

준평등전계중 Dry Air내 산소의 농도에 따른 절연파괴 및 연면방전 특성 연구

(A Study on Characteristics of Insulation Breakdown and Surface Discharge by the
Oxygen Concentration in the Dry Air in Quasi-Uniform Field)

백중현* · 석정후 · 최병주 · 배성우 · 김기채 · 박원주**

(Jong-Hyun Beak · Jeong-Hoo Seok · Byoung-Ju Choi · Sungwoo Bae · Ki-Chai Kim · Won-Zoo Park)

Abstract

This study was conducted to discover a substitute of SF₆ gas. SF₆ gas is widely used across the industries. Thanks to superior electrical properties, in particular, it has been commonly used in electrical industry. However, there have been a lot of studies on its serious effect on global warming. As a substitute of this synthetic gas, a mixture of dry air and N₂/O₂ was chosen in this study. In case of N₂/O₂, dielectric strength differs depending on the mixing ratio. This study examined dielectric breakdown and flashover after adjusting oxygen percentage in the dry air. This test was conducted in a quasi-uniform electric field depending on pressure, oxygen concentration and gas mixtures. The test results found that dielectric voltage and flashover voltage were the highest at a certain oxygen concentration. It is the results of this photoionization and electron attachment of oxygen.

Key Words : Gas Mixtures, Oxygen Concentration, Dielectric Breakdown Voltage, Flashover Voltage

1. 서 론

1997년 일본 교토에서 개최된 UN 산하의 UNFCCC 3차 회의에서 산업화로 인한 대기오염이 지구온난화를 초래한다고 판단하여 환경파괴를 유발하는 지구온난화지수(GWP) 및 지구온난화에 대한 기여도가 높은

CO₂, N₂O, CH₄, PFC, HFC, SF₆ 가스를 감축 대상으로 규정하였다. 또 교토의정서를 채택하여 6가지 온실가스의 감축결의안을 채택하였다[1]. 이로 인해 채택된 다음의 6가지 온실가스는 사용량의 감축이 불가피한 실정이다.

SF₆ 가스는 열적·화학적으로 안정적인 특성을 지녔으며 아크소호능력 또한 우수하다. 따라서 우수한 절연성 및 차단성을 요구하는 초고압 전력기기 내의 절연매체 또는 소호매체로써 광범위하게 사용되어져 왔다[2]. 하지만 각종 기후 협약 등 국제적 협약으로인해 SF₆ 가스의 사용을 줄여야 하는 실정으로 전력설비에서 SF₆ 가스의 사용량을 줄이기 위해서 SF₆ 가스

* Main author : Dotor 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 : whdgus@ynu.ac.kr
Received : 2015. 7. 6
Accepted : 2015. 9. 4

를 대체할 수 있는 절연매질을 개발 중이며, 누출되는 SF₆ 가스의 회수량을 증가시키는 기술의 개발이 진행 중이다[3-5].

현재 SF₆ 대체후보가스인 Dry Air, N₂, CF₃I, N₂/O₂ 혼합가스 등에 관한 연구가 진행 중이며, 가스절연체에 변화를 주어 고체를 절연매질로 사용하는 절연개폐장치(SIS) 및 진공을 매질로 사용하는 절연개폐장치(VIS)에 대한 연구도 진행되고 있다[6].

특히 환경에 영향을 미치지 않는 대체 후보가스 중 Dry Air를 절연매질로 적용한 친환경가스절연개폐장치(Environment-Friendly Gas Insulated Switchgear, EGIS)가 각광을 받고 있으며[3], Dry Air를 적용한 고전압기기들도 연구 개발되고 있는 상태이다[7].

하지만 현재까지도 활발히 연구되고 있는 SF₆ 가스에 비하여 친환경절연가스에 관한 연구가 많이 부족한 것이 현실이다.

이에 따라 본 연구에서는 고압기기에서 절연매체로 사용되고 있는 SF₆ 가스의 대체 후보가스로 Dry Air를 선택하였다. 최근의 연구에서 다양한 방전조건하에 N₂/O₂ 혼합가스의 최적의 혼합비는 다양하게 제시되고 있다[3,8-9]. 따라서 본 연구는 Dry Air 내 산소의 농도를 조절하여 Dry Air의 절연내력을 향상시키는 동시에 경제적인 대체가스를 선정하기 위해 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

그림 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치도를 보여준다. 모의 챔버(Test chamber)는 절연가스의 절연과피 특성 및 GIS 내의 연면방전특성을 모의하기위해 두께 20mm의 스테인리스 스틸로 제작하였으며, 내·외부 사이에 진공층을 두어 열에너지의 교환을 차단할 수 있게 제작하였다. 챔버의 내부는 내직경 260mm, 높이 460mm로서 체적은 약 25ℓ이며, 챔버의 외부의 경우에는 외직경 460mm, 높이 500mm이다. 또한 외부에서 내부를 관측할 수 있도록 외부 용기에는 석영유리 관측창(직경 110mm, 두께 20mm)을 설치하였다. 실험용

용기는 -100~90℃의 온도범위를 견딜 수 있으며, 1MPa까지 가압할 수 있도록 설계·제작하였다.

Dry Air는 Dry Air제조장치(Dry Air product device, ULTRA DRYER AIR SYSTEM)를 이용하여 제조하였으며, 이 제조장치는 공기 중의 불순물을 제거하기 위한 세 단계의 필터를 가지고 있다. 또한 두 개의 수분흡착 탱크가 상보적으로 동작하여 수분은 단시간에 흡착시켜 Dry Air를 만든다.

진공펌프(Vacuum pump, SINKU KIKO Co. Ltd, GUD-050A, Pumping speed 60ℓ/min)는 Dry Air를 모의 챔버에 주입하기 전 챔버 내부와 내·외부 사이에 진공 층을 5×10⁻⁴Torr의 진공상태로 만들어준다. 그리고 내부 압력을 정밀하게 측정하기 위하여 0.1% 미만의 오차를 갖는 디지털 압력계(LEO 2 Ei, -1~30bar)를 사용하였다.

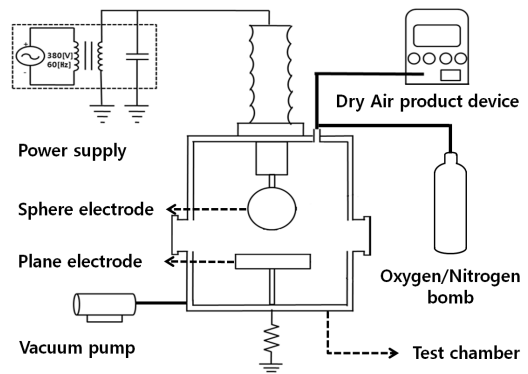


Fig. 1. Experimental setup

전원장치(HV Transformer)는 AC용 전원장치(DY-050725, Input Voltage : 1φ 380V 60Hz, Secondary Voltage : 1φ 300kV 60Hz, Capacity : 36kVA)로 2차 측에 고전압 커패시터와 모의 챔버를 병렬 연결하여 모의 챔버에 고전압을 인가할 수 있게 구성하였다.

전극(Electrode)은 절연가스의 절연과피 측정 시 상부(High Voltage)에 스테인리스 스틸로 만든 구전극(Sphere, 직경 41mm)을 설치하였고 하부(ground)는 스테인리스 스틸로 만든 Rogowski형 평판전극(Plane, 직경 59mm)을 설치하였으며, 이러한 전극의 배치는 전극의 극간이 구전극의 직경에 비해 충분히 작다면,

그 전극계는 준평등 전계를 구성한다. 이러한 준평등 전계는 M. Topler가 검증하였다[10]. 연면방전전압 측정시 스테인리스 스틸로 만든 나이프전극(Knife, 직경 10mm)을 수평으로 설치하여 준평등전계를 형성하였다.

고체절연물(Solid insulator)은 두께(T) 1mm, 직경(Φ) 50mm의 Teflon을 사용하였다.

Dry Air내 O₂의 농도를 조절하기 위해 사용된 N₂와 O₂ 가스는 순도 99.999%의 가스를 사용하였다.

2.2 실험 방법

구대평판에서 N₂:O₂ 비에 따른 절연파괴 특성 실험시 모의 챔버 내에 수직구조로 상부 구전극, 하부 평판전극을 설치하여 준평등전계를 구성한다. 이때 극간은 6mm로 일정하게 한다. 절연가스 주입 전 주입 튜브 및 모의 챔버 내부와 내·외부 사이에 진공 층을 진공펌프를 이용하여 5×10⁻⁴Torr의 진공 상태로 만들어준 후 표 1에 제시된 혼합비로 Dry Air와 O₂ 및 N₂가스를 혼합하고 모의 챔버에 주입하여 전압을 인가, 이때의 절연파괴 전압(V_B: Breakdown Voltage)을 측정하였다. 실험의 비교를 위해 N₂가스와 O₂가스를 혼합하여 Dry Air내의 O₂ 비를 달리하였을 경우와 동일한 N₂:O₂ 비를 갖는 N₂/O₂ 혼합가스를 제조하여 동일한 실험을 수행하였다.

Dry Air중 나이프대나이프 전극에서 N₂:O₂ 비에 따른 연면방전 특성 실험에서는 모의 챔버 내에 두께(T) 1mm, 직경(Φ)은 50mm 인Teflon을 배치하고 표면에 나이프 전극을 수평구조로 설치하여 밀착시킨 후 준평등전계를 구성하였다. 절연가스 주입 전 주입 튜브 및 챔버 내부와 내·외부 사이에 진공 층을 진공펌프를 이용하여 5×10⁻⁴Torr의 진공상태로 만든 후 절연가스를 주입하였으며, 절연가스의 종류는 구대평판 에서 N₂:O₂ 비에 따른 절연파괴 특성 실험에서 사용한 동일한 가스를 사용하였다. 절연가스 주입 후 모의 챔버에 전압을 인가하여 이때의 연면방전전압(V_S:Surface Flashover Voltage)을 측정하였다.

Table 1. N₂:O₂ ratio corresponding to O₂ concentration in Dry Air

실험	N ₂ :O ₂ 비		혼합비(kPa)		
	N ₂	O ₂	D-A	N ₂	O ₂
1	100	0			
2	90	10	47.6	52.4	
3	79	21	95.3		4.7
4	70	30	88.6		11.4
5	60	40	75.9		24.1
6	50	50	63.9		36.1

Dry Air가 사용되는 실험은 노점 -80~-75°C에서 수행하였다. 압력에 따른 절연파괴전압 (V_B) 및 연면방전전압(V_S) 특성 실험의 경우 0.1~0.6MPa 범위에서 0.1MPa씩 압력(P)을 증가시키며 실시하였다. 전원장치를 사용하여 전압을 인가할 때 전압상승속도는 3.15kV/s로 하였으며 절연파괴전압(V_B) 및 연면방전전압(V_S)은 리더방전에 의한 초기방전 전압 값을 10회 측정하여 평균값과 최대값, 최소값을 표시하였다. 절연파괴전압(V_B) 및 절연파괴전압(V_S)의 측정시 절연가스의 충분한 절연회복을 보장하기위해 30s 이상의 시간 간격을 두고 측정하였다. Dry Air내 N₂와 O₂의 비계산시 Dry Air내의 1% 미만의 기타가스 (Ar:0.94%, CO₂:0.03% 등)는 조성비에서 제외하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 구대평판전극에서 N₂:O₂ 비에 따른 절연파괴 특성

그림 2는 극간 6mm에서 N₂와 O₂의 혼합비에 따른 절연파괴전압(V_B)과 압력(P)의 관계를 보여준다.

절연파괴전압(V_B)은 모든 N₂와 O₂의 혼합비(O₂:21,30,40%)에서 압력(P)가 증가함에 상승하였다. 이는 방전개시전압과 압력의 관계를 나타내는 파셴의 법칙(Paschen's Law)에 의해 설명 가능하다.

또한 압력 (P)의 0.1MPa 증가에 따른 절연파괴전압(V_B)의 증가율은 평균 34.01%로 압력(P)의 변화에 따른 절연파괴전압(V_B)의 의존도가 높게 나타났다. 이

는 절연물이 없는 경우 2차 전자방출(SEE)이 전극에서만 발생하기 때문에 절연파괴전압(V_B)의 압력(P) 의존도가 높은 것으로 생각된다.

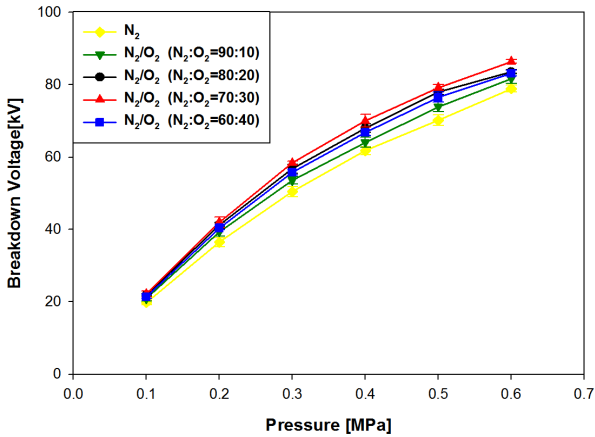


Fig. 2. V_B -P characteristics of the mixing ratio N_2/O_2 gas mixtures

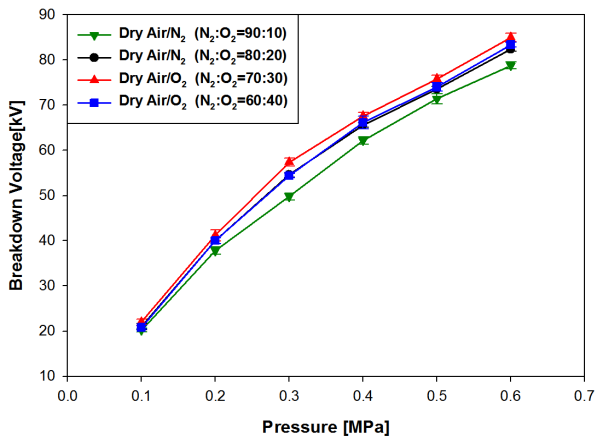


Fig. 3. V_B -P characteristics of O_2 concentration in Dry Air

절연파괴전압(V_B)이 가장 높은 혼합비는 70:30의 N_2/O_2 혼합비였으며 모든 압력(P: 0.1~0.6MPa)에서 동일한 결과를 확인하였다.

그림 3은 극간 6mm에서 Dry Air내의 O_2 농도에 따른 절연파괴전압(V_B)과 압력(P)의 관계를 보여준다. Dry Air에 O_2 및 N_2 를 혼합하여 그림 2에서 실시한 실험과 동일한 비율의 N_2/O_2 를 적용하였다.

앞선 실험과 마찬가지로 절연파괴전압(V_B)은 Dry Air 내 모든 O_2 비(O_2 :21,30,40%)에서 압력(P)이 증가

함에 따라 상승하였으며, 압력(P)의 0.1MPa증가에 따른 절연파괴전압(V_B)의 증가율은 평균 34.29%로 절연파괴전압(V_B)의 압력(P) 의존도가 높았다.

절연파괴전압(V_B)은 N_2/O_2 를 70:30의 비율로 하였을 때 모든 압력(P:0.1~0.6MPa)에서 가장 높았다.

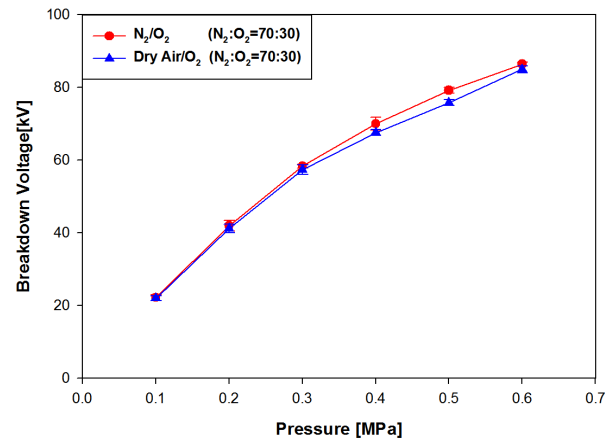


Fig. 4. V_B -P characteristics of N_2/O_2 and Dry Air at optimum mixing ratio

그림 4는 그림 2, 3에서 N_2/O_2 의 비가 70:30인 N_2/O_2 혼합가스와 Dry Air/ O_2 혼합가스의 절연파괴전압(V_B)과 압력(P)의 관계를 보여준다.

N_2/O_2 혼합가스의 경우가 Dry Air/ O_2 혼합가스에 비해 동일한 압력(P)에서 절연파괴전압(V_B)의 값이 평균 2.31% 높았다.

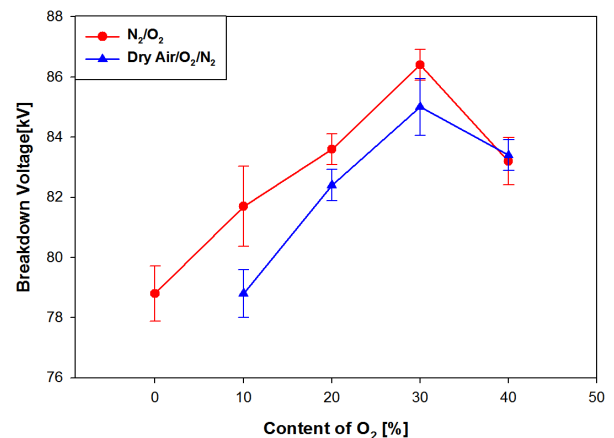


Fig. 5. V_B characteristics according to O_2 concentration of N_2/O_2 and Dry Air at 0.6MPa

그림 5는 0.6MPa에서 N₂/O₂ 혼합가스 및 Dry Air내 O₂농도에 따른 절연과괴전압(V_B)특성을 나타낸다. 절연과괴전압(V_B)의 값은 두 혼합 가스 모두에서 10~30%의 O₂ 농도에서 증가하였고, 30~40%의 O₂의 농도에서 감소하였다. 10~30%의 O₂ 농도 구간에서 절연과괴전압(V_B)의 증가 O₂의 전자부착효과로 인한 것이고, 30~40%의 O₂의 농도 구간에서 절연과괴전압(V_B)의 감소는 광전리에 의한 2차 전자방출과 관련된 것으로 추정되고 있다[9,11].

3.2 나이프대나이프 전극에서 Dry Air중 산소 농도에 따른 연면방전 특성

그림 6은 Teflon 표면에 수평으로 설치된 두 나이프 전극 사이에서의 Dry Air내 O₂의 농도에 따른 연면방전전압(V_S)과 압력(P)의 관계를 보여준다.

연면방전전압(V_S)의 경우 그림 2에서의 절연과괴전압(V_B)과 마찬가지로 모든 O₂의 농도(O₂:10, 20, 30, 40%)에서 압력(P)이 증가함에 따라 증가하였고 70:30의 N₂:O₂ 혼합비에서 연면방전전압(V_S)의 값이 가장 높았고 모든 압력(P:0.1~0.6MPa)에서 동일한 실험값을 보였다.

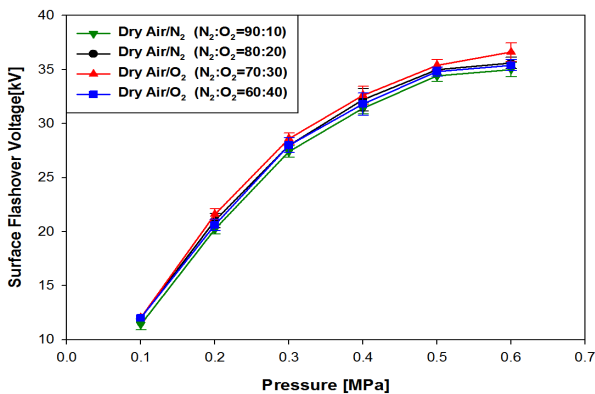


Fig. 6. V_S-P characteristics Content of O₂ in Dry Air

그림 7은 0.5MPa에서 Dry Air 내 O₂농도에 따른 연면방전전압(V_S)특성을 나타낸다. 연면방전전압(V_S)의 값은 10~30%의 O₂ 농도에서 증가하였고, 30~40%의 O₂의 농도에서 감소하였다. 이는 앞서 그림 5에서 설

명한 메커니즘으로 해석가능하다.

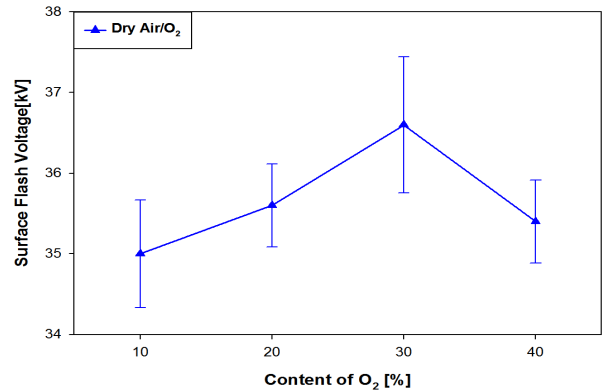


Fig. 7. VF characteristics according to O₂ concentration in Dry Air at 0.5MPa

4. 결론

본 논문은 Dry Air 내 O₂의 농도를 조절하여 경제적 대체가스를 개발하기 위해 연구하였다. 그 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 준평등진계에서 절연과괴전압의 압력의존도는 높게 나타났다.
- 2) N₂/O₂ 혼합가스에서 절연과괴전압은 O₂의 비율이 30%일 때 가장 높았고 모든 압력에서 적용 가능하였다.
- 3) Dry Air 내 O₂의 비율이 30%일 때 절연과괴전압이 가장 높았다.
- 4) O₂의 비율이 30%인 N₂/O₂ 혼합가스와 Dry Air/O₂ 혼합가스에서 절연과괴전압은 N₂/O₂ 혼합가스가 평균 2.29% 높았다.
- 5) N₂/O₂ 혼합가스에서 연면방전전압은 O₂의 비율이 30%일 때 가장 높았다.
- 6) O₂의 비율이 30%인 N₂/O₂ 혼합가스와 Dry Air/O₂ 혼합가스에서 연면방전전압은 N₂/O₂ 혼합가스가 평균 2.63% 높았다.

위의 결과 Dry Air가 N₂/O₂ 혼합가스에 비교하였을 때 최적의 혼합비에서 절연과괴전압 및 연면방전전압은 Dry Air가 더 낮았지만 N₂/O₂ 혼합가스에 비해 N₂의 사용량은 100%, O₂의 사용량은 28.6% 감소하였다. 따라서 Dry Air내 일정량의 O₂ 주입은 Dry Air의 절

연내력을 높여주고 N₂/O₂ 혼합가스를 대처할 수 있는 경제적인 가스의 생산을 가능하게 할 것으로 생각된다. 또한 본 연구 자료는 Dry Air를 절연가스로 사용되어지는 설비의 절연설계 시 적용가능할 것이다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2015년도 춘계학술대회에서 발표한 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 Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 5, pp. 20-24, September/October, 1997.
- [3] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori and F. Endo, "Developrrent of SF₆-free 72.5 kV GS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, pp. 1869-1876, July 2007.
- [4] 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.
- [5] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, F. Endo, and T. Oomori, "Fundamental Insulation Characteristics of Air, N₂, CO₂, N₂/O₂ and SF₆/N₂ Mixed Gases", Electrical Engineering in Japan, Vol. 155, No. 3, pp9~17, 2006.
- [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", Electrical Engineering in Japan, Vol. 175, No. 1, 2011.
- [7] H. Saito, K. Nagatake, H. Komatsu, Y. Takeshi, Y. Matsui, k. Katslmata, and M. Sakaki, "Development of 72/84-kV Dry Air-Insulated Dead Tank VCB", Electrical Engineering in Japan, Vol. 177, No. 1, 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] K. C. Seo, "High Voltage Engineering (New edition)", Dong Myeong Publishers, pp.34-40, 1977.
- [11] J. H. Mason, "Discharges", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. E-13, No. 4, pp. 211-238, August 1978.

◇ 저자소개 ◇



백종현 (白種鉉)

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



석정후 (石貞煦)

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



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 조교수.



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 케이오대학교 전기공학과 졸업(석사). 1989년 3월 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989~1993년 한국표준과학연구원 전자과연구실 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.