

극저온 액체의 동적 절연파괴 특성

11-4-11

Dynamic Electrical Breakdown Characteristics of Cryogenic Liquid

김상현*, 김현희*, 김영석*, 정종만*, 정순용*,
(S.H.Kim, H.H.Kim, Y.S.Kim, J.M.Jung, S.Y.Jung)

Abstract

Electrical breakdown characteristics of liquid nitrogen(LN₂) taking into consideration for application of high T_c superconductor is very important. Also LN₂ will be used as both coolant and insulator in superconducting generator. In this paper, we investigated ac breakdown characteristics of cryogenic nitrogen gas above a LN₂ for rod-to plane electrode configuration. As result the breakdown mechanism of LN₂ is dependence on bubble effect. And breakdown voltage is a ratio on bubble's size but electrodes arrangement is to make no difference. The breakdown voltage decreases slightly with increasing flow velocity, it again decreases abruptly with increasing flow velocity. These results were interpreted as the within pressure of rod electrode and Maxwell force.

Key Words (중요용어) : High T_c Superconducting Generator(고온초전도 발전기), Electrical breakdown(전기 절연파괴), Liquid Nitrogen (액체질소), Bubble(기포), Maxwell force(맥스웰 응력)

1. 서론

전력수요의 급증에 따라 전력회사는 초고압, 대전류 기술개발 등을 진행함과 더불어 전력계통의 안정도와 효율향상, 경제성, 환경문제 등을 고려한 새로운 초전도 발전기의 개발¹⁾⁻³⁾의 필요성이 강하게 대두되고 있다.

초전도 발전기는 원리적으로 기존의 Cu 도체를 사용하는 계자권선에 극저온에서 도전율이 무한대가 되는 초전도체를 사용하기 때문에 강자계를 발생시켜 저 동기리액턴스화, 대용량화, 소형화, 고효율화를 추구할 수 있다. 지금까지 개발된 초전도 발전기는 미국 MIT의 20 [kVA]급을 시점으로 Westing House(미국), Super-GM(일본), Siemens(독일), All Union(러시아)가 100[MW]급의 개발을 진행하고 있다. 그러나 저온초전도선재(NbTi, Nb₃Sn)를 활용한 초전도 발전기의 연구는 냉매 및 절연재료인 액체He(LHe)의 경제성 문제로 지연되

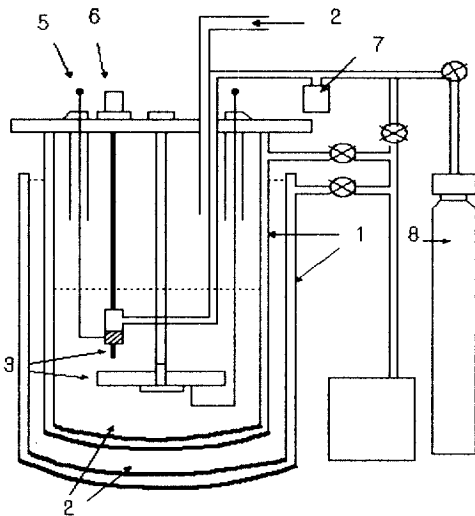
고는 있으나 임계온도가 급격히 상승한 perovskite 산화물계 초전도체⁴⁾가 출현함에 따라 가까운 장래에는 LHe 대신 냉매 및 절연재료로 취급이 용이하고 가격이 저렴한 액체N₂(LN₂)가 활용되어 한층 가속화 될 것으로 보인다. 그러나 초전도 발전기는 극저온이라는 특수환경에 의해 운용되어짐에 따라 극저온 액체에 대한 전기적 절연 및 열적특성에 대해 연구검토가 절실하며, 특히 적은양의 발열에 의해 상전도영역을 발생시키는 Quench는 초전도 발전기 계자코일의 신뢰성, 안정성 그리고 수명에 커다란 요인으로 작용한다. 초전도 발전기 계자코일의 Quench는 열적 기계적 교란에 의하여 국부적으로 발생하여 상전도의 영역으로 전파⁵⁾되어 많은 기포와 이상고전압을 야기시킨다. 냉매에서 발생하는 기포는 국부적인 열에 의해 쉽게 형성되고 기포층에 의한 절연 약화는 초전도 발전기의 수명 및 안정성에 영향을 미친다. 극저온 액체의 저온 방전현상에 관한 연구는 Mathes의 논문⁶⁾을 발단으로 시작되었으나 극저온이라는 특수 환경에 의한 열적, 기계적, 전기적인 측정상 및 경제성의 문제로 연구 결과가 매우 부족하여 초전도 발전기의 기술개발은 어려운 실정에 있다. 특히 저온냉매 사용시에 기포의 발생은 불가피한 것이며, 이에 대한 전기적 절연

* : 경상대학교 공과대학 전기공학과
(자동차 및 컴퓨터 응용기술 연구소)
(진주시 가좌동 900, Fax: (0591) 759-2723
E-mail:shkim@nongae.gsnu.ac.kr)
1997년 10월 4일 접수, 1998년 3월 20일 심사완료

검토에 대한 연구는 실제적인 설계에 있어서 절실하다. 따라서 본 연구는 향후 고온초전도 발전기의 냉매로 활용될 LN₂를 중심으로 절연파괴 특성과 기포에 의한 파괴기구에 대한 실험적 검토를 행하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 그림 1에 표시하며, 제작된 cryostat는 pyrex유리로 구성되어진 이중 구조이다. 이러한 2중벽 사이에는 진공(10⁻³ [Torr])을 유지시켰으며, 내부에는 은(silver)도금으로 측면에 의한 열침입을 극소화 하였으며, 기포의 거동 및 절연파괴 현상을 관측하기 위해 폭 25[mm]의 slit을 두었다. 또한 cryostat는 내부조와 외부조로 구성되어져 있으며, 외부에는 상용LN₂를 사용하여 열적안정을 유지시켰으며, 내조에는 시료용 LN₂(99.9[%])를 도입하였다. 실험시 불순물 유입을 최소화하기 위해 상부 플랜지 및 전극계를 setting한 후 내조를 GN₂로 충전 및 배기를 반복한



1.Vacuum	2.LN ₂	3.Electrode	4.Pump
5.H.V	6.Micrometer	7.Flowmeter	8.GN ₂ (GHe)

그림 1. 실험장치
Fig. 1. Experimental apparatus

후에 시료용 LN₂를 충전 하였다. 플랜지에 부착된 마이크로메타(오차율 ±10[μm])에 의해 전극간격을

조절 하였으며, 봉-평판의 불평등전계하에서 특성을 조사 하였다. 지금까지 초전도 절연시스템의 안정성 및 quench에 대한 실험방법은 하부 전극 또는 병렬 전극에 heater를 설치하여열적 기포를 강제적으로 발생시키는 방법⁷⁾과 초전도 선재에 heater wire를 감고 국부적인 열로 인해 선재 전체에 인위적인 quench를 일으켜 열적 기포에 대한 파괴기구를 검토^{8),9)}하는 방식과 기포의 영향만을 고려하여 전극간에 외부에서 인위적인 기포의 주입으로 절연파괴의 영향을 검토하는 방식으로 진행되고 있다. 본 연구진에서도 위와 같은 두가지 방식으로 검토했으나 전극간 짧은 거리와 극저온이라는 특수 환경하에서 기포의 양 또는 크기 등을 정확히 조절하기 위하여 후자의 방식을 선택하였다. 따라서 본 실험은 외부에서 봉전극에 인위적인 기체를 주입함으로써 기포 및 냉매의 유동에 대한 절연파괴 전압의 영향을 검토하였다. 전극배치로는 기포의 부력 영향을 고려하여 그림 2와 같이 상부에 평판전극을 배치하고 하부에 봉전극을 배치하였으며, 파괴기구의 조사를 위해 전극배치를 반대로 배치하기도 하였다

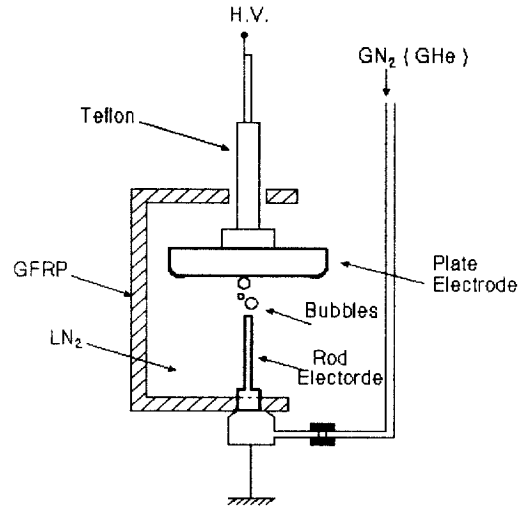


그림 2. 전극계
Fig. 2. Electrodes

직경 40mm의 스테인레스(SUS304)로 구성되어진 평판전극을 연마하고 초음파세척을 한뒤 건조시켜 사용하였으며, 이때 표면조도기(Taylor-hobson사, 0.1[μm]/20[mm])로 측정된 최대 거칠기는 0.098[μm]이다. 사용된 봉전극은 외경이 1000[μm φ]이며 인위적인 기체의 주입을 위해 내경(직경: 100[μm φ],

200[μm ϕ], 400[μm ϕ])이 있으며 외부의 기체 압력조와 연결되어 있다.

기포 발생을 위해 사용된 기체는 GN₂ 및 GHe이며, 기포의 속도조절 및 측정은 기체 압력조에 부착된 압력 조절기와 flowmeter에 의해 측정 하였으며, 기포의 크기는 봉전극의 내경을 변화시켰다.

전원으로는 교류전압(최대출력 교류실효전압: 50 [kV], 주파수:60[Hz]),을 사용하여 예상된 파괴전압의 70-80[%]까지는 빠른 속도로 전압을 상승시키고, 그 이후에 0.3-1.5 [kV/s]의 전압상승 속도를 서서히 상승 시키는 상승법¹⁰⁾에 의해 절연파괴 시켰으며, 전압인가는 동일 조건하에서 6-10회 반복측정을 하였다. 또한 방전직후에 형성된 기포에 대한 영향을 고려하여 방전직후 3분이 지난 이후에 재차전압을 인가하였으며, 기포의 거동 및 절연파괴의 확인은 cryostat의 관측창을 통해 고속사진기(Pentax fx-6059)로 촬영 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 LN₂에 침적된 불평등 전계하에서 파괴

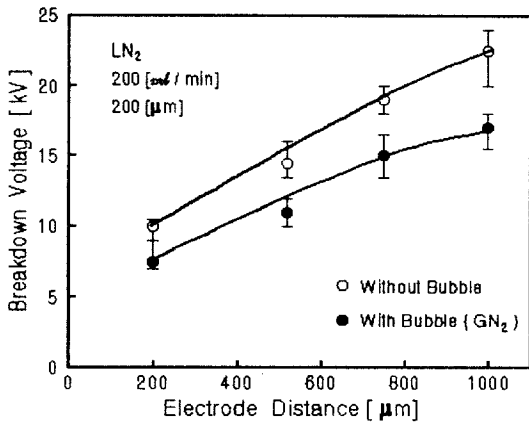


그림 3. LN₂의 파괴전압에 대한 기포 효과
Fig. 3. Effect of bubble on breakdown voltage in LN₂

전압의 기포의 영향을 조사하기 위하여 기체를 유입한 경우와 유입이 없는 경우를 결과이다. 또한 생성된 기포는 GN₂에 의한 것이며, 기포의 속도는 200[mL/min], 하부 봉전극의 내경은 200[μm]로 일정히 유지시켜 측정하였다. 그림에서 절연파괴 전압은 동일조건하에서 기포가 존재하는 경우 낮은 것을 알 수 있다.

이것은 전계강도가 높은 봉전극 부근에서 전계방출된 전자의 Joule열로 인한 소기포와 외부의 인위

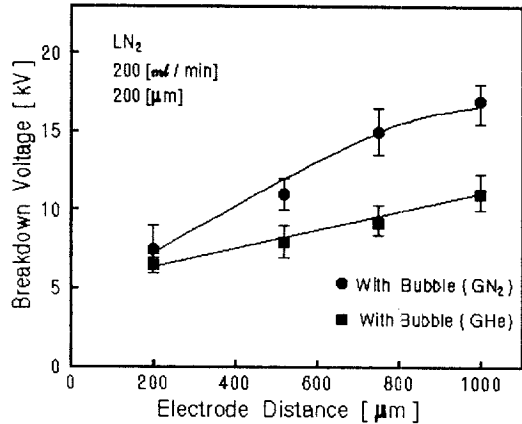


그림 4. LN₂의 기포 내의 기체 의존성
Fig. 4. Gas dependence of breakdown voltage in LN₂

적인 GN₂ 주입에 의해 LN₂내의 절연내력이 기포층이 생성됨에 따라서 LN₂ 내의 기포 층에서 부분방전이 발생되고 streamer의 진전에 따라 방전 브리지를 형성하여 파괴될 확률이 높으며 이는 직류전계 하의 부침의 경우와 유사¹¹⁾한 결과이다. 그림 4는 기포가 절연파괴에 미치는 영향을 더욱

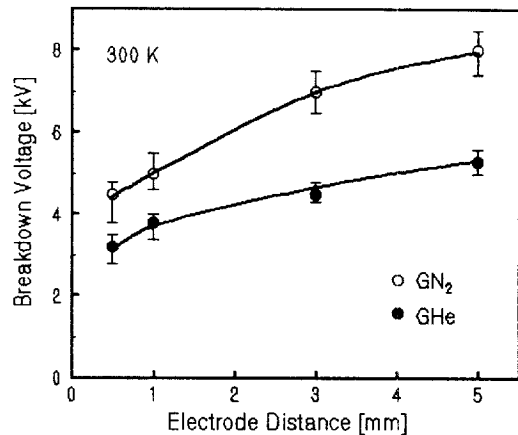


그림 5. GN₂ 및 GHe의 절연파괴 특성
Fig. 5. Breakdown characteristic in GN₂ and GHe

확증하기 위해 GN₂와 GHe를 동일한 속도로 주입하

고 절연파괴전압의 기체 의존성을 조사하였다. 그림에서 나타낸바와 같이 절연파괴전압은 GHe를 주입한 경우가 GN₂의 경우에 비해 절연파괴 전압이 낮게 나타나고 있다. 이러한 결과는 그림 5에 나타난 300[K]의 순수한 GHe과 GN₂의 절연파괴전압의 경향과 유사함을 알 수 있다. 즉 극저온 액체가 열적인 불안정으로 기포가 발생하게 되면, 절연이 상대적으로 취약한 기포에서 방전경로가 형성됨에 따라 전체 극저온 액체의 절연파괴 특성이 결정될 가능성이 높다. 따라서 실용상의 초전도 케이블의 운전시 열침입에 의한 기포의 원인으로 절연약화에 대해 특히 주의해야 한다.

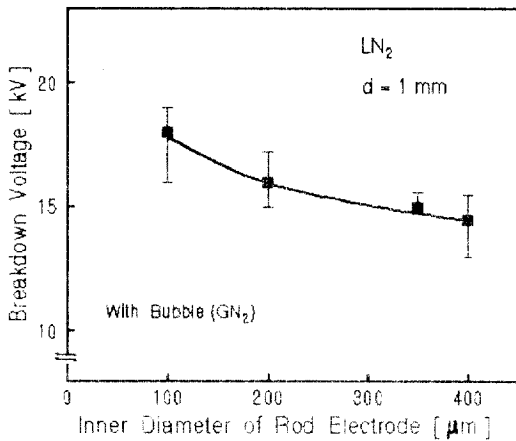


그림 6. 절연파괴전압에 미치는 기포 크기 의존성
Fig. 6. Dependence of bubble size on breakdown voltage

그림6은 절연파괴 전압에 미치는 기포의 크기 효과를 나타낸다. 기포의 크기는 봉전극의 내경변화에 대해 비례하여 증가함에 따라 내경의 크기를 변화시켜 기포의 크기를 조절하였으며, GN₂의 유량은 100[ml/min], 전극간격은 1[mm]로 일정히 유지시켰으며 주입 기포는 GN₂이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 기포의 크기에 따라 절연파괴 전압은 완만히 감소하는 경향을 나타낸다. 즉 액체층과 기체층의 복합계에서 기체층의 증가에 따라 전체의 절연파괴 전압이 감소함을 알 수 있다.

그림 7에 LN₂의 절연파괴 전압에 미치는 기포유량 의존성을 나타낸다. 유입기체인 GN₂의 유량변화에 대한 절연파괴 전압의 경우 유량이 증가함에 따라 완만히 감소하는 I영역과 그 후 급격히 감소하면서 포화되는 II영역으로 나타난다. I영역의 경

우, LN₂ 내의 기포는 다소 존재하나 기포의 유출이 불연속적임에 따라 기포에 의한 절연파괴의 영향은 적은데 반해 II영역의 경우, 연속적으로 기포가 유

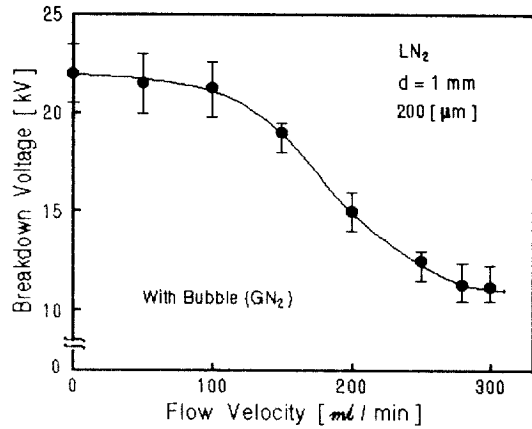


그림 7. 절연파괴전압에 미치는 유량의 의존성
Fig. 7. Dependence of flow capacity on breakdown voltage

출됨에 따라 양전극간 기체의 채널이 생성되고 그 내부에서 방전경로가 형성됨에 따라 액체의 절연파괴 보다는 오히려 기체의 절연파괴에 가까운 것으로 사료된다.

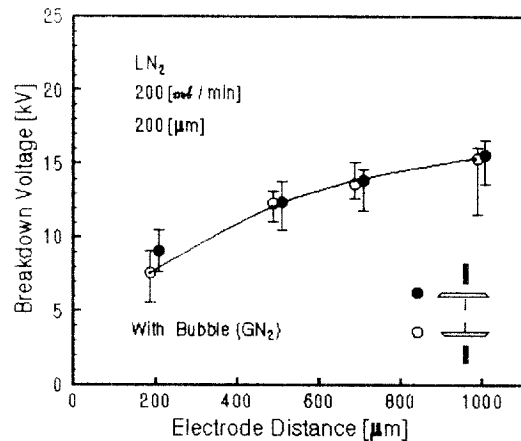
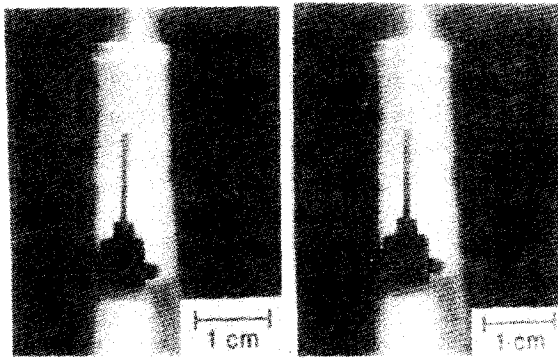


그림 8. LN₂의 파괴전압의 전극배치 영향
Fig. 8. Dependence of electrode arrangements on breakdown voltage in LN₂

따라서 절연파괴 전압은 기포에 의한 기체충이 양 전극에 채널을 형성할 때 영향을 미치는 것으로 사료된다. 지금까지는 봉전극이 하부, 평판전극이 상부인 전극배치로 측정하였으나 그림 8과 같이 봉전극을 상부, 평판전극을 하부로 배치하고 절연파괴 특성을 조사하였다.

어떤 경우에도 전극배치에 대한 영향은 거의 없음에 따라 기포의 부력에 대한 영향은 본 실험 조건에서는 거의 영향이 없었다. 한편 GN_2 의 유량을 $200[ml/min]$ 로 일정히 유지시킨 후 내경이 $200[\mu m]$ 인 봉전극으로부터 유출되는 기포의 거동을 살펴보면, 전극간 전압의 인가가 없을 경우 기포의 형태는 원형으로 유출되며 직경은 봉전극의 내부 직경보다 다소 큰 크기로 대향전극의 수직 방향으로 유출되고 전극간 기포 채널은 형성하지 않았다. 그림 9는 LN_2 중에서 양극간 전압을 각각 $5[kV]$ 및



a) 5 [kV] b) 10 [kV]

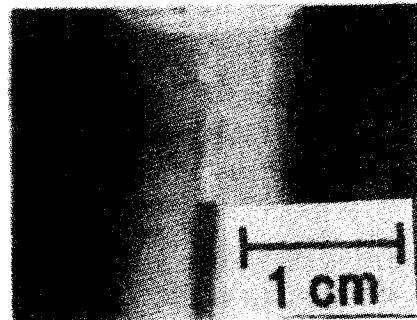
그림 9. 인가전압에 의한 기포의 거동 사진

Fig. 9. Photograph of dynamic bubbles for applied voltage.

$10[kV]$ 로 인가한 후 기포의 거동에 대한 사진을 나타낸다. 인가전압에 따라 기포의 형태는 대향전극 방향의 타원형으로 변형되며 기포의 크기도 점차 줄어든다. 또한 기포의 유량이 증가하며 전극간 기포채널이 형성되기 시작한다. 인가전압이 증가 될수록 봉전극에서 유출되는 기포의 형태는 corona와 더불어 작은 소기포로 변화하며 그 크기는 현저히 줄어든다 유량은 증가한다. 또한 전극간 기포채널이 형성됨에 따라 그림 7에 나타난 II 영역의 경우처럼 기포에 의한 기체의 채널이 생성되고 그 내부에 방전경로가 형성되어 절연파괴 전압이 현저히 줄어드는 것으로 사료된다. 따라서 전극간에 작용되는 힘

은 기포에 의한 부력, GN_2 의 유출에 영향을 미치는 봉전극 내부의 압력, 전극간 전계에 의한 기포의 변형 그리고 봉전극으로부터 유출되는 복합유전체에 대한 전계의 영향으로 발생하는 Maxwell 응력 등이 영향을 미칠수 있으며 특히 주요한 요인으로서 봉전극 내부의 압력에 의한 힘과 Maxwell 응력으로 근사화 할 수 있다.

또한 이러한 기포의 거동은 봉전극 내부의 압력에 의한 힘 F_1 , Maxwell 응력을 F_2 로했을 때 유량이 느린 그림 7의 I 영역의 경우 $F_1 < F_2$ 가 됨에 따라 기포의 거동은 불규칙적이고 간헐적으로 유출되고 완전한 기포채널의 형성이 어려워 기포가 존재하지 않는 경우에 비해 절연파괴 전압은 크게 낮아지지 않은 것으로 사료되며, 유량의 증가와 더불어 $F_1 > F_2$ 가 됨에 따라서 II의 영역에서처럼 완전한 기포채널에 의해 절연파괴 전압이 현저히 낮아짐을 알 수 있었다.



15 [kV]

그림 10. 전계에 의한 기포의 거동 사진

Fig. 10. Photograph of dynamic bubbles for electric field

그림 10은 전계에 의한 기포 거동의 사진을 나타낸다. 그림에서 나타난바와 같이 전극간 거리가 $10[mm]$ 정도로 크고 인가전압이 높을 경우 기포의 채널이 분기되고 상부평판 전극의 고전계 영역으로 기포의 거동이 휘어 도달하는 경우가 간헐적으로 존재한다. 이는 전극간 거리가 증가함에 따라 상부 평판전극의 단부에 집중되어진 전계에 의해 기포의 거동에 영향을 주는 것으로 사료되며, 현재 검토중에 있으며 추후에 보고할 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. LN₂ 의 절연파괴전압은 기포가 발생한 경우 낮으며 기포내의 기체종류에 영향을 받으며, 기체층에 의한 방전경로 형성에 의해 절연파괴전압이 감소된다.
2. LN₂에 대한 절연파괴전압은 기포의 크기에 반비례하며, 기포의 유량에 따라서는 완만히 감소하는 영역과 급격히 감소하다가 포화되는 영역으로 나타난다. 그러나 전극배치에는 무관하다.
3. 봉전극으로부터 유출되는 기포의 거동은 전극간 전압이 높아질수록 기포의 크기는 소기포화가 되나 유량은 증가한다.
4. 실용상의 초전도 발전기 운전시 quench나 열절연이 불안정한 경우 기포에 의해 양극간이 기체채널을 형성할 때 절연내력은 급격히 감소하므로 특히 주의해야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국전기연구소의 연구지원비에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. 日本電氣學會, "超傳導電力機器의開發動向", 電氣學會技術報告 I 部, 192號, (1985)
2. 대한전기학회, 기술조사보고 제1호, (1992)
3. R.G.Surrlock, Cryogenics, Vol. 30, pp.483-500, (1990)
4. J.G.Bednorz and K.A.Muller, "Possible High-Tc Superconductivity in the La-Ba-Cu-O Sysytem", Z .Physics, B-Condensed Material, Vol. 64, pp.189-193, (1986)
5. M.Hara et al. " Breakdown Behavior of Cryogenic Liquids in Presence of Thermal Bubbles under Ramped Voltage." IEEE Trans. Elect., Insul., Vol. 26 No. 4, pp. 685-691, (1991)
6. K. N. Mathes, "Dielectric Properties of Cryogenic Liquids", IEEE Trans. El-2, pp.24-32, (1987)
7. 原雅則, "極低溫冷媒液體의熱氣泡破壞機構", T. IEE Japan, Vol. 111-B, pp. 352-357, (1991)
8. N. Hayakawa et al., "Quench induced breakdown characteristics of liquid helium and optical observation of thermal bubbles", Cryogenics Vol.35, No.2, pp. 135-142, (1995)
9. Okubo et al., " Dynamic breakdown of liquid He induced by quenching", IEEE Trans. Elect., Insul., Vol. 4 No. 1, pp. 120-126, (1997)
10. 西村,尾崎, "極低溫冷媒의不平等電界での耐電壓特性", 日本電氣學會絶緣材料研究會資料,IM-90-87, pp.11-20, (1990)
11. 김상현, " 초전도 케이블용 절연재료의 절연파괴특성과 기구에 관한 연구", 한국전기전자재료학회지 제 5권 제3호. pp. 303-309, (1992)