

SF₆와 SF₆/CO₂ 혼합기체 중에서의 뇌임펄스 전구방전의 특성

(Characteristics of lightning impulse pre-breakdown discharge in SF₆ and SF₆/CO₂ mixtures)

이복희 · 오성균* · 백영환

(Bok-Hee Lee · Sung-Kyun Oh* · Young-Hwan Baek)

Abstract

This paper describes the experimental results of the pre-breakdown phenomena in SF₆/CO₂ mixtures under non-uniform electric fields caused by positive and negative lightning impulse voltages. SF₆/CO₂ mixtures have an advantage of an environmental aspect and cost reduction, and safety aspects. In order to analyze the pre-breakdown processes in SF₆/CO₂ mixtures stressed by impulse voltages, pre-breakdown current and luminous signals were measured by a shunt and a photo-multiplier tube, respectively. Dielectric strengths of SF₆/CO₂ mixtures were investigated. Additionally, characteristics of discharge channels were observed by high speed cameras and the physical properties were discussed. The pre-breakdown propagates with a stepwise process. The time to breakdown from the corona onset point in positive polarity was shorter than that in negative polarity. The time intervals of positive leaders are shorter than those of negative leaders, and the path of positive leader channel is zigzag.

1. 서론

육불화유황(SF₆)은 절연재료로서의 특성이 우수하기 때문에 송변전용 전력기기의 절연매체로서 폭넓게 사용되고 있다. 또한, 가스절연개폐장치(Gas-Insulated Switchgear : GIS)의 소형화와 경제적으로 비용을 낮추는데 기여하였다.

대기압에서 SF₆기체는 공기에 비해 약 2배의 절연내력을 가지고, 압력이 증가하면 이 비율 또한 증가한다. 게다가 무독성, 불연성, 그리고 우수한 아크 소호특성을 가지고 있다.

하지만, SF₆기체는 높은 지구 온난화 가능성이 있는 것으로 지목되고 있다. SF₆기체와 특성이 비슷한 불활성 기체이면서 물리적, 화학적 특성이 우수한 조건을 갖춘 순수기체를 발견하지 못하였다. SF₆/CO₂ 혼합기체는 순수 SF₆를 대체할 친환경적인 매체로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

SF₆기체와 같은 강한 부정기체와의 혼합기체는 가격을 낮출 수 있고, 승화점의 강하와 부정기체의 소량 혼합에 의한 상승효과로 인한 절연내력의 비선형적인 증가의 이점을 기대할 수 있다.[1~4]

실제 GIS내에서 금속 이물질이 존재할 경우 그로 인하여 절연내력이 대단히 약화되는 현상이 나타난다. 따라서 급준성 과도 과전압에 대한 대책이 요구되며 정확한 절연 기체의 특성의 파악이 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 기체절연개폐장치에서 발생할 수 있는 바늘모양의 금속 이물질을 모의하여 침대 평판 갭으로 불평등 전장을 형성하는 전극계

를 구성하고, 정·부극성 임펄스전압에 대한 전구방전과 섬락이 일어났을 때 발생하는 방전광의 특성과 혼합기체의 대체 가능성에 관해 논의하였다.

2. 본론

2.1. 실험계 구성

그림 1은 실규모 GIS를 모의할 수 있는 실험 장치를 간략하게 도시하였다.

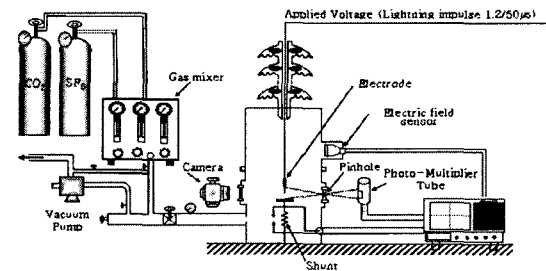


그림 1. 실험장치의 개략도

Fig. 1. A schematic diagram of the experimental apparatus

실험에 사용된 용기는 상부에 뇌임펄스전압을 인가하기에 충분한 절연내력을 가진 부싱(BIL 350kV, In 400A)을 설치하였고, 스테인레스 재질의 실험 용기는 원통형으로 내경이 396mm이며, 상부와 하부로 나뉘어 플랜지로 접합되어 있다. 상부에는 돌출형으로 전압을

측정할 수 있도록 용량성 전장센서가 설치되어 있으며, 하부에는 부분방전과 절연파괴시에 발생하는 전류를 측정하기 위해 분류기를 설치하였다.

GIS내에 발생할 수 있는 금속 이물질을 모의하여 구성된 침-평판 전극계의 사진 및 전극과 전류측정용 분류기의 개략도를 그림 2에 나타내었다.

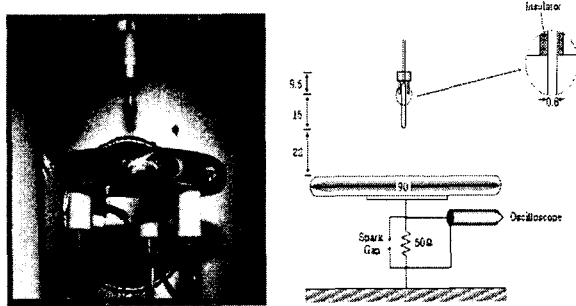


그림 2. 침-평판 전극계 사진 및 구성도
Fig. 2. A photograph and schematic diagram of the needle-plane electrode system

그림 2에서 보는 바와 같이 침 전극의 끝단 직경은 0.6 mm이고, 길이 15 mm이며, 평판 전극은 직경 90 mm의 크기로 침 전극 하부에 갭의 간격이 22 mm가 되도록 설치하였다. 평판 전극 하단에는 전구방전전류 측정용 분류기를 제작하여 설치하였다.

2.2. 측정방법

실험 용기에 연결된 유희전 펌프를 이용하여 실험 용기를 수 mTorr까지 배기시켰다. 그리고, 상용의 CO₂와 SF₆기체를 사용하였으며, 두 기체의 혼합을 위해 기체혼합기를 사용하였고, 기체압력은 0.1~0.5MPa를 단계적으로 증가시켜 가면서 혼합 기체를 주입하였다.

정, 부극성의 뇌임펄스 전압(1.2/50 μ s)은 실험용기의 절연부싱을 통해 침 전극에 인가하였다.

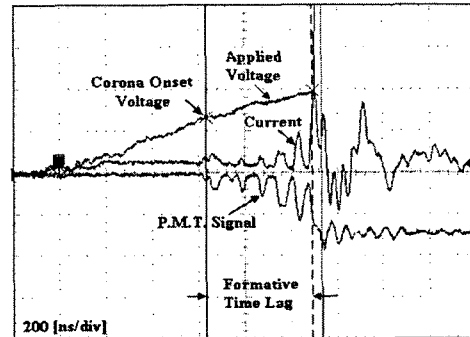
인가전압의 측정은 챔버 상단에 설치한 전장센서를 사용하였고, 전구방전전류는 50 Ω 분류기로 측정하였으며, 분류기의 출력단에 10:1 감쇠기(attenuator)를 연결하여 전류를 검출하였다. 또한, 전구방전에서 절연파괴에 이르기까지 발생하는 전구방전전류를 통해 방출되는 광은 광전자증배관(Photo-Multiplier Tube, Hamamatsu H9305-04)을 이용하여 관측하였다. 오실로스코프(TDS 644B, analog band width: 500MHz, sampling rate: 2.5GS/s)를 통해 인가전압, 전구방전전류, 광 신호는 측정하였다.

실험에 사용한 뇌임펄스전압은 측정 장비에 악영향을 미치기 때문에 계측용 전원은 절연변압기와 필터를 사용하여 보호하고, 방사 노이즈를 차단하기 위해서 오실로스코프와 광전자증배관은 차폐함 내부에 설치하였다.

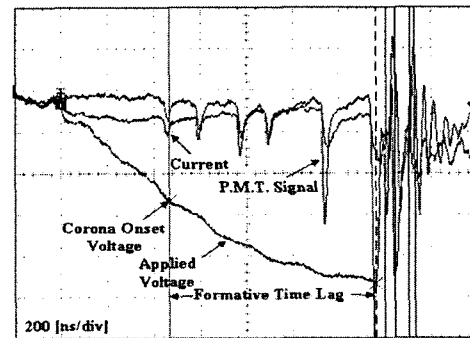
3. 결과 및 고찰

3.1. 전구방전신호

정·부극성의 뇌임펄스 전압을 인가하여 측정된 파형 중 혼합기체 중에서 0.3MPa일 때의 인가전압과 전구방전전류, 리더의 방전광 신호의 대표적 파형을 그림 3에 나타내었다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 3. 0.3MPa의 SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체 중에 인가된 뇌 임펄스전압, 전구방전전류와 방전광 신호
Fig. 3. Waveforms of the applied lightning impulse voltage, prebreakdown current and luminous signals in SF₆(20%)/CO₂(80%)mixtures of 0.3MPa

전압이 인가된 시점으로부터 전극 사이에 전장이 인가되면 초기전자가 발생하게 되는데,[3] 이 시점을 전구방전전류의 신호로 검출할 수 있지만, 좀더 정확한 측정을 위해 초기전자의 광자를 검출하고자 광전자증배관을 이용하여 얻어지는 광 신호에 의해 결정하였다.

그림 3에서 보면 전구방전전류의 신호와 광신호의 대응관계를 알 수 있다. 또한, 코로나 초기전류에서 절연파괴까지의 시간을 분석하기 위해 초기 광신호의 최고점을 기준으로 측정하였다.

광학적 신호는 스트리머 코로나 또는 리더스텝과 일치한다.[4] 따라서 전자사태에 의한 스트리머-리더 변환을 통해 진전하는 메커니즘이라고 볼 수 있다.

3.2. SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체 중에서 초기코로나발생에서 절연파괴까지의 시간특성

SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체의 압력에 대한 형성시간지연특성을 그림 4에 나타낸다.

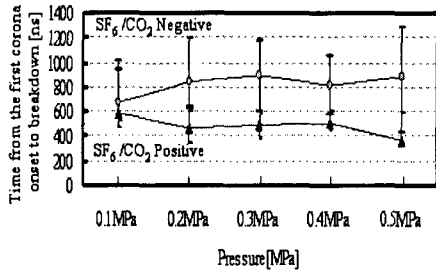


그림 4 SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체 중에서의 압력에 대한 초기코로나 발생에서 절연파괴까지의 시간특성

Fig. 4. Characteristics of the time from the first corona onset to breakdown as a function of the gas pressure in SF₆(20%)/CO₂(80%) mixtures

형성지연시간은 초기코로나의 발단에서 절연파괴에 이르기까지의 시간간격으로 정의한다. 또한, 리더의 전파시간과 일치하고 공간전하효과와 관련이 있다.[4]

그림 4에서 보면 부극성일 때는 압력이 증가함에 따라 형성지연시간이 다소 증가함을 볼 수 있었지만, 정극성일 경우에는 압력이 증가할수록 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다.

정극성의 형성시간지연은 부극성보다 훨씬 짧으며, 리더의 진전스텝간격은 부극성에 비해 매우 짧게 나타났다.

3.3. 초기코로나 개시전압의 압력의존성

SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체 중에서의 압력에 대한 초기코로나 개시전압의 변화 추이를 그림5에 나타내었다.

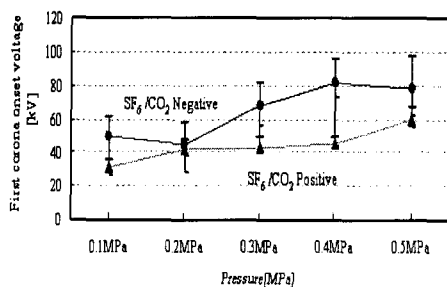


그림 5. SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체 중에서의 초기코로나 개시전압

Fig. 5. Corona onset voltage in SF₆(20%)/CO₂(80%) mixtures

SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체 중에서 가스압력이 증가할수록 정·부극성 동일하게 점차적으로 초기코로나 개시전압은 점차적으로 증가하였다. 이는 형성지연시간과도 관계가 있으며, 기체압력이 증가함에 따라서 형성지연시간의 감소를 의미한다.

특히 부극성의 초기코로나개시전압은 정극성의 경우보다 매우 높으며, 이는 초기전자의 발생 메카니즘과도 직접적인 상관성을 가지고 있는 것으로 볼 수 있다.

정극성의 경우 초기전자가 기체중의 불순물이나 탈리작용에 의해 발생하며, 기체 압력의 증가에 따라 자유행정거리가 짧아지므로 초기전자가 발생하는 전압은 높아지는 것으로 판단된다.

또한 부극성의 경우 초기전자는 침전극의 끝단의 전장의 세기가 높은 부분에서의 전자의 전장방출 작용으로 방사되며, 가스압력의 증가에 따라 전리증식이 어려워져 코로나개시전압은 상승하는 것으로 볼 수 있다.

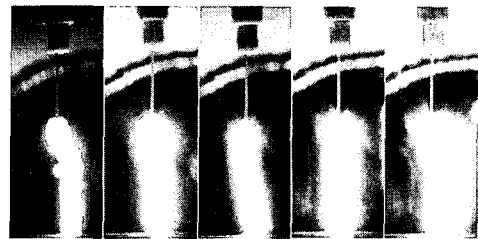
3.4. 방전광 현상

SF₆기체와 SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체중에서 정·부극성의 뇌임펄스 전압이 인가되어 섬락이 발생하기까지의 전체과정동안에 발생하는 방전광에 대한 현상을 알아보기 위해서 고성능 디지털 카메라(Canon, EOS 20D)를 이용하여 촬영하였다.

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



0.1MPa 0.2MPa 0.3MPa 0.4MPa 0.5MPa
(a) 정극성



0.1MPa 0.2MPa 0.3MPa 0.4MPa 0.5MPa
(b) 부극성

그림 6. SF₆(20%)/CO₂(80%) 혼합기체중의 방전광 현상
Fig.6. Light emission phenomena in SF₆(20%)/CO₂(80%) mixtures

정극성의 경우 방전경로가 기체압력의 증가에 따

라 꼬불꼬불한 형상으로 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 비례하는 특성으로 나타났으며, 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 압력이 증가함에 따라 정·부극성에서 모두 빛의 밝기가 강렬해짐을 볼 수 있었다.

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

참 고 문 헌

- [1] 李福熙, “高電壓大電流工學”, 淸文閣, pp. 64~69, 1993
- [2] Tadasu Takuma, Shoji Hamada and Osamu Yamamoto, “APPLICATION OF A GAS MIXTURE WITH *c*-C₄F₈ IN GAS INSULATION”, High Voltage Engineering Symposium, 22~27 August 1999 Conference Publication No.467, © IEE, 3.197.P3, 1999
- [3] 金正一, “SF₆와 SF₆-N₂ 혼합기체중에서 불평등전계 절연파괴특성”, 仁荷大學校 工學碩士學位論文, pp.1~3, 2000
- [4] Mazen Abdel-Salam, Hussein Anis, Ahdab El-Morshedy, Roshdy Radwan, “High-Voltage Engineering Theory and Practice”, Marcel Dekker, Inc., pp. 49-50, 2000
- [5] Tatsuo Kawamura, Bok-Hee Lee, Takahiko Nishimura, and Masaru Ishii, “Breakdown Characteristics of SF₆ Gap Disturbed by a Metallic Protrusion under Oscillating Transient Overvoltages”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33, No.4A, pp. 2043-2049, April 1994