

## DC reactor type 고온초전도 한류기의 턴간 절연 특성

### The Dielectric Characteristics of Turn-to-Turn Insulation for DC Reactor Type HTSFCL

백승명, 정종만, 이창화, 류엔반둥, 김상현\*

(Seung-Myeong Baek, Joung-Man Jung, Chang-Hwa Lee, Van Dung Nguyen, and Sang-Hyun Kim)

#### Abstract

Fault current limiters (FCL) are extensively needed to suppress fault currents, especially for trunk power systems heavily connected to high voltage/large current transmission lines. Due to its ideal electrical behavior, high-temperature superconductor fault current limiter (HTSFCL) becomes one of the most important developing trends of limiters in power system. This paper describes the result of an investigation of the dielectric characteristics of turn-to-turn insulation for pancake and solenoid type reactor coil in liquid nitrogen. The influence of thickness in a variety length, on AC, DC and impulse surface flashover has been investigated. Also, the relationships between the number of turn and breakdown characteristics were clarified. The information gathered in this test series should be helpful in the design of liquid nitrogen filled DC reactor type HTSFCL.

**Key Words** : Dielectric characteristics, Turn-to-turn, DC reactor, HTSFCL, Insulation design

#### 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 제한 할 수

있는 한류기의 필요성이 증가되고 있다[1,2].

위와 같은 측면에서 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]. 특히, 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 절연 연구는 필수적이다[7-11].

한편, HTSFCL용 리액터 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 수직자계의 영향을 많아 층간에 높은 전계가 걸리지만

\* : 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원  
(진주시 가좌동 900,  
Fax : 055-759-2723

Corresponding Author : shkim@nongae.gsnu.ac.kr  
2003년 7월 21일 접수, 2003년 8월 13일 1차 심사완료,  
2003년 10월 10일 최종 심사완료

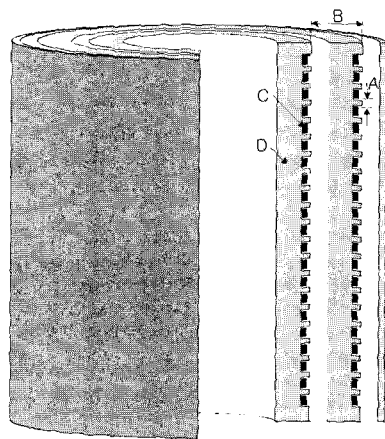
기기를 콤팩트화 할 수 있는 장점이 있다[12,13].

본 연구에서는 액체질소(77K)를 냉매로 사용하는 HTSFCL 한류기용 DC 리액터 코일 형태 중 솔레노이드형과 팬케익형을 모의하여 코일의 절연 구성 중에서 턴간 절연 특성에 대하여 비교, 검토하였다. AC, DC 그리고 Impulse 고전압을 인가하여 고체절연물의 두께, 길이가 연면방전에 미치는 영향을 고찰하였으며, 고분자 절연물의 층수에 따른 절연 파괴 특성을 고찰하였다. 실용적인 관점에서 본 연구의 결과는 DC 리액터형 HTSFCL을 개발하기 위한 코일의 턴간 절연설계에 기초 자료로 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

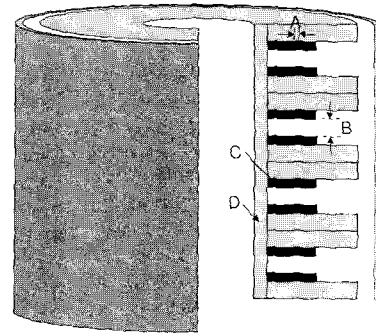
## 2. 실험 절차 및 방법

### 2.1 DC reactor 코일의 구조

솔레노이드형과 팬케익형 DC 리액터 코일의 절연계는 턴간, 층간, 그리고 코일과 외함의 대지 절연으로 구성된다. 그림 1의 (a), (b)에 각각 솔레노이드형과 팬케익형 HTSFCL용 DC 리액터 코일 형태를 나타낸다. 솔레노이드형의 경우, 턴간 절연은 보빈의 홈에 고온초전도 선재를 감기 때문에 턴과 턴 사이의 보빈의 연면거리에 의존하며, 층간 절연은 보빈의 연면거리와 액체질소와 기포의 복합체로 구성이 된다. 더블 팬케익형의 경우, 턴간 절연은 액체질소 중 고분자나 절연지를 이용하여 고온초전도 선재를 감싸는 방식이 주로 일반적이다. 층간 절연은 코일의 지지를 위해 스페이스의 사용이 불가피하므로 턴간 절연물과 스페이스의 연면거리의 복합체로 구성된다.



(a) Solenoid type



(b) Double pancake type

그림 1. HTSFCL용 DC 리액터 코일 형태.

Fig. 1. DC reactor coil type for HTSFCL.

(A:턴간, B:층간, C:고온초전도 권선, D:보빈)

### 2.2 전극계 구성

솔레노이드형의 턴간 절연구성은 액체질소 내에서 턴과 턴 사이의 보빈의 연면길이의 절연내력에 의존한다. 따라서, 솔레노이드형의 턴간 절연 특성을 고찰하기 위하여 그림 1과 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.  $d$ 는 GFRP의 연면거리(0~5mm)이고  $t$ 는 GFRP의 두께(1~5mm)를 나타낸다. 본 연구에서는 연면길이  $d$ 와 및 두께  $t$ 를 변화시키면서 연면방전 특성을 조사하였다.

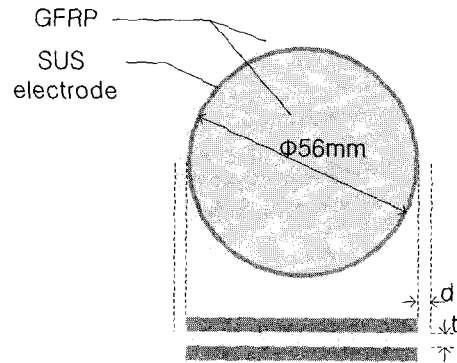


그림 2. 솔레노이드형 턴간 전극 배치.

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

팬케익형의 턴간 절연은 액체질소 내에서 도체를 감싼 절연물의 절연내력에 의존한다. 본 연구에서는 팬케익형 턴간 절연 특성 고찰을 위해 사용한 팬케익형 턴간 절연모델과 그 단면적을 그림 3 (a)와 (b)에 각각 나타낸다. 두께 0.025mm의 Kapton tape를 이용하여 10% overlap 방식으로 고온초전도 선재와 크기가 비슷한 두께 0.3mm, 폭 4.1mm의 Cu 도체를 절연하였다. 전극은 로고스키식에 따라 말단 부분에 집중되는 전기적 스트레스를 줄여 전극이 접한 부분에서 절연 파괴가 일어나도록 하였다. 절연한 전극의 폭과 두께는 임의의 지점을 각 10~20회 측정하였으며 W는 절연된 전극의 폭을 나타내고, T는 절연된 전극의 두께를 나타낸다. 표 1에 더블 팬케익형 턴간 절연 모델의 사양을 나타낸다.

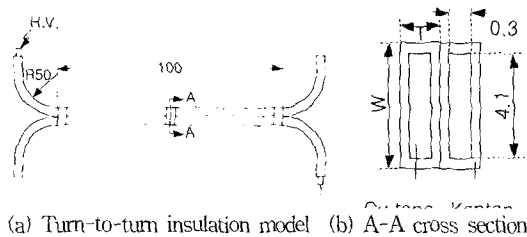


그림 3. 더블팬케익형 턴간 절연 모델.

Fig. 3. Turn-to-turn insulation model for double pancake type.

표 1. 더블 팬케익형 턴간 절연 모델의 사양.

Table 1. Specification of the turn-to-turn insulation model for double pancake type.

(unit : mm)

Cu tape		Insulated electrode					
두께	폭	1 층		2 층		3 층	
		T	W	T	W	T	W
0.3	4.1	0.36	4.23	0.42	4.29	0.49	4.39

### 2.3 실험 방법

그림 2와 3에 나타낸 전극계를 Cryostat에 설치한 후 Cryostat에 액체질소를 충전하고 충분히 열적 안정을 시킨 후 AC, DC 및 Impulse 고전압 장치를 이용하여 고전압을 인가하여 연면방전 및 절연파괴 전압을 측정하였다. AC 전압은 60Hz, 0~100kV 전원을 사용하였으며, 1kV/sec의 상승속도로 전압을 인가하여 연면방전 전압을 측정하였다.

DC 전압은 0~80kV 전원을 사용하였으며 AC와 동일한 방법으로 측정하였다. 실험결과에는 평균값, 최소값과 최대값을 나타낸다. Impulse 전압은 최대 300kV, 1.2×50μs 표준 Impulse 파형을 발생시키는 장치를 사용하였으며, 연면방전 및 절연 파괴 전압치는 50% 파괴확률 전압으로 나타내었다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 슬레노이드형 턴간 절연 특성

그림 4에 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 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 길이 d의 증가에 따라 연면방전 전압은 상승하나 그 증가폭은 매우 작았다. 따라서 연면방전 전압에 미치는 영향은 d보다 t가 더 큼을 알 수 있다.

그림 4에 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 k, n은 정수이다.

예를 들면, d=2.5mm인 경우 식(2)와 같다.

$$V_{AC} = 22.623t^{0.3428} (kV) \quad (2)$$

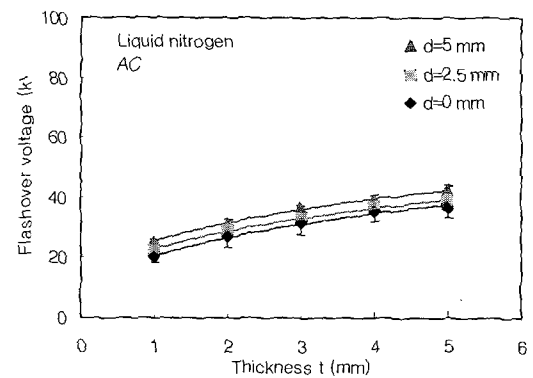


그림 4. AC 연면방전 전압에 미치는 두께의 영향.

Fig. 4. Effect of thickness on AC flashover voltage.

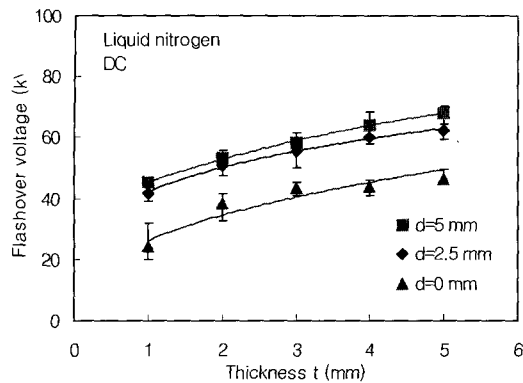


그림 5. DC 연면방전 전압에 미치는 두께의 영향.  
 Fig. 5. Effect of thickness on DC flashover voltage.

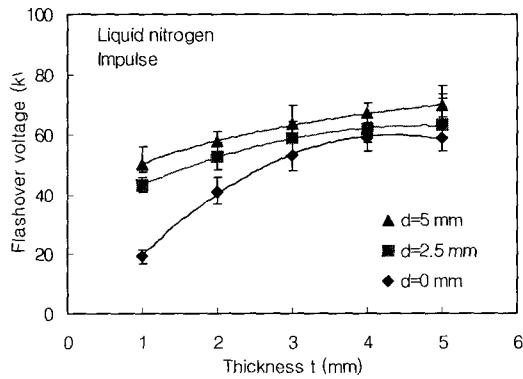


그림 6. Impulse 연면방전 전압에 미치는 두께의 영향.  
 Fig. 6. Effect of thickness on impulse flashover voltage.

그림 5에 동일한 전극계에서 두께  $t$  및 길이  $d$ 의 DC 연면방전 전압 의존성을 나타낸다. DC 연면방전 전압은 AC와 유사한 경향을 나타내지만 연면길이  $d$ 가 0mm에서 2.5mm로 증가시킨 경우 연면방전 전압이 급격히 상승함을 알 수 있다. 하지만  $d$ 를 2.5mm 이상으로 증가시켜도 연면방전 전압은 포화하는 경향을 나타내었다.

그림 6에 동일한 전극계에서 두께  $t$  및 길이  $d$ 의 Impulse 연면방전 전압 의존성을 나타낸다. 임펄스 전압을 인가한 경우 AC, DC와 마찬가지로 두께  $t$ 가 증가함에 따라 연면방전 전압은 증가하는 경향을 나타내지만  $d=0$ mm인 경우 AC, DC의

경우와 다르게 두께  $t$ 가 증가함에 따라 연면방전 전압이 급격히 상승한 후 포화하는 경향을 나타내었다. 또한, 연면길이  $d$ 를 0mm에서 2.5mm로 증가한 경우 연면방전 전압은 급격히 상승하는 경향을 나타내지만 2.5mm 이상으로 증가하는 경우 증가폭이 작게 나타났다. 따라서  $d$ 와  $t$ 의 의존성이 AC, DC 보다 큼을 알 수 있다.

$t=1$ mm인 경우의 연면길이  $d$ 를 변화시키면서 인가전압에 따른 연면방전 특성을 그림 7에 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 연면방전 전압은 DC와 Impulse가 AC보다 매우 높으며 AC의 경우 직선적으로 증가하지만, 증가폭은 매우 작으며, DC와 Impulse의 경우 급격하게 증가한 후 포화하는 경향을 나타낸다.

이상의 결과에서 AC 고전압 하에서의 연면방전 전압은 연면거리  $d$ 보다 두께  $t$ 의 효과가 크고 DC와 Impulse에서는 두께  $t$  뿐 아니라 연면길이  $d$ 의 효과도 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 실용상의 슬래노이드 DC 리액터형 고온초전도 한류기 개발을 위한 최적 절연설계를 위해서는 절연물의 두께와 길이가 적절히 고려되어야 할 것이다.

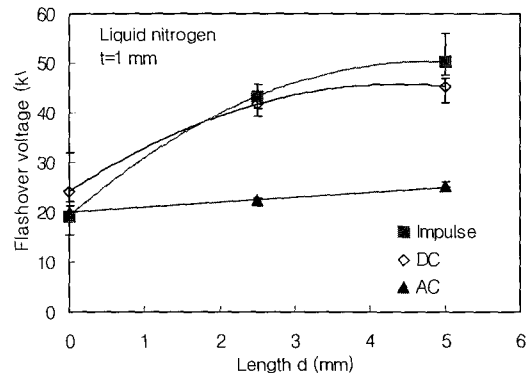


그림 7. 연면방전 전압에 미치는 길이의 영향.  
 Fig. 7. Effect of surface length on flashover voltage.

### 3.2 팬케익형 턴간 절연 특성

그림 8에 그림 3의 전극계를 사용하여 AC 전압을 인가한 경우의 턴 수에 따른 절연과피 전압을 나타낸다. 그림에 나타나듯이 같이 턴 수의 증가에 따라 선형적으로 절연과피 전압이 증가하였다. 1층 절연한 경우 평균 절연과피 전압은 6.93kV이고 2층, 3층은 각각 11.6kV, 15.7kV로 나타났다.

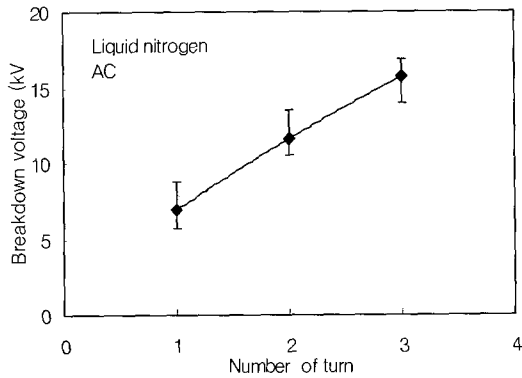


그림 8. 턴 수에 따른 절연파괴 전압.  
 Fig. 8. Effect of number of turn on breakdown voltage.

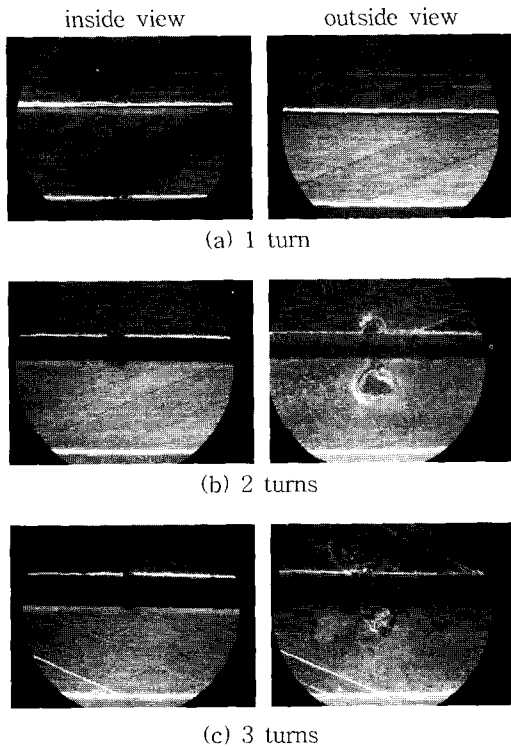


그림 9. AC 고전압에 따른 방전 흔적.  
 Fig. 9. Discharge traces by AC high voltage.

각 턴 수에 다른 AC 전압을 인가한 경우 방전 흔적을 관찰하여 그림 9에 나타낸다. 방전 흔적은

전극이 접한 내부와 외부에 각각 관찰하였으며 대표적인 방전 흔적을 각각 나타낸다. 각 턴 수에 따른 방전 흔적을 관찰한 결과 1회 절연하였을 경우에는 대부분 전극 내부에서 방전이 일어났으며, 2회 이상 절연하였을 경우에는 전극 모서리에서 방전이 발생하였다. 1회 절연한 경우 절연파괴는 절연물이 겹치는 곳에서 발생하였으며, 이러한 현상은 절연물이 overlap으로 겹치면서 발생한 미소 갭에서 방전이 시작되어 절연파괴로 이어지는 것으로 사료된다. 하지만 2회 이상 절연한 경우 절연파괴는 절연물의 겹쳐진 부분에는 영향을 받지 않고 발생하였다. 따라서, Kapton을 사용하여 턴간 절연하는 경우 2회 이상 절연하여야 할 것으로 사료된다. 방전 흔적의 면적은 턴 수가 작을 때 컸으며, 1, 2회 일 때 방전 후 절연물에 흠이 발생하였으며, 3회에는 절연물이 탄화되어 전극에 붙어있는 것을 관찰하였다.

#### 4. 결론

본 연구는 고온초전도 한류기용 DC 리액터 코일의 형태 중에서 솔레노이드형과 팬케익형의 턴간 절연 설계를 위해 AC, DC, Impulse 전압에서 절연 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

솔레노이드형 전극계에서 연면길이, 두께가 증가함에 따라 연면방전 전압은 증가하였으며 특히, AC 전압에서는 연면거리보다 두께의 영향이 크게 나타났으며, DC와 Impulse 전압에서는 두께 뿐 아니라 거리의 영향도 크게 나타났다. 따라서 절연설계 목표전압에 따라 연면길이와 두께를 적절히 고려되어야 할 것으로 사료된다. 팬케익형 전극계에서 AC 절연파괴 전압은 턴 수의 증가에 따라 선형적으로 증가하였으며 방전 흔적을 조사한 결과 턴 수가 작을수록 방전 흔적이 크게 나타났다. 턴 수가 1회 일 때 절연 파괴는 전극 내부 절연물이 겹쳐진 부분에서 발생하였으며 턴 수가 증가하면서 절연파괴는 전극 모서리 부분에서 발생하였다. HTSFCL용 코일의 턴간 절연에 Kapton 필름을 이용하는 경우 2회 이상 절연하는 것이 기기의 절연 특성 향상에 유리한 것으로 나타났다.

본 연구에서 고온초전도 한류기용 솔레노이드형 및 팬케익형 DC reactor 코일의 턴간 절연설계에 대한 데이터 베이스를 구축하였으며 이는 향후 DC reactor 코일의 절연설계에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

- [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, p. 2345, 1991.
- [2] L. S. Fleishman, Y. A. Bashkurov, 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, p. 570, 1993.
- [3] 이 재, 임성훈, 송재주, 김준혁, 한병성, "철심의 자화곡선을 이용한 자기차폐형 고온초전도 전류제한기 특성", 한국전기전자재료학회 2002년도 하계학술대회 논문집, p. 511, 2002.
- [4] H. mitsui, "Review of the research and development for insulation of superconducting fault current limiters ", Cryogenics Vol. 38, No. 11, p. 1159, 1998.
- [5] V. Keilin, I. Kovalev, S. Kmglov, V. Stepanov, I. Shugaev, V. Shcherbakov, I. Akimov, D. Rakov, and 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 Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, 2002.
- [9] 김상현, 김정호, 윤문수, 권영한, "액체 질소의 절연특성에 미치는 전극효과에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 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", 전기전자재료학회논문지, 16권, 2호, p. 151, 2003.
- [12] M. Polak, P. Usak, J. Pitel, L. Jansak, Z. Timoransky, F. Zizek, and H. Piel, "Comparison of slenoidal and pancake model windings for a superconducting transformer", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, p. 1478, 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, p. 861, 2000.