

Double Pancake Coil형 고온초전도 변압기의 전기적 절연 설계를 위한 절연파괴 특성

Breakdown Properties for Electrical Insulation Design of Double Pancake Coil Type HTS Transformer

백승명*, 정종만, 김상현*

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

Abstract

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. However, in order to realize the HTS transformer, it is necessary to establish the high voltage insulation technique in cryogenic temperature.

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. And we investigated AC breakdown properties of LN₂ and complex conition of cryogenic gaseous nitrogen(CGN₂) above a LN₂ surface. Also, the surface voltage of GFRP was measured as a function of thickness and electrode distance in LN₂ and complex condition of CGN₂ above a LN₂ surface. This résearch presented information of electrical insulation design for double pancake coil type HTS transformer.

Key Words : breakdown, 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 더욱 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 초

전도성을 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 연구자들에 의해 고온초전도 기기의 전기절연설계 및 운용상 안정성을 확보하기 위해 LN₂의 전기적 특성연구가 활발히 이루어지고 있다[4,5]. 하지만, LN₂의 특성 연구는 극히 제한적인 조건에서 이루어져 왔으며, 복합 절연계에서 절연특성에 대한 연구가 미비하여 다양한 초전도 기기의 설계에 충분한 정보를 제공하지 못하고 있다. 그리고 고온초전도 변압기나, 한류기 등 코일형 기기의 절연연구는 대부분 solenoid 형태에서 연구[6]가 이루어져 왔기 때문에 pancake coil형으로 응용이 기대되는 고온초전도 변압기, 한류기 등의 전기절연설계를 위한 LN₂ 절연파괴특성 연구는 전무한 상태이다.

* : 경상대학교 전기공학과(공학연구원 자동화 컴퓨터 연구센터)

(진주시 가좌동 900,

Fax: 055-751-5345

E-mail : trebari@hanmail.net)

따라서, 본 연구에서는 전기절연설계와 운전시 안정성확보를 위하여 double pancake coil형 변압기에서 필요한 절연구성을 명확화 하였으며, double pancake 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 연구에서

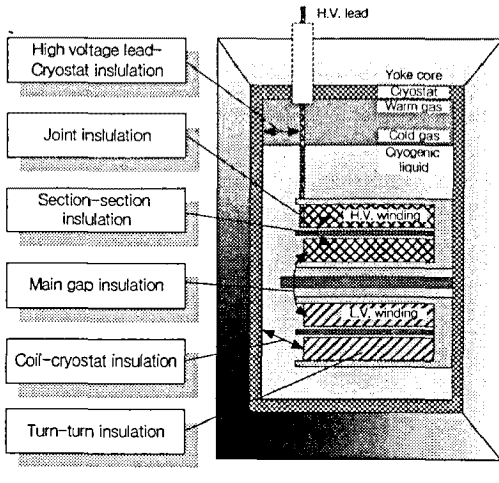


그림 1. DPC형 고온초전도 변압기의 절연구성.
Fig. 1. Composite insulation of DCP type HTS transformer.

다양한 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

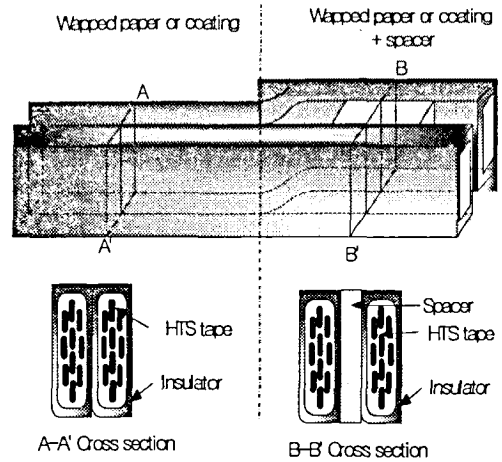


그림 2. 턴간 절연 개략도.

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 것이다. 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.

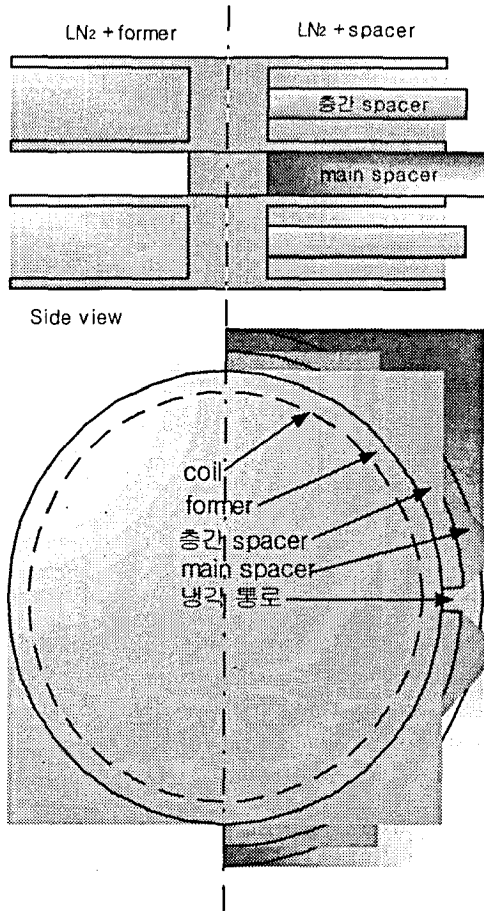


그림 3. 층간 절연 개략도.
Fig 3. Schematic diagram of section-to-section insulation.

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.

절연파괴 실험은 각 전극을 이용하여 전극계를 구성한 후 플랜지에 부착하여 cryostat에 셋팅하였다. 튜어에 LN₂를 넣은 후 절연실험을 행하였다. 절연파괴 전압은 10회 측정하여 구하였다. 연면방전 전압은 두께 0.11 mm의 Al 전극을 FRP표면에 부착한 후 AC 전압을 1kV/sec로 인가하였다.

4. 실험결과 및 검토

먼저, 준평등, 불평등 전계하에서 액체질소의 절연파괴 특성을 고찰하였다. 그림 4에서 pancake coil 전극에 대하여 침, 구, pancake coil과 평판 전극으로 구성된 전극계에서 AC 절연파괴전압을 나타낸다. pancake coil-평판 전극계에서 V_B는 구-pancake coil과 침-pancake coil 전극계의 V_B 사이에 존재하였으며 pancake coil-pancake coil 전극계의 V_B는 pancake coil-평판 전극계의 V_B보다 낮게 나타났다. pancake coil-pancake coil 전극계의 n는 0.5365이고 V_B는 식 (1)과 같다.

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

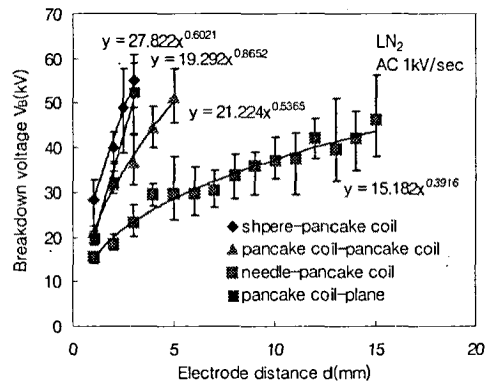


그림 4. 액체질소의 절연파괴 특성.
Fig. 4. Breakdown characteristics of LN₂.

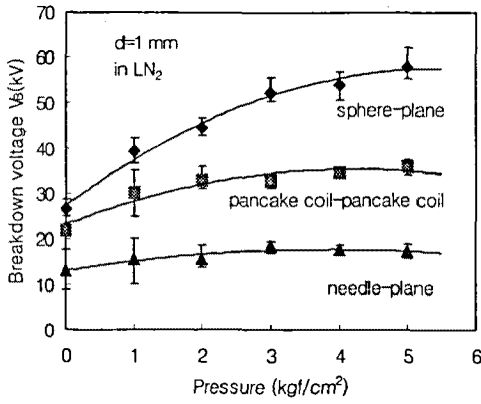


그림 5. 다양한 전극계에서 압력에 따른 절연과파전압.

Fig. 5. Breakdown voltage as function of pressure under various electrode system.

그림 5에 전극간격 $d=1$ mm일 때 침-평판, 구-평판 전극계 및 pancake coil-pancake coil 전극계에서 외부 압력변화에 따른 V_B 를 나타낸다. 침 대 평판 전극계에서 액체의 압력을 높이면 V_B 는 증가하지만 증가폭이 매우 적음을 알 수 있다. 하지만 구-평판 전극계에서는 전극계 외부압력이 증가할수록 V_B 는 압력 증가에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이것은 고 전계의 인가에 따른 영향과 압력의 증가에 따른 영향으로 나눌 수 있다. LN₂에 고 전계가 인가되면 LN₂ 중에 존재하는 미소 기포에 Maxwell stress가 작용하여 기포의 팽창을 방해하고[7], LN₂에 압력을 가하면 LN₂ 중의 미세 기포의 반경은 압력이 증가함에 따라 식(3)과 같이 작아지고 수명은 식(4)과 같이 따라 단축된다[8]. 따라서 압력이 높아짐에 따라 절연내력이 낮은 LN₂ 중의 미소 기포 크기와 수가 줄어들게 되고 액체의 절연내력은 높아지게 된다.

$$R_m = k \left(\frac{W_i}{P_\infty} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\Delta t = 1.83 R_m \left(\frac{\rho_\infty}{P_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서, R_m 은 최대 기포 반경, k 는 비례정수, W_i 는 액체 내에 분사된 에너지이고 P_∞ 는 정수압이다. Δt 는 수명이고 ρ_∞ 는 액체질소밀도이다.

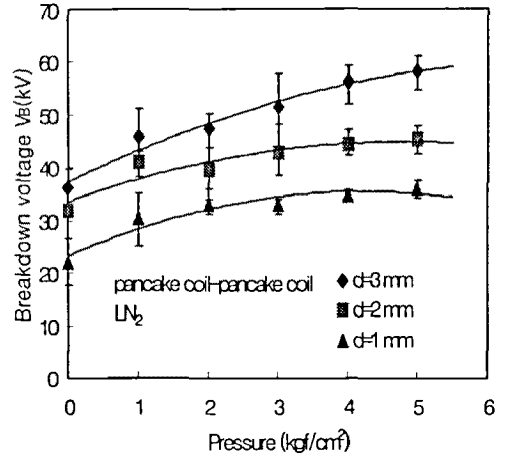


그림 6. pancake coil 대 pancake coil 전극계에서 압력에 따른 절연과파전압.

Fig. 6. Breakdown voltage as function of pressure under pancake coil to pancake coil electrode system.

그림 6에 pancake coil-pancake coil 전극계에서 압력 증가에 따른 V_B 를 나타낸다. pancake coil 대 pancake coil 전극계에서 압력 증가에 따른 V_B 는 다른 전극계와 같이 증가하였으며 증가폭은 침 대 평판 전극계보다 높고 구 대 평판 전극계보다 낮은 값을 나타내었다.

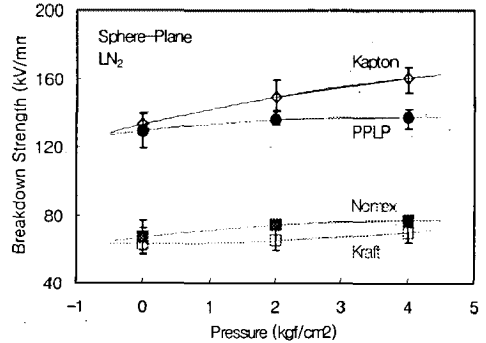


그림 7. 절연 sheet의 압력에 따른 절연과파전압.

Fig. 7. Relationship between breakdown strength of insulating sheets and pressure.

그림 7에 텀간 절연을 고려하여 텀간 절연물로 사용이 유력한 절연물인 Kapton, PPLP, Nomex와 Kraft의 AC 절연과파강도를 나타낸다. 압력에 따른 절연과파강도는 압력이 증가할수록 절연과파강도도 증가하였다. 이것은 캡톤 필름 주위에 있는

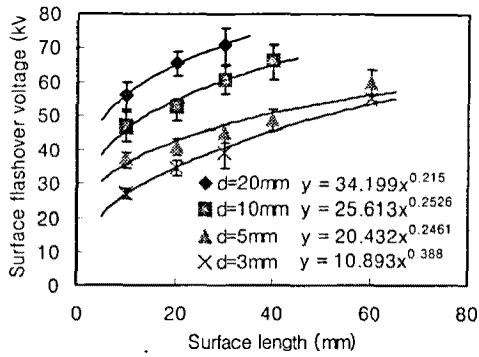


그림 8. spacer 두께와 길이에 따른 절연파괴전압.
Fig. 8. The relation between surface flashover voltage and spacer thickness and length.

LN₂내의 미소기포가 압력에 의해 발생 및 확장이 억제되어 절연파괴에 기포의 영향이 줄어든 것으로 사료된다. 77 K, 0 kgf/cm² (1atm)에서 각 절연물의 최소, 최대 절연파괴강도는 다음과 같다.

- 1) PPLP: 119 - 139 kV/mm
- 2) Kraft: 59.3 - 72.7 kV/mm
- 3) Kapton: 127 - 140 kV/mm
- 4) Nomex: 57.1 - 77.1 kV/mm

PPLP와 Kapton film이 우수한 절연파괴 특성을 나타내었다.

그림 8에 spacer 두께와 길이에 따른 연면방전 전압을 나타낸다. 연면방전 전압은 spacer 길이가 증가함에 따라 증가하다가 포화하는 경향을 나타내고 있다. spacer 두께가 증가하면 연면방전 전압이 크게 높아짐을 알 수 있다. 절연파괴전압은 spacer의 길이보다 두께에 크게 의존하는 경향을 나타낼 수 있다. 따라서 DPC형 고온초전도 변압기의 절연설계 목표전압에 따라 spacer의 길이와 두께가 적절히 고려되어야 될 것으로 사료된다.

IITS 기기의 고전압 리드부는 극저온 액체와 기체가 같이 존재한다. 따라서 액체와 기체의 복합계에서 절연파괴 고찰이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 LN₂와 GN₂가 공존하는 경우와 리드부의 절연물(GFRP)이 부분 침적되었을 경우를 고려하였다. 그림 9에 LN₂의 수위에 따른 절연파괴전압을 나타낸다. LN₂ 수위가 70 %에서 50 %사이에서 급격하게 감소하고 50 %에서 0%사이에서는 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 10에 LN₂ 수위에 따른 연면방전 전압을 나타낸다. LN₂ 수위가 상승함에 따라 거의 일정하게 상승하는 경향이나 나타나지만 공기나 CGN₂의 연면방전 전압에 비교하였을 때 크게 향상되지는 않았다. 그림 9와 그림 10에서 보듯이 CGN₂의 절연내력은 LN₂의 절연내력보다는 낮기 때문에 기기의 안정성 확보를 위하

여 절연설계에 이 부분이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

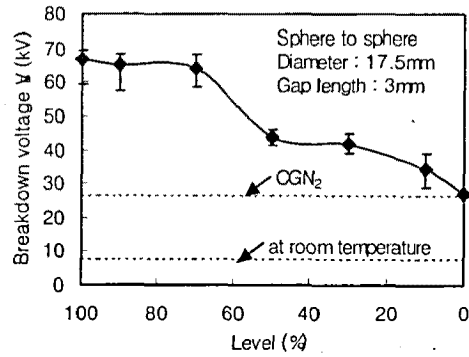


그림 9. 구-구 전극계를 이용한 LN₂와 CGN₂의 복합계에서 LN₂의 수위에 따른 절연파괴전압.

Fig. 9. V_B of complex condition of CGN₂ above a LN₂ as function of LN₂ level with sphere to sphere electrodes.

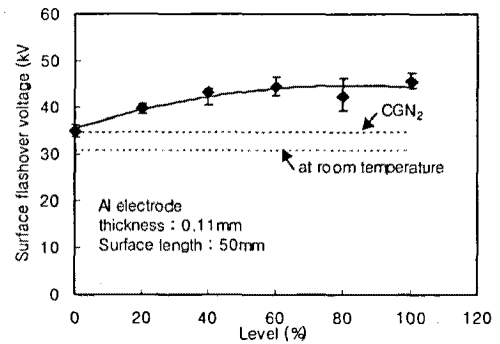


그림 10. Al-Al 전극계를 이용한 LN₂와 CGN₂의 복합계에서 LN₂의 수위에 따른 GFRP의 연면방전 전압.

Fig. 10. Surface flashover voltage of GFRP under complex condition of CGN₂ above a LN₂ surface as a function of LN₂ level with Al sheet to Al sheet electrodes.

5. 결론

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

냉매로 사용되는 LN₂의 절연파괴특성을 고찰하였으며, 압력에 따라 절연파괴 전압은 증가하지만 구-평판이 증가폭이 가장 크게 나타났으며 pancake coil-pancake coil 전극계는 구-평판과 침-평판 사이의 증가폭을 나타내었다. 단간 절연물로

유리한 절연 sheet의 절연파괴강도를 구하였다. Kapton과 PPLP가 높은 절연파괴강도를 나타내었다. spacer용 GFRP의 연면방전 전압은 길이보다 두께에 크게 의존하였으며 절연설계 목표전압에 따라 길이와 두께를 적절히 고려되어야 할 것이다. 액체와 기체의 복합환경에서 절연파괴 전압은 액체만 존재는 경우 보다 크게 감소하였다. 따라서 리드부의 절연설계시 반드시 고려되어야 할 것으로 사료된다.

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 9, No. 1, pp. 17-22, February 2002.

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 경호, 윤 문수, 권 영환, "액체 절연소의 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] 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.
- [7] Y. Suda, M. Itoh, Y. Sakai, K. Matsuura, N. Honma and T. Kimura, "Behaviour of liquid nitrogen between electrodes in a microgravity environment", Cryogenics 36, pp. 567-571, 1996.
- [8] A. Denat, F. Jomni, F. Aitken and N. Bonifaci "Thermally and Electrically Induced Bubbles in Liquid Argon and Nitrogen",