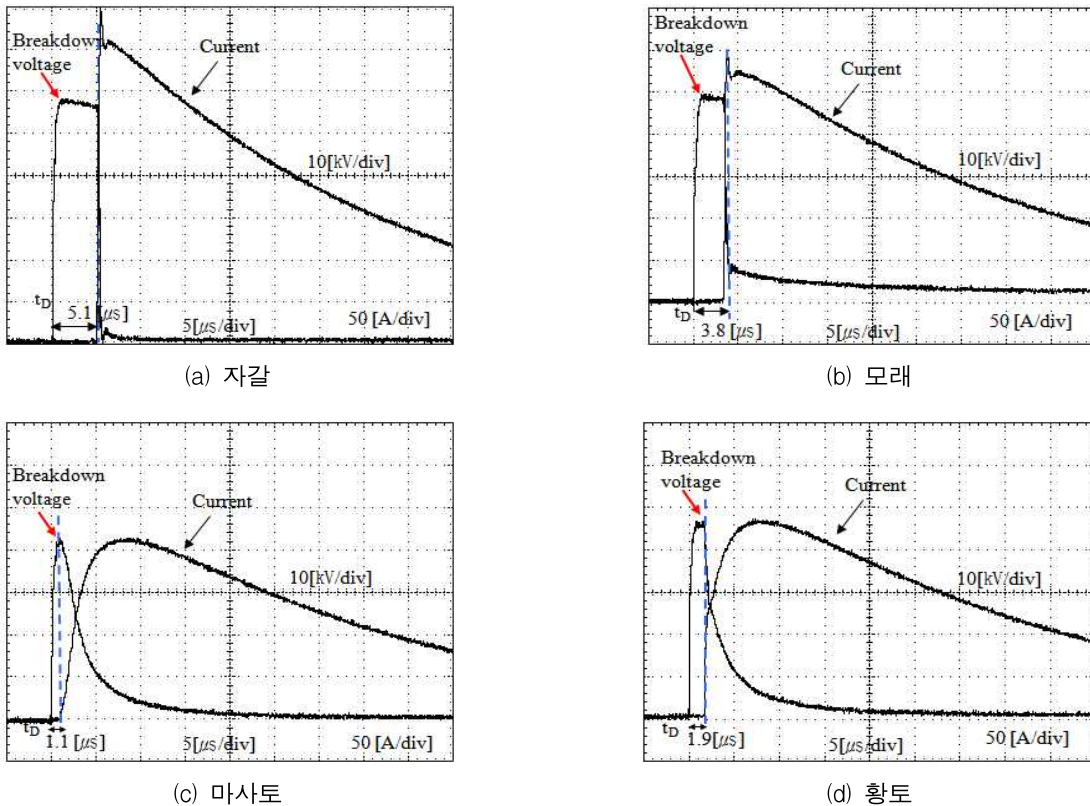


그림 2. 건조한 토양의 절연파괴전압과 전류 파형의 예
Fig. 2. Examples of the voltage and current waveforms for dry soils

타난다. 따라서 접지시스템의 과도접지임피던스특성을 파악하기 위해서는 각종 토양의 방전특성에 대한 기초자료가 필요하다. 포장용수량에 따른 토양의 이온화 특성에 대하여는 이미 발표하였으며[7], 본 논문에서는 건조 상태인 여러 가지 토양의 절연파괴특성과 이에 관련된 과도임피던스에 대하여 기술한다. 자갈, 모래, 마사토, 황토 등 각 토양별 건조 상태에서 표준뇌임펄스전압에 의해 절연파괴가 발생한 때 전압전류의 파형의 예를 그림 2에 나타내었다.

임펄스전압에 의한 각 토양별 건조 상태의 절연파괴 현상은 주로 토양의 종류와 입자크기에 따라 각각 다르게 나타났다. 4가지 토양 모두 절연파괴가 일어날 때 전압이 급격히 떨어지고 전류가 상승하는 것으로 나타났다.

여기서 주목할 점은 절연파괴 이후 전류의 상승곡선이다. 자갈과 모래는 섬락이 발생하는 시점에서 전압은 0으로 떨어지고 전류는 100[A]이상으로 급격하게 상승하였다. 반면 마사토와 황토는 자갈과 모래에 비해 전압은 완만히 강하하고 전류는 서서히 상승하였다. 그 이유는 자갈과 모래의 입자는 황토와 마사토에 비해 크기가 커서 입자 사이의 공극이 차지하는 비율이 크기 때문인 것으로 보인다[8]. 공극이 커지게 되면 일정전압 이상이 되었을 때 공극이 섬락되므로 급격히 상승하고 입자가 작은 마사토와 황토는 입자 사이의 조밀도가 높아 전류의 흐름이 완만해지는 것으로 판단된다.

3.2 절연파괴 임계전계의 세기

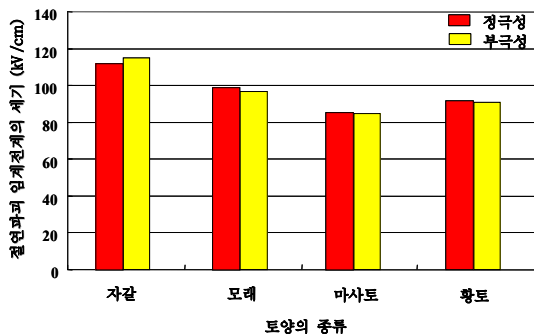


그림 3. 건조한 토양에서 절연파괴를 일으키는 전계의 세기
Fig. 3. Threshold electric field in dry soils

각 토양의 건조 상태에서 뇌임펄스전압에 대한 절연파괴전압을 KS C IEC-60060-1표준에 따라 승강법으로 10회 측정된 값을 식 (1)에 대입하여 절연파괴를 일으키는 임계전계의 세기를 산출하였으며, 정극성과 부극성에 대한 결과를 그림 3에 나타내었다.

본 연구에 적용한 전극계의 절연파괴를 일으키는 전계의 세기는 다음의 식 (1)과 같이 표현된다[9].

$$E = \frac{V}{r_i \ln \left[\frac{r_o}{r_i} \right]} \quad [\text{kV/cm}] \quad (1)$$

여기서,

V : 절연파괴전압 [kV]

r_i : 내부 전극의 반경 [cm]

r_o : 원주형 실험용기의 반경 [cm]

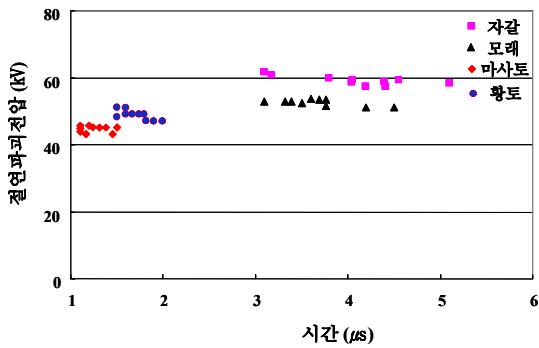
건조 상태에서 절연파괴를 일으키는 전계의 세기는 자갈, 모래, 황토, 마사토 순으로 낮아졌다. 각 토양의 건조 상태에서 절연파괴 임계전계의 세기는 포장용수량 상태에서의 임계전계의 세기보다 높게 나타났다. 따라서 절연파괴 임계전계의 세기는 수분의 함유량과 밀접한 상관성을 가지고 있음을 알 수 있다. 포장용수량이 5[%]인 자갈, 15[%]인 모래, 24[%]인 마사토의 건조 상태에서의 절연파괴 임계전계의 세기는 포장용수량 상태의 약 2 배이었으나 포장용수량이 32[%]인 황토의 경우는 약 1.3 배 상승하였다[7]. 또한, 4가지 시료 모두 극성에 따른 차이는 크게 보이지 않았다.

3.3 절연파괴전압-시간특성

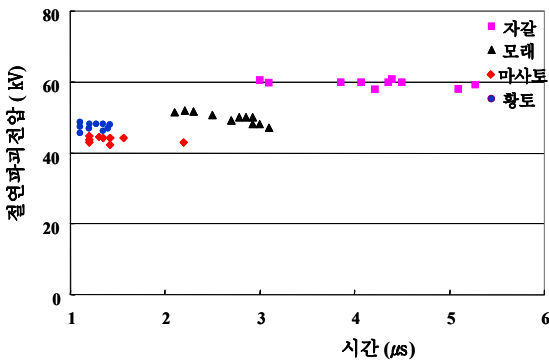
건조한 상태의 각 토양별 방전지연시간특성을 분석하기 위해 인가전압의 원점에서 절연파괴에 의해 전압이 급격히 떨어지기 시작하는 순간까지의 시간과 피크전압을 측정하였다. 각 토양의 종류별 절연파괴전압을 10회 측정된 전압과 방전지연시간에 대한 결과를 그림 4에 나타내었다.

자갈의 절연파괴전압이 다른 시료에 비해 약 60[kV]로 가장 높고, 방전지연시간은 약 3~5[μs]범위로 가

장 길게 나타났다. 절연파괴전압은 마사토가 황토에 비해 조금 높게 나타났으나 방전지연시간은 비슷한 시간대를 형성하였다. 또한, 절연파괴전압이 높은 토양일수록 절연파괴까지의 지연시간이 길게 나타났다. 마사토나 황토와 같이 입자가 작은 토양은 절연파괴 전압에 도달하는 시간이 모래와 자갈에 비해 빠르고, 임펄스 파형의 과도시간 근처에서 일어남을 확인할 수 있었다. 수분이 없는 건조한 상태이므로 토양 입자의 크기가 커서 토양입자 사이에 형성되는 공극이 클수록 기중방전특성과 비슷한 양상으로 방전지연시간이 길게 나타났다.



(a) 정극성



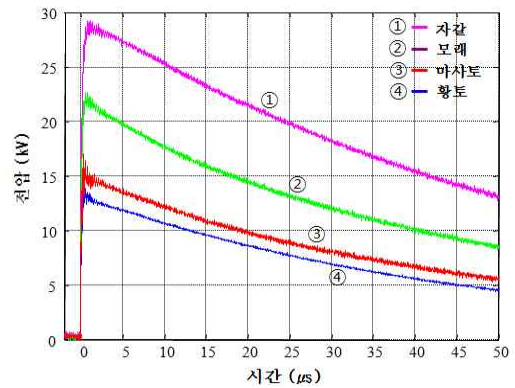
(b) 부극성

그림 4. 건조한 토양의 절연파괴전압-시간 특성
Fig. 4. Breakdown voltage - time characteristics of dry soils

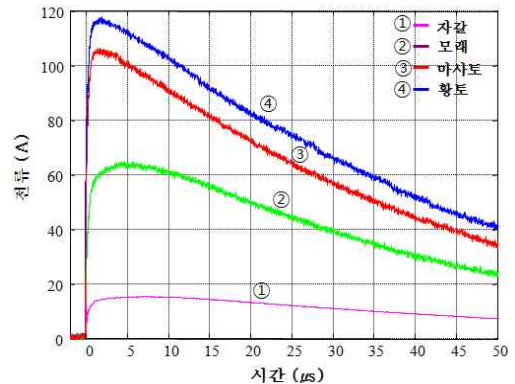
3.4 이온화에 따른 과도임피던스

절연파괴전압보다 낮은 레벨의 전압에서 토양의 이온화 작용에 의한 과도임피던스특성을 분석하기 위해

서 각 토양에 저항률이 220[Ω·m]인 빗물을 4[%]의 수분함유율로 혼합한 후 동일한 32[kV]의 전압을 인가한 경우 토양의 종류에 따른 전극 사이의 단자전압과 전류 파형의 예를 그림 5에 나타내었다.



(a) 전압 파형



(b) 전류 파형

그림 5. 수분함유량 4[%]인 토양에서 이온화가 발생할 때의 임펄스전압과 전류 파형의 예

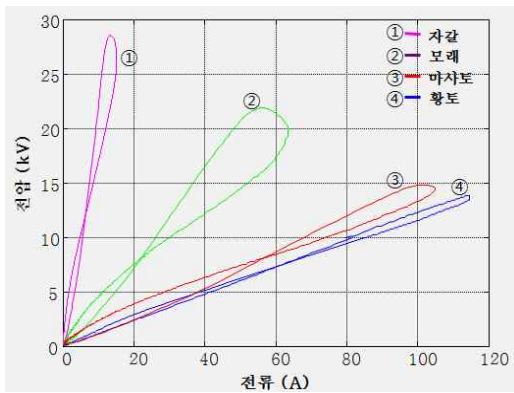
Fig. 5. Examples of impulse voltage and current waveforms when the ionization occurs in soils with 4[%] water content

이와 같이 동일한 크기의 전압을 인가하여도 전극 사이의 단자전압과 전류 모두 다른 파형을 나타내었다. 전압은 자갈이 29.3[kV]로 가장 높고, 황토가 13[kV]로 가장 낮게 나타났다. 전류는 반대로 황토가 가장 크고 자갈이 가장 작았다. 황토의 경우 15[kV]이하로 나타났는데 이는 황토가 저항이 작아 전도전류가 많이 흘러서 인가전압에 비해 전극 사이의 단자전압

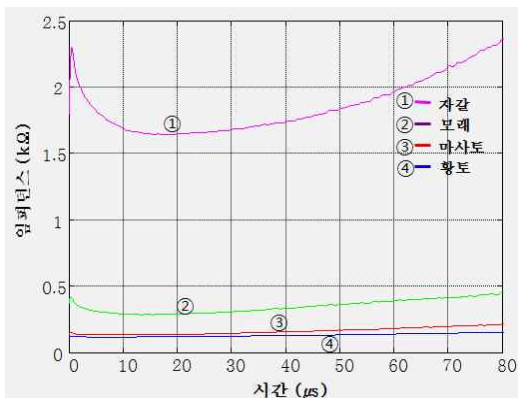
이 낮아지게 되기 때문이다.

모래의 전압과 전류의 파형을 보면 전류의 상승폭과 전압강하폭이 크며, 이온화에 의한 전압과 전류의 위상차가 다른 토양에 비해 큰 모습을 보였다. 이러한 결과는 접지전극을 대지에 시공하였을 때 4가지 시료 중 모래에서 비교적 전류를 대지로 많이 방류시키는 이점이 나타남을 의미한다[9-10].

토양의 종류에 따른 이온화 현상을 전압-전류($V-I$) 곡선과 임피던스-시간($Z-t$)곡선으로 분석하였다. 각 토양에 32[kV]의 전압을 인가한 경우인 그림 5의 전압과 전류의 파형에 대하여 Matlab프로그램을 이용하여 $V-I$ 곡선과 $Z-t$ 곡선을 산출하여 그림 6에 나타내었다.



(a) $V-I$ 곡선



(b) $Z-t$ 곡선

그림 6. 수분함유량 4[%]인 토양의 $V-I$ 곡선 및 $Z-t$ 곡선의 예

Fig. 6. Examples of $V-I$ curves and $Z-t$ curves for soils with 4[%] water content

원점과 곡선의 한 점을 잇는 직선의 기울기는 임피던스를 나타내므로 이온화가 강하게 일어날수록 페루프의 면적이 커진다[11]. 32[kV]의 전압을 인가하였을 때 $V-I$ 곡선은 모든 시료에서 페루프를 형성하며, 임피던스가 감소함에 따라 $V-I$ 곡선이 시계방향으로 회전하는 것으로 나타났다. 그림 6 (a)의 $V-I$ 곡선에서 자갈은 면적이 작은 가느다란 페루프로 나타났으나 변동량이 크며, 황토의 경우 임피던스가 작아 큰 전도 전류로 인해 이온화에 의한 전류의 증가폭이 작아지게 된다.

그림 6 (b)의 결과를 보면 자갈의 경우 이온화에 의한 임피던스의 감소가 가장 크게 나타났으며, 모래에서도 이온화에 의한 임피던스의 감소도 관측되었다. 또한 마사토와 황토의 경우 이온화에 따른 임피던스의 변동 없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다.

4. 결 론

직선형 접지전극을 모의하는 동축원통형 전극계에서 임펄스전류에 의한 토양의 절연과괴특성과 이에 관련된 전기적 파라미터의 분석을 위한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 건조한 토양의 절연과괴전압 및 전류의 파형은 입자 크기에 따라 다르며, 절연과괴 임계전계의 세기는 정·부극성 모두 자갈, 모래, 황토, 마사토 순으로 나타났다.
- (2) 건조한 토양에 임펄스전압을 인가한 때 절연과괴까지의 방전지연시간은 자갈이 3~5[μ s] 범위로 가장 길게 나타났으며, 황토나 마사토와 같이 입자가 작은 토양은 임펄스전압의 파두시간 근처에서 절연과괴가 발생하였다.
- (3) 수분함유량 4[%]인 토양의 이온화 작용에 의한 과도임피던스는 포장용수량이 5[%]인 자갈의 경우 가장 크게 감소하였다. 포장용수량이 각각 32[%], 24[%]인 황토나 마사토의 경우 이온화에 의한 임피던스의 감소는 거의 나타나지 않았다.

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] P. Espel, R. R. D. A Bonamy, and J. N. Silva, A. Wetz, "Electrical Parameters Associated with Discharges in Resistive Soils", IEEE Trans, Power Deli., Vol. 19, No. 3, pp.1174-1182, 2004.
- [2] A.M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents Into Concentrated Electrodes", IEEE Trans. Power Deli., Vol. 9, No. 3, pp.1669-1677, 1994.
- [3] R. Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar. "Experimental Study of Transient Ground Impedances", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 11, pp.4653-4660, 1981.
- [4] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술", 도서출판 의제, 2판, pp.37-104, 1999.
- [5] P. Chowdhuri, "Impulse impedance tests on laboratory model ground electrodes" IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol.150, No.4, pp.427-433, 2003.
- [6] I. F. Gonos and I. A. Stathothopulos, "Soil ionization under lightning impulse voltages", IEE Proc. Sci.- Meas. Tech., Vol.151, No.5, pp.343-346, 2004.
- [7] 김희구, 박건훈, 이복희, "임펄스전압에 의한 동심원통형 전극계에서 토양 이온화특성 분석", 조명전기설비학회논문지, Vol.22, No.9, pp.32-39, 2008.
- [8] 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. Elect. Power, John Wiley & Sons, Ltd, DOI: 10.1002, 2007.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] S. Sekioka, M. I. Lorentzou, M. P. Philppakou, and J. M.P. rousalidis. "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 21, No. 1, pp.194-201, 2006.

◆ 저자소개 ◆



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 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



이강수(李康壽)

1970년 2월 19일생. 2006년 2월 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 동 대학원 전기공학과 석사졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정. (주)의제전기설비연구원 기술연구소 연구소장.

Tel : (02)2632-4541

Fax : (02)2671-5313

E-mail : pwrtoy@empal.com



김희구(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