

## 액체 N<sub>2</sub>의 동적 절연 파괴 특성

### Dynamic Electrical Breakdown Characteristics of Liquid Nitrogen

<sup>0</sup>김영석<sup>\*</sup>, 정종만<sup>\*</sup>, 박민환<sup>\*</sup>, 백승명<sup>\*</sup>, 장현만<sup>\*</sup>, 김상현<sup>\*</sup>  
(Y.S.Kim<sup>\*</sup>, J.M.Jung<sup>\*</sup>, M.H.Kwak<sup>\*</sup>, S.M.Baek<sup>\*</sup>, H.M.Jang<sup>\*</sup>, S.H.Kim<sup>\*</sup>)

\* 경상대학교 공과대학 전기공학과  
(Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l. Univ.)

#### Abstract

Electrical breakdown characteristics of liquid nitrogen(LN<sub>2</sub>) used as both coolant and insulator for high T<sub>c</sub> superconductor system is very important. This paper presents dynamic breakdown characteristics of liquid nitrogen by quench phenomena of thermal bubble under high electric field. As the result, the breakdown mechanism of LN<sub>2</sub> depends on thermal bubble effect. The breakdown voltage decreases slightly with increasing heating. In the Electrode arrangement, electrical breakdown voltage of horizontal arrangement appears lower than that of vertical arrangement.

**Key Words (중요용어) :** High T<sub>c</sub> superconductor(고온초전도체), Electrical breakdown(전기절연파괴), Quench (상전도 전이), Thermal Bubble(열 기포)

#### 1. 서론

초전도 기술은 전기에너지-송전의 차세대 기술의 하나로 유망 되고있고, 초전도 기술의 전력-에너지 분야에의 상용에 관하여 검토가 진행되고 있다.<sup>1)</sup> 지금까지는 기존의 저온초전도선재(NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn)<sup>2)</sup>를 이용한 초전도 시스템의 개발이 중심이 되었지만, 냉매 및 절연재료인 액체헬륨(LHe)의 취급과 경제성 문제로 지연되고 있어 임계온도가 급격히 상승한 perovskite 산화물계 초전도체<sup>3) 5)</sup>가 출현함에 따라 가까운 장래에는 LHe 대신 냉매 및 절연재료로 취급이 용이하고 가격이 저렴한 액체질소(LN<sub>2</sub>)가 활용되어 한층 가속화 될 것으로 보인다. 이러한 배경에 극저온에서의 절연특성에 대한 다양한 특성들의 조사가 필요하다. 초전도 전력 기기에는 단락 전류 등의 과전류 발생시에 Quench (초전도 상태에서 상전도 상태로의 전이현상)가 발생하는 고유의 현상이 존재한다. 초전도 기기의 Quench시에는 상전도 부에서 발생하는 Joule열, 전위차 및 전계의 발생등이 극저온 액체의 절연성능에 크게 영향을 미치는 가능성

이 있다. 즉, Quench를 고려한 극저온 액체의 절연 특성<sup>6)</sup>은 종래의 정적인 절연파괴특성과는 다르고 동적인 절연파괴특성을 나타내게 되어 고려되어야 한다. 이에 따른 초전도기기의 실용절연설계에 대해서는 quench시에 절연환경을 고려한 동적인 절연성능에 관한 검토가 불가피하다. 초전도 응용기기는 극저온이라는 특수환경에 의해 운용되어짐에 따라 극저온 액체에 대한 전기적 절연 및 열적 특성에 대해 연구검토가 절실하다. 이에 하부전극으로 칸탈 발연선을 사용하여 quench시에 발생하는 기포를 인위적으로 발생시키고 그것에 의한 열적 기포가 액체질소의 절연환경에 미치는 영향을 검토하였다. 따라서 본 연구는 향후 고온초전도 응용기기의 냉매로 활용될 LN<sub>2</sub>를 중심으로 절연파괴 특성과 기포에 의한 파괴기구에 대한 실험적 검토를 행하였다.

#### 2. 실험장치 및 방법

그림 1에 본 실험에 사용한 액체질소에서의 절연 파괴 특성 측정을 위한 실험 개략도를 표시한다. 제작된 cryostat는 pyrex유리로 구성되어진 이중 구조

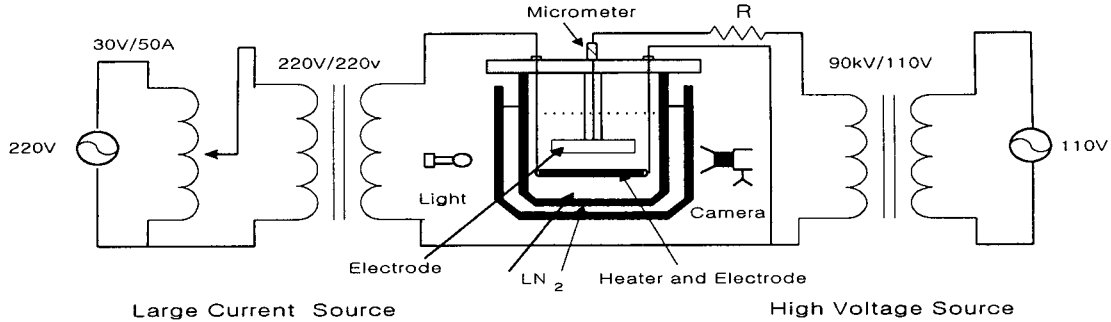


그림 1 실험개략도

로 2 중벽 사이에는 진공( $10^{-3}$  [Torr])을 유지시켰고 내부에는 은(silver)도금으로 측면에 의한 열침입을 극소화하였으며, 발열에 의한 기포의 거동 및 절연 파괴 현상을 폭 25[mm]의 slit을 두어 관측하였다. 또한 cryostat의 외부조와 내부조는 LN<sub>2</sub>를 사용하여 열적안정과 시료용으로 쓰이는 LN<sub>2</sub>(99.9[%])를 주입하였다. 플랜지에 부착된 마이크로메타(오차율  $\pm 10[\mu\text{m}]$ )에 의해 전극간격을 조절하였으며, 평판-봉의 불평등 전계하에서 특성을 조사하였다. 실험에 사용된 전극으로서는 직경 27mm의 스테인레스(SUS304)로 구성되어진 평판전극을 연마제 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 연마하고 초음파세척을 5분간 한뒤 건조시켜 사용하였으며, 이때 표면조도기(Taylor-hobson사, 0.1 [ $\mu\text{m}$ ]/20[mm])로 측정된 최대 거칠기0.098[ $\mu\text{m}$ ]인 것을 상부전극으로 사용하였으며, 하부전극으로서는 직경 1mm의 칸탈 발열선을 사용하여 고전압측과 전류원측을 동시에 접속하였다. 하부전극에는 기포발생을 위해 그림에서 왼쪽편에 전류원을 설치하여 기포를 발

전극배치로는 기포의 부력과 전극사이의 정전력의 영향을 조사하기 위해 3가지 방식의 전극배치를 도입하였다. 전원으로는 교류전압(최대출력 교류실효전압: 90[kV], 주파수:60[Hz], BAUR사)을 사용하여 예상된 파괴전압의 70-80[%]까지는 빠른 속도로 전압을 상승시키고, 그 이후에 0.3-1.5 [kV/s]의 전압상승 속도를 서서히 상승시키는 상승법<sup>7)</sup>에 의해 절연파괴시켰으며, 전압인가는 동일 조건하에서 6-10회 반복 측정을 하였다. 또한 방전직후에 형성된 기포에 대한 영향을 고려하여 방전직후 3분이 지난 이후에 재차전압을 인가하였고, 발열에 의한 열 기포의 거동, 수명특성 및 절연파괴의 확인은 cryostat의 관측창을 통해 고속사진기(Pentax fx-6059)로 촬영 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 LN<sub>2</sub>에서의 정적 및 동적절연파괴의 전압의 전극거리 의존성에 대해 나타낸다.

정적 절연파괴 전압은 Heating을 시키지 않은 상태에서 두 전극사이에서 전압을 인가하여 측정하고,

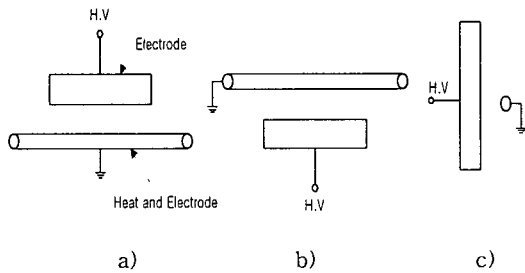


그림 3 전극배치

생시켰고 고전압에 의한 전류원의 유도전압을 방지하기 위해 고전압측 출력단에 고저항을 달아 전류원의 유도전압을 최소화하여 고전압을 인가하였으며, 전류원측에도 변압기(1:1)를 설치하여 유도되는 전압을 억제하였다. 실험에 사용한 전극배치도를 그림 2에 나타낸다.

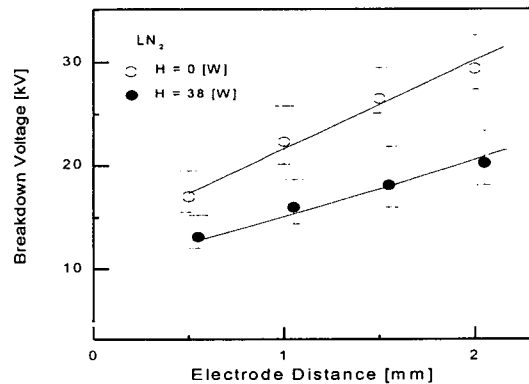


그림 2. 전극거리에 대한 정적 및 동적 절연 파괴 특성

동적절연파괴 전압은 Heating을 시키후, 전압을 인가하였다.

그림에서 동적절연파괴전압( $V_d$ )가 정적절연파괴전압( $V_s$ )보다 낮게 나타나 있는 것을 알 수 있다. 예로  $d = 1\text{mm}$ 에서  $V_s$ 는 23[kV]인데 반해  $V_d$ 는 17[kV] 정도로 약 5~6[kV]정도 낮게 나타나 있다.

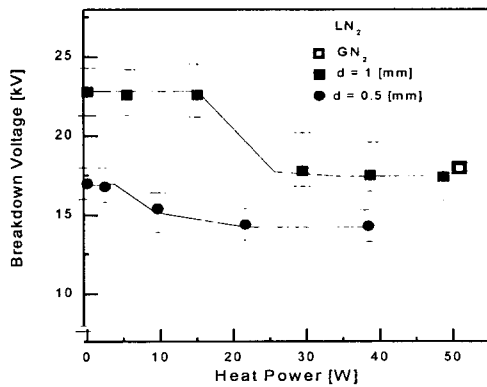


그림 4. 발열량에 따른 동적 절연파괴 특성

이것은 Heat 발열량에 의해 LN2내의 절연내력이 기포층이 생성됨에 따라 부분방전에 의한 streamer의 진전에 의해 방전경로가 형성되어 절연파괴에 이른다고 생각된다.

Heat 발열량에 의한 기포발생이 절연파괴에 미치는 영향을 그림 4에 표시한다. 기포의 발열량은 Heat 발열선에 전류를 가변하여 기포의 크기와 발열량을 조절하였다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 절연파괴전압은 소량의 발열에서는 파괴전압이 거의 영향이 없지만, 일정 발열량(30[W])이상이 되면 절

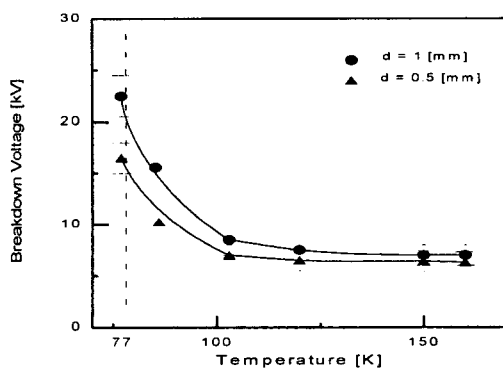


그림 5. 온도 변화에 따른 절연파괴 특성

연파괴전압이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 일정이상의 발열량이 되면 전극사이에 기포층

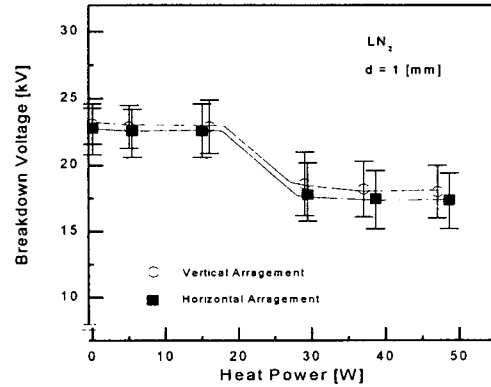


그림 6. 전극배치에 대한 동적절연파괴 특성

이 형성되고 LN2주위를 열화시켜 GN2에 의한 절연파괴가 일어난다고 생각된다. 이것은 그림5에 온도 변화에 의한 GN2에서의 절연파괴 특성으로 전극사이에 기포층에 의한 절연파괴가 일어난다는 것을 확인시켜 주고 있다.

그림 6은 전극의 수직과 수평배치에 대한 절연파괴 특성을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 수직배치가 수평배치보다 절연파괴 전압이 약간 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 수평배치인 경우, Heating에 의한 부력과 두 전극 사이의 정전력이 서로 합쳐져 절연파괴를 더욱 가속화시켜주고, 수직배치인 경우 부력의 힘이 정전력의 힘보다 더 지배적인 상황이 되어 파괴 전압이 약간 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

$$F_B(\text{부력}) = \frac{4}{3} \pi a^3 (\rho_l - \rho_g) G$$

$$F_g(\text{정전력}) = 2 \pi a^3 \frac{\epsilon_l (\epsilon_g - \epsilon_l)}{2 \epsilon_l + \epsilon_g} \nabla E^2$$

(a: 기포반경,  $\rho_l$ : 액체의 질량밀도,  $\rho_g$ : 기포기체의 질량밀도, G: 중력가속도,  $\epsilon_l$ : 액체의 유전율,  $\epsilon_g$ : 기포가스의 유전율, E: 기포가 있는 점의 전기)

이것은 Hara 등의 기포해석<sup>8)</sup>등에서 보고하고 있다.

V-t 수명특성은 유전체의 절연파괴특성의 기초가 되는 중요한 데이터이다. 그림에서 실선은 최저 절연파괴 전압을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 H= 38[W]인 경우의 열적인 기포가 존재하는 조건 하에서는 낮은 전압으로 거의 일정한 값에 도달하고 절연파괴 전압이 높아지는 비율도 감소한다. 그러나, 히터 발열량의 변화에 따라 절연파괴 전압이 조금씩 변화한다. 적은 발열량에서 어느 시간까지는 기포의 형태 변화는 보이지 않고, 어느 일정시간이 지난후 두 전극사이에 기포채널과 열화에 의한

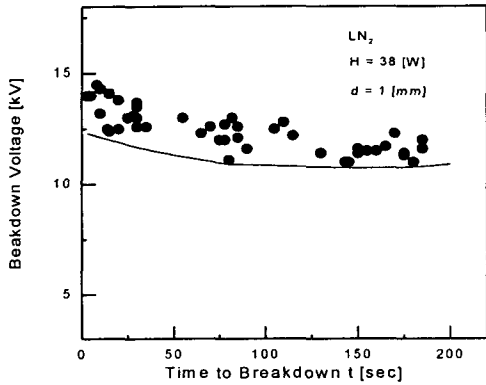


그림 7 V-t 수명특성

기체에서의 기포 절연파괴가 된다. 물론, 전계의 인가가 없는 경우에도 기포가 형성되지만, 많은 Heat 발열량에 따라 절연파괴 전압의 시간이 감소하는 것이 인식된다.

그림 8에 전계에 따른 열 기포의 거동사진을 나타낸다. 사진에서 볼 수 있듯이 전계 인가시 액체질소 주위는 열 기포에 의해 교란을 일으켜 열화 되며, 방전경로가 형성되어 절연파괴에 이르게 된다.

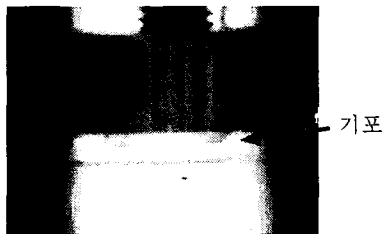


그림 8. 전계인가에 따른 기포의 거동 사진

#### 4. 결론

본 연구에서는 액체질소중에서의 열 기포에 의한 실험을 행하였다. 얻어진 결과를 보면 동적절연파괴 전압( $V_d$ )이 정적절연파괴전압( $V_s$ )보다 낮게 나타나 있는 것을 알 수 있고, 절연파괴전압은 소량의 발열에서는 파괴전압이 거의 영향이 없지만, 일정이상의 발열량이 되면 절연파괴전압이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 전극배치에서 수직배치가 수평배치보다 절연파괴 전압이 약간 높게 나타나는 것을 알 수 있으며,  $H=38[W]$ 인 경우의 열 적인 기포가

존재하는 조건하에서는 낮은 전압으로 거의 일정한 값에 도달하고 절연파괴 전압이 높아지는 비율도 감소한다. 추후에 동적인 절연파괴에서 두 전극사이에 작용하는 힘에 대한 수치해석을 하여 실험치에 대한 검토와 이론 정립이 보고될 예정이다.

#### 참고문헌

1. 沼田都夫. 21世紀中葉の エネルギー・電かについて—地球環境と調和したエネルギーお考える—財團法人電力中央研究所. pp.1-30, (1992)
2. R.L. Wong and C.T.Yeaw, "Coparision of the Calculated and Measured Stability of a NbTi Cable-In Conduit Conductor" IEEE Trans. Appl. Superconductivity, Vol. 5. pp.592-595, (1995)
3. 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)
4. S.Jin et al, "High critical currents in YBCO Superconductors" Appl. Phys. Lett. Vol.52. pp.2074-2076, (1988)
5. H.Maeda et al, "A new HighTc Superconductor without a Rare Earth Elements." Jpn.J. of Appl. Phys. Vol. 27, pp. 209-210, (1988)
6. J.Gerhold, "Breakdown Phenomena in Liquid Helium.", IEEE Trans. Elect. Insul. 24(2) pp.155-165, (1989)
7. 西村,尾崎, "極低溫冷媒の不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)
8. 原・王, "液体窒素中における不平等電界下の熱氣泡舉動," 電氣學會論文誌A, Vol. 114-A, No. 4, pp.337, (1993)