

수중에서 침전극 끝단의 방전특성

(Discharge Characteristics near the tip of needle in water)

이복희 · 최종혁 · 박건훈 · 전병욱 · 김희구 · 백영환 · 이규선

(Bok-Hee Lee · Jong-Hyuk Choi · Geon-Hun Park · Byung-Wook Jun · Hoe-Gu Kim · Young-Hwan Beak · Kyu-Sun Lee)

Abstract

In this paper we describe streamer propagations characterizing underwater pre-breakdown and breakdown behaviour under impulse voltages. Streamer corona branches in lower resistivities are much thicker and brighter than those in higher resistivities. The negative streamer channels not only have more branches but also widely spread out than the positive streamer channels. The succession of streamer coronas during pre-breakdown produces a stepwise propagation. The pre-breakdown currents consist of the conduction current and streamer corona current pulses.

1. 서론

최근 물속에서 발생하는 전기적 절연과피를 응용하여 에너지 저장, 펄스파워시스템의 전환, 물의 정화 등에 적용하는 연구들이 소개되면서 수중방전에 대한 관심이 높아지고 있다. 하지만 수중방전현상은 기체나 고체에 비해서 연구가 많이 이루어지지 않아 정확한 메커니즘이 정립되지 못하였다. 또한 빠른 상승시간을 갖는 펄스전압을 이용하여 수중방전에 관한 연구들이 수행되고 있으나 매우 높은 저항률의 증류수나 수돗물 등에 국한되어 있다[1][2]. 비록 액체에서 스트리머의 발생과 진전에 관한 정확한 메커니즘이 규명되지 못하였지만, 전극과 물이 접촉하는 표면에서 전지주입과 주입된 전자들이 기포와 같은 낮은 밀도 영역에서 전자사태로 발전해 간다는 유력한 이론들이 제시되었다[3]. 수중방전에 관한 정확한 이해를 위해서 저항률, 전압의 크기, 극성에 따른 세부적인 연구들이 수행되어야 한다. 이 논문에서는 빠른 상승시간을 갖는 임펄스전압을 이용하여 전압의 극성과 크기, 물의 저항률 등에 따른 절연과피 이전에 나타나는 전구방전현상에 관한 특성들을 분석하였다.

2. 본론

2.1 측정계의 구성

그림 1은 수중방전을 관찰하기 위해 사용된 임펄스전압 발생장치, 전극계 구성, 전압-전류 측정장치 등을 나타내고 있다. 암실 내부에 8,000 [cm³]의 부피를 갖는 정육면체모양의 수조를 설치하였다. 전극구성은 스테인리스 재질의 침-판 전극을 설치하였으며, 수조하부에 100 [mm]의 판전극을 설치하였고 수조의 윗부분에 0.1 [mm]의 곡률반경을 갖는 침전극을 설치하였다. 판과 침

사이의 갭 간격은 35 [mm]로 일정하게 유지하였다. Marx형 전압발생장치를 이용하여 1.2/50 [μ s] 임펄스전압을 침전극에 인가하였다. 10,000:1의 용량성 분압기와 0.02 [Ω]의 분류저항을 이용하여 전압과 전류를 측정하였으며, 모든 파형은 디지털 임펄스분석장치와 오실로스코프를 동시에 사용하여 측정하였다. 방전광은 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였다.

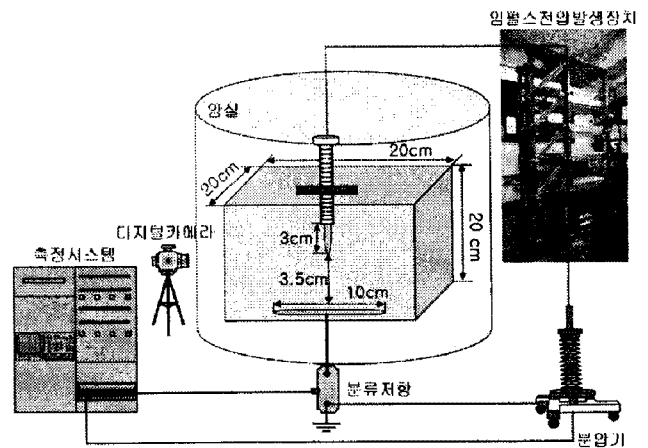


그림 1 실험계 구성
Fig. 1 Configuration of the experimental setup

2.2 측정방법

저항률에 따른 수중방전특성을 파악하기 위해서 10,000 [$\Omega \cdot m$]의 상온의 물을 사용하였으며 용해성이 우수한 유산동(CuSO₄ · 5H₂O)을 이용하여 저항률을 변화시켰다. 저항률의 변화는 전기전도도측정기(CM-21P, TOA · DKK, Japan)를 사용하여 측정하였다. 저항률과 인가전압에 따라 전구방전과 절연과피시의 방전광을 촬영하였으며, 전구방전에너지를 측정하였

다. 또한 전류파형을 분석하여 전구방전시 발생하는 스트리머 코로나와 계단상의 리더진전을 분석하였다.

2.3 측정결과

2.3.1 전구방전과 절연파괴시의 방전광

이 논문에서는 침전극에 인가되는 전압의 극성을 기준으로 하여 극성을 정의하였다. 그림 2의 (a)는 정극성에서 저항률에 따른 전구방전광을 나타내고 있다. 침전극에 전압을 순차적으로 높일 때 일정한 전압이상에서 침 끝에 미세한 스트리머 코로나 현상이 발생하였다. 스트리머는 절연파괴전압 이하에서 전압이 상승할수록 뚜렷하게 나타났다. 모든 저항률에서 일정한 전압에 도달하게 되면 스트리머의 진전이후에 그림 2의 (b)에서처럼 절연파괴가 발생하였다. 저항률이 낮을수록 낮은 전압에서 스트리머가 발생하였고 스트리머의 굵기와 빛의 세기가 증가하였다. 또한 절연파괴시의 방전광도 낮은 저항률에서 더욱 세게 나타났다.

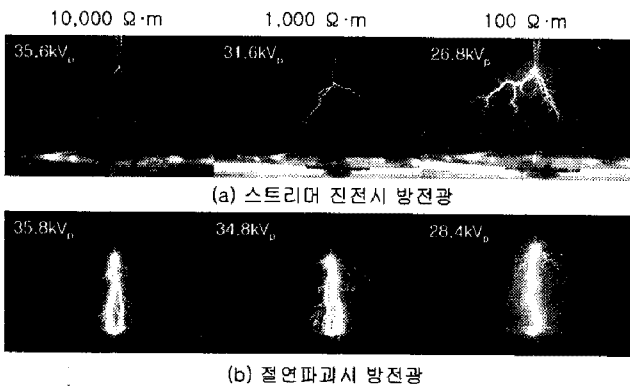


그림 2 물의 저항률에 따른 정극성 방전광
Figure 2. Positive discharge light images in different water resistivities

그림 3의 부극성 방전광도 정극성과 마찬가지로 스트리머와 절연파괴가 관찰되었다. 부극성의 경우 약 30 [kVp]에서 절연파괴가 발생하는 80 [kVp]부근 까지 넓은 전압의 범위에서 스트리머가 존재하였고, 많은 수의 분기로와 기포들로 구성되었다. 또한 저항률이 낮아짐에 따라서 스트리머의 개시 전압이 낮게 나타나며 방전광이 넓고 강하게 형성되었다.

정극성과 부극성 방전광현상을 비교하면 전체적인 진전과정은 비슷해 보이나 세부적인 면에서 현격한 차이가 있다. 우선 정극성의 경우 스트리머를 관찰할 수 있는 전압의 범위가 수 kV이하로 매우 작은 전압의 변화에도 스트리머의 유무가 결정되는 것으로 나타났으나, 부극성의 경우 스트리머가 존재하는 전압의 범위가 매우 크게 나타났다. 방전광 형태는 정극성의 경우 필라멘트형의 스트리머 모양과 절연파괴시에 나무뿌리와 같은 모양의 방전광이 측정되었고, 부극성에서는 관목형

의 스트리머와 절연파괴시에 활엽수모양의 방전광이 측정되었다.

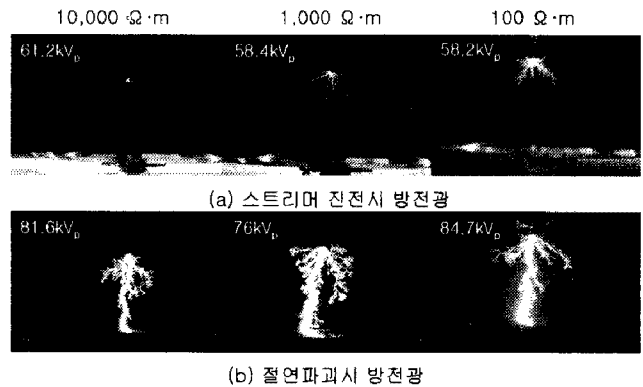


그림 3 물의 저항률에 따른 부극성 방전광
Fig. 3 Negative discharge light images in different water resistivities

2.3.2 전구방전 에너지의 특성

그림 4는 부극성 100 [$\Omega \cdot m$]에서 디지털 임펄스분석 프로그램을 이용하여 전압, 전류, 전력, 에너지 등을 측정한 파형이다. 왼쪽 상단에 있는 전압파형의 경우 저항률에 따른 차이가 나타나지 않으나 오른쪽 상단의 전류파형에서는 저항률이 낮아질수록 절연파괴 이전에 전류가 크게 흐르는 것으로 나타났다.

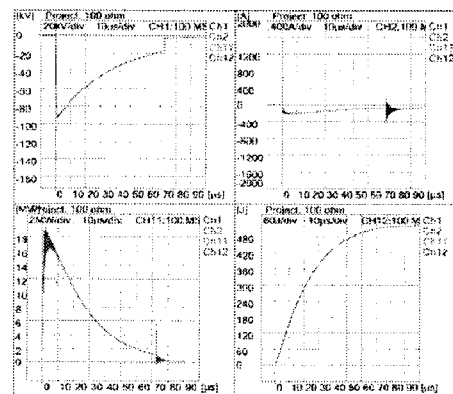


그림 4 임펄스분석프로그램을 이용한 부극성의 전압, 전류, 전력, 에너지 측정 파형 (100 [$\Omega \cdot m$])
Fig. 4 Typical voltage, current, power, and energy waveforms obtained from the impulse measuring and analyzing program in the negative polarity at 100 [$\Omega \cdot m$].

각 저항률에 따른 에너지를 비교해 보면 그림 5와 같이 현격한 차이가 있음을 확인 할 수 있다. 절연파괴가 발생되기 전에 정극성의 경우 10,000 [$\Omega \cdot m$]에서 25 [mJ]의 매우 작은 에너지만이 물에 인가되며 100 [$\Omega \cdot m$]에서는 3.9 [J]로 매우 크게 증가하였다. 부극성의 경우도 마찬가지로 10,000 [$\Omega \cdot m$]에서는 22 [J]이 인가되나 100 [$\Omega \cdot m$]에서는 578 [J]로 급격하게 증가하였다. 저항률이 낮아질수록 인가되는 에너지의 차이가 크게

나타나는 것은 절연과괴 이전에 액체를 통해 흐르는 전류의 양이 크게 증가하기 때문인 것으로 분석된다. 또한 부극성에서 더욱 높은 절연과괴 전압과 긴 지연시간으로 인해 전구방전 에너지가 정극성 보다 크게 나타났다.

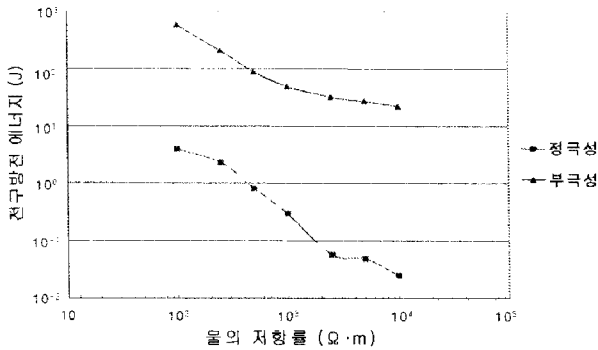


그림 5 저항률에 따른 전구방전 에너지
Fig. 5 Pre-breakdown energy as a function of the water resistivity

2.3.3 전구방전전류

그림 6은 절연과괴전압 이하에서 스트리머가 진전할 때의 전압-전류파형을 나타낸다. 전류파형은 전도성전류와 스트리머가 발생할 때 나타나는 연속적인 전류펄스들이 중첩되어 나타난다. 전류파형 앞단에 나타나는 진동은 빠른 전압상승으로 인한 용량성 효과 때문인 것으로 분석된다. 절연과괴 이하의 전압에서 수백 mA에서 수 A 단위의 스트리머 전류펄스들이 1-5 μ s간격으로 액체를 통해 흐르는 것이 측정되었다. 전류펄스의 수는 정극성에 비해서 부극성에서 더욱 많이 나타났으며, 그 크기 또한 부극성에서 더욱 크게 나타났다. 이러한 전류펄스들은 높은 저항률에서 뚜렷하게 나타났으며, 저항률이 낮아질수록 큰 전도성전류에 중첩되어 측정되지 않았다.

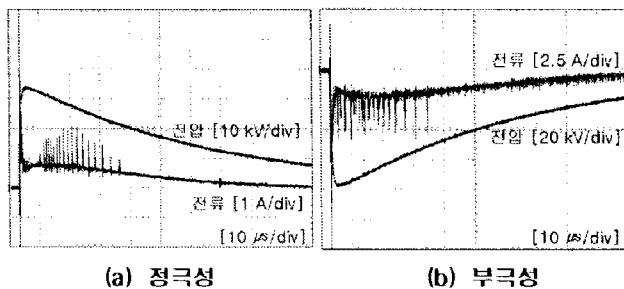
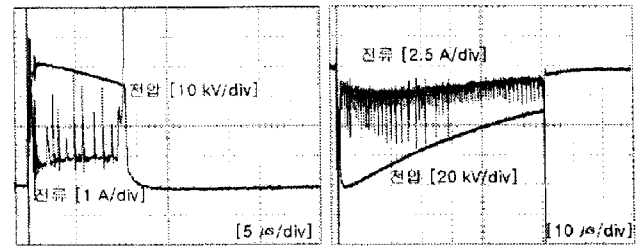


그림 6 스트리머 진전시 전압-전류 파형 (10,000 $\Omega \cdot m$)
Fig. 6 Voltage and current waveforms at streamer propagation 10,000 $\Omega \cdot m$

그림 7은 절연과괴시의 전압-전류 파형을 나타낸다. 정극성과 부극성 모두 침전극에서 판전극을 향하는 스트리머 코로나의 연속된 전류펄스가 측정되었다. 이러한 전류의 측정을 통해 정극성과 부극성 모두 계단상의

리더전전에 의해 절연과괴가 발생함을 알 수 있다. 정극성과 부극성 전류펄스의 시간간격은 1-2 μ s로 전반적인 형태가 비슷하게 나타났다. 하지만, 부극성의 전류펄스의 크기가 정극성에 비해 2.5배 정도 크게 나타났으며, 그 수가 6배 이상 많이 나타났다. 정극성에서는 전류펄스의 크기가 불규칙하게 나타났으며, 부극성의 경우 초기에는 전류펄스의 크기가 비교적 일정하게 증가하였고 지연시간의 절반이 지난 후 감소하였으며, 절연과괴가 발생하기 전에 다시 증가하였다.



(a) 정극성 (b) 부극성
그림 7 절연과괴시 전압-전류 파형 (10,000 $\Omega \cdot m$)
Fig. 7 Breakdown voltage and current waveforms at 10,000 $\Omega \cdot m$

3. 결론

본 논문에서는 수중에서 발생하는 전구방전현상과 절연과괴현상에 대하여 인가전압의 극성과 물의 저항률에 따른 특성을 분석하였다. 스트리머의 진전과 절연과괴시 인가전압의 극성에 따라 방전광에 상당한 차이가 나타났다. 전구방전시에 발생하는 연속적인 스트리머 코로나의 발생은 절연과괴를 일으키기 위한 계단적인 진전을 나타내며 낮은 저항률에서 더욱 확실하게 측정되었다. 전구방전전류는 전도성전류와 스트리머 코로나 전류펄스로 구성되었으며, 부극성에서 더욱 크게 나타났다.

참고 문헌

- [1] 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, 63 (2005) 969-975.
- [2] 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, December 1994.
- [3] 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. 8.