

액체질소 중 FRP의 절연파괴 및 연면방전 특성 연구

Breakdown and Surface Flashover Characteristics of FRP in LN₂

정종만*, 백승명*, 김상현**

Jong-Man Joung*, Seung-Myeong Back*, Sang-Hyun Kim**

Abstract: In this study, we discussed the characteristics of breakdown and surface flashover of FRP in LN₂ for applying it to spacer of a superconducting power equipment. Fiberglass reinforced plastic(FRP) has high breakdown puncture strength and has high mechanical strength. So the research of its dielectric properties have been conducted in liquid nitrogen(LN₂). We measured breakdown voltage of FRP and distinguished four types of surface flashover along solid insulator with arrangement of electrodes and measured the surface flashover voltages of each types of electrode arrangement. The type of a electrode set at the back of the insulator showed the worst dielectric property. The property of surface flashover depending on pressure was tested.

Key Words: FRP, surface flashover, breakdown, liquid Nitrogen

1. 서 론

고온초전도체의 발견이후 그 응용연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 임계전류밀도가 높고 기계적 특성이 우수한 고온초전도 선재의 개발과 더불어 고온초전도 전력기기의 개발 가능성이 한층 더 높아졌다. 현재, 여러 선진 국가에서는 초전도 응용기기의 개념설계 및 상세 설계가 이루어졌으며 전력계통과 연계하기 위한 실 계통 연구 단계에 이르러 있다.

초전도 응용기기가 개발되기 위해서는 극저온에서의 절연연구가 선행되어야 할 것이다. 따라서 고온 초전도 응용기기의 냉매로 사용되어지는 액체질소 내에서의 절연 환경 및 취약점에 대해 많은 연구가 이루어지고 있으며 다양한 절연구성이 제한되고 있다. 액체질소는 본질적으로 절연 특성이 양호하나 증발점열이 낮아 외부로부터의 열 침입이나 초전도 응용기기의 쿨치로 인해 비등기포가 발생되기 쉬우며 또한 금속 입자나 오염물질에 의한 절연 성능의 저하가 우려되고 있다[1].

특히, 초전도 응용기기를 제작하기 위해서는 각종 고체 절연물을 사용하여야 하는데 이때 그 표면을 통한 연면방전은 고체절연물이나 액체 질소의 절연파괴 전압보다 매우 낮아 큰 문제가 된다.

연면방전은 고체절연물의 형상, 전극의 표면처리, 절연물의 재료, 인가되는 전압의 형태 등에 의해 다양한 특성을 나타낸다[1]. 따라서 초전도 기기의 실용화 개발을 위하여, 초전도 전력 시스템에 사용되는 고체절연물의 연면방전 특성에 대한 연구는 대단히 중요하다. 본 연구에서는 극저온에서도 수축율이 낮으며 기계적 특성과 전기 절연 특성이 양호하여 극저온 절연재료 및 구조물로 널리 사용되어지고 있는 FRP에 대한 절연파괴 특성과 연면방전 특성을 연구하였다. 연면방전 특성은 전극과 절연물의 배치에 따라 연면방전 경로를 구분하여 실험하였다.

2. 본 론

2.1. 전극계 구성

FRP의 절연 파괴는 그림 1과 같은 구(지름 7mm) 대 평판(지름 27mm) 전극을 사용하였으며 각 전극의 재질은 SUS로 표면을 미세하게 연마하였다. 그리고 상부 전극에는 스프링을 설치하여 시료를 고정시켰다.

연면방전은 전극과 절연물의 배치에 따라 연면방전의 형태를 그림 2와 같이 4가지로 구분하였다. 첫째로 그림 2의 (a)와 같이 절연물 위에 전극이 수평으로 놓여져 연면방전이 연면 길이에만 의존하는 경우이며, 두 번째로 그림 2의 (b)와 같이 절연물 사이에 두고 두 전극이 수직으로 놓여져 연면방전이 연면 길이와 두께에 의존하는 경우이다. 이때 절연을 위해 전극보다 길게 놓는 여유 부분의 길이를 collar라 정의하였다. 그리고 세 번째는 그림 2의 (c)와 같이 두 번째의 한 전극을 절연물 배후의 전극과 접촉한 경우이다. 네 번째는 그림 2의 (d)와 같이 두 점으로 접해있는 절연물 중간으로 연면방전이 이루어지는 경우이다. 4가지의 연면방전에 대하여 다음 설명과 같은 전극계를 구성하였다. 전극재료로는 두께 0.11 (mm)의 Al sheet와 순 은을 sheath로 사용한 Bi-2223 테이프(두께 0.25mm, 폭 3mm)를 사용하였다.

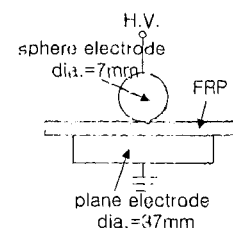


그림 1. FRP 절연파괴용 전극계.
Fig. 1. Schematic of electrode for breakdown of FRP.

* 학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과 박사과정

** 정 회 원 : 경상대 공대 전기전자공학과 교수

원고접수 : 2002년 04월 06일

심사완료 : 2002년 05월 24일

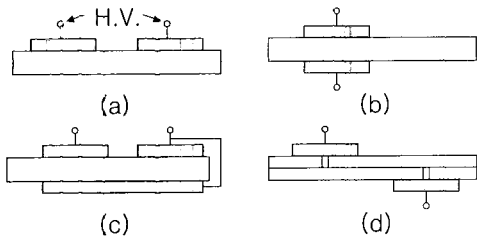


그림 2. 연면방전의 4가지 분류.
Fig. 2. Four types of surface flashover.

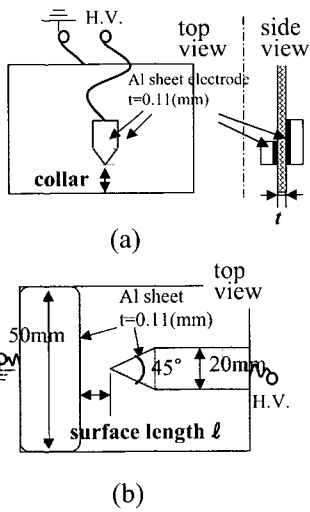


그림 3. 연면방전 전극계 (a)collar 길이에 대한 실험용, (b) 연면 길이에 대한 실험용.
Fig. 3. Schematic of electrodes for surface flashover, (a) depending on collar length, (b) depending on surface length.

그림 3에 Al sheet를 이용한 전극계를 나타내고 있다. Al sheet 전극의 경우 한 전극은 끝 각을 45°가 되게 하였으며 다른 전극은 직사각형 형상으로 하였다. HTS loop전극계의 경우는 Al sheet 전극을 대체하여 사용하였다. HTS loop전극계는 Bi-2223/Ag 테이프를 직경 30 (mm)의 FRP, 높이 10 (mm) 원통면에 1회 권선하여 HTS loop를 만들어 사용하였다. Bi-2223/Ag 테이프 가장자리의 곡률 반경은 약 0.441 (mm) 이다. 그리고 전극계와 절연물의 접촉을 위해서는 스프링 또는 FRP 판의 탄성만을 이용하였으며 silver paste 등으로 미소 공극을 제거하기 위한 부수적인 처리는 하지 않았다.

2.2. 실험방법

그림 4는 절연과피 및 연면방전 실험을 위해 사용된 cryostat의 개략도를 나타낸다. 진공 층이 있는 pyrex-glass dewar 두 개로 구성되어 있는 cryostat에 액체질소를 충전하고 전극계를 침적하였다. cryostat의 내조에는 실험을 위한 질소를 충전하였으며 외조에는 내조의 실험용 질소의 열적 안정을 위한 질소를 충전하였다. cryostat에 침적된 전극에는 AC 60 (Hz)의 전원을 1 (kV/s)의 속도로 상승 시켜 절연과피 및 연면방전이 일어나는 전압을 기록하였다. 90 (kV), 300 (VA)용량의 BAUR DTS AC 전원 장치를 사용하였으며 대기압하에서 실험을 하였다.

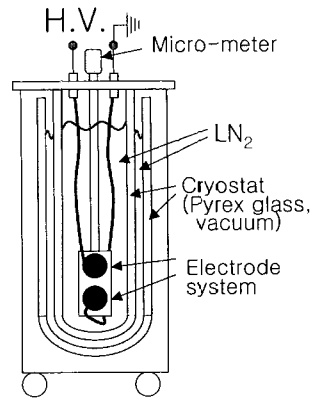


그림 4. 극저온 용기의 개략도.
Fig. 4. Schematic of cryostat.

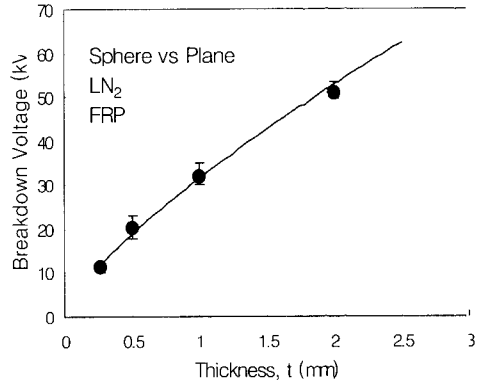


그림 5. FRP의 관통절연과피.
Fig. 5. Breakdown voltage of FRP.

실험을 위한 FRP 판은 알코올에 넣어 초음파 세척 후 사용하였으며, 10~15회 방전전압을 취하여 평균값을 결과 그림에 나타내고 최대값과 최소값을 표시하였다.

2.3. 실험결과 및 고찰

그림 5는 FRP의 절연과피에 대한 결과를 나타내고 있다. 두께 1mm인 경우 평균 32 (kV) 정도의 절연과피 강도를 나타냈으며 $V_B = 32.059 t^{0.7315}$ 의 실험식으로 나타낼 수 있다. 이는 FRP의 진성절연과피 값을 나타내는 것이 아니라 상부 구 전극의 곡률에 의한 부분방전의 발생을 통한 방전전압을 나타낸다. 관통과피 흔적은 육안으로 확인 할 수 있었다. 이러한 절연과피는 구 전극과 시료가 맞닿는 부분에서 절연과피가 일어나지 않으며 최대 전계 분포의 80~90% 전계 분포 영역 내에서 부분방전에 의한 열화와 함께 관통과피 되고 있으며 변압기유 중에서 적용되고 있는 stressed volume theory를 적용할 수 있다 [2].

그림 6은 HTS loop 전극과 Al sheet 전극을 이용한 두께 5 (mm) FRP의 collar 길이에 따른 연면방전 전압 특성을 나타낸다. Al sheet 전극 연면방전에 비해 HTS loop 전극일 경우 연면방전 전압의 포화가 빠르게 일어나고 있다.

연면방전전압 V와 연면거리 l 과의 관계를 실험식 1)과 같이 나타낼 수 있는데

$$V = a \cdot l^m \quad 1)$$

단, a, m 정수이다.

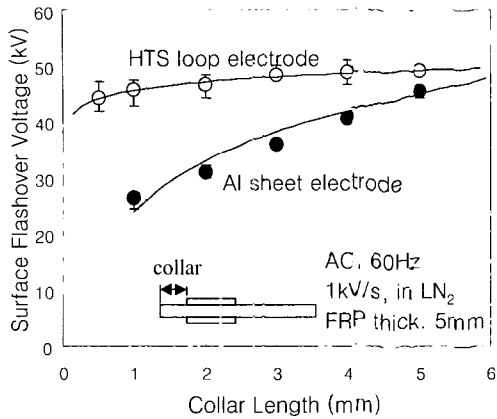


그림 6. collar 길이에 따른 연면방전 전압.
Fig. 6. Surface flashover voltage depending on collar length.

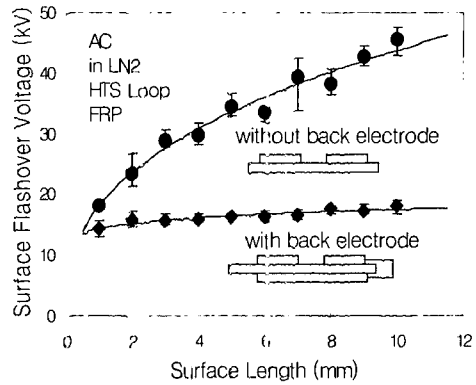


그림 8. 배후전극의 영향.
Fig. 8. Effect of back electrode.

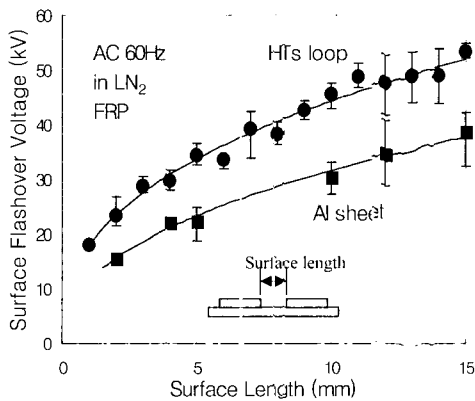


그림 7. 연면거리에 따른 연면방전 특성.
Fig. 7. Surface flashover voltage depending on surface length.

HTS loop 전극의 경우 $m=0.05$, Al sheet 전극 $m=0.34$ 을 나타낸다. 이는 다른 불평등 전계에서의 연구결과 값[3]과 Al sheet의 경우 유사하게 나타나고 있다. collar 길이가 길어짐에 따라 연면방전 전압이 빠르게 포화되기 때문에 초전도, 변압기나 기타 응용기기에 적용될 때 경제적인 collar의 길이를 사용해야 할 것이며, 또한 연면방전을 막기 위해서는 단순히 collar 길이만으로 제어하기 어려울 것이다.

그림 7은 전극을 수평으로 배치한 경우 연면거리에 따른 연면방전 특성을 나타낸다. 실험식 1)에서의 m 값은 HTS loop 전극, Al sheet 전극 각각 0.39, 0.43을 나타낸다. 이는 그림 6의 수직 배치에 비해 연면방전 특성이 좋게 나타나고 있다. 이는 전극이 수직으로 배치되어 중간에 절연체가 있는 경우에는 전극 사이의 고유용량(specific capacitance)[4]이 커지기 때문에 전하의 존재확률이 높아져 방전의 진전이 더 용이하다고 사료된다. 이와 같은 특성은 전극배치 그림 2 (c)와 같이 배후전극이 있는 경우에 연면방전 특성의 차이를 보다 더 뚜렷하게 살펴볼 수 있다.

그림 8은 전극의 수평배치에서 연면거리에 따른 연면방전 특성을 배후전극이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 나타낸다. 전극의 수직 배치보다 연면방전 특성이 더 크게 저하되고 있다. 연면거리 10(mm)인 경우 약 2.5배 감소하였다.

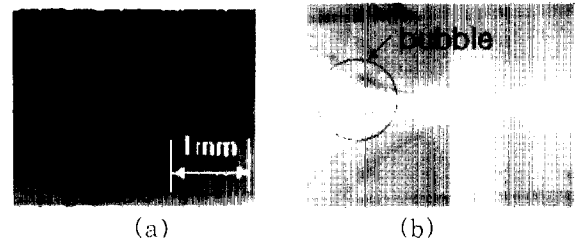


그림 9. (a) 관통파괴에 의한 흔적 사진과 (b) 연면방전과 더불어 발생하는 기포 사진.
Fig. 9. Photograph of (a) FRP surface after puncture and (b) bubble generated by surface flashover.

또한 절연체를 사이에 둔 전극의 수직 배치에서는 전극과 절연체의 미소 공간에서 발생하는 부분 방전을 관찰할 수 있는데, 이러한 부분방전은 절연체의 표면을 심하게 일화시켜 결국에는 관통파괴에 까지 이를 수 있다.

그림 9의 a)에 부분방전에 의해 표면이 열화되어 관통파괴가 생긴 표면사진을 보여주고 있다. 그림 2 (b)의 Al sheet 전극배치 그리고 collar길이가 10 (mm)인 경우의 연면파괴 실험 중 약 14 ~ 16 (kV)에서 부분방전이 개시되어 25 (kV)에서 관통파괴가 일어 난 경우이다.

그림 9의 (b)는 연면방전에 의해 질소가 비등하여 기포가 발생하는 모습을 찍은 사진이다. 전극 간격이 짧은 경우(1mm) 부분 방전으로 생긴 기포에 의해 방전이 가속화되는 것을 관찰할 수 있었지만 전극간격이 큰 경우에는 부분 방전에 의해 발생된 기포가 전계의 세속에 비례하는 gradient력[5]을 받아 전계가 집중된 곳으로부터 밀려나 방전에는 영향을 미치지 못하였다. 하지만 응용기기와 같은 실제 시스템에서는 복잡한 절연구조를 가지므로 기포에 대한 자세한 연구가 필요할 것이다. 초전도 기기의 렌치를 모의한 비등 질소기포에 의한 방전연구가 많이 이루어지고 있다 [6].

그림 10은 전극 배치 그림 2 (d)의 경우로 두께 1 (mm) FRP 판 2장을 적층시킨 후 두 FRP 판 사이로 발생하는 연면방전 특성을 살펴보았다. 이때 적층 사이로 연면방전을 유도하기 위해 각 전극과 맞닿는 FRP 면에 직경 1 (mm)의 구멍을 내었다. 연면방전 회수에 따른 특성은 초기 방전 시에는 동일한 연면거리와 두께를 가진 다른 전극배치의 경우보다 5 (kV) 정도 높게 나타났으나, 방전이 거듭됨에 따라 그림 9 (a)와 같은 방전 탄화로의 생성에 의해 그 특성이 급

격히 저하되었다. 이는 FRP의 표면이 고온 상태로 상호 접촉이 좋아 방전 스트리머의 진전을 저지하는 효과를 가지나 방전이 진행되면 방전에너지가 FRP표면에 직접 작용하여 표면을 심하게 열화 시킨다고 사료된다.

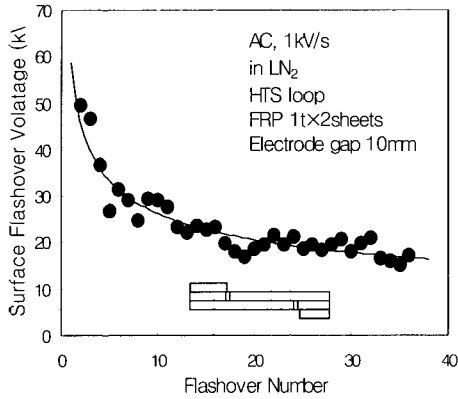


그림 10. 두 장의 FRP 접합면을 통한 연면방전에 의한 표면 열화.
Fig. 10. Aging tendency of contacted two FRP board by surface flashover.

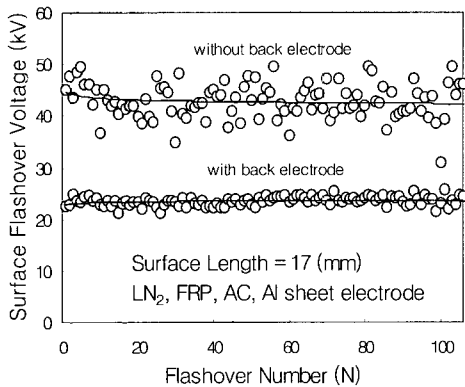


그림 11. 방전회수에 따른 연면방전 전압.
Fig. 11. Surface flashover voltage depending on flashover number.

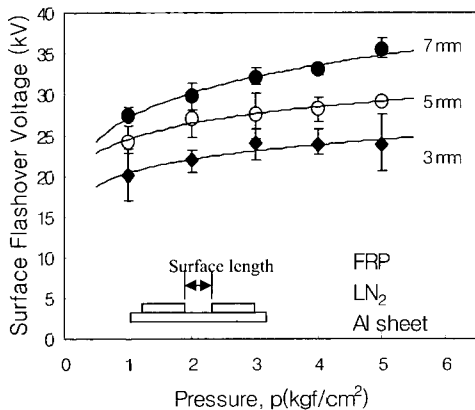


그림 12. 압력에 따른 연면방전 특성.
Fig. 12. Surface flashover voltage depending on pressure.

그림 11은 수평으로 전극이 배치된 경우 방전회수에 의한 연면방전 특성을 나타낸 그림이다. 그림 3의 a)와

c)의 전극배치를 이용하였다. 총 100회의 연면방전에서 방전전압은 거의 감소하지 않고 있으며, FRP의 표면 상태는 미세한 광택 차이만 나타났다. 이는 수직배치의 전극인 경우에는 전기력선의 방향이 절연물과 수직인 성분이 대부분으로 열화가 심하게 일어나고 있는데 반해, 전기력선의 방향이 FRP표면의 수평방향성분이 대부분을 차지하고 있고 방전에너지가 매우 작아 표면 열화가 매우 느리게 진행되고 있다고 사료된다. 예로 1초 동안의 50 (kV) 방전 시 방전에너지를 전원장치의 출력으로서 계산하면 약 150 (J)이며 열량으로는 36 (cal)에 해당하는데 이는 1 (g)의 액체질소를 승화시키는 데 드는 에너지에도 못 미치고 있다. 더욱이 방전은 매우 짧은 순간 이루어진다. 따라서 장시간의 연속적인 부분방전이 일어나는 수명특성에 대한 고찰이 더 필요하리라 사료된다.

그림 12는 연면방전 전압을 압력이 가해진 상태에서 측정하였다. 전극계는 그림 3 a)와 c)를 사용하였다. 압력의 증가와 더불어 연면방전 전압 또한 증가하였으나 압력 1, 2 (kgf/cm²)에서는 증가한 값을 나타냈지만 대체로 압력 3 (kgf/cm²) 이상에서는 그 증가 추세가 약하게 나타났다. 이는 액체질소 중의 기체발생이 억제된 효과로 여겨지고 있으나 더 자세한 연구가 필요하다.

3. 결 론

액체 질소 중에서 FRP의 절연과피 특성과 연면방전을 4가지로 구분한 경우와 압력에 따른 연면방전 특성을 연구하였다.

전극과 절연물의 배치에서 전극 사이에 절연물이 있는 전극의 수직배치와 절연물의 한 면에 수평으로 배치되어 있는 경우로 크게 구분하고 수평배치에 배후전극이 있는 경우와 직층 절연물 접촉면을 통한 연면방전을 살펴보았으며 그리고 연면방전회수에 따른 방전전압 특성을 살펴보았다.

FRP의 절연과피 전압은 구(지름 7mm) 대 평판전극에서 약 32kV/mm 정도의 절연내력을 나타내었다.

연면방전 특성은 전극의 수직배치가 수평배치에 비해 나쁘게 나타났으며, 부분방전의 발생으로 인한 절연물의 열화가 심하게 나타났다.

배후 전극이 있는 경우 더욱 연면방전 특성의 저하가 심하게 나타났다. 또한 부분방전 및 연면방전으로 인해 전극 사이에 질소 기포가 발생되었는데 전극간극이 큰 경우에는 연면방전에 영향을 미치지 않았다. 하지만 전극간격이 작은 경우 연면방전의 전파가 가속화됨을 관찰 할 수 있었다.

연면방전에 따른 FRP의 표면 열화는 수평배치일 경우 거의 일어나지 않았다. 하지만 FRP의 접촉면을 통한 연면방전은 방전회수에 따라 초기에는 같은 연면거리에 비해 높은 방전전압을 가졌으나 방전회수가 증가함에 따라 열화가 심하게 나타났다

압력에 따른 연면방전은 약 3 (kgf/cm²)에서 연면방전 전압이 포화되는 경향을 나타내었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] Craig Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Trans on Electrical Insulation, Vol.24, No.5, pp.765-786, 1989
- [2] H.Okubo, K.Uchida, " Weibull Statistical Analysis of Area and Volume Effects on the Breakdown Strength in Liquid Nitrogen", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No.3, pp.385-394, 1995
- [3] 西村誠介 et al. "極低温冷媒の不平等電界における耐電圧特性", ED-90-118, EIM-90-87
- [4] Tanzo Nitta, Masakuni Chiba, Hisashi Uematsu, "The Relationship among AC Surface Spark-over Voltage, Specific Capacitance of Solid Insulator and Bubbles in LN₂ and LHe", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.1773-1776, 2001
- [5] Tanzo Nitta, Masakuni Chiba, Hisashi Uematsu, "Characteristic of AC Surface Spark Voltage in LN₂ and LHe", IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol.10, No.1, pp.1325-1328, 2000
- [6] B.YSeok, N.Tamuro, M.Hara, "A Study of Thermal Bubble Behavior in the Simulated Electrode System of HT Superconducting Coils", IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.6, No.1, pp.109-116, 1999

저 자 소 개



정종만(鄭鍾萬)

1971년 9월 16일생, 1997년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



백승명(白承明)

1973년 3월 10일생, 1998년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 오오사카대학 대학원 졸업(공학박사), 현재 김상대 전기공학부 교수, 한국초전도·저온공학회 회장