

개선된 Dry Air와 SF₆의 혼합비에 따른 절연파괴 특성 연구

(A Study on Characteristics of Insulation Breakdown by the Mixing Ratio of enhanced Dry Air and SF₆)

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 SF₆ 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-SF₆ content was determined to improve the dielectric strength in N₂ and Dry Air. The examination results of the factors revealed that a SF₆/Dry Air mixture gas possessing the SF₆ content was more appropriate than a SF₆/N₂ mixture gas to the eco-friendly power equipment. In addition to the selection of the suitable SF₆ mixture gas, insulation characteristics as a function of SF₆ content were described from electron-detachment mechanism.

Key Words : Breakdown, Dielectric strength, Dry Air, Electron Detachment, SF₆ Mixture Gas

1. 서 론

고전압을 수용하는 전력설비의 절연설계에서, 고전압 엔지니어의 최근 연구주제는 SF₆ 대체가스의 탐색, SF₆ 사용량 감축, SF₆ 회수율 증가였다. 이는 SF₆가 CO₂보다 23,900배 더 높은 지구온난화 지수를 보유함으로써 인해[1], UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)에서 온실가스로 규

정되었기 때문이다. 언급한 배경으로부터 SF₆ 대체에 관한 검토가 CF₃I[2], N₂/O₂ 혼합가스[3], 건조공기[4], CO₂[5]에서 수행되었다. 이 연구들은[2-4] 대체가스들이 고전압 전력설비의 절연을 위한 절연가스로 SF₆보다 열등함을 보고하였고, 그 적용대상 설비는 배전급이었다.

대전력 전송을 위해 고전압화가 적용되며, 배전급보다 더 높은 전압을 수용하는 전력설비를 위한 SF₆ 대체가스의 연구가 필요하다. 하지만 친환경 절연가스인 건조공기, N₂/O₂ 혼합가스, CO₂의 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 SF₆ 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 SF₆ 혼합가스의 적용을 검토해야한다. 일본은 송전급 전력설비에 SF₆의 사용을 모색하여 “전력용 SF₆ 가스 취급 기준”을 작성하였다. 그 세부내용은 SF₆ 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 SF₆가 송전급 전력설비를 위한 가장 중요한 유전체이기 때문에, SF₆ 방출의 허용과 그 생산방법이 중요하다고 주장하였다. 그리고 T. Takuma et al[8]는 일본에서 SF₆의 방출이 지구의 자정능력 한도에서 방출되고 있음을 보고하였다. 이는 지구의 자정능력범위에서 SF₆의 방출을 조절하여 절연가스로 사용할 수 있음을 암시한다.

SF₆ 혼합가스에 관한 연구는 SF₆/N₂, SF₆/Air, SF₆/CO₂에서 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 SF₆ 혼합가스의 5% 뇌 임펄스 절연과피전압이 순수한 SF₆보다 더 높게 나타남을 설명하였다. 그리고 H. Okubo et al[12]은 SF₆/N₂ 혼합가스의 절연과피메커니즘을 보고하였다. 실제 전력설비에서 새로운 절연가스의 적용과 절연설계에서 가스의 절연특성과 방전메커니즘이 중요한 요소이기 때문에, SF₆ 혼합가스에 관한 연구들은[9-12] 절연특성과 메커니즘의 관점에서 주로 수행되었다. 다른 관점으로 L. G. Christophorou[13]이 SF₆ 혼합가스를 차단기에 적용하기 위해 전류차단의 측면에서 수행하였지만, SF₆ 혼합가스의 환경적 영향 및 경제성에 관한 연구는 물론, 그에 대한 정보가 여전히 부족한 실정이다.

본 논문은 준평등 전계에서 건조공기(Dry Air)와 N₂ 중 SF₆ 함유량에 따른 절연특성, 환경적 영향, 경제성에 대하여 연구하였다. 먼저 SF₆에 혼합될 친환경 가스(Dry Air)의 O₂ 비율을 절연내력을 기준으로 검토하여 개선된 Dry Air를 제안하였다. 그런 후 SF₆ 함유량에 따른 SF₆/Dry Air와 SF₆/N₂의 절연특성을 설명하였다. 그리고 환경적 영향과 경제성이 각각 SF₆의 함유량, 그 혼합가스의 제작비를 기반으로 검토되었

다. 그 검토결과로부터 절연성, 환경적, 경제적으로 수용 가능한 SF₆ 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.

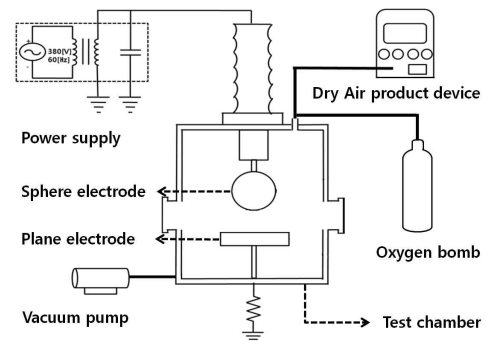


Fig. 1. Experimental schematic diagram

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 6.7×10⁻²Pa까지 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 SF₆ 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 O₂와 SF₆ 함유량에 따른 Dry Air와 SF₆ 혼합가스를 실험대상의 압력으로 모의 챔버 내부에 가압하는 것이다. Dry-Air는 O₂ 함유량을 21, 30, 40%으로 가압하였고, SF₆ 혼합가스는 Dry-Air와 N₂에 SF₆를 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_B)는 리더방전에 의한 초기방전 전압값을 10회 측정하였다. 본 논문에서 실험데이터는 그 전압의 평균값, 최소값, 최대값을 이용하였다. 모의 챔버 내부로 절연가스의 충전과 특정한 V_B 얻은 후, 다음 측정 사이에 시간 간격은 30s이며, 이 시간은 절연가스의 절연회복을 위한 것이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 O₂ 함유량에 따른 개선된 Dry Air의 절연특성

본 항은 SF₆를 혼합시킬 Dry Air의 최적 O₂ 함유량을 선정하고자 한다. O₂는 전기적 부정기체로 전자부착능력을 보유하기 때문에, 높은 절연내력이 얻어질 수 있다.

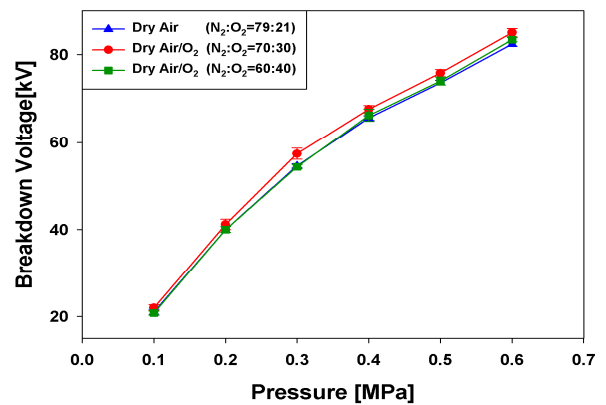


Fig. 2. V_B-P characteristics by O₂ concentration in Dry Air[18]

그림 2는 본 연구의 실험 조건과 동일한 설정에서 수행된 실험 결과이다[15]. 보고된 연구[3,14,15]에 의하면, N₂와 Dry Air 중 O₂ 함유량에 따라 절연내력이 변화됨을 언급하였는데, 그림 2는 이러한 경향과 유사한 결과를 보여준다. 가스 압력(0.1~0.6MPa)에서 절연과피전압(V_B)는 O₂의 함유량이 30%인 경우에서 가장 높았다. 이 전압은 O₂ 함유량이 21%인 경우보다 평균 3.68% 더 높은 것이다. 하지만 O₂의 함유량이 40%인 경우는 실험범위의 압력에서 V_B가 평균 0.23% 낮았다. 다시 말해서 O₂ 함유량이 21%와 40%를 보유하는 Dry Air/O₂ 혼합가스의 V_B는 서로 대등하다. 실험 결과로부터, 30%의 O₂를 가지는 Dry Air/O₂ 혼합가스의 V_B가 가장 높기 때문에, 본 논문에서 SF₆가 혼합될 Dry Air는 30%의 O₂ 함유량을 보유한다. 본 논문에서 이 Dry Air는 개선된 Dry Air로 정의한다.

O₂ 함유량에 따른 Dry Air/O₂와 N₂/O₂ 혼합가스의

절연내력은 특정한 O₂ 비율(30%)까지 증가하지만 30%를 초과하면 감소한다. 이러한 절연특성은 [15]와 [16]에서 설명된 바 있다. 절연내력의 증가는 O₂의 전자부착에 의한 것이고, 그 감소는 광전리에 기인한다. 추가적으로 절연내력이 가장 우수한 O₂의 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 N₂ 중 SF₆ 함유량에 따른 절연파괴 특성

그림 3은 개선된 Dry Air 중 SF₆ 함유량에 따른 절연파괴전압 V_B를 압력(P)별로 보여준다. 모든 실험 조건에서 압력이 증가함에 따라 V_B가 증가하였다. 이는 파센의 법칙(Paschen's Law)에 상응하는 결과이다. 그리고 동일 압력에서 SF₆ 함유량이 증가함에 따라 V_B도 함께 증가하였다. 이 V_B의 상승은 SF₆의 높은 절연내력과 전자부착효과에 의한 결과이다. 하지만 SF₆ 함유량의 증가와 함께 V_B의 상승률은 포화한다. 즉 절연파괴전압 V_B는 SF₆ 함유량과 함께 비선형의 특성을 나타낸다. 이러한 특성들은 SF₆/N₂ 혼합가스에서도 유사하게 나타난다. N₂ 중 SF₆ 함유량에 따른 V_B는 각 압력별로 그림 4에서 확인할 수 있다. 그림 4는 그림 3의 절연특성과 흡사하다. 추가적으로 SF₆/Dry Air와 SF₆/N₂의 절연내력을 비교하기 위해, 그림 5는 SF₆/Dry Air와 SF₆/N₂ 혼합가스들의 절연파괴전압 V_B를 SF₆ 함유량에 따라 비교한 결과를 보여준다. 본 실험조건에서 SF₆/Dry Air 혼합가스가 전기적 부성기체인 SF₆와 O₂를 보유함에도 불구하고, V_B는 O₂를 함유하지 않는 SF₆/N₂ 혼합가스보다 더 낮았다. SF₆ 함유량과 함께 절연파괴전압 V_B가 포화하는 현상과 SF₆/N₂가 SF₆/Dry Air의 V_B보다 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 SF₆와 O₂이다. SF₆ 음이온(SF₆⁻)는 전자친화력이 O₂보다 높아 전자탈착의 발생이 어려울 것이라 예상하지만, 의외로 SF₆⁻의 전자탈착이 가능함을 [18,21]에서 보고되었다. 그러므로 그림 3과 4에서 Dry Air와 N₂ 중 SF₆ 함유량과 함께 포화하는 절연파괴전압 V_B는 SF₆⁻의 전자탈착에 의한 것으로 판단된다. 그리고 전자탈착은 양극성 스트레스가 가해진 전극(positively-stressed electrodes) 주

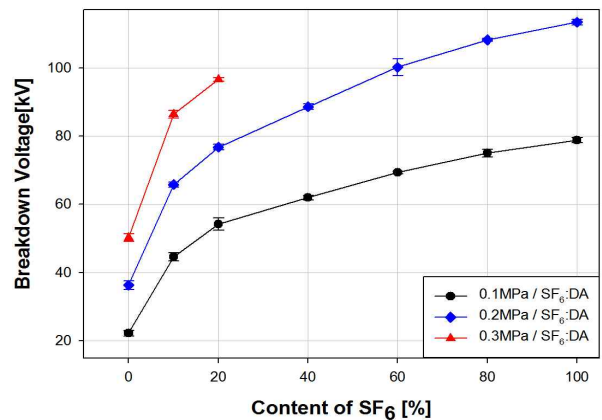


Fig. 3. V_B characteristics as a function of SF₆ content in Dry Air

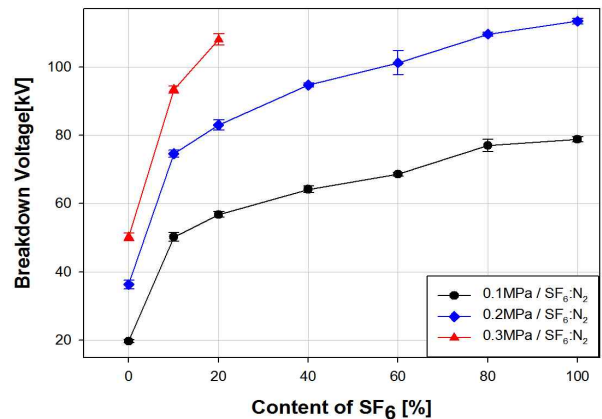


Fig. 4. V_B characteristics as a function of SF₆ content in N₂

위에서 가장 높은 확률로 발생하며, 빠른 속도로 운동하는 양극성 이온과 중성분자와의 충돌에서 발생할 수도 있다[18]. 이는 SF₆ 함유량의 증가와 함께 더 지배적으로 나타나는 V_B 포화현상을 설명하는 이유라 생각한다. 즉 SF₆ 함유량이 증가할수록, SF₆ 혼합가스의 절연내력이 상승하기 때문에, 구전극 주위에 전계는 SF₆ 함유량과 함께 높아진다. 그 결과 인가 교류 고전압의 양극성 주기 동안 고전압측 구전극 주위에서 SF₆⁻의 전자탈착이 SF₆ 함유량의 증가와 함께 더욱더 활발히 발생하여 뚜렷한 V_B의 포화를 이끌게 된다. 추가적으로 충돌전리 과정에서 형성된 양극성 이온이 음극에 충돌하여 전자를 방출시키는 2차 전자방출 작용(γ 작용)을 함께 복합적으로 해석하면 V_B의 포화현상을 더 합리적으로 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

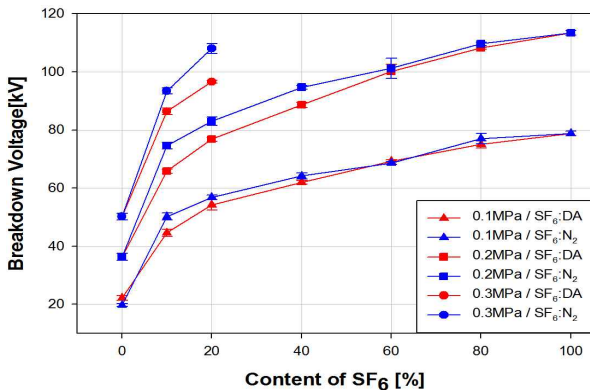


Fig 5. Insulation characteristics of SF₆/N₂ and SF₆/Dry Air according to SF₆ content

그림 5에서 확인할 수 있듯이, SF₆/N₂의 절연과괴전압 V_B가 SF₆/Dry Air의 그 전압보다 더 높다. 이는 상술한 전기적 부성기체가 형성하는 음이온의 전자탈착과 관련되는 것으로 생각된다. SF₆/Dry Air은 SF₆/N₂가 함유하지 않는 전기적 부성기체 O₂를 추가적으로 포함하고 있다. 즉 동일한 SF₆ 함유량에서, 전자탈착을 초래하는 음이온은 SF₆/Dry Air가 더 많이 분포한다. SF₆가 O₂보다 전자를 더 빠르게 부착하기 때문에 [22], SF₆/Dry Air에서 음이온은 SF₆⁻, O₂⁻의 순서로 형성된다. 이들 음이온은 양극 주위에 높은 전계와 SF₆, N₂, O₂ 분자에 충돌로부터 전자탈착을 일으키고, 탈착된 전자는 전자사태의 진전을 더욱더 용이하게

한다. 하지만 SF₆/N₂는 O₂를 포함하지 않기 때문에, 동일한 SF₆ 함유량에서 전자탈착으로부터 얻을 수 있는 전자의 수는 SF₆/Dry Air보다 상대적으로 적다. 이는 SF₆/N₂에서 전자사태가 더욱더 진전하기 어려다는 것을 의미한다. 따라서 상술한 전자탈착에 의한 전자사태 메커니즘이 SF₆/N₂와 SF₆/Dry Air의 상이한 절연내력을 초래하는 이유라고 생각한다. 전자탈착으로 인한 절연내력의 저하는 N₂와 CO₂에 전기적 부성기체인 N₂O의 함유량을 혼합하는 경우에 보고된 바 있다 [23].

3.3 SF₆/Dry Air와 SF₆/N₂ 혼합가스의 환경적 영향 및 경제성

3.2항의 실험에서 SF₆의 혼합비율이 높아짐에 따라 절연과괴전압 V_B의 증가율이 구간마다 상이한 특성을 보였다. 본 항은 그 특성, 절연내력 개선에 유효한 SF₆의 함유량, SF₆/N₂와 SF₆/Dry Air의 환경적 영향과 그 경제성을 평가한다.

표 1은 SF₆/Dry Air 혼합가스에서 SF₆ 함유량에 따른 구간을 나누고, 그 구간에 상응하는 절연특성과 V_B를 분석하여 정리한 것이다. 표 1에서 SF₆ 함유량이 0~10%인 1 구간에서 SF₆ 1%당 절연과괴전압 V_B의 상승률은 압력별로 다르게 나타났다. 압력범위(0.1~0.3MPa)에서 그 증가율은 평균 2.56kV/%이다. SF₆의 함유량이 10~100%인 2 구간에서 SF₆ 1% 증가 당 V_B 증가율은 평균 0.64kV/%로 나타났다. 단위 SF₆ 농도 증가 당 절연과괴전압 V_B의 증가율은 1구간이 2구간에 보다 최대 5.95배, 평균적으로 4.50배 더 크다. SF₆/N₂ 혼합가스도 언급한 SF₆/Dry Air와 동일한 구간별 분할 방법으로 해석하였다. 그 결과는 표 2에서 확인할 수 있다. SF₆/N₂ 혼합가스의 구간별 특성은 SF₆/Dry Air 혼합가스의 그 특성과 동일한 경향으로 나타났다. SF₆/N₂ 혼합가스의 경우, SF₆ 단위 농도당 V_B의 증가율은 1구간이 2구간보다 최대 9.59배 더 높았다. SF₆/N₂ 혼합가스가 SF₆/Dry Air보다 SF₆ 함유량에 따른 V_B의 증가율이 더 높은 것은 3.2항에서 설명한 전자탈착으로 인한 것이다.

Table 1. Breakdown characteristics on the sections which were divided from SF₆ content in SF₆/Dry Air

SF ₆ 농도 압력 (MPa)	SF ₆ 단위 농도(%)당 절연과괴전압(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 SF₆를 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, SF₆ 혼합가스의 절연성능, 환경 및 경제적 영향이 검토되어야 한다. 표 1~2와 경제적 관점에서부터, 각각 N₂와 Dry-Air 중 효과적인 절연내력의 개선을 위한 SF₆ 혼합량과 경제적인 SF₆ 혼합가스가 결정될 수 있다. 유효한 SF₆ 혼합량은 절연과괴전압 V_B의 포화가 현저하게 나타나기 이전인 10%이다. 이는 SF₆ 함유량이 증가하여도 절연내력의 상승효과가 포화하며, 환경적 부하가 증가하기 때문이다. 아울러 대기 중 공기를 원료로 사용하는 Dry Air의 제작비는 N₂와 N₂/O₂ 혼합가스보다 약 3배 더 저렴하기 때문에[3], 동일한 함유량의 SF₆를 사용한다면, 경제적인 SF₆ 혼합가스는 SF₆/Dry Air로 선택할 수 있다.

최근에 전극과 스페이서의 접촉불량을 고려할 때, SF₆ 0.1MPa에 상응하는 N₂/O₂ 혼합가스 압력이 0.6MPa임을 보고하였다[24]. N₂/O₂ 혼합가스와 Dry Air의 절연성능은 거의 대등하기 때문에, 본 논문에서 제안된 SF₆/Dry Air(10/90) 혼합가스의 절연내력은 0.6MPa의 Dry Air와 0.1MPa의 SF₆와 비교한다. 0.2MPa의 SF₆/Dry Air(10/90) 혼합가스가 순수 0.1MPa의 SF₆와 비교할 때, SF₆의 사용량은 80% 절감 가능하며, 절연과괴전압 V_B의 저하는 17.5%에 불

과하다. 그리고 그림 2와 3으로부터, 0.3MPa의 SF₆/Dry Air(10/90)의 V_B는 순수 0.1MPa SF₆와 0.6MPa Dry Air보다 각각 9.64, 4.85% 더 높다. 따라서 0.3MPa의 SF₆/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 SF₆보다 더 높은 절연내력을 보유하며, SF₆의 사용량은 70% 감소시킬 수 있다. 이러한 SF₆/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 SF₆ content in SF₆/N₂

SF ₆ 농도 압력 (MPa)	SF ₆ 단위 농도(%)당 절연과괴 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 SF₆ 혼합가스(SF₆/Dry Air, SF₆/N₂)의 절연특성과 그들 가스의 환경적 및 경제적 관점을 연구하였다. 그 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) SF₆/N₂와 SF₆/Dry Air 혼합가스의 절연특성은 SF₆ 함유량의 증가와 함께 포화하는 경향을 보였다. 이는 음이온 SF₆⁻의 전자탈착 메커니즘에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 준평등 전계에서 SF₆ 혼합가스의 절연과괴전압은 SF₆/N₂가 SF₆/Dry Air보다 더 높게 나타남을 확인하였다. SF₆/Dry Air는 SF₆와 함께 음이온을 형성할 수 있는 전기적 부정기체인 O₂를 추가적으로 포함하고 있기 때문이라 생각한다.

- 3) N₂와 Dry Air에 SF₆를 혼합할 때, 효과적인 절연 성능 개선을 위한 SF₆의 함유량은 10%였다.
- 4) 절연내력, SF₆ 사용량에 대한 환경적 부하, 절연 가스의 제작에서 경제성을 검토한 결과, SF₆/Dry Air 혼합가스가 SF₆/N₂보다 친환경 전력설비에 더 적합하였다.

본 논문의 결과들은 고전압 기기에 SF₆/Dry Air 혼합가스를 적용 시 내압설비, 환경적 영향, 경제적 영향을 고려한 합리적인 설계에 사용될 것이다. 추후 불평 등 전계와 전극재료에 따른 SF₆ 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 CF₃-N₂ and CF₃-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 SF₆-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 SF₆ 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 (SF₆) 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 (SF₆) 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 SF₆/N₂, SF₆/AIR, SF₆/CO₂ MIXTURES", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. E1-15, No. 5, pp. 413-418, 1980.
- [10] T. Watanabe and T. Takuma, "The Breakdown Voltage and Discharge Extension of Long Gaps in Nitrogen-SF₆ and Air-SF₆ 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 SF₆", 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 SF₆ and PFC gases mixed with N₂ 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, N₂, CO₂, N₂/O₂ and SF₆/N₂ 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/O₂ 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. E-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. Pancheshnyi, A. Luque, S. Nijdam and U. Ebert, "Probing photo-ionization: simulations of positive streamers in varying N₂:O₂ 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 SF₆⁻, SF₅⁻ and F⁻ in SF₆: Implications for Ion Transport and Electrical Discharges", J. Chem. Phys. Vol. 91, pp. 2261-2268, 1989.
- [22] R. Morrow, "Theory of electrical corona in SF₆", 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 N₂O 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 N₂/O₂ 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.