

액체질소 중의 연면 방전과 트래킹 현상

신호영*, 윤대희, 이상훈, 이광식, 이동인
 영남대학교 전기전자공학부

A Study on the Characteristics of the Surface Discharge and Tracking Phenomena in Liquid Nitrogen

Ho-Young Shin*, Dae-Hee Yoon, Sang-Hoon Lee, Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee
 School of Electrical and Electronic Engineering, Yeungnam University

Abstract - This paper was studied on the surface discharge characteristics and tracking phenomena on the solid insulator in liquid nitrogen(LN₂) at atmospheric pressure.

In order to investigate the bubbles which have much influence on electric surface discharge in liquid nitrogen, Knife type electrode and plane electrode were arranged in different modes(Mode A, Mode B, and Mode C) and investigated for surface discharge and tracking phenomena.

In Mode A, by the movement of bubbles, tracking damage was formed under the electrodes. The tracking pattern in Mode B was formed along the electrode axis.

1. 서 론

최근, 에너지는 산업의 발전과 수요의 증가와 함께 에너지 수송 및 절감에 관한 새로운 방향으로서 초전도를 중심으로 한 극저온의 응용이 광범위하게 진행되어지고 있다. 특히, 초전도 마그네트 등의 개발이 행하여지고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾ 그 중의 예로서 초전도 현상을 이용한 초전도 케이블, 전기저항이 저온(80(K))에서 약 1/10로 감소하는 특성을 이용한 극저온 케이블등이 있다.⁽³⁾ 이러한 신기술이 응용되기 위해서는 극저온 하에서 전기절연이 중요하며 현재 선진외국에서는 극저온 전기절연 특성에 관하여 연구가 활발하게 수행되고 있으나 국내에서는 극저온환경에서 연구의 난이성으로 인하여 그 연구가 미흡한 실정이다.⁽⁴⁾ 액체질소의 사용은 고체절연재료와 복합유전체로 되는 경우가 많으므로 극저온 기기의 절연성능을 확립하기 위해 액체질소의 절연특성 뿐만 아니라 액체질소중에서 고체절연재료의 절연특성과 연면방전시의 절연파괴특성 및 트래킹현상 등의 연구⁽⁵⁾가 필수적이다.

이러한 관점에서 본 연구는 대기압상대하의 액체질소에서 인가전원으로 직류 고전압을 사용하여 전원의 극성과 절연물의 종류에 따른 연면방전특성 및 트래킹현상에 관한 연구이다.

2. 본 론

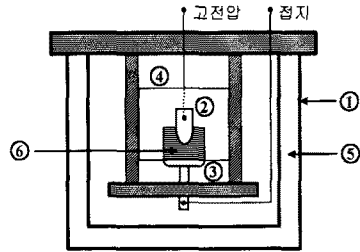
2.1 실험방법

본 연구에서는 연면방전 특성 및 방전진전에 따른 트래킹현상을 연구할 목적으로 그림 2.1과 같은 cryostat를 사용하였다. 내경180(mm) 외경220(mm), 내높이240(mm)이며, 급격한 온도변화에 의한 균열방지를 위하여 내열성이 강한 Pyrex glass를 사용하였으며, 열차폐를 목적으로 내조와 외조사이를 10⁻³(Torr)까지 진공을 시킨 2중 원통구조이다.

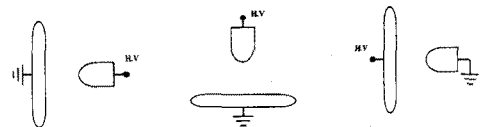
본 실험에 사용된 전원장치는 정극성 직류 고전압 발생장치(입력전압:1∅220(V), 출력전압:200 (kV), 출력

전류:5(mA), Pulse Electronics Co. Ltd.) 및 부극성 직류고전압 발생장치(입력전압:1∅110(V), 출력전압: 300(kV), Pulse Electronics Engineering Co. Ltd.)를 이용하였다. 또한 출력되는 전압을 측정하기 위하여 분압비 5000 : 1 인 high voltage divider(Hipotronics INC)를 이용하였다. 액체질소중 연면방전용 절연물의 연면방전특성과 방전진전에 따른 트래킹현상을 기포거동을 고려하여 연구하였으며, 그 영향을 조사하기 위하여 전극의 배치를 A mode 및 B mode, C mode 로 배치시켜서 실험을 하였다.

실험은 Knife 형 전극(재질 : 스테인레스 스틸, 길이 38(mm), 직경 10(mm), 두께 2(mm), 곡률반경 5(mm), 침단각도 45°) 과 평판전극(재질 : 황동, 직경 : 60(mm), 두께 : 5(mm)) 을 서로 대칭 배치하였으며 전극지지판 위에는 각각의 절연물이 전극의 하부에 구성되어 있다. 각 절연물의 규격은 두께 2(mm), 가로 60(mm), 세로 30(mm) 로 일정하게 하였다. 전압 인가속도는 1.0(kV/Sec) 의 전압 상승속도이며, 동일 절연물에 대해 연속하여 15회의 연면파괴전압을 측정하여 앞선 5회의 값을 제외한 10회의 값의 평균을 취하였다.



① Pyrex glass ② Knife type 전극 ③ 평판전극
 ④ 전극 지지판 ⑤ 진공 ⑥ 고체절연물



A mode B mode C mode

그림 2.1 저온유지장치와 전극배치

2.2 실험결과

2.2.1 A mode배치

그림 2.1과 그림 2.2는 전극의 하부에 절연물이 존재할 때 대기압하의 액체질소중에서 A mode로 전극을 배치한 후 정극성 및 부극성 직류 고전압을 인가한 경우의 연면절연파괴값과 연면파괴후의 고체유전체 표면의 트래킹형상을 보이고 있다.

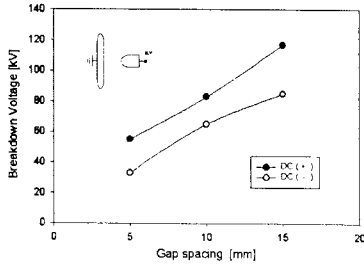


그림 2.1 A mode배치시의 연면파괴전압

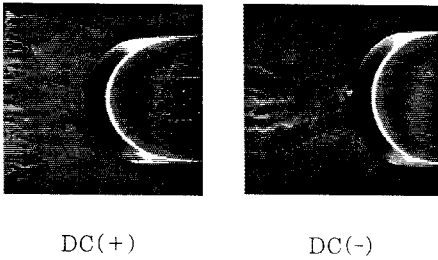


그림 2.2 A mode배치시의 트래킹형상

본 연구와 같은 대기압하의 액체질소의 절연파괴는 전극내에 존재하는 기포의 존재에 따라 크게 의존하며, 이러한 기포는 전계를 인가함으로써 전극계 내에 어느 위치에서 정체하게 되는데 이 기포를 정체 기포(stagnation bubble)라 칭하며, 이것이 절연파괴에 큰 영향을 미치게 된다. 전극계 내에 이 정체 기포의 형성은 전극배치 모드에 따라 크게 의존하고 있으며, 이것이 큰 원인이 되어 절연파괴로 이어지게 된다.

그림 2.1에서 연면파괴전압은 정극성 직류 고전압을 인가한 경우가 부극성 직류 고전압을 인가한 경우 보다 높게 나타나고 있으며, 연면거리가 길어질수록 파괴전압을 거의 직선적으로 상승하는 경향을 보이고 있다.

그림 2.2의 연면파괴 후의 트래킹형상을 보면, 5[mm], 10[mm]간극의 경우, 전극 축과 그 하부에 보다 많은 형상이 나타나고있으며, 이와 같은 현상은 기포의 영향을 더 많이 받는 부극성 직류 고전압을 인가한 경우에 보다 뚜렷한 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 대기압상태하에 있어서 액체질소중의 기포의 운동에 관한 힘 중 주요한 힘이 부력(floating force, F_f)과 gradient력(gradient force, F_g)이라 가정하면, A Mode(전극 축이 중력방향과 수직인 배치)에서는 전극 축을 경계로 상부 영역에서는 F_f 과 F_g 의 합성력(Resultant force, F_R)은 기포를 전극계 밖으로 밀어내는 힘이 강하게 작용하고, 하부 영역에서 발달한 기포는 오히려 전극 축 가까이로 모이게 하는 힘이 작용하게되어, A mode의 경우에는 전극 축 하부에서 이동하는 기포가 부력과 gradient력의 합성력에 의해 전극 축 가까이에서 정체될 확률이 높기 때문이다. 한편 간극이 15[mm]로 될 경우에는 트래킹형상이 점점 상부로 이동하는 경향을 보이는데, 그 원인으로 는 간극이 커짐에 따라 전계강도가 약해지게 되어 상대적으로 F_g 에 비해 F_f 가 강해진 원인이기 때문이다.

2.2.2 B mode배치

그림 2.3과 그림 2.4는 전극의 하부에 절연물이 존재할 때 대기압하의 액체질소중에서 B mode로 전극을 배치한 후 정극성 및 부극성 직류 고전압을 인가한 경우의 연면절연파괴값과 연면파괴후의 고체유전체 표면의 트래킹형상을 보이고 있다.

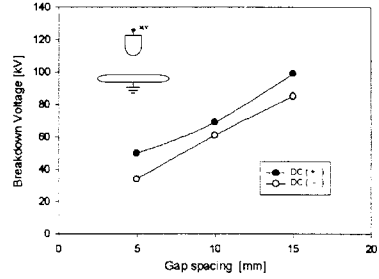


그림 2.3 B mode배치시의 연면파괴전압

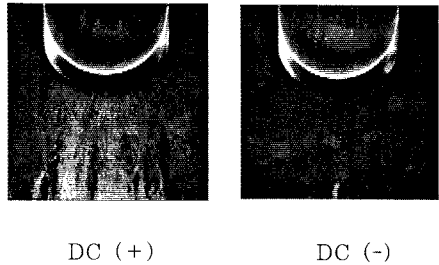


그림 2.4 B mode배치시의 트래킹형상

연면파괴전압은 A mode의 경우와 마찬가지로 정극성 직류 고전압을 인가한 경우가 부극성 직류 고전압을 인가한 경우 보다 높게 나타나고 있다.

연면파괴 후의 트래킹형상을 보면, B Mode(전극축이 중력방향과 평행일 때)에서는 부력(floating force, F_f)과 gradient력(gradient force, F_g)의 합성력(Resultant force, F_R)은 전극 가장자리에서는 기포를 전극계에서 멀리하려는 방향으로 작용하며, 침전극 하부에서는 이들 $F_f = F_g$ 인 어느 위치에서 정체 기포가 생성될 가능성이 높기 때문에, 전극축을 중심으로 뚜렷한 형상을 보이고 있음을 알 수 있다.

또한 A mode와 B mode의 연면파괴전압을 비교해보면, A mode의 경우가 보다 높은 전압에서 파괴가 일어나는데, 그 원인으로 는 기포거동에 의해 B mode의 경우가 정체기포의 생성이 용이한 원인과 함께 B mode의 경우에는 부력에 의해 상승하는 기포의 운동방향이 전극 축 방향과 일치하여 움직이기 때문에 A mode에 비해 상대적으로 간극사이에 존재하는 시간이 길어지기 때문이다.

2.2.3 C mode배치

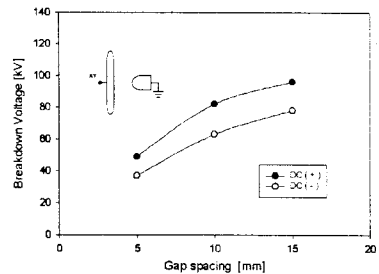
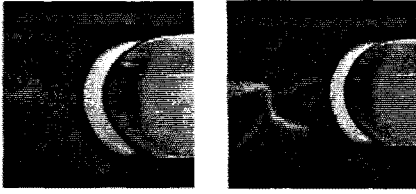


그림 2.5 C mode배치시의 연면파괴전압



10[mm] gap 15[mm] gap

그림 2.6 C mode배치시의 트래킹형상(DC+)

그림 2.5에서 연면방전전압은 A mode, B mode의 경우와 마찬가지로 정극성 직류 고전압을 인가한 경우가 부극성 직류 고전압을 인가한 경우 보다 높게 나타나고 있으며, 연면거리가 길어질수록 파괴전압은 상승하는 경향을 보이고 있으나 A mode, B mode의 경우와는 달리 연면방전 전압 값은 간극이 길어질수록 상승하는 경향이 두드러지지는 않고 어느 정도 포화하는 경향을 보이고 있다.

이러한 현상은 A mode의 경우와 비교해 보면 기포 거동의 측면에서는 같은 메카니즘을 가지고 있지만, 평판전극에 전원을 인가할 경우 Knife Type전극에 전원을 인가할 경우보다 전극, 고체절연물, 액체절연소의 접촉부, 즉 삼중점을 형성하여 전계의 집중을 일으켜 연면방전전압을 저하시키는 역할을 하여 약점으로 존재할 수 있는 부분이 상대적으로 많아진 원인과 함께 파괴적전에 열적으로 유기되어 전극표면으로부터 방출되는 열기포의 영향이 상대적으로 면적이 넓은 평판전극에서 우세하기 때문이라 할 수 있다.

그림 2.6은 C mode배치시 10[mm], 15[mm]간극의 경우에 정극성 연면방전후의 트래킹 형상으로 전극 축을 중심으로 뚜렷하게 나타나는 형상을 보이고 있지만, 15[mm]간극의 경우 전극 축을 따라 진전하다가 Knife Type전극하부로 이동하는 형상을 보이고 있다.

C mode와 같은 전극계에서는 전극축 하부에서는 부력과 gradient력의 합성력이 기포를 Knife Type전극 쪽으로 밀어내는 작용을 하게되며, 이러한 기포들이 Knife Type전극하부에서 상승을 억제 받아 정체하게 되어, 연면방전이 최단간극을 따라 진전하다가 상대적으로 절연내력이 약한 정체기포 쪽으로 이동하게 되어 그림과 같은 형상이 나타나게 된다.

3. 결 론

본 논문에서 기포거동을 고려하여 대기압하의 액체절연소 중 전극배치에 따른 고체유전체 표면의 연면방전전압 측정과 트래킹 현상에 관한 연구를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 대기압하에서 액체절연소 중 Knife Type전극과 평판전극을 이용한 전극계에서 전극간 거리가 커질수록 연면절연파괴전압이 증가하며, 또한 전극의 배치에 따른 절연파괴전압은 10[mm]간극까지는 A mode > C mode > B mode 순으로 나타나고 있으며 15[mm]간극의 경우 B mode와 C mode의 절연파괴 전압 값이 역전되는 경향을 보이고 있다.

② 동일한 전극배치에 있어서 연면방전전압은 상대적으로 정체기포가 생성될 확률이 낮은 정극성 전원을 인가한 경우가 부극성 전원을 인가한 경우보다 높게 나타나고 있다.

③ 연면방전 후 모든 절연물의 표면에 다소의 트래킹 흔적이 확인되었으며, 절연물의 트래킹 강도는 상대적으로 기포의 영향을 적게 받는 정극성 전원을 인

가한 경우가 부극성 전원을 인가한 경우보다 크게 나타났다.

④ A mode의 트래킹 형상은 최단 간극인 전극 축과 아래에 정체된 기포의 영향으로 전극 축과 그 하부 중심에서 일어나고 있으며, 15[mm]간극에서부터 서서히 전극 축 상부로 이동하는 경향을 보이고 있다.

⑤ B mode의 트래킹 형상은 정체기포가 생성될 확률이 가장 높고 전계의 집중이 가장 강한 전극 축을 통하여 일어나고 있다.

⑥ C mode의 트래킹 형상은 최단 간극인 전극 축을 중심으로 일어나고 있으며, 15[mm]간극의 경우 하부로 이동하는 경향을 보이고 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Toshio Suzuki, "Future Power System and Challenges in Electric Power Engineering", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, August 23-27, 1993.
- [2] 土森紀之, 長澤隆士, "21世紀の電力エネルギー-輸送技術Ⅲ・系統構成・運用の高速化", 電學誌, Vol.112, No.8, pp.592-596, 1992.
- [3] 一柳, 直陵 外1人, "極低溫大容量送電技術の可能性", EIM-85-102, 1985.
- [4] 益田義賀, "超低溫物理", pp.5-22, 名古屋大學出版社, 1987.
- [5] 石井裕 外1人, "極低溫ヘリウム中での沿面放電", EIM-85-110, 1985.
- [6] 王振朝 外3人, "液體窒素中における直流電界下の氣泡運動の解析", ED-93-219, 平成5年
- [7] 李 廣植, 朱 宰賢 外4人, "컴퓨터 시스템에 의한 극저온 냉매의 방전메카니즘에 대한 연구", 한전연구보고서, 1996.
- [8] 原 雅則 外3人, "液體窒素中の氣泡存在下の絶縁破壊に關するFRPスペーサの影響", IEE Japan, Vol. 118-A, No. 6, '98