

논문 15-11-11

## 고온초전도 기기응용을 위한 모의 퀘칭 환경에서 액체질소의 절연파괴 특성

### Electrical Breakdown Characteristics of LN<sub>2</sub> under Simulated Quenching Conditions for Application of HTS Apparatus

백승명, 정종만, 김상현  
(Seung-Myeong Baek, Jong-Man Jung, and Sang-Hyun Kim)

#### Abstract

The electrical breakdown characteristics of liquid nitrogen(LN<sub>2</sub>) were studied under simulated quenching conditions for application of HTS apparatus. The experimental results for various quenching condition revealed that the breakdown voltage of LN<sub>2</sub> with bubble flow velocity and gap spacing. In the case, breakdown voltage decreases gradually with the bubble velocity. When it is bubble velocity from 0 to 1 l/min, breakdown voltage rapidly decreases but decreases from 2 l/min to 10 l/min slowly. The breakdown voltage for vertical electrode arrangement is higher than that for horizontal electrode arrangement. Also, it did a electric field and potential distribution interpreting at the liquid nitrogen when the bubble existed. The plots of equipotential lines for three cases are also shown.

**Key Words** : Electrical breakdown, Liquid nitrogen, Quenching conditions, HTS apparatus

#### 1. 서론

고온초전도체가 발견된 이후로 에너지 시스템에 고온초전도체를 접목시켜 응용하려는 연구가 활발히 전개되었다. 최근에는 고온초전도체 본연의 기계적 취약성을 보강한 선재가 많이 개발되면서 MRI, SMES뿐 아니라 케이블, 변압기, 한류기 등 그 응용범위가 더욱 확대되고 있다[1-3]. 하지만, 고온초전도체를 응용하기 위해서는 초전도성을 유지하기 위한 극저온 유지 시스템이 필수적이다. 이러한 관점에서 LN<sub>2</sub>는 사용 비용이 저렴하여 냉매로서 경제성이 높고 절연물로도 사용할 수 있어

향후 고온초전도 기기의 냉매로 많이 사용될 것으로 기대되기 때문에 극저온 분야 연구자들에 의해 고온초전도 기기의 전기절연설계 및 운용상 안정성을 확보하기 위해 전기적 특성연구가 활발히 이루어지고 있다[4-10]. 하지만, LN<sub>2</sub>의 특성 연구는 제한적인 조건에서 이루어져 왔으며, 다양한 초전도 기기의 설계에 충분한 정보를 제공하지 못하고 있다. 특히, pancake coil형으로 응용이 기대되는 고온초전도 변압기, 한류기 등의 전기적 절연설계를 위한 LN<sub>2</sub> 절연파괴특성 연구는 거의 이루어지지 않고 있기 때문에 이 분야의 연구가 절실히 요구되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 Pancake coil형 고온초전도 기기의 수명과 안정성확보를 위하여 모의 퀘칭 전극을 이용하여 LN<sub>2</sub>내에 기포를 발생시켜 LN<sub>2</sub>와 기포 복합체의 절연파괴 특성을 고찰하였다. 그리고 변압기와 한류기 등의 절연, 기계적 지지 및 GFRP로 구성된 냉각통로에 기포가 존재하는 경우 LN<sub>2</sub>의 절연특성에 미치는 영향을

경상대학교 전기공학과 및 컴퓨터·자동화응용 기술 연구소  
(진주시 가좌동 900,  
Fax : 055-759-2723  
E-mail : trebari@hanmail.net)  
2002년 5월 27일 접수, 2002년 7월 19일 1차 심사완료  
2002년 8월 9일 최종 심사완료

고찰하였다. 또한 기포가 냉각통로 내에 존재하는 위치에 따라 전계분포 해석을 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

그림 1에 실험장치 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 cryostat, 전원, 기포발생 전극부, 기체질소(GN<sub>2</sub>) 주입부와 관측부로 구성된다. cryostat는 pyrex 유리로 된 관측창이 있으며, FRP를 이용하여 높이 1650mm, 내경 300mm과 외경 430mm로 제작하였다. cryostat 내부에 샘플을 부착할 수 있는 플랜지를 FRP를 이용하여 제작하였으며, 외부의 열침입을 막기 위한 LN<sub>2</sub>와 진공의 복합층으로 구성되어 있다. 전원은 BARU Dieltes(Type DTA E, 최대교류전압 100kV)를 사용하였다. 기포발생 전극은 stainless를 이용하여 제작하였으며 전극과 전극홀더 그리고 GN<sub>2</sub> 호스와 연결하는 연결관으로 구성되어 있다. 전극의 직경은 60mm이고 기포를 발생시키기 위해 반경 15mm에 직경 1mm의 구멍을 뚫었다. 구멍간 21°의 사이각을 두었으며 중심부에 1개를 포함하여 총 18개이다. 기포발생 전극의 표면은 1 $\mu$ m이하로 경면 처리하였다. GN<sub>2</sub> 주입부는 기체질소용기 2개, 각 용기마다 압력밸브 2개와 flow-meter 1개가 부착되어 있다. 관측부는 램프와 CCD 카메라 그리고 관측한 내용을 저장할 수 있는 컴퓨터로 구성이 되어 있다.

절연파괴특성 실험은 먼저 기포발생 전극을 이용하여 전극계를 구성한 후 FRP로 제작한 플랜지에 부착하여 외측을 진공시킨 cryostat에 장착하였다.

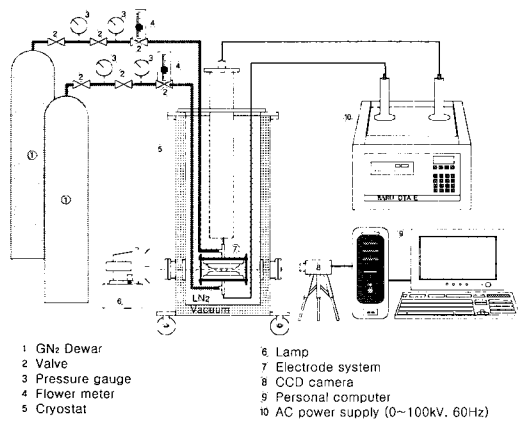


그림 1. 실험장치 개략도.  
Fig. 1. Schematic drawing of experimental setup.

cryostat 내부에 상용 LN<sub>2</sub>(비점 77K)를 넣고 LN<sub>2</sub>가 안정이 된 후 AC 전원을 이용하여 전압을 인가하였다. 전압은 1kV/sec로 증가시키면서 10회

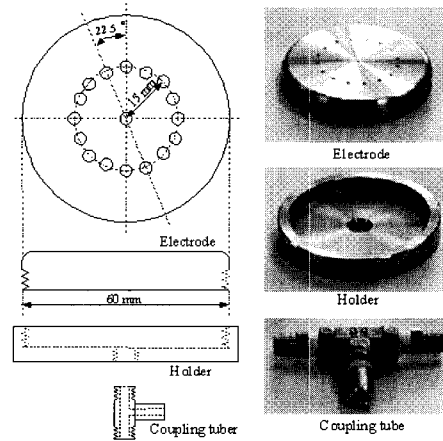


그림 2. 기포발생 전극.  
Fig. 2. Electrode for bubble generation.

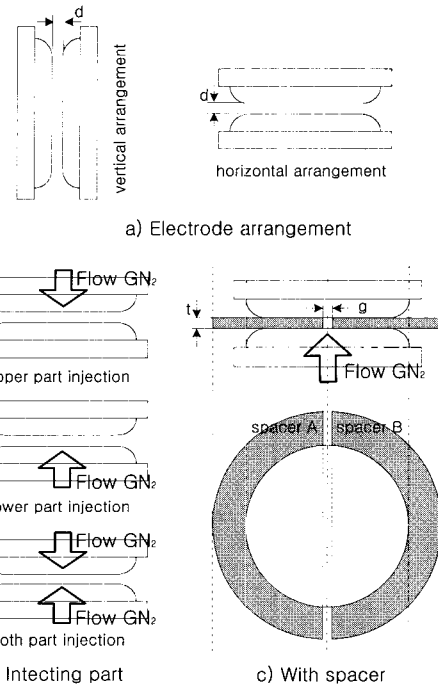


그림 3. 전극계.  
Fig. 3. Electrode system.

측정하였다. 기포 발생을 위해 GN<sub>2</sub>를 기포발생 전극에 주입하였으며, 기포량은 압력계와 flow-meter를 이용하여 기포량을 조절하였다. 전극계는 고온 초전도 변압기와 유도형 환류기 등은 초전도 선재의 지지 및 전기적 절연과 냉각 등을 고려하여 spacer가 없는 경우와 spacer가 있는 두 가지 경우를 고려하여 제작하였다. spacer가 없는 즉, 전극 사이에 LN<sub>2</sub>만 존재하는 경우 전극배치 및 기포발생 위치에 대하여 전극간 거리 d와 기포량을 증가시키면서 절연파괴특성을 고찰하였다. spacer가 존재하는 경우 본 실험에서는 기포발생 전극에 spacer를 끼운 후 전극과 spacer를 고정시켰다. spacer가 존재하는 경우 double pancake coil형 초전도 기기를 제작할 경우를 고려하여 spacer를 A와 B 둘로 나누어서 실험하였다. spacer의 두께를 t라하고, spacer A와 spacer B의 사이 간격을 g라고 하였다. GN<sub>2</sub>를 0~10 l/min까지 주입하여 기포를 발생시키면서 spacer 두께 t와 간격 g를 변화시키면서 AC 전압을 인가하여 절연파괴특성을 고찰하였다. 그림 3에 spacer가 없는 경우와 있는 경우의 전극계를 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 4에 spacer가 없는 경우, 기포량에 따른 절연파괴 전압의 전극거리 의존성을 나타낸다. 전극간 거리가 1mm이고 기포량이 1 l/min일 때 절연파괴전압은 기포가 존재하지 않을 때보다 약 40% 낮은 전압값을 나타내었다. 하지만 전극간 거리가 3mm이고 기포량이 1 l/min이면 기포가 존재하지 않을 때 보다 약 15% 낮은 전압값을 나타내었다. 기포량이 10 l/min일 때 전극간 거리 1mm과 3mm모두 기포가 존재하지 않을 때의 전압값의 약 50% 낮은 값을 나타내었다. 그림 5는 전극거리가 각각 1mm, 2mm와 3mm일 때 기포의 주입 위치에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. 전극은 수평으로 배치하였으며 GN<sub>2</sub>를 위전극, 아래전극 그리고 위와 아래 두 전극 동시에 주입하면서 절연파괴전압을 구하였다. 절연파괴전압은 평균값을 나타낸다. 전극의 거리가 짧으면 기포량이 1 l/min에도 절연파괴 전압이 급격하게 감소하지만 전극거리가 멀어지면 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 절연파괴 전압은 기포 주입위치에 크게 의존하지 않았다.

그림 6에 전극배치에 따른 절연파괴 전압을 나

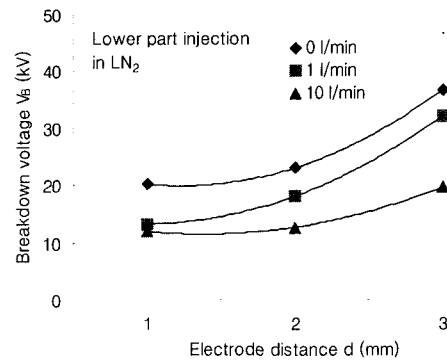


그림 4. 기포가 존재할 경우 절연파괴전압의 전극거리 의존성.

Fig. 4. Relationship between breakdown voltage with bubble and electrode length.

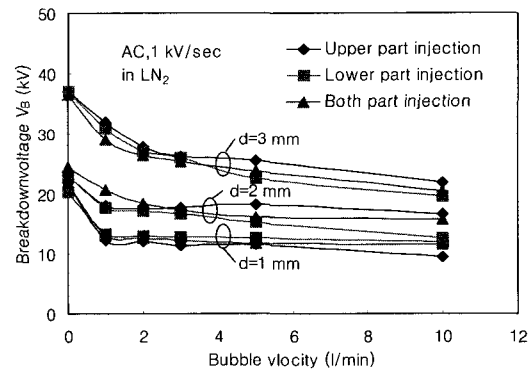


그림 5. 기포속도 및 위치에 따른 절연파괴전압.

Fig. 5. Breakdown voltage as a function of bubble velocity and position.

타낸다. 수평, 수직배치 모두 기포량이 증가하면서 감소하였지만, 기포 발생초기에 수직배치의 경우 수평배치보다 파괴전압이 약간 높게 나타났다. 하지만 기포량이 증가할수록 비슷한 경향을 나타내었다. 이것은 수평배치의 경우 기포 발생초기에 전극으로부터 나온 기포가 부력에 의해 상승하다가 상부전극에 부딪쳐 순간적으로 멈추게 되고 멈춘 기포는 전극과 전극을 GN<sub>2</sub>로 연결하는 채널을 형성하게 되어 LN<sub>2</sub>의 절연파괴전압이 낮게 나타나지만 수직배치의 경우 전극에서 나온 기포가 아무런 장애 없이 부력에 의해 외부로 배출되어 전극과 전극에 채널을 형성하지 못하므로 LN<sub>2</sub>의 절연파괴 전압이 수평배치보다 약간 높게 나타나는 것으로

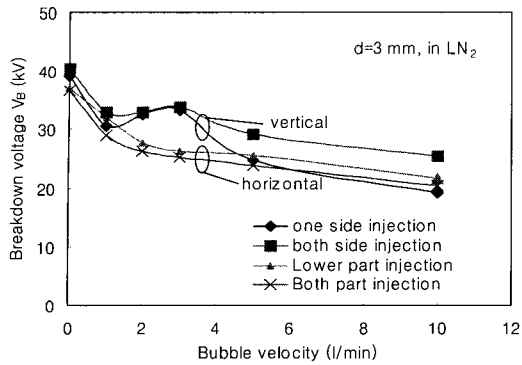


그림 6. 전극배치에 따른 절연파괴전압.

Fig. 6. Breakdown voltage as a function of electrode arrangement.

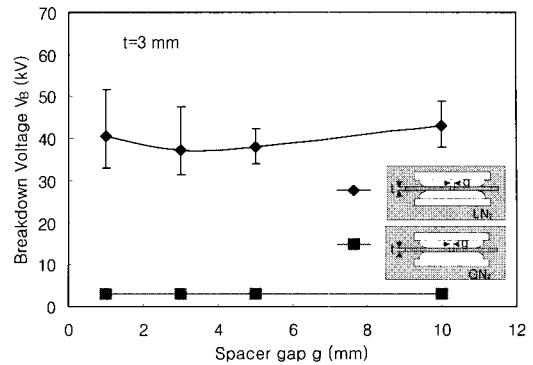


그림 8. spacer 간격 g의 따른 절연파괴전압.

Fig. 8. Breakdown voltage as a function of spacer distance g.

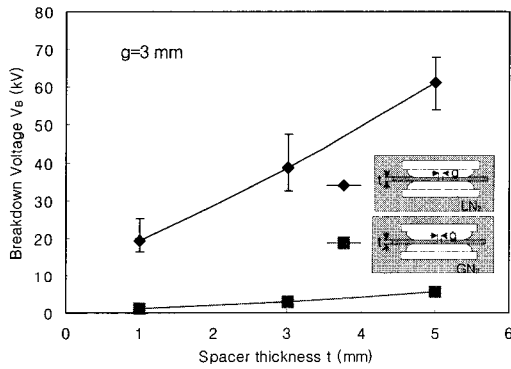


그림 7. spacer 두께 t에 따른 절연파괴전압.

Fig. 7. Breakdown voltage as a function of spacer thickness t.

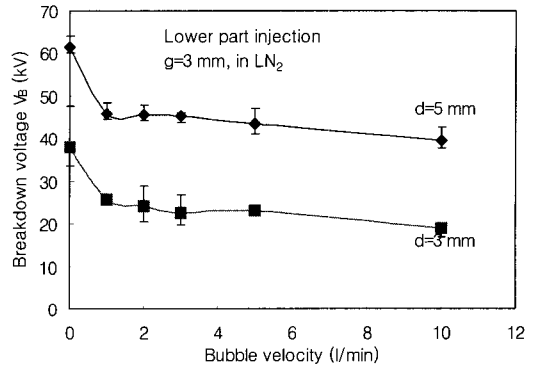


그림 9. 기포속도와 spacer 두께 t의 변화에 따른 LN2의 절연파괴전압.

Fig. 9. Breakdown voltage as a function of bubble velocity and spacer thickness t.

사료된다. 하지만 기포량이 증가할수록 수직배치에서도 기포 채널이 형성되어 수평배치와 같은 경향을 나타내는 것으로 사료된다.

그림 7에 spacer가 존재하고, 기포를 주입하지 않았을 때 spacer 두께 t의 변화에 따른 LN<sub>2</sub>와 GN<sub>2</sub>의 절연내력을 나타내고, 그림 8에 spacer 간격 g의 변화에 따른 LN<sub>2</sub>와 GN<sub>2</sub>의 절연파괴전압을 나타낸다. spacer 두께 t가 증가할수록 LN<sub>2</sub>의 파괴전압은 증가하지만 spacer 간격 g의 증가에 따라서 거의 일정한 값을 나타내었다.

그림 9에 기포가 존재하는 경우 spacer 두께 t의 변화에 따른 LN<sub>2</sub>의 절연파괴전압을 나타낸다. 기포를 주입하면 LN<sub>2</sub>의 절연파괴전압은 급히 감소하지만 기포량이 증가하여도 절연파괴전압은 더 이

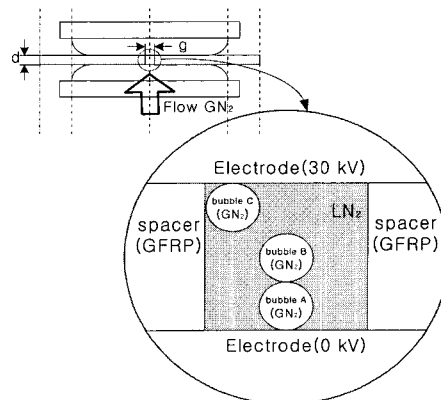
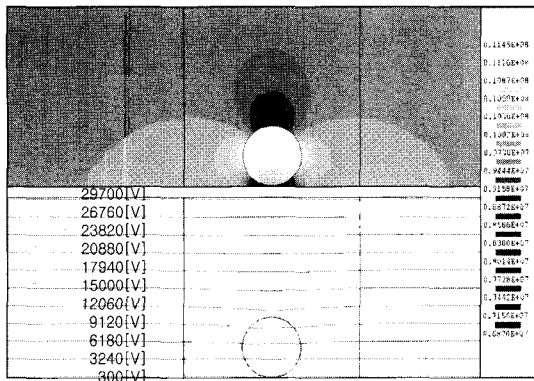
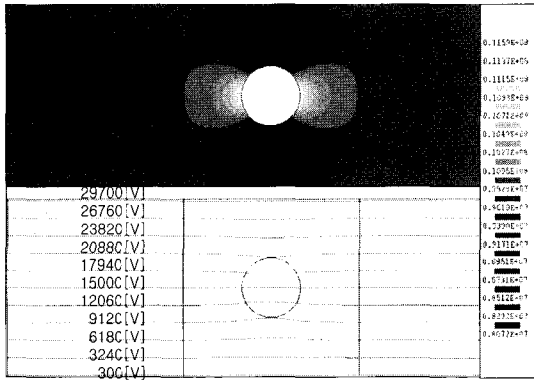


그림 10. 해석 모델.

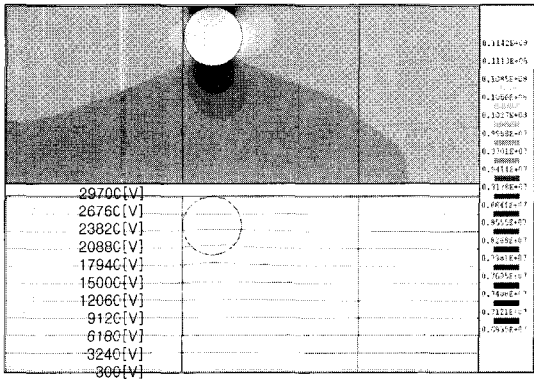
Fig. 10. Analysis model.



a) bubble A.



b) bubble B.



c) bubble C.

그림 11. 전계 및 전위분포  
Fig. 11. Electric field and potential distribution.

상 감소하지 않고 일정하게 나타났다. spacer가 존재하지 않는 경우 전극간 거리가 멀어짐에 따라 절연 파괴 전압은 완만하게 감소하는 경향을 나타

내었지만, spacer가 존재하는 경우 spacer 두께가 커져도 절연 파괴 전압은 두께가 짝을 때와 마찬가지로 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. spacer가 없는 경우보다 절연 내력이 더욱 약화됨을 알 수 있다. 이는 기포에 의한 절연 파괴 전압과 spacer의 연면 방전의 상호작용에 의한 것으로 사료된다.

그림 10에 기포의 위치에 따른 전계 분포를 해석하였다. 전계와 전위 분포 해석은 Flux2D를 이용하여 기포의 위치와 개수에 대하여 행하였다. 해석에 사용된 전압은 DC30 kV이고 기포의 직경은 1mm로 고정하였다. FRP의 유전율  $\epsilon_f$ 는 4.45, LN<sub>2</sub>의 유전율  $\epsilon_l$ 는 1.43, GN<sub>2</sub>의 유전율  $\epsilon_g$ 는 1.00로 하였다.

그림 11에 전계와 전위 분포 해석 결과를 나타낸다. 기포가 존재하는 경우 구조물이나 액체가 스트레서를 많이 받으며 특히, 구조물에 기포가 포집되는 경우 외부 구조물이나 액체는 전기적 스트레스를 더욱 크게 받는 것으로 나타났다.

이것은 기포가 존재함으로써 LN<sub>2</sub>와 GN<sub>2</sub>의 복합 절연계로 구성되고 복합 절연계에서 LN<sub>2</sub>에 전기적 스트레스가 더욱 크게 작용하여 절연 파괴가 쉽게 발생하여 전체 절연 내력이 약화되는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 켈치 현상을 모의하여 기포 발생 전극을 이용하여 기포 발생시 LN<sub>2</sub>의 절연 특성을 고찰하였으며, 컴퓨터를 이용한 전계 분포를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

기포가 존재할 때 LN<sub>2</sub>의 절연 내력은 저하되는 경향을 나타내었다. spacer가 없는 경우, 전극 거리가 1mm일 때 작은 양의 기포에도 절연 파괴 전압은 급격히 감소하였으며, 전극 거리가 멀어짐에 따라 절연 파괴 전압은 완만히 감소하여 포화하는 경향을 나타내었다. 하지만 spacer가 존재하는 경우, spacer가 없는 경우보다 더욱 급격히 감소하였다. 절연 내력 저하에 미치는 기포의 영향은 spacer가 없는 경우보다 있는 경우에 크게 나타났으며 전극간 거리가 좁을수록 크게 나타났다. 기포가 존재하는 위치에 따른 전계 분포를 한 결과 기포가 존재하면 기포가 없는 경우보다 전기적 스트레스를 많이 받는 것으로 나타났다. 따라서 기포가 포함된 복합 절연계에서 LN<sub>2</sub>에 전기적 스트레스가 더욱 크게 작용하여 절연 파괴가 쉽게 발생하여 전체 절연

내력이 약화되는 것으로 사료된다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

- [1] H. Zueger, "630kVA high temperature superconducting transformer," *Cryogenics*, Vol. 38 p. 1169, 1998.
- [2] M. Nassi, N. Kelley, P. Ladie, P. Corsaro, G. Ciletta, and C. Von Dollen, "Qualification results of a 50 m-115 kV warm dielectric cable system," *IEEE Trans. on Appl. superconductivity*, Vol. 11, No. 1, p. 2355, 2001.
- [3] 류 경우, 김 해중, "0.7 MJ UPS용 초전도 케이블의 켈치 특성", *한국전기전자재료학회논문지*, 11권, 7호, p. 565, 1998.
- [4] J. Gerhold, "Cryogenic liquids—apropective insulation basis for future power equipment," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 9, No. 1, p. 68, 2002.
- [5] 김 상현, 김 정호, 윤 문수, 권 영한, "액체 질소의 절연특성에 미치는 전극효과에 관한 연구", *한국전기전자재료학회논문지*, 4권, 2호, p. 114, 1991.
- [6] H. Okubo, M. Hikita, H. Goshima, H. Sakakibari, and N. Hayakawa, "High voltage insulation performance of cryogenic liquids for superconducting power apparatus", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, p. 1400, 1996.
- [7] M. Hara and H.Okubo, "Electrical insulation characteristic of superconducting power apparatus", *Cryogenics*, Vol. 38, p. 1083, 1998.
- [8] 김상현, 김현희, 김영석, 정종만, 정순용, "극저온 액체의 동적 절연파괴 특성", *한국전기전자재료학회논문지*, 11권, 4호, p. 321, 1998.
- [9] A. Dentat, F. Jomni, F. Aitken, and N.

- Bonifaci, "Generation of bubbles in liquid argon and nitrogen in divergent electric fields", *Proceedings of 13th International Conference on Dielectric Liquids(ICDL '99)*, p. 384, 1999.
- [10] B. Y. Seok, H. Komatsu, J. Suehiro, and M. Hara, "Partial and complete electrical breakdown in simulated high temperature superconducting coils," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 7, No. 1, p. 78, 2000.