Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 22, No.8, pp. 67~74 August 2008 논문 22-8-10

# 임펄스전압에 의한 침 대 평판전극에서 수중방전특성

## (Discharge Characteristics between Needle and Plane Electrodes in Water under Impulse Voltages)

최종혁* · 박건훈 · 이복희
(Jong-Hyuk Choi · Geon-Hun Park · Bok-Hee Lee)

## 요 약

이 논문은 수중의 침 대 평판 전극에서 임펄스전압의 크기와 극성, 물의 저항률 등과 같은 다양한 조건에 따른 방전특성을 나타낸다. 스트리머코로나가 침전극 끝단에서 발생하며 평판전극을 향하여 진전하여 최종적으로 전극 사이가 섬락에 이르게 된다. 동일한 전압에서 물의 저항률이 작을 때 스트리머코로나의 분기로는 물의 저항률이 클 때 보다 더욱 굵고 밝게 나타났다. 정극성에 비해서 부극성 스트리머코로나가 더욱 많은 분기로를 형성하며 더욱 넓게 퍼지는 것으로 나타났다. 스트리머코로나의 개시 후 방전의 진전과 더불어 수 백 [mA]에서 수 [A]에 이르는 많은 수의 전류펄스가 발생하였다. 정극성의 절연파괴까지의 지연시간은 부극성에 비하여 매우 짧았으며, 전극에 공급되는 전구방전에너지는 물의 저항률에 반비례하였다.

## Abstract

In this paper we describe discharge characteristics between needle-to-plane electrodes in water in various conditions such as different impulse voltages, polarities and water resistivities. Streamer corona is initiated at the tip of needle electrode and propagates toward plane electrode, and it experiences the final jump across the test gap. The branched channels of streamer coronas for lower water resistivities are much thicker and brighter than those for higher water resistivities at the same level of applied voltage. The negative streamer coronas not only have more branches but also widely spread out compared to the positive streamer coronas. A number of pulse-like currents ranging from some hundreds mA to a few A after streamer corona onset were produced with discharge developments. The time-lags-to breakdown for the positive polarity were remarkably shorter than those for the negative polarity. The pre-breakdown energy supplied into the test gap was inversely proportional to water resistivity.

Key Words : Underwater Discharge, Streamer Corona, Water Resistivity, Pulse-Like Current, Pre-Breakdown

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-860-7398
E-mail : chjohy80@naver.com
접수일자 : 2008년 5월 6일
1차심사 : 2008년 5월 15일
심사완료 : 2008년 6월 10일

## 1. 서 론

물은 우리 주변에 가장 많이 존재하는 액체이면서도 유극성을 띄고 있다는 특성으로 인해 절연유와

액체 니트로젠과 같은 무극성 액체에 비해 많은 연구가 이루어지지 못하였다. 최근에 매우 빠른 상승시간을 갖는 펄스를 이용하여 수중에서 스트리머 코로나 방전을 일으키고, 그 때 발생되는 스트리머에 의해서 물을 정화하는 연구와 같이 수중방전에 대한 응용분야의 관심이 높아지고 있다[1-2]. 하지만, 정량적인 이론이 정립된 기체와 고체에 비해서 수중에서의 방전현상에 대한 연구는 미약한 상태이다. 비록 증류수와 같이 저항률이 매우 높은 물에서 펄스전압을 이용한 절연파괴 특성에 대한 연구가 일부 이루어졌으나 액체에서의 스트리머의 생성과 진전 메카니즘에 대한 연구결과는 부족한 상태이다[3-4]. 일반적으로 전극표면과 물의 경계면에서 전자주입에 관한 이론과 물속에 존재하는 저밀도 영역에서의 전자사태에 의한 절연파괴이론이 제시되었으나 보다 명확한 설명을 위해 포괄적인 실험데이터가 요구된다[5]. 이러한 다양한 이론의 존재는 수중방전현상의 결과들이 온도, 압력, 전극의 형상, 인가전압의 극성, 불순물의 유무와 같은 여러 가지 조건에 매우 민감하게 변화되기 때문이다. 이 논문은 수중방전의 기초적인 특성을 파악하기 위해 침-평판 전극계에서 임펄스전압에 의해 발생하는 수중방전현상에 대한 실험적인 결과들을 기술하였으며, 측정된 결과를 바탕으로 물리적 의미를 고찰하였다.

## 2. 실험계의 구성 및 방법

### 2.1 실험계의 구성

본 실험에 사용된 임펄스전압발생장치, 실험용기, 전압과 전류의 측정시스템으로 구성된 실험계를 그림 1에 나타내었다.

용적 8,000[㎤]의 아크릴로 만들어진 실험용기의 상부에 스테인리스 재질의 0.1[mm]의 곡률반경을 갖는 침전극을 설치하였고 하부에 직경 100[mm]의 평판전극을 설치하고 분류기를 통하여 접지하였다. 갭 간격은 35[mm]로 고정하였다. 갭 양단에 표준 뇌임펄스전압을 인가하기 위해서 최대 400[kV], 20[kJ]의 전압이 발생되는 Marx형 임펄스전압발생장치를 사용하였으며 10,000 : 1의 용량성 분압기로 갭 양단의 전압을 측정하였다. 또한 판전극과 접지 사이에 15[MHz]의 주파수 대역까지 측정할 수 있는 0.02[Ω]의 분류기로 방전전류를 측정하였다. 전압/전류 파형의 분석을 위해 4 채널, 500[MHz]의 오실로스코프와 디지털 임펄스분석장치(MIAS 100-14/B, IMS 23)를 사용하였다. 선명한 방전광을 촬영하기 위해서 실험용기를 암실 내부에 설치하였으며, 관측창을 통해 암실 외부에 설치된 디지털 카메라로 방전광을 촬영하였다.

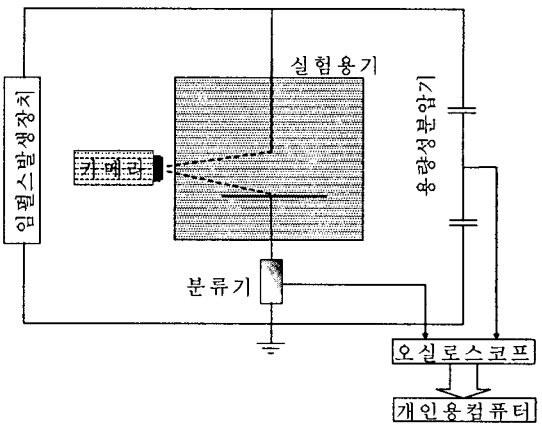



**그림 1. 실험계의 개략도**
**Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set up**

### 2.2 실험방법

10,000[Ω · m]의 증류수를 수조에 채우고 실험을 진행하였으며, 물의 저항률을 변화시키기 위해 용해성이 우수한 유산동($CuSO_4 \cdot H_2O$)을 첨가하여 저항률을 조절하였다. 물의 저항률은 전기전도도측정기(CM-21, TOA)로 측정하였으며, 실험 전후의 저항률의 변화를 측정하였다. 물의 저항률 및 인가전압의 극성과 크기에 따른 방전광을 분석하였으며, 절연파괴전압과 방전지연시간 및 전구방전에너지 등을 산출하였다. 또한 전류파형의 분석을 통해 스트리머코로나와 계단상의 리더진전에 대한 전구방전현상을 고찰하였다.

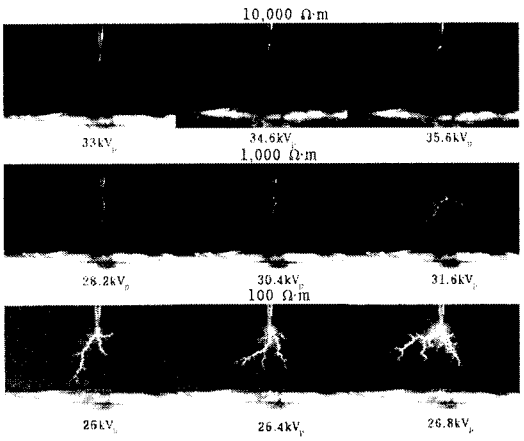
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 물의 저항률에 따른 방전광 특성

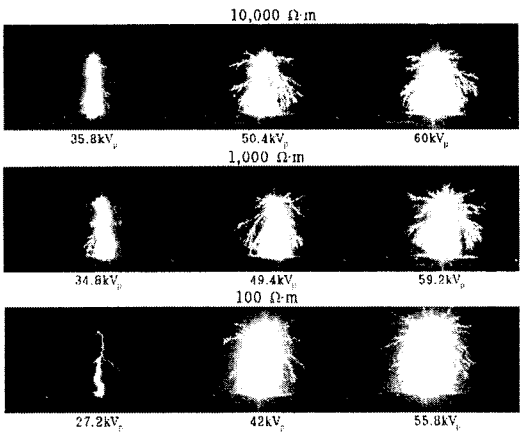
물의 저항률의 변화 및 정극성 인가전압의 상승에 따라 촬영된 대표적인 방전광의 예를 그림 2에 나타내었다. 그림 2 (a)는 스트리머코로나의 진전을 나타내며, 그림 2 (b)는 섬락이 발생할 때의 방전광 사진이다. 스트리머코로나의 방전광은 빛의 양이 적기 때문에 디지털 카메라의 조리개를 최대로 개방하여 촬영하였고, 섬락이 발생할 때는 조리개를 최소로 열어 놓고 촬영하였다.

정극성 방전광에서는 저항률에 상관없이 일정한 전압이상에서 침 끝단에 미세한 스트리머코로나가 발생하고, 전압을 상승시킴에 따라 평판전극(접지전극)을 향하여 진전하였다. 정극성 스트리머코로나는 필라멘트형의 가는 줄기 모양으로 나타났으며 약 5개 정도의 분기수를 갖는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용한 전극계에서 정극성 스트리머코로나의 관찰은 매우 작은 전압범위에서 관찰되었고, 1~2[kV]의 전압변화에도 스트리머코로나의 존재유무가 결정되었다. 인가전압을 계속 증가시키면 일정한 전압이상에서 그림 2 (b)와 같이 섬락이 발생하였다. 절연파괴 이후에는 전압이 상승함에 따라 가는 분기들이 증가하여 나무뿌리와 같은 형상을 나타내었다. 전구방전의 경우 10,000[Ω · m]의 높은 저항률에서는 약 33[$kV_p$]에서부터 매우 작고 가는 스트리머코로나가 발생하며, 저항률이 낮아질수록 더욱 낮은 전압에서 스트리머코로나가 발생하였고 굵기와 두께가 증가하였다.

물의 저항률과 인가전압에 따른 부극성 방전광의 대표적인 예를 그림 3에 나타내었다. 부극성 방전광도 정극성 방전광과 마찬가지로 일정 전압에서 침 끝에 미세한 스트리머코로나가 발생하고 전압이 상승함에 따라서 평판전극을 향하여 진전하여 섬락에 이르는 것으로 나타났다. 30[$kV_p$] 이상에서 시작된 부극성 스트리머코로나는 약 80[$kV_p$]까지 인가전압의 상승에 따라 진전하는 것으로 나타났으며, 가지가 많이 퍼진 관목형태를 나타내었다. 섬락이 발생한 이후에도 인가전압의 상승에 따라 스트리머코로나의 분기는 증가하는 것으로 나타났으며 분기로는 반구형의 형태를 나타내었다.




(a) 스트리머코로나의 방전광

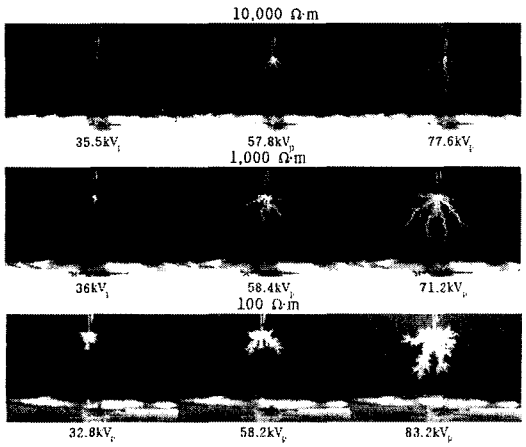



(b) 섬락시의 방전광

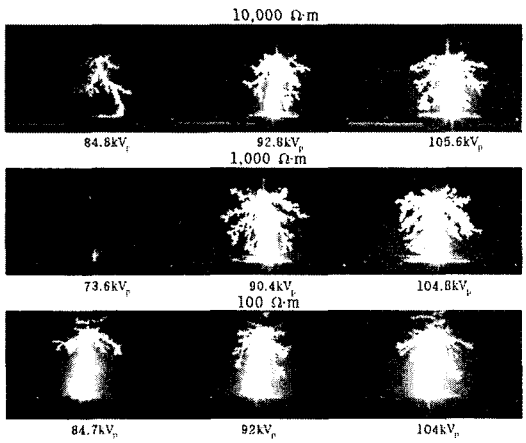
**그림 2. 정극성 뇌임펄스전압에 대한 방전광**
**Fig. 2. Discharge luminous images for the positive lightning impulse voltage**

극성에 따른 방전광을 살펴보면 정극성의 경우 매우 작은 전압의 범위에서 스트리머코로나가 존재하고 부극성의 경우 약 50[kV]의 큰 범위에서 스트리머코로나가 존재하였다. 또한 주 스트리머코로나에서 분기된 가지의 형태에서도 큰 차이가 나타났다. 이러한 형태상의 차이점은 정극성의 경우 스트리머 전단에 전계가 부극성에 비해 강하고 전자의 이동이

스트리머코로나를 향하는 방향으로 이동하여 필라멘트형을 나타내게 되고, 부극성의 경우 스트리머코로나에서 평판전극을 향하는 전자의 이동방향과 공간전하에 의해서 스트리머코로나 끝단의 전계가 감소되어 반구형 형태의 분기로가 나타난다고 분석된다[6].




(a) 스트리머코로나의 방전광

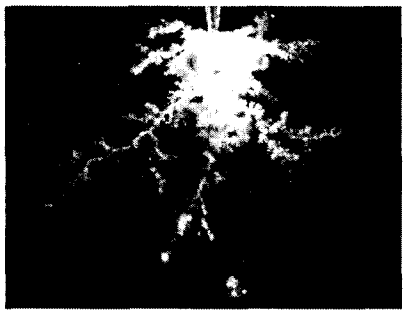



(b) 섬락시의 방전광

**그림 3. 부극성 뇌임펄스전압에 대한 방전광**
**Fig. 3. Discharge luminous images for the negative lightning impulse voltage**

스트리머코로나 진전시 침끝의 형상을 확대한 사진을 그림 4에 나타내었다. 정극성과 부극성 방전광에서 스트리머코로나가 진전하는 동안 침 끝과 그 주변에 수많은 미세 기포들이 관찰되었다. 정극성의 경우 매우 얇은 두께의 스트리머코로나가 나타나는 것이 확인되었으며, 스트리머코로나 주변에 기포방울이 나타난다. 반면에 부극성에서는 갭 사이에 스트리머코로나가 충분히 발달할 수 있는 크기의 미세기포들이 스트리머코로나 주변에 가득히 채워져 있다. 이러한 미세기포들은 액체에서의 방전현상에 관한 이론에서 언급되었듯이 수 [$\mu$s]단위 시간에 절연파괴를 일으키기에 충분하였다[6-7].

(a) 정극성



(b) 부극성

**그림 4. 스트리머코로나의 확대사진**
**Fig. 4. Enlarged pictures of streamer coronas**

### 3.2 절연파괴 특성

임펄스전압에 의한 수중에서의 절연파괴현상은 스트리머코로나의 불규칙적인 진전으로 인해 그 결과가 고체나 기체에 비해서 일정하지 않게 나타난다. 수중에서의 전기적 절연파괴전압을 측정하기 위해 고전압 시험법인 승강법을 이용하여 인가전압을 2[kV]씩 변화시키면서 절연파괴전압을 측정하였다.

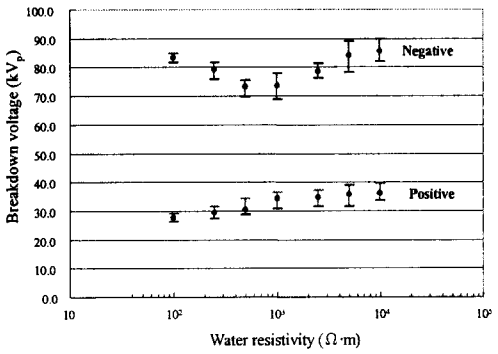
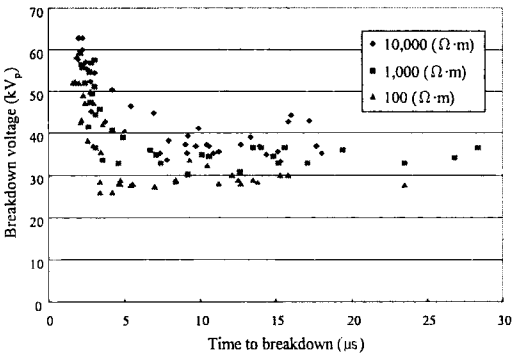



**그림 5. 물의 저항률에 따른 절연파괴전압**
**Fig. 5. Breakdown voltages as a function of water resistivities**

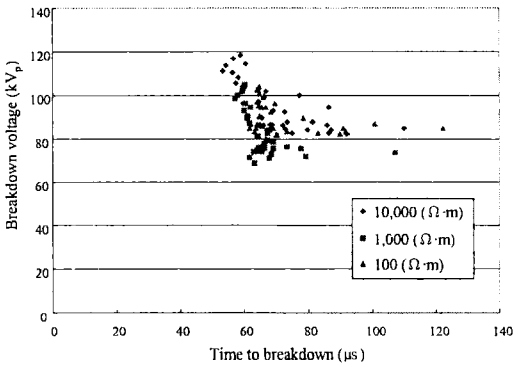
그림 5에 나타낸 바와 같이 정극성 절연파괴전압은 저항률이 낮아짐에 따라서 감소하는 것으로 나타났고, 부극성 절연파괴전압의 경우 1,000[Ω · m]까지 저항률이 낮아짐에 따라서 감소하나 500[Ω · m] 이하의 저항률에서는 다시 증가하는 V자 형태로 나타났다. 이러한 V특성은 수중에서 갭 간격이 큰 전극구조에서도 발생하였으며 그 원인파악을 위해 더 깊은 연구가 필요하다고 판단된다[8]. 절연파괴전압은 모든 저항률에서 부극성이 정극성에 비해서 약 30[kV]정도 높게 나타났으며, 낮은 저항률에서 그 편차는 작게 측정되었다.

인가전압의 상승에 따른 방전지연시간을 분석하기 위해 섬락이 발생하여 전압이 급격히 떨어지는 지점에서 방전지연시간과 피크전압을 측정하였다. 그림 6 (a)의 정극성에서는 방전지연시간이 2[μs]에서 30[μs]로 나타났으며, 저항률이 높을수록 절연파괴전압-시간(V-t) 곡선이 상승하는 것으로 나타났다. 부극성의 경우 55[μs]에서 120[μs]로 부극성의 경우가 정극성에 비해 방전지연시간이 매우 길게 나타났으며, 절연파괴전압이 낮게 나타난 저항률의 곡선이 아래쪽에 위치하였다. 정극성과 부극성 모두 인가전압이 낮게 되면 스트리머 코로나의 발생으로 인해 지연시간이 길어지는 특성을 나타내었다.

인가전압의 극성에 따른 방전지연시간의 차이는 극성에 따라 절연파괴에 이르는 메카니즘의 차이점을 뒷받침한다. 정극성의 경우 가늘고 긴 형태의 스트리머코로나가 단시간에 진전하여 절연파괴에 이르기 때문에 지연시간이 짧게 나타난다. 반면에 부극성의 경우 수많은 기포가 발생되기까지 수십 [μs]의 시간이 필요하고 그러한 기포 내부에서 전자사태가 발생하여 스트리머가 진전하기 때문에 정극성에 비하여 매우 긴 지연시간이 필요하다고 판단된다.




(a) 정극성




(b) 부극성

**그림 6. 물의 저항률에 따른 절연파괴까지의 지연시간 특성**
**Fig. 6. Characteristic of the time lags-to breakdown in different water resistivities**

측정된 임펄스 전압과 전류파형을 임펄스분석시스템을 이용하여 절연파괴 이전에 액체에 인가되는 에너지를 산출하였다. 100[Ω · m]의 저항률에서 임펄스 분석프로그램을 사용하여 얻어진 전형적인 부극성 전압, 전류, 전력, 에너지파형을 그림 7에 나타내었다.

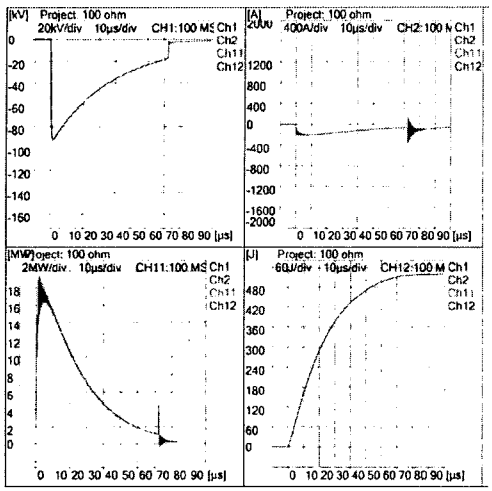



**그림 7. 임펄스분석시스템을 이용하여 측정한 전형적인 전압, 전류, 전력, 에너지 파형의 예 (저항률 100[Ω · m]**

**Fig. 7. Typical voltage, current, power, and energy waveforms obtained from the impulse measuring and analyzing program in the negative polarity(the water resistivity: 100Ω · m)**

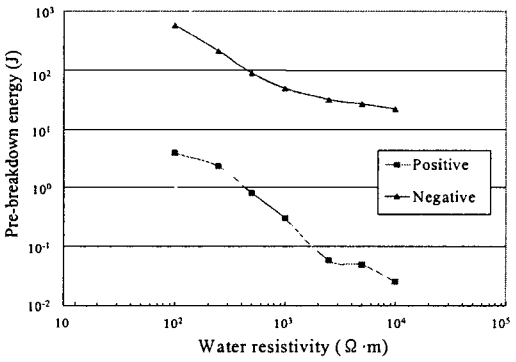


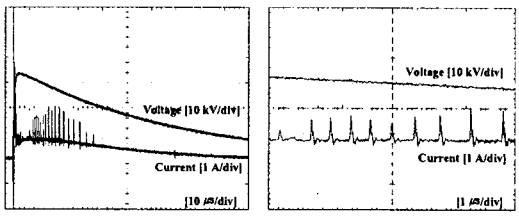

**그림 8. 물의 저항률에 따른 전구방전 에너지**

**Fig. 8. Pre-breakdown energy as a function of water resistivity**

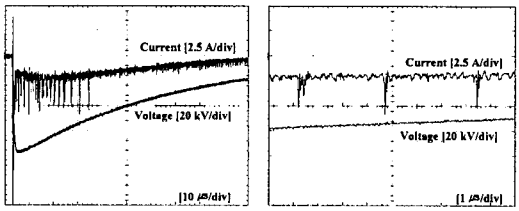
그림 8은 물의 저항률 변화에 따른 전구방전에너지를 나타낸다. 전구방전에너지는 정극성과 부극성 모두 물의 저항률에 반비례하는 것으로 나타났다. 낮은 저항률에서 더욱 많은 전도성 전류가 흐르기 때문에 전구방전에너지가 크게 나타난 것으로 분석된다. 동일한 저항률의 경우 부극성의 경우가 정극성에 비해서 매우 크게 나타났으며, 이것은 부극성에서 높은 절연파괴전압과 긴 방전지연시간으로 인해 많은 에너지가 더욱 긴 시간에 걸쳐 공급되었기 때문이라고 판단된다.

### 3.3 전구방전전류

전구방전 특성을 조사하기 위해 스트리머코로나의 진전시에 발생하는 전구방전전류를 측정하고 분석하였다. 그림 9는 스트리머코로나가 발생하였으나 섬락이 발생하지 않았을 때의 전형적인 전압과 전류 파형의 예이다.




(a) 정극성



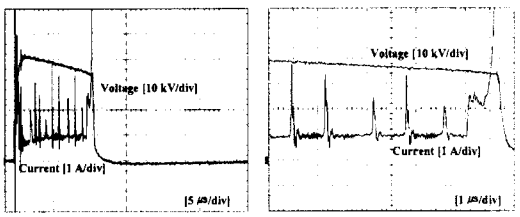

(b) 부극성

**그림 9. 물의 저항률 10,000[Ω · m]에서의 인가전압과 전구방전전류 파형**

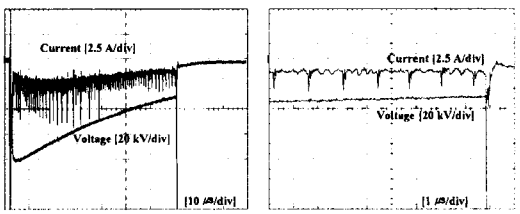
**Fig. 9. Typical applied voltage and pre-breakdown current waveforms in case that the water resistivity is 10,000[Ω · m]**

전압이 인가되면 약간의 지연시간 이후 스트리머코로나 펄스가 발생하게 된다. 전류파형은 전도성 전류와 스트리머코로나 영역에 상응하는 연속적인 매우 짧은 지속시간을 갖는 전류펄스들로 구성된다. 즉, 스트리머코로나 전류펄스와 전도성 전류가 중첩되어 나타난다. 전도성 전류의 경우 인가전압에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 전류파형에서 나타나는 초기 진동은 인가전압의 빠른 상승에 의한

물의 용량성 성분 때문인 것으로 분석된다. 절연파괴전압 이하에서 계단상으로 진전하는 스트리머코로나는 수차례 진전과 휴지를 반복한 후 소멸하는 것으로 분석된다. 전류펄스 사이의 시간간격은 대략 1~5[㎲]로 분포하며, 낮은 전압에서 더욱 길게 나타났다. 부극성에서의 스트리머코로나의 전류펄스는 정극성에 비해 매우 많은 것으로 나타났으며, 이것은 방전광에서 나타나는 기포의 수와 진전단계에 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.




(a) 정극성




(b) 부극성

**그림 10. 물의 저항률 10,000[Ω · m]에서 섬락시의 전압과 전류파형의 예**
**Fig. 10. Examples of the voltage and current waveforms in the case that the water resistivity is 10,000[Ω · m]**

섬락이 발생할 때 측정된 전형적인 전압과 전류파형의 예를 그림 10에 나타내었다. 연속적인 전류펄스들은 평판전극을 향해 진전하는 스트리머코로나에 상응한다. 두 극성 모두 명백히 계단상의 리더진전에 의해 섬락에 이르는 것으로 분석된다. 전구방전은 섬락에 이르기 위한 계단상의 연속적인 스트리머코로나의 발생과 스트리머코로나들 사이의 시간지연 등으로 표현된다. 정극성 스트리머코로나 전류펄스의 크기는 불규칙하게 나타났으며, 전류펄스 사이의 시간지연은 1~2[㎲]로 나타났다. 부극성의 스트리머코로나 전류펄스들은 전반적으로 정극성과 비슷한 양상을 보이나 정극성에 비해 더욱 큰 값을 나타내었다. 또한 부극성의 스트리머코로나 전류펄스들은 전압 인가 후 증가하는 추세를 보이다 감소하며, 섬락이 발생하기 전 다시 증가하는 것으로 분석되었다. 부극성의 전류펄스들 사이의 시간지연은 정극성과 유사하게 나타났다.

## 3. 결 론

임펄스전압에 의해서 수중의 불평등전극계에서 발생하는 전구방전과 절연파괴현상을 특징짓는 스트리머코로나의 진전에 관한 실험적 연구를 수행한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전구방전동안의 연속적인 스트리머코로나는 계단상의 진전을 하는 것으로 나타났으며, 전구방전전류는 전도성 전류와 스트리머코로나에 상응하는 전류펄스들로 구성되었다.
(2) 스트리머코로나 주변에 나타나는 수많은 기포 내부에서의 전자사태는 스트리머의 발생과 진전에 중요한 원인으로 분석된다.
(3) 수중에서의 절연파괴전압은 인가전압의 극성에 크게 의존하였으며, 부극성에서의 절연파괴 전압과 지연시간은 정극성에 비해 매우 높고 길게 나타났다.

감사의 글

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

## References

[1] H. Akiyama, "Streamer discharges in liquids and their applications", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.7, No.5, pp.656-653, 2000.
[2] Anto Tri Sugiarto, Takayuki Ohshima, Masayuki Sato, "Advanced oxidation processes using pulsed streamer corona discharge in water", Thin Solid Films, Vol.407, No.1-2, pp.174-178, 2002.
[3] Y. H. Sun, Y. X. Zhou, M. J. Jin, Q. Liu, and P. Yan, "New prototype of underwater sound source based on the pulsed corona discharge", J. Electrostatic, Vol. 63, pp.969-975. 2006.

[4] H. M. Jones, E. E. Kunhardt, "The Influence of Pressure and Conductivity on the Pulsed Breakdown of Water", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.1 No.6, 1994.
[5] D. A. Wetz, K. P. Truman, J. J. Mankowski, and M. Kristiansen,"The Impact of Surface Conditioning and Area on the Pulsed Breakdown Strength of Water", IEEE Trans., on Plasma Science, Vol. 33, No. 4, pp.1161-1169, 2005.
[6] A. T. Sugiarto, M. Sato and J. D. Skalay, "Transient regime of pulsed breakdown in low-conductive water solutions", J. Phys. D., Appl. Phys., Vol.34, pp.3400-3406, 2001.
[7] J. Nieto-Salazar, O. Lesaint and A. Denat, "Transient current and light emission associated to the propagation of pre-breakdown phenomena in water", Proc. 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.542-545, 2003.
[8] Jong-Hyuk Choi, Sang-Duk An, Bok-Hee Lee, "Analysis of Underwater Discharge Characteristics Caused by Impulse Voltage", Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.22, No.2, pp.128-133, 2008.

## ◇ 저자소개 ◇

**최종혁** (崔鍾赫)
1980년 5월 12일생. 2006년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 2008년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.
Tel : (032)860-7398, Fax : (032)863-5822
E-mail : chjohy80@naver.com

**박건훈** (朴建勳)
1982년 4월 28일생. 2007년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업(학사). 현재 인하대 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