

## 고온초전도 한류기의 절연설계를 위한 과냉각 액체질소의 절연내력 특성

### Dielectric Characteristics of Subcooled LN<sub>2</sub> for Insulation Design of HTS Fault Current Limiters

백승명\*, 정종만\*, 김상현\*\*

Seung-Myeong Baek\*, Jong-Man Joung\*, Sang-Hyun Kim\*\*

**Abstract:** In the dielectric insulation design of any high temperature superconducting (HTS) apparatus as well as HTS fault current limiter in the electrical power systems, the breakdown characteristics of cryogenic coolants such as liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) are an important factor of the insulating engineering. Previous reports concerned with the breakdown characteristics of liquid nitrogen have pointed out that bubbles and gaseous nitrogen have a great influence on their breakdown phenomena. However, useful data for practical insulation design of HTS fault current limiter operating at subcooled LN<sub>2</sub> have not been obtained enough.

Therefore, this paper presents an experimental investigation of breakdown phenomena in liquid nitrogen under AC voltage. And, we observed the breakdown voltage (BDV) of liquid nitrogen with lowering temperature. The Weibull plots of the breakdown voltage of subcooled LN<sub>2</sub> for the needle-plane electrode with d = 10 mm are studied. The dependence of breakdown voltage for needle-plane and pancake coil-pancake coil electrode on temperature is illustrated. The relationship between the AC breakdown characteristics and the temperature were clarified.

**Key Words:** breakdown characteristics, subcooled LN<sub>2</sub>, HTS fault current limiter

#### 1. 서 론

임계전류 특성이 향상된 고온초전도체가 발견됨에 따라 고온초전도체를 응용한 케이블, 변압기 및 한류기 등의 상용화에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 [1,2]. 하지만, 고온초전도기기의 상용화를 위해서는 초전도체의 특성을 유지하기 위한 냉매와 극저온의 지속적인 유지가 필요하다. 고온초전도기기에 사용되는 액체질소는 양산이 용이하고 경제적이므로 시스템에 대부분 냉매로 사용하고 있다. 따라서 고온초전도체를

실용화하기 위해서 액체질소의 전기적 특성 연구는 가장 기본적인 분야이므로 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3-7]. 최근, 국내에서도 과학기술부에서 추진중인 “21세기 프론티어 연구개발사업”의 일환으로 “차세대 초전도 응용기술개발사업”이 선정되어 고온초전도 기기의 실용화를 위한 연구가 활발히 진행중이다. 하지만 기존의 고온초전도 기기는 액체질소 비등온도인 77 K에서 운전됨으로 액체질소의 비등온에 의해 발생한 미소 기포와 펜치 시 발생되는 다량의 기포에 의해 전기절연에 치명적인 영향을 미친다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 주로 액체질소의 압력을 높이거나, 온도를 낮추어 기포를 억제한 후 절연특성을 증대하는 연구가 진행되었다[8,9]. 특히, 액체질소를 77 K 이하로 Subcooled하여 냉매로 사용할 경우 고온초전도체의 임계전류 특성을 향상시킬 뿐 아니라 미소기포를 억제시켜 액체질소의 절연 내력을 높여 액체질소를 냉매로 사용하는 초전도 기기의 전기적 특성을 향상시킬 수 있어 Subcooled 액체질소의 절연특성 연구에 대한 필요성은 더욱 증가되고 있다. 하지만 액체질소를 77 K 이하의 온도인 Subcooled 상태를 만들기 위해서는 냉동기 등의 장비가 필요하므로 Subcooled 액체질소의 절연 특성에 대한 연구가 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 pancake 코일형 한류기 변압기 뿐 아니라 고온초전도 기기의 절연설계에 필요한 온도변화에 따른 액체질소의 절연특성을 고찰하기 위하여 진공 펌프를 사용한 Subcooled 액체질소 생산할 수 있는 극저온 용기를 고안하였으며 이 용기를 이용하여 전극형상과 온도 변화에 따른 액체질소의 절연특성을 고찰하였다. Subcooled 액체질소를 냉매로 사용하는 고온초전도 기기의 최적의 절연설계를 위해 Weibull 분포 해석을 하였다.

#### 2. 실험 방법 및 절차

그림 1에 본 실험에 사용한 극저온 용기의 개략도를 나타낸다. 77 K에서 65 K 사이의 온도인 액체질소의 절연파괴 특성을 고찰하기 위해 극저온 용기를 제작하였다. 외부 침입열을 최소화하기 위해 극저온 용기 제작 외부에 진공 층을 두었으며 진공 층 내부에 외부 용기와 내부 용기가 있다. 대기압 상태에서 Subcooled 액체질소의 절연파괴 특성을 고찰하기 위해 외부 용기와 내부 용기에 액체질소를 넣은 후 진공 펌프(600 l/min)를 이용하여 외부 용기를 펌핑하였다. 외부 용기는 압력이 떨어지면서 외부 용기 내에 있는 액체질소의 온도가 떨어지게 되고 열전도에 의해 내부 용기내의 액체질소의 온도가 떨어지게 된다. 외

\* 학생회원: 경상대 대학원 전기공학과 박사과정 수료

\*\* 정회원: 경상대 대학원 전기공학과 교수(공학원)

원고접수: 2003년 4월 18일

심사완료: 2003년 9월 24일

부 용기내의 액체질소는 대기압보다 낮은 압력상태가 되지만 내부 용기내의 액체질소는 압력 조절기로 조절하여 대기압 상태로 조절이 가능하다. 외부 용기의 펌핑량을 조절하여 내부 용기의 액체질소의 온도를 조절하였다. 이 때 온도 측정은 Chromel-CuFe(0.15%) 열전대를 사용하였으며 열전대는 평판전극 중앙 하부 (Thermocouple A), 평판 중앙 하부에서 수평으로 70 mm 떨어진 곳 (Thermocouple B) 그리고 평판 중앙 하부에서 수평으로 70 mm 떨어진 곳에서 수직으로 70 mm 떨어진 곳 (Thermocouple C)로 세 군데 부착하여 온도를 측정하였다. 각 지점의 온도는 멀티메터(KEITHLEY 2002)를 이용하여 실시간으로 온도를 측정하였다. 모든 절연파괴 실험은 온도 변화 0.5 K이내에서 측정하였다. 액체질소의 높이를 관찰하기 위해 레벨미터(AMI model 185)를 내측용기 내에 설치하여 실시간으로 높이 변화를 관찰하였다.

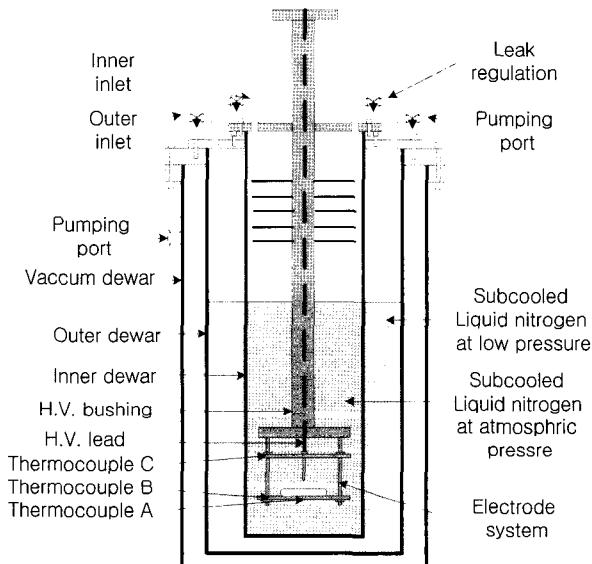


그림 1. 극저온 용기.

Fig. 1. Cryostat.

액체질소의 온도에 따른 절연파괴 특성을 고찰하기 위해 침-평판, 구-평판 그리고 pancake-pancake 전극계를 이용하여 내부 용기 내의 액체질소의 온도를 내리면서 절연파괴 특성을 고찰하였다. 전극계 구성에 사용한 전극의 치수를 표 1에 나타낸다. 침, 구 및 평판 전극은 SUS 304로 만들었다. 평판 전극의 직경은 60 mm이고 두께는 10 mm이고, 구 전극의 반경은 8.8 mm이다. 평판과 구 전극의 표면은 0.1 μm 이내로 경면 처리하였다. 침 전극의 선단 곡률 반경은 25 μm이고 선단 각은 24°이다. pancake 전극은 두께 0.3 mm, 폭 3.5 mm의 Kapton 필름으로 절연시킨은 피복 Bi-2223 선재를 사용하였으며 GFRP 지지대에 pancake 형상으로 제작하였다. 전극의 내경은 30 mm, 외경은 60 mm이다. 은 피복 Bi-2223 선재의 선단 곡률 반경은 0.24 mm이다. 각 전극을 이용하여 전극계를 구성한 후 극저온 용기에 배치하였다. 고전압 인가를 위해 BARU 사의 AC (60 Hz, 100 kV) 고전압 장치를 사용하였으며 절연파괴 발생 까지 1 kV/sec의 속도로 전압을 상승시켰다.

표 1. 절연파괴 전압측정에 사용한 전극.

Table 1. Electrodes for breakdown measurement.

Unit : mm			
Shape	Sphere	Needle	Panckae
Tip Radius	8.8	0.025	0.24
Material	Stainless steel		Ag sheathed Bi-2223 tape
Electrode gap	1-3	1-10	1-5

절연파괴 전압 측정은 동일한 조건에서 최소 10회 이상 실시하였으며 매회 1분의 시간 간격을 두었다. 실험 결과에서 절연파괴 전압은 평균전압을 구하여 최소 값과 최대 값과 함께 나타내었다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 2에 본 실험에 사용한 전극계의 각 부분의 시간에 따른 온도 분포를 나타낸다. 진공펌프를 이용하여 외부의 액체질소의 온도를 내려 전도에 의해 내부의 온도를 내리기 때문에 그림 2에서 보듯이 액체의 온도는 위쪽에서 먼저 냉각된 후 아래쪽으로 냉각이 됨을 알 수 있다. 그리고 전도에 의해 냉각이 되기 때문에 내부 용기의 벽쪽의 액체가 중앙쪽의 액체보다 온도가 낮음을 알 수 있다. 온도 차이는 열전대 A의 지점과 C의 지점이 약 2 K 정도이고 열전대 A의 지정과 B의 지점은 약 1 K 정도로 나타났다. 실험 전극 부부의 액체질소의 온도를 65 K까지 내리는데 약 187분이 소요되었다.

그림 3에 내부 용기에 있는 액체질소의 시간에 따른 높이 변화를 나타낸다. 액체질소의 온도를 내리기 전의 높이는 459 mm이었으며 열전대 A지점의 온도가 65 K가 될 때의 높이는 446 mm이다. 온도가 액체질소 증발량이 크지 않음을 알 수 있다. 그리고 내부 용기내의 액체질소 높이의 감소 폭은 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 액체의 온도가 내려감에 따라 증발량이 더욱 감소함에 따른 것으로 사료된다.

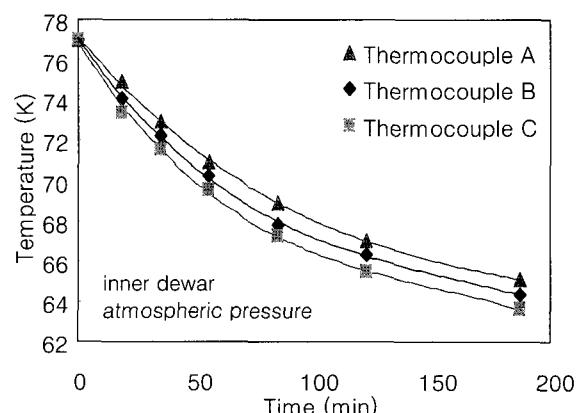


그림 2. 펌핑 시간에 따른 내부 용기내의 액체질소 온도.

Fig. 2. Temperature of LN<sub>2</sub> in inner dewar as a function of pumping time.

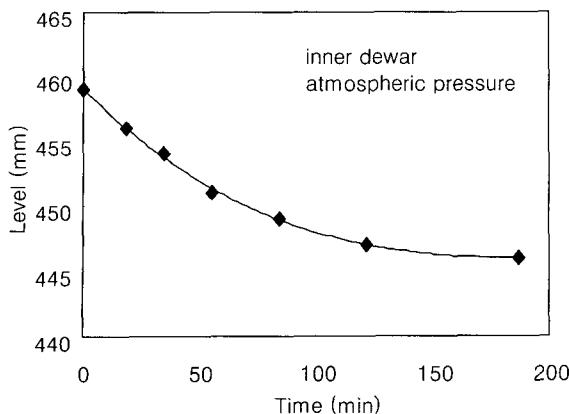


그림 3. 펌핑 시간에 따른 내부 용기내의 액체질소 높이.

Fig. 3. Level of  $\text{LN}_2$  in inner dewar as a function of pumping time.

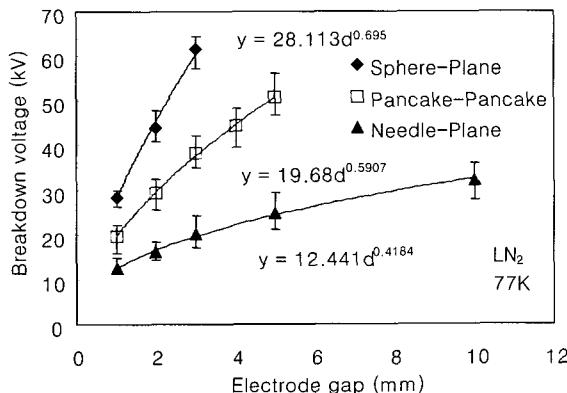


그림 4. 전극계에서 다양한 전극 거리에 따른 액체 질소의 절연파괴 전압.

Fig. 4. Breakdown voltage of  $\text{LN}_2$  according to various distances of three electrodes.

그림 4에 침-평판, 구-평판, pancake-pancake 전극계에서 전극간 거리에 따른 액체질소의 절연파괴 전압을 나타낸다. 절연파괴 전압은 전극간 거리가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였으며, 전극간 거리뿐 아니라 전극 형상에 크게 의존하는 경향을 나타내었다. 전극간 거리  $d$ 와 절연파괴전압 BDV는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$BDV = kd^m$$

여기서  $k$ 와  $m$ 은 상수이다.

불평등 전계 상태인 침-구 전극계에서 절연파괴 전압이 가장 낮게 나타났으며, pancake-pancake 전극계는 침-구 전극계와 구-평판 전극계의 중간 값을 나타내었다. 준평등 전계 상태인 구-평판 전극계에서 액체질소의 절연파괴 전압은  $BDV = 28.113 d^{0.695}$ 로 나타났다.

그림 5는 침-평판 전극계에서 다양한 온도에서 액체질소의 절연파괴 전압을 나타낸다. 온도가 내려감에 따라 절연파괴 전압은 선형적으로 증가하였다.

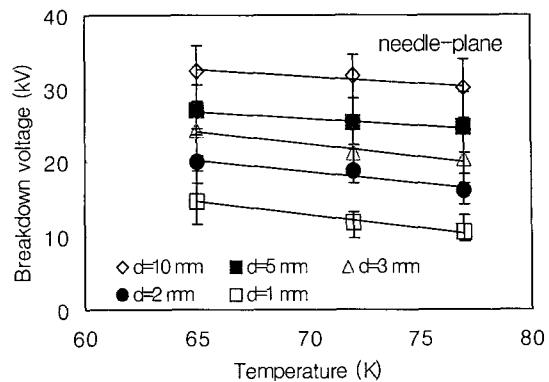


그림 5. 절연파괴 전압의 온도 의존성.

Fig. 5. The temperature dependence of breakdown voltage.

예를 들어,  $d=1\text{ mm}$ 일 때 65 K의 액체질소의 평균 절연파괴전압은 77 K 액체질소의 평균 절연파괴전압보다 약 42.7 % 높게 나타났으며,  $d=10\text{ mm}$ 일 때는 약 7.8 % 높게 나타났다. 이러한 경향은 다음과 같이 고찰할 수 있다. 액체질소 내에 존재하는 미소기포의 유전율은 액체질소의 유전율보다 낮아 전기적 스트레스를 액체질소보다 더 크게 받는다. 따라서 미소기포에서 부분방전이 발생이 용이하여 미소기포를 포함한 액체질소는 절연파괴가 쉽게 일어나게 된다. 하지만 액체질소의 온도를 낮추면 미소기포의 수명이 단축되고 액체질소 내의 미소기포의 개수가 줄어 액체질소의 절연파괴 전압이 높아지게 된다.

그림 6은 그림 5에서 측정한 절연파괴 전압을 이용하여 고온초전도 한류기 등 고온초전도 기기의 절연설계를 위해 침-평판 전극계에서 전극간 거리에 따른 77 K, 72 K 및 65 K 액체질소의 절연파괴 전압을 Weibull 분포를 이용하여 나타낸 것이다.

Weibull 분포에서 절연파괴 확률은 전계  $E$ 에서 식 (2)과 같다.

$$p = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{E}{E_i} \right)^m \right] \quad (2)$$

여기서,  $m$ 은 형상 파라미터이고,  $E_i$ 은 척도 파라미터이다.

Weibull 분포에서 형상 파라미터와 척도 파라미터는 온도가 내려감에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 척도 파라미터를 예로 들면  $d=1\text{ mm}$ 일 때, 77 K일 때 10.98 kV/mm, 72 K일 때 14.55 kV/mm, 65 K일 때 15.67 kV/mm로 온도가 낮아짐에 따라 증가함을 알 수 있다. 전극간 거리가 증가하여도 같은 경향을 나타내었다. 따라서 65 K 액체질소에서 고온초전도 기기를 운전하면 77 K에서 운전하는 경우보다 기기의 절연측면에서 더 큰 이득을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

그림 7에  $d=1\text{ mm}$ 일 때 침-평판, 구-평판 그리고 pancake-pancake 전극계에서 온도 감소에 따른 절연파괴 전압의 경향을 나타낸다. 그림 7에 나타나듯이 온도 낮아짐에 따라 절연파괴 전압의 증가폭은 구-평판 전극계가 제일 크게 나타났으며, 침-평판 전극계가 제일 작게 나타났다. 이것은 전극의 곡률 반경과 관련된 것으로 사료된다. 즉, pancake 전극제작에 사용한은 괴복 B-2223 선재의 선단 곡률 반경이 침 전극의

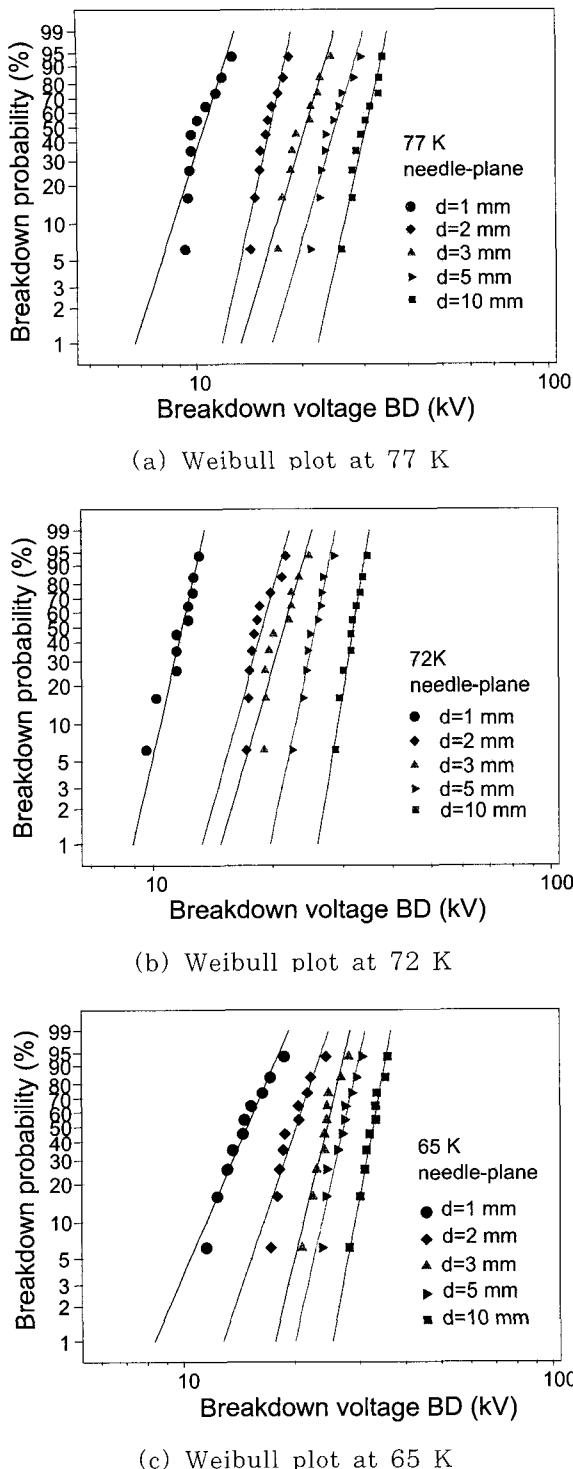


그림 6. 65 K, 72 K 및 77 K 액체질소의 절연파괴 확률.

Fig. 6. Breakdown probability as a function of temperature.

선단 곡률 반경보다 약 10배정도 크기 때문에 침 전극이 더 큰 결점율을 가진다. 따라서 침 전극의 절연파괴 전압이 pancake 전극보다 낮다. 그리고 선단 곡률 반경이 크면 스트레스 받는 면적이 크게 되어 액체질소의 상태에 따른 영향이 크게 된다. 따라서 액체질소의 온도를 낮추면 미소 기포의 수가 줄어들어 선단 곡률 반경이 침 전극보다 큰 pancake coil 전극계에서 절연파괴 전압 상승률이 더 크게 나타난 것으로 사료된다.

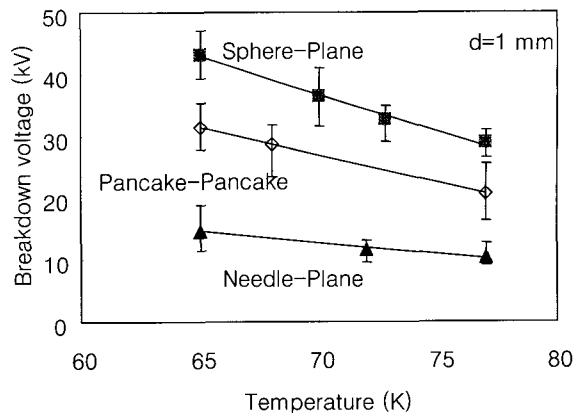


그림 7. 다른 전극계에서 절연파괴 전압의 온도 의존성.

Fig. 7. The temperature dependence of breakdown voltage for different electrode systems.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 액체질소의 온도를 77 K에서 65 K까지 변화하여 다양한 전극계에서 절연파괴 실험을 실시하였다. 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

액체질소의 절연파괴 전압은 전극간 간격이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하고 준 평등 전극계에서

$V_B = 28.113 d^{0.695}$ 로 나타났다. 액체질소를 Subcooled한 65 K 액체질소의 절연파괴 전압이 77 K 액체질소의 절연파괴 전압보다 높게 나타났다. 이것은 액체질소의 온도를 낮추면 절연내력이 낮은 미소 기포의 수명이 단축되고 액체질소 내의 미소 기포의 개수가 줄어들어 액체질소의 절연파괴 전압이 높아지게 되는 것으로 사료된다. 침-평판 전극을 이용하여 온도 변화에 따른 절연파괴전압을 Weibull 분포로 나타낸 결과 온도가 낮아짐에 따라 형상 및 척도 파라미터가 증가하였다 구 전극은 침 전극보다 결점이 작기 때문에 절연파괴 전압은 높게 나타났으며 온도를 낮추면서 절연파괴 전압을 측정한 결과 구-평판 전극계에서 절연파괴 전압 증가폭이 침-평판 전극계의 절연파괴 전압 증가폭보다 더욱 높았다.

본 연구는 77 K 및 65 K 액체질소의 AC 절연파괴 특성을 명확히 하였으며, 고온초전도 기기의 절연설계에 기초자료로 유용할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

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

#### 참 고 문 헌

- [1] F.Y. Chu, "Application of High Temperature Superconducting Materials in the Electric Power System and Ontario Hydro Perspective", World Congress on

- Superconductivity, Houston, 129-138, 1998.
- [2] H Zueger, "630kVA high temperature superconducting transformer", *Cryogenics* 38 (1998)1169-1172.
- [3] J. Gerhold, "Electrical Insulation in Superconducting Power Systems". *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 8, No. 3, pp. 14-21, May/June 1992.
- [4] KN Mathes, "Dielectric Properties of Cryogenic Liquids", *IEEE Trans. Electrical Insulation*, Vol. 12, No. 1, pp. 24-32, 1967.
- [5] Sang-Hyun Kim, Jong-Man Jeong, Young-Seok Kim, Cheon-Oh Kim, Seung-Myeong Baek, "Influence of bubble size and flow velocity on AC electrical breakdown characteristics of LN<sub>2</sub>", *Cryogenics* 42 (2002) 411-414.
- [6] Nishijima S and Hara M, "Mechanical influence on long term dielectric performance of insulants", *Cryogenics* 1998; 38(11): 1105-1113.
- [7] 김 상현, 마 대영, 김 현희, 김 해종, 임 응춘, "초전도 케이블용 냉매인 극저온 액체 기체의 전기적 성질", *대한전기학회논문지*, Vol. 42, pp. 78-85, 1993.
- [8] M. Hara and H. Okubo, "Electrical insulation characteristic of superconducting power apparatus", *Cryogenics* 38 (1998)1083-1093.
- [9] T. C. Hua and J. J. Xu, "Quenching boiling in subcooled liquid nitrogen for solidification of aqueous materials", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 292, Issue 2, 15, pp. 169-172, November 2000.

### 저자 소개



백승명(白承明)

1973년 3월 10일 생, 1998년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2003년 현재 동대학원 전기공학과 박사과정 수료



정종만(鄭鍾萬)

1971년 9월 16일 생, 1997년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2003년 현재 동대학원 전기공학과 박사과정 수료



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일 생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년 일본 오사카 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986-1989년 한국전기연구원 초전도 연구실장, 1999-2001년 경상대학교 공과대학 학장, 2000-2002년 한국 초전도·저온공학회 회장, 2003년 현재 경상대학교 교수, 대한전기학회 경남지부장.