

SF₆ 가스 절연기기내에 도전성 금속이물 존재시 섬락전압에 미치는 영향

이방욱 · 함길호 · 김익수 · 구자윤
 LG 산전 전력연구소 · 한국전기연구소 고전압연구팀 · 한양대학교 전기공학과

Influence of Conducting Particle on the Breakdown Phenomena of SF₆ gas in Gas Insulated System

B. W. LEE · G. H. HAM · I. S. KIM · J. Y. KOO
 Electrotechnology R&D Center, LGIS · High Voltage Team, KERI · Dept. of Electrical Eng. I

Abstract-In this work, the behaviours of conducting wire type particles within the coaxial electrode gap energized with high ac voltage have been systematically investigated using charge simulation method. For this, spheroidal charge is adopted as a image charge for the CSM analysis in order to calculate the acquired charge of the particles which are erected on the surface of the outer electrode. For this purpose, the effects of the lengths and diameters of Cu, Al particles in gas insulated system have been studied by a numerical computation and particle lifting voltage, lifting field, breakdown voltage, acquired charge and travelling distance have been considered. From this, we understand that the particle behaviours have different characteristics according to the particle lengths and diameters. And a possible countermeasure, based on the proposed simulation, has been provided with a view to estimating the flashover voltage of SF₆ gas under the 1 atm.

1. 서 론

1960년대 이후 급속한 산업화로 말미암은 전력계통의 확장에 따라 이와 관련된 가스절연 시스템의 기술개발도 상당한 진전을 가져왔다. 이로 인하여, 개발 당초보다 전력기기의 소형화, 고성능화가 이루어졌으며 주요한 초고압 설비, 앞으로의 초초고압 송전에 있어서도 GIS가 적용될 전망이다.

이러한 GIS의 급속한 발전과는 달리, GIS 제조시의 부정확한 조립공정, 또는 운용 중의 기계적 응력 등으로 발생하는 금속이물의 존재로 인하여 시스템의 절연내력이 치명적으로 감소되어 사고에 이르는 경우가 많이 보고되고 있다[1~4].

본 논문에서는 절연성능의 심각한 저하를 야기하는 금속이물의 영향을 극복하기 위하여 금속이물 존재시 SF₆ 가스 절연과피 특성과 거동 양상에 관한 실험적, 해석적 방법을 동원하여 연구를 수행하였다. 특히 시험 챔버로서는 현재 전력계통에 사용되고 있는 362 kV GIS의 붓싱과 모선부분을 시험 챔버로 사용하여 국내 최초로 실규모 시험을 실시하였으며, 금속이물의 거동양상을 관측하고, 모의 시뮬레이션을 통해 그 영향을 분석하였다. 전하중첩법을 이용한 시뮬레이션을 통하여 대부분의 가스절연 기기에 많이 사용되고 있는 동축 실린더 구조에 높은 교류전압 인가시 실린더 외벽에 존재하는 자유도전성 금속이물의 부상 전계와 부상전압, 부상시 금속이물이 얻게 되는 전하량, 부상 금속이물의 높이 등에 대하여 수치 해석을 수행하였다.

이 결과를 바탕으로 선형 금속이물의 대전 전하량과 전계 및 정전력을 계산하였고 섬락전압을 예측하여 시험치와 비교 분석하였다. 수치해석 결과는 기존 외국의 시험결과와 그 경향이 거의 일치하였으며, 1기압에서의 절연과피전압의 시험값과도 일치하므로, GIS의 절연설계에 있어서 실질적인 기초자료로 활용될 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

2. 수치해석 결과 및 해석

2.1 금속이물 길이 변화에 따른 부상전계, 부상 전하량 금속이물이 부상시 획득하는 전하와 부상전계에 관해서는 금속이물의 형태와 존재 상태에 따라 일반적으로 다음과 같은 시험식으로 나타낼 수 있다[77].

금속이물	획득 전하량	기압, 부상전계
구형(sphere)	$Q = \frac{2}{3} \pi \epsilon_0 r^2 E$	$E_L = 0.49 \sqrt{\frac{\rho g \gamma}{\epsilon_0}}$
선형(wire) : 누운상태	$Q = 2\pi \epsilon_0 r L E$	$E_L = \sqrt{\frac{\rho g \gamma}{\epsilon_0}}$
선형(wire) : 기립상태	$Q = \frac{\pi \epsilon_0 L^2 E}{\ln(2L/r) - 1}$	$E_L = [\ln(2L/r) - 1] \cdot \sqrt{\frac{2\rho^2 g}{3\epsilon_0 L [\ln(L/r) - 0.5]}}$

* r : 이물의 반경 L : 길이
 ρ : 밀도 g : 중력가속도

그림 4.1과 그림 4.2는 각각 직경 1 mm 금속이물의 길이 변화에 따른 부상전계와 부상시 대전된 전하량을 나타낸 것이며 구리와 알루미늄을 대상으로 하였다. 금속이물의 길이가 길어질수록 부상 전계는 완만히 감소하는 양상을 나타내며 이는 다른 문헌에서의 시험결과와도 일치한다[2,3,5]. 위의 시험식으로부터 얻은 결과와 수치해석 결과를 비교해 보면, 금속이물의 길이가 길수록 더 낮은 전계에서 민감히 반응하여 부상이 일어난다는 해석을 뒷받침하는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 길이가 길어질수록 대전되는 전하량은 더 커지므로 횡단 전압은 낮아지고, 상부전극에 일찍 도달하여 결과적으로 절연과피전압도 낮아지게 된다.

2.2 금속이물 직경 변화에 따른 부상전계, 부상 전하량

그림 4.3과 4.4는 각각 길이 5 mm의 구리, 알루미늄 금속이물을 대상으로 직경이 0.4, 0.6, 0.8, 1 mm인 금속이물이 부상 개시할 때의 전계와 전하량을 계산한 것과 앞 절에서의 시험식에 의해 계산된 값을 비교한 것이다. 앞 절의 길이 변화와는 달리, 반경 크기의 변화에 대하여 부상 전계는 상당히 큰 폭으로 변화하는 것을 볼 수 있지만, 축적된 전하량은 소폭으로 변하고 있다. 직경이 커질수록 금속이물의 부상전계가 증가되는 이유는 금속이물의 반경 변화에 따라 축적된 전하량의 변화는 그림

4.4에서와 같이 크지 않지만, 금속이물의 무게가 증가하므로 증력의 영향이 상대적으로 길이 변화보다 더 크므로, 부상시 더 많은 전하의 축적이 필요하게 되기 때문이다. 따라서 부상전계는 금속이물의 직경이 증가할수록 길이 변화의 영향에 비해 큰 폭으로 상승하게 되는 것이다.

2.3 교류전압 인가시 금속이물의 이동거리 및 시간

앞절에서 구한 금속이물이 획득하는 전하량과 전계를 토대로 금속이물의 운동방정식을 해석하면, 동일한 전압하에서 금속이물의 길이와 반경이 변할 때, 전극사이에서 부상하는 높이와 그 높이까지의 부상에 걸리는 시간을 구하는 것이 가능하다.

그림 4.5는 동축원통 겹(240/120 mm)에서 100 kV 교류전압을 인가하였을 때 직경 1 mm인 선형 금속이물의 길이 변화에 따른 부상시간과 높이에 대한 수치해석 결과이다.

그림 4.5에 의하면, 동일 직경에 대하여, 금속이물의 길이가 길어질수록 부상이 빨리 이루어져서 상단 전극에 도달하게 되며, 150 μ s 동안 부상높이는 5 mm 금속이물의 경우 약 2.4 cm, 12 mm인 경우 약 6.1 cm로서, 동축원통의 전극 간격이 6 cm 이므로 12 mm 금속이물만이 이 시간동안 상부전극에 도달하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞서 해석한 바와 같이 금속이물의 길이가 길면 그에 따른 축적 전하량이 상대적으로 많아지므로 바다 전극으로부터의 부상이 쉽게 일어나며 상부전극에서 절연파괴가 일어날 확률이 커진다는 것을 뒷받침하고 있다.

그림 4.6은 동축원통 겹(240/120 mm)에서 100 kV 교류전압을 인가하였을 때 길이 5 mm인 선형 금속이물의 직경 변화에 따른 부상시간과 높이와의 상관관계에 대한 수치해석 결과를 보여주고 있다. 그 결과 120 μ s 동안 부상높이는 반경 0.3 mm인 금속이물의 경우 약 6 cm, 반경 0.4 mm인 경우 약 3.3 cm로, 동일한 길이에 대해서는 상대적으로 반경이 작은 쪽 즉 가벼운 금속이물일수록 부상이 쉽게 이루어져 더 긴 거리를 이동한다는 사실을 예측할 수 있으며 무거운 금속이물일수록 증력의 영향을 더 받으므로 부상에 필요한 전계가 더 커지는 것으로 해석할 수 있다.

2.4 금속이물 부상전계 해석에 의한 섬락전압의 예측

엔지니어링 관점에서 볼 때, SF₆ 가스 절연 시스템의 섬락전압을 예측하는 것은 매우 중요한 문제이나 아직까지 확실하게 제시할 수 있는 섬락전압의 예측식은 제시되지 못하였다. 일반적으로 평판-침 전극 배치에서의 섬락전압은, 공간전하효과를 무시하면 (4.1)식으로부터 구할 수 있다

$$V_{BD} = \frac{d}{f} E_c \quad (4.1)$$

여기서, a 는 갭 간격, E_c 는 임계섬락전계, f 는 전계 집중계수이다.

전계집중계수는 전극배치에 따른 전계의 집중 정도를 나타내는데, 전계이용률의 역수로서 정의된다. 전극에 인가된 전압을 V , 전극간 거리를 a 라 할 때 이용률 ζ 는 불평등 전계로 야기된 최대전계에 대한 표준전계의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta = \frac{(V/d)}{E_m} = \frac{V}{dE_m} \quad (4.2)$$

앞의 수치해석 결과에 의하면, 고정성 금속이물의 경

우에 금속이물의 선단부에는 4배의 전계가 집중되고 있으므로 금속이물의 부상시의 수치해석에서 구한 전계값의 4배의 값을 취하고 이를 갭사이의 간격에 대하여 계산을 하면 고정성 금속이물에 의한 섬락전압이 산출될 수 있다.

SF₆ 가스압이 1기압 일 때 모의 해석에 의한 계산결과와 2장에서 구한 시험에 의한 섬락전압을 비교한 그래프가 그림 4.7에 나타나 있다. 물론 여기서는 자유 도전성 금속이물 모의해석에 의한 부상전계값을 사용하였으므로 실제적인 오차가 존재하지만 그 경향이 일치하는 것을 볼 수 있다.

GIS에 실제적으로 많이 사용되고 있는 동축원통 구조에서, 금속이물이 존재하여 불평등 전계가 야기될 때의 섬락전압 V_{BD} 를 시뮬레이션하기 위해 식 (4.3)을 이용하였다.

$$V_{BD} = 89pd\zeta \quad (4.3)$$

여기서 p 는 가스압, a 는 갭간격, ζ 는 이용률이다.

2.1절과 2.2절에서 금속이물의 부상전계를 구하고 식 (4.2)에 의하여 이용률을 계산하면, 가스압이 1기압일 때 금속이물의 길이에 대한 섬락전압의 예측이 가능하다.

GIS 시험 시스템에 설치된 동축원통의 사이즈는 외경과 내경이 각각 240mm, 120mm 이고 SF₆ 가스압이 1기압 일 때 금속이물의 길이변화에 대하여 부상전계, 이용률, 섬락전압의 예측값은 다음 표와 같다.

길이(mm)	부상전계(kV/cm)	이용률	섬락전압 (kV _{rms})
5	10.09	0.3344	115.776
8	8.90	0.3277	107.245
10	8.38	0.3231	101.7
12	7.85	0.3184	96.20
15	7.61	0.3121	88.38

위 표의 수치해석 결과로부터 실험을 통하여 얻은 기립전압, 시뮬레이션에 의한 부상전압, 시험과 모의 해석에 의한 절연파괴전압, 절연물 코팅(38 μ m)을 실시하였을 때 부상전압의 향상 정도를 비교한 결과가 그림 4.8에 나타나 있다.

그림 4.8에서 알 수 있는 것은, 섬락전압의 예측치와 시험치가 거의 일치하고 있고 이를 토대로 금속이물 존재시 시뮬레이션을 통하여 구한 부상전계의 값이 타당함을 입증하였다. 이러한 결과를 바탕으로 금속이물이 존재할 때, 금속이물의 영향을 최소화하고 섬락전압을 예측할 수 있는 수치해석 기법의 틀을 마련하였다. 단 가스압의 효과를 수치해석에 고려할 수 있는 기법이 개발되어야 정확한 해석이 가능할 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 전하중첩법을 이용하여 외부 전계 인가에 의해 금속이물의 길이 및 직경변화에 따른 거동해석 결과, 금속이물의 부상 높이, 부상전계, 획득전하량 등을 산출하여 외국의 시험식에 의한 결과와 비교하여 수치해석 결과가 타당성이 있음을 입증하였다.

둘째, 수치해석 결과를 토대로 SF₆ 가스압이 1기압일 때 금속이물 존재시 섬락전압의 변화를 예측 분석한 결과, 실규모에서의 시험값과 거의 일치함이 확인되어 섬락전압의 예측이 가능하여 전극의 절연설계시 적용 가능성이 입증되었다. 단 실규모 전극에 적용하기 위해서는 가스압의 효과를 명확히 고려할 수 있는 기법이 개발되어야 한다

향후 본 연구 결과를 바탕으로 금속이물 존재시 SF₆

절연과파 메카니즘에 관한 해석, 금속 이물 모델링 기법의 향상, 가스압의 효과를 수치해석에 고려할 수 있는 기법의 개발, 코팅효과에 관한 수치해석 등이 추가된다면 금속이물에 더욱 효과적인 절연재료 및 절연설계 기술의 개발이 가능하리라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. H. Cookson and O. Farish, "Particle-In Breakdown Between Coaxial Electrodes in Comp SF₆". IEEE Trans. on PAS. Vol. PAS-92, pp.87-1973
- [2] J. R. Laghari and A. H. Qureshi, "A Review Particle-Contaminated Gas Breakdown". IEEE on EI, Vol. EI-16, No.5, pp. 388-398, October 1
- [3] H. Anis and K. D. Srivastava, "Free Cond Particles in Compressed Gas Insulation". IEEE on EI, Vol. EI-16, No.44, pp. 327-338, August 1
- [4] F. Endo et Al., "Particle-Initiated Breakdown Characteristics and Reliability Improvement in SF₆ Insulation", IEEE Trans. on Power Delivery, PWRD-1, No.1, pp.58-65, January 1986
- [5] 青柳浩邦, 小林伸光, "GISに混入した金属異物の挙動解析と絶縁破壊の理論的検討", 全學論 B, 108卷 4號, 昭 63

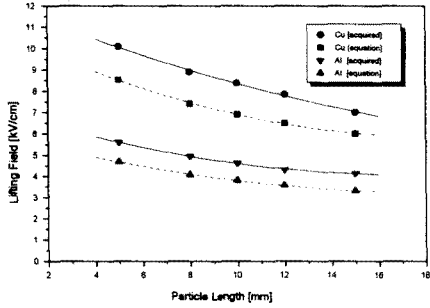


그림 4.1 금속이물 길이 변화에 따른 부상 전계

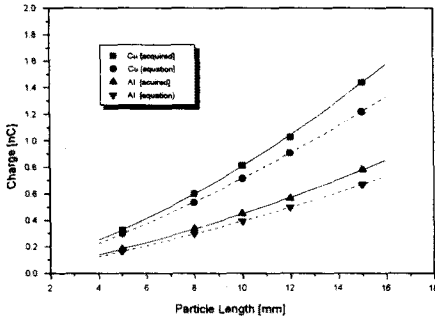


그림 4.2 금속이물 길이 변화에 따른 대전 전하량

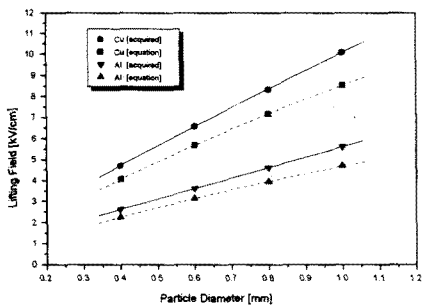


그림 4.3 금속이물 직경 변화에 따른 부상 전계

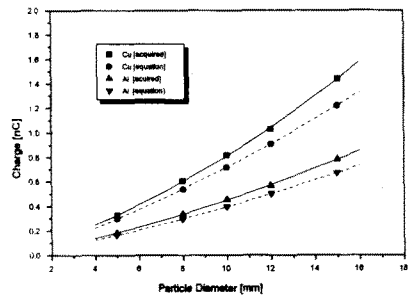


그림 4.4 금속이물 직경 변화에 따른 대전 전하량

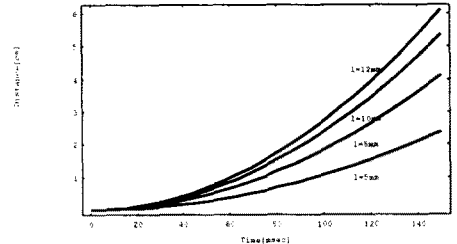


그림 4.5 100 kV 인가시 직경 1mm 구리 길이 변화에 따른 부상 높이

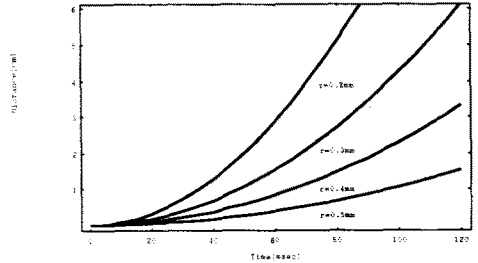


그림 4.6 100 kV 인가시 길이 5mm 구리 직경 변화에 따른 부상 높이

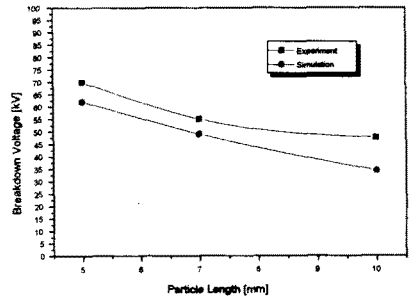


그림 4.7 고정성 금속이물 길이 변화에 따른 섬락전압의 비교

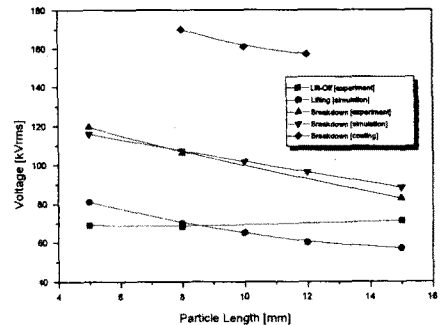


그림 4.8 동축원통 구조에서의 기립, 부상, 섬락 전압의 비교