

극저온 액체 및 기체 질소의 압력에 따른 절연파괴 특성

Effects of Pressure on the Breakdown Characteristics of Cryogenic Liquid and Gaseous Nitrogen

백승명*, 정종만*, 김상현**

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

Abstract : Electrical properties of liquid nitrogen (LN₂) and gaseous nitrogen(GN₂) have become of great interest again since the discovery of high temperature superconductors. It is very important from a point of superconducting apparatus protection to elucidate breakdown characteristics in LN₂ and GN₂ at atmospheric and pressurized conditions.

Therefore, this paper studies the effect of pressure on the breakdown characteristics in LN₂ and GN₂. AC high voltage is applied to electrode system with uniform and non-uniform field in various gap length. And Breakdown voltages of LN₂ and GN₂ are investigated under AC voltage for pressure ranging from 0 and 0.5 MPa. This research presented basis information of electrical insulation design for liquid nitrogen immersed HTS power apparatus.

Key Words : pressure, breakdown, gaseous nitrogen, liquid nitrogen

1. 서 론

액체 질소를 냉매로 사용할 수 있는 고온초전도체가 발견된 이후 전기, 통신 및 의학 등 고온초전도체 응용에 대한 연구가 세계 각국에서 활발히 진행되었다. 국내에서도 2001년도부터 시행되고 있는 프론티어 사업에 고온초전도체 분야가 포함되어있어 고온초전도체 분야에 대한 연구가 더욱 활발할 것으로 기대된다.

고온초전도체를 응용하기 위해서는 극저온을 유지할 장치나 냉매가 필요하며, 액체 질소는 경제성 뿐만 아니라 절연내력도 우수하기 때문에 고온초전도체의 냉매로 많이 사용된다. 하지만 초전도체의 켈치 등의 외란에 의해 액체 질소는 기화하게 되고 기화된 기체 질소는 액체 질소보다 절연내력이 낮아 고온초전도 기기의 수명이나 안전성에 치명적이므로 액체 질소와 기체 질소의 절연특성 평가는 고온초전도체의 응용을 위해 매우 중요한 일이다[1-3]. 또한 초전도 케이블 등 초전도 기기의 냉각을 위한 냉매를 순환 및 냉매의 안정을 위하여 압력을 사용하는 경우가 발생한다. 따라서 냉매로 사용되는 액체 질소와 기체 질소의 압력 영향을

고려하는 것은 응용의 기초단계라고 할 수 있다.[4,5] 따라서, 본 연구에서는 액체 질소를 냉매로 사용하는 고온초전도 기기의 전기절연 설계를 위해 대기압 상태에서부터 압력을 증가시키며 액체 질소의 절연특성을 고찰하였다. 또한 기체 질소의 온도변화에 따른 절연특성과 압력에 따른 절연특성을 고찰하였다. 특히, pancake coil형 초전도 기기의 절연설계를 위한 기초를 마련하기 위해 칩과 구 전극 뿐 아니라 pancake coil 전극을 이용하여 위와 동일한 조건에서 기체 및 액체 질소의 압력에 따른 절연파괴 특성을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1. 실험장치 및 방법

절연파괴 전압은 최대 1 MPa 압력을 견디는 압력 용기 안에서 측정하였다. 압력용기는 스테인레스로 제작된 것이며, 열 침입을 막기 위해 진공 층이 이중으로 되어있다. 용기의 제일 안쪽은 직경 100 mm 원통형으로 시료를 배치시킬 수 있는 구조로 되어있다. 진공 층의 진공을 조절하기 위해 각 진공 층마다 진공계 이지가 부착되어 있으며, 시료를 고정시키는 플랜지 부분에는 압력계와 노즐이 부착되어 있어 압력을 자유로이 조절할 수 있다. 실험에 사용한 전극은 칩, 구 및 single pancake coil을 사용하였다. 칩 전극은 선단 곡률 반경이 25 μ m이고 선단 각은 24°인 stainless steel 를 사용하였으며, 구 전극은 직경 8 mm인 stainless steel 구를 사용하였다. 평판전극은 직경 80 mm, 두께 1 mm이고 표면은 0.1 μ m이하로 경면 처리하였다. pancake coil 전극은 두께 0.3 mm, 폭 3.5 mm의 Cu 테이프를 이용하여 FRP 지지대에 pancake coil형상으로 제작하였다. 전극의 내경은 30 mm, 외경은 60 mm이다. 제작한 전극을 상·하로 배치하여 전극계를 구성하였다. 그림 1에 pancake coil 전극계 사진을 나타낸다. AC 고전압 장치는 BAUR Dieltest(Type DTA E, AC 100 kV, 60 Hz)를 사용하였으며 1 kV/s로 증가시키면서 절연파괴 전압을 구하였다.

액체 질소의 압력에 따른 절연파괴 전압을 고찰하기 위해 압력 용기 내, 외부 진공 층을 10⁻³ torr 이하로 진공배기 시킨 후 전극계를 압력용기 안에 배치시키고 진공 펌프를 이용하여 내부를 진공배기 시킨 후 내부에 액체 질소를 넣어 내부 분위기를 대기압 순수 액체 질소로 만들었다. 압력용기와 전극계가 충분히 냉각한 후 압력용기를 외부와 차단시켜 용기 내부에서 기화되는 기체 질소의 기화압력을 이용하여 액체 질소에 압력을 증가시키며 절연파괴 전압을 구하였다. 기체 질소의 압력에 따른 절연파괴 전압을 고찰하기 위해 액

* 학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과 박사과정

** 정 회원 : 경상대 대학원 전기공학과 교수(공학원)

원고접수 : 2002년 04월 06일

심사완료 : 2003년 01월 21일

체 질소와 같은 방법으로 압력용기의 내, 외부 진공층을 10^{-3} torr 이하로 진공시킨 후 전극계를 압력용기 안에 배치시키고 진공 펌프를 이용하여 용기 안을 진공시킨 후 용기 안에 기체 질소를 넣어 용기 안의 분위기를 대기압 순수 기체 질소로 만들었다. 여기서 용기에 기체 질소를 불어넣어 기체 질소의 압력을 높였다. 기체 질소의 압력을 높이면서 전극계의 절연파괴 전압을 측정하였다. 본 연구에서는 압력을 가하지 않은 초기 대기압 상태를 0 MPa로 하였으며, 액체 및 기체 질소는 범용을 사용하였다. 절연파괴 전압은 동일한 조건에서 각 10회 실시하여 얻었으며 매 회당 1분의 시간 간격을 두었다. 그림 1에 Pancake coil 전극계를 나타내고 그림 2에 압력용 극저온 용기를 나타낸다.

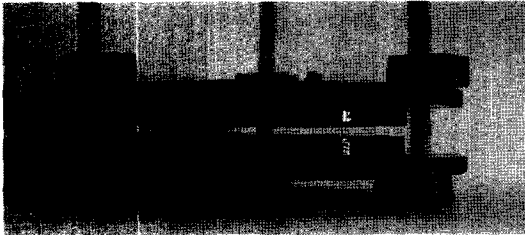


그림 1. Pacake coil 전극계.
Fig. 1. Pancake coil electrode system.

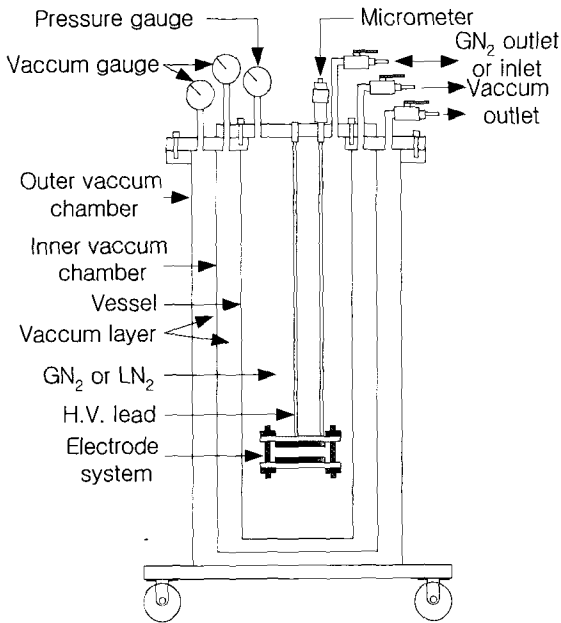


그림 2. 고압 극저온용기.
Fig. 2. High pressure LN₂ cryostat.

3. 실험결과 및 검토

그림 3에 다양한 전극계에서 액체 질소의 절연파괴 전압을 측정하여 나타내었다. 그림 3과 같이 일반적으로 전극간격 d 가 증가하면 절연파괴 전압은 비선형적으로 증가하였다. 구-평판 전극계에서 절연파괴 전압은 다음 식(1)과 같다.

$$V_B = 28.103d^{0.7038} \text{ kV} \quad (1)$$

여기서, V_B 는 절연파괴 전압이고 d 는 전극간 거리이다. 일반적으로 절연파괴 전압 $V_B = A \cdot d^n$ 으로 나타낼 수 있고 n 값은 준평등전계 일 때 0.6~0.7이고, 불평등에서는 0.3~0.35범위를 나타낸다. 본 연구에서는 준평등에서 0.703으로 나타났고 불평등 전계에서는 0.4591로 조금 높게 나타났다. pancake coil-pancake coil 전극계의 n 은 0.0.5907이고 절연파괴 전압은 식 (2)과 같다.

$$V_B = 19.68d^{0.5907} \text{ kV} \quad (2)$$

그림 4에 침-평판 전극계에서 외부 압력증가에 따른 절연파괴 전압을 나타내고 그림 5에 구-평판 전극계에서 외부 압력변화에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. 침-평판 전극계에서 액체의 압력을 높이면 절연파괴 전압은 증가하지만 증가폭이 매우 적음을 알 수 있다. 하지만 구-평판 전극계에서는 전극계 외부압력이 증가할수록 절연파괴 전압은 압력 증가에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이것은 고 전계의 인가에 따른 영향과 압력의 증가에 따른 영향으로 나눌 수 있다. 고 전계가 인가되면 액체 질소 중에 존재하는 미소 기포에 Maxwell stress가 작용하여 기포의 팽창을 방해하고 [6], 액체 질소에 압력을 가하면 액체 질소 중의 미세 기포의 반경은 압력이 증가함에 따라 식(3)과 같이 작아지고 수명은 식(4)와 같이 단축된다[7].

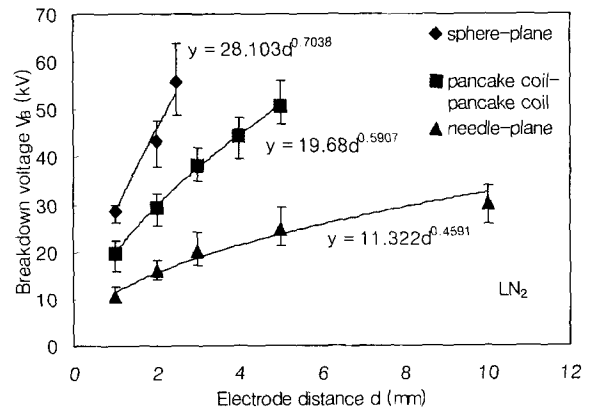


그림 3. 액체 질소의 절연파괴특성.
Fig. 3. Breakdown characteristics of LN₂.

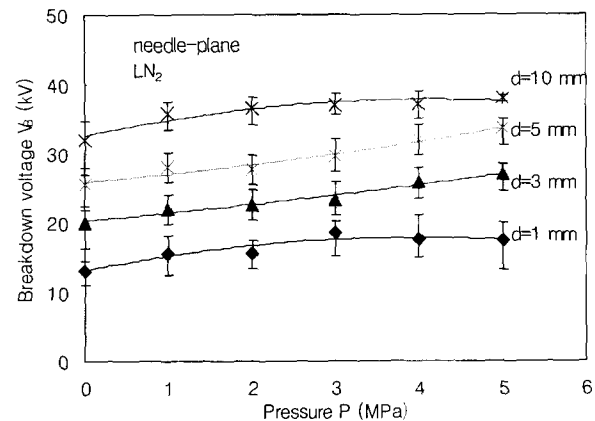


그림 4. 침-평판 전극계에서 압력에 따른 절연파괴 전압.
Fig. 4. Breakdown voltage as function of pressure under needle-plane electrode system.

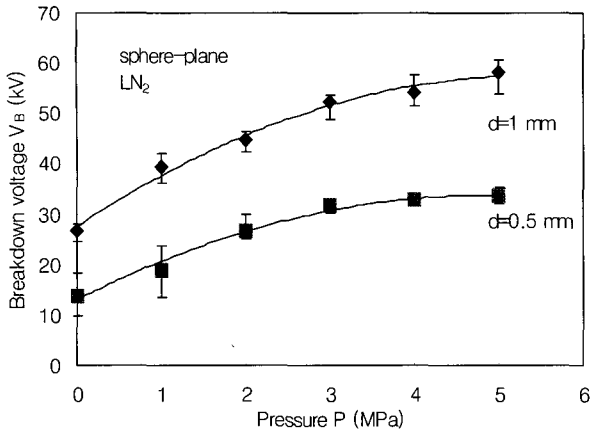


그림 5. 구-판 전극계에서 압력에 따른 절연 파괴 전압.
Fig. 5. Breakdown voltage as function of pressure under sphere-plane electrode system.

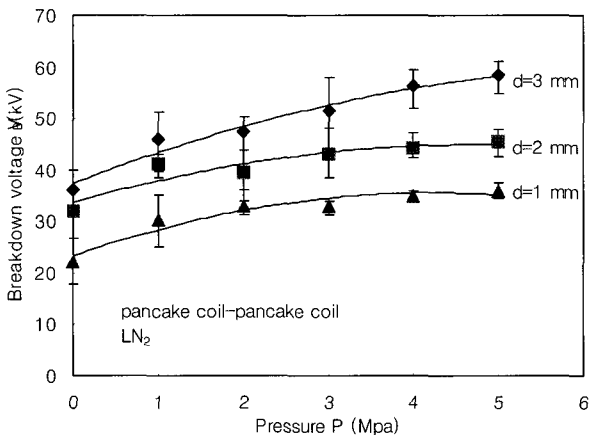


그림 6. pancake coil-pancake coil 전극계에서 압력에 따른 절연 파괴 전압.
Fig. 6. Breakdown voltage as function of pressure under pancake coil-pancake coil electrode system.

따라서 압력이 높아짐에 따라 절연내력이 낮은 액체 질소 중의 미소 기포 크기와 수가 줄어들게 되고 액체의 절연내력은 높아지게 된다.

$$R_m = k \left(\frac{W_i}{P_\infty} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$\Delta t = 1.83 R_m \left(\frac{\rho_\infty}{P_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서, R_m 은 최대 기포 반경, k 는 비례정수, W_i 는 액체 내에 분사된 에너지이고 P_∞ 는 정수압이다. Δt 는 수명이고 ρ_∞ 는 액체밀도이다.

그림 6에 pancake coil-pancake coil 전극계에서 압력 증가에 따른 절연 파괴 전압을 나타낸다. pancake coil-pancake coil 전극계에서 압력 증가에 따른 절연 파괴 전압은 다른 전극계와 같이 증가하는 경향을 나타내었으며 증가폭은 침-평판 전극계보다 높고 구-평판 전극계보다 낮은 값을 나타낸다.

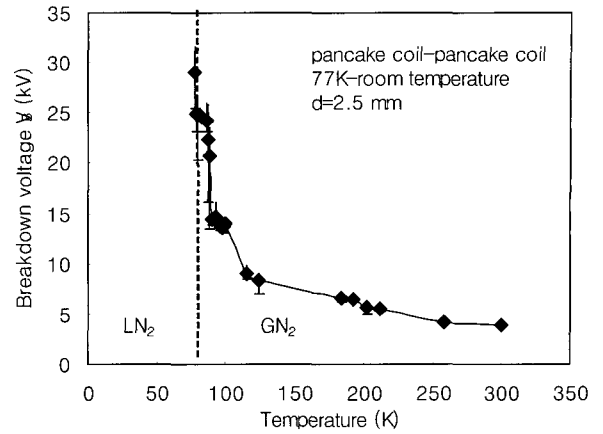


그림 7. 온도에 따른 절연 파괴 전압.
Fig. 7. Relation between Breakdown voltage and temperature.

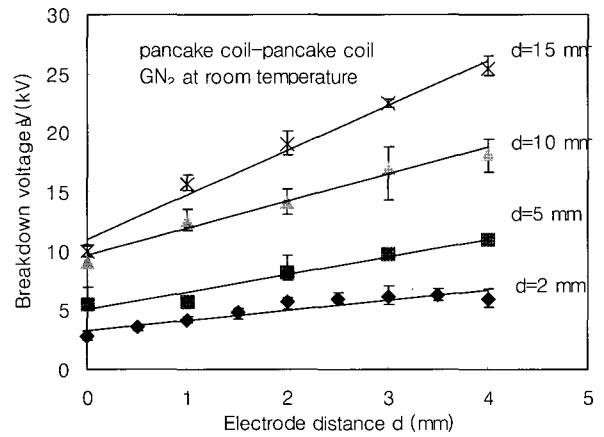


그림 8. 기체 질소에서 압력에 따른 절연 파괴 전압.
Fig. 8. Breakdown voltage as function of pressure in GN₂.

그림 7에 액체 질소의 상변화에 따른 절연 파괴 특성을 나타낸다. pancake coil-pancake coil 전극계를 이용하였으며 전극간 거리는 $d=2.5$ mm에서 교류 전압을 1 kV/s의 비율로 증가시키면서 절연 파괴 전압을 측정하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 비등점 77 K 액체 질소에서 GN₂로 상변화를 하면서 절연 파괴 전압은 현저하게 감소하며 약 100K 이후에는 서서히 감소하였다. 극저온 GN₂의 밀도는 상온에서의 GN₂보다 크다. 따라서 그림 7에서 보듯이 절연 파괴 전압이 급격히 감소하는 것은 기화된 N₂의 온도가 증가함에 따라 밀도가 변하고 그에 따른 평균 자유행정의 변화에 의한 영향으로 고찰된다.

그림 8에 다양한 전극간격에서 기체 질소의 압력의 변화에 따른 절연 파괴 전압을 나타낸다. 압력을 증가시키면서 측정할 때와 감소시키면서 측정할 때의 절연 파괴 전압은 거의 동일하게 나타나는 것으로 관찰되었으며 본 연구에서는 압력을 증가시키면서 절연 파괴 전압을 측정하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 압력이 높아질수록 절연 파괴 전압은 증가함을 알 수 있고 전극간격 d 가 클수록 절연 파괴 전압은 압력의 영향을 더 크게 받아 더욱 높아짐을 알 수 있다. 쿨지 뿐 아니라 극저온의 초전도기에 상온의 전원에서 전력을 공급하는 역할을 하는 전류리드에 의해 상온에서 극저온으로 열 침입과 외란에 의해 발생하는 기체 질소의 영향도 압력을 가함으로써 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 액체 질소를 냉매로 사용하는 고온초전도 기기의 절연 설계를 위해 준평등, 불평등 전계에서 액체 질소의 절연특성을 고찰하였다. 또한 액체 및 기체 질소의 절연파괴 특성에 미치는 압력의 영향을 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 액체 질소의 절연파괴 전압 $V_B = A \cdot d^n$ 식으로 일반화하여 나타내었다. 구-평판 전극계에서 절연파괴 전압은 $28.103d^{0.7038} \text{ kV}$ 를 나타내었으며, pancake coil-pancake coil 전극계에서 절연파괴 전압은 $19.68d^{0.5907} \text{ kV}$ 를 나타내었다.
2. 압력 변화에 따른 액체 질소의 AC 절연파괴 전압은 침 대 평판, 구 대 평판 및 pancake coil 대 pancake coil 전극계에서 모두 증가하였으며 이것은 압력이 증가함에 따라 액체 질소 중의 미소 기포의 크기 및 수명이 단축되어 절연파괴 전압이 높아진 것으로 사료된다.
3. 온도에 따른 기체 질소의 절연파괴 전압은 77 K 이후 급격히 감소하고 약 100 K에서 상온까지는 거의 일정한 값을 나타내었다. 그리고 GN_2 에 압력을 가하면 절연파괴 전압은 직선적으로 증가하고 간격이 클수록 증가폭이 더욱 크게 나타났다.
4. 본 연구의 결과는 pancake coil형 고온초전도 기기뿐 아니라 고온초전도 케이블, 고온초전도 한류기 등 다른 고온초전도 기기의 절연설계에 기초 자료로 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] J. Gerhold, "Dielectric breakdown of Cryogenic gases and liquids", Cryogenic, Vol. 19, pp. 571-584, 1979.
- [2] T. Kaneko, M. Hara and M. Akazaki, "Effects of voltage on dielectric breakdown characteristics in gaps partially immersed in liquid nitrogen", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 20, pp. 349-357, 1985.
- [3] E. B. Forsyth, "The High Voltage Design of Superconducting Power Transmission Systems", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 6, no. 4, pp. 7-16, 1990.
- [4] N. Hayakawa, H. Sakakibari, H. Goshima, M. Hikita and H. Okubo, "Breakdown Mechanism of Liquid Nitrogen Viewed from Area and Volume Effects", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4 No. 1, pp. 127-134, February 1997.
- [5] F. M. J. MacCluskey and A. Denat, "The Behavior of Small Bubbles Generated by Electrical Current Impulses over a Wide

Range of Applied Pressures", J. Appl. Phys., Vol. 80, pp. 2049-2059, 1996.

- [6] Y. Suda, M. Itoh, Y. Sakai, K. Matsuura, N. Honma and T. Kimura, "Behaviour of liquid nitrogen between electrodes in a microgravity environment", Cryogenics 36, pp. 567-571, 1996.
- [7] A. Denat, F. Jomni, F. Aitken and N. Bonifaci "Thermally and Electrically Induced Bubbles in Liquid Argon and Nitrogen", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 9, No. 1, pp. 17-22, February 2002.

저 자 소 개



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



정중만(鄭鍾萬)
1971년 9월 16일생, 1997년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정



김상현(金相賢)
1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 오사카 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986-1989년 한국전기연구원 초전도 연구실장, 1999-2001년 경상대학교 공과대학 학장, 현재 경상대학교 교수, 한국초전도·저온공학회 회장