

# DC 리액터형 고온초전도한류기용 고온초전도자석의 권선 및 전류리드의 절연

양성은, 배덕권, 전우용, 김영식, 김상현\*, 고태국  
연세대학교 전기전자공학과, 경상대학교 전기공학과\*

## Insulation of Winding and Current Lead of the High- $T_c$ Superconducting Magnets for DC Reactor Type SFCL

Seong Eun Yang, Duck Kweon Bae, Woo Yong Jeon, Young Sik Kim,  
Sang-Hyun Kim, and Tae Kuk Ko  
Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University  
Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University

castleun@yonsei.ac.kr

**Abstract** - Following the successful development of practical high temperature superconducting (HTS) wires, there has been renewed activity in the development of superconducting power equipments. HTS equipments must be operated in the coolant, such as liquid nitrogen ( $LN_2$ ) or cooled by cooler, such as GM-cryocooler to maintain the temperature below critical temperature. In this paper, dielectric strength of some insulating materials, such as epoxy, teflon, and glass fiber reinforced plastic (GFRP) in  $LN_2$  was measured. Surface breakdown voltage of GFRP, which is basic property in design of HTS solenoid coil was measured. Epoxy is a good insulating material but it is fragile at cryogenic temperature. The multi-layer insulating method of current lead is suggested to compensate this fragile property. It consists of teflon tape layer and epoxy layer fixed with texture. Based on these measurements, the 6.6kV class HTS magnet for DC reactor type high- $T_c$  superconducting fault current limiter (SFCL) was successfully fabricated and tested.

### 1. 서 론

이미 상용화되어 사용되고 있는 초전도 MRI, NMR 등은 저온초전도 자석을 사용하여 고자장 및 고균등 자장을 구현한다. 성공적으로 상용화되어 판매되고 있는 Bi-2223 고온초전도선재의 등장으로 현재까지 진행되어온 고온초전도 자석의 개발이 가속화되어 활발히 진행중이다 [1]. 대한민국의 21세기 프론티어 사업에서 개발하고

있는 고온초전도 기기의 핵심은 전력기기로써 이들 기기의 성공적 개발을 위해서는 극저온 절연 시스템에 대한 개발이 병행되어 이루어져야 한다 [2]. 상온에서의 절연시스템에 대한 국내업체들의 정보 및 설계 제작기술은 상당히 발전되어 있으나 극저온 절연 재료에 대한 연구는 아직 미약한 형편이므로 이에 대한 연구들이 활발히 진행되어 고온초전도전력기기의 성공적 개발을 앞당길 수 있을 것이다.

본 논문은 고온초전도 전력기기 중 DC 리액터형 고온초전도한류기용 자석을 위한 절연시스템에 대한 연구이다. 고전압용 자석을 위한 권선 구조에 대한 설계와 전압분포 시뮬레이션 및 연면파괴전압을 측정하였고, 극저온 속의 전류리드에 대한 절연을 위하여 테프론 테이프 및 섬유질로 고정시킨 에폭시의 절연내력을 측정하였다. 이들 자료를 바탕으로 6.6 kV급 한류기용 HTS 자석을 성공적으로 설계, 제작하여 시험하였다.

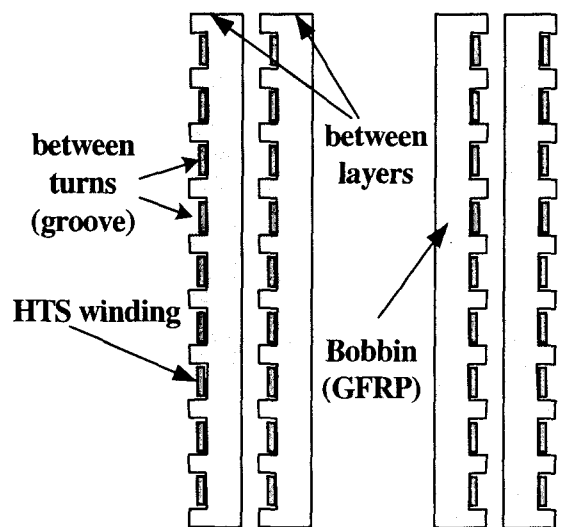


Fig 1. Cross-sectional view of HTS solenoid coil wound on GFRP bobbins

Table 1 Design result of HTS magnet

Item	Spec.
Number of bobbins (number of layers)	5 ea
Number of turns	415 turns
Number of stacks of HTS wire	4 ea
Voltage between turns	about 20 V
Voltage between layers	about 1.8 kV
Material of bobbin	GFRP
Depth of groove	5 mm
Width of wall	1.85 mm
Thickness of bobbin	12 mm

## 2. 한류기용 HTS 자석의 절연

DC 리액터형 한류기의 HTS 자석에는 전력 변환기를 통한 직류전압이 정상시에 인가되는데 정상시에는 매우 작은 전압이 자석 양단에 인가되나 계통에 고장이 발생할 경우, 부하가 지락 또는 단락되어 계통에 임피던스가 사라지므로 이 시간동안 계통의 전압이 HTS 자석 양단에 걸리게 된다 [3]. 다시 말해, 계통의 고장발생 시점에서 차단기가 동작하기까지의 약 100ms 정도의 시간동안 DC 리액터인 HTS 자석 양단에 고전압이 인가된다. 계통에서 부하가 사라질 경우 HTS 자석 양단에 걸리는 전압은 식 (1)과 같다 [4].

$$v = \frac{\pi}{3} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (1)$$

여기서,  $V_{m,L-L}$ 은 선간전압의 최대치를 나타낸다. 따라서 식 (1)에 의한 전압을 견딜 수 있도록 HTS 자석을 설계, 제작하여야 한다. 본 연구의 대상인 DC 리액터형 한류기는 3상 6.6 kV급으로 제작되었으므로 고장 시 약 9 kV의 전압이 HTS 자석 양단에 인가될 것이다.

## 3. 솔레노이드 권선의 절연

### 3.1 권선구조의 설계 및 시뮬레이션

그림 1은 동심인 다중 GFRP 보빈을 직렬로 연결한 고온초전도 솔레노이드 코일의 단면을 나타낸다. HTS 자석의 전송전류를 키우기 위해서는 여러개의 고온초전도선재를 쌓아서 병렬로 연결하는 구조이어야 한다. 본 한류기용 자석 개발에서는 4개의 선재를 쌓아서 권선하였다. 고온초전도선재는 테이프의 형상이므로 여러 층으로 쌓아서 권선하기가 용이하지 않으므로 보빈에 홈 가공을 하는 것이 필요하다. 특히 성능이 좋은

절연체를 보빈으로 사용하여 홈가공을 할 경우 테이프 형상인 고온초전도선재의 끝부분의 전계 집중으로 생성되는 질소기포의 절연파괴로 야기될 수 있는 권선 내부의 절연파괴의 가능성을 줄일 수 있다. 절연성능이 좋고 열수축율이 작은 GFRP를 보빈의 재료로 사용하여 이러한 조건을 충족시켰다. 또한 고장전류제한에 필요한 인덕턴스를 구현하기 위하여 동심상의 5개의 보빈을 직렬로 연결하여 HTS 자석을 제작하기로 하였다. 표 1은 설계한 자석의 제원을 나타낸다.

그림 2는 자석 절연설계의 기본 자료로 사용된 정자계해석과 연면 절연파괴 실험을 위한 해석 모델을 나타낸다. 5 mm 깊이의 홈을 GFRP에 가공하였으므로 권선의 두께를 제외한 홈과 홈 사이 벽의 높이  $d$ 는 약 3 mm가 될 것이다. 가공상의 실수 등으로 홈 사이의 벽이 사라졌을 경우를 대비하여  $d$ 가 3 mm인 경우와 -0.5 mm인 경우에 대한 정자계분포를 해석하였다. 해석기법으로는 유한요소법을 사용하였다. 그림 3에서 정자계해석 결과를 나타내었다. 인가전압은 설계전압의 125%인 25 V였다. 각 경우에 대한 최대집중전계를 계산해 본 결과 3 mm의 벽이 있을 경우 70.94 V/mm였고 -0.5 mm의 벽이 있을 경우에는 71.82 V/mm였다. 이 값을 인가전압으로 환산하면 최대 집중전계는 인가전압의 약 2.86배가 된다.

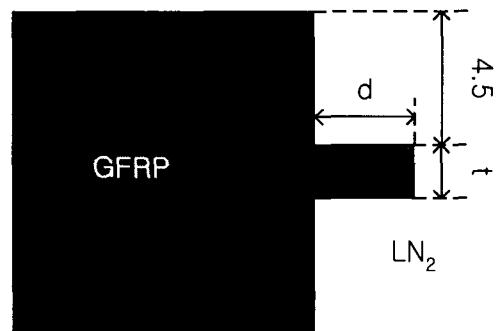


Fig. 2 Model for electrostatic analysis and surface breakdown test

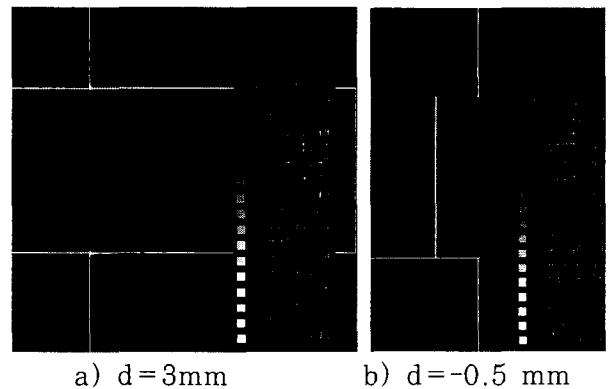


Fig. 3 Distribution of electric field according to the length of GFRP guide wall

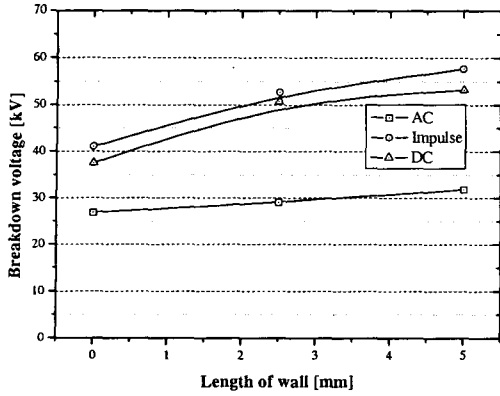


Fig. 4 Surface breakdown voltage of GFRP medeled for HTS solenoid coil

### 3.2 모델전극계를 통한 솔레노이드 권선의 연면파괴전압 측정

그림 4는 HTS 솔레노이드 코일을 모델링한 전극계에서 수행한 연면 절연파괴 실험결과를 나타낸다. 벽의 두께  $t$ 는 2 mm였고 벽의 높이  $d$ 는 0, 2.5, 5 mm로 변화시켰다. 교류, 직류 및 충격전압을 인가하여 그 결과를 측정하였다. 모든 측정은 액체질소속에서 행하였으며, 그림에 표시된 파괴값은 모두 10회 측정의 평균값이다. 권선사이에 GFRP 벽이 없을 경우에도 25 kV 이후에서 절연파괴가 일어남을 알 수 있다. 설계 전압은 20 V 이므로 권선을 위한 추가적인 절연은 필요하지 않을 것이다. 단 고장전류에 의한 전자기력이 초전도코일을 손상시킬 수 있어 [5], 이에 대한 대비책으로 고온초전도선재를 고정시킬 필요가 있을 수 있으나 본 연구에서는 권선의 전기적인 면만 고려하였다. 권선 사이의 벽이 길어짐에 따라 교류 직류 및 충격파전압의 절연내력이 비례하여 증가함을 알 수 있다. 벽의 길이가 길어짐에 따라 충격파전압 및 직류전압의 절연내력은 약간 포화하는 경향을 나타내나 교류전압의 절연내력은 선형적으로 증가하는 경향을 나타낸다.

## 4. 전류리드의 절연

### 4.1 전류리드용 절연체의 절연내력 측정

본 연구에서 고려하는 HTS 자석은 액체질소를 냉매로 사용하고 전류리드는 기화된 질소 속에 있게된다. 일반적으로 기체의 절연내력은 액체의 절연내력보다 약하고 압력에 따라 절연특성이 변하므로 절연설계에 많은 주의가 필요하다.

본 연구에서는 전류리드의 주 절연재료로 Stycast® 2850FT Blue와 경화제 Catalyst 9를 선택하였다. Stycast® 2850FT Blue는 알루미늄이 충전되어 있는 에폭시로서 극저온용 고압 절연재료 응용에 좋은 특성을 나타낸다 [6]. Catalyst 9는 Stycast® 2850FT Blue와 함께

사용되는 범용의 경화제이다.

선택한 에폭시의 절연특성을 조사하기 위하여 지름 4 mm의 스테인레스 구를 에폭시 속에 삽입하여 시편을 제작하였다. 따라서 구대평판 전극계로 절연내력을 측정하였다. 측정 시 연면 파괴 방지와 온도유지를 위하여 제작한 시편을 액체질소 속에 넣어 77K을 유지한 상태로 절연내력을 측정하여 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 5회 측정을 평균한 절연내력은 69.71 kV/mm였다. 그림 6은 제작한 시편과 절연파괴된 시편의 표면을 나타내었다. 오른쪽에 나타난 절연파괴된 표면은 광학현미경을 사용하여 확대 촬영한 그림이다.

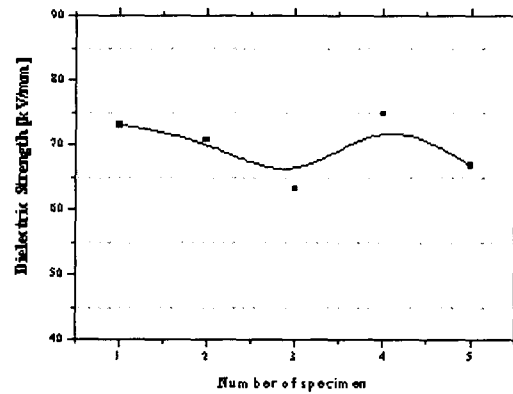
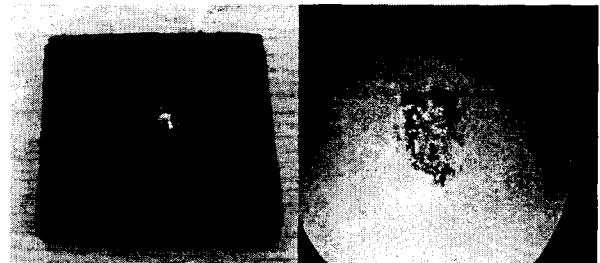


Fig. 5 Dielectric strength of epoxy



(a) specimen (b) surface

Fig. 6 Manufactured specimen and surface after breakdown

### 4.2 전류리드용 복합절연

에폭시는 좋은 절연체이지만 유리질이어서 충격에 약하고 급격한 온도변화에 취약한 단점을 가지고 있다 [6]. 이러한 약점을 보완하기 위하여 도체와 에폭시 사이에 테프론테이프 층을 두는 복합절연 방식을 제안하였다. 또한 에폭시에 섬유질을 넣어 기계적 특성을 강화시켰다. 섬유질을 넣음으로써 별도의 주형 없이도 에폭시층의 두께를 일정하기 유지할 수 있는 장점도 가지게 되었다. 이러한 구조에 대한 절연특성을 평가하기 위하여 테프론테이프, 강화에폭시, 테프론테이프+강화에폭시의 세가지 시편에 대하여 절연내력을 측정하였으며 이를 그림 7에 나타내었다.

## 5. 결 론

DC 리액터형 한류기용 고온초전도자석의 권선과 전류리드에 대한 절연특성을 평가하였다. 고온초전도 권선 사이의 연면파괴전압은 연면방전길이가 길어짐에 따라 교류절연내력과 직류 및 충격파전압 절연내력의 차이가 커졌으며 본 연구에서 제시한 방법에 따라 제작한 권선사이의 벽에 손상이 있을 경우에도 25 kV 이상의 절연내력을 가지는 것을 확인하였다. 전류리드의 절연을 위하여 테프론테이프와 강화에폭시의 다중절연구조를 제안하여 제작하여 시험하였다. 1.4 mm의 절연두께에서의 절연내력은 32.02 kV/mm였다.

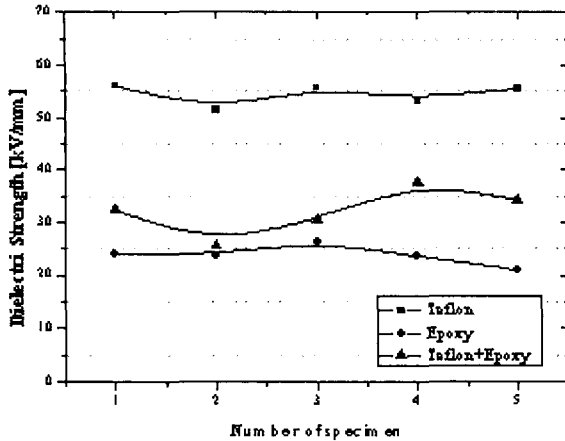


Fig. 7 Dielectric strength of each component and whole multi-insulation

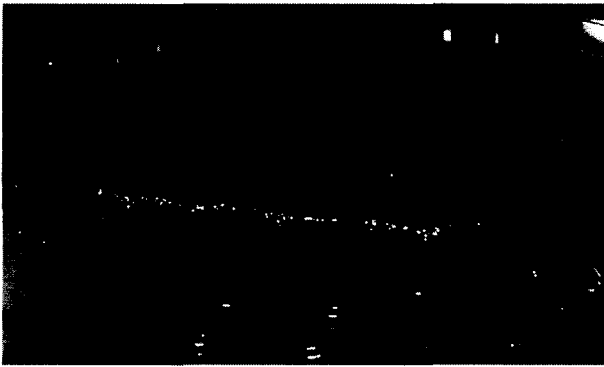


Fig 8. Insulated Current lead of 6.6 kV HTS magnet

50  $\mu\text{m}$  두께의 테프론테이프를 50% 겹침으로 4겹 감아서 테프론테이프층을 제작하였다. 이 층의 두께는 400  $\mu\text{m}$ 였다. 에폭시 층의 두께는 1 mm였고 테프론테이프 + 에폭시 층의 두께는 1.4 mm였다. 시편을 액체질소 속에 담근 상태에서 절연내력을 측정하였으며 각각 5회를 측정하였다. 테프론테이프의 절연내력은 54.36 kV/mm였으며 강화에폭시와 테프론테이프 + 강화에폭시의 절연내력은 각각 23.66 kV/mm와 32.02 kV/mm였다. 강화에폭시의 절연내력은 4.1에서 측정된 절연내력의 약 34% 밖에 되지 않는다. 이때의 두께는 약 600  $\mu\text{m}$ 였다. 이는 단일재료의 절연내력은 두께의 1/2승에 반비례한다는 보고 [7] 보다 작은 값이다. 측정된 절연내력은 이 규칙을 따를 경우 절연내력(약 49 kV/mm)의 약 49%였다. 복합재료를 제작함에 따른 절연내력의 감소 때문에 절연내력이 낮아졌을 것이다. 그림 8은 본 연구에서 제안한 방법으로 제작한 전류리드를 보여준다.

본 연구를 바탕으로 제작한 HTS 자석을 사용하여 6.6kV급 한류기 단락실험을 성공적으로 수행하였다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

### [참 고 문 헌]

- [1] Kalsi, and S.S., "Development status of superconducting rotating machines," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 401-403, 2002.
- [2] Available: <http://www.cast.re.kr>
- [3] Eung Ro Lee, Seungje Lee, et. al., "Test of DC reactor type fault current limiter using SMES magnet for optimal design," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12 No. 1, pp. 850-853, 2002
- [4] Daniel W. Hart, *Introduction to Power Electronics*, pp. 139, 1997
- [5] Duck Kweon Bae, Sang-Jin Lee, Joon Han Bae, K.D. Sim, Kyong Yop Park, and Tae Kuk Ko, "Electrical degradation of a high-Tc superconductor by continuous current transport," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 13 No. 2, pp. 2949-2952, 2003
- [6] I. Sauers, D.R. James, A.R. Ellis, and M. O. Pace, "High Voltage Studies of Dielectric Materials for HTS Power Equipment," IEEE Trans. on DEI, Vol. 9, No. 6, pp. 922-931, 2003
- [7] Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage Test and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies, ASTM D 149-97a