

## 낙뢰 리더의 대지부착과정에 대한 기초적 연구

(A Basic Study on the Attachment Process of Lightning Leader to Ground)

유양우\* · 김승민 · 김유하 · 이복희\*\*

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

### Abstract

This paper presents the results of model tests for the attachment process of lightning leader to ground which is one of poorly understood processes of cloud-to-ground lightning discharges. In order to simulate the attachment process of lightning leader to ground, we investigated the discharge characteristics of air gap between the tip of needle-shaped electrode and the soil surface as a parameter of moisture content in soils when the positive and negative 1.2/50 $\mu$ s lightning impulse voltages are applied. The breakdown voltage and the discharge light were observed. As a result, the attachment processes of lightning leader to ground are strongly dependent on the grain size and the moisture content of soils. The time to breakdown was shortened with increasing the magnitude of incident impulse voltages. The delay time from application of the highest voltage to breakdown in sand is shortened with increasing the moisture content. The delay time from application of the voltage to breakdown in gravel varied from about 0.5 $\mu$ s to several  $\mu$ s. As the moisture content in soil increases, the breakdown voltages are decreased and the breakdown voltage versus time to breakdown curves are shifted toward the lower side. The results obtained in this work are similar to those for non-uniform air gap stressed by lightning impulse voltages.

Key Words : Lightning, Lightning Leader, Attachment Process, Lightning Impulse Voltage,  
Discharge Voltage - Time-lag Curve, Soil Surface Discharge

### 1. 서 론

뇌운의 전하에 의해서 형성된 전계의 세기가 대기의 절연과괴강도를 넘어서면 계단상 리더가 발생한다. 계단상 리더는 뇌운에서 대지를 향해 진전하는 하향 리더와 대지에서 뇌운을 향해 진전하는 상향 리더로 분류되며, 계단상 리더의 진전으로 뇌운과 대지가 교락됨에 따라 낙뢰의 발생이 완성된다. 부극성 낙뢰의 경우 부전하를 갖은 하향의 계단상 리더가 대지 근방

---

\* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정  
\*\* 교신저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학과 교수  
\*\* Corresponding author : Professor, Department of  
Electrical Engineering, Inha University.  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2014년 7월 28일  
1차심사 : 2014년 7월 30일  
심사완료 : 2014년 8월 14일

에 도달하면 대지표면은 정(+)전위로 대전되어 대지 표면에서 계단상 리더를 향하는 스트리머를 방사하게 된다. 대지에서 방사된 스트리머가 계단상 리더를 만나는 부착과정을 통하여 귀환뇌격으로 이행하게 된다[1-3].

계단상 리더와 대지 사이를 교락하는 스트리머방전을 기반으로 하는 부착과정은 대기 중에 놓인 침-평판 전극 사이의 방전과 유사하며, 귀환뇌격과 접지가 결합되는 전기적 특성으로 나타난다. 귀환뇌격의 부착과정의 특성은 대지의 물리적 성질에 따라 영향을 받게 된다. 특히 대지를 구성하는 토양의 물리량 중에서 토양입자의 종류, 크기, 조성, 수분함유량 등은 접지시스템에 흐르는 뇌격전류의 진도메커니즘과 특성의 분석에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으며[4-7], 낙뢰가 대지로 입사하는 과정의 특성은 안정된 전기전자 시스템의 구축을 위한 기본기술로 매우 중요하다. 또한 귀환뇌격의 선행방전인 계단상 리더와 대지표면 사이의 임펄스전압에 의한 방전은 공기의 이온화현상 및 토양입자 표면의 수분에 따른 저항률에 따라 결정된다[8].

본 논문에서는 대지에 귀환뇌격이 발생하는 경우 토양의 수분함유율에 따른 귀환뇌격의 부착과정의 특성을 파악하기 위하여 정극성과 부극성의 표준 뇌임펄스전압을 입사시켜 방전전압에 따른 방전개시까지의 지연시간을 측정하여 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

대기 중에서 계단상 리더가 진전하여 대지에 부착하는 과정을 관측하고 물리적 특성을 분석하기 위해 침-평판 전극으로 이루어진 모의실험계를 그림 1과 같이 구성하였다. 침전극으로는 곡률반경 1mm인 원추형 동봉을, 그리고 평판전극으로는 대지를 모사하는 모래 또는 자갈을 사용하였다. 실험에 사용된 시료의 토양은 경사진 원주형으로 하면의 직경은 400mm, 상면의 직경은 250mm이고 높이는 70mm로 하였으며, 전극과 시료토양표면 사이의 거리는 30mm로 하였다.

시료 토양으로는 가는 모래(입자의 직경: <0.3mm), 굵은 모래(1-2mm), 가는 자갈(10-12mm) 및 굵은 자

갈(20-25mm) 4종류에 대하여 실시하였다. 전원장치는 직류 충전전압 100kV, 1μF, 충전에너지량 5kJ인 커패시터를 4단으로 구성한 표준 뇌임펄스파형 1.2/50μs의 전압을 발생시키는 Marx발생장치를 사용하였다. 임펄스전압은 50kV부터 240kV까지 20kV의 간격으로 입사시켜 실험하였다. 임펄스전압은 10,000:1 비율을 갖는 용량성 임펄스전압분압기를 사용하여 검출하고 축적형 오실로스코프로 파형을 관측하였다. 시료 토양의 수분함유량에 따른 정극성과 부극성의 표준 뇌임펄스전압에 의한 방전현상으로 정지카메라를 이용한 방전광을 촬영하고, 방전개시전압과 시간지연특성을 측정하고 분석하였다. 토양의 수분함유량은 일반적으로 중량비로 나타내며, 수분이 함유된 중량과 건조 상태의 중량의 차를 건조 상태의 중량에 대한 비율로 정의한다. 시료 토양의 수분함유량은 포화수분량을 고려하여 모래의 경우 중량비율로 0-9%, 그리고 자갈의 경우 0-3%에서 실험하였다.

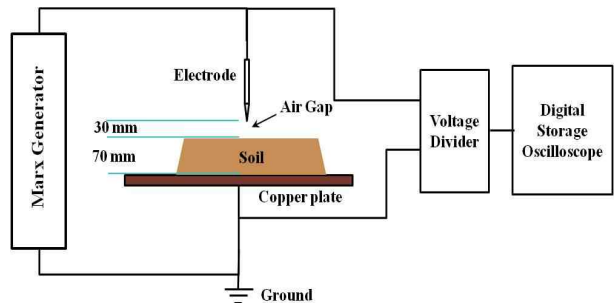


그림 1. 실험장치의 개략도  
Fig. 1. A schematic diagram of the experimental set-up

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 방전광 특성

1.2/50μs의 정극성 임펄스전압을 전극계에 입사시켰을 때 가는 모래의 수분함유량에 따라 관측한 방전광의 사진의 전형적인 예를 그림 2에 나타내었다. 수분함유율은 토양의 건조중량 대비 수분함유중량과 건조중량 차의 비율로 나타내었다. 평판전극인 모래의 수분함유량이 증가함에 따라 방전경로의 왜곡이 작아지

고 방전의 부착점의 침전극의 직하부분으로 나타났다. 뇌임펄스 입사전압이 높아짐에 따라 방전경로가 직선화되고 리더채널의 직경이 굵게 나타났다. 또한 리더채널의 굵기는 전극의 끝단보다는 중앙부위가 더욱 굵게 나타났으며, 이는 하향의 리더 끝단과 상향스트리머가 부착되는 접합점에서 격렬하게 방전이 진전되었기 때문인 것으로 보인다. 입사전압이 낮을 때 리더채널의 길이가 길은 것으로 보아 섬락에 이르기까지의 시간지연이 길어지기 때문인 것을 가시적으로 확인할 수 있다.

본 연구에 적용한 수분함유량 9%까지는 그림 2에 나타낸 바와 같이 모두 리더가 토양의 표면에 부착된 후 토양을 관통하여 진전되는 방전형태를 나타내었으며, 이미 발표된 연구결과와 유사한 양상을 나타내었다[9].



그림 2. 수분함유량이 3과 9%인 가는 모래의 정극성 1.2/50 $\mu$ s 뇌임펄스에 대한 방전광 사진  
 Fig. 2. Photographs of discharge light for fine sand with 3 and 9% moisture contents under the 1.2/50 $\mu$ s lightning impulse voltage for the positive polarity

토양의 표면에 수분이 많이 있거나 지표 하부층이

점토질 토양인 경우 토양의 표면에 입사한 임펄스전압은 대기표면을 따라 진전하는 표면방전의 양상을 나타내기도 한다[10]. 지중 또는 대기표면에서 발생하는 아크채널을 형성하는 방전과정은 접지저항을 저감시키는 주요 요인으로 알려져 왔다[11].

### 3.2 방전전압-시간특성

침-평판전극에 임펄스전압을 입사시켰을 때 불꽃방전은 전압이 입사된 순간이 아니라 어느 정도 시간이 경과한 후에 발생하게 된다. 즉 전압이 입사된 후 초기전자의 생성과 스트리머의 형성과정을 거치는 시간이 필요하다. 따라서 방전형상의 진전메커니즘이 명확하게 밝혀지지 않은 전극계의 물리적 특성의 해명과 절연설계에 있어 방전전압-시간특성은 중요한 자료로 활용된다[12]. 평판전극이 수분함유량 0%인 가는 자갈인 경우 정극성 뇌임펄스전압의 크기에 따른 방전전압과형을 그림 3에 나타내었다.

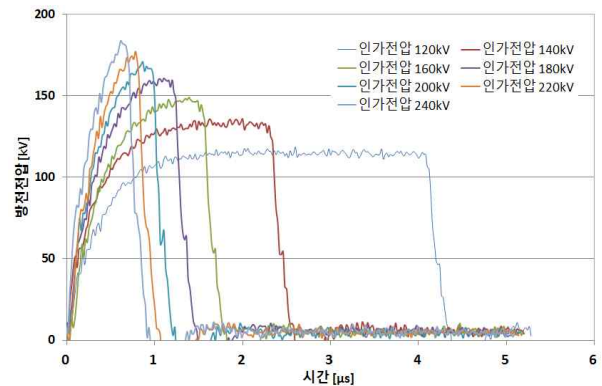


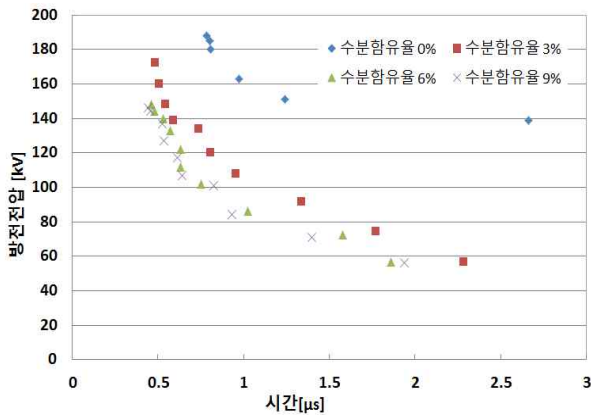
그림 3. 건조한 자갈의 경우 방전과정 동안의 임펄스전압파형  
 Fig. 3. Impulse voltage traces during discharge processes for dry gravel

입사전압이 높아짐에 따라 불꽃방전에 이르기까지의 시간지연이 짧아지는 전형적인 불평등전계 중에서 공기의 절연과괴특성과 거의 유사한 양상을 나타내었다. 인가전압이 낮은 경우 방전형성지연시간이 비교적 길게 유지됨을 나타내고 있으며, 이는 그림 2에 나타낸 방전광의 사진에서 알 수 있는 바와 같이 리더채널의 길이가 길어지는 것과 상관성이 있는 것으로

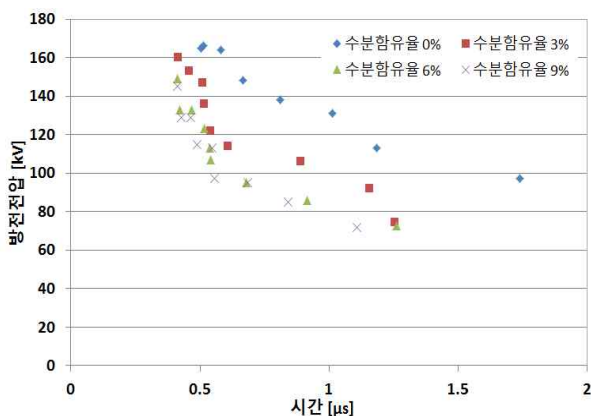
추정된다.

본 연구에서 모의한 침-평판으로 구성된 전극계에 정극성과 부극성의 1.2/50 $\mu$ s 임펄스전압을 50kV부터 240kV까지 입사시켰을 때 평판전극인 모래의 수분함유량에 따른 방전전압-시간지연특성에 대한 실험결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 방전전압-시간지연 곡선(V-t곡선)의 종축은 섬락이 일어나지 전에 입사된 뇌임펄스전압의 최대값을 그리고 횡축은 임펄스전압이 입사되어 섬락이 발생하여 전압이 급격히 저하되기 시작하는 순간까지의 시간을 취해 도식적으로 나타내었다. 정극성 절연과피전압의 최대값은 부극성

에 비해 높았으며, 최소값은 오히려 낮게 나타났다. 절연과피까지의 시간지연은 정극성 임펄스전압이 부극성보다 길게 나타났다. 본 실험조건인 전극계에서 뇌 임펄스전압에 의한 불꽃방전을 일으킨 전압과형과 V-t곡선의 특성은 대기 중에 놓인 불평등전극계의 전형적인 방전현상과 유사하게 관측되었으며[13], 단지 음극이 토양인 조건의 영향만 다르게 나타날 것으로 예상된다.

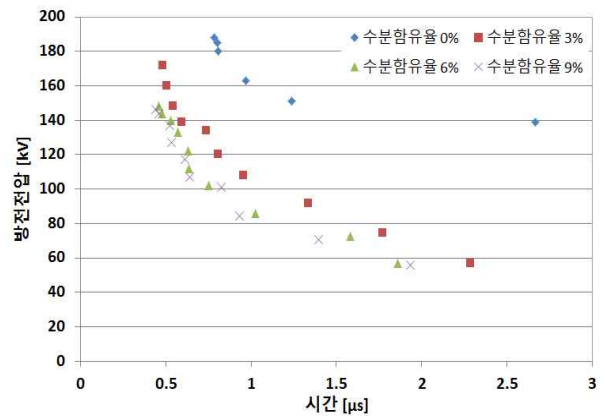


(a) 정극성

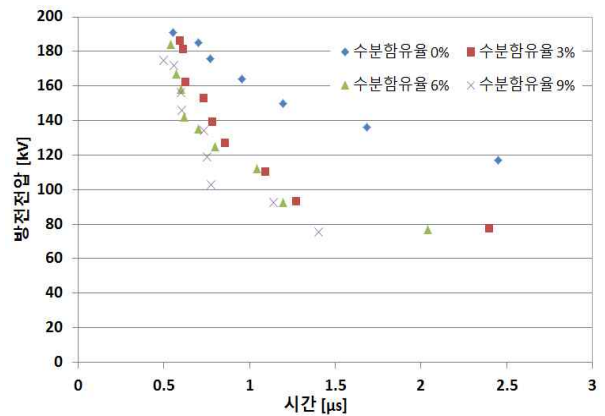


(b) 부극성

그림 4. 가는 모래의 수분함유율에 따른 방전전압-시간곡선  
Fig. 4. Breakdown voltage versus time to breakdown curves for various moisture contents in fine sand



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5. 굵은 모래의 수분함유율에 따른 방전전압-시간곡선  
Fig. 5. Breakdown voltage versus time to breakdown curves for various moisture contents in coarse sand

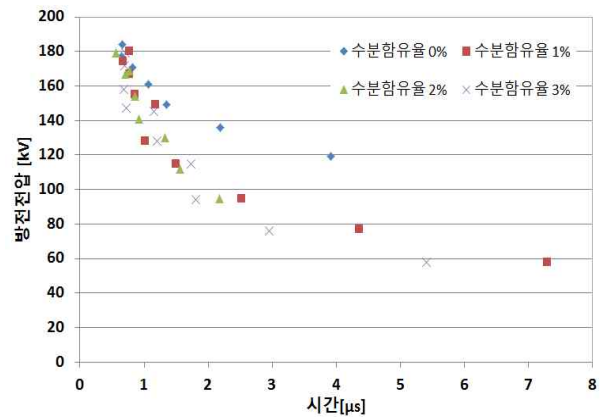
수분함유량이 증가함에 따라 방전전압-시간 특성곡선은 하향으로 강하하는 양상을 나타내었다. 즉 평판전극인 모래의 표면의 수분함유량이 증가함에 따라

방전개시전압은 낮아지고 방전시간도 짧아지는 현상으로 수분함유량의 증가와 더불어 방전의 개시와 진전이 용이해짐을 알 수 있다. 즉 침-평판 전극계에서 음극표면상태가 임펄스방전의 개시와 진전에 크게 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 대지표면의 수분함유량이 많을수록 귀환뇌격의 입사가 쉬워지며, 뇌격전류도 증가할 것으로 예상되며, 그에 상응하는 유도서지전압도 강력하게 발생할 것으로 추정된다.

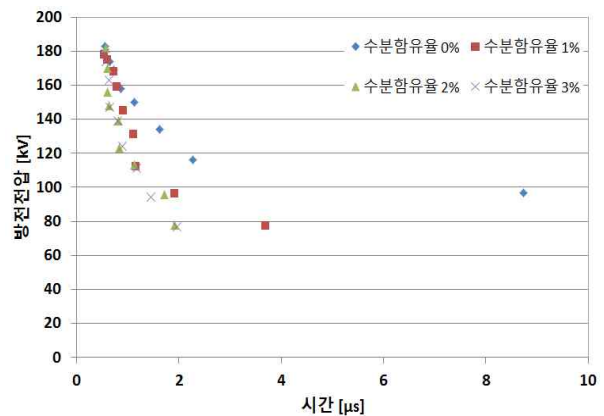
입사하는 임펄스전압의 크기가 증가함에 따라 방전개시시간은 짧아졌고 수분함유량이 증가할수록 방전형성시간도 크게 증가하였다. 수분이 함유되지 않은 건조한 굵은 모래의 경우  $V-t$ 곡선은 수분이 함유된 경우보다 훨씬 상위에 위치하며, 수분함유량의 의존성은 미약한 것으로 나타났다. 동일 질량 대비 수분함유량을 기준으로 가는 모래와 굵은 모래의 수분함유율이 0%일 때 방전개시시간과 방전전압은 거의 동일하게 나타났으나 3%의 수분함유량에서 가는 모래의 방전개시시간이 굵은 모래의 방전개시시간보다 짧고 방전전압도 낮은 것으로 나타났다. 이는 가는 모래의 경우 공극에 수분이 침투한 비율이 큰 반면 상대적으로 공극이 큰 굵은 모래의 경우 수분을 비롯하여 공극내 공기의 절연파괴전압의 영향이 다소 나타난 것으로 보인다. 또한 수분함유량이 6% 이상에서 방전전압-시간곡선은 거의 비슷하게 나타났다. 모래의 내부에 포함된 공극(void)에서 전계의 세기가 높아지는 것이 지중방전을 일으키는 근원으로 볼 수 있다. 자갈 입자 사이의 공극에서의 전계의 세기의 증가는 토양입자의 불규칙한 형상 및 토양과 공극의 비유전율의 현저한 차이에 의해 형성되며, 불꽃방전의 진전을 촉진시킨다[14]. 가는 자갈과 굵은 자갈의 수분함유량에 따른  $V-t$ 특성곡선을 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

자갈의  $V-t$ 곡선의 극성의존성은 비교적 미약하였으며, 최저 절연파괴전압에 상응하는 시간자연은 모래보다 상당히 길게 나타났다. 자갈의 경우 저항률이 모래에 비하여 입자가 크므로 입사 사이의 공극이 모래보다 상대적으로 넓어 공극내 공기가 방전특성에 미치는 영향이 크게 작용한다. 따라서 이러한 자갈 입자 사이 공극의 영향은 수분함유량의 증가에 따라 큰 영

향을 주지 않은 것으로 나타났으며 수분함유량 1% 이상에서 수분함유량에 따른 방전전압의 큰 차이가 나타나지 않았다. 즉 수분함유량의 증가는 시료 내부인 자갈표면의 수분량의 증가를 가져오나 그 양에 따라서 방전전압과 방전형성시간에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 볼 수 있다. 자갈의 경우도 수분이 함유되지 않은 건조한 가는 자갈과 굵은 자갈의 방전전압-시간특성곡선은 거의 비슷하게 나타났지만, 모래의 경우와 반대로 3% 수분함유율에 대해서 굵은 자갈의 방전개시시간의 더 짧게 나타났다. 자갈의 특성상 입사 사이의 공극의 영향이 크고 수분함유율의 비중이 영



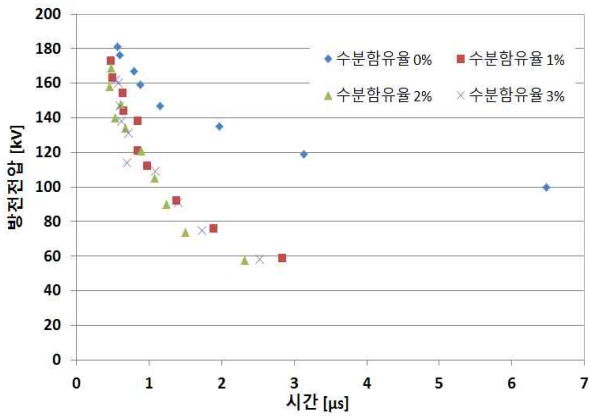
(a) 정극성



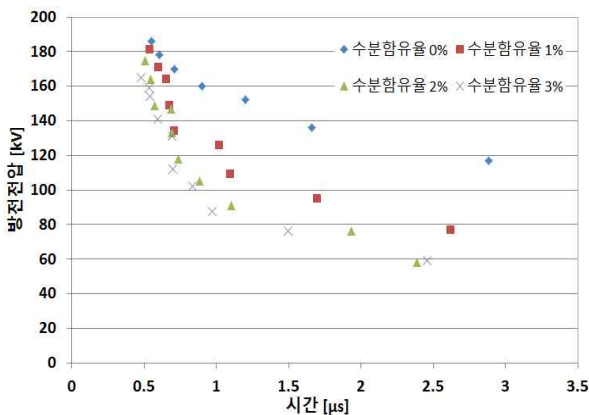
(b) 부극성

그림 6. 가는 자갈의 수분함유율에 따른 방전전압-시간곡선  
Fig. 6. Breakdown voltage versus time to breakdown curves for various moisture contents in small-sized grain gravel

향이 작았기 때문에 모래에 대한 방전전압-시간곡선과 상이한 결과가 나타난 것으로 판단된다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 7. 굵은 자갈의 수분함유율에 따른 방전전압-시간곡선  
Fig. 7. Breakdown voltage versus time to breakdown curves for various moisture contents in coarse grain gravel

#### 4. 결 론

대지표면의 수분함유량에 따른 낙뢰의 부착특성을 분석하기 위한 일환으로 평판전극으로 토양을 적용한 침-평판전극계에 뇌임펄스전압에 대한 방전전압-시간특성을 측정하고 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 뇌격전압이 높아짐에 따라 섬락에 이르기까지의 시간은 짧아지는 하향으로 강하하는 방전전압-시간특성을 나타내었다. 평판전극인 대지의 수분함

유량이 증가할수록 섬락전압은 낮아지고 방전형성시간은 길어졌다. 입자의 크기가 클수록 입자사이의 공극의 영향으로 수분의 영향이 보다 현저한 것으로 나타났다으며, 방전형성시간이 짧은 것으로 나타났다. 대지표면의 수분함유량이 낙뢰가 입사하는 부착과정에 미치는 영향이 현저하였으며, 이는 접지시스템을 포함하는 피뢰시스템의 성능에도 영향을 미칠 것으로 사료되며, 활용을 위한 응용분야의 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No.20133010011770)

#### References

- [1] B. H. Lee and S. C. Lee, Protection of Information and Communication Facilities against Lightning, Department of publication of Inha University, pp.20~25, 2004.
- [2] M. A. Uman, The Lightning Discharge, Dover Publications, Inc., pp.99~107, 2001.
- [3] V. A. Rakov, Lightning - Physics and Effects, Cambridge University Press, pp.137~143, 2003.
- [4] 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.
- [5] I.F. Genos, I.A. Stathopoulos, "Soil Ionization under Lightning Impulse Voltage", IEE Proc-Sci, Vol.151, pp.343~346, 2004.
- [6] IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Inc, pp.49~63, 2000.
- [7] B. H. Lee, G. H. Park, H. G. Kim, K. S. Lee, "Analysis of Soil Ionization Behaviors under Impulse Currents", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 4, pp.98~105, 2009.
- [8] A. M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrode", IEEE Trans, Vol 9, No.3, pp.1672, 1994.
- [9] Victor M, Cabrera M, Stig Lundquist, Veron Cooray, "On the Physical Properties of Discharging in Sand Under Lightning Impulses", Journal of Electrostatics, Vol 30, pp.17-28, 1993.
- [10] J. Wang, A. C. Liew and M. Daveniza, "Extension of Dynamic Model of Impulse Behavior of Concentrated Grounds at High Currents", IEEE Trans. PD, Vol.20, No.3, pp.2160~165, 2005.
- [11] V. A. Rakov, M. A. Uman, K. J. Rambo, M. I. Fernandez, R. J. Fisher, G. H. Schnetzer, R. Thottappillil, A. Eybert-Berer, J. P. Berlandis, P. Lalande, A. Bonamy, P.

낙뢰 리더의 대기부착과정에 대한 기초적 연구

Larache, and A. Bondiou-Clergerie, "New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama", J. Geophys. Res., Vol.163, Vol.D12, pp.14,117~14,130, 1998.

[12] B. H. Lee, High Voltage and High Current Engineering, Chungmungak, pp.15-18, 1993.

[13] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, High Voltage Engineering: Fundamentals, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, pp.360~365, 2000.

[14] 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, 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. 본 학회 명예회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr