

## 액체 SF<sub>6</sub>의 기포발생과 거동에 따른 절연파괴특성

( The Discharge Characteristics through the Bubble Production & Motion in Liquid SF<sub>6</sub> )

최은혁·최상태\*·박원주·김이국\*\*·이광식

( Eun-Hyuck Choi · Sang-Tae Choi · Won-Zoo Park · Lee-Kook Kim · Kwang-Sik Lee )

영남대학교, \*경주대학교, \*\*경일대학교

### Abstract

In this paper the experiments of breakdown characteristics SF<sub>6</sub> liquid (LSF<sub>6</sub>) in model GIS(Gas Insulated Switchgear) were described. From the experiments results, The ability of LSF<sub>6</sub> insulation is higher than high-pressurized SF<sub>6</sub> gas. The breakdown characteristics of LSF<sub>6</sub> were produced by bubble formed evaporation of LSF<sub>6</sub> and bubble caused by high electric emission. It is considered in this paper that the results are fundamental data for electric insulation design of superconductor and cryogenic equipments machinery which will be studied and developed in the future.

### 1. 서론

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

현대사회가 첨단과학의 이기를 갈망함에 따라 현재보다 더 많은 전력에너지를 필요함과 동시에 도시의 공간 활용의 효율성 측면에서 전력기기들의 소형화 및 고 신뢰화가 시도되고 있다. 또한, SF<sub>6</sub> 가스 적용 변전기기는 공급범위가 확대되어, 혹한 지역에 설치가 되고 있는 데, 이 경우 온도저하에 따라 액화현상으로 절연특성의 큰 변화를 가져옴으로서 오동작 현상이 큰 문제점으로 지적되고 있다.

또한, SF<sub>6</sub> 가스의 온난화 계수가 이산화탄소의 23,000배로 대기 중으로 방출될 경우에 온실효과 문제를 야기 시켜 세계적으로 "Kyoto Protocol"에 의해 규제를 가하고 있는 실정이다. 하지만 현실적으로 SF<sub>6</sub> 가스를 대체할 수 있는 물질은 없는 상태에서 SF<sub>6</sub>의 전력기기의 소형화, SF<sub>6</sub>의 안전성을 확보가 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 SF<sub>6</sub>를 액화시켜 기존의 SF<sub>6</sub> 가스와 액체 SF<sub>6</sub>(LSF<sub>6</sub>)의 절연파괴특성을 측정 / 분석하여 SF<sub>6</sub>의 대체물질로 LSF<sub>6</sub>의 가능성을 검토하고, 혹한 지역에 있는 전력설비의 온도저하에 따른 LSF<sub>6</sub>를 구명함으로써 각종 고온초전도 및 극저온 응용 설비의 절연설계에 기초 자료를 제공하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험용 챔버의 외관은 사진 1-(a)과 같고 이것은 SF<sub>6</sub>의 방전 특성을 연구하기 위해 설계·제작한 챔버이다. 최대 인가전압은 AC 300[kV]까지 인가 가능하다. 사진 1-(b)와 같이 전원은 DY-106 (AC 300[kV] / 120[mA])을 사용하였다. 실험용 챔버 내부온도를 관측하기 위하여 온도센서(UNICON, -90[°C]~90[°C])를 실험용 챔버 내부 중심부에 전극부와 평행하게 전극 수직 중심축과 8[cm] 떨어진 곳에 설치하였다. 실험용 챔버 내부압력을 측정하기 위해 압력계(WISE, 0~15기압)를 설치하였다. 실험용 챔버 내부를 진공펌프(SINKU KIKO Co.Ltd, GUD-050A, pumping speed 60ℓ/min)로 5×10<sup>-4</sup>[Torr]까지 진공을 유지

할 수 있으며, 열 절연을 위하여 챔버 내·외부사이에 진공층을 두었다.

실험용 챔버 내부에 설치된 온도센서와 전극부를 관측할 수 있는 관측창(직경 110[mm], 두께 20[mm])을 설치하였다. 이 관측창의 재질은 투명 아크릴이며, 원통형으로 제작 설치하였다.

실험용 챔버의 주요 사양은 압력 변화(2~6[atm])를 위해 안전상 10기압 정도의 가압이 가능하고 압력 유지를 위해 실험용 챔버 내의 기밀성 유지가 가능하다. 또한 온도변화(90~-90℃) 및 유지가 가능하고 높은 절연성을 가진 SF<sub>6</sub> 가스의 절연내력 시험을 위해 300[kV]까지 고압인가를 할 수 있도록 절연설계가 되어있다.

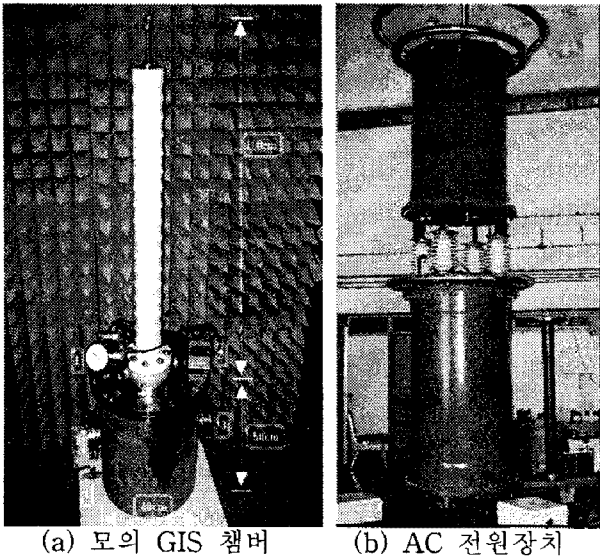


사진 1. 실험용 모의 GIS 챔버, AC 300[kV] 전원장치

본 연구에 사용한 전극의 재료는 스테인레스 스틸을 사용하였다. 사용된 전극 형태의 종류는 Plane-Needle 전극 (Plane ; 상부, Needle; 하부, P-N), N-P 및 P-P 전극을 사용하였다. 전극의 배치는 수직 배치하였으며, 전극은 스테인레스 스틸을 사용하여 평판전극(직경 59[mm])과 침전극(직경 5[mm], 침단각도 20°)을 제작하였다. 전극간 거리(d)는 Micrometer로 외부에서 조정 (정도 :  $5 \times 10^{-2}$ [mm]) 가능한 구조이다.

## 2.2. 실험방법

LSF<sub>6</sub>에 관한 실험은 모의 GIS 내부를 진공

( $5 \times 10^{-4}$ [torr])으로 한 후 SF<sub>6</sub> gas를 4기압 주입시킨 상태에서 Dry-ice를 모의 GIS 상부에 접촉시켜 온도를 하강시켰다. 온도 센서부의 온도가 0~-10[℃]에서 SF<sub>6</sub> gas의 액화가 진행되면 전극이 함침 될 때까지 SF<sub>6</sub> gas를 일정 속도로 주입하여 전극부를 모두 LSF<sub>6</sub>에 함침되게 하였다. 이 때 사용된 전극은 N-P, P-N 및 P-P를 사용하였으며, 전극형상에 따른 각 d에서 절연과괴전압(V<sub>B</sub>)을 측정하였다. 전극의 배치는 수직배치이며 각 전극에서 d의 변화에 따른 실험이 끝나면 전극과 SF<sub>6</sub>을 교체하여 같은 방법으로 실험을 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. N-P와 P-N의 기포현상

본 연구에서 사용된 실험용 모의 GIS 챔버는 열 절연을 위하여 챔버 내·외부사이에 진공층을 두었지만, 일정 압력하의 LSF<sub>6</sub> 에서 기포가 발생되고 이러한 기포는 코로나발생에 따라 더욱 증식하게 된다. 이러한 기포는 상승하면서 수직으로 배치된 전극에 의해 기포의 흐름은 경계로부터 “분리되어” 그 영역에서는 재순환 형태가 발생한다. 이러한 현상을 유선분리(Separation)라 하는데 이러한 현상은 평판에서 더욱 잘 일어난다.

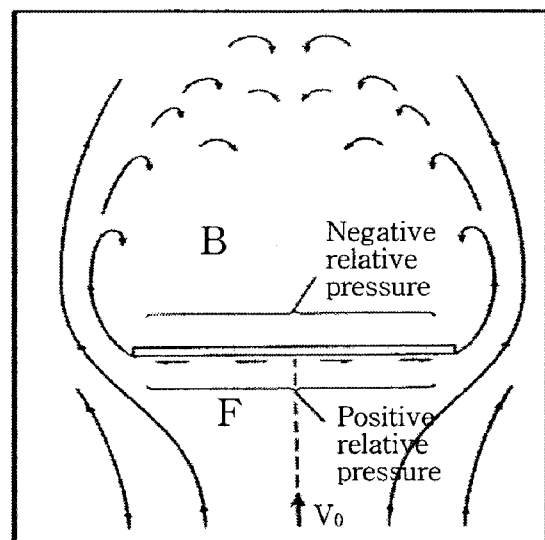
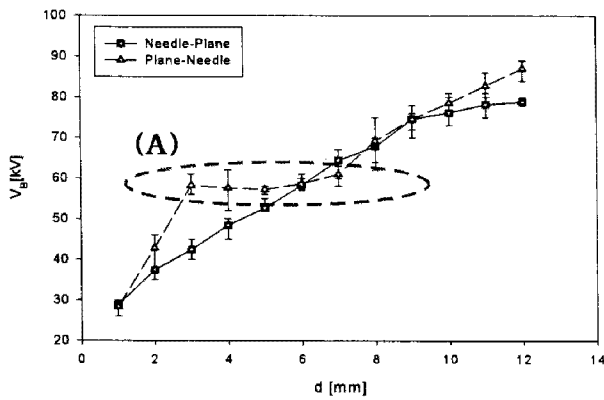


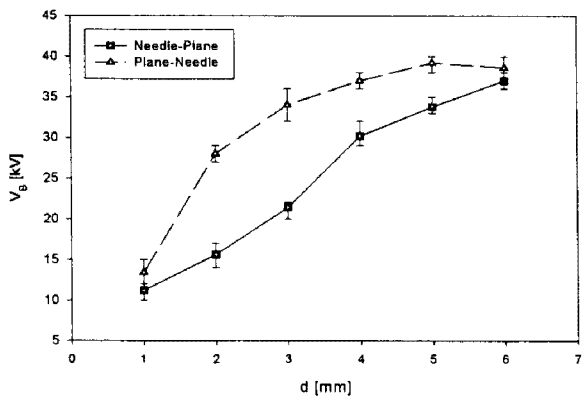
그림 1. 평판을 지나는 기포흐름

유선분리에 따른 압력과 점성력이 항력에 미치는 상대적 효과를 살펴보면 아래의 그림 1과 같이 흐름에 수직으로 놓인 경우에는 압력과 점성력이

모두 평판에 작용한다. 그러나 점성력은 세로방향으로 작용하며, 또한 평판의 중간점에 대하여 대칭을 이룬다. 따라서 점성력은 평판의 양력이나 항력에 직접적으로 기여하지 않는다. LSF<sub>6</sub>에서 자체하중에 의하여 그림과 같이 기포의 이동에 대해 판의 상류측 면(F)과 하류측 면(B)에서의 압력의 차이가 발생하여 상류측 면(F)의 압력이 상대적으로 높게 된다



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



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

그림 2. N-P과 P-N의 절연파괴특성 비교

그림 2는 LSF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>에서 N-P와 P-N의 절연 파괴전압을 비교한 것이다. LSF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>의 N-P는 d-V<sub>B</sub>가 거의 선형적으로 상승한다. 반면, d가 변화함에 따라 V<sub>B</sub>가 LN<sub>2</sub>와 대조적으로 LSF<sub>6</sub>의 P-N에서는 포화되는 구간 (A)영역이 존재한다. 이는 같은 전극을 사용한 그림 2의 두 실험에서 P-N에서는 아래에서 상승한 기포의 진행방향과 수평으로 위치해 있는 평판 전극에 상부로 상승한 기포가 충돌함에 따라 유선분리 되어 기포는 전극의

표면을 따라 이동하며, 전극표면에 닿아 존재하는 기포는 전극하부에 부착되면서 평판전극의 가장자리로 이동하게 된다. 이러한 과정에서 상승한 자연 기포와 코로나에 의하여 발생된 기포가 서로 만나 큰 기포로 된 후 그림 1의 F면, 즉 상부 평판전극 하부에 기포층을 형성하게 된다. 그 후 그림1의 B 영역은 상대적으로 F영역보다 압력이 낮으므로 평판전극하부 가장자리부분에 존재한 기포층의 일부는 상부로 이동하게 되며 이때는 유선분리 현상이 나타나며 그 속도 또한 상대적으로 빠름을 알 수 있다. 또한 LN<sub>2</sub>와 달리 LSF<sub>6</sub>에서 발생하는 기포는 아크 소호능력이 극히 우수하므로 자연기포 또는 코로나에 의한 기포가 발생하나 그 기포에서 아크의 발생은 빠르게 소호되어 기포현상이 LSF<sub>6</sub>에서는 LN<sub>2</sub>와 달리 상대적으로 크게 약화되는 현상이 나타난다. 즉 LSF<sub>6</sub>의 포화구간은 갭이 증가함에 따라 평판의 F면에 형성되는 SF<sub>6</sub> 기포가 LSF<sub>6</sub>와 복합유전체를 형성하여 전압이 감소하는 현상과 갭이 증가함에 따라 V<sub>B</sub>의 상승값이 서로 작용하여 일정 파괴전압을 이루게 된다.

### 3.2. P-P 전극의 기포현상과 절연파괴특성

그림 3은 LSF<sub>6</sub>내 P-P전극에서 연속 5회 각 갭의 절연파괴전압을 측정된 값 중 2번째와 4번째 갭 변화에 따른 절연파괴특성을 나타내고 있다. 그림과 같이 갭이 1[mm]에서는 횡수에 따른 V<sub>B</sub>의 값이 유사하게 나타난다. 갭이 증가에 따라 기포가 유선분리에 의하여 전극사이에 존재할 경우가 많아지면 그림과 같이 갭변화에 따른 V<sub>B</sub>의 값이 달라짐을 확인하였다. 이러한 현상은 전극과 전극사이에 존재하는 SF<sub>6</sub> 기포가 LSF<sub>6</sub> 보다 상대적으로 절연성이 떨어져 전극사이에 절연물사이에 보이드와 같은 역할을 한다. 아래에서 위로 상승하는 기포가 상부 평판전극의 중심부에서 가장자리로 표면을 따라 이동하여 상부로 상승할 때 절연파괴의 원인이 되는 전자를 부성기체로 전자친화력이 강한 SF<sub>6</sub>가 소호하여 전극의 가장자리로 이동 후 챔버의 상부로 이동하게 된다. 이러한 현상으로 인하여 절연파괴전압은 상대적으로 상승하는 것으로

사려된다.

(AC 110[kV])

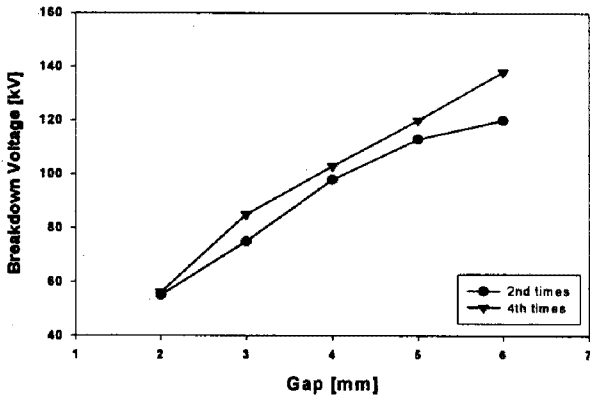


그림 3 P-P전극에서 측정 횟수에 따른 절연파괴특성

LSF<sub>6</sub> 내 평판대평판 전극에서는 그림 4-(a)와 같이 최초 전압 인가시 전극주위로 챔버 아래에서 위로 자연기포들이 이동하는 것을 확인하였다. 전압인가에 따라 코로나열에 의한 기포가 증식하고 기포이동 속도가 서서히 증가하였으며, 상승하는 기포가 그림 4-(b)와 같이 전극사이로 약간씩 휘어들어가는 현상을 관찰하였다. 기포의 발생량이 점차 증가하여 그림 4-(c)와 같이 상부에 있는 전극의 표면을 따라 이동하였다.

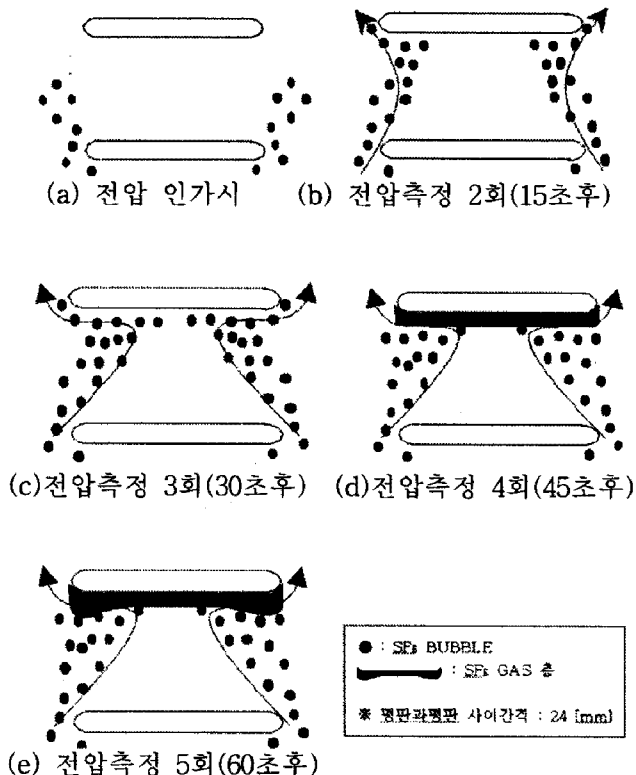


그림 4. 전압인가에 따른 기포거동현상

시간이 지나면서 상부 평판전극 하부표면을 따라 이동하는 기포의 양이 많아지면서 상부 평판전극 하부표면, 즉 하부 평판전극 경계면 근처에서는 점성저항에 의하여 비회전류흐름으로서의 속도보다 줄어들게 된다. 상부 평판전극의 하부에 존재하는 기포의 속도는 0에 가깝게 되어 정체기포로 나타나게 된다. 그리고 아래에서 유입되는 기포와 정체기포가 적층하여 SF<sub>6</sub>의 막을 형성함을 그림 4-(d)와 같이 확인하였다.

기포의 양이 최대로 발생되면 기포의 상승속도 또한 최대가 된다. 따라서 상부 평판전극의 기포 막은 전극의 가장자리가 중심부 보다 두터워 지는 형상을 확인(그림 4-(e))하였다. 즉 전극사이에 LSF<sub>6</sub>와 SF<sub>6</sub> 가스두개의 복합유전체로 이루어지는 형상이 나타나게 된다.

#### 4. 결 론

본 논문은 AC 고전압을 사용하여 액화 SF<sub>6</sub>의 전극형상별 기포거동에 따른 절연파괴전압과 특성을 구명하였다.

LSF<sub>6</sub>내의 기포발생, 정체 및 운동은 전극형상, 전압에 따른 코로나, 전극의 배치 및 크기에 의존하며, 기포현상에 따라 절연파괴특성이 달라짐을 확인하였다.

1) LSF<sub>6</sub>와 LN<sub>2</sub>의 N-P는 d-V<sub>B</sub>특성이 거의 선형적으로 상승한다. 반면, d가 증가함에 따라 V<sub>B</sub>가 LN<sub>2</sub>와 대조적으로 LSF<sub>6</sub>의 P-N에서는 포화되는 구간이 존재한다.

2) LSF<sub>6</sub>의 P-N에서는 코로나발생에 따라 전극사이의 정체기포의 적층현상을 확인하였으며, 이러한 현상은 전극사이에 LSF<sub>6</sub>와 SF<sub>6</sub> 가스층이 형성되어 고체절연물의 복합유전체 형태가 나타난다. 그 결과 같은 갭에서 복합유전체 형성된 전극의 절연파괴전압이 높은 구간도 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [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 SF<sub>x</sub> 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 가스의 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.
- [11] 이광식 외 4명, "SF<sub>6</sub>와 액체 질소의 절연파괴특성과 正氣泡現象", Vol 54C No 8, 2005.8