

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)

백종현* · 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 협약으로 인해 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 절연파괴 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^{-4} Torr의 진공상태로 만들어준다. 그리고 내부 압력을 정밀하게 측정하기 위하여 0.1% 미만의 오차를 갖는 디지털 압력계(LEO 2 Ei, -1~30bar)를 사용하였다.

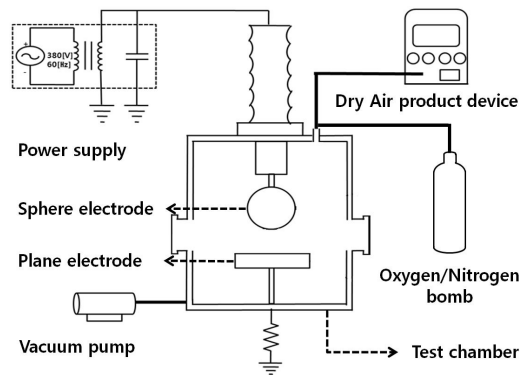


Fig. 1. Experimental setup

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 절연파괴 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(SEEA)이 전극에서만 발생하기 때문에 절연과괴전압(V_B)의 압력(P) 의존도가 높은 것으로 생각된다.

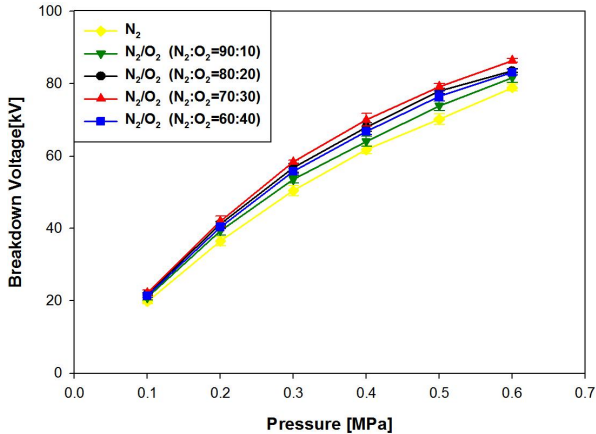


Fig. 2. V_B -P characteristics of the mixing ratio N_2/O_2 gas mixtures

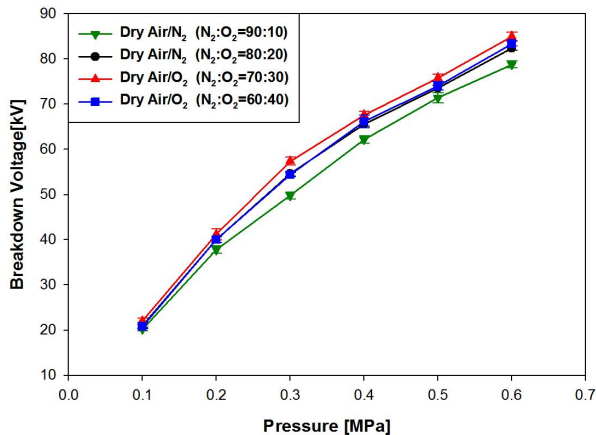


Fig. 3. V_B -P characteristics of O_2 concentration in Dry Air

절연과괴전압(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 절연과괴전압(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 절연과괴전압(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 절연과괴전압(V_B)의 증가율은 평균 34.29%로 절연과괴전압(V_B)의 압력(P) 의존도가 높았다.

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

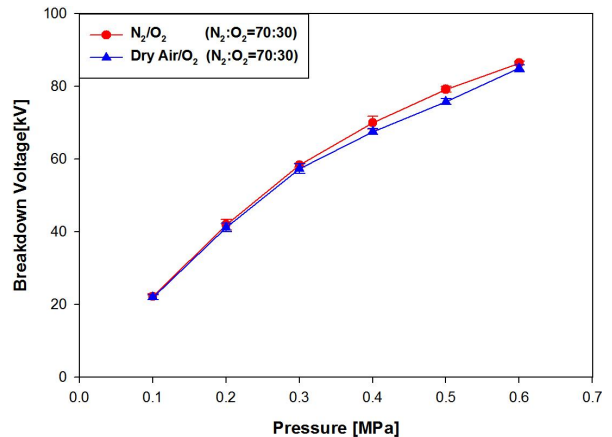


Fig. 4. V_B -P characteristics of N_2/O_2 and Dry Air at optimum mixing ratio

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

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

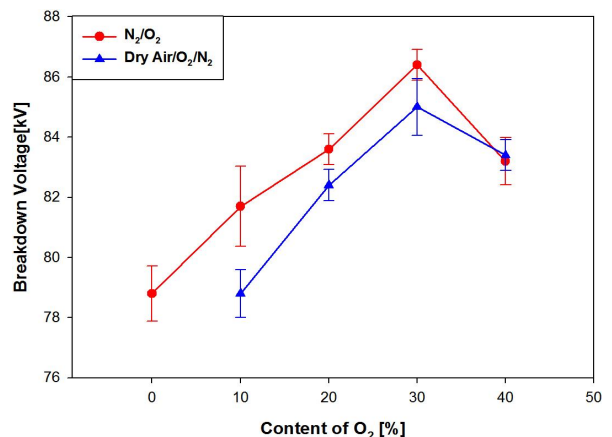


Fig. 5. V_B characteristics according to O_2 concentration of N_2/O_2 and Dry Air at 0.6MPa

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.

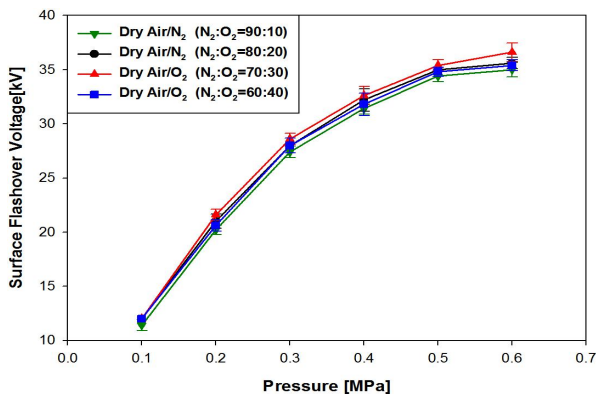


Fig. 6. V_S-P characteristics Content of O₂ in Dry Air

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.

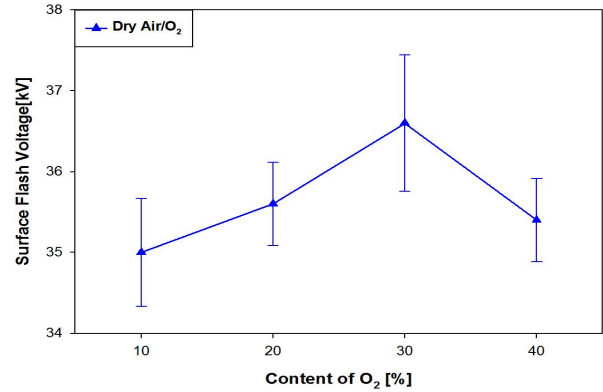


Fig. 7. VF characteristics according to O₂ concentration in Dry Air at 0.5MPa

4. 결론

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

- 1) 준평등전계에서 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, "Development of SF₆-free 72.5 kV GIS", 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 게이오대학교 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.