

# GIS내에서 금속이물이 절연파괴에 미치는 영향

김민규<sup>o</sup>, 문인욱, 김윤택, 김익수, 이형호  
한국전기연구소

## The Effect of Conducting Particles on Breakdown Phenomena in GIS

Min-kyu Kim<sup>o</sup>, In-wook Moon, Youn-taeg Kim, Ik-soo Kim, Hyeong-ho Lee  
Korea Electrotechnology Research Institute

### ABSTRACT

SF<sub>6</sub> gas has become an important insulation medium in modern electric power apparatus, because of its high insulation withstand levels and good arc quenching capability. For the application of SF<sub>6</sub> gas in GIS the estimation of insulation properties is a fundamental point. Moreover the reduction of withstand levels in case of inhomogeneous fields caused by particles or fixed protrusions is of special interest.

It is known that the presence of free conducting particles in GIS can significantly lower the insulating level of SF<sub>6</sub> gas at elevated pressure and also it has been recently shown that dielectric strength is greatly reduced by fast transients such as disconnector surges where metallic particles are involved.

In this paper, we have designed the particle test chamber rated 362kV for the purpose of investigating the discharge characteristics in SF<sub>6</sub> gas where inhomogeneous fields are caused by metallic particles.

### 1. 서론

가스절연개폐장치(GIS)는 밀폐된 용기내에 개폐작동에 필요한 고전압기, 보호장치등을 내장하고 있으며, 전기적특성이 우수한 SF<sub>6</sub> 가스를 가압봉입한 컨테이너이다. GIS의 이용은 설치에 필요한 공간의 축소화가 가능하고 주변환경의 영향을 받지 않으며, 안정성, 신뢰성이 높으므로 오늘날 실용화가 확대되고 있다.

SF<sub>6</sub> 가스가 우수한 절연특성을 가지고 있다는 점은 주지의 사실이지만, 어떠한 원인에 의하여 GIS내에 미세한 금속이물(particle)이 혼입되는 경우에는 극부적으로 불평등전계가 형성되어 SF<sub>6</sub> 가스의 절연강도는 현저하게 저하하여 조건에 따라서 절연성능에 미치는 영향은 상대적으로 크게 되며, 탱크측 전계의 영향에 의하여 금속이물이 가스공간을 부상하여 비행하기도 하고, 절연물 표면에 부착하여 기기의 절연성능을 현저히 저하시키게 되므로 절연 사고가 발생할 가능성이 있고[1], 이러한 사실은 실제 운전중에 발생하는 주요 사고로 인식되고 있으며, 이러한 현상에 대해서 금속이물의 거동, 재질, 형상, 크기의 영향 및 가스압력과 관계등에 관한 연구가 광범위하게 수행되고 있는데, 이러한 것들은 가스절연기기의 구조, 형상, 배치등과 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 금속이물의 영향을 간단히 논하기는 어렵다.

한편, GIS 단로기 동작에 의해서 급준파과도전압이 발생하거나 불평등전계의 gap에 단로기 서어지를 인가하여 실험한 결과 섬락전압(flashover voltage)이 현저하게 저하는 경향이 있음이 알려져 있으며[2], 이러한 현상에 대해서 1986년 Bock등이 보고한 적이 있다. 그 이후 실용적인 관점에서 불평등전계에서의 SF<sub>6</sub> 가스중 방전특성에 대한 관심이 집중되었다.

본 논문에서는 금속이물이 GIS 내에 혼입된 불평등 전계에서 SF<sub>6</sub> 가스중의 방전특성을 연구하기 위한 기초 단계로서 Particle 시험용 체임버를 설계하였다.

### 2. GIS 절연성능에 미치는 금속이물의 영향

#### (1) 금속이물의 거동

GIS내에 도전성 금속이물이 존재하는 경우에 있어서 인가전압(a.c)을 상승시키면 금속이물은 정전력을 받으면서 복잡한 운동을 반복하게 된다. 이 운동은 인가되는 전압은 물론 이물의 형상과 크기, 모선의 치수, sheath와 고전압 도체와의 충돌조건, 가스의 압력등에 의해서 변화한다. 일반적으로 GIS는 동축원통전극으로 구성되어있기 때문에 이러한 금속이물의 운동을 이론적으로 취급하는 경우 관로 모선의 반경방향의 운동과 길이방향의 운동으로 나누어서 생각할 수 있다. 이때 금속이물에 작용하는 힘으로서 정전력, 중력, 점성력을 가정하면, 금속이물이 전계에 의해서 기립하여 부상하는 조건을 고려하여 sheath면을 원점으로하고 고압도체로 향하는 방향을 z좌표로 정하면 반경방향의 운동에 대해서 다음과 같은 운동방정식이 성립하게 된다.

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = F_e[e(t), Q_p] - mg - \mu S \frac{dz}{dt} \quad (1)$$

여기서, m:이물의 질량(kg), t:시간(s), F<sub>e</sub>:정전력(N), e(t):인가전압(=V<sub>m</sub>sinωt), Q<sub>p</sub>:이물의대전전하(C), g:중력가속도(9.8m/s<sup>2</sup>), μ:점성계수(1.91 × 10<sup>-4</sup>Pa·s로 가정) S:이물의 단면적(m<sup>2</sup>), r: 이물의 반경방향 좌표(m)

인가전압을 더욱더 상승시키면 금속이물의 부상높이는 증가하고, 결국에는 고압 도체와 탱크간의 가스·공간을 금속이물이 왕복주행(crossing)하게 된다. 그러나 이 단계에서는 아직 절연파괴에는 이르지 못하며 더욱더 전압을 증가시키면 금속이물이 중심의 고압도체와 충돌함에 따라서 미소한 spark가 금속이물과 고압도체사이에서 발생하게 되고 가스공간을 금속이물이 수회에 걸쳐서 왕복주행한 후에 절연파괴에 이른다. 그림 1에 참고로 금속이물의 거동을 simulation한 결과의 한 예를 나타내었다[3].

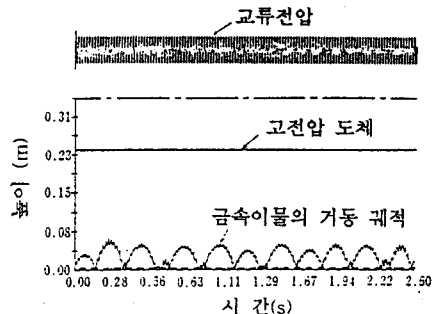


그림 1. 금속이물 거동을 simulation한 결과의 예 (알루미늄선, 길이 l = 10mm, φ = 0.25mm)

(2) 금속이물의 크기

금속이물이 존재하는 경우에 있어서 GIS의 절연성능과 관련하여 어느 정도 크기의 금속이물이 유해한 것인가를 논하는 것은 GIS의 절연성능이 구조, 형상 및 배치등과 밀접하게 관련된 종합적인 특성이므로 상당히 어렵다. 동축원통수평배치의 실제 GIS 모선에서의 실험 결과를 근거로 침상의 도전성 금속이물의 크기는 7-14mm 정도라고 보고하고 있다. 그림 2에 침상의 도전성 금속이물 (재질:알루미늄)의 크기 변화에 따른 섬락전압을 측정된 실험결과와 한 예[2]를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 금속이물의 길이가 길어질수록 섬락전압이 저하하는 것을 알 수 있다.

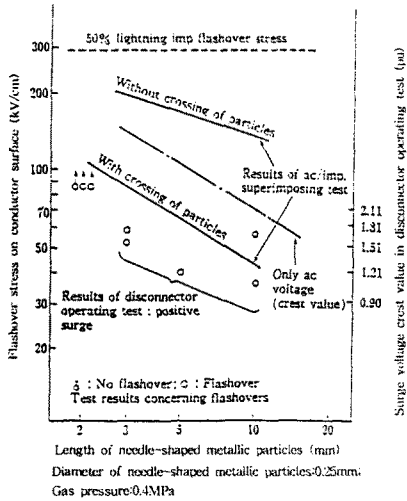


그림 2. Free 금속이물의 길이와 단로기 서어지 및 ac/뇌임펄스 중첩 절연특성

3. 금속이물 존재시의 V-t 특성

금속이물이 존재하는 경우 SF<sub>6</sub> 가스중에서의 V-t특성에 대해서 현재까지 보고된 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 금속이물의 존재에 의하여 절연특성은 저하하고 급준파영역에 있어서 특히 영향이 현저하다.
- 2) 절연특성의 저하는 정극성폭이 현저하며, V-t특성은 좌측 하강의 경향을 나타낸다.
- 3) 고주파 진동성 임펄스에 대해서는 파미 flashover가 많은데, 이것은 leader의 진전과정에서 방전형성지연에 의한 것으로 생각된다.

SF<sub>6</sub> 가스중에 금속이물이 존재하는 경우의 절연특성에 대해서는 금속이물의 크기, 위치, 가스압력등의 parameter에 의해서 영향을 받으며, V-t특성에 대해서는 수백us이상의 시간영역에 비하여, 수us이하의 시간영역에서의 섬락전압이 현저하게 저하하는데, 이것은 수백us이상의 시간영역에서는 금속이물의 선단에서 발생하는 코로나 안정화작용에 의한 영향을 받지만, 수us이하의 시간영역에서는 코로나 안정화작용이 없기 때문이다. 즉 코로나의 형성시간보다 빠른 영역의 현상으로 생각된다. 또한 고주파 진동성 임펄스에서의 파미 flashover에 대해서는 다음과 같은 방전메카니즘을 생각할 수 있다. 금속이물에서의 절연파괴와 같이 극단적인 불평등전계를 형성하는 경우에는 leader 진전파괴를 생각할 수 있다. Leader의 진전은 가스공간을 흐르는 변위전류가 주요한 역할을 수행한다. 특히, 고주파 진동성 임펄스의 경우에는 이러한 변위전류가 크게되며, 낮은 인가전압에서도 leader의 진전이 용이하여 절연파괴에 이른다고 생각된다. 이때 leader의 진전은 비교적 완만하므로 방전의 형성시간 지연이 길어진다고 생각된다.

4. 실험

(1) 실험장치

GIS내에서 금속이물이 절연 성능에 미치는 영향을 실험적으로 관측하기 위하여 그림 3과 같은 실험장치를 구성하였다. 실제 362kV급 계통에서 운용되고 있는 GIS 모선을 이용하여 가스 압력 변화에 따른 최대인가전압 500kV에 대한 섬락특성 시험과 금속이물의 거동 관측을 용이하게 하기 위하여 고압도체와 탱크사이에서 동축원통형의 알루미늄 접지 전극을 전개해석 결과에 근거하여, 표 1에 나타난 크기별로 제작하여 고압도체와 탱크간의 절연거리를 조정함으로써 낮은 인가전압에서도 절연파괴가 일어날 수 있도록 설계하였으며, 체임버 설계에는 다음과 같은 기준을 적용하였다.

① 고압도체와 탱크(외부도체) 사이

실제 전력기 절연설계의 설계전계강도(E<sub>d</sub>)는 50% 파괴전압의 정규분포 특성상에서 파괴확률을 0.3%이하로 억제하기 위하여 표준편차(σ)와 안전률(a)을 고려한다. 그러므로 설계 전계강도와 SF<sub>6</sub>가스의 허용 전계강도(E<sub>0</sub>)를 기준으로 가스 절연기의 절연설계를 하여야 하며, 그들의 상호관계는 다음과 같다.

$$E_d \leq E_0 (1 - 3\sigma) \cdot a \quad (2)$$

여기서, σ:5%, α:0.9라고하면, E<sub>0</sub> = a · P<sup>b</sup> [kV/cm] (a=7.4, b=0.88) 이므로 5기압에서 설계전계강도는 233.3kV/cm 이하로 한다.

내부도체 (φ=11.75cm) 표면의 이론적인 최대전계강도 E<sub>max</sub>는 다음과 같이 계산된다.

$$E_{max} = 89P \mu (1 + 0.1754(PR)) \text{ [kV/cm]} \quad (3)$$

$$= 89(5\text{기압})(0.445)(1 + 0.1754(5)(2 \times 5.875))$$

$$= 202.546 \text{ [kV/cm]}$$

여기서, P:압력, μ:전계이용률(=1/r, r:불평등계수), R:최대전계부 곡률반경의 조화평균[cm](1/R = 1/2(1/r<sub>1</sub> + 1/r<sub>2</sub>), r<sub>2</sub> → ∞ 이므로 R = 2r<sub>1</sub>)

따라서 설계기준을 만족하므로 내부도체의 크기는 φ=11.75cm이고, 탱크의 크기는 φ=50.0cm로 정하였다.

② 고압도체 말단과 탱크 cover 사이

고압도체 말단에서의 이론적인 최대전계강도 E<sub>max</sub>는 다음과 같이 계산된다.

$$E_{max}(\text{이론치}) = 89 P \mu (1 + 0.1754(PR)) \text{ [kV/cm]}$$

$$= 89 (5\text{기압}) (1/3) (1 + 0.1754(5)(5.875))$$

$$= 153.12 \text{ [kV/cm]}$$

E<sub>max(d=0)</sub> = f · E<sub>av</sub> = 3 · (V/d) 에서, 3 · (V/d) = 153.12 [kV/cm] 이므로, d = 3V/153.12 이다.

최대인가전압을 500kV로 가정하면, d = 9.796cm이다. 따라서 고압도체 말단과 탱크 cover 사이의 간격, d를 10cm로 설계하였다.

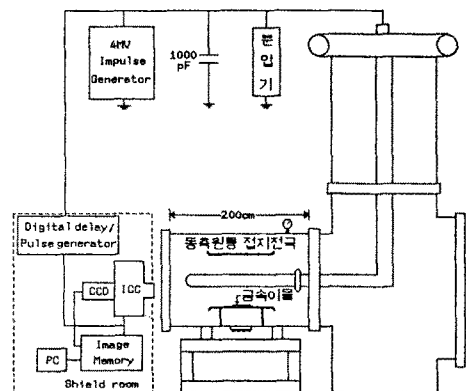


그림 3. 실험 장치

## Reference

- [1] W. Bock, W. Taschner, J. Gorablenkow, "Insulating Behaviour of SF<sub>6</sub> with and without Solid Insulation in case of Fast Transients", CIGRE 15-07, 1986
- [2] S. Kobayashi, S. Nishwaki, "Particle-Initiated Flashover Caused by Disconnecter Restriking Surges in GIS", 5th ISH, 12.03, 24-28 August 1987
- [3] 青柳 浩邦, "GIS에 混入した 金屬異物의 暴動解析と 絶緣破壊의 理論的檢討(交流電壓)", T.IEE Japan, Vol. 108-B, No.4, 1988
- [4] S.A. Boggs, F.Y. Chu, N. Fujimoto, "Disconnect Switch Induced Transients and Trapped Charge in Gas Insulated Substations", IEEE Trans. PAS-101, No.1, p.3593, 1982

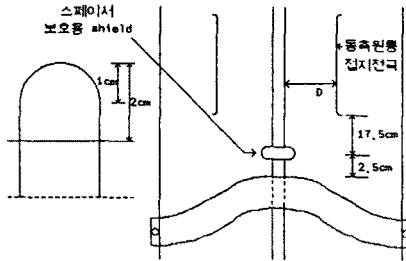


표 1. 각각의 압력에 대한 내부 동축인물집지전극의 크기

P [atm]	불평동계수 f	D [cm]	절연과과전압[kV] (이론치)
1	3.90	19.125	458
2	3.96	12.0	558
3	4.05	8.0	542
4	4.26	6.5	557
5	4.83	5.5	495
6	4.99	5	546
7	5.44	4.5	525

또한 Image Converter Camera(IMACON792)를 이용하여 고속 streak 사진을 촬영함으로써 고압 도체와 탱크 사이의 가스 공간에서 금속이물체 의한 방전진전을 관측하고자 그림 3에서와 같이 설치하여 a.c전압, d.c전압, 임펄스전압에 의한 가스공간에서의 절연파괴 메카니즘을 조사하고자 한다.

### (2) 실험방법

그림 3에 나타난 362kV급 GIS test model에서 금속이물체가 혼입된 상태인 불평동계에서 금속이물체의 길이에 대한 섬락 전압의 변화를 관측하기 위하여 길이가 각각 0.5, 1, 3, 5, 10, 15mm인 알루미늄(Al) 및 니켈(Ni)선을 이용하여 a.c인가시의 금속이물체의 거동을 관측한다. 또한 임펄스 전압에 의한 섬락메카니즘을 규명하기 위해서 전압파형의 영향을 조사한다. 먼저 임펄스전압의 파두장을 10us부터 500us까지 변화시키면서 섬락전압과 섬락될때까지의 시간과의 관계를 조사한다. 그리고 임펄스전압 상승시간의 변화에 따른 V-t특성에 미치는 가스압력의 영향에 대해서도 조사한다.

GIS 내부에서 각각 길이가 다른 침상의 금속이물체가 혼입된 상태에서 실제 단로기 동작으로 인하여 발생하는 수ns에서 수십ns의 단시간 상승시간과 100kHz에서 100MHz범위의 고주파성분을 가지는 복잡한 파형인 재접촉 서지전압(급준과도전압)에 의한 섬락특성을 조사하기 위해서 단로기 조작부와 particle 시험용 체임버를 결합하여 단로기 동작시험을 하므로써 금속이물체의 길이에 대한 섬락 전압의 특성을 관측한다. 또한 금속이물체가 혼입된 경우의 단로기 서지전압에 대한 내전압특성을 조사하기 위한 기본적인 실험으로서 교류전압과 뇌임펄스전압을 중첩했을 때의 섬락특성도 조사하고자 한다.

## 5.결론

금속이물체가 GIS내에 혼입되어 불평동계가 형성될때의 SF<sub>6</sub> 가스의 절연특성을 조사하고 절연특성에 영향을 미치는 금속이물체의 파라메타(크기, 형상, 재질) 및 가스압력, 인가전압의 파형과의 관계를 실험적으로 규명하고 Image Converter Camera로써 고속 streak 사진을 촬영하여 방전진전을 관측하기 위한 기초단계로서 현재 362kV 계통에서 운용중인 GIS을 모델로한 particle 시험용 체임버를 설계하였다.