

평등전계에서 SF₆/CF₄ 혼합가스의 AC절연내력 특성

AC Breakdown Voltage Characteristics of SF₆/CF₄ in Uniform Field

황청호^{1,a}, 박신우¹, 김남렬¹, 허창수¹

(Chung-Ho Hwang^{1,a}, Woo-Shin Park¹, Nam-Ryul Kim¹, and Chang-Su Huh¹)

Abstract

The excellent dielectric properties of SF₆(sulfur hexafluoride) have lead to its wide range of application in the field of high voltage insulation. Because there has been some recent concern regarding the environmental impacts of SF₆, binary gas mixtures, with SF₆ as the main component, have been the subject of active research. Scientists have long been interested in the possible use of gaseous fluorocarbons, including CF₄ (Carbon Tetrafluoride), in high voltage applications due to their inert character and high dielectric strength. This paper presents experimental results concerning the AC breakdown characteristics for various mixtures of SF₆/CF₄ in a test chamber and 25.8 kV GIS (Gas Insulation Switchgear) at practical pressures (0.1-04 MPa) and gap lengths (0.5 mm, 1 mm) in a test chamber. In the result, it was observed that an increase in the dielectric strength is attained through the addition of SF₆ to CF₄. It is possible to make an environment friendly gas insulation material while maintaining the dielectric strength by combing SF₆ and CF₄ which generates a lower level of the "global warming" effect.

Key Words : SF₆, CF₄, GIS, AC breakdown voltage

1. 서론

SF₆가스는 절연 및 소호능력이 우수하여 현재 고압 및 초고압 개폐장치, 변압기 그리고 고압케이블과 같은 중전기 산업에 많이 사용되고 있다. SF₆ 가스는 무독성, 불화성, 비폭발성, 큰 전자부착성질을 가지고 있어 높은 절연내력을 지녔으며 방전시 자기회복성이 우수하다[1]. 그러나 도전성 입자 및 금속이물에 의한 불평등전계에서 파괴전압이 낮아지고 방전시 고독성, 고부식성 화합물을 발생시킨다. 또한 지구 환경을 고려하였을 때 GWP(Global Warming Potential)가 23900배(CO₂=1배)로 심각한 문제가 되고 있어 교토의정서(2005.2)에 의해 SF₆ 가스가 온실가스로 지정되었다. 선진국의 경우

2008년부터 유엔기후변화협약에 참여하고 우리나라의 경우 2013년부터 의무적으로 참여하여야 하는 실정이다[2]. 현재 SF₆가스의 사용량을 줄이면서 어느 정도의 절연내력을 유지하기 위해 SF₆가스에 N₂, CO₂, Dry-Air, PFC (Perfluorocarbons; 과불화탄소) 등 완충가스(Buffer gas)를 혼합하는 방법이 많이 연구되고 있다[3]. PFC계열 가스는 CF₄, C₂F₆, C₃F₈등이 있으며 불연성에 무색, 무취의 가스이며 화학적으로 매우 안정한 가스이다[4]. 또한 고체 표면에 흡착하기 쉬운 성질과 매우 큰 부착 단면적을 가지고 있어 절연내력이 높은 편이다. 반도체 공정용 및 냉매용으로 많이 사용되고 있는 CF₄ 가스는 PFC계열 가스 중에서 GWP가 6300배로 낮고 무독성이며 절연성능도 높아 대체가스 후보로서 유망하다. 외국에서는 가스절연재료로서 CF₄, C₂F₆, c-C₄F₈와 같은 PFC 물질에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으며, 최근 SF₆가스와 CF₄ 가스 이용하여 추운 지역 (i.e 캐나다)에서 SF₆가스의 절연성능이 낮아지는 것을 보완하기 위해 두 가스를 혼합하여 사용하는 방법에 대해 연구되고

1. 인하대학교 전기공학과

(인천시 남구 용현동 253)

a. Corresponding Author : hch7642@hanmail.net

접수일자 : 2007. 2. 20

1차 심사 : 2007. 3. 14

심사완료 : 2007. 3. 21

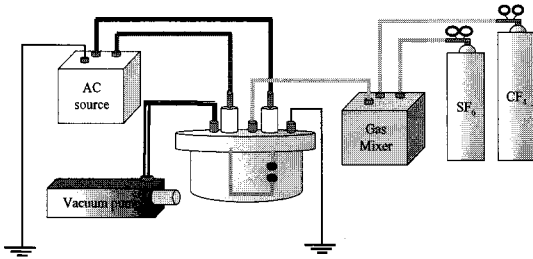


그림 1. 실험장치의 개략도.

Fig. 1. A schematic diagram of the experimental setup.

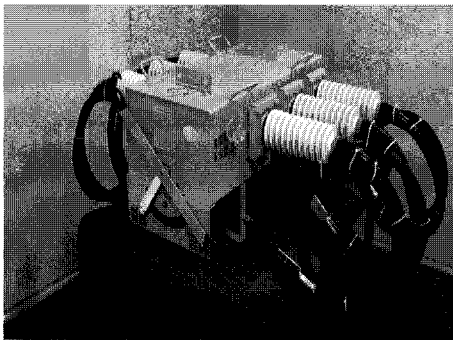


그림 2. 25.8 kV GIS.

Fig. 2. Photograph of the 25.8 kV GIS.

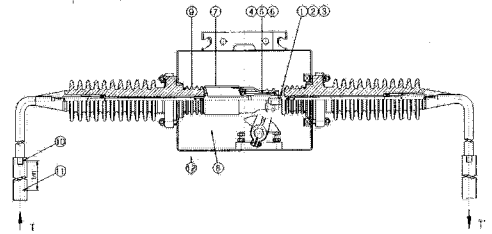
있다. 국내에서도 SF₆가스에 대한 연구와 불활성 가스의 혼합특성에 대하여 연구가 진행되었으나 아직까지 CF₄, C₂F₆, c-C₄F₈와 같은 PFC 물질에 대한 연구가 미비하며 또한 차단기의 소호 특성 등과 연계되어 종합적으로 연구되지 않는 실정이다.

본 연구에서는 실험용 챔버를 통해 상용주파내 전압실험을 실시하여 SF₆가스와 CF₄가스의 혼합비율에 따른 절연내력을 조사하고 이를 실증기기인 25.8 kV GIS에 적용하였을 때 그 절연내력 특성 및 부분방전에 관해 연구한 것이다.

2. 실험

2.1 실험장치

그림 1은 GIS를 모의한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 본 연구를 위하여 사용된 챔버는 스테인레스 스틸 재질로 되어 있으며 상부에 AC 전원을 인가하기에 충분한 절연내력을 가지도록 설계되었다. 챔버 안쪽은 구대구 전극을 설치하여 전력기기의 절연설계의 기본이 되는 평등전계를 형



① 고정접촉자 도체 A상	⑦ 고정축 하우징
② 고정접촉자 도체 B상	⑧ Tank 내부
③ 고정접촉자 도체 C상	⑨ 붓심표면
④ 가동접촉자 도체 a상	⑩ 구출선 도체
⑤ 가동접촉자 도체 b상	⑪ 인입 Cable
⑥ 가동접촉자 도체 c상	⑫ 외부온도

그림 3. 25.8 kV GIS의 단면도.

Fig. 3. Cross section of the 25.8 kV GIS.

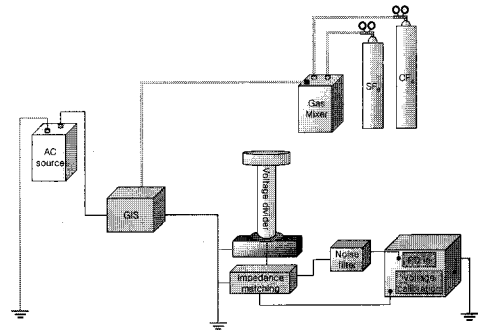


그림 4. 25.8 kV GIS에서의 PD발생과형(0.05 MPa, 20 pC/div).

Fig. 4. PD inception graph in 25.8kV GIS(0.05 MPa, 20 pC/div).

성하였다. 구대구 전극구조에서 구의 반경이 두 전극간 거리보다 크면 클수록 평등전계에 가까운 준 평등전계가 형성된다[5]. 실험에 사용된 전극의 직경은 12.5 mm이며 전극간 거리를 1 mm, 0.5 mm에서 실험하여 등가적으로 평등전계를 모의하였다. 전극의 재질은 물리 화학적 강도가 높은 스테인레스 스틸을 사용하여 실험하였다. 혼합비율을 정확하게 조절하기 위하여 가스혼합기(가스: SF₆/CF₄, 오차: ± 2 %, 최대유량: 5 L/min)를 사용하였으며 SF₆가스와 CF₄가스 외에 공기가 섞이지 않도록 챔버 내부의 공기를 진공펌프를 통해 10⁻¹ torr로 배기하였다. AC절연내력 실험시 주위온도는 20 °C이다. 그림 2와 3은 실험용 챔버를 통해 얻은 결과를 토대로 실증실험을 하기 위해 제작된 25.8 kV GIS의 사진 및 단면도를 나타내었다. 25.8 kV GIS는 3상

일괄조작 단일 탱크형으로 양질의 재료를 사용하여 전기적, 기계적 내력을 가지며 각 부분은 간단 견고하고 보수점검이 용이한 간단한 구조로 되어 있으며 GIS내부에 습기를 흡수하도록 흡습제를 구비하였다. 그림 4는 25.8 kV GIS PD실험장치도를 나타내며 실험시 외부로부터의 잡음을 최대한 줄이기 위해 차폐실내에서 실험하였으며, 절연변압기를 사용하여 전원으로부터의 잡음을 최소로 하였다. PD실험에 사용된 커플링 커패시터는 최대 100 kV까지 견딜 수 있으며 1 nF의 용량을 사용하였다.

2.2 실험방법

실험에 앞서 우선 챔버 내부의 이물질을 제거하기 위해 메탄올로 깨끗이 청소한 후 제작된 실험용 챔버와 25.8 kV GIS의 내부를 진공펌프를 이용하여 10^{-1} torr로 배기시켰다. 99.9 %의 순도를 가진 SF₆가스와 CF₄가스를 가스혼합기에 있는 플로우미터를 통해 흐르는 양을 관찰하며 가스의 혼합비를 조절하면서 실험용 챔버와 25.8 kV GIS에 있는 압력계를 보면서 실험압력까지 주입하였다. 가스 주입 후 전극의 표면을 안정화하기 위해 몇 차례 방전을 시킨 후 실험하였다. 실험 시 60 Hz AC전압의 상승속도는 일정하게 증가시켰으며 방전 후 가스의 안정화를 위해 일정한 시간간격을 두고 실험하였다. 실험결과에 나타난 절연파괴전압은 동일 조건에서 10번의 AC절연파괴실험 후 평균값으로 환산하여 나타내었다. 25.8 kV GIS PD실험은 전압의 상승속도를 일정히 하면서 PD신호가 발생했을 때의 전압을 10회 측정하여 이것의 평균값으로 나타내었다. 가스절연파괴실험 및 25.8 kV GIS PD실험 후 질소가스를 통해 챔버 내부의 남은 가스를 제거하여 다른 실험 시 잔류가스에 의한 영향을 최소화하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험용챔버에서의 SF₆/CF₄ AC절연내력실험

SF₆, CF₄, N₂가스의 압력에 따라 AC전압을 인가했을 때 절연파괴특성을 그림 5에 나타내었으며 각각의 가스들은 같은 조건에서 20회의 동일한 실험을 하였을 때 AC절연파괴전압의 최대값과 최소값의 차이가 작았다. 공기 중에서 가장 많은 부분을 차지하는 질소를 통해 SF₆가스와 CF₄가스를 절연성능을 비교하면 N₂가스를 기준으로 SF₆가스는 약 3배정도의 절연성능을 나타내었고 CF₄가스는 약 1.8배의 성능을 나타내었다. SF₆가스와 CF₄가스는 N₂가스보다 매우 큰 부차단면적을 가지고 있는

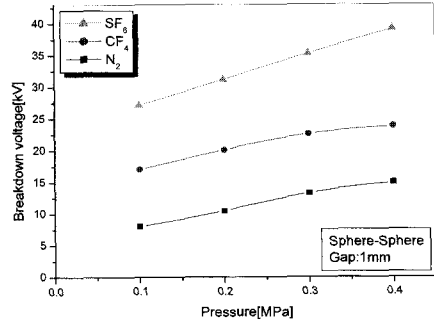


그림 5. 단일가스 AC절연내력실험 결과.

Fig. 5. Characteristics of AC breakdown voltage versus the pure gas.

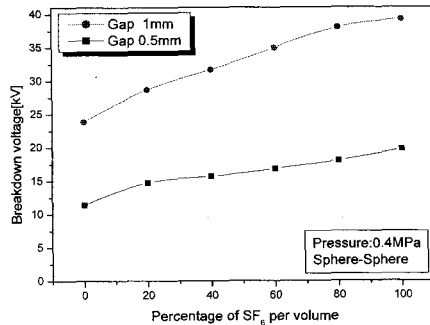


그림 6. SF₆/CF₄혼합가스에서 SF₆가스의 비율에 따른 혼합가스의 AC절연파괴전압(0.4 MPa).

Fig. 6. AC breakdown voltage as a function of SF₆ in SF₆/CF₄ mixtures of 0.4 MPa.

전자부성가스이므로 충돌에 의해 나온 전자의 에너지를 감소시켜 중성분자를 전리시킬 수 있는 높은 에너지의 전자가 감소되어 절연파괴전압이 높게 나타난 것으로 사료된다. 각 단일가스마다 압력이 증가할수록 절연내력이 거의 선형적으로 증가하는 특성을 나타내었으며, SF₆가스는 실험 압력범위에서 지속적으로 증가한 반면 CF₄가스와 N₂가스는 압력이 증가할수록 약간 포화되는 현상을 보였다.

혼합가스의 압력이 0.4 MPa, 전극 간격이 0.5 mm일 때와 1 mm일 때 SF₆가스의 혼합비율에 따른 AC 절연내력을 그림 6에 나타내었다. CF₄ 단일 가스에 약 20 %의 SF₆가스를 혼합하였을 때 전극 간 간격이 0.5 mm에서는 약 28 %의 큰 증가폭을 나타내었으며 그 이후의 혼합비율에서는 증가폭이

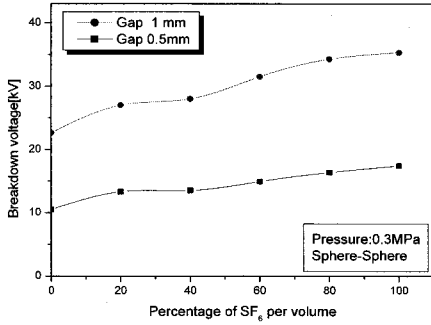


그림 7. SF₆/CF₄혼합가스에서 SF₆가스의 비율에 따른 혼합가스의 AC절연파괴전압(0.3 MPa).
 Fig. 7. AC breakdown voltage as a function of SF₆ in SF₆/CF₄ mixtures of 0.3 MPa.

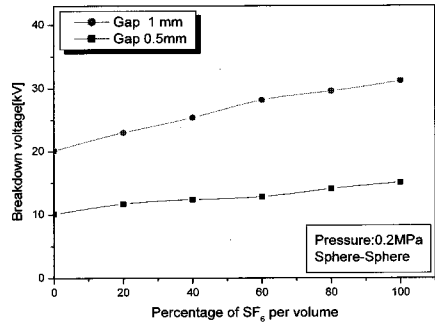


그림 8. SF₆/CF₄혼합가스에서 SF₆가스의 비율에 따른 혼합가스의 AC절연파괴전압(0.2 MPa).
 Fig. 8. AC breakdown voltage as a function of SF₆ in SF₆/CF₄ mixtures of 0.2 MPa.

낮았다. 또한 전극 간 간격 1 mm에서는 CF₄ 단일 가스와 비교하였을 때 약 20 % 정도의 증가폭을 나타내었으며 SF₆가스의 혼합비율이 높아짐에 따라 약간은 거의 선형적으로 증가하다 80 %정도에서 SF₆ 단일가스와 비슷한 성능을 나타내었다. 이러한 혼합비율에 의한 절연내력결과는 두 가스의 서로 다른 특성에너지대에 대한 전자 부착능력에 의한 것으로 판단된다. 같은 혼합비율에서 전극간 거리에 따른 절연내력은 1 mm일 때 0.5 mm일 때 대략 2배정도의 차이를 나타내었다. 이는 구대구의 평등전계에서 전극간 거리의 차이에 따라 구 양단의 전계의 세기도 변하기 때문인 것으로 사료된다.

그림 7은 혼합가스의 압력이 0.3 MPa일 때 혼합가스의 AC절연특성을 나타낸 것으로 전반적으로 0.4 MPa인 경우와 비교하였을 때 전체적으로 절연파괴전압은 낮아졌다. 이러한 원인은 가스의 압력이 낮아질수록 전자의 평균자유행정거리가 길어지기 때문에 전자가 중성분자에 충돌할 확률이 적어져 절연파괴전압이 낮아지는 것으로 판단된다. 0.3 MPa일 때는 1 mm, 0.5 mm의 극간간격 모두에서 SF₆가스의 비율이 40 %까지 점점 절연내력 상승폭이 줄어드는 경향을 나타낸 후 그 이후 다시 증가하였다. 또한 전극 간 간격이 1 mm 와 0.5 mm일 때 절연파괴전압을 비교해 보면 약 2배정도의 차이를 나타내고 있다.

그림 8은 혼합가스의 압력이 0.2 MPa일 때 AC 절연내력특성을 나타낸 것으로 전체적으로 0.4 MPa인 경우의 실험결과와 비슷하게 나타났다. 또한 0.4 MPa인 경우 전극 간격이 1 mm일 때는 약 80 %, 0.5 mm에서는 혼합비율에 따라 약간은 다

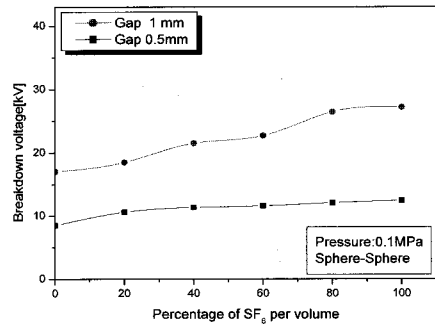


그림 9. SF₆/CF₄혼합가스에서 SF₆가스의 비율에 따른 혼합가스의 AC절연파괴전압(0.1 MPa).
 Fig. 9. AC breakdown voltage as a function of SF₆ in SF₆/CF₄ mixtures of 0.1 MPa.

르지만 70 %의 절연파괴전압을 나타내었다. 혼합 비율에 따른 절연파괴전압은 양 전극 간격에 따라 선형적으로 증가하였지만 0.5 mm인 경우에는 증가폭이 상당히 낮았다.

실험한 가스압력 중 가장 낮은 0.1 MPa의 압력에서의 SF₆가스의 혼합비율에 따른 절연내력을 그림 9에 나타내었다. 1 mm일 경우는 0.3 MPa의 경우와 비슷한 파형을 보여주었으며, 0.5 mm일 경우를 살펴보면 SF₆가스 혼합비율이 증가함에도 불구하고 SF₆가스의 비율이 20 % 이후에는 거의 일정한 절연파괴전압을 나타내었다.

SF₆가스는 일반적으로 약 0.01~20 eV사이에 약 5개의 부착단면적을 가지고 있는 것으로 알려져

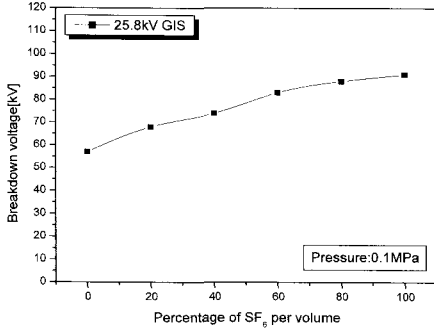


그림 10. 25.8 kV GIS에서의 AC절연파괴전압(0.1 MPa).
 Fig. 10. AC breakdown voltage in 25.8 kV GIS(0.1 MPa).

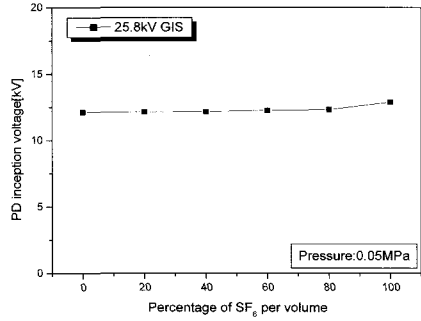


그림 12. 25.8 kV GIS에서 혼합비율에 따른 PD 발생전압(0.05 MPa).
 Fig. 12. PD inception voltage as a function of SF₆ in 25.8 kV GIS(0.05 MPa).

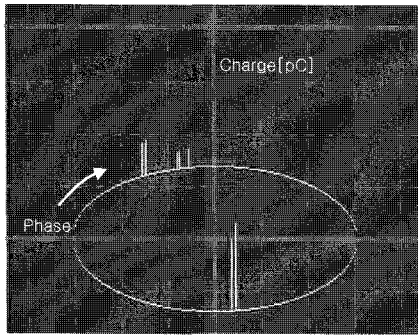


그림 11. 25.8 kV GIS에서의 PD발생파형(0.05 MPa, 20 pC/div).
 Fig. 11. PD inception graph in 25.8 kV GIS (0.05 MPa, 20 pC/div).

있다. 그러나 전극으로부터 나온 전자가 중성분자와 비탄성충돌 후 전자의 에너지가 낮아지게 되고 확률적으로 충돌에 의해 높은 에너지를 가진 전자가 적기 때문에 주로 0.05~0.1 eV의 낮은 에너지대에서 SF₆가스에 부착되게 된다[1]. 반면 CF₄가스는 일반적으로 약 3~15 eV 에너지대에 걸쳐 부착단면적을 가지고 있으며 약 7 eV의 에너지대에서 큰 부착단면적을 가지고 있다. 낮은 에너지의 전자가 SF₆가스에 의해 부착되어 확률적으로 7 eV 정도의 에너지를 가진 전자가 줄어들며, 중성분자와의 충돌에 의해 높은 에너지를 얻기 어려워지기 때문에 SF₆/CF₄혼합가스에서 CF₄가스비율이 커짐에 따라 절연내력이 낮아진 것으로 판단된다[6-9]. 또한 전극간 간격에 의해 절연내력차이는 전극간

격이 작을수록 두 전극사이에 인가되는 전계의 세기가 커지기 때문에 상대적으로 전자의 이동을 더욱 가속하기 때문이며 또한 전자를 흡착하여 상대적으로 전자보다 무거운 SF₆가스나 CF₄가스도 확률적으로 전류에 기여하기 때문으로 생각된다.

3.2 25.8 kV GIS에서 SF₆/CF₄ 혼합가스 AC절연내력실험

그림 10은 실증기기인 25.8 kV GIS에서 SF₆가스의 혼합비율에 따른 절연내력을 나타낸 것이다. 실험조건은 챔버실험시 조건과 같이 진공도는 10⁻¹ torr, 주위온도는 20 °C이다. 전원의 인가는 25.8 kV의 전원측 3개상 중 한곳과 나머지 2개상 및 부하측 3상을 접지에 연결한 후 실험하였다. SF₆가스의 혼합비율에 따른 절연내력파형은 SF₆의 혼합비율이 20 %일 때 절연내력파형은 SF₆의 혼합비율이 20 % 이후의 혼합비율에서는 점점 증가폭이 줄어들었다. 25.8 kV GIS 절연파괴실험 결과 실험용 챔버와 비교하였을 때와 유사한 파형을 나타낸 것은 25.8 kV GIS 전극도 평등전계가 되도록 만들어졌기 때문이라 판단된다.

3.3 25.8 kV GIS에서 SF₆/CF₄ 혼합가스 PD실험

혼합비율에 따른 25.8 kV GIS에서의 PD특성을 확인하기 위하여 25.8 kV GIS에 부분방전 실험을 실행하였다. 그림 11은 실험결과의 대표적인 파형이며 주로 PD파형은 90° 와 270°의 위상에서 나타났다. 그림 12은 PD방전개시전압을 표시하였으며 실험결과 부분방전 개시전압은 혼합비율에 따라 거의 차이없이 12 kV를 나타내었다. 이는 고체

절연체와는 달리 기체절연물에서는 가스의 혼합비율에 의한 원인보다는 전극의 형태나 GIS내의 외부적 결합에 의한 영향이 더 크기 때문일 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 SF₆/CF₄ 혼합가스를 실험용 챔버에서 구대구 전극을 통해 평등전계를 모의하여 혼합비율 및 전극간 거리(0.5 mm, 1 mm)에서의 절연특성 살펴보고 이를 실증기인 25.8 kV GIS에 적용하였을 때의 절연특성도 알아보았다. 일정한 압력의 혼합가스에서 CF₄가스에 SF₆가스를 추가함에 따라 절연성능은 전체적으로 상승하다 점점 증가폭이 줄어드는 경향을 보였다. 전극간격이 0.5 mm 일 경우는 SF₆가스의 혼합비율이 20 %일 때까지 절연내력이 상승하다 그 이후부터는 증가폭이 점점 감소하였다. 동등한 조건에서 전극 간격에 따른 절연내력은 0.5 mm일 때 1 mm의 약 50 %정도의 절연내력을 나타내었으며 실험압력범위에서 거의 비슷한 특징을 나타내었다. 25.8 kV GIS에서도 실험용 챔버에서의 절연내력 결과와 유사하게 비교적 선형적으로 절연과파전압이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 25.8 kV GIS PD실험결과 부분 방전 개시전압은 혼합비율에 따른 차이 없이 거의 일정한 값을 나타내었다. SF₆가스의 혼합비율이 80 %일 때 100 %의 SF₆가스와 절연과파전압이 비슷한 결과를 나타낸 것으로 보일 때 온난화 지수가 낮은 CF₄가스를 사용하여 환경적 오염을 줄일 수 있다고 생각한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-142) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

[1] V. N. Maller and M. S. Naidu, "Advances in High Voltage Insulation And Arc Interruption in SF₆ And Vacuum", Pergamon press, p. 1, 1981.
 [2] 임창동, 유봉선, 박원욱, "Mg 산업에서 SF₆ 가스의 사용과 Global Warming", 한국주조공학회지, 23권, 3호, p. 109, 2003.

[3] Y. Qiu and Y. P. Feng, "Investigation of SF₆-N₂, SF₆-CO₂ and SF₆-air as substitutes for SF₆ insulation", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol. 2, p. 766, 1996.
 [4] Y. Tajima, T. Futatsuki, T. Abe, and S. Tanzawa, "PFC recycling system by continuous gas Chromatography", IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, Vol. 18, No. 4, p. 495, 2005.
 [5] D. Kind and K. Feser, "High-voltage test techniques", Newnes, p. 14, 2001.
 [6] G. J. Cliteur, Y. Hayashi, E. Haginomori, and K. Suzuki, "Calculation of the uniform breakdown field strength of SF₆ Gas", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 6, p. 847, 1998.
 [7] 서상현, 유희영, 김상남, 하성철, "SF₆가스의 전리 및 부착계수에 관한 연구", 조명전기설비학회지, 10권, 6호, p. 622, 1996.
 [8] V. A. Lisovskiy and V. D. Yegorenkov, "Electron-drift velocity determination in CF₄ and SF₆ in a strong electric field from breakdown curves of low-pressure RF discharge", Appl. Phys., Vol. 32, p. 2647, 1999.
 [9] 송병두, 하성철, "볼츠만 방정식에 의한 CF₄ 분자가스의 전하이동속도특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 17권, 11호, p. 1254, 2004.
 [10] W. Ziomek and E. Kuffel, "Breakdown prebreakdown characteristics of SF₆/CF₄ mixtures in non-uniform electric field", 1999. 11th International Symposium on High Voltage Engineering, Vol. 3, No. 467, p. 243, 1999.
 [11] J. Berg and E. Kuffel, "Breakdown voltage characteristics of SF₆/CF₄ mixtures in uniform and non-uniform field gaps", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, No. 2252, p. 128. 1995.
 [12] T. Nitta, N. Yamada, and Y. Fujiwara, "Area effect of electrical breakdown in compressed

- SF₆", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, Iss. 2, p. 625, 1974.
- [13] 서호준, 이동희, "SF₆계 혼합가스의 뇌임펄스 절연파괴특성", 전기전자재료학회논문지, 18권, 7호, p. 667, 2005.
- [14] T. R. Blackburn, Z. Z. Li, and B. T. Phung, "Investigation of corona discharge in SF₆ using a computer-based data acquisition system", 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, p. 1215, 1991.