

LSF₆의 교류 및 직류전압에 대한 절연특성연구

최은혁, 박광서*, 임창호, 김이국*, 이광식
영남대학교, 경일대학교*

The breakdown characteristics in LSF₆ for AC&DC voltage

Eun-Hyuck Choi · Kwang-Seo Park* · Chang-Ho Lim·Lee-Kook Kim* · Kwang-Sik Lee
Yeungnam Univ. · Kyungil Univ.*

Abstract - In this paper the experiments of breakdown characteristics SF₆ liquid (LSF₆) in model GIS(Gas Insulated Switchgear) were described. From the experiments results, The ability of LSF₆ insulation is higher than high-pressurized SF₆ gas. The breakdown characteristics of LSF₆ were produced by bubble formed evaporation of LSF₆ 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. 서 론

산업사회의 발달과 더불어 신뢰성 높은 양질의 전기에너지와 운전 및 보수 간의 간편화, 계통 운용의 신뢰성, 안전성 확보가 요구되고 있다. 이에 따라 절연 특성이 매우 우수한 고압의 SF₆가스를 절연체로 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, SF₆ 가스 적용 변전기기는 공급범위가 확대되어, 혹한 지역에 설치되고 있는데, 이 경우 온도 저하에 따라 액화현상으로 절연특성의 큰 변화를 가져오므로서 오동작 현상이 큰 문제점으로 지적되고 있다.

또한, SF₆ 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 SF₆ 가스를 대체할 수 있는 물질은 없는 상태에서 SF₆의 전력기기의 소형화, SF₆의 안전성을 확보가 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 SF₆를 액화시켜 기존의 SF₆ 가스와 액체 SF₆(LSF₆)의 절연과 파괴특성을 측정 / 분석하여 SF₆의 대체물질로 LSF₆의 가능성을 검토하고, 혹한 지역에 있는 전력설비의 온도저하에 따른 LSF₆를 구명함으로써 각종 고온초전도 및 극저온 응용 설비의 절연설계에 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

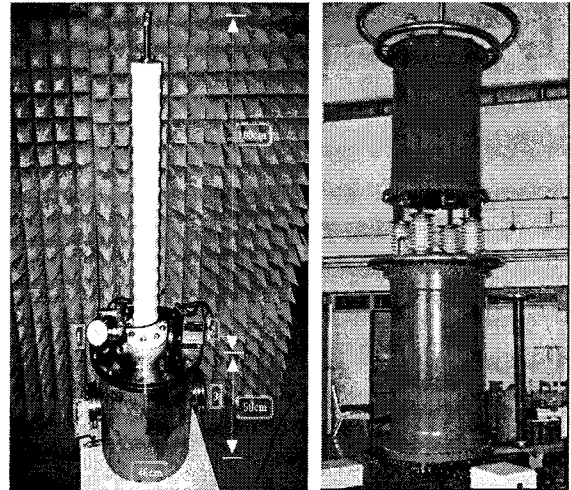
2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험용 챔버의 외관은 사진 1-(a)과 같고 이것은 SF₆의 방전 특성을 연구하기 위해 설계·제작한 챔버이다. 최대 인가전압은 AC 300[kV]까지 인가 가능하다. 전원은 DC(-)용 Pulse Electronic Eng. Tokyo ; HDV-300 KIV-N 150[kV]/1[ma]와 사진 1-(b)와 같이 전원은 DY-106 (AC 300[kV] / 120[ma])를 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 5×10⁻⁴[Torr]까지 진공을 유지할 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°C) 및 유지가 가능하고 높은 절연성을 가진 SF₆ 가스의 절연내력 시험을 위해 300[kV]까지 고압인가를 할 수 있도록 절연설계가 되어있다.

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-P를 사용하였다. 전극의 배치는 수직 배치하였으며, 전극은 스테인레스 스틸을 사용하여 구전극(직경 41[mm]), 평판전극(직경 59[mm])과 침전극(직경 5[mm], 침단각도 20°)을 제작하였다. 전극간 거리(d)는 Micrometer로 외부에서 조정 (정도 : 5×10⁻²[mm]) 가능한 구조이다.



(a) 모의 GIS 챔버

(b) AC 전원장치

〈사진 1〉 실험용 모의 GIS 챔버, AC 300[kV] 전원장치

2.2 실험방법

LSF₆에 관한 실험은 모의 GIS 내부를 진공(5×10⁻⁴[torr])으로 한 후 SF₆ gas를 4기압 주입시킨 상태에서 Dry-ice를 모의 GIS 상부에 접촉시켜 온도를 하강시켰다. 온도 센서부의 온도가 0~-10[°C]에서 SF₆ gas의 액화가 진행되면 전극이 함침 될 때까지 SF₆ gas를 일정 속도로 주입하여 전극부를 모두 LSF₆에 함침되게 하였다. 이 때 사용된 전극은 N-P, P-N 및 S-P를 사용하였으며, 전극형상에 따른 각 d에서 절연파괴전압(V_B)을 측정하였다. 전극의 배치는 수직배치이며 각 전극에서 d의 변화에 따른 실험이 끝나면 전극과 SF₆를 교체하여 같은 방법으로 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 (-)DC 전원 인가시 V_B

LSF₆가 침전극 주위를 둘러싸는 경우 V_B은 크게 상승함에 착안하여 각 중 전극을 LSF₆에 함침시킨 경우의 d의 변화에 따른 V_B 특성을 그림 1에 나타내었다. 그림과 같이 각 전극형상에 대하여 전극간 거리에 따른 V_B 변화율은 상이하지만, 모든 전극에서 d의 증대에 따라 상승경향을 보여준다.

d가 1[mm]에서는 각 형태의 전극 V_B가 거의 같게 나타난다. 이것은 단 간극의 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〉 LSF₆에서 S-P와 P-P의 절연파괴전압.

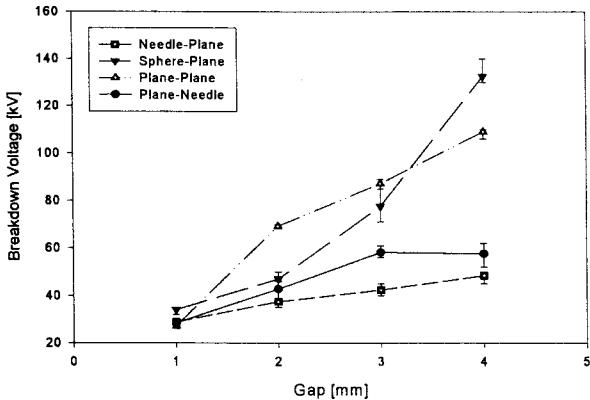
d [mm]	1	2	3	4
S-P [kV]	34.0	48.0	81.0	130.0
P-P [kV]	27.2	69.2	87.2	109.0
평균 [kV]	30.6	58.6	84.1	119.5

S-P 및 P-P의 경우는 P-N 및 N-P에 비하여 d의 증대에 따라 더욱더 높게 나타나는데 이것은 P-P 및 S-P는 본 연구의 d범위에서는 평등성을 크게 유지하므로 불평등성이 큰 P-N과 N-P보다 높게 나타나는 것이다.

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 어떻게 발생하는 전극구조이

며, Bubble이 P-N의 경우가 N-P보다 전극 최단거리 및 전극 내에 놓일 확률이 크지만 LSF₆의 Bubble은 SF₆ 가사이므로 소호능력이 극히 왕성하여 상대적으로 (-)전극의 침예성이 상대적으로 크게 낮은 P-N은 Corona가 발생하기 어렵게 되어 V_B가 높게 나타나게 되는 것이다.

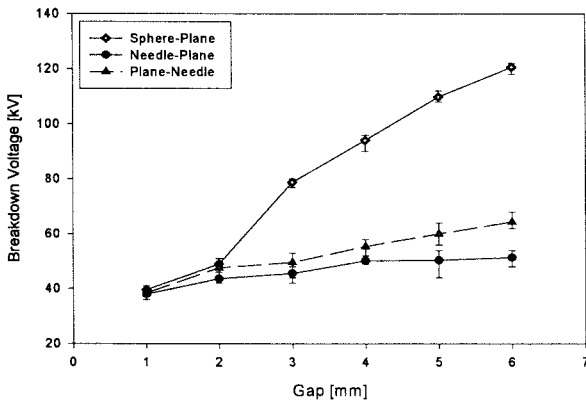


〈그림 1〉 LSF₆에서 전극 형상에 따른 절연파괴 특성((-)DC).

3.2 AC 전원 인가시 V_B

각종 전극을 LSF₆에 함침시킨 경우의 d의 변화에 따른 AC V_B 특성을 그림 2에 나타내었다. 그림과 같이 각 전극형상에 대하여 전극간 거리에 따라 V_B 변화율은 상이하지만, 모든 전극에서 d의 증대에 따라 상승경향을 보여준다.

d가 1[mm]에서는 (-)DC를 인가할 때와 같이 불평등성이 둔화되고 상대적으로 평등성이 큰 경우이기 때문에 각 형태의 전극에서 V_B가 거의 같게 나타난다. 또한 그림에서 S-P의 갭 증가에 따른 V_B의 증가량이 P-N과 N-P보다 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 LSF₆에서 작용하는 절연파괴 기구 중에서 전계집중에 의한 corona의 영향이 bubble의 영향보다 더 크게 작용하기 때문이다. 즉, 사용된 S전극의 Φ가 4[mm]로서 d가 1~6[mm]까지 거의 준평등 전계를 형성하는 전극 구조이므로 코로나발생이 N-P, P-N 보다 상대적으로 대단히 낮기 때문에 V_B가 높게 나타나는 것이다. 또, P-N 전극구조에서 N-P 전극구조 보다 V_B가 높게 나타나는 것은 Needle 전극이 상부 즉, 전압인가부에 위치하면 plane 전극이 전압인가부에 위치할 때 보다 corona가 더욱 왕성하게 발생하므로 P-N 전극구조의 V_B가 더 높게 나타난다.



〈그림 2〉 LSF₆에서 전극 형상에 따른 절연파괴 특성 (AC)

3.3 LSF₆의 Bubble 효과

그림 3은 (-)DC인가시 LSF₆와 액체질소(LN₂)의 N-P과 P-P의 d-V_B 특성을 나타내고 있다.

LSF₆의 경우 d가 1[mm]인 단점에서 V_B가 거의 같게 나타난은 단간극의 경우이므로 불평등성이 둔화되고 상대적으로 평등성이 큰 경우이기 때문이다. d가 증대됨에 따라 V_B는 N-P, P-P전극에 있어서 모두 상승하게 되며, 특히 P-P인 경우가 상승률이 크게 나타난다. 그러나 LN₂에서는 d의 증대에 따라 V_B가 LSF₆와 같이 크게 편차가 나지 않음을 보여주며 N-P가 P-P 보다 더 높게 나타나 LSF₆와 반대되는 결과를 나타낸다.

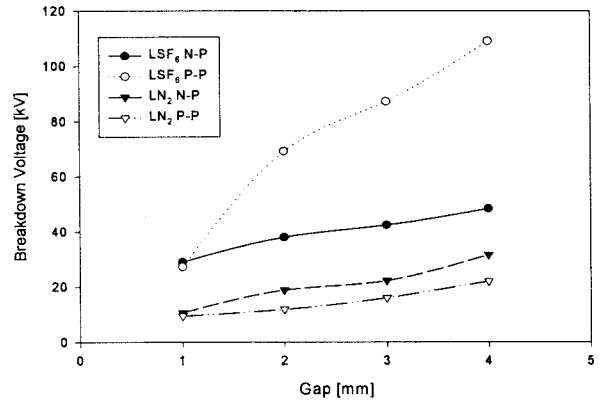
이는 일반적으로 대기압 하의 LN₂에서는 Bubble이 존재 시 N-P 전극보다 P-P 전극이 절연파괴전압이 낮은 결과를 보여준다. 이 현상을 Bubble 현상이라 한다. 그러나 LSF₆에서는 이와 상이한 현상, 즉 N-P보다 P-P의 절연파괴전압이 높게 된다. 이를 저자들은 "Positive Bubble Effect"라 칭하였다. 정기포현상이 나타나게 되는 것을 기포 발생 및 운동성을 함께 고려하면 다음과 같이 정의가능하다.

- (1) LSF₆의 초기압력 4기압일 경우액화온도는 -20~-30℃정도이나 LN₂

는 -190℃정도이므로 모의 GIS 내외의 온도차가 크고 기화온도가 낮은 LN₂의 경우가 기포발생이 왕성하며 그 운동성은 LSF₆ 경우 보다 더욱 활발함을 확인하였다.

- (2) LSF₆가 LN₂와 같이 자연기포 또는 Corona에 의한 bubble이 발생하나 LN₂의 bubble보다 LSF₆의 bubble은 아크소호능력이 극히 우수하므로 LSF₆에서 발생된 bubble 중의 코로나 및 아크는 빠르게 소호되어 bubble 현상이 LSF₆에서는 LN₂와 달리 상대적으로 크게 약화된다.

앞의 결과로 전극내 기포의 존재 확률이 LSF₆의 경우가 LN₂에 비하여 극히 낮다. LSF₆의 경우는 bubble 현상에 의한 절연파괴 기구보다 전계에 의한 절연파괴기구가 관건이 되는 현상으로 볼 수 있다. 그 결과 P-P 전극인 준평등 전계형성 전극인 경우의 절연파괴 전압이 N-P 전극인 극히 불평등성이 강한 전극의 절연파괴전압보다 높게 나타나게 된다.



〈그림 3〉 LSF₆ & LN₂에서 N-P & P-P 절연파괴특성

4. 결 론

본 논문은 AC/DC 고전압을 사용하여 액화 SF₆의 절연파괴특성을 비교 분석하였다.

- 1) 전극형상, 전극배치, 기포의 발생과 운동, 매체의 아크소호능력과 Corona 발생난이도 및 극간 거리 등에 의해 절연파괴 특성이 결정된다.
- 2) 액화 SF₆는 SF₆ Gas(6[atm])보다 약 2배정도의 절연특성이 우수함을 확인하였다.
- 3) 고온초전도체 개발에 따른 저온냉매 및 절연재료로서 액화 SF₆가 사용 가능함을 확인하였다.

이 연구결과를 응용 보완하면 고온 초전도 설비, 저온기기 및 케이블 등의 냉매 및 대체 절연물로 사용 가능하여 소형화 및 고 신뢰도 문제 해결이 가능할 것으로 기대된다. 또한 본 연구의 결과를 토대로 액화 SF₆를 고온 초전도 및 저온 설비분야에 냉매로 이용할 경우 저온영역의 입출구에 사용되는 부분은 열 절연성 재료가 사용되어야 할 것이므로 이의 개발이 절실히 요구된다

[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. 495~497, 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] 이광식의 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] 이광식의 4명, " SF₆ 가스의 온도변화에 따른 절연특성 "대한전기학회 논문지 Vol 52C No 8, 2003.8
- [10] Frank M. White, " Fluid Mechanics ", McGraw-Hill, 1995.8.
- [11] 이광식의 4명, " SF₆와 액체 질소의 절연파괴특성과 正氣泡現象 ", Vol 54C No 8, 2005.8