

균등전계 중에 놓인 침상 전극의 끝단에서 발생한 직류 코로나방전 특성

(Characteristics of DC Corona Discharges Caused at the tip of a Needle-shaped Electrode Placed in the Homogeneous Electric Fields)

김태기* · 김승민 · 이복희**

(Tae-Ki Kim · Seung-Min Kim · Bok-Hee Lee)

Abstract

In the measurement of atmospheric static electric field, it is important to know characteristics of corona discharges caused at the tip of test electrode. This paper presents the fundamental data of DC corona discharges that occurred at the tip of a needle-shaped electrode placed in the homogeneous background electric field which simulates the atmospheric static field under thundercloud. The major characteristics of interest for this purpose are the polarity effect of corona discharges and the magnitudes and time intervals of corona current pulses. The experimental set-up consists of the plate-to-plate configuration with a needle-shaped protrusion, DC power supply, and voltage and current measuring devices. As a result of experiments, the polarity dependence of corona pulses is significantly pronounced. The time intervals between successive corona pulses in the negative polarity is much longer than those in the positive polarity. The time intervals for both polarities is drastically decreased as the applied electric field is increased. Also the magnitudes of the positive corona pulses are slightly changed with an increase in applied electric field, but those of the negative corona pulses are linearly increased with increasing the applied electric fields.

Key Words : Corona Discharge, DC Corona Current Pulse, Polarity Effect,
Atmospheric Static Field Time Interval Between Corona Pulse

1. 서 론

뇌방전 특성의 해석 및 합리적인 피뢰대책의 수립을 위해서는 뇌운의 위치와 규모 등 뇌운의 정보를 파악하는 것이 필수적이며, 뇌운 전하에 의한 지상 정전계의 측정이 중요한 수단으로 활용이 되고 있다. 뇌운에 의해 형성되는 대기전계의 측정에는 필드밀, 정전안테

* 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. 8. 24

Accepted : 2015. 9. 16

나, 침단코로나전류, 전기광학소자, 클리도노그래프 등을 이용하는 여러 가지 기법이 이용되고 있다[1-7]. 지금까지의 지상 정전계의 측정에는 회전형 필드밀이 가장 일반적으로 이용되어져 왔다. 그러나 필드밀은 회전부가 있기 때문에 보수점검이 까다롭고, 가격이 비싸며, 수명이 짧고, 안전대책을 시설하는 문제 등이 있었다. 또한 눈이 많이 오는 시기에는 정확한 측정이 되지 않는 등의 내후성면에서도 옥외에 장기 관측에는 문제가 있다. 이에 비하여 침단코로나전류를 이용하는 대기전계측정법은 내후성 및 기계적 강도 등에서 우수하며, 구조가 간단하여 옥외에 장기관측에 적합하다[8]. 또한 침단코로나전류를 검출하여 뇌운의 접근을 파악하여 정보를 송출하는 피뢰대책에도 활용될 수 있다.

본 논문에서는 뇌운에 의해 형성되는 대기전계 중에서 설치한 침상 전극에서 발생하는 코로나방전전류를 검출하여 대기의 정전계를 관측하기 위한 기초적 자료를 확보할 목적으로 대기 중에서 뇌운에 의해 발생하는 침단코로나방전을 모의하기 위해 균등전계 내에서 침상 전극을 설치하고 직류 전압을 가할 때 발생하는 코로나방전에 대하여 실험적으로 연구하였다. 균등전계의 세기에 따른 코로나방전전류펄스의 크기와 펄스 사이의 시간간격 등에 대한 특성파라미터를 측정하고 분석하였다. 또한 뇌운 전하의 극성에 따른 코로나방전의 극성효과에 대하여 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

뇌운에 의해 형성되는 대기 정전계에 의해 발생하는 침단코로나전류를 검출하여 대기 중의 정전계의 세기를 측정할 수 있는 기초자료의 확보를 위한 연구이므로 균등전계인 대기 중에 설치한 침상 전극에서 발생한 직류 코로나방전을 모의하는 실험계를 그림 1과 같이 구성하였다. 전원 장치로는 3kVA의 용량을 가지는 슬라이드압에 의한 전압조정으로 입력전계의 세기를 조절하였다. 슬라이드압의 출력단에 권수비 1:10인 승압변압기를 연결하였으며, 변압기 출력단에 역내전압 24kV인 정류다이오드와 평활용 커패시터(0.1μF)를 연결하여 DC 전원장치를 구성하였다. 균등전계의 형성

을 위해 알루미늄평판(50cm×50cm)을 20cm 간격으로 평행하게 설치하였고, 하부 평판 전극의 중앙에 구멍을 내어 직경 0.5mm의 침상 전극을 설치하였으며, 침상 전극의 형상과 치수에 대한 상세도는 그림 1 (b)와 같다. 침상 전극의 끝단과 상부 평판 전극 사이의 거리는 8cm로 일정하게 하였다. 코로나방전전류를 관측하기 위해 침상 전극의 하단에 검출저항(10kΩ)을 연결하고, 검출저항의 단자전압은 동축케이블(RG-58)을 경유하여 측정형 디지털오실로스코프로 관측하였다. 평판 전극 사이에 가해진 전압을 능동성 고전압프로브로 검출하여 입력전계의 세기를 산출하였다.

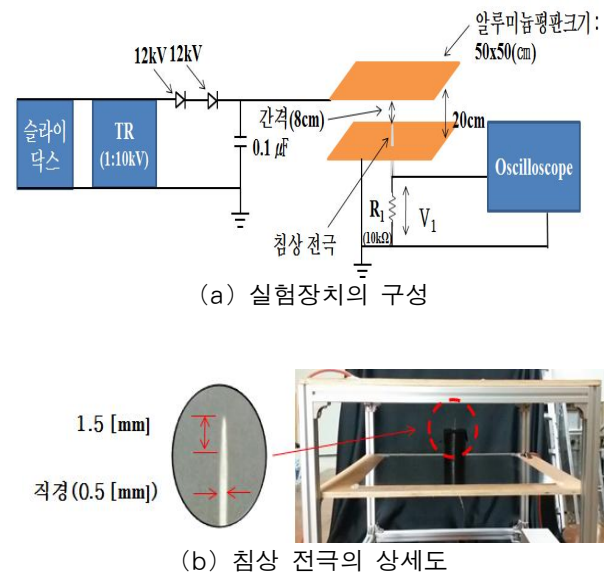


Fig. 1. A schematic diagram of the experimental set-up

3. 결과 및 고찰

뇌운에 의해서 발생하는 지표면의 전계가 어느 일정 값에 도달하면 지상에 설치한 침상 전극의 끝단에서 코로나방전이 발생하며 침상 전극을 통하여 코로나전류가 흐르게 된다. 이를 침상코로나전류라 하며, 코로나전류 I 와 전계의 세기 E 사이에는 아래와 같은 식 (1)의 관계를 나타내며, 코로나전류는 전계의 세기에 따라 선형적으로 변화하므로 코로나전류를 검출하여 전계의 세기를 측정할 수 있다[8-11].

균등전계 중에 놓인 침상 전극의 끝단에서 발생한 직류 코로나방전 특성

$$I = a(E^2 - E_0^2), \quad E \geq E_0 \quad (1)$$

여기서 E_0 는 코로나 개시 전계의 세기이며, a 는 침상 전극의 형상, 치수와 배치에 관련된 정수로 $10^{-13} \sim 10^{-16} \text{A} \cdot \text{m}^2/\text{V}^2$ 정도의 범위이다. 낙뢰가 발생할 때 지표면의 전계의 세기는 대체로 $130 \text{kV}/\text{m}$ 인 것으로 알려져 있다[8].

3.1 전계의 세기에 따른 코로나전류 파형

코로나전류는 불꽃방전 이전에 발생하며 자속방전의 전류로서는 매우 작다. 코로나의 형식, 전극의 형상, 전압의 극성과 크기 등에 따라 다르며, 침상 전극 끝단에서의 코로나전류는 대체로 $10 \sim 100 \mu\text{A}$ 의 범위이다. 배후의 균등전계의 세기에 따른 코로나방전전류의 검출파형의 특성을 각 극성별로 분석하기 위하여 검출저항을 $10 \text{k}\Omega$ 으로 동일하게 하여 측정된 코로나전류펄스의 파형을 그림 2에 나타내었다.

코로나전류펄스의 파형은 정극성과 부극성 모두 개시점에서 순간적으로 상승하고 피크값 이후는 거의 지수함수적으로 감쇠하는 단펄스성으로 나타났다. 검출저항의 크기에 따라 동일한 전계의 세기에서 코로나펄스의 크기는 변동하였지만 파형의 형상의 변화는 거의 없었다. 정극성 코로나전류펄스의 크기는 전계의 세기가 증가하여도 그다지 큰 변동이 없었으나, 부극성의 경우 전계의 세기가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 양상을 나타내었다. 또한 그림 2 (a)의 정극성과 그림 2 (b)의 부극성 각각의 코로나전류펄스의 검출된 파형을 보면 전계의 세기와 극성에 관계없이 감쇠시정수는 $\tau = 3.4 \mu\text{s}$ 는 거의 유사하게 나타났다.

3.2 전계의 세기에 따른 코로나전류펄스 사이의 시간간격

대기 중의 정전계에 상응하는 균등전계의 세기에 따른 코로나전류펄스 사이의 시간간격을 분석하기 위해

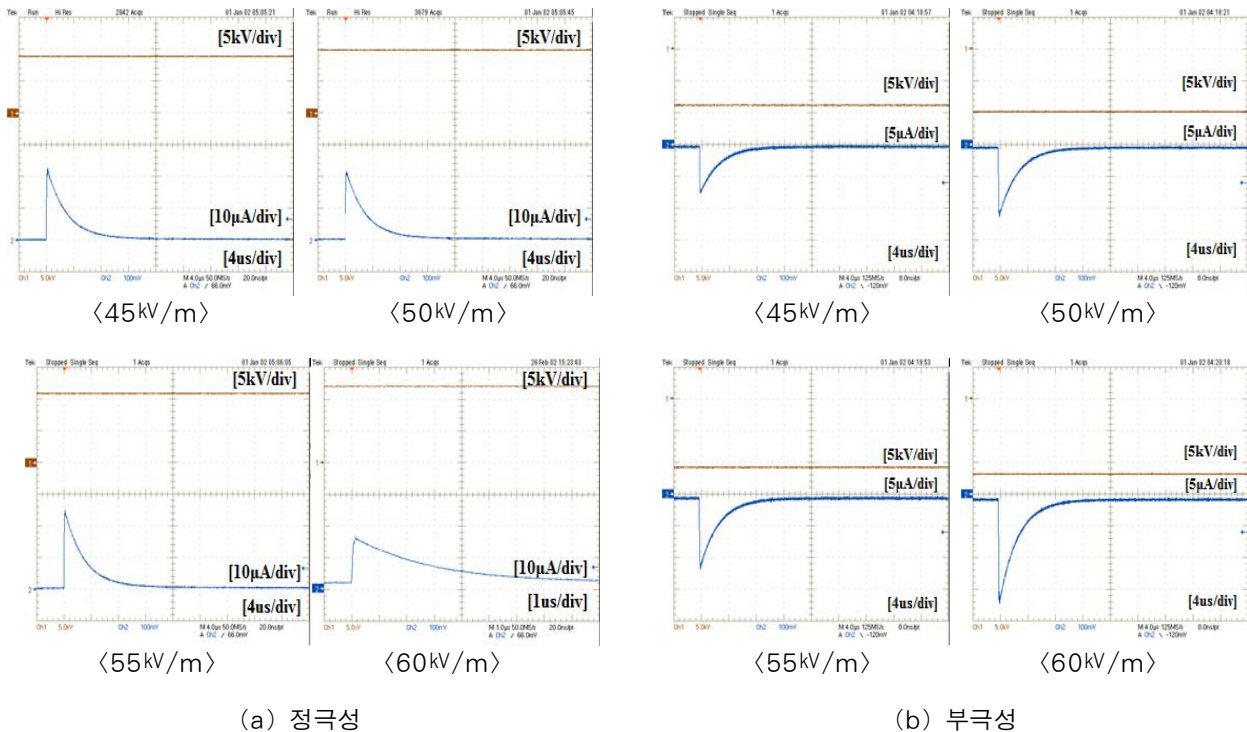


Fig. 2. Waveforms of corona current pulses as a function of electric field intensity

서 정·부극성의 전계의 세기 45~65kV/m의 범위에서 측정된 코로나전류펄스 파형의 대표적인 예를 그림 3에 나타내었다. 본 연구에 적용한 입력전계의 세

기의 범위에서 정극성 코로나펄스의 시간간격은 대략 38~180 μ s 범위이었고, 부극성 코로나전류펄스의 시간간격은 1~78ms 범위로 정극성에 비하여 30~400배

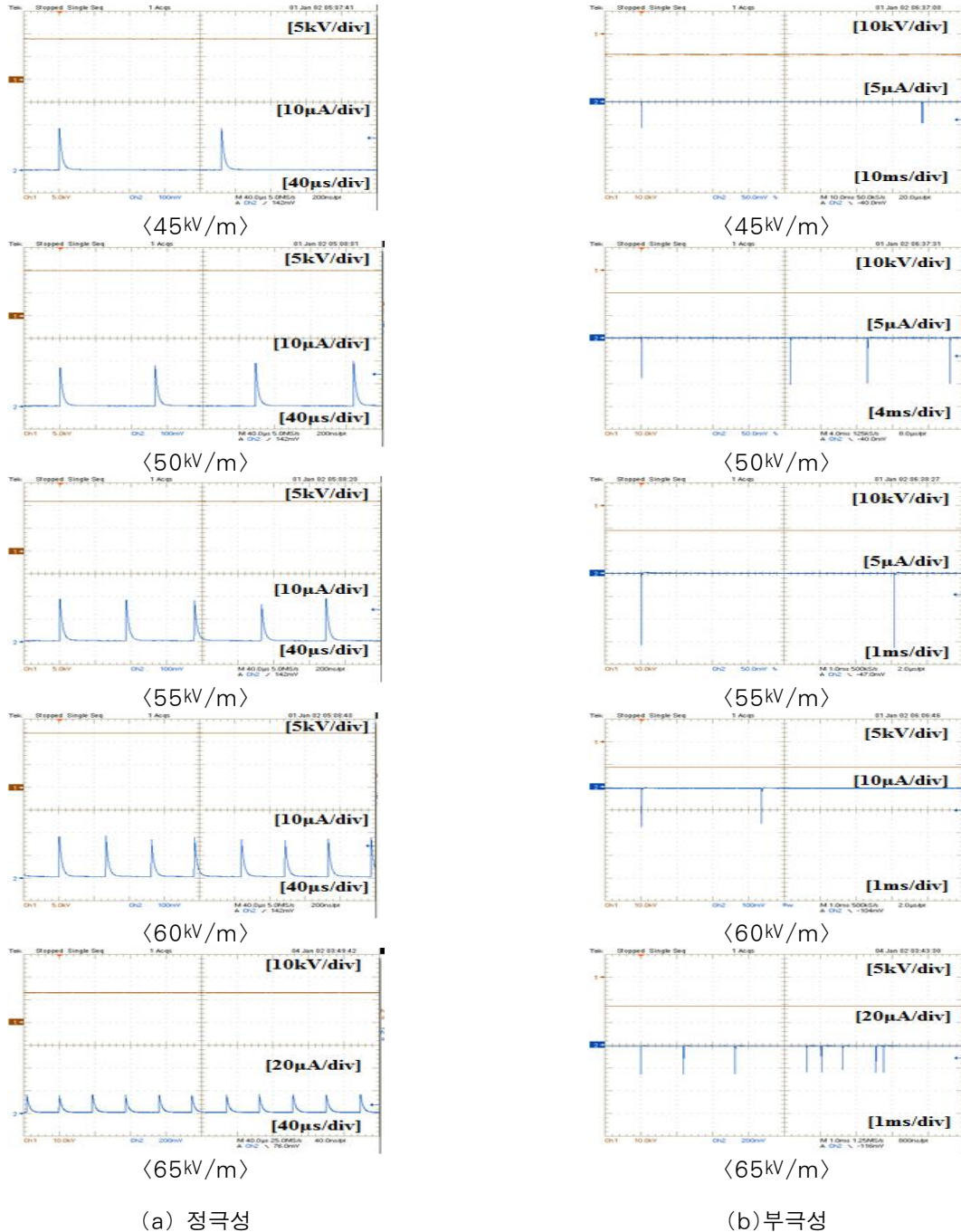


Fig. 3. Typical waveforms of corona current pulses as a function of electric field intensity measured in this work

정도 길게 나타났다.

정극성과 부극성 모두 코로나전류펄스 사이의 시간 간격은 입력전계의 세기에 반비례하여 감소하였다. 정극성의 경우 입력전계의 세기가 증가함에 따라 연속되는 코로나펄스의 크기는 거의 변동하지 않았으며, 코로나전류펄스 사이의 시간간격도 거의 등간격을 유지하는 매우 규칙적인 코로나방전이 안정적으로 발생됨을 알 수 있다. 이 결과를 입력전계의 세기와 코로나펄스의 시간간격의 상관성을 이용하여 전계의 세기를 평가할 수 있음을 추정할 수 있으며, 적분기를 사용하면 코로나방전에 의해 발생하는 전하량이 입력전계의 세기에 비례하여 선형적으로 증가할 것으로 예상된다.

이에 반하여 입력전계의 세기에 따른 부극성 코로나전류펄스의 양상을 보면 정극성에 비하여 규칙성이 다소 유동적임을 알 수 있다. 예를 들면 입력전계의 세기가 증가함에 따라 코로나펄스의 크기가 증가하며, 동일한 입력전계의 세기에 대하여도 일련의 코로나펄스의 크기가 다소 변동하는 양상을 나타내었다. 또한 일정한 전계의 세기에 대하여도 코로나전류펄스 사이의 시간간격이 불규칙적으로 변동함을 알 수 있다. 즉 입력전계의 세기에 따른 코로나전류펄스의 크기와 시간간격의 파라미터가 정극성에 비하여 일정한 선형성을 나타내지 않으므로 검출저항으로 측정된 코로나전류펄스만으로 입력전계의 세기를 평가하는 것이 어려울 것으로 예상되므로 적분기를 이용한 전하량을 검출하여 입력전계의 세기와 선형성을 가지는 파라미터의 산출을 위한 검토가 필요함을 알 수 있다. 이와 같이 입력전계의 세기에 따른 코로나전류펄스 파형의 기초데이터를 확보함으로써 침단 코로나전류의 검출을 통한 입력전계의 세기를 평가할 수 있는 가능성과 해석을 위한 기본적 특성을 파악하였다.

3.3 코로나펄스의 크기와 시간간격의 분포

코로나방전 자체가 국부적인 불평등전계 중에서 발생하므로 배후의 균등전계의 세기가 일정할 때조차 코로나전류펄스의 크기와 시간간격은 변동하므로 통

계적인 해석이 필요하다. 따라서 동일한 전계의 세기에 대하여 5회 이상 측정된 코로나전류펄스 파형을 기반으로 코로나펄스의 크기와 펄스 사이의 시간간격의 변동특성을 통계적으로 분석하였다. 정극성 입력전계의 세기에 따른 코로나전류펄스의 크기와 시간간격의 분포를 각각 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

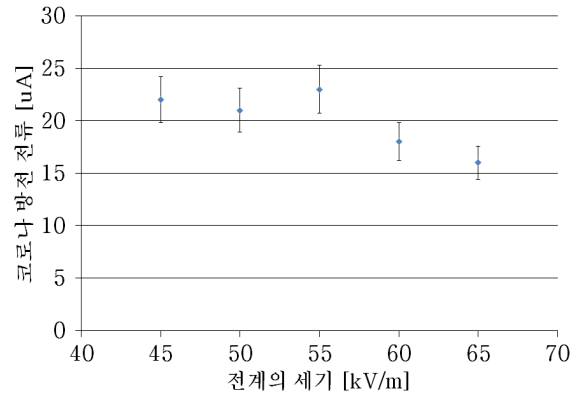


Fig. 4. Magnitudes of the positive corona current pulses as a function of electric field intensity

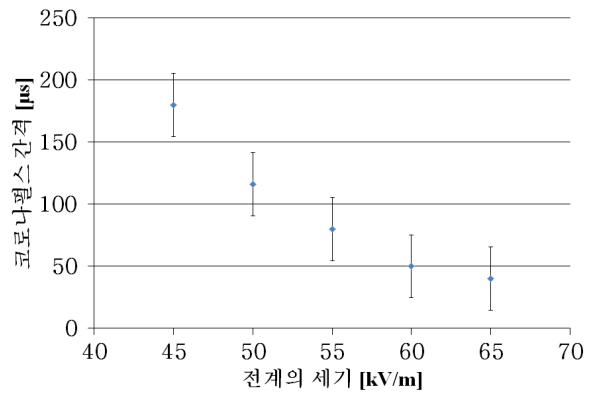


Fig. 5. Time Intervals of the positive corona current pulses as a function of electric field intensity

본 연구의 측정조건에서는 정극성의 경우 코로나전류펄스는 배후의 균등전계의 세기가 약 45kV/m에서 명확하게 검출되기 시작하였으며, 이 때 전류피크의 평균은 약 20 μ A이었으며, 55kV/m에서 약간 증가하였으나 그 이후 전계의 세기가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 코로나전류펄스의 피

크의 최대값과 최소값 사이의 편차는 전계의 세기에 관계없이 약 $5\mu\text{A}$ 로 나타났다.

또한 지속되는 코로나전류펄스의 시간간격은 입력 전계의 세기에 반비례하여 감소하는 특성을 나타내었다. 코로나펄스 사이의 시간간격의 최대값과 최소값의 편차는 약 $50\mu\text{s}$ 로 입력전계의 세기와의 상관성은 거의 없는 것으로 나타났다.

부극성 입력전계의 세기에 따른 코로나전류펄스의 크기와 시간간격의 분포를 각각 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 본 연구의 측정조건에서는 부극성의 경우 코로나전류펄스는 정극성과 마찬가지로 배후의 균등 전계의 세기가 약 45kV/m 에서 명확하게 검출되었으며, 이 때 전류피크의 평균은 약 $15\mu\text{A}$ 이었다. 코로나전류펄스의 크기는 정극성과는 다르게 입력 전계의 세기가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 코로나전류펄스의 피크의 최대값과 최소값 사이의 편차는 전계의 세기에 관계없이 약 $7\mu\text{A}$ 로 나타났으며, 정극성에 비하여 약 1.4배 정도로 약간 더 불규칙적인 코로나방전이 발생됨을 알 수 있다.

또한 연속적으로 발생하는 코로나펄스 사이의 시간간격은 정극성과 마찬가지로 입력전계의 세기에 반비례하여 감소하는 특성을 나타내었다. 전계의 세기 $45\sim 55\text{kV/m}$ 의 범위에서 급격히 감소하였으나 그 이상의 전계의 세기에서는 감소가 완만하게 나타났다.

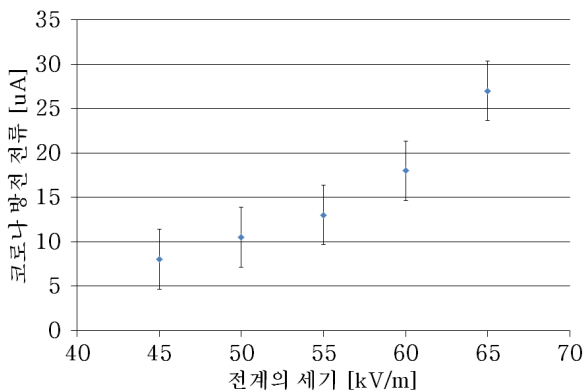


Fig. 6. Magnitudes of the negative corona current pulses as a function of electric field intensity

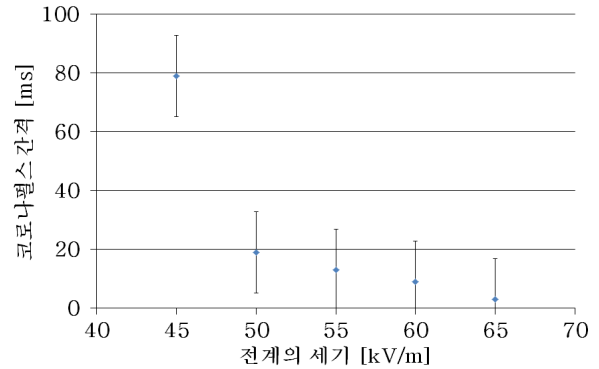


Fig. 7. Time Intervals of the negative corona current pulses as a function of electric field intensity

코로나펄스 사이의 시간간격의 최대값과 최소값의 편차는 전계의 세기 45kV/m 에서 약 80ms 로 가장 크게 나타났으나 입력전계의 세기가 증가함에 따라 점차 감소하여 전계의 세기 55kV/m 에서는 약 17ms 정도로 나타났다. 이 결과로부터 전계의 세기가 어느 정도 이상에서 코로나방전이 보다 안정적으로 지속됨을 알 수 있다.

정극성과 부극성의 코로나전류펄스의 형상은 거의 같았으며 단지 극성만 반대이다. 코로나전류펄스의 크기는 입력전계의 세기 55kV/m 이하에서는 정극성 경우 부극성 보다 크게 나타났으며, 그 이상의 전계의 세기에서는 부극성의 보다 크게 나타났다. 또한 정극성 코로나전류펄스 사이의 시간간격은 부극성보다 훨씬 짧았다. 전반적으로 정극성 코로나전류펄스의 크기와 시간간격은 부극성에 비하여 규칙성이 양호하고 안정적인 것으로 나타났다.

코로나방전은 1atm 근방에서 가장 잘 발생하는 자속방전이며, 전극의 형상, 기압, 전압의 극성과 크기에 따라 글로우(막상)코로나, 선상코로나, 부러시코로나, 스트리머코로나, 리더코로나 등 여러 가지 방전형태로 변화한다[11-13]. 코로나전류펄스의 특성으로 보아 본 연구범위의 코로나방전은 간헐글로우코로나 (intermittent glow corona)에 상응하는 것으로 규칙성이 있고 안정한 특성으로 판단된다. 정극성 글로우 코로나는 공간전하 때문에 억제되어 있는 가장 미약한 상태이며, 코로나전류도 비교적 작으며 안정적인

코로나이다. 전극 가까이에 안정한 글로우방전이 존재하여 음극으로부터의 정이온의 γ_i 작용이 없으므로 전자의 생성이 전리작용만에 의한 것으로 생각된다. 부분적이긴 하지만 정극성 글로우코로나가 안정한 정상방전인 것은 아직도 불가사의한 것으로 아직도 명확한 원인이 밝혀지지 않았다. 아마 정이온의 γ_i 작용 대신에 공간을 통하여 방전광에 의한 음극에서의 γ_p 작용이 발생하고 있는 것으로 추정되고 있다[14]. 부극성 코로나의 경우 침상 전극이 음극이므로 정이온의 γ_i 작용으로 국부적으로 안정한 글로우방전이 발생하며, 이때의 코로나펄스를 트리첼펄스(Trichel pulse)라 한다. 입력전계의 세기가 증가함에 따라 글로우방전영역이 확장되어 코로나펄스의 크기와 반복주기가 부극성 정상글로우방전모드로 되는 임계값까지 증가하는 안정적인 것으로 볼 수 있다[15].

4. 결 론

본 논문에서는 대기 중에 설치한 침상 전극에서 발생하는 코로나방전 특성과 배후의 균등전계의 세기 사이의 상관성을 분석하기 위한 목적으로 실험적 관찰에 대한 연구를 수행하였다. 뇌운에 의해 대기 중에 설치한 침상 전극에 형성되는 전계분포를 모의하는 실험계를 구성하여 침상 전극의 끝단에서 발생하는 코로나전류를 측정하고, 코로나전류펄스의 특성파라미터를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구의 범위에서는 정극성과 부극성 모두 글로우코로나방전으로 매우 안정적이어서 배후의 균등전계의 세기와 선형적 상관성이 양호한 것으로 나타났다.
- (2) 정극성 코로나전류펄스의 피크값은 입력전계의 세기에 상관없이 거의 일정하게 관측되었으며, 연속되는 코로나펄스 사이의 시간간격은 입력전계의 세기에 반비례하고, 선형성이 양호한 것으로 나타났다.
- (3) 부극성 코로나전류펄스의 크기는 입력전계의 세기가 증가함에 따라 비례적으로 증가하였으나 코로나펄스 사이의 시간간격은 감소하는 특성을

나타내었다.

- (4) 정극성과 부극성 코로나전류펄스의 크기의 차이는 현저하지 않았으나 펄스 사이의 시간간격은 수 10~수 100배의 차이를 나타내었다. 향후 입력전계의 세기와 코로나전류펄스 사이의 보다 양호한 선형적 상관성을 가지는 파라미터의 도출이 필요하며, 이에 대한 연구의 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2015년 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

- [1] Tae-ki Kim, Seung-Min Kim, Seung-Jun Park, Bok-Hee Lee, "A Fundamental Study on the DC Corona Discharges Caused at the Tip of Needle-shaped Electrode". Proc. KIEE Spring Annual Conference 2015. pp.169, 2015.
- [2] Hasegawa Kenizi, Ono Iwao, "The Development of Point Corona Electrode Device for Electric Field Evaluation", The Study Committee of IEEJ, ED-93-150, HV-93-58, pp. 125~132, 1993.
- [3] Hasegawa Kenizi, Ono Iwao, "Electric Field Characteristics of Improved Point Corona Electrode Device for Electric Field and outdoor Actual Measurement", The Study Committee of IEEJ, ED-94-142, HV-94-72, pp. 7~14, 1994.
- [4] M. A. Uman, "The Lightning Discharge, Dover Publications", Inc., New York, pp. 345~351. 2001.
- [5] R. A. Rakov and M. A. Uman, Lightning-Physics and Effects, Cambridge University Press, New York, pp. 555~558, 2003.
- [6] Chi-Youn Cho, Bok-Hee Lee, Seung-Min Kim, Hee-Kyung Shin, "A basic study on the sensor system for detecting the electric fields of the atmosphere", Proc. KIEE Autumn Annual Conference 2014, pp.122, 2014.
- [7] K. A. Nicoll and R.G. Harrison, "A lightweight balloon-carried cloud charge sensor", Review of Scientific Instruments, Vol.80, 04501-1~4, 2009.
- [8] Koumura Tatu, "Instrumentation Method of Atmosphere Electric Field", Joint Convention of the Institutes of Electrical and related Engineers., pp. 22~25, 1984.
- [9] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, High Voltage Engineering - Fundamentals, 2nd Ed., Newnes, Oxford, pp. 348~359. 2000.
- [10] M. A. Uman, Lightning, Dover Publications, Inc., New York, pp. 66-67, 1984.
- [11] Kitakawa Siniti, "Design Code of Combined Storm Tracer and Operation Situation by actual Thundercloud",

The Study Committee of IEEJ, ED-91-142, HV-91-59, pp. 165~174, 1991.

- [12] Bok-Hee Lee, Hyeong-Joon Kil, Ju-Hong Eom, Chang-Hwan Ahn, "Characteristics of Ionic Wind in a DC Corona Discharge in Needle-to-punched plate Geometry", Journal of KIEE, Vol.17, No 4, pp. 74~80, 2003.
- [13] Bok-Hee Lee, "High Voltage and High Current Engineering", Cheong Moon Gak, pp.10~12, 53~64. 2008.
- [14] Tageda Ssmu, "A base of Gas Discharge", Dong Myeong Publishers, pp. 57~63, 1978.
- [15] M. Abdel-Salam, H. Anis, A. El-Morshedy, and R. Radwan, High-Voltage Engineering - Theory and Practice, 2nd Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 148~161, 2000.

◇ 저자소개 ◇



김태기 (金泰己)

1970년 7월 12일생. 2008년 8월 인하대 공학대학원 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정. (사)대한전기협회 부장.

Tel : (032) 860-7398,

Fax : (032) 863-5822,

E-mail : ktk@elec.or.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



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