

배전급 전력설비를 위한 친환경 가스의 절연성능검토

(Review of Insulation Performance in Synthetic Air and Dry Air for High Voltage Equipment in Distribution Class)

임동영* · 최은혁 · 최병주 · 최상태 · 이광식 · 배성우**

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

Abstract

This paper examines the insulation performance of synthetic air and dry air. This examination was conducted based on dielectric strength in uniform and non-uniform field, electric field distribution by interior structure and defects in gas insulation switchgear (GIS) and insulation performance in different temperatures. From this review, it was found that eco-insulation gas required to possess low moisture content for power equipment in the distribution class. The results of this paper are valuable to ensure the insulation design and insulation reliability of GIS using air.

Key Words : Dry Air, Gas Insulation Switchgear, Insulation Performance, Synthetic Air

1. 서 론

SF₆의 높은 지구온난화 지수로 인해, 최근에 SF₆ 가스를 대체하기 위한 노력과 연구가 전력산업에서 활발히 진행되었다. 이러한 수고는 SF₆ 대체가스를 찾기 위해 다양한 가스들(N₂/O₂ 혼합가스[1], 건조공기[2], CO₂[3], PFC 계열의 혼합가스[4])에 관한 절연특성과 그 성능에 관한 유용한 데이터를 얻었다. 특히 L. Niemeyer[5]는 전력설비의 절연을 위해 절연가스가

보유해야할 항목을 정리하여 체계적인 검토를 수행하였다. 그는 지구온난화 지수와 독성이 없고, 절연성능이 우수한 가스는 질소와 공기뿐이라는 것과 질소와 공기의 절연내력이 SF₆에 약 1/3 정도라는 결론을 보고하였다. 이 질소와 공기는 배전급 전력설비에 적용할 수 있는데, 이는 배전급 전력설비가 송전급 전력설비에 비해 수용해야하는 전압규모에서 현저히 낮기 때문이다. 그래서 공기 적용에 관한 검토가 국내에서 K. -S. Lee et al[6-9]에 의해 수행된바 있다. 그들은 평등전계에서 SF₆ 0.1MPa에 상응하는 공기의 압력은 0.3MPa임을 확인하였고, SF₆ 0.1MPa의 압력으로 절연된 전력설비의 체적과 가스압력의 증가에 의해 SF₆를 공기로 대체할 수 있음을 보고하였다. 아울러 N₂와 O₂로 구성된 공기의 절연성능을 향상시키기 위해, O₂ 함유량에 따른 절연특성도 함께 연구하여 절연성능에

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

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

Tel : 053-523-2356, Fax : 053-556-7338

E-mail : without38@naver.com

Received : 2015. 7. 15.

Accepted : 2015. 10. 14.

서 최적의 N₂/O₂ 혼합비를 결정하였고, 제조공기라는 공기에 관한 새로운 용어도 언급하였다.

공기가 종래의 절연가스인 SF₆ 보다 절연성능이 열악하기 때문에 공기의 절연성능을 충분히 확보하는 것이 필요하다. 그 확보를 위한 방법 중 하나는 전기적 부성기체인 O₂ 외에 수분함유량(습도)을 조절하는 것이다. 공기 중 H₂O는 전자부착효과를 가지기 때문에 평등전계에서 절연과피전압의 향상효과가 보고된 바 있다[10-11]. 이러한 관점에서부터, 배전급 전력설비를 위한 친환경 절연가스로 수분을 조절한 건조공기가 검토되기 시작하였다. 그 검토와 연구로부터, 건조공기를 이용한 72.5kV 가스절연개폐기(Gas Insulation Switchgear, GIS)가 일본에서 개발되었고 [12], 국내에서도 건조공기에 대한 절연특성을 지속적으로 연구하고 있다[13].

언급한 바와 같이 제조공기와 건조공기는 장기간 다수의 연구와 관심으로 배전급 전력설비에 SF₆ 대체가스로 주목받고 있으며, 그 전력설비에서 SF₆ 대체가능성도 확인되었다. 그러므로, 현재 제조공기와 건조공기를 전력설비에 적용을 위한 검토 및 연구가 필요할 시점이다. 하지만 제조공기와 건조공기에 대하여 상술된 연구들[6-13]은 대체 가능성, 그들 가스의 방전 메커니즘, 절연특성, 절연성능을 집중적으로 다루었다. 그래서 SF₆ 대체가스의 실제적용을 위한 연구는 현재까지 매우 드물다[14].

본 논문은 제조공기와 건조공기의 실제 적용을 위한 유용한 정보를 제공하기 위해, 그 가스들의 절연성능에 관한 검토를 수행하였다. 이 검토는 유사연구[14]에서 다루어지지 않은 평등전계와 불평등 전계에 대한 그 가스들의 절연내력비교, GIS의 구조와 내부결함에 의한 전계분포에 관한 사항을 언급하였다. 그리고 주위온도변화에 따른 절연특성도 언급한다. 최종적으로 공기를 이용한 배전급 친환경 전력설비에 그 가스들의 적용을 위한 추가적인 검토를 고찰에서 수행하였다.

2. 제조공기와 건조공기의 구성성분

제조공기는 순수한 질소와 공기의 혼합으로 제작된

다. 절연내력에서 최적의 N₂/O₂의 혼합비는 8/2이기 때문에[6,14], 제조공기는 순도가 높은 N₂와 O₂의 8/2 혼합으로 제작되며, 실제 공기에서 N₂와 O₂를 제외한 0.97%[15]로 구성된 불순물들(Ar, CO₂, Ne, He, CH₄, Kr, H₂, N₂O, Xe, CO, O₃)을 포함하지 않는다. 건조공기는 대기 중 공기의 수분만을 제거한 공기이다. 건조공기의 수분함유량은 일반적으로 노점으로 표시하며, 현재까지 고전압 전력설비를 위한 건조공기라 칭할 수 있는 명확한 노점기준은 정립되지 않는 실정이다. 완전한 건조공기는 수분을 포함하지 않지만 언급한 불순물들을 포함한다. 즉 건조공기는 노점에 따라 수분 함유량이 다르지만 실제 공기 중 N₂와 O₂를 제외한 나머지 불순물들을 노점에 상관없이 포함한다. 따라서 제조공기와 건조공기의 명백한 차이점은 수분함유량과 상술한 공기 중 0.97%의 불순물들이다.

3. 검토사항의 선정

본 논문에서 제조공기와 건조공기는 3가지 사항에 대하여 검토되었다. 검토는 1) 평등 및 불평등 전계의 절연내력, 2) GIS 구조와 내부결함에 따른 전계분포, 3) 주위온도에 따른 절연성능이다. 고전압 전력설비의 제작 및 설계에서 가스의 절연내력은 필수적으로 고려하는 파라미터이다. 가스의 절연내력은 인가전압의 유형, 설비의 내부 구조 및 전계분포에 따라 달라진다. 그렇기 때문에 전력설비의 구조와 내부결함에 따른 전계분포가 검토되어야 하고 이에 유효한 절연가스가 선정되어야 한다. 그리고 고전압 전력설비는 외부 환경에 노출되어 있기 때문에, 낮과 밤의 전환, 기후와 계절의 변화로부터 그 설비의 표면온도가 변화하고, 최종적으로 그 설비의 내부에 충전된 절연가스의 온도도 변하게 된다. 절연가스의 절연내력은 온도에 영향을 받기 때문에[16-19], 그 설비가 동작하는 광범위한 온도범위에서 충분한 절연신뢰성을 확보해야 한다. 제조공기와 건조공기의 화학적 구성성분이 유사하여 절연내력에서 상당한 차이가 발생하지 않을 것으로 판단된다. 하지만 상술한 검토는 두 공기 중 절연성능의 차이를 확인하는데 유효할 것이다. 이는 다음의 검토결과와 고찰에서 설명된다.

4. 검토결과 및 고찰

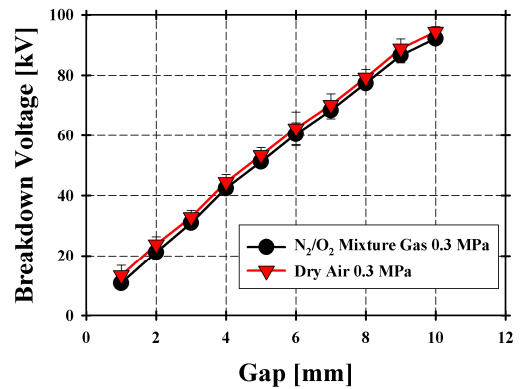
4.1 제조공기와 건조공기의 절연내력

제조공기와 건조공기의 절연내력은 평등전계와 불평등 전계에 대하여 각각 평가하였다. 평등전계와 불평등 전계는 각각 구-평판전극과 침-평판전극 구조를 이용하여 구성하였다. 구-평판전극은 구-구전극보다 전계 이용률이 낮음으로 인해[15], 실제 전력설비의 평등하지 않는 전계분포를 모의하는데 구-구전극보다 더 효과적이다. 그리고 구-평판전극은 전극 사이에 간격이 구전극의 지름보다 작으면 준평등 전계를 형성한다. 구전극과 평판전극의 지름은 각각 41mm, 59mm이다. 특히 평판전극은 전계의 평등성을 확보하기 위해 가장자리에 모서리를 둥글게 제작하였다. 침전극은 길이 100mm, 너비(폭) 5mm, 침단각도 30°이다. 사용된 전극은 모두 스테인레스로 제작하였고, 시험전압은 교류 60Hz이다. 절연시험을 위한 장치와 방법은 [6,8,14]와 동일하다.

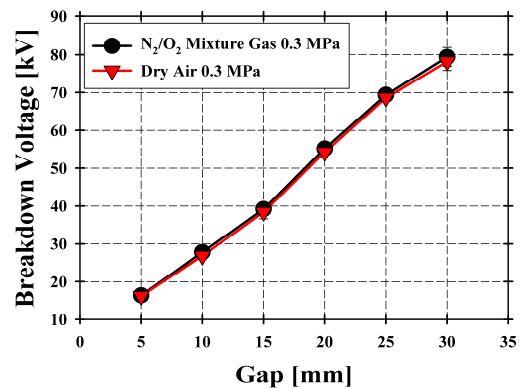
그림 1은 평등전계와 불평등 전계 중 압력 0.3MPa에서 전극간 갭에 따른 제조공기와 건조공기의 절연 파괴전압(V_B)을 보여준다. 두 가스의 절연내력은 평등전계와 불평등 전계에서 서로 상반된다. 다시 말해서 제조공기는 불평등 전계에서 건조공기보다 더 높았고, 평등전계에서는 건조공기가 더 높았다. 그리고 이들 두 가스의 절연내력의 차이는 현저하지 않았다. 이 실험결과는 다음과 같이 설명할 수 있다.

제조공기와 건조공기의 명백한 차이는 그들 가스 중 포함된 수분함유량(습도)이다. 본 실험을 위한 건조공기의 노점은 -48~-52°C 범위이기 때문에, 건조공기는 수분을 포함한다. 반면에 제조공기는 99.999%의 순도를 가지는 N_2 와 O_2 로 혼합되었기 때문에, 수분이 거의 존재하지 않는다. 공기 중 수분(H_2O)은 전자부착 능력을 보유하고 있으며[10], 코로나 개시전압을 감소시키는 영향을 가진다[14]. 그리고 코로나 방전은 불평등 전계에서 완전한 절연과괴 이전에 발생한다. 평등전계는 코로나 방전을 경유하지 않고 절연과괴로 진전한다. 즉 평등전계에서 수분의 전자부착의 효과가 V_B 를 상승시키기 때문에, 평등전계에서 V_B 는 수분

을 함유한 건조공기가 더 높게 나타난다. 하지만 불평등 전계에서 코로나가 절연과괴에 지대한 영향을 미친다. 상술한 것처럼 코로나 개시전압이 공기 중 습도의 증가와 함께 감소하기 때문에[14], 건조공기 중 함유된 수분의 전자부착효과가 존재할지라도 습도와 함께 감소하는 코로나 개시전압이 V_B 의 감소를 이끈다. 그래서 평등전계와 불평등 전계에서 각각 수분의 전자부착효과와 코로나 개시전압의 감소 효과로 인해 제조공기와 건조공기의 V_B 특성이 그림 1처럼 나타나게 된다.



(a) Uniform Field



(b) Non-nuiform field

Fig. 1. The Breakdown voltage in synthetic air and dry air at 0.3MPa

추가적으로, 제조공기와 건조공기의 연면절연성능도 검토하였다. 그림 2는 나이프 형상의 전극을 이용하여 고체유전체(테프론) 표면으로 진전하는 연면플래쉬오버전압(V_P)을 보여준다. 전극, 절연가스, 고체

유전체가 접하는 삼중점과 나이프 형상이 초래하는 전계의 불평등성으로 인해, 그림 1의 (b)와 같이 제조 공기의 V_F 가 더 높음을 확인할 수 있다.

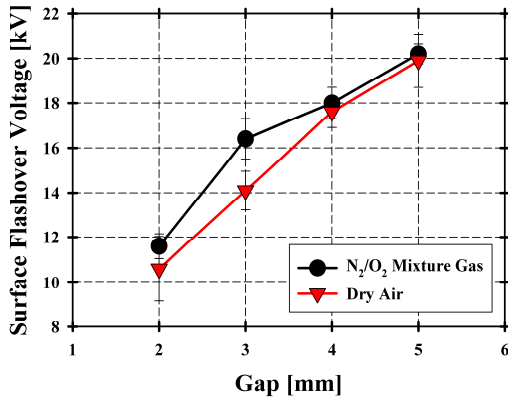


Fig. 2. The Surface insulation performance of synthetic air and dry air at 0.3MPa[14]

그림 1과 2로부터 제조공기와 건조공기의 절연내력을 확인하였다. 제조공기는 불평등 전계와 연면절연 성능에서 건조공기보다 우수하며, 건조공기는 평등전계에서 제조공기보다 우수하다.

4.2 GIS의 구조와 결함에 의한 전계분포

제조공기와 건조공기의 절연성능은 그림 1과 같이 전계분포에 따라 상반된다. 그렇기 때문에 GIS의 내부 전계분포가 구성성분이 99% 유사한 두 공기의 절연성능에서 차이를 초래할 수 있다. 그림 3은 GIS의 내부구조와 함께 전계가 집중할 수 있는 요소들을 보여준다. 고전압 전력설비의 온전한 절연은 기체만의 단일매질로 불가능하다. 도체의 지지와 고체절연을 적용하기 때문에, 기체와 고체의 복합절연을 구성한다. 이 복합절연의 대표적인 사례가 그림 3과 같은 고전압 도체를 지지하는 스페이서의 적용이다. 동축원통전극은 평등전계에 근접하는 준평등 전계를 구성하지만, 스페이서의 적용과 다양한 결함을 고려한 절연 가스는 제조공기가 건조공기보다 더 적합하다. 이는 그림 1과 같이 제조공기가 불평등 전계에서 더 우수한 절연내력을 보유하기 때문이다.

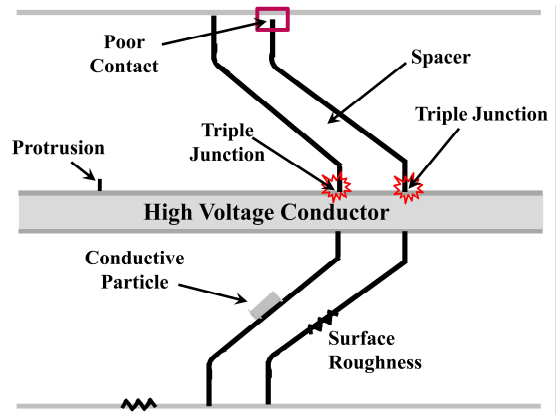


Fig. 3. Structure and defects of spacer-electrode inside of GIS

4.3 온도변화에 따른 절연성능

가스온도의 변화에 따른 절연성능은 온도의 상승, 감소, 감소 후 증가에 대한 변화를 기준으로 3개의 관점으로 검토한다. 공기 중 온도의 상승에 따른 절연특성은 40 ~ 700°C 범위에서 보고되었다[17]. 그 절연특성은 온도의 상승과 함께 공기의 절연성능이 저하하였다. 특히 불평등 전계는 온도상승에 따른 절연내력 저하가 평등전계보다 더 현저하다. H. Fujita et al[18]은 불평등 전계 중 113~293K(-160~20°C)의 온도범위에서 온도하강에 따른 공기의 절연특성을 연구하였다. 그들은 온도감소와 함께 공기의 절연내력이 감소와 상승하는 온도범위의 존재를 확인하였다. 그리고 온도가 감소 후 상승하는 경우는 SF₆의 수분함유량과 함께 T. Nitta et al[19]에 의해 수행되었다. -10°C에서 SF₆의 연면절연성능은 0°C와 대등하나, 다시 온도가 상승으로 증가하는 과정에서 그 성능은 현저히 저하한다. 이러한 현상은 SF₆의 수분 함유량이 많을수록 지대하게 나타난다.

언급한 3가지 온도변화에 따른 가스들의 절연특성으로부터, 제조공기가 건조공기보다 온도변화에 대한 절연성능이 더 높은 것으로 평가할 수 있다. 온도가 상승이나 감소만으로 변화할 때, 공기의 절연내력은 온도와 전계분포에 의존한다. 이는 전력설비의 구조가 결정되면, 가스의 절연성능은 온도변화에 영향을 받게 됨을 의미한다. 그러므로 제조공기와 건조공기

의 절연성능은 단방향의 온도변화에서 유사하다. 하지만 온도가 영하로 하강하여 상온으로 상승할 때, 공기 중 수분은 설비의 내부 구조물에 동결된 후 액체인 물로 상변화가 발생한다. GIS 내부에 전극과 스페이서 표면에 생성된 물은 연면절연성을 심각하게 저하시킬 수 있다[14]. 더욱이 스페이서와 전극 표면에 생성된 물은 공기에 포함된 산소의 영향으로 내부구조물의 산화와 부식 초래하며, 주위 고체유전체에 수트리를 발생할 우려가 존재한다. 따라서 절연가스 중 수분의 함유량이 낮을수록 온도변화에 따른 연면절연성과 절연열화에 대한 신뢰성이 확보되기 때문에, 99.999%의 순도를 가지는 제조공기가 수분을 포함하는 건조공기보다 더 우수하다.

4.4 고 찰

제조공기와 건조공기의 실제 적용을 위해 평등전계와 불평등 전계에 대한 절연내력, GIS의 내부구조와 결합에 의한 전계분포, 온도변화에 대한 절연성능을 검토하였다. 그 결과는 그림 4에 나타내었다. 제조공기는 평등전계에 대한 절연내력 외에 모두 건조공기보다 우수하였다. 본 논문에서 검토된 절연성능의 관점만을 고려한다면, 실제 적용에 대해서 제조공기는 건조공기보다 더 적합한 것으로 해석할 수 있다. 하지만 실제 고전압 전력설비에 적용하기 위해서, 그 전력설비 내부에서 발생하는 특별한 결합 및 상황에 대한 절연특성이 추가적으로 요구된다. 다시 말해서 공기 중 도전성 파티클과 불순물, 스위칭 동작과 낙뢰로 인해 교류 전압에 임펄스 전압이 중첩된 파형, 전극과 스페이서의 불량접촉, 스페이서의 표면 결합 및 내부 보이드에 관한 절연특성에 관한 연구가 필요하다. 그리고 건조공기는 배전급 친환경 고전압 전력설비에 적용을 위한 노점기준의 확립과 불평등 전계 중 노점(습도, 수분 함유량)에 따른 절연특성에 관한 연구가 필요하다고 판단된다. 특히 봉-평판 전극구조에서 습도에 따른 개폐 임펄스의 절연특성[23]은 다양한 방전메커니즘이 제안되고 있지만 명확히 구명하지 못하고 있는 실정이다. 다행스러운 것은 언급된 필요 연구들이 현재까지도 지속적으로 수행되고 있다는 것이다[24-25].

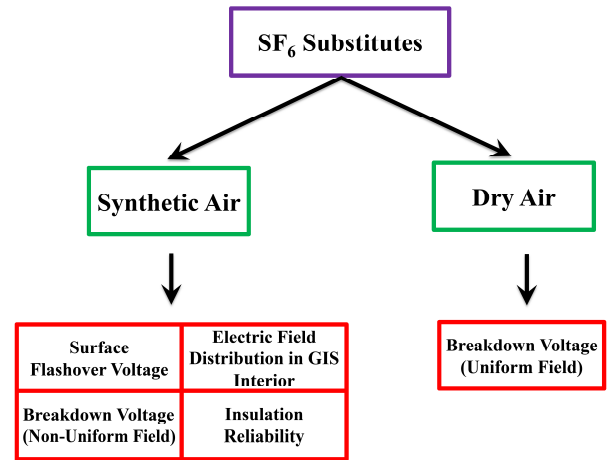


Fig. 4. Examination results of synthetic air and dry air

배전급 친환경 전력설비에 적용할 친환경 절연가스는 그 가스의 절연내력도 중요하지만, 절연가스의 제작과 장기간 운전에 대한 경제성도 함께 검토해야 한다. 제조공기와 건조공기가 SF₆의 절연내력보다 열등하기 때문에, 기존의 고전압 전력설비에 사용된 SF₆의 양보다 상당한 양의 제조공기 및 건조공기가 사용될 것으로 예상된다. 이러한 관점에서부터, 제조공기와 건조공기의 제작과정에서 용이성과 경제성이 검토되었다[14]. 건조공기는 대기 중 공기를 압축시킨 후 수분만 제거하여 제작할 수 있는 반면에, 제조공기는 공기 중 N₂/O₂의 분리, 혼합, 압축과정이 필요하다[14]. 즉 건조공기가 제조공기보다 제작과정에서 용이하고 경제적이다. 하지만 고전압 전력설비의 제작, 운용, 유지 및 보수의 전체적인 동작과정에서 건조공기가 제조공기보다 경제적이라 단정지를 수 없다. 4.1과 4.3 항에서 각각 언급된 불평등 전계에 대한 절연내력과 온도변화에 대한 절연신뢰성은 건조공기보다 제조공기가 더 우수하기 때문이다. 제조공기의 우수한 절연신뢰성은 절연과피사고에 대한 확률을 낮추는데 기여한다. 절연과피사고가 정전의 피해, 고장복구의 비용, 전력설비 열화 및 노후화에 의한 유지 및 점검비의 상승을 초래하기 때문에, 그 사고에 대한 낮은 확률은 장기간 운전에서 비용의 절감을 이끌 수 있다. 따라서 경제성은 제조공기와 건조공기의 제작뿐만 아니라, 장기간 운전에 관한 비용도 고려하여 결정해야 할 것이다.

마지막으로 본 논문과 유사한 연구가 [14]에서 수행되었다. 그 유사연구는 연면플래쉬오버전압에서 가스 압력과 갭 의존성에 관하여 평가하였기 때문에, 친환경 전력설비에서 체적과 크기의 결정 및 절연설계를 수행하는데 유용하다. 반면에 본 논문은 공기를 이용한 배전급 친환경 전력설비에서 절연신뢰성의 확보와 유지를 위해 유용하게 활용할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 배전급 전력설비에 친환경 절연가스의 적용을 위해 제조공기와 건조공기의 절연성능을 검토하였다. 불평등 전계에서 우수한 절연성능과 온도변화에 대한 절연신뢰성 확보의 관점으로부터, 수분을 적게 함유하는 공기가 배전급 친환경 전력설비에 효과적인 절연가스임을 알 수 있었다. 본 논문의 결과는 배전급 친환경 고전압 전력설비에 공기의 적용, 절연 성능의 확보 및 유지를 위해 활용될 수 있다. 추후 건조공기의 노점확립, 제조공기와 건조공기의 제작에서 경제성, 수분이 다른 공기 중 가스절연개폐기 내부에 결함을 모의한 절연특성에 관한 연구가 필요하다.

References

[1] 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.

[2] H. Park, E. -H. Choi, L. -K. Kim and K. -S. Lee, "Surface Discharge Characteristics for Epoxy Resin in Dry-Air with Variations of Electrode Features and Epoxy Resin Size", *J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, Vol. 23, No. 2, pp. 154-160, 2009.

[3] 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.

[4] 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.

[5] L. Niemeyer, "A Systematic Search for Insulation Gases and Their Environmental Evaluation", *Gaseous Dielectrics VIII*, pp. 459-464, 1998.

[6] 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.

[7] D. -Y. Lim, H. Park, E. -H. Choi, S. -T. Choi and K. -S. Lee, "Surface Discharge Characteristics of Solid Dielectrics in N₂/O₂ Mixture Gas for Eco-Friendly Insulation Design", *J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, Vol. 26, No. 3, pp. 9-15, 2012.

[8] 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.

[9] G. -J. Min, B. -C. Kang, D. -Y. Lim, K. -S. Lee and W. -Z. Park, "A Study of Surface Discharge Characteristics for Dew-point of Dry-air and Materials or Shapes of Solid Insulator in Quasi-Uniform Field", *J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, Vol. 27, No. 6, pp. 44-49, 2013.

[10] E. Kuffel, "Influence of Humidity on the Breakdown Voltage of Sphere-Gaps and Uniform-Field Gaps", *IEE Proc. A*, Vol. 108, No. 40, pp. 295-301, 1961.

[11] G. R. G. Raju and R. Hackam, "Sparking Potentials of Dry Air, Humid Air and Water Vapour between Concentric Sphere-Hemisphere Electrodes", *Proc., IEE*, Vol. 120, No. 9, pp. 927-933, 1973.

[12] 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.

[13] G. -J. Min, S. Bae, B. -C. Kang and W. -Z. Park, "Surface Discharge Characteristics Study on the Laminated Solid Insulator in Quasi-Uniform Electric Field with Dry Air", *J. Electr. Eng. Technol.*, Vol. 10, No. 2, pp. 742-748, 2015.

[14] 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.

[15] R. Arora and W. Mosch, "High Voltage and Electrical Insulation Engineering", a John Wiley&Sons Inc., Publication, pp. 17-19, 71, 2011.

[16] E. -H. Choi, K. -C. Kim and K. -S. Lee, "Breakdown Characteristics of SF₆ and Liquefied SF₆ at Decreased Temperature", *J. Electr. Eng. Technol.*, Vol. 7, No. 5, pp. 765-771, 2012.

[17] H. Mitsui and R. Kumazawa, "Surface Flashover Characteristics of Ceramic Insulation in Gases at 40 °C ~ 700 °C", *T. IEE Japan*, Vol. 117-A, No. 8, pp. 832-838, 1997.

[18] H. Fujita and T. Kouno, "The Breakdown Voltages of N₂-O₂ Gas Mixtures in Non-Uniform Field at Low Temperatures", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 11, pp. 2233-2241, 1978.

[19] T. Nitta, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, Y. Arahata, H. Takahashi and H. Kuwahara, "Factors Controlling Surface Flashover in SF₆ Gas Insulated Systems", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 97, No. 3, pp. 959-968, 1978.

- [20] K. Itaka, T. Hara, T. Misaki and H. Tsuboi, "Improved Structure Avoiding Local Field Intensification on Spacers in SF₆ Gas", IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. PAS-102, No. 1, pp. 250-255, 1983.
- [21] H. C. Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 24, No. 5, pp. 765-786, 1989.
- [22] H. H. Lee, "A Study Breakdown Mechanism and Improvement of Dielectric Performance under Particle-contaminated Conditions in SF₆ Gas", Ph. D. Thesis, Kyushu University, pp. 36-41, 1992.
- [23] N. L. Allen, "Corona, Breakdown and Humidity in the Rod-Plane Gap", IEE Proc. A, Vol. 133, No. 8, pp. 562-568, 1986.
- [24] 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.
- [25] 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 ◇



임동영 (林東永)
 1983년 4월 12일생. 2009년 2월 경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부 졸업. 2011년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2015년 동대학원 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 스마트전기과 교수.



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.



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.



이광식 (李廣植)
 1948년 10월 25일생 1971년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전 고진압 연구회 간사장역임. 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.