

액체 질소중에서 고체 Spacer에 의한 연면 방전특성

김영석, 백승명, 이병성, 장현만, 김상현
 경상대학교 공과대학 전기공학과

Characteristics of Surface Flashover of spacer in Liquid Nitrogen

Y.S. Kim, S.M. Back, B.S. Lee, H.M. Jang and S.H. Kim
 Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Gyeongsang National University

Abstract - Composite insulation system of liquid nitrogen and solid spacer is widely applied in high temperature superconducting power machine. This study has three step procedure. As follow, first step is composition of parallel deposited electrode and vertically deposited electrode along the direction of immersion in liquid nitrogen(LN₂). Second step is investigation into surface flashover voltage of solid spacer under partially immersed in LN₂, and last step is comparison the result of this research with that of fully immersed in LN₂ and at cryogenic temperature gaseous nitrogen(GN₂). This result presented that surface flashover voltage along solid spacer half immersed in LN₂ was almost the same as that of fully immersed spacer when the thickness of spacer(t) was t<10 mm. In the case of t>10 mm, however, spacer flashover voltage was equal to that obtained in GN₂ at cryogenic temperature.

1. 서 론

액체질소(비등점, 77 K)는 고온 초전도체를 사용하는 전력 기기의 냉매로 사용되고 있으며, 임계전류밀도가 충분히 향상되는 못하는 상황에서는 초전도 전력기기의 고전압화가 요구되고 있다. 그러므로, 이런 극저온 상황에서 절연 설계는 액체질소의 기화에 의한 저온 고 밀도 질소가스의 절연특성과 액체 상에서의 절연특성의 확립이 중요하다[1][2].

초전도 시스템의 절연 방식 중에 고체 spacer와 냉매로 절연하는 액체-고체의 복합 절연방식이 전기적 절연 방식으로 유력시되고 있으며, 이 절연방식은 도체의 지지부 및 절연으로 고체 spacer가 사용되며 주위 냉매인 액체 질소로 다시 절연하는 장점을 가지고 있다[3][4]. 하지만, 전극사이에 spacer를 삽입하므로 절연물의 계면을 따라 진전하는 연면 방전이 문제시되고 있다[5][6].

연면 방전 연구는 Toepler의 대기 중 실험을 중심으로 진공, 기체 등에서 연구가 되어 왔으며, 극저온에서의 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그리고 연면 방전 형태는 전계가 고체절연물 표면과 평행하여 교차하지 않는 경우와 교차하는 경우의 두 종류로 나뉘며, 고체 절연물의 계면을 따라 초기단계, 성장단계, 최종단계로 방전경로가 형성되어 관통과과전압보다 낮은 경향을 나타내어 극저온 절연설계에 주의하여야 한다[7][8].

따라서, 본 논문에는 고체 spacer-액체의 복합 절연 방식을 채택하여 액체질소 속에 부분적으로 침적시켜 연면 방전 특성을 조사하였다. 또한 극저온 기체 질소 및 액체 질소 속에 완전히 침적 시켰을 경우와 비교하였으며, 액체 질소 속에 침적되는 방향에 따른 연면 방전특

성에 관해 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 Spacer에 의한 연면 방전의 실험 개략도를 나타낸다. 극저온 기체 및 액체 질소에서의 연면 방전 현상을 조사하기 위해 극저온 저온용기를 사용하였으며, 극저온 질소 가스의 온도범위에서의 연면 방전을 측정하기 위해 전극 holder부에 센서를 부착하여 온도기록제(Yokogawa Co)로 온도변화를 측정하였다.

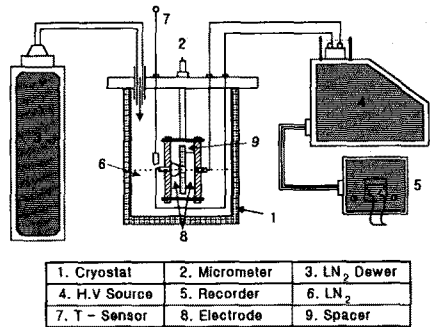
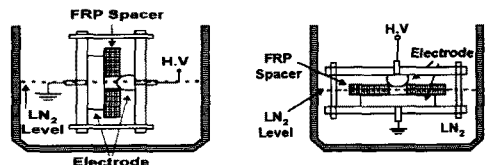


그림 1. 실험장치 개략도

Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

교류전압의 인가는 최대 교류전압 90(kV)인 고전압 발생장치를 이용하여 1 kV/s의 전압상승 속도로 서서히 상승시켰으며, 전압인가는 동일조건하에서 5-10회 반복 측정을 하였다. 또한 방전전압의 기록은 고전압 발생장치와 연결된 Recorder를 통하여 측정하였다.

그림 2는 본 실험에 사용한 연면 방전 전극계를 나타낸다.



a) Parallel immersion b) Vertical immersion

그림 2. 연면 방전 전극장치

Fig.2. Electrode system for Surface Flashover

전극재료는 stainless steel(SUS 304) 전극을 사용하였으며, 구-평판전극으로 구성하였다. 고체 spacer로는 극저온 FRP를 사용하였으며, 중심부에 직경의 변화를 주었다. 또한 전극과 고체 spacer와의 밀착성을 위

해 Teflon을 이용하여 전극의 양쪽부분에 전극 지지부를 구성하고 spacer와 전극부분을 미소 gap를 없애기 위해 용수철을 부착하여 각 전극이 spacer에 밀착되게 고정하였다. 그리고 전극계가 액체 질소 속에 침적되는 방향에 따른 연면 방전전압을 조사하기 위해 수직과 수평의 두 가지 전극배치로 나누어 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2-b)의 수직방향으로 침적되는 전극배치를 사용하여 연면 방전전압을 측정하였으며, 그림에서 error bar의 상·하는 측정치의 최대 및 최소값을 나타내며, 표시한 점(●)은 전압의 평균치를 나타낸다.

또한, 액체질소 수위의 100%는 전극이 액체질소에 완전히 침적된 상태를, 50%일 때는 Spacer에 1/2 침적된 상태를, 0%는 거의 침적되지 않는 극저온 가스상태를 표시한다. 또한 300K은 실온에서의 연면 방전전압을 나타낸다.

그림 3은 spacer 두께변화에 따른 연면 방전전압을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 액체 질소의 레벨에

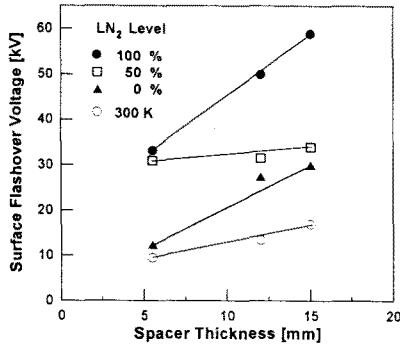
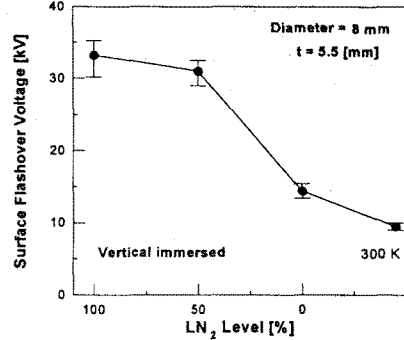


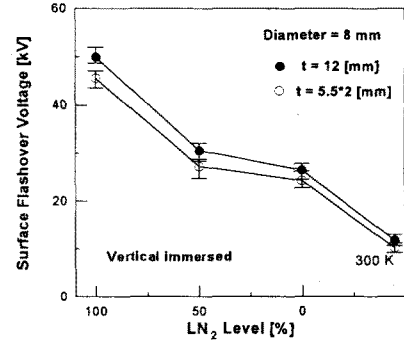
그림 3. Spacer의 두께 변화에 따른 연면 방전전압.
Fig. 3. Surface flashover voltage under different spacer thickness.

관계없이 연면 방전 전압은 spacer 두께가 두꺼워 질수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 하지만, 액체 질소의 50%인 경우 spacer의 두께에 따라 전압의 증가 폭은 적었다. 또한 spacer의 두께 12 mm인 것에 내경 변화에 따른 연면 방전전압을 조사하였으며, 내경이 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 spacer의 직경이 증가함에 따라 전극의 약점부가 증가하여 연면 방전 전압이 감소하는 결과라 생각된다.

그림 4의 a)와 b)는 전극이 액체질소 속에 수직방향으로 침적되는 경우의 두께 5.5mm, 12mm, 내경 8mm 인 FRP spacer의 액체 질소수위에 따른 연 압을 나타내고 있다. 그림 4-a)의 두께 5.5mm인 경우, 50%일 때의 연면 방전전압은 100%의 완전히 침적된 경우에 비해 약간 낮게 나타나지만 거의 같은 전압값을 나타내고 있다. 그리고 0%일 때는 전압이 급격하게 떨어졌으며, 실온에서의 전압 값보다 약간 높게 나타났다. 하지만, 그림 4-b)의 두께 12mm와 5.5mm의 2층을 한 경우, 50%일 때의 연면 방전전압은 급격하게 감소하여 100%일 때 보다 1/2정도로 낮게 나타나며, 극저온 질소가스의 전압과 거의 같게 나타났다. 이것은 spacer의 두께가 작은 경우, 50%일 때의 액체질소는 전계가 점점 높아짐에 따라 액체가 상부전극으로 올라가는 climb 현상이 발생하여 100%일때의 연면 방전전압과 같이 높게 나타났다. 하지만, spacer의 두께가 증가할수록 전계에 의한 climb 현상은 일어나지 않고 절연 내력이 약한 질소 가스층에서 먼저 방전이 발생했다. 액



a) $t = 5.5 \text{ mm}$, $\phi = 8 \text{ mm}$



b) $t = 12 \text{ mm}$, $\phi = 8 \text{ mm}$

그림 4. 연면 방전 전압의 액체질소 수위 효과
Fig. 4. Effect of liquid nitrogen level on surface flashover voltage.

체질소 속에 고체 Spacer가 50% 침적 되었을때의 연면 방전전압은 spacer의 두께에 의존하였고, $t < 10 \text{ mm}$ 이하에서는 100% 함침 되었을 때와 거의 같았다. 하지만, $t > 10 \text{ mm}$ 이상이 되면 극저온 질소가스의 연면 방전 전압과 거의 같았다.

그림 5는 온도변화에 따른 연면 방전전압을 나타낸다. Spacer의 내경은 8mm로 일정하게 두고 두께를 5.5, 15mm로 변화시켜 실험하였다. 그림에서 알 수 있듯이 두 가지 경우 모두 온도가 높아짐에 따라 연면 방전 전압은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 하지만, spacer의 직경이 15mm의 것은 전압이 서서히 감소하여 포화되고 5.5mm의 것은 77K이상의 온도 범위를 넘어서면

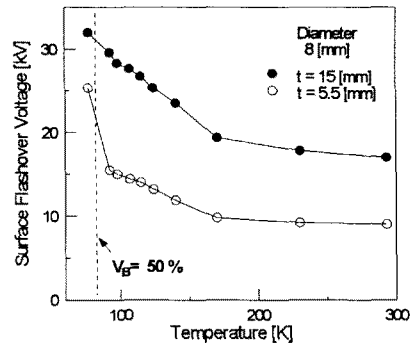


그림 5. 온도변화에 따른 연면 방전전압.
Fig. 5. Surface flashover voltage vs. variable temperature.

전압은 급격하게 감소한 후 포화되는 경향을 가졌다. 이때의 연면 방전전압은 그림 4-a) 및 b)의 액체 수위의 0%에 해당되는 연면 방전전압 값을 가졌다.

그림 6은 침적되는 방향에 따른 각 액체 질소 수위의 연면 방전전압을 나타낸다. 두께가 얇은 5.5 mm인 spacer의 경우, 연면 방전 전압은 수평 및 수직의 침적되는 방향에 크게 의존성은 없는 것을 알 수 있으며, climb 현상에 의한 액체 질소에서의 연면방전으로 생각된다. 또한 액체질소 속에 침적되는 수평방향과 수직방향에 대한 50% 연면 방전전압을 그림 7에 나타낸다.

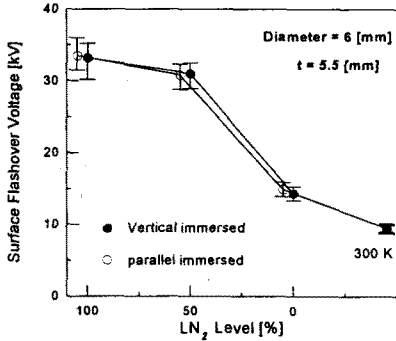


그림 6. 침적방향에 따른 액체 질소 수위에서의 연면 방전전압.

Fig. 6. Surface flashover of LN₂ level on immersion direction.

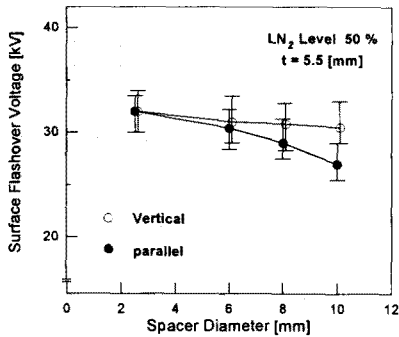


그림 7. 액체 질소속에 침적되는 방향에 따른 연면 방전전압.

Fig. 7. surface flashover voltage on immersion direction in liquid nitrogen.

그림에서 알 수 있듯이 액체질소 속에 침적되는 방향이 수직인 경우, 연면 방전전압은 거의 변화가 없이 일정한 전압값을 나타내고 있다. 하지만 침적되는 방향이 수평인 경우의 연면 방전전압은 spacer내경이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 수직배치인 경우, spacer 내경이 증가해도 기체와 액체의 복합 층이 그대로 형성되어 전압의 변화는 일어나지 않았다. 하지만, 수평배치인 경우 spacer 내경이 증가함에 따라 기체 층의 영역이 증가하여 절연내력이 좋은 액체 상에는 방전이 일어나지 않고 상대적으로 절연내력이 약한 질소가스의 방전이 발생하였다.

3. 결 론

본 연구에서 얻어진 결과들은 다음과 같다.

1. 연면 방전전압은 고체 spacer의 두께가 증가할수록 액체질소 수위와 관계없이 높게 나타났으며, 내경의 증가할수록 약점부분의 증대로 약간 감소하였다.
2. 액체질소 속에 고체 Spacer가 50% 침적 되었을 때의 연면 방전전압은 spacer의 두께에 의존하였고, t<10mm이하에서는 100% 합침 되었을 때와 거의 같았다. 하지만, t>10mm 이상에서는 극저온 질소가스의 연면 방전전압과 거의 같았다.
3. 액체질소 속에 전극계가 침적되는 방향에 따라 방전 전압의 차이가 나타났으며, 수평으로 침적되는 경우 spacer 내경의 증가로 인해 기체층에서 파괴되어 연면 방전전압이 낮게 나타났다.

(참 고 문 헌)

- [1] K.Funaki, et al, "Preliminary of a 500kVA-Class Oxide Superconducting Transformer Cooled by Subcooled Nitrogen", IEEE Trans. on Appl. Supercond. 7, 2, pp.824- 827,1997.
- [2] 原 雅則, "超電導應用器機に求められる高耐電壓化", 電氣學會誌, 116卷 6號, 1996.
- [3] 김상현 "초전도 케이블 및 송전 시스템 개발-전기절연기술-", 최종보고서, 한국전력공사 1996.
- [4] A.Bulinski and J.Densley, "The Impulse Characteristics of Electrical Insulation Operating at Cryogenic Temperatures", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.15, pp.89-96, 1980.
- [5] 星野, 力石, 柳, 山本, 本島, 小崎, 原 "스페이샤를 つ平板電極系における低温ガスの沿面放電特性", 電氣學會研究會資料, ED-96-84, DEI-96 -49, 1996.
- [6] Qiaogen Zhang et al, "Effect of surface Charge on Impulse Flashover Voltages of Spacer in SF₆", Proceeding of 1998 International Symposium, pp 27-30, 1998.
- [7] 岩田善輔, "液體窒素中の沿面放電", 電氣學會絶緣材料研究會資料, No.IM-72-40, 1972
- [8] J.Gerhold, "Dielectric breakdown of cryogenic gaseous and liquids", Cryogenic, 19, pp.571-584, 1979.