

배전급 전력설비를 위한 제조공기의 절연성 평가

(Breakdown Characteristics Assess of Imitation-Air for Distribution Power Facilities)

도영희 · 최은혁 · 이창욱 · 박광서 · 김이국 · 이광식*

(Yeong-Hoei Do · Eun-Hyeok Choi · Chang-Uk Lee · Kwang-Seoo Park ·
Lee-Kook Kim · Kwang-Sik Lee)

요 약

현재 산업사회의 발달과 더불어 신뢰성 높은 양질의 전기에너지와 운전 및 보수의 간편화, 계통운용의 신뢰성의 확보가 요구되고 있다. 또한 SF₆을 대체할 친환경적인 절연매체의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이에 본 연구는 모의 GIS내 제조공기의 압력 및 갭 변화에 따른 전원별 절연특성을 구명하였다. 또한 배전급 전력설비에 적용을 위하여 제조공기와 SF₆의 절연특성을 비교 평가하였다.

제조공기의 절연특성을 구명함으로써 각종 전력용 설비의 절연설계에 SF₆ 대신 친환경적인 모의공기를 사용 가능함을 본 연구에서 구명하였다. 배전급 SF₆ 1[atm]의 절연과피전압에 상응하는 제조공기의 압력이 약 3[atm]으로 확인되었다. 제조공기를 이용한 친환경적인 절연재 사용으로 지구의 온난화현상 감소에 크게 기여할 것으로 기대된다.

Abstract

With the improvement of industrial society, the high quality electrical energy, simplification of operation and maintenance, ensuring reliability are being required. We request urgently change a SF₆ for an environment friendly gas insulation material. In this paper the experiments of breakdown characteristics by pressure and gap change of Imitation-Air in model GIS(Gas Insulated Switchgear) were described. Also assess of breakdown characteristics about Imitation-Air and SF₆.

It is considered in this paper that the results are fundamental data for electric insulation design of Distribution Power Facilities which will be studied and developed in the future. The pressure to be confronted to SF₆ gas 1[atm] for Distribution Power Facilities is Imitation-Air 3[atm]. And we could make an environment friendly gas insulation material with maintaining dielectric strength by Imitation-Air which generates a lower level of the global warming effect.

Key Words : Imitation-Air, SF₆, Breakdown Voltage

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
Tel : 053-810-3953, Fax : 053-810-4767
E-mail : kslee@yu.ac.kr
접수일자 : 2007년 11월 9일
1차심사 : 2007년 11월 10일
심사완료 : 2007년 11월 19일

1. 서 론

SF₆ 가스는 22[kV]급부터 800[kV]에 이르기까지

신뢰성 높은 양질의 절연가스로 유용하게 사용되고 있다[1].

그러나 인체에 무해한 SF₆는 방전시 고독성, 고부식성 화합물이 발생하며, 수증기, 도전성입자 및 도체 표면 거칠음에 대한 파괴전압의 민감성, 저온에서의 액화로 인한 사고의 위험들을 가지고 있다. 특히 지구온난화 계수(GWP)가 이산화탄소의 약 23,900배로 매우 높고 화학적으로도 매우 안정화되어 대기중 수명도 길기 때문에 이에 따라 대기 중에 방출되었을때 장시간 축적되어 지구 온난화에 끼치는 영향이 지대하므로 2005년 “Kyoto Protocol”에 의해 온실가스중 하나로 지정되었으며, CO₂, CH₄, HFC, PFC와 더불어 대표적인 절연가스인 SF₆가스도 오스트레일리아, 캐나다, 일본, EU 등 여러 국가에서 규제물질로 정하였다. 비록 우리나라는 온난화 가스에 대한 개도국으로 선정되어 있지만 앞에서 언급한 여러 국가들은 강제 이행국으로써 온난화물질 대체 연구 및 새로운 전력설비에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 향후 우리나라도 온난화가스에 대한 강제 이행국이 될 것이 확실시 되고 있으며, 향후 전력선진국으로 도약하기 위해서는 우리나라도 다양한 대체 절연재 개발에 많은 연구 및 개발의 필요성이 있다고 사료된다[2-3].

따라서 본 연구에서는 질소와 산소를 79:21 비율로 만든 제조공기(I-Air)와 SF₆의 절연파괴특성을 비교분석하여 배전급 전력설비에 사용 가능성을 검토한 연구이다.

2. 실험 장치 및 방법

사진 1은 본 연구에 사용된 챔버의 외관으로서 그 주요사양은 다음과 같다. 실험용 챔버 내부온도를 관측하기 위하여 온도센서(UNICON, -90~90[°C])를 실험용 챔버 내부 중심부에 전극부와 평행하게 전극 수직 중심축과 8[cm] 떨어진 곳 온도센서를 상·중·하 3개와 실험용 챔버 내부압력을 측정하기 위해 압력계(WISE, 0~15[atm])를 설치하였다. 실험용 챔버 내부 온도센서와 전극부를 관측할 수 있는 관측창(직경 110[mm], 두께 20[mm])이 존재한다. 이 관측창의 재질은 투명 아크릴이며, 원통형으

로 제작 설치하였다. 실험용 챔버 내부를 진공펌프(SINKU KIKO Co.Ltd, GUD-050A, pumping speed 60[l/min])로 5×10^{-4} [Torr]까지 진공을 유지할 수 있으며, 열 절연을 위하여 챔버 내·외부사이에 진공층을 두었다.

또한 챔버는 압력 변화(1~7[atm])를 위해 안전상 10기압 정도의 가압이 가능하고 압력 유지를 위해 실험용 챔버 내의 기밀성 유지가 가능하다. 온도변화(90~-90[°C]) 및 유지가 가능하고 높은 절연성을 가진 SF₆ 가스의 절연내력 시험을 위해 300[kV]까지 고압인가를 할 수 있도록 절연설계가 되어있다. 또한 챔버내 가압상태에서 외부에서 겹을 75[mm]까지 상부에서 조정할 수 있도록 설계하였다.

전원장치는 사진 2와 같이 AC는 DY-106(AC 300[kV]/120[mA])와 DC(-)는 Pulse Electronic Eng. Tokyo ; HDV-300 KIV-N을 사용하였다.

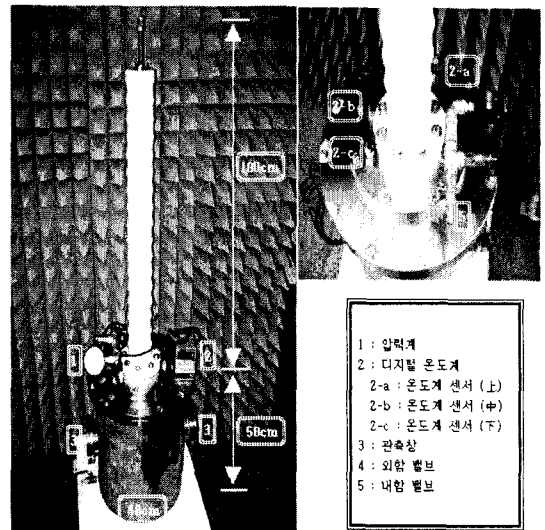


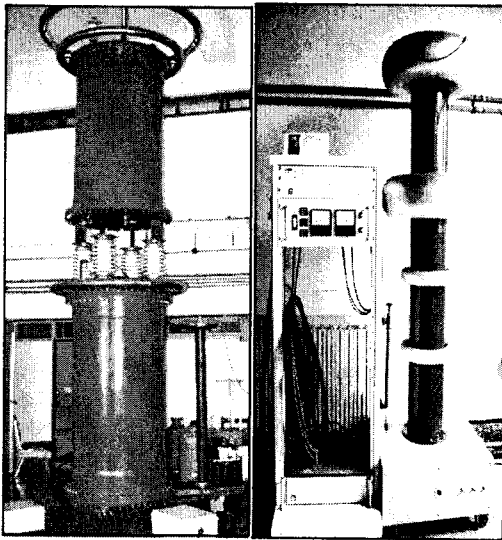
사진 1. 실험용 챔버
Photo 1. The experimental chamber

사용전극은 스테인레스 스틸인 Sphere-Sphere (구직경 41[mm], S-S)을 사용하였다.

SF₆의 실험방법은 가스를 투입하기전 챔버 내를 5×10^{-4} [torr]까지 배기시킨 후 SF₆ 가스를 2~4[atm]까지 0.5[atm]씩 주입하였다. 이에 각 압력에 따른 겹(d) 변화시(1~4[mm]) 절연파괴전압(V_B) 특성 연

배전급 전력설비를 위한 제조공기의 절연성 평가

구하였다. I-Air도 SF₆와 같은 방법으로 배기시킨후 I-Air를 게이지 압력 2~4[atm]까지 0.5[atm]씩 주입하여 d 변화시(1~15[mm]) V_B를 측정하였다. V_B는 10회 측정하여 평균한 값을 이용하였다.



(a) AC 전원장치 (b) DC 전원장치

사진 2. AC / DC 전원장치
Photo 2. AC / DC high voltage source

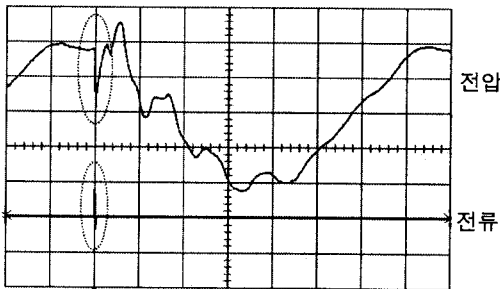


그림 1. Leader 방전에 따른 전압전류파형
Fig. 1. Current & Voltage Wave of Leader Discharge

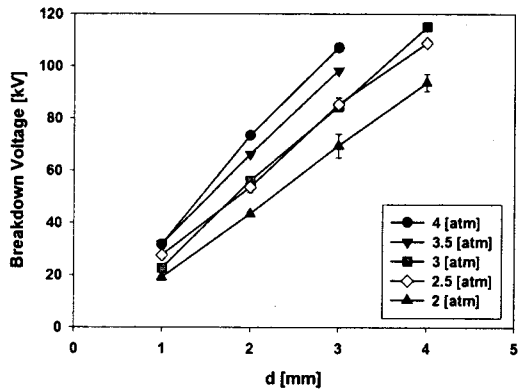
절연파괴측정방법은 리더방전에 의한 초기방전전압을 측정하였다. 리더방전은 PD를 이용하여 전류파형과 전압파형을 확인함으로써 초기방전전압을 측정할 수 있는 방법으로 아래의 그림 1과 같이 부분방전 진전에 의한 전압 전류 파형에서 전압파형이 급감하는 시점에서 동시에 전류의 파형이 급증하게

될때의 전압을 본 연구의 절연파괴전압으로 채택하였다[9].

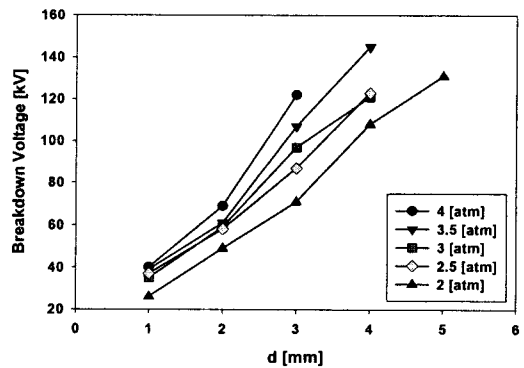
절연파괴 측정시의 전압은 상승속도 1[kV/s]로 하였다. 부정현상을 없애기 위해 처음 10번 정도 방전시킨 후 절연파괴 전압값을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 SF₆의 압력에 따른 절연파괴특성



(a) AC전원 인가시



(b) DC전원 인가시

그림 2. 전원별 SF₆의 절연파괴전압
Fig. 2. Breakdown voltage of SF₆ by AC&DC

일반적으로 배전급 GIS 등에 사용되는 SF₆는 약 1[atm]에서 3[atm]정도의 압력을 적용운용하고 있다. 본 연구에서는 4[atm]까지 변화시킬 때마다 각 d에 따른 V_B의 특성을 연구하였는 바, 다음과 같은 특성을 보여준다.

그림 2는 압력을 매개변수로 한 V_B - d 특성이다. 그림에서 에러바는 10회 측정중 최대 및 최소값을 나타내며 그 평균값을 점으로 표현하였다. 절연파괴 특성은 그래프와 같이 d 증가시 선형적으로 상승하였으며, 평균적으로 d 가 1[mm] 증가됨에 따라 V_B 가 3배정도 증가됨을 확인하였다.

또한 그림에서 보는 바와 같이 압력이 증가됨에 따라 V_B 는 상승하였으며, d 가 커질수록 각 압력에 따른 V_B 의 차가 큼을 알 수 있다.

위와 같은 결과는 이미 잘 알려진 Paschen의 법칙에 의존한 결과로 해석된다.

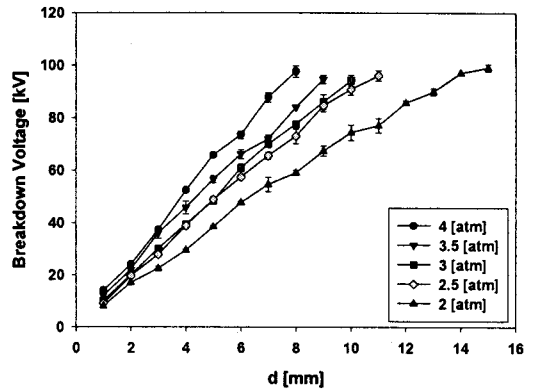
3.2 I-Air의 압력에 따른 절연파괴특성

그림 3은 I-Air의 전원별 일정압력을 매개변수로 한 갭변화에 따른 절연파괴전압특성을 나타내고 있다. 절연파괴특성은 d 증가에 따라 SF₆와 같이 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. SF₆의 절연내력에 비하여 제조공기의 절연내력은 약 2.5배에서 3배 정도이며, 갭이 증가함에 따라 절연내력이 SF₆에 비하여 현저히 떨어짐을 확인하였다. 또한 SF₆와 같이 압력증가에 따라 V_B 는 상승하였으며, d 가 증가할수록 각 압력에 따른 V_B 값의 크기가 더욱더 커짐을 확인하였다.

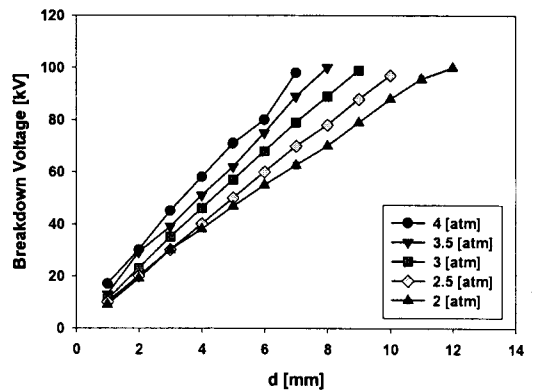
이것은 압력이 높을수록 Paschen의 법칙을 유지하는 pd 범위가 큰 결과이며 그림에서 보듯이 압력이 낮은 경우는 d 가 짧은 범위에서 포화하는 결과로 나타난다. 위 결과는 AC 및 DC 전압 인가시 다 함께 나타나며 DC 전압 인가 경우가 AC 전압 인가 경우보다 더 높게 V_B 가 형성됨을 보여주는데 이것은 일반적으로 알려진 대기압하의 공기에서 알려진 방전 메커니즘과 같게 해석된 결과이다.

3.3 SF₆와 I-Air의 절연성능평가

국내 중전기업체가 SF₆를 사용하지 않는 친환경 개폐장치개발에 경쟁적으로 나서고 있는 가운데 한전은 현행 “25.8[kV] 가스절연개폐장치” 규격을 대체하기 위해 고체절연개폐장치, 질소가스절연개폐장치, 압축건조공기절연개폐장치 등의 규격을 검토



(a) AC 전원인가시



(b) DC 전원인가시

그림 3. 전원별 I-Air의 절연파괴전압
Fig. 3. Breakdown voltage of I-Air by AC&DC

하고 있다. 이에 본 논문에서는 SF₆의 일정압력시 d 에 따른 V_B 값에 상응하는 I-Air의 V_B 와 d 를 표 1에서 나타낸다.

이에 25.8[kV]에 사용하는 1.1[atm] SF₆에 상응하는 I-Air의 기압을 도출하고자 그림 4와 같이 SF₆ 1[atm]과 I-Air의 절연파괴전압을 비교하여 나타내었다.

표 1에서 2[atm]의 SF₆ $d=1$ 일때 $V_B=19$ 에 상당하는 2[atm] I-Air는 $d=2$ 로 나타난다. 이 경우 SF₆에 대한 I-Air의 V_B 의 백분율 오차는 -7.36[%]로 나타나 같은 SF₆의 V_B 에 상당하는 신뢰성을 가지기 위해서는 2배를 조금 상회하는 d 가 요구되나 -7.36[%]의 오차는 공학적으로는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 또한 압력이 3, 4[atm]으로 상승함에 따라

배전급 전력설비를 위한 제조공기의 절연성 평가

SF₆인 경우의 d=1[mm]에 상응되는 I-Air의 d는 2[atm]일 경우와 같이 동일하게 2[mm]이지만, SF₆ d가 2, 3, 4로 상승됨에 따라 상응하는 I-Air의 d는 그림 4에서 보는 것과 같이 약 3배이상의 d를 가질 때 신뢰성이 보장되는 것으로 사료된다.

표 1. 일정압력시 d에 따른 SF₆의 V_B에 상응되는 I-Air의 d

Table 1. d of I-Air to correspond at SF₆ V_B with a regular gas volume

기압 [atm]	구분	SF ₆ d[mm]			
		1	2	3	4
2	SF ₆ V _B [kV]	19	43.4	69.4	93.6
	I-Air V _B [kV]	17.6	40.4	70.4	94.4
		d	2	5	9
	오차 [%]	-7.36	-6.91	1.44	0.85
3	SF ₆ V _B [kV]	22.6	56	88	109
	I-Air V _B [kV]	21.2	60.4	86.6	107.8
		d	2	6	9
	오차 [%]	-6.6	7.85	-1.61	-1.11
4	SF ₆ V _B [kV]	31.6	73.4	107	
	I-Air V _B [kV]	31.6	73.4	104	
		d	2	6	9
	오차 [%]	0	0	-2.88	

또한 표 1에서 보는바와 같이 일정압력시 d에 따른 SF₆의 V_B에 상응되는 I-Air의 d를 도출하였다. 한편 일정 d일 때 압력에 따른 SF₆의 V_B에 상응하는 I-Air의 압력을 산출하면, d=1일 경우 SF₆ 2[atm]에 상응하는 I-Air의 압력은 7[atm]으로 나타났다. 이는 2[atm]이상의 SF₆를 사용하는 전력설비의 체적을 동일하게 할 때 I-Air의 압력을 대단히 높게 설계에 반영하여야 할 것이므로 전력설비에 응용은 큰 어려움이 따를 것으로 판단된다.

그림 5는 25.8[kV]급 SF₆ GIS에 주로 사용되고 있는 압력이 1.1~3[atm]이므로 이에 상응하는 I-Air의 압력을 얻고자 나타낸 그림이다. 그림에서 SF₆ 3[atm]의 절연내력은 I-Air에 비하여 평균 2배 이상으로 나타남을 확인하였다. 또한 SF₆ 1[atm]에 상응하는 I-Air의 압력이 약 3[atm]임을 확인하였다.

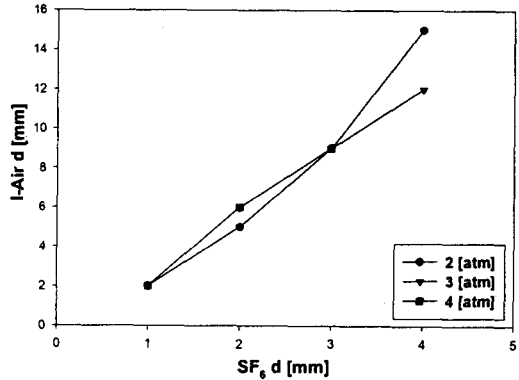


그림 4. 일정압력시 d에 따른 SF₆ V_B에 상응되는 I-Air의 d

Fig. 4. d of I-Air to correspond at SF₆ V_B with a regular gas volume

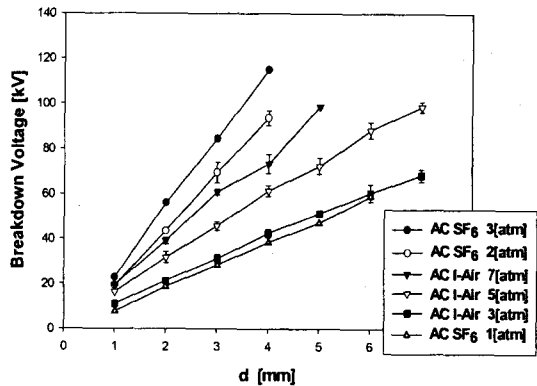


그림 5. SF₆와 I-Air의 절연파괴전압 비교

Fig. 5. Breakdown voltage of SF₆ & I-Air

그림에서 보는바와 같이 각 d에서 SF₆의 1~3[atm] 사이 V_B값내에 포함되는 I-Air 특성을 보면 그 압력이 3~7[atm]일 경우이다. 여기서 주목할 사항은 I-Air일 경우 7[atm]일 경우에도 SF₆ 2[atm]에 크게 미치지 못하고 있는 것으로 나타난다. 이것은 d가 각각 1, 2, 3, 4[mm]일 경우 SF₆에 대한 I-Air의 V_B값의 백분율 오차가 2.0[%], -10.1[%], -12.4[%], -21.6[%]로 크게 나타남을 알 수 있다. 이 결과에서 SF₆ 3[atm]에 상응하는 I-Air의 기압을 유추하여 보면 13~15[atm]이상 되어야 할 것으로 판단되어 제작시 큰 압력에 이겨내는 챔버의 설계가 요구되어 재질, 두께, 기밀성 등 난제가 많은 것으로 생각된다. 그러므로 일정 전극간 거리에서 압력만으로도 SF₆

의 V_B 에 상응하는 I-Air의 압력을 고려하여 설계에 반영하는 것 보다 압력과 d(체적)를 동시에 증대시키는 방법을 제안하고자 한다.

4. 결 론

본 논문은 AC/DC(-) 고전압을 사용하여 SF₆와 제조공기의 절연과피특성을 구명하고, 제조공기를 배전급 전력기기에 사용가능성을 평가한 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SF₆는 압력과 갭이 증가됨에 따라 절연과피전압도 비례적으로 상승함을 확인하였으며, Paschen의 법칙에 의존한 결과를 얻었다.
- 2) 제조공기도 압력과 갭이 증가됨에 따라 절연과피전압이 상승하였다. 하지만 낮은 압력에서 갭 증가에 따른 절연과피전압이 포화됨에 따라 Paschen의 법칙을 벗어남을 확인하였다.
- 3) SF₆ 1[atm]의 절연과피전압에 상응하는 제조공기의 압력이 3[atm]정도인 것이 확인되었다. 한편 SF₆ 2[atm]일 때 상응하는 제조공기의 압력이 7[atm]이상으로 크게 높게 되어 SF₆ 2[atm] 이상의 전력설비의 절연재를 제조공기로 대체시는 제조공기의 압력 및 체적의 증가를 전력설비 설계에 반영하여야 신뢰성이 확보될 것이다.

이에 위의 결과를 응용하면 SF₆ 대신 제조공기를 배전급 전력설비의 절연재료로 사용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Landry, M. et al. "Dielectric withstand and breaking capacity of SF₆ circuit breakers at low temperatures" Power Delivery, IEEE Transactions on, pp. 1029~1035, July 1988.
- [2] Gong Guoli et al, "The influence of SF₆ and SF₆/N₂ dissociating products on the electrical performance of several insulating varnishes", Electrical Insulating Materials, pp. 495~497, 1995.
- [3] T.Ueda et al, "Discrimination of Partial Discharge Electromagnetic Signal in SF₆ Gas from External Noise Using Phase Gate Control Method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 117~120, 1996.
- [4] C.Beyer et al. "Influence Reactive SFX Cases on Electrode Surfaces after Electrical Discharge under SF₆

Atmosphere", IEEE Trans, pp. 234~240, 2000.

- [5] Kwang-Sik Lee, "A Study on the Discharge Characteristics of Liquid Nitrogen and Gases at Very Low Temperature", KEPCO, 1993.8.
- [6] Kyeung-Tae Park, "The Characteristics of Discharge and Radiated Electromagnetic Waves with a Variation of Temperature in SF₆", Yeungnam Univ., 2002.12.
- [7] Kwang-Sik Lee, "The Characteristics of Insulation with Temperature Variations of SF₆" KIEE Vol 52C No 8, 2003.8.
- [8] Kwang-Sik Lee, Eun-Hyuck Choi, "The Positive Effect and the Breakdown Characteristics in SF₆ and LN₂", KIEE Vol 54C No 8, 2005, 8.
- [9] Naoki "Streamer and Leader Discharge Propagation Characteristics Leading to Breakdown in Electron in Electronegative Gases" IEEE, 2006.
- [10] Kwang-Sik Lee, Eun-Hyuck Choi, "Breakdown characteristics of SF₆ at various temperature under AC High-Voltage" IEEE - ICPADM 2006, 2006.06.
- [11] 이광식 외, "평등전계에서 SF₆와 건조공기의 압력별에 따른 절연특성 연구", 한국조명전기설비학회 추계학술대회 논문집, 2007.11.

◇ 저자소개 ◇

도영희(都榮會)

1958년 9월 23일생. 1988년 경일대 전기공학과 졸업. 1993년 동산업대학원 전기공학과 졸업. 2006년 영남대 일반대학원 전기공학과 박사과정수료. 현재 한국전력공사 대구전력관리처 부처장.

최은혁(崔殷赫)

1977년 2월 19일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 2005년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동대학원 박사수료.

이창욱(李昌旭)

1979년 5월 20일생. 2006년 영남대 광전자물리/전기공학과 졸업. 2007년 현재 전기공학과 석사 재학중.

박광서(朴光緒)

1970년 3월 23일생. 1997년 영남대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 졸업(박사). 현재 경일대학교 전기공학과 전임강사.

김이국(金利國)

1946년 9월 30일생. 1969년 영남대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 졸업(석사). 2002년 동 대학원 졸업(박사). 현재 경일대학교 전기공학과 교수.

이광식(李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전고전압연구회 간사장 역임. 한국조명전기설비학회 편수위원장·부회장 역임. 현재 한국조명전기설비학회 회장. 영남대학교 전기공학과 교수.