

### SF<sub>6</sub> 와 Dry air 가 혼합된 가스의 평등/불평등 전계에 의한 절연파괴특성 연구

이상화\*, 정현재\*, 정승용\*, 류철취\*, 방항권\*\*, 구자윤\*  
\*한양대학교, \*\*한국전력공사

#### Breakdown Characteristics of Mixtures of SF<sub>6</sub> and Dry air under Uniform and Nonuniform Electric Field

Sang-hwa Lee\*, Hyun-jae Jung\*, Seung-young Jeong\*, Cheol-hwi Ryu\*, Hang-kwon Bang\*\*, Ja-yoon Koo\*  
\*Hanyang University, \*\*KEPCO

**Abstract-** 본 연구는 SF<sub>6</sub>와 Dry-air(건조공기)가 혼합된 절연매체의 절연 특성과 부분방전 특성 연구를 위하여 기초실험용 챔버와 70kV급 GIS mock up 을 이용하여 교류전압을 인가하여 실험이 수행되었다. 전자의 경우, Sphere gap 및 Needle/Plate 전극시스템을 이용하여 순수 SF<sub>6</sub>가스와 Dry-air의 절연내력을 비교하고, 챔버의 압력을 5기압으로 유지한 상태에서 Dry-air와 SF<sub>6</sub>가스의 혼합비를 변화시키면서 절연내력이 측정되었다. 후자의 경우, 기초실험에서 도출된 SF<sub>6</sub>가스와 Dry-air의 최적의 혼합비율을 선택한 후, 방전 개시전압과 부분방전 양상을 순수 SF<sub>6</sub>가스의 결과와 비교 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 GIS 사고의 주요원인이 되는 결함들, 즉 Protrusion, Floating, Free moving particle 들을 인위적으로 모의하여 Mock up 내부에 설치하고 내부 압력을 5기압으로 유지한 상태에서 수행되었다.

전자의 경우, 0.5~5 기압 범위내 에서 Dry-air 압력을 변화시켰을 때 절연내력은 전극시스템에 무관하게 순수 SF<sub>6</sub>가스의 결과치의 40~50%정도 이다. 또한 챔버 압력이 5기압일 경우, Needle/Plate 전극을 이용했을 경우, Dry-air 가 80% 혼합된 절연매체는 순수 SF<sub>6</sub>가스 절연내력의 80%정도 이다. 후자의 경우, 인가전압을 고정 시켰을 때, 부분방전 패턴과 방전크기는, 순수 SF<sub>6</sub>가스와 Dry-air 가 80% 혼합된 절연매체는 동일한 패턴과 방전크기를 나타내고 있다.

이러한 결과를 근거로, 가스 압력이 5기압에서 운전되는 전력기기의 절연 매체로서 혼합가스를 사용할 경우, SF<sub>6</sub>가스와 Dry-air의 혼합비는 2:8정도가 적절한 것으로 제안한다.

#### 1. 서 론

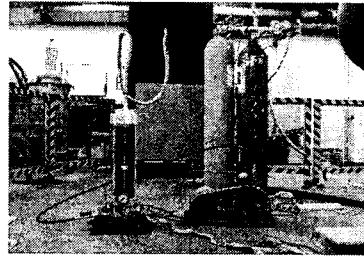
현재 초고압 송변전기기에 적용되고 있는 SF<sub>6</sub>가스는 절연 및 소화성능이 우수하며 회복특성이 뛰어나기 때문에 초고압 기기의 절연매체로서 널리 사용되고 있으나 가격이 비싸고 저온 및 높은 압력에서 액화되기 쉬우며 대기 중으로 방출될 경우에는 온실효과를 야기 시키는 단점을 가지고 있다. 최근 환경에 대한 관심과 규제가 높아지면서 온실가스에 대한 규제로서 교토 의정서가 정식 발효됨에 따라 SF<sub>6</sub>가스는 금후 총량 제한에 의해 사용량이 규제 받을 가능성이 대단히 높다. 따라서 SF<sub>6</sub> 와 Air, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, He 등과 혼합된 절연매체들이 하나의 대안으로 연구되어 절연특성, 안정성 과 경제성들에 대한 분석 결과에 의해 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 혼합체가 연구 개발되어 선진국을 중심으로 상용화되고 있다.

본 연구에서는 현재 대체 절연가스로 주목받고 있는 Dry-air(공기 중에서 수분과 각종 불순물을 제거한 공기)와 SF<sub>6</sub> 가스를 0.5~5기압까지 변화시켰을 때의 절연내력을 비교하였다. 두 기체의 혼합된 절연매체에 대한 실험적 연구를 위하여 기초실험용 챔버의 압력을 5기압으로 유지하고 SF<sub>6</sub>가스와 Dry-air의 혼합비율을 변화시켰다. 전극은 평등전계를 위하여 직경 50mm 인 Sphere gap, 와 불평등전계를 위하여 침 끝 곡률반경이 1mm 인 Needle / 평판전극 을 챔버 내부에 설치하고 교류 전압을 인가하여 절연 파괴 전압을 측정하였다. 또한 실제 전력설비에 적용할 경우, SF<sub>6</sub>가스와 Dry-air의 적절한 혼합 비율을 제안하기 위하여, 70kV급 GIS mock up 내부의 압력을 5기압으로 유지하고 GIS 사고 주요 원인으로 알려진 결함들을 인위적으로 모의하여 SF<sub>6</sub>가스와 Dry-air의 혼합비율을 변화시키며 방전 개시전압과 부분방전크기를 비교분석하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 실험장치 및 방법

절연파괴특성 실험을 하기 위해서 Hipotronics사의 절연파괴시험기(100kV)를 이용하여 연구대상 절연매체에 단시간 절연파괴 시험방법(절연파괴에 상전압까지 1분 내에 상승)을 적용하여 교류전압을 인가하였다.



<그림 1> 실험장치 및 전경

그림 1과 같이, 기초실험용 챔버(200kV AC, 10기압) 내부의 순도를 유지하기 위해서 10<sup>-3</sup>torr의 진공도에 도달한 후 실험목적에 부합되도록 연구 대상 절연매체의 가스 압력을 다양하게 유지하였다. 투입되는 절연매체의 양을 측정하기 위하여 Dwyer사의 Flow Meter(Max1L/min)를 사용하였으며, 압력 측정은 VICTOR사의 Regulator(0-6 atm)를 사용하였다. 이러한 과정을 거쳐 가스양과 압력들이 조정된 후 절연 파괴시험이 수행되었다. 그 결과들을 이용하여 GIS Mock-up(70kV급, 가스압력:5kgf/cm<sup>2</sup>) 내부에 Protrusion, Floating, Free moving particle 3가지 결함을 인위적으로 모의하여 삽입하였고 가스투입과 압력조정은 상기 서술된 방법이 그대로 적용되었다. 전압은 시험변압기(PD free Test transformer, 100kVA)를 이용하여 인가 되었으며 삽입된 결함에 의한 부분방전의 패턴은 IEC 60270에 부합되는 HAEFLEY TE571을 이용하여 분석되었다.

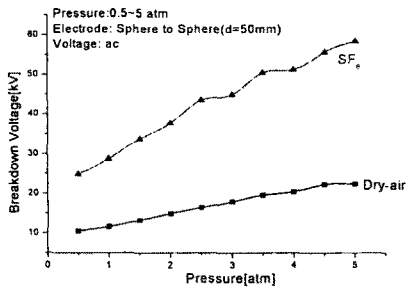


<그림 2> 실험장치 및 전경

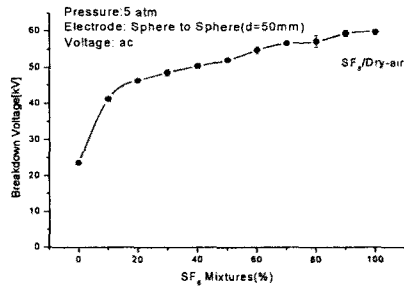
##### 2.2 평등전계에서의 절연파괴 특성

Sphere gap(직경 50mm, 간격 1mm)를 이용하여 거의 평등한 전계를 형성하였으며, SF<sub>6</sub>가스와 Dry-air의 압력을 각각 0.5기압에서 5기압까지 변화시켜가며 절연파괴전압을 측정 비교하였다. 혼합가스의 경우, 챔버의 압력을 5기압으로 유지하고 SF<sub>6</sub>가스혼합비를 10%에서 100%까지 변화시켜가며 교류전압에 대한 절연파괴 전압을 측정하였다.

기압 변화에 따른 순수 SF<sub>6</sub>가스와 Dry-air의 절연파괴 전압을 비교해보면 후자의 절연내력이 그림 3과 같이 전자의 약37~40% 정도로 나타났다. 그림4는 혼합가스(SF<sub>6</sub> 20%, Dry-air 80%) 인 경우 5 기압 하에서의 절연내력은 순수SF<sub>6</sub>가스의 79%정도이다. 또한 특이한 점은 혼합비가 50%를 초과할 경우 절연내력이 순수SF<sub>6</sub>가스의 90~100%에 근접함을 보여주고 있다.



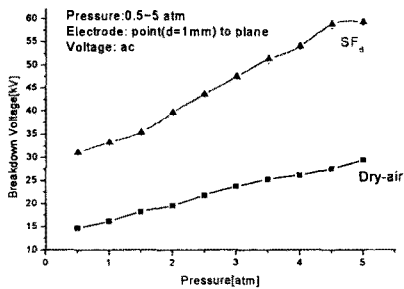
<그림 3> 평등전계에서의 가스별 절연특성



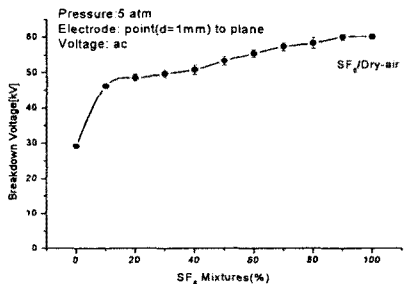
<그림 4> 평등전계에서의 혼합비에 따른 절연특성

### 2.3 불평등전계에서의 절연과피 특성

침 끝 곡률반경이 1mm 인 Needle / 평판전극의 전극간격을 4mm 로 유지 하여 불평등전계가 형성되었고 전술된 방법과 동일하게 가스 압력과 혼합비, 인가전압이 선택되어 실험이 수행되었다. 그림5와 같이 Dry-air의 절연내력은 순수SF<sub>6</sub>의 약 42~51%정도로 나타났으며, 그림6은 혼합가스(SF<sub>6</sub> 20%, Dry-air 80%) 인 경우 5 기압 하에서의 절연내력은 순수SF<sub>6</sub>가스의 82%정도이다. 또한 특이한 점은 혼합비가 40%를 초과 할 경우 절연내력이 순수SF<sub>6</sub>가스의 90~100%에 근접함을 보여주고 있다.



<그림 5> 불등전계에서의 가스별 절연특성

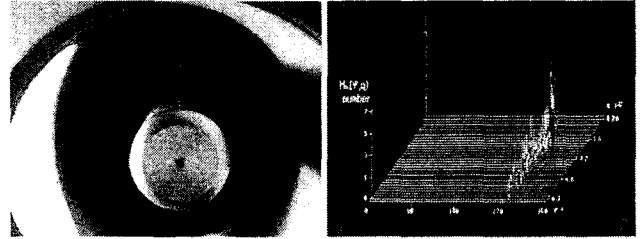


<그림 6> 불등전계에서의 혼합비에 따른 절연특성

### 2.4 인위적 결함을 이용한 부분방전패턴 분석

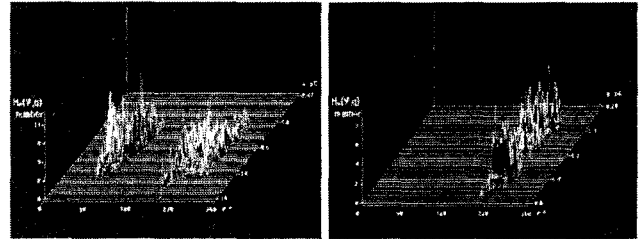
#### 2.4.1 Conductor-Fixed Protrusion

그림7-(a)과 같이 Ogura Needle(곡률반경 100um, 길이 5cm)을 도체에 고정시켜 결함을 모의하였고, 얻어진 부분방전의 패턴은 그림 7과 같다.



(a) Conductor-Fixed Protrusion

(b) 순수 SF<sub>6</sub>



(c) Dry-air

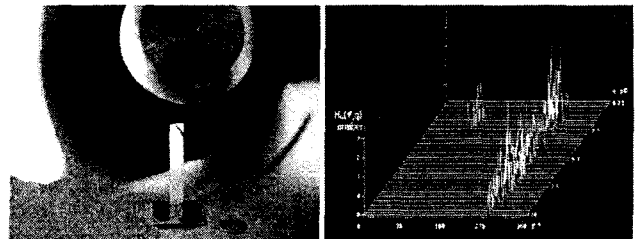
(d) SF<sub>6</sub>+Dry-air 혼합체

<그림 7> Conductor-Fixed Protrusion 부분방전 패턴

인가전압을 16kV 에 고정 시켰을 때, 순수 SF<sub>6</sub>가스와 2:8의 혼합비의 절연매체는 인가전압의 위상 270° 부근에서 유일하게 부분방전이 주로 검출되었으며 방전양은 전자의 경우 6.3pC정도, 후자는 8.6pC정도 검출되었다. 그러나 Dry-air 경우, 동일한 인가전압에서 270° 부근에서 19pC 정도의 방전이 먼저 검출된 후 이어서 90° 부근에서도 방전이 발생되었다.

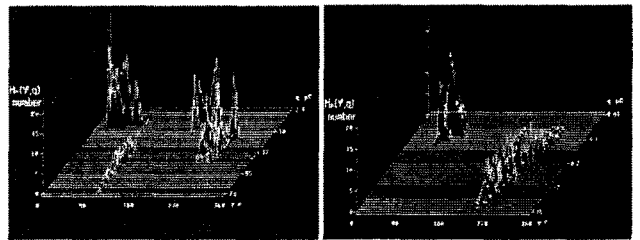
#### 2.4.2 Floating Electrode

그림8-(a)와 같이 Ogura Needle(곡률반경 100um, 길이 5cm)을 GIS 내부에 떠있는 상태로 결함을 모의하였고 얻어진 결과는 그림 8과 같다.



(a) Floating Electrode

(b) 순수 SF<sub>6</sub>



(c) Dry-air

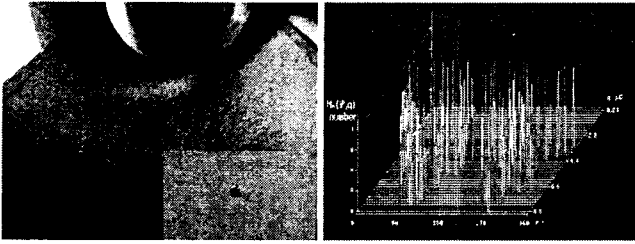
(d) SF<sub>6</sub>+Dry-air 혼합체

<그림 8> Floating Electrode 부분방전 패턴

인가전압을 22kV 에 고정 시켰을 때, 순수 SF<sub>6</sub>가스와 2:8의 혼합비의 절연매체는 인가전압의 위상 90°, 270° 부근에서 부분방전이 주로 검출되었으며 방전양은 전자의 경우 10pC정도, 후자는 16pC정도 검출되었다. 그러나 Dry-air 경우, 동일한 인가전압에서 45°~120°, 230°~300° 부근에서 74pC 정도의 방전이 발생되었다.

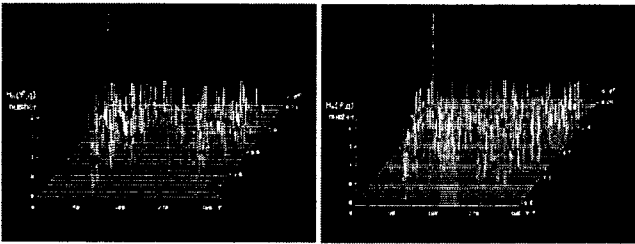
### 2.4.3 Free moving particle

그림9-(a)에서와 같이 알루미늄ball(1mm)을 모의결함으로 사용하여 순수 SF<sub>6</sub>, Dry-air, 혼합가스의 방전특성을 비교하였다.



(a) Free Moving Particle

(b) 순수 SF<sub>6</sub>



(c) Dry-air

(d) SF<sub>6</sub>+Dry-air 혼합체

〈그림 9〉 Free moving particle 부분방전 패턴

동일한 인가전압 30kV에서 검출된 방전양은, 순수 SF<sub>6</sub>가스의 경우 8.8pC 정도, 2:8의 혼합비의절연매체는 9.4pC정도이며 Dry-air는 12pC로 방전이 발생했다. 방전위상에서 전 위상에서 발생하였으며 별다른 차이점이 없었다.

### 3. 결과요약

1. 실험용 챔버의 압력을 0.5~5기압까지 변화 시켰을 때, 순수 SF<sub>6</sub>가스를 기준으로 할 때 Dry-air의 절연내력은 평등전계에서는 37~40% 불평등전계에서는 42~51% 정도이다.
2. 5기압으로 고정된 실험용 챔버내에서 SF<sub>6</sub>가스의 혼합비에 따른 절연내력을 순수SF<sub>6</sub>가스를 기준으로 비교해보면,
  - 평등전계의 경우, 혼합비가 20%인 경우 79% 정도이며, 혼합비가 50% 이상이면 90~100%에 이르고 있다.
  - 불평등전계의 경우, 혼합비가 20%인 경우 82% 정도이며, 혼합비가 40% 이상이면 90~100%에 이르고 있다.
3. GIS Mock up의 압력을 5기압으로 유지하고 인위적 결함들을 이용하여 동일한 인가전압 하에서 순수SF<sub>6</sub>가스, 혼합가스(SF<sub>6</sub> 20%, Dry-air 80%),는 방전 패턴과 검출된 방전양은 거의 동일하였다.

### 4. 결 론

SF<sub>6</sub>가스의 혼합비에 따른 절연내력의 변화곡선에 의하면, 혼합비가 20%까지 절연내력이 급격히 증가하여 순수 SF<sub>6</sub>가스의 79~82%에 이르고 그 이상의 혼합비에서는 변화의 정도가 완만해진다.

이러한 결과를 고려할 때, 가스절연매체 절연물을 사용하는 전력기기에 환경적인 요소를 감안하여 Dry-air를 절연매체로 선정 시 SF<sub>6</sub>가스의 혼합비를 20%정도로 할 것을 제의한다.

### 【참 고 문 헌】

- [1] M. Piemontesi, F. Koenig, L. Niemeyer, C. Heitz "Insulation performance of 10%SF<sub>6</sub>/90% N<sub>2</sub> mixture" IEEE 1999
- [2] Y. Qiu, E. Kuffel "Comparison of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> Gas Mixtures as Alternatives to SF<sub>6</sub> Gas" Vol 6 No. 6, December 1999
- [3] C.S. Seo, J.S. Lee, J.T. Kim, J.Y. Koo, "Breakdown Characteristics of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixtures under Uniform and Nonuniform Electric Field", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp2299-2301, July 1999
- [4] Sayed A. ward "Optimum SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>-Air, SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> Mixtures Based on Particle Contamination", Conf. Record of the IEEE Intern. Symp. on Elect. Insul., Anaheim, CA USA, April 2000
- [5] S.Ohtsuka, S.Nagara, K.Miura, M.Nakamura, M.Hikita, "Effect of Mixture of a small Amount of CO<sub>2</sub> in SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixed Gas on the Insulation Performance under Nonuniform Field", Conf. Record of the 2000 IEEE Intern. Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA USA, pp288-291, April 2000