

저항률에 따른 수중방전 특성에 관한 연구

이복희, 최종혁, 이강수, 안창환*, 정용기**
 인하대학교, *인하공업전문대학, **(주)의제전기설비연구원

A Study of underwater discharge characteristics in different resistivity

Bok-Hee Lee, Jong-Hyuk Choi, Kang-Soo Lee, Jong-Seok Lee, Ki-Bok Kim, Chang-Hwan Ahn*
 Inha University, *Inha Technical collage, **UIJAE Ltd.

Abstract - This paper describes underwater discharge phenomena which are less studied than gas, solid and dielectric liquid. Since discharge phenomena were affected by various factors, we investigated the effect of water resistivity in point-plane gap by impulse voltage. In discharge photograph, it is hard to discover the streamer development in positive polarity at high resistivity. On the other hand, the streamer originated at the tip of rod and developed toward the plane with increasing voltage. It is found that the breakdown voltage of both polarities in lower resistivity are lower than that of high resistivity. High current flowing in lower resistivity before the breakdown induce more streamer and enhance the probability of breakdown.

1. 서 론

액체에서의 방전현상은 기체나 고체에 비해서 연구결과가 미약하며, 기체방전현상과 같은 전자사태이론, 기포이론, 불순물입자이론 등에 의한 다양한 메커니즘들이 제시되었지만 아직까지 뚜렷한 결론을 얻지 못하고 있다. 또한 액체에서 수행된 실험결과들이 온도, 압력, 액체의 순도, 전극의 형상 및 인가전압의 극성과 크기 등의 변화에 매우 다양하게 나타나고 있으며, 몇몇의 연구들은 대립되는 결과를 도출하였다.[1][2] 현재 액체에서의 절연과괴현상은 주로 불순물이 포함되지 않은 절연액체와 증류수와 같은 순수액체에서 빠른 상승시간을 갖는 연속적인 펄스에 의해서 연구되고 있으며, 아크방전이 발생하기 전에 발생하는 스트리머에 의한 전구방전현상에 초점을 두고 있다.[3][4] 하지만 순수한 액체를 만드는 것은 액체에 불순물을 포함시키지 않는다하여도 제조단계에서 포함되는 불순물과 기포로 인해 불가능하다. 포함된 불순물 또는 기포들은 액체의 전도도와 같은 특성을 변화시키고 전구방전현상과 절연내력에 큰 영향을 준다. 일부 연구들이 증류수 또는 높은 저항률을 갖는 액체에서 이루어졌지만, 아직까지 불순물이 포함되거나 저항률이 낮은 액체의 방전메커니즘에 대한 고려는 이루어지지 않고 있다. 이 논문에서는 50,000 [Ω·m]의 증류수로부터 0.2 [Ω·m]의 바닷물까지 저항률이 크게 변화되는 물에서 표준임펄스전압을 이용하여 저항률에 따른 방전광과 절연과괴전압-전류 특성을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 실험계 구성 및 방법

2.1.1 실험계 구성

수중에서 발생하는 방전특성을 조사하기 위해서 빛을 차단할 수 있는 암실 내부에 12,000 [cm³] 부피의 수조를 설치하였다. 불평등 전계를 형성하기 위해서 스테인리스 재질의 직경 10 [cm]의 로고스키형 판전극을 하부에 설치하고, 0.1 [mm]의 곡률반경을 갖는 침전극을 10 [μm]의 간격을 갖는 깊이마이크로미터를 이용하여 수조의 위쪽에 설치하였다.

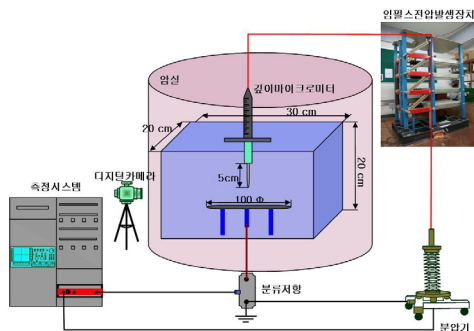


그림 1 > 실험계 구성

High Volt사의 400 [kV], 20 [kV]의 용량을 갖는 임펄스전압발생장치를 이용하여 침전극에 1.2 [μs]의 파두시간과 50 [μs]의 파미시간을 갖는 임펄스전압을 인가하였으며, 10000:1의 분압기를 이용하여 전극에 인가된 전압을 측정하였다. 또한 전류측정시 유도성 노이즈를 제거하기 위해 접지와 판전극 사이에 0.02 [Ω]의 분류저항을 연결하여 전류를 측정하였으며, 방전시에 발생하는 방전광은 고성능 디지털 카메라를 설치하여 촬영하였다.

2.1.2 실험방법

저항률에 따른 수중방전 특성을 조사하기 위해서 수조에 시판되는 10,000 [Ω·m]의 증류수를 채우고 갭 간격을 25 [mm]로 일정하게 유지하며 실험을 진행하였다. 물의 저항률을 변화시키기 위해서 용해성이 우수한 유산동(CuSO₄·5H₂O)을 조금 첨가하여 저항률을 낮추었고, 정확한 저항률의 변화를 측정하기 위해서 전기전도도측정기(CM-21P, TOA·DKK, Japan)를 이용하였다. 수중에서의 방전현상은 스트리머에 의한 전구방전에서 완전한 도전통로가 형성되는 아크방전으로 진행되기 때문에, 선명한 방전광의 촬영을 위해서 방전광의 양이 적은 스트리머방전의 경우 디지털카메라의 조리개를 최대로 열어 촬영하였고, 강한 방전광이 발생하는 아크방전의 경우 조리개를 최소로 하여 촬영하였다. 또한 신뢰성 있는 절연과괴전압을 측정하기 위해서 승강법을 이용하여 아크방전이 발생하는 20번의 전압을 측정하였다. 실험기간 동안 모든 전압과 전류파형은 디지털오실로스코프에 기록되었다.

2.2 실험결과

2.2.1 방전광 분석

그림 2의 정극성 방전광에서 5000 [Ω·m]의 높은 저항률에서는 아무런 초기코로나 현상도 촬영되지 않았으며 약 38 [kV_p]부근에서 아크방전이 발생하였다. 저항률이 500 [Ω·m]이하로 낮아지면서 약 35 [kV_p] 전압에서 침 끝에 미세한 코로나현상이 촬영되었다. 하지만 정극성에서는 전압이 올라가도 스트리머의 진전은 관찰되지 않았으며 저항률에 따라 일정한 전압에서 아크방전이 발생하였다. 모든 저항률에서 전압이 상승할수록 주 방전로의 두께가 증가하고, 주 방전로에서 분기된 가지의 수가 증가하며 나무뿌리와 같은 형상으로 변화하였다.

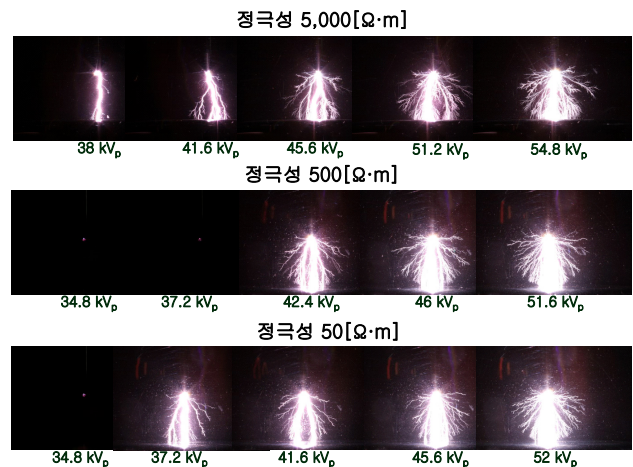


그림 2 > 저항률에 따른 정극성 방전광

그림 3의 부극성 방전에서는 낮은 전압에서 스트리머의 진전현상이 모든 저항률에서 나타나며, 전압이 상승할수록 침전극의 끝에서 판전극을 향하여 진전하는 것으로 나타났다. 스트리머의 진전은 저항률이 낮아질수록 더욱 뚜렷하게 나타나고 정극성과 달리 방전로가 퍼져 넓게 확

장되는 것을 확인할 수 있었다. 부극성 방전도 정극성과 마찬가지로 아크방전이 발생한 이후 모든 저항률에서 전압이 상승함에 따라서 방전로의 분기수가 증가하였고, 나뭇잎 모양의 분기로와 함께 관목모양을 이루었다.

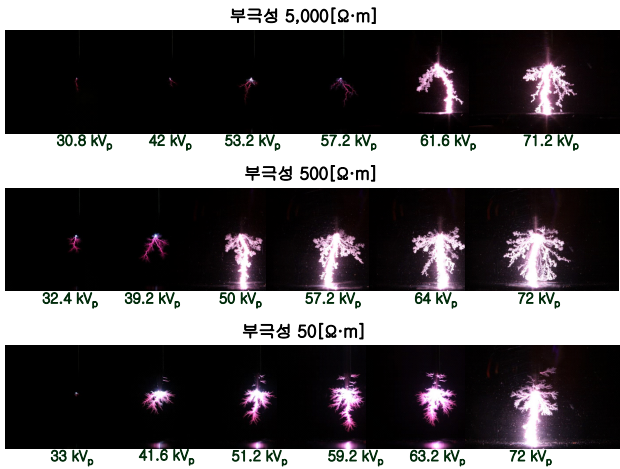


그림 3> 저항률에 따른 부극성 방전광

2.2.2 저항률에 따른 방전전압

물의 저항률에 따른 절연파괴전압을 조사하기 위해서 승강법을 이용해 입력전압을 2 [kV]씩 변화시키며 20번의 아크방전전압을 측정하였다. 정극성과 부극성 모두 저항률이 낮아지면서 침 끝 뿐 아니라 전극의 다른 부분에서 코로나현상이 관찰되었고 이것은 절연파괴전압을 변화시키는 원인이 되기 때문에 다른 부분에서 코로나현상이 나타나지 않는 정극성 50 [Ω·m], 부극성 250 [Ω·m]까지의 저항률에 대하여 조사하였다.

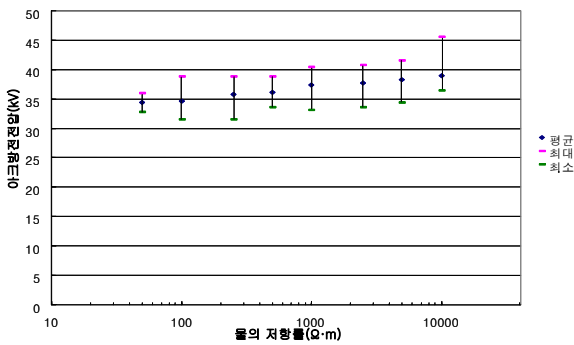


그림 4> 저항률에 따른 절연파괴전압(정극성)

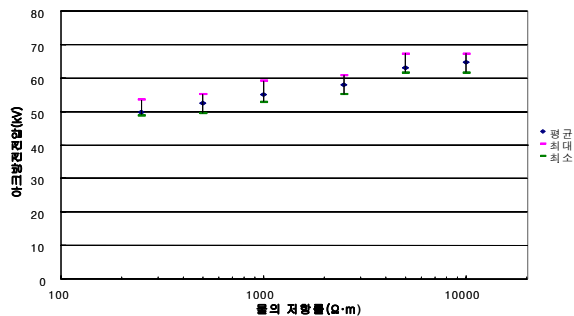


그림 5> 저항률에 따른 절연파괴전압(부극성)

그림 4와 그림 5는 저항률에 따른 아크방전 전압을 보여준다. 측정된 전압은 아크방전이 발생한 20개 전압의 평균값과 최대값, 최소값을 나타낸다. 그림 3의 정극성은 10,000 [Ω·m]의 저항률에서 평균 39 [kV_p]의 전압에서 절연파괴가 일어났고, 저항률이 낮은 50 [Ω·m]에서 34.4 [kV_p]로 일정하게 줄어드는 것으로 나타났다. 그림 4의 부극성의 경우 10,000 [Ω·m]에서 평균 64.6 [kV_p]로 정극성에 비해 약 25 [kV] 정도 높게 나타났으며, 250 [Ω·m]에서 49.8 [kV_p]로 줄어들었다. 이러한 현상은 짧은 지속시간을 갖는 구형과 전압에서 스트리머에 의한 전구방전 현상이 낮은 저항률에서 발생하기 쉽다는 결과에 상응하는 것으로, 임펄스전압에 의해 발생하는 절연파괴현상도 정극성과 부극성 모두 저항률

이 낮아질수록 방전이 발생하기 쉽다는 것을 의미한다.[3] 또한 기중방전과 마찬가지로 동일한 저항률을 갖는 수중에서 부극성 절연파괴전압이 정극성에 비해 높게 나타났다.

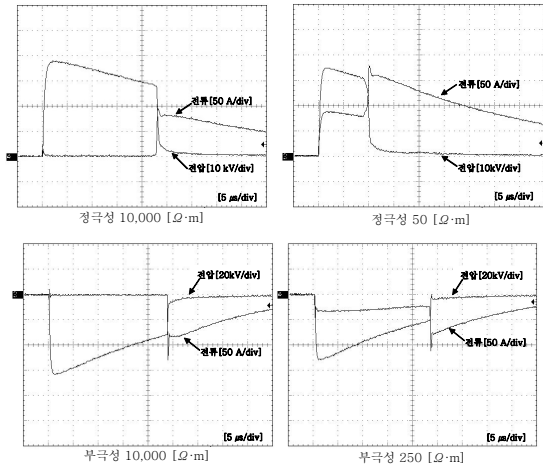


그림 6> 저항률에 따른 전압-전류 파형

그림 6는 높은 저항률과 낮은 저항률에서의 절연파괴가 발생할 때 전압-전류파형을 보여준다. 기중방전과는 달리 방전은 모두 임펄스전압의 파미부분에서 이루어졌다. 10,000 [Ω·m]의 저항률에서는 정극성과 부극성 모두 방전이 발생하기 이전에 전류가 거의 흐르지 않고, 방전이 발생하면서 전압은 0으로 떨어지고 전류가 급상승하는 것으로 나타났다. 반면에 50 [Ω·m]와 250 [Ω·m]의 낮은 저항률에서는 방전이전에 수십 [A] 단위의 전도전류가 흐르는 것으로 나타났으며, 전도전류는 액체의 저항률이 낮아질수록 증가하였다. 낮은 저항률에서도 높은 저항률과 마찬가지로 도전통로가 형성된 이후 전류가 급상승하였으며, 도전로 형성 이후에 전류의 크기는 저항률과 무관하게 나타났다. 이것은 저항률에 따라서 방전이전에 흐르는 전도전류가 결정되고 완전한 도전통로가 형성된 이후에 흐르는 전류는 저항률에 영향을 받지 않는다는 것을 나타낸다.

3. 결 론

임펄스전압에 의한 침-관 겹에서의 수중방전현상을 관찰한 결과, 정극성 방전의 경우 높은 저항률에서 스트리머의 진전은 관찰되지 않았고, 낮은 저항률에서 침 끝에 미세한 코로나현상이 나타나며, 전압이 높아짐에 따라 스트리머의 진전없이 절연파괴가 발생하였다. 정극성의 경우 아크방전이 발생한 후 전압이 상승하면서 점차 나무뿌리와 같은 형상으로 변화하였다. 반면에 부극성의 경우 모든 저항률에서 스트리머의 진전이 관찰되었으며 저항률이 낮아질수록 더욱 선명하게 나타났다. 또한 전압이 높아질수록 스트리머는 관전극을 향하여 진전하고 관전극과 닿는 순간 아크방전이 발생하는 것으로 나타났다. 부극성의 경우 절연파괴가 발생한 이후 나뭇잎모양의 가지가 증가하여 관목형을 이루었다.

저항률에 따른 아크방전현상을 관찰한 결과 정극성과 부극성에서 저항률이 낮아질수록 방전전압이 낮아지는 것으로 나타났으며, 기중방전과 마찬가지로 부극성의 방전전압이 정극성에 비하여 높게 나타났다. 이러한 원인은 높은 저항률에서는 절연파괴 이전에 갭 사이에 전류가 거의 흐르지 않고, 저항률이 낮아지면서 액체를 통해 흐르는 전도전류가 증가하여 절연파괴가 발생할 확률이 증가하기 때문이라고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", McGraw-Hill 1995, pp.385-394
- [2] Mazen Abdel-Salam, Ahdab El-Morshedy "High-Voltage Engineering Theory and Practice" Marcel Dekker 2000, pp.217-234
- [3] H. M. Jones and E. E. Kunhardt Weber Research Institute, Polytechnic University Farmingdale, New York 11735 USA "Nanosecond Pre-Breakdown and Breakdown Phenomena in Water", Conference Record of the ICDL 96 12th International Conference on Conduction and breakdown in Dielectric Liquids, Roma, Italy, July 15-19, 1996
- [4] Anto Tri Sugiarto, Masayuki Sato and Jan D Skalny, "Transient regime of pulsed breakdown in low-conductive water solutions", J. Phys. D: Appl. Phys.34(2001), pp.3400-3406