

뇌임펄스전압에 의한 불평등전계에서 토양방전특성

(Soil Discharge Characteristics in Inhomogeneous Field Caused by Lightning Impulse Voltages)

유양우* · 김승민 · 김유하 · 이복희**

(Yang-Woo Yoo · Seung-Min Kim · You-Ha Kim · Bok-Hee Lee)

Abstract

This paper presents experimental results about characteristics of soil discharge as a function of moisture content when the 1.2/50 μ s lightning impulse voltage is applied. The laboratory experiments, for this study, were carried out based on factors affecting the transient behavior in soils. The electrical breakdown in soils was measured over a 0-6% range of moisture content for sands and a 0-4% range of moisture content for gravels. Needle-plane electrode systems was used As a result, the conduction current prior to ionization growth in dry soil is a little, but it in wet soil is increased with the applied voltage because the wet soil particles act as conductors. The soil impedance curves show an abrupt reduction just after breakdown. The general tendency measured in different soils is that the higher the water content, the lower the breakdown voltage and the shorter the time-lag to breakdown.

Key Words : Soil Discharge, Lightning Impulse Voltage, Discharge Voltage, Ionization Growth, Formative Time-lag, Transient Impedance

1. 서 론

토양의 저항률이 매우 높은 사막, 야산 등에 낙뢰와 같이 매우 높은 과도과전압이 접지극을 통해 토양으로 방전될 때 접지극 주변의 존재하는 토양의 저항률은 크게 저감된다. 또한 접지극의 접지임피던스를 비

롯하여 표면전위상승 저감에 크게 도움이 된다. 토양은 다양한 입자크기, 조성, 수분함유정도, 유기질 및 무기질 등 여러 가지 복합적인 성질이 섞여있기 때문에 토양의 요소를 고려한 실규모의 접지전극 실험은 매우 어렵다. 현재까지 접지시스템의 과도임피던스 특성 연구는 그동안 많이 진행되었으나[1-5], 토양방전에 대한 실험적 데이터는 아직 불충분하다.

토양의 물리적 특성 및 뇌격전류와의 메커니즘을 파악하는 것은 접지시스템 향상을 위해 매우 중요한 요소이며[6-8], 임펄스방전은 토양입자 사이의 공기의 이온화현상 및 토양에 함유된 수분에 관련된 저항률에 영향을 받는다[9].

* Main author : Candidate for the Ph. D, Dept. of Electrical Engineering, Graduate School, Inha University

** Corresponding author : Professor, Department of Electrical Engineering, Inha University

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

Received : 2015. 2. 16

Accepted : 2015. 3. 11

토중에 위치한 접지전극 주변에서 발생하는 방전특성은 뇌격전류의 크기 및 토양의 저항률 및 유전율에 영향을 받는다. 뇌격전류가 다소 작고, 토양의 저항률이 크다면 접지임피던스는 저항성을 나타낸다. 하지만 토양을 통해 흐르는 뇌격전류가 매우 크고, 토양의 저항률이 낮은 경우 토양은 이온화과정을 거쳐 불꽃방전으로 진전하게 된다.

과도전압에 의한 방전에 있어서 토양내의 전계는 방전형성에 매우 중요한 요소이다. 실제 다양한 환경에서 뇌격에 의해 접지전극 주변에서 방전이 발생하기 때문에, 뇌격이 발생한 때 전계의 집중정도는 접지전극의 형상, 토양의 조건과 특성 등 매우 복잡한 환경적 영향을 받는다.

본 논문에서는 피뢰설비의 접지시스템 성능과 밀접한 관련성이 있는 뇌격에 의한 토양 내의 방전특성을 파악하기 위하여 자갈 및 모래의 수분함유 정도를 다르게 하여 토양 내 흐르는 뇌격전류 및 방전전압을 측정하고 분석하였다. 또한 방전개시시간을 관찰하여 토양의 종류에 따라 수분함유량이 방전진전에 미치는 영향 및 토양방전에 따른 과도접지임피던스를 분석하고 활용성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

낙뢰가 피뢰침에 입사한 때 봉형 접지전극을 통하여 뇌격전류가 대지로 방류되는 과정을 모사하기 위해서 그림 1과 같은 실험계를 구성하였다. 직경 300mm의 실린더형 실험용기를 사용하였고, 상부전극으로 끝단의 곡률반경이 약 3mm인 상용 접지전극을 길이 200mm로 절단하여 사용하였으며 하부 전극은 동판으로 제작하였다. 상·하부전극 간격은 175mm의 조건에서 실험하였다.

시료토양으로 모래와 자갈을 선정하였으며, 시료토양의 물리적 파라미터를 표 1에 나타내었다. 전원장치로는 직류 충전전압 100kV, 커패시턴스 1 μ F이고 충전에너지량 5kJ인 커패시터를 4단으로 구성한 1.2/50 μ s 표준뇌임펄스파형의 전압을 발생시키는 Marx Generator를 사용하였다. 실험은 온도 25 $^{\circ}$ C, 습도 50%인 실험실에서 실시하였다. 임펄스전압은 40kV부터

240kV까지 40kV의 간격으로 입사시켜 실험하였다. 임펄스전압은 10,000:1 비율을 갖는 용량성 임펄스전압분압기를 사용하여 검출하고 축적형 오실로스코프로 파형을 관측하였다. 계측기기는 절연변압기와 전원용 필터를 경유하여 전원을 공급하고 패러데이케이지에 넣어 노이즈와 전자기간섭의 영향이 저감되도록 하였다.

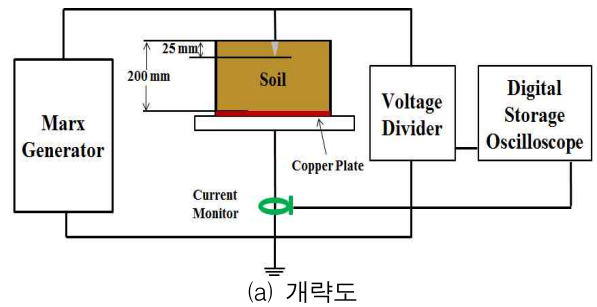


그림 1. 실험장치의 개략도 및 사진
Fig. 1. Schematic diagram and photograph of the experimental setup

표 1. 시료토양의 물리적 파라미터
Table 1. Physical parameters of sample soils

	입자크기	저항률(10kHz)($\Omega \cdot m$)	
		수분 0%	수분 3%
모래	< 0.3mm	수분 0%	31,291
		수분 3%	645
		수분 6%	530
자갈	10-12mm	수분 0%	48,466
		수분 2%	4,478
		수분 4%	1,295

시료토양은 표준체를 이용하여 규격에 따라 입자크기를 분류하였고, 수분함유량은 저항률 70Ω·m의 수돗물로 조절하였다. 증량비율의 수분함유량은 모래 0에서 6%, 자갈 0에서 4%까지 균일하게 섞은 조건에서 실험하였다. 시료토양을 용기에 넣은 후 압력 5kPa으로 압축한 상태에서 시험전압을 공급하여 방전전압, 방전전류 파형을 관측하였다.

3. 결과 및 고찰

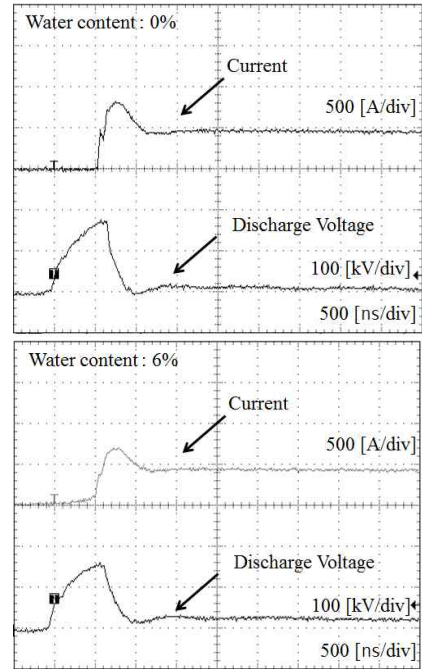
3.1 임펄스방전특성

뇌임펄스전압에 의해 봉형 접지전극 주변에서 발생하는 토양의 방전특성을 분석하기 위해 모래 및 자갈에서의 방전전압과 전류를 수분함유량 변화에 따라 측정하였고, 최대한 수분의 증발에 의한 영향이 없도록 하였다.

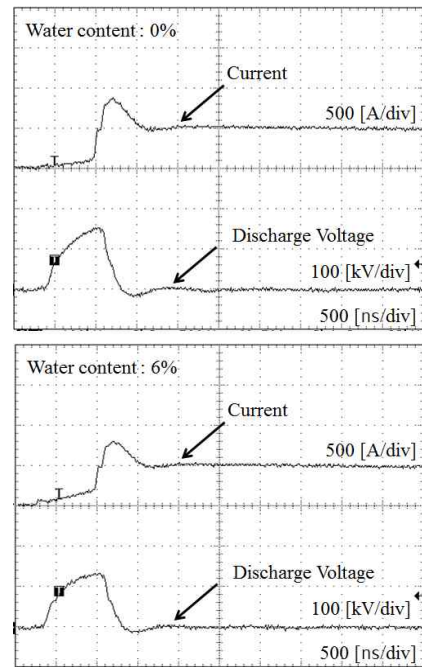
1.2/50μs 뇌임펄스전압에 대한 전형적인 토양의 방전전압 및 전류 파형을 그림 2에 나타내었다. 전류 파형에서 상승부의 계단상의 상승은 토양 내 공극에서 방전 2~3단계로 진전되는 것을 나타낸다. 토양에 고전압을 공급할 때, 전압의 증대에 따라 전계의 세기가 높아지므로 토양 내 공극에 존재하는 공기와 수분 분자는 전자와 이온을 발생시키는 이온화 작용을 일으키게 된다. 또한 전계가 더욱 높아지면 급격한 전리성장에 의해 전자증식이 가속화되어 불꽃방전으로 진전하게 된다.

인가된 전압이 비교적 낮은 경우 전도성 전류가 시료토양을 통해 흐르게 된다. 전도성 전류는 입사전압의 크기에 비례하여 선형적으로 증가하게 되며, 토양 내 수분함유율이 증가할수록 전도성 전류도 증가하는 것으로 관찰되었다. 일반적으로 질소분자 이온화 에너지 1402kJ/mol, 물의 이온화 에너지 1216kJ/mol로 수분의 증가는 전극 사이에 존재하는 매질의 평균이온화 에너지를 낮추는데 기여한 것으로 보인다.

공급전압이 방전을 야기할 수 있을 정도로 높을 때, 방전전류는 전도성 전류에 이어져서 급격하게 증가한다. 충분히 높은 임펄스전압이 토양 공극에 인가되면, 각 전압인가에서 방전이 일어난다. 전압과 전류의 비



(a) 모래



(b) 자갈

그림 2. 1.2/50μs 뇌임펄스전압으로 측정된 토양방전 전압 및 전류 파형

Fig. 2. Observed voltage and current waveforms for soil discharges due to the 1.2/50μs lightning impulse voltage

전형 특성이 방전진전으로 나타난다. 토양방전의 지속시간은 대략 $50\mu s$ 이고, 이는 전극간격 및 Marx Generator를 포함한 실험계 회로의 선로정수에 의해 결정된다.

뇌격전압에 의해 접지전극 주변에서 토양방전이 발생하게 되면 전위는 크게 저감되며 대지 내에 흐르는 뇌격전류는 증가하게 되며, 접지전극을 포함하여 토양의 임피던스 역시 크게 저감한다. 토양방전이 발생한 때 상부전극 전위의 순시값을 방전전류로 나누어 과도접지임피던스를 산출하였다. 그림 3은 공급전압 200kV에 의해 방전이 발생한 모래시료와 자갈시료의 과도접지임피던스 곡선을 나타낸 것이며, 과도임피던스는 방전전류의 시작점을 기준으로 하였다. 방전이 발생하기 이전에 흐르는 전도성 전류에 의한 임피던스는 방전 후의 임피던스에 비해 대단히 크기 때문에 동일한 좌표상의 그래프로 나타내는 것이 불가능하다.

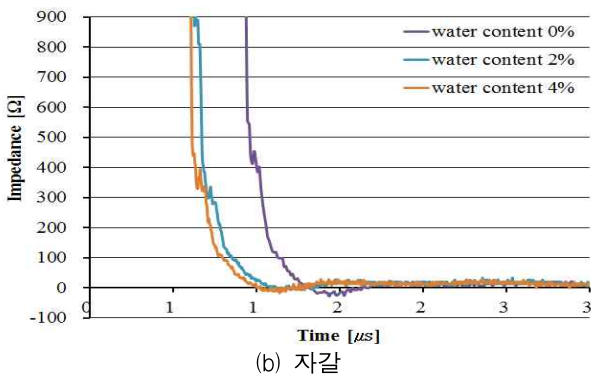
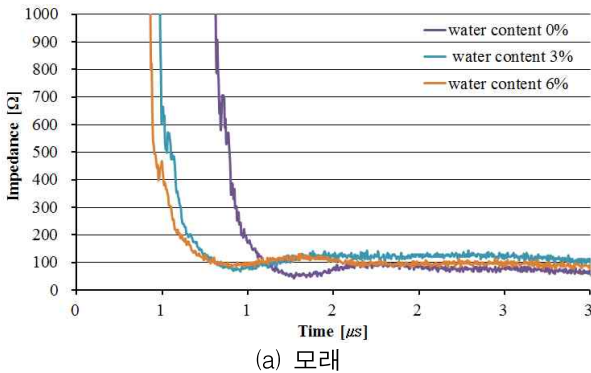


그림 3. 수분함유량에 따른 과도임피던스곡선
Fig. 3. Transient impedance curves as a parameter of water contents

모래와 자갈 모두 수분함유율이 증가할수록 과도임피던스곡선은 짧은 시간영역으로 천이되는 경향을 나타내었으며, 두 시료에 대한 과도임피던스곡선의 양상은 전반적으로 유사하였다. 또한 수분함유량이 0%인 건조 상태의 토양에서 방전이 일어난 경우 임피던스의 저감이 현저한 것도 비슷한 결과를 보이고 있다.

모래와 자갈의 과도임피던스의 차이는 방전이 완성된 순간에 상응하는 임피던스의 최소값이 다른 점이다. 모래의 과도임피던스의 최소값은 약 50Ω 이상이었으나 자갈의 경우 수분이 함유된 상태에서 거의 0이거나 건조 상태에서는 부(-)의 값을 나타내었다. 이와 같은 현상은 방전의 진전과정과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다. 모래의 경우 전극 사이 방전의 진전은 모래입자 사이의 수분을 경유하는 전리성장(ionization growth)으로 이루지기 때문에 상당한 에너지가 소모되며 방전경로의 전압강하에 의해 임피던스가 형성되는 것으로 볼 수 있다. 이에 반하여 자갈의 경우 방전진전이 자갈입자 사이의 공극을 자갈표면을 경유하는 불꽃방전(sparking)으로 이루어지기 때문에 전극 사이가 완전 교락상태로 되므로 임피던스가 0가 되는 것으로 판단된다. 자갈의 건조 상태의 경우 자갈입자 사이에 형성된 공극의 교락에 기인된 실험회로의 오버슈트로 임피던스가 부(-)의 값으로 나타난 것으로 볼 수 있다.

3.2 방전전압-시간특성

임펄스전압의 공급에서 토양방전이 일어나기까지는 반드시 방전이 진전되기 위한 어느 정도의 시간이 요구된다. 기체의 섬락이나 고체의 절연파괴가 발생하는 전압과 발생하는 시간을 각각 종축과 횡축으로 나타낸 방전전압-시간특성은 방전에 따른 절연물의 기초적 분석 자료로 매우 중요하다[10-11]. 토양에서의 방전은 전도성 전류가 흐른 후 전리성장이나 섬락과 정으로 진전하는 것으로 관측되었다. 따라서 본 논문에서는 그림 4에 나타낸 바와 같이 방전지연시간(t_3)을 임펄스전압의 공급으로 전도성 전류가 흐르는 시간(t_1)과 방전이 개시되어 섬락에 이르는 형성지연시간(t_2) 2영역으로 나누어 분석하였다.

방전전압-시간 ($V-t$)곡선은 IEC60060-1에서 제시한 실험과정에 따라 방전이 발생하기 이전의 최대전압으로 나타냈다[12]. 모래와 자갈 시료에 대하여 수분함유율을 파라미터로 하여 측정된 방전전압-시간특성곡선을 그림 5에 나타내었다.

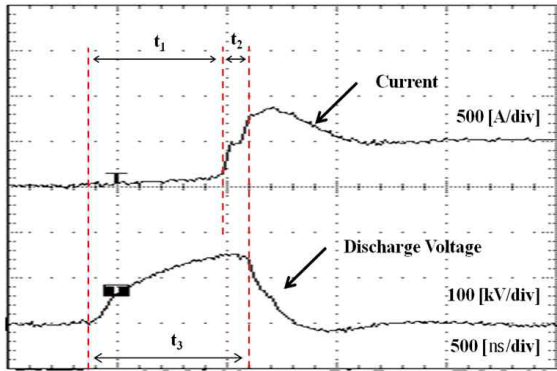


그림 4. 토양방전에 요구되는 시간의 정의
Fig. 4. Definitions of the time required for the soil discharge

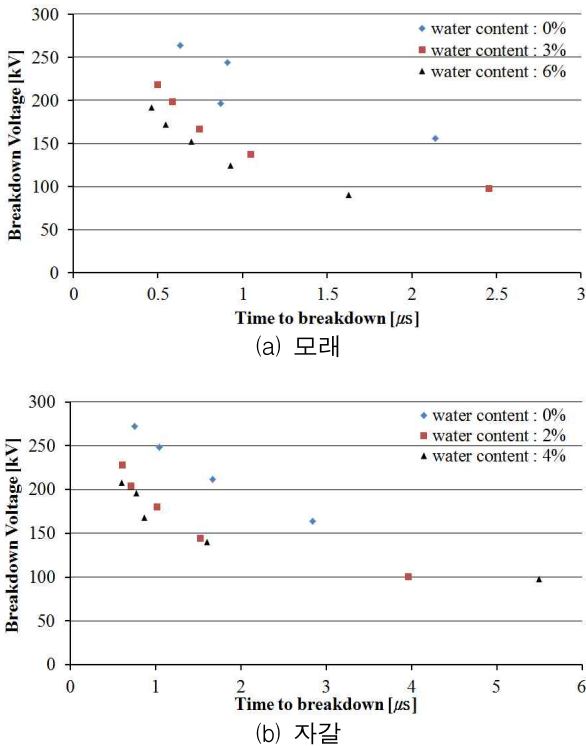


그림 5. 수분함유율에 따른 $V-t$ 곡선
Fig. 5. $V-t$ curves for different water contents

동일한 크기의 임펄스전압에서 방전이 발생하기까지의 시간지연은 수분함유량이 증가할수록 하향으로 이동하였다. 또한 저항률이 작은 모래의 $V-t$ 곡선이 자갈보다 낮게 측정되었다. 모래와 자갈 모두 수분함유율이 증가할수록 $V-t$ 곡선의 하향 이동의 정도는 점차 줄어들었다. 자갈의 경우가 수분함유량이 증가할수록 방전지연시간도 길어지는 것으로 나타났다.

전도성 전류가 종료되고 전리성장이 시작하기까지의 시간은 임펄스전압의 크기, 수분함유량, 토양 입자크기에 주로 의존한다[13-14]. 임펄스전압을 공급한 후 전도성전류의 흐름이 지속되는 시간 즉, 전리성장이 시작되기까지의 시간지연이 시료의 수분함유량에 따라 변동되는 특성의 측정결과를 그림 6에 나타내었다.

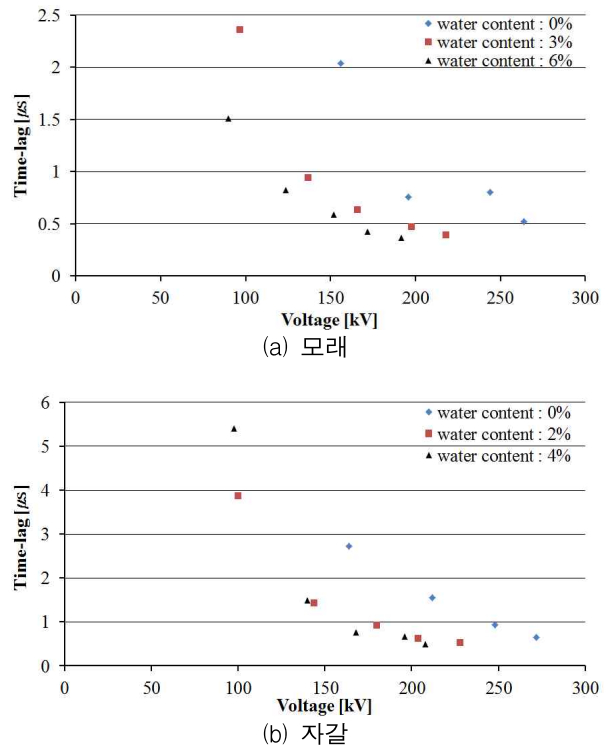


그림 6. 수분함유량에 따른 전리개시까지의 시간
Fig. 6. Time to the initiation of ionization as a function of water contents

전리성장이 개시되기까지의 시간지연(t_1)은 시료토양 내의 공극에서 수분 및 공기의 분자가 전리작용을

위한 초기전자가 발생하기 위한 시간으로 토양의 종류와 수분함유량과 같은 물리적 특성에 의존적이다. 또한 전리성장이 개시되기까지의 시간지연은 수분함유량이 증가할수록 짧아졌고, 공급전압의 크기가 높을수록 감소하였다. 모래와 자갈 시료에서 전리성장이 시작되기까지의 시간지연은 다소 차이가 있는 것으로 관측되었으며, 이는 모래 및 자갈의 공극 크기와 공극 내에 수분이 유지되는 시간정도 등 물리적 특성의 차이에서 비롯된 것으로 판단된다.

형성지연시간(t_2)은 전리성장이 시작되어 섬락에 이르기까지 소요되는 시간을 의미한다. 형성지연시간은 전리성장 또는 불꽃방전의 진전시간에 상응하고 방전의 진전메커니즘과 밀접하게 관련이 있다. 자갈과 모래의 방전이 완성되는 교락상태까지의 형성지연시간을 수분함유량에 따라 측정된 결과를 그림 7에 나타내었다.

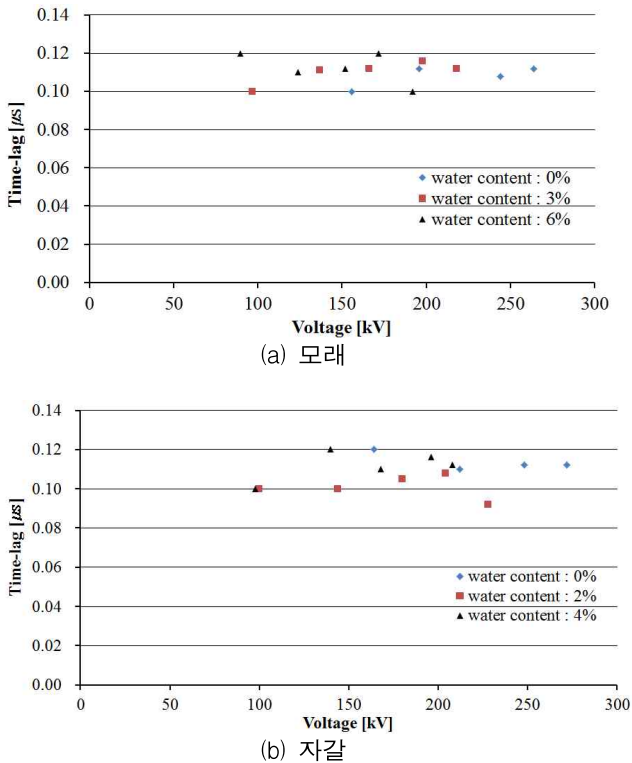


그림 7. 수분함유량에 따른 형성지연시간
Fig. 7. Formative time-lag as a function of moisture contents

형성지연시간은 토양 내 방전시작과 진전과정에 필수적으로 의존하게 된다. 모래 및 자갈의 형성지연시간은 수분함유량이 증가함에 따라 약간 작아졌다. 형성지연시간은 임펄스전압의 크기에 거의 영향을 받지 않았으며 0.09~0.12 μ s로 측정되었다. 자갈과 모래에서 입자 사이의 공극이 방전이 진전하는 과정의 지속 시간인 형성지연시간에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 모래와 자갈 시료의 공극에서 초기전자의 발생을 경유하여 전리작용이 시작되는 조건의 생성 소요시간은 시료의 물리적 조건에 크게 영향을 받지만 일단 전리성장이 개시된 후에는 방전이 빠르게 진전되기 때문에 그 차이는 미미한 것으로 보인다. 즉, 토양에서 전리성장이 발생하는 조건의 생성에 소요되는 시간은 토양의 종류나 수분함유량 등의 물리적 파라미터에 크게 영향을 받지만 전리성장이 개시되면 방전의 진전이 중지되지 않도록 급속히 이루어지므로 형성지연시간은 거의 같은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서 뇌격전류가 접지전극을 통해 대지로 방류될 때 토양의 종류 및 수분함유율이 방전형성에 미치는 영향과 접지시스템의 성능과의 상관성을 파악하기 위한 목적으로 뇌격이 봉형 접지전극에 입사하는 것을 모의하는 실험계를 구성하여 토양방전에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 토양에서 임펄스전류의 방전은 2가지 메커니즘을 통해 이루어지며, 첫째는 전도성 전류의 흐름이며, 두 번째 단계는 이온화 과정이다. 전기적 방전현상은 전도성 전류가 흐른 후 나타나는 이온화 과정이 계단형으로 진전함에 따라 발생된다.
- (2) 접지전극 주변에서 토양방전에 의해 접지전극의 전위가 급격하게 낮아졌으며, 모래의 경우 토양방전으로 접지임피던스가 현저하게 저감됨을 확인하였다. 또한 수분함유량의 증가에 따라 방전개시까지의 시간이 짧아지고 접지임피던스도 작게 나타났다.
- (3) 방전에 이르기까지의 시간지연은 뇌격전압의 크

기에 반비례한다. 전리성장이 시작되기까지의 시 시간지연은 토양의 물리적 특성과 임펄스전압의 크기에 의존하며 이는 $V-t$ 곡선을 통해 확인하였다. 향후 피뢰시스템의 수뢰장치에 낙뢰가 입사하여 접지전극에서 방전이 발생하는 경우 과도접지임피던스의 특성해석을 연구를 추진할 예정이다.

References

- [1] I.F. Genos, I.A. Stathopoulos, "Soil Ionization under Lightning Impulse Voltage", IEE Proc-Sci, Vol.151, pp.343-346, 2004.
- [2] IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Inc, pp.49-63, 2000.
- [3] Abdul M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrode", IEEE Trans, Vol. 9, No. 3, pp.1672, 1994.
- [4] Z. Song, M. R. Raghuvveer and J. He, "Model for prediction of characteristics of lightning breakdown channels in soil in the presence of a buried cable", IEE Proc. - Genere. Transm. Distrib., Vol.150, No.5, pp.623-628, Sep. 2003.
- [5] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Characterization of Ionization Phenomena in Soils under Fast Impulses", IEEE Trans. PD, Vol.21, No.1, pp.353-361, Jan. 2006.
- [6] A. Phillip, "Guide for Transmission Line Grounding: A Roadmap for Design, Testing and Remediation; Part 1-Theory Book, EPRI Report, pp 4.1-4.13, 2006.
- [7] I.F. Genos, I.A. Stathopoulos, "Soil Ionization under Lightning Impulse Voltage", IEE Proc-Sci, Vol.151, pp.343-346, 2004.
- [8] IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substaion Grounding, IEEE Inc, pp.49-63, 2000.
- [9] Abdul M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrode", IEEE Trans, Vol 9, No. 3, pp.1672, 1994.
- [10] E. Kuffel, W. S. Xaengl and J. Kuffel, High Voltage Engineering - Fundamentals, 2nd ed., Butterworth - heinemann, pp.359-365, 2000.
- [11] T. M. Flanagan, C. E. Mallon, R. Denson, and R. E. Leadon, "Electrical Breakdown Properties of Soil", IEEE Trans. Nuclear Science, Vol.NS-28, No.6, pp.4432-4439, Dec. 1981.
- [12] IEC 60060-1, High-voltage test techniques - part 1 : General definition and test requirements, pp.14-22, 2001.

- [13] S. Sekioka, M. I. Lorentzou, M. P. Philippakou, and J. M. Prousalidis, "Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization", IEEE Trans. PD, Vol.21, No.1, pp.194-201, Jan. 2006.
- [14] N. Mohamad Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Performance of Earthing Systems of Low Resistivity Soils", IEEE Trans. PD, Vol.21, No.4, pp.2039-2047, Oct. 2006.

◇ 저자소개 ◇



유양우 (柳良佑)

1958년 2월 2일생. 2009년 2월 인하대 공학대학원 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정수료. (주)광명 전기 전무이사.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail: yoo@kmec.co.kr



김승민 (金承珉)

1985년 8월 22일생. 2011년 8월 인하대 자연과학대 물리학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : sm0822@inha.edu



김유하 (金庾河)

1980년 4월 27일생. 2007년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2013년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)광명전기 연구소 과장.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : baal80@daum.net



이복희 (李福熙)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
1988~1989년 동경대학 객원연구원. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 2010~2011년 본 학회 회장. 현재 인하대 IT공대 전기공학과 교수. 당 학회 명예회장.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr