

SF₆ 가스의 온도변화에 따른 절연특성(The Characteriztics of Insulation and Discharge
with a Variation of Tempaerature in SF₆ gas)

박경태* · 윤대희 · 박광서 · 김이국 · 박원주 · 이광식 · 이동인

(Kyeung-Tae Park · Dae-Hee Yoon · Kwang-Seo Park · Lee-Kuk Kim · Kwang-Sik Lee · Dong-In Lee)

Abstract

In this paper the experiments of insulation characteristics by temperature change of SF₆ gas and insulation characteristics about liquid SF₆ 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 SF₆ was higher than that of the highly pressurized SF₆ gas.

1. 서론

고압력 SF₆가스를 절연매체로 하는 대표적 전력 기기인 가스절연개폐장치(GIS : Gas Insulated Switchgear)는 높은 절연내력과 소호 능력에 의한 고신뢰화, 보수의 간편화, 초소형화, 환경조화 등의 여러 가지 장점을 가지고 있어서, 22[kV]급부터 765[kV]급에 이르기까지 기간계통 및 도시과밀지역의 중추변전소등의 중요거점에 적용대상이 확대되고 있다. 특히 절연레벨 저감에 의한 절연설계합리화에 관한 연구가 활발히 수행되어, 더 한층 전력기기의 소형화 및 고신뢰화가 시도되고 있다.

이러한 GIS에 대한 사고가 발생하면 현재 국내에서는 단순히 기기 모듈 전체를 교환하고 있는 실정에 있다. 따라서 초고압용의 설비에 주로 적용되는 GIS설비는 사고발생 시 파급효과도 크다. GIS설비는 밀폐형이므로 한번 설치되면 내부의 보수가 어렵고 비용도 많이 든다. 고전압상태에서 운전되므로 제작과정에서의 미세한 구조적 결함이나 운전 중 발생한 결함 및 이물질의 영향으로 인해 기기의 오동작이나 절연파괴사고로 확대될 개연성이 높다. GIS의 경우 금속이물질의 자유운동에 의한 사고가 많이 발생하므로 자유운동 하는 금속이물질을 효과적으로 억제하거나 금속이물질을 수집하는 방법이 연구되어지고 있다. 또한, 제작시 최적 절연설계를 통한 부분방전의 발생가능성을 최대한 줄이는 연구가 진행되고 있다.

그러나 혹한지역과 열대지역 등과 같은 극한환경에서 GIS가 사용될 경우 절연매체인 SF₆가스의

온도변화에 따른 절연특성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 현장에서는 GIS의 경우 SF₆ 가스 압력 유지만으로 운전의 안전성을 주로 제어하고 있지만 가스 온도변화에 따라 가스 압력은 물론, 특히 GIS장치 내의 가스분자 밀도가 달라지므로 절연특성의 현저한 변화가 발생하리라 판단된다.

본 연구는 실험용 모의 GIS장치 내의 온도변화에 따른 SF₆가스의 절연특성에 관한 연구이다. 본 연구는 극한 또는 혹서 환경에서 온도변화에 대한 GIS 전력설비의 고신뢰성과 안정성을 가진 SF₆ 가스 절연 전력설비의 최적 절연설계 및 최적 설비 운용 자료로서 활용 될 것으로 판단된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치를 그림 1, 사진 1에 나타내었다. 사용된 전압원은 교류 고전압(일본, Pulse Electronic. Co. Ltd., 입력 : AC 200V 50/60Hz, 출력 : 60kV)을 사용하였다. 절연파괴전압의 측정은 High Voltage divider (Pulse Electronic Engineering, EP-300K, 10000:1)와 Digital storage type oscilloscope(Lecroy 9350AL)를 사용하여 관측하였다. 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 내부압력을 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^{-4} [Torr] 까지 진공을 만든 다음 SF₆ 가스를 주입하였다. 모의 GIS 내부에 설치된 온도센서와 전극부를 관측할 수 있는 관측창(직경 110 [mm], 두께 20 [mm])을 설치하였다. 이 관측창의 재질은 투명 아크릴이며, 원통형으로 제작 설치하였다.

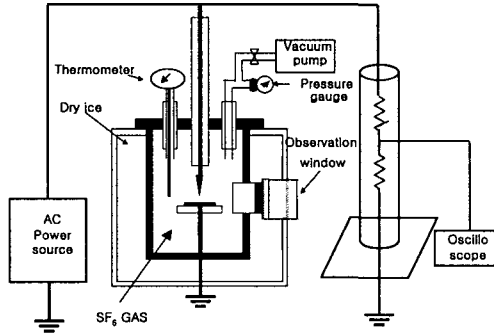


그림 1. 실험장치 회로도

본 연구에 사용한 전극은 침대평판전극과 평판대 평판전극을 사용하였다. 각 전극부에서 하부전극인 평판전극은 직경 59 [mm]의 로고스키 타입이고 재질은 스테인레스 스틸로 제작된 것이다. 침전극은 직경 5.9 [mm], 침단각도는 23°, 길이 100 [mm]의 스테인레스 스틸로 제작된 것을 사용하였다.

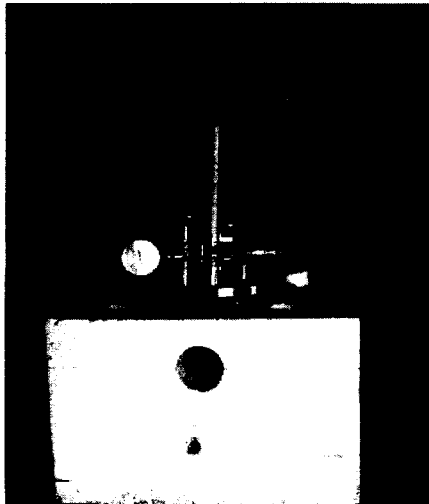


사진 1. 냉각장치를 설치한 모의 GIS

실험용 모의 GIS 챔버의 주요 사양은 압력 변화(2~6[atm])를 위해 안정상 10기압 정도의 가

압이 가능하고 압력 유지를 위해 실험용 GIS 챔버 내의 기밀성 유지가 가능하다. 또한 온도변화(50~-50℃) 및 유지가 가능하고 높은 절연성을 가진 SF₆ 가스의 절연내력 시험을 위해 150[kV] 정도의 고압인가에 따른 절연설계가 되어있다.

냉각 설비는 열 절연을 위하여 고강도 스티로 폴을 이용하여 사진 1과 같이 직육면체 모양의 박스를 만들었고 내부에 드라이 아이스(-78.5 [℃])를 채우는 양에 의해 온도를 낮추었다.

2.2. 실험방법

먼저 50~-50℃의 온도 변화에 따른 각각 내부압력(2-6[atm]) 유지시 SF₆ 가스의 절연파괴 전압을 측정하였다. 또한 실험용 모의 GIS 챔버 내의 가스량의 변화 없이 일정 가스량 유지시 온도-압력 변화에 대한 SF₆ 가스의 절연파괴 전압을 측정하였다. 절연파괴 전압은 10회를 측정하여 평균값으로 그래프에 표시하였다.

전압의 측정은 고전압 분압기와 오실로스코프를 이용하여 그림 1과 같이 구성하여 전압을 서서히 상승 인가시 1번의 아크 방전이 발생될 때 전압값을 측정하였다. 부정현상을 없애기 위해 처음 10번 정도 방전시킨 후 절연파괴 전압값을 측정하였다. 고전압인가는 약 절연파괴 전압의 50% 정도는 초당 1[kV] 속도로 인가하였다. 그 이후부터는 초당 0.5[kV] 속도로 절연파괴까지 전압을 인가하였다.

온도 변화를 위해 그림 1에 보는 바와 같이 모의 GIS 챔버 벽면에 드라이 아이스의 양을 조절하여 온도를 변화 시켰다. 한번 실험의 소요 시간은 약 8~10시간이 소요되었다. 상온에서 50℃ 까지 온도의 상승은 모의 GIS 주변에 전열기를 이용하여 온도를 서서히 상승시켜 실험을 행하였다. 저온화 실험시 실험용 챔버의 상단 부분의 열적 차폐를 막기 위해 드라이 아이스를 가루로 만들어 얇은 드라이 아이스 층을 만들었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 온도변화에 따른 일정 내부압력 유지시 절연파괴전압특성

그림 2는 모의 GIS 장치 내에 침대평판전극을 설치하여 SF₆ 가스의 온도 변화에 따른 일정 내부압력 유지시 절연파괴 특성을 나타내었다.

본 연구에서는 모의 GIS 장치내의 침대평판전극의 간극을 3 [mm], 기압은 2~5기압(kgf/cm²)까지 변화시켰으며, 장치내의 온도는 50 [℃]~-30 [℃]까지 변화시켰다.

5기압의 경우에는 50[°C]에서 0[°C]까지는 절연파괴전압에서 41[kV]에서 43[kV]로 약 3[kV]차이로 큰 변화가 없었으나 0[°C]이후 영하로 내려갈 경우 -10[°C]절연파괴전압이 52.8[kV]로 상승하였다. 4기압에서는 50[°C]에서 -10[°C]에까지는 36[kV]에서 39[kV]로 약 3[kV]정도의 변화가 있다. 이후 -20[°C]에서 41.0[kV]로 절연파괴전압으로 상승하였다. 3기압에서 50[°C]에서 -10[°C]까지 30[kV]에서 33[kV]로 약 3[kV]로 거의 변화가 없었으며 -10[°C]이후 -20[°C]에서는 45[kV]로 절연파괴전압이 커지는 것을 볼 수 있다. 2기압의 경우에도 50[°C]에서 -20[°C]까지 25[kV]에서 28[kV]까지 약 3[kV]정도의 변화가 있었지만 -30[°C]에서 44.5[kV]로 매우 큰 절연파괴전압으로 측정되었다.

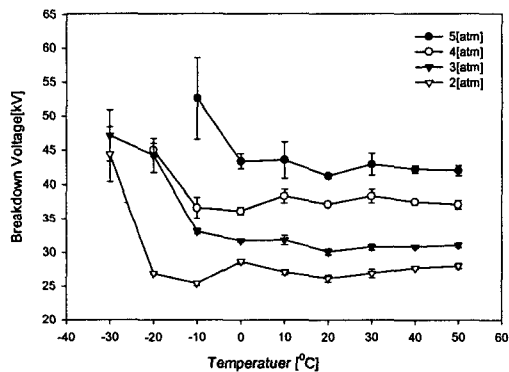


그림2. 침대평판판일 때 절연파괴전압(간극 3[mm]).

각 압력별 절연파괴가 상승하는 부분에 관측창을 통해 관측하였다. 그 결과 각 압력에 따라 임계온도 이하의 경우 액화가 진행되어 액화된 SF₆가 침선단에 모여 물방울과 같은 모양으로 떨어지기 시작하였다. 이때 전압을 높여 절연파괴 시킬 경우 액화 SF₆가 브러시 코로나 형태의 액체 막을 형성하였다. 계속 전압을 상승시킬 경우 중심에서 절연파괴가 발생하였다. 그 결과 액화 SF₆의 절연파괴 전압은 상당히 높을 것이라고 판단되었다. 이 현상 이후에 계속하여 가스를 주입할 경우 액화의 진행속도가 빨라서 챔버 내부에 일정시간동안 일정 압력의 유지가 어려워 실험을 진행하기 어려웠다.

액화 SF₆의 절연내력을 알기 위해 계속 가스를 주입하여 전극계 전부를 액화 SF₆ 가스로 함침시켜 절연파괴 전압을 측정하려 하였다. 이때 액화 SF₆의 절연내력은 인가전압의 한계치(60[kV]) 이상의 절연내력을 가지고 있다는 것이 확인되었다.

물론 온도가 내려감에 따라 챔버 내의 압력을 유지할 경우 가스 밀도가 증가하여 절연파괴 전압이 상승하는 요인도 있겠지만 임계값 이하에서 급격한 절연파괴 전압의 상승은 위에서 언급한 바와 같이 SF₆ 가스의 액화 진행으로 인한 요인이 더 크다고 판단된다.

표1. 온도와 기압변화에 따른 절연파괴전압특성

	2기압	3기압	4기압	5기압
-20 [°C]	26.9	44.0	45	-
-10 [°C]	25.4	33.1	36.6	52.6
20 [°C]	26.2	30.1	37.0	41.3
50 [°C]	28.0	31.1	37.1	42.0

표 1은 그림 2의 절연파괴전압특성을 간략히 나타냈다. 기압의 상승과 함께 절연파괴전압은 20 [°C]일 때 2기압, 3기압, 4기압, 5기압에서 절연파괴 전압은 각각 26.2[kV], 30.1[kV], 37.1[kV], 41.3[kV]로 기압이 1기압씩 증가할수록 4~5[kV] 정도 높아지는 경향을 보였다. 기압이 증가하면 SF₆가스 밀도의 증가로 절연파괴전압이 높아진다.

표 1에 대한 그래프를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 5기압일 때 -10[°C]의 경우와 3, 4기압일 때 -20[°C]의 경우가 그 밖의 다른 기압과 온도의 변화 때 보다 절연파괴 전압의 편차가 상대적으로 크다. 이것은 침 선단에 액화 SF₆가 물방울 모양으로 모여 떨어지기 전과 후의 절연파괴 시간차와 물방울 모양의 크기 차이 등에 따라 절연내력의 편차가 발생되었다고 판단된다.

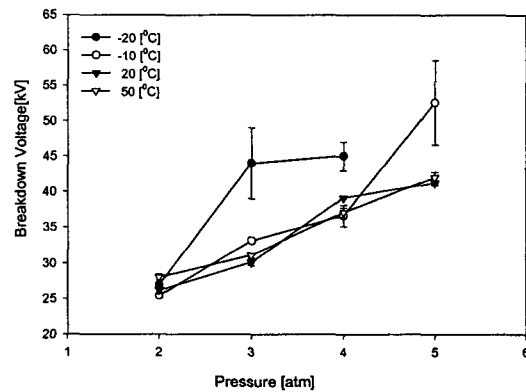


그림 3. 침대평판일 때 기압에 대한 절연파괴

3.2 일정 가스량에 대한 온도-압력 절연 파괴 특성

그림 4는 모의 GIS 장치 내에 침대평판전극을 설치하여 SF₆가스의 일정 가스량 유지시 온도-압력에 대한 절연과피전압을 나타냈다. 표 2는 그림 4의 압력에 대한 온도변화를 표로 나타내었다. 본 실험은 온도-압력변화에 따른 SF₆의 절연특성에 대한 물리적 특성을 알기 위한 실험이다.

본 연구에서는 모의 GIS장치내의 침대평판전극의 간극을 3[mm], 기압은 상온(20[°C])일 때 4~6[kgf/cm²]에 대해 장치내의 온도를 50[°C]~-50[°C]까지 변화시켰다.

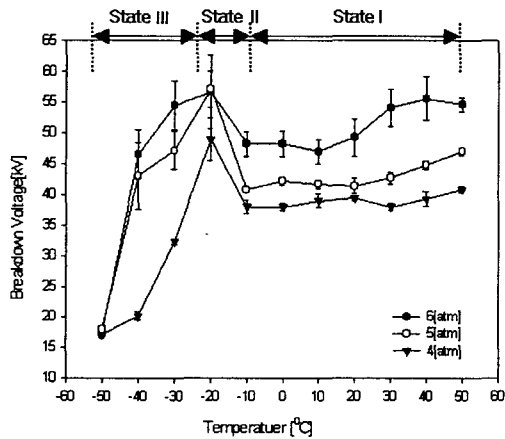


그림4. 일정 가스량에 대한 침대평판의 절연과피전압(3mm)

표 2. 일정 가스량에 대한 침대평판의 온도-압력 특성(3mm)

온도	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
6[atm]	0	1.6	2.9	4.2	4.6	5	5.6	6	6.3	6.6	6.6
5[atm]	0	1.5	2.5	3.5	4.1	4.5	4.8	5	5.3	5.6	5.9
4[atm]	0	0.2	1.5	2.9	3.1	3.4	3.9	4	4.2	4.5	4.7

상태 I 은 각 압력에 대한 SF₆의 액화 진행 전의 단계이며 이 경우에는 온도증가로 인한 압력증가에 의한 절연과피 전압이 약간 상승하는 경향을 나타낸다. 상태 II에서는 각 압력에 따른 SF₆의 액화가 진행됨에 따라 절연과피 전압은 급격히 상승한다. 상태 III에서는 SF₆의 액화가 더욱더 진행될 경우 갭간의 압력이 급격히 떨어져 절연과피 전압도 급격히 하락한다. 이 경우에는 극간에 희박한 SF₆ 가스와 희박한 공기의 혼합체 만 존재하기 때문에 절연과피 전압이 급격히 하락한다고 판단된다.

즉 극한지방에 GIS를 설치할 경우 액화가 진행됨에 따라 절연내력이 일시 상승하지만 결국 액화가 더욱 진행될 경우 압력이 급격히 떨어져 절연과피

에 이르게 된다고 판단된다.

4. 결론

(1) 온도변화에 따른 일정 내부압력 유지 시 절연과피특성

불평등 전극계에서 기압과 온도를 변화시켰을 때 각 압력별(2~6기압)액화가 진행되기 전에는 거의 일정한 절연과피전압특성을 나타내었다. 각 압력별 액화가 진행될 경우 절연과피전압이 급격히 증가하였다. 온도를 계속 낮출 경우 급속한 SF₆ 가스의 액화 진행으로 인하여 압력의 유지가 어려웠으며 동일 온도 하에서 압력의 증가에 따라 SF₆ 가스의 밀도가 증가하여 절연과피 전압도 상승하였다.

(2) 일정 SF₆ 가스량에 대한 온도-압력 절연과피 특성

각 압력에 따른 SF₆의 액화 진행 전의 단계에서는 온도증가로 인한 압력 증가에 의한 절연과피 전압이 약간 상승하는 경향을 나타낸다. 각 압력에 따른 SF₆의 액화가 진행됨에 따라 절연과피 전압은 급격히 상승한다. SF₆의 액화가 더욱더 진행될 경우 갭간의 압력이 급격히 떨어져 절연과피 전압도 급격히 하락한다. 액화 SF₆의 절연과피 전압은 인가전압의 한계치(60[kV]) 이상으로 높음을 알 수 있었다.

액화 SF₆의 절연특성에 관한 연구는 향후 더욱 연구의 필요성이 있다고 판단된다. 즉 저온화가 진행되면 결국 SF₆의 액화가 직접적 원인이 아니라 액화진행으로 인한 압력의 급속한 저하로 인해 SF₆의 절연 내력이 급격히 낮아지게 되는 결론에 이르게 되었다.

참고 문헌

- [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, scrimination 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] C.Beyer et al. "Influence Reactive SF₆ ases on Electrode Surfaces after Electrical Discharge under SF₆ Atmosphere". IEEE Trans. pp. 234~240, 2000