

## 임펄스전압에 대한 N<sub>2</sub>가스의 절연파괴특성

(Electrical Breakdown Characteristics of N<sub>2</sub> Gas under Impulse Voltages)

신희경\* · 김동규 · 이복희\*\*

(Hee-Kyoung Shin · Dong-Kyu Kim · Bok-Hee Lee)

### Abstract

This paper aims to examine the possibility of using an environmentally friendly N<sub>2</sub> as an alternative gas to SF<sub>6</sub>. For this purpose, we have investigated breakdown characteristics of N<sub>2</sub> under impulse voltages in a quasi-uniform electric field gap. The 1.2/50[ $\mu$ s] lightning impulse voltage, switching impulse voltages and oscillatory impulse voltages were applied at the test gap. The electric field utilization factor ranges from 0.5 to 0.8. The experimental data of SF<sub>6</sub> and N<sub>2</sub> acquired in the same experimental condition are presented in parallel for comparison. As a result, the breakdown voltages in SF<sub>6</sub> and N<sub>2</sub> are linearly increased with the gas pressure, also the breakdown voltages in N<sub>2</sub> are increased with increasing the gap distance and electric field utilization factor. The positive breakdown voltages are higher than the negative breakdown voltages. The negative basic lightning impulse withstand level of 150[kV] in N<sub>2</sub> of about 0.5[MPa] is nearly equal to that in SF<sub>6</sub> of 0.15[MPa]. It is seen from the results obtained in this work that N<sub>2</sub> can be used as an eco-friendly alternative gas to SF<sub>6</sub> in distribution power equipment.

Key Words : Impulse Voltage, Breakdown Voltage, Alternative Gas, Electric Field Utilization Factor, Basic Lightning Impulse Withstand Level

### 1. 서 론

현재 배전설비를 구성하는 차단기나 단로기 같은 개폐차단장치의 절연매질로는 소호능력과 절연성능이 우수한 SF<sub>6</sub>가스를 주로 사용하고 있다. 하지만 SF<sub>6</sub>가

스는 지구온난화지수가 CO<sub>2</sub>가스의 약 23,900배 정도로 환경 문제에 대한 관심이 높아지면서 온실가스에 대한 규제로서 교토의정서가 정식 발효됨에 따라 대다수의 가스절연개폐장치(gas insulated switchgear: GIS)의 절연물로 쓰이고 있는 SF<sub>6</sub>가스는 사용하지 못할 처지가 되었다[1]. 가스절연개폐장치는 운전 중에 낙뢰 및 차단기, 단로기 등의 조작에 의하여 발생하는 여러 가지 과도과전압으로부터 위협을 받게 된다. 따라서 뇌서지나 개폐서지에 관련된 전력기기의 절연특성의 분석은 대단히 중요하며, 고품질의 배전급 친환

\* 주저자 : 인하대학교 대학원 박사과정  
\* 교신저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2010년 12월 29일  
1차심사 : 2011년 1월 4일  
심사완료 : 2011년 1월 25일

경 전력기기의 개발을 위한 절연설계에 필히 사용되는 중요한 자료이다[2].

본 연구에서는 배전용 가스절연개폐장치를 구성하는 부품의 형상설계에 관련된 준평등전계를 모의하기 위하여 구-평판전극계로 구성하고 친환경가스인 N<sub>2</sub> 가스를 SF<sub>6</sub>가스의 대체절연가스로 사용할 수 있는지의 기본적 절연특성을 분석하기 위하여 가스압력과 전극간 거리에 대한 절연과피전압을 측정하고 분석하였다. 이 때 전극에 인가되는 실험전압으로는 1.2/50 [ $\mu$ s] 표준 뇌임펄스전압, 180/2,500 [ $\mu$ s] 개폐임펄스전압, 진동성 임펄스전압(500[ns]/1[MHz])을 사용하였다. 또한 전계이용률에 따른 N<sub>2</sub>가스의 규격화된 임펄스전압에 대한 절연과피전계특성으로 나타내어 전력기기의 절연설계에 폭 넓게 활용할 수 있는 데이터로 제시하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험계의 구성

가스절연개폐장치의 구성부품에 의해 형성되는 준평등전계에서 N<sub>2</sub>가스의 임펄스전압에 대한 절연과피특성을 SF<sub>6</sub>가스의 특성과 비교·분석하기 위하여 배전기기 규모의 실험계를 구성하였다.

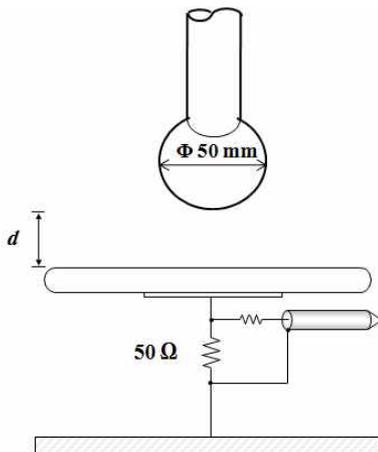


그림 1. 구-평판 전극계의 구성도  
Fig. 1. A configuration of the sphere to plane electrode system

본 연구에 사용된 실험 용기는 내경 396[mm]인 스테인레스강을 사용하여 원통형으로 제작하였으며, 전극에 전압을 인가하기 위하여 66[kV](BIL 350[kV])용 콘덴서형 부싱이 설치되어 있고, 실험전압은 병렬충전식 4단 임펄스발생기를 이용하여 실험장치에 인가하였다[3]. 절연과피전압은 분압비가 10,000 : 1인 분압기로 검출하여 500[MHz]대역을 갖는 오실로스코프로 관측하였다.

본 연구에 사용된 전극의 재질은 스테인리스 스틸이며, 준평등전계를 모의하기 위하여 그림 1과 같은 구-평판전극을 설치하였다. 구 전극의 지름은 50[mm], 평판 전극의 지름은 90[mm]이다.

### 2.2 실험방법

유회진 진공펌프를 이용하여 실험 용기를 수 [mTorr]까지 배기시킨 다음 N<sub>2</sub>가스를 주입하였다. 표준 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압, 진동성 임펄스전압 3가지 임펄스전압을 동일한 조건에서 전극간 간격에 따른 N<sub>2</sub>가스의 50[%] 절연과피전압(V<sub>50</sub>)을 측정하고 분석하였다. 동일한 전압을 10회 이상 인가하여 측정된 절연과피전압과 확률을 이용하는 보간법으로 V<sub>50</sub>을 산출하였다[4]. 가스압력을 0.5[MPa]으로 고정시킨 상태에서 동일한 전극의 크기에 대하여 전계이용률 0.5~0.8의 범위에서 실험하기 위하여 전극간의 간격을 7.5, 14, 20, 30[mm]인 조건에서 실험하였다 [3].

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 SF<sub>6</sub>와 N<sub>2</sub>의 절연특성의 비교

전극간 거리 14[mm], 전계이용률 0.71인 조건에서 뇌임펄스전압에 대한 SF<sub>6</sub>가스와 N<sub>2</sub>가스의 압력에 따른 절연과피전압을 그림 2에 나타내었다. 25.8[kV]급 가스절연개폐장치(GIS)에서는 절연매질로 SF<sub>6</sub>가스를 사용하는 경우 가스압력의 범위가 절대압력 0.1~0.2[MPa]이므로 이 범위에 대한 결과만을 측정하였다.

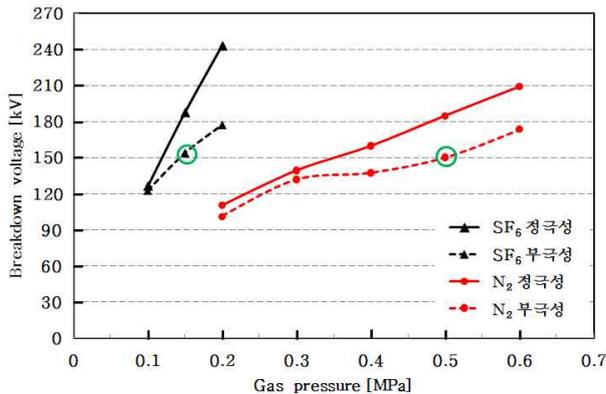


그림 2. 가스압력에 따른 뇌임펄스전압에 대한 SF<sub>6</sub>와 N<sub>2</sub>가스의 절연파괴전압  
 Fig. 2. Lightning impulse breakdown voltages in SF<sub>6</sub> and N<sub>2</sub> gases as a function of gas pressure

SF<sub>6</sub>가스와 N<sub>2</sub>가스 모두 절연파괴전압은 가스압력에 대하여 선형적으로 증가하며, 준평등전계이므로 정극성 절연파괴전압이 부극성의 경우보다 높게 나타났다. 한국산업표준 KS C 4502에서 배전용 가스절연개폐장치에 대한 기준뇌임펄스내전압은 150[kV]이상으로 규정하고 있다[5]. 동일한 실험조건에서 배전용 기기의 부극성 기준뇌임펄스내전압 150[kV]에 상응하는 절연파괴전압은 N<sub>2</sub>가스의 경우 0.5[MPa]로 SF<sub>6</sub>가스 압력 0.15[MPa]의 약 3.3배이다. 즉 최소 전계이용률이 0.712인 배전용 기기의 경우이라면 산술적으로는 SF<sub>6</sub>가스 대신에 구조변경없이 가스압력을 약 3.3배 높게 하여 N<sub>2</sub>가스로 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

### 3.2 절연파괴전압

배전용 가스절연개폐장치의 내부는 주로 준평등전계가 되도록 설계하며, 내부구조에 따라 충전도체와 도체사이, 도체와 외함 사이의 간격은 위치에 따라 다르지만 불평등전계가 형성되지 않도록 설계한다. 준평등전계에서 N<sub>2</sub>가스의 절연파괴전압은 인가전압의 파형 및 극성, 절연거리 등 여러 가지 요인의 영향을 받게 된다[6]. 따라서 최적의 친환경적인 가스절연개폐장치의 설계를 위하여 준평등전계에서 N<sub>2</sub>가스를 SF<sub>6</sub>가스의 대응으로 사용하기 위해서는 임펄스전압

의 극성과 파형, 전극조건과 같은 요인의 영향에 대한 절연파괴특성은 중요한 평가 요소이다.

가스압력이 0.5[MPa]인 N<sub>2</sub>가스에서 정·부극성의 표준 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압, 진동성 임펄스전압을 인가하고, 준평등전계인 구-평판전극의 전극간 거리를 7.5~30[mm]범위에서 측정한 50[%] 절연파괴전압 V<sub>50</sub>을 그림 3에 나타내었다.

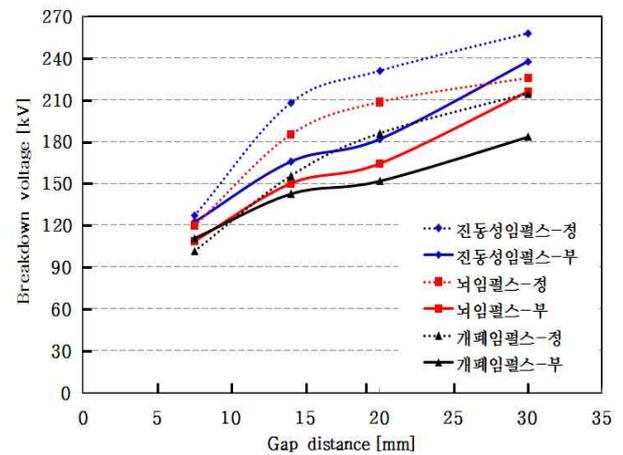


그림 3. N<sub>2</sub>가스에서 전극간 거리에 따른 50[%] 절연파괴전압 V<sub>50</sub>  
 Fig. 3. 50[%] breakdown voltages V<sub>50</sub> in N<sub>2</sub> gas as a function of the gap distance

N<sub>2</sub>가스에서 전극간의 거리에 따른 50[%] 절연파괴전압은 3종류의 임펄스전압 모두에 대하여 전극간의 거리가 증가함에 따라 정·부극성 모두 상승하였으며. 전극간의 거리가 증가할수록 초기 전자방출이 어려운 정극성이 부극성보다 절연파괴전압이 높게 나타났으며[7], 전극간 거리에 대한 의존도가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 인가전압별로는 상승시간이 빠른 진동성 임펄스전압, 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압 순으로 50[%] 절연파괴전압 V<sub>50</sub>이 높게 나타났다.

이 같은 이유는 Kind 법칙에서 알 수 있듯이 절연파괴를 일으키기에는 소정의 에너지가 필요하므로 상승시간이 빠른 임펄스전압일수록 더 높은 50[%] 절연파괴전압 V<sub>50</sub>을 갖기 때문이라 판단된다[4]. 이로서 N<sub>2</sub>가스의 50[%] 절연파괴전압 V<sub>50</sub>을 SF<sub>6</sub>가스의 50[%] 절연파괴전압 V<sub>50</sub>과 동일하게 하려면 동일한 전극간

거리에서 가스압력을 3.3배 증가하거나[3] 동일한 가스압력에서 전극간 거리를 더 크게 하는 2가지 방법 중에서 하나를 적용할 수 있다.

배전계통에서 발생하는 개폐임펄스전압은 전력기기의 절연에 크게 위협을 주지 않으므로 배전용 전력기기의 절연설계에서는 상용주파 전압과 뇌임펄스전압에 대한 절연내력을 주안점으로 고려하고 있다. 실험 결과에서 개폐임펄스전압에 대한 절연파괴전압이 가장 낮게 나타났으므로 N<sub>2</sub>가스를 절연재료로 채택하는 경우는 이에 대한 심층적인 검토가 필요한 것으로 생각된다.

### 3.3 전계이용률에 따른 절연파괴전계강도

배전용 전력기기가 정상상태에서 운전될 때 기기의 내부구조와 부품의 형상에 따라 부위에 따라 다른 전계의 세기가 발생할 수 있으므로 절연설계에서는 가장 낮은 전계이용률을 대상으로 한다. 배전용 가스 절연개폐장치는 기체를 절연매질로 하며, 기체방전 현상에 가장 결정적인 역할을 하는 것은 절연기체에 인가된 전계이다. 통상 가장 높은 전계(최대 전계  $E_{max}$ )의 부분에서 절연파괴를 일으키므로 전계분포를 고려하여야 한다. 전력기기의 부품의 형상 즉, 전극배치에 따른 전계분포를 대표적으로 나타내는 파라미터로 전계이용률을 적용한다. 따라서 특정의 전극구조에 대한 절연특성보다는 규격화된 절연특성이 폭 넓게 적용될 수 있으므로 실험결과의 활용성을 높이기 위하여 본 연구에서는 전극간 거리를 달리하여 전계이용률에 따른 N<sub>2</sub>가스의 절연파괴전계 특성을 평가하였다.

전계이용률  $\eta$ 은 전극사이에 형성되는 최대 전계의 세기에 대한 평균 전계의 세기의 비율로서 다음과 같이 정의된다[8].

$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} = \frac{V_d/d}{E_{max}} \quad (1)$$

$$E_{mean} = \frac{V_d}{d} \quad (2)$$

여기서  $V_d$ 는 측정된 절연파괴전압이며,  $d$ 는 전극간 거리이다.

또한 구-평판전극계의 최대 전계의 세기는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$E_{max} = 0.9 \frac{V}{d} \frac{r+d}{r} \quad (3)$$

여기서  $r$ 은 구전극의 반경이다. 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 전계이용률은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{r}{0.9(r+d)} \quad (4)$$

구-평판 전극계에서의 전계이용률  $\eta$ 은 식 (4)에서와 같이 구전극의 반경과 구전극에서 평판전극까지의 거리에 대한 함수로 표현된다. 즉 구-평판 전극계에서의 전계이용률  $\eta$ 은 단지 전극의 형상과 배치에 의하여 정해진다. 본 연구에 적용한 구-평판 전극계에서 구전극의 반경이 25[mm]일 경우, 전극간 거리에 따른 전계이용률을 표 1에 나타내었다.

표 1. 본 연구에 적용한 전극계의 전극간 거리에 따른 전계 이용률

Table 1. Electric field utilization factor of the electrode system as a function of the gap distance used in this work

전극간 거리[mm]	전계이용률[ $\eta$ ]
7.5	0.855
14	0.712
20	0.617
30	0.505

기체 중의 방전에서 초기전자를 특정한 수단으로 공급하여 주지 않으면 초기전자는 정극성의 경우 기체에 포함된 불순물에 의하여 공급되며, 부극성의 경우는 전극으로부터 전자방출에 의하여 공급된다[7]. 평등전계와 준평등전계에서는 전극에 임펄스전압을 인가할 경우 아주 짧은 시간에 절연파괴가 일어나기 때문에 절연파괴의 진전에는 공간전하효과보다는 초기전자의 공급메커니즘의 영향이 지배적이며, 초기전자 공급전압이 높은 정극성이 부극성보다 절연파괴전압

이 높다[9,10]. 특히 가스절연개폐장치의 절연설계에 있어서 기기의 내전압을 고려하는 경우에는 반드시 극성에 관계없이 최소값을 적용한다. 따라서 본 연구에서는 준평등전계에서 절연파괴전압이 낮은 부극성 임펄스전압에 대한 N<sub>2</sub>가스의 절연내력에 대하여 중점적으로 검토하였다.

준평등전계인 구-평판전극일 경우, 코로나를 거치지 않는 절연파괴는 대략  $d < 2r$  ( $d$ 는 갭길이,  $r$ 은 구전극의 반경)의 범위이다. 식 (4)에 의하여 산출하게 되면 구전극의 반경이 25[mm]일 때 전계이용률이  $\eta > 0.4$ 이면 구-평판전극계에서 준평등전계라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전계이용률이 0.5~0.8인 범위에서 절연내력을 산출하였다.

평균 절연파괴전계의 세기는 식 (2)를 이용하여 산출하였으며, 최대 절연파괴전계의 세기는 식 (5)을 이용하여 산출하였다[8].

$$E_{max} = \frac{E_{mean}}{\eta} \text{ [kV/cm]} \quad (5)$$

준평등전계에서 전계이용률에 따른 N<sub>2</sub>가스의 절연내력을 분석하기 위하여 3종류의 부극성 임펄스전압에 대한 전계이용률에 따른 최대 절연파괴전계의 세기와 평균 절연파괴전계의 세기를 그림 4에 나타내었다. VFTO는 진동성 임펄스전압, LI는 뇌임펄스전압, SI는 개폐임펄스전압을 의미한다.

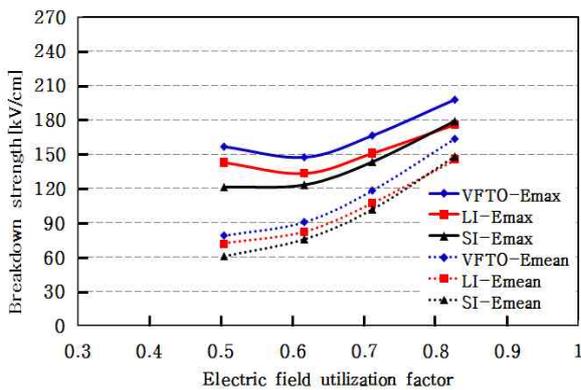


그림 4. 전계이용률에 따른 절연파괴전계의 세기  
Fig. 4. Breakdown electric field strength as a function of the electric field utilization factor

N<sub>2</sub>가스의 전계이용률에 따른 최대 절연파괴전계의 세기는 전계이용률  $\eta$ 가 0.5~0.6 범위에서 거의 일정한 값에 수렴하였으며, 전계이용률  $\eta > 0.6$ 인 범위에서는 전계이용률이 증가함에 따라 최대 절연파괴전계의 세기가 급격하게 증가하였다. 그리고 절연파괴전압과 마찬가지로 최대 절연파괴전계의 세기는 상승시간이 빠른 진동성 임펄스전압에서 가장 높게 나타났고, 상승시간이 가장 느린 개폐임펄스전압에서 가장 낮게 나타났다. 하지만 평균 절연파괴전계의 세기는 전계이용률이 증가함에 따라 전체적으로 증가하였다. 평균 절연파괴전계의 세기도 전계이용률  $\eta > 0.6$ 인 범위에서 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

이와 같이 전극간의 간격이 증가하면 전계이용률은 낮아지고 전계는 불평등화 됨으로써 국부적으로 구전극 주변에서 전계가 강하게 모여 절연파괴전계강도가 낮아진다고 판단된다[11].

#### 4. 결 론

본 논문은 N<sub>2</sub>가스를 SF<sub>6</sub>의 대체절연가스로의 사용가능성을 파악하기 위하여 구-평판 전극계에서 임펄스전압에 대한 절연특성에 대하여 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전계이용률 0.712에서 동일한 가스압력에서 SF<sub>6</sub> 가스는 N<sub>2</sub>가스에 비하여 약 3.3배 높은 절연내력을 가지고 있는 것으로 나타났다.
- (2) 전극간 거리가 증가함에 따라 인가전압의 종류와는 상관없이 정·부극성 모두 절연파괴전압이 상승하였으며, 절연파괴전압은 진동성 임펄스전압, 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압 순으로 높았다.
- (3) 전극간 거리가 증가할수록 초기 전자방출이 어려운 정극성이 부극성 보다 절연파괴전압이 높게 나타났으며, 절연파괴전압의 전극간 거리에 대한 의존도가 더 큰 것으로 나타났다.
- (4) 최대 절연파괴전계의 세기는 전계이용률 0.6이하에서 거의 일정하였으나 0.7이상에서는 선형적으로 증가하였으며, 평균 절연파괴전계의 세기는 전계이용률에 비례적으로 상승하는 것으로 나타났다.

로 나타났다.

- (5) 배전급 가스절연개폐장치에서 구조의 변경 없이 가스압력만을 높여 주면 친환경적이고 가격이 저렴한 N<sub>2</sub>가스로 SF<sub>6</sub>가스를 대체할 수 있을 것이라 판단된다.

### References

- [1] H. Saitoh, K. Morita, T. Kikkawa, N. Hayakawa and H. Okubo, "Impulse Partial Discharge and Breakdown Characteristics of Rod-Plane Gaps in Air and N<sub>2</sub> Gases", *JIEE*, Vol. 148, No. 3, pp. 36~43, 2004.
- [2] Hama H, Yoshimura M, Inami K, Hamano S, "Application Problems of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixtures to Gas Insulated Bus", *Gaseous Dielectrics VIII*, pp. 353~359, 1998.
- [3] 이복희, 김동규, 이 봉, "준평등전계에서 임펄스전압에 대한 N<sub>2</sub>가스의 절연과괴특성", *조명전기설비학회 논문지*, Vol 24, No 8, pp.126~132, 2010.
- [4] 이복희, *고전압대전류공학*, 정문각, pp.16~17, pp.265~268, 2010.
- [5] 한국산업표준 KS C 4502:1999, 단로기, p.6, 2006. 2.
- [6] M. S. Bhalla, J. D. Craggs, "Measurement of Ionization and Attachment Coefficients in Sulphur Hexafluoride in Uniform Fields", *Proc Phys. Soc*, Vol. 80, pp. 151~160, 1962.
- [7] 李京沃, "불평등전계에서 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 혼합가스의 방전특성", 인하대학교 박사논문, pp.13~15, p.38~48, 2001.2.
- [8] E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, Oxford; Boston : Butterworth-Heinemann, pp.201~361, 2000.
- [9] M. Abdel-Salam, A. A. Turkey and A. A. Hashem, "The Onset Voltage of Coronas on Bare and Coated Conductors", *J. Phys. D: Appl. Phys*, Vol. 31, No. 4, pp. 2550~2556, 1998.
- [10] N. Hayakawa, K. Hatta, S. Okabe, H. Okubo, "Streamer and Leader Discharge Propagation Characteristics Leading to Breakdown in Electronegative Gases", *IEEE Trans on DEI*, Vol. 13, No. 4, pp. 842~849, 2006.
- [11] H. K Kang, J. B. Nah, Y. D. Chung, M. C. Ahn, D. K. Bae, T. K. Ko, "Study on the Breakdown Voltage Characterization of Insulation Gases for Developing a High Voltage Superconducting Apparatus", *IEEE Trans on applied superconductivity*, Vol. 20, No. 3, pp. 1646~1649, 2010.

### ◆ 저자소개 ◆



#### 신희경(申熹璟)

1973년 12월 11일생. 1999년 동국대학교 안전공학과 졸업. 2004년 한양대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 (박사과정). 주식회사 엘피에스코리아 대표이사  
Tel : (02)2639-8872  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : realmac1@hanafos.com



#### 김동규(金東奎)

1983년 3월 14일생. 2009년 2월 호서대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업.  
Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : electric02@naver.com



#### 이복희(李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.

Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr