

극저온화에 따른 액화 SF₆ 및 액체질소의 방전특성

최은혁*, 이현철*, 윤대희*, 박광서*, 김종환**, 박창기***, 김기재*, 이광식*
 영남대학교, 경북교육청**, 한국전력공사***

Discharge Characteristics of Liquid SF₆ & N₂ at Very Low Temperature

E.H. Choi*, H.C. Lee*, D.H. Yoon*, K.S. Park*, G.H. Kim**, CH.K. Park***, K.C. Kim*, K.S. Lee*
 Yeungnam Univ*, Gyeongsangbuk-do Office of Education**, KEPCO***

Abstract - This paper describes the discharge characteristics of liquid SF₆ (-41[°C], 1.7[atm]) and LN₂ for plane to plane, needle to plane, plane to plane and sphere to plane electrode with gap variations from 1[mm] to 12[mm]. From this result, the breakdown voltage was increased with increasing gap length. Especially, the formation of bubbles by evaporation was observed in spite of non-applying voltage source. A corona is created of the applying voltage from the bubbles on the electrodes applied voltage. We consider it equal mechanism of corona as void exists in solid insulator. The results of liquid SF₆ and LN₂ discharge characteristics were caused by bubble formed evaporation and applied electric field voltage. Corona was happened to weak bubble and was proceed to new bubble breakdown.

모의하기 위해 제작한 챔버이다. 실험용 챔버 내부온도를 관측하기 위하여 온도센서(UNICON, -50~50[°C])와 내부 압력을 측정하기 위해 압력계(WISE, 0~15기압)를 설치하였다. 또한 챔버 내부에 설치된 온도센서와 전극 부를 관측할 수 있는 관측창 (직경 110[mm], 두께 20[mm])을 만들었으며, 관측창은 투명 아크릴을 사용하여 원통형으로 제작하였다. 실험용 챔버의 주요 사항은 10기압 정도의 가압과, -50~50[°C]의 온도변화와 유지가 가능하며, 액체 SF₆와 LN₂의 절연내력 시험을 위해 150[kV] 정도의 고압인가가 가능하도록 설계되었다.

액화 SF₆ 실험은 챔버의 내부를 진공펌프(SINKU KIKO Co.Ltd, GUD-050A, pumping speed 60[l/min])로 약 5×10⁻⁴[Torr]까지 진공을 만든 다음 SF₆가스를 4기압 주입시킨 상태에서 -30[°C]까지 Dry-Ice를 이용하여 온도를 하강시켰다. -20~-30[°C]에서 SF₆ 가스의 액화가 진행되면 일정속도로 주입하여 전극이 합침될 때까지 액화시켰다. 액화 후 챔버내 기압을 약 1.7기압으로 일정하게 유지하였다.

LN₂는 열절연을 위하여 챔버 내함과 외함 사이에 진공펌프를 이용하여 진공상태를 만들 후, LN₂에 전극을 합침하였다. 대기압상태에서 챔버내에 LN₂가 안정화되게 만들었다.

그리고 부극성 고전압 측정시스템 (Pulse Electronic Eng. Tokyo ; HDV-300KIV-N)을 이용하여 전압을 초당 1[kV] 정도의 속도로 인가전압을 상승시키면서 챔버의 갭 조절기를 이용하여 전극간 갭을 1[mm]씩 최대 12[mm]까지 조정하여 갭의 변화에 따른 절연파괴 전압을 측정하였다.

1. 서 론

산업의 고도 성장에 따라 도시집중화 및 도시기능의 고도화는 한정된 지역에서의 대용량 전력에너지의 공급을 요구하게 되었다. 또한 산업시대 및 도시의 토지이용률을 향상시키기 위하여 발전설비는 도시의 원격지에 위치하게 되어 장거리송전이라는 문제점을 수반하고 있었다.

위와 같은 문제점으로 현재는 절연내력이 우수한 SF₆ 가스의 활용은 필연적으로 차단기, 단로기 등의 개폐장치 모선뿐만 아니라 대용량 변압기에도 SF₆가 절연방식이 적용되고 있다.

하지만, 현대사회가 첨단과학의 이기를 갈망함에 따라 현대인의 생활에 전력의 사용이 점차 증가하는 실정이다. 현재보다 더 많은 전력에너지를 필요함과 동시에 도시의 공간활용의 효율성 측면에서 전력기기들의 소형화 및 고 신뢰화가 시도되고 있다. 또한, 혹한 지역에 노출되어 SF₆를 사용하는 전력설비는 그 온도 저하에 따른 액화현상으로 방전특성이 큰 변화를 가지게 된다. 이러한 관점에서 현재 이용되고 있는 SF₆가스를 앞으로 다가올 초고압시대에 맞추어 연구 및 개발의 필요성이 있다고 사려된다.

따라서, 본 논문에서는 냉매로서 뿐만 아니라 절연재료로서도 성능이 우수한 액화 SF₆와 기존에 극저온 가스로 연구되고 있는 액체 질소의 기본적인 절연파괴특성을 비교/분석하여 송배전 전력기기들의 소형화 및 신뢰도 분야 연구에 있어 기초적인 자료를 제공할 뿐만 아니라, SF₆가스 절연 전력설비의 설계에 있어 활용될 수 있을 것이다. 그리하여 액화 SF₆와 액체 질소하에서 전극과 갭에 따른 절연파괴 특성을 실험 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

사진1은 본 연구에서 액화 SF₆와 LN₂의 방전 특성을

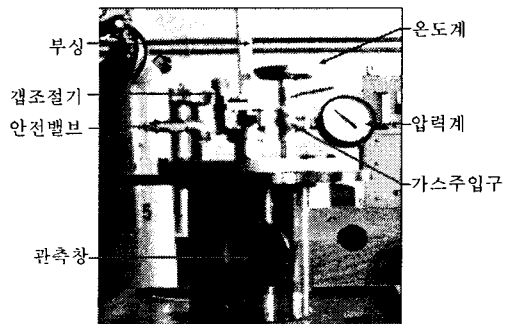


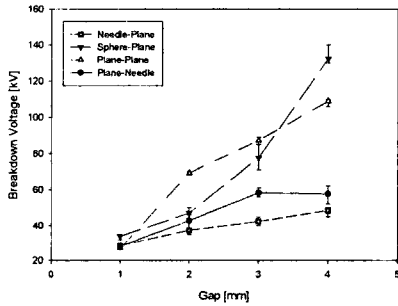
사진 1 실험용 모의 챔버 사진

전극형상에 따른 액화 SF₆ 가스의 방전 특성을 알아보기 위해 재질이 스테인레스 스틸인 구 전극(직경 41[mm]), 로고스키형 평판전극(직경 59[mm])과 침전극(직경 5[mm], 침단각도 20°)을 이용하여 평등 전계(평판 대 평판), 준평등 전계(구 대 평판), 불평등 전계(침(↓) 대 평판(↓), 평판(↑) 대 침(↓))을 챔버 내의 중심부에 설치하였다.

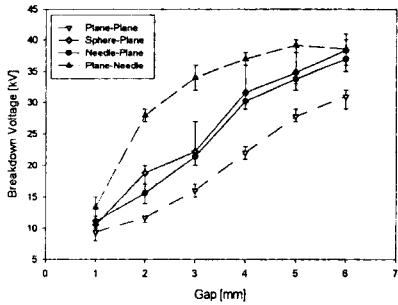
2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 전극형상에 따른 방전 특성

그림 1은 액화 SF₆와 LN₂에서 전극 형상에 따른 절연 파괴전압을 그래프로 도식하였다. 그림과 같이 전극형상에 대하여 전극변화에 따른 전압파괴전압 변화율은 상이했지만, 모든 전극에서 상승경향을 보여준다. 그림 1 (a)는 액화 SF₆의 단간극(短間隙)하에서 전극형상에 따른 절연파괴전압을 나타내고 있다. 갭이 1[mm]에서는 모든 전극형상에 따른 절연파괴전압이 비슷한 양상을 보여 주었다. 갭이 증가함에 따라 침(上)대평판(下) 전극보다 평판(上)대침(下) 전극의 파괴전압이 높게 측정되었다. 액화 SF₆하에서 보면 갭이 4[mm]시 평판대평판 전극보다 구대평판 전극의 절연파괴 전압이 높음을 확인하였다. 이는 평등전계인 평판대평판 전극과 준평등 전계인 구대평판전극에 있어서는 갭이 증가함에 따라 전극의 최단거리 및 그 근방에 Bubble이 많이 존재하는 평판대평판 전극이 절연파괴전압이 낮은 것으로 사려된다.



(a) 액화 SF₆



(b) LN₂

그림 1. 전극 형상에 따른 절연파괴 특성

그림 1 (b)는 LN₂의 전극과 갭 변화에 따른 파괴전압의 변화를 보여주고 있다. 챔버 내 LN₂는 액화 SF₆에 비해 더 빠른 유속으로 기포의 이동을 확인하였으며, 기포의 수 또한 더 많이 생성되었다. 이러한 요인으로 절연파괴전압에 있어 전극사이의 전계, 전계형태에 따른 후류, 전극간의 기포밀도와 같이 기포에 의해 결정된다. 따라서, 극저온 액체의 절연파괴 이론과 같이 액화 SF₆와 LN₂하에서도 전극형상에 따른 절연파괴전압의 변화요인은 기포가 주원인이 되며, 더불어 전계의 형상과 갭의 길이에 결정된다. 또한 LN₂에 비해 액화 SF₆의 절연파괴 전압이 SF₆의 아크소호능력과 절연내력에 의해 높음을 확인하였다.

그림 2는 SF₆의 침(上)대 평판(下), 평판(上) 대 침(下) 전극과 같은 불평등 전계에 전극의 배치에 따른 절연 파괴 전압을 보여주고 있다.

특히, 액화 SF₆의 평판(上)대 침(下) 전극에서 구간 (I)은 갭이 상승하여도 일정한 파괴전압을 보여주고 있다. 이러한 현상은 기포의 두가지 작용에 의해 나타난다

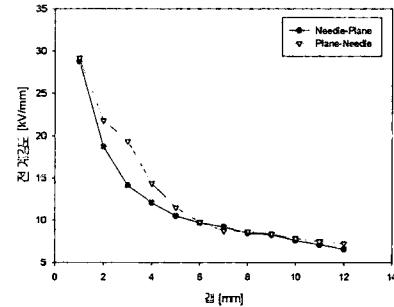
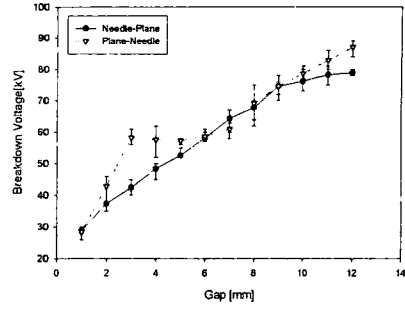


그림 2. 액화 SF₆에서 침(上)대평판(下)과 평판(上)대침(下) 전극 절연파괴특성 비교

고 생각되어 진다. 먼저, 아래에서 상승한 기포의 진행방향과 수직으로 위치해 있는 평판 전극에 수직으로 충돌함에 따라 기포는 전극의 표면을 따라 이동하며, 전극표면에 닿아 존재하는 기포는 전극에 부착되어 전혀 유동이 없는 정체기포를 생각할 수 있다. 또한 전극 사이의 전계와 부력에 의해 전극사이에 존재하는 기포의 위치가 결정되어진다. 따라서 그림 3과 같이 절연파괴전압은 평판 전극표면에 기포 층이 형성되고, 전계와 부력의 합력으로 기포는 전극사이 적층하게 되어 일정 갭이 상승하여도 파괴전압이 유지되는 것으로 생각되어진다.

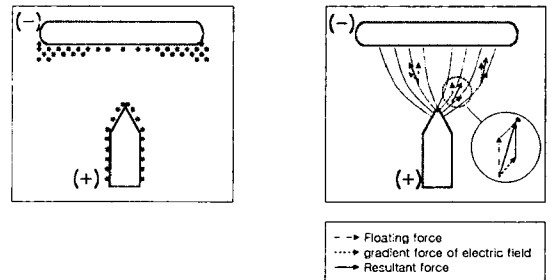
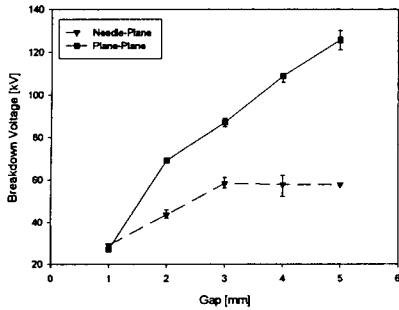


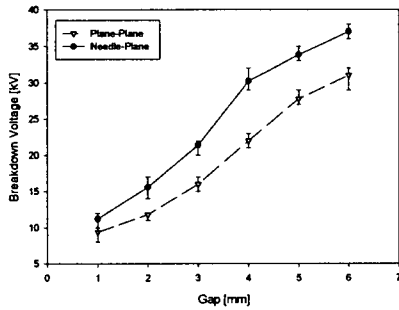
그림 3. 액화 SF₆에서 Bubble 효과

2.2.2 액화 SF₆와 LN₂ Bubble 현상 비교

본 논문에서 실험한 액화 SF₆와 LN₂에서 자연기포가 발생되고 이러한 기포는 코로나 발생에 따라 더욱 증식하게 된다. 그림 4는 액화 SF₆와 LN₂의 침(上)대평판(下)과 평판대평판 전극의 절연파괴특성을 나타내고 있다. 일반적으로 평등전계인 평판대평판 전극의 절연파괴 전압이 불평등전계인 침대평판 전극보다 높게 나타난다. 하지만 액화 SF₆에서 갭 거리가 1[mm]일 때와 LN₂에서는 불평등전계인 침(上)대평판(下) 전극의 파괴전압이 높게 나타나는 양상을 보여 주고 있다.



(a) 액화 SF₆



(b) LN₂

그림 4 침(上)대평판(下)과 평판(上)대평판(下) 전극 절연파괴특성 비교

그림 4 (a)는 액화 SF₆에서 절연파괴특성을 보여 주고 있다. 액화 SF₆에서 발생된 SF₆기체 기포는 코로나 발생에 따라 더욱 증식하게 된다. 그 결과로 평판 대 평판 전극이 침(上)대 평판(下)전극보다 절연파괴 전압이 낮아지는 결과를 확인할 수 있지만, 갭이 1[mm]일 때 평판 대 평판의 절연파괴전압이 낮고 2[mm]이상일 때 침 대 평판 보다 더 높은 절연파괴전압이 측정되었다. 액화 SF₆ 하에서 생성되는 SF₆ 기포는 공기보다 절연 내력이 3배 이고, 공기의 100배 정도의 아크 소호능력을 가지고 있어 기체질소 보다 월등한 절연내력을 가지고 있다. SF₆ 기포는 액화 SF₆하에서 일정 갭 이상시 절연내력이 기포에 의해 감소되는 현상 보여준다. 또한 기포는 그림 5와 같이 침(上)대평판(下) 전극에서 전계와 부력의 합력에 의해 침전극의 선단과 멀어지는 곳에 위치하게 된다. 따라서 위와 같은 두가지 원인으로 그림 4 (a)와 같이 갭 2[mm]이상에서 평판 대 평판의 절연파괴전압이 높게 나타난다.

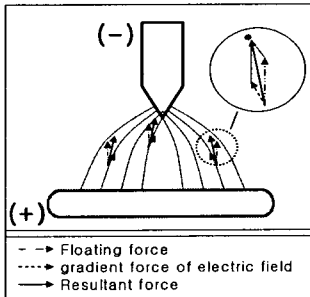


그림 5. 액화 SF₆하 침대평판의 Bubble 효과

그림 4 (b)와 같이 LN₂에서 발생하는 자연기포는 SF₆ 가스 기포에 비해 절연내력이 낮고 특히 아크소호능력이 현저히 낮다. 따라서 LN₂에서 평판대평판 전극이 침(上)

대평판(F) 전극에 비해 전극의 최단거리 및 그 근방에 Bubble이 많이 존재하는 평판대평판 전극이 절연파괴전압이 낮아짐을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

일정 온도, 압력하에서 액화 SF₆와 LN₂에 대한 전극 형상에 따른 방전특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 액화 SF₆와 LN₂하에서 전극형상에 따른 절연파괴전압도 Bubble 효과가 적용된다..
- ② 액화 SF₆ 평판대침 전극에서 절연파괴전압은 bubble 효과가 추가 되는 영역과 전계효과가 관련이 되는 영역이 존재한다.
- ③ 침(上)대평판(下), 평판(上)대침(下) 전극에서는 전극 배치에 따라 기포의 정체, 후류 등에 의해 절연파괴전압이 달라진다.
- ④ 극저온하에서 발생하는 자연기포에 의한 절연파괴전압 특성은 기포 가스의 기본적 물성에 따라 변화함을 확인하였다.
- ⑤ 액화 SF₆와 LN₂에서 액화 SF₆의 절연내력이 월등하다는 것을 실험을 통해 확인하였으며, 이를 통해 고온초전도체 개발에 따른 극저온 및 절연재료로서 액화 SF₆가 사용 가능함을 확인하였다.

앞으로 보다 많은 액화 SF₆에 대한 연구가 진행된다면 초전도 전력기기에 절연설계 분야에 많은 도움 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Landry, M. et al. " Dielectric withstand and breaking capacity of SF6 circuit breakers at low temperatures " Power Delivery, IEEE Transactions on, pp. 1029~1035, July 1988
- [2] Gong Guoli et al, " The influence of SF6 and SF6/N2 dissociating products on the electrical performance of several insulating varnishes ", Electrical Insulating Materials, pp. 49 5~497, 1995
- [3] T.Ueda et al, " Discrimination of Partial Discharge Electromagnetic Signal in SF6 Gas from External Noise Using Phase Gate Control Method ", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 117~120, 1996
- [4] 이광식 외 3명, " 대기압하에서 액체질소(LN2)의 방전특성에 관한 연구 ", 대한전기학회 논문지 Vol 45 No 7, 1996.7.
- [5] C.Beyer et al. " Influence Reactive SFX Gases on Electrode Surfaces after Electrical Discharge under SF6 Atmosphere", IEEE Trans, pp. 234~240, 2000
- [6] 주재현, " 액체질소중의 방전형상과 방사전자파의 특성에 관한 연구 ", 영남대학교 대학원 1997.8.
- [7] 이광식, " 액체질소 및 극저온 가스의 방전특성에 관한 연구 ", 한국전력공사, 1993.8.
- [8] 박경태, " 온도변화에 따른 SF6의 방전 및 방사전자파 특성 ", 영남대학교 대학원, 2002.12.
- [9] 이광식 외 4명, " SF6 가스의 온도변화에 따른 절연특성 " 대한전기학회 논문지 Vol 52C No 8, 2003.8
- [10] Frank M. White, " Fluid Mechanics ", McGraw- Hill, 1995.8.