

저항형 고온초전도 한류기용 절연체의 절연 특성

Breakdown Characteristics of Insulators for a Resistor Type HTS Fault Current Limiter

백승명*, 류엔반둥**, 김상현***

Seung-Myeong Baek*, Van Dung Nguyen**, Sang-Hyun Kim***

Abstract: Breakdown characteristics of insulator-liquid nitrogen (LN₂) composite insulation for resistor type High T_c superconducting fault current limiter (HTSFCL) under ac and impulse voltage in LN₂ has been studied using model electrode systems. Electrodes for model electrode systems were made of SUS 304 contacted fiberglass reinforced plastic (FRP) and Au coated sapphire. The breakdown characteristics of model electrode systems were investigated experimentally for FRP thickness ranging from 1 mm to 5 mm, surface distance ranging from 2.5 mm to 7 mm and electrode gap ranging from 1 to 5 mm. The experimental data suggested that the breakdown voltage of model electrode systems in LN₂ is highly dependent on the surface distance, electrode gap as well as on the FRP thickness.

Also, we had observed discharge traces and puncture due to high-voltage 60-Hz AC stress.

Key Words: breakdown characteristics, resistor type, HTSFCL

1. 서 론

전력계통 용량의 증가로 고장전류보다 차단내력이 큰 차단기가 필요하지만 차단기의 차단내력을 크게 하는 것은 기술적 및 경제적 한계가 있고, 고장전류를 제한하기 위하여 전력계통에서 연계선로를 분기하는 것은 용이하지 않다. 또한 전력공급 신뢰도 및 안정도 저하와 같은 문제점들이 발생할 수 있다. 따라서 고장전류를 기존 차단기의 차단내력 이하로 고장전류를 제한하여 전력계통에서 선로 고장 발생시 차단용량을 경감하는 방법이 적극적으로 검토되고 있다. 또한 선로사고의 피해를 최소화하기 위해서는 차단기의 신속한 동작이 중요하고 국내에서는 154 kV급 선로에서는 50 kA급 차단기가 주종을 이루고 있으며, 31.5 kA급인

GIS는 차단내력의 한계에 도달해 있는 실정이다. 따라서 사고전류를 차단용량 이하로 제한하는 한류기를 도입함으로써 기존의 차단기에서 발생하는 문제점을 해결할 수 있을 것으로 기대된다 [1]. 특히, 초전도 한류기는 구조가 간단하고 동작시간이 짧으며 수명이 반영구적인 장점이 있어 계통적용을 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행중이다 [2-4]. 국내에서는 과학기술부에서 추진중인 "21세기 프론티어 연구개발사업"의 일환으로 "차세대 초전도 응용기술개발사업"이 선정되었으며, 고온초전도 한류기는 저항형과 DC reactor형 두가지 형태로 최종 154 kV/2 kA급 초전도 한류기 개발을 목표로 연구가 진행중이다 [5,6].

개발중인 저항형 초전도 한류기는 초전도체를 사파이어 위에 박막으로 올린 단위소자를 직·병렬로 연결하여 사고전류를 제한하고 사고전류를 제한할 때 초전도체가 상전도로 전이하여 다량의 기포가 발생하는 구조이다 [7,8]. 따라서 단위소자의 구조와 배치는 저항형 초전도 한류기의 안정적인 운용에 매우 중요한 부분이지만 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 또한 실용화를 위해서는 BIL 기준을 충족하는 절연내력을 가지는 절연구조 및 방법에 대한 연구가 선행되어야 하지만 국내에서는 이에 대한 연구가 전무한 실정이다 [9].

따라서 본 연구에서는 현재 개발 중인 저항형 초전도 한류기의 절연설계를 위해 절연구성을 분석하고 절연구성에 따라 서로 다른 두 종류 전극을 이용한 모의 전극계를 설계 및 제작하여, 절연특성을 고찰하였다.

2. 실험 방법 및 절차

그림 1에 실험에 사용한 전극배치를 나타낸다. 저항형의 층간 절연구성은 액체질소 내에서 층과 층 사이의 간격의 절연내력에 의존하므로, 층간 절연 특성을 고찰하기 위하여 그림 1과 같이 전극계를 구성하였다. 전극은 FRP에 직경 40 mm, 두께 10 mm인 SUS 304로 만든 평판 전극을 접촉한 것과 금 코팅 한 사파이어를 이용하였다. FRP는 두께 1, 3 과 5 mm, 직경 45, 48 과 54 mm로 각 두께 및 직경에 맞게 10개씩 제작하였다. FRP를 붙인 평판전극은 고전압 측과 연결하고 나머지 평판전극을 접지측과 연결하였다. 전극계에서 d는 절연물의 연면거리 (0~7 mm) 이고 t는 절연물의 두께 (1~5 mm)이며, g는 전극의 간격 (1~5 mm)을 나타낸다. 지지물을 사용하였을 때 전극간격 g는 지지물의 두께를 함께 나타낸다. 본 연구에서는 연면길이 d, 두께 t 및 간격 g를 변화시키면서 절연 특성을 조사하였다. 그림 2는 실제 박막 저항형 HTSFCL에 사용되는 사파이어를 이용하여 금 코팅 전극을 이용한 전극 배치를 나타낸다. 사파이어

* 학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과 박사과정 수료

** 학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과 석사과정

*** 정 회 원 : 경상대 대학원 전기공학과 교수

원고접수 : 2004년 02월 21일

심사완료 : 2004년 03월 23일

의 직경은 2인치이고, 두께는 0.3 mm로 실제 저항형 HTSFCL의 모듈에 사용되는 사파이어이다. 사파이어 위에 금을 코팅하기 전에 완충 층으로 수 나노미터 두께의 크롬을 코팅하였으며, 그 위에 ~20 μ m의 금을 코팅하였다. 금 코팅한 사파이어 전극을 상, 하로 배치하여 상부의 전극을 고전압에 연결하고 하부의 전극을 접지층에 연결하였다.

그림 1과 2에 나타난 전극계를 Cryostat에 설치한 후 Cryostat에 액체질소를 충전하고 충분히 열적 안정을 시킨 후 AC 및 임펄스 고전압을 인가하여 절연 파괴 전압을 측정하였다. AC 전압은 KYONAN ELECTRIC사의 (60 Hz, 100 kV, 10 mA) 전원을 사용하였으며, 1 kV/sec의 상승속도로 전압을 인가하여 연면방전 전압을 매 10회-20회를 측정하였다. 실험결과에는 평균값, 최소값과 최대값을 나타낸다. 임펄스 전압은 최대 300kV (1.2 \times 50 μ s, 상승/하강) 표준 임펄스 전압을 발생시키는 장치를 사용하였으며, 연면방전 및 절연파괴 전압은 매 30회를 측정하여 50% 파괴확률 전압으로 나타내었다. 모든 절연파괴 실험은 액체질소 중에서 행하였다.

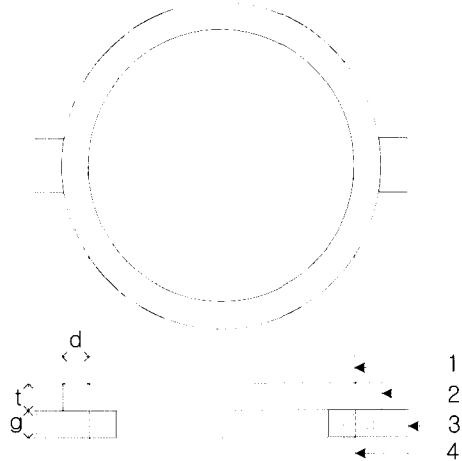


그림 1. 전극배치: 1-평판 또는 금 코팅 고전압 전극, 2-FRP 또는 사파이어, 3-지지물 (FRP), 4- 평판 또는 금 코팅 접지 전극.

Fig. 1. Electrode arrangement: 1-Plate or Au coated H.V. electrode, 2-FRP or Sapphire, 3-Supporter (FRP), 4-Plate or Au coated ground electrode.

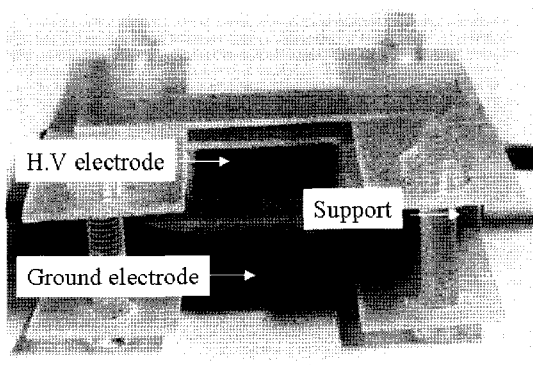
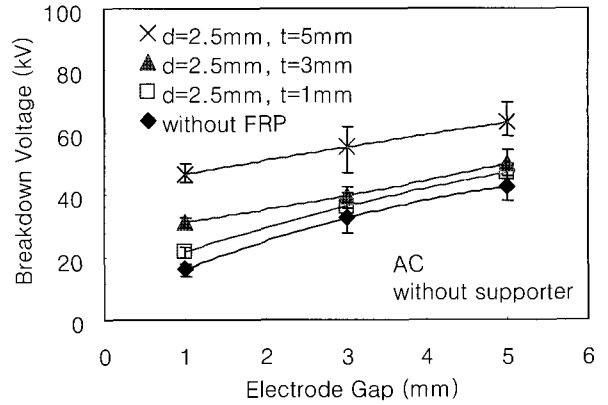


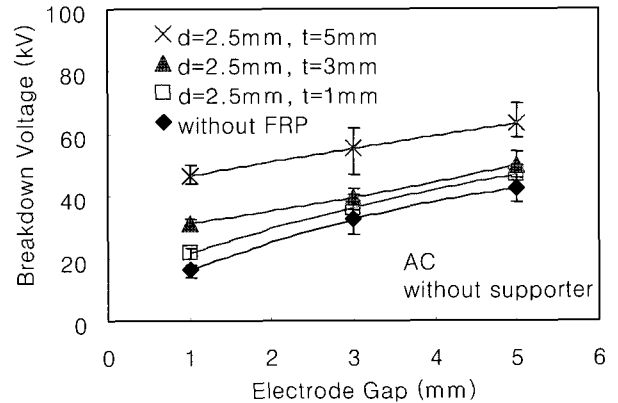
그림 2. 금 코팅 사파이어 전극을 이용한 전극계.
Fig. 2. Electrode system using Au coated sapphire electrodes.

3. 실험 결과 및 고찰

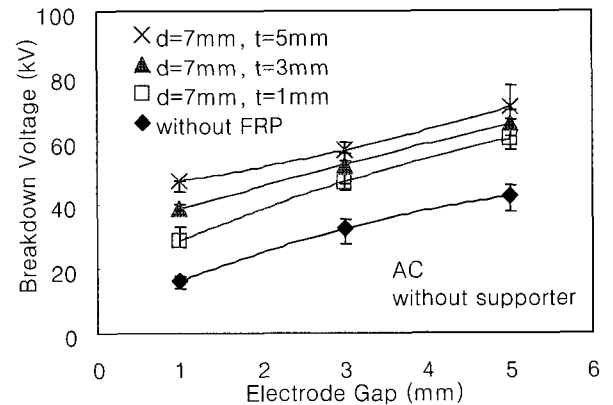
그림 3(a)에 $d=2.5$ mm일 때 FRP 두께 t 와 전극간격 g 에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. $d=2.5$ mm일 때 g 와 t 가 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가하는 경향을 나타내었다. 그림 3에서 t 가 1, 3으로 증가시켜도 절연파괴 전압은 크게 증가하지 않지만 t 를 5 mm로 증가시켰을 때 절연파괴 전압은 크게 증가하는 경향을 보인다.



(a)



(b)



(c)

그림 3. 전극간격에 따른 절연파괴 전압: (a) $d=2.5$ mm, (b) $d=4$ mm, (c) $d=7$ mm.

Fig. 3. Breakdown voltage as function of electrode gap: (a) $d=2.5$ mm, (b) $d=4$ mm, (c) $d=7$ mm.

그림 3(b)에 $d=4$ mm일 때 FRP 두께 t 와 전극간격 g 에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. $d=2.5$ mm와 마찬가지로 g 와 t 가 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 하지만, 그림 $d=4$ mm일 때는 $d=2.5$ mm일 때와 달리 t 가 증가함에 따라 절연파괴 전압은 일정하게 증가하는 경향을 나타내었다.

즉, $g=1$ mm일 때, t 가 증가함에 따라 절연파괴 전압은 약 10 kV씩 일정하게 증가하여 16, 26, 38 과 46 kV를 각각 나타내었다.

그림 3(c)에 $d=7$ mm일 때 FRP 두께 t 와 전극간격 g 에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. $d=7$ mm일 때 $d=2.5$ 와 4 mm와 마찬가지로 g 와 t 가 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가하는 경향을 나타내고 있다. FRP가 없는 경우와 비교하였을 때 $d=7$ mm인 FRP가 있는 경우에 절연파괴 전압이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이후에 FRP의 t 를 증가시켜도 절연파괴 전압의 증가폭은 둔화되는 경향을 나타낸다.

그림 4에 $d=7$ mm 및 $g=3$ mm일 때 t 를 증가시키면서 전압인가 회수에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. $t=3$ mm와 5 mm에서는 절연파괴 회수를 증가시켜도 절연파괴 전압은 일정하게 나타났지만 $t=1$ mm에서는 1-3회는 연면을 통하여 절연파괴가 발생하였지만 4번째 FRP 절연물을 관통하여 절연파괴가 발생하였다. 즉, FRP의 경우 절연파괴 전압 회수에 따라 쉽게 열화되어 FRP를 관통하여 절연파괴가 발생하는 것으로 관측되었다.

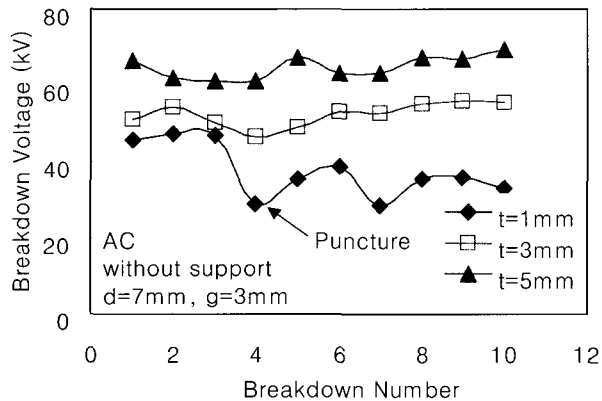


그림 4. $d=7$ mm, $t=1$ mm, $g=3$ mm일 때 인가 회수에 따른 절연파괴 전압.

Fig. 4. Breakdown voltage as a function of breakdown number, showing conditioning for $d=7$ mm, $t=1$ mm and $g=3$ mm.

그림 5에 $d=7$ mm, $t=1$ mm, $g=3$ mm일 때 절연파괴 흔적 사진을 나타낸다. 절연파괴 흔적은 평판의 외경을 따라서 발생하였으며 크기는 1 mm 정도였다.

그림 3~5에서 알 수 있듯이 박막의 기판으로 사용될 절연물의 두께와 폭 그리고 그 간격에 따라 절연 특성이 다르게 나타나며, 기기 설계 및 제작과 절연 등급 및 경제성 등에 따라 두께, 폭 간격이 달라질 것으로 사료된다. 또한 열화 특성이 우수한 절연물을 기판으로 사용해야 기기의 절연 특성을 높일 것으로 고찰된다.

그림 6에 지지물의 유, 무 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. 지지물이 없는 경우 연면거리가 증가함에 따라 절연파괴 전압이 증가하는 경향을 나타내지만 지지물이 있는 경우 연면거리가 증가하여도 절연파괴 전압

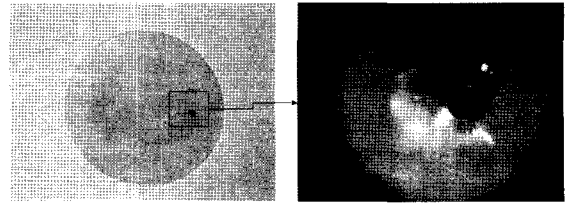


그림 5. $d=7$ mm, $t=1$ mm 및 $g=3$ mm일 때 절연파괴 흔적 사진.

Fig. 5. Photograph of FRP after puncture due to AC stress, showing conditioning for $d=7$ mm, $t=1$ mm and $g=3$ mm.

의 증가폭은 미약하였다. 따라서 모듈간의 절연파괴 전압을 증가시키기 위해서는 지지물의 두께와 전극 간격을 전압레벨에 맞게 사용하는 것이 중요하다. 그리고 모듈간의 간격을 유지하는 방법 또한 절연내력에 중요한 요인임을 알 수 있다.

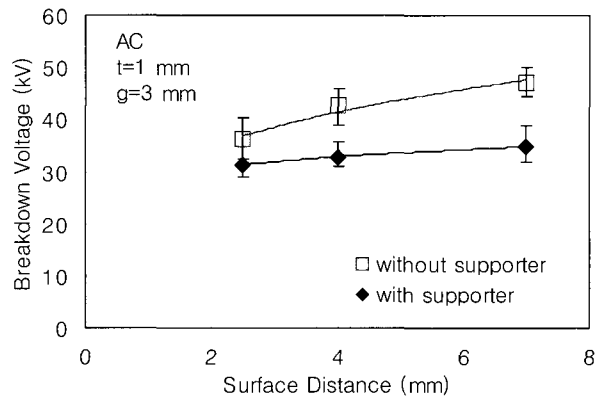


그림 6. 지지물의 유, 무와 연면거리에 따른 절연파괴 전압.

Fig. 6. Breakdown voltage as a function of surface distance with and without supporters.

그림 7에 각 전극에서 지지물의 유무에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. 평판전극을 이용한 전극계에서의 절연파괴 전압과 실제 박막 저항형 한류기에 사용될 금코팅 한 사파이어 전극을 이용한 전극계에서 지지물 유, 무에 따른 절연파괴 전압을 각각 비교한 결과 지지물이 없는 평판전극을 이용한 전극계에서 절연파괴 전압이 크게 나타났으며, 금 코팅한 사파이어 전극을 이용한 전극계에서 절연파괴 전압이 가장 작게 나타났다.

그림 8에 금 코팅한 사파이어 전극의 관통파괴 흔적을 나타낸다. 지지물이 있을 때 $g=1$ 및 3 mm에서는 연면으로 절연파괴가 발생하였지만 $g=5$ mm일 때 사파이어를 관통하여 절연파괴가 발생하였다. 따라서 실제 사용될 박막 저항형 한류기의 단위소자에서 연면방전뿐 아니라 관통파괴도 발생하므로 절연을 보강할 수 있는 구조와 배치에 대한 연구가 더 필요하다 할 수 있다.

그림 9에 FRP와 지지물이 있을 때 연면길이에 따른 AC 및 임펄스 절연파괴 전압을 비교하였다. AC에 대한 임펄스 비는 $d=2.5, 4, 7$ mm에서 1.6, 2, 2.1배로

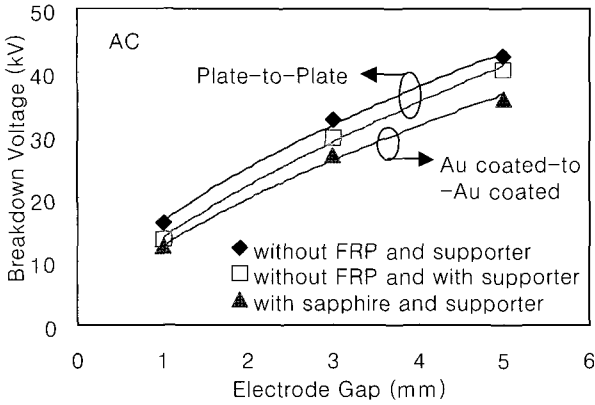


그림 7. 전극계에 따른 절연파괴전압.
Fig. 7. Breakdown voltage for different electrode systems.

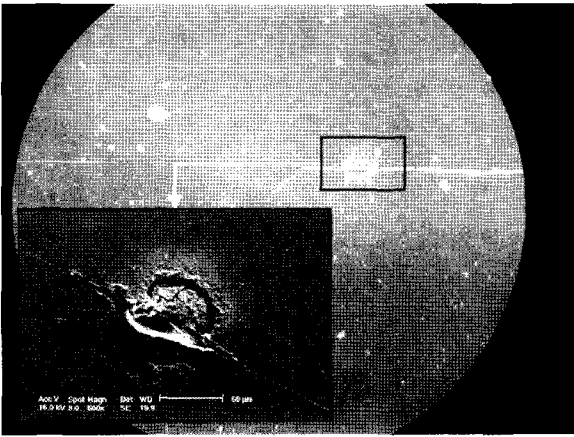


그림 8. 금 코팅한 사파이어 전극의 관통흔적.
Fig. 8. Photograph of Au coated sapphire after puncture due to AC stress.

각각 나타났다. 절연설계에서 AC 절연파괴 전압보다 임펄스 절연파괴 전압이 기기의 실제 사용상 더 유용하므로 임펄스 절연파괴 전압에 대한 연구가 더욱 필요할 것으로 사료된다.

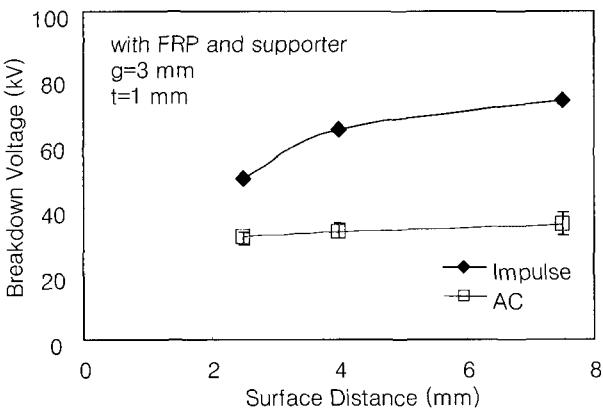


그림 9. 연면거리에 따른 AC 및 임펄스 절연파괴전압.
Fig. 9. AC and Impulse breakdown voltage as a function of surface distance.

4. 결 론

본 연구에서는 저항형 HTSFCL의 절연설계를 위해 모의 전극계를 사용하여 절연 특성을 고찰하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

단위 모듈에 사용되는 절연물로 FRP와 사파이어를 사용하여 전극계를 구성하여 절연파괴 전압을 측정할 결과 FRP의 두께, 연면길이 및 전극간 거리에 따라 절연파괴 전압이 다른 경향을 나타내었다. 연면길이 가 짧을 때는 FRP의 두께보다 전극간 거리의 영향이 크게 나타났으며, 연면길이 가 길수록 FRP의 두께의 영향이 크게 나타나는 경향을 나타내었다.

FRP의 두께가 얇을수록 방전회수에 따라 쉽게 열화되어 관통파괴가 발생하였다.

저항형 HTSFCL에 사용되는 사파이어에 금 코팅을 한 전극을 이용하여 절연파괴 전압을 비교한 결과 금 코팅 사파이어 전극을 이용한 경우 절연파괴 전압이 가장 낮게 나타났으며, 사파이어를 통하여 관통파괴가 발생하였다. 이는 실제 저항형 HTSFCL에서 쉽게 절연파괴가 나타날 수 있으므로 절연보강이 더욱 필요하다는 것을 나타낸다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 최효상, 황시돌, 현옥배, "단락사고에 대한 저항형 초전도 한류기의 설계용 시뮬레이션", 한국초전도·저온공학회논문지 1권 1호, 28-32, 1999.
- [2] R. F. Giese and M. Runde, "Assessment Study of Superconducting Fault-Current Limiters Operating at 77 K", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, 1138-1147, 1993.
- [3] Steffen Elsehner, Frank Breuer, Mathias Noe, Thomas Rettelbach, Heribert Walter, and Joachim Bock, "Manufacturing and Testing of MCP 2212 Bifilar Coils for a 10 MVA Fault Current Limiter", IEEE TRANSACTION ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 13, NO. 2, 1980-1983, 2003.
- [4] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current Limiting Properties of YBCO-Films on Sapphire Substrates", IEEE TRANSACTION ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 9, NO. 2, 1369-1372, 1999.
- [5] Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun, Hyo-Sang Choi, Sang-Do Cha, and Je-Myung Oh, "Resistance Development in Superconducting Fault Current Limiters Prior to Quench Completion", IEEE TRANSACTION ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 13,

NO. 2, 2032-2035, 2003.

- [6] 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 TRANSACTION ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 12, NO. 1, 850-853, 2002.
- [7] K. B. Park, J. S. Kang, B. W. Lee, I. S. Oh, H. S. Choi, H. R. Kim, and O. B. Hyun, "Quench Behavior of YBaCuO Films for Fault Current Limiters Under Magnetic Field", IEEE TRANSACTION ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 13, NO. 2, 2092-2095, 2003.
- [8] Sang-Hyun Kim, Jong-Man Jeong, Young-Seok Kim, Cheon-Oh Kim, and Seung-Myeong Baek", Cryogenics 42 411-414, 2002.
- [9] 백승명, 정종만, 김상현, "고온초전도 한류기의 절연설계를 위한 과냉각 액체질소의 절연내력 특성", 한국초전도·저온공학회논문지 5권 2호 46-50, 2003.



류엔반등

1976년 12월 13일생 베트남, 2000년 Cantho 대학교 기계공학과, 2004년 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.



김상현((金相賢)

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 오사카 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986-1989년 한국전기연구원 초전도 연구실장, 1999-2001년 경상대학교 공과대학 학장, 2000-2002년 한국 초전도·저온공학회 회장, 2004년 현재 경상대학교 교수, 대한전기학회 경남지부장.

저 자 소 개



백승명(白承明)

1973년 3월 10일생, 1998년 경상대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2004년 현재 동대학원 전기공학과 박사과정 수료.