

# 170[kV] GIB 내에서 건조공기(Dry Air)의 절연파괴 특성

(Breakdown Characteristics of Dry Air under 170[kV] GIB)

한기선\* · 윤진열 · 주형준\*\*

(Ki-Son Han · Jin-Yul Yoon · Hyung-Jun Ju)

## Abstract

In this paper, we changed SF<sub>6</sub> insulation gases used already in the GIB(Gas Insulated Bus, gas insulated busbar) of switching appliances of power grid 170[kV] GIS(Gas Insulated Switchgear, Gas Insulated Switchgear) with green insulation dry air gases and studied dielectric breakdown voltage characteristics by the AC voltage withstand test. Withstand test AC voltage applied to the standard KEPCO's 170[kV] GIB with dry air insulation and the equivalent of dry air and SF<sub>6</sub> gas were examined. Breakdown voltage of dry air, using an expression of the experiments were calculated and AC Withstand criterion of dry air insulation for the AC voltage test was derived. Using the criterion, dry air gases can be used instead of the SF<sub>6</sub> gas was confirmed in the factory acceptance test at 170[kV] GIB.

Key Words : 170[kV] GIS, 170[kV] GIB, Breakdown voltage characteristic, Dry Air Insulation

## 1. 서 론

초고압 변전기기의 절연매체로서 널리 사용되고 있는 SF<sub>6</sub> 가스는 높은 절연내력과 우수한 아크소호능력, 무독성 및 안정적인 열적·화학적 특성을 가지고 있고, 공기 절연에 비해 약 20[%]의 공간으로 설치가 가능하여 변전기기의 축소화 및 고신뢰화를 가능하게 하였다. 그러나 SF<sub>6</sub> 가스는 저온 및 고압에서 액화되기 쉽고 불평등 전계에서 절연내력이 낮아지며 다른

가스에 비해 가격이 비싼 단점이 있다. 특히 SF<sub>6</sub> 가스는 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)가 CO<sub>2</sub>의 23,900배로 매우 높고 화학적으로 안정되어 있어 지구온난화에 끼치는 영향이 지대하므로 2005년 교토의정서에 의해 온실가스에 포함되었다. 우리나라는 2013년부터 SF<sub>6</sub> 가스 감축이 불가피할 것으로 예상되므로 한전과 중전기 제작사는 SF<sub>6</sub> 가스를 절감할 수 있는 다양한 연구와 개발이 필요할 것으로 판단된다[1-2]. 특히 SF<sub>6</sub> 가스는 100[%] 회수가 곤란하여 중전기 제작사의 공장 검수시험시 약 30[%], 한전의 설비 유지보수 및 증설시 약 20[%]가 미회수되어 대기중으로 배출되고 있어 SF<sub>6</sub> 가스 절감대책에 대한 연구가 절실한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 공장 시험시 대기중으로 배출되는 약 30[%]의 SF<sub>6</sub> 가스 미

\* 주저자 : 전력연구원 선임연구원  
\*\* 교신저자 : 전력연구원 선임보연구원  
Tel : 042-865-5884, Fax : 042-865-5804  
E-mail : juhjun@kepco.co.kr  
접수일자 : 2010년 8월 12일  
1차심사 : 2010년 8월 14일, 2차심사 : 2010년 9월 27일  
심사완료 : 2010년 9월 28일

회수를 막기 위해 대체 방법으로 N<sub>2</sub> 가스와 O<sub>2</sub> 가스가 혼합된 건조공기의 적용 가능성을 확인하고자 하였다 [3-5].

170[kV] GIB의 절연매체로 SF<sub>6</sub> 가스와 건조공기 사용시 전계해석을 통하여 건조공기의 대체 적용 가능성을 검토하였으며, 한전 현장에서 설치 운영하고 있는 GIS의 약 67[%]를 점유하고 있는 효성중공업에서 제작한 170[kV] 상분리형 GIB와 상일괄형 GIB를 대상으로 상용주파전압을 인가하여 건조공기의 압력변화에 따른 상용주파 절연파괴 실험을 통하여 측정된 절연파괴전압과 SF<sub>6</sub> 가스 사용시의 절연파괴전압을 비교하고 등가성을 분석하여 건조공기 사용시 절연파괴전압 실험식을 산출하였다. 또한 산출된 절연파괴전압 실험식으로부터 상용주파 내전압 시험 기준식을 도출하고 적합도를 검증하기 위하여 전계해석상의 취약한 부위에 이물질이 부착하여 실제 절연파괴가 내전압 시험기준 값 이하에서 발생하는지를 확인하였다[6-10]. 이상의 실험결과 본 논문에서는 SF<sub>6</sub> 가스 사용량을 감축하기 위하여 170[kV] GIB의 공장 검수시험시에 SF<sub>6</sub> 가스 대신 대체 절연가스인 건조공기의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 전계해석

170[kV] GIB에 절연매체로 N<sub>2</sub> 가스와 O<sub>2</sub> 가스가 혼합된 건조공기 사용시 내부 구조물에 분포되는 전계를 기존의 SF<sub>6</sub> 가스 사용시 전계와 비교하기 위해 전계해석 프로그램인 Ansys사의 Maxwell 3D를 사용하여 해석하였다. 실제 한전에서 사용중인 효성중공업체의 170[kV] 상분리형과 상일괄형 GIB를 대상으로 하였으며 건조공기가 1, 3, 5[Bar]으로 충전된 경우를 가정하여 절연파괴에 가장 취약한 부위인 스페이스의 전계분포를 해석하였다.

그림 1에 해석에 사용된 170[kV] 상분리형 GIB 모델과 전계해석 분포를 나타냈으며, 그림 2는 해석에 사용된 170[kV] 상일괄형 GIB 모델과 전계해석 분포를 보여준다. 건조공기 절연시 전계해석 결과는 기존 SF<sub>6</sub> 가스 절연의 경우와 비교하여 표 1에 나타내었다.

해석에 사용된 스페이스는 실제 설치되어 운전되는 수직배치형으로 모의 하였고, 재질은 에폭시로 구성되어 있으며 그림 3에 모의된 상분리형과 상일괄형 스페이스의 사진을 보여준다.

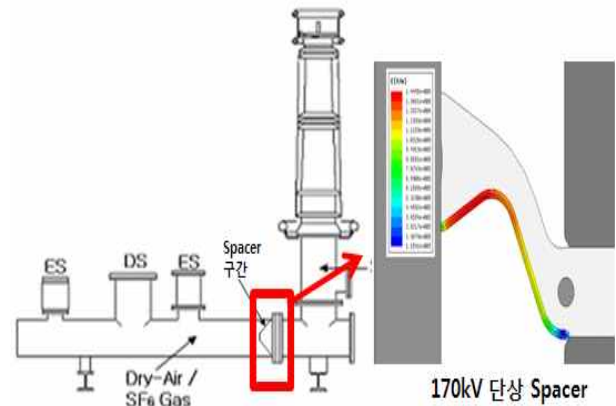


그림 1. 170[kV] 단상 GIB 스페이스 전계해석  
Fig. 1. 170[kV] 1 phase GIB & electric field of Spacer

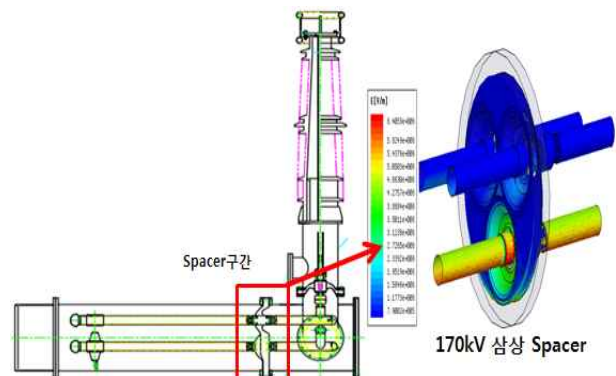


그림 2. 170[kV] 삼상 일괄형 GIB 스페이스 전계해석  
Fig. 2. 170[kV] 3 phase GIB & electric field of Spacer



그림 3. 170[kV] 단상과 삼상 일괄형 스페이스  
Fig. 3. 170[kV] 1 phase & 3 phase Spacer

표 1. SF<sub>6</sub> 가스와 건조공기 절연시 스페이서 전계강도  
Table 1. Electric field intensity of Spacer with SF<sub>6</sub> and Dry air

조건 절대압 [Atm]	최고전계강도 [kV/mm]			절연과피전압 [kV]			
	건조공기		SF <sub>6</sub> 가스	건조공기		SF <sub>6</sub> 가스	
	상분리형	상일괄형	기준값	상분리형	상일괄형	상분리형	상일괄형
1	1.45	1.71	3.94	98.6	90.6	267.9	208.8
3	3.52	4.44	8.27	239.4	235.3	562.3	438.3
5	5.04	6.41	11.18	342.7	339.7	760.2	592.5

표 1의 전계해석 결과 건조공기 절연시 170[kV] 상분리형 GIB 스페이서의 최고전계강도는 SF<sub>6</sub> 가스절연과 비교하여 압력에 따라 평균 41[%]의 값을 나타냈으며, 상일괄형 GIB 스페이서의 최고전계강도는 SF<sub>6</sub> 가스절연과 비교하여 압력에 따라 평균 51[%]의 값을 보였다. 절연과피전압도 최고전계강도와 같은 결과를 보였다. 따라서 건조공기로 절연한 경우가 SF<sub>6</sub> 가스절연과 비교하여 낮은 전계강도 분포와 절연과피전압 특성을 보임을 알 수 있었다. 또한 충전된 건조공기 압력에 따라 170[kV] GIB 상일괄형 스페이서가 상분리형 스페이서보다 높은 전계강도와 낮은 절연과피전압을 보였다.

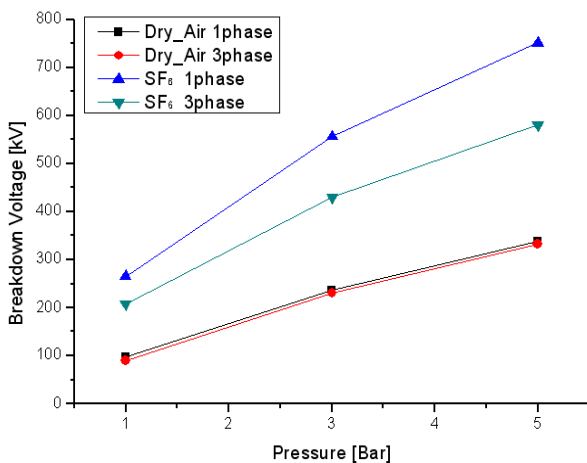


그림 4. SF<sub>6</sub> 가스절연과 건조공기 절연시 전계강도  
Fig. 4. Electric field intensity of SF<sub>6</sub> and Dry air

건조공기 절연의 최고전계강도는 그림 4와 같이 압력이 증가함에 따라 상분리형과 상일괄형 GIB 스페이서 모두 증가하는 경향을 보이며, 이는 SF<sub>6</sub> 가스절연과 유사한 특성을 보인다. 즉 건조공기 절연의 전계강도가 기존의 SF<sub>6</sub> 가스절연과 비교하여 일정한 패턴을 갖고 있음을 확인하였다.

따라서 전계해석 결과 170[kV] GIB에 대한 상용주파내전압 시험시 SF<sub>6</sub> 가스를 대체하여 건조공기의 사용 가능성을 알 수 있었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 실험장치

전계해석결과를 바탕으로 실험은 한전 현장에서 설치 운영하는 효성중공업체의 170[kV] 상분리형 GIB와 상일괄형 GIB를 대상으로 건조공기와 SF<sub>6</sub> 가스를 절연가스로 충전하여 실험하였다. 실험장치의 구성은 그림 5와 같으며 GIB에 전압을 가하는 내전압 시험기의 출력전압은 최대 800[kV]이며 GIB에 충전하는 건조공기의 성분은 표 2에 따른다.



그림 5. 상용주파 내전압 시험설비  
Fig. 5. Test Set-up for AC withstanding voltage

표 2. 실험에 사용한 건조공기 가스성분  
Table 2. Component of Dry air

구분	성분	구성
1	O <sub>2</sub>	19.5[%] 이하
2	N <sub>2</sub>	80[%]
3	Dew Point	-65[°C] 이하
4	수분함유량	10[ppm] 이하

### 3.2 AC 상용주파 절연파괴 특성

AC 상용주파 절연파괴 실험대상인 170[kV] 상일괄형과 상분리형 GIB는 현장에서 조립후 진공작업을 실시하고 GIB 내부의 진공도를 확인하여 0.03 [Torr] 이하를 유지하였다. 건조공기와 SF<sub>6</sub> 가스를 1에서 5[Bar]의 조건으로 충전한 후 내부 가스의 수분을 측정하여 10[ppm] 이하를 유지하였다. AC 내전압 시험기를 통하여 60[Hz]의 인가전압을 1[kV] 씩 증가하며 절연파괴전압을 측정하였다. 각 실험 후 GIB를 분해 점검하여 절연파괴 위치를 육안으로 확인하고 보수점검 및 재조립하여 가스를 충전하고 재실험 하였다. AC 내전압 시험기의 인가전압 상승은 예상파괴전압의 70[%] 까지는 직선상승법을 적용하고, 이후는 1[kV/s]의 계단상승법을 적용하여

표 3. 건조공기에 대한 AC 상용주파 절연파괴 실험결과

Table 3. AC withstanding test results of dry air insulation

조건 압력	실험에 의한 절연파괴전압[kV(주)]		전계해석에 의한 절연파괴전압[kV]	
	상분리형	상일괄형	상분리형	상일괄형
1	93.2	87.4	98.6	90.6
3	239.7	233.9	239.4	235.3
5	337.2	281.5	342.7	339.7

주) 99.7[%] 신뢰구간 최소값절연파괴 실험의 최소값

실험하였다. 건조공기의 압력은 1, 3, 5[Bar]을 적용하였으며 비교 실험인 SF<sub>6</sub> 가스절연의 경우 순도 95[%] 이상의 가스를 1[Bar]로 충전하여 실험하였고 절연파괴특성 실험에서 전압인가 횟수는 매 조건에서 30회 이상으로 하였다. 건조공기 사용시 AC 상용주파 절연파괴 실험결과는 표 3과 같이 나타내었다.

실험을 통하여 절연파괴 실험식을 구하는 방법은 다양한 방법이 보고되고 있으나, 본 연구에서는 실험으로 얻어진 데이터의 정규분포를 확인하고 신뢰도 99.7[%]구간의 최소값을 사용하여 최소 절연파괴전압을 사용하여 Allometry방법으로 실험식을 도출하였다. 도출된 170[kV] 상분리형 GIB와 상일괄형 GIB의 AC 상용주파 절연파괴 실험식은 다음의 식 1, 2와 같다.

$$V_{bd} = 99.667 P^{0.765} \quad 170[\text{kV}] \text{ 상분리형} \quad (\text{식 1.})$$

$$V_{bd} = 102.793 P^{0.651} \quad 170[\text{kV}] \text{ 상일괄형} \quad (\text{식 2.})$$

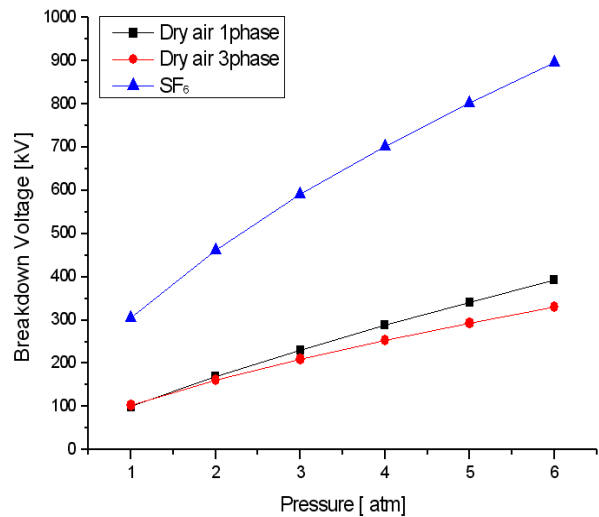


그림 6. SF<sub>6</sub> 가스와 건조공기 절연시 절연파괴시험 결과  
Fig. 6. Experimental Breakdown voltage results, SF<sub>6</sub> and Dry air insulation

건조공기 절연인 경우의 상기 AC 상용주파 절연파괴 실험식과 SF<sub>6</sub> 가스 사용시 전계해석에 의해 각각 계산된 절연파괴전압을 압력에 따라 그림

6와 같이 비교하여 등가성을 확인하였으며, 표 3에서 실제 실험에 의한 절연파괴전압과 전계해석에 의한 절연파괴전압을 비교하여 실험 데이터의 정합성을 검증하였다. 이상의 실험결과 170[kV] GIB에 대한 상용주파내전압 시험시 SF<sub>6</sub> 가스를 대체하여 건조공기의 사용이 가능한 것으로 판단된다.

건조공기를 사용하여 170[kV] GIB의 상용주파내전압시험시 적용하기 위한 기준식을 도출하기 위해서는 상기 도출된 AC 상용주파 절연파괴 실험식 중 절연파괴전압이 낮은 170[kV] 상일괄형 GIB에 대한 실험식을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 따라서 170[kV] 상일괄형 GIB의 상용주파 절연파괴 실험식에 실험데이터의 확률편차  $\sigma(0.9983)$ 와 효성중공업에서 상용주파내전압 계산시 적용하는 오차계수 K1(0.9)과 오손계수 K2(0.95)를 적용하여 상용주파 내전압 기준식을 다음과 같이 도출하였다.

$$V_{bd} = 99.667 P^{0.765} \cdot \sigma \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (\text{식 3})$$

### 3.3 결함에 의한 상용주파내전압 기준식 검증

도출된 170[kV] GIB의 상용주파 내전압 기준식을 검증하기 위해 인위적으로 그림 7과 같이 길이 1[cm], 직경 2[mm]인 원통형 알루미늄 금속으로 이물질 제작 후 결함원으로 사용하여 그림 8과 같이 170[kV] 상분리형 GIB의 경우 3개소에 원형으로 표시된 위치에 고정 후 절연파괴 실험을 시행하고, 그림 9와 같이 170[kV] 상일괄형 GIB 내에 8개소에 원형으로 표시된 위치에 이물질을 고정 후 절연파괴 실험을 시행하였다. 이물질의 부착위치는 전계해석결과 최고의 전계분포를 갖는 스페이서와 포트 및 말단부에 부착하였다. 실험시 온도는 GIB 내부의 건조공기 압력은 3[Bar]의 조건으로 유지한 후 수분은 10[ppm] 이하를 유지하였으며 온도는 33[°C], 습도는 44[%]의 조건이다. 알루미늄으로 제작된 금속 이물은 그림 10과 같이 고정부에 내부 도체

방향으로 Tape를 이용하여 수직으로 고정하였다. 실험대상인 170[kV] 상일괄형과 상분리형 GIB는 AC 내전압 시험기를 통하여 60[Hz]의 인가전압을 50[%]까지는 직선상승법을 적용하고, 이후는 1[kV/s]의 계단상승법을 적용하여 절연파괴 시점까지 증가하며 실험하였다.



그림 7. 시험에 사용된 금속 결함(원통형 알루미늄 재질)  
Fig. 7. Metal defects for experiment  
(cylinder type, AL)

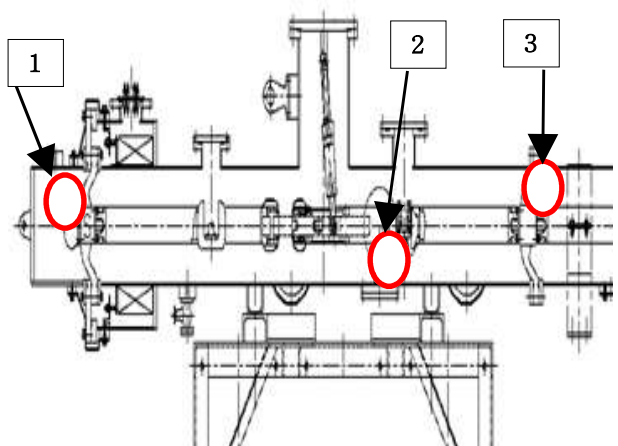


그림 8. 단상 170[kV] GIB의 결함 위치  
Fig. 8. Location of defects in 1 Phase 170[kV] GIB

표 4에 금속 이물질에 의한 AC 상용주파 절연파괴 실험결과를 나타내었으며 상용주파 내전압 기준식에 의해 산출한 전압(179[kV])보다 낮은 전압에서 절연파괴가 발생함을 확인함으로써 상용주파 내전압 기준식의 적용 가능성을 검증하였다.

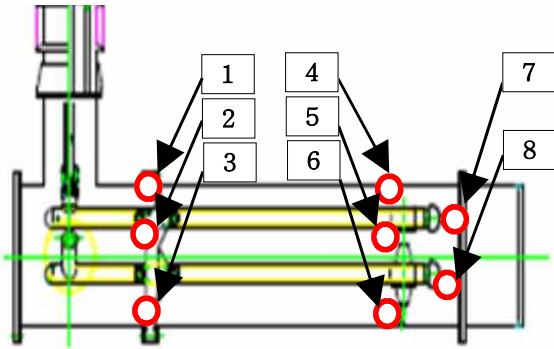


그림 9. 삼상 일괄형 170[kV] GIB의 결함 위치  
Fig. 9. Location of defects in 3 Phase 170[kV] GIB



그림 10. GIB 내부에 설치된 결함 사진  
Fig. 10. Pictures of installed defect inside GIB

표 4. 금속이물에 의한 AC 상용주파 절연파괴 실험결과

Table 4. Results of AC withstanding voltage test with meta defects insulated by Dry air

구 분	상용주파 절연파괴전압 [kV]	상용주파내전압 기준식에 의한 시험전압[kV]
상분리형	132	179
	144	
상일괄형	122	
	134	
	127	
	119	
	120	

#### 4. 결 론

본 논문에서는 실제 한전에서 사용하는 170[kV] GIB에서 기존 SF<sub>6</sub> 가스 대신 건조공기를 사용하여 상용주파전압에 의한 절연파괴 특성을 연구하였다. 상용주파전압을 인가하여 건조공기와 SF<sub>6</sub> 가스의 절연파괴전압을 비교하여 등가성을 확인하고 건조공기에 대해서 상용주파 절연파괴 실험에 의한 전압과 전개해석에 의한 절연파괴전압을 비교하여 실험 데이터의 정합성을 검증하여 건조공기에 대한 상용주파 절연파괴 실험식을 산출하였다. 이 실험식에 확률편차, 오차계수 및 오손계수를 적용하여 170[kV] GIB에 대해 상용주파내전압 시험시 기준식을 도출하였으며, 이물질에 의한 절연파괴 실험을 통해 상용주파 내전압 기준식에 대해 검증하였다. 따라서 본 연구를 통해 도출한 170[kV] GIB에 대한 상용주파내전압 기준식을 이용하여 SF<sub>6</sub> 가스를 대체하여 건조공기를 사용한 상용주파내전압 시험 가능성을 제시함으로써 한전 및 중전기기 제작사의 공장 검수시험시 SF<sub>6</sub> 가스가 대폭 절감될 것으로 기대되어진다.

#### References

- [1] C.Beyer et al. Influence Reactive SFX Gases on Electrode Surfaces after Electrical Discharge under SF<sub>6</sub> Atmosphere, IEEE Trans, pp. 234~240, 2000.
- [2] N.H.Melik, A.H.Qureshi, A review of electrical breakdown in mixtures of SF<sub>6</sub> and other gases, IEE Trans, 1979.
- [3] 최은혁, 구본호, 김이국, 이광식, 친환경절연재의 절연성 평가, KIEE, vol.23 No 5, 2009.
- [4] Landry, M. et al., Dielectric withstand and breaking capacity of SF<sub>6</sub> circuit breakers at low temperatures, Power Delivery, IEEE Transactions on, pp. 1029~1035, July 1988.
- [5] T.Ueda et al, Discrimination of Partial Discharge Electromagnetic Signal in SF<sub>6</sub> Gas from External Noise Using Phase Gate Control Method, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 117~120, 1996.
- [6] 김정달, 송원표, 김동의 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 혼합가스에서 뇌충격전압에 의한 50% Flash over 전압 및 V-t 특성, 조명 전기설비 학회, 1993.
- [7] Kwang-Sik Lee, The Characteristics of Insulation with Temperature Variations of SF<sub>6</sub>” KIEE Vol 52C No 8, 2003.
- [8] Naoki, Streamer and Leader Discharge Propagation Characteristics Leading to Breakdown in Electron in

Electronegative Gases, IEEE, 2006.

- [9] Kwang-Sik Lee, Eun-Hyuck Choi, "Breakdown characteristics of SF<sub>6</sub> at various temperature under AC High-Voltage IEEE - ICPADM 2006, 2006.
- [10] 이창훈, 김영수, 최은혁, 김정배, 최영길, 이광식, 평등/불평등 전계하에서의 건조공기 절연파괴특성, 한국조명설비학회 추계학술대회 논문집, 2007.

◇ 저자소개 ◇



**한기선**(韓基善)

1966년 6월 20일생. 1991년 한양대학교 전기학과 졸업. 2007년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국전력공사 입사. 2005년~현재 한전 전력연구원 송배전연구소 선임연구원.

Tel : (042)865-5882

Fax : (042)865-5804

Email :hankison@kepco.co.kr



**윤진열**(尹珍烈)

1956년 3월 12일생. 1982년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1977년 한국전력공사 입사. 2003년~현재 한전 전력연구원 책임연구원.

Tel : (042)865-5880

Fax : (042)865-5804

Email : jyyoon@kepri.re.kr



**주형준**(朱炯俊)

1972년 2월 20일생. 1996년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 수료(박사). 2006년 한국전력공사 입사. 2006년~현재 한전 전력연구원 송배전연구소 선임보연구원.

Tel : (042)865-5884

Fax : (042)865-5804

Email :juhjun@kepco.co.kr