

(-)전압 인가시 액체 SF<sub>6</sub>의 전극형상에 따른 절연파괴특성

최은혁, 박광서\*, 김이국\*, 이광식, 도대호\*\*, 김중환\*\*\*  
영남대학교, 경일대학교\*, 포항 1대학\*\*, 경북교육청\*\*\*

The discharge characteristics for various electrode shapes under negative high-voltage in Liquid SF<sub>6</sub>

Eun-Hyuck Choi·Kwang-Seo Park·Lee-Kook Kim·Kwang-Sik Lee·Dae-Ho Do\*\*·Jong-Whan Kim\*\*\*  
Yeungnam Univ.·Kyungil Univ.·Pohang College.\*\*·Gyeongsangbuk-do Office of Education\*\*\*

**Abstract** - In this paper the experiments of insulation characteristics by temperature change of SF<sub>6</sub> gas and liquid SF<sub>6</sub> in model GIS(Gas Insulated Switchgear) were described. From this results, the breakdown voltage was increased with a drop of temperature and an increase of the inner pressure in model 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 caused by high electric emission.

It is considered that these result are fundamental data for electric insulation design of superconductor and cryogenic application machinery which will be studied and developed in the future.

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 절연재료로 사용하는 변전기기의 사용이 증가되고 있는 실정이며, 국·내외에서 건설 및 운용 중이다.

하지만, 현대사회가 첨단과학의 이기를 감망함에 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 설치되고 있는 데, 이 경우 온도 저하에 따라 액화현상으로 절연 특성의 큰 변화를 가져옴으로서 오동작 현상이 큰 문제점으로 지적되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 냉매로서 뿐만 아니라 절연재료로서도 성능이 우수한 액화 SF<sub>6</sub> (LSF<sub>6</sub>)와 기존에 극저온 가스로 연구되고 있는 대기압하의 액화 질소의 기본적인 절연파괴특성을 비교분석하여 송배전 전력기기들의 소형화 및 신뢰도 분야 연구에 있어 기초 자료로 제공할 뿐만 아니라, SF<sub>6</sub>가스 절연 전력설비의 설계에도 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험용 모의 GIS 챔버의 외관은 사진 1과 같고 이것은 SF<sub>6</sub>의 방전 특성을 연구하기 위해 설계·제작한 챔버이다. 최대 인가전압은 DC 150[kV]까지 인가 가능하다. 전원은 Pulse Electronic Eng. Tokyo ; HDV-300 KIV-N을 사용하였다. 실험용 모의 GIS 챔버 내부온도를 관측하기 위하여 온도센서(UNICON, -50[℃]-50[℃])를 실험용 모의 GIS 챔버 내부 중심부에 전극부와 평행하게 전극 수직 중심축과 8[mm] 떨어진 곳에 설치하였다. 실험용 모의 GIS 챔버 내부압력을 측정하기 위해 압력계(WISE, 0-15기압)를 설치하였다. 실험용 모의 GIS 챔버 내부를 진공펌프 (SINKU KIKO Co.Ltd, GUD-050A, pumping speed 60l/min)로 5×10<sup>4</sup>[Torr]까지 진공을 유지할 수 있으며, 열 절연을 위하여 챔버 내·외부사이에 진공층을 두었다.

실험용 모의 GIS 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.



사진 1. 실험용 모의 GIS 챔버

본 연구에 사용한 전극의 재료는 스테인레스 스틸을 사용하였다. 사용된 전극 형상의 종류는 Plane-Needle전극 (Plane ; 상부, Needle; 하부, P-N), N-P, Sphere-Plane전극 (Sphere ; 상부, Plane; 하부, S-P) 및 P-P을 사용하였다. 전극의 배치는 수직 배치하였으며, 전극간 거리(d[mm])는 Micrometer로 외부에서 조정 (정도 : 5×10<sup>2</sup>[mm]) 가능한 구조이다.

실험용 모의 GIS 챔버의 주요 사양은 압력 변화(2~6[atm])를 위해 안전상 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]까지 고압인가를 할 수 있도록 절연설계가 되어 있다.

전극은 스테인레스 스틸을 사용하여 구전극(직경 41[mm]), 평판전극(직경 59[mm])과 침전극(직경 5[mm], 침단각도 20°)을 제작하였다.

## 2.2 실험방법

LSF<sub>6</sub>에 관한 실험은 챔버 내부를 진공(10<sup>-4</sup>[torr])으로 한 후 SF<sub>6</sub> gas를 4기압 주입시킨 상태에서 Dry-ice를 챔버 상부에 접촉시켜 온도를 하강시켰다. 온도 센서부의 온도가 -20~-30[℃]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, S-P 및 P-P를 사용하였으며, d[mm]는 1~5[mm]까지 변화시켜 각 d에서 절연파괴 전압(V<sub>B</sub>)을 측정하였다. 절연파괴 측정시의 전압은 상승속도 1[kV/s]로 하였다. 부정현상을 없애기 위해 처음 10번 정도 방전시킨 후 절연파괴 전압값을 측정하였다. 전극의 배치는 수직배치이며 각 전극에서 d의 변화에 따른 실험이 끝나면 전극과 SF<sub>6</sub>을 교체하여 같은 방법으로 실험을 수행하였다. 각 d에서 bubble 현상을 관측하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 LSF<sub>6</sub>의 V<sub>B</sub>특성

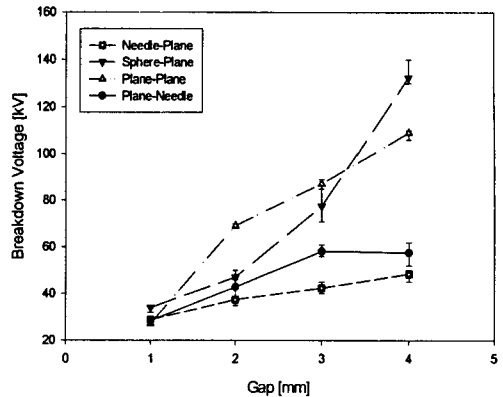
LSF<sub>6</sub>가 침전극 주위를 둘러싸는 경우 V<sub>B</sub>은 크게 상승함에 착안하여 각종 전극을 LSF<sub>6</sub>에 함침시킨 경우의 d의 변화에 따른 V<sub>B</sub> 특성을 그림 2에 나타내었다. 그림과 같이 각 전극형상에 대하여 전극변화에 따른 V<sub>B</sub> 변화율은 상이하지만, 모든 전극에서 d의 증대에 따라 상승경향을 보여준다.

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 준평등 전계 형성 전극인 S-P와 P-P 전극에서의 절연파괴 값은 표 1과 같다.

표 1. LSF<sub>6</sub>에서 S-P와 P-P의 절연파괴전압

d [mm]	1	2	3	4
S-P [kV]	34.0	48.0	81.0	130.0
P-P [kV]	27.2	69.2	87.2	109.0
평균 [kV]	30.6	58.6	84.1	119.5

S-P 및 P-P의 경우는 P-N 및 N-P에 비하여 d의 증



대에 따라 더욱더 높게 나타나는데 이것은 P-P 및 S-P는 본 연구의 d범위에서는 평등성을 크게 유지하므로 불평등성이 큰 P-N과 N-P보다 높게 나타나게 된다.

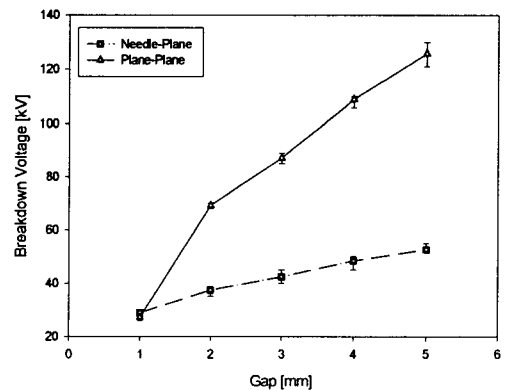
여기서 d가 4[mm]에서는 S-P가 P-P보다 높게 되는 것은 S-P 및 P-P의 평등성은 비슷하나 Bubble 효과가 P-P의 경우가 더 크게 작용함에 기인한다고 판단된다.

P-N과 N-P의 관계를 보면 P-N이 높게 나타나는데 이는 Plane전극이 (-)일 경우, 즉 P-N의 경우가 Corona 방전이 어렵게 발생하는 전극구조이며, Bubble이 P-N의 경우가 N-P보다 전극 최단거리 및 전극 내에 놓일 확률이 크지만 LSF<sub>6</sub>의 Bubble은 SF<sub>6</sub> 가스이므로 소호능력이 극히 왕성하여 상대적으로 (-)전극의 침예성이 상대적으로 크게 낮은 P-N은 Corona가 발생하기 어렵게 되어 V<sub>B</sub>가 높게 나타나게 되는 것이다.

### 3.2 LSF<sub>6</sub>의 正氣泡現象

본 논문의 연구조건은 LSF<sub>6</sub>에서 자연기포가 발생되고 이러한 기포는 코로나 발생에 따라 더욱 증식하게 된다. 그림 3은 N-P와 P-P 전극의 V<sub>B</sub>특성 곡선이다. d가 증대됨에 따라 V<sub>B</sub>는 N-P, P-P전극에 있어서 모두 상승하게 되며, 특히 P-P인 경우가 상승률이 크게 나타난다.

그림 3 LSF<sub>6</sub>에서 N-P와 P-P의 절연파괴특성 비교



LSF<sub>6</sub>에서 d가 증대됨에 따라 V<sub>B</sub>의 편차가 점점 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. LSF<sub>6</sub>는 아크소호능력이 극히 우수하므로 Bubble 현상에 따른 절연파괴 기구보다 (-)전극 형상에 따른 Corona 발생 난이도가 절연파괴원인의 관건이 되는 결과에 기인한다. 즉, (-)전극이 평판인 P-P는

Corona 발생이 극히 어려운 전극형태이므로 Bubble 현상을 상쇄시키고 Corona 기구가 관건이 되어 작용하는 결과로 나타나므로 LSF<sub>6</sub>에서는 P-P의 경우가 N-P보다 V<sub>B</sub>전압이 더 높게 나타나게 된다.

이 현상은 “ 저기압 하의 LN<sub>2</sub>의 Bubble 현상”<sup>[4]</sup>과 달리 정반대의 현상으로 나타나므로 이 현상을 필자들은 正氣泡現象(Positive Bubble Effect)이라 명명하게 되었다.

이렇게 LSF<sub>6</sub>에서 正氣泡現象이 나타나게 되는 것을 기포 발생 및 운동성을 함께 고려하면 다음과 같이 정의 가능하다.

- 1) 본 연구의 결과 LSF<sub>6</sub>의 액화온도는 -20~-30℃정도 이나 LN<sub>2</sub>는 -190℃정도이므로 챔버 내의 온도차가 크고 기화온도가 낮은 LN<sub>2</sub>의 경우가 기포발생이 왕성하며 그 운동성은 LSF<sub>6</sub> 경우 보다 더욱 활발함을 확인하였다.
- 2) 아크 소호능력이 LSF<sub>6</sub>가 LN<sub>2</sub> 보다 극히 우수하므로 자연기포 또는 Corona에 의한 bubble이 발생하나 그 기포에서 아크의 발생은 빠르게 소호되므로 bubble 현상이 LSF<sub>6</sub>에서는 LN<sub>2</sub>와 달리 상대적으로 크게 약화됨.
- 3) 앞의 1), 2)의 결과로 전극내 기포의 존재 확률이 LSF<sub>6</sub>의 경우가 LN<sub>2</sub>에 비하여 극히 낮다.
- 4) 위의 1), 2), 3)의 결과 LSF<sub>6</sub>의 경우는 전극내의 기포현상에 따른 방전기구 보다 (-)전극을 평판으로 한 P-P에 따른 Corona 발생이 상대적으로 크게 어려운 P-P의 V<sub>B</sub>가 N-P의 V<sub>B</sub>보다 더 높게 나타나게 되는 것이다. 즉, Bubble 현상에 의한 방전기구보다 전극형상이 원인이 되는 Corona 방전기구에 따른 절연파괴 기구가 관건이 되는 현상으로 볼 수 있다. 그 결과 표 2와 같이 d=1[mm]일 경우에 큰차이가 없으나 d=5[mm]일때는 P-P 전극의 경우가 72.4[kV] 더 높은 결과를 보인다.

표 2. LSF<sub>6</sub>에서 P-P와 N-P의 절연파괴전압

#### 4. 결 론

본 논문은 (-) 고전압을 사용하고 전극모양 및 전극간 거리에 따른 액체 SF<sub>6</sub>의 bubble 현상의 비교 분석 등에

d[mm]	1	2	3	4	5
P-P[kV]	27.2	69.0	87.2	109.0	125.8
N-P[kV]	29.0	37.4	42.4	48.4	52.6
차 이	-1.8	31.6	44.8	60.6	72.4

관한 연구로 요약 기술하면 다음과 같다.

- 1) 정극형상, 기포의 발생 및 운동, 매체의 아크소호능력, (-)전극의 Corona 발생난이도 및 극간거리 등에 의해 절연파괴 특성이 결정된다.
- 2) 고온 초전도체 개발에 따른 극저온 및 절연재료로서 LSF<sub>6</sub>가 사용 가능함을 확인하였다.
- 3) LSF<sub>6</sub>의 절연파괴 전위경도는 S-P 전극에서는 34

[kV/mm], P-P 전극에서는 27.2 [kV/mm]임으로 평균 30.6 [kV/mm]로 나타났다.

- 4) LSF<sub>6</sub>의 N-P와 P-P의 V<sub>B</sub> 차이는 표 2과 같이 평균 42[kV]의 차이를 보인다.
- 5) LSF<sub>6</sub>에서는 正氣泡現象이 나타난다.
- 5) 본 연구의 결과를 보면 초전도 및 극저온 설비분야에 냉매로 이용할 경우 저온영역의 입출구의 도체에 사용할 수 있는 열절연성 도체의 개발이 절실히 요구된다.

앞으로 (+) 직류전압 및 AC전원에 의한 연구를 보완하고 장래에 이 연구결과를 응용 보완하면 고온 초전도 설비, 저온기기 및 케이블 등의 대체 절연물로 사용하여 소형화 및 고 신뢰도 문제 해결의 응용한 자료로 이용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 (재)기초전력연구원(과제번호 : R-2004-B-203)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### [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, 1958.