

Dry Air/O₂ 혼합가스의 혼합비에 따른 절연파괴 및 연면방전 특성 연구

(A Study on Characteristics of Insulation Breakdown and Surface Discharge by the Mixing Ratio of Dry Air/O₂ gas mixtures)

석정후* · 백종현 · 임동영 · 배성우 · 김기채 · 박원주**

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

Abstract

This paper presents the discharge characteristics and economic feasibility of a Dry Air/O₂ and a N₂/O₂ mixture gas in order to review SF₆ alternative. From AC discharge experiment in an quasi-uniform field, it was found that the optimal N₂/O₂ mixing ratio which breakdown voltage and surface flashover voltage were the highest was 70/30 and that the pressure dependence on the breakdown voltage was higher than that of the surface flashover voltage in the Dry Air/O₂ and the N₂/O₂ mixture gas. The mixing ratio (70/30) and the tendency of the pressure dependence were described in detail based on physical factors (impact ionization coefficient, electron attachment coefficient, secondary electron emission coefficient) involved in discharge mechanism and a electron source, respectively. In addition, the performance insulation and the economic feasibility of the Dry Air/O₂ and the N₂/O₂ mixture gas were discussed so that Dry Air/O₂ mixture gas was more suitable than N₂/O₂ mixture gas to the SF₆ alternative.

Key Words : Breakdown Voltage, Dry Air/O₂ Mixture Gas, SF₆, Surface Flashover Voltage

1. 서 론

1997년에 UN 산하의 기후변화기본협약(United Nations Framework Convention on Climate Change:

* 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. 2. 17
Accepted : 2015. 5. 13

UNFCCC) 3차 회의는 SF₆ 가스(SF₆)를 온실가스로 지목하여 감축 대상가스로 규정하였다[1]. 하지만 고전압 엔지니어들은 초고압 전력기기의 절연과 대전류 차단을 위해 안정한 열적·화학적 특성, 우수한 절연성과 아크소호성을 보유한 SF₆를 현재까지 사용하고 있다[2]. 그래서 SF₆ 대체절연가스의 개발과 SF₆ 회수량 증가의 기법에 관한 연구는 전력산업과 고전압 엔지니어에게 흥미롭고, 본질적인 주제이다.

SF₆ 감축, 그 대체절연가스의 탐색과 절연특성에 관한 연구는 다수가 보고되어 있다[3-11]. T. Rokunohe

et al[3-4]는 N₂/O₂ 혼합가스의 절연특성을 연구하여 건조공기와 진공차단기를 적용한 72.5kV 가스절연개폐기를 개발하였고, X. Q. Qiu et al[5]는 불평등 전계에서 SF₆보다 더 높은 5% 뇌 임펄스 절연파괴전압을 보유하는 SF₆ 혼합가스를 보고하였다. 그리고, 건조공기의 낮은 절연내력을 보상하기 위한 절연기법[6], SF₆ 대체를 위한 다양한 절연가스(건조공기[7], N₂와 N₂/O₂ 혼합가스[8-9], CF₃I[10-11])의 절연특성에 관한 연구가 보고되었다. 특히 N₂/O₂ 혼합가스에서 최적의 절연내력을 보이는 혼합비가 60/40[3-4], 80/20[9]으로 실험조건은 다소 다르지만 두 연구에서 서로 상이하게 보고되어 있다.

한편 SF₆ 대체가스를 기존의 고전압 전력설비에 적용하기 위해서는 그 대체가스의 절연성능, 연면절연성능, 경제성을 검토하는 것이 필수적이다. 대체가스들의 절연성능은 더 높은 고전압을 감당, 수용하기 위한 가장 기본적인 조건이다. 그리고 고전압 전력설비의 내부구조, 크기, 재질, 설치환경을 고려하면, 그 장치의 절연은 단일 매질로만 수행하는 것이 불가능하다. 그렇기 때문에 고전압 도체를 지지하는 스페이서와 고전압 인출을 위한 부싱, 전선간 이격과 절연을 위한 애자와 같은 고체유전체가 적용된다. 즉 기체와 고체매질의 복합절연이 구성된다. 이 복합절연은 고체보다 더 낮은 기체의 절연성능으로 인해 고체 표면으로 연면방전을 초래하는 취약점을 가진다. 심지어 연면방전 개시전압은 동일한 압력, 전극구조, 절연간격에서, 고체유전체가 없는 기체만의 절연내력보다 더 낮다[12]. 게다가 알려진 SF₆ 대체가스(N₂, CO₂, 건조공기, N₂/O₂ 혼합가스)는 절연내력이 평등 전계에서 SF₆의 약 1/3 수준이므로[3], 대체가스를 이용한 전력설비는 기존의 SF₆ 전력설비보다 더 높은 압력을 요구한다. 그러므로 대체가스들의 연면절연성능과 경제성이 친환경 전력설비의 적용을 위해 검토해야 한다.

하지만 대체가스에 관한 연구들[3-11]은 광범위한 실험범위, 장기간 실험소요시간과 노력으로 인해 대체가스들의 절연내력, 연면절연성능, 경제성을 함께 검토하지 않았다. 더욱이 기체방전(고체유전체가 없는 경우)과 기체의 연면방전특성을 동시에 다룬 연구들

은 소수의 리뷰논문으로 보고되어 있지만[13-14], 그 2개의 방전유형은 상이한 물리적 메커니즘으로 인해 구분, 분리하여 연구하고 있는 실정이다.

본 논문은 SF₆ 대체가스인 Dry Air/O₂ 혼합가스와 N₂/O₂ 혼합가스의 기체방전과 연면방전특성, 경제성을 함께 연구하였다. 대체가스 중 절연특성실험은 준평등 전계에서 압력, N₂/O₂ 혼합비에 따른 절연특성의 실험을 수행하였다. 그 실험결과로부터 본 논문은 기존 연구[3-4, 8-9]와 상이한 최적의 N₂/O₂ 혼합비와 N₂/O₂ 혼합가스보다 더 낮은 비용의 친환경 대체가스를 제안하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

그림 1은 본 연구를 위한 실험 장치도를 보여준다. 그 장치도는 모의 챔버(Test chamber), 전원장치(Power Supply), Dry Air 제조장치(Dry Air product device), 진공펌프(Vacuum pump, SINKU KIKO Co. Ltd, GUD-050A, Pumping speed 60 l/min), 전극, 디지털 압력계로 구성된다.

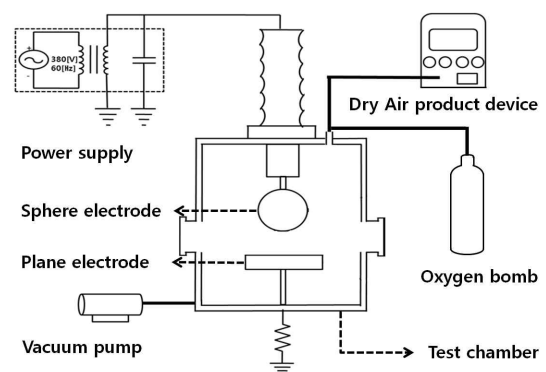


그림 1. 실험 장치도
Fig. 1. Experimental setup

모의 챔버는 가스의 방전특성과 연면방전특성을 연구하기 위하여 스테인리스 스틸로 내·외부 이중 구조로 제작하였다. 절연파괴전압에서 온도에 영향을 억제하기 위해, 그 이중구조 사이는 열절

연을 위한 진공층으로 구성하였다. 이 챔버의 크기는 직경 460mm, 높이 500mm이며, 가혹한 실험 조건을 위해, -90~100℃의 온도범위와 최대 가스 압력 1MPa까지 수용가능하다. 전원장치는 AC용 DY-050725(Input Voltage : 1φ 380V 60Hz, Secondary Voltage : 1φ 300kV 60Hz, Capacity : 36kVA)으로 2차 측과 병렬로 연결한 고전압 커패시터와 모의챔버에 고전압을 인가한다. Dry Air 제조장치는 Dry Air를 제작을 위해 사용하였고, 공기 중의 불순물의 제거를 위해 세 단계의 필터를 가진다. 그리고 상보적 동작을 하는 두 개의 수분흡착 탱크는 콤프레서를 통과한 대기 중 공기의 수분을 단시간에 흡착하여 -75℃ 이하의 Dry Air를 제공한다. 진공펌프는 순수한 절연가스를 모의 챔버에 주입시키기 위해, 모의챔버의 내부와 이중구조(내·외부 사이)를 6.7×10^{-2} Pa로 진공화 하는데 사용하였다. 전극은 상부(고전압 측)와 하부(접지측)에 각각 스테인리스 스틸의 구전극(Sphere, 직경 41mm)과 Rogowski형 평판전극(Plane, 직경 59mm)을 사용하였다. 모의 챔버의 내부 압력은 디지털 압력계(LEO 2 Ei, 0.1~3MPa, 오차 0.1% 미만)를 이용하여 측정하였고, 절대압력을 기준으로 측정하였다.

그 외 실험을 위한 실험재료들은 고체유전체, 절연 가스가 있다. 고체유전체는 연면방전특성을 연구하기 위해 테프론을 사용하였고, 그 두께와 지름은 각각 3mm, 100mm이다. 그리고 사용한 N₂와 O₂ 가스의 순도는 99.999%이다.

2.2 실험 방법

실험은 모의 챔버 내부에 전극과 고체유전체의 설치, 모의 챔버 내부의 진공화, 절연가스의 가압, AC 고전압 인가, 절연과피전압의 측정의 순서로 실시하였다. 전극은 모의 챔버 내의 하부에 평판전극을 설치하고, 상부 구전극을 부싱에 연결하여 설치하였다. 구전극과 평판전극 사이에 전극간 갭은 6mm이다. 전극설치 후 진공펌프로 모의 챔버 내부를 진공의 압력으로 배기시켰다. 절연가스는 표 1

과 같은 혼합비로 주입하였고, N₂/O₂, Dry Air/O₂ 혼합비는 디지털 압력계에 의해 정밀하게 설정하였다. 실험대상의 절연가스를 주입한 후 모의 챔버로 AC 고전압을 인가하였다. AC 고전압은 전극 사이에 완전한 절연과피나 플래쉬오버가 발생할 때까지, 3.15kV/s의 상승속도로 인가하였다. 절연과피 전압(V_B)과 연면플래쉬오버전압(V_S)은 리더방전에 의한 초기방전 전압값을 10회 측정하였고, 실험데이터는 그 평균값, 최대값, 최소값을 이용하였다. 모의 챔버내 절연가스의 충전과 각각의 절연과피 후, 다음 측정 사이에는 30s의 시간간격을 두었는데, 이는 절연가스의 절연회복시간을 확보하기 위함이다. V_S 의 측정실험은 전극 사이에 고체유전체를 설치하여 수행하였고, 그 외 나머지 실험방법과 절차는 V_B 측정과 동일하다.

사용한 전극계의 평등성을 확인하기 위해, 그림 2는 N₂/O₂ 혼합가스 0.3MPa에서 V_B 를 기반으로 계산된 전계강도를 보여준다. 전계강도는 갭과 함께 감소하는데, 이는 본 전극계가 평등전계가 아님을 의미한다. 본 전극계의 전계 평등성을 확인하기 위해, 전계 이용률 ξ 을 식 (1)로 계산하였다[15].

$$\xi = \frac{E_{mean}}{E_{max}} \quad (1)$$

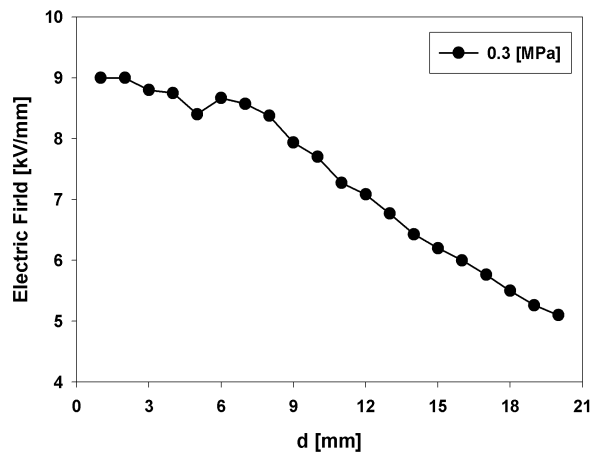


그림 2. 0.3MPa의 N₂/O₂ 혼합가스 (8/2) 중 구대평판전극의 전계강도
Fig. 2. Electric field under sphere-plant electrode at 0.3MPa in N₂/O₂ mixture gas (8/2)

여기서 E_{mean} 과 E_{max} 는 각각 평균전계와 최대전계이다. 그림 2의 데이터와 식 (1)로부터, 전계 이용률 ξ 는 약 0.81이다. 이 0.81의 전계 이용률은 유사한 전극 형상과 배치를 준평등 전계로 이용한 다른 연구[16]의 η 와 유사한 값을 가진다. 더욱이 위와 같은 전극 배치에서 전극의 극간이 구전극의 지름에 비해 충분히 작다면, 그 전극계는 준평등 전계를 형성한다. 이러한 형성은 M. Topler가 검증하였다[17].

표 1. 실험에 사용된 Dry Air/O₂와 N₂/O₂의 혼합비
Table 1. The mixing ratio of Dry Air/O₂ and N₂/O₂ for the AC discharge test

실험	혼합비(%)		N ₂ /O ₂ 비(%)	
	Dry Air	O ₂	N ₂	O ₂
1	100	0	79	21
2	88.6	11.4	70	30
3	75.9	24.1	60	40

3. 실험 결과

3.1 N₂/O₂와 Dry Air/O₂ 혼합가스의 절연 파괴특성

그림 3은 절연파괴전압 V_B 와 압력의 특성을 6mm의 전극간격에서 N₂/O₂ 혼합비에 따라 보여준다. 절연파괴전압 V_B 는 모든 N₂/O₂ 혼합비에서 압력과 함께 증가하였다. 이는 절연파괴전압과 압력의 관계를 설명하는 파셴의 법칙(Paschen's Law)에 부합하는 결과이다. 그리고 N₂/O₂ 혼합가스의 압력이 0.1MPa 간격으로 증가할 때, V_B 의 증가율은 평균 33.91%였다. 그 증가율의 최소와 최대를 보인 압력구간은 각각 5~6MPa와 1~2MPa이며, 그 증가율은 각각 7.18%, 89.19%이다. 언급한 결과로부터, 절연파괴전압 V_B 는 압력에 의존하는 것으로 해석할 수 있다. 추가적으로 V_B 가 가장 높은 N₂/O₂ 혼합비는 70/30이며, 이러한 결과는 실험범위의 모든 가스압력에서 유효했다. N₂/O₂ 혼합가스에서 최적의 절연내력을 보이는 혼합비는 60/40[3-4], 80/20[9]로 보고된 바 있지만, 본 실험의 결과는 그 혼합비들과 다른 결과가 나타났다. 이는 4.1

항에서 고찰한다.

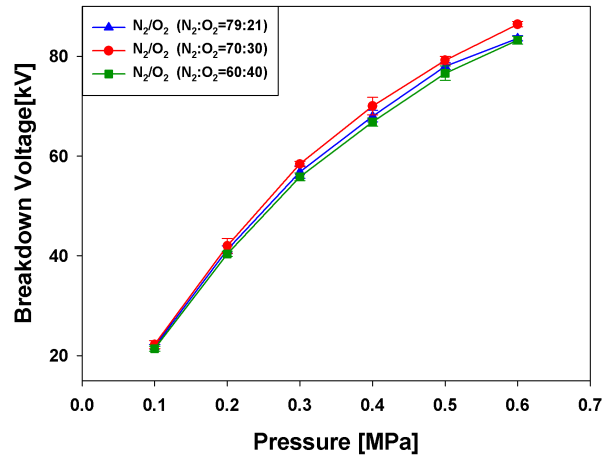


그림 3. N₂/O₂혼합가스의 혼합비에 따른 V_B -P 특성
Fig. 3. V_B -P characteristics by the mixing ratio in N₂/O₂ gas mixture

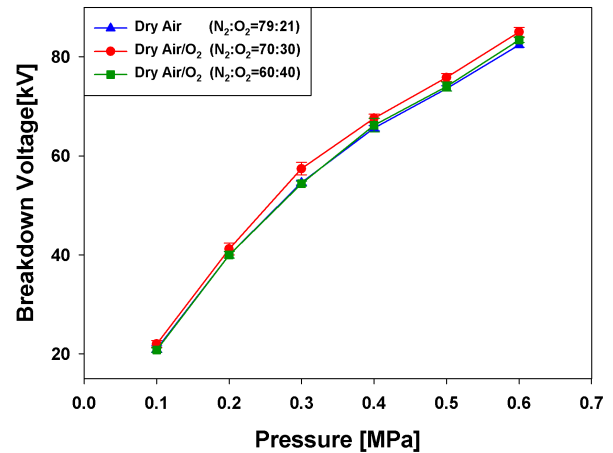


그림 4. Dry Air/O₂혼합가스의 혼합비에 따른 V_B -P 특성
Fig. 4. V_B -P characteristics by the mixing ratio in Dry Air/O₂ gas mixtures

그림 4는 절연파괴전압 V_B 와 압력의 특성을 6mm의 전극간격에서 Dry Air/O₂ 혼합비에 따라 보여준다. Dry Air/O₂의 혼합비는 표 1과 같이 N₂/O₂ 혼합가스의 절연특성실험과 동일한 N₂/O₂ 혼합비를 적용하였다. Dry Air/O₂ 중 압력에 따른 V_B 특성은 N₂/O₂ 혼합가스의 V_B 와 압력특성과 유사하였다. 다시 말해서 Dry Air/O₂의 절연파괴전압 또한 압력에 의존한다. Dry Air/O₂의 가스압력이 0.1MPa 간격으로 증가할

때, V_B 의 증가율은 평균 34.29%이다. 그 증가율의 최소와 최대를 보이는 압력구간은 각각 5~6MPa와 1~2MPa이며, 그 증가율은 각각 10.36%, 92.31%이다. 그리고 V_B 가 가장 높은 Dry Air/ O_2 의 혼합비는 88.6/11.4였다. 그 혼합비는 N_2/O_2 의 70/30과 동일한 혼합비다. 이 결과 또한 모든 압력에서 유효하게 나타났다.

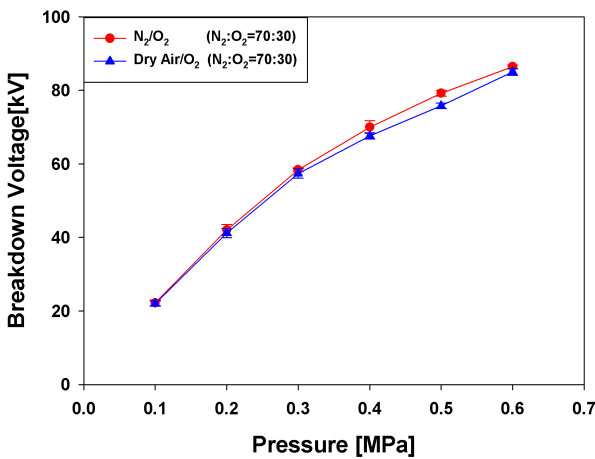


그림 5. 최적 혼합비에서 N_2/O_2 와 Dry Air/ O_2 혼합가스의 V_B -P 특성
 Fig. 5. V_B -P characteristics of N_2/O_2 and Dry Air/ O_2 gas mixtures at optimum mixing ratio

그림 5는 가장 높은 V_B 를 보이는 N_2/O_2 와 Dry Air/ O_2 의 혼합가스에서 절연과괴전압을 비교한 것이다. N_2/O_2 혼합가스의 절연과괴전압 V_B 가 Dry Air/ O_2 의 그 전압보다 평균 2.31% 더 높았다.

3.2 N_2/O_2 와 Dry Air/ O_2 혼합가스의 연면 플래쉬오버 특성

그림 6은 N_2/O_2 혼합가스 중 압력에 따른 연면 플래쉬오버 특성을 보여준다. 연면 플래쉬오버 전압 V_S 는 그림 3의 V_B 와 유사하게 압력과 함께 상승하였다. 가스 압력이 0.1MPa의 간격으로 증가할 때, V_S 의 증가율은 평균 3.81%였다. 심지어 최대의 V_S 증가율은 2-3 압력구간에서 5.80%이다. 그러므로 V_S 의 압력의존성은 3.1항에서 설명한 V_B 의 압력 의존성 보다 현저하게 낮

은 것으로 해석된다. 추가적으로 가장 높은 V_S 를 보유한 N_2/O_2 의 혼합비는 70/30으로 그림 3에서 최적의 V_B 를 보여준 N_2/O_2 혼합비와 동일함을 확인하였다.

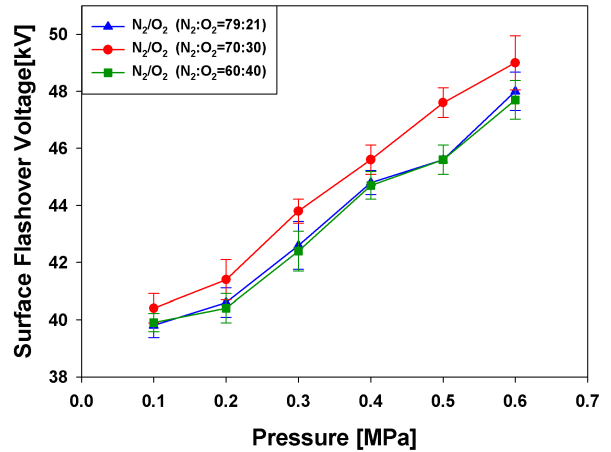


그림 6. N_2/O_2 혼합가스의 혼합비에 따른 V_S -P 특성 (Teflon, 3T 100Φ)
 Fig. 6. V_S -P characteristics by the mixing ratio in N_2/O_2 gas mixtures (Teflon, 3T100Φ)

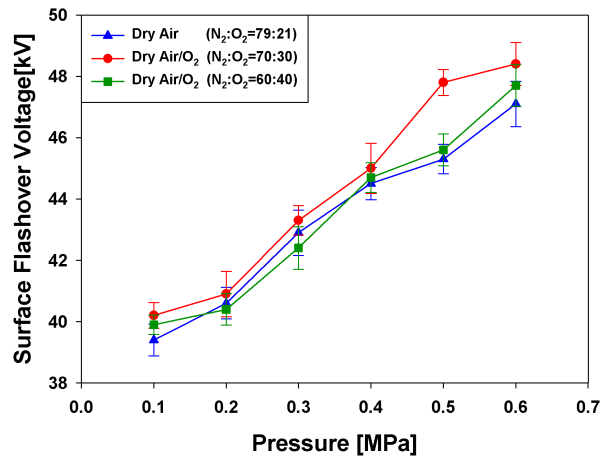


그림 7. Dry Air/ O_2 혼합가스의 혼합비에 따른 V_S -P 특성 (Teflon 3T 100Φ)
 Fig. 7. V_S -P characteristics by the mixing ratio in Dry Air/ O_2 gas mixtures (Teflon 3T100Φ)

Dry Air/ O_2 혼합가스의 연면 플래쉬오버 전압 V_S 는 압력과 함께 그림 7에 도식하였다. 그 그림으로부터 Dry Air/ O_2 혼합가스의 연면 플래쉬오버 특성이 N_2/O_2 의 그 특성과 유사함을 알 수 있다. 연면 플래쉬오버 전

압 V_S 가 가장 높은 N₂/O₂ 혼합비도 동일하며, V_B 보다 V_S 가 압력 의존성이 낮다는 결과도 유사하였다. 두 전압의 압력 의존성은 4.2항에서 고찰한다.

4. 고찰

4.1 N₂/O₂의 최적 혼합비

최적의 절연내력을 보유하는 N₂/O₂ 혼합비는 60/40[3-4], 80/20[9]로 알려져 있다. 본 실험에서, 얻어진 N₂/O₂의 최적 혼합비는 이전의 연구와 서로 상이한 70/30이다. 이는 O₂ 함유량에 따른 N₂/O₂ 혼합가스의 절연파괴전압을 보여주는 그림 8에서 확인할 수 있다. N₂/O₂ 혼합가스 중 O₂ 함유량에 따른 절연특성에서, O₂ 함유량과 함께 절연파괴전압은 상승한 후 감소하는 특성을 드러내는데[3-4, 8-9, 18], 그림 8은 그 특성과 잘 일치한다. J. H. Mason[18]은 O₂ 함유량과 함께 상승하는 절연파괴전압은 O₂의 전자부착으로 인한 것이고, 그 전압의 감소는 광전리로 인한 것으로 추정하였다. 그러므로 불일치한 N₂/O₂의 혼합비는 O₂의 전자부착의 영향에 의존한 해석보다는 광전리를 함께 고려하여 설명하는 것이 합리적이다.

2차 전자방출과정(광전리)과 전자부착을 고려한 절연파괴는 타운젠트 절연파괴 이론식에 의해 정량적으로 표현되는데, 그 이론식은 식 (2)와 같다[15].

$$I = I_0 \frac{\frac{\alpha}{\alpha - \eta} [e^{(\alpha - \eta)d} - \frac{\eta}{\alpha}]}{1 - \frac{\alpha \gamma}{\alpha - \eta} [e^{(\alpha - \eta)d} - 1]} \quad (2)$$

여기서 I 와 I_0 는 각각 절연파괴 시 전류, 음극에서 개시하는 전자전류이고, d 는 전극간 갭이다. α 와 γ 는 각각 전자사태의 성장을 이끄는 충돌전리계수와 2차 전자방출계수이다. 그리고 η 는 전자사태를 억제하는 전자부착계수이다. 절연파괴는 식 (2)의 분모가 0이 되어 $I = \infty$ 의 조건을 충족하면 발생한다. 그래서, α 와 γ 계수가 증가하여 전자사태로 발달하면 최종적으로 절연파괴가 발생하게 된다. 식 (2)에서

광전리의 영향은 2차 전자방출계수 γ 에 포함되어 있다. 그 γ 계수는 양이온이 음극에 충돌하여 전자를 방출하는 작용과 광자가 음극에 입사하여 전자를 방출하는 광전리로 구성된다. 이는 γ 계수가 음극으로 사용한 전극에 영향이 있음을 의미한다. E. Kuffel[15]는 이 γ 계수가 실험조건에 현저하게 의존함을 언급하였다.

그리고 충돌전리계수 α 는 일정한 압력에서 전계 E 의 함수이고, 전극 사이에 전계 E 는 인가전압의 규모와 전극간 거리에 의존한다[19-20]. 상술한 설명으로부터, 2차 전자방출계수 γ 는 음극재료와 그 표면 거칠기에, 충돌전리계수 α 는 인가전압 규모와 전극간 거리에 따라 변화하게 된다.

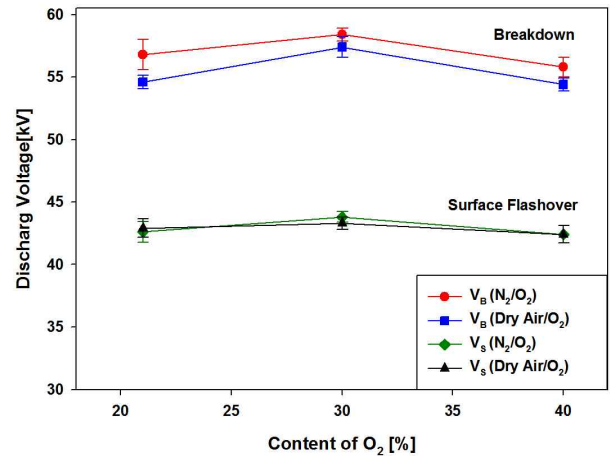


그림 8. 0.3MPa에서 N₂/O₂와 Dry Air/O₂ 혼합가스의 O₂ 농도에 따른 V_B 및 V_S 특성

Fig. 8. V_B and V_S characteristics according to content of O₂ in N₂/O₂ and Dry Air/O₂ gas mixtures at 0.3MPa

이전의 연구인[3-4]는 동축원통전극(갭 250mm)과 뇌 임펄스 전압을, [9]는 나이프 형상의 전극(갭 5mm)과 교류전압을 이용하여 연구하였다. 그러므로 인가전압, 음극의 재료와 표면 거칠기, 전극간 거리 모두가 본 실험의 조건과 일치한 연구는 없다. 이는 전자사태의 성장과정에서 충돌전리계수 α 와 2차 전자방출계수 γ 가 [3-4, 9]의 실험과 불일치함을 의미한다. 이러한 α 와 γ 계수가 불일치하는 N₂/O₂ 최적 혼합비의 결과를 이끄는 것으로 해석할 수 있다. 다시 말해서 O₂

함유량이 동일하여 전자사태를 억제하는 전자부착효과가 같을지라도, 전자사태의 성장을 이끄는 α 와 γ 계수의 차이가 가스의 상이한 절연성능을 초래할 수 있다. 이전에 유사한 연구[21]에서도 실험조건의 불일치가 최적의 N_2/O_2 가 상이할 수 있음을 지적하였다. 아울러 L. G. Christophorou[22]가 절연파괴는 가스 유전체에서 도전성 채널을 형성하기 위한 전자사태의 성장을 설명하는 것이 중요하다고 제안하였다. 이는 전자사태 성장과 관련된 α 와 γ 계수를 고려한 상술의 설명과 일맥상통한다.

4.2 절연파괴전압과 연면플래쉬오버전압의 압력의존성

그림 3과 6에서, N_2/O_2 혼합가스의 절연파괴전압 V_B 와 연면플래쉬오버전압 V_S 는 가스의 압력과 함께 증가함을 알 수 있다. V_B 와 V_S 에서 압력에 따른 평균 증가비율은 각각 33.91%, 3.81%이므로, 압력의존성은 절연파괴전압 V_B 가 V_S 보다 현저하게 높다. 이 결과는 Dry Air/ O_2 혼합가스에서도 동일하다. 이 차이는 전자사태의 성장메커니즘에 기인한 것이다.

전극 사이에 절연물이 없는 경우에 전자사태는 주로 음극에서 방출된 전자가 기체분자와의 충돌전리와 광전리를 통하여 발달한다. 반면에 절연물이 전극 사이에 존재하는 연면방전은 충돌전리, 광전리와 함께 고체유전체 표면에 전자충돌로 인한 2차 전자방출이 추가된다[12]. 전극, 고체유전체, 절연가스가 접하는 음극지점(삼중점)에서 방출된 전자는 기체와 충돌전리를 일으키며 다시 고체유전체 표면에 충돌하여 전자를 방출시킨다. 그리고 전리를 발생시킬 수 있는 충분한 에너지를 보유한 광자가 전극과 고체유전체에 입사하면 추가적으로 전자가 방출된다. 따라서, 고체유전체의 존재가 베리어의 역발 보다는 전자 방출원으로 작용하여 전자사태를 촉진한다. 아울러 양극과 음극 사이에 고체유전체 표면에 따른 연면거리에 대한 전계 평등성은 삼중점의 집중된 고전계, 고체유전체의 표면에 미세한 돌출부와 표면 거칠기로 인해 평등전계 보다 불평등 전계로 간주하는 것이 합리적이다. 따

라서 전자사태성장에 기여하는 전자 방출원과 연면거리에 대한 전계 불평등성이 V_S 의 압력의존성을 V_B 에 대한 그 의존성보다 더 낮아짐에 기여한다.

4.3 N_2/O_2 와 Dry Air/ O_2 혼합가스의 경제성

낮은 SF_6 대체가스의 절연성능을 보장하기 위해, 친환경 전력설비는 기존의 SF_6 전력설비보다 더 높은 압력을 요구한다. 그래서 SF_6 대체가스는 경제적으로 제작하는 것이 중요하다.

N_2/O_2 혼합가스와 Dry Air 혼합가스의 구성성분은 유사하지만, 그들 가스의 제작비용은 N_2/O_2 혼합가스가 Dry Air 보다 약 3배 더 고가이다[4]. 이 비용의 차이는 제작을 위한 장치와 가스의 분리, 혼합의 과정에서 추가 장치에 의해 발생하는 것으로 분석되었다[21]. 따라서 공기를 SF_6 대체절연가스로 적용하는 경우, Dry Air의 혼합량이 많을수록 대체 절연가스는 경제적이다.

본 실험으로부터 N_2/O_2 의 최적혼합비는 70/30이다. 그 혼합비에서 Dry Air/ O_2 의 절연내력은 N_2/O_2 혼합가스보다 약 2.31% 더 낮지만(그림 5), 거의 대등하다. 그리고 N_2/O_2 의 구성성분이 70/30과 같은 Dry Air/ O_2 는 N_2/O_2 혼합가스에 비해, N_2 와 O_2 의 사용량을 각각 100%, 28.6% 감소 가능하다. 따라서 N_2/O_2 혼합가스와 비교하여 거의 동등한 절연성능과 더 우수한 경제성을 보유한 Dry Air/ O_2 혼합가스는 N_2/O_2 혼합가스보다 친환경 전력장치의 절연가스로 더 적절하다.

5. 결 론

본 논문은 Dry Air/ O_2 와 N_2/O_2 혼합가스의 절연특성과 연면플래쉬오버특성 및 그 경제성을 검토하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절연파괴전압과 연면플래쉬오버전압은 N_2/O_2 혼합비가 70/30에서 가장 높았고, 이 혼합비는 알려진 최적혼합비(80/20, 60/40)와 상이하였다. 이는 불일치한 실험조건(음극의 재료와 표면 거칠기, 인가전압의 규모와 전극간 거리)으로 인

해, 상이한 충돌전리계수와 2차 전자방출계수를 초래하여 전자사태의 성장률이 변화하기 때문이다.

- 2) 절연과괴전압과 연면플래쉬오버전압의 압력 의존성은 서로 달랐다. 이는 전자사태성장 메커니즘이 상이하기 때문인데, 연면방전에서 고체유전체가 배리어의 역할보다는 전자 방출원으로 작용한 결과로 생각한다.
- 3) Dry Air/O₂ 혼합가스의 절연성능은 N₂/O₂ 혼합가스와 비교할 때 거의 같으며, 제작비용이 더 경제적이다. 따라서 미래의 친환경 전력설비에 절연가스로 Dry Air/O₂ 혼합가스가 N₂/O₂ 혼합가스보다 더 적합하다.

본 논문의 결과들은 Dry Air를 절연가스로 이용하는 고전압 전력설비의 절연설계에 유용하게 적용가능할 것이다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2014년도 추계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

- [1] S.H. Park, "European Union and the Kyoto Protocol", ACEF Autumn Annual Conference 2008, pp. 125-144, 2008.
- [2] 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.
- [3] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori and F. Endo, "Development of SF₆-free 72.5kV QS", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 22, No. 3, pp. 1869-1876, 2007.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] T. Yoshida, H. Koga, T. Harada, S. Miki, M. Arioka, S. Sato, S. Yoshida, N. Inoue, A. Maruyama, and T. Takeuchi, "Insulation Technology in Dry-Air and Vacuum for a 72-kV Low-Pressure Dry-Air Insulated Switchgear", Electr. Eng. Jpn., Vol. 175, No. 1, pp. 18-24, 2011.
- [7] H. Saito, K. Nagatake, H. Komatsu, Y. Takeshi, Y. Matsui, k. Katslmata, and M. Sakaki, "Development of 72/84kV Dry Air-Insulated Dead Tank VCB", Electr. Eng. Jpn., Vol. 177, No. 1, pp. 1-10 2011.
- [8] D.Y. Lim, "A Study of Surface Insulation Characteristics in N₂/O₂ Mixture Gas", a thesis submitted for the degree of master of Electrical Engineering, Yeungnam University, 2011.
- [9] D.Y. Lim, "Comparative Study on Surface Insulation Performance in Oxygen/Nitrogen Gas Mixtures for High Voltage Equipment in Distribution Class", a thesis submitted for the degree of doctor of Electrical Engineering, Yeungnam University, 2015.
- [10] 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.
- [11] X. Zhang, S. Xiao, J. Zhou and J. Tang, "Experimental Analysis of the Feasibility of CF₃/CO₂ Substituting SF₆ as Insulation Medium using Needle-Plant Electrodes", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, No. 4, pp. 1895-1900, 2014.
- [12] H. C. Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 24, No. 5, pp. 765-786, 1989.
- [13] T. Takuma, "Discharge Characteristics of Gaseous Dielectrics," IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. E-21 No. 6, pp. 855-867, 1986.
- [14] P. R. Howard, "Insulation Properties of Compressed Electronegative Gases", Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering, Vol. 104, No. 14, pp. 123-137, 1957.
- [15] E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", Elsevier, pp. 203, 323-345, 2000.
- [16] M. Hikita, S. Ohtsuka, N. Yokoyama, S. Okabe and S. Kaneko, "Effect of Electrode Surface Roughness and Dielectric Coating on Breakdown Characteristics of High Pressure CO₂ and N₂ in a Quasi-Uniform Electric Field", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, No. 1, pp. 243-250, 2008.
- [17] K. C. Seo, "High Voltage Engineering (New edition)", Dong Myeong Publishers, pp.34-40, 1977.
- [18] J. H. Mason, "Discharges", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. E-13, No. 4, pp. 211-238, 1978.
- [19] D. Y. Lim, G. J. Min, H. Park, E. H. Choi, S. T. Choi, S. Bae, S. B. Rhee, W. Z. Park and K. S. Lee, "Analysis of Medium Effect by Gas Pressure and Gap at Surface Discharge of Dry Air", Journal of KIIEE, Vol. 27, No. 10, pp. 86-92, 2013.
- [20] J. H. Lee, H. Park, E. H. Choi, S. H. Jang and K. S. Lee, "Surface Discharge Characteristics of Teflon Resin in Environment-Friendly Insulation Gas", Journal of KIIEE, Vol. 23, No. 10, pp. 121-127, 2009.
- [21] 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., 2015(to be published)
- [22] L. G. Christophorou and L. A. Pinnaduwege, "Basic Physics of Gaseous Dielectrics", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, No. 1, pp. 55-74, 1990.

◇ 저자소개 ◇



석정후(石貞煦)

1990년 9월 12일생. 2014년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



백종현(白種鉉)

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



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).



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.



김기채(金基采)

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



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 본 학회 감사.