

## HTS pancake 코일을 모의한 전극계에서의 전기절연 특성

### Electrical insulation characteristics with simulated electrode system of HTS pancake coil

정종만\*, 백승명\*, 김상현\*

(Jong Man Joung, Seung Myeong Baek, Dong soon Gwak Sang Hyun Kim.)

#### Abstract

For the experiment the four types of spacer were distinguished by arrangement. The flashover characteristic on each types of spacer was investigated and the flashover phenomena were observed to understand breakdown mechanism in liquid nitrogen(LN<sub>2</sub>). The spacer should be placed interior coil as an insulator, a cooling channel and s supporter of structures. The simulated electrode used in the experiment was made from five turns of HTS tape. Experimental results revealed that multi-layer and barrier effects did work well in Air but did not in LN<sub>2</sub>. These result suggested that the flashover in LN<sub>2</sub> caused by the bubbles due to partial discharge at micro gap, g. The flashover characteristics decreased to 70% when g is 0.2 mm. The degradation was improved by even treatment on surface of coil electrode.

**Key Words** : liquid nitrogen, partial discharge, spacer, surface flashover.

#### 1. 서론

고온초전도 응용기기가 개발되기 위해서는 극저온에서의 절연기술이 확립되어야 한다. 그러나 모든 전력기기의 안정성은 기기의 절연특성이 달려 있음에도 냉매인 액체질소의 절연과피 기수에 대한 충분한 이해가 부족한 실정이다.

액체질소는 본질적으로 양질의 절연재료로서 기포발생이 없는 상태에서의 절연강도는 소규모의 실험전극에서 몇 백 kV/cm 정도 가진다. 또한 유전율이 작고, 점도가 낮아 좋은 구비조건을 가졌다고 할 수 있다. 하지만 액체질소의 절연성능은 상온의 액체절연물과 같이 기포의 존재여부, 전극의

표면 거칠기, 전계 분포, 시험전원 등에 영향을 받게 되는데, 특히 잠열이 낮아 기체로의 상 변화에 의한 절연성능저하가 크게 문제되고 있다[1].

특히, 고체절연물의 표면을 따른 방전에 의한 연면절연과피는 고체절연물이 없는 경우에 비해 매우 낮게 나타난다. 하지만 전력응용기기에서는 상당한 량의 스페이서가 냉각채널 또는 절연물, 지지물로서 사용되어야 한다. 또한 스페이서의 증가에 따른 시스템의 절연과피 강도는 한 층 감소하게 된다. 따라서 무엇보다도 액체질소 속에서의 연면방전 현상에 대한 이해가 필요하다.

고온초전도 응용기기 중에서 초전도 변압기는 여러 나라에서 개발되어지고 있다. 변압기의 권선은 팬케이크 코일의 직렬 또는 병렬 접속에 의하여 구성 할 수도 있으며 굵기가 없는 한 도체로 이루어진 솔레노이드 형식으로 구성할 수도 있다. 두 권선의 차이점을 살펴보면 전자의 경우 변압기의 권선을 팬케이크 코일 단위로 모듈화 하여 손상을 입은 권선 부를 교체하기가 쉬워 경제적인

\* : 경상대학교 전기공학과(공학연구원 자동화 컴퓨터 연구센터)

(진주시 가좌동 660-701,

Fax: 055-759-2723

E-mail : jjmany@hanmail.net)

2002년 월 일 접수, 2001년 월 일 1차 심사 완료,  
2002년 월 일 2 차 심사 완료

반면 접속 부에서 접촉저항이 발생하게 된다. 후자의 경우는 일부분의 도체 결합이 전체 권선의 파손을 의미하지만 접촉저항이 없는 것이 이점이다. 이러한 차이점 외에도 절연관점에서 슬레노이드형 권선은 동축원통에 의한 절연이 주를 이루며 팬케이크 코일은 원형 판상에 의한 절연이 주를 이루게 된다.

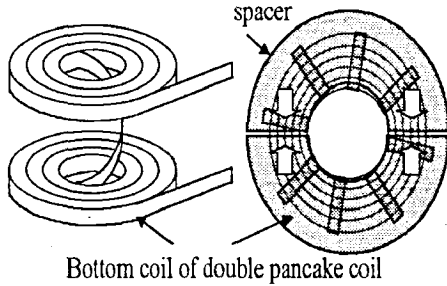


그림 1. 더블 팬케이크코일과 스페이서의 개략도  
Fig. 1. Sketch fo double pancake coil and the spacer

그림 1은 더블 팬케이크 코일과 스페이서에 대한 개념 도를 나타낸다. 스페이서는 완전원판의 스페이서를 코일 사이에 삽입하기가 어려워 두 개의 반 원판으로 나누어진 상태이다. 이와 같은 경우 반 원판이 맞닿는 부위에서의 연면방전은 불가피하게 되므로 연면방전에 대한 효과적인 절연설계가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 스페이서의 구성에 따라 4가지 형태의 스페이서를 구성한 후 각 형태에 대한 연면방전 특성 실험과 방전현상을 관찰한 후 본 실험에서 절연열화의 가장 큰 이유로 여겨진 연면방전에 대한 미소갭의 영향에 대하여 살펴보았다.

## 2. 실험

### 2.1 스페이서의 4가지 형태

액체질소 중에서의 연면방전 특성을 이해하기 위해 4가지 형태의 스페이서를 일정한 거리의 전극간에 구성하였다. 그림 2는 4가지 형태의 스페이서를 나타내고 있다. Type A는 4가지 중 가장 단순한 형태로 스페이서의 존재로 인한 연면방전으로 인해 절연강도가 감소한다는 사실은 잘 알려져 있다. Type B의 스페이서 구성에서는 여러 장의 스페이서를 겹친 형태로 관통파괴가 일어나지 않는 한 방전이 개시되어 스페이서의 면을 따라 전원의 입력에너지가 고갈될 때까지 streamer가 진전되어 두 전극을 교락하여 절연파괴 될 것이다. Type C와 D의 경우는 냉각 통로가 존재하는 형태로 type B와 같은 경우이나 type C가 type D 보

다는 barrier 효과가 더 작용할 것으로 기대된다 [2-3].

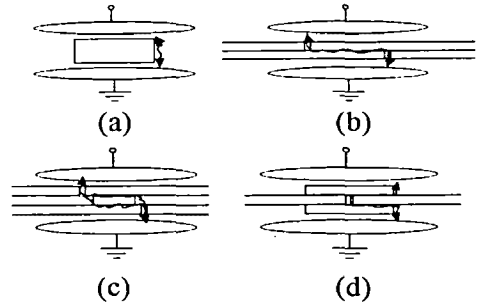


그림 2. 4가지 형태의 스페이서 구성도, (a) type A, (b) type B, (c) type C, (d) type D  
Fig. 2. Four types spacer, (a) type A, (b) type B, (c) type C, (d) type D

### 2.1 실험 방법

그림 3은 실험의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 저온용기, 고전압 전원장치, 전극계, 디지털 카메라 등이다.

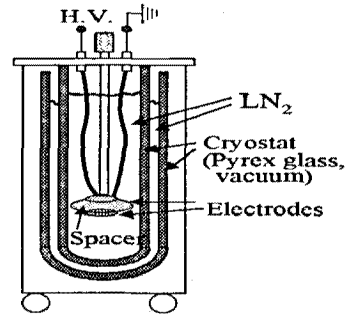


그림 3. 실험 개략도  
Fig. 3. Schematic of experiment setup

극저온 용기는 2 중의 액체질소 용기로 이루어져 있다. 내조는 실험용 액체질소를 충전하기 위한 것이며, 외조는 내조의 액체질소를 안정하게 하기 위한 액체질소를 충전하기 위한 것이다. 각 저온용기의 내벽을 은으로 도포되어 있어 복사열을 차단 시켰으며, 또한 관측창을 가지고 있어 방전현상을 육안으로 관찰할 수 있어 이를 통해 사진 촬영을 하였다. 전원장치는 교류전원이며 최대 90 kV, 300 VA의 용량을 가진다. 1 kV/s의 상승속도로 절연파괴가 일어날 때까지 전원을 인가하였다. 절연파괴된 전압은 10회 측정하여 그 평균을 취했으며 그래프에서 최대값과 최소값을 에러바로 나타내었다.

그림 4는 실험에 사용된 전극계에 대한 사진과

스페이서 구성에 대한 개략도를 나타낸다. 그림 4 (a)는 전극계의 사진이며, 그림 4 (b)는 그림 2에 나타낸 스페이서 구성 중 type C를 나타낸다. 실험에 사용된 전극은 FRP 폼에 은 피복 초전도 선재로 5회 권선 한 것으로 초전도 선재는 두께 0.25 mm, 폭 3 mm이다. 코일 전극의 외경은 45 mm이다.

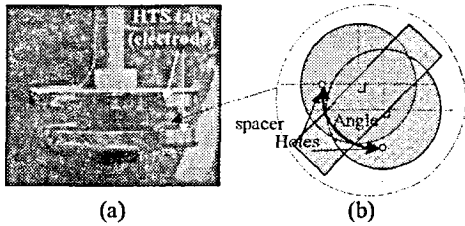


그림 4. (a) 전극계 사진과 (b) type C 스페이서의 개념도

Fig. 4. (a) Photo of electrode and (b) schematic of type C spacer

모든 스페이서는 두께 1 mm의 FRP 원형판 및 직사각형의 판으로 구성되어 있으며 각 원판에는 연면방전을 유도하기 위한 직경 4 mm의 홀(hole)이 존재한다. 그리고 원판을 겹쳐 구성할 경우 각 홀의 위치가 90도가 되도록 하였다. 이때 홀이 겹치는 각을 조절하여 연면거리를 길게 할 수 있을 것이다. Type C의 경우는 두 원판 사이에 직사각형의 FRP판이 존재하며, type D의 경우는 두 개의 직사각형의 판이 원판의 홀을 가로막게 구성하였다.

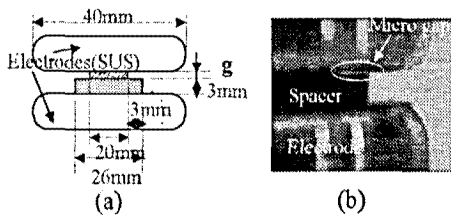


그림 5. 미소갭에 따른 연면방전 측정용 위한 (a) 전극계의 개념도와 (b) 사진.

Fig. 5. Electric for the effect of micro gap on surface flashover, (a) schematic and (b) photo

그림 5는 미소갭이 연면방전에 미치는 영향을 실험하기 위한 전극계를 나타낸다. 그림 5 (a)는 전극계의 개략도를, (b)는 사진을 나타낸다. 전극은 스테인레스 재질로 직경 40mm이다. 스페이서는

두께 3 mm, 직경 26 mm의 FRP 이다. 미소갭  $g$ 는 FRP 스페이스 위에 두께 60  $\mu\text{m}$ , 직경 20 mm의 Kapton 필름을 FRP 스페이서 위에 올려 만들었다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 6은 공기 중에서의 전극간 거리 6 mm일 때 각 스페이서 형태에 대한 연면방전 전압을 나타낸다. 예상했던 것과 같이 type A의 경우 방전 전압이 가장 낮게 나타난다. 스페이서의 면이 전기력선과 이상적으로 평행한 경우 절연내력의 변화가 없으나 실제의 경우 표면의 이물질, 미소 공극 등의 다양한 결함에 의해 절연내력이 크게 감소하게 된다. Type B의 경우는 전극간 거리 3 mm에서 스페이서를 구성하였다. 하지만 type A보다 상당히 높은 특성을 나타내고 있다. 이는 연면거리에 비례해서 연면방전 전압이 크게 증가했음을 알 수가 있다. type C와 D의 경우도 홀의 간격만큼 연면거리가 증가한 상태이다. 특히 type C의 경우는 원형 spacer가 전극과 가까이 있어 스트리머의 진전을 막아주는 barrier 효과가 크게 나타나기 때문이라고 여겨진다.

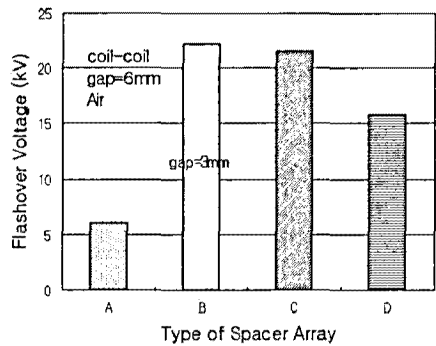


그림 6. 공기 중에서의 연면방전 전압

Fig. 6. Surface flashover voltage in Air

그림 7은 액체절소 속에서 전극간 간격이 3 mm 그리고 6 mm인 경우 각 스페이서의 연면방전 특성을 나타내고 있다. 공기 중에서는 type A에 비해 나머지 형태의 스페이스는 상당한 절연 파괴 전압이 증가하였음에도 불구하고 4가지 type의 방전 전압이 거의 같게 나타나고 있다.

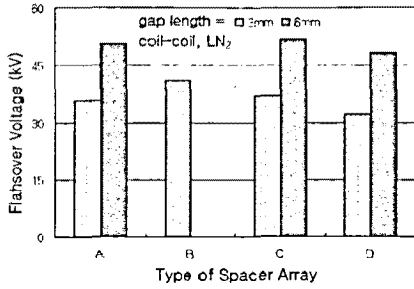


그림 7. 액체질소 중에서의 연면방전 전압  
Fig. 7. Surface flashover voltage in LN<sub>2</sub>

액체질소 중에서의 방전전압의 개선 효과가 나타나지 않는 것은 다음과 같은 실험 중에 관찰된 현상으로 설명할 수 있을 것이다. 절연과피 직진 일정 전압이상에서 방전음의 발생과 더불어 다량의 기포가 발생하였다. 이는 액체질소의 잠열이 작아 기포가 부분방전에 의해 쉽게 발생하고 게다가 발생된 기포가 냉각채널 또는 스페이스의 아래쪽에 모이게되어 절연열화를 가속화시키는 것으로 사료된다[4]. 그림 8은 액체질소 중의 부분방전을 찍은 사진과 코일 전극의 표면을 찍은 사진이다. 그림 8 (a)은 고전압을 인가하여 방전음이 들리는 35 kV에서 전압을 유지시켜 절연과피가 일어날 때까지 유지시켰다. 절연과피 시까지 120초가 소요되었으며 코일과 스페이스가 만나는 경계면에서 많은 열화 흔적과 관통과피 홀을 관찰할 수 있었다.

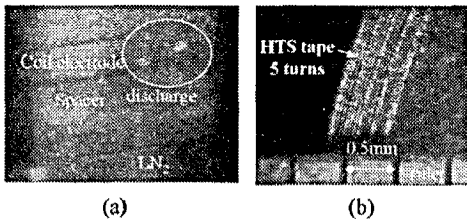


그림 8. (a) 부분방전 사진과, (b) 코일전극의 표면 사진

Fig. 8. Photo of (a) partial discharge and (b) coil electrode

코일 전극의 표면은 그림 8 (b)와 같이 표면이 평활하지 못해 스페이스와 접촉하게되면 많은 미소 갭을 가지게 될 것이다. 이러한 미소 갭이 부분방전의 커다란 원인으로 여겨진다. 따라서 그림 5 (a)와 같은 전극을 이용하여 미소갭 g의 크기에 따른 연면방전전압을 측정하였다. 그림 9에 미소갭에

따른 연면방전 전압을 나타내었다. 연면방전 전압은 최대 70%까지 감소하였으며, g가 0.2 mm일 경우에 최대로 감소하였고 g . g > 0.4 mm일 경우 감소영역을 벗어나 두께에 따라 증가할 것으로 보인다.

연면방전은 일반적으로 전극과 스페이스 그리고 주위 절연물이 만나는 삼중점에서 시작되어 스페이스의 연면을 따라 진전하게 된다. 특히 스페이스에 미소갭과 같은 결함이 있게되면 전계가 집중되어 절연내력을 더욱 감소시키게 되는데, 등전위 분포가 균일하지 못하여 전계가 집중되는데 그림 10에 이를 나타내었다. 해석 모델은 그림 5 (a)의 전극개념도와 같다. 그림 10 (b)은 0.3 mm의 미소갭이 존재할 경우 등전위선이 미소갭의 단부에 집중되어 전계가 크게 나타남을 보여주고 있다[5].

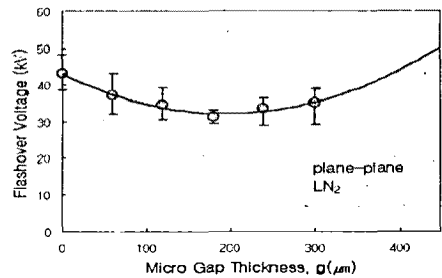


그림 9. 미소갭에 따른 연면방전 전압  
Fig. 9. Surface flashover voltage as a function of micro gap g

고체-액체 복합 절연계에서 전계 분포는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$E_n = \frac{\sigma_n}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} V + \left( \frac{\epsilon_n}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} - \frac{\sigma_n}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \right) V \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}, \quad n = 1 \text{ or } 2$$

( $\epsilon$ : 유전율,  $\sigma$ : 도전율, d: 절연 폭, n: 절연물 종류, V: 인가전압, E: 전계의 세기)

이때 시정수  $\tau$ 의 크기가 충분히 크다면 순간절연과피일 경우 두 절연체에 대한 전계 분포는 유전율에 의해 지배된다. 액체질소, Kaption, GFRP(G10)의 유전율은 각각 1.432, 3.5, 4.43이다.

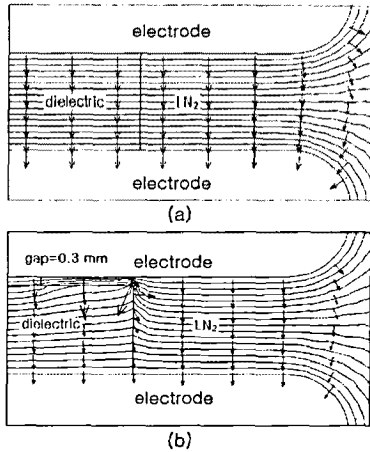


그림 10. 미소갭에 대한 등전위선도, (a) 이상적인 접촉 시, (b) 미소갭 존재시

Fig. 10. Electrical equipotential lines, (a) perfect contact at junction, (b) micro gap at junction

액체질소와 고체절연물의 복합 절연계에서는 액체질소의 전계 분담율이 높게 나타난다. 하지만 액체질소의 고유절연내력이 높으므로 기포의 발생을 억제하거나 배출을 용이하게 한다면 절연내력을 유지할 수 있을 것이다. 따라서 스페이서의 절연설계시 미소갭과 기포 배출을 위한 냉각 채널을 고려해야 할 것이다

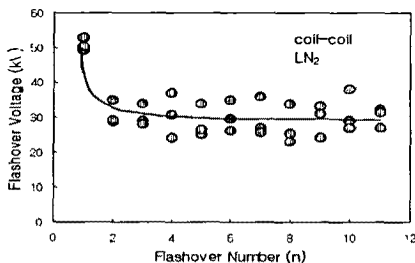


그림 11. 코일전극의 표면처리 후의 연면방전 전압  
Fig. 11. Surface flashover voltage after surface treatment

그림 11은 코일 전극 표면의 면을 에폭시 수지를 이용해 고르게 한 후 type D의 형태로 스페이서를 구성하여 연면방전 전압을 측정 한 결과이다. 매우 얇은 평면처리에도 불구하고 연면방전 전압은 1.4배 이상 증가하였으며 한번의 방전 이후 일정한 연면방전을 유지하고 있다. 이는 평면처리를 통

해 미소갭이 제거되어 절연내력이 향상되었고 에폭시 층의 절연파괴 후에는 절연이 복구되지 않고 평면처리 이전의 절연내력으로 저하되었으며, 에폭시층의 절연파괴 이후에는 액체에 의한 절연회복이 되는 현상이다.

#### 4. 결론

double pancake coil 내부에서의 스페이서의 구조에 따른 절연파괴 기구를 이해하기 위해 4가지 형태의 스페이서를 구성하였다. 구성된 4가지의 스페이서를 이용해 액체질소 중에서 연면방전 실험을 행하였으며 절연파괴 현상을 관찰하였다. 그 결과와 현상들을 정리하면 다음과 같다.

1. 4가지 형태의 스페이서에 대한 방전특성은 공기 중에서 다층으로 구성된 스페이서에서는 연면방전 특성이 구성에 따라 개선되어 나타나지만 액체질소 중에서는 부분방전에 의한 비등기포에 의해 절연내력이 약화되었다.
2. 부분 방전은 코일전극의 미소갭 코일전극과 스페이서가 만나는 경계에서 발생하였으며 기포를 발생시켜 절연열화를 가속시켰다.
3. 미소갭  $g=0.2$  mm일 경우 연면방전 전압이 최대 70%까지 감소하였다.
4. 코일전극의 표면을 에폭시로 평탄하게 하였을 경우 type D의 경우 1.5배까지 연면방전 특성이 개선되었다.
5. 스페이서의 설계에 있어 기포의 배출 및 미소갭의 영향을 충분히 고려하여 설계하여야 할 것이다.

#### 감사의 글

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

#### 참고 문헌

- [1] J. Gerhold, "Cryogenic Liquids-A Prospective Insulation Basic for Future Power Equipment," IEEE Trans. on Dielectric and Electric Insulation, vol. 9, no. 1, pp. 68-75, 2002
- [2] K. Kadowaki, etc., "Initial Images of Complete Breakdown of Liquid Nitrogen/Polymer Film," IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 9, no. 1, 2002
- [3] Masayuki, NAGAO, etc., "Breakdown Strength of Ice-Paper Composite Insulation in Liquid Nitrogen," Proceeding of The 16th

International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, pp. 66-70, 1999

[4] B.Y.Seok. H.Komatsu, J.Suehiro. M.Hara, "Partial and Complete Electrical Breakdown in Simulated High Temperature Superconducting Coils," IEEE Trans. on Dielectric and Electric Insulation, vol. 7, no. 1, pp. 78-86. 2000

[5] H. Craig Miller, " Surface Flashover of Insulators," IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 24, no. 5, pp. 765-786, 1989