

# 불평등전계중에서 임펄스전압에 대한 SF<sub>6</sub> 기체의 전구방전과정의 분석

13-1-14

## Analysis of Predischage Processes of SF<sub>6</sub> Gas Stressed by Impulse Voltages under Nonuniform Electric Field

이복희\*, 이경옥\*, 이창준\*\*, 백승권\*\*\*

(Bok-Hee Lee\*, Kyoung-Ok Lee\*, Chang-June Lee\*\* and Seung-Kwon Paek\*\*\*)

### Abstract

In this paper, the predischage propagation processes of SF<sub>6</sub> gas stressed by impulse voltages under nonuniform electric field perturbed by a needle protrusion are described. The statistical and formative time-lags and the time interval between leader pulses were investigated on the basis of the predischage current measured in the gas pressure range of 0.1~0.5 MPa. The predischage current is closely related to the waveform, amplitude and polarity of applied voltages, the gas pressure and the gap geometry. Both the positive and negative predischage processes in nonuniform electric field develop in a regime of stepwise leader propagation leading to electrical breakdown. The mean of the time interval between leader pulses gives about a factor of 10 higher for the negative than for the positive leader current pulses. According as the gas pressure increases, the statistical time-lag was almost unchangeable, but the formative time-lag was gradually decreased.

**Key Words(중요용어)** : SF<sub>6</sub> gas(SF<sub>6</sub> 기체), Impulse voltage(임펄스전압), Predischage current(전구방전전류), Leader mechanism(리더기구), Time interval between leader pulses(리더펄스 사이의 시간간격), Statistical time-lag(통계적 시간지연), Formative time-lag(형성 시간지연)

### 1. 서 론

차단기나 단로기 같은 개폐 및 차단장치와 모선 등을 금속재료의 밀폐된 용기 내에 설치하고 공기보다 절연특성이나 소호능력이 우수한 SF<sub>6</sub> 기체를 절연재료로 사용하는 기체절연개폐장치(gas insulated switchgear : GIS)는 전력 수송설비로 활용되고 있다. GIS를 적용하게 되면 변전소의 규모가 작아지고, 포괄적인 전력설비 운전의 신뢰도가 향상되며,

밀폐성에 의해서 보수 및 수리가 간편해지는 등의 장점이 있기 때문에 현재 대규모의 변전소에서 널리 이용되고 있다. 그러나 GIS내에서 단로기 조작에 의한 충전전류의 차단 혹은 지락사고가 발생할 경우에는 급준성 과도과전압(very fast transient over-voltage : VFTO)이 발생한다. 이 VFTO는 상승시간이 수 ns, 진동주파수가 수 kHz~수 백 MHz인 고주파성분을 포함하며, 사용 전압의 0.9~3.2 pu 정도의 크기로서 발생하여 GIS의 절연내력을 위협하는 현상이 나타나는 것으로 보고되었다<sup>1), 2), 3), 4)</sup>. GIS의 성능과 운전 효율의 향상을 위해서는 SF<sub>6</sub> 기체 절연기구의 불평등전계중에서 나타나는 절연파괴현상과 절연내력에 직접적으로 영향을 미치는 전구방전의 진전기구에 대한 해석은 매우 중요하다. 따라서 이 분야에 대한 연구가 많이 진행 되어 왔지만 아직 밝혀지지 않은 문제점이 많이 남아 있다.

본 연구에서는 GIS내에 금속성 이물질이 존재하는

\* : 인하대학교 전자전기컴퓨터공학부  
(인천광역시 남구 용현동 253, Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822 E-mail : bhlee@dragon.inha.ac.kr)

\*\* : LG 산전(주) 연구소

\*\*\* : 인재대학교 전자공학과

1999년 7월 23일 접수, 1999년 12월 13일 심사완료

경우 절연파괴를 일으키는 전구방전의 진전과정을 분석할 목적으로 현장의 SF<sub>6</sub> 기체절연 전력기기에서 발생하는 서지에 의한 빈번한 사고와 GIS의 운전 중에 자연적 혹은 인위적으로 발생하는 VFTO를 모의한 비진동성 및 진동성 임펄스전압을 만들어 시험전압으로 적용하였다. GIS내에 이물질이 존재하는 경우를 모의한 불평등전계인 침전극을 부착시킨 평행평판 전극계를 구성하여 0.1~0.5 MPa의 기체 압력의 범위에서 정(+)·부(-)극성의 실험전압에 대한 전구방전전류를 측정하였다. 실험전압은 용량성 전계센서 그리고 전구방전전류는 고응답 분류기를 이용하여 측정하였으며, 전구방전전류를 기초로 하여 계단상으로 진전하는 리더 사이의 시간간격, 절연파괴까지의 시간지연 등에 대한 물리적 현상을 중점적으로 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험용 모의 GIS는 내경 396 mm인 스테인리스강을 이용하여 원통형으로 제작하였으며, 내부전극에 전압을 인가하기 위하여 66 kV(BIL 350 kV)용 콘덴서형 부상을 설치하였다.

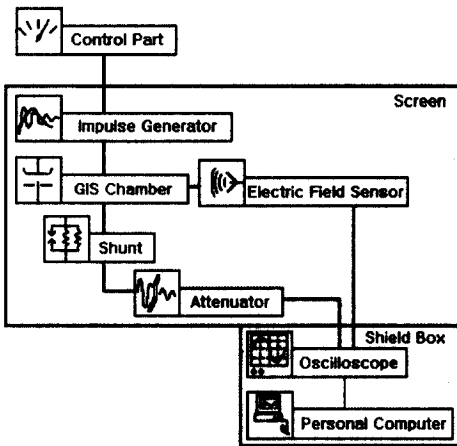


그림 1. 실험계의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system.

전극에 인가되는 실험전압을 가능한 전극 가까운 곳에서 정확하게 측정하기 위하여 원추형으로 설계·제

작된 용량성 전계센서를 GIS 내부의 전극 상단부에 설치하였으며, 실험계의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

실험전압으로는 정·부극성의 비진동성 임펄스전압과 진동성 임펄스전압을 사용하였으며, 이 때 비진동성 임펄스전압은 8단 Marx형 임펄스발생장치에 의해서 약 1.7/44  $\mu$ s인 파형이 발생되었다. 그리고 진동성 임펄스전압은 Marx형 임펄스발생장치에 공심원통형 인덕터(L=130  $\mu$ H), 고압용 콘덴서(C=25 nF) 및 방전 갭을 조합시킨 회로에 의하여 상승시간 약 400 ns, 50 % 감쇠시간 44  $\mu$ s, 진동주파수 1.14 MHz의 파형이 발생된다. 또한 전구방전전류를 구성하는 스트리머코로나 혹은 전자사태에 의한 방전전류는 상승시간이 대단히 빠르기 때문에 고응답의 측정장치가 필요하다. 따라서 전구방전 전류의 측정용 분류기는 응답도가 우수한 500  $\Omega$ 의 금속피막저항 10개를 전자유도 및 외부잡음의 영향을 극소화시키기 위해서 원통형 구조로써 50  $\Omega$ 으로 하였으며, 섬락으로 발생하는 과전압에 대한 계측기의 보호장치로써 고성능 피뢰기를 병렬로 접속하여 제작하였다. 이 때 분류기의 순수 응답시간은 1.2 ns이고, 주파수대역은 DC~290 MHz이다.

### 2.2 전극계의 구성

GIS내에 금속성 이물질의 존재를 모의하는 불평등전계중에서 SF<sub>6</sub> 기체의 전구방전 특성을 실험하기 위해서 그림 2와 같은 침전극이 설치된 평행평판 전극계를 구성하였다.

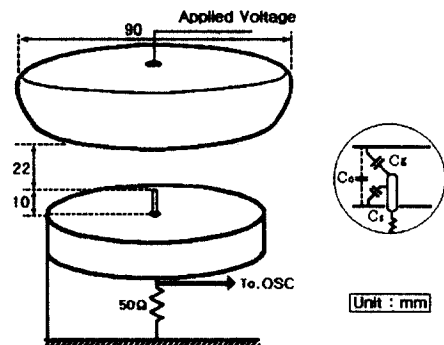


그림 2. 침전극이 설치된 평판전극계

Fig. 2. Electrode geometry of plane-to-plane with a needle.

중심부에 침전극이 설치된 하부의 평판전극은 반경 35 mm인 동(銅)을, 상부의 전극은 반경 45 mm인 스테인리스강을 사용하였다. 또한 임펄스전압의 변동에 의한 변위전류 성분을 최소화시키기 위해서 침전극을 하부의 평판전극으로부터 전기적으로 절연시켰다.

그림 3에 전극계의 정전용량과 전구방전전류의 검출저항  $R_0$  을 기초로 하여 구성한 전기적 동가회로를 나타내었다.  $R_0$  에 의해서 검출되는 출력전압  $V_0$  는

$$V_0 = \frac{R_0 I_g}{1 + \frac{C_g}{C_s} + j\omega R_0 \left( C_s + C_g + \frac{C_s C_g}{C_0} \right)} \quad (1)$$

이 된다<sup>5), 6)</sup>.

$V_0$  가 전구방전전류인 미지의 전도전류  $I_g$  에 정비례하기 위해서는

$$C_s \gg C_g, \quad \omega R_0 \left( C_s + C_g + \frac{C_s C_g}{C_0} \right) \ll 1 \quad (2)$$

의 조건이 필요하며, 식 (2)의 조건이 만족되도록 전극계를 설계·제작하여야 한다. 침전극의 곡률 반경은 0.5 mm이고, 길이는 10 mm이며, 침전극의 끝단과 상부전극의 중심 사이의 거리는 22 mm이다.

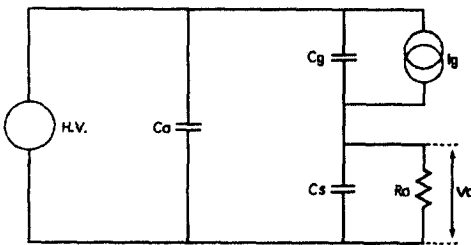


그림 3. 전극계의 동가회로  
Fig. 3. Equivalent circuit of the electrode geometry.

### 2.3 실험 방법

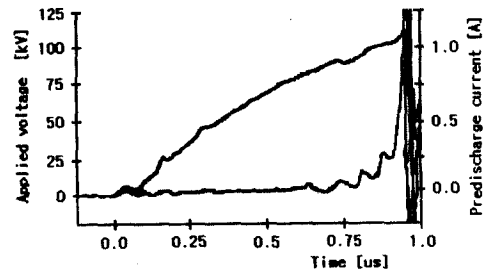
정·부극성의 비진동성 및 진동성 임펄스전압으로 기체 압력 0.1~0.5 MPa 범위에서 실험하였다. 시료 기체를 주입하기 이전에 실험 용기를 약 0.133 Pa 까지 배기시킨 후 순도 99.95 %인  $SF_6$  기체를 봉입하였다. 전구방전전류를 측정하기 위해 침전극에 부착된 분류기의 검출신호를 동축케이블을 통하여 10 : 1 감쇠기를 경유해서 오실로스코프(Tek. 2440)로 관측하였다. 인가전압과 전구방전전류의

측정용 케이블은 2중 매쉬선으로 차폐하였고, 실험에 사용된 오실로스코프, 개인용 컴퓨터 등의 모든 계측 장비는 차폐함 안에 내장시켰으며, 계측기용 전원은 절연변압기와 2중 라인필터를 통해 공급함으로써 외부에서 발생하는 잡음과 외란의 영향이 최소화되도록 하였다. 전계센서로 감지되는 전압과 분류기를 통한 전구방전전류는 동시에 오실로스코프로 실시간 관측되었고, 여기서 얻어진 결과는 GPIB케이블을 통해 퍼널 컴퓨터로 전송되어 저장·분석되었다.

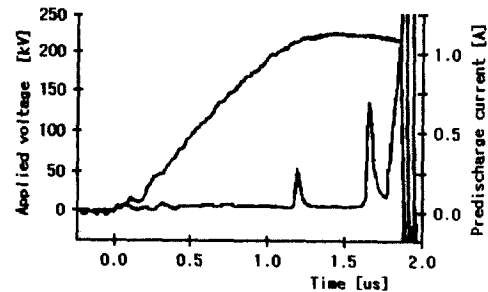
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 전구방전의 진전과정

그림 4는 기체 압력이 0.2 MPa인 경우 정·부극성의 비진동성 임펄스전압을 인가하였을 때의 전구방전전류의 파형 예를 나타낸 것으로 인가전압의 극성에 따라 파형의 차이가 나타남을 알 수 있다. 전구방



(a) 정극성



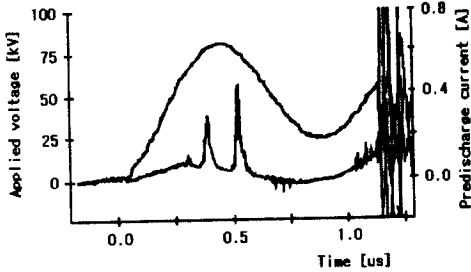
(b) 부극성

그림 4. 비진동성 임펄스전압에 대한 전구방전전류의 예

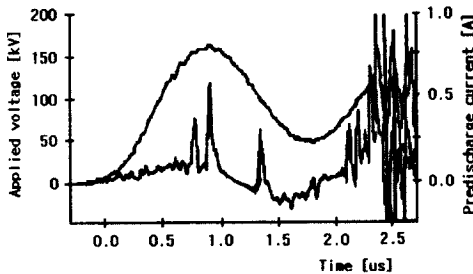
Fig. 4. Typical waveforms of the predischage current under the non-oscillating impulse voltage.

전의 진전과정은 전구코로나전류 즉, 리더전류펄스가 간헐적으로 수 회 나타난 후 섬락에 이르는 것으로 관측되었다. 부극성의 전구방전 진전과정은 정극성의 경우와 근본적으로는 동일하고, 리더전류펄스 사이의 간격이 넓으며, 이온성 전류성분을 많이 포함하고 있음을 알 수 있다.

기체 압력에 따라 다소 다른 양상의 전구방전이 관측되었는데, 기체 압력을 증가시킴에 따라 초기스트리머 코로나전류의 크기는 점차 감소하고, 리더의 숫자가 증가하는 추세로 나타났으며, 리더펄스 사이의 시간간격이 좁아지는 것을 알 수 있었다. 인가전압의 상승부에서 초기스트리머코로나가 발생하였고, 임펄스전압의 증가에 비례하여 전구방전전류는 증가하는 양상을 나타내었으며, 반드시 리더펄스의 크기가 인가전압에 정비례하는 것은 아니었다. 리더의 진전에 따라 인가전압이 거의 일정하더라도 전하의 축적과 도전통로의 형성에 의해서 절연파괴 직전에서 매우 크게 나타났다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5. 진동성 임펄스전압에 대한 전구방전전류 파형의 예

Fig. 5. Typical waveforms of the predischarge current under the oscillating impulse voltage.

이 결과로부터 전구방전은 계단상 리더에 의하여 진전됨을 알 수 있으며, 결국 정극성과 부극성에 대한 전구방전전류의 전반적인 진전기구는 거의 비슷하였지만 진전과정이 약간 다르게 나타났다. 이와 같이 침전극의 끝단에서 발단된 초기스트리머코로나에 의해서 리더가 형성되고, 리더의 점진적인 진전으로 전극 사이는 마침내 교락되어 절연파괴에 이르는 것이라고 볼 수 있다.

그림 5는 기체 압력이 0.2 MPa일 때 정·부극성의 진동성 임펄스전압을 인가하였을 경우의 전구방전전류의 파형 예를 나타낸 것이다. 정극성 및 부극성 모두 인가전압의 변동에 의해 약간의 변위전류 성분이 나타났지만 전구코로나전류와 비교하면 미약하고, 또한 진동 주기가 훨씬 크기 때문에 충분히 전구방전전류를 구별할 수 있다. 정극성과 부극성 모두 인가전압의 진동에 의하여 전구방전전류는 반전되는 양상 즉, 전구방전전류가 양방향성을 보이는 것은 리더의 진전이 양방향으로 교대로 나타나는 것을 의미한다. 전구방전의 양방향성 진전양상에 대한 전체적인 과정에 대한 모델을 그림 6에 나타내었다.

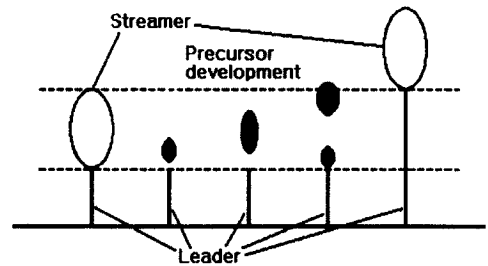


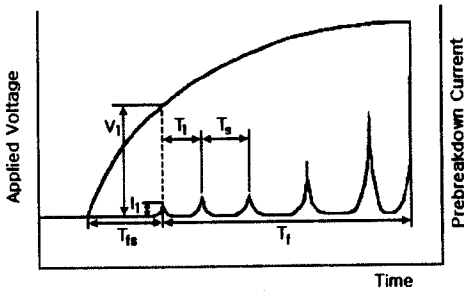
그림 6. 진동성 임펄스전압에 대한 리더 진전과정  
Fig. 6. Leader development process under the oscillating impulse voltage.

인가전압의 진동에 의한 전압 변동이 이온의 확산에 비하여 빠르게 되면 양방향성 방전이 일어나게 된다. 따라서 이온의 확산시간은 양방향성 전류가 흐를 것인지 아닌지를 결정하는 요인이 되고, 기체 압력을 함수로 한 경우 절연파괴 전압이 높아지게 되며, 절연파괴까지의 시간 지연 및 방전지속시간이 길어지는 원인이 된다<sup>7),8)</sup>. 정극성의 경우 초기 전자는 주로 SF<sub>6</sub> 기체의 부이온 또는 수분과 같은 불순물의 부이온으로부터의 탈리작용에 의해서 공급되고, 초기 코로나에 의해 발생하는 공간전하분포가 기체 압력에 따라 변화하므로 전구방전 현상도 달라지게 되며, 기

체 압력의 고저에 따라 전구방전의 진전 양상도 다르게 나타났다. 0.1 MPa의 기체 압력까지는 초기코로나나 진동성 과도전압의 피크치 부근에서 펄스형상으로 발생하고, 초기코로나전류는 기체 압력의 증가에 따라 감소하였다. 비진동성 임펄스전압이 인가된 경우와 마찬가지로 리더의 진전과 더불어 리더펄스의 크기가 증가하였고 폭이 넓어졌는데, 이러한 현상은 스트리머코로나의 반복적 진전 때문이며, 또한 리더의 진전에 따른 전류펄스의 증가는 리더의 성장에 의한 전계의 상승 및 리더의 선단과 전극 사이의 정전용량의 증대에 의한 에너지 주입이 많아지기 때문인 것으로 볼 수 있다.

### 3.2 전구방전전류의 분석

침 전극에 의해 형성되는 불평등전계중에서의 전구방전현상은 초기코로나전류의 크기나 공간전하의 전계완화효과가 인가전압의 상승시간 또는 진동에 의한 변화 등에 의하여 매우 큰 영향을 받게 된다.



- $V_1$  : 초기코로나 발생전압
- $I_1$  : 초기코로나전류의 크기
- $T_1$  : 제1 리더의 스템핑시간
- $T_s$  : 스템핑시간
- $T_{fs}$  : 통계적 시간지연
- $T_f$  : 형성시간지연

그림 7. 전구방전전류 파형의 분석을 위한 파라미터의 정의

Fig. 7. The definition of the relevant parameters in the analysis of the pre-discharge current waveform.

또한 임펄스전압에 대한  $SF_6$  기체의 방전기구의 해석에서 이들에 영향을 미치는 요소가 대단히 많고, 이들이 서로 영향을 미치므로 정량적으로 정리하기는 거의 불

가능하다. 절연파괴전압의 기체 압력 의존성은 대단히 복잡하며, 이에 상응하는 전구방전전류 및 리더의 진전도 일률적이지 않으므로 통계적인 해석이 바람직하다.

$SF_6$  기체의 절연특성에 직접적으로 영향을 미치는 요인인 전구방전현상을 정확하게 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다. VFTO가 인가되었을 때의 방전현상은 비진동성 임펄스전압이 인가되었을 경우와는 달리 매우 복잡하며 다른 특성을 갖는다. VFTO가 인가된 경우는 전압의 변동 때문에 리더의 진전이 중단되거나 양방향성 진전이 일어나기 때문에 통계적인 분석 또한 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 비진동성 임펄스전압이 인가된 경우 리더의 진전에 관련된 물리량과 절연파괴까지의 시간지연, 초기코로나전류의 특성 등에 대해서 분석하였으며, 그림 7에 전구방전전류의 분석을 위한 파라미터의 정의에 대해서 나타내었다.

#### 3.2.1 리더펄스의 시간간격

전구방전 진전과정에 대하여 전구방전전류의 파형을 기초로 해서 분석·고찰하였으며, 리더의 전위가 다음 리더를 발생시키도록 이온화 영역의 끝단까지 진전하는데 소요되는 시간인 리더펄스 사이의 시간간격  $T_s$ 는 전자와  $SF_6$  기체분자 사이의 충돌 및 리더전류밀도에 의하여 결정된다. 또한 스트리머코로나전류의 크기와 기체 압력의 영향도 받으며, 다음의 스케일링법칙으로 유도할 수 있다<sup>9)</sup>.

스트리머코로나에 의해서 생기는 선전하밀도  $\lambda$ 는 인가전압  $V$ 에 비례하고, 스트리머코로나전하  $Q_c$ 는  $V^2/p$ 에 비례하므로

$$Q_c \equiv \frac{\pi \epsilon_0 V^2}{E_{cr}} = \frac{V^2}{p} \quad (3)$$

가 된다.  $q_i$ 를 이온이 드리프트하면서 생기는 공간전하라고 하면, 이 때의 전계의 증가분  $\Delta E$ 는

$$\Delta E = \frac{q_i}{4\pi \epsilon_0 R^2} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있고, 펄스를 발생시키는 공간전하를 만들기 위한 전하  $q_i$ 는

$$q_i = v_{di} \cdot T_s \cdot \lambda \quad (5)$$

이며, 여기서  $v_{di}$ 는 이온의 이동속도이다. 따라서  $T_s$ 는

$$T_s = \frac{q_i}{v_{di} \cdot \lambda} = \frac{4\pi \epsilon_0 \Delta E}{v_{di}} \cdot \frac{R^2}{V} \quad (6)$$

이고, 리더 반경 R은 압력 p에 반비례하므로

$$T_s = \frac{K}{V \cdot p^2} \quad (7)$$

으로 나타낼 수 있다. 이 때 V는 인가전압, K는 돌기 물의 형상과 인가전압 파형에 의해 정해지는 정수이다.

실제 전구방전의 진전에 필요한 전하량 Q<sub>c</sub>는 스트리머내의 임계코로나전하량 Q<sub>cr</sub>보다 커야 하고, 이 Q<sub>cr</sub>은 R의 제곱에 비례하며, 극성에 따라 달라지게 된다. 정극성의 경우 전자사태는 모여드는 형상이고, 부극성의 경우 전자사태는 방사상으로 팽창하는 진전형상을 보이므로 실제로 진전하는 리더의 반경은 부극성의 경우가 크게 된다. 그러므로 본 연구에서는 T<sub>s</sub>에 관한 특성의 평가에서 전압에 반비례하고, 압력의 제곱에 반비례하는 식 (7)을 적용하였다.

리더의 진전에 따른 리더펄스 사이의 시간간격 T<sub>s</sub>의 측정 결과를 그림 8에 나타내었다. 기체 압력과 인가전압의 증대에 따른 리더펄스의 시간간격의 감소는 SF<sub>6</sub> 이온의 이동과 직접적인 관련성을 갖는다. 스트리머 코로나에 의해 SF<sub>6</sub><sup>+</sup>(SF<sub>6</sub>)<sub>n</sub>과 같은 정이온이 형성되는데<sup>6)</sup>, 이들의 이동속도가 기체 압력의 증가와 더불어 감소하므로 T<sub>s</sub>는 짧아지게 된다<sup>9)</sup>. 또한 부극성의 경우가 정극성의 경우보다 동일한 V·p<sup>2</sup>인 값에서 리더스텝 사이의 시간간격이 약 10배정도 길다는 것을 알 수 있다.

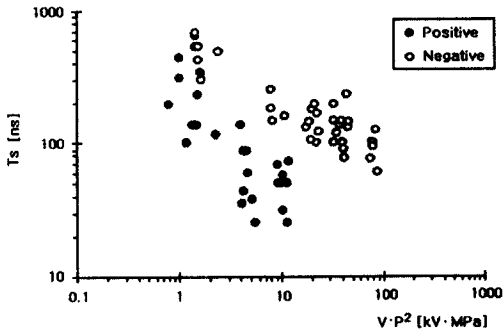


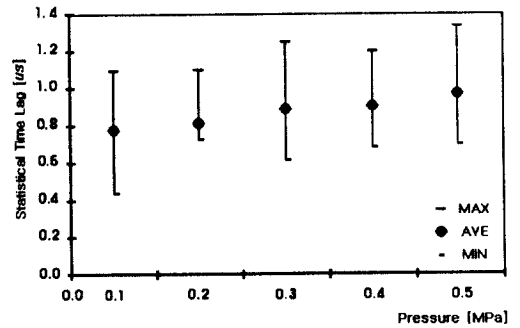
그림 8. 리더펄스의 시간간격  
Fig. 8. Time interval between Leader pulses.

본 실험에서 K의 값은 정극성의 경우가 부극성의 경우보다 약 10배정도 높은 것으로 나타났으며, 기체 압력이 낮을수록 데이터의 편차가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 부극성의 리더펄스의 시간간격은 공간

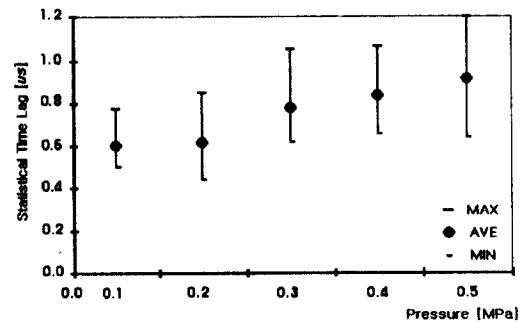
전하가 부이온으로, 전계완화작용이 정극성에 비해 보다 길게 나타남을 알 수 있다. 결국 리더가 진전하는데 부극성이 더 많은 에너지가 필요하므로 절연파괴전압도 높으며, 리더의 발생과 진전의 과정을 거치지 않고 초기스트리머코로나에서 직접 절연파괴로 이어질 확률도 높다는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2.2 통계적 시간지연

기체 또는 고체의 절연물에 설치한 전극 사이에 전압이 인가된 순간에 곧바로 절연파괴가 일어나는 것이 아니라 절연파괴에 이르기까지는 얼마간의 시간지연이 필요하다. 절연파괴까지의 시간지연은 크게 통계적 시간지연(statistical time-lag)과 형성시간지연(Formative time-lag)으로 나누어진다<sup>10), 11)</sup>. 이 중에서 통계적 시간지연은 일반적으로 전극계의 기하학적 조건과 초기전자 공급기구에 의해서 정해지며, 인가전압에는 관계없이 거의 일정한 값을 갖지는 않는다는 것이 여러 실험에 의해서 밝혀졌다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 9. 기체 압력에 따른 통계적 시간지연의 특성  
Fig. 9. Characteristics of the statistical time-lag vs. the gas pressure.

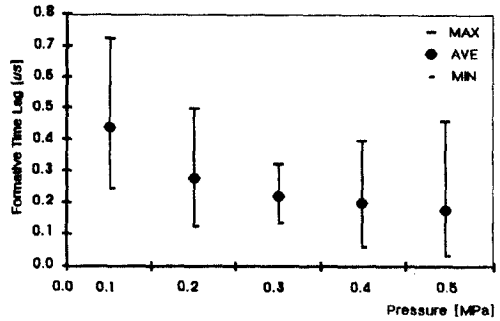
따라서 본 실험에서는 기체 압력에 따라 나타나는 통계적 시간지연과 형성시간지연의 특성을 알아보았다. 통계적 시간지연은 전압이 인가되고 나서 초기코로나가 발생되기까지의 시간을 나타낸 것으로 초기전자의 발생메커니즘과 직접적으로 관련된 특성이다<sup>12), 13)</sup>.

그림 9에는 시료 기체의 압력에 따른 통계적 시간지연의 측정결과를 나타내었으며, 기체 압력이 증가할수록 초기코로나가 발생되기까지의 시간이 약간 길어지는 것으로 나타났으며, 초기전자의 발생이 매우 불규칙적임을 알 수 있다. SF<sub>6</sub> 기체 중에서 통계적 시간지연의 요인인 초기전자의 발생은 주로 정극성의 경우는 SF<sub>6</sub> 부이온으로부터의 탈착에 의해서 공급되어지며, 부극성의 경우는 음극으로부터의 전계방출에 의한 초기전자의 발생이 지배적인 것으로 보고되어 있다<sup>14), 15)</sup>. 따라서 기체 압력의 의존성이 비교적 적지만 기체 압력이 증가함에 따라 발생된 초기전자의 자유행정이 상대적으로 짧아져서 초기스트리머코로나가 리더로 진전하기 위한 에너지를 얻기가 어려워 지므로 리더의 발생이 억제되는 것으로 생각할 수 있다. 통계적 시간지연은 부극성보다는 정극성의 경우가 약간 더 길게 나타났다.

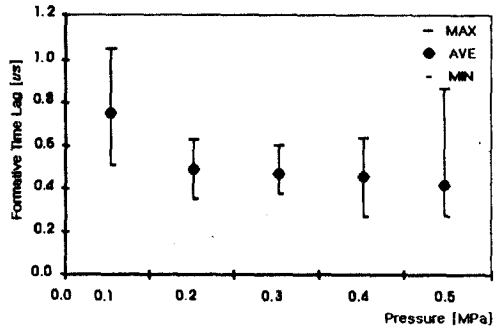
### 3.2.3 형성시간지연

형성시간지연은 초기전자에 의해서 발생한 초기스트리머코로나에 의해서 리더가 형성되어 진전되기 시작하여 절연파괴까지 이르는 시간을 나타내며, 본 실험에서 측정된 특성을 그림 10에 나타내었다.

기체 압력에 따라 초기코로나 개시전압이 변화하며, 초기코로나전류의 크기도 달라지는 것을 파형으로부터 확인할 수 있었다. 정극성의 경우 기체 압력이 증가할수록 초기코로나전류가 작아지게 되고, 코로나 발생의 빈도수가 높아지는 현상을 나타냈으며, 형성시간지연은 전체적으로 짧게 되는 경향을 나타내었다. 또한 기체 압력이 증가함에 따라 형성시간지연이 부극성에 비해 비교적 훨씬 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 기체 압력이 낮을 때는 더욱 큰 편차를 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 초기코로나의 발생이 편차가 심하다는 것과 이에 따라 진행되는 방전전전 메커니즘의 영향이라고 판단되며, 기체 압력이 높을수록 점점 안정적으로 된다는 것을 알 수 있다. 부극성에서의 형성시간지연은 조금씩 짧아지는 경향을 보였으며, 정극성보다는 낮은 기체 압력에서 길게 나타나는 특성을 볼 수 있었다. 따라서 정극성의 형성시간지연은 부극성의 경우보다 기체 압력에 대한 의존도가 훨씬 높다는 것을 알 수 있다.



(a) 정극성



(b) 부극성

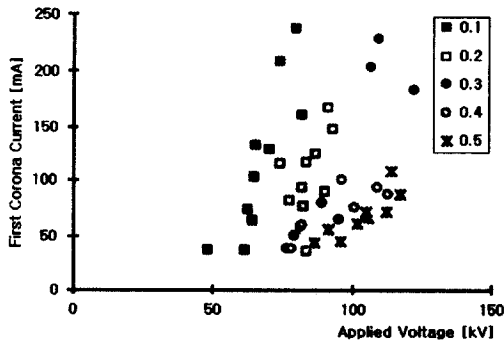
그림 10. 기체 압력에 따른 형성시간지연의 특성  
Fig. 10. Characteristics of the formative time-lag vs. the gas pressure.

### 3.2.4 초기코로나 전류 특성

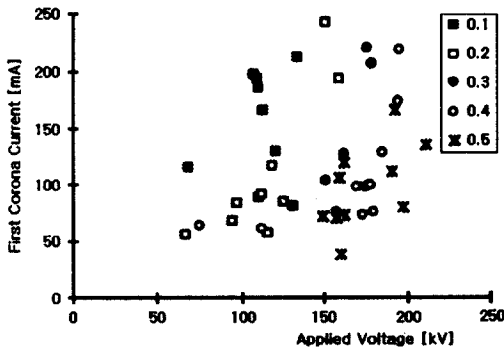
전계 집중계수가 큰 침-평판 전극계에서 전구방전의 진전형태는 인가전압의 극성에 따라 다르지만, 진전과정은 초기코로나에 의하여 전구방전이 개시되고 리더의 진전으로 절연파괴에 이르는 형태를 나타내었다. 따라서 리더의 발생 및 진전과 공간전하효과에 직접 관련성을 갖는 초기코로나전류를 측정하고 검토하는 것이 바람직하므로 이에 대한 특성을 분석하였다.

그림 11에 SF<sub>6</sub> 기체 압력의 변화에 따른 인가전압에 대한 초기코로나전류의 특성을 나타내었다. 초기코로나전류는 기체 압력의 변화에 따라 정·부극성에서의 비슷한 양상을 띄고 있고, 인가전압의 상승과 더불어 증가하는 현상을 나타냈다. 또한 기체 압력의 변화에 따라 정·부극성 모두에서 초기코로나전류는 상당히 큰 편차를 보이고 있다. 압력이 높을수록 초기코로나 개시전류의 편차는 대체적으로 작게 나타났으며, 정극성의 경우 초기코로나는 부극성에 비하여 낮은 초기코로나 발생전압에서 일어나게 됨을 알 수 있다.

전반적으로 보면 초기코로나전류가 인가전압에 따라 대략적으로 상당히 비례하는 특성을 나타내고 있다. 또한 기체 압력이 증가할수록 동일한 인가전압에 대해서 초기코로나전류의 크기는 감소하는 특성을 나타내었다. 기체의 압력이 낮을 때에는 1~2회의 커다란 초기코로나 펄스가 발생한 후 직접 절연파괴에 이르는 현상이 나타났다. 그러나 기체 압력이 높아질수록 초기코로나전류는 작아지며, 리더가 발생하고 진전하여 절연파괴에 이르는 리더진전과정으로 변화되었다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 11. 인가전압에 따른 초기코로나 전류의 특성  
Fig. 11. Characteristics of the first corona current vs. the applied voltage.

#### 4. 결 론

GIS의 운반, 설치 혹은 사용중에 발생할 수 있는 금속성 이물질은 SF<sub>6</sub> 기체의 절연내력을 현저하게 저하시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 GIS 안에 금속성 돌기물이 존재하는 경우를 모의한 불평등전계중

에서 임펄스전압이 SF<sub>6</sub> 기체의 절연파괴에 미치는 영향을 분석·검토한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

불평등전계의 정도가 현저한 조건에서 임펄스전압에 대한 SF<sub>6</sub> 기체의 절연파괴는 리더진전기구에 의해서 일어나게 되며, 전구방전의 진전과정은 인가 전압의 파형, 극성 및 기체 압력에 따라 변화하게 된다. 초기코로나방전은 침전극의 끝단에서 발생하고, 리더가 대향전극을 향하여 계단상으로 진전해서 최종적으로 절연파괴에 이르게 되며, 리더펄스 사이의 시간간격은 기체 압력의 증가와 더불어 짧아지는 것으로 밝혀졌다. 또한 진동성 임펄스전압이 인가되면 전압의 변동에 의해 리더의 진전이 매우 불규칙적이며, 양방향성 진전의 특성이 나타났다. 통계적 시간지연은 기체 압력의 의존성이 그다지 크지 않았지만, 형성시간지연은 기체 압력의 증가에 따라 감소하는 특성임을 알았다.

#### 참 고 문 헌

- [1] B-H. Lee, et al., "Dielectric characteristics of SF<sub>6</sub> gas under fast transient overvoltages in a non-uniform electric field", Proc of 11th International Conference on Gas Discharge and Their Application, pp. I-34-307, 1995.
- [2] Y. Qio, W. Gu, Q. Zhang and E. Kuffel, "The Pressure Dependence of the Leader Stepping Time for a Positive Point-Plane Gap in SF<sub>6</sub> Gas", J. Phys. D : Phys. 31, pp. 3252-3254, 1998.
- [3] I. Gallimberti and N. Wiegart, "Streamer and Leader Formation in SF<sub>6</sub> Gas and SF<sub>6</sub> Mixtures under Positive Impulse Conditions" J. Phys., Vol. 12, pp. 2351-2361, 1986.
- [4] A. Ieyasu and M. Yumoto, "Proposal of Surface Electric-field Intensity Factor at Tip of Conducting Particle Attached on Insulator in GIS and Prediction of Surface Flashover Voltage", T. IEE Japan, Vol. 115-B, No. 10, pp. 1242-1248, 1995.
- [5] Bok-Hee Lee, "Breakdown Behavior of SF<sub>6</sub> Gas in Nonuniform Electric Field under Transient Impulse Voltages" J. of the Korean Phys. Society, Vol. 34, pp. 248-253, 1999.
- [6] T. Kawamura and Bok-H. Lee, "Transient

- Impulse Breakdowns of  $SF_6$  Gas in Inhomogeneous Electric Field" Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, pp. 4898-4904, 1999.
- [7] S. Matsumoto, H. Okubo, H. Aoyagi, S. Yanabu, "Non-uniform flashover mechanism in  $SF_6$  gas under fast-oscillating and non-oscillating impulse voltages", 6th ISH, 1989.
- [8] B. Heers and A. Stepken : "Investigation on Discharge Development in  $SF_6$  Gas for Oscillating Impulses and Fast Oscillating Overvoltages", 7th International Symposium on High Voltage Engineering, No. 31-06, pp. 29-32, 1991.
- [9] L. Niemeyer, L. Ullrich and N. Wiegart, "The Mechanism of Leader Breakdown in Electronegative Gases", IEEE Trans. on Dielectrics and Elect. Insul., Vol. 24, No. 2, pp. 309-324, 1989.
- [10] Bok-Hee Lee *et al.*, "Breakdown Behaviors of  $SF_6$  Gas under Nonoscillating and Oscillating Impulse Voltages in Inhomogeneous Field" Proc. of 7th Conf. on PES, IEE of Japan, pp. 231-236, 1996.
- [11] 이복희 외, " $SF_6$  가스중에서 불평등전계에 있어서 뇌임펄스와 진동성 임펄스전압의 절연파괴특성", 대한전기학회 논문지, Vol. 44, No. 9, pp. 1201-1207, 1995.
- [12] W. Wiegart, "A model for the production of initial electrons by detachment of  $SF_6$  ions", IEEE Trans., Vol. PAS-88, No. 10, 1969.
- [13] 이복희, 이경옥, 전덕규, "Prebreakdown Phenomena of  $SF_6$  Gas in a Non-uniform Field Disturbed by a Metallic Protrusion", '96 한국전기전자재료학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 137-141, 1996.
- [14] H. Heisinger, "Statistical time-lag in case of very fast transient breakdown", Proc. of 6th ISH, No. 32-23, 1989.
- [15] Bok-Hee Lee, T. Kawamura and M. Ishii, "V-t Characteristics of  $SF_6$  Gap Disturbed by a Needle-shaped Protrusion under Oscillating Transient Overvoltages", T. IEE Japan, Vol. 114-B, No. 6, pp. 664-668, 1994.