

금속입자 오손시 SF₆가스의 절연파괴특성

김민규^o, 문인욱, 김익수, 이형호
한국전기연구소

Breakdown Characteristics of SF₆ Gas under Particle Contaminated Conditions

Min-kyu Kim^o, In-wook Moon, Ik-soo Kim, Hyeong-ho Lee
High Voltage Team, Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

The gas-insulated switchgear(GIS) has made high-reliability, high-safety, compact substations possible by using SF₆ gas. They are likely to be further developed toward higher voltages and larger capacities, along with greater compactness and lower cost. Although SF₆ gas has excellent insulation performance, breakdown voltages are reduced by the conducting particles. Thus, extensive studies have been made on the breakdown characteristics of SF₆ gas in particle contaminated conditions. Experiments were carried out for fixed particle and free particle in a coaxial electrode system with DC and AC voltages. This paper represents the experimental results of the processes involved in electrical breakdown in compressed SF₆ gas, where breakdown is initiated by conducting particles.

1. 서론

가스절연개폐장치(GIS)는 밀폐된 용기내에 개폐작용에 필요한 고전압 기기, 보호장치등을 내장하고 있고, 또한 주변의 공간에 전기적특성이 우수한 SF₆ 가스를 가압봉입한 전력기기이다. 그 특징으로서서는 설치에 필요한 공간의 축소화가 가능하고, 주변환경의 영향을 받기가 어려우며 안정성, 신뢰성이 높으므로 오늘날 실용화가 확대되고 있으며, 최근에는 GIS가 더욱 소형화되어 구성기기의 치수가 축소되는 경향이 있고, 기기 내부에는 고전계화, 고가스압화가 추진되고 있다.

SF₆ 가스는 우수한 전기적 특성을 가지고 있지만, 어떠한 원인에 의해서 공간에 미세한 Particle이 혼입되는 경우, 그 조건에 따라서는 현저하게 절연 성능이 손상을 받는 경우가 있다는 것은 주지의 사실이다. 그러므로 Particle의 현상에 관한 아주 많은 연구가 되어왔다.

이러한 연구를 대별해보면, Particle의 형상과 크기와 절연파괴와의 관계를 실험적으로 구하는 연구, Particle에 의한 절연파괴 메카니즘에 대해서 검토하는 연구, Particle의 거동에 관한 연구가 있다. 지난 20여년간 매우 다양한 전계 및 Particle을 이용한 많은 실험을 통하여 Particle 오손된 SF₆ 가스절연에 관한 수 많은 연구 보고가 있었으나, 이러한 많은 실험결과들은 조건에 따라서 서로 다른 양상을 나타내고 있다.

본 연구에서는 Particle 오손시 SF₆가스의 절연파괴특성을 파악하고자 동축전극구조에서 Fixed particle 및 Free particle이 존재하는 경우 AC 및 DC전압이 인가되었을 때의 파티클 개시 절연파괴에 관한 실험을 행하였다.

2. GIS내에서의 Particle 거동

전계의 영향을 받는 Particle의 거동은 SF₆ 가스의 절연파괴에 결정적인 역할을 할 수가 있다. 이러한 전하의 크기, Particle에 작용하는 힘과 그 힘이 Particle에 작용하는 시간에 관계한다는 것이 실험에 의해서 증명되었으며, Particle의 거동은 인가되는 전압의 파형에 의존한다.

도전성 Particle이 전극위에 누운상태로 놓여 있을때, Particle은 전하 Q를 축적하게 된다. 이러한 전하의 크기는 국부전계 E와 Particle의 형상, 놓여진 방향 및 크기와 함수 관계가 있다. 만일 Particle에 작용하는 힘이 QE가 중력을 초과하게 되면 Particle은 부상하게 된다. 전하 Q와 Particle의 부상전계 E₁을 비교적 간단한 model을 이용하여 계산할 수가 있다.

서로 다른 Particle의 크기 및 재질에 대해서 구형 및 원통형(선형) Particle의 전하 Q와 부상전계 E₁을 나타내면 표 1과 같으며, Particle이 일단 인가전계에 의해서 부상을 하게 되면, 다양한 기계적·전기적 힘이 Particle에 작용하여 Particle은 가속되되거나, 운동을 방해받게 된다. 표 2에 부상 이후의 Particle에 작용하는 힘의 종류를 정리하여 나타내었다.

표. 1 전하 Q와 부상전계 E₁

| Particle형태 | Q | E ₁ |
|----------------|--|---|
| Sphere (구형) | $2 \pi^3 \epsilon_0 r^2 E/3$ | $0.49 (\rho g r / \epsilon_0)^{\frac{1}{2}}$ |
| Wire (누운상태) | $2 \pi \epsilon_0 r l E$ | $[r g \rho / (1.43 \epsilon_0)]^{\frac{1}{2}}$ |
| Wire (기립상태) | $\pi \epsilon_0 l^2 E / [\ln(2l/r) - 1]$ | $[\frac{\ln(2l/r) - 1}{r^2 \rho g / \epsilon_0 (\ln(2l/r) - 0.5)}]^{\frac{1}{2}}$ |

여기서, g : 중력가속도(9.8 m/s²),
ε₀ : 자유공간의 유전율(8.854×10⁻¹² F/m)
r : 구형 또는 선형 Particle의 반경
l : 선형 Particle의 길이
E : 국부전계

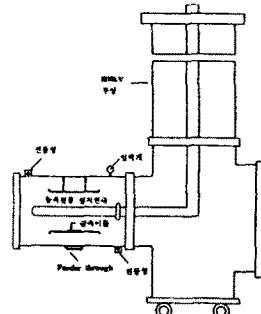
표. 2 Particle에 작용하는 힘

| 조 건 | 힘의 형태 | |
|----------------------|--|-------------------------------------|
| | 구 동 력 | 억 제 력 |
| 코로나방전 전류가 존재하는 경우 | Lorentz 힘 QE Dipole moments | 중력 가스에 의한 drag force 전극에서의 충돌 |
| 코로나방전 전류가 존재하지 않는 경우 | Lorentz 힘 QE Capacitive force Corona force | 중력 가스에 의한 drag force 전극에서의 충돌 |

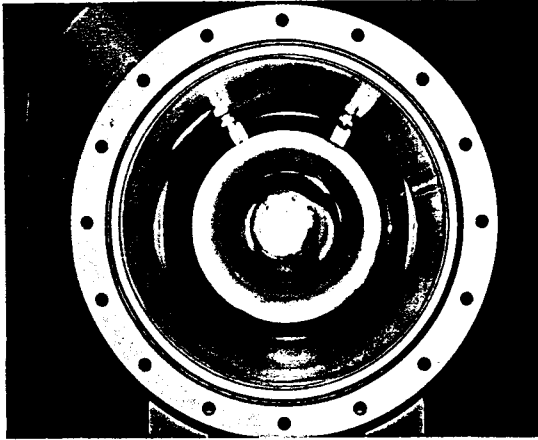
3. Particle 오손시 SF₆ 가스의 절연파괴 특성시험 및 결과 분석

가. 시험장치 및 시험방법

동축원통전극 구조인 GIS내에서 Particle이 혼입된 경우의 SF₆가스중 절연파괴특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같이 시험장치를 구성하여 시험을 하였다. Particle현상 연구에 이용된 제어기는 실험로 362kV급 GIS 모선이며, 내부의 전극구조는 그림 1(b)와 같다.



(a) 시험장치 내부구조



(b) 시험용 동축전극구조
그림 1 시험장치

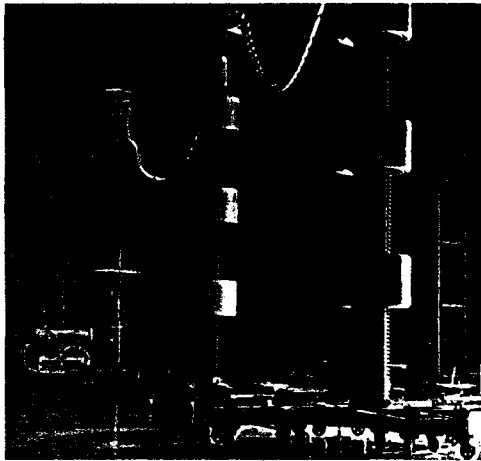
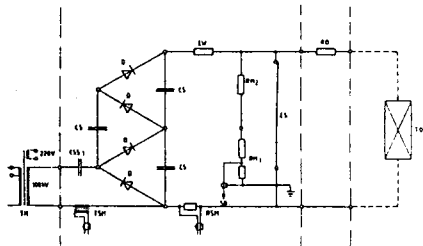


그림 2 Particle개시 절연파괴시험 장면



TH : 고전압 변압기 D : 고전압 다이오드(100kV, 20mA)
CS : 평활 커패시터(200kV DC, 15nF)
CSS1 : 결합 커패시터(100kV DC, 30nF)
RM1, RM2 : 축정저항(각각 200kV DC, 800MΩ)
EW : 접지저항(200kV DC, 1kΩ)
RD : 제동저항(1kΩ, 12kΩ), ES : 접지스위치, TO : 시료

그림 3 DC전압 발생 시스템

나. 시험결과 및 분석

1) Fixed particle의 경우

그림 1(b)에 나타난 동축전극구조(φ120/240mm)의 내부도체에 고정 부착된 직경이 1.0mm인 신행 Particle(재질:구리)을 이용하여 Particle개시 절연파괴시험을 한 결과는 다음과 같다.

가) SF₆ 가스압력과 절연파괴전압(V_{BD})의 관계

SF₆가스 압력변화에 따른 절연파괴전압의 변화를 그림 4에 나타내었다. SF₆ 가스중에서 이와같은 전극시스템에서의 절연파괴특성은 최대평판 전극 시스템에서의 결과와 유사하게 나타났다. 즉 절연파괴전압이 압력의 상승에 따라서 코로나 개시전압과 같이 선형적으로 비례하지 않고 절연파괴특성은 저압력 영역에서 현저하게 Peak치를 나타내었다. 다른 문헌에 의하면 가스압력 0.75MPa 이상에서 절연파괴전압과 코로나 개시전압은 동일한 전압을 나타내는데 반해서 저압력 영역에서는 절연파괴전압이 코로나 개시전압에 비해서 4배정도 높게 나타난다고 보고하고 있다. 이와 같이 코로나 개시전압에 비해서 절연파괴전압이 증가하는 현상은 여러가지 주목할만한 현상들과 연관되어 있다.

(a) Particle tip에서 발생하는 코로나로부터 빛이 방출하게 된다. 이러한 코로나는 Particle tip 근방에서 공간전하를 형성하게 되고, 이러한 공간전하 형성에 의해서 전계가 완화되어 절연파괴전압은 peak치를 갖게 된다.

(b) 코로나에 의해서 SF₆ 가스중으로 주입되는 공간전하를 Particle tip으로부터 발생하는 전동(electric wind)을 일으키게 된다.

(c) 절연파괴는 종종 Particle tip에서의 코로나로부터 발생할뿐만 아니라 굴곡된 스파크에 의해서 형성된 측면에서 일어나기도 한다.

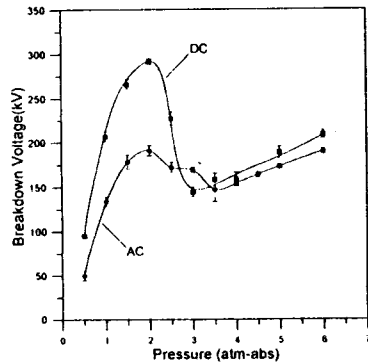


그림 4 SF₆ 가스압력과 절연파괴전압의 관계

나) Particle의 길이와 절연파괴전압(V_{BD})의 관계

그림 5는 동축전극구조(φ120/240mm)의 내부도체에 고정 부착된 직경이 0.6mm인 신행 Particle의 길이 변화에 따른 절연파괴전압의 관계를 나타낸 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Particle의 길이가 길수록 절연파괴전압은 저하하였으며, 코로나안정효과로 인한 절연파괴전압 Peak치를 갖는 압력범위(2.5atm-abs)에서 절연파괴전압 저하의 정도는 Particle의 길이가 길수록 크게 나타났다.

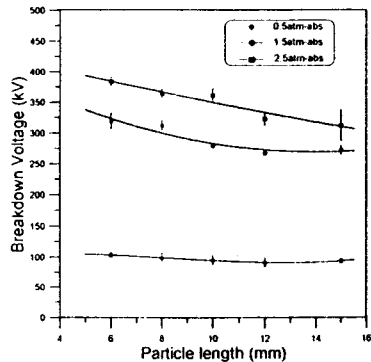


그림 5 동축전극구조(φ120/240mm)의 내부도체에 고정 부착된 신행 Particle(직경 0.6mm)의 길이 변화에 따른 DC 절연파괴전압의 관계

다) Particle의 직경과 절연파괴전압(V_{BD})의 관계

그림 6은 동일한 조건에서 Particle의 굵기를 변화시킨 경우의 Particle의 직경과 절연파괴전압과의 관계를 나타낸 시험결과이다. 다른 연구결과에 의하면 뇌임펄스 인가시의 절연파괴특성은 Particle의 직경 변화에 따라서 거의 일정한 특성을 나타내지만, AC, DC 및 개폐임펄스전압 인가시에는 Particle의 직경이 크지는 않음 Particle tip 부근의 전계가 작아지므로 절연파괴전압은 상승하는 경향을 나타낸다. 그런데, Particle의 직경이 작은 경우에 있어서도 선형 코로나 방전에 의한 전계완화효과가 존재하는

경우가 있으므로, Particle 길이 및 직경 변화에 따른 절연파괴전압의 관계를 함께 나타내면 그림 7과 같다. Particle의 형상을 좌우하는 길이 및 직경을 길이/반경의 새로운 파라메타를 이용하여 절연파괴전압과의 관계를 살펴보면 압력에 대해서 모두 길이/반경의 비가 증가함에 따라서 절연파괴전압은 저하하는 경향을 나타내며, 압력이 높을수록 그 저하의 정도는 크게 나타났다.

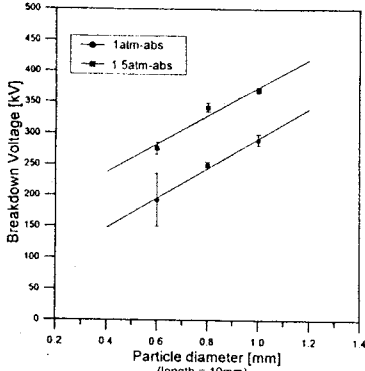


그림 6 Particle의 굵기를 변화시킨 경우의 Particle의 직경과 DC절연파괴전압과의 관계

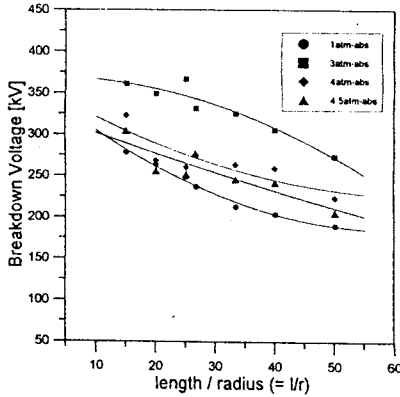


그림 7 Particle의 길이/반경의 변화에 따른 DC절연파괴전압

2) Free particle의 경우

가) 부상전압 및 절연파괴전압의 관계

(1) SF₆ 가스 압력의 변화

그림 8은 동축전극구조(φ120/240mm)의 하부전극위에 직경이 0.5mm인 선형 Free particle 10개를 혼합하여 SF₆ 가스압력을 변화시키면서 60Hz AC전압을 인가했을 때 부상전압 및 절연파괴전압을 Video를 이용하여 관측한 결과이다.

그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 가스압력의 변화에 따라서 Particle이 인가전계에 의해서 충전되어 하부전극 위에서 수직으로 부상하게 되는 부상전압은 압력의존성이 없이 거의 일정하며, 절연파괴전압은 압력의 상승과 함께 증가하는 특성을 나타내었다.

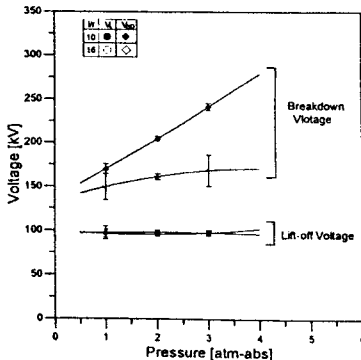


그림 8 동축전극구조(φ120/240mm)에서 압력 변화에 따른 부상전압 및 절연파괴전압 (Particle : φ0.5mm, 재질 Cu, 10개)

(2) Free particle의 길이 및 직경 변화

Free particle의 길이 변화에 따른 절연파괴전압 및 부상전압의 관계를 그림 9에 나타내었다. 일반적으로 Particle의 길이가 길수록 절연파괴전압은 낮아지며, 부상전압은 Particle의 길이에는 무관하게 거의 일정한 값을 갖는다.

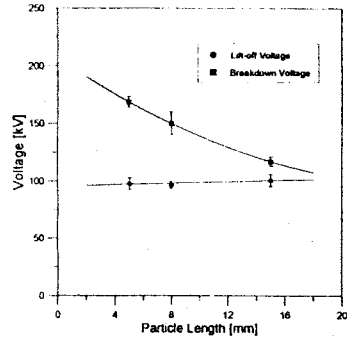


그림 9 Free particle의 길이 변화에 따른 절연파괴전압 및 부상전압의 관계 (Particle : φ1.0mm, 3atm-abs)

그림 10은 Free particle의 직경이 AC절연파괴전압 및 부상전압에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 Particle의 직경이 증가함에 따라서 절연파괴전압은 상승하지만 부상전압은 거의 변화없이 일정한 특성을 나타내고 있다. Particle의 직경이 클수록 Particle에 작용하는 중력 및 정성력이 증가하므로 Particle이 부상하여 갭간을 Crossing하는데 필요한 전압은 증가하게 된다. 한편, Particle이 갖는 순전하는 Particle 직경이 크짐에 따라서 증가하므로 정전적인 구동력은 강해진다. 그 결과 Crossing에 필요한 전압은 감소하게 된다. 이러한 요소들의 전반적인 영향에 의해서 Particle의 직경이 크짐에 따라서 Crossing 전압은 증가하며 절연파괴전압은 상승하게 된다.

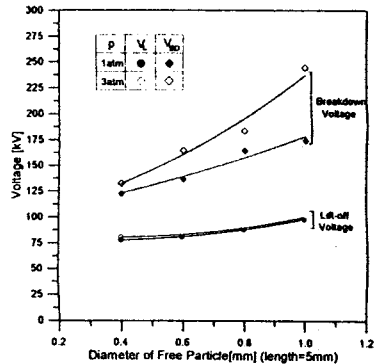


그림 10 Free particle의 직경이 AC절연파괴전압 및 부상전압에 미치는 영향

나) 입자의 거동현상

Particle 시험용 챔버내에 구리 재질의 선형 Particle을 혼합하고 60Hz AC 전압을 인가했을 때 인가전압의 상승에 따른 Free Particle의 거동을 Video Camera를 이용하여 관측한 결과를 그림 11에 나타내었다. 인가전압이 Particle의 부상전압에 도달하면 Particle은 하부전극까지 상승시키면 기계적인 반응을 시작하면서 인가전압이 Crossing전압까지 상승시키면 고압중심도체와 하부 전극전극간을 수차례 왕복한 후 절연파괴가 일어나게 된다. AC전압이 인가된 경우 정전력은 그 방향을 주기적으로 바꾸게 된다. 이러한 사실과 전극 중첩에 있어서의 기계적인 반사작용으로 인하여 Particle 거동은 확률론적인 특성을 나타낸다. 일반적으로 부상전압에서 Particle은 외부전극 위에서 거동을 하며 인가전압이 상승할(Crossing전압>부상전압)으로써 Crossing이 일어난다. Crossing은 절연파괴를 하는데 필수적이지만 유효적절한 것은 아니다. 다른 연구결과에 의하면 오직 Particle이 고압 중심도체나 또는 바로 그 근방에 있고 전압의 순시치와 Particle 전하(량)간의 확률론적인 관계가 자속방전이 일어나는데 충분하다면 절연파괴가 일어날 수가 있다고 보고하고 있다.

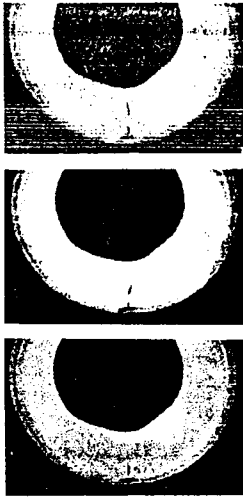


그림 11 AC전압 인가시 인가전압의 상승에 따른 Free particle의 거동

4. 결 론

설규모의 362kV급 Particle현상 연구용 챔버를 이용하여, GIS내에 Particle이 혼입된 경우의 SF₆가스중 절연파괴특성시험을 행한 결과 다음과같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 가. DC 및 AC 전압의 경우, Fixed particle에 대한 SF₆ 가스 압력변화에 따른 절연파괴특성에는 코로나안정화효과가 존재하며 저압력 영역에서 Peak치를 나타내었다.
- 나. 절연파괴전압은 Particle의 길이가 길수록 감소하였으며, 특히 코로나안정화효과가 나타나는 저압력에서 저하의 정도가 크게 나타났다.
- 다. Fixed particle의 직경이 커질수록 Particle 선단의 전계감소에 의하여 절연파괴전압은 상승하였다.
- 라. 절연파괴전압의 압력변화 의존성은 Wire형 Particle의 형상요소인 길이/반경의 비가 증가할수록 저하하는 경향을 나타내었으며, 압력이 높을수록 그 저하의 정도는 크게 나타났다.
- 마. Free particle의 부상전압은 SF₆ 가스압력에 관계없이 거의 일정하였으며, 절연파괴전압은 압력의 상승과 함께 증가하는 특성을 나타내었다.
- 바. Free particle의 길이 및 직경 변화에 따라서 부상전압은 거의 일정한 값을 가졌으나, Particle의 직경이 커질수록 Particle에 작용하는 중력 및 점성력이 증가하므로 전극간을 Particle이 Crossing하는데 필요한 전압은 증가하므로 절연파괴전압은 상승하였다.

참 고 문 헌

- [1]E.Endo, T.Yamagiwa, T.Ishikawa, "Particle-Initiated Breakdown Characteristics and Reliability Improvement in SF₆ Gas Insulation" IEEE Vol PWRD-1, No.1, Jan. 1986
- [2]A.E.Vlastos, L.Ming, "Free Particle Initiated Breakdown of SF₆ under Voltages of Different Time Dependence", Gaseous Dielectrics V(May 1987) Knoxville
- [3]松本, 青柳, 柳父, 村瀬, "SF₆가스의絶縁特性に及ぼす金屬異物の太さの影響", 電氣學會平成2年 電力エネルギー部門 全國大會(1990)
- [4]S.J.Dale, "Superposition Gas Breakdown", EPRI Report EL-1484, 1980
- [5]S.J.Dale, R.E.Wooton, "Effect of Fixed Particle Protrusions on 60Hz and Impulse Breakdown Voltage-Pressure Characteristics in SF₆", Proc. 3rd Int. Symp. on High Voltage Engineering, Miran, 1979
- [6]A.H.Cookson, O.Farish, "Particle-Initiated Breakdown between Coaxial Electrodes in Compressed SF₆", IEEE Vol PAS-92, pp 871, 1973
- [7]松本, 青柳, 柳父, 村瀬, "急峻波不平等電界におけるガスの絶縁破壊現象", 平成元年 電氣・情報 關聯學會 聯合大會(1989)