

불평등전계에서 SF₆/CF₄ 혼합 가스의 SLI, AC 절연내력 특성

論 文

57-2-15

SLI, AC Breakdown Voltage Characteristics of SF₆/CF₄ Mixtures Gas in Nonuniform Field

黃 青 虎[†] · 成 許 慶^{*} · 許 昌 洙^{**}

(Cheong-Ho Hwang · Heo-Gyung Sung · Chang-Su Huh)

Abstract - Although many studies have been carried out about binary gas mixtures with SF₆, few studies were presented about breakdown characteristics of SF₆/CF₄ mixtures. At present study the breakdown characteristics of SF₆/CF₄ mixtures in non-uniform field was performed. The experiments were carried out under AC voltage and standard lightning impulse (SLI) voltage. Breakdown characteristics were investigated for SF₆/CF₄ mixtures when AC voltages and standard lightning impulse voltage was applied in a needle-plane. The needle-plane electrode whose gap distance was 3 mm were used in a test chamber. SF₆/CF₄ mixtures contained from 0 to 100% SF₆ and the experimental gas pressure ranged from 0.1 to 0.5 MPa. The breakdown characteristics of SF₆/CF₄ mixtures in non-uniform field may be influenced by defects like needle-shaped protrusions. In case of slowly rising SLI voltage and AC voltage it is enhanced by corona-stabilization. This phenomena caused by the ion drift during streamer development and the resulting space-charge is investigated. In non-uniform field under negative SLI voltage the breakdown voltage was increase linearly but under positive SLI voltage the breakdown voltage increase non-linearly. The breakdown voltage in needle-plane electrode displayed N shape characteristics for increasing the content of SF₆ at AC voltage. SF₆/CF₄ mixture has good dielectric strength and arc-extinguishing properties than pure SF₆. This paper presents experimental results on breakdown characteristics for various mixtures of SF₆/CF₄ at practical pressures. We could make an environment friendly gas insulation material with maintaining dielectric strength by combing SF₆ and CF₄ which generates a lower lever of the global warming effect.

Key Words : Breakdown, AC Voltage, standard lightning impulse voltage, SF₆, CF₄

1. 서 론

새로운 혼합 가스는 고전압차단기에 관심 있는 매체로서 현재 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에 사용된 혼합 가스는 SF₆ 가스와 CF₄ 가스 물질로 구성되어있다. CF₄ 가스는 전자부극성이 약함에도 불구하고, SF₆/CF₄ 혼합 가스에서는 다른 SF₆/N₂ 혼합 가스에 대비하여 회복전압 상승비율이 매우 우수하다. 이러한 우수한 효율성에 기대하여 저온환경의 실적용에 대한 SF₆/N₂ 혼합 가스들의 단점을 대체할 훌륭한 후보 가스이다[1]. 본 연구의 초점은 이 새로운 SF₆/CF₄ 혼합 가스에 대한 전력기기 절연가스로서의 적합성을 찾는 데 있다. 차가운 저온기후의 전력설비 운영에서 순수 SF₆ 가스의 사용은 상대적인 고액화 온도에 있어서 많은 한계점에 직면하고 있다. 순수 CF₄ 가스는 -47 °C의 임계온도를 가지고 있다. 이처럼 SF₆/CF₄ 혼합 가스는 순수 SF₆ 가스보다 낮은 임계온도를 가지고 있을 뿐 아니라 SF₆/N₂

가스와 비교하여 더 우수한 아크 소멸 특성을 가지고 있다. 이 SF₆/CF₄ 혼합가스의 절연과피 전압특성은 CF₄ 가스에서 SF₆ 가스양의 감소와 함께 선형적으로 감소되었다[2]. 현재 본 논문은 불평등전계하에서 AC, SLI 전압을 제공하고 SF₆/CF₄ 혼합 가스의 차등변화율과 같은 매개변수와 함께 절연과피 능력을 실험을 통하여 데이터로 나타내었다.

2. SF₆/CF₄ 가스의 물리적인 특성적용

SF₆ 가스는 송변전 계통에서 사용되며 전력설비를 보호하여 니켈 반응관 속에서 플루오르를 보내면서 상온 및 상압에서는 가스 상의 물질로서 중량비가 21.95%의 유황과 78.05%의 불소로 만들어지는 무색, 무취, 무미의 기체로서 열적, 화학적 특성이 안정하며 내열성, 비연소성, 비부식성, 비폭발성과 강한 절연내력 특성 및 우수한 아크 소호 능력을 가지고 있고 절연과피 시 내압상승이 적은 관계로 현재 고전압 절연 기기에 많이 사용되고 있다. 하지만 SF₆ 가스는 저온 및 높은 압력에서 액화하기 쉬우며 금속이물질로 인한 국부적인 전장상승에 매우 민감한 반응을 보이는 단점이 있다. 특히 SF₆ 가스는 냉각에 있어 가장 곤란한 문제점을 가지고 있고, 열을 운반하는 능력이 낮아 고전압, 대용량 설비에 적용하기에는 많은 한계점을 나타내고 있으며, 또한 적외선 흡수력이 크고 화학적 불활성 때문에 지구 대기권으

† 교신저자, 正會員 : 仁荷大 電氣學科 博士課程
E-mail : hch7642@hanmail.net

* 學生會員 : 仁荷大 電氣工學科

** 正會員 : 仁荷大 電氣工學科

接受日字 : 2007年 10月 22日

最終完了 : 2007年 12月 28日

로부터 신속히 제거되지 못하는 관계로 성층권 오존을 파괴하는 온실 가스 물질로 알려져 있다. 이러한 이유로 인하여 현재 SF₆ 가스의 사용량을 적절히 줄이면서도 좋은 절연내력을 유지하기 위하여 N₂, CO₂, Dry-Air, PFC 가스 등 완충 가스와 SF₆ 가스를 혼합한 혼합 가스의 절연내력에 대한 특성연구가 활발히 이루어지고 있다[3].

PFC 가스는 일반 유기화합물의 수소 원자를 전기화학적 방법으로 모두 불소로 치환한 물질로서 이 화합물은 염소나 수소를 전혀 포함하지 않기 때문에 현재 오존층을 파괴할 염려가 없는 좋은 물질로 나타나고 있다. 아울러 국내에서는 불연소성에 무색, 무취의 가스이며 화학적으로 매우 안정하고, 고체 표면에 흡착하기 쉬운 특성을 가지고 있으며, 큰 전자부착단면적과 절연내력이 높고 또한 냉각 특성이 우수한 PFC에 대한 연구가 부족한 실정이다. 이러한 PFC 가스에는 CF₄, C₂F₆, C₃F₈, C₄F₁₀, C₆F₁₄ 등이 있다[4]. 특히 이 PFC 계열 중 무독성이고, 다른 PFC 가스 계열보다 높은 임계압력 가지고 있는 CF₄ 가스와 혼합한 가스의 절연 내력에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 이 CF₄ 가스는 PFC 계열 가스 중에서 온난화지수(GWP)가 CO₂의 6300배로 다른 물질보다 낮고 무독성이며, 절연성능도 높아 대체 가스 후보로서 아주 유망한 가스이다. 아울러 CF₄ 가스는 전자에너지가 7eV 부근에서 부착단면적이 가장 크고 비탄성충돌 때문에 전자에너지를 저하시켜 전자수가 시간과 더불어 감소하는 전자 부성 가스로 절연내력이 좋은 관계로 본 연구에서는 SF₆ 가스와 CF₄ 가스를 선정하여 이를 불평등전계 중에서 SF₆/CF₄ 혼합 가스로 만들어 그 혼합 차등비율에 따른 절연내력과 물리적 현상을 분석하였다[5].

분석에 사용된 전극은 침상 돌기물이 부착된 평행판 전극을 사용하였다. 여기서 침대 평판 전극을 선택한 이유는 절연내력이 혼합 가스의 봉입압력과 전극형상에 따라 달라지는데 있어 절연내력을 저하시키기 때문에 침대 평판 전극을 사용하는 것을 검토해 보았다. 불평등 전극 하에서 SLI 전압과 AC 전압을 측정 분석하였으며, 그 절연과피 특성조사는 SLI 전압과 AC 전압이 불평등전계 내에서의 침대 평판 전극에서 시험챔버 내부로 SF₆/CF₄ 혼합 가스가 공급될 때, 그 가스혼합 차등비율과 압력변화에 따른 절연과피 특성을 조사하여 SF₆ 가스를 대체하기에 충분한 가스인지를 조사하였다. 조사결과 SF₆/CF₄ 혼합 가스의 혼합비에 따른 압력상승 변화에서, AC 절연과피 전압특성은 순수 CF₄ 가스에 SF₆ 가스를 20% 간격으로 증가시키면서 투입하기 시작하면 절연과피전압이 급격히 상승하였다. CF₄ 가스에 비해 SF₆ 가스의 투입량이 점차 많아지기 시작하면 N-특성 현상이 나타났다. 또한, SLI 전압에서 절연과피 전압은 SF₆ 가스의 첨가량이 많아짐에 따라 증가되었고, SLI 부극성 전압이 SLI 정극성 전압보다 높게 나타났으며, 순수 SF₆ 가스의 절연과피 전압특성은 SLI 정극성 전압을 인가 시 단조 증가하는데 반해, SLI 부극성의 경우에는 0.2 Mpa 이상에서 SLI 정극성 전압에 비해 높은 전압에서 약간 포화 상승하는 절연과피 전압 특성을 나타냈다.

3. 실험

3.1 실험장치

그림 1은 실험에 사용된 실험 장치의 구성도를 모의한 개략도를 그림으로 나타낸 것이다. 본 연구에 사용된 챔버는 스테레스 스틸재질로 그 크기는 시험챔버 내부 공간 직경이 270 mm, 높이 180 mm가 되도록 하였으며, AC 전압과 SLI 전압을 인가하기에 충분한 절연내력을 가지도록 제작하였다. 또한 그림 2는 불평등 전계를 만들기 위해 시험챔버내에서 사용한 침대 평판 전극의 개략도이다. 이때 불평등전계를 만들기 위한 침대 평판 전극에서 전극의 재질은 물리화학적 강도가 높은 스테레스 스틸재질로 제작하였으며, 침전극의 길이는 6 mm, 끝 반경은 0.3 mm로 하였고, 평판의 직경은 60 mm, 두께는 10 mm, 곡률반경은 1.5 mm로 만들어 실험하였다. 또한, 실험에 사용한 전원은 Marx형 임펄스 발생장치(IEC규정 1.2 x 50 μ s 표준과형, 3단 스테이지)로 발생시킨 버 임펄스(SLI) 전압을 이용하여 실험하였다. 또한, SF₆/CF₄ 가스 혼합에 있어서는 그 가스 혼합비율을 정확히 조절하여 실험하기 위해 가스 혼합기(오차±2%, 최대기체유량: SF₆/CF₄ 5 l/min, YUTAKA MX-2S)를 주문제작하였으며, 가스의 혼합비는 Flow Meter의 유량을 통해 혼합 가스의 비율을 조절하였다. 그리고 SF₆ 가스와 CF₄ 가스 외에 기타 공기 등 불순물이 섞이지 않도록 하기 위하여 진공 펌프(GVD-101, ULAVAC)를 사용하였다.

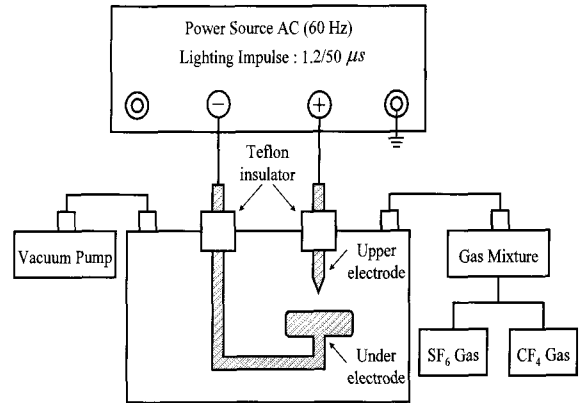


그림 1 실험장치의 개략도

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental setup

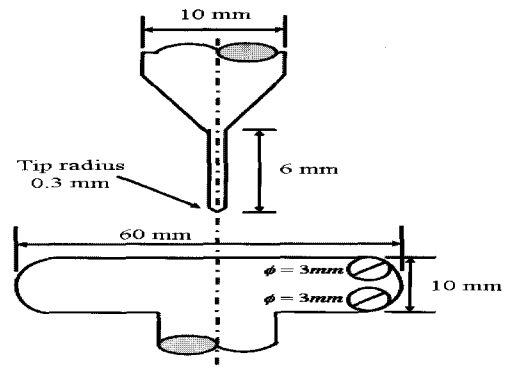


그림 2 침- 평판 전극 개략도

Fig. 2 A schematic diagram of needle-plane electrode

3.2 실험방법

시험 챔버내에서 SF₆/CF₄ 혼합 가스의 총 압력변화는 0.1-0.5 MPa 범위로, 불평등전계에서의 침대 평판 전극간격을 3 mm로 고정시켰으며, SF₆/CF₄ 혼합 가스 비율은 각기 20%씩 교차 가감 차등비율로 하여 그 특성을 조사하였고, 전압원은 표준 뇌 임펄스 전압(SLIV) 하에서 실험하였다. 실험에 앞서 실험 시험챔버 내부는 실험하기 전 이물질이 없애기 위해 챔버 내부 및 전극을 메탄올로 깨끗이 닦아내고, 1.33 x 10⁻⁶ Mpa에 대한 진공펌프 (GVD-101, ULAVAC)에 의해 챔버 안의 공기를 챔버 밖으로 10⁻¹ Torr 까지 배출시킨 후 가스혼합기를 사용해서 혼합가스를 챔버 내부로 0.1-0.5 MPa까지 채웠으며, 그리고 SF₆(순도99.99%)와 CF₄(순도99.99%)가스는 혼합기(MX-2S)를 통해 시험 챔버 내부로 주입시켰다. 이때 가스 주입 후 전극의 표면을 안정화시키기 위해 몇 차례 방전을 시킨 후 실험하였으며, 절연파괴가 일어난 후 3분간의 시차를 두고 다음 절연파괴 실험을 수행하였다. 또한 표준 뇌 임펄스 전압은 3스테이지 Marx형 발전기에 의해서 발생된다. 그리고 절연파괴 전압은 정전용량 분배기를 통한 고전압 탐침(P6015A, Tektronix)에 의해 측정되어졌다. 각 압력과 혼합비율에서의 절연 파괴전압은 SLI 실험의 경우 승강법을 통하여 20번의 절연파괴점을 찾았으며 AC 실험의 경우 10번의 절연파괴점을 찾아 평균값으로 나타내었다. 각 혼합비의 실험이 끝나면 챔버 내부를 다시 깨끗이 닦아내서, 이전의 실험에서 챔버 내부에 묻어있던 혼합 가스의 영향이 최소화되도록 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 불평등전계에서의 SF₆/CF₄ 혼합 가스의 혼합 비율에 따른 SLI 절연파괴전압

불평등 전계에서 SLI 절연파괴 전압 특성은 각기 정, 부극성의 양극성 전압으로 실험하였다. 이때 불평등 전계에서 혼합 가스 차등비율에 따른 절연파괴 전압을 침대 평판 전극간격을 3 mm로 고정시키고, 정, 부극성 SLI 전압의 절연 파괴전압 변화를 압력 상승에 따라 어떻게 변화하는지를 실험으로 살펴보았다. SLI 절연파괴전압에 대한 측정은 0에서 100%까지 CF₄ 가스를 기준으로 SF₆ 가스양을 차등 변화시키면서 SF₆/CF₄ 혼합 가스에 대하여 조사하였다. 또한 최대 및 최소 SLI 절연파괴 전압값도 조사되었다. 그림 3은 순수 CF₄ 가스(100%)에서의 절연 파괴 전압을 나타내는데, 그 절연파괴 특성을 살펴보면 SLI 정극성 전압에서 절연 파괴 전압은 압력이 증가해도 많은 상승을 보이지 않는다. 다만 SLI 부극성에서만 압력의 상승함에 따라 침 전극 앞단의 공간전하의 확산에 의한 소멸이 억제되는 전장 안정화 작용으로 인하여 절연파괴 전압과 초기 코로나 개시전압이 약간 더 증가함을 볼 수 있었다. 전체적으로 이와 같은 특성은 CF₄ 가스도 전자부착 가스이지만 전자부착력이 낮아서 압력의 상승에 비해서 절연 파괴 전압은 많이 상승하지 못하는 것으로 보인다.

그림 4는 SF₆ 20%/CF₄ 80% 혼합 가스에서의 절연파괴 전압 특성으로 순수 CF₄ 가스에 비해서 압력상승에 따른 절연파괴 전압의 상승 기울기가 훨씬 높음을 알 수 있다. 압

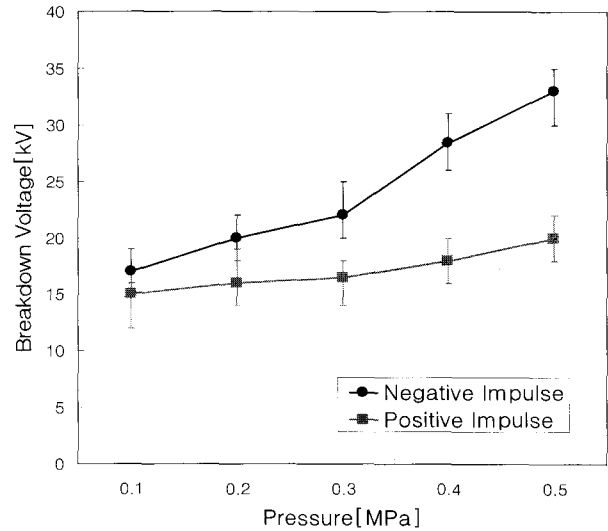


그림 3 CF₄ 100%에서 압력에 따른 정극성 SLI, 부극성 SLI 절연파괴 전압, 전극간격 3 mm

Fig. 3 positive SLI, negative SLI breakdown voltage as a pressure of CF₄ 100% gas, gap distance 3 mm

력이 낮을 때는 절연 파괴 전압이 순수 CF₄ 가스의 경우와 비슷하지만, 압력이 높아지면 2배 정도의 절연 파괴 전압 특성을 가지는 것을 볼 수 있다. 이처럼 절연파괴 전압이 높아지는 것은 SF₆ 가스가 전자 부착력이 강하기 때문에 20%의 첨가로도 월등한 절연 파괴 전압을 가질 수 있는 것으로 보인다. 순수 CF₄ 가스와 20%의 SF₆ 가스가 첨가된 혼합가스의 경우에서 가장 많은 절연 파괴 전압의 상승이 관찰되었다.

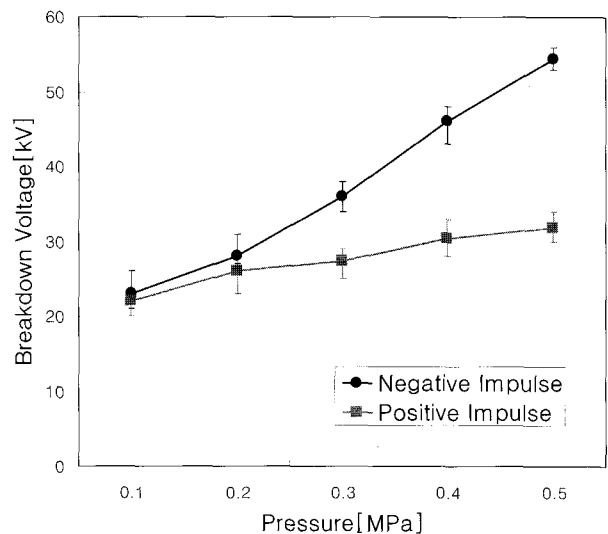


그림 4 SF₆ 20%/CF₄ 80%혼합 가스에서 압력에 따른 정극성 SLI, 부극성 SLI 절연파괴 전압, 전극간격 3 mm

Fig. 4 positive SLI, negative SLI breakdown voltage as a pressure of SF₆ 20%/CF₄ 80% mixture, gap distance 3 mm

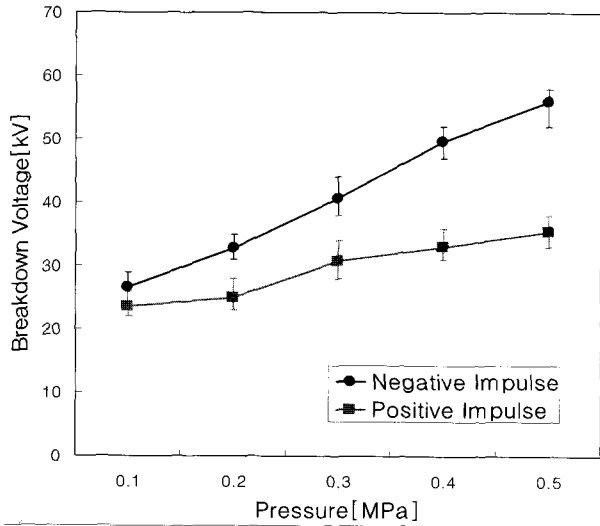


그림 5 SF₆ 40%/CF₄ 60%혼합 가스에서 압력에 따른 정극성 SLI, 부극성 SLI 절연파괴 전압, 전극간격 3 mm
 Fig. 5 positive SLI, negative SLI breakdown voltage as a pressure of SF₆ 40%/CF₄ 60% mixture, gap distance 3 mm

그림 5는 SF₆ 40%/CF₄ 60% 혼합 가스에서의 절연파괴 전압 특성을 나타내고 있다. 그림 5는 그림 4와 비교하여 SF₆ 20%/CF₄ 80% 혼합 가스에서의 절연파괴 전압 특성곡선과 비슷함을 살펴볼 수 있으나, 다만 0.2 MPa 부근에서 SLI 정, 부극성의 절연파괴 전압이 약간 더 상승하는 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 SF₆ 가스의 20% 추가 혼합비 상승에 따른 전자부착력이 절연파괴전압을 약간 더 높이는 것으로 보인다.

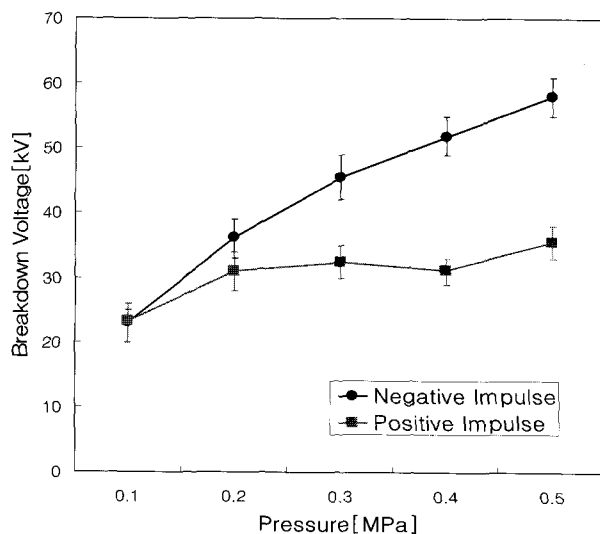


그림 6 SF₆ 60%/CF₄ 40% 혼합 가스에서 압력에 따른 정극성 SLI, 부극성 SLI 절연파괴 전압, 전극간격 3 mm
 Fig. 6 positive SLI, negative SLI breakdown voltage as a pressure of SF₆ 60%/CF₄ 40% mixture, gap distance 3 mm

그림 6은 SF₆60%/CF₄ 40% 혼합 가스에서의 절연파괴 전압 특성을 나타내고 있는데, 그림 5와 비교하면 보면 SF₆ 40%/CF₄ 60 % 혼합 가스에서의 절연파괴 전압 특성곡선과 비슷함을 보이나 SLI 정극성에서만 0.3 MPa부분에서 약간 포화현상을 보이다가 0.5 MPa에서는 그림 5와 같아짐을 볼 수 있다. 이것은 SLI 정극성 전압이 인가될 경우 초기전자가 침 전극에서 출발하여 평판전극으로 향하여 진전하는 역할을 하는 선구자기구에 의해 리더가 진전하게 되는데, 이때 침 전극에서 방출된 초기전자가 이온의 탈리 작용에 의해 침전극의 앞단에는 정이온이 잔류하게 되며, 이 잔류된 정이온과 공간전하의 양과 분포는 가스압력의 영향을 받기 때문인 것으로 보인다. 가스압력이 증가함에 따라 0.3 MPa 부분에서 약간 포화현상을 보이는 것은 공간전하의 생성시간이 짧아져 이 공간전하의 확산과 소멸이 억제됨으로 인하여 계단상 리더의 진전 경로가 약화되어 일어나는 포화현상으로 사료된다.

그림 7은 SF₆ 80% / CF₄ 20% 혼합 가스에서의 절연파괴 전압 특성으로 그림 6과 대비하여 살펴보면 SF₆ 60% / CF₄ 40% 혼합 가스에서 SLI 정극성에서만 0.3 MPa부분에서 약간 포화현상을 보이다가 0.5 MPa에서는 그림 5와 같아짐을 볼 수 있다.

그림 8은 순수 SF₆ 가스(100%)에서만 절연파괴 전압 특성으로 0.1 MPa의 경우에 SLI 정극성 및 부극성 전압은 모두 같이 22 kV 부근에서 절연파괴 현상이 일어났다. 그러나 가스 압력이 증가함에 따라 SLI 정극성 전압의 경우에는 단조 증가하나, SLI 부극성 전압의 경우에는 0.2 MPa 부근에서 약간 포화하다가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이로 인하여 SLI 정, 부극성 개시전압도 0.1 MPa에서 일치하는 것으로 보인다. 이제 전체적인 특성을 간추려 살펴보면 불평등 전계하에서 SLI 전압 특성은 SLI 부극성 전압이 항상

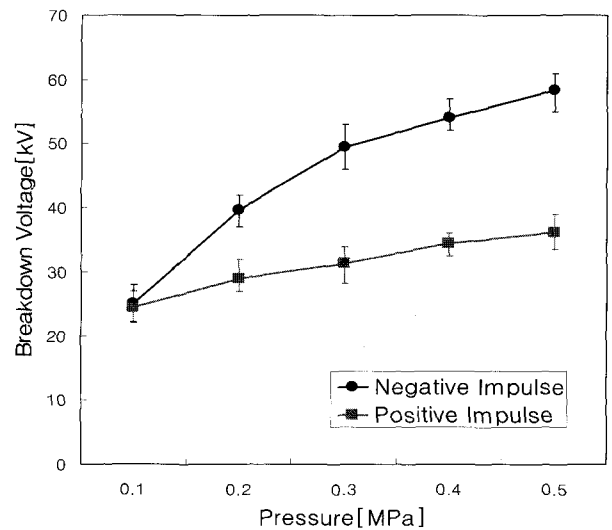


그림 7 SF₆ 80%/CF₄ 20% 혼합 가스에서 압력에 따른 정극성 SLI, 부극성 SLI 절연파괴 전압, 전극간격 3 mm
 Fig. 7 positive SLI, negative SLI breakdown voltage as a pressure of SF₆ 80%/CF₄ 20% mixture, gap distance 3 mm

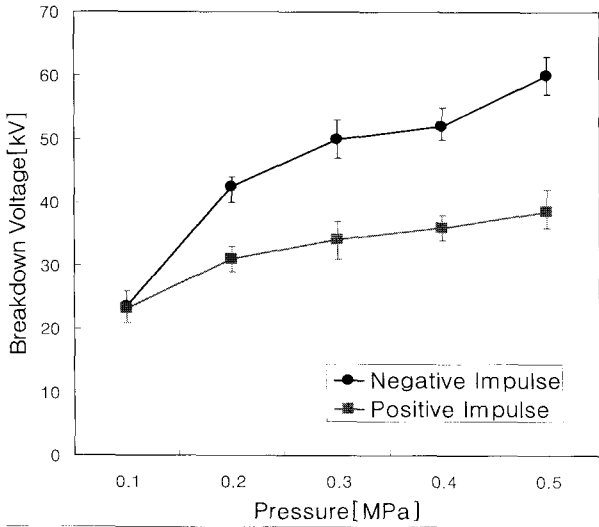


그림 8 SF₆ 100%에서 압력에 따른 정극성 SLI, 부극성 SLI 절연파괴 전압, 전극간격 3 mm

Fig. 8 positive SLI, negative SLI breakdown voltage as a pressure of SF₆ 100%, gap distance 3 mm

다 SLI 정극성 전압보다 높다는 것을 알 수 있으며, SLI 정극성 전압을 기준으로 볼 때 SLI 부극성 전압은 비선형이며, 또한 전체적인 SLI 전압은 SF₆/CF₄ 혼합 가스에서는 SF₆ 가스량의 증가와 함께 증가함을 볼 수 있다.

4.2 SF₆/CF₄ 혼합 가스 압력에 따른 AC 절연파괴 전압

불평등 전계에서 혼합 가스 차등비율에 따른 AC 절연파괴 전압을 침대 평판에서 전극간격 3 mm로 고정시켜 압력 상승에 따라 절연파괴 전압이 어떻게 변화하는지를 실험으로 살펴보았다. 그림 9는 SF₆/CF₄ 혼합 가스 각각의 혼합비율에서 압력을 0.1 - 0.5 MPa까지 변화시키면서 절연파괴 전압을 한 그래프에서 살펴볼 수 있도록 나타낸 것이다. 우선 순수 CF₄ 가스 100% (SF₆ 0%, CF₄ 100%)에서의 AC 절연파괴 전압은 가스 압력이 0.1 - 0.5 MPa 까지 증가해도 많은 상승을 보이지는 않는다. 그러나 가스 혼합비를 SF₆ 20%/CF₄ 80% 비율로 하면 절연파괴 전압특성이 순수 CF₄ 가스에 비해서 압력상승에 따른 절연파괴 전압 상승의 기울기가 상당히 높게 나타나는데 이를 그래프로 살펴보면, 압력이 0.1 MPa로 낮을 때는 절연파괴 전압이 순수 CF₄ 가스의 경우와 비슷하지만, 압력이 0.5 MPa로 높아지면 거의 2배 정도의 절연파괴 전압 특성을 가지는 것을 볼 수 있다. 이처럼 절연파괴 전압이 높아지는 것은 SF₆ 가스가 전자 부착력이 강하기 때문에 20%의 SF₆ 가스의 첨가만으로도 월등한 절연파괴 전압을 가지는 것으로 보이며, 이것은 다른 가스 혼합비와 비교하여 보아도 순수 CF₄ 가스에 SF₆ 가스를 처음으로 첨가 시에는 많은 절연파괴 전압이 상승하는 것으로 보인다. 다음으로 SF₆ 40%/CF₄ 60% 혼합 가스에서의 절연파괴 특성을 SF₆ 20%/CF₄ 80% 혼합 가스에서의 절연파괴 특성과 비교하여 살펴보면 전체적인 절연파괴 특성 곡선은 비슷하지만 0.2 MPa 부근에서 절연파괴 전압이 약간 더 상승하는 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 현

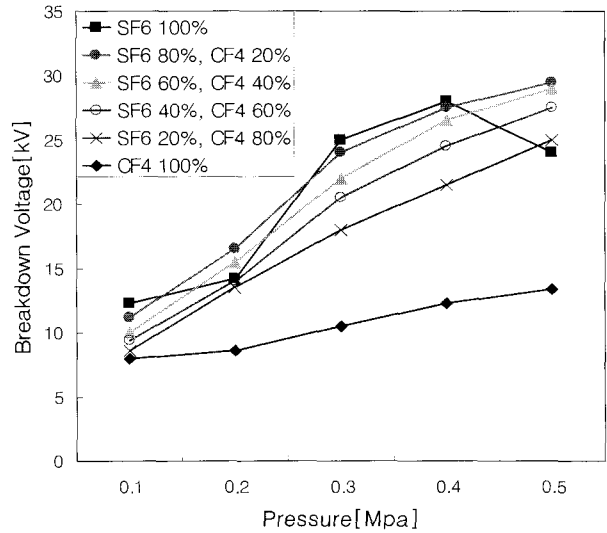


그림 9 SF₆/CF₄ 혼합 가스 압력에 따른 AC 절연파괴 전압, 전극간격 3 mm

Fig. 9 AC breakdown voltage as a pressure of SF₆/CF₄ mixtures, gap distance 3 mm

상은 20%의 SF₆ 가스 추가 투입에 따라 절연파괴 전압이 더 높아진 것으로 보인다. 이어서 SF₆ 60%/CF₄ 40% 혼합 가스에서의 절연파괴 전압특성을 SF₆ 40%/CF₄ 60% 혼합 가스에 비교하여 살펴보면 SF₆ 가스를 CF₄ 가스에 비해 20% 더 많이 첨가시킬 시 절연파괴 전압이 전체적으로 5 kV 정도 상승되어 나타난다. 이어서 SF₆ 80%/CF₄ 20% 혼합 가스에서의 절연파괴 전압특성을 SF₆ 60%/CF₄ 40% 혼합 가스에서의 절연파괴 전압특성과 비교하여 살펴보면 SF₆ 가스 투입량이 CF₄ 가스에 비해 40% 정도 많아짐에 따라 약간 N-특성현상이 나타나기 시작한다. 그리고 최종적으로 침대 평판 불평등 전계에 교류전압을 인가한 경우 순수 SF₆ 가스(SF₆ 100%)만 투입 시에는 좀 더 선명하게 N-특성 현상이 나타나기 시작하는데, 이 N-특성 현상이란 순수 SF₆ 가스에 대한 교류절연파괴 전압의 가스의존 특성에서 극대치가 나타난 후 가스압력을 더욱 높이면 절연파괴전압은 일단 저하한 후 다시 상승하는 현상을 말한다[6,7]. 이처럼 가스 압력을 0.1 Mpa에서부터 점차로 증가시키에 따라 절연파괴 전압이 극대치가 되는 가스 압력이 0.4 Mpa 에서 나타나는데, 이것은 가스 압력이 낮은 범위에서 부분방전에 의해 만들어진 공간전하에 의해 침 전극 선단의 전계가 완화되어 절연파괴 전압이 높게 일어나는 코로나 안정화 작용 때문이다. 이어서 가스압력을 0.5 Mpa까지 더욱 높이면 큰 부분방전이 발생되어 그대로 절연파괴에 이르게 되므로 절연파괴전압은 일단 급격히 저하하는 N 특성 형상을 보인다.

SF₆ 및 절연 가스들은 압력이 증가함에 따라 절연 내력이 증가하지만 더욱 높은 압력에서는 가스의 높은 전자 부착 특성 때문에 전자 이동 속도가 떨어져 절연 내력이 감소된다. 전자 부착 특성에 의한 전자 이동 속도의 감소는 SF₆ 가스에서 뚜렷하게 나타난다. 한편 SF₆ 가스에 CF₄ 가스를 혼합하면, 전자 이동 속도 감소는 순수 SF₆ 가스에 비하여 둔화되므로 절연 내력이 낮아지는 것을 막아준다. 그러나 압력이 증가함에 따라 SF₆의 전자 이동 속도 감소가 커져

결국 그림 9와 같이 압력이 0.5 MPa에서 순수 SF₆ 가스는 혼합 가스에 비해 절연 내력이 낮아지는 것을 알 수 있다. 여기서 압력이 0.2 MPa일 때 순수 SF₆ 가스가 각각 SF₆ 80%/CF₄ 20%, SF₆ 60%/CF₄ 40% 혼합 가스보다 절연 내력이 낮아지는 이유는 평균값을 나타내었기 때문으로 최대값, 최소값을 나타내었을 때 오차 범위에 해당된다. 아울러 실험 결과 그림에 보이는 바와 같이 SLI 전압 인가 시에는 순수 SF₆ 가스의 절연과피 특성에서는 AC 전압에서의 같은 N-특성이 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 SLI 전압이 인가되는 경우 코로나안정화 작용이 미약하기 때문인 것으로 보인다.

5. 결 론

본 논문에서는 현재 온실 가스를 일으키는 가스로 지정되어 배출규제 대상으로 되어있는 SF₆ 가스를 대체하기 위한 새로운 절연매체를 개발하고자 하는 목적으로 SF₆ 가스와 CF₄ 가스를 혼합하여 불평등 조건하에서 SF₆/CF₄ 혼합 가스의 혼합 비율에 따른 AC 전압과 SLI 정, 부극성 절연과피 전압 특성을 실험하였다. 이로부터 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 불평등 침대 평판 전극에서 절연과피 전압은 SF₆ 가스의 첨가에 의해 증가되었고, 부 임펄스의 절연과피 전압은 정 임펄스 전압보다 높게 나타났다. 그리고 절연과피 전압은 0.2 Mpa 이상의 압력에서 SLI 정, 부극성 전압사이에서 달라짐을 볼 수 있었다.

2) 불평등 전계하에서의 압력 상승에 따라 SLI 정, 부극성 전압의 절연과피 전압을 비교하여 살펴보면 순수 CF₄ 가스에 비해 SF₆ 가스의 절연과피 전압은 0.2 MPa이상에서 급속히 증가하였지만, 0.1 MPa에서 절연과피전압은 서로 유사하였다. 그러나 SLI 부극성 전압은 0.2 MPa와 0.5 MPa사이에서 SLI 정극성보다 높다. 그것은 침대 평판 사이의 공간전하에 의해 영향이 있는 것으로 보인다. 또한 0.5 MPa에서 절연과피 전압은 순수 CF₄(100%)에 비하여 CF₄/SF₆ 혼합 가스 시 높게 상승하는 것으로 나타났다.

3) 불평등전계 조건하에서의 순수 SF₆ 가스의 절연과피 전압특성은 SLI 정극성 전압을 인가 시 단조 증가하는데 반해, SLI 부극성의 경우에는 0.2 MPa이상에서 약간 포화 상승하였다.

4) 불평등전계 조건하에서 순수 CF₄ 가스의 절연과피 전압특성은 SLI 정극성 전압에서는 절연과피 전압이 높지 않으나 SLI 부극성에서는 0.3 MPa이상에서 높게 나타났다.

5) 불평등전계 조건하에서 순수 CF₄ 가스에 SF₆ 가스가 첨가되기 시작하면 바로 0.2 MPa 압력에서 절연과피 전압이 높아짐을 알 수 있다.

6) AC 전압에서는 SF₆ 가스양이 많아짐에 따라 0.2 MPa 내에서 절연과피 전압이 급속히 증가하다 순수 SF₆(100%) 가스에서는 N-특성 절연과피 전압특성이 나타나 보였다. 0.5 MPa에서는 SF₆/CF₄ 혼합 가스가 순수 SF₆ 가스 보다 더 높은 절연과피 전압을 가졌다.

7) 불평등 전계에서 절연과피 전압 특성은 CF₄ 가스에 SF₆ 가스양의 증가와 함께 선형적으로 증가하므로, CF₄ 가스는 절연과피 특성을 선형적으로 감소시킨다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] M. L. Trudeau, M. F. Frechette and R. Y. Laroque, "Sparks in SF₆ and SF₆/CF₄ Atmospheres : impact on metallic and insulating surfaces". conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996.
- [2] W. Ziomek and E. Kuffel, "Breakdown and prebreakdown characteristics of SF₆/CF₄ mixtures in non-uniform electric field", High Voltage Engineering, Eleventh International Symposium on Conf. Vol.3, No. 467, p.243, 1999.
- [3] Y. Qiu, 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] 황정호, 박신우, 김남렬, 허창수. "평등전계에서 SF₆/CF₄ 혼합 가스의 AC 절연내력 특성", 한국전기전자재료학회지, vol. 20, No.4, p. 381, April 2007.
- [5] 송병두, 하성철, "볼츠만 방정식에 의한 CF₄ 분자 가스의 전자이동속도특성에 관한 연구", 전기전자재료학회 논문지, Vol.17, No.11, p.1252, November 2004.
- [6] M. Zou and J. P. Reynders, "Synergy between SF₆ and other gases to enhance dielectric strength", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, p.251, 1997.
- [7] 서호준, 이동희, "SF₆계 혼합 가스의 뇌임펄스 절연과피 특성", 전기전자재료학회, Vol.18, No.7, p.667, 2005.
- [8] V. N. Maller and M. S. Naidu, "Advances in High Voltage Insulation And Arc Interruption in SF₆ And Vacuum", Pergamon press, pp.1~11, 1981.
- [9] D. Kind and K. Feser, "High-voltage test techniques", Newnes, p. 14. 2001
- [10] G. J. Cliteur, Y. Hayashi, E. Haginomori, 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.
- [11] 서상현, 유희영, 김상남, 하성철, "SF₆ 가스의 전리 및 부착계수에 관한 연구", 조명 전기설비학회지 Vol.10, No.6, p. 622, 1996.
- [12] J. Berg, E. Kuffel, "Breakdown voltage characteristics of SF₆/CF₄ mixtures in uniform and non-uniform field gaps", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report., Conf, p. 126 - 129, 1995

- [13] T. Nitta, N. Yamada, Y. Fujiwara, "Area effect of electrical breakdown in compressed SF₆", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-93, Issue. 2, p.625, 1974.

저 자 소 개



황 청 호 (黃 靑 虎)

1958년 7월 1일생. 2000년 서울산업대 제어계측학과 졸업. 2002년 인하대 공학대학원 전기공학과 졸업 2002년~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 032-860-7408

Fax : 032-860-7408

E-mail : hch7642@hanmail.net



성 히 경 (李 舜 信)

1981년 1월 4일생. 2006년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 032-860-7408

Fax : 032-860-5822

E-mail : sunhg3@hotmail.com



허 창 수 (許 昌 洙)

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대 전기공학과 졸업. 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년~현재 인하대 전기공학과 교수

Tel : 032-860-7408

Fax : 032-860-5822

E-mail : csh@inha.ac.kr