

초전도 케이블용 절연재료의 절연파괴 특성과 기구에 관한 연구(Ⅱ)

(Study on Breakdown Characteristics and Mechanisms of Insulating Material for Superconducting Cable(Ⅱ))

김상현*
(Sang-Hyung Kim)

요 약

향후 급속히 증가할 것으로 예측되는 전력수요에 대비한 새로운 대전력 수송방법의 필요성이 최근 선진국들을 중심으로 강하게 대두되고 있다. 이러한 목적에서 초전도 케이블이 필요하나 신뢰성, 안정성, 경제성을 보장하기 위해서는 극저온절연 기술이 반드시 해결되어야 한다. 특히 고온 초전도체를 사용하는 초전도체 케이블의 냉각 및 절연재료로 사용될 액체 $N_2(LN_2)$ 의 절연 파괴특성은 중요하다.

본 논문에서 LN_2 의 절연파괴에 미치는 기포의 영향을 조사하고, 정침에서는 정 Streamer, 부침에서는 기포파괴기구의 가능성을 검토하였다.

Abstract

According as it is expected that the demand for electrical energy will rapidly increase in the near future, it is strongly required to develop a new method of high power transportation, as happens in the developed countries. The technology to satisfy the above requirement is superconducting cable, it to be solved to assure the high reliability, safety and economy of cable is breakdown at cryogenic temperature.

Particularly breakdown characteristics of liquid nitrogen(LN_2) taking into consideration for application of high T_c superconductor is very important.

Also LN_2 will be used as both coolant and insulator in superconducting cable.

In this paper, we investigated on the bubbling effect of the breakdown in LN_2 and concluded that the breakdown mechanism of LN_2 is the positive streamer breakdown for positive needle and the bubble breakdown for negative needle.

* : 경상대학교 전기공학과

I. 서 론

현대 산업문명의 급속한 발전과 경제성장의 가속화로 전력수요는 급격히 증가하는 추세에 있어 국내의 경우 2000년경에는 현재의 약 3 배 이상이 될 것으로 추산하고 있다. 이와 같은 양상은 세계적으로 공통된 양상으로 송전 회선수를 늘이거나 800KV 이상의 UHV (Ultra High Voltage) 송전방식을¹⁾ 검토하고 있으나 경제성 문제, 환경 및 용지 확보 등의 문제로 장래 심각성이 예상된다. 따라서 이들의 문제점을 획기적으로 해결하기 위해서는 기존의 가공송전방식 대신에 초전도 케이블²⁾ -³⁾에 의한 지중송전방식이 강하게 대두되고 있다.

초전도 케이블(Superconducting Cable)은 완전도전성($R=0$)의 초전도 현상⁴⁾을 이용하여 joule 손실없이 대전류를 흘릴 수 있어 저손실, 소형화, 고성능, 경제성등이 매우 크다. 현재 미국, 일본, 소련을 중심으로 실용화 연구가 활발하게 진행되고 있으나 초전도체(Nb-Ti, Nb₃Sn 등)의 임계온도(T_c)의 문제 즉 냉각재료 및 절연재료로 사용되는 액체 He(LHe, 4.2K)의 경제성의 문제로 연구 개발 속도가 약간 지연되고 있다. 그러나 1986년 Nb-Ti, Nb₃Sn 등으로 대표되는 금속계 초전도체(저온 초전도체)에 대처되는 Perovskite 산화물계 초전도체⁵⁾가 등장하면서 T_c 가 향상되어 가까운 장래에는 LHe 대신에 값싸고, 취급이 용이한 액체 N₂(LN₂, 77K)가 냉각 및 절연재료로서 적극적으로 초전도체 케이블에 활용될 것이 기대되고 있다. 한편 LN₂는 기초연구로서 분자구조가 간단하기 때문에 복잡한 분자구조를 갖는 유기절연재료의 전기전도, 절연과피기구를 이해하는 모델 물질로서도 지극히 중요하다.

극저온 액체의 저온 방전현상에 관한 연구는 경제성의 문제로 1967년 GE사의 Mathes의 논문⁶⁾을 발단으로 본격적으로 연구가 진행되어 20년에 불과하며, 극저온이라는 특수 환경이므로 열적, 기계적, 전기적으로 실온과 달리 검토해야 할 문제가 산적해 있으며 측정상의 문제로 연구결과⁷⁾⁻⁹⁾가 매우 부족하여 초전도 케이블의 기술 개발은 어려운 실정이다.

본 논문은 이와같은 관점에서 LN₂를 중심으로 절연과피 특성과 기구를 연구하였다. LN₂에 6 μ s 방형파 펄스전압을 인가하고 시

간지연(Time Lag) 특성을 조사한 결과 짧은 경우의 LN₂의 절연과피는 정침조건에서는 정 streamer, 부침조건에서는 기포과피기구의 가능성을 이미 보고¹⁰⁾ 하였으나 본 논문에서는 그 가능성을 더욱 확증하기 위하여 기포를 인위적으로 주입시켜 절연과피 특성을 조사하고 그 실험 결과를 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 스테인레스 강(SUS 304) cryostat 및 전극계를 그림1에 표시한다. cryostat는 2중 구조로 외부 cryostat에는 사전냉각용의 상업용 LN₂를 그리고 내부 cryostat에는 시료용의 고순도 LN₂(순도 99.999%)를 각각 도입하였다. 내, 외부 cryostat에는 다시 2중벽으로 구성되며 그 사이에는 고진공(10^{-3} Torr)시킴으로서 측면의 전도에 의한 열전달을 차단시켜 시료용 LN₂의 온도를 안정시켰다. 이 상태에서의 시료용 LN₂의 온도는 77K, 밀도는 0.881, 유전율은 1.431¹¹⁾이다. 또한 cryostat는 10atm.까지 압력을 인가할 수 있다.

시료용 LN₂에 침적되어 사용되는 전극계는 스테인레스 강의 평판(75mm ϕ)-구(6.3mm ϕ), 평판-침(tip 곡률 반경: 2 μ m, 선각단

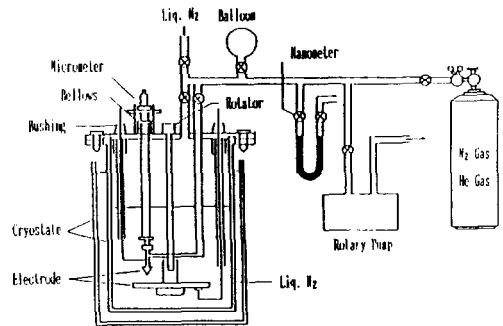


그림1. 실험장치

Fig 1. Experiment apparatus

33 $^\circ$) 전극을 각각 평등전계 및 불평등전계용으로 사용하였다. 평판 전극의 표면은 Al₂O₃ 분말(1.0, 0.3, 0.5 μ m), 다이아몬드 페스트(3, 1 μ m), 연마액에 의해 처리한 후 아세톤에 넣어 5분간 초음파 세척하고 건조시켜

사용하였다. 이때 표면조도기(Taylor-hobson 사, $0.1\mu\text{m}/20\text{mm}$)로 측정된 표면거칠기는 $R_{\text{max}}=0.094\mu\text{m}$ 이다. 한편 침전극은 tip곡률 반경 $2\mu\text{m}$ 을 사용하였으나 기포실험의 경우는 특히 그림2와 같은 침전극을 전극홀더에 고정시켜 측정하였다. 즉 tip 곡률반경 $3\mu\text{m}$, 선각단 52° 인 침전극의 중앙에는 기체가 유입될 수 있는 통로(직경: $200\mu\text{m}\phi$)가 있으며 외부의 기체 압력조와 연결되어 있다. 기포는 기체압력조에 부착된 압력 조절기에 의하여 조절되었으며 기체는 N_2 He 등을 주입시켰다. 전극계의 배치는 침전극이 상 또는 하로 되는 수평배치로 하였다. 전극간격의 조정은 프란지(plang)상에 부착된 마이크로메타(micro-meter)(오차: $\pm 1\mu\text{m}$)에 의하여 영점을 구한 후 전극간격을 일정한 거리로 유지시켰으며, 프란지의 중앙에는 회전자를 설치하여 평판전극을 회전하여 절연파괴의 위치를 바꿀 수 있도록 하였다.

전원으로는 직류전압(최대출력 직류전압: 32.5KV)을 사용하였으며, 전압인가법은 예상되는 파괴전압의 70-80%까지는 빠른 속

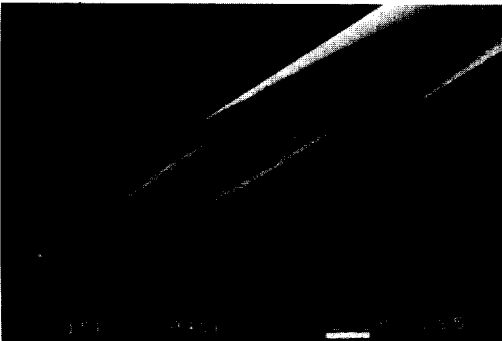


그림2. 침전극
Fig 1. Point needle

도로 전압을 상승시키고, 그후는 $0.3-3\text{KV/s}$ 의 전압상승 속도로 서서히 상승시키는 상승법¹²⁾에 의해 절연파괴 시켰다. 전압인가는 한가지 조건에 대하여 6-10회 반복 측정하였으며 방전직후 형성된 기포, 공간저하 등의 영향을 피하기 위하여 방전직후 1분 이상이 경과된 후에 재차 전압을 인가하였다. 절연파괴의 확인은 cryostat의 관측창에서 눈으로 확인하였다.

3. 실험결과 및 검토

최근의 ceramic계 고온 초전도체의 개발과 더불어 관심이 높아지고 있는 $\text{LN}_2(77\text{K})$ 의 직류파괴전압의 극성효과를 그림3에서 표시한다. 파괴전압은 전극간격이 짧은 경우에는 평등전계 > 정침 > 부침의 순서이나 전극간격이 긴 경우에는 평등전계 > 부침 > 정침의 순서로 역전됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 이미 $6\mu\text{s}$ 의 방향파 전압을 사용한 LN_2 의 시간지연(time lag)의 실험¹⁰⁾과 유기액체의 경우에서 보고된바 있으며 기포파괴결과 정 streamer 파괴기구의 가능성으로 설명되고 있다. 또한 tip 곡률반경이 증가함에 따라 파괴전압이 증가됨을 알 수 있다.

LN_2 의 기포파괴기구의 가능성을 더욱 확증하기 위하여 그림3의 $3\mu\text{m}$ tip 곡률반경의 침전극을 선택하고 그림2와 같은 전극계에 인위적으로 기체 $\text{N}_2(\text{GN}_2)$ 를 주입시켜 기포를

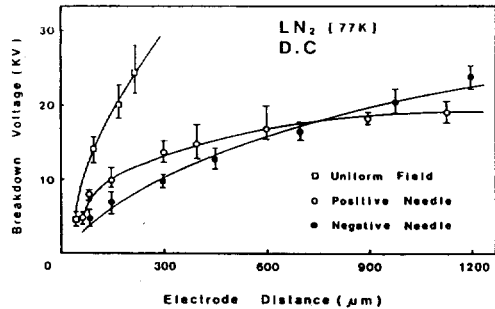


그림3. 액체 N_2 의 파괴전압의 극성 효과
Fig 3. Polarity effect of breakdown voltage in LN_2

형성시킨 경우의 정침조건에서의 절연파괴 특성을 그림4에 표시한다. 그림에서 error bar의 상, 하는 각각 측정치의 최대 및 최소를 표시하고, \blacksquare , \square 은 각각 기포를 주입시킨 경우와 기포를 주입하지 않은 경우의 평균치를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 LN_2 의 정침조건에서의 기포의 발생은 파괴 전압에 거의 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 한편 액체 $\text{He}(\text{LHe})$ 의 경우에서도 유사한 경향이 보고되고 있다¹³⁾. 즉 기포가 존재하는 상유동 $\text{He}(\text{HeII}, 4.2\text{K})$ 와 기포가 무시되는 초유동 $\text{He}(\text{HeI}, 2.1\text{K})$ 에서의 절연파괴전압이

거의 유사한 결과로부터 LHe의 파괴기구는 기포파괴가 아닌 음극의 전자방출에 의한 전자적 파괴기구로 설명되고 있다. LN₂의 경우도 기포파괴가 아닌 앞에서 설명한 전자적 과정인 정 streamer 파괴기구의 가능성이 높다.

그림5는 동일조건에서 부침의 절연파괴특성을 표시한다. 정침조건과는 달리 GN₂를 인위적으로 주입시켜 기포를 발생시킨 경우의 파괴전압이 기포를 주입시키지 않은 경우보다 낮은 것을 알 수 있다. GN₂를 주입시키지 않

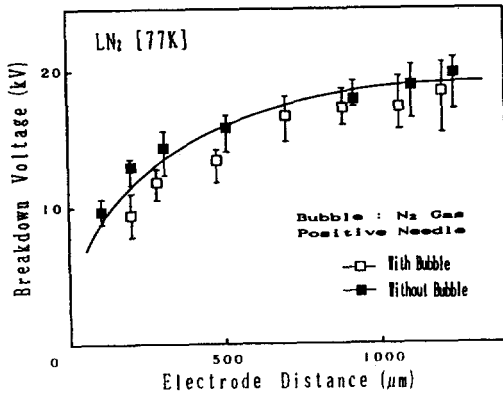


그림4. 정침조건에서의 액체 N₂의 파괴전압의 기포 효과
Fig 4. Effect of bubble on breakdown voltage in LN₂ under positive needle

은 경우 침전극이 음극이기 때문에 corona¹³⁾와 전계방출된 전자의 joule 열로 기포와 정 streamer가 형성되나 부침의 전계강도가 높아 정 streamer의 진전보다 기포의 진전이 용이하여 전극간에 브리지를 형성하여 기포파괴될 가능성이 높다. 따라서 외부의 기체압력조에서 GN₂를 인위적으로 주입시켜 기포를 더욱 효과적으로 발생시킴으로서 절연파괴전압이 감소되었다고 생각되며 앞에서 설명한 기포파괴 기구의 가능성에 위반되지 않음을 알 수 있다. 이와 유사한 결과는 silicon oil(그림6)의 경우에서도 확인할 수 있었다. 즉 LN₂의 부침조건에서는 일반액체의 경우와 같이 기포파괴기구의 가능성이 높으며 실용상의 초전도 케이블의 운전시 quenching이나 열전연이 불안정한 경우 부침조건에서는 특히 주의해야 한다.

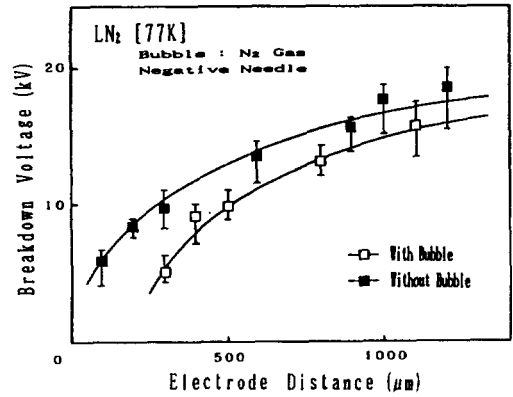


그림5. 부침조건에서의 액체 N₂의 파괴전압의 기포효과
Fig 5. Effect of bubble on breakdown voltage in LN₂ under negative needle.

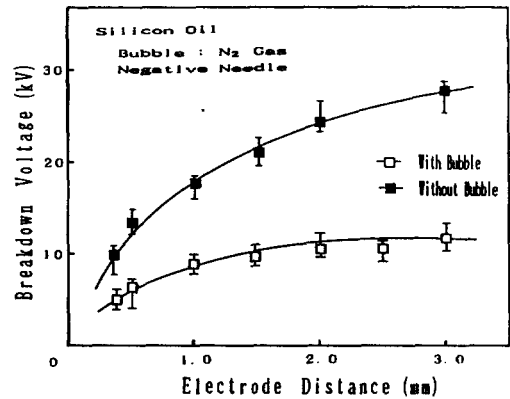


그림6. 실리콘유류의 파괴전압의 기포효과
Fig 6. Effect of bubble on breakdown voltage in silicon oil

그림7, 8은 각각 기포내의 기체의 영향을 조사하기 위하여 GN₂, 기체 He(GHe), 기체 Ar(GAr)을 인위적으로 주입시킨 경우의 정침 및 부침의 절연파괴특성을 표시한다. 정침 조건에서의 절연파괴전압은 주입기체의 종류에 무관하나 부침의 경우는 주입기체가 GHe, GAr, GN₂의 순서로 높아져, 기포내의 기체의 절연파괴 전압의 순서임을 알 수 있다. 극저온 기체의 절연파괴특성은 일반기체와 같은 Paschen의 법칙이 성립되며¹⁵⁾, 액체보다 절연내력이 낮은 기체인 기포에 의해 액체의 절

연파괴전압이 결정되어 지금까지 설명한 기포의 가능성을 지지하는 결과를 얻고 있다.

그러나 기체의 절연파괴전압은 기체 밀도에 따른 온도의 역수와 관련되고 있어 본 실험에서 사용한 300K의 고온인 기체의 온도에서는 절연파괴특성이 현저히 감소될 가능성이 있으나 silicon oil와 같은 현저한 경향은 나타나고 있지 않다. 극저온이라는 극한상태이기 때문에 error bar가 클 가능성도 있으나 기체의 주입시의 액체의 유동¹⁶⁾이나 불순물⁹⁾의 영향도 생각되어 검토가 필요하다.

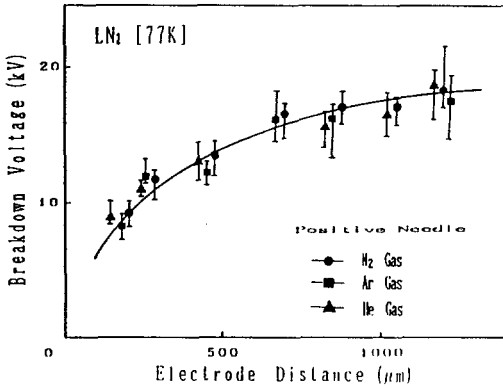


그림7. 정침조건에서의 액체 N₂의 파괴전압의 기포내 기체 의존성
Fig 7. Gas dependence of breakdown voltage in LN₂ under positive needle

그림9는 전극간격을 300 μ m로 일정하게 유지하고 압력을 대기압에서 6기압까지 증가시킨 경우의 불평등전계에서의 LN₂의 절연파괴특성을 표시한다. 그림으로부터 정침조건인 경우는 압력의 증가와 더불어 별다른 변화를 보이지 않으나 부침 조건에서는 압력의 증가와 더불어 기포의 발생이 억제됨으로서 부침의 경우 절연파괴 전압이 상승하는 것으로 이해할 수 있으며, 반면에 정침의 경우에는 기포파괴가 아닌 전자적과정인 정 streamer에 의해 절연파괴가 주도될 가능성이 생각된다.

지금까지는 침전극이 상부, 평판전극이 하부인 전극배치만을 측정하였으나, 기포의 부력에 의한 영향도 고려되어 침전극을 하부, 평판 전극을 상부로 한 전극 배치에서의 부침

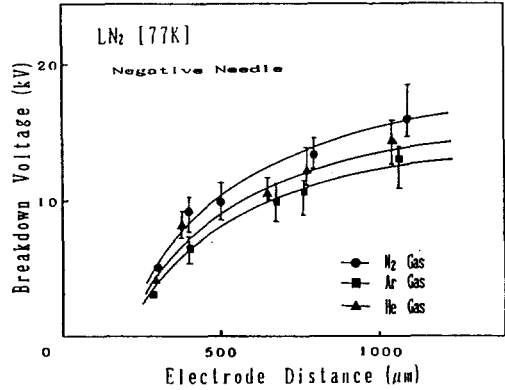


그림8. 부침조건에서의 액체 N₂의 파괴전압의 기포내 기체 의존성
Fig 8. Gas dependence of breakdown voltage in LN₂ under negative needle

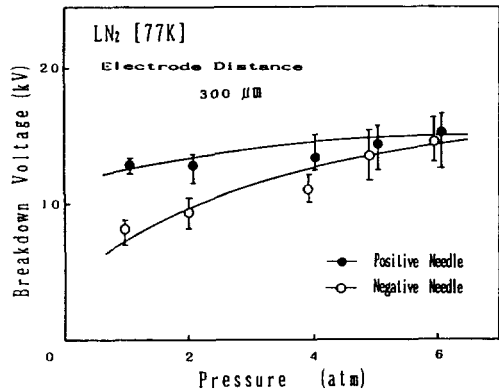


그림9. 액체 N₂의 파괴전력의 압력의존성
Fig 9. Pressure dependence of breakdown voltage in LN₂

조건이 절연파괴특성을 그림 10에 표시한다. 어느 경우에도 절연 파괴전압은 전극배치에 무관하며 기포의 부력의 영향이 없음을 알 수 있다.

한편 정침, 부침조건에서의 기포의 거동은 살펴보면 어느 경우에도 침전극에서 기포가 출발하여 평판전극으로 향하나 고전계 영향으로 기포의 집단은 휘어 평판 전극에 도달하며 더욱이 부침의 경우는 corona와 더불어 주입 기포(200 μ m)보다 작은 소기포(수 10 μ m 정도)가 가세하는 현상을 볼 수 있다. 지금까

초전도 케이블용 절연재료의 절연파괴 특성과 기구에 관한 연구

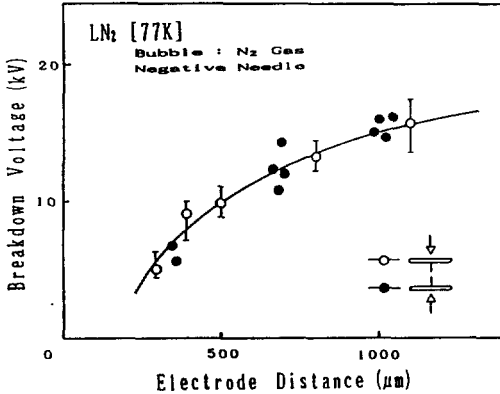


그림10. 액체 N₂의 파괴전압의 전극배치 영향

Fig 10. Dependence of electrode arrangements on breakdown voltage in LN₂

지는 주입 기포의 직경을 200 μm로 일정히 하고 측정하였으나 기포의 직경을 400 μm로 변화시킨 경우의 절연파괴전압은 그림11과 같다. 그림에서 error bar는 크나 기포의 직경이 작은 경우가 큰 경우보다 절연파괴전압이 높은 것을 알 수 있다. 즉 기포내의 Paschen의 법칙으로 이해되며 동일한 결과는 Hara도¹⁷⁾ 얻고 있으나 측정상의 문제로 검토가 필요하며 기포의 사진관측과 함께 추후에 할 예정이다.

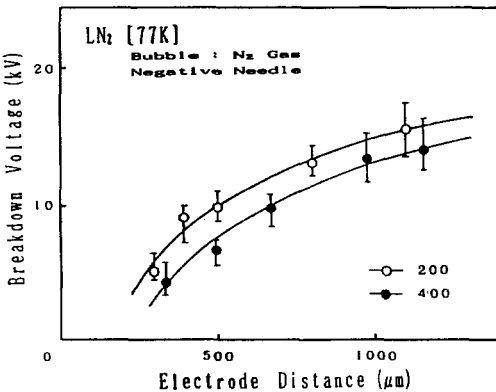


그림11. 액체 N₂의 파괴전압의 기포크기 효과

Fig 10. Dependence of bubble dimensions on breakdown voltage in LN₂

4. 결 론

고온 초전도 개발로 더욱 가속화되고 있는 초전도 케이블의 절연 및 냉각재료로 사용 될 LN₂의 절연파괴현상과 기구에 대하여 연구하였다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) LN₂의 파괴전압의 극성효과는 일반유기액체와 같이 평등전계 >정침 >부침의 순서이다.
- 2) LN₂의 정침조건에서의 파괴전압은 기포의 영향이 적으나 부침조건에서는 기포의 영향이 현저하다. 따라서 실용상의 초전도 케이블의 운전시 quenching이나 열절연이 불안정한 경우 부침조건에서는 특히 주의해야 한다.
- 3) 또한 부침조건에서의 LN₂의 파괴전압은 기포 내의 기체종류, 기포의 크기 등에 민감하나 기포의 부력에 무관하다.
- 4) 한편 기포를 억제하기 위하여 압력을 가하면 정침조건에서의 파괴전압은 압력에 무관하나 부침조건에서의 파괴전압은 상승한다. 이상의 실험결과로부터 LN₂ 파괴기구는 정침의 경우는 정 streamer, 부침의 경우는 기포파괴의 가능성이 높다.

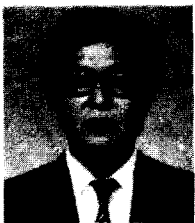
이 논문은 1991년도 한국과학 재단의 목적 연구 기초연구비에 의하여 연구되었다. 이 연구에 협조를 아끼지 않으신 한국전기연구소 초전도연구실의 여러분과 대학원생 김 정호, 김 현희 군에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 한국전력공사 기술연구원 : "전력계통의 장기전망과 운용전략에 관한 연구", 연구보고서, KRC-85S-T05, 1986
- 2) E.B.Forsyth : "Cryogenic Engineering for the Brookhaven Power Transmission Project", Cryogenic, Vol. 17, pp.3-7, 1977
- 3) 一柳, 岩田 : "極低温 大容量 送電技術の可能性", 日本 絶縁材料 研究會, EIM-85-102, pp.1-12, 1985
- 4) R. G. Surrlock : "A Brief History of Cryogenic", Cryogenics, Vol.30, pp.483-500, 1990

- 5) J. G. Bednorz, K.A. Müller : "Possible High T. Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", Z.Phys. B64, pp.189-193, 1986
- 6) K. N. MAtes : "Dielectric Properties of Cryogenic Liquids", IEEE Trans. EI-2, pp.24-32, 1967
- 7) D. J. Kwak : "A Study on the Dielectric Strength of PET and Liquid Nitrogen under Enviroments of Cryogenic Apparatus", Kyushu Univ. 박사학위논문, 1988
- 8) R. J. Meats, M. A., M. Inst. P. : "Pressurised-Helium Breakdown at Very Low Temperature", Proc. IEEE, Vol.119, pp.760-766, 1972
- 9) A. Jaksts, B. Mazurek : "Particle Initiated Flashover in liquid Nitrogen", Cryogenics, Vol.30, pp.68-71, 1990
- 10) 추 영배, 류 경우, 류 강식, 김 상현 : "액체 질소의 절연파괴 특성", 대한 전기학회, Vol.37, pp.872-878, 1988
- 11) J. Gerhold : "Dielectric Breakdown of Cryogenic Gases and Liquids", Cryogenics, Vol.19, pp.571-584, 1979
- 12) 西村, 尾崎, 園江 : "극저온 냉매의 불평등 전계에서의 내전압특성", 일본전기학회 절연재료연구회, EIM-90-87, pp.11-20, 1990
- 13) 김 상현, 윤 문수, 吉野, 大石 : "초유동 He의 절연파괴", 제16회 전기절연 재료 Symposium 예고집, pp.79-82, 1983 (1992년 5월 8일 접수)
- 14) Y. Takahashi, K. Ohtsuka : "Corona Discharges and Bubbling in Liquid Nitrogen", J. Phys. D : Appl. Phys., Vol.8, pp.165-168, 1975
- 15) 김 상현, 마 대영, 김 정호, 권 영한 : "초전도 케이블용 극저온 액체, 기체의 절연 특성 연구", 대한전기학회 춘계 학술 연구 발표회 논문집, pp.120-123, 1992
- 16) M. G. Danikas : "Breakdown of Transformer Oil", IEEE Elect. Insulation Magazine, Vol.6, pp.27-34, 1990
- 17) M. Hara, Koishihara, K. Saita : "Breakdown Behavior of Cryogenic Liquids in the Presence of Thermal Bubbles under Ramped Voltage", IEEE Trans. EI-26, pp.685-691, 1991

(1992년 5월 8일 접수)



김상현

1950년 2월 7일생. 1974년 2월 인하대 전기공학과 졸업. 1979년 2월 인하대 전기공학과 석사. 1986년 3월 일본 오오사카 대학 전기공학과(공박). 1989년 2월 한국전기연구소 극저온재료실장. 1992년 현재 경상대 전기공학과 조교수.