

SF₆가스챔버내 금속이물에 의한 부분방전 및 절연파괴 현상

(The partial discharge and breakdown phenomena
due to metallic particle in SF₆ gas chamber)

이재걸^{*} · 곽희로^{**} · 조국희^{***} · 박종신^{****}

(Jae-Gul Lee · Hee-Ro Kwak · Kook-Hee Cho · Jung-Shin park)

요 약

본 논문에서는 SF₆가스 내에 혼입된 금속이물에 의한 부분방전에 대해 연구하였다. 모의 GIS챔버를 설계·제작하여, 전극 내에 혼입된 금속이물에 의한 부분방전 및 절연파괴과정을 관측하고, 초음파센서를 이용하여 부분방전을 검출하였다. 또한 전극 내에 혼입된 금속이물의 위치에 따른 전계를 해석하였다.

SF₆가스 내에서 금속이물의 거동 중 끝단에서 부분방전이 발생하였다. 이와 같이 금속이물이 거동중에 발생하는 미소 갭사이의 방전은 아크방전으로 진전되어, 결과적으로는 절연파괴를 유발할 수 있다.

금속이물의 위치에 따른 전계분포는 금속이물이 상부전극에 수직으로 부착되어 있는 경우에 전계의 세기가 가장 크고, 하부전극에 수평으로 부착되어 있는 경우가 가장 낮게 나타났다.

Abstract

This paper describes the partial discharge due to particles in SF₆ gas. A model GIS chamber was designed and manufactured. The partial discharge and breakdown phenomena due to the particles between electrodes were observed and partial discharge signals were detected, using an ultrasonic sensor. The analysis of the electric field by the states of the particle inserted between the electrodes, were also carried out.

The partial discharge was observed at end while the particle was moving in SF₆ gas. The partial discharge in micro-gap grows to arc, and after all, it can cause a breakdown.

The electric field strength was the highest in case that the particle was vertically attached on the conductor, and the lowest in case that it was horizontally attached on the enclosure.

1. 서 론

전기에너지의 수요증가로 전력전송전압의 격상과 전력설비의 대용량·고전압화가 가속되고 있다. 또한 전력설비의 소형화와 옥내화가 불가피하고, 설비의 신뢰성과 안정성의 확보가 요구되므로 절연특성이 매우 우수한 SF₆ 가스를 사용하는 가스절연개폐장치의 사용이 늘어나고 있다[1~2].

* 정회원 : 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정

** 정회원 : 숭실대학교 공과대학 전기공학과 교수

*** 정회원 : 한국전기연구소 산업전기 연구단 선임연구원

**** 정회원 : 한국전력 중앙연구소 배전교육팀 부교수
접수일자 : 1999년 10월 15일

SF₆가스챔버내 금속이물에 의한 부분방전 및 절연파괴 현상

GIS는 높은 절연내력을 가지는 SF₆ 가스를 금속용기에 밀폐시킨 고신뢰성 기기이므로 통상의 운전상태에서는 부분방전이 발생하지 않는 충분한 전계강도로 설계되어 있으나, GIS의 제작, 운반, 현장조립, 가스주입시에 도전성 이물질 등이 발생할 수 있다. 특히 GIS 내의 금속이물은 전계의 영향으로 기립, 부상(lift-off), 비행(hovering) 및 왕복운동(crossing)하거나, 절연 스페이스에 부착 또는 돌기의 형태로 탱크 내면에 부착되어 부분방전 발생의 원인이 되기 때문에, GIS의 절연성능에 큰 영향을 미친다.

이러한 자유 도전성 금속이물은 돌기와 같은 고정된 이물과는 달리 인가전계의 영향으로 전극 내에서 자유롭게 왕복운동한다. 또한 높은 전계왜곡을 일으키고 이에 따라 금속이물 주변에서 전리작용을 야기하며, 결국은 절연파괴를 유발한다[3~8].

본 논문은 고전계내에서 자유도전성 금속이물에 의한 GIS내 부분방전의 발생과 검출에 대해 연구하였다. 평행평판 전극구조 내의 선형 도전성 금속이물을 대상으로 교류전압을 인가하였을 경우, 고전계내의 금속이물 주변의 미소부분방전 현상과 절연파괴과정을 고속카메라를 이용하여 관찰하였으며, 미소한 부분방전을 초음파 센서를 이용하여 측정하였다. 또한 GIS내에 금속이물 혼입시 금속이물의 위치에 따른 전계를 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

SF₆가스내 평행평판 전극에서 금속이물에 의한 부분방전 및 절연파괴현상을 관찰하기 위한 실험장치는 고전압발생장치, 평행평판 전극내장 모의 가스챔버, 그리고 고속카메라 시스템 등으로 구성하였다. 가스챔버는 고전계에서 금속이물에 의한 GIS의 부분방전 및 절연파괴현상을 관찰하기 위해 아크릴을 이용하여 원통형으로 제작하였다. 그리고 전압인가선, 접지선 및 가스주입구등을 취부하고 완전히 밀폐하였다.

내부의 전극은 평등전계를 형성하기 위해 원형의 평판-평판전극을 사용하였다. 평판전극의 크기는 상부전극의 직경 80[mm], 하부전극의 직경 100[mm], 모서리부의 곡률 반경은 5[mm]로 제작하였다. 전극간격은 최대 70[mm]까지 조절할 수 있도록 제작하였다. 또한, 전극의 모서리 부분은 근사 로고우스키 전극의 형태로 제작하여, 전계의 왜형을 최대한 감소시켰다.

실험에 사용된 모의 GIS 챔버는 그림 1과 같다.

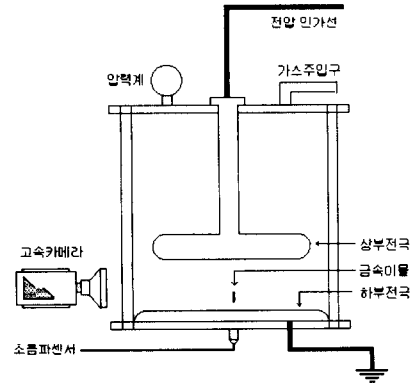


그림 1. 모의 GIS 가스챔버
Fig. 1. Model GIS gas chamber

고속 카메라는 모의 GIS내에서의 금속이물에 의한 절연파괴 과정을 관찰하기위해 평판-평판전극 정면에 수평으로 1.5[m]거리에 설치하였으며, 부분방전시의 초음파 신호를 검출하기위해 하부전극에 초음파 센서를 취부하여 신호를 검출하였다. 본 실험에서 사용된 고속카메라는 SpeedCam+ 디지털 고속 카메라 시스템으로 최고 1091[Frame/s]의 고속도 촬영이 가능하며, 초음파센서는 NF사의 AE-900F2 No:Q850을 사용하였고 주파수 대역은 20[kHz] - 2[MHz] 광대역이다.

실험은 SF₆가스압력 2[bar], 전극간격 15[mm]에서 하였다.

전계 해석을 위해 본 논문에서는 Maxwell 2D를 사용하였다. Maxwell 2D는 재질들을 임의로 선정할 수 있으므로 가능한 실제 GIS와 같은 조건으로 전계를 해석하였다. 가스절연개폐장치내에서 금속이물을 각각 상부전극에 부착된 상태, 하부전극에 기립된 상태, 하부전극에 수평으로 부착한 상태로 구분하여 전계의 분포상태를 해석하였다.

3 실험 및 전계해석 결과

3.1 금속이물의 거동중 부분방전

그림 2는 25[kV]의 전압 인가시 직경 0.6[mm], 길이 7[mm]의 선형 철 금속이물 운동 중 육안관측 가능한 부분방전 발생 및 부분방전 발생전후의 사진으로 480 [Frame/sec] 속도로 촬영하였다. 그림 2.(b)는

부상개시 이후 약 115.5[ms] 후의 하강과정에서의 부분방전현상이며, 그림 2.(e)는 부상개시 이후 약 161.7[ms]경과 후의 하강과정에서의 부분방전현상이다. 그림 2의 (e)는 (b)보다 전극에 더욱 근접하여 부분방전이 발생되었기 때문에, (e)의 부분방전현상이 (b)보다 더 크게 나타남을 알 수 있다.

아래 그림과 같이 금속이물이 전극에 접근하여 축적된 전하를 갖고 있는 금속이물의 끝단 전계가 SF₆ 가스의 절연과피전압보다 크게 되면 금속이물의 끝에서 부분방전이 발생하게 된다.

이와 같이 금속이물이 전극에 접근하면, 축적된 전하에 의해 금속이물의 끝단에서 부분방전이 발생함으로써 금속이물과 전극간이 아크방전으로 진전되어, 궁극적으로는 SF₆ 가스의 절연과피를 일으키기도 한다.



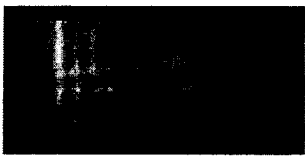
(a) 부상 113.4[ms] 후



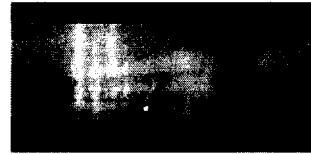
(b) 부상 115.5[ms] 후



(c) 부상 117.6[ms] 후



(d) 부상 159.6[ms] 후



(e) 부상 161.7[ms] 후



(f) 부상 163.8[ms] 후

그림 2. 금속이물의 운동 중 부분방전 (철, 직경 0.6 [mm], 길이 7 [mm], 인가전압 25 [kV], 카메라 프레임속도 : 480 [Frame/sec])

Fig. 2. Partial discharge during the movement of particle (Fe, diameter 0.6 [mm], length 7 [mm], applied voltage 25 [kV], camera frame speed : 480 [Frame/sec])

즉, 대전된 금속이물이 전계에 의한 운동중에 반대극성으로 대전된 전극에 접근하면 금속이물 끝단에서 부분방전이 발생한다. 이런 부분방전은 즉시 금속이물과 전극간을 단락시키고, 금속이물의 전위는 전극전위로 된다. 따라서 금속이물이 전극면위의 돌기역할을 하게되고, 이로인해 결국에는 절연과피가 발생하기도 한다.

위와같이 금속이물이 부상하면 상부전극과 하부전극 사이에서 인가전압에 따라 상하운동을 하며, 금속이물 주변에서 부분방전이 발생한다.

금속이물에서 부분방전이 발생하는 경우는 그림 2와 같은 경우 외에도 하부전극에서 기립하여 금속이물 끝에서 전계집중에 의해 부분방전이 발생하는 경우, 상부전극에 부착하여 부분방전이 발생하는 경우 등이 있으며, 이때 전압을 더욱 증가시키면 절연과피가 발생하게 되고, 경우에 따라서는 동일한 전압에서도 부분방전이 절연과피로 진전되는 경우도 있다.

3.2 금속이물에 의한 부분방전 측정

그림 3은 외부잡음(background noise)을 초음파 센서로 측정된 것으로 약 10[mV]의 크기를 나타내었다. 측정된 외부잡음은 금속이물을 혼입하지 않은 상태에

SF₆가스챔버내 금속이물에 의한 부분방전 및 절연파괴 현상

서 전압을 인가하였을 경우에 나타나는 신호이다. 이것은 실험장치의 설치환경과 전치증폭기 및 전원에 포함된 잡음에 의한 것으로 판단된다.

그림 4는 모의 GIS 챔버에서 그림 2와 같이 금속이물이 부상하여 외부전극에 충돌할 경우에 측정된 초음파 신호파형이다. 이때 금속이물은 직경 0.15[mm], 길이 5[mm]의 선상의 구리(copper wire)를 사용하여 상부전극과 하부전극 사이에 혼입하였으며, 인가전압은 10[kV]이다.

금속이물이 외부원통에 충돌하여 발생하는 초음파 신호의 크기는 약 60[mV]로서 잡음신호에 비하여 약 10[dB] 정도 크게 나타났고 잔향도 2[ms]동안 지속되었다.

부분방전의 발생은 부분방전 측정장치(Hipotronics사의 CDO-77A1.2.3.(Part No.40-50))로 측정된 방전 전하량과 방전파형으로 확인하였으며, 그림 5는 금속이물(직경 0.15[mm], 길이 5[mm])이 하부전극에 수직으로 부착되었을 경우, 인가전압 12[kV]에서 발생하는 부분방전에 의한 초음파 신호를 나타내고 있다.

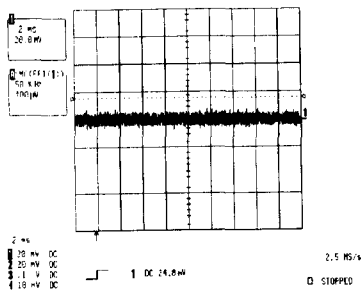


그림 3. 모의 GIS챔버에서의 잡음신호
Fig. 3. Background noise in model GIS chamber

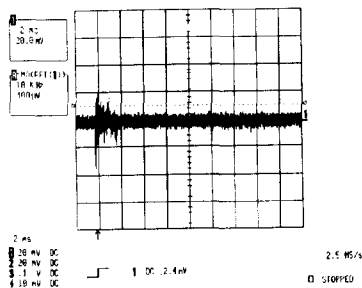


그림 4. 금속이물의 충돌에 의한 초음파 신호
Fig. 4. Ultrasonic signal due to conducting particle bouncing

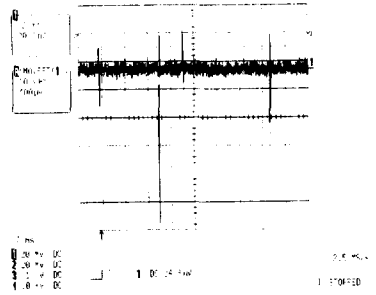


그림 5. 금속이물에 의한 부분방전발생시 초음파 신호
Fig. 5. Ultrasonic signal in case of partial discharge due to particle

그림 5의 경우는 약 40[pC]의 부분방전 전하량이 발생된 경우이다. 그림 5와 같은 부분방전에 의한 신호는 그림 4와 같이 금속이물이 외부전극에 충돌할 때의 신호와 같은 잔향이 발생하지 않으므로 구별이 가능하였다.

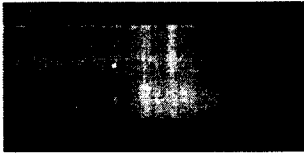
3.3 금속이물에 의한 SF₆가스의 절연파괴

그림 6은 38[kV]의 전압 인가시 직경 0.6[mm], 길이 7[mm]의 선형 철 금속이물에 의한 SF₆가스의 절연파괴과정으로, 부분방전의 발생 이후 절연파괴까지의 과정을 760 [Frame/s]의 속도로 촬영한 사진이다. 그림 6.(a)는 절연파괴 약 2.6[ms]전의 금속이물의 상태이며, 그림 6.(b)는 절연파괴 약 1.3[ms]전의 부분방전이다. 그림 6.(c)는 절연파괴시의 사진이고, 그림 6(d) 및 (e)는 절연파괴 발생 약 5.2[ms]와 6.5[ms] 후 절연이 회복된 상태의 사진이다.

그림 6의 파괴과정은 금속이물이 운동중 하부전극에 기립상태로 부착되어, 금속이물의 상단에서 부분방전이 발생되고, 곧바로 절연파괴로 진전된 경우이다.



(a) 절연파괴 약 2.6[ms] 전



(b) 절연파괴 약 1.3[ms] 전



(c) 절연파괴



(d) 절연파괴 발생 약 5.2[ms] 후



(e) 절연파괴 발생 약 6.5[ms] 후

그림 6. 금속이물에 의한 절연파괴 과정 (철, 직경 0.6 [mm], 길이 7 [mm], 인가전압 38 [kV], 카메라 프레임속도 : 760 [Frame/sec])

Fig. 6. Breakdown process by particle (Fe, diameter 0.6 [mm], length 7 [mm], applied voltage 38 [kV], camera frame speed : 760 [Frame/sec])

그림 6(c)에 보인 절연파괴현상은 약 5.2[ms]동안 지속되었으며, 그림 6(d)와 6(e)에서와 같이 전극간의 주 방전이후에 금속이물 주위의 절연회복현상을 관찰할 수 있었다.

SF₆ 가스중의 모의 동축원통전극내에 금속이물이 존재할 경우 절연파괴강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 금속이물이 상부전극(도체)에 수직으로 부착하여 있는 경우, 금속이물이 하부전극(탱크표면)에 수직

으로 고정된 경우 및 하부전극(탱크표면)에 수평으로 고정되어 있는 경우 각각에 대한 절연파괴전압을 10회 측정하여 평균한 값을 그림 7에 나타내었다. 실험에 사용한 금속이물은 직경 0.26[mm], 길이 5[mm]의 구리를 사용하였다. 이때 전극간의 간격은 15[mm]이었다.

실험 결과 금속이물이 존재하지 않는 경우에는 한계전압이 50[kV]인 고전압 발생장치로 44[kV]까지 전압을 인가하여도 절연파괴는 일어나지 않았으며, 하부전극에 수평으로 고정시킨 경우 가스압력 1.5[bar]까지는 절연파괴전압을 측정할 수 있었으나 2[bar]에서는 44[kV]까지 전압을 인가하여도 절연파괴가 발생하지 않았다. 금속이물을 상부전극에 수직으로 고정시킨 경우의 절연파괴전압이 가장 낮은 값(1.5[bar]에서 32[kV])을 나타내었고, 하부전극에 수직으로 고정시킨 경우는 금속이물 부상시와 같은 상태로 침대 평판전극의 형태이기 때문에 수평으로 고정시킨 경우보다 낮은 절연파괴전압(1.5[bar]에서 36[kV])을 나타냈다. 이와 같은 실험결과를 검증하기 위해 다음과 같이 전계를 해석한 후 비교·검토하였다.

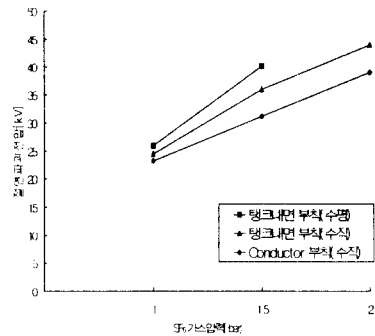


그림 7. 금속이물 혼입시 SF₆ 가스압에 따른 절연파괴전압

Fig. 7. Breakdown voltage with SF₆ gas pressure when particle inserted

3.4 금속이물의 위치에 따른 전계해석

SF₆ 가스중의 전극내에 금속이물이 존재할 경우 전극내의 전계강도 분포를 분석하기 위하여 금속이물이 상부전극에 수직으로 부착하여 있는 경우, 금속이물이 하부전극에 수직으로 고정되어있는 경우 및 하부전극에 수평으로 고정되어 있는 경우에 대하여 전계를 해석하였다.

Maxwell 2D로 전계를 해석하기 위해서, 선형 도전성 금속이물은 직경 1[mm], 길이 3[mm]인 구리를 대상

SF₆ 가스 챔버 내 금속이물에 의한 부분방전 및 절연파괴 현상

으로 하였다. 이때 전극간 거리는 15[mm]로 하였고 하부전극은 철(Fe)이며, 금속이물은 SF₆ 가스내에 있는 것으로 하였다.

전계해석은 금속이물의 위치를 임의로 다음과 같은 3가지의 경우로 나누어 실행하였다.

- ① 금속이물이 하부전극에 기립되어 있는 상태
- ② 금속이물이 상부전극에 수직으로 부착된 상태
- ③ 금속이물이 하부전극에 누워있는 상태

전계의 세기는 1[IC]당 작용하는 힘을 [N]으로, 즉 단위 전하에 작용하는 힘으로 표시된다.

금속이물에 미치는 전계의 세기는 다음 식과 같이 힘에 비례하므로 금속이물의 부착위치에 따른 금속이물에 작용하는 힘을 구한 결과는 표 1과 같다.

$$F = QE$$

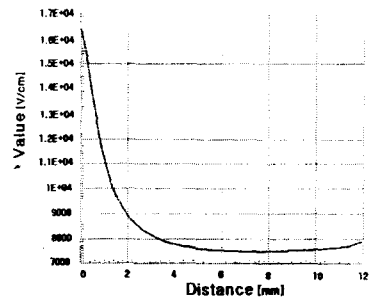
표 1에 나타난 바와 같이 금속이물에 작용하는 힘이 상부전극에 수직으로 부착하였을 때 1.82×10^{-6} [N], 하부전극에 수직으로 부착하였을 때 1.65×10^{-6} [N], 하부전극에 수평으로 부착하였을 때 0.82×10^{-6} [N]으로 나타났다. 금속이물에 작용하는 힘은 전계의 세기와 비례하므로 각 부착위치에서의 전계의 세기는 상부전극에 수직으로 부착하였을 때가 가장 크고 다음은 하부전극에 수직으로 부착하였을 때이며, 하부전극에 수평으로 부착하였을 때가 가장 작게 나타났다. 즉 금속이물이 전극간에서 수직으로 위치할때 큰 전계의 영향을 받으므로 이런 경우에 금속이물 주변에서 부분방전이 발생할 가능성이 크게 된다. 그러므로 전계해석과 실제 실험결과가 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

표 1. 부착위치에 따라 금속이물에 작용하는 힘
Table 1. The force acting to particle by attachment states

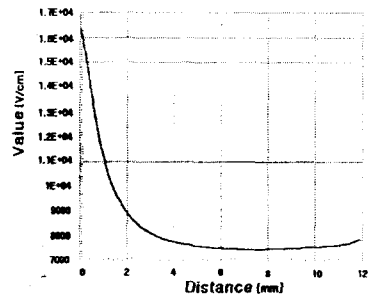
Case	금속이물부착위치	힘[N]
①	하부전극(기립)	1.65×10^{-6}
②	상부전극(수직)	1.82×10^{-6}
③	하부전극(수평)	0.82×10^{-6}

그림 8의 (a), (b), (c)는 금속이물 부착위치에 따른 전계의 세기에 대한 그래프를 보여주고 있다. 그림 8의 (a)는 금속이물이 하부전극에 수직으로 부착된 경우로써 전계의 세기가 1.65×10^4 [V/cm]이고, 그림 8의

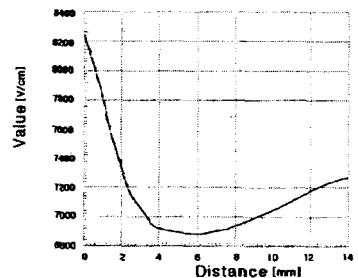
(b)는 상부전극에 수직으로 부착된 경우로써 전계의 세기가 1.82×10^4 [V/cm]며, 그림 8의 (c)는 하부전극에 수평으로 부착된 경우로써 전계의 세기가 0.82×10^4 [V/cm]이다. 전계의 세기에서도 상부전극에 금속이물이 부착되었을 때가 가장 심하게 집중되었음을 알 수 있다.



(a) 금속이물이 하부전극에 수직으로 부착한 경우



(b) 금속이물이 상부전극에 수직으로 부착한 경우



(c) 금속이물이 하부전극에 수평으로 부착한 경우

그림 8. 금속이물 위치에 따른 전계의 세기
Fig. 8. Electric field strength by particle states

4. 결 론

SF₆가스내에 금속이물이 혼입되었을 때 금속이물 주변의 부분방전 및 절연파괴에 대한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 금속이물은 거동중 전극에 접근하면 끝단에서 미소 방전이 발생하였다. 이와같은 미소갭사이의 방전은 아크방전으로 진전되어, 결과적으로는 절연파괴를 유발할 수 있다.
- (2) 금속이물에 의한 부분방전은 초음파 센서를 이용하여 방전 펄스파형을 검출할 수 있었다.
- (3) 금속이물의 위치에 따른 파괴전압은 도체에 수직으로 위치하였을 때가 외함에 수직 또는 수평으로 위치했을 경우보다 낮음을 알 수 있었다.
- (4) 금속이물의 위치에 따른 전계 해석 결과에서는 금속이물이 상부전극에 수직으로 부착되어 있는 경우에 전계의 세기가 가장 크고, 다음 하부전극에 수직으로 부착되어 있는 경우가 크며, 하부전극에 수평으로 부착되어 있는 경우가 가장 낮게 나타났다. 실제 실험 결과에서도 전계를 해석하여 얻은 결과와 같은 순서로 절연파괴전압이 측정되었으며, 이는 전계를 해석한 결과와 실제 실험결과가 일치하고 있음을 나타내고 있다.

참 고 문 헌

- [1] K. Kaminaga, M. Koshiishi, T. Hayashi, M. Matsuki, T. Hara and N. Sugiyama, "Development of Compact 500kV 8000A Gas Insulated Transmission Line-dirt Control during Field Jointing and Method for Detecting Conductive Particles", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, pp. 961-968, 1989.
- [2] Ming, "Influence of Conducting Particles on the SF₆ Gas Gap Breakdown and Spacer Flashover in GIS", Doctoral Thesis, Chalmers Univ. of Technol., Göteborg, 1987.
- [3] T. Hattori, "A Study on Effects of Conducting Particles in SF₆ Gas and Test Methods for GIS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, pp. 197-204, 1988.
- [4] Alan H. Cookson, "Effect of Conducting Particles on AC Corona and Breakdown in Compressed SF₆", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 4, PAS-91, pp. 1329-1338, 1972
- [5] 조국희, 광희로 외, "GIS내 금속이물의 전계해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1728-11730, 1998.
- [6] 이재걸, 광희로 외, "모의 GIS내에서 파티클의 재질에 따른 절연파괴 특성", 한국조망·전기설비학회 추계 학술대회 논문집, pp. 67~69, 1997.

- [7] Alan H. Cookson, "Particle-Initiated Breakdown between Coaxial Electrodes in Compressed SF₆", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 3, PAS-93, No. 3, pp. 343-349, 1973.
- [8] S. Tomimaga, H. Kuwahara, K. Hirooka and T. Yoshioka, "SF₆ Gas Insulated Analysis Technique and Its Application for Evaluation of Internal Conditions in SF₆ Gas Equipment", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 9, pp. 4196-4206, 1981.

◇ 저자소개 ◇

이재걸 (李在걸)

1974년 12월 5일생, 1997년 숭실대 공대전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

광희로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울공대 전기공학과 졸. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸(박사). 1986년 M.I.T Visting Scientist. 현재 숭실대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 부회장

조국희 (趙國熙)

1950년 1월 13일생, 1987년 숭실대 전기공학과 졸업, 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국전기연구소 산업전기 연구단 선임연구원

박중신 (朴重信)

1956년 3월 3일생. 1980년 숭실대학교 전기공학과 졸. 1982년 숭실대학교 전기공학과 졸(석사). 1996년~현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정, 현재 한국전력 중앙연수원 배전교육팀 부교수.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.