

고온 초전도 변압기용 spacer 연구

김상현*, 백승명*, 김영석*, 한철수**, 정순용***, 정종만*
 *경상대학(공학연구원), **울산공고, ***부산정보대

Study of Spacer for HTS Transformer

Kim Sang-hyun*, Baek Seong-myeong*, Han Cheol-su**, Joung Soon-yong***, Joung Jong-man*
 *Gyeongsang Nat'l Univ., **Ulsan Eng. School, ***Pusan Information College.

Abstract - 초전도 응용 기기의 실용화를 위해서는 극저온 냉매의 절연기술이 확립되어야 한다. 특히, 취급이 용이하고 경제성이 높은 액체 질소를 냉매로 사용하는 고온 초전도 응용 기기 개발이 활발히 이루어지고 있어 여러 고온초전도 응용 기기 중 고온 초전도 변압기의 pancake-coil 형 권선에서의 spacer에 대한 절연 특성을 연구하였다. 이때 spacer는 pancake-coil의 턴간 절연내력을 유지하여야 하며, 또한 냉매 유동 통로를 확보하여야 한다. 하지만 실용상에 있어서는 절연물의 계면을 따라서 진전하는 연면 방전에 의한 절연내력이 관통절연 파괴전압에 비해 낮아 절연 설계 시 유의해야 한다. 따라서 pancake-coil형 고온초전도 변압기 권선을 위한 spacer에 대한 연면 방전 특성을 연구하였다.

형 고온초전도 변압기 권선을 위한 spacer에 대한 연면 방전 특성을 연구하였다.

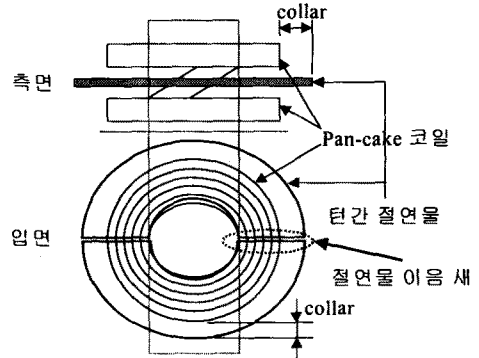


그림 1 pan-cake 코일의 절연 부

1. 서론

초전도 분야는 기기의 효율, 환경문제, 대전력 에너지 수송 문제 등을 해결할 기술로 기대되어 초전도 현상 발견 이후 많은 과학자들의 관심을 통해 수많은 연구성과를 얻었으며 눈부신 발전을 해왔다. 현재에 이르러 세계 각국에서는 초전도 응용 기기의 실용화 단계에 이르러 있으며 실 계통과의 연계 운전을 시험하고 있다. 따라서 가까운 시일 내에 실용화가 이루어질 것으로 예상된다. 특히 국내에서는 2001년 9월 21세기 뉴프론티어 연구개발사업으로 '차세대초전도응용기술개발사업'이 시작되어 초전도응용연구가 가속화되었으며 실용기의 개발을 목표로 하고있다.

2. 본론

2.1 Double pan-cake 코일에서의 절연

그림 1은 double pan-cake 코일의 구조를 나타내고 있다. Double pan-cake 코일은 고온 초전도 선재의 단선 없이 두 코일을 감을 수 있어 초전도 마그넷 제작 시 많이 응용되고 있으며 고온 초전도 변압기의 코일 구조로 채택되고 있다.

초전도 응용 기기가 실용화되기 위해서는 여전히 많은 요소 기술이 보완되어야 한다. 특히 초전도 전력 응용 분야 중 초전도 변압기의 경우 기계적으로 안정되고 높은 전류밀도를 가진 초전도 선재를 제작할 수 있는 기술 개발, 고온 초전도 선재를 이용한 권선 설계 및 켄치(quenck)보호기술의 개발, 열 절연이 우수한 냉매용기(cryostat)의 제작 등 많은 기술들이 산재해 있다[1]. 그리고 초전도 응용 기기는 초전도성을 나타내기 위한 임계온도 이하로 냉각되어 사용되거나 초전도체의 특성 향상을 위해 더 낮은 온도에서 운용되므로 이러한 극저온에서 기기의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 고전압 절연기술 또한 확립되어야 할 것이다[2].

1단의 double pan-cake 코일에 고전압이 양단에 걸리게 되면 코일의 내 측은 집중된 상태로 등 전위이며 중심에서 외측으로 나갈수록 맞닿은 코일간의 전위차가 높아져 코일의 최 외측 부분에서 가장 큰 문제가 된다. 따라서 전계는 코일의 외측 원주의 단 부에 집중되어 있어 spacer는 코일의 외경보다 긴 원형 원판이 가장 적합하다.

초전도 응용 기기는 냉매의 사용이 필연적이며 고온 초전도 응용 기기는 비등점이 77K인 액체 질소를 사용한다. 따라서 초전도 기기의 냉매 및 절연물로 사용되어지는 액체질소의 절연특성 연구가 이루어져야 한다. 현재 국내의 '차세대초전도응용기술개발사업'을 통해 double pan-cake coil 형태의 초전도 변압기를 설계, 제작하여 실용화하려 하고 있다. 이에 double pan-cake coil의 절연을 위한 구조적 고찰과 연면방전 특성을 연구하였다. 턴간 절연내력을 유지하며 냉매 유동 통로를 확보하기 위해 spacer를 사용하는데 실용상에 있어서는 절연물의 계면을 따라서 진전하는 연면 방전에 의한 절연내력이 관통절연 파괴전압에 비해 낮아 절연 설계 시 유의해야 한다[3]-[5]. 따라서 pan-cake

하지만 Double pan-cake 코일은 권선 시 사용되는 총 선재의 1/2 부분에서 코일 하나를 권선 한 후 나머지 코일의 권선을 하게되어 원판의 spacer를 권선 중간에 넣기에는 부적합하다. 따라서 두 반 원판의 spacer를 맞게 놓는 형태가 가능하다. 이때 두 반 원판의 이음새 부분은 절연물 중 절연이 가장 취약한 부분으로 효과적인 이음이 필요하다.

따라서 원판 spacer의 collar에 해당하는 연면 거리에 대한 절연특성 그리고 반 원판형 spacer 이음새 부분의 절연 특성을 살펴보았다.

2단의 double pan-cake 코일이 외부에서 접속 될 경우에는 두 단의 double pan-cake 코일 사이의 코일 내측 전위차가 높게 된다.

2.2 실험방법

그림 2은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 극저온 액체를 담기 위한 cryostat는 pyrex 유리로 제작되었으며

내조와 외조로 된 2중 구조로 이루어져 있다. 실험 시 내조의 실험용 LN₂의 안정을 위하여 외조에도 LN₂를 채워 외부의 열이 내조로 침입하는 것을 차단하였으며, 내·외조의 내벽은 은(Silver) 도금을 하여 복사열을 차단하였다. 또한 내·외조 각각은 진공 벽으로 되어있다.

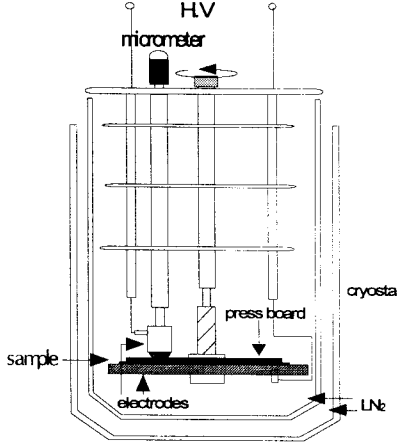


그림 2 실험장치의 개략도

고전압 전원으로는 최대 교류전압 90kV, 주파수 60Hz인 고전압 장치를 사용하여 전압인가는 전압상승 속도 1kV/s로 상승시켰다. 동일 조건하에서 5~10회 반복측정 하였다. 그리고 공간 전하의 영향을 고려하여 방전 직후 1분이 경과한 후 재차 전압을 인가하였다.

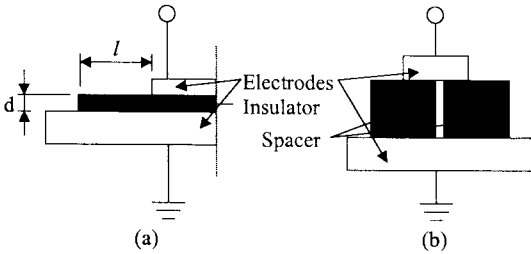


그림 3 전극계

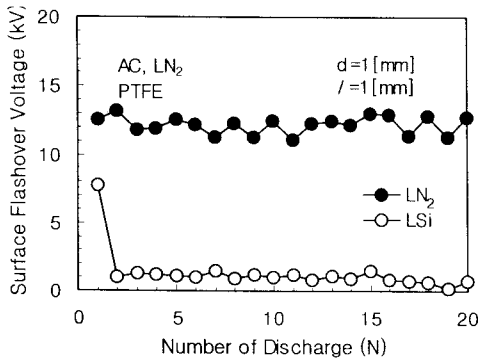


그림 4 연면방전의 방전회수에 대한 열화 특성

2.3 실험결과 및 고찰

액체질소 중에서 연면방전의 열화를 파악하는 것은 재료의 수명을 추정하는 데 있어 중요하다. 따라서 그림 3 (a)와 같은 전극계를 사용하여 collar에 해당하는 연면 거리 $l=1\text{mm}$, 두께 $d=1\text{mm}$ 인 PTFE에 다수회의

연면방전 전압을 인가하고 주위 매질을 액체질소에서 측정하고 실리콘 유와 비교하여 그림 4에 나타내었다.

전극간 연면방전 시 열 전자에 다량의 기포가 발생하며 빛을 발생한다. 그림과 같이 액체질소 중에서의 연면방전은 방전횟수에 대해 방전전압이 거의 일정하나 실리콘 유와 비교하여 방전 후 탄화로의 발생으로 인해 급격히 방전전압이 저하되어 열화 함을 알 수 있다. 하지만 액체질소의 연면방전은 유기 절연액체와 달리 화학적으로 안정된 상태이기 때문에 방전 시 불순물, 탄화물 등의 2차적 인자가 억제되어 탄화로의 형성이 없어 열화가 없다고 사료된다.

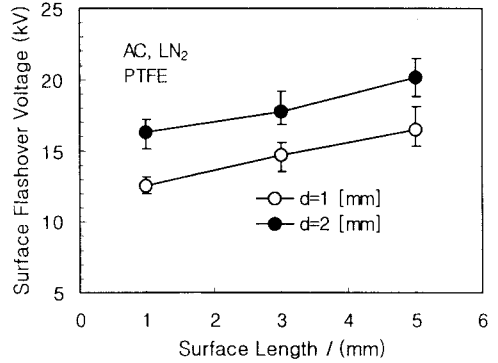


그림 5 액체 질소 중에서의 연면 거리에 따른 연면방전 특성

그림 5에 각각 액체 질소 중에서 PTFE의 두께 d 및 연면거리 l 를 변화시킨 경우의 교류 연면방전 특성을 나타내었다. 여기서 표시된 상하의 error bar는 실험치의 최대 및 최소치를 나타내며, ○ ●의 표시는 실험치의 평균값을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, d 및 l 의 증가와 더불어 연면방전 전압이 상승함을 알 수 있다. 연면방전 전압과 연면거리, 두께의 관계는 이미 기체 중에서 Toepler의 연구에서 확립되어 있어 극저온 유전체 중에서의 경우도 이것에 준하여 이론적 검토를 행하였다.

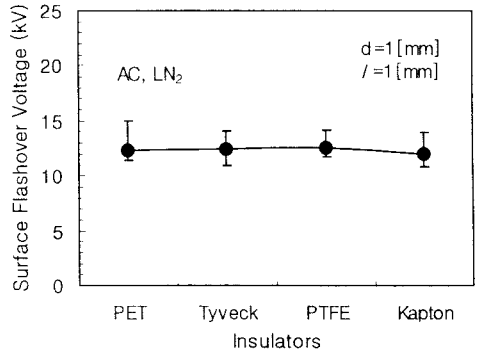


그림 6 액체 질소 중 절연재료에 따른 연면방전 특성

즉,

$$V/l = K \frac{1}{m \sqrt{l^2/d}} \text{ 이다.}$$

단 V 는 연면방전 전압, l 은 연면거리, d 는 절연체의 두께, m , K 는 정수이다. 그림 5의 실험치에 해당하는 $m=2.7$ 이며 연면방전 전압은 $d^{0.4} l^{0.3}$ 에 비례함을 알 수 있다. 이는 Toepler의 대기중의 실험($1/m=1/2.5$)에 비해 연면전압에 대한 연면거리의 의존성이 높고 유

중($1/m \approx 1/6 \sim 3.65$)의 결과보다는 약간 낮은 것을 알 수 있다[6]. 이러한 연면방전 전압과 절연체 두께 및 사용량에 직접 관련되므로 매우 유의해야 한다.

또한 본 실험에서는 전극간 고체 절연재료 종류에 대한 파괴전압의 영향을 조사하기 위해 방전거리 $l=1\text{mm}$ 및 두께 $d=1\text{mm}$ 인 고체 절연재료의 종류를 변화시켜 그 특성을 조사하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 error bar의 크기에는 다소 차이가 있으나 연면 섬락 전압은 고체 절연재료의 종류에 관계없이 거의 동일함을 알 수 있었다.

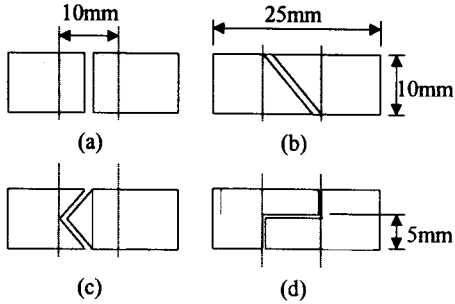


그림 7 코일 턴간 spacer의 이음 형

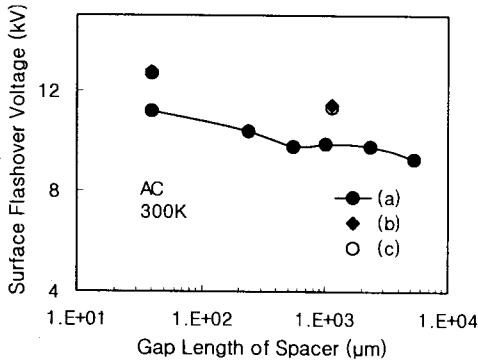


그림 8 spacer 형 (a), (b) 그리고 (c)의 틈 크기에 대한 연면방전 특성

그림 8은 턴간 절연물의 이음 형태에 따른 공기 중에서의 연면방전 전압 특성을 나타내었다. 그림 3 (b)와 같은 형태의 전극계를 구성하여 spacer 형태에 따른 실험을 하였다. 그림 7에 4가지 형태의 대표적인 턴간 절연물의 이음형태를 가정했으며 10mm 폭 내에서 그 형상을 정하였다. 치밀하게 맞닿은 spacer의 면이 외부의 원인, 변압기의 진동 등과 같은 요인에 의해 그 이음새에 틈이 생겼을 때를 고찰했다. 실험 결과에 의하면 (a) spacer의 경우 각 겹의 연면 방전 전압은 겹의 크기가 클수록 떨어지는 경향을 보여주고 있으며, spacer (b)와 (c)도 같은 경향이라 예상된다. 하지만 모든 형상에 있어 치밀하게 맞닿아 있을 시에는 주어진 spacer 형태로는 측정이 어려우며 절연내력이 고체 절연물에 준하리라 사료된다. 그리고 spacer (b)와 (c)는 연면거리가 같고 (a)보다는 커 그 연면방전 전압이 높게 나타났다. spacer (d)의 경우는 spacer 면이 상하로 맞닿아 있어 틈을 두더라도 그 접촉면이 치밀하게 닿아 있어 측정이 어려웠다.

따라서 pan-cake 코일의 권선 절연물의 이음새 부분은 (d)와 같은 형태로 항상 치밀하게 맞닿아 있을 수 있는 구조가 좋을 것이다.

액체질소의 연면 거리 의존성은 대기 중 보다 커 극저

온 냉매에서의 연구가 더 필요하다.

3. 결 론

액체질소 속에서의 연면방전 특성은 Toepler의 대기 중의 실험에 비해 연면전압에 대한 연면 거리의 의존성이 높고 연면방전 특성은 절연물의 재료에 무관하며 틈새의 연면방전 특성은 치밀하게 맞닿아 있는 구조일 때 좋은 특성을 나타낸다.

(참 고 문 헌)

- [1] J.K.Sykulski, et al, "Prospects for large high-temperature superconducting power transformers: conclusions from a design study," IEEE Proc. Electri. Power Appl., Vol.146, No1, pp.41-52, 1999
- [2] M.Hara and J.Gerhold, "Electrical Insulation Specification and Design Method for Superconducting Power Equipment", Cryogenics, Vol.38, No.11, pp.1053-1061, 1998
- [3] Qiaogen Zhang et al, "Effect of surface Discharge on Impulse Flashover Voltage of Spacer in SF6", Proceeding of 1998 International Symposium, pp.27-30, 1998.
- [4] Y.Mizuno et al, "Surface Flashover along Polymeric Rods Partially Immersed in LN₂", IEEE trans. Dielectric ad Electrical Insulation, Vol.5, No.6, pp.809-813, 1998
- [5] 山野芳昭, "2つの絶縁物が作る微小間隙に沿った交流絶縁破壊", 日本電気學會 絶縁材料研究會資料, ED-93-73, DEI-93-90, 29-36, 平成5年
- [6] 岩田, "液體窒素中の沿面放電," 日本電気學會 絶縁材料研究會資料, IM-72-40, 1-7, 1972.