

고온초전도 코일의 모의 전극계에서의 절연연구

Study on Coil Insulation of HTS Transformer with Simulated Electrode

정종만, 백승명, 이정원, 광동순, 김상현

(Jong-man Joung, Seung-myeong Baek, Jung-won Lee, Dong-soon, Kwak Sang-hyun Kim)

Abstract

In this paper the characteristics of surface flashover for high temperature superconducting transformer(HTS) was discussed. The transformer, will be developed in the shell type with double pancake coil, isn't developed yet in the world. We conducted experiment of surface flashover that could occur in the windings of the transformer. First, we distinguished the surface flashover with electrode alignment into two type, such as parallel and vertical, and then compared with each characteristics of surface flashover. And the surface flashover with metallic particle was tested, it was also affected by the particle position.

Key Words : Surface flashover, metallic particle, FRP

1. 서 론

고온초전도체가 발견된 이후 응용을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 초전도응용기기 중 고온초전도변압기는 일본의 큐슈대학, 미국의 Waukesa 전기 회사에서 개발된 적이 있으며, 국내에서는 double pancake 코일을 이용한 shell 타입으로 개념설계를 완료하였으며, 사업 1단계에서 22.9kV/6.6kV, 1MVA 배전급의 초전도변압기를 연구 개발할 예정이다.

모든 전력기기는 안전성, 안정성 그리고 신뢰성을 확보하기 위해서는 반드시 계통에서 요구하는 절연강도를 가져야 한다. 특히, 초전도응용기기가 개발되기 위해서는 냉매인 액체질소 온도(77K)에서 각종 절연재료가 가지는 절연특성에 관한 연구와 액체질소의 절연파괴기구에 대한 연구가 선행되어야만 한다.

기포 발생이 없는 안정된 액체질소의 경우 양질의

절연특성을 가지고 있다. 그러나 절연내력이 낮은 비등기포의 전계에 따른 거동 메카니즘이 복잡하게 작용하고[1] 있다. 또한, 초전도응용기기가 제작되기 위해서는 구조물을 지지하거나, 냉매가 흐를 수 있는 냉각 통로를 확보하기 위해 스페이서(spacer)를 사용하여야 한다. 이와 같은 spacer가 코일 사이에 있게되면 spacer의 표면을 통한 연면방전이 발생하기 쉬운데, 그 절연특성은 spacer가 없을 시 액체질소 자체만의 절연강도에 비해 절연강도가 현저히 낮아 절연상 큰 문제를 야기한다. 전원의 종류나 액체질소에 함유된 불순물, 전극의 형상이나 표면상태 등도 절연특성에 영향을 주는 중요한 요인이다[2].

지금까지 이와 같은 관점에서 극저온 액체에 대한 기초연구[3]를 해오고 있으며, 본 논문에서는 더블판케이크 코일 형태로 권선되는 고온초전도변압기의 절연설계를 위해 절연구성에서 나타날 수 있는 연면방전의 형태를 모의하여 그 특성연구를 하였다.

경상대학교 전기공학과, 공학연구원 자동화 컴퓨터 연구센터

(경남 진주시 가좌동 900)

Fax : 055-759-2723

E-mail : jjmany@hanmail.net

2. 실험

실험장치의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

cryostat는 pyrex 유리로 제작된 2중 구조로 내, 외 조로 구성되어 있다. 충분히 건조시킨 cryostat의 외 조에 먼저 액체질소를 채운 다음 내조를 채워 내조의 열적으로 안정되게 하였다. 액체질소는 상용의 액체질소를 사용하였으며 대기압 하에서 실험을 하였다.

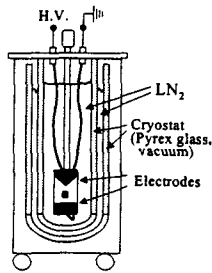


그림 1. 실험장치 개략도
Fig. 1. Schematic of experimental apparatus

그림 2는 전극계를 나타낸다. 그림 2는 수평 전극배치에 따른 연면방전 특성과 금속성 입자가 존재할 때의 연면방전 특성 실험을 위한 전극계로, FRP spacer의 표면에 두께 0.11mm인 알루미늄(Al) 전극을 부착하였다. 삼각형 전극은 끝 각이 90°, 너비 48mm이며 사각형 전극은 너비 48mm로 반경 10mm로 모서리 처리하였다. 그리고 금속입자는 폭 2mm, 너비 3mm 두께 0.11mm인 Al 재료이다.

전극의 수평 및 수직 배치는 그림 3에 나타내었다. 수평배치에 대한 실험은 연면거리 l 을 변화시키면서 방전전압을 측정하였으며, 수직배치의 경우는 절연체의 두께가 1, 2, 5mm일 때 그림에 나타낸 collar길이를 변화시키면서 방전전압을 측정하였다. 이때 수직배치의 경우 총연면거리 l 은 collar 길이를 두배하고 두께를 더한 값으로 나타내었다.

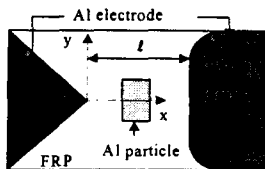


그림 2. 전극계
Fig. 2. Schematic of electrode system,

금속입자가 존재할 경우의 실험은 그림 2와 같이 x, y로 축을 구분하고 x 방향으로 삼등분하여 방전

전압을 측정한 다음, 전극의 폭 중간에서부터 위치를 변화시키면서 측정하였다.

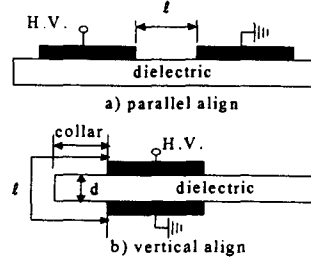


그림 3. 전극계, a) 수평배치와 b) 수직배치
Fig. 3. Electrode system, a) parallel align and b) vertical align

시료는 현재 극저온에서 기계적 및 전기절연 특성이 우수한 GFRP(G10)[4]를 사용하였으며 알코올로 초음파 세척한 후 충분히 건조시키고 실험에 사용하였다. 상용 주파수의 교류전원을 사용하였으며 BAUR사의 90kV 300VA 용량이다. 1kV/S의 속도로 전원을 인가하고 절연파괴 및 연면방전이 일어나는 전압을 기록하였다. 총 10-15회의 실험전압을 취해 그림에 평균과 최대 및 최소치를 표기하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2 전극계에서 spacer가 없을 때 액체질소의 절연파괴 특성을 그림 4에 나타내었다. 절연파괴 특성은 두께효과에 의해 포화되는 경향으로 실험식으로 나타내면 식 1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_B = k \ell^m \quad 1)$$

이때 V_B 는 절연파괴 전압, ℓ 은 전극간 거리, k 와 m 은 실험정수를 나타내며 $k=17.2$, $m=0.5$ 의 값을 가진다. 이 값은 평등전계 전극에서 값 $k=29$, $m=0.8$ 에 비해 낮은 값으로 전계의 불평등 정도를 알 수 있다.

그림 5은 전극배치에 따라 연면거리를 증가시키며 방전전압을 측정한 결과이다. 그림을 살펴보면 수직배치의 경우 연면방전 전압은 연면거리보다는 절연물의 두께의 증가에 따라 더 크게 상승하고 있음을 알 수 있다. 그리고 두께 2mm에서 수평배치와 경향이 거의 같게 나타나고 있으며, 이를 경계로 연면방전 전압의 증가 추세가 크거나 작게 나타나고 있다.

그림 5의 연면방전특성을 실험식 1)로 나타낼 경우 각 상수들의 값을 비교하면, 수직배치의 두께

2mm의 경우 m 값이 0.43으로 수평배치의 값 0.4와 거의 같다. 그리고 두께 1mm인 경우는 0.29로 낮으며, 5mm인 경우는 0.49로 큰 값을 가진다.

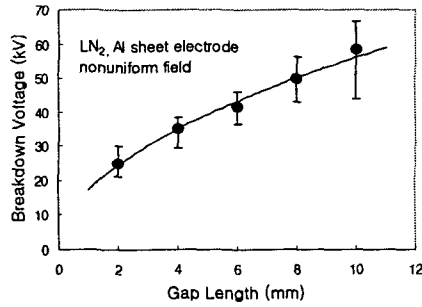


그림 4. 액체질소의 절연파괴 특성

Fig. 4. Breakdown characteristics of LN₂

따라서 전극이 수직으로 배치된 경우 연면방전 전압은 collar보다는 두께에 더 크게 의존함을 알 수 있다.

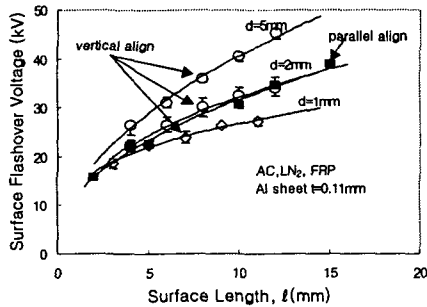


그림 5. 수평, 수직 배치 전극계의 연면방전 특성

Fig. 5. The surface flashover characteristics of electrode alignment, parallel and verticle

연면방전 전압은 전극사이에 불순물 입자가 존재하면 특성이 나빠지는 데 그림 6과 7에 그 특성을 나타내었다. 그림 3과 같이 전극 중간에 크기가 $2 \times 3\text{mm}^2$ 이고 두께가 1mm인 Al 입자가 있을 때 특성을 나타낸 그림이다.

입자의 위치는 (x, y) 좌표계로 나타냈으며 x, y 값은 다음 식과 같이 일반화하여 나타냈다.

$$y = y_p / (w_e - w_p) \times 100 (\%)$$

이때 y_p 는 입자의 y 값, w_e 는 전극의 폭, w_p 는 입자의 폭을 나타낸다. x 또는 y 값이 50%일 경우는

전극의 x, y 방향에서 중간에 위치할 때이다.

그림 6은 입자의 위치 x 에 대한 연면방전 특성을 나타낸다. x 가 50%일 경우 액체질소 및 공기의 방전전압이 최고값을 가지며 전극에 가까울수록 감소함을 알 수 있다.

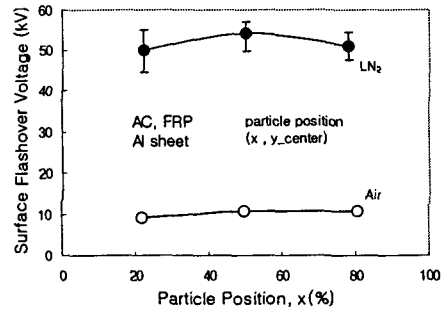


그림 6. 입자의 위치 x 에 따른 연면방전 특성

Fig. 6. The characteristics of surface flashover depending on particle position of x

그림 7은 입자의 위치 y 에 대하여 연면방전 전압을 나타낸다. y 값 55% 정도에서 연면 방전전압이 액체질소와 공기가 최저치를 나타내고 있으며 y 값이 더욱 증가함에 따라 다시 증가하고 있다.

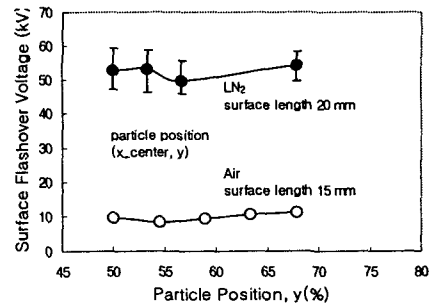


그림 7. 불순물 입자의 위치 x 에 따른 연면방전특성

Fig. 7. The characteristics of surface flashover depending on particle position of x

이와 같은 금속입자가 존재할 때의 연면방전특성은 다음과 같은 사항을 고려할 수 있다. 금속입자의 두께 만큼 전극간 거리가 감소한 특성, 또한 금속입자 가장자리에서의 전계집중, 금속입자를 통한 방전 경로 형성, 금속입자에 의한 방전의 유도 등으로 생각할 수 있다.

그림 8는 금속입자의 위치 x 에 대한 전계분포와 등전위선을 나타낸 그림이다. 전자장해석 프로그램 Flux2D를 사용하여 삼각형 전극에 전압을 100으로 일반화했을 때의 값이다.

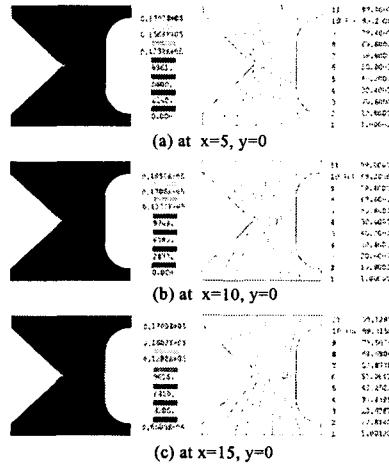


그림 8. 입자의 위치 x 에 따른 전계 및 전위분포
 Fig. 8. The electrical field distribution and equipotential line of depending on particle position of x

그림을 살펴보면 삼각형 전극의 꼭지점에서 전계가 집중되며 금속입자가 전극에 가까워짐에 따라 전계는 완화되고 있다. 하지만 금속입자 주변의 전극은 전극에 가까워짐에 따라 전계가 크게 된다
 따라서 금속입자의 위치 x 에 대한 특성은 금속입자에서의 전계집중에 의한 특성으로 사료된다.

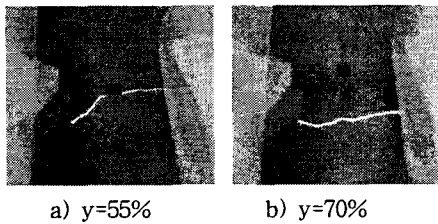


그림 9. 공기 중 불순물 입자에 의한 방전
 Fig. 9. Surface flashover in Air

그림 9은 공기에서의 연면방전의 형상을 보여주고 있다. 액체질소에서의 금속입자에 대한 연면방전 특성은 공기와 같은 경향으로 공기에서의 연면방전 특성으로 유추할 수 있으리라 생각된다. 공기에서의 특성을 살펴보면 그림 10 a) $y=55\%$ 에서는 금속입자

모서리를 통해 방전 경로가 왜곡되어 형성되고 있으며, y 값이 증가함에 따라 연면방전이 금속입자를 통하지 않게 되고 경로의 왜곡도 점점 약해짐을 볼 수 있다.

따라서 금속입자의 위치 y 에 따른 연면방전 특성은 금속입자를 통한 방전경로의 왜곡에 의한 특성이 사료된다.

4. 결 론

고온초전도 변압기 코일의 절연구성을 살펴보았으며, 액체질소 중에서 FRP의 표면을 따른 연면방전 특성을 연구하였다.

전극배치가 수직인 배치의 경우 연면거리보다 절연물의 두께에 더 크게 의존하였으며, 이러한 두께 효과는 두께가 얇을 경우에는 나타나지 않았다.

수평배치의 전극구조에 금속 불순물 입자가 존재하면 연면방전 전압이 저하된다. 금속입자에 의한 연면방전 특성은 입자에서 전계가 집중되고 금속입자에 의한 방전 경로가 왜곡되어 나타난다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] B.Y Seok, N.Tamuro, M.Hara, "A study of Thermal Bubble Behavior in the Simulation Electrode System of HT Superconducting Coils," IEEE trans on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.6, No.1, pp.109-116, 1999
- [2] Carig Miller, "Surface Flashover of Insulations," IEEE trans on Electrical Insulation, Vol.24, No.5, pp.765-786, 1989
- [3] 김상현, 김현희, 김영석, 정종만, 정순용, "극저온 액체의 동적절연파괴 특성." 한국전기전자재료학회, Vol.11, No.4, pp.321-326, 1998.
- [4] S.Usami, T.Suzuki, H.Ejima, K.Asano, "Thermo-mechanical properties of epoxy GFRPs used in superconducting magnet winding," Cryogenics 39, pp.905-914, 1999