

GIS내에 함유된 자유 도전성 파티클의 거동해석

이방욱*, 구자윤*

*한양대학교 전기공학과

A Numerical analysis on the lift-off motion of Free Conducting Particle in GIS

Bang Wook Lee*, Ja Yoon Koo*

* Dept. of Electrical Eng. HanYang University

Abstract

In this work, the behavior of conducting wire type particles existing inside the cylinder type coaxial electrode has been systematically investigated by charge simulation method and electrostatic force analysis from the view point of the acquired charging before being lifted off into the gap under the high ac voltage. Spheroidal charge are adopted as a image charge for the CSM analysis in order to calculate the acquired charges of the particles which are erected on the surface of the outer electrode.

For this purpose, different material of the particle and their lengths and diameters have been considered in view to calculate their lift-off field, acquired charge and to understand their effect on the lift-off voltage.

The results imply that the particle lengths and diameters have an different influence on the particle behavior in GIS system.

1. 서론

고전압 가스 절연 기기(Gas Insulated System)의 절연 소호 매체로 이용되는 SF₆ 가스는 그 절연내력과 고온에서의 열적 특성이 우수하여 그 사용이 보편화되고 있으며, 그 결과 GIS 기기의 소형화, 실제 운용에 따른 안정성 등이 크게 향상되고 있다. 따라서 GIS 제조 기술도 그 동안 획기적으로 발전해왔으나, GIS 제조시의 부정확한 조립공정, 또는 운용 중의 기계적 손상 등으로 발생하는 파티클의 존재로 인하여 시스템의 절연내력이 치명적으로 감소되어 사고에 이르는 경우가 많이 보고되고 있다[1].

그러므로, 가스절연기기의 신뢰성을 향상시키고 경제적인 운용을 하기 위해서는 절연성능의 심각한 저하를 야기하는 파티클의 영향을 극복하여야 하며 그에 대한 연구가 선진외국에서 많이 행해져왔다. 그러나 국내에서는 아직까지 이에 대한 연구가 미진한 실정이며 절연 성능에 영향을 미치는 도전성 파티클의 영향을 규명하고 이에 대한 대책을 수립하는 것이 시급하다.

자유 도전성 파티클은 고정된 파티클과는 달리 인가전계의 영향으로 인하여 시스템 내에서 자유롭게 움직이며, 시스템의 구조나 크기, 인가전압에 따라 그 거동양상이 다르게 나타난다. 이러한 자유 도전성 파티클은 높은 전계왜곡을 일으키고 이에 따라 파티클 주변에서 전리운동을 야기한다. 또, 전극에서 이 파티클의 대전과 방전으로 인하여 미소한 스파크 방전이 발생하고 결국에는 갭간에 절연파괴가 일어나 GIS 사고의 대부분을 차지하게 된

다. 따라서 GIS의 설계 및 안정적인 운전을 위해서는 파티클의 거동과 부상, 그에 따른 절연파괴에 대한 연구가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 실제적으로 가스절연 기기에서 많이 사용되고 있는 동축 실린더 구조를 대상으로 교류전압을 인가하였을 때 실린더 외벽에 존재하는 자유도전성 파티클을 대상으로 부상 전계와 부상전압, 부상시 파티클이 얻게 되는 전하량 등을 수학적으로 해석하였다. 파티클의 거동을 해석하기 위하여 회전타원체 전하(spheroidal charge)를 가상전하로 사용하는 전하중첩법을 이용하여 선형 파티클의 대전 전하량과 전계 및 정전력을 계산하였다. 그 결과 구리와 알루미늄 파티클에 대하여 길이와 반경의 변화에 따른 부상전계 및 대전전하량, 부상 전압 등에 미치는 영향, 동축 실린더의 내경, 외경 변화에 따른 부상전압 등을 구하였으며, 절연파괴에 미치는 영향을 해석하였다.

2. 파티클 모델링 및 해석

동축 실린더 전극의 외벽에 존재하는 자유 도전성 파티클은 교류 전압이 인가되었을 때 대전된 후 부상하여 갭간을 즉시 가로지르지는 않으며, 전압이 증가하면 그 활동력은 더욱 커지게 되며 부상 전계 이상의 상당히 높은 전계가 형성될 때 갭을 가로지르게 된다. 일반적으로 파티클의 운동에 관련된 힘은 다음 방정식의 형태를 갖는다[2].

$$ma = \overrightarrow{F_E} - \overrightarrow{F_D} \pm \overrightarrow{F_G} \tag{1}$$

여기서 a는 파티클의 가속도, F_E는 정전력, F_D는 점성력, F_G는 중력이며, m은 파티클의 질량이다.

(1)식에서 가스 유체에 의한 점성력, 파티클로 인해 형성되는 공간전하와 영상 전하로 인한 힘은, 전극 위에 기립해 있는 파티클에 대해서는 그 영향이 미미하므로 무시한다면, 실제적으로 파티클 부상에 영향을 주는 힘은 정전력과 중력으로 볼 수 있으며, 각각 다음 식으로 나타낸다.

$$F_E = QE(t) \tag{2}$$

$$F_G = mg \tag{3}$$

(2)와 (3)식에 의하면 식 (4)와 같이 파티클에 작용하는 정전력이 중력보다 크게 되는 순간 파티클은 부상을 개시하게 된다.

$$F_E \geq mg \tag{4}$$

(4) 식을 해석하기 위해서는 우선 파티클에 작용하는 정전력을

구하하여야 하며 이를 위해서는 인가전압에 의하여 파티클에 대전되는 총전하량을 계산하는 것이 우선되어야 한다[3].

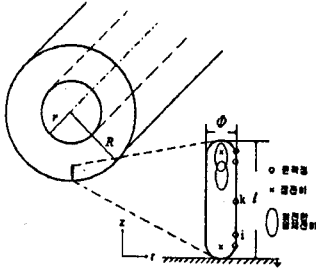


그림 1. 수치 해석 모델

그림 1은 수치계산에 사용된 동축 실린더 전극 구조 및, 접지된 외부 전극에 기립해 있는 파티클에 대한 가상전하 및 윤곽점의 배치를 나타낸 것이다.

전하중립법을 이용하여 접지면에 기립해 있는 파티클의 대전 전하량을 다음과 같은 순서에 의하여 계산하였다. 그림 1과 같이 파티클의 선단 부분에 점전하를 각 1개씩, 0.5mm 간격으로 회전타원체전하[4]를 가상전하로써 배치하여 해석의 정밀성을 기하였으며 파티클의 길이 및 반경 변화에 따라 가상전하의 수를 가감하였다.

sheath면에 기립해 있는 파티클의 경우, 고전압 도체 전극의 전위를 V_0 라 하면 파티클에 배치한 윤곽점 i 에 대하여 전하중립법으로 계산하면 다음 식이 성립한다.

$$V_{0i} + \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j = 0 \quad (5)$$

여기서, P_{ij} 는 전위계수이며, n 은 윤곽점의 갯수이다.

이때, 동축 실린더의 외부반경을 R , 내부반경을 r 이라 하면 파티클의 한 윤곽점에서의 전위는 $V_m \sin \omega t$ 의 교류전압 인가시 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$V_{0i} = V_m \sin \omega t \frac{\ln \frac{R}{R-Z_i}}{\ln \frac{R}{r}} \quad (6)$$

여기서 Z_i 는 윤곽점 i 의 z 좌표이다.

그러므로, 파티클 내의 대전 전하량은 전위계수행렬의 역행렬과 파티클 각각의 윤곽점에 미치는 전위에 의하여 다음식으로 나타난다.

$$[Q_j] = [P_{ij}]^{-1} [-V_{0i}] \quad (7)$$

(7)식에 의하여 파티클이 부상시 얻게 되는 전하량을 알 수 있고, 파티클에 작용하는 정전력은 고전압 동축 실린더에 의한 전계와 파티클 내의 가상 전하와의 벡터 합으로 표현할 수 있다.

$$F_E = \sum_{j=1}^n E_j Q_j \quad (8)$$

여기서 $E_j = V_m \sin \omega t \frac{t}{(R-Z_j) \ln \frac{R}{r}}$

또 파티클에 미치는 중력은 다음과 같은 식에 의하여 계산하였다.

$$F_G = mg = \text{파티클의비중} \times \left[\frac{4}{3} \pi r^3 + \pi r^2 h \right] \times 9.8 \text{m/sec}^2$$

여기서, r 은 파티클의 선단반경, h 는 파티클의 길이 이에서 양 선단부를 제외한 것이다.

3. 수치해석 결과 및 해석

3.1 선형 도전성 파티클의 동전위면 및 전계 분포

그림 2는 직경 1mm, 길이 10mm 파티클에 형성되는 동전위면 및 전계분포를 나타낸 것이다.

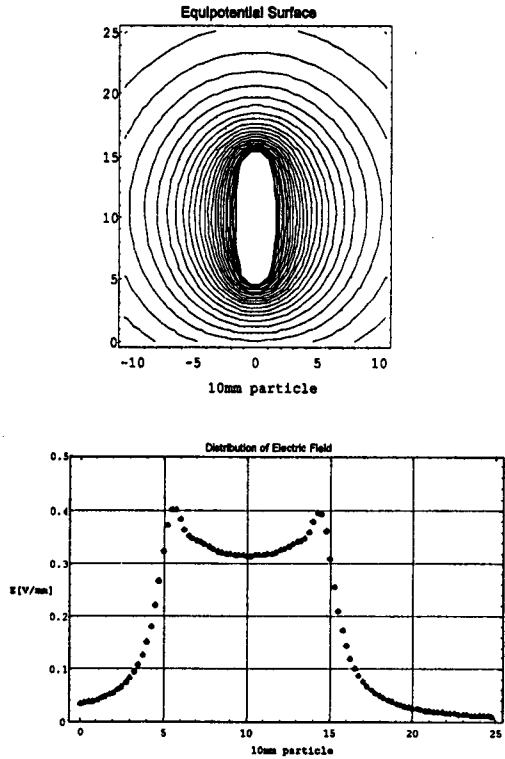


그림 2. 파티클의 동전위면 및 전계분포 해석

시뮬레이션 결과에 의하면, 파티클의 선단부에는 파티클이 존재하지 않을 때의 전계보다 약 4배의 전계가 집중되고 있다. 이로 인하여 sheath에서 고전압 도체로 파티클이 부상하여 이동할 때 선단부의 전계집중으로 말미암아 미소방전이 발생하여 집간의 절연파괴의 원인이 되며, 이는 다른 연구보고와도 일치한다[6].

3.2 파티클 길이에 따른 부상전계, 부상 전하량

균일 전계에 놓여 있는 도전성 파티클은 교류전압 하에서 어떤 전압 값에서 부상을 시작하고, 전압이 상승되면 파티클은 집간에서 반동운동(bouncing)을 하는데 그 상승 높이는 인가전압에 의하여 결정되어진다. 전압이 좀 더 상승되면 반동 높이가 코로나 전류는 증가하게 되어 결국 절연파괴가 일어난다. 부상전압은 가스압이나 가스 종류와는 무관하며, 반동 개시 이후에 파티클에 미치는 전압은 부상전압보다 약 30% 더 낮은 것으로 알려져 있다[6].

본 해석에서는 직경 1mm의 구리와 알루미늄을 대상으로 길이를 5, 7, 10, 12mm로 변화시켜 가면서 길이 변화에 따른 부상 전계와 파티클이 얻게 되는 전하량을 수치해석을 통해 구하였다.

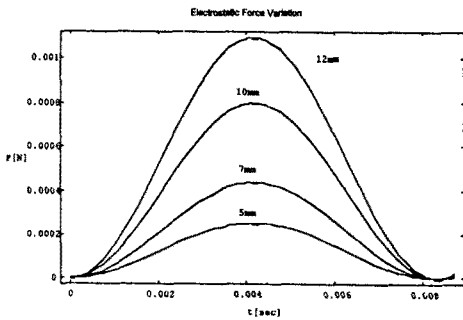


그림 3. 100kV 교류 전압 인가시 정전력의 변화

그림 3은 100kV 교류 전압 인가시 반 주기 동안에 sheath 위에 기립해 있는 파티클에 미치는 정전력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일 전압 하에서 길이가 길어질수록 더 강한 정전력이 파티클에 가해지고 있음을 알 수 있다.

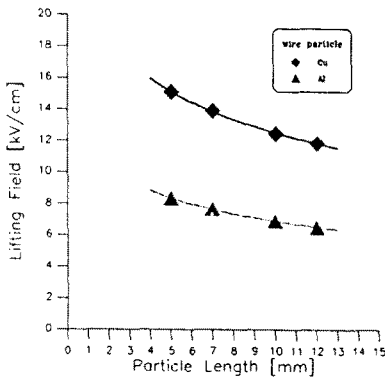


그림 4. 파티클 길이 변화에 따른 부상 전계

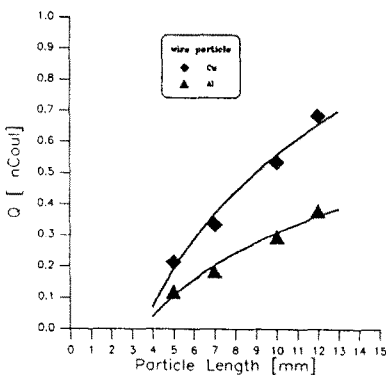


그림 5. 파티클 길이 변화에 따른 대전 전하량

그림 4와 5는 각각 길이 변화에 따른 파티클의 부상전계와 부상시 대전된 전하량을 나타낸 것이며 구리와 알루미늄을 대상으로 하였다. 파티클의 길이가 길어질수록 부상 전계는 완만히 감소하는 양상을 나타낸다. 이것은 파티클의 길이가 길수록 더 낮은 전계에서도 민감히 반응하여 부상이 일어난다는 것을 의미한다. 마찬가지로 길이가 길어질수록 대전되는 전하량은 더 커지므로

로 더 낮은 전압에서 부상이 일어나게 되며, 결과적으로 절연파 퍼전압도 낮아지게 된다. 또 구리는 알루미늄에 비하여 밀도가 3배 정도 크지만 부상 전계는 약 1.8배 정도로 더 높아지고 있음을 알 수 있는데 이는 부상전계는 파티클 물질의 밀도의 제곱근에 비례한다는 사실을 입증하고 있다[6].

3.3 파티클 직경 크기에 따른 부상전계, 부상 전하량

그림 6과 7은 각각 길이 5mm의 구리, 알루미늄 파티클을 대상으로 직경이 0.4, 0.6, 0.8, 1mm인 파티클이 부상 개시할 때의 전계와 전하량을 계산하여 그 변화를 나타내고 있다.

이 경우에는 앞의 길이 변화와는 달리 반경 크기의 변화에 대하여 부상 전계는 상당히 큰 폭으로 변화하는 것을 볼 수 있지만, 축적된 전하량은 소폭으로 변하고 있다. 직경이 커질수록 파티클의 부상전계가 증가되는 것은 파티클의 길이 변화보다 반경 변화가 파티클의 부상전계에 더 큰 영향을 준다는 것을 의미한다. 그 이유는 파티클의 반경 변화에 따라 축적된 전하량의 변화는 크지 않지만 중력의 영향이 상대적으로 길이 변화보다 더 크므로, 부상시 더 많은 전하의 축적이 필요하게 되고, 따라서 부상전계는 큰 폭으로 상승하게 되는 것이다.

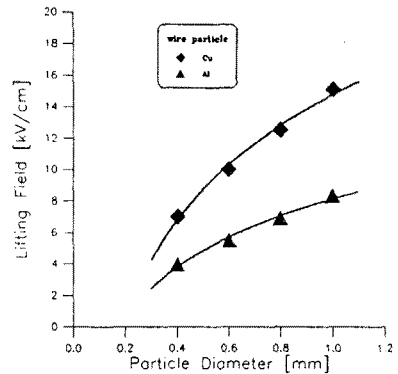


그림 6. 파티클 직경 변화에 따른 부상 전계

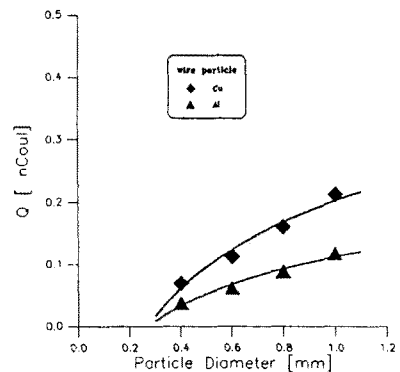


그림 7. 파티클 직경 변화에 따른 대전 전하량

3.4 동축 실린더 내,외경 변화에 따른 부상전압 비교

그림 8과 9는 외경, 내경의 크기가 각각 $\phi = 240/120\text{mm}$, $350/120\text{mm}$, $350/210\text{mm}$, $430/210\text{mm}$ 인 동축 실린더 전극에 대하여 부상전압을 비교한 것이다. 수치 해석 결과 부상 전계 및 대전되는 전하량은 실린더의 크기에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있었으며 임계치를 넘어섰을 때만 부상이 일어났다.

내경과 외경의 비, 즉 R/r 의 영향은 단지 부상전압의 차이만을 가져오며 그 값이 커질수록 길이의 증가에 따라 부상전압은 낮아지며, 반경의 증가에 따라 부상전압은 높아짐을 확인할 수 있다.

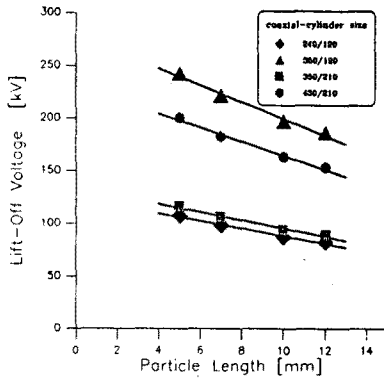


그림 8. 동축 실린더 전극 외,내경 변화시 파티클 길이 변화에 따른 부상 전압의 비교

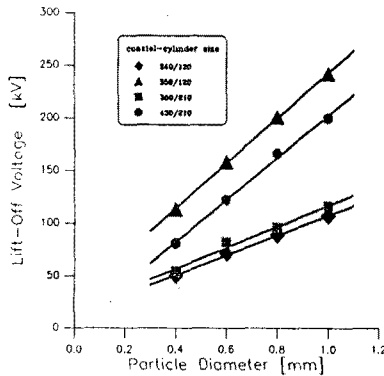


그림 9. 동축 실린더 전극 외,내경 변화시 파티클 직경 변화에 따른 부상 전압의 비교

4. 결론

GIS내에 유입된 파티클이 인가 전압에 의하여 부상할 때 파티클에 미치는 부상 전계의 영향을 규명하기 위하여, 동축 실린더 전극을 대상으로 전하중첩법을 이용한 전계해석을 실시하여 파티클 길이, 파티클 반경, 동축 실린더의 외경과 내경의 변화에 따른 부상전계 및 부상시 일게되는 전하량의 변화를 계산하여 다음과 같은 사실을 알게 되었다.

첫째, 파티클의 선단부에는 주변 전계에 비하여 약 4.2배의 전계가 집중되고 있으므로, 갭을 가로질러 전극에 도달할 때 파티클 팁에서 일어나는 미소방전의 원인이 된다.

둘째, 동일 전압 하에서는 길이가 길어질수록 더 강한 정전력이 파티클에 가해지고 있다.

셋째, 파티클의 길이가 길어지면 부상전계는 완만히 감소하고, 축적된 전하량은 큰 폭으로 증가하여, 부상전압은 상대적으로 낮아진다.

넷째, 파티클의 반경이 커지면 부상 전계는 큰 폭으로 증가하

고, 축적된 전하량은 완만히 증가하여, 부상전압은 상승한다. 즉 가늘고 긴 파티클일수록 부상전압은 낮아져서 시스템의 운전전압에서도 절연파괴에 이를 가능성이 높다고 생각된다.

다섯째, 동축 실린더의 내경에 비해 외경이 커질수록 길이의 증가에 따라 부상전압은 낮아지며, 반경의 증가에 따라 부상전압은 높아지게 되지만, 부상전계 및 축적전하량의 변화는 없다.

위와 같은 결과는 수치해석을 통해 단순화된 경향을 구한 것으로서, 한걸음 더 나아가서는 자유도전성 파티클을 대상으로 한 실제적인 거동관측 및 해석, 선단부의 전계영역의 해석, 파티클의 거동 양상, 파티클 검출 방법 및 부상억제책에 대한 더 심도 깊은 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] J. R. Laghari and A. H. Qureshi, "A Review Of Particle - Contaminated Gas Breakdown", IEEE Trans. on EI, Vol. EI-16, No. 5, pp. 388~398, 1981
- [2] S. M. El-Makkaway and S. S. El-Dessouky, "Computation of the Dynamic Motion of Free Conducting Particles in SF₆ Compressed Gas under Switching impulse superimposed on a DC Voltage", 9th ISH, pp. 8334-1~8334-4, 1995
- [3] 青柳浩邦, 小林伸光, "GIS에混入した金屬異物の暴動解析と絶縁破壊の理論的検討", 全學論 B, 108卷 4號, 昭 63
- [4] 里, 毛受, "回轉丸體電荷を用いた界計算法", 全學論 A, 100, pp. 121~125 昭 55-3
- [5] F. A. M. Rizk et Al, "Particle-Initiated Breakdown in SF₆ Insulated Systems Under High Direct Voltage", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-98, No. 3, pp. 257~269, 1979
- [6] H. Anis and K. D. Srivastava, "Free Conducting Particles in Compressed Gas Insulation", IEEE Trans. on EI, Vol. EI-16, No. 4, pp. 327~338, 1981