

SF₆ 가스 내 금속이물 존재시 절연특성 및 전계해석

(The Insulation Characteristics and The Electric Field Analysis
by Conducting Particle in SF₆ Gas)

조국희* · 이동준** · 박희로***

(Kook-Hee Cho · Dong-Zoon Lee · Hee-Ro Kwak)

요 약

본 논문은 교류전압 상태에서의 동축원통전극 내에 금속이물 존재시 영향을 절연파괴전계와 전계해석법을 이용하여 나타내었다. 이때 모의한 GIS 챔버내 금속이물의 위치는 전극부착시, 외함부착시 그리고 자유운동시로 하였다.

그 결과 GIS챔버의 절연파괴전계의 경우, 전극에 파티클 부착시가 가장 작게 나타났고, 파티클 자유운동시가 중간, 외함에 파티클 부착시가 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 파티클 위치에 따른 전계해석의 경우 전극에 파티클 부착시가 가장 크게 나타났고, 파티클 자유운동시가 중간, 외함에 파티클 부착시가 가장 작게 나타났다. 이 결과는 국내 GIS의 절연설계에 실제적인 참고자료가 될 것으로 사료된다.

Abstract

This paper describes the influence of conducting particle in the coaxial cylindrical electrodes under alternating voltage condition investigated using breakdown electric field and electro magnetics simulation method. Simulated particle-location in GIS chamber were the particle on electrode, the particle on enclosure and free moving particle.

As results, it was founded that in case of breakdown electric field of the GIS chamber, breakdown electric field of particle on electrode was the lowest, that of free moving particle was middle and that of particle on enclosure was the highest. And in case of the electric field analysis with particle locations, electric field of particle on electrode was the highest, that of lifted particle was middle and that of particle on enclosure was the lowest. This results can offer a practical reference on the insulation design of domestic GIS.

1. 서 론

문명의 발전에 따른 급속한 산업화로 전력계통의 확장에 따라 이와 관련된 가스절연 시스템의 기술개발도 상당한 진전을 가져왔다. 이로 인하여, 인구의 도시집중화 및 도시기능의 고도화를 유발시켜 전력기기의 소형화, 고성능화가 이루어졌으며, 이러한 요구를 만족시키기 위한 절연매체로서 SF₆ 가스는 송전, 변전, 배전설비에 사용하기 시작하여, 현재는 가

* 정회원 : 전기연구소 선임연구원

** 정회원 : 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정
E-mail : above@ee.ssu.ac.kr

*** 정회원 : 숭실대학교 공과대학 전기공학과 교수
접수일자 : 2001년 6월 21일
최종완료 : 2001년 8월 8일

스절연기기뿐만 아니라 대용량 변압기에도 가스절연이 적용되고 있다[1-2].

SF₆ 가스절연을 하는 대표적 기기인 GIS는 내부의 고전압 도체와 접지된 외부도체로 구성된 동축원통형 전극으로 전극간은 준평등전계를 형성하고 있어, 통상의 운전상태에서는 부분방전이 발생하지 않는 충분한 전계강도로 설계되어 있다. 그러나 GIS의 금속가공, 연마작업, 운반, 현장조립 및 가스주입시 도체에서의 돌기 및 도전성 금속이물 등이 발생할 수 있으며, 이러한 결함에 의해 축소화, 전계의 균일화된 GIS내에 전계집중 현상이 발생하게 된다. 따라서 금속이물이 존재하면 SF₆ 가스의 우수한 절연내력은 상당히 감소되어, 이러한 현상에 대해 활발한 연구가 이루어지고 있다[3-5].

본 논문에서는 GIS내 절연성능의 심각한 저하를 야기하는 금속이물의 영향을 조사하기 위하여, 절연 특성 및 전계해석을 행하였다. 절연특성은 방전량의 변화와 절연파괴시 전계 값을 비교 분석하였고 또한 SF₆ 가스 내에 금속이물 존재시 Maxwell 방정식이 기초하여 유한요소법과 경계요소법의 단점을 보완한 전자계 시뮬레이션을 이용한 전계해석을 수행하였다.

2. 실험방법 및 전계해석

2.1 실험방법

본 논문에서는 GIS내 파티클 존재에 따른 절연특성을 분석하기 위하여 동축원통 모의전극 및 고전압 발생장치, 고전압측정장치 등을 구성하였다. 그림 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

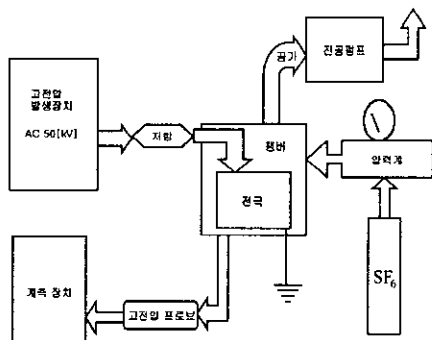


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

그림 1에 나타난 전원공급장치에는 고전압 제어기와 고전압 발생장치로 구성되고 계측장치는 절연파괴 측정장치와 방전량 측정장치로 구별되며 모의 GIS챔버는 챔버내 공기를 빼내는 진공펌프와 SF₆ 가스 그리고 챔버 안의 전극으로 구성되어 있다.

사용된 고전압 발생장치는 최대 50[kV]까지 출력할 수 있으며, 변압기는 특수하게 제작되어 변압기 자체에서 코로나가 발생하지 않는 특성을 가지고 있다. 또한 고압 발생부에서 가스 챔버까지의 전원은 모선이나 접속부의 예리한 부분에서 부분방전이 발생할 수 있으므로 직경 15[mm]이 동관을 완만하게 구부려 접속하였다.

모의 GIS 챔버는 실제 170[kV]급 GIS를 모의하였으며, 크기는 가로 170 [mm], 세로 170 [mm] 높이 170 [mm]이며 진공펌프를 연결할 수 있어서, 가스를 주입 및 배출할 수 있도록 하였고 평등전계 구조의 GIS 내부에서 금속이물이 전계에 의해 부상할 수 있도록 하였으며 모의 GIS 챔버에서 외부원통은 접지하였다. 외부원통에는 금속이물의 거동상태를 관찰할 수 있도록 관찰 창을 설치하였다. 그림 2는 모의 GIS 챔버의 사진이다.

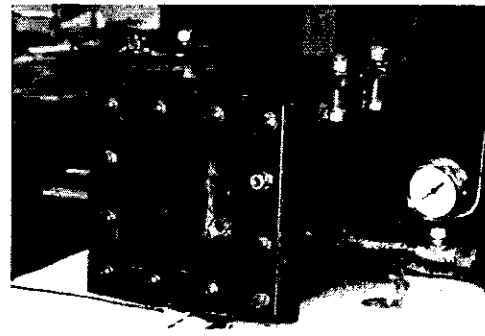


그림 2. 모의 GIS챔버
Fig. 2. Simulated GIS chamber

모의 GIS 챔버에서 외부전극 위에 금속이물이 있을 때 내부전극에 전압을 인가하고 금속이물의 부분방전 및 절연파괴에 이르는 과정을 실험하기 위하여 가스압을 4기압까지 충전할 수 있도록 설계하였다. 또한, 본 논문에서 사용한 진공펌프는 기름을 이용한 Rotary 형식의 진공펌프로 최대 3×10^{-4} [Torr]까지 가능하며 본 논문에서는 챔버내의 진공을 1×10^{-3} [Torr]로 균일하게 실험하였다.

SF₆ 가스 내 금속이물 존재시 절연특성 및 전계해석

모의 GIS 챔버는 GIS의 동축원통형 전극 특성을 유지하게 설계하였으며, 전압측정기로는 0.1[kV]단위 까지 PD 측정기로는 [pC]단위까지 계측하여 기록하였다.

또한 절연특성을 알아보기 위하여 금속이물의 부착상태에 따른 방전량의 변화와 절연과피전압을 조사하였다. 이때 전극간의 거리는 15[mm]로 하였고 금속이물의 크기는 지름 0.56[mm] 길이 6[mm]의 금속이물을 이용하였고, 진공 펌프를 이용하여 1×10⁻³[torr]까지 진공을 잡은 후 SF₆ 가스를 0.1[Mpa] 넣어 실험하였다.

절연과피전압 측정은 1[kV/sec]의 속도로 전압을 인가하며 과피전압을 구했으며, 각각의 전극에서 5 번 이상 반복 측정하였다. 또한, 방전량 측정은 절연과피가 일어날 때까지 각각의 전압에 따라 발생하는 방전량을 기록하여 평균값을 대표 값으로 삼았다.

금속이물의 부착위치는 전극부착시, 외함부착시, 자유운동시로 구분하였으며[6], 그림 3은 본문에서 실험한 금속이물의 부착위치를 나타낸 것이다.

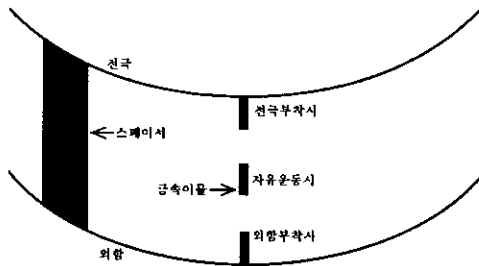


그림 3. 금속이물의 부착위치
Fig. 3. The attachment location of particle

2.2 금속이물 존재시 전계 해석이론

도전성 선형 금속이물의 거동을 정적인 상태에서 부터 부상할 때까지의 과정을 보면 금속이물에 작용하는 힘은 대부분 정전력과 중력이므로 전계 내에서 금속이물의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다[7-8].

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_e - F_g \tag{1}$$

여기서, Fe = QE(t)는 정전력이고, E(t)는 주변전계, Fg = mg는 중력이고 m은 이물의 질량, g는 중력가속도.

반경이 r이고, 길이가 l인 선형 금속이물이 전극 위에 놓여 있는 경우에 있어서, 금속이물에 축적되는 전하 Q와 질량 m은 다음과 같다.

$$Q = 2\pi \epsilon_0 \gamma l E(t) \tag{2}$$

$$m = \rho \pi r^2 l \tag{3}$$

따라서 식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{d^2t}{dt^2} = \frac{2\epsilon_0}{\rho r} E_{(0)}^2 - g \tag{4}$$

E(t) = Em sin ωt 이므로 식 E(t)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d^2t}{dt^2} = \frac{2\epsilon_0}{\rho r} E_m^2 \sin^2 \omega t - g \tag{5}$$

금속이물이 정적인 상태에서 부상할 때를 고려하면 다음과 같다. 즉 $\frac{dx}{dt}(t=0)=0$ 이고 $x(t=0)=0$ 이므로 식(5)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$x = \frac{\epsilon_0 E_m^2}{4\rho r \omega^2} (2\omega^2 t^2 + \cos 2\omega t - 1) - \frac{1}{2} g t^2 \tag{6}$$

인가전압의 주파수가 f일 때 t=1/2f 라고 하면 금속이물이 전극으로부터 떨어져 이동한 거리 x는 다음과 같다.

$$x = \frac{\epsilon_0 E_m^2}{8\rho r f^2} - \frac{g}{8f^2} \tag{7}$$

금속이물이 전극으로부터 부상하는 경우, 즉 거리 x가 0보다 크게되는 경우 인가전계는 다음의 값보다 크게 된다.

$$E_{ms} = \sqrt{\frac{\rho r g}{2\epsilon_0}} \tag{8}$$

본 논문에서 사용된 시뮬레이션 소프트웨어는 재질들을 임의로 선정할 수 있으므로 가능한 한 실제 GIS와 같은 조건에서 전계해석을 수행하였다. 전계 해석을 위해 사용된 금속이물은 선형 도전성 금속이물로서 직경 1[mm], 길이 5[mm]인 구리(Cu)로 전위분포에 따른 등전위, 전계의 세기, 매쉬 분할을 하여 금속이물에 대한 영향을 검토하였다. 이때 전극간(도체 하단과 접지된 표면) 거리는 100[mm]로 하였고 접지된 표면은 철(Fe)이며, 금속이물은 SF₆ 가스 내에 있는 것으로 하였다. 그림 4는 GIS의 3차원 모델을 나타내었다.



그림 4. GIS의 3차원 모델
Fig. 4. Three dimensions model of GIS

3. 전계해석 및 절연특성

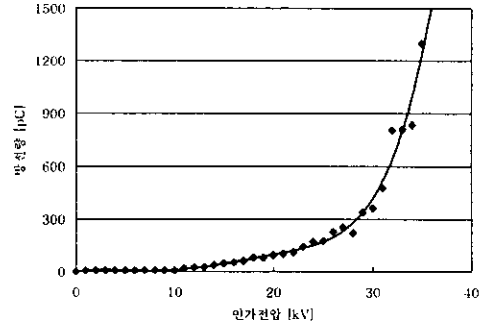
3.1 절연특성

금속이물의 위치에 방전량과 절연파괴전압을 측정하였다. 그림 5는 각각의 금속이물 위치에 따른 방전량의 추이를 나타낸 것이다.

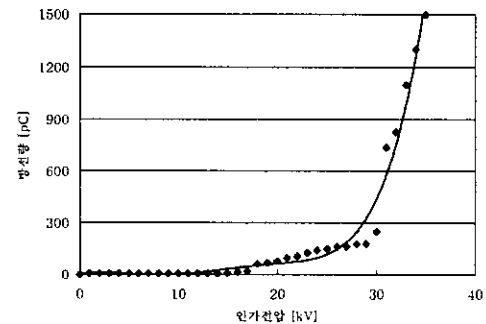
전극에 금속이물 부착시 방전량은 그림 5(a)에서 알 수 있는 바와 같이 10[kV] 이하에서는 방전량이 미약하였고 약 15[kV]에서부터 방전량이 증가하고 있다. 특히 30[kV] 이상이 되면 방전량이 급증하게 되어 절연파괴에 이르는 것을 알 수 있다.

그림 5(b)는 외함에 금속이물 부착시 방전량 변화를 나타낸 것이다. 그림 5(b)에서 보면 것처럼 방전은 약 15[kV]에서 시작되었으며 약 30[kV]까지는 서서히 증가하다가 30[kV] 이상에서는 방전량이 급증하는 것을 알 수 있다.

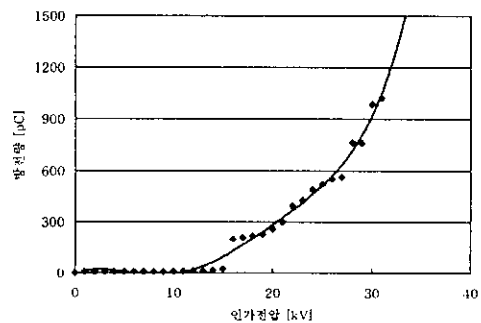
그림 5(c)에서 보는 것처럼 금속이물이 자유운



(a) 전극부착시



(b) 외함부착시



(c) 자유운동시

그림 5. 금속이물의 상태에 따른 방전량 변화
Fig. 5. Discharge quantity patterns with particle locations

동시 방전량은 처음 15[kV]까지는 그 증가가 별로 없으나 15[kV]에서 방전량이 급증하는 것을 알 수 있다. 이는 챔버 외함에 누워있던 금속이물이 부상하면서 부분방전이 발생하고 있기 때문으로 사료된다. 그 후 완만한 방전량 증가를 보여주

고 있다.

지금의 결과를 살펴보면 전극부착시와 외함부착시에는 방전량이 일정 전압(약 30[kV]) 이상에서는 급증하였으며, 자유운동시에는 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 방전개시전압의 경우 잡음이 10[pC] 이하로 측정되기 때문에 10[pC]의 2배인 20[pC] 이상이 되는 전압을 방전개시전압으로 삼았다. 이 경우 부분방전개시전압은 전극부착시가 가장 낮은 전압에서 발생하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 가스압력에 따른 절연파괴시 전계를 나타낸 것이다.

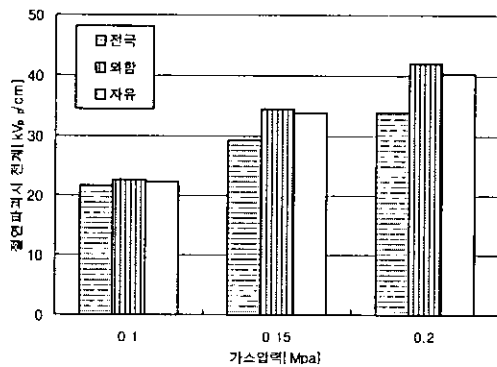
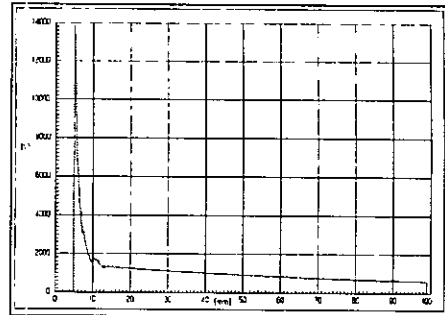


그림 6. 가스압력에 따른 절연파괴시 전계
Fig. 6. Electric field at breakdown with pressure

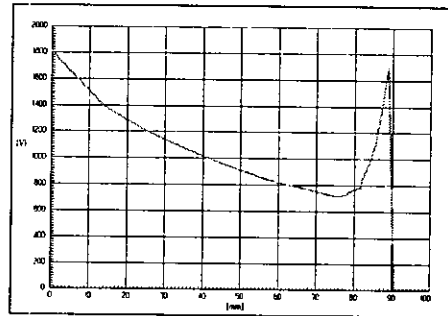
그림 6에서 보는 것처럼 절연파괴시 전계특성은 전극부착시가 제일 낮고 자유운동시, 외함부착시로 나타났다. SF₆ 가스에 이물이 없을 경우 0.1[Mpa]에서의 절연파괴시 전계는 약 90[kV/cm]이므로 금속이물 부착시에는 약 20~30[%]로 줄어들고 있음을 알 수 있다.

3.2 전계해석

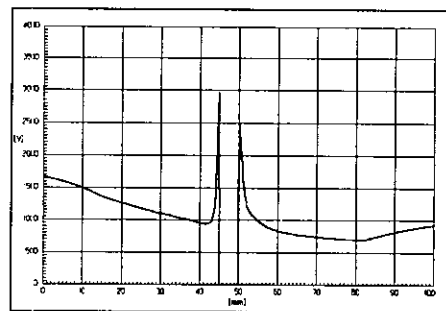
그림 7(a)는 금속이물이 전극부착시 전계의 세기를 보여 주고 있다. 그림 7(b)는 금속이물이 외함부착시 전계의 세기를 보여 주고 있다. 또한 그림 7(c)는 금속이물이 도체와 접지 되어 있는 외함표면사이에 수직으로 부유되어 있을 때 전계해석으로 전계의 세기를 보여 주고 있다.



(a) 금속이물 전극부착시



(b) 금속이물 외함부착시



(c) 금속이물 부유시

그림 7. 금속이물의 위치에 따른 전계의 세기
Fig. 7. Electric field intensity with particle locations

그림 7(a)에서 보는 것처럼 금속이물이 전극에 부착시 전계의 세기는 14,000[V/m]이고, 그림 7(b)는 금속이물이 외함에 부착된 것으로 전계의 세기가 1,820[V/m]이며, 그림 7(c)는 금속이물이 도체와 접지 되어 있는 외함사이에 수직으로 부유된 것으로 전계의 세기는 도체방향으로 2,900[V/m], 접지방향으로 2,400[V/m]이다. 이와 같이 전계의 세기는 금속이물이 도체에 수직으로 부착되어 있을 때 가장 심하

게 집중되었음을 알 수 있다.

따라서 그림 7에서 나타난 결과는 그림 5와 그림 6에서 나타난 바와 같이 금속이물이 전극부착시에는 전계가 집중되어 부분방전개시전압이 가장 낮게 나타나고 또한 절연파괴전압이 가장 낮게 나타나고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 GIS내 금속이물 부착시 나타나는 절연특성과 전계해석을 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 금속이물의 부착위치에 따른 절연특성은 전극 부착시와 외함부착시에는 방전량이 인가전압에 따라 일정전압(약30[kV])까지는 서서히 증가하다가 일정전압이상부터는 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며, 자유운동시에는 인가전압에 비례하여 꾸준히 선형적으로 증가하였다. 또한 절연파괴전압은 외함부착시가 가장 높았고, 자유운동시 그리고 전극부착시 순으로 나타났다. 이 값은 0.1[Mpa]의 금속이물이 없는 SF₆ 가스에서의 파괴전압의 20~30[%]정도의 값을 나타내었다.

(2) 금속이물의 부착위치에 따른 전계해석 결과에서는 금속이물이 전극부착시 전계의 세기가 14,000 [V/m]로 가장 크고, 다음은 금속이물이 전극과 외함 사이에 수직으로 부유된 경우 2,900[V/m], 금속이물이 외함에 부착된 경우 1,820[V/m]로 가장 낮게 나타났다.

(3) 절연특성 실험과 전계해석을 통한 모의 GIS내 금속이물 위치에 따른 특성은 전극부착시 전계가 매우 심하게 집중되는 현상이 나타나 부분방전이 가장 먼저 발생하였고, 뿐만 아니라 절연파괴시 전계도 가장 낮게 나타나는 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터 GIS내 금속이물 존재에 따른 절연성능과 전계해석 결과를 이용하여 GIS 절연설계에 있어서 실질적인 기초자료로 활용이 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) K. Morii, Y. Yamashita, Y. Harumoto, T. Ushio and S. Morioka, "Development of 500kV Gas-Insulated Switchgear and Its Application", IEEE Trans., T 73, pp. 33-38, 1973.
- (2) W.J. McNutt, W. H. Rathbun, J. P. Slocik and J. P. Vora, "Technology Development for Advanced Concepts in Gas-Insulated Power Transformers", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-101, pp. 2171-2177, July 1982.
- (3) E. Kuffel and etc, "Activity of Moving Metallic Particles in Prebreakdown State in GIS", IEEE transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 1, pp. 39-43 February 1997.
- (4) A.H. Cookson and R.E. Wootton, "Movement of Filamentary Conducting Particles under AC Voltages in High Pressure Gas", in Proc. Int. Symp. High Voltage Eng., Zürich, pp. 416-420, 1975.
- (5) 권동진 외 "변전설비 진단기술 개발 연구" 전력연구원, pp. 69-108, 1998.
- (6) 광희로, 이동준, 김경화, "GIS내 파티클의 상태에 따른 부분방전 신호의 분석", 한국조명·전기설비 논문지, Vol.14, No.1, pp. 63-74, 2000. 1.
- (7) J.R. Laghari "A Review of Particle-contaminated Gas Breakdown", IEEE. Trans. on E Vol. E-16, No. 5, October 1981.
- (8) A.H. Cookson, P.C. Bolin and H.C. Doepken, Recent Research in the United States on the Effect of Particle Contamination Reducing the Breakdown Voltage in Compressed Gas-Insulated Systems. CIGRE, 15-09, 1976.

◇ 저자소개 ◇

조 국 희 (趙國熙)

1950년 1월 13일생. 1987년 숭실대 공대 전기공학과 졸. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 선임연구원.

이 동 준 (李東俊)

1971년 12월 27일생. 1995년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

광 희 로 (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.