

## 개선된 Dry Air와 SF<sub>6</sub>의 혼합비에 따른 절연파괴 특성 연구

(A Study on Characteristics of Insulation Breakdown by the Mixing Ratio of enhanced Dry Air and SF<sub>6</sub>)

석정후\* · 백중현 · 임동영 · 배성우 · 김기채 · 박원주\*\*

(Jeong-Hoo Seok · Jong-Hyun Beak · Dong-Young Lim · Sungwoo Bae · Ki-Chai Kim · Won-Zoo Park)

### Abstract

It is very desirable that a mixture gas possessing excellent insulation performance is suggested for insulation on increasing high voltage. This paper proposes a SF<sub>6</sub> mixture gas based on the factors including dielectric strength, environmental impact and economic feasibility of manufacture for the insulation in eco-friendly power equipment. A suitable-SF<sub>6</sub> content was determined to improve the dielectric strength in N<sub>2</sub> and Dry Air. The examination results of the factors revealed that a SF<sub>6</sub>/Dry Air mixture gas possessing the SF<sub>6</sub> content was more appropriate than a SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> mixture gas to the eco-friendly power equipment. In addition to the selection of the suitable SF<sub>6</sub> mixture gas, insulation characteristics as a function of SF<sub>6</sub> content were described from electron-detachment mechanism.

Key Words : Breakdown, Dielectric strength, Dry Air, Electron Detachment, SF<sub>6</sub> Mixture Gas

### 1. 서 론

고전압을 수용하는 전력설비의 절연설계에서, 고전압 엔지니어의 최근 연구주제는 SF<sub>6</sub> 대체가스의 탐색, SF<sub>6</sub> 사용량 감축, SF<sub>6</sub> 회수율 증가였다. 이는 SF<sub>6</sub>가 CO<sub>2</sub>보다 23,900배 더 높은 지구온난화 지수를 보유함으로써 인해[1], UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)에서 온실가스로 규

정되었기 때문이다. 언급한 배경으로부터 SF<sub>6</sub> 대체에 관한 검토가 CF<sub>3</sub>I[2], N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스[3], 건조공기[4], CO<sub>2</sub>[5]에서 수행되었다. 이 연구들은[2-4] 대체가스들이 고전압 전력설비의 절연을 위한 절연가스로 SF<sub>6</sub>보다 열등함을 보고하였고, 그 적용대상 설비는 배전급이었다.

대전력 전송을 위해 고전압화가 적용되며, 배전급보다 더 높은 전압을 수용하는 전력설비를 위한 SF<sub>6</sub> 대체가스의 연구가 필요하다. 하지만 친환경 절연가스인 건조공기, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스, CO<sub>2</sub>의 적용은 그 설비에서 어려울 것으로 예상된다. 이는 1.0MPa 이상의 고기압, 고체유전체 개선, 전극코팅의 절연기법이 함께 적용되어야 하며, 그 절연기법과 고기압의 가스량, 유지 및 보수에 대한 경제성도 종래의 SF<sub>6</sub> 전력설비

\* Main author : Master course of Electrical Engineering at Yeungnam University  
\*\* Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Yeungnam University  
Tel : 053-810-3926, Fax : 053-810-4767  
E-mail : lab203@ynu.ac.kr  
Received : 2015. 12. 1.  
Accepted : 2016. 1. 6.

와 비교하여 검토해야 하기 때문이다. 그래서 송전급 전력설비에 SF<sub>6</sub> 혼합가스의 적용을 검토해야한다. 일본은 송전급 전력설비에 SF<sub>6</sub>의 사용을 모색하여 “전력용 SF<sub>6</sub> 가스 취급 기준”을 작성하였다. 그 세부내용은 SF<sub>6</sub> 가스의 회수율에 관한 것으로, 그 회수율이 시험 및 점검에서 97 % 이상, 설비의 철거 및 폐기에서 99 % 이상으로 규정되어 있다[6]. 특히 H. Okubo et al[7]은 SF<sub>6</sub>가 송전급 전력설비를 위한 가장 중요한 유전체이기 때문에, SF<sub>6</sub> 방출의 허용과 그 생산방법이 중요하다고 주장하였다. 그리고 T. Takuma et al[8]는 일본에서 SF<sub>6</sub>의 방출이 지구의 자정능력 한도에서 방출되고 있음을 보고하였다. 이는 지구의 자정능력범위에서 SF<sub>6</sub>의 방출을 조절하여 절연가스로 사용할 수 있음을 암시한다.

SF<sub>6</sub> 혼합가스에 관한 연구는 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>/Air, SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub>에서 주로 이루어지고 있다[9-12]. 충돌전리계수의 계산으로부터, 이들 가스의 절연과피전압이 예측되었고[9], 그들 가스에 대한 방전메커니즘도 보고된바 있다[10]. 특히 X. Q. Qiu et al[11]은 불평등 전계에서 SF<sub>6</sub> 혼합가스의 5% 뇌 임펄스 절연과피전압이 순수한 SF<sub>6</sub>보다 더 높게 나타남을 설명하였다. 그리고 H. Okubo et al[12]은 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스의 절연과피메커니즘을 보고하였다. 실제 전력설비에서 새로운 절연가스의 적용과 절연설계에서 가스의 절연특성과 방전메커니즘이 중요한 요소이기 때문에, SF<sub>6</sub> 혼합가스에 관한 연구들은[9-12] 절연특성과 메커니즘의 관점에서 주로 수행되었다. 다른 관점으로 L. G. Christophorou[13]이 SF<sub>6</sub> 혼합가스를 차단기에 적용하기 위해 전류차단의 측면에서 수행하였지만, SF<sub>6</sub> 혼합가스의 환경적 영향 및 경제성에 관한 연구는 물론, 그에 대한 정보가 여전히 부족한 실정이다.

본 논문은 준평등 전계에서 건조공기(Dry Air)와 N<sub>2</sub> 중 SF<sub>6</sub> 함유량에 따른 절연특성, 환경적 영향, 경제성에 대하여 연구하였다. 먼저 SF<sub>6</sub>에 혼합될 친환경 가스(Dry Air)의 O<sub>2</sub> 비율을 절연내력을 기준으로 검토하여 개선된 Dry Air를 제안하였다. 그런 후 SF<sub>6</sub> 함유량에 따른 SF<sub>6</sub>/Dry Air와 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>의 절연특성을 설명하였다. 그리고 환경적 영향과 경제성이 각각 SF<sub>6</sub>의 함유량, 그 혼합가스의 제작비를 기반으로 검토되었

다. 그 검토결과로부터 절연성, 환경적, 경제적으로 수용 가능한 SF<sub>6</sub> 혼합가스가 제안되었다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

그림 1은 가스의 절연특성 실험을 위한 장치도이다. 그림 1에서 장치도는 모의 챔버(Test chamber), 전원장치(Power Supply), Dry Air 제조장치(Dry Air product device), 진공펌프(Vacuum pump), 전극, 디지털 압력계로 구성됨을 확인할 수 있다. 모의 챔버는 가스의 방전특성을 연구하기 위한 것으로 스테인레스 스틸을 이용하여 내·외부 이중 구조로 제작하였고, 그 이중 구조사이에는 진공화 하였다. 이는 절연과피전압이 온도변화에 영향을 받기 때문에, 내·외부 사이에 열교환을 차단하여 일정한 내부온도에서 절연과피전압을 얻기 위함이다. 그리고 실험은 22~25°C 온도 범위에서 수행하였다. 모의 챔버의 크기는 직경 460mm, 높이 500mm이며, 수용 가능한 온도와 압력의 범위는 각각 -90~100°C, 1MPa이다. 전원장치는 AC DY-050725(Input Voltage : 1φ 380V 60Hz, Secondary Voltage : 1φ 300kV 60Hz, Capacity : 36 kVA)이며, 2 차측 출력의 고전압은 2차 측에 병렬로 접속된 고전압 커패시터와 모의 챔버에 인가된다. Dry Air 제조장치는 Dry Air를 제작을 위해 사용하였으며, 이 장치는 공기 중의 불순물과 수분의 제거를 위해 세 단계의 필터와 2개의 수분흡착탱크를 보유한다.

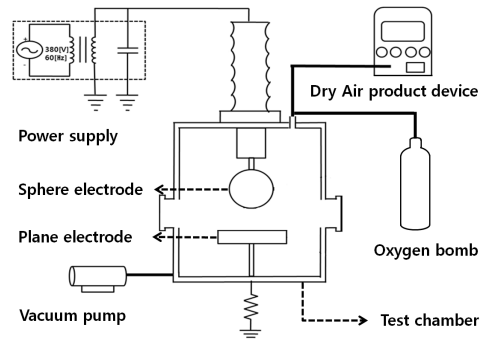


Fig. 1. Experimental schematic diagram

그 필터와 흡착탱크는 -75℃ 이하의 노점을 갖는 Dry Air를 생산 가능하게 한다. 진공펌프는 모의 챔버 내부의 배기와 방전 실험 시 순수한 절연 가스의 주입을 위해 사용하였다. 이 진공펌프는 모의 챔버 내부를 6.7×10<sup>-2</sup>Pa까지 진공화 시킬 수 있다. 전극은 상부(고전압 측)와 하부(접지측)에 각각 스테인리스 스틸의 구전극(Sphere, 직경 41mm)과 Rogowski형 평판전극(Plane, 직경 59mm)을 사용하였다. 모의 챔버 내부의 압력은 디지털 압력계(LEO 2 Ei, 0.1~3MPa, 오차 0.1% 미만)를 이용하여 절대압력을 기준으로 측정하였다. 특히 이 압력계는 SF<sub>6</sub> 혼합가스의 혼합비를 분압비를 이용하여 정밀하게 제어하는데 유용하다.

## 2.2 실험 방법

실험방법은 모의 챔버 내부에 전극의 설치, 모의 챔버의 내부의 진공화, 절연가스의 주입, AC 고전압 인가, 절연과피전압 측정의 절차로 수행하였다. 구 형상과 평판형 전극이 그림 1과 같이 수직으로 설치하였고, 그 전극갭은 6mm이다. 전극설치 후, 모의 챔버 내부의 진공화가 진공펌프에 의해 수행되었다. 절연가스의 주입은 O<sub>2</sub>와 SF<sub>6</sub> 함유량에 따른 Dry Air와 SF<sub>6</sub> 혼합가스를 실험대상의 압력으로 모의 챔버 내부에 가압하는 것이다. Dry-Air는 O<sub>2</sub> 함유량을 21, 30, 40%으로 가압하였고, SF<sub>6</sub> 혼합가스는 Dry-Air와 N<sub>2</sub>에 SF<sub>6</sub>를 10, 20, 40, 60, 80%의 함유량으로 가압하였다. 이들 가스의 혼합비는 분압비를 기준으로 하였고, 이 분압비는 오차 0.1% 미만의 디지털 압력계를 이용하여 정밀하게 얻을 수 있었다. 절연과피전압은 60Hz의 AC 고전압을 모의 챔버에 3.15kV/s의 상승속도로 인가하여 측정하였다. 절연과피전압(V<sub>B</sub>)는 리더방전에 의한 초기방전 전압값을 10회 측정하였다. 본 논문에서 실험데이터는 그 전압의 평균값, 최소값, 최대값을 이용하였다. 모의 챔버 내부로 절연가스의 충전과 특정한 V<sub>B</sub> 얻은 후, 다음 측정 사이에 시간 간격은 30s이며, 이 시간은 절연가스의 절연회복을 위한 것이다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 O<sub>2</sub> 함유량에 따른 개선된 Dry Air의 절연특성

본 항은 SF<sub>6</sub>를 혼합시킬 Dry Air의 최적 O<sub>2</sub> 함유량을 선정하고자 한다. O<sub>2</sub>는 전기적 부정기체로 전자부착능력을 보유하기 때문에, 높은 절연내력이 얻어질 수 있다.

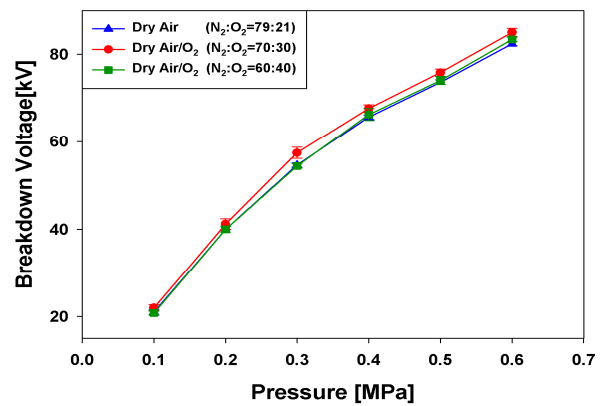


Fig. 2. V<sub>B</sub>-P characteristics by O<sub>2</sub> concentration in Dry Air(18)

그림 2는 본 연구의 실험 조건과 동일한 설정에서 수행된 실험 결과이다[15]. 보고된 연구[3,14,15]에 의하면, N<sub>2</sub>와 Dry Air 중 O<sub>2</sub> 함유량에 따라 절연내력이 변화됨을 언급하였는데, 그림 2는 이러한 경향과 유사한 결과를 보여준다. 가스 압력(0.1~0.6MPa)에서 절연과피전압(V<sub>B</sub>)는 O<sub>2</sub>의 함유량이 30%인 경우에서 가장 높았다. 이 전압은 O<sub>2</sub> 함유량이 21%인 경우보다 평균 3.68% 더 높은 것이다. 하지만 O<sub>2</sub>의 함유량이 40%인 경우는 실험범위의 압력에서 V<sub>B</sub>가 평균 0.23% 낮았다. 다시 말해서 O<sub>2</sub> 함유량이 21%와 40%를 보유하는 Dry Air/O<sub>2</sub> 혼합가스의 V<sub>B</sub>는 서로 대등하다. 실험 결과로부터, 30%의 O<sub>2</sub>를 가지는 Dry Air/O<sub>2</sub> 혼합가스의 V<sub>B</sub>가 가장 높기 때문에, 본 논문에서 SF<sub>6</sub>가 혼합될 Dry Air는 30%의 O<sub>2</sub> 함유량을 보유한다. 본 논문에서 이 Dry Air는 개선된 Dry Air로 정의한다.

O<sub>2</sub> 함유량에 따른 Dry Air/O<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스의

절연내력은 특정한 O<sub>2</sub> 비율(30%)까지 증가하지만 30%를 초과하면 감소한다. 이러한 절연특성은 [15]와 [16]에서 설명된 바 있다. 절연내력의 증가는 O<sub>2</sub>의 전자부착에 의한 것이고, 그 감소는 광전리에 기인한다. 추가적으로 절연내력이 가장 우수한 O<sub>2</sub>의 함유량은 실험조건(전극의 배치와 재료, 전극갭, 전극 사이에 전계평등성)에 의해 달라질 수 있지만[15,17], 실험조건이 동일하면 그 함유량은 본 연구와 [15]처럼 동일하게 나타날 수 있다.

### 3.2 Dry Air와 N<sub>2</sub> 중 SF<sub>6</sub> 함유량에 따른 절연파괴 특성

그림 3은 개선된 Dry Air 중 SF<sub>6</sub> 함유량에 따른 절연파괴전압 V<sub>B</sub>를 압력(P)별로 보여준다. 모든 실험 조건에서 압력이 증가함에 따라 V<sub>B</sub>가 증가하였다. 이는 파센의 법칙(Paschen's Law)에 상응하는 결과이다. 그리고 동일 압력에서 SF<sub>6</sub> 함유량이 증가함에 따라 V<sub>B</sub>도 함께 증가하였다. 이 V<sub>B</sub>의 상승은 SF<sub>6</sub>의 높은 절연내력과 전자부착효과에 의한 결과이다. 하지만 SF<sub>6</sub> 함유량의 증가와 함께 V<sub>B</sub>의 상승률은 포화한다. 즉 절연파괴전압 V<sub>B</sub>는 SF<sub>6</sub> 함유량과 함께 비선형의 특성을 나타낸다. 이러한 특성들은 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스에서도 유사하게 나타난다. N<sub>2</sub> 중 SF<sub>6</sub> 함유량에 따른 V<sub>B</sub>는 각 압력별로 그림 4에서 확인할 수 있다. 그림 4는 그림 3의 절연특성과 흡사하다. 추가적으로 SF<sub>6</sub>/Dry Air와 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>의 절연내력을 비교하기 위해, 그림 5는 SF<sub>6</sub>/Dry Air와 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스들의 절연파괴전압 V<sub>B</sub>를 SF<sub>6</sub> 함유량에 따라 비교한 결과를 보여준다. 본 실험조건에서 SF<sub>6</sub>/Dry Air 혼합가스가 전기적 부성기체인 SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub>를 보유함에도 불구하고, V<sub>B</sub>는 O<sub>2</sub>를 함유하지 않는 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스보다 더 낮았다. SF<sub>6</sub> 함유량과 함께 절연파괴전압 V<sub>B</sub>가 포화하는 현상과 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>가 SF<sub>6</sub>/Dry Air의 V<sub>B</sub>보다 더 높게 나타나는 현상은 다음과 같이 해석할 수 있다.

전기적 부성기체는 전극 사이에 형성된 전자를 부착하여 전계에 가속되기 어려운 음이온의 형성으로 인해 우수한 절연내력을 얻는데 기여한다. 하지만 그 음

이온은 전자탈착 메커니즘에 의해 전자사태를 진전시키는 전자공급의 원천이 된다. 이 전자탈착 메커니즘은 전기적 부성기체에서 초기 전자의 생성원이 되기도 하며, 전자사태의 주요 전자 공급원이다[18-20]. 본 연구에서 전기적 부성기체는 SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub>이다. SF<sub>6</sub> 음이온(SF<sub>6</sub><sup>-</sup>)는 전자친화력이 O<sub>2</sub>보다 높아 전자탈착의 발생이 어려울 것이라 예상하지만, 의외로 SF<sub>6</sub><sup>-</sup>의 전자탈착이 가능함을 [18,21]에서 보고되었다. 그러므로 그림 3과 4에서 Dry Air와 N<sub>2</sub> 중 SF<sub>6</sub> 함유량과 함께 포화하는 절연파괴전압 V<sub>B</sub>는 SF<sub>6</sub><sup>-</sup>의 전자탈착에 의한 것으로 판단된다. 그리고 전자탈착은 양극성 스트레스가 가해진 전극(positively-stressed electrodes) 주

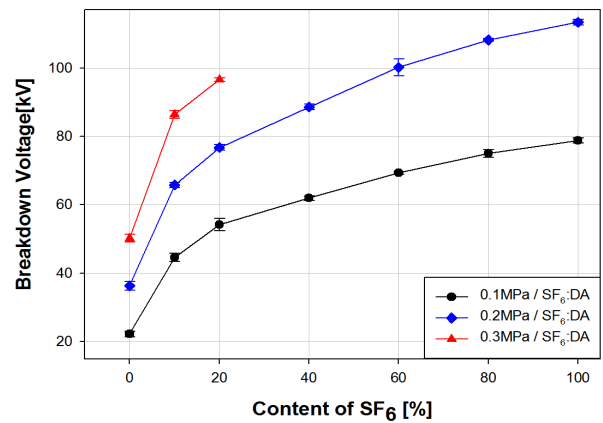


Fig. 3. V<sub>B</sub> characteristics as a function of SF<sub>6</sub> content in Dry Air

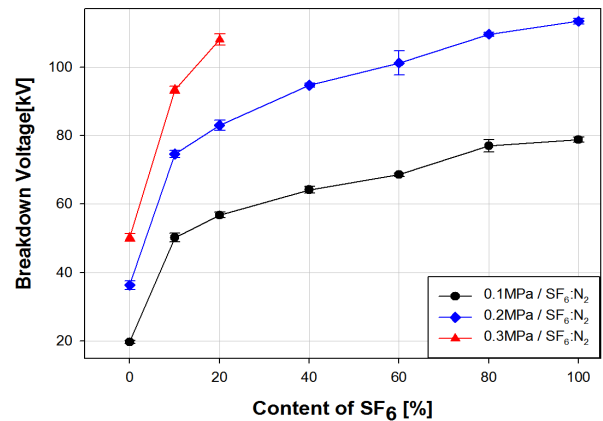


Fig. 4. V<sub>B</sub> characteristics as a function of SF<sub>6</sub> content in N<sub>2</sub>

위에서 가장 높은 확률로 발생하며, 빠른 속도로 운동하는 양극성 이온과 중성분자와의 충돌에서 발생할 수도 있다[18]. 이는 SF<sub>6</sub> 함유량의 증가와 함께 더 지배적으로 나타나는 V<sub>B</sub> 포화현상을 설명하는 이유라 생각한다. 즉 SF<sub>6</sub> 함유량이 증가할수록, SF<sub>6</sub> 혼합가스의 절연내력이 상승하기 때문에, 구전극 주위에 전계는 SF<sub>6</sub> 함유량과 함께 높아진다. 그 결과 인가 교류 고전압의 양극성 주기 동안 고전압측 구전극 주위에서 SF<sub>6</sub><sup>-</sup>의 전자탈착이 SF<sub>6</sub> 함유량의 증가와 함께 더욱더 활발히 발생하여 뚜렷한 V<sub>B</sub>의 포화를 이끌게 된다. 추가적으로 충돌전리 과정에서 형성된 양극성 이온이 음극에 충돌하여 전자를 방출시키는 2차 전자방출 작용( $\gamma$  작용)을 함께 복합적으로 해석하면 V<sub>B</sub>의 포화현상을 더 합리적으로 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

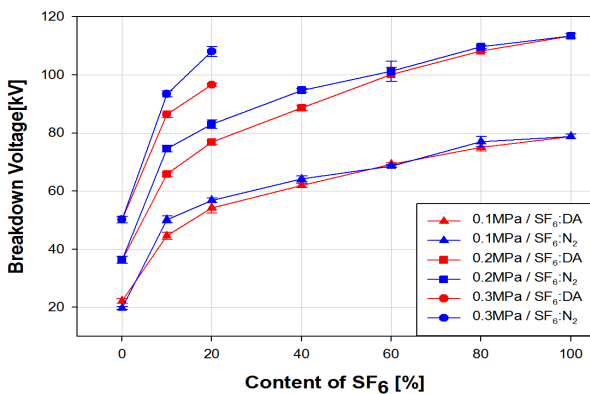


Fig 5. Insulation characteristics of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>/Dry Air according to SF<sub>6</sub> content

그림 5에서 확인할 수 있듯이, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>의 절연과피전압 V<sub>B</sub>가 SF<sub>6</sub>/Dry Air의 그 전압보다 더 높다. 이는 상술한 전기적 부성기체가 형성하는 음이온의 전자탈착과 관련되는 것으로 생각된다. SF<sub>6</sub>/Dry Air은 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>가 함유하지 않는 전기적 부성기체 O<sub>2</sub>를 추가적으로 포함하고 있다. 즉 동일한 SF<sub>6</sub> 함유량에서, 전자탈착을 초래하는 음이온은 SF<sub>6</sub>/Dry Air가 더 많이 분포한다. SF<sub>6</sub>가 O<sub>2</sub>보다 전자를 더 빠르게 부착하기 때문에 [22], SF<sub>6</sub>/Dry Air에서 음이온은 SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>의 순서로 형성된다. 그들 음이온은 양극 주위에 높은 전계와 SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 분자에 충돌로부터 전자탈착을 일으키고, 탈착된 전자는 전자사태의 진전을 더욱더 용이하게

한다. 하지만 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>는 O<sub>2</sub>를 포함하지 않기 때문에, 동일한 SF<sub>6</sub> 함유량에서 전자탈착으로부터 얻을 수 있는 전자의 수는 SF<sub>6</sub>/Dry Air보다 상대적으로 적다. 이는 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>에서 전자사태가 더욱더 진전하기 어려다는 것을 의미한다. 따라서 상술한 전자탈착에 의한 전자사태 메커니즘이 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>와 SF<sub>6</sub>/Dry Air의 상이한 절연내력을 초래하는 이유라고 생각한다. 전자탈착으로 인한 절연내력의 저하는 N<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>에 전기적 부성기체인 N<sub>2</sub>O의 함유량을 혼합하는 경우에 보고된 바 있다 [23].

### 3.3 SF<sub>6</sub>/Dry Air와 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스의 환경적 영향 및 경제성

3.2항의 실험에서 SF<sub>6</sub>의 혼합비율이 높아짐에 따라 절연과피전압 V<sub>B</sub>의 증가율이 구간마다 상이한 특성을 보였다. 본 항은 그 특성, 절연내력 개선에 유효한 SF<sub>6</sub>의 함유량, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>와 SF<sub>6</sub>/Dry Air의 환경적 영향과 그 경제성을 평가한다.

표 1은 SF<sub>6</sub>/Dry Air 혼합가스에서 SF<sub>6</sub> 함유량에 따른 구간을 나누고, 그 구간에 상응하는 절연특성과 V<sub>B</sub>를 분석하여 정리한 것이다. 표 1에서 SF<sub>6</sub> 함유량이 0~10%인 1 구간에서 SF<sub>6</sub> 1%당 절연과피전압 V<sub>B</sub>의 상승률은 압력별로 다르게 나타났다. 압력범위(0.1~0.3MPa)에서 그 증가율은 평균 2.56kV/%이다. SF<sub>6</sub>의 함유량이 10~100%인 2 구간에서 SF<sub>6</sub> 1% 증가 당 V<sub>B</sub> 증가율은 평균 0.64kV/%로 나타났다. 단위 SF<sub>6</sub> 농도 증가 당 절연과피전압 V<sub>B</sub>의 증가율은 1구간이 2구간에 보다 최대 5.95배, 평균적으로 4.50배 더 크다. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스도 언급한 SF<sub>6</sub>/Dry Air와 동일한 구간별 분할 방법으로 해석하였다. 그 결과는 표 2에서 확인할 수 있다. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스의 구간별 특성은 SF<sub>6</sub>/Dry Air 혼합가스의 그 특성과 동일한 경향으로 나타났다. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스의 경우, SF<sub>6</sub> 단위 농도당 V<sub>B</sub>의 증가율은 1구간이 2구간보다 최대 9.59배 더 높았다. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합가스가 SF<sub>6</sub>/Dry Air보다 SF<sub>6</sub> 함유량에 따른 V<sub>B</sub>의 증가율이 더 높은 것은 3.2항에서 설명한 전자탈착으로 인한 것이다.

**Table 1. Breakdown characteristics on the sections which were divided from SF<sub>6</sub> content in SF<sub>6</sub>/Dry Air**

SF <sub>6</sub> 농도 압력 (MPa)	SF <sub>6</sub> 단위 농도(%)당 절연과피전압(kV)		1구간 / 2구간
	1구간(0~10%)	2구간(10~100%) (0.3MPa는 10~20%)	
0.1	2.26	0.38	5.95
0.2	2.38	0.53	4.56
0.3	3.04	1.02	2.98

이전의 연구에서 [3,5,14,15,17], 친환경 가스는 절연 성능으로 SF<sub>6</sub>를 대체하기 위해 더 높은 압력을 요구하였다. 이는 환경적 영향에는 부합하지만, 향상된 기계적 강도로 인한 설비의 가격상승, 많은 양의 친환경 가스 제작에서 비용 문제를 초래한다. 따라서 적절한 내압설비를 기반으로, SF<sub>6</sub> 혼합가스의 절연성능, 환경 및 경제적 영향이 검토되어야 한다. 표 1~2와 경제적 관점으로부터, 각각 N<sub>2</sub>와 Dry-Air 중 효과적인 절연내력의 개선을 위한 SF<sub>6</sub> 혼합량과 경제적인 SF<sub>6</sub> 혼합가스가 결정될 수 있다. 유효한 SF<sub>6</sub> 혼합량은 절연과피전압 V<sub>B</sub>의 포화가 현저하게 나타나기 이전인 10%이다. 이는 SF<sub>6</sub> 함유량이 증가하여도 절연내력의 상승효과가 포화하며, 환경적 부하가 증가하기 때문이다. 아울러 대기 중 공기를 원료로 사용하는 Dry Air의 제작비는 N<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스보다 약 3배 더 저렴하기 때문에[3], 동일한 함유량의 SF<sub>6</sub>를 사용한다면, 경제적인 SF<sub>6</sub> 혼합가스는 SF<sub>6</sub>/Dry Air로 선택할 수 있다.

최근에 전극과 스페이서의 접촉불량을 고려할 때, SF<sub>6</sub> 0.1MPa에 상응하는 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스 압력이 0.6MPa임을 보고하였다[24]. N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스와 Dry Air의 절연성능은 거의 대등하기 때문에, 본 논문에서 제안된 SF<sub>6</sub>/Dry Air(10/90) 혼합가스의 절연내력은 0.6MPa의 Dry Air와 0.1MPa의 SF<sub>6</sub>와 비교한다. 0.2MPa의 SF<sub>6</sub>/Dry Air(10/90) 혼합가스가 순수 0.1MPa의 SF<sub>6</sub>와 비교할 때, SF<sub>6</sub>의 사용량은 80% 절감 가능하며, 절연과피전압 V<sub>B</sub>의 저하는 17.5%에 불

과하다. 그리고 그림 2와 3으로부터, 0.3MPa의 SF<sub>6</sub>/Dry Air(10/90)의 V<sub>B</sub>는 순수 0.1MPa SF<sub>6</sub>와 0.6MPa Dry Air보다 각각 9.64, 4.85% 더 높다. 따라서 0.3MPa의 SF<sub>6</sub>/Dry Air(10/90) 혼합가스는 0.6MPa의 Dry Air보다 가스압력을 0.3MPa를 더 낮출 수 있으며 더 우수한 절연내력도 함께 얻을 수 있다. 더욱이 0.1MPa의 SF<sub>6</sub>보다 더 높은 절연내력을 보유하며, SF<sub>6</sub>의 사용량은 70% 감소시킬 수 있다. 이러한 SF<sub>6</sub>/Dry Air(10/90) 혼합가스는 친환경가스를 적용한 전력설비가 요구하는 가스압력보다 더 낮은 압력으로 설계 가능하며, 더 우수한 절연내력 및 환경적, 경제적 사항을 동시에 충족시킬 수 있는 절연가스이다.

**Table 2. Breakdown characteristics on the sections which were divided from SF<sub>6</sub> content in SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>**

SF <sub>6</sub> 농도 압력 (MPa)	SF <sub>6</sub> 단위 농도(%)당 절연과피 전압(kV)		1구간 / 2구간
	1구간 (0~10%)	2구간(10~100%) (0.3MPa는 10~20%)	
0.1	3.05	0.32	9.59
0.2	3.83	0.43	8.89
0.3	4.32	1.46	2.96

#### 4. 결 론

본 논문은 준평등 전계에서 SF<sub>6</sub> 혼합가스(SF<sub>6</sub>/Dry Air, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>)의 절연특성과 그들 가스의 환경적 및 경제적 관점을 연구하였다. 그 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>와 SF<sub>6</sub>/Dry Air 혼합가스의 절연특성은 SF<sub>6</sub> 함유량의 증가와 함께 포화하는 경향을 보였다. 이는 음이온 SF<sub>6</sub><sup>-</sup>의 전자탈착 메커니즘에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 준평등 전계에서 SF<sub>6</sub> 혼합가스의 절연과피전압은 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>가 SF<sub>6</sub>/Dry Air보다 더 높게 나타남을 확인하였다. SF<sub>6</sub>/Dry Air는 SF<sub>6</sub>와 함께 음이온을 형성할 수 있는 전기적 부정기체인 O<sub>2</sub>를 추가적으로 포함하고 있기 때문이라 생각한다.

- 3) N<sub>2</sub>와 Dry Air에 SF<sub>6</sub>를 혼합할 때, 효과적인 절연 성능 개선을 위한 SF<sub>6</sub>의 함유량은 10%였다.
- 4) 절연내력, SF<sub>6</sub> 사용량에 대한 환경적 부하, 절연 가스의 제작에서 경제성을 검토한 결과, SF<sub>6</sub>/Dry Air 혼합가스가 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>보다 친환경 전력설비에 더 적합하였다.

본 논문의 결과들은 고전압 기기에 SF<sub>6</sub>/Dry Air 혼합가스를 적용 시 내압설비, 환경적 영향, 경제적 영향을 고려한 합리적인 설계에 사용될 것이다. 추후 불평 등 전계와 전극재료에 따른 SF<sub>6</sub> 혼합가스의 절연특성 연구가 필요하다.

## References

- [1] L. G. Christophorou, J. K. Olthoff and R. J. Van Brunt, "Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 13, No. 5, pp. 20-24, 1997.
- [2] H. Toyota, S. Matsuoka, and K. Hidaka, "Measurement of Sparkover Voltage and Time Lag Characteristics in CF<sub>3</sub>-N<sub>2</sub> and CF<sub>3</sub>-Air Gas Mixtures by using Steep-Front Square Voltage", Electr. Eng. Jpn., Vol. 157, No. 2, pp. 1-7, 2006.
- [3] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori and F. Endo, "Development of SF<sub>6</sub>-free 72.5 kV GS", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 22, No. 3, pp. 1869-1876, 2007.
- [4] H. Saito, K. Nagatake, H. Komatsu, Y. Takeshi, Y. Matsui, k. Katsumata, and M. Sakaki, "Development of 72/84kV Dry Air-Insulated Dead Tank VCB", Electr. Eng. Jpn., Vol. 177, No. 1, pp. 1-10 2011.
- [5] Y. Hoshina, M. Sato, M. Shiiki, M. Hanai and E. Kaneko, "Lightning impulse breakdown characteristics of SF<sub>6</sub> alternative gases for gas-insulated switchgear", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 153, No. 1, pp. 1-6, 2006.
- [6] 大陽日酸東關東株式會社, "六フッ化硫 (SF<sub>6</sub>) の回収技術", J. Vac. Soc. Jpn, Vol. 52, No. 7, pp. 397-399, 2009.
- [7] H. Okubo, A. Beroual, "Recent Trend and Future Perspectives in Electrical Insulation Techniques in Relation to Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) Substitutes for High Voltage Electric Power Equipment," IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 27, No. 2, pp. 34-42, 2011.
- [8] T. Takuma, O. Yamamoto and S. Hamada, "GASES AS A DIELECTRIC," Gaseous Dielectrics X, pp. 195-204, 2004.
- [9] N. H. Malik and A. H. Qureshi, "BREAKDOWN GRADIENTS IN SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>/AIR, SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> MIXTURES", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-15, No. 5, pp. 413-418, 1980.
- [10] T. Watanabe and T. Takuma, "The Breakdown Voltage and Discharge Extension of Long Gaps in Nitrogen-SF<sub>6</sub> and Air-SF<sub>6</sub> Gas Mixtures", J. Appl. Phys., Vol. 48, pp. 3281-3287, 1977.
- [11] X. Q. Qiu, I. D. Chalmers, P. Coventry, "A Study of Alternative Insulating Gases to SF<sub>6</sub>", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 32, pp. 2918-2922, 1999.
- [12] H. Okubo, T. Yamada, K. Hatta, N. Hayakawa, S. Yuasa and S. Okabe, "Partial discharge and breakdown mechanisms in ultra-dilute SF<sub>6</sub> and PFC gases mixed with N<sub>2</sub> gas", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 35, pp. 2760-2765, 2002.
- [13] L. G. Christophorou, J. K. Olthoff and D. S. Green, "A Search for Possible Universal-Application Gas Mixtures", Gaseous Dielectrics VIII, pp. 361-366, 1998.
- [14] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, F. Endo, and T. Oomori, "Fundamental Insulation Characteristics of Air, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixed Gases", Electr. Eng. Jpn., Vol. 155, No. 3, pp. 9-17, 2006.
- [15] J. H. Seok, J. H. Beak, D. Y. Lim, S. Bae, K. C. Kim and W. Z. Park, "A Study on Characteristics of Insulation Breakdown and Surface Discharge by the Mixing Ratio of Dry Air/O<sub>2</sub> gas mixtures", J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng., Vol. 29, No. 6, pp. 49-57, 2015.
- [16] J. H. Mason, "Discharges", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. EI-13, No. 4, pp. 211-238, 1978.
- [17] D. Y. Lim and S. Bae, "Study on Oxygen/Nitrogen Gas Mixtures for the Surface Insulation Performance in Gas Insulated Switchgear", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, No. 3, pp. 1567-1576, 2015.
- [18] L. G. Christophorou and L. A. Pinnaduwege, "Basic Physics of Gaseous Dielectrics", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 25, No. 1, pp. 55-74, 1990.
- [19] S. Pandheshnyi, "Effective ionization rate in nitrogen-oxygen mixtures", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 46, No. 15, 155201, 2013.
- [20] G. Wormeester, S. Pandheshnyi, A. Luque, S. Nijdam and U. Ebert, "Probing photo-ionization: simulations of positive streamers in varying N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>-mixtures", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 43, 505201, pp. 1-13, 2010.
- [21] J. K. Olthoff, R. J. Van Brunt, Y. Wang, R. L. Champion and L. D. Doverspike, "Collisional Electron Detachment and Decomposition Rates of SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SF<sub>5</sub><sup>-</sup> and F<sup>-</sup> in SF<sub>6</sub>: Implications for Ion Transport and Electrical Discharges", J. Chem. Phys. Vol. 91, pp. 2261-2268, 1989.
- [22] R. Morrow, "Theory of electrical corona in SF<sub>6</sub>", Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 382, pp. 57-65, 1996.
- [23] H. Kojima, O. Kinoshita, N. Hayakawa, F. Endo, H. Okubo, M. Yoshida and T. Ogawa, "Breakdown Characteristics of N<sub>2</sub>O Gas Mixtures for Quasi Uniform Electric Field under Lightning Impulse Voltage", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 14, No. 6, pp. 1492-1497, 2007.
- [24] D. Y. Lim, E. H. Choi, S. T. Choi, B. J. Choi, K. S. Lee and S. Bae, "Surface Flashover Characteristics on Poor Contact in N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Mixture Gas under Non-Uniform Field", J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng., Vol. 29, No. 8, pp. 63-69, 2015.



◇ 저자소개 ◇



**석정후 (石貞煦)**

1990년 9월 12일생. 2014년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업. 2016년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사).



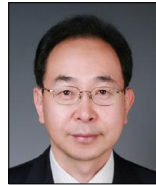
**배성우 (裴晟佑)**

1978년 6월 30일생. 2006년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2009년 미국 텍사스 오스틴대학교 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 영남대학교 전기공학과 조교수.



**백종현 (白種鉉)**

1961년 2월 4일생. 2006년 2월 경일대학교 전기공학과 졸업. 2013년 2월 영남대학교 공학대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 현재 영남대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



**김기채 (金基采)**

1959년 10월 19일생. 1984년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1986년 3월 일본 게이오 대학교 전기공학과 졸업(석사). 1989년 3월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989~1993년 한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원. 현재 영남대학교 전기공학과 교수.



**임동영 (林東永)**

1983년 4월 12일생. 2009년 2월 경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부 졸업. 2011년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2015년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).



**박원주 (朴元株)**

1954년 3월 14일생. 1978년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 3월 큐우슈 대학 대학원 졸업(박사). 1994년~현재 영남대학교 전기공학과 교수. 현재 본학회 부회장.