

Lift-Off Voltage and Partial Discharge Characteristics of Free Metallic Particles in GIS

尹 珍 烈* · 韓 相 玉**
(Jin Yeol Yoon, Sang Ok Han)

Abstract - Both motion of free metallic particles from which most GIS internal failures are caused and partial discharges from the particles were examined using EHV GIS test chamber.

Effects from particle length and gas pressure which are main factors to lead to breakdown failure were investigated theoretically and experimentally.

Magnitude of both lift-off voltage and partial discharge inception voltage were measured respectively and, through these measurements, this paper showed the possibility of predicting breakdown fault and of taking action to prevent the fault in advance.

The measurement of partial discharge when the particles began to move could be adopted to decide minimum sensitivity in developing predictive diagnostic equipments.

Both the amount of apparent discharge and real discharge in GIS were examined theoretically and experimentally, then experimental results were analyzed on the basis of the theory.

Key Words : GIS, Partial Discharge, Particle, Apparent Discharge, Motion of Particles

1. 서 론

GIS는 신뢰도는 높으나 내부고장 발생시 피해가 광범위하고 복구에도 수일이 소요되는 등, 고장에 의한 과급효과가 매우 크다. 또한, 운전전압이 765 kV 등 초고압 설비일 경우 또는 대용량 발전소의 경우 그 영향은 더욱 확대되어진다. 이에 대한 대응방법으로 예비설비를 확보하는 방안도 있으나 이 경우 시설 투자비의 과다부담 문제가 수반되기 때문에 바람직한 대처방안이라 하기는 어렵다. 근래에 와서는 내부이상을 사전에 인지하기 위한 예방진단설비를 GIS에 부가하는 방향으로 진행되는 추세에 있다. 이렇게 할 경우 기기 내부에서 진행중인 결함을 운전자가 발견하여 사전조치를 가능하게 하므로써 불시정전을 예방하고 소요비용도 대폭 감소시킬 수 있는 큰 이점이 있다. 이러한 이점 때문에 국내에서도 2001년에 운전개시 예정인 765 kV 변전소에 On-Line 예방진단설비를 갖출 것을 계획하고 있다.

GIS에서 발생하는 전기적 고장요인중 가장 큰 비중을 차지하는 것이 도전성 금속입자이다[1,2]. GIS 내 금속입자 등 다양한 결함들을 검출하기 위하여 지금까지 여러 가지 방법

이 제시되어 왔으며[3], 이들중 가장 효과적인 방법중의 하나는 결함들에 의해 발생하는 부분방전 현상을 측정하는 것이다. B. F. Hampton 등이 제시한 전자파(UHF) 측정법[4]이나 B. H. Wahlstrom 등이 제시한 음향신호 측정법[5,6]은 현재 현장에서 활용되고있는 기술로서 지금까지 제시된 GIS 진단기술중 실용도가 매우 높은 기술들로 평가받고 있으며, 이들 또한 부분방전 현상을 이용하여 결함의 위치와 결함종류를 판별하는 기술이다. 그러나 이들 전자파 측정법이나 음향신호 측정법은 금속입자에 의한 부분방전 발생 유무를 판별하고 발생위치를 탐색할 수는 있으나 부분방전 측정을 통한 입자의 거동과약 즉, 위험도 평가에는 한계가 있다. 따라서 GIS 내에서 금속입자가 존재할 때 입자의 거동에 따른 부분방전 특성을 추적하는 것은 앞으로 이 분야 연구에서 해결해야할 중요한 과제중의 하나이다.

본 논문에서는 현장 GIS에 적용하기 위한 예방진단기술 개발에 필요한 전 단계 연구로서 금속입자에 의한 사고발생 위험도를 평가하기 위한 일환으로 실규모 GIS에서 금속입자에 의한 절연과피 메카니즘을 규명하고 입자의 기립거동과 부분방전 현상과의 상관관계를 이론과 실험을 통해 규명하므로써 후속연구인 GIS 예방진단기술 및 시스템 개발에 필요한 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 선형입자의 방전현상

선형 금속입자가 동축원통구조 전극 내에 놓여지면 입자

* 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 先 任 研 究 員

** 正 會 員 : 忠 南 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1998 年 7 月 30 日

最 終 完 了 : 1999 年 1 月 15 日

의 형상, 방향, 전계강도의 영향하에 전하량 Q_L 로 대전되고, 주위 전계에 의한 정전력 E_{QL} 가 입자의 중력크기를 증가하게 되면 입자는 부상(혹은 기립)하게 되며, 이때 영상전하에 의한 정전력은 감소되어 입자에 작용하는 정전력은 더욱 증가하게 된다. 이 상태에서 입자는 외부전극 위에서 Bouncing을 하게되며 인가전압이 계속 증가하게 되면 입자는 부상을 시작하여 양 전극을 횡단(Crossing)하게되며 중앙전극 근처에 접근했을 때 중앙전극이 양(Positive)극성일 경우 절연파괴(Breakdown)로 이어지는 것이 일반적인 현상이다[2,7].

선형입자가 기립 또는 부상하는 데에 필요한 전계의 크기 및 입자가 기립하기 전에 누운상태에서 대전되는 전하량의 크기(Q_L)는 다음과 같다.[8]

$$E = [rg\rho / (1.43 \epsilon_0)]^{1/2} \quad (1)$$

E : 전계 강도, r : 입자의 반경, g : 중력가속도 ($=9.8[m/s^2]$) ρ : 입자의 밀도 [kg/m^3], ϵ_0 : 유전율 ($=8.854 \times 10^{-12}[F/m]$)

$$Q_L = 2\pi \epsilon_0 r l_0 E \quad (2)$$

l_0 : 입자길이[m], E : 전계강도[V/m], r : 입자의 반경 [m], ϵ_0 : 유전율

선형입자는 기립으로부터 횡단까지의 과정에서 외부전극과의 방전 또는 기중방전을 일으키게 된다. 전극사이에서 이동하는 대전체에 의한 방전전류를 이론적으로 고찰하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

그림 1에서 판전하 q 가 이동할 때 회로상에 나타나는 걸보기 방전전하의 크기는 식 (3)과같이 표현된다.[9]

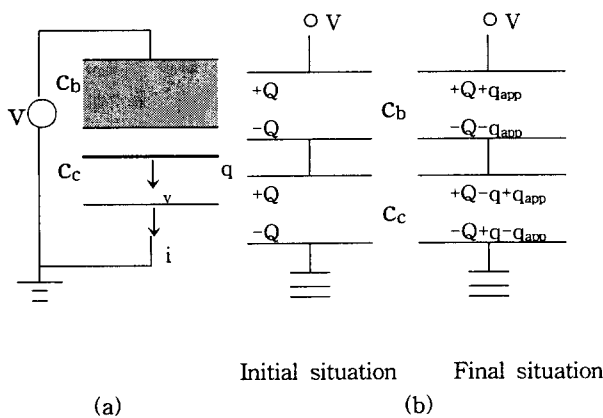


그림 1. Capacitor 회로를 이용한 전하의 이동에 따른 방전 전류 해석

(a) 회로개념도 (b) 등가회로

Fig.1 Analysis of discharge current caused by moving charge using capacitance circuit

(a) Conceptual circuit (b) Equivalent circuit

$$Q_{app} = q \cdot C_b / (C_b + C_c) \quad (3)$$

Q_{app} : 걸보기 방전전하, q : 진 방전전하, C_b : 입자와 인가도체사이의 정전용량, C_c : 입자와 탱크와의 정전용량

식 (3)에 의하면 입자의 부상 또는 하강시 방전량의 측정치(Q_{app})는 탱크표면과 입자, 그리고 도체와 입자사이의 정전용량 크기에 의해 결정됨을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치 및 구성

본 연구를 위해서 GIS의 실험용 챔버 (Chamber)를 사용하였고, 이때 구성된 실험설비는 그림 2와 같다.

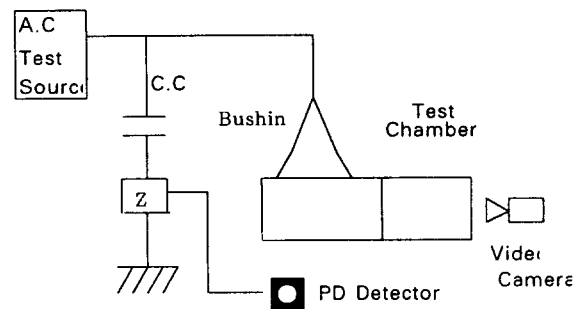


그림 2. 실험장치도

Fig. 2 Experimental apparatus

실험설비를 구성하는 각 요소별 규격은 다음과 같다.

실험용 챔버 내의 도체에 전압을 가하기 위한 전원은 Mitsubishi제 정격 1,100 [kV], 2,200 [kVA] 이며, 커플링 콘덴서(Coupling Condenser)는 Mitsubishi제 KP Type 정격 1,100 [kV AC], 1,000 [pF]를 사용하였다. 실험용 챔버 내 입자(Particle)의 거동을 관찰하기 위해 비디오 카메라(Video Camera, LG전자 LC-V909 Model)를 사용하였으며, PD 신호측정을 위한 Detector는 Haefely제품 TE 571 형식을 사용하였으며 이 측정기의 규격은 PD Measurement Display 0-999 [pC/nC], Band Width 40-400 [kHz], Test-Voltage Frequency Range 40-200 [Hz]이다. PD 신호입력 매칭용인 Coupling Quadripole은 Haefely제품 AKV 572를 사용하였고 Setting치는 2,000 [mA], 1~2 [nF]로 하였다.

Test Chamber 전체적인 규모는 800 [kV]급 GIS 크기로써 구조는 전원인입을 위한 붓싱부와 도체연결부, 그리고 입자의 실험을 행할 수 있는 원통형 동축전극으로 구성되어 있다. Chamber 전극부의 구조는 그림 3과 같다. 전극 내부 구조는 중앙부에 Al 내부도체가 있고 이 도체와 외함 사이에는 중간전극으로 동축원통형 Al접지전극을 배치하였다. 중간전극은 취부와 분리를 자유롭게 할 수 있는 구조이며, 따라서, 다양한 크기의 접지전극으로 실험이 가능한 구조이다.

스페이서와 인접하여 스페이서 보호용 쉴드를 배치하였고 Chamber 내부에서 일어나는 각종현상을 관찰하기 위해 Chamber 윗면 및 측면에 전부 6 개의 관측창이 배치된 구

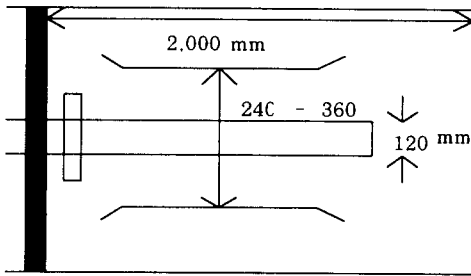


그림 3. 실험용 챔버 전극부의 구조도
Fig. 3 Test chamber including electrodes

조이다.

3.2 실험방법

파괴전계강도 실험은 동축원통 전극 구조를 갖는 GIS 내에 도전성 금속입자를 넣고 SF₆ 가스의 절연내력 특성 변화를 관찰하기 위해 입자의 크기가 0.8 [mm ϕ] 길이 5, 10, 15 [mm], 압력 1[kg/cm²]인 경우 각각의 절연파괴전압 측정과, 입자의 크기가 0.8 [mm ϕ] 길이 5 [mm] 압력 1, 2, 3[kg/cm²]인 경우 각각의 절연파괴전압을 측정하였다.

SF₆ 개스의 압력변화에 따른 금속입자의 부분방전 개시전압과 방전량을 측정하기 위해 압력 3, 4, 5 [kg/cm²] 각각에 대하여 입자의 크기변화에 따른 코로나 개시전압을 측정하기 위해 Al Wire형 입자 0.8 [mm ϕ] 길이 5, 10, 15 [mm] 3종류를 각 10 개씩 사용하였다. 전원전압의 상승에 따라 입자에 의한 부분방전 개시 때의 거동을 관측하기 위해 관측창을 통해 비디오 카메라로 촬영하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 금속입자 존재시 교류 절연파괴 전계강도

금속입자에 의한 파괴전압의 특성을 구하기 위하여 교류 전압을 사용하여 시험을 실시하고 측정시의 전압은 첨두 (Peak) 전압측정기를 사용하여 측정하였다.

그림 4는 SF₆ 가스압력이 1 [kg/cm²] 일 때 입자의 길이에 따른 절연파괴 강도를 나타낸 것으로 입자의 길이가 길수록 파괴전계가 현저하게 낮아지는 현상을 나타내고 있다.

그림 5는 입자의 길이가 5[mm]인 경우의 금속입자에 대한 SF₆가스의 압력변화에 따른 절연파괴강도를 나타낸 것이다. 여기서 압력이 높아지면 절연파괴강도가 상승하는 것으로 나타났다. 절연파괴 강도의 실험은 파괴전압이 높은 관계로 1 - 3 [kg/cm²]까지 실험을 하였다.

그림 5는 입자의 길이가 5[mm]인 경우의 금속입자에 대한 SF₆가스의 압력변화에 따른 절연파괴강도를 나타낸 것이다. 여기서 압력이 높아지면 절연파괴강도가 상승하는 것으로 나타났다. 절연파괴 강도의 실험은 파괴전압이 높은 관계로 1 - 3 [kg/cm²]까지 실험을 하였다.

그림 4, 5에서 보는 바와 같이 입자의 길이가 길수록, 가

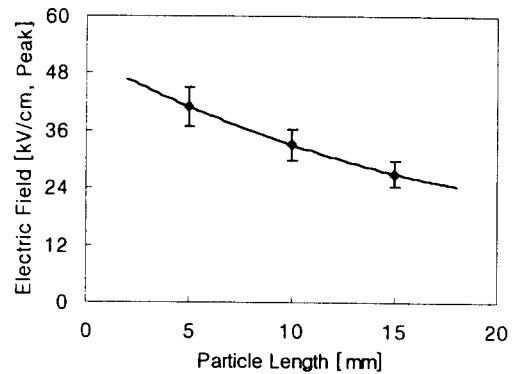


그림 4. Free Particle의 길이에 따른 절연파괴 전계 (0.8mm ϕ , Al, at 1 [kg/cm²], 120/240 mm Electrodes)
Fig. 4 Breakdown field with free particle lengths

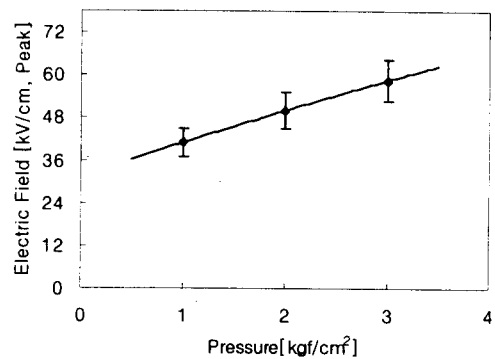


그림 5. 가스압력 변화에 따른 Particle 절연파괴 전계 (0.8mm ϕ , L=5mm, Al, 120/240 mm Electrodes)
Fig. 5 Breakdown Field initiated by free particle with gas pressures

스압력이 낮을수록 절연파괴 전계강도는 현저히 저하하므로 운전 중인 GIS에 과도전압이 침입했을 경우 도전성입자에 의해 절연파괴 사고로 충분히 진전될 수 있음을 알 수 있다.

4.2 금속입자의 부상전압과 부분방전 개시전압의 특성

금속입자가 GIS내부에 존재할 때 이들의 거동현상을 관찰하고자 GIS 내부를 비디오카메라로 촬영하였고, 입자의 부상모습과 부분방전량을 동시에 측정하였다. 그림 6은 입자가 부상하는 한 예를 나타내고있다.

금속입자 3 종류(Al, 8 [mm ϕ], 5[mm], 10[mm], 15[mm])의 부상전압과 부분방전 개시전압을 SF₆가스의 압력에 따라 측정한 결과는 다음의 그림 7 - 그림 9와 같다.

그림 7은 금속입자의 길이가 5[mm]인 경우의 부상전압과 부분방전 개시전압 측정결과이며, 전압을 증가시키면 먼저 부분방전이 발생하고 좀 더 전압이 증가하면 입자의 부상

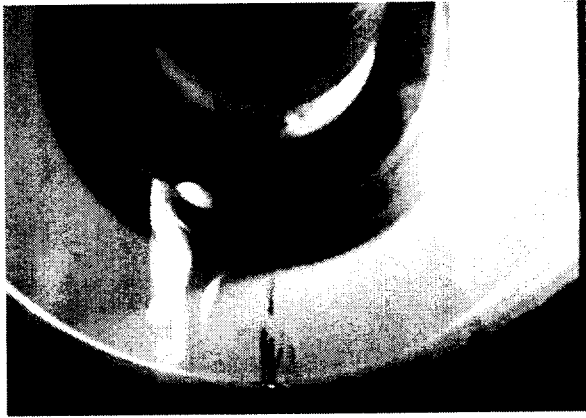


그림 6. 15[mm] Particle의 부상모습
Fig. 6 Video image of 15mm particles at lift-off.

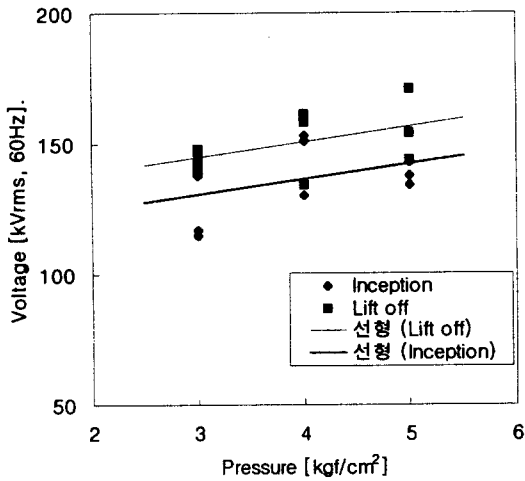


그림 7. 압력변화에 의한 Particle의 부분방전 개시전압 및 부상전압
(0.8[mm ϕ], L=5[mm], Al, 120/360 mm Electrodes)
Fig. 7 PD inception and lift-off voltage of particle with gas pressure

현상이 관찰되었다. 압력이 증가하면 부상전압은 약간 상승하는 경향을 보였다.

그림 8과 그림 9는 금속입자의 길이가 각각 10[mm]와 15[mm]인 경우의 부상전압 또는 부분방전 개시전압의 결과이며, 두 경우 모두 입자가 부상할 때 부분방전이 개시됨을 관찰할 수 있었다. 즉, 부분방전 개시전압 크기와 부상전압 크기는 동일하였다. 가스의 압력이 증가하면, 그림 8의 경우는 방전개시 전압이 약간 증가하고, 그림 9의 경우는 방전개시 전압이 약간 감소하는 것으로 나타났지만, 거의 일정한 값을 보였다.

금속입자의 길이가 5 [mm]인 경우 부상전압 크기는 부분방전 개시전압과 구분이 가능하였으나, 10 [mm] 이상의 입자크기에서는 부상전압과 부분방전 개시전압의 구분이 불가

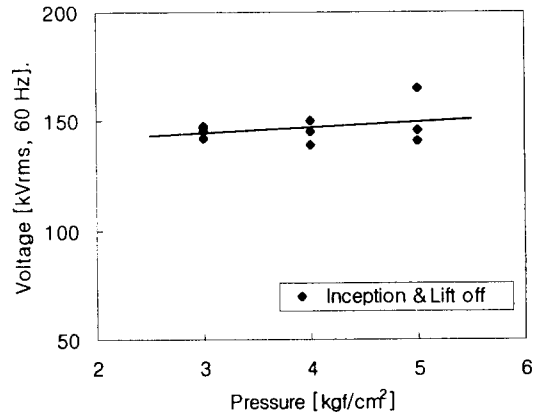


그림 8. 압력변화에 의한 Particle의 부분방전 개시전압 또는 부상전압
(0.8[mm ϕ], L=10[mm], Al, 120/360 mm Electrodes)
Fig. 8 PD inception voltage of particle with gas pressure

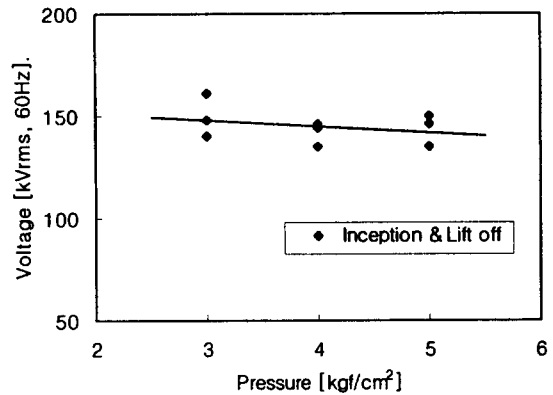


그림 9. 압력변화에 의한 Particle의 부분방전 개시전압 및 부상전압
(0.8[mm ϕ], L=15[mm], Al, 120/360 mm Electrodes)
Fig. 9 PD inception and lift-off voltage of particle with gas pressure

능하였다. 그러나 이들의 부상전압 또는 부분방전 개시전압은 압력의 변화나 입자의 길이에 관계없이 거의 같은 값을 보였다.

식(1)에 의하면 부상전계는 입자의 반경과 밀도에는 의존하지만, 가스압이나 입자의 길이에는 무관한 것으로 나타나고 있다. 이 식으로 부상전계를 계산하면 914 [kV/m] 정도이고, 본 실험에서 얻어진 전계는 958 - 1180 [kV/m] 인 것으로 계산되었다. 본 실험의 결과는 식 (1)과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4.3 부분방전량의 특성

부분방전이 개시될때에 측정된 부분방전량을 그림으로 나

타내면 그림 10 ~ 그림 12와 같다. 여기서, 그림 10의 측정치는 그림 7과 동시에 측정한 방전량이며, 그림 11의 측정치는 그림 8과 동시에 측정한 방전량이고, 그림 12의 측정치는 그림 9와 동시에 측정한 방전량이다.

그림 10은 입자의 길이가 5[mm]인 경우의 가스압력에 대한 부분방전량이며, 압력이 3 [kg/cm²]에서 4 [kg/cm²]으로 증가할 때 부분방전량이 약간 증가하였으며, 4 [kg/cm²]에서 5 [kg/cm²]으로 증가할 때는 거의 같은 값을 유지하였다.

그림 11은 입자의 길이가 10 [mm]인 경우의 가스압력에 대한 부분방전량이며 그림 10과 비슷한 결과를 얻었고, 부분방전량이 그림 10의 경우에 비하여 약간 큰 값을 나타내고 있다.

그림 12는 입자의 길이가 15[mm]인 경우의 가스압력에 대한 부분방전량이며, 그림 10 및 그림 11과는 달리 부분방전량의 크기가 2가지의 군으로 나뉘어 나타나고 있으며, 방전량이 적은 부분의 크기는 그림 11 결과와 같지만, 큰 부분방전량이 나타나는 것은 117 - 168[pC] 이다.

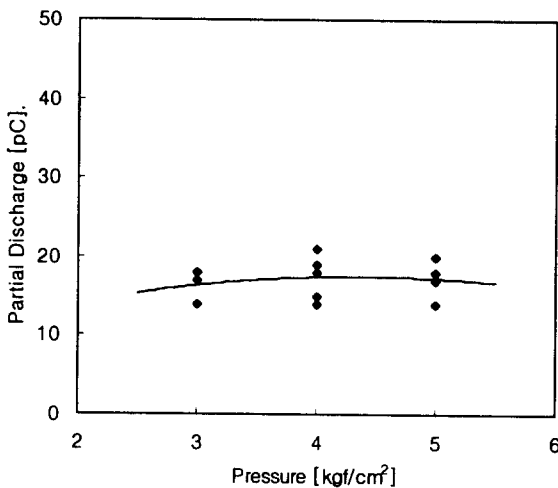


그림 10. 가스압력 변화에 의한 Particle의 부분방전량 (0.8[mm ϕ], L=5[mm], Al, 120/360 mm Electrodes)
Fig. 10 PD quantity of particle with gas pressure

그림 10, 11, 12에서 보는바와 같이 입자 길이의 증가에 따라 부분방전량이 상당히 증가하였다. 식 (2)에 의하면 입자 5[mm], 10[mm] 및 15[mm] 경우에 인가전압을 150[kV]로 계산하면 입자에 대전되는 전하량은 119[pC] 및 238[pC], 357[pC]이고, 다른 문헌의 결과에 의하면 부분방전량 측정치가 10 - 수백[pC] 정도인 것으로 보고되고 있다.[10,11] 본 실험에서는 운전중인 GIS의 예방진단 측면에서 부분방전현상 검출을 위하여 입자의 크기에 따른 부분방전 개시전압과 그때의 부분방전량 즉, 초기 방전량 및 입자의 부상에 대해 집중적으로 실험을 행하였다.

식 (3)에 의하면 입자의 부상 또는 하강시 방전량(q)의 측정치는 탱크표면과 입자, 그리고 도체와 입자사이의 정전용량 크기에 의해 정해진다. 입자의 길이가 5 [mm]로 짧은 경우 입자가 부상을 하더라도 정전용량과 방전량의 변화가

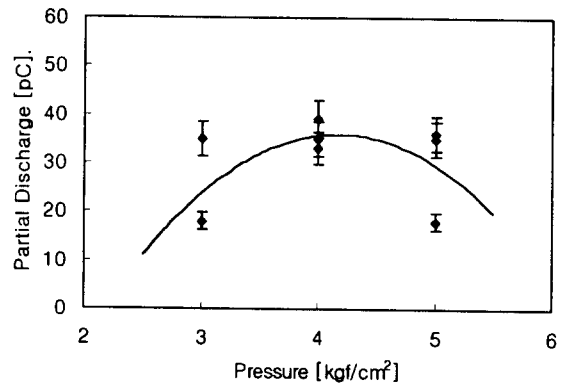


그림 11. 가스압력 변화에 의한 Particle의 부분방전량 (0.8[mm ϕ], L=10[mm], Al, 120/360 mm Electrodes)
Fig. 11 PD quantity of particle with gas pressure

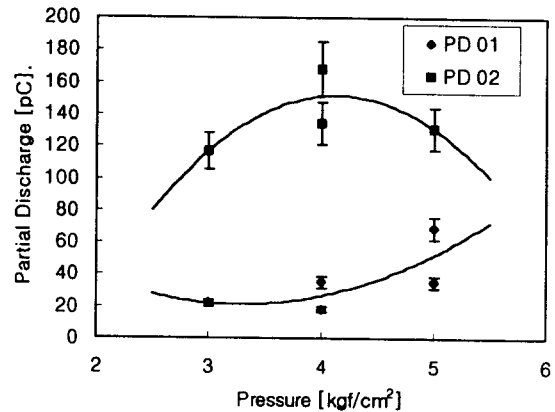


그림 12. 가스압력 변화에 의한 Particle의 부분방전량 (0.8[mm ϕ], L=15[mm], Al, 120/360 mm Electrodes)
Fig.12 PD quantity of particle with gas pressure

적게 일어나서 식(3)의 영향을 고려하지 않아도 되지만 입자의 길이가 15[mm]로 길어지게 되면 입자의 부상에 따라 정전용량과 방전량의 변화가 커서 측정되는 방전량은 이종의 크기로 나타나는 것으로 생각된다.

따라서, 여러 연구자의 부분방전량 측정결과가 일정하지 않는 경우는 이와 같이 부상시 입자에 의해 만들어지는 도체와 탱크사이의 정전용량과 방전시 방전량이 실험조건에 따라 달라지기 때문인 것으로 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 실 규모 GIS 실험을 통하여 GIS 내부에 알루미늄 입자가 혼입 또는 생성되었을 경우 입자에 의해 발생하는 부분방전 신호를 검출하므로써 절연과피 사고로 진행되는 시작단계인 입자의 기립거동을 유추할 수 있었다.

자유 금속입자의 기립전압 크기는 부분방전 개시전압과 거의 동일하였으며, 이때의 방전량은 조건에 따라 차이는 있지만 최소 10[pC] 이상의 값을 보였다.

GIS 내 자유금속입자에 의한 절연과피전압 크기는 입자

의 길이가 길수록, 가스압력이 낮을수록 현저히 저하하는 특성을 갖지만 부분방전 개시전압 크기에는 영향을 미치지 않았다. 이는 곧 GIS 진단과정에서 도전성입자에 의한 부분방전이 검출되었을 경우 입자가 최소한 기립상태에 있을 가능성이 크므로 대책수립이 필요하며, 가스압력이 낮을수록, 입자의 길이가 길수록 절연파괴사고로 진전될 위험이 큼을 의미한다.

입자의 길이가 길수록 걸보기 방전전하량과 진 방전전하량과는 차이가 클 수 있으므로 진단기술 적용시 측정정밀도 결정에 있어서 이에 대한 고려가 필요하다.

도전성 금속입자의 거동과 관련하여 Hovering 및 Crossing 과정에서의 부분방전 특성연구가 심도있게 행해진다면 보다 신뢰성 높은 예방진단기술 구현에 도움이 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] N. Fujimoto and G.L.Ford, "Results of Recent GIS Fault Survey", IERE Workshop on Gas Insulated Substations, Toronto, Sept. 1990.
- [2] 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. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No.2, pp.323-331,1994.
- [3] CIGRE Working Group 15.03, "Diagnostic Methods for GIS Insulating Systems", CIGRE Paper 15/23-01, Paris, 1992
- [4] J. S. Pearson, O. Farish, B. F. Hampton, and I. M. Welch, "Partial Discharge Diagnostics for Gas Insulated Substations", IEEE Trans.,1995, DEI-2,(5),pp893-905.
- [5] B. Walstrom, W. Lord, P. Hoff, P. Karrvall, M. Leijon, "Acoustic Detection, Localization and Identification of Anomalies in GIS", 6th Int. Symposium on HV Engineering, Paper 23.07, New Orleans, USA, 1989
- [6] B. Walstrom, K. Pettersson, W. Lord, M. Leijon, "Approach and Experiences in Sweden of Reducing GIS - Maintenance Costs - Especially by Application of Periodic Acoustic Measurements", CIGRE Paper 23-106, 1990.
- [7] CIGRE Working Group 15.03, "Effects of Particles on GIS Insulation and the Evaluation of relevant Diagnostic Tools", CIGRE Paper 15-103, 1994
- [8] A. H. Cookson, P. C. Bolin, H. C. Doepken, Jr, "Recent Research in the United States on the Effect of Particle Contamination Reducing the Breakdown Voltage in the Compressed Gas-Insulated Systems." CIGRE, Paper 15-09, 1976.
- [9] J. M. Wetzer, P. van der Laan, "Prebreakdown Currents, Basic Interpretation and Time-resolves Measurements", IEEE Trans. on Electrical Insulation,

Vol.24, No.2, pp297-308, April 1989

- [10] 岡部成光, 財滿英一, 山極時生, 石川敏雄, "GIS内金屬異物の部分放電特性と診断技術" Trans. IEE of Japan, Vol.115 B, No 10, pp1221-1227, Oct., 1995
- [11] M. M. Morcos, H. Anis, K. D. Srivastava, "Particle-initiated Corona and Breakdown in GITL Systems", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol24 No.4, pp561-571, Aug. 1989

저 자 소 개



윤진열 (尹珍烈)

1956년 3월 15일 생. 1982년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력 연구원 전력계통연구실 선임연구원



한상옥 (韓相玉)

1946년 5월 12일생. 1974년 충남대 공대 공업교육과 졸업. 1978년 단국대 대학원 공업교육과 졸업(석사). 1985년 인하대 대학원 공업교육과 졸업(공학). 1984년 독일 하노버대학 객원연구원(6개월). 1989년 일본 나고야대학 객원연구원(1년). 1997년 현재 충남대 공대 전기공학과 교수