

## Risk Assessment on Free Conducting Particle in GIS

尹 珍 烈\* · 朴 基 濬\* · 具 禪 根\*

(Jin Yul Yoon · Kijun Park · Sun-geun Goo)

**Abstract** - The main hazard leading to breakdown in GIS(Gas Insulated Switchgear) comes from free conducting particles, which can cross between two electrodes and cause dielectric failure under the influence of the electric field. Bouncing height of the particle can be an important factor to evaluate the possibility of breakdown occurrence. In this paper, how to estimate, outside a GIS, the bouncing height of the particle was newly suggested when GIS is in service. Both experimental results using 362 kV test chamber and computer simulation results on estimating the height were presented and compared with each other.

**Key Words** : GIS, particle, bouncing height, risk assessment, breakdown

## 1. 서 론

GIS의 절연과피는 도전성 파티클이나 도체간 접촉불량, 도체표면 불량, 스페이서 결함 등 여러 종류의 내부결함에 의해 발생하며, 이들 요인 중에서 절연과피를 일으키는 데에 가장 큰 비중을 차지하는 것이 도전성 파티클이다[1]. GIS 내부에 도전성 파티클이 존재할 경우 중앙도체에 인가된 전압이 일정 값을 초과하게 되면 외함전극 바닥에 놓여있던 파티클은 기립 동작과 함께 절연 공간에서 튀는 동작을 불규칙적으로 반복하게 된다. 이때 인가전계의 증가 혹은 기타 요인에 의해 파티클이 가스절연 공간을 가로질러 중앙도체까지 접근하게 되면 절연과피의 직접적인 원인으로 작용하게 된다. 이 때 파티클의 위 끝부분이 중앙도체 표면에 접촉했을 때 보다는 도체 표면으로부터 2 mm 간격 이내에 접근 했을 때 절연과피 발생확률이 가장 높은 경우에 해당하는 것으로 알려져 있다[2]. 도전성 파티클이 GIS 내에서 튀는 동작을 계속하고 있을 때 외부에서 운전자가 이러한 현상을 발견하는 일은 최근에 와서 UHF(Ultra High Frequency) 방전 검출기술과 같은 최신기술의 개발로 가능하게 되었다.

GIS 내에 파티클 결함이 검출되었을 경우 이 결함에 의해 GIS가 절연과피 사고까지 진행되어질지 여부에 대한 판단과 절연과피 발생 시기를 예측하는 일은 설비운전자의 입장에서는 대단히 중요한 일이다. 이러한 절연과피 발생 위험도 평가 기술은 전력기기 예방진단기술 분야에서 가장 어려운 부분에 해당하며 이 분야에 대한 집중적인 연구개발 노력에도 불구하고 현재까지 현장에 적용할 만큼 신뢰도가 높은 성과를 얻지 못하고 있다. A G Sellars et. al. 이 발표한 논문에 의하면 400

kV 실규모 GIS에서 20 mm 길이의 도선형 알루미늄 파티클이 양 전극을 횡단하는 데에 소요되는 시간은 50 Hz 인가전압에서 약 180 ms 정도임을 제시한바 있고[3], CIGRE WG 15.03이 발표한 논문에 의하면 moving metallic particle의 경우 파티클 길이가 밀리미터 단위의 길이부터 절연과피 요인으로 작용한다고 보고하고 있다[4]. CIGRE WG 15.03이 1999년에 발표한 논문에 의하면 위험을 일으킬 수 있는 길이인 mm 정도의 파티클이 외함표면에서 튀는 동작을 보일 때의 방전량은 대략 5 pC의 결보기 방전량을 발생시키므로 5 pC 이상의 방전량을 GIS 내부결함 검출 최소감도 기준으로 정한바 있다[5]. U. Schichler et. al.이 2000년에 발표한 논문에는 파티클이 중앙도체에 근접하였거나 충돌할 때 생기는 PD burst 현상 유무로서 파티클에 의한 위험도 평가방안을 제시한바 있으나[6] 절연과피 예방측면에서 볼 때 시간적으로 너무 늦어 적절한 예방방안이라 하기 어렵다. 이상에서와 같이 도전성 파티클은 GIS 결함중에서 절연과피를 일으키는 가장 흔한 요인임에도 불구하고 이에 대한 적절한 위험도 평가방안이 아직까지 제시되지 않고 있다.

본 연구에서는 도전성 파티클이 GIS 내에서 튀는 동작을 하고 있을 때 절연과피 발생가능성에 대한 최적의 위험도 평가방안을 제시함으로써 예방진단 시스템 기술 및 실제 현장에서 운전중인 GIS의 절연과피 사고를 예방하는 데에 기여하고자 하였다.

## 2. 본 론

## 2.1 선형 파티클의 거동 시뮬레이션

반경이  $r$ , 길이  $l$ , 밀도  $\rho$  인 도전성 파티클이 GIS의 외함전극 표면 위에서 튀는 동작을 할 때, 그 곳의 전계가  $E(t) = E_m \sin \omega t$  이고 외함전극 표면에서 중앙전극을 향하여 파티클이 상승하는 높이를  $y$  라 하면, 파티클의 운동방정식의 개략치는 (1)식과 같다[7].

\* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員

接 受 日 字 : 2001年 12月 28日

最 終 完 了 : 2002年 2月 25日

$$y = A_n \cdot [t \cos \phi_n + \frac{1}{\omega} \sin \phi_n - \frac{1}{\omega} \sin(\omega t + \phi_n)] - \frac{1}{2} g t^2 - R U_n t \quad (1)$$

여기서  $A_n = \frac{E_\phi E_m \epsilon_0 l}{\omega \rho r^2 (\ln \frac{2l}{r} - 1)}$

여기서  $E_\phi$ 는  $t = 0$  일때  $n$ 번째 거동 개시 때의 전계,  $U_n$ 은  $n$ 번째 거동 전 파티클이 전극에 부딪히는 속도,  $R$ 는 탄성계수(coefficient of restitution),  $E_m$ 은 인가 전계 피크치,  $\phi_n$ 은  $\sin^{-1}(E_\phi/E_m)$ ,  $\epsilon_0$ 는 공기의 유전율,  $g$ 는 중력가속도이다.

파티클 거동양상을 식 (1)을 이용하여 컴퓨터로 시뮬레이션한 결과의 일부를 그림 1에 나타내었다. 시뮬레이션에 사용한 조건은, 동축 원통형 구조의 362 kV급 GIS에서 중앙전극 반경은 60 mm, 외함전극 내부표면 반경은 248 mm이고, 알루미늄 파티클은 직경 0.5 mm, 길이 10 mm, 밀도 2,698 kg/m<sup>3</sup>이며, 인가전원은 140 kV<sub>rms</sub>, 60 Hz 이고,  $R = 0.7$  이다. 그림에서 횡축은 시간을 나타내고, 종축은 위쪽 그림은 파티클이 튀는 높이, 아래그림은 인가전압이다.

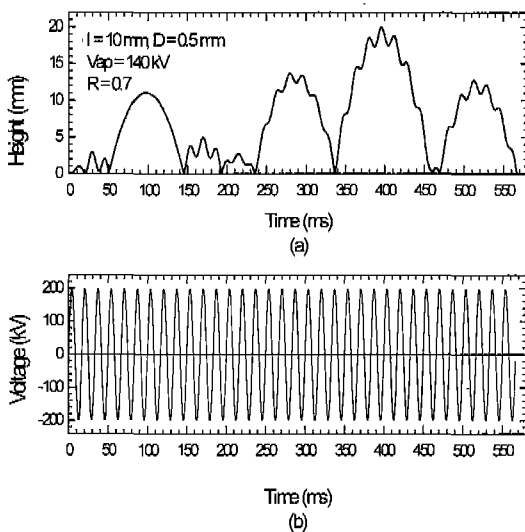


그림 1 시뮬레이션에 의한 알루미늄 파티클의 거동궤적. 길이 10 mm, 직경 0.5 mm, 인가전압 140 kV<sub>rms</sub>, (a) 거동 궤적, (b) 인가전압 파형

Fig. 1 Simulated particle motion trace for an aluminium particle of 10 mm in length, 0.5 mm in diameter at 140 kV<sub>rms</sub>, (a) motion trace, (b) applied voltage waveform

2.2 선형 파티클의 거동 실험

파티클 거동에 따른 제반 특성을 측정하기 위한 실험장치는 그림 2와 같이 구성하였다[8].

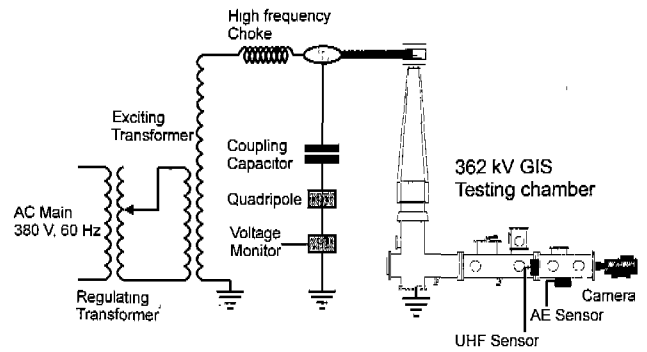


그림 2. 실험장치 및 교류전원의 구성도. Fig. 2. Experimental set-up and AC source

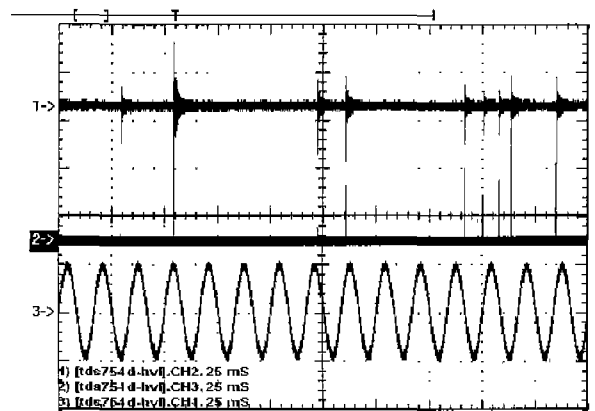


그림 3 알루미늄 파티클이 외함바닥과 충돌시 측정된 초음파 신호(위)와 UHF 신호(중간), 전압파형(아래) (파티클 직경 0.5 mm, 길이 10 mm, 인가전압 180 kV).

Fig. 3 Measured signals when an aluminium particle impacts on the enclosure. Ultra sonic signal(upper), UHF signal(middle) and AC voltage waveform(lower).

선형 파티클이 튀는 동작 과정에서 하강운동 중 외함전극과 충돌할 때의 부분방전에 의해 발생하는 UHF 신호와 초음파 신호특성을 조사하기 위해 120 - 240 kV의 교류 전압을 GIS에 인가하였으며 이때의 가스압력은 실제 사용 압력과 동등한 5 kg/cm<sup>2</sup><sub>abs</sub>였다. UHF 센서는 파티클 거동구간에서 가장 가까운 위치에 있는 스페이서 외부 표면에 배치하여 미소한 UHF 신호라도 모두 검출되도록 하였고, 초음파 센서는 파티클 챔버 외표면 하단에 부착하여 음향신호가 직접 센서에 전달되도록 하였다. UHF 센서의 감도특성은 500 - 1,500 MHz 대역에서 effective height 평균치가 8.4 mm 인 우수한 감도의 센서를 사용하였고, 초음파 센서는 DECI사에서 제작한 model No. SE2MEG-P1 304를 이용하였다. 또한 파티클이 튀는 동작은 고속카메라(1,000 fr/s)를 이용하여 촬영하였다. 측정에 사용한 오실로스코프는 Tektronix TDS 754D를 이용하였다. 그림 3은 직경 0.5 mm, 길이 10 mm의 알루미늄 파티클, 인가전압 180 kV에서의 초음파 신호와 UHF 신호,

인가전압 파형의 예이다. 그림에서 알 수 있듯이 UHF 신호와 초음파 신호는 전압 위상각과는 무관하게 검출되었으며, 대부분의 경우 초음파 신호와 UHF 신호가 동시에 검출되었다. 이것으로부터 파티클이 외함전극과 충돌할 때 대부분 부분방전 현상이 발생함을 알 수 있다. 실험조건을 달리하여 수회에 걸쳐 측정된 결과 모두는 그림 3과 같은 양상을 나타내었다.

2.3 파티클 결함에 대한 위험도 평가 방안

그림 1과 같이 나타난 파티클 거동에 대한 시뮬레이션 결과를 변형하여, 파티클이 외함바닥과 충돌할 때마다의 시간간격에 대한 파티클 상승높이를 그림 4에 나타내었으며, 그림 5는 그림 4의 일부를 확대한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 파티클이 1회 상승운동을 하는 데에 소요되는 시간간격이 클수록 상승높이가 증가하되 서로의 상관관계는, 그림에서 최대 상승높이를  $y$  (m), 1회 행정에 소요되는 시간을  $t$  (s)라 하면,

$$y = \frac{1}{8} g t^2 + h_0 \tag{2}$$

의 관계가 있음을 알 수 있었다. 여기서  $g$  는 중력가속도  $9.8 \text{ m/s}^2$  이다. 식 (2)에서  $(1/8) g t^2$  은 중력장에서 물체가 수직 상승운동을 할 때 최고점 높이와 상승운동에 소요되는 총 소요시간과의 상관관계를 나타내는 식이다. 식 (2)에서  $h_0$  는 파티클이 바닥을 출발한 이후 전계의 영향에 의한 상승높이 성분이며 식 (1)에서 탄성계수  $R = 0$  인 경우로서, 그림 4에서 알 수 있듯이 소요시간이 증가할수록  $(1/8) g t^2$  에 비해 상대적으로 작아짐을 알 수 있다.

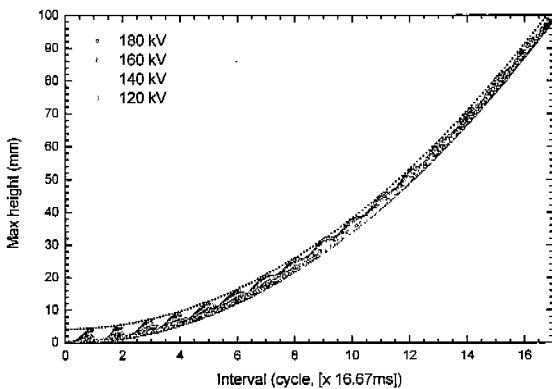


그림 4 인가전압 변화에 의한 파티클의 최대 상승높이와 외함바닥 충돌 시간간격과의 상관관계 계산 결과  
Fig. 4 Calculated max. bounce height versus time interval between particle bounces when applied voltage varying.

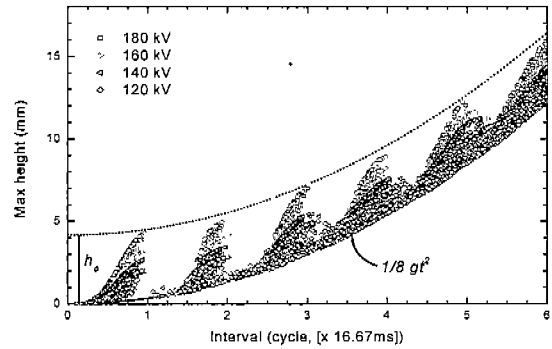


그림 5 그림 4의 부분 확대도.  
Fig. 5 Partly enlarged view of Fig. 4.

중력장에 존재하는 모든 물체는 식 (2)에서  $(1/8) g t^2$  항에 지배되므로  $h_0$  의 값이 상대적으로 작은 값을 고려하면 GIS 내에 존재할 수 있는 모든 물체는 전계에 의해 외함 바닥으로부터 중앙도체를 향하여 튀는 운동을 할 경우 파티클 형성이나 재질, 인가전압, 탄성계수 등이 어떤 값이든 관계없이 방전 시간간격을 측정함으로써 식 (2)로부터 상승높이 근사치를 계산할 수 있음을 알 수 있다[9].

식 (2)를 확인하기 위하여 GIS chamber 내에 선형 파티클이 상승운동을 할 때 상승궤적을 고속 디지털 카메라로 촬영하여 시간에 대한 궤적을 그림 6과 같이 나타내었다. 그림에서 황축 바로 위에 점으로 표시된 것은 UHF 신호가 측정된 시점이다. 그림 7은 그림6의 결과를 파티클이 외함바닥과 충돌할 때마다의 시간간격에 대한 파티클 상승높이를 나타낸 그림이다. 고속카메라로 측정된 파티클의 최대 상승높이와 운동 소요시간과의 상관관계인 그림 7은 시뮬레이션 결과인 그림 4와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

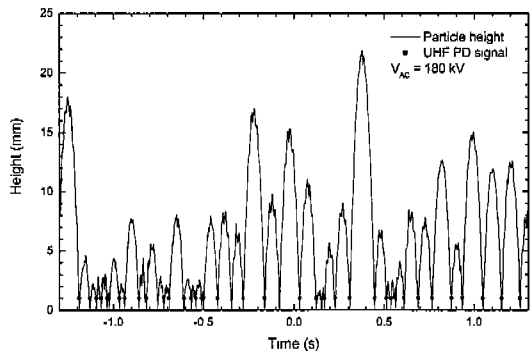


그림 6 고속카메라로 취득한 선형 알루미늄 파티클의 거동 궤적과 UHF 신호발생의 예.  
Fig. 6 Motion trace of wire type Al particle(line) and UHF signals(dots) captured by high speed camera.

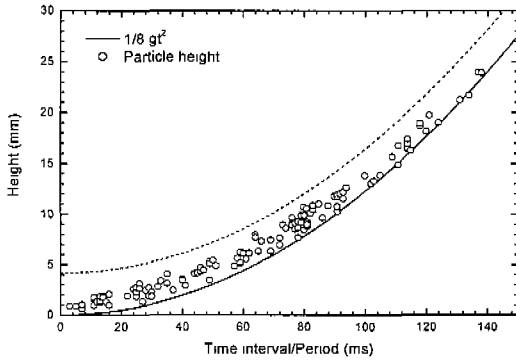


그림 7 부분방전 발생 간격과 그때 고속카메라로 취득한 파티클의 최고 상승높이. 실선과 점선은

$$y = \frac{1}{8}gt^2 \text{ 및 } y = \frac{1}{8}gt^2 + h_0$$

Fig. 7 Time intervals between partial discharges versus max. bounce height of particle captured by high speed camera

연구결과를 실험에 사용한 실규모 GIS에 시험적으로 적용해보면, 중앙전극 (직경 120 mm)으로부터 외함전극 (내경 496 mm)까지의 거리가 188 mm인 362 kV급 실험용 GIS에 전압이 인가된 상태에서 파티클에 의해 UHF 신호를 일정 시간동안 측정할 결과 최대 시간간격이 267 ms (= 16 cycle)로 측정되었다면 이 때의 파티클 상승높이의 최소 값은 수식  $y = 1/8 gt^2$  으로부터 87 mm 가 됨을 알 수 있다. 그림 4로부터 조사한 상승높이는 87 ~ 91 mm 이다. 이는 이 GIS의 중앙도체 높이인 188 mm의 약 50 % 높이까지 상승한 경우에 해당하므로 중앙도체에 근접할 가능성이 크다고 할 수 있으며 따라서, 절연파괴를 유발할 가능성이 매우 높아지므로, 운전중인 GIS인 경우 운전전압 증가를 최대한 억제하면서 파티클 제거작업을 신속히 수행해야할 필요가 있음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

운전중인 현장 GIS 내에 도전성 파티클 결함이 혼입된 상태에서 파티클이 전계의 영향을 받아 GIS 외함전극 표면으로부터 중앙도체를 향해 튀는 동작을 할 때 파티클에 의해 GIS 절연파괴 사고로 진행할 가능성을 평가하는 위험도 평가방안을 제시하였으며 실험을 통해 제시한 방안을 확인하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, GIS 내에 도전성 파티클이 상승하는 높이는 파티클이 상승운동을 하면서 GIS 외함과 부딪히는 시간간격을 GIS 외부에서 UHF 신호 혹은 초음파 신호를 측정함으로써 추정 가능하다.

둘째, 본 연구에서 최초로 제시한 파티클 상승높이 추정 수식  $y = 1/8 gt^2$  은 중력장에서 적용되는 수식이므로 GIS 내부에서 활동중인 파티클의 종류나 모양, 재질, 인가전압, 탄성 계수 등이 어떤 값이든 관계없이 적용이 가능하다.

셋째, 컴퓨터 시뮬레이션 방법에 의한 파티클 상승높이 통계 결과는 실험결과에 의한 통계치와 일치하였다.

넷째, 파티클 상승높이를 추정하기 위한 실험과정에서 파티클이 외함 바닥과 부딪힐 때 발생하는 UHF 신호와 초음파 신호는 동시에 발생하였다.

지금까지 본 논문에서는 파티클 한 개에 대해서만 연구한 결과를 기술하였다. 실제 GIS에서 한 구획 내에 활동 중인 파티클이 두개 이상 존재하는 경우는 흔하지는 않으나 이러한 경우 본 논문에서 제시한 방법으로 파티클의 상승높이를 추정하기에는 한계가 있다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

- [1] CIGRE Joint Working Group 33/23.12, "Insulation co-ordination of GIS : return of experience, on site tests and diagnostic techniques", Electra No 176, pp 67-97, Feb. 1998.
- [2] Westinghouse Research and Development Center, "Investigation of High-Voltage Particle-Initiated Breakdown in Gas-Insulated Systems," EPRI Project 7835 Report, Pittsburgh, Pennsylvania, March, 1979.
- [3] A G Sellars, O Farish and B F Hampton, "Assessing the risk of failure due to particle contamination of GIS using the UHF technique", IEEE Trans. on D&EI, Vol.1, No.2, pp323-331, April 1994,
- [4] CIGRE Working Group 15.03, "Diagnostic methods for GIS insulating systems", CIGRE session paper 15/23-01, 30 Aug.-5 Sept., 1992
- [5] CIGRE Working Group 15.03, "Partial discharge detection system for GIS : sensitivity verification for the UHF method and the acoustic method", ELECTRA No.183, pp75-87, April 1999
- [6] U Schichler, J Gorablenkow, A Diessner, " UHF PD detection in GIS substations during on-site testing", 8 DMMA, Edinburgh, UK, 2000
- [7] 박기준, 구선근, 윤진열, "362 kV GIS 내부 이물질 운동에 의한 UHF 부분방전 신호 검출", 2000년도 대한전기학회 추계 부문학술대회 논문집 p516-518, 2000
- [8] 윤진열, 박기준, 구선근, 한상욱, "GIS 내 알루미늄 파티클의 거동에 따른 UHF 신호발생 특성", 2000년도 대한전기학회 추계 부문학술대회 논문집 p525-527, 2000
- [9] Risk assesment method and detection system of partial discharge generated inside of gas insulated high voltage switchgear and gas insulated gear. 특허출원

## 저 자 소 개



**윤진열 (尹珍烈)**

1956년 3월 15일 생. 1982년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 충남대 대학원 진기공학과 졸업(공학). 현재 한국전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

Tel : 042-865-5872,

Fax. 042-865-5844

E-mail : jyoon@kepri.re.kr



**박기준 (朴基濬)**

1968년생. 1991년 인하대 공대 응용물리학과 졸업. 1993년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(석사). 1997년 Univ. of Central Florida 전기전자공학과 졸업(공학). 1996 - 현재 한국전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

Tel : 042-865-5895

Fax. 042-865-5844

E-mail : killer@kepri.re.kr



**구선근 (具禪根)**

1967년 10월 16일 생. 1986년 연세대 물리학과 졸업. 1994년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 한국전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

Tel : 042-865-5896

Fax. 042-865-5844

E-mail : freeon@kepri.re.kr