

고온초전도 기기응용을 위한 모의 퀘칭 환경에서 액체질소의 절연파괴 특성

백승명, 정종만, 이정원, 곽동순, 김상현
경상대학교 전기공학과(공학연구원 자동화 컴퓨터 연구센터)

Electrical Breakdown characteristics of LN₂ under simulated Quenching conditions for application of HTS apparatus

Seung-Myeong Baek, Jong-Man Jung, Joung-Won Lee,
Dong-Soon Kwag, Sang-Hyun Kim

Department of Electrical Engineering, Gyeongsang University
(Automation and Computer Research Center of Engineering Research Institute)

Abstract

The characteristics of Electrical breakdown liquid nitrogen(LN₂) were studied under simulated Quenching conditions for application of HTS apparatus. The experimental results for various quench condition revealed that the breakdown voltage of LN₂ with bubble flow velocity and gap spacing. Also, it did a electric field and potential distribution interpreting at the liquid nitrogen when the bubble existed. The plots of equipotential lines for three cases are also shown.

1. 서 론

고온초전도체가 발견된 이후로 에너지 시스템에 고온초전도체를 접목시켜 응용하려는 연구가 활발히 전개되었다. 최근에는 고온초전도체 본연의 기계적 취약성을 보강한 선재가 많이 개발되면서 MRI, SMES뿐 아니라 케이블, 변압기, 한류기 등 그 응용범위가 더욱 확대되고 있다. 하지만, 고온초전도체를 응용하기 위해서는 초전도성을 유지하기 위한 극저온 유지 시스템이 필수적이다. 이러한 관점에서 LN₂는 사용 비용이 저렴하고 냉매로서의 역할과 함께 절연물로도 사용할 수 있다. 향후 고온초전도 기기의 냉매로 많이 사용될 것으로 기대되기 때문에 극저온 분야 연구자들에 의해 고온초전도 기기의 전기절연설계 및 운용상 안정성을 확보하기 위해 전기적 특성연구가 활발히 이루어지고 있다.[1-5]. 하지만, LN₂의 특성 연구는 극히 제한적인 조건에서 이루어져 왔으며, 다양한 초전도 기기의 설계에 충분한 정보를 제공하지 못하고 있다. 특히, pancake coil형으로 응용이 기대되는 고온초전도 변압기, 한류기 등의 전기적 절연설계를 위한 LN₂ 절연파괴특성 연구는 거의 이루어지지 않고 있기 때문에 이 분야의 연구가 절실히 요구되고 있

다. 따라서, 본 연구에서는 Pancake coil형 고온초전도 기기의 수명과 안정성확보를 위하여 모의 퀘칭 전극을 이용하여 LN₂내에 기포를 만들어 LN₂와 기포 복합계의 절연파괴 특성을 고찰하였다. 그리고 변압기와 한류기 등의 절연, 기계적 지지 및 냉각 통로 사용이 기대되는 FRP가 LN₂의 절연특성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 기포가 전극계 내에 존재하는 위치에 따른 전계분포를 해석하였다[6].

2. 실험장치 및 방법

그림 1에 실험 개략도를 나타낸다. LN₂의 절연파괴 특성과 절연파괴 현상을 고찰하기 위해 관측장이 부착된 극저온 용기를 사용하였다. 퀘칭시 발생하는 기포를 모의하여 외부에서 기포발생 평판전극에 기체질소(GN₂)를 주입하여 모의 기포를 발생시켰다. 기포량은 GN₂ 용기에 부착된 압력계를 이용하여 제어하였으며 Flow meter를 이용하여

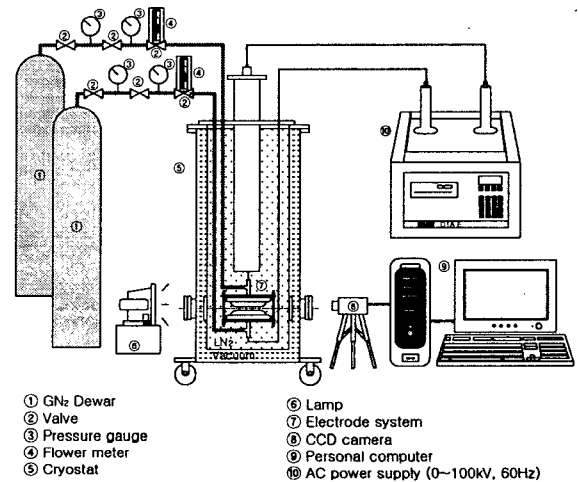
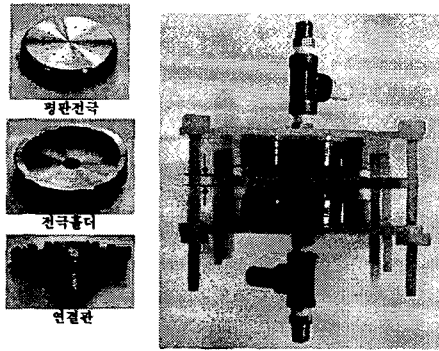


그림 1. 실험장치 개략도



a) 전극구성 b) sample

그림 2. 전극계

관측하였다. 기포발생용 평판전극은 stainless를 이용하여 제작하였으며 평판전극과 전극홀더 그리고 GN_2 호스와 연결하는 연결관으로 구성되어 있다. 평판전극의 직경 60 mm이고 기포를 발생시키기 위해 반경 15 mm에 직경 1 mm의 구멍을 뚫었다. 기포 발생용 구멍은 중심부에 1개를 포함하여 총 18 개이다. 구멍은 21° 의 간격을 두고 있다. 표면은 $1\mu m$ 이하로 경면 처리하였다.

고온초전도 변압기와 유도형 한류기 등은 초전도 선재의 지지 및 전기적 절연과 냉각 등을 고려한 spacer의 사용이 불가피하다. 따라서 실제 응용을 고려하여 본 실험에서는 기포발생용 평판전극에 spacer를 끼운 후 FRP를 이용하여 전극과 spacer를 고정시켰다. 그림 2에 실험에 사용한 기포발생용 평판전극과 spacer를 끼운 실험용 샘플을 나타낸다. spacer가 존재하지 않는 경우와 spacer가 존재하는 두 가지 경우를 고찰하였다. spacer가 존재하는 경우 double pancake coil형 변압기를 제작할 경우를 고려하여 spacer를 A와 B 둘로 나누어서 실험하였다. spacer의 두께를 t 라고 하고, spacer A와 spacer B의 사이 간격을 g 라고 하였다. LN_2 의 절연 파괴전압은 기포의 속도 $0\sim 10$ l/min까지 구하였다.

AC 고전압 장치는 BAUR Dieltest (Type DTS E, AC 100 kV, 60 Hz)를 사용하였으며 1kV/sec로 증가시키면서 10회의 절연파괴전압을 구하여 평균값을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3, 4와 5에 전극간격 d 가 각각 1, 2와 3 mm일 때 기포의 속도에 따른 절연파괴 전압을 나타내고 있다. 그림 3, 4와 5는 spacer가 없는 경우를 나타낸 것이다. 전극은 수평으로 배치하였으며 GN_2 를 위전극, 아래전극, 위와 아래 두 전극 동시에 주입하면서 절연파괴전압을 구하였다. 절연파괴전압은

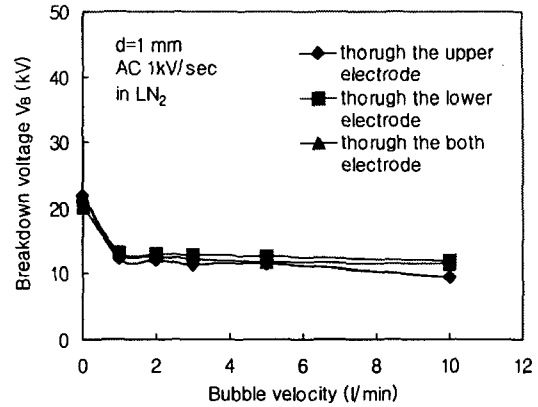


그림 2. 기포의 속도에 따른 절연파괴전압 ($d=1$ mm)

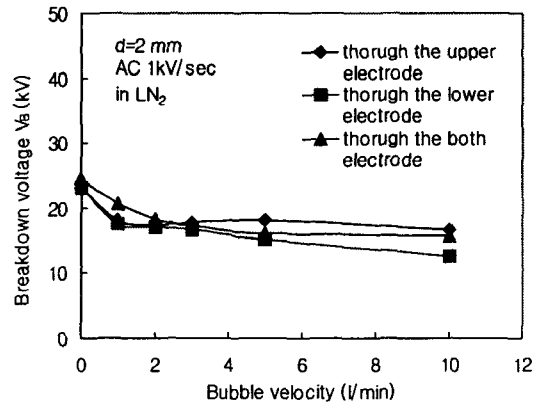


그림 3. 기포의 속도에 따른 절연파괴전압 ($d=2$ mm)

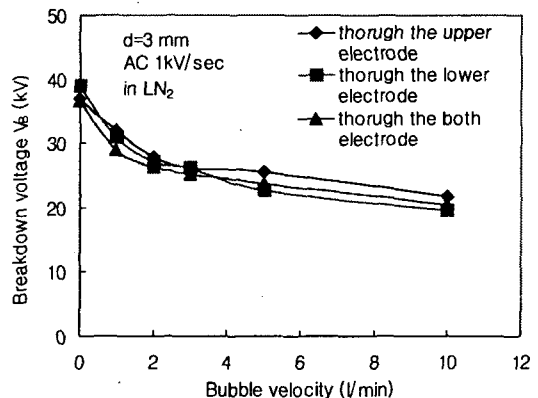


그림 4. 기포의 속도에 따른 절연파괴전압 ($d=3$ mm)

평균값을 나타낸다. spacer가 존재하지 않는 경우, 기포량이 증가할수록 절연파괴전압은 낮게 나타났

다. 전극간격이 짧을수록 기포량이 증가할수록 급격하게 파괴전압이 감소하였으며 이후에는 일정

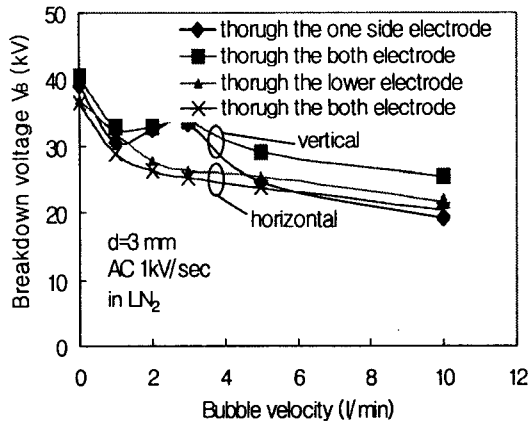


그림 5. 전극배치에 따른 절연파괴전압

하게 포화되었다. 전극간격이 증가할수록 기포량이 증가할수록 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다.

그림 5에 전극 배치에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. 수평, 수직 배치 모두 기포량이 증가하면서 감소하였지만, 수직배치의 경우 수평배치보다 파괴전압이 약간 높게 나타났다. 이것은 수평배치의 경우 전극으로부터 나온 기포가 부력에 의해 상승하다가 상부전극에 부딪쳐 순간적으로 멈추게 되고 멈춘 기포는 전극과 전극을 GN_2 로 연결하는 채널을 형성하게 되어 LN_2 의 절연파괴전압이 낮게 나타나지만 수직배치의 경우 전극에서 나온 기포가 아무런 장애 없이 부력에 의해 외부로 배출되어 전극과 전극에 채널을 형성하지 못하므로 LN_2 의 절연파괴전압이 수평배치보다 약간 높게 나타나는 것으로 사료된다.

그림 6에 spacer가 존재하고, 기포를 주입하지 않았을 때 spacer 두께 t 에 변화에 따른 LN_2 와 Air의 절연내력을 나타내고 그림 7에 기포가 존재하지 않을 때 spacer 간 간격 g 의 변화에 따른 LN_2 와 Air의 절연파괴압을 나타낸다. spacer 두께 t 가 증가할수록 LN_2 의 파괴전압은 증가하지만 spacer간 간격 g 의 증가에는 상관없는 일정한 값을 나타내었다.

그림 8에 기포가 존재하는 경우 spacer 두께에 따른 LN_2 의 절연파괴전압을 나타내고 그림 9에 기포가 존재하는 경우 기포량과 spacer 간 간격 g 의 변화에 따른 LN_2 의 절연파괴전압을 나타낸다. 기포를 주입하면 LN_2 의 절연파괴전압은 급히 감소하지만 기포량이 증가하여도 절연파괴전압은 더 이상 감소하지 않고 일정하게 나타났다. spacer가 존재하지 않는 경우 전극간 거리가 멀어짐에 따라 절연파괴 전압은 완만하게 감소하는 경향을 나타내었지만 spacer가 존재하는 경우 spacer 두께가 커져도 절연파괴전압은 완만히 감소하지 않고 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 그림 9에서 나타나듯이 spacer간 간격 g 가 증가하여도 절연파괴전압은 급격히 감소한 후 일정하게 유지되는 경향을 나

타내었다.

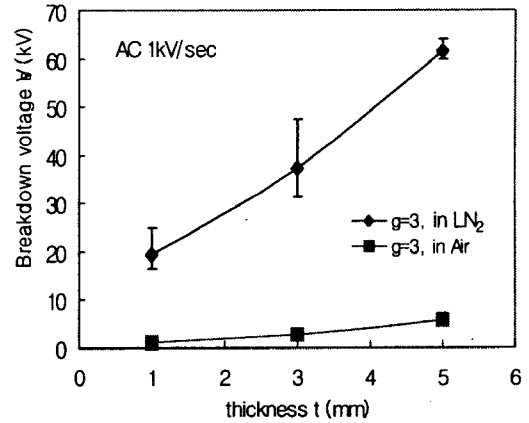


그림 6. 기포가 존재하지 않는 경우 spacer 두께에 따른 LN_2 와 Air의 절연파괴전압

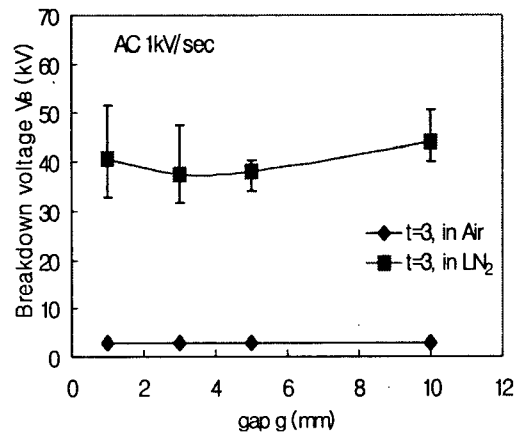


그림 7. 기포가 존재하지 않을 때 spacer 간 간격 g 의 변화에 따른 LN_2 와 Air의 절연파괴전압

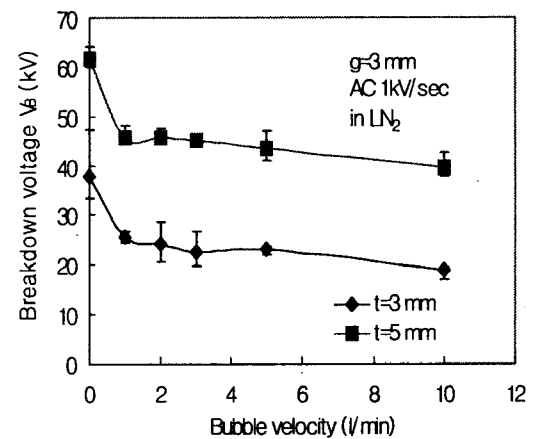


그림 8. 기포가 존재하는 경우 spacer 두께에 따른 LN_2 의 절연파괴전압

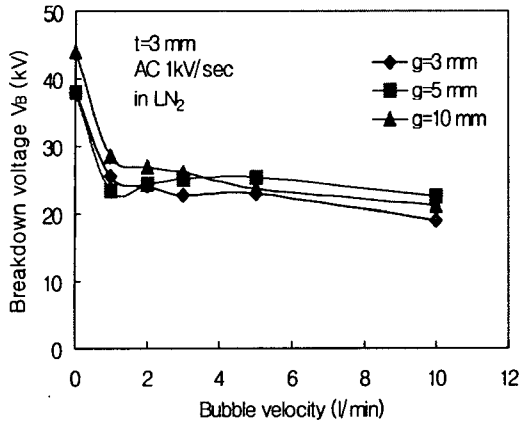


그림 11. 기포가 존재하는 경우 기포량과 spacer 간 간격g의 변화에 따른 LN₂의 절연파괴전압

하지만 절연파괴전압은 g에 크게 의존하지 않고 같은 경향을 나타내었다.

그림 10에 기포의 위치에 따른 전계분포를 해석하였다. 기포의 위치를 기포가 발생하는 지점, 전극간 중앙과 기포가 포집되는 위치 세 가지 경우를 해석하였다. 전계분포 해석은 DC 30 kV로 하였으며 기포의 직경은 1 mm로 하였다. FRP의 유전율 ϵ_f 는 4.45, LN₂의 유전율 ϵ_l 는 1.43, GN₂의 유전율 ϵ_g 는 1.00으로 하였다.

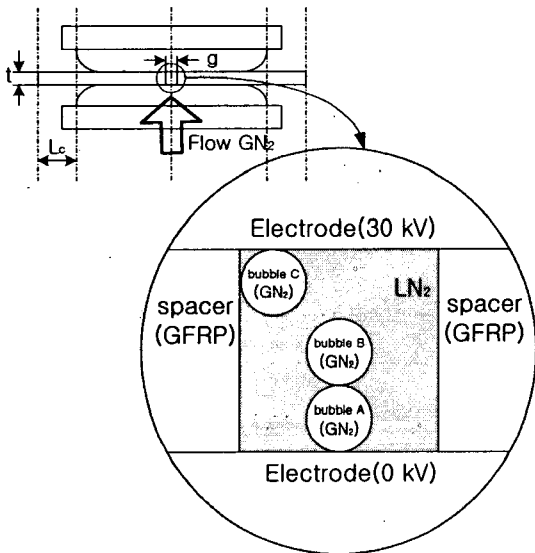
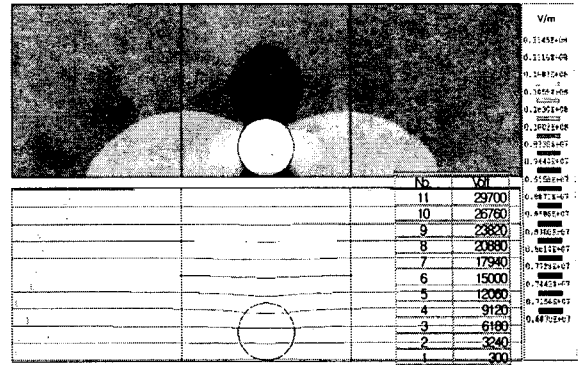
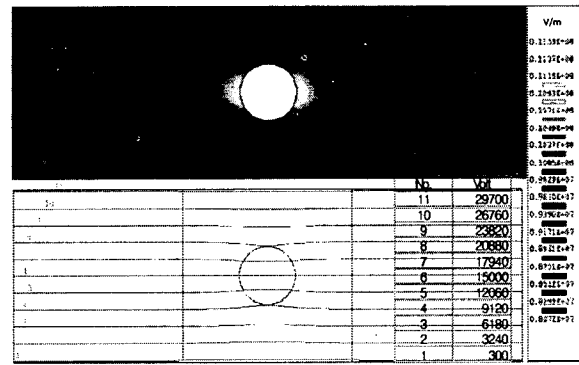


그림 12. 전계분포 해석 모델

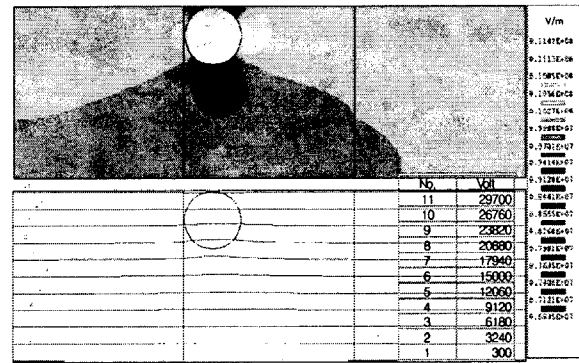
기포가 존재하는 경우 어느 지점에서나 전계의 집중현상이 나타났다. 이것은 기포가 존재함으로써 LN₂와 GN₂의 복합절연계가 구성되고 절연내력이 낮은 GN₂에 전계가 집중되어 절연내력이 약화됨을 알 수 있다.



a) bubble A



b) bubble B



c) bubble C

4. 결 론

본 연구에서는 켈치 현상을 모의하여 기포발생용 모의 전극계를 이용하여 기포발생시 LN₂의 절연특성을 고찰하였으며, 컴퓨터를 이용한 전계분포를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

기포가 존재하는 경우 LN₂의 절연내력은 약화 되었으며 spacer가 존재하지 않는 경우 전극간 거리가 멀어지고 기포량이 증가할수록 절연파괴전압은 완만히 감소하여 포화하는 경향을 나타내었다. 하지만 spacer 존재하는 경우 절연파괴전압이 급속히 감소한 후 기포량이 증가하여도 절연파괴전압은 일정하게 나타났다. 전극간 간격이 멀어져도 급격히

감소한 후 기포량이 증가하여도 절연파괴 전압은 일정하였다. 기포가 존재하는 위치에 따른 전계분포를 한 결과 기포가 존재하는 경우 기포에 전계가 집중되었다. 따라서, 기포가 포함된 LN₂의 절연내력이 약화됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Gerhold, "Properties of cryogenic insulants," *Cryogenics* 38 (1998) 1063-1081.
- [2] H.Okubo, M.Hikita, H.Goshima, H.Sakakibari, N.Hayakawa, "High Voltage Insulation Performance of Cryogenic Liquids for Superconducting Power Apparatus", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, pp. 1400-1406, July, 1996.
- [3] M. Hara and H.Okubo, "Electrical insulation characteristic of superconducting power apparatus", *Cryogenics*, Vol. 38, pp. 1083-1093, 1998.
- [4] Delucchi, M., Girdino, P., Liverti, G. and Molinari, G., "A statistical analysis of the ac dielectric strength of liquid nitrogen with IEC spherical electrodes under controlled conditions," *Journal of Electostatics*, 1982, 12, 315-322.
- [5] B. Y. Seok, N. Tamuro and M. Hara, "A Study of Thermal Bubble Behavior in the Simulated Electrode System of High Temperature Superconducting Coils", *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 6, No. 3, pp. 109-116, 1999.
- [6] Blaxmore, P., and Birtwhistle, D., "Surface Discharge on Polymeric Insulator Shed Surfaces," *IEEE Trans. Electrical Insulation*, Vol. 4, No.2, April 1997, pp. 210-217.