

비등 기포를 억제한 환경에서 액체 질소의 절연파괴 특성

백승명, 정종만, 김영석, 곽동순, 한철수, 김상현
경상대학교 공과대학 전기공학과 및 공학연구원

Breakdown Characteristics of Liquid Nitrogen in the Environment to Restrain Vapor Bubbles

Seung-Myeong Baek, Jong-Man Jeong, Young-Seok Kim, Dong-Soon Kwag, Chul-Su Han and Sang-Hyun Kim

Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l University and Engineering Research Institute

shkim@nongae.gsnu.ac.kr, trebari@chollian.net

Abstract - Experimental investigations of AC breakdown characteristics of liquid nitrogen in the environment to restrain boil bubbles are presented in this paper. The environment to restrain vapor bubble in the liquid nitrogen is both increasing pressure and decreasing temperature. Measurements of the breakdown voltage of liquid nitrogen in the environment to restrain vapor bubbles are investigated under AC high voltage in a quasi-uniform and non-uniform electrical field for pressures and temperatures ranging from 0 to 0.5 MPa and 77 K to 65 K respectively.

1. 서 론

액체 헬륨보다 경제성이 높은 액체 질소를 냉매로 사용할 수 있는 고온초전도체가 발견됨으로서 고온초전도체를 응용한 케이블, 한류기, 변압기 및 에너지 저장장치 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 더욱이 액체 질소는 생산이 쉬울 뿐 아니라 전기적 절연특성이 우수하기 때문에 고온초전도 기기의 냉매 뿐 아니라 절연물로도 사용된다[1]. 하지만 불순물, 분해가스 등 2차 요인의 작용에 의한 절연파괴 현상은 명확하지 않다. 또한 액체질소는 잠열이 작기 때문에 내, 외적인 열 교란 및 운전상의 발열에 의해 비등기포가 쉽게 발생된다. 그리고 보통의 초전도 기기는 액체 질소의 비등온도에서 운전되기 때문에 비등기포가 발생하기 쉽다. 비등기포는 액체 질소보다 절연내력이 낮기 때문에 낮은 전계에서 절연파괴가 발생한다. 따라서 비등기포는 고온초전도 기기의 운

전이나 수명에 치명적인 영향을 미치게 된다. 그러므로 비등기포를 모의한 환경에서 액체 질소의 절연 특성을 연구하거나, 액체질소에서 비등기포의 발생 메카니즘에 대하여 연구하는 등 비등기포의 발생과 발생환경에서 액체 질소의 절연 특성에 대한 연구를 하였다[2, 3]. 하지만 향후 고온초전도 기기 설계와 안전한 운전을 위해서 비등기포가 억제된 환경에서 운전될 것으로 기대되므로 비등기포가 억제된 환경에서 액체 질소의 절연특성 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 액체 질소내의 비등기포가 억제된 환경에서 운전될 고온초전도 기기의 절연설계를 위하여 액체 질소의 압력과 온도 특성을 이용하여 비등기포를 억제시키면서 액체 질소의 절연파괴 특성을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 비등기포의 억제 방법

그림 1에 액체 질소의 포화 증기압 곡선을 나타낸다. 액체 질소가 액상으로 존재하는 영역은 삼중점 온도와 임계점 온도사이 이고, 고온초전도 기기가 운전되는 액체 질소는 77 K로 비등온도이며 비등한 기체 질소는 액체 질소내에 비등기포로 존재한다. 여기서, 액체 질소내의 비등기포를 억제하기 위해서는 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 압력을 높이는 방법으로 압력을 높이면 액체 질소의 비등온도가 포화 곡선을 따라 상승하게 되어 액체 질소가 비등하기 어렵다는 특성을 이용한 방법이다. 따라서 압력을 높이면 비등기포를 억제할 수 있다. 또 다른 방법은 액체 질소를 비등온도 이하로 과냉각시켜 액체 질소의 비등을 억제하는 방법이 있다. 액체 질소의 온

도를 비등온도 이하로 낮추려면 냉동기 등 고가의 장비가 필요하므로 진공펌프를 이용하는 방법을 사용하고 있다. 하지만 진공펌프를 사용하면 액체 질소의 압력이 낮은 상태에서 과냉각됨으로 실제 응용과 차이가 생긴다. 따라서 본 연구에서 진공 펌프와 열전도 특성을 이용하여 대기압 상태의 과냉각 액체 질소를 제조하여 방법을 개발하여 절연 특성을 고찰하였다.

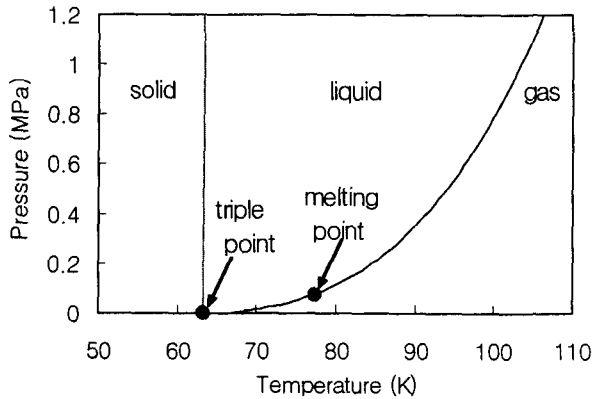


Fig. 1. Saturation vapor pressure curve of liquid nitrogen.

2.2 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용한 전극은 침, 구 및 평판을 사용하였다. 침 전극은 선단 곡률 반경이 25 μm 이고 선단 각은 24° 인 stainless를 사용하였으며, 구 전극은 반경 8.8 mm인 stainless 구를 사용하였다. 평판전극은 직경 80 mm, 두께 10 mm이고 표면은 0.1 μm 이하로 경면 처리하였다.

압력을 가하여 비등기포를 억제하는 방법을 이용하여 액체 질소의 절연 파괴 특성을 고찰하기 위해 1 MPa 이상 압력을 견디는 압력용기 안에서 측정하였다. 압력용기는 SUS로 제작된 것이며, 열 침입을 막기 위해 진공 층이 이중으로 되어있다. 압력 용기 내, 외부 진공 층을 10^{-3} torr 이하로 진공시킨 후 전극계를 압력용기 안에 배치시키고 진공 펌프를 이용하여 내부를 진공시킨 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 절연 파괴 전압을 구하였다. 본 연구에서는 압력을 가하지 않은 초기 대기압 상태를 0 MPa로 하였으며, 액체 질소는 범용을 사용하였다.

액체 질소를 대기압 상태에서 비등온도 이하로 과냉각시켜 액체 질소의 비등을 억제하는 방법을 이용하여 액체 질소의 절연 특성 연구를 위한 실험 개략도를 그림 2에 나타낸다.

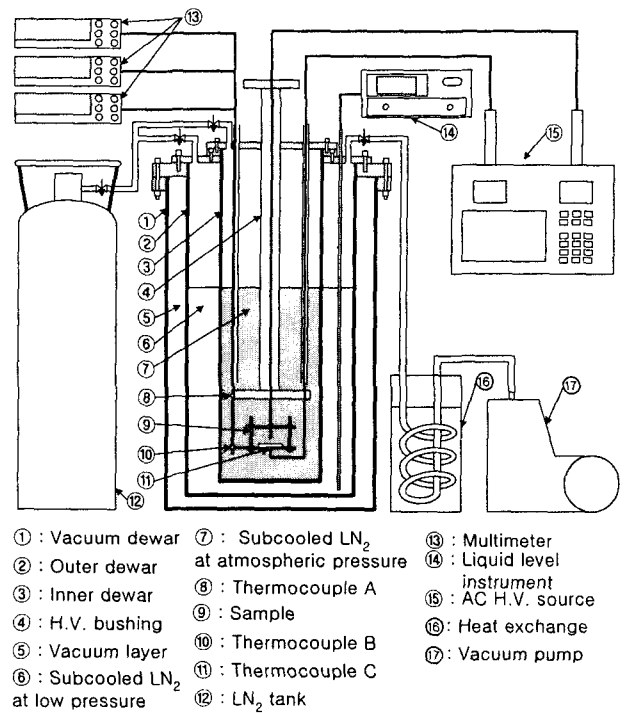


Fig. 2. Experimental apparatus.

외부로부터 열 침입을 막기 위해 액체 질소가 담긴 내부, 외부 용기 바깥에 진공 층을 두었다. 외부 용기는 대기와 격리되어 있으며 내부 용기는 GFRP 관을 통하여 대기와 연결되어 있다. 외부 용기내의 압력이 떨어지면서 액체 질소의 온도는 그림 1에서 보는 바와 같이 포화곡선을 따라 온도가 떨어지게 된다. 외부 용기내에 있는 액체 질소의 온도가 떨어지면 열전도에 의해 내부 용기내의 액체 질소의 온도가 떨어져 대기압 상태의 과냉각 액체 질소가 된다. 액체 질소의 높이는 Liquid level instrument(AMI model 185)를 이용하여 관측하였다. 600 l/min 용량의 진공 펌프를 이용하였으며, 온도 측정은 Lake Shore사의 Chromel-CuFe(0.15%) 열전대를 사용하였다. 액체 질소의 온도 분포 관찰을 위해 열전대 A는 전극계의 온도를 측정하였으며, 열전대 B는 열전대 A에서 옆으로 70 mm 떨어진 곳의 온도이며, 열전대 C는 열전대 B에서 위로 70 mm 떨어진 곳의 온도를 측정하였다. 온도는 전압을 측정하여 온도로 환산하였으며 임의의 온도에서 절연 파괴 실험을 할 경우 $\pm 0.25\text{K}$ 오차 범위 내에서 실시하였다. AC 고전압 장치는 BAUR Dieltest(Type DTA E, AC 100 kV, 60 Hz)를 사용하였으며 1 kV/s로 증가시키면서 절연 파괴 전압을 구하였다. 절연 파괴 전압은 동일한 조건에서 각 10회 실시하여 얻었으며 매 회당 1분의 시간 간격을 두었다.

2.3 실험 결과 및 검토

그림 3에 침-평판 전극계에서 외부 압력증가에 따른 절연 파괴 전압을 나타내고 그림 4에 구-평판 전극계에서 외부 압력변화에 따른 절연 파괴

전압을 나타낸다. 침-평판 구-평판 전극계 모두 압력과 전극거리가 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가하지만 증가하는 경향은 서로 다르게 나타났다. 침-평판 전극계에서 압력이 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가 후 거의 일정한 한 경향을 나타내지만 구-평판 전극계에서는 압력이 증가함에 따라 절연파괴 전압이 증가하다가 포화하는 경향을 나타내었다. 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, 액체 질소에 압력을 가하면 액체 질소 중의 미세 기포의 반경은 압력이 증가함에 따라 작아지고 수명은 단축된다[4].

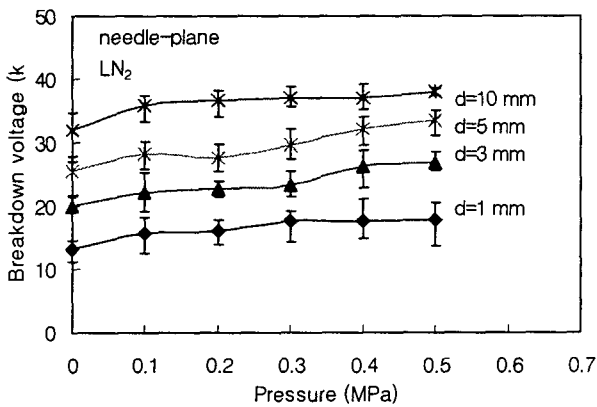


Fig. 3. Breakdown voltage versus pressure in needle-plane geometry.

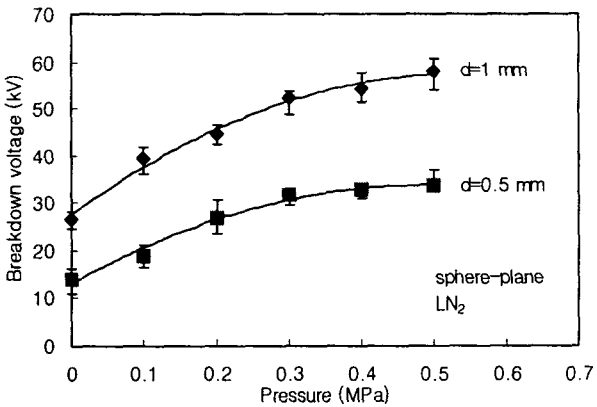


Fig. 4. Breakdown voltage versus pressure in sphere-plane geometry.

여기서 침전극의 경우 침 끝단 반경이 25 μ m로 구의 반경 8.8 mm 보다 매우 작으므로 비등기포가 영향을 받을 면적이 구 전극보다 매우 작다. 즉, 침-평판 전극의 경우 전극사이에 비등기포의 양이 구-평판 전극보다 적으므로 압력을 증가함에 따라 절연파괴 전압이 상승한 후 거의 일정한 절연파괴 전압을 나타낸다. 하지만 구-평판 전극의 경우 압력이 증가함에 따라 비등기포의 양은 감소하므로 절연파괴 전압이 일정하게 증가한다.

하지만 압력을 더욱 높임에 따라 비등기 포가 거의 존재하지 않는 액체 질소의 절연내력을 나타내므로 절연파괴 전압은 거의 일정하게 포화된다.

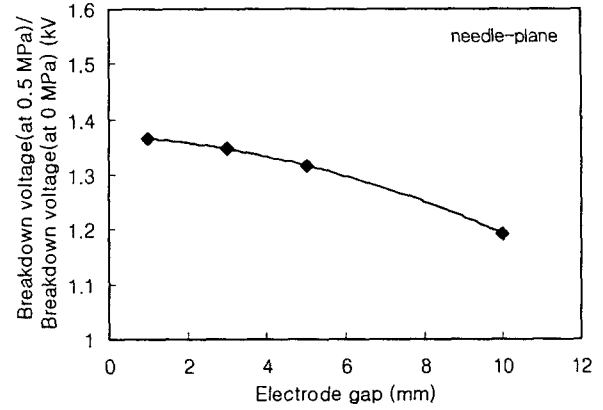


Fig. 5. Increase rate of breakdown voltage(at 0.5 MPa)/breakdown voltage(at 0 MPa) as a function of electrode gap.

그림 5에 전극간 거리에 따른 압력 0.5 MPa 일 때 절연파괴 전압에 대한 0 MPa 일 때 절연파괴 전압 값을 나타낸다. 전극간 거리가 증가함에 따라 절연파괴 전압 증가폭은 서서히 감소함을 알 수 있다.

그림 6에 대기압 상태에서 시간에 따른 액체 질소의 온도를 나타낸다. 본 연구에 사용한 대기압 상태의 과냉각 액체 질소 생산방법은 액체 질소의 양과 펌프의 용량 및 내부 용기의 재질 등에 의해 액체 질소의 온도변화 및 온도 분포가 결정된다. 알루미늄으로 제작된 내부 용기의 액체 질소온도는 외부 용기의 액체 질소를 펌핑하여 온도를 떨어짐에 따라 열전도에 의해 온도가 점점 떨어진다. 펌핑을 함에 따라 액체 질소의 표면에 가까운 열전대 A 위치의 온도가 떨어지고 이어서 열전대 B, C 위치의 온도가 떨어짐을 알 수 있다. 같은 높이에서 알루미늄으로 제작된 내부 용기 벽에 가까운 열전대 B 위치의 온도가 벽에서 먼 열전대 C 위치의 온도보다 더 빨리 떨어짐을 알 수 있다. 65 K의 온도까지 떨어지는데 걸린 시간은 열전대 A, B 및 C 각각 약 122분, 137분 및 163분이 걸렸다. 펌핑량은 600 l/min이고, 액체 질소량은 35.35 l이다.

그림 7에 진공 펌프를 정지하였을 때 내부 용기내의 액체 질소의 온도 분포를 나타낸다. 20분간 펌핑 한 후 진공 펌프를 정지하였을 때 열전대 A, B의 온도는 거의 일정하게 나타났으며 열전대 C (전극계)의 온도는 74.8 K에서 72.1 K까지 떨어졌다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 열전대 C는 72 K와 73 K 사이의 온도를 약 78분간 유지하였다. 온도차이가 크지 않으며, 일정한 온도를 오랜 시간 유지하였다.

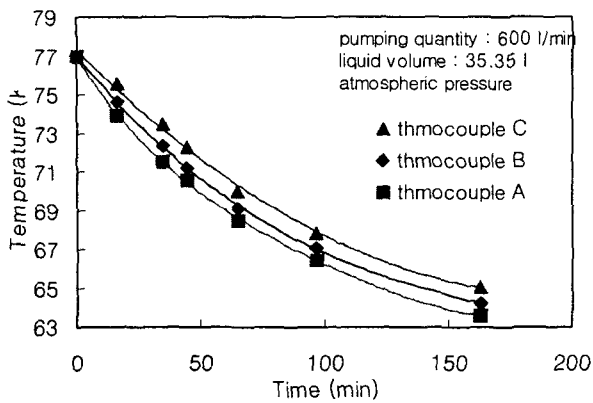


Fig. 6. Vacuum pump cooling down at atmospheric pressure.

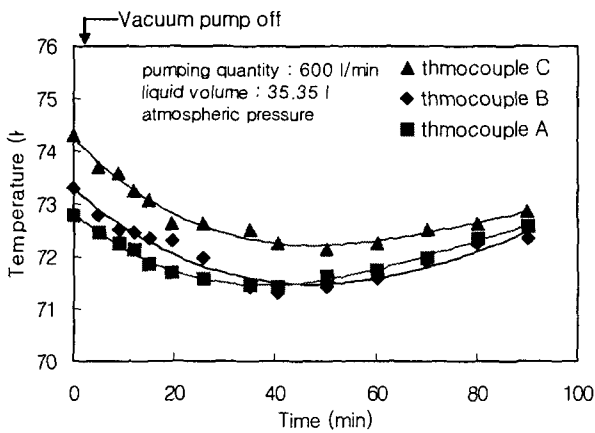


Fig. 7. The temperature gradient.

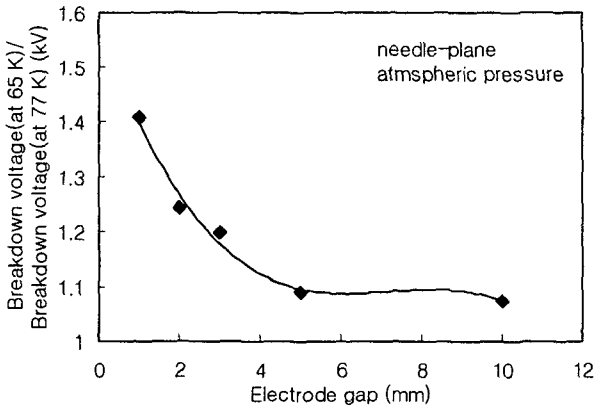


Fig. 8. Increase rate of breakdown voltage(at 65 K)/breakdown voltage(at 77 K) as a function of electrode gap.

그림 8에 전극간 거리에 따라 침-평판 전극계에서 대기압 상태 65 K 액체 질소의 절연내력에 대한 77 K 액체 질소의 절연내력을 나타낸다. 압력을 이용하는 방법과 달리 절연파괴 전압은 전극간 거리가 증가함에 따라 급격히 감소한 후 일

정한 값을 나타내었다. 액체 질소를 비등온도 아래로 과냉하면 액체 질소내의 비등기포 체적이 감소할 뿐 아니라 액체 질소의 밀도가 증가하여 절연내력이 증가하는 것으로 사료된다. 전극간 거리 짧을 때 비등기포는 전극 사이의 액체 질소의 절연에 큰 결점으로 작용하므로 온도를 낮춰 비등기포를 억제시키면 액체 질소의 절연내력이 크게 향상되지만 전극간 거리가 긴 경우 전극 내에 상대적으로 비등기포 체적이 적으므로 온도를 내려도 절연내력은 크게 향상되지 않는다.

3. 결론

본 연구에서 비등기포를 억제한 환경에서 액체 질소의 절연 특성을 연구하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

압력을 높이는 경우 액체 질소의 절연파괴 전압은 증가하였으며 침-평판, 구-평판 전극계에서 증가하는 경향이 다르게 나타났다. 이것은 전기적 스트레스를 받는 전극면적의 차이와 전극간 존재하는 비등기포의 양과 관련된 것으로 사료된다. 또한 침-평판 전극계에서 전극간 거리에 따라 절연파괴 전압 증가폭은 서서히 감소하였다.

액체 질소를 과냉시키는 경우 액체 질소내의 비등기포 양 및 수가 감소할 뿐 아니라 액체 질소의 밀도가 증가하여 절연파괴 전압은 증가하지만 침-평판 전극계에서 전극간 거리에 따른 절연파괴 전압 증가폭은 압력을 이용하는 방법과 다른 경향을 나타내었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 이 연구는 2002년도 경상대학교 연구년제 연구교수연구지원 과제임

[참고 문헌]

- [1] J. Gerhold, "Dielectric breakdown of Cryogenic gases and liquids", Cryogenic, Vol. 19, pp. 571-584, 1979.
- [2] M. Hara and H.Okubo, "Electrical insulation characteristic of superconducting power apparatus", Cryogenics, Vol. 38, pp. 1083-1093, 1998.
- [3] Hara, M., Wang, Z.-C. and Sait, H., "Thermal bubble breakdown in liquid nitrogen under non-uniform fields," IEEE Transactions on DEI, 1(4) 709-715, 1994.
- [4] A.Denat, F. Jomni, F. Aitken and N. Bonifaci, "Thermally and Electrically Induced Bubbles in Liquid Argon and Nitrogen," IEEE Transactions on DEI Vol. 9, N. 1, 2002.