

# 불평등 전기 중 불량 접촉갭에 관한 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스의 연면플래쉬오버특성

(Surface Flashover Characteristics on Poor Contact in N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Mixture Gas under  
Non-Uniform Field)

임동영\* · 최은혁 · 최상태 · 최병주 · 이광식 · 배성우\*\*

(Dong-Young Lim · Eun-Hyeok Choi · Sang-Tae Choi · Byoung-Ju Choi ·  
Kwang-Sik Lee · Sungwoo Bae)

## Abstract

This paper presents the surface flashover characteristics to simulate the poor contact between an anode and a solid dielectric in a N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixture gas (8/2) under a non-uniform field. The surface flashover voltage of the N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixture gas revealed the irregular tendency that was not in accordance with the Paschen's law with an increasing gap of the poor contact. In addition, the insulation performance of the N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixture gas at 0.6MPa was comparable to that of SF<sub>6</sub> gas of 0.1MPa based on the insulation performance on the poor contact. These results are able to apply the insulation design of eco-friendly gas insulation switchgear considering the internal faults.

Key Words : Breakdown, Gas Insulation Switchgear, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Mixture Gas, Poor Contact, Surface Flashover

## 1. 서 론

전력설비가 고전압 엔지니어에 의해 온전한 절연설계로 충분한 절연성능을 보유할지라도, 의도하지 않은 결함들이 그 설비의 절연성능을 위협, 저하시킨다. 그렇기 때문에 의도치 않은 결함들이 절연파괴에 미치는 영향과 그 절연파괴메커니즘을 지속적으로 연구해

야한다. S. Tominaga et al[1]은 SF<sub>6</sub> 가스가 아크에 노출되면 분해된 SF<sub>4</sub>를 생성하는데, 그 SF<sub>4</sub>의 양이 SF<sub>6</sub> 0.5MPa의 체적에 0.03% 이상 함유되면, 스페이서의 표면저항이 변함을 보고하였다. 그리고 자연환경에 의한 결함(비[2], 눈[3], 외부오염[4])이 전력설비의 절연성능에 미치는 영향도 검토되었다. 아울러 액체 유전체는 코로나 전류와 외부의 유입 열이 액체 중 기포의 발생을 초래하여 결함으로 작용하는데, M. Hara[5], K. S. Lee[6]는 절연파괴에서 기포의 거동과 그 영향을 연구하였다. 그 외 가스절연개폐기(Gas Insulation Switchgear)의 진단, 점검, 조립과정에서 유입된 도전성 파티클에 의한 SF<sub>6</sub> GIS의 절연성능저하와 그 방전메커니즘도 연구되었다[7-8].

\* Main author : Director of Research Institute at Hyeong Jin Corp.

\*\* Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Yeungnam University

Tel : 053-526-2356, Fax : 053-556-7338

E-mail : without38@naver.com

Received : 2015. 6. 1

Accepted : 2015. 7. 6

전력설비의 절연성능이 상술한 비의도적 결합들뿐만 아니라, 불량 접촉갭에 의해 저하될 수 있다. 그래서  $SF_6$  전력설비와  $SF_6$  대체가스의 전력설비에서 내부장치의 동작과 내부구조에 따른 불량 접촉갭의 절연성능에 관한 연구가 필수적이다. 이러한 불량 접촉은 GIS 내부에 차단기와 개폐기의 동작과 스페이스-전극접촉에 상응한다. 차단기와 개폐기의 동작은 접촉자들의 이격과 접촉직전에 매우 짧은 가스갭을 형성하며, 스페이스와 전극의 접촉은 완전히 고르지 못한 표면에 의해 마이크로 갭을 초래한다. 그 갭들은 고전압에 의해 고전계를 제공하기 때문에, 부분방전의 원천이 된다. 이 부분방전은 완전한 절연과괴와 연면플래쉬오버의 발달에 기여하여, 절연성능의 저하를 초래한다.

불량 접촉갭에 관한 연구는  $SF_6$  가스 중에서 많은 결과들이 발표되었다[9-12]. T. Hosokawa와 K. S. Lee[9-10]는  $SF_6$  중 불량 접촉갭에 약한 아크가 존재하는 조건에서,  $SF_6$ 의 절연과괴 과정이 6단계로 나누어짐을 해명하였고, T. Takma[11]는 전극과 스페이스의 불량 접촉에 영향을 증가하는  $SF_6$  가스 압력과 함께 뚜렷해짐을 보고하였다. 반면에 온난화 지수를 보유하지 않는  $SF_6$  대체가스( $N_2$ ,  $N_2/O_2$  혼합가스, 건조 공기) 중 그 연구사례는 드물다[12]. 이는  $SF_6$  대체를 위한 절연매질 탐색[13]과 절연성능[14-16]을 집중적으로 연구하였기 때문이다. 특히 일본에서 친환경 GIS를 개발 하였지만[14], 불량 접촉갭과 차단성능을 검토하지 않아 종래의  $SF_6$  GIS처럼 단일매질로 구축되지 않았다. 더욱이  $SF_6$  대체가스 중 도전성 파티클에 대한 연구는 보고된 바 있지만[17-18], 불량 접촉갭에 대한 절연성능 및 특성에 관한 연구는 여전히 미흡하다.

본 논문은 친환경 전력설비의 절연설계를 위한 물리적 정보를 제공하기 위해, 불량 접촉갭에 대한 절연특성을 연구하였다. 연면플래쉬오버 실험은 불평등 전계 중  $N_2/O_2$  혼합가스(8/2)와  $SF_6$  가스에 대하여 수행하였다. 불량 접촉갭의 조건에서, 연면플래쉬오버특성은 파센의 법칙에 부응하지 않았으며,  $SF_6$  0.1MPa의 절연성능에 상응하는  $N_2/O_2$  혼합가스의 압력은 알려진 것과 다른 결과를 얻었다.

## 2. 실험장치와 실험방법

본 실험을 위한 장치는 교류 고전압 발생기, 고전압 분압기, 테스트 챔버, 오실로스코프를 사용하였다. 그림 1은 이 장치들의 연결과 배치를 보여준다. 교류 고전압 발생기는 전원(380V, 60Hz)을 이용하여 교류 고전압을 발생시키고, 고전압 변압기 2차측의 증가된 교류 고전압이 고전압 장치( $C_3$ )와 테스트 챔버에 인가된다. 테스트 챔버는 스테인레스 스틸로 제작하였고, 그 직경과 높이는 각각 460mm, 500mm이다. 압력계는 테스트 챔버 내부압력의 측정을 위해, 챔버 상부에 설치하였다. 고전압 분압기(CR 분압기, 5000:1, EP-100k)는 테스트 챔버에 인가한 고전압과 연면플래쉬오버전압( $V_f$ )의 측정을 위해 사용하였고, 그 분압기의 오차는 3%이다. 그리고 그림 1에서  $R_4$  저항은 방전전류를 측정하기 위한 22Ω의 저항이며, 방전전압-방전전류 파형은 오실로스코프(LeCory WaveRunner 6Zi, 1GHz)를 이용하여 관측하였다. 그 오실로스코프는 고전압 분압기 저압측에 설치하였으며, 저압측 저항과 병렬로 연결하였다.

그 외 연구를 위해 사용한 실험재료들은 절연가스, 전극, 고체유전체가 있다. 절연가스는 공기와 성분이 유사한  $N_2/O_2$  혼합가스(8:2)를 사용하였고, 그들 가스의 순도는 99.999%이다. 전극은 스테인레스 재질의 나이프 형상의 전극을 사용하였고, 그 전극의 길이, 너비, 곡률은 각각 43, 10, 7mm이다. 연면방전을 위한 고체유전체는 테프론을 이용하였고, 테프론의 두께, 지름, 유전율은 각각 1mm, 50mm, 2.1이다.

실험방법은 테스트 챔버 내부에 전극과 고체유전체의 설치, 챔버 내부의 진공화, 절연가스의 가압, 고전압 인가 후  $V_f$  측정의 순으로 진행하였다. 전극과 고체유전체는 그림 2와 같이 고전압측 전극(양극)에 불량 접촉갭을 가지도록 배치한 후, 테스트 챔버에 설치하였다. 두 나이프 전극 사이에 전극갭(Electrode Gap, EG)은 5mm로 고정시켰고, 양극과 고체유전체 사이에 수직의 접촉갭(Contact Gap, CG)은 0.5, 1, 2, 3mm의 범위로 가변하여 실험을 수행하였다. 음극측 전극과 고체유전체의 불완전한 접촉은 음극 상부의 조절나사를 이용하여 억제하였다. 테스트 챔버 내부에 전

극과 고체유전체를 설치한 후, 테스트 챔버 내부가 진공펌프에 의해  $6.7 \times 10^{-2}$  Pa로 배기된다.

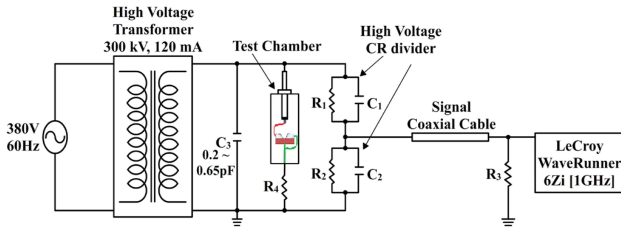


Fig. 1. Experimental apparatus and circuit diagram

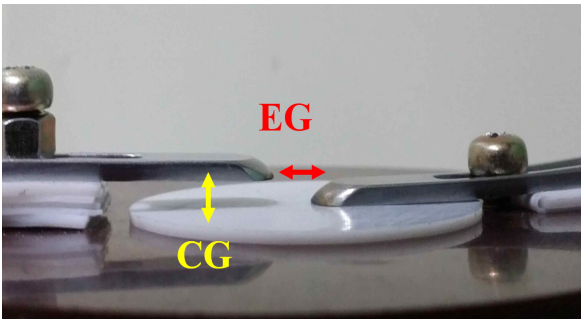


Fig. 2. The arrangement of knife electrode and solid dielectric

$N_2/O_2$  혼합가스는  $N_2$ ,  $O_2$ 의 순서로 테스트 챔버에 주입하였고, 그 혼합비는 압력계에 의한 압력비율을 기반으로 하였다. 교류 고전압은 완전한 연면플래쉬오버가 발생할 때까지 3.15kV/s로 인가하였고, 연면플래쉬오버전압  $V_F$ 는 인가전압의 모든 피크위상 부근에서 전압은 급감하고 전류는 급증하는 펄스가 나타나는 인가전압을 기준으로 측정하였다. 실험데이터는 10번의  $V_F$ 를 측정하여 그 평균값을 적용하였고, 실험은 실내온도 5~10°C의 범위에서 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 불량 접촉갭에 따른 연면플래쉬오버특성

그림 3은 5mm의 전극간 갭(EG)에서 불량 접촉갭(CG)의 증가에 따른  $N_2/O_2$  혼합가스의  $V_F$  특성을 보여준다. 연면플래쉬오버전압  $V_F$ 는 CG와 함께 일정

한 증가패턴을 드러내지 않았다. 즉 불량 접촉갭의 발생에서  $V_F$ 는 파센의 법칙에 불일치하는 결과를 보였고, 다른 가스압력에서도 그 불일치는 동일하게 나타났다.

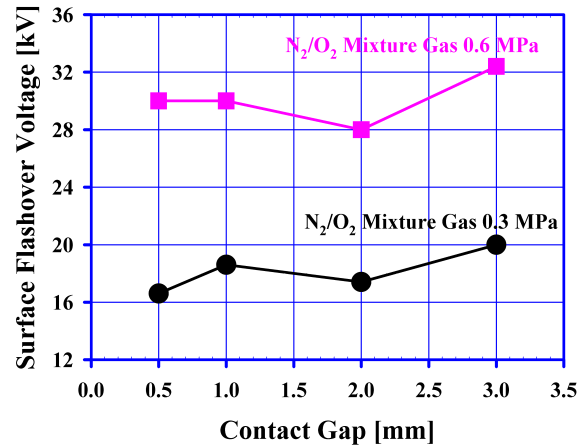


Fig. 3. Surface flashover voltage with the gap of poor contact in  $N_2/O_2$  Mixture gas(8/2)

일반적으로 가스의 절연파괴전압은 파센의 법칙에 의해 가스압력이나 전극갭과 함께 증가한다. 하지만 증가하는 CG에 따른 연면플래쉬오버전압  $V_F$ 는 그 법칙에 부합하지 않는 불규칙적인 패턴을 보였다. 파센의 법칙은 충돌전리계수  $\alpha$  때문에, 평등전계 중 가스압력( $p$ )과 극간거리( $d$ )의 곱이 1000bar·mm(100MPa·mm) 범위 이내에서 유효하다[19]. 방전로는 전극 사이에서 최단거리로 형성되는 것으로 상정하면, CG의 증가와 함께 방전로 진전거리도 증가한다. 즉 CG가 0.5, 1, 2, 3mm일 때, 방전로 진전거리는 각각 5.02, 5.1, 5.39, 5.83mm이다. 이들 거리와 실험의  $p$  범위로 부터 본 실험에서  $pd$ 의 범위는 약 1.51~3.50MPa·mm으로 산출된다. 본 실험조건은 파센의 법칙이 성립하는 유효범위에 포함된다. 다시 말해서  $pd$ 만 고려하면, 그림 3에서 CG에 의한  $V_F$  패턴이 합리적으로 설명되지 않는다.

$V_F$  패턴의 설명하기 위해 가스의 절연파괴와 파센의 법칙과 관련된 물리적 요소가 필요하다. 그 물리적 요소는 충돌전리계수  $\alpha$ 이고, 이  $\alpha$ 는  $pd$  성립 구간과 가스의 절연파괴 메커니즘인 전자사태와 관련된다.

충돌전리계수  $\alpha$ 는 전계( $E$ )와 가스압력( $p$ )의 함수이다.  $p$ 가 일정하면  $\alpha$ 는  $E$ 에 의존한다[20]. 교류 고전압이 양극에 인가되면, 양극 부근에 불량 접촉갭과 고체유전체 사이에 전계는 양극과 음극 사이에 형성된 전계보다 더 높아진다. 이는 양극의 인가전압은 동일하나, 불량 접촉갭  $CG$ 가 양극과 음극 사이의  $EG$ 보다 더 짧기 때문이다. 양극과 고체유전체 사이에 형성된 고전계는 접촉갭 사이에 상당히 높은  $\alpha$ 계수를 이끌 수 있다. 이러한 충돌전리계수  $\alpha$ 가 파센의 법칙을 벗어나게 하며, 최종적으로  $CG$ 와 함께 불규칙적  $V_f$ 를 이끄는 것으로 판단된다. 아울러 그림 3과 같은 불규칙적인  $V_f$ 의 변화는  $\alpha$ ,  $E$ 뿐만 아니라 전자사태에 기여하는 다른 물리적 요소(2차 전자방출계수)의 영향도 함께 고려한다면 더욱더 합리적으로 설명될 것이다. 2차 전자는 스트리머 진전에서 광전리, 고체유전체와 음극으로 광자의 유입, 음극에서 방출된 전자가 고체유전체의 충돌로부터 방출될 수 있다. 불행하게도, 2차 전자방출계수는 실험조건(전극의 표면 거칠기, 고체유전체의 표면 거칠기와 흡착가스, 고체유전체의 대전 등)에 강력히 영향을 받기 때문에[21] 다수의 실험조건에 관한 면밀한 검토를 수행한 후, 본 논문의 결과를 해석하는데 적용해야 한다.

### 3.2 불량 접촉갭에서 SF<sub>6</sub>와 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스의 절연성능 비교

가스의 절연성능은 고전압 전력설비의 절연설계에서 중요한 파라미터 중 하나이다. 특히 그 설비에서 발생할 수 있는 사고 및 결함에 따른 절연성능의 저하를 고려한 절연설계는 전력공급 신뢰성 확보에 필수적이다. 본 항은 그 절연설계에 관한 정보를 제공한다.

그림 4는 불량 접촉갭의 존재에서 SF<sub>6</sub> 가스와 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스의 절연성능을 보여준다. 연면플래쉬오버전압  $V_f$ 는 불량 접촉갭이 존재하여도 SF<sub>6</sub> 가스가 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스보다 더 높았다. 그림 4에서 가장 중요한 정보는 SF<sub>6</sub> 0.1MPa의 절연내력에 대응하기 위한 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스의 압력이 0.6MPa이라는 것이다.

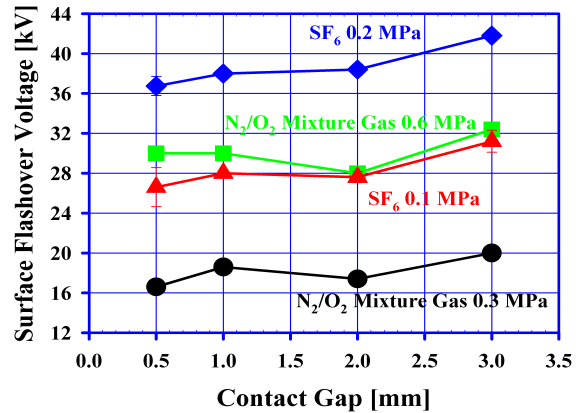


Fig. 4. Comparison of insulation performance of SF<sub>6</sub> and N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixture gas(8/2) by the gap of poor contact

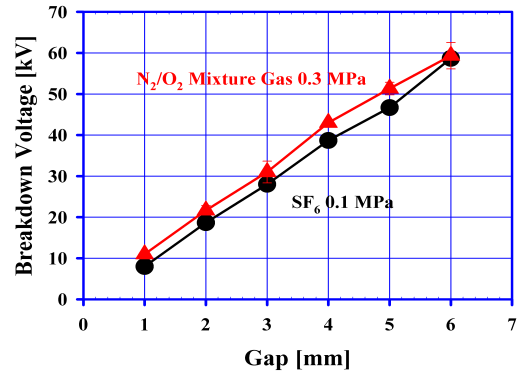
파센의 법칙에 근거하여 동일한 조건에서 추정된 SF<sub>6</sub>의 절연내력은 평등전계에서 공기의 2.5배로 알려져 있다[19]. 이 이론적 추정은 SF<sub>6</sub> 대체가스에 관한 연구[22-23]에서 실험적으로 입증되었다(그림 5 (a)). 그리고 SF<sub>6</sub> 대체가스(공기)의 절연성능에 관한 연구들[22-24]은 평등전계에서 SF<sub>6</sub> 0.1MPa의 절연성능을 얻기 위해, 3배의 더 높은 공기압력이 요구됨을 언급하였다. 하지만 그림 4로부터 접촉 불량갭에 관한 절연성능은 6배 더 높은 압력이 요구됨을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 사용한 전극계와 양극의 불량 접촉갭에 의한 전계평등성에 의한 것으로 판단되며 다음과 같이 설명가능하다. 가스 절연파괴의 메커니즘은 전자사태이며, 이 전자사태는 충돌전리, 2차 전자방출, 전자부착계수에 영향을 받는다. 평등전계에서 그들 계수를 포함한 절연파괴조건은 타운젠트 절연파괴 이론식으로부터 식 (1)과 같이 도출된다[25].

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

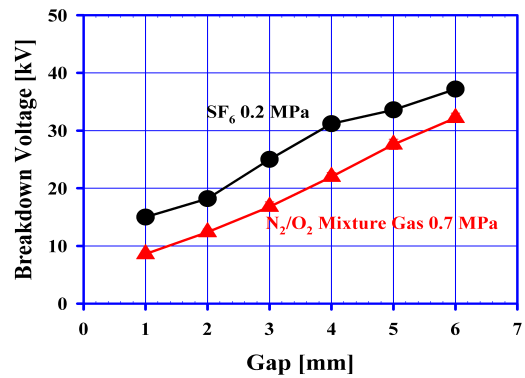
식 (1)에서  $\alpha$ 와  $\gamma$ 는 각각 충돌전리계수와 2차 전자방출계수이며,  $\eta$ 는 전자부착계수이다. 그리고  $d$ 는 전극간 갭이다. 증가하는 인가전계에 의해 음극에서 방출된 전자는 전극간 갭 내에서 충돌전리를 일으키고, 충돌전리 과정에서 형성된 광자와 양이온은 음극에 충돌하여  $\alpha$ 와  $\gamma$ 가 증가하게 된다. 그리고 충돌전리계

수  $\alpha$ 는 인가전계와 함께 증가하는 반면에 전자부착계수  $\eta$ 는 감소한다[26]. 따라서 인가전계의 증가와 함께 식 (1)은 최종적으로 '0'이 된다. 이는 충돌전리와 2차 전자방출에 의해 전자사태가 성장하여 가스의 절연과 파괴가 발생함을 의미한다. 식 (1)에서  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$ 는 전극간 갭 사이에 전계의 영향을 받기 때문에, 가스의 절연 성능은 전극에 의해 형성되는 전계분포에 따라 달라질 수 있다. 본 실험과 같은 나이프 형상의 전극과 접촉 갭에 의한 전계분포는 [22-24]의 평등전계분포와 다름이 자명하다. 그래서 전자사태에 영향을 미치는  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$  계수의 상이함으로 인해, 본 연구와 [22-24]에서 0.1MPa의 SF<sub>6</sub>에 상응하는 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스의 압력에 차이가 나타날 수 있다. 추가적으로 이전에도 본 연구와 같이 평등전계와 불평등 전계에서 절연특성과 절연 성능이 다름이 보고된 바 있다[24, 27-28]. 평등전계와 불평등 전계의 절연과 파괴 메커니즘에서 명백한 차이점 중 하나는 불평등 전계에서 완전한 절연과 파괴 이전에 발생하는 코로나 방전이다. 이 코로나 방전은 가스의 절연과 파괴전압에 특정한 영향을 미친다. 전기적 부성기체 중 불평등 전계에 대한 절연과 파괴전압은 코로나로 인한 공간전하의 영향으로 압력과 함께 N 형상의 특성을 드러낸다[27]. 게다가 공기의 절연과 파괴에서 습도의 영향은 코로나로 인해 평등전계와 불평등 전계에서 상이하게 나타난다[24]. 아울러 봉전극의 곡률 변화가 전계평등성의 변화를 초래하여 공기 중 절연과 파괴전압이 달라짐도 보고된 바 있다[28].

상술된 식 (1)과 절연과 파괴 메커니즘에 관한 설명과 전계분포에 따른 절연특성으로부터 전계 평등성의 상이함이 가스의 절연 성능 차이를 초래할지라도, 그 차이가 흥미롭거나 새로운 결과가 아니다. 그림 5와 같이, 이전에도 평등전계와 불평등 전계에서 SF<sub>6</sub> 가스에 대등한 절연내력을 보유하기 위한 공기의 압력이 다름을 이미 실험적으로 밝혀졌다[22-23]. 하지만 그림 4의 결과는 GIS 내부에서 발생할 수 있는 결함(접촉 불량)을 고려했을 때, 공기를 적용한 친환경 GIS의 가스압력은 기존의 연구결과[22-23]보다 더 높아야 한다는 정보를 제공하는데 가치가 있다고 판단된다. 이는 친환경 GIS의 절연신뢰성 확보와 절연 성능 저하를 위한 유용한 정보가 된다.



(a) Uniform field



(b) Non uniform field

Fig. 5. Comparison of insulation performance of SF<sub>6</sub> and N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixture gas(79/21) under uniform and non-uniform field[23]

#### 4. 결 론

본 논문은 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스(8/2) 중 접촉 불량갭을 고려한 연면플래쉬오버특성을 연구하였다. 불량 접촉 갭의 증가와 함께 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스의 연면플래쉬오버 특성은 파센의 법칙에 부합하지 않는 불규칙적인 증가패턴을 보였다. 그리고 불량 접촉갭의 존재에서, SF<sub>6</sub> 0.1MPa의 절연 성능은 N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 혼합가스 0.6MPa와 대등하였다. 따라서 접촉 불량에 관한 결함을 위해, 전력설비의 가스압력은 평등전계에서 요구되는 압력보다 더 높아야 한다. 본 논문의 결과들은 공기를 이용한 친환경 가스절연개폐기에서 스페이서와 전극의 불완전한 접촉과 내부 차단기의 접촉자 동작에서 형성되는 짧은 갭을 고려한 절연설계 및 절연특성 연구에 활용할 수 있다.

## References

- [1] S. Tominaga, H. Kuwahara and K. Hirooka, "Influence of Arc-Decomposed SF<sub>6</sub> Gas on Cast Epoxy Insulators for Gas Insulated Switchgears", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No. 6, pp. 2107-2114, 1979.
- [2] Y. Yuan, X. Jiang, S. M. Rowland, X. Cheng and Q. Li, "Effect of Water Streams on the AC Breakdown Performance of Short Rod-plane Air Gaps", IEEE Trans. Dielectri. Electr. Insul., Vol. 21, No. 4, pp. 1747-1756, 2014.
- [3] M. Yasui, K. Naito and Y. Hasegawa, "AC Withstand Voltage Characteristics of Insulator String Covered with Snow", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 3, No. 2, pp. 828 - 838, 1988.
- [4] M. R. Raghuvver and E. Kuffel, "Experimental and Analytical Studies of Factors Which Affect Flashover Voltage on Polluted Insulation Surfaces", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, No. 1, pp. 312-320, 1974.
- [5] M. Hara, K. Satia, and H. Satio, "Analysis of Bubble Behavior in Cryogenic Liquids under Non-Uniform Electric Fields", T. IEE Japan, Vol. 113-A, No. 4, pp. 337-344, 1993.
- [6] E. H. Choi, K. C. Kim and K. S. Lee, "Breakdown Characteristics of SF<sub>6</sub> and Liquefied SF<sub>6</sub> at Decreased Temperature", J. Electr. Eng. Technol., Vol. 7, No. 5, pp. 765-771, 2012.
- [7] Y. Negara, K. Yaji, J. Suehiro, N. Hayashi, and M. Hara, "DC Corona Discharge from Floating Particle in Low Pressure SF<sub>6</sub>", IEEE Trans. Dielectri. Electr. Insul., Vol. 13, No. 6, pp. 1208-1216, 2006.
- [8] M. Akazaki and M. Hara, "Mechanism and Characteristics of DC Corona from Floating Particles", Electr. Eng. Jpn., Vol. 90, No. 4, pp. 131-141, 1970.
- [9] S. Sugiyama, T. Morita, T. Hosokawa, Y. Sekiya and K. S. Lee "Breakdown Mechanism of a Gap with a Small Arc Current in SF<sub>6</sub> Gas", IEEE Trans. Dielectri. Electr. Insul., Vol. 1, No. 6, pp. 1167-1174, 1994.
- [10] S. Sugiyama, T. Morita, T. Hosokawa, Y. Sekiya, Y. Mukaiyawa, I. Takagi and K. S. Lee, "An Investigation of Breakdown Voltage with Small Arc due to Poor Contact in SF<sub>6</sub> Gas", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 7, No. 1, pp. 332-338, 1992.
- [11] T. Takuma, "Discharge Characteristics of Gaseous Dielectrics", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. E-21 No. 6, pp. 855-867, 1986.
- [12] D. Y. Lim, "Comparative Study on Surface Insulation Performance in Oxygen/Nitrogen Gas Mixtures for High Voltage Equipment in Distribution Class", Ph. D. Thesis, Yeungnam University, 2015.
- [13] L. Niemeyer, "A Systematic Search for Insulation Gases and Their Environmental Evaluation", Gaseous Dielectrics VIII, pp. 459-464, 1998.
- [14] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori, and F. Endo, "Development of SF<sub>6</sub>-free 72.5 kV GIS", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 22, No. 3, pp. 1869-1876, 2007.
- [15] H. Okubo and N. Hayakawa, "Dielectric Characteristics and Electrical Insulation Design Techniques of Gases and Gas Mixtures as Alternatives to SF<sub>6</sub>", Gaseous Dielectrics X, pp. 243-252, 2004.
- [16] 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.
- [17] Y. Khan, K. Sakai, E. K. Lee, J. Suehiro and M. Hara, "Motion Behavior and Deactivation Method of Free Conducting Particle around Spacer between Diverging Conducting Plates under DC Voltage in Atmospheric Air", IEEE Trans. Dielectri. Electr. Insul. Vol. 10, No. 3, pp. 444-457, 2003.
- [18] M. Hara, K. Adachi, H. Tobata, M. Akazaki and F. L. Mao, "Particle-Initiated Breakdown Characteristics of Conical Insulator in N<sub>2</sub> Gas and N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Mixture under DC Voltage", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. E-22, No. 1, pp. 87-96, 1987.
- [19] F. A. M. Rizk and G. N. Trinh, "High Voltage Engineering" CRC Press, pp. 179-180, 2014.
- [20] 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", J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng., Vol. 27, No. 10, pp. 86-92, 2013.
- [21] E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", Elsevier, pp. 323-345, 2000.
- [22] E. H. Choi, B. H. Koo, L. K. Kim and K. S. Lee, "Assess of Breakdown Characteristics about Environmentally Friendly Gases", J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng., Vol. 23, No. 5, pp. 96-100, 2009.
- [23] C. U. Lee, "A Study of Breakdown Characteristics of N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Mixture", M. S. Thesis, Yeungnam University, 2008.
- [24] D. Y. Lim and S. Bae, "Study on Oxygen/Nitrogen Gas Mixtures for the Surface Insulation Performance in Gas Insulated Switchgear", IEEE Trans. Dielectri. Electr. Insul., Vol. 22, No. 3, pp. 1567-1576, 2015.
- [25] L. L. Alston, "High-Voltage Technology", Oxford University Press, pp. 34-35, 1968.
- [26] D. Dubos, N. Merbahi, O. Eichwald, M. Yousfi and M. Benhenni, "Electrical Analysis of Positive Corona Discharge in Air and N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub> Mixtures", J. Appl. Phys. Vol. 101, 053304, pp. 1-9, 2007.
- [27] 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.
- [28] J. K. Lee, S. H. Lee, I. S. Ahn and J. O. Jang, "Breakdown Characteristics According to the Type & Gap of Rod-electrodes Using Imitation Air", J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng., Vol. 28, No. 2, pp. 19-23, 2014.



◇ 저자소개 ◇



**임동영**(林東永)  
1983년 4월 12일생. 2009년 2월 경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부 졸업. 2011년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 (주)형진 연구소장.



**최은혁**(崔殷赫)  
1977년 2월 19일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 2005년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국폴리텍 VI대학 구미캠퍼스 전기과 교수.



**최상태**(崔相泰)  
1957년 8월 8일생. 1984년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 독일 Ruhr Bochum 대학교 전기공학부 석사과정 졸업(Dipl. Ing.). 1997년 동 대학원 박사과정 졸업(Dr. Ing.). 1998년~현재 경주대학교 신재생에너지학과 부교수



**최병주**(崔炳柱)  
1958년 12월 12일생. 1981년 영남대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Kyushu대학 대학원 공학연구과 졸업(박사). 1982~1986년 현대중전기(주)기술연구소 연구원. 1986~1997년 한국전기연구원 선임연구원. 1997~2009년 서라벌대 고속전기철도과 부교수. 2014년~현재 영남대학교 전기공학과 산학협력중점전임교원.



**이광식**(李廣植)  
1948년 10월 25일생 1971년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전 고전압 연구회 간사장 역임. 현재 본 학회 명예회장. 영남대학교 전기공학과 명예교수.



**배성우**(裴晟佑)  
1978년 6월 30일생. 2006년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2009년 미국 텍사스 오스틴대학교 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2012~2013년 삼성종합기술원 근무. 현재 영남대학교 전기공학과 조교수.