

대기압하의 액체질소중 트래킹현상 및 연면방전 특성

박 광서★○, 신 동화○, 신 호영○, 주 재현 □, 최 병주◇, 이 광식○, 이 동인○, 변 승봉○  
 ○ 영남대학교 전기전자공학부, ◇ 경주전문대학 전기과, □ 거제전문대학 전기과, ◎ 전기전자공학부 겸임교수

The Characteristic of Tracking Phenomena and Surface Discharge at the atmospheric pressure

Kwang-Seo Park★○, Dong-Hwa Sin○, Ho-Young Sin○, Jae-Hyun Ju□, Byoung-Ju Choi◇, Kwang-Sik Lee○, Dong-In Lee○, Sung-Bong Byon◎  
 ○,◎ The School of Electrical and Electronic Engineering of Yeungnam University,  
 ◇ Electricity of Kyong-Ju Junior College, ◎Electricity of Gwa-Jea Junior College.

**Abstract** - This paper was studied on the surface discharge characteristics on the solid insulators in the Liquid Nitrogen(LN<sub>2</sub>) at atmospheric pressure.

Liquid Nitrogen has been widely used as a cooling and insulating materials for superconducting and cryogenic cable.

Considering the effect of bubbles, we observed tracking phenomena on the surface of solid insulators and investigated surface breakdown characteristics of several solid insulators.

1. 서 론

최근, 에너지는 산업의 발전과 수요의 증가와 함께 에너지 수송 및 절감에 관한 새로운 방향으로 초전도를 중심으로 한 극저온의 응용이 광범위하게 진행되어지고 있다. 특히, 초전도 마그네트 등의 개발이 행하여지고 있다.<sup>(1)(2)</sup> 그 중의 예로서 초전도 현상을 이용한 초전도 케이블, 전기저항이 저온(80[K])에서 약 1/10로 감소하는 특성을 이용한 극저온 케이블등이 있다.<sup>(3)</sup> 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.<sup>(4)</sup> 액체질소의 사용은 고체절연재료와 복합 유전체로 되는 경우가 많으므로 극저온 기기의 절연성을 확립하기 위해 액체질소의 절연특성 뿐만 아니라 액체질소중에서 고체절연재료의 절연특성과 연면방전시의 절연파괴특성 및 트래킹현상 등의 연구<sup>(5)</sup>가 필수적이다. 이러한 관점에서 본 연구는 대기압상태에서 인가전원으로 직류 고전압을 사용하여 전원의 극성과 절연물의 종류에 따른 연면방전특성 및 트래킹현상에 관한 연구이다.

2. 정체기포생성 및 기포거동이론

기포의 운동에 관한 주된 힘은 부력(floating force,  $F_f$ )과 gradient력(gradient force,  $F_g$ )이며, 이 두 힘의 합성력(Resultant force,  $F_R$ )에 의하여 기포가 거동 및 정체한다. 이 기포의 운동에 의해 전극계 내의 전극의 상하부 어느점에 기포는 정체 할 수있다. 이 기포를 정체기포라 하며, 이 정체기포가 결국 다수의 소기포와 함께 어울려서 큰 기포로 성장하므로 기포의 크기가 증대된 결과 이 기포에서 corona가 발생되고 더욱더 기포를 성장시켜 전극간을 교락하여 절연파괴로 진전한다. 그림 2.1은 전극축 아래부분의 기포는 합성력에 의해 전극축 가까이에 형성된다. 그러나 전극축 윗부분의 기포는 합성력에 의해 전극축에서 더욱더 멀리 형성된다.

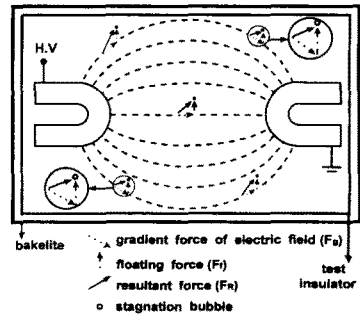


그림 2.1 정체기포생성개념도(As mode의 정면도)

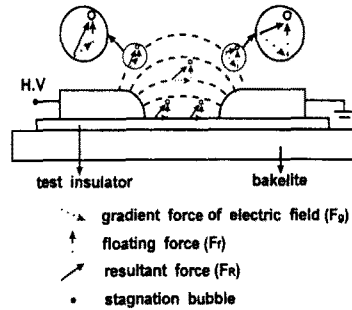


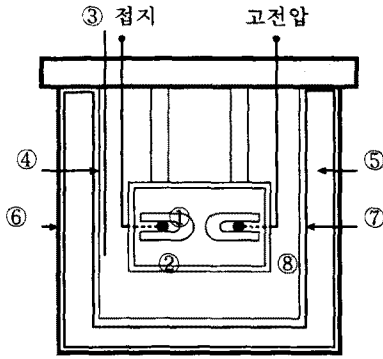
그림 2.2 정체기포생성개념도(Bs mode의 정면도)

그림 2.2는 발생된 기포가 연면에서 더욱더 먼곳에서 형성되므로 기포가 가장 많이 존재하고 전극간에 최단거리인 절연물의 연면이 가장 취약한 부분임을 예측 할 수 있다.

3 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 연면방전 특성 및 방전진전에 따른 트래킹현상을 연구할 목적으로 그림3.1과 같은 cryostat를 사용하였다. 내경170[mm] 외경210[mm], 내높이 170[mm]이며, 급격한 온도변화에 의한 균열방지를 위하여 내열성이 강한 Pyrex glass를 사용하였으며, 열차폐를 목적으로 내조와 외조사이를 10<sup>-3</sup>[Torr]까지 진공을 시킨 2중 원통구조이다.

본 실험에 사용된 전원장치는 정극성 직류 고전압 발생장치(입력전압:1∅220[V], 출력전압:200 [kV], 출력전류:5[mA], Pulse Electronics Co. Ltd.) 및 부극성 직류고전압 발생장치(입력전압:1∅220[V], 출력전압: 60[kV], Hipotronics INC)를 이용하였다. 또한 출력되는 전압을 측정하기 위하여 분압비 5000 : 1 인 high voltage divider( Hipotronics INC)를 이용하였다.



As mode 전극배치(장치의 정면도)

- ①Knife type 전극 ②Test insulator ③온도센서 ④실버코팅 ⑤진공 ⑥스테인레스스틸 ⑦Pyrex glass ⑧ Bakelite board

그림 3.1 저온유지장치와 전극배치

액체질소중 연면방전용 절연물의 연면방전특성과 방전진전에 따른 트래킹현상을 절연물의 종류(테프론, 베클라이트, G-FRP)에 따라 연구하였으며, 기포의 영향을 조사하기 위하여 전극의 배치를 As mode 및 Bs mode로 배치시켜서 실험을 하였다.

실험은 Knife 형 전극( 재질 : 스테인레스 스틸, 길이 38[mm], 직경 10[mm], 두께 2[mm], 곡률반경 5[mm], 침단각도 45° ) 을 서로 대칭 배치하였으며 전극지지판 위에는 각각의 절연물이 전극의 하부에 구성되어 있다. 각 절연물의 규격은 두께 2[mm], 가로 82[mm], 세로 20[mm] 로 일정하게 하였다. 전압 인가속도는 1[kV/Sec] 의 전압 상승속도로 서서히 상승시켜서 연면방전이 일어날 때의 전압값을 측정하였다. 측정값은 20회 측정하여 산술평균한 값이다.

## 4. 실험 결과 및 검토

### 4.1 전극계를 As mode로 배치한 경우

#### 4.1.1 정극성 직류고전압을 인가한 경우

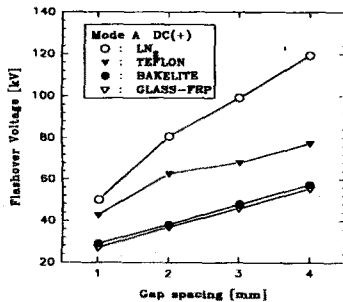


그림 4.1 As mode의 전극배치시 절연물의 종류에 따른 정극성 직류 연면방전전압

그림 4.1은 전극의 하부에 절연물이 존재하지 않을 때와 존재할 때 대기압하 액체질소중의 Knife 형 전극을 As mode로 배치한 경우의 정극성 직류 고전압을 인가한 경우의 연면방전전압을 보여주고 있다.

일반적으로 정침조건에서 절연파괴의 원인은 전자에 의한 액체분자의 충돌전리, 즉 전자사태만에 의한 것보다는 충돌전리에 의하여 발생한 양이온에 의해 공간전하를 형성하여 streamer의 진전에 의한 절연파괴로 나타나고 있다. 그러나 본 연구의 실험조건인 대기압상태하에서는 기포가 다량으로 존재하므로 기포파괴이론과 위의 이론과의 복합적인 원인으로 사료된다.

연면파괴전압값들을 보면 테프론, 베클라이트,

G-FRP의 순으로 나타났다. 비유전율값이 2.174 인 테프론의 연면방전전압이 가장 높게 측정되었으며, 비유전율을 5.519인 G-FRP가 가장 낮은 연면방전전압으로 측정되었다. 이것은 비유전율이 크므로해서 전계인가시 유전손의 증가에 따라 액체질소중 에너지 주입에 의해 미세 기포의 수가 증가함과 관계가 있고 또한 절연재료의 표면윤활도와 관계가 있다고 생각된다.



(a) G-FRP 사진 (b) (a)의 트래킹형상 설명도

그림 4.2 절연물 표면의 Tracking형상 (As mode-4[mm] gap)

그림 4.2는 As mode인 경우의 트래킹 현상인데 이론에서 설명한 바와 같이 As mode에서는 정체기포가 전극축 상단부 보다 하단부에서 많이 발생되므로 트래킹의 강도는 전극축 부근과 하단부 영역이 크게 형성됨을 알 수 있었다.

#### 4.1.2 부극성 직류 고전압을 가한 경우

그림 4.3은 As mode의 전극배치에서 부극성 직류고전압을 인가시 연면방전전압특성을 나타내고 있다.

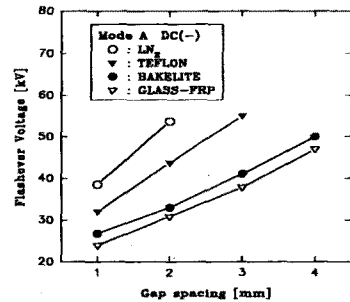
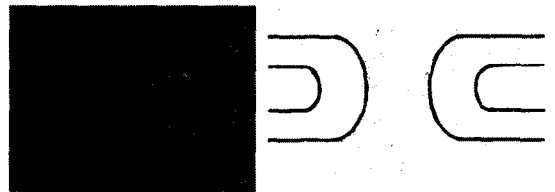


그림 4.3 As mode의 전극배치시 절연물의 종류에 따른 부극성 직류 연면방전전압

일반적으로 부(-)의 전압을 인가하면 절연파괴 현상은 높은 인가전계로부터 방출된 전자를 통하여 액체속에 주입된 에너지가 전극과 절연물 그리고 액체질소 등의 경계면을 통하여 기포를 발생시키고 그 기포내의 부분방전



(a) 베클라이트 (b) (a)의 트래킹형상 설명도

그림 4.4 절연물 표면의 Tracking형상 (As mode - 4[mm] gap)

으로인하여 절연파괴로 진전된다. 부극성 연면방전전압을 정극성과 비교하면 극성효과로 인하여 부극성이 더 낮은 전압에서 연면방전이 발생한다. 절연물에 따른 연면방전전압은 테프론, 베클라이트, G-FRP의 순이며 그림 4.4은 연면절연파괴시 절연물 표면에 생긴 트래킹

의 모양을 나타낸다. 정극성에 비하여 트래킹 강도가 미약하다.

#### 4.2 전극계를 Bs mode로 배치한 경우

##### 4.2.1 정극성 직류 고전압을 가한 경우

그림 4.5은 Bs mode의 전극배치시 측정된 연면방전 전압특성이다.

일반적으로 정(+ )전압 인가시에는 절연파괴의 원인은 As mode에서 설명한 바와 같고 정전압 인가시의 As mode와 비교하여 보면 Bs mode인 경우가 낮은 값에서 연면방전전압이 측정되었다.

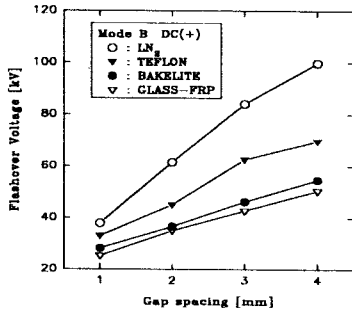


그림 4.5 Bs mode의 전극배치시 절연물의 종류에 따른 정극성 직류 연면방전전압

이것은 2장의 정체기포생성 및 기포거동이론과 As mode의 트래킹 현상에 의해 As mode 연면방전시에는 주로 전극축 부근과 그 하부에서의 방전에 의하기 때문에 연면방전 거리의 증가에 따른 방전전압의 증가라고 사료되며, Bs mode 시에는 전극사이의 최소 단거리에서 방전이 진전될 확률이 더 높기 때문에 연면방전전압이 더 낮다고 사료된다.



(a) 베클라이트 (b) (a)의 트래킹 형상 설명도

그림 4.6 고체절연물 표면의 Tracking 형상 (Bs mode - 4[mm] gap)

이들 관계는 그림 4.6에서 확인 할 수 있었는데 트래킹의 모양은 As mode와 달리 Bs mode에서는 전극 사이의 최소 단거리에서 많은 트래킹이 보였으며 중심부에서 멀어질수록 트래킹의 강도가 낮으며 전극축에 대하여 대칭성 트래킹 형상으로 나타났다.

##### 4.2.2 부극성 직류 고전압을 가한 경우

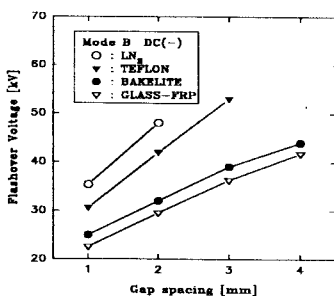
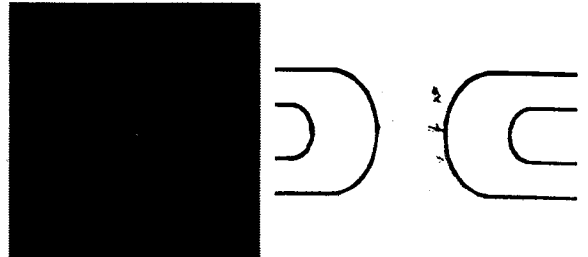


그림 4.7 Bs mode의 전극배치시 절연물의 종류에 따른 부극성 직류 연면방전전압

그림 4.7은 Bs mode의 전극배치에서 부극성 직류 고전압을 인가한 경우 연면방전전압을 나타낸다.

As mode의 부의 전압을 인가시와 비교하면 Bs mode가 연면방전전압이 더 낮게 측정되었다. 이것은 앞에서 설명한 바와같이 정체기포 및 기포거동에 의해서 Bs mode에서 기포에 의한 절연파괴시 연면거리가 As mode보다 짧기 때문이라 생각된다.

Bs mode에서 부의전압 인가시 본 실험중 가장 낮은 값의 방전전압을 얻었다. 이 경우에는 입력전력이 가장 낮은 결과, 그림 4.8에서 보여주는 바와 같이 가장 미약한 트래킹 강도로 나타나는 것이다.



(a) G-FRP 사진 (b) (a) 트래킹 형상 설명도

그림 4.8 고체절연물 표면의 Tracking 형상 (Bs mode - 4[mm] gap)

## 5. 결론

본 논문에서 대기압하의 액체질소중 절연물의 종류에 따른 연면방전특성과 방전시 트래킹 현상에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 대기압하에서 액체질소중의 Knife 전극에서 전극간 거리가 커질수록 연면방전전압이 증가하며, 또한 전극의 배치에 따른 절연파괴전압은 As mode가 Bs mode보다 높았다.
- ② 절연물의 트래킹 강도는 에너지 주입이 더 큰 정극성이 부극성보다 크게 나타났다.
- ③ As mode의 트래킹 형상은 비대칭이며 Bs mode의 트래킹은 대칭성이다.
- ④ 대기압하 액체질소중의 절연물 재료에 따른 연면방전전압은 테프론, 베클라이트, G-FRP 순으로 나타났다.
- ⑤ 연면방전전압의 크기는 Mode As DC(+) > Mode Bs DC(+) > Mode As DC(-) > Mode Bs DC(-) 순서였다.
- ⑥ 연면방전전압은 G-FRP가 가장 낮게 나타났으며 트래킹현상에 의한 표면손상은 가장 적게 일어났다.

## [참고 문헌]

- [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と輸送技術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] 益田義賢, "超低溫物理", pp.5-22, 名古屋大學出版社, 1987.
- [5] 石井格 外1人, "極低溫ヘリウム中での浴面放電", 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 방전 메카니즘에 대한 연구", 한전연구보고서, 1996.