

# SF<sub>6</sub> 가스의 온도변화에 따른 절연특성

論 文

52C-8-7

## The Characteristics of Insulation with Temperature Variations of SF<sub>6</sub>

李 廣 植\* · 朴 光 緒\*\* · 朴 徑 台\*\*\* · 金 利 國§ · 朴 昌 基§§

(Kwang-Sik Lee · Kwang-Seo Park · Kyeong-Tae Park · Lee-Kook Kim · Chang-Gi Park)

**Abstract** - In this paper, insulations characteristics by temperature changes(+50~-50[°C]) of SF<sub>6</sub> gas in the experimental chamber were studied. From this result, at the low temperature, the breakdown voltage was increased with a drop of temperature and an increase of inner pressure in GIS. In addition the ability of insulation of liquid SF<sub>6</sub> was higher than that of the highly pressurized SF<sub>6</sub> gas. That is, with progress of low temperature, the main reason of breakdown was not liquefaction of SF<sub>6</sub> but rapid decrease of inner pressure. This study will come in greatly handy for the insulation design of GIS in a hard cold region

**Key Words** : GIS, liquid SF<sub>6</sub>, breakdown voltage, insulation, low temperature

### 1. 서 론

산업 발달로 송전전압이 격상하고 있는 추세이며, 도시기능의 고도화 등으로 좁은 지역에서 막대한 전력이 사용되고 있다. 그러나 전원 및 전력수송설비의 대도시 근교로의 입지는 제한되어 발·변전소용 부지의 효율적 사용 및 환경조화를 위해 설비의 축소화, 밀폐화가 불가피하므로 가스절연방식을 이용한 소형이면서 초고압·대용량 전력기기의 사용이 확대되고 있다. 이들 기기는 종래의 대기절연방식을 탈피하여 절연성능이 우수하고 불활성을 갖고 안전한 SF<sub>6</sub>가스를 절연매체로하여, 활선부를 밀폐하며 외기 및 환경에 영향을 받지 않도록 함으로서 높은 신뢰성과 콤팩트한 구조로 사용하고 있다. 그 대표적 전력기기인 가스절연개폐장치(GIS)는 40년 전부터 상업화가 시작된 이래 22kV급에서 765kV급까지 광범위하게 사용되고 있다.

그러나 GIS의 전기적 사고가 발생하면 현재 국내에서는 단순히 기기 모듈 전체를 교환하고 있는 실정이다. 따라서 초고압용의 설비에 주로 적용되는 GIS설비는 사고발생 시 파급효과도 크다. GIS설비는 밀폐형이므로 한번 설치되면 내부의 보수가 어렵고 비용도 많이 든다. 고전압상태에서 운전되므로 제작과정에서의 미세한 구조적 결함이나 운전 중 발생한 결함 및 이물질의 영향으로 인해 기기의 오동작이나 절연파괴로 확대될 개연성이 높다. GIS의 경우 금속이물질의 자

유운동에 의한 사고가 많이 발생하므로 자유운동 하는 금속이물질을 효과적으로 억제하거나 금속이물질을 수집하는 방법이 연구되어지고 있다. 또한, 제작시 최적 절연설계를 통한 부분방전의 발생가능성을 최대한 줄이는 연구가 진행되고 있다. 그러나 혹한지역과 열대지역 등과 같은 극한환경에서 GIS가 사용될 경우 절연매체인 SF<sub>6</sub>가스의 온도변화에 따른 절연특성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 현장에서는 GIS의 경우 SF<sub>6</sub>가스 압력 유지만으로 운전의 안전성을 주로 제어하고 있지만 가스 온도변화에 따라 가스 압력은 물론, 특히 GIS장치 내의 가스분자 밀도가 달라지므로 절연특성의 현저한 변화가 발생하리라 판단된다.

따라서 본 논문에서 실험용 챔버 내의 온도변화(+50~-50[°C])에 따른 SF<sub>6</sub>가스의 절연특성에 관해 연구하였다. 이 연구는 온도변화 특히 혹한지역에 대한 GIS 전력설비의 고 신뢰성과 안정성을 가진 SF<sub>6</sub>가스 절연 전력설비의 최적 절연설계에 활용 될 것으로 판단된다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

그림 1, 사진1은 본 연구에 사용하기 위해 설계 제작한 실험용 챔버의 개략도와 실험 장치도, 그리고 사진을 나타내었다. 사용된 전압원은 교류 고전압(일본, Pulse Electronic. Co. Ltd., 입력 : AC 200V 50/60Hz, 출력 : 60kV)을 사용하였다. 절연파괴전압의 측정은 High Voltage divider (Pulse Electronic Engineering, EP-300K, 10000:1)와 Digital storage type oscilloscope(Lecroy 9350AL)를 사용하여 측정하였다. 실험용 챔버 내부온도를 관측하기 위하여 온도센서(UNICON, -50[°C]~50[°C])를 챔버 내의 중심부에 전극부와 평행하게 전극 중심부와 약 8[cm] 떨어진 곳에 설치하였다. 실험용 챔버의 내부압력을 측정하기 위해 압력계(WISE, 0~15기압)를 설치하였다. 챔버의 내부를 진공펌프(SINKU KIKO Co.Ltd,

\* 正 會 員 : 嶺南大學 電子情報工學部 教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 嶺南大學 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 準 會 員 : 嶺南大學 電氣工學科 碩士課程

§ 正 會 員 : 慶一大學 電氣工學科 教授

§§ 正 會 員 : 韓國電力 送電科長

接受日字 : 2003年 4月 16日

最終完了 : 2003年 6月 12日

GUD-050A, pumping speed 60 l/min)로 5\*10<sup>-4</sup>[Torr]까지 진공을 만든 다음 SF<sub>6</sub>가스를 주입하였다.

모의 GIS 내부에 설치된 온도센서와 전극부를 관측할 수 있는 관측창(직경 110[mm], 두께 20[mm])을 설치하였다. 이 관측창의 재질은 투명 아크릴이며, 원통형으로 제작 설치하였다.

본 연구에 사용한 전극은 침대평판전극이며 하부전극인 평판전극은 직경 59[mm]의 로고스키타입이고 재질은 스테인레스 스틸로 제작된 것이다. 침전극은 직경 5.9[mm], 침단각도는 23°, 길이 100[mm]의 스테인레스 스틸로 제작된 것을 사용하였다.

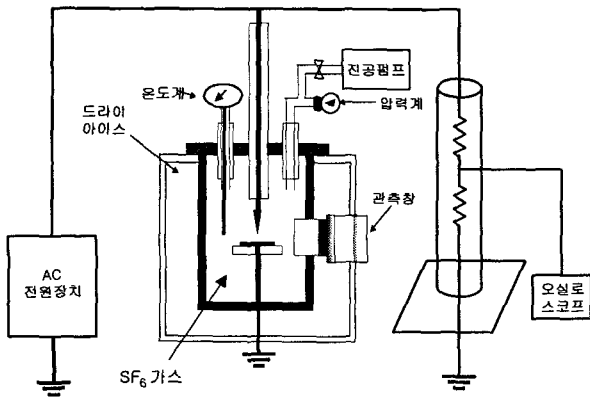
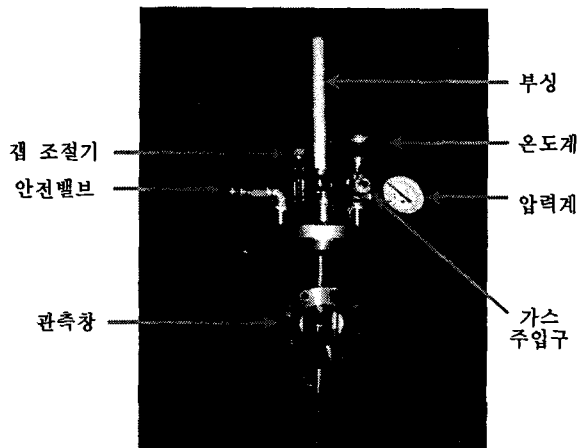


그림 1 설계 제작한 실험용 챔버 및 실험 장치도

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental chamber and experimental equipments



사 진 1 설계 제작한 실험용 챔버 사진

Photo 1 photograph of the experimental chamber designed and manufactured

실험용 챔버의 주요 사양은 압력 변화(2~6[atm])를 위해 안정상 10기압 정도의 가압이 가능하고 압력 유지를 위해 실험용 챔버 내의 기밀성 유지가 가능하도록 하였다. 또한 온도 변화(50~-50℃) 및 유지가 가능하고 높은 절연성을 가진

SF<sub>6</sub> 가스의 절연내력 시험을 위해 150[kV] 정도의 고압인가가 가능하도록 설계하였다.

냉각 설비는 열 절연을 위하여 고강도 스티로폴을 이용하여 그림 1과 같이 직육면체 모양의 박스를 만들었고 내부에 드라이 아이스(-78.5[℃])를 채우는 양에 의해 온도를 낮추었다.

실험 방법은 먼저 50~-50℃의 온도 변화에 따른 각각 내부압력(2~6[atm]) 유지시 SF<sub>6</sub> 가스의 절연파괴 전압을 측정하였다. 이때 온도변화에 따라 가스압력이 변할 경우 챔버 내의 가스량을 주입 또는 가감하여 각각의 내부압력을 일정하게 유지하고 온도를 변화시켰다.

또한 실험용 챔버 내의 가스량의 변화 없이 일정 가스량 유지시 온도-압력 변화에 대한 SF<sub>6</sub> 가스의 절연파괴 전압을 측정하였다. 이때 온도변화에 따라 가스량을 주입 또는 가감하지 않고 온도 변화에 따른 절연파괴 전압과 그때의 압력을 측정하였다. 절연파괴 전압은 10회를 측정하여 평균값으로 그래프에 표시하였다.

전압의 측정은 고전압 분압기와 오실로스코프를 이용하여 그림 1과 같이 구성하여 전압을 서서히 상승 인가시 1번의 아크 방전이 발생할 때 전압값을 측정하였다. 부정현상을 없애기 위해 처음 10번 정도 방전시킨 후 절연파괴 전압값을 측정하였다. 고전압의 인가는 약 절연파괴 전압의 50% 정도는 초당 1[kV] 속도로 인가하고 그 이후부터는 초당 0.5[kV] 속도로 절연파괴 될 때까지 전압을 인가하였다.

온도 변화를 위해 그림 1에서 보는 바와 같이 모의 GIS 챔버 벽면에 드라이 아이스의 양을 조절하여 최대한 느린 속도로 온도를 변화 시켰으며 온도 변화와 유지의 어려움으로 인해 한번 실험의 측정 소요 시간은 약 8~10시간이었다. 상온에서 50℃까지 온도의 상승은 모의 GIS 주변에 열기를 이용하여 온도를 최대한 서서히 상승시켜 실험을 행하였다. 저온화 실험시 실험용 챔버의 상단 부분의 열적 차폐를 막기 위해 드라이 아이스를 가루로 만들어 얇은 드라이 아이스 층을 만들었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 온도변화에 따른 일정 내부압력 유지 시 절연파괴 특성

그림 2는 모의 GIS 장치 내에 침대평판전극을 설치하여 SF<sub>6</sub> 가스의 온도 변화에 따른 일정 내부압력 유지시 절연파괴 특성을 나타내었다.

본 연구에서는 모의 GIS장치내의 침대평판전극의 간극을 3[mm], 기압은 2~5기압(kgf/cm<sup>2</sup>)까지 변화시켰으며, 장치내의 온도는 50[℃]~-30[℃]까지 변화시켰다.

5기압의 경우에서는 50[℃]에서 0[℃]까지는 절연파괴전압에서 41[kV]에서 43[kV]로 약 3[kV]차이로 큰 변화가 없었으나 0[℃]이후 영하로 내려갈 경우 -10[℃]절연파괴전압이 52.8[kV]로 상승하였다.

4기압에서는 50[℃]에서 -10[℃]에까지는 36[kV]에서 39[kV]로 약 3[kV]정도의 변화가 있다. 이후 -20[℃]에서 41.0[kV]로 절연파괴전압으로 상승하였다.

3기압에서 50[℃]에서 -10[℃]까지 30[kV]에서 33[kV]로 약 3[kV]로 거의 변화가 없었으며 -10[℃]이후 -20[℃]에서는

45[kV]로 절연파괴전압이 커지는 것을 볼 수 있다.

2기압의 경우에도 50[°C]에서 -20[°C]까지 25[kV]에서 28[kV]까지 약 3[kV]정도의 변화가 있었지만 -30[°C]에서 44.5[kV]로 매우 큰 절연파괴전압으로 측정되었다.

각 압력별 절연파괴가 상승하는 부분에 관측창을 통해 관측한 결과 각 압력에 따라 임계온도 이하의 경우 액화가 진행되어 액화된 SF<sub>6</sub>가 침 선단에 모여 물방울과 같은 모양으로 떨어지기 시작하였다. 이때 전압을 높여 절연파괴 시킬 경우 액화 SF<sub>6</sub>가 브러시 코로나 형태의 액체 막을 형성하였으며 계속 전압을 상승시킬 경우 중심에서 절연파괴가 발생하였다. 그 결과 액화 SF<sub>6</sub>의 절연파괴 전압은 상당히 높을 것이라고 추측되었다. 이 현상 이후에 계속하여 가스를 주입할 경우 액화의 진행 속도가 상당히 빨라서 챔버 내부에 일정시간동안 일정 압력의 유지가 어려워 실험을 진행하기 어려웠다.

액화 SF<sub>6</sub>의 절연내력을 알기 위해 계속 가스를 주입하여 전극계 전부를 액화 SF<sub>6</sub>로 함침시켜 절연파괴 전압을 측정하였다. 이때 액화 SF<sub>6</sub>의 절연내력은 인가전압의 한계치(60[kV]) 이상의 절연내력을 가지고 있음이 확인되었다.

물론 온도가 내려감에 따라 챔버 내의 압력을 유지할 경우 가스 밀도가 증가하여 절연파괴 전압이 상승하는 요인도 있지만 임계값 이하에서 급격한 절연파괴 전압의 상승은 위에서 언급한 바와 같이 SF<sub>6</sub> 가스의 액화 진행으로 인한 요인이 더 크다고 판단된다.

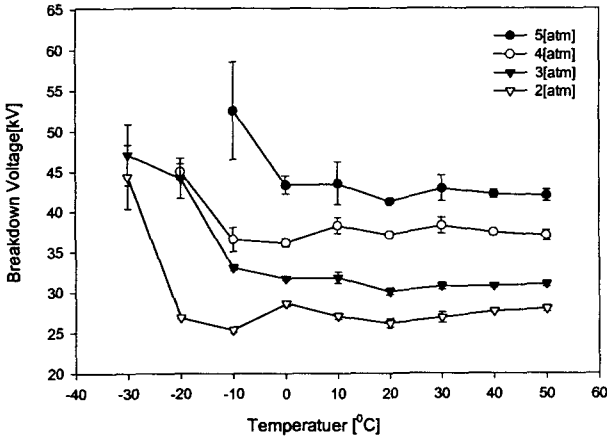


그림 2 내부 압력 유지시 기압과 온도변화에 따른 절연파괴 전압 특성

Fig. 2 The characteristics of breakdown voltage in case of keeping the inner pressure with variation of temperature

그림 3은 기압 변화에 따른 절연파괴 전압의 특성을 알기 위해 그림 2의 데이터에서 범례인 압력을 X축에 그림 2의 X축인 온도 중에서 -20, -10, 20, 50 [°C]만 추출하여 나타낸 것입니다.

그림 3에서 5기압일 때 -10[°C]의 경우와 3, 4기압일 때 -20[°C]의 경우가 그 밖의 다른 기압과 온도의 변화 때 보다 절연파괴 전압의 편차가 상대적으로 크다. 이것은 액화가 진행됨에 따라 침 선단에 액화 SF<sub>6</sub>가 물방울 모양으로 모여 떨어지기 전과 후의 절연파괴 시간차와 물방울 모양의 크기 차이 등에 따라 절연내력의 편차가 발생되었다고 판단된다.

표 1은 그림 3의 절연파괴전압 특성을 각 온도별로 표로서 간략히 나타냈다. 기압의 상승과 함께 절연파괴전압은 20[°C]일 때 2기압, 3기압, 4기압, 5기압에서 절연파괴전압은 각각 26.2[kV], 30.1[kV], 37.1[kV], 41.3[kV]로 기압이 1기압씩 증가할수록 4~5[kV]정도 높아지는 경향을 보였다. 기압이 증가하면 SF<sub>6</sub>가스 밀도의 증가로 절연파괴전압이 높아진다고 사료된다.

표 1은 그림 3의 절연파괴전압 특성을 각 온도별로 표로서 간략히 나타냈다. 기압의 상승과 함께 절연파괴전압은 20[°C]일 때 2기압, 3기압, 4기압, 5기압에서 절연파괴전압은 각각 26.2[kV], 30.1[kV], 37.1[kV], 41.3[kV]로 기압이 1기압씩 증가할수록 4~5[kV]정도 높아지는 경향을 보였다. 기압이 증가하면 SF<sub>6</sub>가스 밀도의 증가로 절연파괴전압이 높아진다고 사료된다.

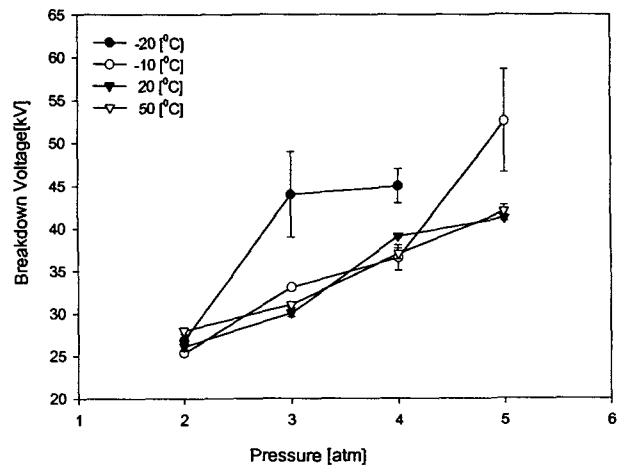


그림 3 압력변화에 따른 절연파괴전압

Fig. 3 The characteristics of breakdown voltage in case of variation of inner pressure

표 1 기압변화에 따른 절연파괴전압특성

Table 1 The breakdown voltage about per each pressure (단위 : [kV])

	2기압	3기압	4기압	5기압	비고
-20[°C]	26.9	44.0	45	-	
-10[°C]	25.4	33.1	36.6	52.6	
20[°C]	26.2	30.1	37.0	41.3	
50[°C]	28.0	31.1	37.1	42.0	

### 3.2 일정 가스량에 대한 온도-압력 변화에 따른 절연파괴전압 특성

그림 4는 모의 GIS 장치 내에 침대평판전극을 설치하여 SF<sub>6</sub>가스의 일정 가스량 유지시 온도-압력에 대한 절연파괴전압을 나타냈다. 표 2는 그림 4의 압력에 대한 온도변화를 표로서 간략히 나타내었다. 본 실험은 일정 가스량 유지시 온도-압력변화에 따른 SF<sub>6</sub>의 절연특성에 대한 물리적 특성을 알기 위한 실험이다.

본 연구에서는 모의 GIS장치내의 침대평판전극의 간극을 3[mm], 기압은 상온(20[°C])일 때 4~6[kgf/cm<sup>2</sup>]에 대해 장치내의 온도를 50[°C]~ -50[°C]까지 변화시켰다.

그림 4에서 상태 I 은 각 압력에 대한 SF<sub>6</sub>의 액화 진행 전

의 단계이며 이 경우에는 온도증가로 인한 압력증가에 의한 절연파괴 전압이 약간 상승하는 경향을 나타낸다.

상태II에서는 각 압력에 따른 SF<sub>6</sub>의 액화가 진행됨에 따라 절연파괴 전압은 급격히 상승한다.

상태III에서는 SF<sub>6</sub>의 액화가 더욱더 진행될 경우 갭간의 압력이 급격히 떨어져 절연파괴 전압도 급격히 하락한다. 이 경우에는 액화가 진행되어 챔버 내의 바닥에 액화 SF<sub>6</sub> 가스가 채워지기 시작하면서 상대적으로 극간에 희박한 SF<sub>6</sub> 가스와 희박한 공기의 혼합체 만 존재하기 때문에 절연파괴 전압이 급격히 하락한다고 판단된다.

즉 극한지방에 GIS를 설치할 경우 액화가 진행됨에 따라 절연내력이 일시 상승하지만 결국 액화가 더욱 진행될 경우 압력이 급격히 떨어져 절연파괴에 이르게 된다고 판단된다

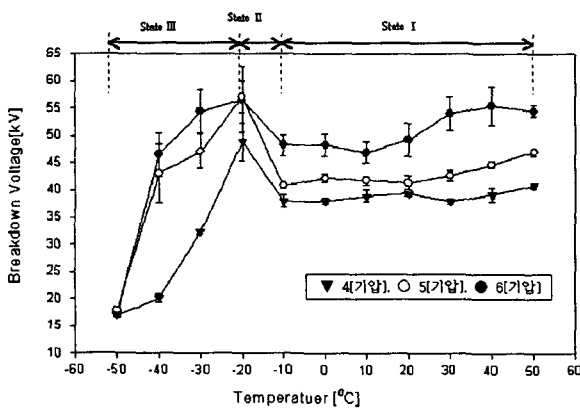


그림 4 일정 가스 량에 대한 온도-압력 변화에 따른 절연파괴 전압

Fig. 4 Breakdown voltage on the variations of temperature-pressure with a regular gas volume

표 2 일정 가스 량에 대한 온도-압력 변화

Table 2 The variations of temperature-pressure with a regular gas volume

온도	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
압력	0	1.6	2.9	4.2	4.6	5	5.6	6	6.3	6.6	6.6
	0	1.5	2.5	3.5	4.1	4.5	4.8	5	5.3	5.6	5.9
	0	0.2	1.5	2.9	3.1	3.4	3.9	4	4.2	4.5	4.7

#### 4. 결 론

##### 4.1 온도변화에 따른 일정 내부압력 유지 시 절연파괴 특성

불평등 전극계에서 일정 내부압력을 유지하면서 온도를 변화시켰을 때 각 압력별(2~6기압)액화가 진행되기 전에는 거의 일정한 절연파괴전압특성을 나타내었다. 그러나 각 압력별 액화가 진행될 경우 절연파괴전압이 급격히 상승하였다. 온도를 계속 낮출 경우 급속한 SF<sub>6</sub> 가스의 액화 진행으로 인하여 압력의 유지가 어려웠으며 동일 온도 하에서 압력의 증가에 따라 SF<sub>6</sub> 가스의 밀도가 증가하여 절연파괴 전압도 상

승하였다.

##### 4.2 일정 SF<sub>6</sub> 가스량에 대한 온도-압력 변화에 따른 절연파괴 특성

각 압력에 따른 SF<sub>6</sub>의 액화 진행 전의 단계에서는 온도증가로 인한 압력 증가에 의한 절연파괴 전압이 약간 상승하는 경향을 나타낸다. 각 압력에 따른 SF<sub>6</sub>의 액화가 진행됨에 따라 절연파괴 전압은 급격히 상승한다.

SF<sub>6</sub>의 액화가 더욱더 진행될 경우 갭간의 압력이 급격히 떨어져 절연파괴 전압도 급격히 하락한다. 액화 SF<sub>6</sub>의 절연파괴 전압은 인가전압의 한계치(60[kV]) 이상으로 높음을 알 수 있었다.

액화 SF<sub>6</sub>의 절연특성에 관한 연구는 향후 더욱 연구의 필요성이 있다고 판단된다. 즉 저온화가 진행되면 결국 SF<sub>6</sub>의 액화가 직접적 원인이 아니라 액화진행으로 인한 압력의 급속한 저하로 인해 SF<sub>6</sub>의 절연 내력이 급격히 하락함을 알 수 있었다. 따라서 극한 지방에 설치되는 GIS의 경우 적정 온도를 유지하는 보온 시스템이 있으면 절연파괴 사고를 방지할 수 있다고 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 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
- [2] Gong Guoli et al. "The influence of SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 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 SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>x</sub> Gases on Electrode Surfaces after Electrical Discharge under SF<sub>6</sub> Atmosphere". IEEE Trans. pp. 234~240, 2000
- [5] 이광식 외 4명, "온도변화에 따른 SF<sub>6</sub> 가스의 절연특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1662~1664. 2002.

저 자 소 개



**이 광 식(李 廣 植)**

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988년~1989 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 1998년~1999년 당 학회 방전고전압 연구회 간사장 역임. 영남대학교 산업대학원장 역임. 현재, 대한전기학회 대구지부장, 영남대 전자정보공학부 교수.

Tel : 053) 810-2486, Fax : 053-813-8230

E-mail : kslee@yu.ac.kr



**박 광 서(朴 光 緒)**

1970년 3월 23일생. 1997년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자공학부(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel: 053) 815-7291, Fax: 053-813-8230

E-mail: aca28@yumail.ac.kr



**박 경 태(朴 徑 台)**

1974년 5월 16일생. 2001년 영남대 전기전자공학부졸업. 2002년 대학원 졸업(공학석사)

Tel : 011-809-7395

E-mail : hana19988@hotmail.com



**김 이 국(金 利 國)**

1946년 9월30일생. 1976년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 경일대학교 전기공학과 교수

Tel: 053-850-7145, Fax: 053-850-7602

E-mail: lkkim@bear.kyungil.ac.kr



**박 창 기(朴 昌 基)**

1962년8월18일생, 1987년 영남대학교 전자공학과 졸업. 1999년 영남대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~ 현재 영남대학교 대학원 전기공학과 박사과정 현재 한국전력공사 서대구전력소 송전과장.

Tel: 054-970-3351 Fax:054-970-3314

E-mail: parkcki@kepcoco.kr