

Breakdown Characteristics of Liquid Nitrogen Induced by Quench

金榮錫*, 鄭鍾萬*, 郭政煥**, 丁淳裕**, 金相賢***

(Kim Young-Seok, Jeong Jong-Man, Kwak Min-Hawn**, Chung Soon-Yong**, Kim Sang-Hyun***)

Abstract - Electrical breakdown characteristics of liquid nitrogen(LN₂) used as both coolant and insulator for high T_c superconductor system are very important. This paper presents dynamic breakdown characteristics of LN₂ by quench phenomena of thermal bubble under high electric field. Experimental results revealed dynamic breakdown voltage fell down drastically compared with the static breakdown voltage without the quench. Because of increasing heat power, bubble size becomes big and breakdown voltage decreases. The breakdown voltage mechanism of LN₂ depends on thermal bubble effect. In the Electrode arrangement, electrical breakdown voltage of horizontal arrangement appears lower than that of vertical arrangement. Also, we observed the behavior of thermal bubbles in LN₂ which were generated after quench using camera.

Key Words : High T_c Superconductor, Electrical Breakdown, LN₂, Quench, Thermal Bubble

1. 서 론

초전도 기술은 전기에너지-송전의 차세대 기술로 유망 되고있고, 초전도 기술의 전력-에너지 분야에의 상용화에 관해 검토가 진행되고 있다.[1][2] 1911년 네덜란드의 K.Onnes에 의해 발견된 초전도 현상은 저항이 0인 완전 도전성의 특성을 가지고 있어, Joule 손실 없이 대용량의 전류를 통전 할 수 있게 되었다. 최근 임계온도가 높아진 고온초전도체[3][4]의 개발은 기존의 저온초전도선재(NbTi, Nb₃Sn)[5]의 냉매로 사용되는 액체헬륨 대신에 액체질소를 냉매로 사용하기 때문에 취급이 간편하고 값이 싼 이점이 있어 개발이 한 층 가속화되고 있다. 액체질소를 냉매로 사용하는 고온 초전도 전력 기기의 개발은 각지에서 진행중이며, 특히 초전도 케이블, 변압기 등은 시작기가 제작되어 실용화를 목표로 해서 검토가 진행되고 있는 실정이다. 그러므로, 고온 초전도 응용에 있어서 액체질소를 냉매로 사용함에 따라 극저온 액체 절연기술의 중요성이 한층 높아지고 있으며, 초전도 기기의 실용화를 위해서는 극저온 액체에 대한 고전압하에서의 절연기술의 확립이 필수적이라 할 수 있다. 하지만, 극저온 환경하에 대한 전기절연 및 전계 현상에 대해서는 정력적인 검토가 행해지고 있지만, 그것은 액체헬륨과 액체질소등의 극저온 액체의 방전물리에 주안을 둔 정적인 절연파괴특성에 대한 것이 지배적이었다.[6][7]

초전도 전력 기기의 절연구성은 냉매액체이외에도 넓은 온도영역에서 증발 가스, 진공, 고체, 등의 복합계로 이루어져 있기 때문에 침입 열과 Quench에 의한 기포가 절연성능에 주는 영향을 고려하지 않으면 안 된다. 즉, 초전도 전력 기기의 실용절연설계를 위해서는 열적 기포가 존재하는 복합 절연계의 절연구성에 대한 데이터를 얻을 필요가 있다. 초전도 전력 기기에는 상전도에서는 볼 수 없는 이상전압 및 단락 전류등의 과전류 발생시에 Quench[8](초전도 상태에서 상전도 상태로의 전이현상)라는 고유의 현상이 존재하므로 초전도 전력 기기에 Quench가 발생하면 상전도 부에서 발생하는 Joule열, 전위차 및 전계의 발생 등이 극저온 액체의 절연성능에 크게 저하된다. 즉, Quench를 고려한 극저온 액체의 절연특성[9]은 종래의 정적인 절연파괴특성과는 다른 동적인 절연파괴특성을 나타나게 되어 이를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 고온초전도 전력 기기의 절연재료 및 냉매로 사용될 액체질소에서 기기의 사고 시 quench를 모개한 실험조건으로 기포를 인위적으로 발생시키고 그것에 의한 열 적 기포가 액체질소의 절연환경에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 액체질소에서의 절연파괴 특성 측정을 위한 실험 개략도를 그림 1에 표시한다.

제작된 저온용기는 pyrex유리로 구성된 이중 구조의 형태로 2 중벽 사이에는 rotary pump로 오랜시간 펌핑하여 진공(10³[Torr])을 유지시켰고 내부에는 은(silver)도금을 하여 측면 으로부터의 외부의 열 침입을 최소화하였으며, 칸탈(Kantal) 발열선에 의해 발생하는 기포의 거동 및 절연파괴 현상을 관 측하기 위하여 폭 25[mm]의 slit을 두었다. 또한

* 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 碩士修了
 ** 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 博士課程
 *** 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 教授 · 工博(ICRC)
 接受日字 : 1998年 8月 28日
 最終完了 : 1998年 11月 26日

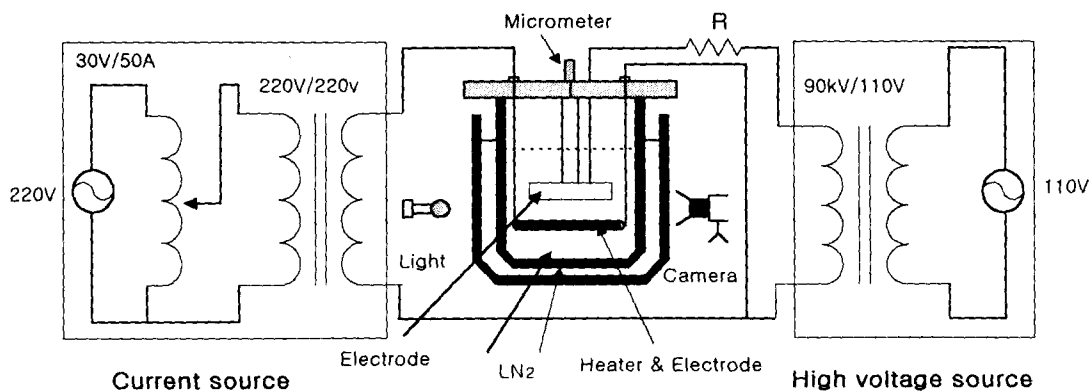


그림 1 실험개략도
Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

저온용기의 외부조와 내부조는 질소가스로 내부의 불순물을 제거한 뒤 외부조에 상용의 액체질소를 사용하여 저온용기를 열적으로 안정시켰으며, 내부조에는 시료용으로 쓰이는 액체 질소(99.9%)를 주입하였다. 시료 Holder의 플랜지에 마이크로메타(오차율 $\pm 10[\mu\text{m}]$)를 부착하여 전극간격을 조절하였으며, 평판-봉의 불평등 전계 조건하에서 특성을 조사하였다. 실험에 사용된 전극으로서는 직경 27mm의 스테인레스(SUS304)로 구성되어진 평판전극을 연마제 Al_2O_3 로 연마하고 초음파세척을 5분간 세척한 뒤 건조시켜 사용하였으며, 이때 표면조도기(Taylor-hobon사, $0.1[\mu\text{m}]/20[\text{mm}]$)로 측정된 최대 거칠기 $0.078[\mu\text{m}]$ 인 것을 상부전극으로 사용하였으며, 하부전극으로서는 직경 1mm의 칸탈 발열선을 고전압축과 직류 전류원측을 동시에 접속하였다. 하부 전극의 기포발생을 위해 그림 1에 직류 전류원(6260B DC Power Supply, HP사)을 설치하여 1A~10A의 전류를 가변시켜 기포의 크기와 기포량을 발생시켜 조절하였고, 고전압에 의한 전류원내의 유도되는 전압을 방지하기 위해 고전압측 출력단에 고저항을 달아 전류원내의 유도전압을 최소화하여 고전압을 인가하였으며, 전류원 측에도 변압기(220V/220V)를 설치하여 유도되는 전압을 억제하였다.

교류전압(최대출력 교류실효전압: 90[kV], 주파수:60[Hz], BAUR사)인가는 1.5[kV/s]의 전압상승 속도로 서서히 상승시켜 절연파괴 시켰으며, 전압인가는 동일 조건하에서 5-10회 반복측정을 하였다. 방전직후에 형성된 기포에 대한 영향을

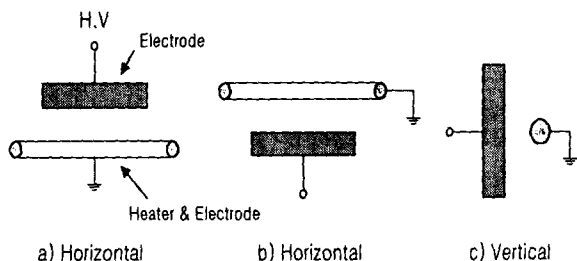


그림 2. 전극배치
Fig. 2. Electrode arrangement.

고려하여 방전 직후 2분이 지난 이후에 재차 전압을 인가하였고, 발열에 의한 열 기포의 크기, 거동, 수명특성은 저온용기의 관측창을 통해 빛을 투과 시켜 고속사진기(Pentax fx-6059)로 촬영하였다.

전극배치는 그림 2의 a), b) 와c)로 표시한다. 기포의 부력과 전극사이의 정전력의 영향을 조사하기 위해 기포의 부력과 정전력이 겹치는 수평배치로 그림 a)와 같이 상부에 평판전극을 설치하고 하부에 칸탈 발열선을 놓은 경우와 그림 b)와 같은 상부에 칸탈 발열선을 설치하고 하부전극으로 평판전극을 설치하여 수평배치를 구분하였다. 그리고 부력과 정전력이 교차하는 그림 c)와 같은 수직배치로 설치하여 이들의 특성들을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 LN_2 에서의 그림 2-a)와 같은 수평배치로 전극을

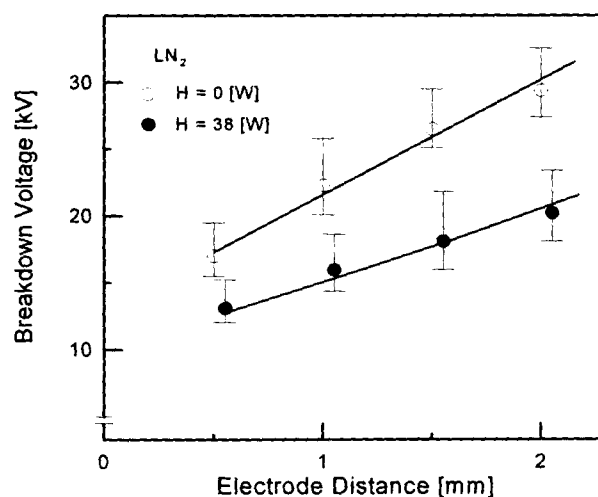


그림 3. 정적 및 동적 절연파괴 전압의 전극거리 의존성
Fig. 3. The gap length dependencies of the static and dynamic breakdown voltage.

설치하여 교류절연파괴 전압의 전극거리 의존성에 대해 나타낸다.

그림에서 error bar의 상·하는 각각 측정치의 최대 및 최소치, 점(●,○)은 평균치를 나타낸다. 정적 절연파괴 전압은 하부전극인 칸탈 발열선에 발열을 시키지 않은 $H=0[W]$ 인 상태에서 두 전극사이에 전압을 인가하여 측정하고, 동적 절연파괴 전압은 하부 전극에 발열을 시켜 기포의 발생이 많고 동적 절연파괴 전압값이 포화되는 $H=38[W]$ 인 경우로 하여 고전압을 인가하여 측정하였다.

그림에서 어느 경우에도 절연파괴 전압은 전극 거리에 따라 증가하나 정적인 경우(○)보다는 동적인 경우의 절연파괴 전압(●)이 보다 낮은 것을 알 수 있다. 예를 들어보면, 두 전극거리 $d=1[mm]$ 에서 정적 절연파괴 전압은 $23[kV]$ 인 것에 비해 동적 절연파괴 전압은 $17[kV]$ 정도로 약 $5\sim6[kV]$ 정도 낮게 나타나 있다.

그림 4는 액체 질소에서 기체 질소로 상 변화에 따른 절연파괴 전압의 온도 의존성을 나타낸다. 극저온에서의 온도는 열전대를 삽입하여 측정하였으며, 그림 2의 a)의 수평 배치로 전극을 설치하였다.

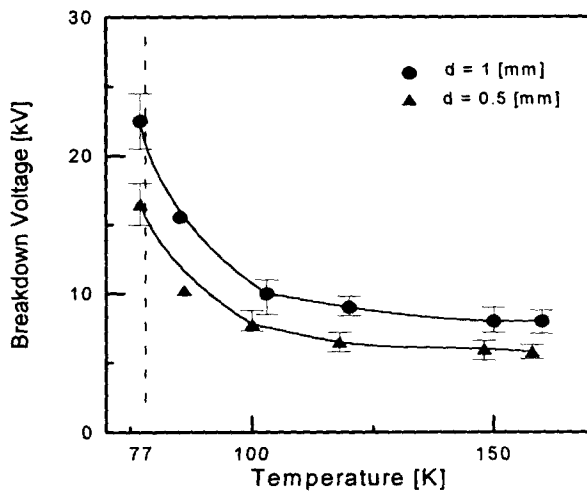


그림 4. LN₂-GN₂의 파괴전압의 온도 의존성
Fig. 4. Temperature dependence of breakdown voltage in LN₂-GN₂.

그림에서 나타난 바와 같이 기체 N₂의 절연파괴 전압은 비등점 근처의 상 변화영역에서 급속하게 변화하여, 온도가 100K 이상으로 상승하면 77K에서의 절연파괴전압보다 1/3~1/4정도 절연파괴 전압이 낮아지고, 이 후 포화되어 일정한 값을 유지하였다.

그림 5에 그림 2-a)와 같은 수평배치로 전극거리 $d=1$ 과 $d=0.5[mm]$ 로 하여 액체 질소 속에서 발열량에 따른 동적 절연파괴 특성을 나타낸다.

기포의 크기와 발열량은 하부전극인 칸탈 발열선에 1~10A의 전류를 가변 하여 조절하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전극거리 $d=1[mm]$ 인 경우의 절연파괴 전압은 10[W]인 소량의 발열량에서는 절연 파괴전압이 거의 변화가

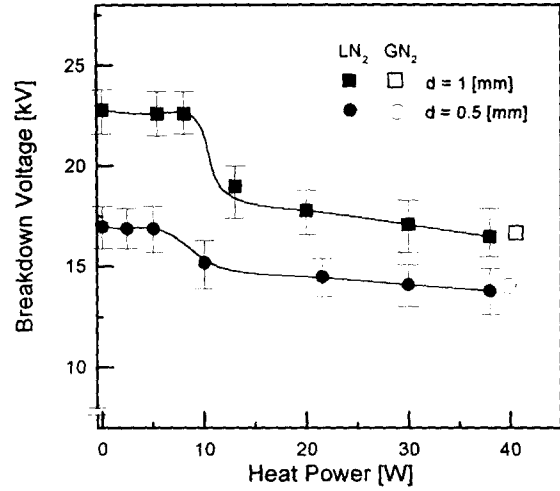


그림 5. 발열량에 따른 동적 절연파괴 특성
Fig. 5. Characteristics of dynamic breakdown with heat power.

없지만, 발열량이 10[W]이상이 되면 절연파괴전압이 급격히 감소한 후, 포화되는 경향을 볼 수 있다. 이때 절연파괴 전압이 포화하는 값은 90K영역에서의 기체질소의 절연파괴 전압과 동등한 수준이다. 그러나, $d=0.5[mm]$ 의 전극거리가 짧은 경우의 발열량에 따른 동적 절연파괴 전압 특성은 $d=1[mm]$ 의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있지만, 현저하게 절연파괴 전압의 변화는 보이지 않고 발열량이 증가함에 따라 정적인 상태의 전압보다 약 2~3[kV]정도 낮게 나타났다.

그림 6에 발열량에 대한 기포의 크기를 나타낸다. 기포의

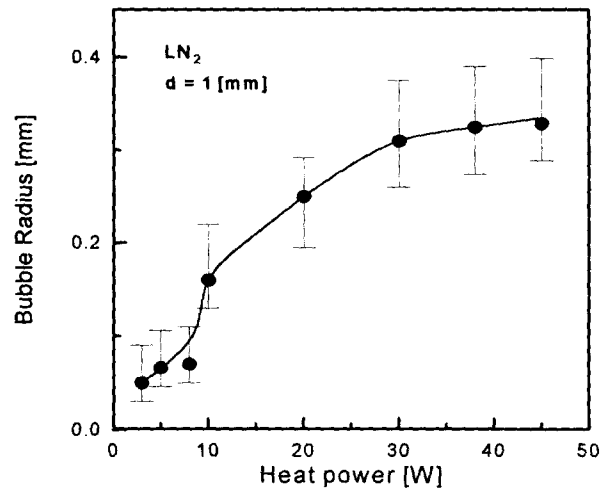


그림 6. 발열에 따른 기포의 크기
Fig. 6. The bubble size under heat powers.

크기는 저온용기의 slit에 빛을 투과하여 고속사진기로 촬영하여 구하였지만, 측정상의 정확한 값을 얻기 위해 20회 이상 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 발열량이 증가함에 따라 기포의 반경도 커지게 되고 어느 범위를 넘어서면 포화되는

경향을 나타낸다.

그림 7은 발열량에 따른 열 기포의 거동사진을 나타낸다.

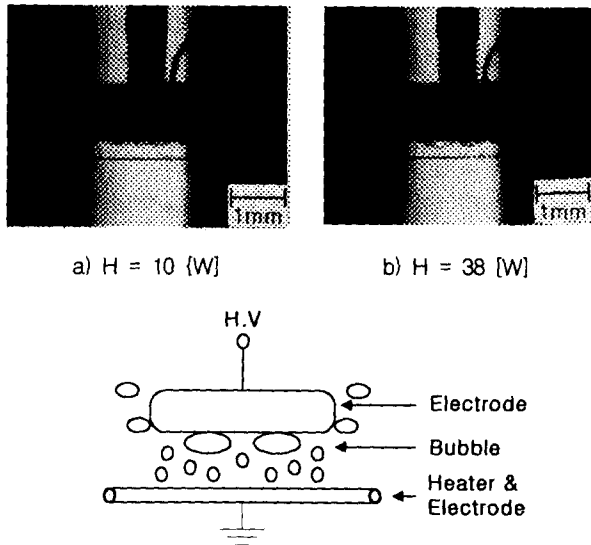


그림 7. 기포의 거동 사진

Fig. 7. Photograph of bubble behavior.

기포의 거동은 전압을 인가하지 않고 $H=0[W]$ 에서 $H=38[W]$ 이상일 때까지 측정하였다. 정적인 상태인 $H=0[W]$ 에서는 실험에 사용한 저온용기가 원래 액체 헬륨용으로 열 적 안정 상태이므로 칸탈발열선인 하부전극 상에서는 물론 액체 질소에서도 기포의 모습은 보이지 않았다. 그러나, 발열량을 증가하여 $H=10[W]$ 인 상태에서는 사진 a)와 같이 기포는 아주 작은 소기포로 칸탈 발열선 전체에서 상부전극으로 향해 진행하고 있음을 확인했다. 발열량을 증가하여 그림 b)와 같이 $H=38[W]$ 일 때는 기포의 크기도 매우 커지고 표면에 기포균형성하지만, $38[W]$ 이상의 발열량이 가해지면 기포의 크기는 더 이상의 선형적인 증가는 보이지 않고 포화되어 가는 현상이 되었다.

한편, 전압을 인가한 경우, 발열량에 따른 기포의 거동을 살펴보면, $10[W]$ 이내의 발열에서 소기포들이 존재하지만 절연 파괴 전압을 저하시키지 않고 부력의 힘에 의해 전극의 위로 방출된다. 하지만, $10[W]$ 이상의 발열을 증가시키면 열 기포는 정전흡인력과 부력의 힘이 가해져 타원형의 기포 모양을 형성하여 두 전극 사이에 기포 채널을 이루어 절연 파괴에 이르게 된다.[10]

지금까지는 전극배치를 수평 배치만을 설치하고 측정하였으나, 액체 질소에서 전극배치의 영향을 살펴보기 위하여 그림 2(c)의 수직배치로의 전극을 설치하여 수평배치와의 동적인 절연 파괴 특성을 비교하였다.

그림 8은 수직배치 전극을 사용하여 $H = 38[W]$ 와 전극거리 $d = 1[mm]$ 에서 절연 파괴 전압 특성을 구하고 수평배치 전극의 경우와 비교한 결과를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 수직배치 전극을 사용한 경우의 절연 파괴 전압은 수평배치의 경우보다 약간 높으나 그 절연 파괴 특성의 경향은 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 수평배치인 경우, 평판전극 아래 부분에서 기포균을 형성하고 발열에 의한 부력과 두

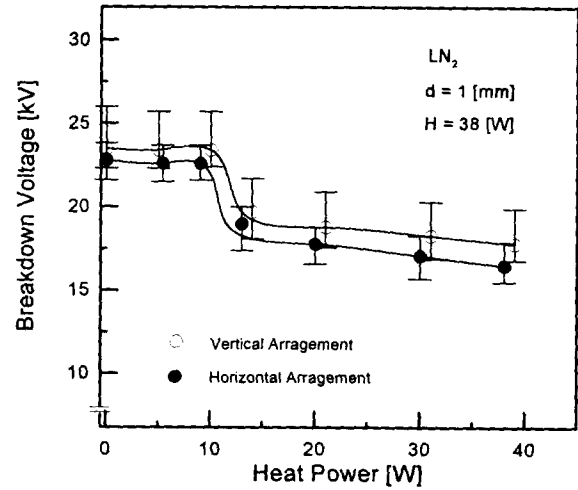


그림 8. 전극배치에 대한 동적 절연 파괴 특성

Fig. 8. Characteristics of dynamic breakdown with electrode arrangement.

전극 사이의 정전력이 서로 합해져 절연 파괴를 더욱 가속화 시켜주며, 수직배치인 경우 부력이 정전력 보다 더 지배적이므로 두 전극사이에서 기포 채널의 형성이 부력에 의해 수평 배치보다 어렵기 때문에 방전경로가 길어져 파괴 전압이 약간 높게 나타난다고 생각된다. 이와 같은 생각은 이미 보고된 Hara의 전계 하에서의 기포의 운동해석[11][12]과 거의 일치하고 있다. 한편, 전극을 수직배치로 해서 기포의 거동 모습을 살펴보면 전압이 인가되지 않은 상태에서는 부력에 의해 기포는 평판전극에 도달하지 않고 수직방향으로 방출되지만, 두 전극에 전압이 인가되면 기포는 정전력에 의해 평판전극으로 비스듬히 채널을 이루어 절연 파괴 전압에 도달하게 된다.

이상의 결과로부터 액체 질소에서의 절연 파괴 전압은 발열량이 없는 경우 두 전극사이에 자유전자들이 액체 속으로 열 전자방출 되는 streamer진전으로 전극간을 단락 함으로서 절연 파괴에 도달하고, $10[W]$ 이하의 발열량에서는 소 기포들이 하부전극인 칸탈 발열선에서 생성되지만, 절연 파괴 전압에 영향을 주지 못하여 발열량이 없는 경우와 거의 비슷한 파괴 전압값을 나타내었다. 하지만, $10[W]$ 이상의 발열량에서는 기포의 크기가 발열량에 따라 커지면서 기체와 액체의 복합 절연계에서 기포는 두 전극 사이에서 채널을 형성하여 절연내력이 약한 기체 층으로 되어 절연 파괴 전압은 열 기포 파괴에 의한 동적 절연 파괴의 형태를 나타내고 있다. 이와 같은 경향은 그림 2의 b)의 수평배치의 경우에도 동일한 결과치를 나타내고 있다. 한편, 수직배치의 전극에서도 수평배치와 유사한 경향을 나타내지만, 기포에 작용하는 부력이 정전력보다 더 강하게 작용하여 기포는 두 전극사이에서 비스듬히 채널을 형성하여 기포 파괴를 이룬다.

그림 9와 10은 정적인 상태와 동적인 상태의 전압-수명시간(V-t) 특성을 나타낸다.

V-t 수명특성은 유전체의 절연 파괴특성의 기초가 되는 중요한 데이터이다. 수명실험의 데이터는 그림 9의 정적인 경우($H=0[W]$) 실험결과를 Weibull 분포에 적용시켜 누적파괴

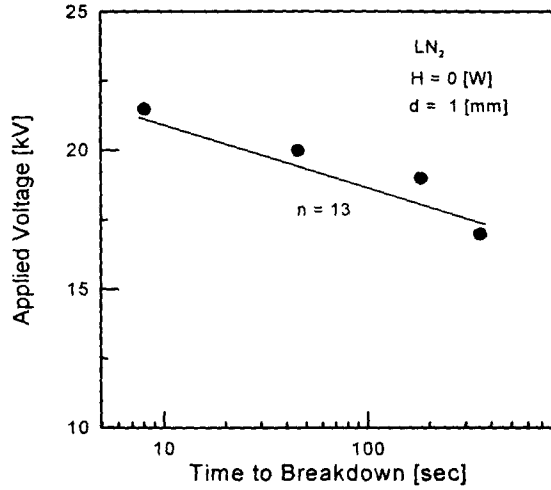


그림 9. 정적인 상태의 V-t 수명특성
Fig. 9. V-t characteristics of static state.

확률의 50%인 값을 취했으며, 그림 10의 동적인 경우 (H=38[W])일 때는 수명시간의 오차범위가 넓어 실험 값을 그대로 사용하였다. 그림 10에서의 전압-수명시간특성은 일

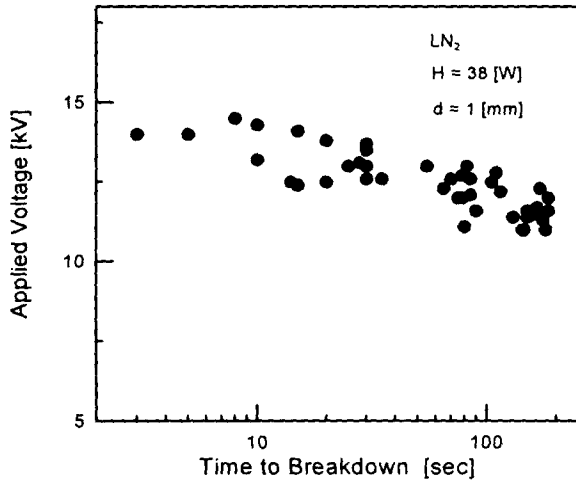


그림 10. 동적인 상태의 V-t 수명특성
Fig.10. V-t characteristics of dynamic state.

정한 특정 값을 갖는 것이 아닌 불안정한 상태를 나타내고 있으며, H = 0[W]일 때의 전압-시간특성보다 시간이 짧아지는 경향을 나타내고 있다. H = 0[W]일 때와 적은 발열량에서의 기포에 의한 수명특성은 역 n 승의 법칙($V^n \cdot t = C$; V ;인가전압, t ;수명시간, C ;정수)에서 구한 LN₂의 n = 13 정도로서 절연내력의 특성이 좋은 것을 나타내고 있으며, 초전도 전력 기기에 Quench가 발생하면 열 기포에 의한 주위 냉매를 열화 시켜 수명특성이 현저하게 나빠지는 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 액체질소 중에서 열 기포에 의한 동적 절연 파괴 특성에 대한 실험을 행하였다. 얻어진 결과를 보면

1. 액체 질소의 동적 절연파괴 전압 특성은 10[W] 이내의 적은 발열량에서는 절연파괴전압이 거의 변화가 없지만, 발열량이 10[W] 이상이 되면 절연파괴 전압은 급격히 감소하여 기체 N₂의 절연파괴와 거의 동등한 수준이다.
2. 발열량의 증가는 기포의 크기를 크게 하고 절연파괴 전압을 저하시킨다. 이것은 액체 질소와 기체 질소의 복합계에서 절연내력이 약한 기체 층의 증가로 인한 기포파괴로 설명된다.
3. 부력과 정전력으로 인해 수평배치 전극의 경우 수직배치의 전극 보다 절연파괴 전압이 약간 낮다.
4. 액체질소 중에서 동적일 때의 수명특성은 열 기포가 주위 냉매를 열화시키므로 정적인 경우보다 수명시간이 짧았다.

본 연구는 한국전기연구소의 연구지원비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

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える—財團法人電力中央研究所. pp.1-30, 1992.
- [2] H.Okubo, M.Hikita, H.Goshima and N.Hayakawa, "High Voltage Insulation Performance of Cryogenic Liquids for Superconducting Power Apparatus", IEEE Trans on Power Delivery, Vol.11, No.3, PP.1400-1406, 1996.
- [3] J.G.Bednorz and K.A.Muller, "Possible High Tc Superconductivity in the La-Ba-Cu-O System", Z. Physics, B-Condensed Material, Vol. 64, pp.189-193, 1986.
- [4] S.Jin et al, "High critical currents in YBCO superconductor" Appl. Phys. Lett. Vol.52. pp.2074-2076, 1988.
- [5] 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.
- [6] S.Nakayama & D.Ito, "D.C Breakdown Voltage Characteristics in Supercritical Helium Breakdown in Non-uniform Fields", Cryogenics, Vol.26. pp.12-18, 1986.
- [7] A.A.Belevtsev, "Dielectric Strength of Condensed Cryogenic Helium", proc.of 11th ICDL, pp.224-228, 1993
- [8] R.H.Bellis and Y.Iwasa, "Quench propagation in high

Tc superconductor", Cryogenics. Vol. 34, pp.129-144, 1994.

[9] J.Gerhold, "Breakdown Phenomena in Liquid Helium.", IEEE Trans. Elect. Insul. 24(2) pp.155-165, 1989.

[10] J. Suehiro, I. Nakamura and M.Hara, "Electrical Breakdown Mechanism of Cryogenic Liquid Coolants in the Presence of Thermal Bubbles" T.IEE Japan, Vol. 111-B, No.4, pp. 352-357, 1991.

[11] 原・王, "液体窒素中における不平等電界下の熱気泡挙動," 電氣學會論文誌A, Vol. 114-A, No. 4, pp.337, 1993.

[12] M.Hara, H.Koisihara and K.Saita, "Breakdown behavior of cryogenic liquids in the presence of the thermal bubbles under ramped voltage", IEEE Trans. Vol. 26 pp.685-691, 1991.



정순용(丁淳溶)

1947년 7월 11일생. 1974년 3월 인하대학교 전기과 졸업. 1983년 2월 인하대학교 대학원 석사. 현재 경상대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 부산전문대학 전기공학과 부교수.



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일생. 1974년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 2월 인하대 전기공학과 석사. 1986년 3월 일본 오오사카대학 전기공학과(공박).1989년 2월 한국전기연구소 극저온재료실장. 1998년 현재 경상대 전기공학과 교수. 정보통신센터 연구원(ICRC)

저 자 소 개



김영석(金榮錫)

1974년 4월 6일생. 1996년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 경상대학교 대학원 전기공학과 석사수료.



정종만(鄭鐘萬)

1971년 9월 16일생. 1997년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 경상대학교 대학원 전기공학과 석사수료.



곽민환(郭玟煥)

1970년 1월 25일생. 1995년 2월 경상대학교 공대 전자재료공학과 졸업. 1998년 2월 경상대학교 대학원 전자재료공학과 석사. 현재 경상대학교 대학원 전기공학과 박사과정.