

액체질소의 연면 방전 기초 특성 연구

정종만, 백승명, 김영석, 김상현
경상대학교 전기공학과(공학연구원 자동화 컴퓨터 연구센터)

Basic Study on Characteristics of Surface Flashover in LN₂

Joung Jong Man, Baek Sung Myeong, Kim Yeong Seok, Kim Sang Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.
(Automation and Computer Research Center of Engineering Research Institute)

jjmany@hanmail.net

Abstract - Fiberglass - reinforced plastic (FRP) can have high breakdown puncture strength and has high mechanical strength. So the research of its dielectric properties have been conducted in liquid nitrogen(LN₂). In this study, we discussed the characteristics of surface flashover on FRP in LN₂ for applying it to spacer of a superconducting power equipment. We distinguished four types of surface flashover along solid insulator with arrangement of electrodes and tested the surface flashover voltage of each types of electrode arrangement. The type of a electrode set at the back of the insulator showed the worst dielectric property.

1. 서 론

고온 초전도체의 발견이후 그 응용연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 임계전류밀도가 높고 기계적 특성이 우수한 고온초전도 선재의 개발과 더불어 고온초전도 전력기기의 개발 가능성이 한층 더 높아졌다. 현재, 여러 선진 국가에서는 초전도 응용기기의 개념설계 및 상세 설계가 이루어졌으며 전력계통과 연계하기 위한 실 계통 연구 단계에 이르러 있다.

우선, 초전도 응용기기가 개발되기 위해서는 냉매의 절연 연구가 선행되어야 할 것이다. 따라서 고온 초전도 응용기기의 냉매로 사용되어지는 액체질소 속에서의 절연연구가 널리 이루어지고 있으며 다양한 절연구성이 제안되고 있다. 액체질소는 본질적으로 절연특성이 양호하나 증발잠열(6cal/g)이 낮아 외부로부터의 열 침입이나 초전도 응용기기의 켄치로 인해 비등 기포가 발생되기 쉬우며 또한 금속 입자나 오염물질에 의한 절연 성능의 저하가 우려되고 있다[1].

특히, 초전도 응용기기를 제작하기 위해서는 각종 고체 절연물을 사용하여야 하는데 이때 그

표면을 통한 연면방전은 고체절연물이나 액체질소의 절연파괴 전압보다 매우 낮아 큰 문제가 된다. 연면방전은 고체절연물의 형상, 전극의 표면처리, 절연물의 재료, 인가되는 전압의 형태 등에 의해 다양한 특성을 나타내며[1], 본 연구에서는 전극과 절연물의 배치에 따른 연면방전 경로를 구분하여 현재 극저온 절연재료로 많은 연구가 이루어지고 있는 FRP에 대하여 액체질소 중에서 연면방전 특성을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 전극계 구성

전극과 절연물의 배치에 따라 연면방전의 형태를 그림 1과 같이 4가지로 구분하였다. 첫째로 그림 1의 (a)와 같이 절연물 위에 전극이 수평으로 놓여져 연면방전이 연면길이에만 의존하는 경우이며, 두 번째로 그림 1의 (b)와 같이 절연물을 사이에 두고 두 전극이 수직으로 놓여져 연면방전이 연면길이와 두께에 의존하는 경우이다. 이때 절연을 위해 전극보다 길게 놓는 여유 부분의 길이를 collar라 정의하였다. 그리고 세 번째는 그림 1의 (c)와 같이 두 번째의 한 전극을 절연물 배후의 전극과 접촉한 경우이다. 네 번째는 그림 1의 (d)와 같이 두 겹으로 접해있는 절연물 중간으로 연면방전이 이루어지는 경우이다.

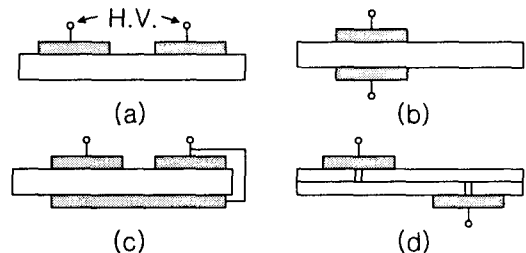


Fig.1. Four types of surface flashover

위와 같은 4가지 종류에 대하여 그림 2와 같은 전극계를 구성하였으며 전극재료로는 두께 0.11 (mm)의 Al sheet와 순 은을 sheth로 사

용한 Bi-2223 테이프(0.25 thick, 3 width)를 사용하였다. Al sheet 전극의 경우 한 전극은 끝 각을 45°가 되게 하였으며 다른 전극은 직사각형 형상으로 하였다. Bi-2223/Ag 테이프의 경우는 직경 30 (mm)의 원판 FRP에 감아 HTS loop를 만들어 사용하였다. Bi-2223/Ag 테이프 가장자리의 곡률 반경은 약 0.441 (mm) 이다.

전극계와 절연물의 접촉을 위해서는 스프링 또는 FRP 판의 탄성만을 이용하였으며 silver paste 등으로 미소공극을 제거하기 위한 부수적인 처리는 하지 않았다.

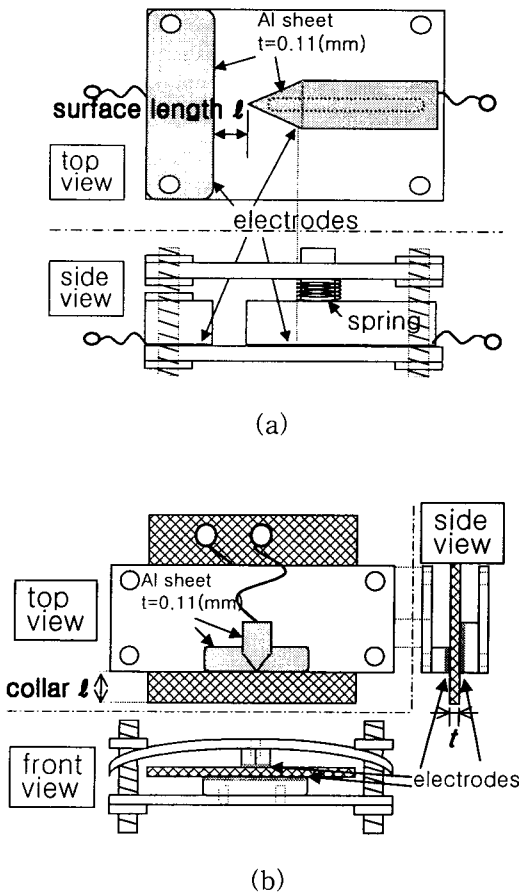


Fig. 2. Schematic of electrodes, (a) for dependence on surface length, (b) for dependence on collar length

2.2 실험방법

전극을 액체질소에 침적하기 위한 Cryostat는 진공 층이 있는 pyrex-glass dewar 두 개로 구성되어 있으며 내조에는 실험을 위한 질소를 담았고 외조에는 내조의 실험용 질소의 열적 안정을 위한 질소를 담았다. Cryostat에 침적된 전극에는 AC 60Hz의 전원을 1 (kV/s)의 속도로 상승 시켜 연면 방전이 일어나는 전압을 기록하였다. 90 (kV), 300 (VA)용량의 BAUR DTS AC 전원 장치를 사용하였다. 실험을 위한

FRP 판은 에탄올에 넣어 초음파 세척 후 사용하였다.

2.3 실험결과 및 토의

그림 3은 두께 5 (mm)의 FRP의 collar 길이에 따른 연면방전 전압 특성을 살펴본 그림이다. 연면방전 전압 V와 연면거리 l과의 관계를 다음과 같은 실험식으로 나타낼 수 있는데

$$V = a \cdot l^m$$

단, a, m 정수이다.

HTS loop 전극의 경우 m=0.05, Al sheet 전극 m=0.34을 나타낸다. 이는 다른 불평등 전계에서의 연구결과 값[2]과 Al sheet의 경우 유사하게 나타나고 있다. 그리고 Al sheet 전극의 경우는 HTS loop 전극보다 collar 길이가 짧을 경우 연면방전 전압이 높게 나타나는 데 이는 Al sheet 전극이 HTS loop에 비해 심한 불평등 전계를 나타내기 때문일 것이다. 하지만 collar 길이가 길어짐에 따라 연면방전 전압은 포화되기 때문에 초전도, 변압기나 기타 응용기기에 적용될 때 경제적인 collar의 길이를 사용해야 할 것이며, 또한 연면방전을 막기 위해서는 단순히 collar 길이만으로 제어하기 어렵다는 것을 나타내고 있다.

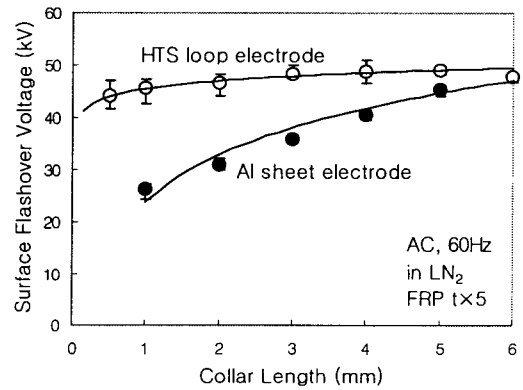


Fig. 3. Dependence of surface flashover voltage on collar length

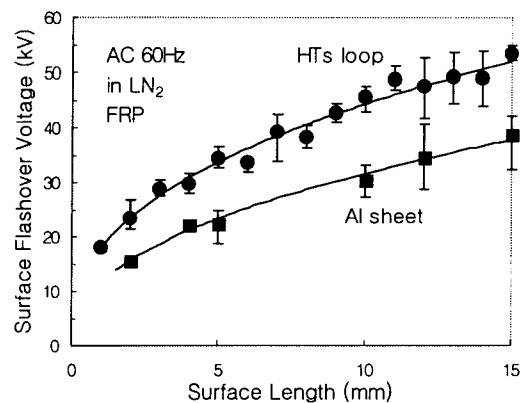


Fig. 4. Dependence of surface flashover voltage on surface length

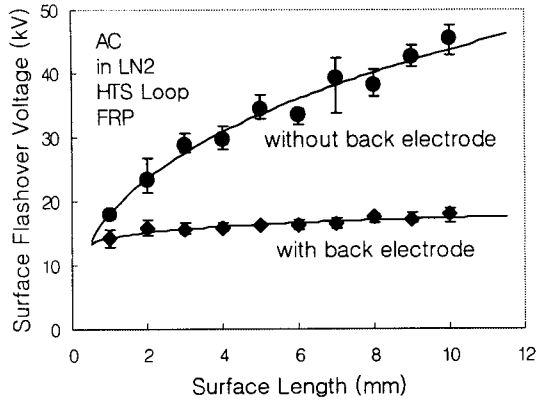


Fig. 5. Effect of back electrode

그림 4는 전극이 수평으로 놓여져 연면길이에 대한 연면방전 특성을 나타낸다. 이때 위 실험식의 m값은 HTS loop 전극은 0.39, Al sheet 전극은 0.43으로 거의 같은 경향을 나타낸다. 이는 전극이 수직으로 배치되어 그 사이에 절연 물이 놓여 있는 경우 보다 연면방전 특성이 좋은 것을 알 수 있는데, 이는 전극이 수직으로 배치 되어 중간에 절연체가 있어 전극 사이의 고유용량(specific capacitance)이 커지기 때문에 연면방전 거리가 길어지기 때문이다[3]. 액체질소의 비유전율은 1.431이며 FRP(G-10)의 비유전율은 4.432이다.

이와 같은 특성은 전극배치 (c)와 같은 경우에 연면방전 특성의 차이를 보다 더 뚜렷하게 살펴 볼 수 있다. 그림 5와 같이 전극을 수평으로 배치한 경우에서도 배후 전극이 있으므로 해서 표면전하 존재 확률이 높아져 연면 방전 특성이 상당히 저하되고 있다.

또한 절연체를 사이에 둔 전극의 수직 배치에서는 전극과 절연체의 미소 공극에서 발생하는 부분 방전을 관찰할 수 있는데, 이러한 부분방전은 절연체의 표면 열화를 심화시켜 결국에는 관통과피에 까지 이를 수 있다. 그림 7에 부분방전에 의해 표면이 열화되어 관통과피가 생긴 표면 사진을 보여주고 있다. 그림 1 (b)의 Al sheet 전극배치 그리고 collar길이가 10 (mm)인 경우의 연면과피 실험 중 약 14 ~ 16 (kV)에서 부분방전이 개시되어 25 (kV)에서 관통과피가 일어난 경우이다.

그림 7의 (b)는 연면방전에 의해 질소가 비등하여 기포가 발생하는 모습을 찍은 사진이다. 전극 간격이 짧은 경우(1mm) 부분 방전으로 생긴 기포에 의해 방전이 가속화되는 것을 관찰할 수 있었지만 전극간격이 큰 경우에는 부분 방전에 의해 발생한 기포가 전계 E^2 에 비례하는 gradient력을 받아 전계가 집중된 곳으로부터 밀려나 방전에는 영향을 미치지 못하였다[4]. 하지만 응용기와 같은 실제 시스템에서는 복잡한 절연구성을 가지므로 기포에 대한 자세한 연구가

필요할 것이다. 초전도 기기의 켄치를 모의한 비등 질소 기포에 의한 방전연구가 많이 이루어지고 있다[5].

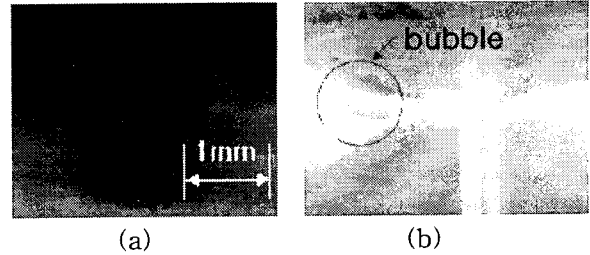


Fig. 6. Photograph of (a) FRP surface after puncture and (b) bubble generated by surface flashover

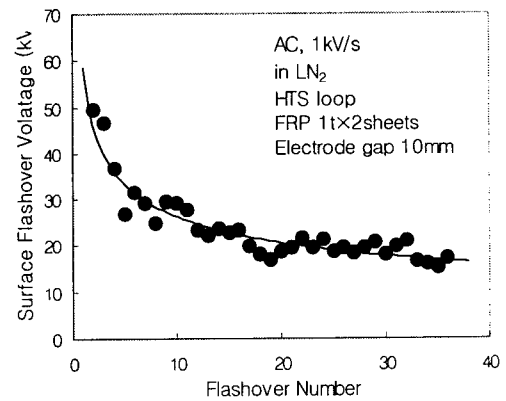


Fig. 7. Aging tendency of contacted two FRP board

그림 7은 전극 배치 (d)의 경우로 두께 1 (mm) FRP 판 2장을 적층 시킨 후 두 FRP 판 사이로 발생하는 연면방전 특성을 살펴보았다. 이때 적층 사이로 연면방전을 유도하기 위해 각 전극에 맞닿는 FRP 면에 직경 1 (mm)의 구멍을 두었다. 연면방전 회수에 따른 특성은 초기 방전 시에는 동일한 연면거리와 두께를 가진 다른 전극배치의 경우보다 5 (kV) 정도 높게 나타났으나, 방전이 거듭됨에 따라 그림 6 (a)와 같은 방전 탄화로의 생성에 의해 그 특성이 급격히 저하되었다.

3. 결 론

액체 질소 중 연면방전을 4가지로 구분하고 FRP 절연체에 대한 기초 특성 연구를 실시하였다. 전극과 절연물의 배치에서 전극 사이에 절연 물이 있는 전극의 수직배치와 절연물의 한 면에 수평으로 배치되어 있는 경우로 크게 구분 할 수 있으며, 더불어 수평배치에 배후전극이 있는 경우와 적층 절연물 접촉면을 통한 연면방전을 살펴 보았다.

전극의 수직배치가 수평배치에 비해 연면방전 특성이 나쁘게 나타났으며 또한 부분방전의 발생

으로 인한 절연물의 열화가 심하게 나타났다. 이는 배후 전극이 있는 경우 더욱 연면방전 특성이 저하가 심하게 나타났으며, 전극사이의 절연체에 의한 고유정전용량으로 설명되고 있다. 또한 부분방전 및 연면방전에 의해 전극 사이에 질소 기포가 발생되었으며 전극간극이 큰 경우에는 연면방전에 영향을 미치지 않았다. 하지만 전극간격이 작은 경우 연면방전의 전파가 가속화됨을 관찰할 수 있었다. 따라서 절연 구조물 내에서의 비등기포에 대한 자세한 연구가 필요하다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Craig Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Trans on Electrical Insulation, Vol.24, No.5, pp.765-786, 1989
- [2] 西村誠介 외, "極低溫冷媒の不平等電界における耐電壓特性", ED-90-118, EIM-90-87
- [3] Tanzo Nitta 외, "The Relationship among AC Surface Spark-over Voltage, Specific Capacitance of Solid Insulator and Bubbles in LN2 and LHe", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.1773-1776, 2001
- [4] Tanzo Nitta 외, "Characteristic of AC Surface Spark Voltage in LN2 and LHe", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol.10, No.1, pp.1325-1328, 2000
- [5] B.YSeok 외, "A Study of Thermal Bubble Behavior in the Simulated Electrode System of HT Superconducting Coils", IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.6, No.1, pp.109-116, 1999