

Pancake coil형 고온초전도 기기의 응용을 위한 극저온 냉매의 절연파괴 특성

백승명, 정종만, 이진호, 김상현
경상대학교 공과대학 전기공학과(공학연구원 자동화·컴퓨터 연구센터)

Breakdown Properties of Cryogenic Coolant for Pancake Coil Type High T_c Superconducting Equipment

S.M. Baek, J.M. Jeong, J.H. Lee and S.H. Kim
Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Nat'l University
(Automation and Computer Research Center of Engineering Research Institute)

e-mail : trebari@hanmail.net

Abstract - In the design of superconducting power equipments such as transformer, cable and fault current limit, knowledge of the dielectric behavior of both liquid and gaseous at very low temperatures is very importance. Especially, Electrical properties of liquid nitrogen(LN₂) and gaseous nitrogen(GN₂) have become of great interest again since the discovery of high temperature superconductors. However, many sources of LN₂ and GN₂ problems in the test of pancake coil model arising from the deficiency of insulation data.

Therefore, this paper describes the results of an experimental study on the ac breakdown voltage(V_B) properties of LN₂ and Air under the electrode of simulated HTS pancake coil. The ac breakdown voltage of GN₂ have been measured by pancake coil-pancake coil gaps over the temperature range of 293 K to 77 K.

1. 서 론

고온초전도체의 발견되어 초전도기기의 냉매로 액체 헬륨보다 더 경제적인 LN₂를 사용함으로써 고온초전도체의 응용에 더욱 가속이 붙었다. 더욱이 LN₂는 일반적으로 전기적 절연특성이 우수하기 때문에 실제 초전도기기의 응용에서 냉매 뿐만 아니라 절연체로도 사용된다. 하지만 불순물, 분해가스 등 2차 요인의 작용에 의한 절연파괴 현상은 명확하지 않다. 또한 LN₂의 잠열이 작기 때문에 내, 외적인 열교란 및 운전상의 발열에 의한 GN₂는 기기의 절연내력을 약화시킨다. 따

라서 전계의 상승과 극저온에서 초전도 전력기기의 절연설계와 안정적인 운전을 위해서는 LN₂와 기화에 의한 저온 고밀도 GN₂의 전기적 절연파괴특성 및 메커니즘을 명확히는 것이 중요하다. 예를 들면, LN₂에 침적된 고온초전도 기기의 전류리드는 넓은 온도분포에서 GN₂가 존재하게 되고 기화된 GN₂는 LN₂보다 절연내력이 수배 낮기 때문에 기기의 절연내력을 약화시킨다. 압력, 밀도, 온도 등의 영향에 따른 LN₂의 절연특성 뿐만 아니라 GN₂의 절연 특성연구가 필요하다 [2-5]. 하지만, 앞으로 응용이 유력시되는 pancake coil형 초전도 변압기와 초전도 마그네틱의 전기적 절연을 위한 실용적인 절연 data와 절연파괴현상에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고온초전도 변압기나 마그네틱 등 pancake coil형 초전도 기기 전기 절연 특성연구를 위하여 HTS pancake coil을 모의하여 LN₂ 및 GN₂의 전기적 특성을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법 및 장치

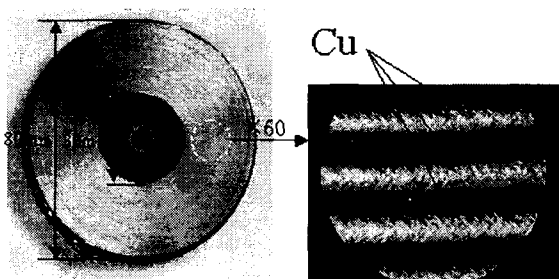
현재 대부분의 고온초전도 기기는 Bi계 다심 선재를 사용하고 있으며 형상도 거의 일정하다. 본 실험에서는 Cu 선재를 이용하여 두께 0.3mm, 폭 3.5mm로 Bi-2223 고온초전도 다심 선재와 같은 형상으로 제작하여 pancake coil 전극을 제작하였다. 코일 제작시 코일내부에 절연을 한 경우와 절연을 하지 않은 경우에 대한 영향을 고려하기 위하여 Kapton tape를 이용하여 코일사이를 전기적으로 절연하였다. 그림 1의 (a)에 코일간 절연하지 않은 pancake coil 전극을 나타내고 (b)에 코일간 절연한 pancake coil을 나타낸다. pancke coil

전극에서 LN₂의 절연특성을 비교하기 위하여 침, 구와 평판 전극을 이용하였다. 각 전극의 재질은 Stainless steel이고 침 전극의 tip 곡률 반경은 50 μ m, 선단각은 24°이다. 구 전극은 직경 8mm이고 홀더에 부착하여 사용하였다. 평판 전극은 직경 80mm, 두께 1mm이고 표면은 0.1 μ m이하로 경면 처리하였다.

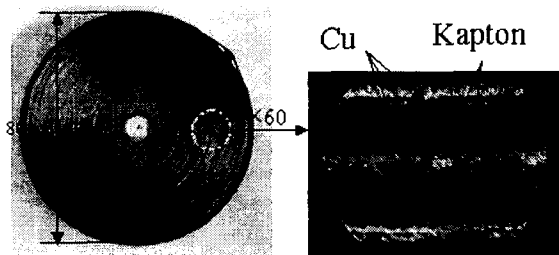
고전압 장치는 BAUR Dieltest(Type DTS, AC 90 kV, 300 VA, 60 Hz)를 사용하였으며 전압은 1 kV/s 비율로 증가 시켰다. V_B는 5회씩 실시하여 얻었다.

Cryostat는 내부를 진공으로 한 Pyrex 유리의 2중 장치로 구성되어 외부 Cryostat 에는 열안정용 액체, 그리고 내부 Cryostat는 시료용 액체가 각각 담겨지도록 하였다. 그리고 전극부를 지지하기 위한 플랜지를 설치하였으며 전극간 거리를 조절하기 위해 Micro-Meter를 부착하였다. 플랜지의 중앙에 Rotator를 설치하여 전극 표면의 손상에 의한 영향을 최소화하였다. 그리고, 압력특성을 고찰하기 위해 Stainless steel Cryostat를 이용하였다. 구조는 외부에 이중 진공층이 있으며, 내부에 전극계를 구성할 수 있는 직경 10mm의 공간이 있다. 각 층별 진공 gauge가 부착되어 있으며, 본 실험에서는 0~4(kgf/cm²)까지 측정하였다.

77 K에서 상온까지 GN₂의 V_B는 유리 Cryostat 내, 외측에 LN₂를 넣고 77K로 만든 다음 LN₂를 자연 증발시키면서 측정하였다. V_B 측정시 매번 온도를 실시간으로 측정하였다. 온도측정을 위하여 T type 열전대를 KEITHLEY 2002 MULTIMETER에 연결하여 77 K에서 실온까지 측정하였다.



(a) Without insulation



(b) With insulation

2.2 실험결과 및 고찰

우선, pancake coil을 이용하여 공기 중에서 V_B를 측정하여 그림 2에 나타내었다. 전극간격이 멀어짐에 따라 절연과피전압이 상승함을 명확히 알 수 있다.

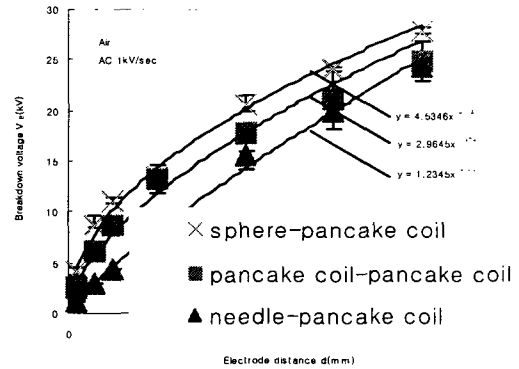


Fig. 2. Breakdown as a function of electrode distance.

그림 3과 4에 pancake coil을 이용하여 LN₂의 V_B를 측정하여 나타내었다. 그림 2에서와 같이 그림 3과 4에서도 일반적으로 전극간격 d가 증가하면 V_B는 상승하였다. pancake coil-평판 전극계, pancake coil-평판 전극계에서 V_B값은 구-평판, 침-평판 전극계 사이에 존재하며 구-평판의 V_B 곡선에 근사하게 접근하고 있다. pancake coil-평판 전극계의 V_B는 다음 식(1)과 같다.

$$V_B = 19.292d^{0.8652} \quad (89)$$

일반적으로 $V_B = A \cdot d^n$ 으로 나타내고 준평등전계 일 때 n은 0.6~0.7이고, 불평등에서는 0.3~0.35이다. 여기서, pancake coil-평판 전극계의 V_B에서 n=0.86으로 높게 나타났는데 이는 전극간 거리가 수 mm 이내 일 때의 값으로 이후 전극간 거리가 커질수록 구-평판전극 곡선에 수렴하여 유사할 것으로 기대된다.

그림 4에서 pancake coil 전극에 대하여 침, 구, pancake coil과 평판 전극으로 전극계를 구성하여 ac 절연과피특성을 고찰하였다. 그림 3과 마찬가지로 pancake coil-평판 전극계에서 V_B는 구-pancake coil과 침-pancake coil 전극계의 V_B사이에 존재하였으며 pancake coil-pancake coil 전극계의 V_B는 pancake coil-평판 전극계의 V_B보다 조금 낮게 나타났다. 여기서, pancake coil-pancake coil 전극계의 n은 0.5365이고 V_B는 식 (2)와 같다.

$$V_B = 21.224d^{0.5365} \quad (2)$$

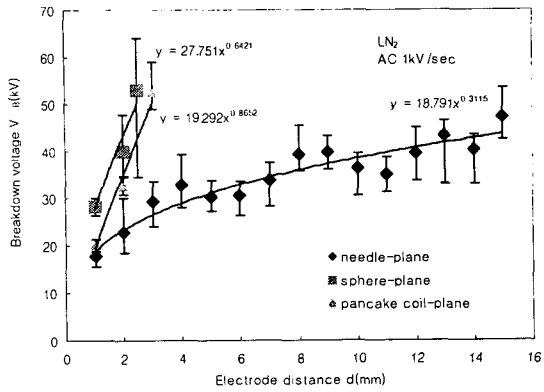


Fig. 3. Breakdown as a function of electrode distance.

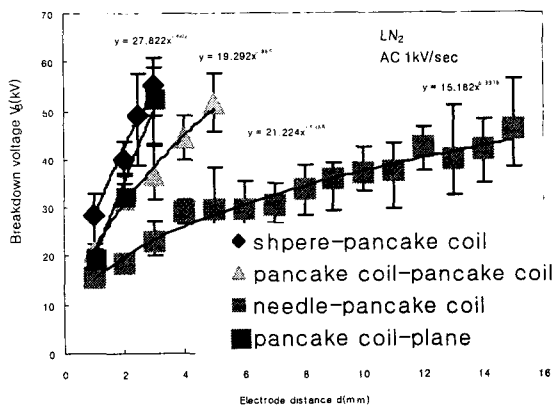


Fig. 4. Breakdown as a function of electrode distance under various electrode systems.

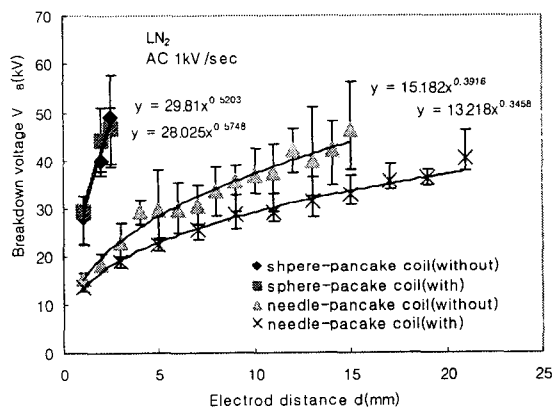


Fig. 5. Breakdown as a function of electrode distance under pancake coil electrode with and without electrical insulation

그림 5에 Kapton tape로 코일간 절연을 하였을 때와 절연을 하지 않았을 때의 LN₂의 절연 파괴 특성을 고찰하였다. 구-pancake coil 전극계

의 경우에는 절연파괴특성은 비슷하게 나타났지만 침-pancake coil 전극의 경우에는 코일간 절연을 행한 경우에 절연을 하지 않은 경우보다 절연파괴 전압이 낮게 나타났다. 이는 코일간 절연한 pancake coil-pancake coil의 절연파괴전압에 영향을 미치 것으로 기대되고, pancake coil형 초전도 기기의 전기절연 시 고려가 요구되며 앞으로 이 부분에 대한 연구가 더 이루어져야 할 것으로 사료된다.

그림 6에 LN₂의 상변화에 따른 절연파괴특성을 나타낸다. pancake coil-pancake coil 전극계를 이용하였으며 전극간 거리는 d=2.5mm에서 교류 전압을 1kV/sec의 비율로 증가시키면서 V_B를 측정하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 비등점 77 K LN₂에서 GN₂로 상변화를 하면서 V_B는 현저하게 감소하며 약 100K 이후에는 서서히 감소하였다. 극저온의 밀도는 상온에서의 GN₂보다 크며 그림 6에서 보듯이 기화된 N₂의 온도가 증가함에 따라 밀도변화에 의한 평균 자유행정의 변화에 의한 영향으로 고찰된다.

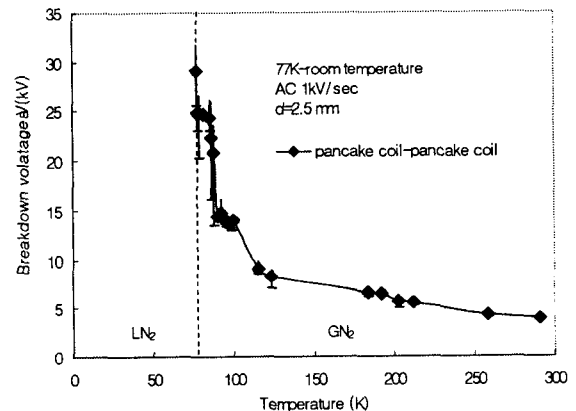


Fig. 6. Breakdown voltage vs temperature near boiling point.

그림 7과 8에서 압력의 영향에 의한 GN₂의 ac 절연내력 특성을 조사하였다. 그림 7에 압력을 증가시키면서 V_B와 압력을 감소시키면서 측정한 V_B를 나타낸다. 압력의 증가시와 감소시의 V_B는 거의 동일하게 나타나는 것으로 관찰되며 본 실험에서는 압력을 증가시키면서 V_B를 측정하였다. 그림 8에 다양한 전극간격에서 압력의 변화에 따른 V_B를 나타낸다. 압력이 높아질수록 V_B는 증가함을 알 수 있고 전극간격 d가 클수록 V_B는 압력의 영향을 더 크게 받아 V_B가 더욱 높아짐을 알 수 있다. 켄치에 의해 기포가 발생할 경우 압력을 높이면 기포의 크기를 제한하여 절연내력이 높아지는 것으로 보고 되고있으며[6], 켄치 뿐 아니라 극저온의 초전도기에 상온의 전원에서 전력을 공급하는 역할을 하는 전류리드에 의해 상온에서 극저온으로 열 침입에 의해

GN₂가 발생하거나, 전자의 충돌이나 액체분자의 해리 등에 의해 발생하는 GN₂의 영향도 압력을 가함으로써 크게 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

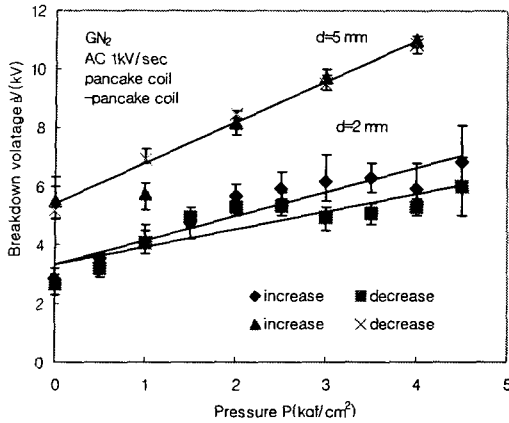


Fig. 7. Effect of forced-increasing or decreasing of pressure on breakdown voltage of gases nitrogen.

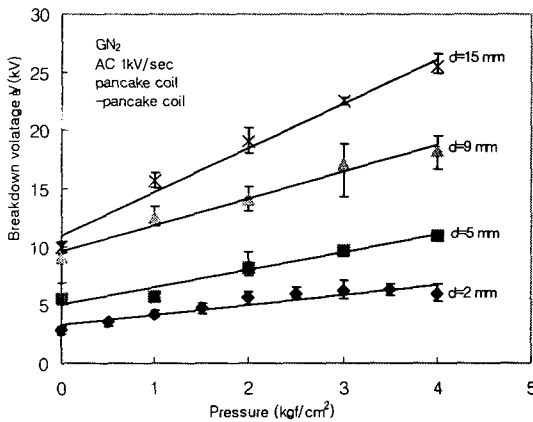


Fig. 8. Breakdown voltage vs the pressure at various gaps.

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

3. 결 론

본 연구에서는 모의 pancake coil 전극을 이용하여 LN₂와 GN₂의 ac 절연파괴특성에 관하여 연구하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. pancake coil 전극계를 이용하여 공기중에서 절연파괴 실험을 한 결과 전극간격이 증가함에 따라 V_B가 명확히 증가하였으며, LN₂에서도 전극간격이 증가함에 따라 V_B가 증가하였으며 V_B

곡선은 구-pancake coil, 침-pancake coil의 V_B곡선사이에 있다.

2. pancake coil-평판 전극계에서 LN₂의 V_B는 $19.292d^{0.8652}$ 이고 구-평판전극의 V_B곡선에 수렴하며, pancake coil-pancake coil 전극계에서 V_B는 $21.224d^{0.5365}$ 이다.

3. 코일간 절연한 경우와 절연하지 않은 경우의 V_B는 유사하지만 침-pancake coil 전극계에서 절연을 한 경우 V_B가 약간 낮게 나타났으며 pancake coil형 초전도 기기의 전기절연 시 고려되어야 하며 앞으로 이 부분에 대한 연구가 더 이루어져야 할 것으로 사료된다.

4. GN₂의 V_B는 77 K 이후 급격히 감소하고 약 100 K에서 상온까지는 거의 일정한 값을 나타내었으며 GN₂에 압력을 가하면 V_B는 직선적으로 증가하고 간격이 클수록 V_B의 증가폭이 더욱 크게 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Gerhold, "Dielectric breakdown of Cryogenic gases and liquids", Cryogenic, Vol. 19, pp. 571-584, 1979.
- [2] H. Fujita, T. Kouno, Y. Noguchi and S. Ueguri, "Breakdown voltage of gaseous N₂ and air from normal to cryogenic temperatures", Cryogenics, Vol.18, pp. 195-200, 1978.
- [3] 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.
- [4] S.H. Kim, D.Y. Ma, H.H. Kim, K.S. Ryu, "Electrical Breakdown Properties in Liquid-Gas Composite N₂", Jpn. J. Phys. Vol. 33, pp. 151-154, 1994.
- [5] Gerhold, J., Hubmann, M. and Telsler, E., "Gap size effect on liquid helium breakdown", Cryogenics, Vol. 34, pp. 579-586, 1994.
- [6] M. Hara and H.Okubo, "Electrical insulation characteristic of superconducting power apparatus", Cryogenics, Vol. 38, pp. 1083-1093, 1998.