

# SF<sub>6</sub> 상태에 따른 절연파괴전압 비교분석에 관한 연구

( The analysis & comparative method on the breakdown voltage in SF<sub>6</sub> )

최은혁\* · 윤대희 · 박광서 · 박원주 · 주재현 · 최상태 · 이광식

( Eun-Hyuck Choi · Dae-Hee Yoon · Kwang-Seo Park · Won-Goo Park · Jae-Hyun Joo · Sang-Tae Choi · Kwang-Sik Lee )

## Abstract

In this paper the experiments of insulation characteristics by temperature change of SF<sub>6</sub> gas and insulation characteristics about liquid SF<sub>6</sub> in GIS(Gas Insulated Switchgear) were described.

From this result, at low temperature, the breakdown voltage was increased with a drop of temperature and an increase of the inner pressure in GIS. The ability of insulation in liquid SF<sub>6</sub> was higher than that of the highly pressurized SF<sub>6</sub> gas. A liquid SF<sub>6</sub> discharge characteristics was caused by bubble formed evaporation of liquid SF<sub>6</sub> and bubble when high voltage apply to electrode. Corona was happened to weak bubble and was proceed to new bubble breakdown.

## 1. 서 론

산업사회의 발달과 더불어 신뢰성 높은 양질의 전기에너지와 운전 및 보수의 간편화, 계통 운용의 신뢰성, 안전성 확보가 요구되고 있다. 이에따라 절연 특성이 매우 우수한 고압의 SF<sub>6</sub>가스를 절연 재료로 사용하는 변전기기의 사용이 증가되고 있는 실정이며, 국·내외에서 건설, 운전 중이다.

하지만, 현대사회가 첨단과학의 이기를 갈망함에 따라 현재보다 더 많은 전력에너지를 필요함과 동시에 도시의 공간활용의 효율성 측면에서 전력기기들의 소형화 및 고 신뢰화가 시도되고 있다. 또한, 혹한 지역에 노출되어 SF<sub>6</sub>를 사용하는 전력설비는 그 온도 저하에 따른 액화현상으로 방전특성이 큰 변화를 가지게 된다. 이러한 관점에서 현재 이용되고 있는 SF<sub>6</sub>가스를 앞으로 다가올 초고압시대에 맞추어 연구 및 개발의 필요성이 있다고 사료된다.

또한 SF<sub>6</sub> 가스를 절연매체로 사용하고 있는 초고압 용의 설비에 주로 적용되는 GIS설비는 고전압상태에서 운전되므로 제작과정 및 운전상태에서 미세한 구조적 결함이나 이물질로 인해 기기의 오동작이나 절연파괴와 같은 사고발생시 파급효과도 크다. 이에 외부환경 및 여러 가지의 사고사항을 고려한 최적 절연설계를 통한 부분방전의 발생가능성을 최대한 줄이는 연구가 필요하며 진행되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 냉매로서 뿐만 아니라 절연재료로서도 성능이 우수한 액화 SF<sub>6</sub> (LSF<sub>6</sub>)와 기존에 극

저온 가스로 연구되고 있는 액화 질소의 기본적 절연파괴특성을 비교/분석하여 송배전 전력기기들의 소형화 및 신뢰도 분야 연구에 있어 기초적인 자료를 제공할 뿐만 아니라, SF<sub>6</sub>가스 절연 전력설비의 설계에 있어 활용될 수 있을 것이다. 그리하여 LSF<sub>6</sub>와 액화 N<sub>2</sub>(LN<sub>2</sub>) 하에서 전극의 종류와 갭에 따른 절연파괴 특성을 실험 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치를 그림 1, 사진 1에 액화 SF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>의 방전 특성을 모의하기 위해 설계·제작한 챔버이다. 최대 인가전압은 부극성 DC 150[kV]이 가능한 전원( Pulse Electronic Eng. Tokyo ; HDV-300KIV-N )을 사용하였다. 모의 GIS장치 내부온도를 관측하기 위하여 온도센서(UNICON, -50[°C]~50[°C])를 GIS 내부 중심부에 전극부와 평행하게 전극 중심부와 약 8 [cm] 떨어진 곳에 설치하였다. 모의 실험용 GIS 내부 압력을 측정하기 위해 압력계(WISE, 0~15기압)를 설치하였다. 실험용 모의 GIS 내부를 진공펌프(SINKU KIKO Co.Ltd, GUD-050A, pumping speed 60 l/min)로 5×10<sup>-4</sup>[Torr]까지 진공을 만든 다음 SF<sub>6</sub> 가스를 주입하였다. 모의 GIS 내부에 설치된 온도센서와 전극부를 관측할 수 있는 관측창(직경 110[mm], 두께 20[mm])을 설치하였다. 이 관측창의 재질은 투

명 아크릴이며, 원통형으로 제작 설치하였다.

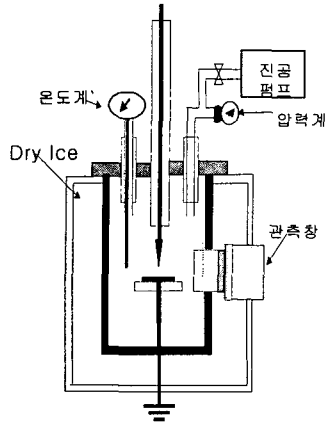


그림 1. 모의 GIS 챔버

본 연구에 사용한 전극은 스테인레스 스틸인 구 전극 (직경 41mm), 로고스키형 평판전극 (직경 59mm)과 침전극 (직경 5mm, 침단각도 20°)을 이용하여 평등 전계(평판대평판), 준평등 전계(구대평판), 불평등 전계(침(上)대평판(下), 평판(上)대침(下))을 사용하였다.



사진 1. 실제 제작한 모의 GIS 챔버

실험용 모의 GIS 챔버의 주요 사양은 압력 변화(2~6[atm])를 위해 안정상 10기압 정도의 가압이 가능하고 압력 유지를 위해 실험용 GIS 챔버 내의 기밀성 유지가 가능하다. 또한 온도변화(50~-50℃) 및 유지가 가능하고 높은 절연성을 가진 SF<sub>6</sub> 가스의 절연내력 시험을 위해 150[kV] 정도의 고압인가에 따른 절연설계가 되어있다.

냉각 설비는 열 절연을 위하여 그림 1에서와 같이 챔버 내·외부사이에 진공펌프를 이용하여 진공층을 두었으며, 드라이아이스를 이용하여 온

도를 조절하였다.

## 2.2. 실험방법

SF<sub>6</sub>의 온도변화에 따른 절연과피전압을 측정을 위하여 30~-40℃의 온도 변화에 따른 각각 내부 압력(4-6[atm]) 유지시 SF<sub>6</sub> 가스의 절연과피 전압을 측정하였다. 또한 실험용 모의 GIS 챔버 내의 가스량의 변화 없이 일정 가스량 유지시 온도-압력 변화에 대한 SF<sub>6</sub> 가스의 절연과피 전압을 측정하였다. 절연과피 전압은 10회를 측정하여 평균값으로 그래프에 표시하였다.

전압의 측정은 전압을 서서히 상승 인가시 1번의 아크 방전이 발생될 때 전압값을 측정하였다. 부정현상을 없애기 위해 처음 10번 정도 방전시킨 후 절연과피 전압값을 측정하였다. 고전압인가는 초당 1[kV] 속도로 인가하였다.

그리고 액체상태에서의 특성을 알아보기 위하여 챔버내의 전극을 LSF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>에 함침하여 챔버의 갭 조절기를 이용하여 1[mm]당 절연과피전압을 12[mm]까지 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 일정 가스량에 대한 온도-압력 절연과피 특성

그림 2는 모의 GIS 장치내에 침대평판전극을 설치하여 30[℃]에서 SF<sub>6</sub>가스의 일정 가스량을 유지시 온도-압력에 대한 절연과피 전압을 나타냈다. 또한 표 1에는 압력에 대한 온도변화를 보여주고 있다.

Section I은 각 압력에 대한 SF<sub>6</sub>의 액화 진행전의 단계이며 이 경우에는 온도증가로 인한 압력증가에 의한 절연과피전압이 약간 상승하는 경향을 나타냈다. Section II에서는 각 압력에 따른 SF<sub>6</sub>의 액화가 진행됨에 따라 절연과피 전압은 급격히 상승한다. 이러한 현상은 액화된 SF<sub>6</sub>가 침전극을 타고 흘러내려감에 따라 액화 SF<sub>6</sub>가 침을 도포하게 되어 위와 같은 높은 절연과피 전압을 보여준다. 또한 액화 SF<sub>6</sub>가 침에도포정도에 따라 절연과피전압의 차이가 심한 것을 볼 수 있었다. Section III에서는 SF<sub>6</sub>의 액화가 더욱 더 진행될 경우 갭간의 압력이 급격히 떨어져 절연과피전압도 급격히 하락한다. 이 경우에는 극간에 희박한 SF<sub>6</sub>가스와 희박한 공기의 혼합체만 존재하기 때문에 절연과피전압이 급격히 하락하게 된다.

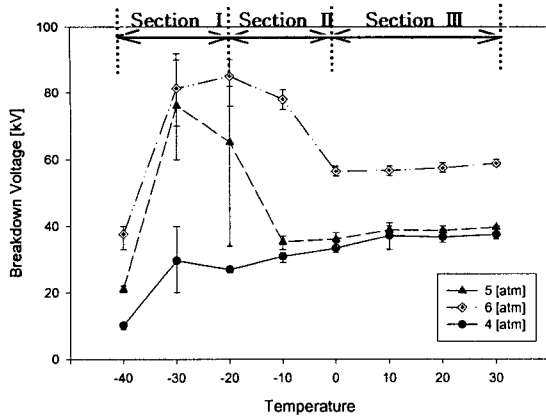


그림 2. 일정 가스량에 대한 온도-압력 절연파괴전압

표 1. 일정 가스량에 대한 온도-압력변화

온도	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30
5 [atm]	1.5	3.0	3.6	4.1	4.8	5.4	5.6	6.0
6 [atm]	1.0	2.6	3.4	3.7	4.2	4.5	4.7	5.0
4 [atm]	0.3	1.5	2.3	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0

위의 실험결과에서 보듯이 SF<sub>6</sub>가 침전극을 포함 경우 절연파괴전압이 급격히 상승함에 따라 액화 SF<sub>6</sub>에서의 절연파괴 전압을 규명하기 위하여 전극형상에 따른 절연파괴전압을 좀 더 규명하고, 극저온 연구에 활용되고 있는 액화 질소와 비교하여 그 특성과 이용 가능성을 확인할 것이다.

### 3.2 LSF<sub>6</sub>하에서 갭 변화시 절연파괴강도

#### 3.2.1. 전극형상에 따른 절연파괴강도

그림 3는 LSF<sub>6</sub>에서 전극 형상에 따른 절연파괴전압을 그래프로 도식하였다. 그림과 같이 전극형상에 대하여 전극변화에 따른 전압파괴전압 변화율은 상이했지만, 모든 전극에서 상승경향을 보여준다. LSF<sub>6</sub>의 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

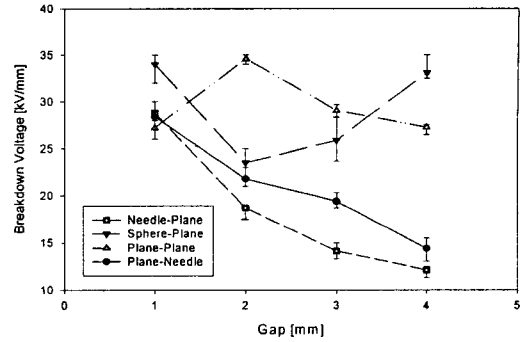


그림 3. LSF<sub>6</sub>하에서 전극형상별 절연파괴강도

(上)대침(下) 전극의 파괴전압이 높게 측정되었다. 액화 SF<sub>6</sub>하에서 보면 갭 변화시 평판대평판 전극보다 구대평판 전극의 절연파괴전압을 보면, 1[mm]에서는 전계가 절연파괴의 주된 요인으로 작용하여 평판(下)대평판(下)이 높게 나타난다. 갭이 2, 3[mm]에서는 평등전계인 평판대평판 전극과 준평등 전계인 구대평판전극에 있어서는 갭이 증가함에 따라 전극의 최단거리 및 그 근방에 Bubble이 많이 존재하는 평판대평판 전극이 절연파괴전압이 낮은 것으로 사려된다. 갭이 4[mm]에서는 거리가 증가함에 따라 로고스키형 평판전극을 사용하였지만 평판전극의 가장자리에서 전계의 불균형이 생김에 따라 구대평판전극이 평등전계에 더욱 가까워짐에 따라 절연파괴전압이 증가하게 된다.

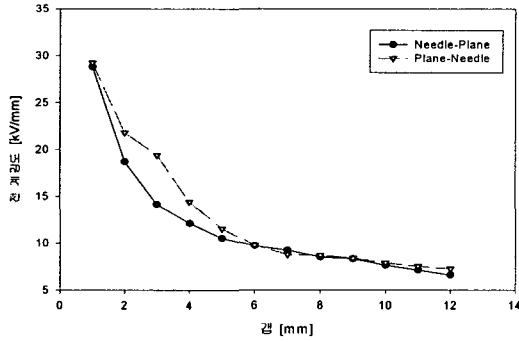
#### 3.2.2. LSF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>의 버블효과 비교

극저온 액체중의 절연파괴 이론 중 Bubble 이론에 관하여 살펴보면 챔버 내·외부에서의 분위기에 따라 Bubble이 생성된다.

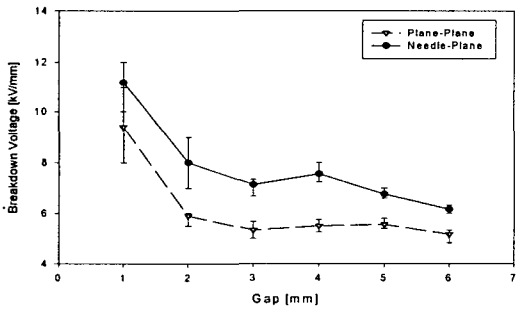
이러한 Bubble들은 전극의 최단거리 혹은 그 최단거리에 가깝게 많이 정체(정체기포)하게 되면 될 수록 Bubble에 의한 Corona가 왕성하게 발생하게 되 어 결국 상대적으로 낮은 전압에서 절연파괴로 이어지게 된다. 또한 정체기포로 Floating Force와 Gradient Force의 합력에 의하여 전극사이의 어느 위치에 정체하게 되므로 대기압하의 액체질소 중에는 정체기포가 전극최단 거리에 정체할 확률이 큰 평판대평판 전극(수직 배치)의 절연 파괴전압이 침대평판 전극(침전극 상부, 평판전극 하부)의 절연파괴 전압보다 낮게 된다.

본 연구에서 실험한 LSF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>에서 자연기

포가 발생되고 이러한 기포는 코로나 발생에 따라 더욱 증식하게 된다. 그림 4는 LSF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>의 침(上)대평판(下)과 평판대평판 전극의 절연 파괴특성을 나타내고 있다. 일반적으로 평등전계인 평판대평판 전극의 절연 파괴전압이 불평등전계인 침대평판 전극보다 높게 나타난다. 하지만 LSF<sub>6</sub>에서 갭 거리가 1[mm]일 때와 LN<sub>2</sub>에서는 불평등전계인 침(上)대평판(下) 전극의 파괴전압이 높게 나타나는 양상을 보여 주고 있다.



(a) LSF<sub>6</sub>



(b) LN<sub>2</sub>

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

그림 4 (a)는 LSF<sub>6</sub>에서 절연 파괴특성을 보여 주고있다. LSF<sub>6</sub>에서 발생된 SF<sub>6</sub> 기체 기포는 코로나 발생에 따라 더욱 증식하게 된다. 그 결과로 평판 대 평판전극이 침(上)대 평판(下)전극보다 절연 파괴 전압이 낮아지는 결과를 확인할 수 있지만, 갭이 1[mm]일 때 평판 대 평판의 절연 파괴전압이 낮고 2[mm]이상일 때 침 대 평판보다 더 높은 절연 파괴전압이 측정되었다. LSF<sub>6</sub> 하에서 생성되는 SF<sub>6</sub> 기포는 공기보다 절연 내력이 3배이고, 공기의 100배 정도의 아크 소호능

력을 가지고 있어 기체질소 보다 월등한 절연내력을 가지고 있다. SF<sub>6</sub> 기포는 LSF<sub>6</sub>하에서 일정 갭 이상시 절연내력이 기포에 의해 감소되는 현상 보여준다.

#### 4. 결론

- (1) LSF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>하에서 전극형상에 따른 절연 파괴전압도 Bubble 효과가 적용된다..
- (2) LSF<sub>6</sub> 평판대침 전극에서 절연 파괴전압은 bubble효과가 주가 되는 영역과 전계효과가 관건이 되는 영역이 존재한다.
- (3) 침(上)대평판(下), 평판(上)대침(下) 전극에서는 전극배치에 따라 기포의 정체, 후류 등에 의해 절연 파괴 전압이 달라진다.
- (4) 극저온 하에서 발생하는 자연기포에 의한 절연 파괴전압 특성은 기포 가스의 기본적인 물성에 따라 변화함을 확인하였다.
- (5) LSF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>에서 LSF<sub>6</sub>의 절연내력이 월등하다는 것을 실험을 통해 확인하였으며, 이를 통해 고온초전도체 개발에 따른 극저온 및 절연재료로서 LSF<sub>6</sub>가 사용 가능함을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] Landry, M. et al. " Dielectric withstand and breaking capacity of SF<sub>6</sub> circuit breakers at low temperatures " Power Delivery, IEEE Transactions on, pp. 1029~1035, July 1988
- [2] Gong Guoli et al, " The influence of SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> dissociating products on the electrical performance of several insulating varnishes ", Electrical Insulating Materials, pp. 495~497, 1995
- [3] T.Ueda et al, " Discrimination of Partial Discharge Electromagnetic Signal in SF<sub>6</sub> 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(LN<sub>2</sub>)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 SF<sub>6</sub> Atmosphere", IEEE Trans, pp. 234~240, 2000
- [6] 주재현, " 액체질소중의 방전형상과 방사전자파의 특성에 관한 연구 ", 영남대학교 대학원 1997.8.
- [7] 이광식, " 액체질소 및 극저온 개스의 방전특성에 관한 연구 ", 한국전력공사, 1993.8.
- [8] 박경태, " 온도변화에 따른 SF<sub>6</sub>의 방전 및 방사전자파 특성 ", 영남대학교 대학원, 2002.12.
- [9] 이광식 외 4명, " SF<sub>6</sub> 가스의 온도변화에 따른 절연 특성 " 대한전기학회 논문지 Vol 52C No 8, 2003.8
- [10] Frank M. White, " Fluid Mechanics ", McGraw-Hill, 1995.8.