

Double Pancake형 고온초전도 변압기의 전기적 절연 특성

Dielectric Insulation properties of Double Pancake coil type HTS Transformer

백승명, 정종만, 이정원, 김상현

(Seung-Myeong Baek, Jong-Man Jung, Joung-Won Lee, Sang-Hyun Kim)

Abstract

HTS transformer experimentally. High temperature superconductors can only be applied against an engineering specification that has to be determined for each particular application from the design requirements for economic viability and for operation margins in service. High temperature superconducting(HTS) power apparatus are very promising candidates for application. Especially, these advantages make superconducting transformers very promising candidates for application in electrical power engineering and locomotives. In order to realize the HTS transformer, it is necessary to establish the high voltage insulation technique in cryogenic temperature. So far, insulation research of pancake type HTS transformer is lacking nothing but insulation research of solenoid type transformer consisted.

Therefore, the composite insulation of double pancake coil type transformer are described and ac breakdown voltage characteristics of liquid nitrogen(LN₂) under HTS pancake coil electrode made by Bi-2223/Ag are studied. Breakdown in LN₂ is dominated electrode shape and distance. The relation between surface flashover voltage is considered for FRP. This research presented basis information of electrical insulation design for double pancake coil type HTS transformer.

Key Words : dielectric insulation, double pancake coil, HTS transformer, composite insulation

1. 서 론

고온초전도기기는 기존의 기기보다 효율성이 높고 소형화가 가능하여 경제성이 높기 때문에 여러 분야에서 고온초전도체를 에너지 시스템에 접목시키기 위한 응용연구가 활발히 전개되었다[1,2]. 최근에는 고온초전도체 본연의 기계적 취약성[3]을 보강한 선재가 많이 개발되면서 MRI, SMES뿐 아니라 케이블, 변압기, 한류기 등 그 응용범위가 더

욱 확대되고 있다. 특히, 고온초전도체를 변압기에 적용할 경우 변압기 용량을 높일 뿐 아니라 환경적 오염을 줄일 수 있기 때문에 앞으로 고온초전도 변압기가 기존 변압기를 대체할 것으로 기대된다. 하지만, 고온초전도체를 응용하기 위해서는 초전도성을 유지하기 위한 극저온 유지 시스템이 필수적이다. 극저온 환경의 유지와 기기응용에서 기기의 절연측면에서 LN₂는 사용 비용이 저렴하고 냉매로서의 역할과 함께 절연물로도 사용할 수 있기 때문에 고온초전도 기기의 냉매로 많이 사용될 것으로 기대된다. 따라서 극저온 분야 연구자들에게 의해 고온초전도 기기의 전기절연설계 및 운용상 안정성을 확보하기 위해 LN₂의 전기적 특성연구가

경상대학교 전기공학과
(진주시 가좌동 900,
Fax: 055-751-5345
E-mail : trebari@hanmail.net)

활발히 이루어지고 있다[4-6]. 하지만, LN₂의 특성 연구는 극히 제한적인 조건에서 이루어져 왔으며, 복합 절연계에서 절연특성에 대한 연구가 미비하여 다양한 초전도 기기의 설계에 충분한 정보를 제공하지 못하고 있다[7]. 그리고 고온초전도 변압기나, 한류기 등 코일형 기기의 절연연구는 대부분 solenoid 형태에서 연구[8]가 이루어져 왔기 때문에 pancake coil형으로 응용이 기대되는 고온초전도 변압기, 한류기 등의 전기절연설계를 위한 LN₂ 절연과 파괴특성 연구는 전무한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 전기절연설계와 운전시 안정성확보를 위하여 double pancke coil형 변압기에서 필요한 절연구성을 명확화 하였으며, double pancke coil 상태를 모의하여 LN₂의 절연특성을 고찰하였다. 그리고 변압기와 한류기 등의 절연, 기계적 지지 및 냉각 통로 사용이 기대되는 FRP spacer의 형상에 따른 LN₂의 절연특성에 미치는 영향을 고찰하였다

2. 절연구성

2.1 DPC형 고온초전도 변압기의 절연구성

고온초전도 기기는 극저온에서 운전되기 때문에 고온초전도 기기를 제작, 운전하기 위해서는 극저온에서의 서지와 과전압 그리고 수명 등을 고려한 전기적 절연연구가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 다

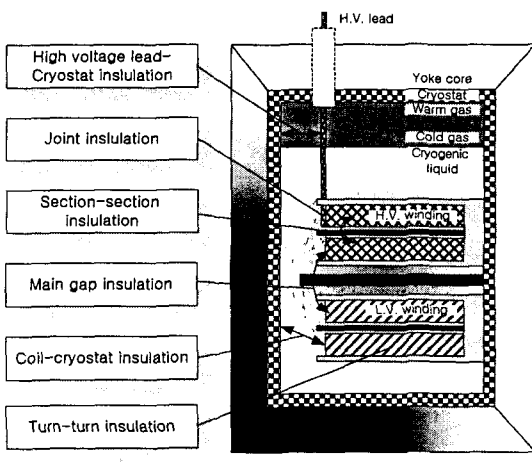


그림 1. DPC형 고온초전도 변압기의 절연구성.
Fig. 1. Composite insulation of DCP type HTS transformer.

양한 고온초전도 기기의 절연을 연구하기 위하여 먼저, DPC형 고온초전도 변압기의 절연구성을 검토하였다. DPC형 고온초전도 변압기의 절연에 사용되는 절연물은 냉매인 액체와 고분자 필름 또 절연지 그리고 spacer등이다. 실제 응용에서는 이 절연물들을 복합적으로 구성하여 사용한다. 그림 1에 DPC형 고온초전도 변압기의 절연구성을 나타낸다. 본 연구에서는 DPC형 고온초전도 변압기의 절연구성 중에서 턴간(turn-to-turn) 절연, 층간(section-to-section) 절연과 main 절연을 실험적으로 고찰하였다.

2.2 턴간 절연

그림 2에 턴간 절연 개략도를 나타낸다. 턴간 절

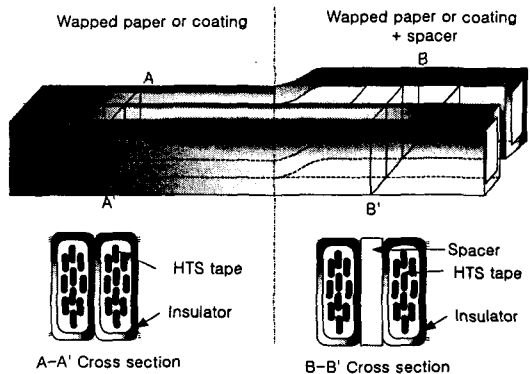


그림 2. 턴간 절연 개략도.

Fig 2. Schematic diagram of turn-to-turn insulation.

연은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 절연지나 고분자를 이용하여 도체를 절연하거나 고분자 절연물을 이용하여 코팅하는 방법이 있다. 둘째는 첫째 방법에서 턴간에 spacer를 넣는 방법이 있다. 본 연구에서는 첫째 방법을 고려하여 극저온에서 턴간 절연물로 유력한 캡톤 필름의 절연내력을 측정하였다.

3.3 층간과 main 절연

그림 3에 층간과 main 절연 개략도를 나타낸다. 층간은 하나의 double pancake coil에서 coil과 coil 사이를 의미하고 main은 고압부 coil과 저압부 coil 사이를 의미한다. 그림 3의 좌측 그림에서 층간 절연은 LN₂만을 이용한 것을 나타내고 main 절연은 LN₂와 coil의 former를 이용한 것을 나타낸 것이

다. 여기서, 층간 절연은 LN₂의 절연내력에 의존하고 main은 고압 coil과 저압 coil간의 이격거리와 former의 형상과 재질에 의존한다. DPC형 고온초전도 변압기에서 coil은 전자력을 받기 때문에 기계적 지지가 필수적이므로 coil의 지지를 위해 spacer의 사용이 불가피하다. 그리고 고전압 coil과 저전압 coil 사이의 절연은 액체만 이용할 경우 콤팩트가 어렵다. 따라서 신뢰성을 높이고 기기의 콤팩트를 위해 main 절연에 spacer를 사용하게 된다. 그림 5의 우측그림은 spacer가 있을 때의 층간과 main 절연 구성도를 나타낸다. 층간 절연은 층간 spacer의 길이와 두께에 의존하게 된다. main 절연은 main spacer의 길이와 두께에 의존하게 된다.

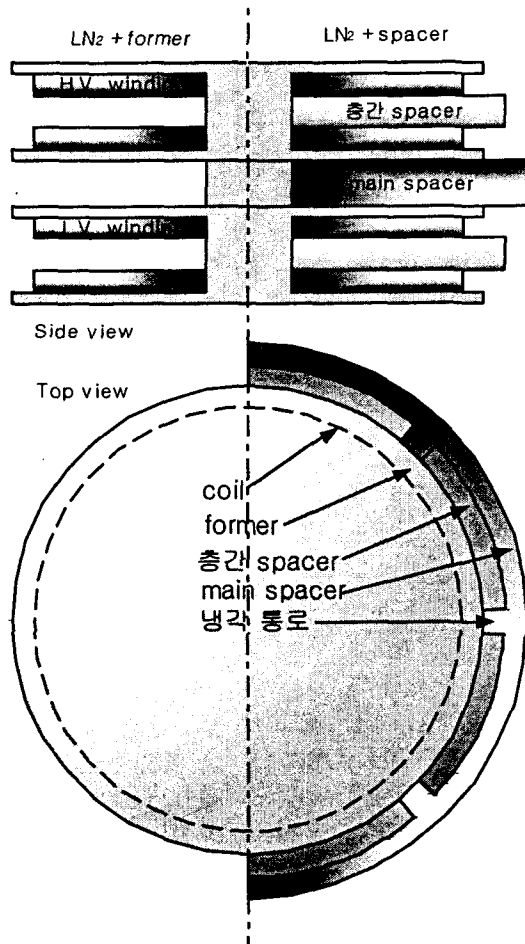


그림 3. 층간 절연 개략도.

Fig 3. Schematic diagram of section-to-section insulation.

3. 실험장치 및 방법

실험장치는 크게 cryostat, 관측부, 전원과 샘플로 구성된다. cryostat는 pyrex 유리로 된 관측창이 있으며, FRP를 이용하여 높이 1650mm, 내경 300mm과 외경 430mm로 제작하였다. cryostat 내부에 샘플을 부착할 수 있는 플랜지를 FRP를 이용하여 제작하였으며, 외부의 열침입을 막기 위한 LN₂와 진공의 복합층으로 구성되어 있다. 전원은 BARU Dieltes(Type DTA E, 최대교류전압 100kV)를 사용하였다. 램프와 CCD 카메라를 이용하여 절연파괴현상을 관찰하였다. 절연특성실험을 위해 사용한 전극은 침, 구 및 HTS pancake coil 전극을 사용하였다. 침 전극은 선단 곡률 반경이 25 μ m이고 선단 각은 24° 인 stainless를 사용하였으며, 구 전극은 직경 8mm인 stainless 구를 사용하였다. 평판전극은 직경 60mm, 두께 1mm이고 표면은 0.1 μ m이하로 경면 처리하였다. HTS pancake coil 전극은 두께 0.3mm, 폭 3.5mm의 Bi-2223/Ag 테이프를 이용하여 FRP 지지대에 pancake coil형상으로 제작하였다. HTS pancake coil 전극의 내경은 30 mm, 외경은 60mm이다.

절연파괴실험은 각 전극을 이용하여 전극계를 구성한 후 플랜지에 부착하여 cryostat에 셋팅하고 LN₂를 넣어 충분히 안정된 후 절연실험을 행하였다. 절연파괴전압은 10회 측정하여 구하였다. 연면 방전 전압은 두께 0.1mm의 Al 전극을 FRP표면에 부착한 후 AC 전압을 1kV/sec로 인가하였다.

4. 실험결과 및 검토

그림 4에 턴간 절연을 고려하여 턴간 절연물로 사용이 유력한 캡톤 필름의 AC 절연파괴강도를 나타낸다. 캡톤 필름의 평균 두께 0.125mm인 것을 사용하였다. 대기압, LN₂에서 최소 절연파괴강도는 약 129 kV/mm를 나타내었으며, 평균절연강도는 약 136kV/mm를 나타내었다. 압력에 따른 절연파괴강도는 압력이 증가할수록 절연파괴강도도 증가하였다. 이것은 캡톤 필름 주위에 있는 LN₂내의 미소기포가 압력에 의해 발생 및 확장이 억제되어 절연파괴에 기포의 영향이 줄어든 것으로 사료된다. 압력에 따른 캡톤 필름의 절연파괴강도를 그림 5에 나타낸다.

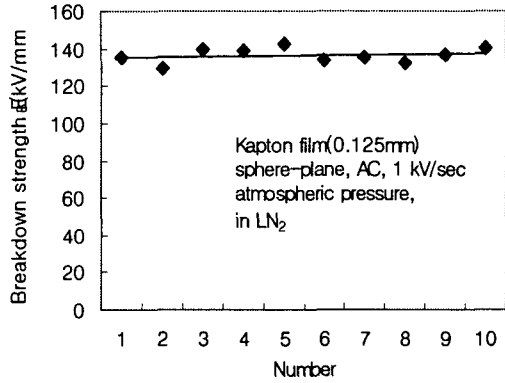


그림 4. 캡톤 필름의 AC 절연파괴 강도.
Fig. 4. The AC breakdown strength of Kapton film.

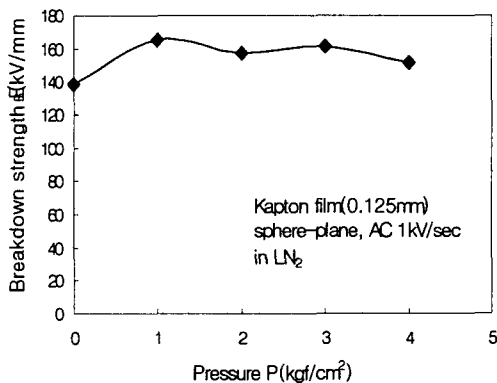


그림 5. 캡톤 필름의 절연파괴강도와 압력과의 관계.
Fig. 5. Relationship between breakdown strength of Kapton film and pressure

그림 6에서 pancake coil 전극에 대하여 침, 구, pancake coil과 평판 전극으로 전극계를 구성하여 AC 절연파괴전압을 나타낸다. pancake coil-평판 전극계에서 V_B 는 구-pancake coil과 침-pancake coil 전극계의 V_B 사이 존재하였으며 pancake coil-pancake coil 전극계의 V_B 는 pancake coil-평판 전극계의 V_B 보다 조금 낮게 나타났다. pancake coil-pancake coil 전극계의 n는 0.5365이고 V_B 는 식 (1)과 같다.

$$V_B = 21.224d^{0.5365} \quad (1)$$

그림 7에 pancake coil 대 pancake coil 전극계에서 전극배치에 따른 V_B 를 나타낸다. 전극을 수평으로 배치하였을 때 수직으로 배치하였을 때보다 V_B 가 낮게 나타났으며, 이것은 전극을 침적할 때와 절연파괴가 일어났을 때 발생한 기포가 수직 전극배치인 경우 부력에 의해 전극계에서 외부로 배출되지만 수평 전극배치일 경우 전극표면에 기포가 전극표면에 잔류하여 LN_2 의 절연내력을 약화시킨 것으로 사료된다. 그림 8에 spacer 두께와 길이에 따른 연면방전 전압을 나타낸다. 연면방전 전압은 spacer 길이가 증가함에 따라 증가하다가 포화하는 경향을 나타내고 있다. spacer 두께가 증가하

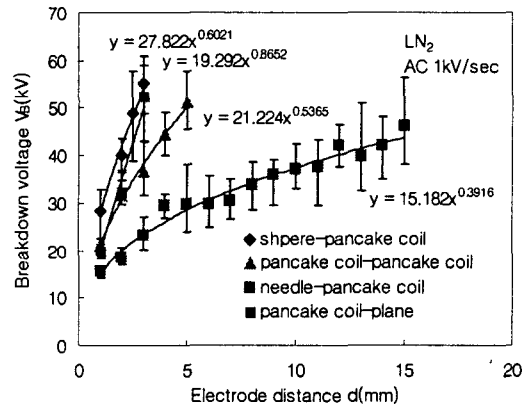


그림 6. 액체질소의 절연파괴 특성.
Fig. 6. Breakdown characteristics of LN₂.

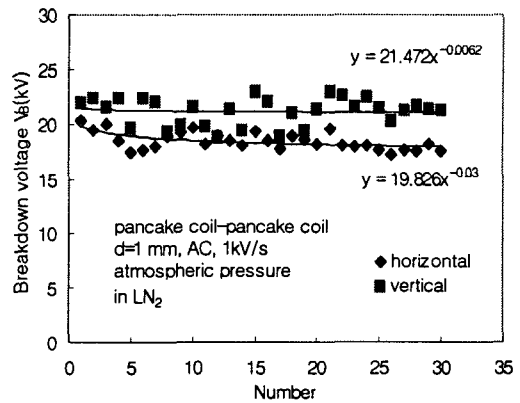


그림 7. 전극배치에 따른 Conditioning 효과.
Fig. 7. Conditioning effect as function of different electrode arrangement.

면 연면방전 전압이 크게 높아짐을 알 수 있다. 따라서 DPC형 고온초전도 변압기의 절연설계 목표 전압에 따라 spacer의 길이와 두께가 적절히 고려되어야 될 것으로 사료된다.

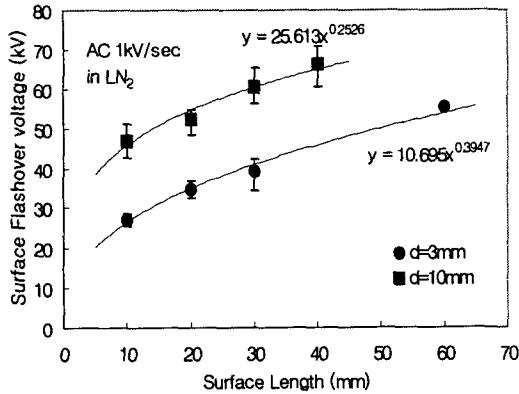


그림 8. spacer 두께와 길이에 따른 절연파괴전압.
Fig. 8. The relation between surface flashover voltage and spacer thickness and length.

5. 결 론

본 연구에서는 double pancake coil(DPC)형 고온초전도 변압기 전기적 절연설계에 필요한 절연구성을 명확화 하였으며, 절연구성에 따른 절연특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

턴간 절연물로 유력한 캡톤 필름의 평균절연강도는 약 136kV/mm를 나타내었으며 압력에 따른 절연파괴강도는 압력이 증가한 후 일정한 절연파괴강도를 나타내었다. pancake coil 대 pancake coil 전극에서 LN₂의 절연파괴전압은 구 대 pancake과 침 대 pancake coil전극 사이의 값을 나타내었으며, 일정하게 증가하다가 포화되는 경향을 나타내었다. spacer용 FRP의 연면방전 전압은 길이보다 두께에 크게 의존하였으며 절연설계 목표전압에 따라 길이와 두께를 적절히 고려되어야 할 것이다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] W.G. Garlick, Power System Applications of High Temperature Superconductors, Cryogenics, Vol. 37, pp. 649-652, 1997.
- [2] Jan K. Sykulski, F. Goddard and Richard L. Stoll, "High Temperature Superconducting Demonstrator Transformer: Design Considerations and First Test Results," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 35, NO. 5 pp. 3559-3561, SEPTEMBER 1999.
- [3] 백 승명, 김 영석, 정순용, 김상현, "고온 초전도 케이블용 Bi-2223 선재의 기계적 특성," 한국전기전자재료학회 Vol. 11, No. 11, pp. 1028-1034, 1998.
- [4] 김 상현, 김 정호, 윤 문수, 권 영한, "액체 질소의 절연특성에 미치는 전극효과에 관한 연구," 한국전기전자재료학회지 Vol. 4, pp.114-122, 1991.
- [5] J. Gerhold, "Cryogenic Liquids-Aprospective Insulation Basis for Future Power Equipment," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 1, pp. 68-75, February 2002.
- [6] H.Okubo, M.Hikita, H.Goshima, H.Sakakibari, N.Hayakawa, "High Voltage Insulation Performance of Cryogenic Liquids for Superconducting Power Apparatus", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1400-1406, July, 1996.
- [7] L. E. Feather and P. Voytik, "Application of Polyamide paper in Liquid-Cooled Transformers," Proceedings of the IEEE 10th Electrical Insulation Conference, pp. 24-27, 1971.
- [8] B. Y. Seok, N. Tamuro and M. Hara, A Study of Thermal Bubble Behavior in the Simulated Electrode System of High Temperature Superconducting Coils, IEEE Trans. on DEI, Vol. 6, No. 3, pp. 109-116, 1999.