

6.6kV급 고온초전도 한류기용 HTS 코일의 절연 설계 및 시험

백승명, 정종만, 광동순, 류엔반동, 김상현
경상대학교 공과대학 전기공학과 및 공학연구원

Insulation Design and Testing of HTS coil for 6.6kV Class HTSFCL

Seung-Myeong Baek, Jong-Man Jeong, Dong-Soon Kwag, Van Dung Nguyen and Sang-Hyur Kim
Department of Electrical Engineering, Gyeongsang National University
and Engineering Research Institute

shkim@nongae.gsnu.ac.kr

Abstract The Electrical insulation design and testing of high temperature superconducting (HTS) coil for high temperature superconducting fault current limiter (HTSFCL) has been performed. Electrical insulating factors of HTS coil for HTSFCL are turn-to-turn, layer-to-layer. The electrical insulation of turn-to-turn depends on surface length, and the electrical insulation of layer-to-layer depends on surface length and breakdown strength of LN₂. Therefore, two basic characteristics of breakdown and flashover voltage were experimentally investigated to design electrical insulation for 6.6kV Class HTSFCL. We used Weibull distribution to get electric field strength for insulation design. And mini-model HTS coil for HTSFCL was designed by using Weibull distribution and was manufactured to investigate breakdown characteristics. The mini-model HTS coil had passed in AC and Impulse withstand test.

1. 서 론

고온초전도체의 발견 이후 전력에너지의 발생 및 저장뿐 아니라 변전 및 수송 등 전력계통 전 분야에 광범위하게 응용을 위한 연구가 활발히 이루어져왔다. 특히, 에너지 소비가 증대되면서 고온초전도체를 응용한 전력기기의 용량을 더욱 높이기 위해 대전류, 저전압에서 대전류 고전압으로 응용범위를 넓혀가고 있다. 또한 기존의 전력기기 뿐 아니라 고온초전도 기기의 모든 요소는 사고 전류로부터 발생하는 기계적, 열적 그리고 전기적 스트레스에 견뎌야하지만 전력의 증대와 전송의 네트워크 상태가 복잡해지면서 사고 전류가 더욱 증대하고 있어 정상상태에서는 전력 시스템에 영향을 미치지 않고, 정상상태에서 사고전류를 제한할 수 있는 한류기의 필요성이 증가되고 있다

[1,2]. 특히 고온초전도 한류기(이하 HTSFCL)는 액체헬륨(4.2K)에서 운전되는 저온초전도 한류기보다 냉각비용이 10배 이상 낮아 상업성을 목적으로 국내는 물론 미국, 일본 등의 국가에서 HTSFCL 개발에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다 [3-6]. DC 리액터형 고온초전도 한류기는 정상 상태에서 DC 전류가 흐르므로 교류 손실이 발생하지 않으며, 사고 시 상전도 상태로 전이 없이 사고전류를 제한할 수 있는 장점이 있다. 하지만 사고전류 제한 시 코일에 고전압이 발생되어 코일을 손상시킴으로 실용화를 위해서는 극저온 환경에서 코일의 절연 연구는 필수적이다 [7-11]. HTSFCL용 HTS 코일은 초전도 변압기와 같이 솔레노이드형과 팬케익형이 있으며 솔레노이드형 코일의 경우 턴 수로 전계를 분산시킬 수 있으며, 층간을 보빈으로 분리할 수 있지만 제작이 어렵고 부피가 커지는 단점이 있다. 더블 팬케익형 코일의 경우 접속부가 많이 발생하며 수직 자계의 영향을 많아 층간에 높은 전계가 걸리지만 기기를 컴팩트화 할 수 있는 장점이 있다[12,13].

본 연구에서는 액체질소(77K)를 냉매로 사용하는 HTSFCL 한류기용 DC 리액터 코일 형태 중 솔레노이드형 모의하여 코일의 절연구성 중에서 턴간 절연 특성에 대하여 검토하였다. AC와 Impulse 고전압을 인가하여 고체절연물의 두께, 길이가 연면방전에 미치는 영향을 고찰하였다. 위의 연구를 토대로 6.6kV급 HTSFCL용 HTS 코일의 절연 설계를 한여 AC (22kV, 1분)와 Impulse (60kV, 3회) 내전압 시험을 하였다. 실용적인 관점에서 본 연구의 결과는 DC 리액터형 HTSFCL을 개발하기 위한 절연설계에 기초 자료로 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2. 실험 구성 및 방법

2.1 HTS 코일 구조

솔레노이드형 HTS 코일의 절연 구성은 턴간, 층간, 그리고 코일과 외함의 대지 절연으로 구성

된다. 그림 1에 솔레노이드형 HTSFCL용 HTS 코일 형태를 나타낸다. 솔레노이드형에서 턴간 절연은 보빈의 홈에 고온초전도 선재를 감기 때문에 턴과 턴 사이의 보빈의 연면거리에 의존하며, 층간 절연은 보빈의 연면거리와 액체질소와 기포의 복합계로 구성이 된다.

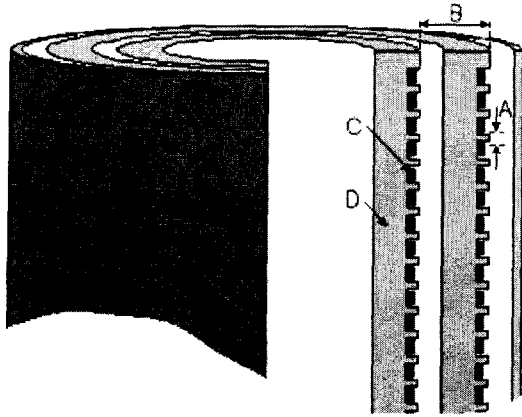


Fig. 1. A sketch of the HTS coil.
A : turn-to-turn, B : layer-to-layer,
C : HTS wire, D : GFRP bobbin.

2.2 전극계 구성

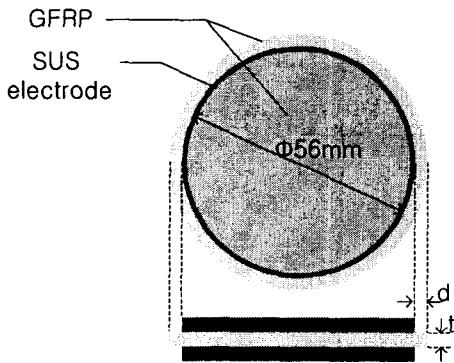


Fig. 2. Turn-to-turn electrode arrangement for solenoid type.

솔레노이드형의 턴간 절연구성은 액체질소 내에서 턴과 턴 사이의 보빈의 연면거리의 절연내력에 의존하므로 솔레노이드형의 턴간 절연 특성을 고찰하기 위하여 그림 2와 같이 턴간 절연구성에 따른 전극계를 구성하였다. 전극은 두께 0.2mm, 폭 5mm의 스테인레스 강(SUS 304)을 직경 56mm의 원형으로 제작하여 사용하였다. 턴간 절연물은 GFRP를 사용하였다. d는 GFRP의 연면거리(0~5mm)이고 t는 GFRP의 두께(1~5mm)를 나타낸다. 전체 연면 길이 $L=2d+t$ 가 된다. 본 연구에서는 턴간 절연 설계를 위해 연면 길이 d와 및 두께 t를 변화시키면서 연면방전 특

성을 조사하였다. 또한, 층간 절연설계를 위해 침-평판 전극을 사용하였다. 침 전극의 선단 각은 24°이고 선단 반경은 25 μ m이다. 평판 전극의 직경은 80mm이다. 침, 평판 전극의 재질은 SUS(304)이다.

2.3 실험 방법

그림 2에 나타난 전극계를 Cryostat에 설치한 후 Cryostat에 액체질소를 충전하고 충분히 열적 안정을 시킨 후 AC 및 Impulse 고전압 장치를 이용하여 고전압을 인가하여 연면방전 및 절연 파괴 전압을 측정하였다. AC 전압은 60Hz, 0~100kV 전원을 사용하였으며, 1kV/sec의 상승속도로 전압을 인가하여 연면방전 전압을 측정하였다. 층간 절연설계를 위하여 침-평판 전극계를 Cryostat에 설치한 후 위와 같은 방법으로 실험을 행하였다. 실험결과에는 평균값, 최소값과 최대값을 나타낸다. Impulse 전압은 최대 300kV, 1.2 \times 50 μ s 표준 Impulse 파형을 발생시키는 장치를 사용하였으며, 연면방전 및 절연 파괴 전압 값은 50% 파괴확률 전압으로 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

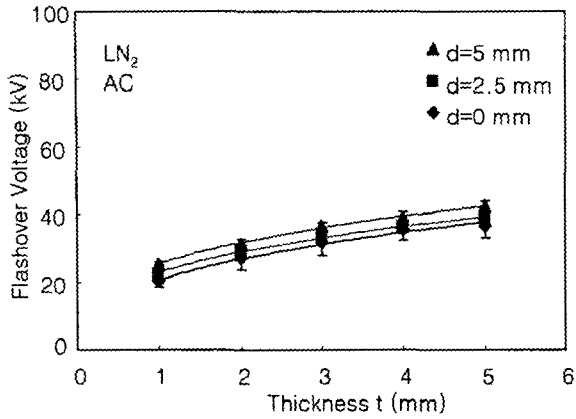
3.1 연면 및 액체질소의 절연 특성

그림 3에 액체질소에서 AC 고전압을 인가하고 GFRP 두께 t 및 길이 d의 연면방전 전압 의존성을 나타낸다. 그림에 나타난 점들은 평균치를 나타내고 최대값, 최소값은 error bar의 상한, 하한을 각각 표시한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두께 t가 증가함에 따라 연면방전 전압은 증가하면서 포화하는 경향을 나타내었다. 또한, 연면 길이 d의 증가에 따라 연면방전 전압은 직선적으로 상승하나 그 증가폭은 매우 작았다. 따라서 AC 연면방전 전압에 미치는 영향은 d보다 t가 더 큼을 알 수 있다. 그림 3에 나타난 결과를 이용하여 AC 전압의 경우 두께 t와 따른 연면방전 전압을 식(1)과 같이 일반식으로 나타내었다.

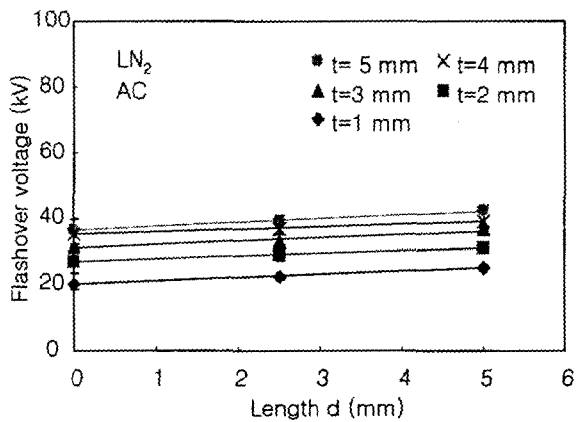
$$V_{AC} = kt^n (kV) \quad (1)$$

여기서 k는 정수이고 n은 음의 정수이다.

그림 4에 동일한 전극계에서 두께 t 및 길이 d의 Impulse 연면방전 전압 의존성을 나타낸다. Impulse 전압을 인가한 경우 AC와 마찬가지로 두께 t가 증가함에 따라 연면방전 전압은 증가하다가 포화하는 경향을 나타내지만 d=0mm인 경우 AC의 경우와 다르게 두께 t가 증가함에 따라 연면방전 전압이 급격히 상승한 후 포화하는 경향을 나타내었다. 또한, 연면길이 d를 0mm에서 2.5mm로 증가한 경우 연면방전 전압은 급격히 상승하는 경향을 나타내지만 2.5mm 이상으로 증가하는 경우 증가폭이 작게 나타났다. 따라서 Impulse 연면방전 전압의 경우 t뿐 아니라 d의 의존성도 큼을 알 수 있다.

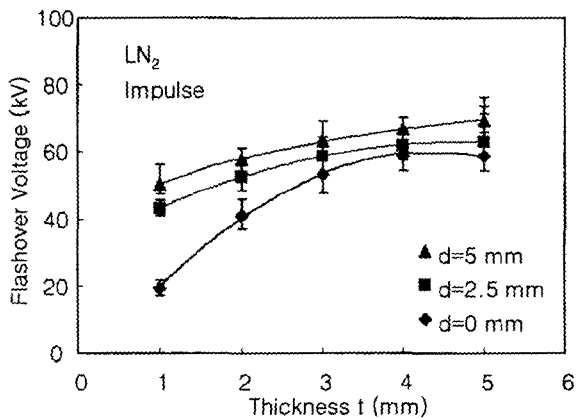


(a) Thickness dependence



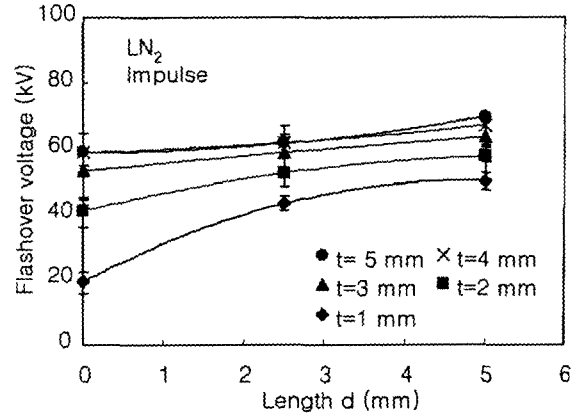
(b) Length dependence

Fig. 3. Flashover voltage on the AC for different thickness and length.



(a) Thickness dependence.

그림 5는 AC 및 Impulse 전압에서 전극간 간격이 절연파괴에 미치는 영향을 나타낸다. 그림 6에서 나타나듯이 절연파괴 전압은 AC와 Impulse



(b) Length dependence.

Fig. 4. Flashover voltage on the Impulse for different thickness and length.

전압을 인가한 경우 전극간 간격이 증가함에 따라 점점 포화하는 경향을 나타내지만 Impulse 전압을 인가한 경우 AC 전압을 인가한 경우보다 증가폭이 크게 나타났다. 그림에서 22kV와 60kV는 AC와 Impulse 내전압 시험 기준 전압을 각각 나타낸다.

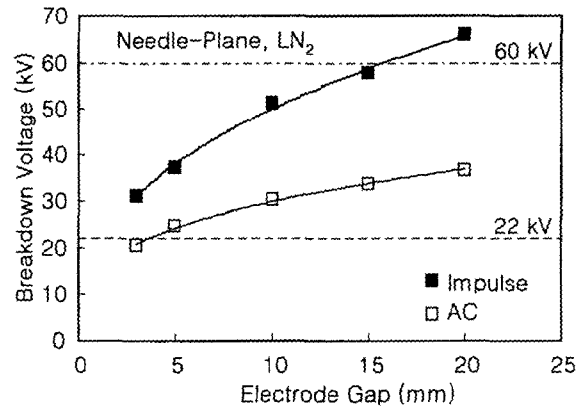


Fig. 5. Breakdown voltage on the AC and Impulse for different electrode gap.

3.2 절연 설계 전계

그림 6에 0.1 % 와이블 분포에서 구한 전체 연면길이에 따른 전계강도를 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 전체 연면길이에 전극간격이 증가함에 따라 전계강도는 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 턴간 절연설계를 위한 절연강도는 식 (2), (3)과 같으며, 층간 절연설계를 위한 전계강도는 식 (4), (5)와 같다.

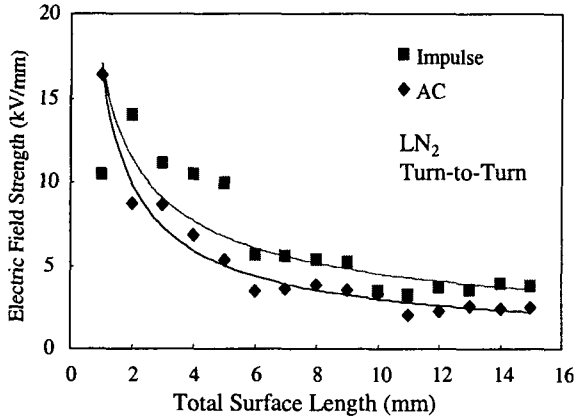
$$E_{sAC} = 16.65L_s^{-0.7474} \quad (2)$$

$$E_{sIMP} = 17.045L_s^{-0.5761} \quad (3)$$

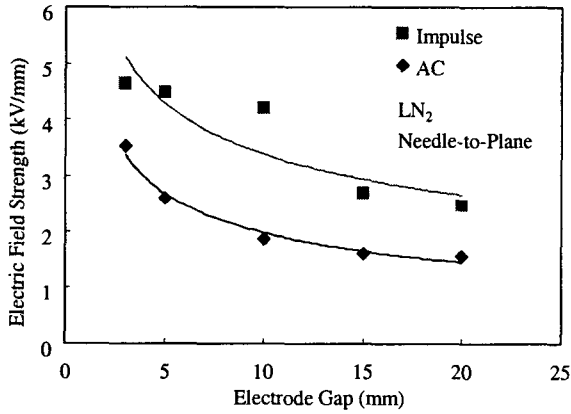
$$E_{gAC} = 5.4869L_g^{-0.4444} \quad (4)$$

$$E_{gIMP} = 7.447L_g^{-0.3428} \quad (5)$$

여기서, E_{sAC} 와 E_{sIMP} 는 전체 연면길이에 따른 AC와 Impulse 전계강도를 각각 나타내고, E_{gAC} 와 E_{gIMP} 는 전극거리에 따른 AC와 Impulse 전계강도를 각각 나타낸다.



(a) Total surface length dependence.



(b) Electrode gap dependence.

Fig. 6. Electric field strength as function of total surface length and electrode gap obtained by 0.1 % Weibull distribution.

4. 미니 모델 HTS 코일

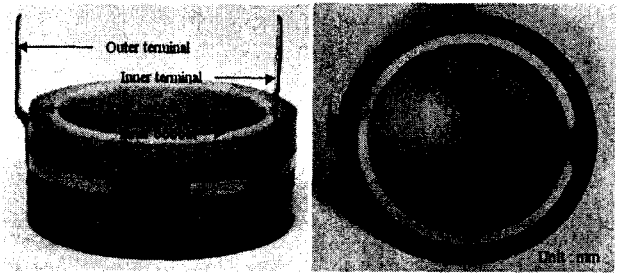
4.1 미니 모델 설계 및 제작

위의 설계값을 적용시키기 위해 두 개의 미니모델을 제작하여 평가하였다. 미니모델 I은 AC 전압 설계 값을 이용하였으며, 연면길이는 12.9mm이다. 미니모델 II는 연면거리가 29.3mm로 Impulse 전압 설계 값을 적용시킨 것이다. 표 2에 미니모델을 제작하기 위한 절연거리를 나타낸

다. 최종 제작한 미니모델 I의 연면길이는 13mm, 층간 간격은 3.5mm이고 미니 모델 II의 연면길이는 26mm, 층간 간격은 3.5mm이다.

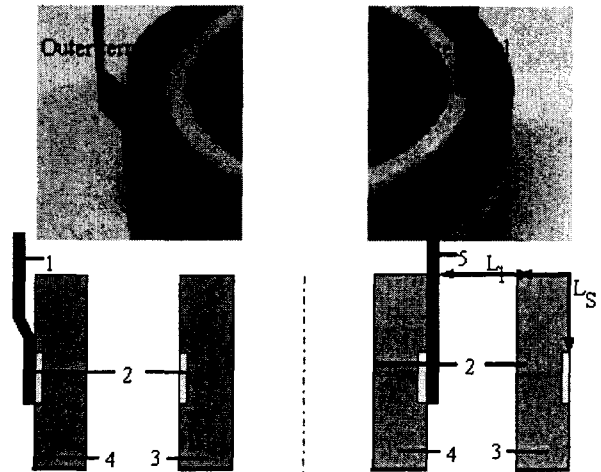
Table 2. Designed insulation length for manufacture of mini-model coils.

Insulation factor	Layer-to-Layer	
Number	2 layers	
Insulator	Surface length + LN ₂ gap	
Design Voltage	AC	Impulse
Target Voltage (kV)	22	60
Electric Field Strength (kV/mm)	8.5+2.7	10.2+2.5
Insulation Length (mm)	2.4+0.8	5.7+0.8
Margin	4.5	4.5
Final Insulation Length (mm)	9.4+3.5	26.8+3.5



(a) Structure

(b) Dimension



(c) Terminal shape

(1-Z shape terminal, 2-SUS tape, 3:Inner bobbin, 4-Outer bobbin, 5-I shape terminal)

Fig. 9. Mini-model coil.

그림 9에 내전압 시험에 사용한 미니모델의 보빈형상과 치수 및 단자형상을 나타낸다. 보빈은

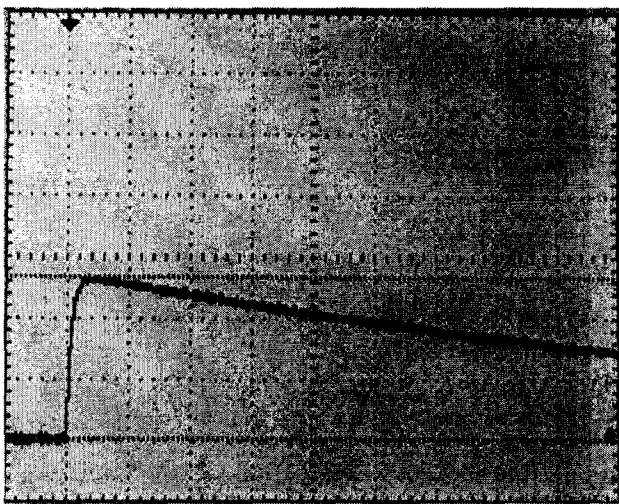
2층으로 구성되어 있으며, 외부 보빈의 외경과 내경은 각각 76mm, 71mm이며, 내부 보빈의 외경과 내경은 각각 64mm, 58mm이다. 그리고 보빈 간 간격은 3.5mm이다. 외부단자가 Z형이며, 내부단자가 I형으로 구성되어 있다.

표 3에 AC, Impulse 내전압시험 결과를 나타낸다. AC 전압으로 설계한 미니모델 I은 AC 22kV, 1분간 시험에 통과하였다. 하지만 60kV Impulse 전압에서는 처음 인가하였을 때 절연파괴가 발생하였다. Impulse 전압으로 설계한 미니모델 II는 AC 내전압 시험에서 절연파괴가 발생하지 않았고 60kV 표준 임펄스 전압을 3회 인가하여도 절연파괴 전압이 발생하지 않았다. 따라서 미니모델 I은 AC 내전압시험에는 통과하였으나 Impulse 내전압 시험에는 통과하지 못하였으며 미니모델 II는 AC, Impulse 내전압 시험에 모두 통과하였다. 미니모델 II는 Impulse 전압 75kV에서 절연파괴가 발생하였다.

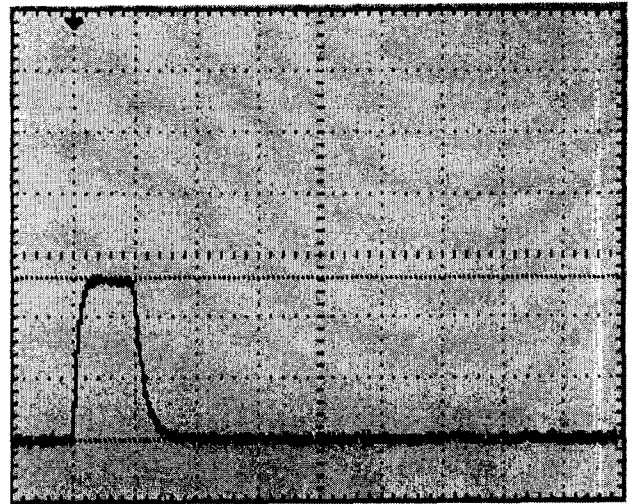
그림 10 (a), (b) 및 (c)에 60kV Impulse 전압파형과 미니모델 I과 II의 절연 파괴시 전압파형을 각각 나타낸다. 그림에서 Time/div는 $5\mu s$ 이다.

Table 3. Results of insulation tests.

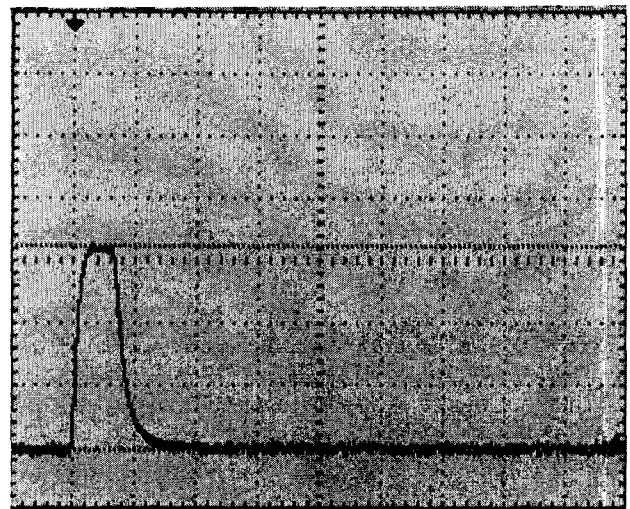
Test case	AC withstand voltage (22kV, 1 min)	Impulse voltage (60kV, 3 times)
Mini-model coil I	No breakdown	Breakdown (at First time)
Mini-model coil II	No breakdown	No breakdown (75kV)



(a) 60 kV standard Impulse wave



(b) Breakdown wave of the coil I



(c) Breakdown wave of the coil II

Fig. 10. Impulse breakdown wave of the mini-model coils.

5. 결론

모의 전극계를 이용하여 탄간, 층간 절연특성을 고찰한 후 미니모델 코일을 제작하여 실험적 검증을 거쳐 6.6kV급 DC 리액터형 HTSFCL용 HTS 코일의 절연설계를 하였다. 절연설계값을 이용하여 미니모델 코일 I과 II를 제작하여 AC 22kV 1분과 Impulse 60kV 3회 인가하는 내전압 시험을 행하였다. 미니모델 코일 I은 AC 절연설계값을 이용하여 절연 거리를 설계하였으며, 미니모델 코일 II는 Impulse 절연 설계값을 이용하여 절연 거리를 설계하였다. 미니모델 코일 I은 AC 내전압 시험에 통과하였지만 Impulse 내전압 시험에는 통과하지 못하였지만, 미니모델 코일 II는 AC와 Impulse 내전압 시험 모두 통과하였으며 절연파괴는 Impulse 75kV에서 발생하였다. 내전압 시험을 통하여 본 연구에서 제시한 절연설계가 적절함을 증명하였다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Ito, K. Tsurunaga, E.S. Yoneda, Y. Sugiyama, T. Hara, K. Okaniwa, H. Hoshino and T. Yamamoto, "Superconducting Fault Current Limiter Development", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, pp. 2345-2348, March 1991.
- [2] L.S. Fleishman, Y.A. Bashkirov, V.A. Aresteanu, Y. Brisselte and J.R. Cave, "Design Considerations for an Inductive High-T_c Superconducting Current Limiter," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 3, pp. 570-573, 1993.
- [3] 이재, 임성훈, 송재주, 김준혁, 한병성, "철심의 자화곡선을 이용한 자기차폐형 고온초전도 전류제한기 특성", 한국전기전자재료학회 2002년도 하계학술대회 논문집, pp. 511-514, 2002.
- [4] H. mitsuii , "Review of the research and development for insulation of superconducting fault current limiters ", Cryogenics Vol. 38, No. 11, pp. 1159-1167, 1998.
- [5] V. Keilin, I. Kovalev, S. Kmglov, V. Stepanov, I. Shugaev, V. Shcherbakov, I. Akimov, D. Rakov, A. Shikov, "Model of HTS Three-Phase Saturated Core Fault Current Limiter", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, 2000.
- [6] R.F. Giese and M Runde, "Assessment Study of Superconducting Fault-Current Limiters Operating at 77 K," IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol 8, No. 3, 1993.
- [7] T. Nomura, M. Yamaguchi, S. Fukui, K. Yokoyama, T. Sato and K. Usui, "Single DC Reactor Type Fault Current Limiter for 6.6kV Power System", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, 2001.
- [8] Eung Ro Lee, Seungje Lee, Chanjoo Lee, Ho-Jun Suh, Duck Kweon Bae, Ho Min Kim, Yong-Soo Yoon, and Tae Kuk Ko, "Test of DC Reactor Type Fault Current Limiter Using SMES Magnet for Optimal Design", IEEE Trasactions on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, 2002.
- [9] 김상현, 김정호, 윤문수, 권영한, "액체 질소의 절연특성에 미치는 전극효과에 관한 연구," 전기전자재료, 4권, 2호, p. 114, 1991.
- [10] J. Gerhold, "Cryogenic liquids-aprospective insulation basis for future power equipment". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 1, p. 68, 2002.
- [11] 백승명, 정종만, 이현수, 한철수, 김상현, "Double Pancake Coil형 고온초전도 변압기의 전기적 절연 특성", 한국전기전자재료학회 논문지, Vol. 16, No. 2, pp. 151-156, 2003.
- [12] M. Polak, P. Usak, J. Pitel, L. Jansak, Z. Timoransky, F. Zizek, and H. Piel, "Comparison of Solenoidal and Pancake Model Windings for a Superconducting Transformer," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 1478-1481, 2001.
- [13] M. Iwakuma, K. Nishimura, K. Kajikawa, K. Funaki, H. Hayashi, K. Tsutsumi, A. Tomimka, M. Konno and S. Nose, " Current Distribution in Superconducting Parallel Conductors Wound into Pancake Coils," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp. 861-864, 2000.