

불평등전장에서 SF₆/CO₂ 혼합기체의 뇌임펄스 전구방전특성

이복희*, 오성균*, 백영환*, 안창환**, 전덕규***

*인하대학교 차세대 고전압전력기술연구센터, **인하공업전문대학, ***서울산업대학교

Characteristics of lightning impulse preliminary breakdown discharge under non-uniform electric field in SF₆/CO₂ mixtures

B. H. Lee*, S. K. Oh*, Y. H. Baek*, C. H. Ahn**, D. K. Jeon***

*HIERC Inha University, **Inha Technical College, ***Seoul National University of Technology

Abstract - This paper presents the experimental results on the preliminary breakdown characteristics under a highly non-uniform electric field in SF₆/CO₂ gas mixtures. The impulse preliminary breakdown developments are investigated by the measurements of corona current and light emission images. As a result, the preliminary breakdown development mechanisms for both positive and negative polarities are same. The first streamer corona is initiated at the tip of needle electrode, and the leaders develop with a stepwise propagation and bridge the test gap. The pause time of leader pulses in the positive polarity is significantly shorter than that in the negative polarity. Also, the time interval between the first streamer corona onset and breakdown in the negative polarity was much longer than that in the positive polarity. The discharge channel paths in the positive polarity were zigzag. On the other hands, the leader channel in the negative polarity was thicker than that in the positive polarity.

불평등전장에서 SF₆/CO₂ 혼합기체의 임펄스 코로나방전의 특성을 분석하기 위한 모의 GIS 실험 장치를 설계 및 제작하였다. 그림 1에 실험계 구성 및 측정시스템의 개략도를 나타내었다.

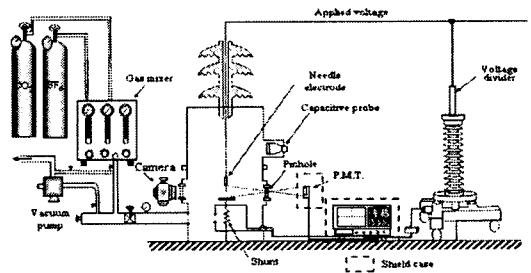


그림 1. 실험장치의 개략도

Fig. 1. A schematic diagram of the experimental setup

1. 서 론

6불화유황(Sulfur hexafluoride (SF₆))은 우수한 절연특성 때문에 전력기기의 절연재료로서 사용되어 왔다. 그러나 SF₆기체는 대기의 지구온난화에 기여하는 온실효과를 일으키는 기체로 알려졌다. SF₆기체의 온실효과 가능성 때문에 최근 몇 년동안 혼합기체의 사용이 재고되고 있다. SF₆/CO₂ 혼합기체는 SF₆기체를 대체할 유력한 기체중의 하나로 여겨지고 있다. SF₆기체의 대체기체로서 혼합기체의 절연특성에 관한 많은 연구가 이루어졌고, 특히 SF₆/N₂ 혼합기체에 관한 연구가 수행되어져 왔다.^[1,2] 최근, 절연매체로서 SF₆/N₂ 혼합기체를 사용한 기체절연송전선이 실용화되었다. SF₆/CO₂ 혼합기체내에서 기체분리에 관련된 장점을 가지고 있는 SF₆/N₂ 혼합기체보다 절연내력의 우수함이 보고되어 왔다.^[3,4]

본 연구에서는, 불평등 전장중의 SF₆/CO₂ 혼합기체중에서 스트리머 코로나와 리더 방전 현상의 규명을 위해 침-평판 전극의 임펄스 코로나 방전 특성을 측정하는 일련의 실험을 수행하였다.

전구방전 전진과정은 스트리머와 리더코로나 전류, 방전광 신호의 측정을 통해 분석하였다. 또한, 방전 채널은 방전광의 관측에 의해 측정하였다. 실험적 결과는 세부적으로 절연파괴에 이르는 물리적 현상인 스트리머 코로나와 리더전진 과정에 기반을 두어 논의하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험계 구성

350 kV의 임펄스 내전압을 가지는 콘덴서형 절연 부싱을 시험용기의 상부에 설치하였다. 스테인레스 재질의 시험용기의 하부에 침-평판 전극으로 구성되어 설치하였다. 그림 2에 침-평판 전극의 사진 및 세부 구성을 나타내었다. 침 전극의 지름은 0.6 mm이고, 길이는 15 mm, 갭 간격은 22 mm이며, 평판 전극의 지름은 90 mm이다.

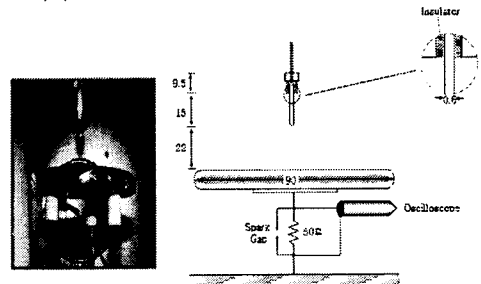


그림 2. 침-평판 전극계 사진 및 구성도

Fig. 2. Photo. and schematic diagram of the needle - to - plane electrode system

시험 전압은 100MHz의 대역폭을 가지는 용량성 분압기로 측정하였다. 스파크 갭을 병렬로 연결한 50 [Ω]의 분류기(shunt)로 코로나 전류를 측정하였다. 방전자 증배관(Photo-Multiplier Tube, Hamamatsu H9305-04)을 방전광 신호를 관측하기 위해 설치하였으며, 고속 카메라를 이용하여 전진경로를 관측하였다.

온실효과를 일으키는 기체의 온난화 정도를 나타내는 지구온난화지수(global warming potential : GWP)는 이산화탄소(CO₂)를 1로 기준할 때 메탄 21, 이산화질소 310, 수소불화탄소 1,300, 과불화탄소 7,000, 6불화유황 23,900이다.^[5]

CO₂ 또한 온실기체로 규정된 기체이지만 SF₆에 비해 지구온난화 지수가 1/23,900 정도로 낮으므로 CO₂기체의 제안은 충분히 실험의 목적에 부합하다고 판단이 된다. 그리고, 혼합 비율을 20 %로 고정하여 실험을 하게 된 이유는 SF₆의 소량의 혼합으로도 절연내력을 갖출 수 있으며, 실용화 연구에서 대체로 SF₆의 혼합비율을 20~40% 정도로 평가하고 있다.

2.2 실험방법

시험 용기를 유최전 펌프로 0.133 kPa까지 배기시킨 후, 상용등급의 SF₆와 CO₂기체를 혼합기를 사용하여 주입하였다. 20%의 SF₆기체와 80%의 CO₂ 기체를 0.1~0.5 MPa까지 단계적으로 증가시켜 가면서 실험하였다. 정, 부극성의 뇌임펄스 전압을 침 전극에 인가하였다. 전원선을 통하여 계측기에 침입하는 외부 잡음을 감쇠시키기 위해 절연 변압기와 라인필터를 적용하였다. 인가전압, 전구방전전류와 방전광 신호는 디지털 오실로스코프(TDS 644R, analog band width: 500 MHz, sampling rate: 2.5 GS/s)를 통해 동시에 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전구방전특성

SF₆/CO₂ 혼합기체 중에 설치된 침-평판전극의 임펄스 전구방전 특성을 분석하기 위해서 전구방전전류와 방전광 신호를 측정하였다. 0.3 MPa의 기체압력에서 정·부극성의 뇌 임펄스전압에 대한 전구방전전류와 방전광 신호의 대표적인 파형의 예를 그림 3에 나타내었다.

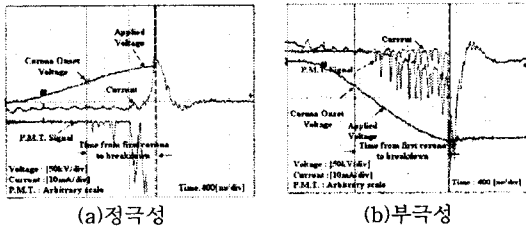


그림 3. 0.3 MPa에서 SF₆/CO₂ 혼합기체내의 인가전압, 코로나 전류 및 방전광 신호의 파형
Fig. 3. Waveforms of the applied voltage, corona currents and light emission signals in SF₆/CO₂ gas mixtures at 0.3 MPa

절연파괴직전의 방전광 신호는 초기 스트리머 코로나 펄스에 비해 매우 강하다. 전구방전은 침 전극의 끝단에서 스트리머 코로나에 의해 발달되고, 전자사태는 접지된 평판전극을 향해 진전된다. 계단상 리더전전은 기체 압력과 인가된 전압의 극성에 강한 의존성을 나타내었으며, 정·부극성의 전구방전 진전메커니즘은 기본적으로 같다. 각각의 계단상 리더 사이의 리더전전기구로 나타나는 리더 휴지기간은 인가전압과 기체압력에 의해 영향을 받는다. 리더 휴지기간은, 정·부극성의 공간전하는 반대방향으로 움직이는 스트리머 코로나에 의해 만들어지고, 공간전하 쌍극자는 다중 광이온화공정을 가지는 주변 전장의 증대를 야기한다.

3.2 SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체 중에서 초기코로나 발생에서 절연파괴까지의 시간특성

3.1절에 기술한 것처럼, 시험 갭의 전기적 절연파괴는 인가전압의 극성에 무관하게 초기 스트리머 코로나 전류 후에 몇몇의 리더 방전의 진전에 의해 발생한다. 그림 4는 SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체의 압력의 함수로써 초기 스트리머 코로나발생에서 절연파괴까지의 시간차이의 분포를 나타내었다.

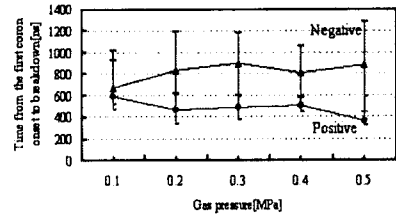


그림 4. SF₆(20 %)/CO₂(80 %) 혼합기체 중에서 압력에 대한 초기 코로나 발생에서 절연파괴까지의 시간특성
Fig. 4. Characteristics of the time interval between the first corona onset and breakdown as a function of the gas pressure in SF₆(20%)/CO₂(80%) mixtures

정극성에서 초기 스트리머 코로나 개시전압으로부터 절연파괴에 이르기까지의 시간간격은 압력이 증가함에 따라 비례적으로 약간 감소하였다. 초기 코로나 발생에서 절연파괴에 이르기까지의 전구방전 형성시간을 측정 한 데이터의 넓은 편차는 초기 전자 생성의 불규칙성에 의해 발생할 수 있다. 정극성에서 전구방전과정의 형성 시간은 부극성의 것보다 짧았다. 그와는 반대로, 부극성에서는 코로나에 의해서 발생한 공간전하의 안정화가 절연파괴에 이르는 긴 시간간격과 높은 절연파괴전압의 결과를 가져왔다. 그러나, 부극성 뇌임펄스전압에서, 계단상 리더펄스사이의 시간간격은 길게 나타났다.

3.3. 초기코로나 개시전압의 압력의존성

전구방전은 초기 스트리머 코로나에 의해 발달되고, 스트리머-리더변환으로 진전하였다. SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체 중에서의 기체압력을 변수로 하는 초기코로나 개시전압을 그림 5에 나타내었다.

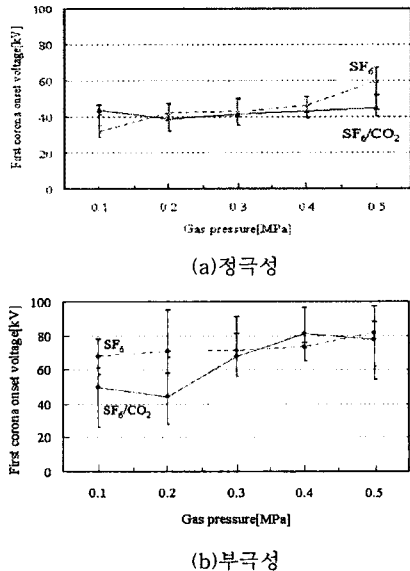


그림 5. 초기 스트리머 코로나 개시전압의 압력의존성
 Fig. 5. Dependence of the first corona onset voltages on the gas pressure

정극성의 경우, SF₆ 기체내에서 초기 코로나 개시 전압은 기체압력이 증가함에 따라 증가하지만, SF₆/CO₂ 혼합기체에서는 거의 일정하였다. 또한, SF₆/CO₂ 혼합기체내에서 부극성의 스트리머 코로나 개시전압의 기체 압력의존성이 현저하고, 초기 코로나 개시전압의 변동도 두드러지게 크게 나타났다. 정극성에서 초기전자는 불순물이나 부이온으로부터의 탈리 작용에 의해 생성된다. 초기 전자사태는 초기전자에 의한 이온화 진전에 의해 발생되고, 그 이후의 전자사태는 광 전리작용에 의해 일어난다. 반면에, 부극성에서 초기전자는 음극 표면으로부터의 전계방출에 의해 생성되고, 초기 스트리머 코로나는 시작된다.^{16,71}

정·부극성 사이에 초기코로나개시전압의 차이는 초기 전자 생성 메커니즘에 밀접하게 관련성이 있다고 사료된다.

3.4 방전광 현상

SF₆기체와 SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체 중에서 정·부극성의 뇌임펄스 전압이 인가되어 섬락이 발생하기까지의 전체 방전진전과정 동안에 발생하는 방전광에 대한 현상을 고성능 디지털 카메라(Canon, EOS 20D)를 이용하여 방전경로를 촬영하였다.

그림 6의 사진은 가스압력별 방전경로를 나타낸 것으로 가시적으로 정극성에서 보다 부극성일 때의 빛의 강도가 높고, 방전 채널의 굵기도 굵은 것을 알 수 있다.

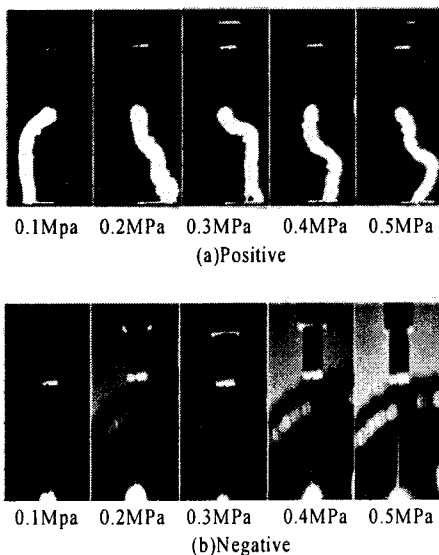


그림 6. SF₆(20 %)/CO₂(80 %) 혼합기체중의 방전광의 사진
 Fig.6. Photographs of light emission images in SF₆(20%)/CO₂(80%) mixtures

정극성의 경우 방전경로가 기체압력의 증가에 따라 꼬불꼬불한 경로로 진전하며, 전체 방전경로의 길이는 증가하는 것으로 보인다. 그러나 부극성의 경우 방전경로는 거의 직선상으로 나타났으며, 방전경로의 형상과 기체압력사이의 관계는 특별히 나타나지 않았다. 방전경로의 광의 세기는 기체압력의 증가에 따라 밝게 나타났다.

4. 결 론

SF₆기체와 SF₆(20 %)/CO₂(80 %)의 혼합기체 중에서 전구방전특성과 방전진전경로의 고찰을 위한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기코로나개시전압은 가스압력에 비례하여 증가하였으며, 초기코로나의 발생에서부터 절연파괴에 이르기까지의 시간은 부극성에서 훨씬 길게 나타났다.
- (2) 전구방전은 침 전극 끝단에 발생한 초기 코로나에 의해 시작되어 계단상으로 진전되는 간헐적 양상을 나타내었으며, 진전 스텝 간격은 부극성에서 훨씬 길게 나타났다.
- (3) 정극성의 경우 방전진전경로의 형태는 꼬불꼬불하게 나타났으며, 부극성 방전채널의 굵기는 정극성의 것보다 굵게 나타났다. 또한 기체압력이 증가함에 따라 정·부극성에서 모두 빛의 밝기가 강렬해짐을 볼 수 있었다.
- (4) 비유질감 및 환경적인 측면에서 SF₆기체의 소량 혼합 조건을 20%로 하여 실험한 결과, 100% SF₆기체보다 낮은 레벨의 초기코로나특성을 나타냄을 알 수 있었다. 부극성 보다 낮은 초기코로나 개시특성을 지니는 정극성을 기준으로 절연협조의 측면에서 연구가 진행된다면, GIS내에서 발생할 급속성 이물질에 대한 절연내력을 예측할 수 있고 고장에 대비할 수 있을 것이다.

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원 사업에 의해 작성되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Kawamura, Bok-Hee Lee, T. Nishimura and M. Ishii, "Breakdown Characteristics of SF₆ Gap Disturbed by a Metallic Protrusion under Oscillating Transient Overvoltages", Jpn. J. Appl. Phys. 33, 2043(1994).
- [2] S. Hotsuka, K. Eguchi, M. Cho, S. Yuasa, S. Okabe, and M. Hikita, "Light emission properties of SF₆ gas mixture in impulse breakdown process", 13th ISH, 99.367-370, 2003.
- [3] H. Saitoh, K. Morita, T. Kikkawa, N. Hayakawa, and H. Okubo, "Impulse Partial Discharge and Breakdown Characteristics of Rod-Plane Gaps in N₂/SF₆ gas Mixtures", IEEE Trans., on Dielectrics and Insulation, Vol.9, No.4, pp. 544~550, 2002.
- [4] Y.Qiu, E. Kuffel, "Comparison of SF₆/N₂ and SF₆/CO₂ Gas Mixtures as Alternatives to SF₆ Gas", IEEE Trans., on DEI, Vol.6, No.6, pp.892-895, 1999.
- [5] <http://www.me.go.kr/>, "지구온난화에 대한 이해"
- [6] L. Niemeyer, L. Ullrich and N. Wiegart, "The Mechanism of Leader Breakdown in Electronegative Gases", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 2, pp. 311~312, 1989.
- [7] T. Kawamura and Bok-H. Lee, "Transient Impulse Breakdowns of SF₆ gas in Inhomogeneous Electric Fields", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.38, No.8, pp.4898~4904, 1999.