

# 액체 SF<sub>6</sub>중 기포거동과 절연파괴특성에 관한 연구

( The discharge characteristics and the Bubble Motion in Liquid SF<sub>6</sub> )

최은혁·박광서\*·최상태\*\*·김이국\*·윤병한·이광식

( Eun-Hyuck Choi · Kwang-Seo Park · Sang-Tae Choi · Lee-Kook Kim · Bung-Han Yoon · Kwang-Sik Lee )

영남대학교, \*경일대학교, \*\*경주대학교

## Abstract

현재 전력설비에 사용되고 있는 SF<sub>6</sub> 가스는 절연 및 소호성능이 우수하고 회복특성이 뛰어나기 때문에 각종 전력기기의 절연매체로서 널리 사용되고 있다. 하지만 산업사회의 발달로 인하여 도시의 공간 활용의 효율성 측면에서 전력기기의 소형화, 지중화 및 고 신뢰화가 시도되고 있으며, 또한 온실가스에 대한 규제로서 "도쿄 의정서"가 정식 발효됨에 따라 환경문제로 인하여 전력설비의 SF<sub>6</sub> 가스의 유출 최소화, 대체 절연물질 개발 등의 친환경 재료의 개발이 새롭게 대두되고 있다.

따라서, 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 지역에서 운용되고 있는 SF<sub>6</sub> 이용 전력설비의 온도저하에 따른 문제점을 구명하였다.

## 1. 서 론

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 전력기기의 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 60 l/min)로  $5 \times 10^{-4}$  [Torr]까지 진공을 유지할 수 있으며, 열 절연을 위하여 챔버 내·외부 사이에 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~ $-90^{\circ}\text{C}$ ) 및 유지가 가능하고 높은 절연성을 가진 SF<sub>6</sub> 가스의 절연내력 시험을 위해 300[kV]까지 고압인가를 할 수 있도록 절연설계가 되어있다.

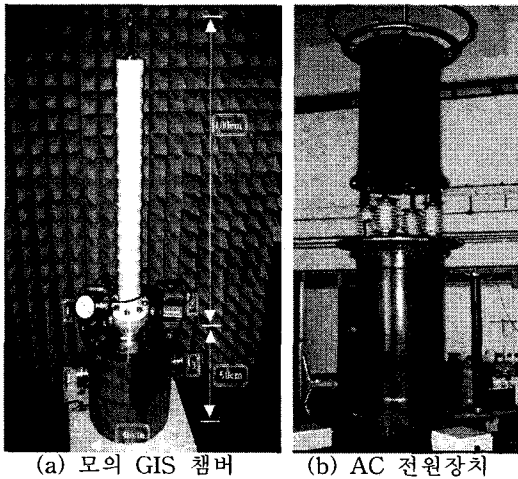


사진 1. 실험용 모의 GIS 챔버, AC 300[kV] 전원장치

본 연구에 사용한 전극의 재료는 스테인레스 스틸을 사용하였다. 사용된 전극 형태의 종류는 Plane-Needle 전극 (Plane ; 상부, Needle; 하부, P-N), N-P 및 Sphere-Plane 전극 (Sphere ; 상부, Plane; 하부, S-P)을 사용하였다. 전극의 배치는 수직 배치하였으며, 전극은 스테인레스 스틸을 사용하여 구전극(직경 41[mm]), 평판전극(직경 59[mm])과 침전극(직경 5[mm], 침단각도 20 $^{\circ}$ )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~ $-10^{\circ}\text{C}$ 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 S-P를 사용하였으며, 전극형상에 따른 각 d에서 절연파괴전압(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. 또한 N-P에서 d=6[mm]의 bubble 현상을 관측하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. LSF<sub>6</sub>의 절연파괴특성

각종 전극을 LSF<sub>6</sub>에 함침시킨 경우의 d의 변화에 따른 AC V<sub>B</sub> 특성을 그림 1에 나타내었다. 그림과 같이 각 전극형상에 대하여 전극간 거리에 따라 V<sub>B</sub> 변화율은 상이하지만, 모든 전극에서 d의 증대에 따라 상승경향을 보여준다.

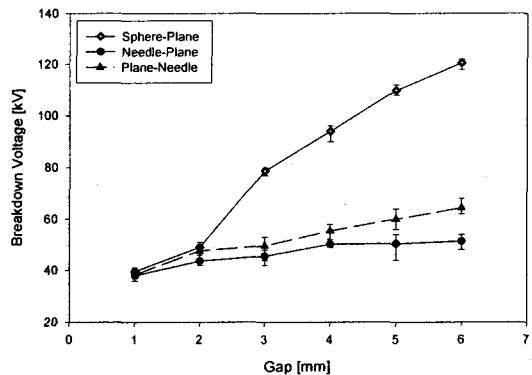


그림 2. LSF<sub>6</sub>에서 전극 형상에 따른 절연파괴특성

d가 1[mm]에서는 각 형태의 전극 V<sub>B</sub>가 거의 같게 나타난다. 이것은 단간극의 경우이므로 불평등성이 둔화되고 상대적으로 평등성이 큰 경우이기 때문이다.

또한 그림에서 S-P의 갭 증가에 따른  $V_B$ 의 증가량이 P-N과 N-P보다 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 LSF<sub>6</sub>에서 작용하는 절연 파괴 기구 중에서 전계집중에 의한 corona의 영향이 bubble의 영향보다 더 크게 작용하기 때문이다. 즉, 사용된 S전극의 직경이 41[mm]로서 d가 1~6[mm]까지 거의 준평등 전계를 형성하는 전극 구조이므로 코로나발생이 N-P, P-N 보다 상대적으로 대단히 낮기 때문에  $V_B$ 가 높게 나타나는 것이다. 또, P-N 전극구조에서 N-P 전극구조 보다  $V_B$ 가 높게 나타나는 것은 Needle 전극이 상부 즉, 전압인가부에 위치하면 plane 전극이 전압인가부에 위치 할 때 보다 corona가 더욱 왕성하게 발생하므로 P-N 전극구조의  $V_B$ 가 더 높게 나타난다.

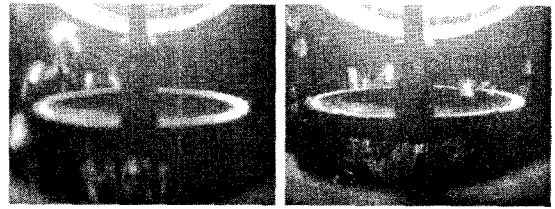
### 3.2. LSF<sub>6</sub>의 기포거동

사진 2는 P-N의 d=6[mm]일 때 AC 20[kV]를 인가시간에 따른 기포발생과 기포거동을 나타내고 있다. 유체 흐름은 일반적으로 경계로부터 “분리되어” 그 영역에서는 재순환형태가 발생한다. 이러한 현상을 유선분리라 하는데 사진 2와 같이 기포의 진행방향의 하류부에서 더욱 그러하다.

사진 2-(a)는 전압인가 전의 사진으로 아래로부터 상승하는 SF<sub>6</sub> 자연기포는 침전극 표면을 따라 상승하고 있다. 사진 2-(b)는 전압인가 직후의 기포의 유선분리 현상을 나타내고 있다. 이 경우는 침단의 코로나로 인한 열로 인해 그림과 같이 부채꼴 형태로 기포가 발생된다. 그리고, 사진 2-(c)와 같이 코로나가 진전됨에 따라 침전극의 옆면과 침단의 기포의 발생이 증가하였고, 코로나에 의해 발생하는 기포는 전압인가 시간이 길어짐에 따라 사진 2-(d), 2-(e)와 같이 평판전극의 위로 상승되는 기포도 점점 증가함을 확인하였다. 사진 2-(f)와 같이 기포의 양이 최대로 발생되면 기포의 상승속도 또한 최대가 된다. 일반적으로 점성 유체 흐름에서 속도는 경계면 근처에서는 점성저항에 의하여 비회전류흐름으로서의 속도보다 줄어들게 된다. 평판전극의 하부에 존재하는 기포의 속도는 0에 가깝게 되어 정체기포로 나타나게 된다. 따라서 정체된 기포는 진행방향의 뒤(평판전극하부)에 SF<sub>6</sub> 가스층을 형성하게 된다. 또한 유선분리가 발생하는 하류부에서는 유선분리면 바깥쪽의 기포는 매우 빠른 속도로 운동하고 안쪽의 기포는 상대적

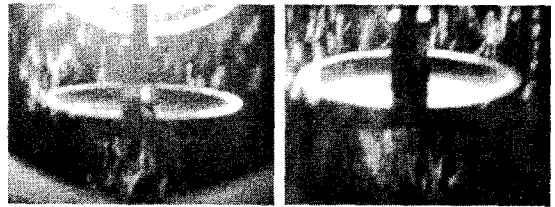
으로 느리게 운동하게 된다. 이와 같은 유선분리면에서의 높은 속도구배는 소용돌이 현상을 발생하게 되는데, 이것은 기포가 가장 활발히 발생하고 있는 사진 2-(f)의 평판 뒷면으로 기포의 와류를 명확히 확인할 수 있다.

전압을 차단시키면 코로나의 발생이 급격히 감소되어 침전극 부근으로부터 기포의 발생이 줄면서 기포가 상승하는 속도도 크게 줄어들게 되는 것을 사진 2의 (g), (h)에서 확인하였다.



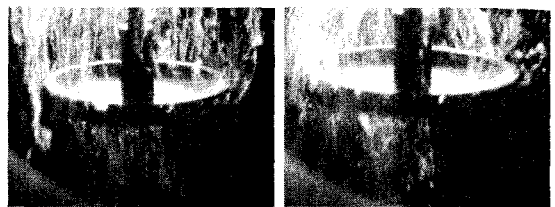
(a) 전압인가 전

(b) 전압인가 직후



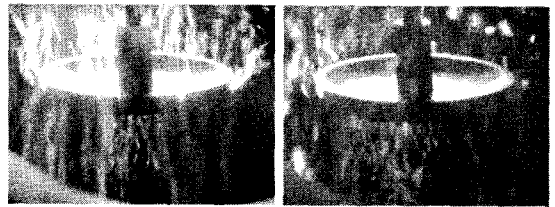
(c) 전압인가 30초후

(d) 전압인가 60초후



(e) 전압인가 90초후

(f) 전압인가 120초후



(g) 전압차단 직후

(h) 전압차단 30초후

사진 2. 기포의 발생과 유선분리현상  
( N-P, d=6[mm], 인가전압 20[kV] )

### 4. 결 론

본 논문은 AC 고전압을 사용하여 액화 SF<sub>6</sub>의

절연과피특성과 기포거동을 측정/분석 하였다.

- 1) 전극형상, 전극배치, 기포의 발생과 운동, 매체의 아크소호능력과 Corona 발생난이도 및 극간거리 등에 의해 절연과피 특성이 결정된다.
- 2) 액화 SF<sub>6</sub>의 기포의 발생 및 유선분리현상을 확인하였다.
- 3) 액화 SF<sub>6</sub>는 SF<sub>6</sub> Gas(6[atm])보다 약 2배정도의 절연특성이 우수함을 확인하였다.
- 4) 고온초전도체 개발에 따른 저온냉매 및 절연재료로서 LSF<sub>6</sub>가 사용 가능함을 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 방사전자과의 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 방사전자과 특성 ", 영남대학교 대학원, 2002.12.
- [9] 이광식 외 4명, " SF<sub>6</sub> 가스의 온도변화에 따른 절연특성 " 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 절연과피특성과 正氣泡現象", Vol 54C No 8, 2005.8