

전 덕 규, 백 용 현, 조 성 욱, 이 복 희  
인하대학교 공과대학 전기공학과

Prebreakdown Corona Processes of Point-to-Plane Gap in SF<sub>6</sub> Gas

Duk Kyu Jeon, Yong Hyun Paek, Sung Wook Cho, Bok Hee Lee  
Dept. of Electrical Engineering, Inha University

Abstract

This paper deals with the dielectric behaviors of SF<sub>6</sub> gas and prebreakdown growth caused by lightning impulse voltages in inhomogeneous field perturbed with a fixed needle shaped protrusion on the electrode. The measuring interpretation of the external current induced by moving charges is described.

The temporal growth of prebreakdown is observed by using a shunt and photomultiplier. The prebreakdown processes are initiated by the first streamer corona at a needle protrusion, the flashover of the main gap in the positive polarity is very sensitive to the local field and propagates into the gap with the leader mechanism.

It is found that the dependence of the prebreakdown phenomena on the polarity of applied voltages is caused by the effect of space charges. In addition, the proposed measuring techniques are very useful to perform the measurements of avalanche currents, corona discharges in inhomogeneous fields and partial discharges in voids.

1. 서 론

SF<sub>6</sub>의 절연특성은 코로나방전을 경유하지 않고 절연파괴를 일으키는 평등전계, 준평등전계중에서는 매우 우수하며 많은 연구결과가 보고되어 있으나 고기압, 불평등 전계중에서의 절연파괴기구에 대하여는 아직 밝혀지지 않은 점이 많다. 금속성 이물질이 존재하는 경우나 부품이 돌기부에 의하여 형성되는 불평등전계중에서 코로나 방전이 발생하게 되면 SF<sub>6</sub>가스의 절연성능은 상당히 저하되며, 전력손실이 생기고 부식성, 유독성 부산물을 생성하는 등의 문제점을 가지고 있으므로 이에 대한 연구가 요구되고 있다. 최근 SF<sub>6</sub>가스의 절연기기의 전로 절연파괴에 의한 사고는 그다지 많지 않으나 금속성 이물질에

의한 불평등전계중에서의 부분방전이 문제로 되어 왔으며, 절연설계시 특별한 주의가 요구되며 이에 대한 대책과 성능향상을 위한 연구가 중요하므로 불평등전계중에서 SF<sub>6</sub>가스의 물성적, 전기적 특성에 대한 연구가 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. [1], [2]

따라서 본 연구에서는 금속성 이물질이 가스 절연기기의 내부에 존재하는 경우를 모사하기 위하여 평행평판 전극의 중앙에 비늘모양의 돌기물을 설치하여 불평등 전계상태에서 SF<sub>6</sub>가스중의 방전진전과정을 해석할 목적으로 불평등전계의 계산과 섬락전압, 전구코로나전류를 측정하였다.

2. 이 론

전구코로나전류는 하전입자의 이동에 의하여 흐르게 되는데, 방전전류가 미소하고 간헐적으로 흐르므로 외부회로, 전극계, 측정회로의 영향을 받기 쉬워서 정확한 측정이 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 외부요인을 배제시켜 공간전하의 이동에 의한 전구코로나전류를 측정할 수 있는 이론과 방법에 대하여 검토하였다.

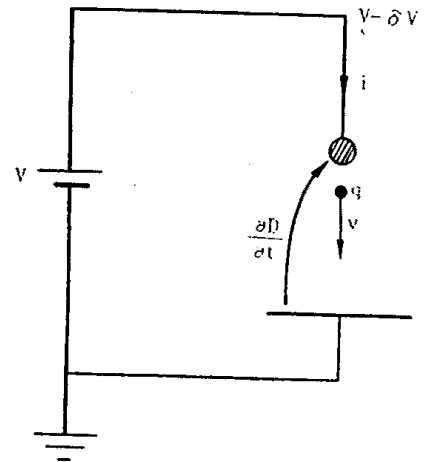


그림 1. 하전입자의 이동에 의한 외부회로의 전류와 전위의 변화

그림 1에 나타난 바와 같은 불평등전극계에 정전압  $V$ 가 인가된 간극내에서 전하량이  $q$ 인 하전입자가 이동하면 외부회로에는 전류  $i$ 가 흐르게 된다. 에너지면을 고려하여 보면  $dt$ 초 사이의 입력 에너지  $Vidt$ 는 전하가  $dx$ 만큼의 거리를 이동하는 동안에 전계에 대하여 한 일  $qEdx$ 와 같아야 되므로 전류  $i$ 는

$$i = \frac{qE}{V} \frac{dx}{dt} = \frac{quE}{V} \quad (1)$$

로 표현되며, 여기서  $u$ 는 전계  $E$ 방향으로의 전하이동속도이다.

전하  $q$ 가 간극사이를 완전히 횡단한 때에는 외부전류로 나타나지만 전하가 횡단하지 못하고 간극내의 일부분만을 이동하는 경우는 외부회로에 전류가 흐르지 못하고 전속변화를 일으켜 전위강하가 일어나게 된다. 즉, 변위전류가 나타나며 간극의 전압강하  $\delta V$ 는

$$\delta V = \frac{1}{C} \cdot \frac{quE}{V} dt \quad (2)$$

로 되며, 여기서  $C$ 는 전극간의 정전용량이다. 입력전력  $P_{in}$ 은 Pointing Vector에 의하여

$$P_{in} = - \oint (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S} \quad (3)$$

로 주어지며, Curly  $\mathbf{E}=0$ 인 보존계에서는 맥스웰의 전자방정식을 적용하면 식 (3)은

$$P_{in} = \iiint_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dv + \iiint_V \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} dv \quad (4)$$

로 된다. 여기서  $dv$ 는 전하가 이동하는 전극계의 체적소이며,  $\mathbf{J}$ 와  $\mathbf{D}$ 는 각각 전류밀도와 전속밀도이다. 식 (4)로부터 외부회로에 흐르는 전류를 산출하면

$$i(t) = \frac{1}{V_R(t)} \iiint_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dv + \frac{1}{V_R(t)} \frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{2} \iiint_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} dv \quad (5)$$

가 되며  $V_R(t)$ 는 방전간극의 전위차이다.

식 (5)의 우측 1번째항은 전하의 이동에 의하여 흐르는 전도전류이고 두번째항은 변위전류성분으로  $C \cdot \partial V_R(t)/\partial t$ 가 되며 전극내에 저장되는 전체에너지를 나타낸다. 따라서 전구코로나방전에 의한 전하의 이동으로 외부회로에 흐르게 되는 전류만을 측정하기 위하여는 변위전류성분의 함유를 작게 하여야만 된다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 실험계의 개략도는 그림 2에 표시하였다. 전위으로는 2중충전식 12단 Marx형 임펄스발생장치 (2.1[MV], 86[KJ])를 사용하였으며, 방전갯의 섬락시 전극과 전위장치의 보호를 위하여 제동저항  $R_d$ 를 통하여 공급하였다. 하전입자의 이동으로 흐르는 전도전류는 침전극과 접지단자 사이에 연결된 임피던스  $R_0$ 의 전압강하로부터 측정되며, 시험전압은 전계센서를 이용하여 측정하였다.

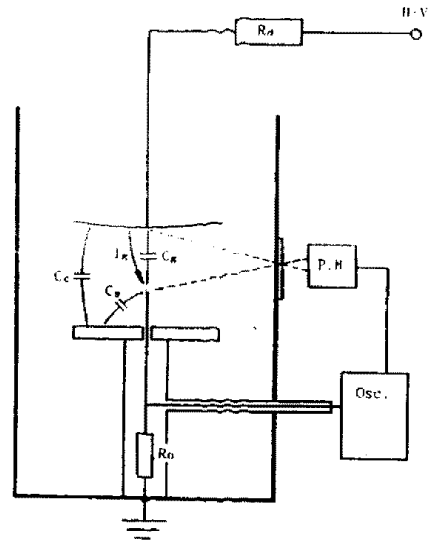


그림 2. 전극계의 개략도

평판전극은 황동으로 직경이 170[mm]이며 단부효과를 고려하여 가장자리를 원형으로 하였다. 전극간 거리는 32[mm]이고 돌기물로는 길이 10[mm], 직경 0.5[mm]인 스테인레스침을 사용하였다. 침-평판전극간의 전계분포는 침전극의 끝부분이 반구형인 경우에 있어서 쌍곡선함수를 이용하여 전하영상법을 적용하면 비교적 간단히 해석되어진다. 침전극의 반경을  $r$ , 전극간 거리를  $d$ , 인가전압을  $V$ 라 하면 침전극 축방향으로의 전계의 세기는 근사적으로

$$E(z) = \frac{V}{A \{d(r+d)\}^{1/2}} \cdot \frac{1}{1 - z^2/\{d(r+d)\}} \quad (6)$$

$$= \ln \left\{ \frac{(r+d)^{1/2} + r^{1/2} + d^{1/2}}{(r+d)^{1/2} + r^{1/2} - d^{1/2}} \right\}$$

로 표현된다. 여기서  $z$ 는 전극축방향으로 평판전극으로부터의 거리이다.

식 (6)을 적용하여 전극계의 전계분포를 계산한 결과를 그림 3에 나타내었다. 침전극의 선단에서는 전계의 세기가 대단히 높으며 전계집중계수는 약 12이다.

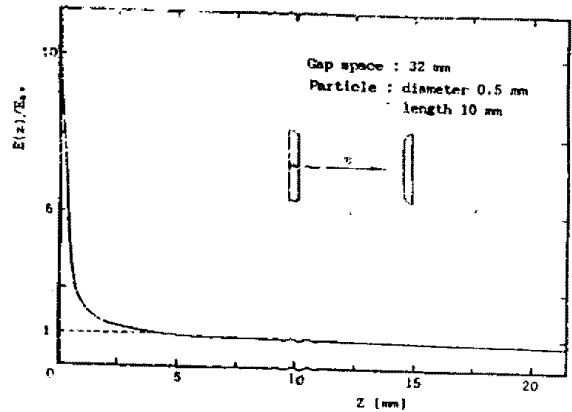


그림 3. 전극축방향으로의 전계분포

#### 4. 실험결과 및 고찰

전구방전전류의 측정을 위하여 제작한 분류기의 단위계단용 단복성을 측정하였다. 이 때 입력전원으로는 상승시간이 약 0.25ns인 펄스발생기(Tek. PG-109)를 사용하여 측정한 응답을 그림 4에 나타내었다.

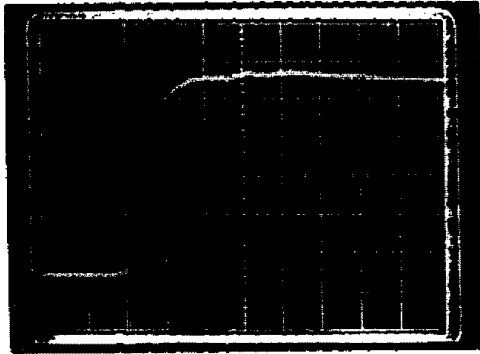
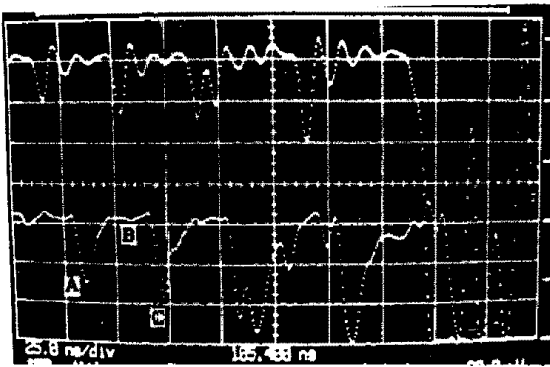


그림 4. 분류기의 단위계단응답

그림 4에서 응답의 상승시간이 약 1.6ns이므로 주파수 대역의 상한치는 약 220MHz이며 오버슈우트가 거의 없으므로 임피던스정합이 잘 이루어져 있음이 확인되었다. 따라서 제작된 분류기로 220MHz까지의 고주파성분을 포함하는 전구방전전류의 측정이 가능함을 알 수 있다.

전구방전현상은 가스압력에 따라 다르며, 0.1MPa 이상에서는 전구코로나전류가 수 회에 걸쳐 간헐적으로 나타난 후 섬락에 이르는 진전과정이 관측되었다.

그림 5에 가스압력 0.25MPa에서 1.5/50[ms]인 임펄스전압을 인가했을 때의 전구방전전류와 방전장의 대표적인 측정예를 나타내었다.



위 : 전구전류 [ 300 mA/div, 25 ns/div ]  
아래 : 방전장 [ A.U/div, 25 ns/div ]

그림 5. 대표적인 전구전류와 방전장의 파형 (정극성, 절대압력: 0.25MPa)

여기에서의 방전결은 방전궤내에서의 스트리머코로나에 의한 전리작용에 의하여 발생한다. 방전장의 신호는 측정에 사용한 광전자증배관의 주행시간 때문에 전류신호보다 약 20ns 정도

지연되어 나타났다. 전류의 파형(상부)에는 방전궤 신호에 비하여 진동성분이 포함되어 있는데, 이것은 침전극을 포함한 측정계의 인덕턴스영향으로 여겨진다.

그림 2의 전극계에서의 인덕턴스는

$$L = -\frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (7)$$

와 같이 근사적으로 표현된다. [12] 여기서 h와 d는 침전극의 길이와 직경, D는 실험용기의 직경이며, 본 전극계의 인덕턴스는 약 13nH이다.

그림 5에서와 같이 정극성의 경우 단일 스트리머에 의하여 섬락에 이르지 않고 스텝상으로 진전되며 스텝상의 리더진전은 인가전압과 가스압력에 의존한다. 리더의 스텝핑시간  $T_s$ [ns]에 대하여는 다음식으로 표현하고 방전기구를 해석하고 있다. [5], [6]

$$T_s = \frac{K_0}{V \cdot P^2} \quad (8)$$

여기서 V는 인가전압[kV], P는 가스압력[MPa]이며  $K_0$ 는 돌기물의 형상, 인가전압의 파형에 의하여 결정되는 정수이다.

$V \cdot P^2$ [KV·MPa<sup>2</sup>]을 횡축, 스텝핑시간  $T_s$ [ns]로 하여 도식한 결과를 그림 6에 나타내었으며, 인가전압과 가스압력의 증가와 더불어 리더의 스텝핑 간격이 좁아지고 있으며, 측정된 결과를 식 10에 대입하여 산출한 정수  $K_0$ 의 산술평균값은 약 314이다.

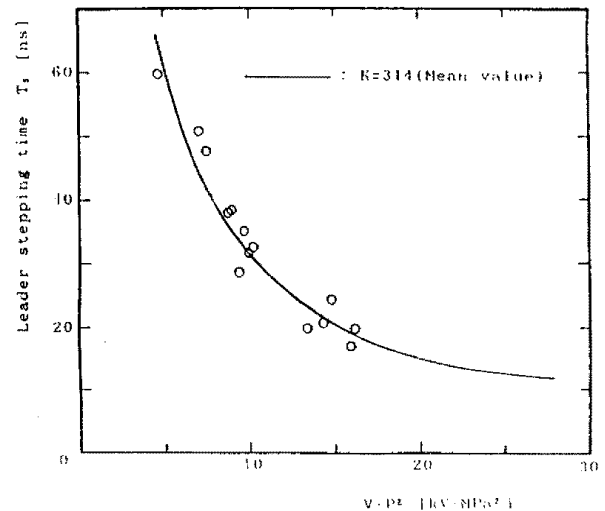


그림 6. 리더 스텝핑시간

#### 5. 결 론

급속성 돌기물에 의하여 형성되는 불평등전계중에서 SF<sub>6</sub>가스의 절연특성과 전구방전현상을 파악하기 위하여 전구코로나전류의 측정방법을 해석하고 뇌임펄스전압에 대한 방전진전과정의 측정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전구코로나방전에 의한 전도전류밀도의 탐지를 위한 측정계의 특성은 매우 우수하였으며, 분류기응답의 고역측차단주파수는 약 220[MHz]이었다.
- (2) SF<sub>6</sub>가스의 절연특성과 전구방전현상사이에는 밀접한 상관관계가 있으며 극성의존성이 현저하게 나타났다.
- (3) 고기압에서 첫극성의 전구코로나과정은 스텝상의 리더더기구에 의하여 진천됨이 판명되었으며 인가전압과 가스압력의 증가에 따라 리더의 스텝핑간격이 좁아지는 현상이 밝혀졌다.

#### 참고 문헌

- [1] H. Anis and K. D. Srivastava : " Breakdown Characteristics of Dielectric Coated Electrodes in Sulfur Hexafluoride Gas with Particle Contamination", 6th ISH, No.32~36, 1989
- [2] Bok-Hee Lee, et al : "Particle-Initiated Breakdown Behaviors of SF<sub>6</sub> Gas under the very fast Transient Overvoltages", the 2nd Asian Conference on Electrical Discharge, pp.67~70, 1989
- [3] W. Shockley : " Currents to Conductors Induced by a Moving Point Charge", J. Appl. Phys., Vol.9, pp. 635~636, 1938
- [4] B. Gravendeer, P. C. T. van der Laan and F. J. de Hoog : "External discharge currents in inhomogeneous field configurations", J. Appl. Phys., Vol.21, pp. 437 ~ 441, 1988
- [5] L. Ulrich : "The Influence of Very Fast Transients on the Discharge Development in SF<sub>6</sub>", the 9th INT. Symposium on Gas Discharge, pp.335~338, 1988
- [6] 이복희, 백용현 : "진동성 과도전압에 대한 SF<sub>6</sub>가스의 절연특성", '92 춘계기계방전심포지움, pp.8~12, 1992