

SF₆-N₂ 혼합가스중에 뇌임펄스전압에 의해 형성된 불평등전장에서 전구방전현상

論 文

50C-6-6

Predischarge Phenomena in Nonuniform Fields Caused by Lightning Impulse Voltages in SF₆-N₂ Mixtures

李福熙* · 李京沃** · 白承權***

(Bok-Hee Lee · Kyoung-Ok Lee · Seung-Kwon Paek)

Abstract - Predischarges in nonuniform electric field stressed by lightning impulse voltages in SF₆-N₂ mixtures are initiated by streamer coronas. Due to field enhancement at a protrusion point of electrodes new ionization processes occur and a precursor, which leads to a first leader, is created. The leader proceeds step by step to the opposite electrode and the final jump bridges the test gap. It was found that the predischarge is propagated with a leader mechanism of stepwise expansion from the predischarge current waveforms measured by a shunt. The predischarge current is closely related to the amplitude and polarity of applied voltages, the gas pressure and the gap geometry. The time intervals between step leaders for the positive and negative polarities were inversely proportional to $V \cdot p^2$. When the gas pressure increases in the positive polarity, statistical time lag to streamer corona inception increases slightly, but the formative time lag to flashover is significantly decreased.

Key Words : SF₆-N₂ mixtures, Predischarge current, Leader mechanism, Time interval between leader pulses, Statistical time lag, Formative time lag

1. 서 론

가스절연개폐장치(Gas-Insulated Switchgear : GIS)는 차단장치, 피뢰기, 모선 등을 금속제의 밀폐 용기 안에 설치하고 공기보다도 절연특성과 소호능력이 우수한 6불화황(Sulfur Hexafluoride : SF₆)가스를 절연재료로서 사용하는 일종의 콤팩트화된 변전설비로 변전소 규모의 축소, 운전의 신뢰도 향상, 밀폐성에 의한 보수의 간편화 등의 장점을 가지고 있기 때문에 대규모의 변전소에서 널리 이용되고 있다. 그러나 GIS 내부에서 상승시간이 빠른 과도과전압이 발생하는 경우 SF₆가스의 절연내력을 현저하게 저하시키는 것으로 보고되고 있다 [1]~[3]. 또한 고전압 전력기기 및 케이블에서 SF₆가스의 적용은 절연재료로서의 가격이 너무 비싸고, 대기압보다 높은 가스압력을 사용하는 등의 실제적인 문제가 존재할 뿐만 아니라 대기로 방출되는 경우 유효한 적외선 흡수체로서 작용하여 온실효과를 일으켜 지구온난화의 환경문제를 발생하고 전기적 방전으로 SF₆가스의 분해물질 즉, SF₄, SF₂, S₂F₁₀, SO₂, SOF₂, SOF₄, SO₂F₂, S₂O₂F₁₀ 그리고 HF 등이 생성된다. 이들 생성물질 중에서 S₂F₁₀와 S₂O₂F₁₀는 치명적인 독성을 갖고 있는 것으로 알려지고 있

다 [4].

따라서 SF₆가스보다 경제적이고 절연과피전압의 향상 등을 기대할 수 있는 화학물질과 SF₆가스 혼합물들의 적용에 대한 연구가 지금까지 활발히 진행되어 왔으며, 이 경우 C₄F₆가스의 절연내력은 순수 SF₆가스보다 약 2.3~2.5배정도 그리고 SF₆가스 혼합물들 중에서 몇 가지는 순수 SF₆가스보다 약 1.1~1.75배 정도로 높은 절연강도의 향상을 갖는 것으로 보고되었다 [5]~[6]. 그러나 C_xF_y 및 CO₂계 혼합가스들 중에는 C₄F₆Cl₂와 같은 독성 불순물을 포함하거나 아크가 일어나면 이들 가스들로부터 탄소(C)가 생성된 후 고체절연물들에 침적되어 전도층을 형성하는 등의 문제가 나타나며, 실제 시스템들에서 그들의 독성, 방전 생성물 및 이들 혼합가스의 성능에 관한 의문점들이 발생되었다. 그러므로 공기의 주성분으로 비점(-196℃)이 낮고, 가격이 저렴하며, 무독성 및 비가연성 등의 화학적 안정성이 우수한 N₂가스를 SF₆가스에 혼합한 SF₆-N₂ 혼합가스의 적용은 새로운 연구대상으로 대두되고 있다. 결국 SF₆-N₂ 혼합가스는 순수 SF₆가스에 비해서 이물질의 존재나 전극표면 거칠기 등에 의한 강한 국부전장이 존재할 때 절연내력의 저하가 상대적으로 덜 민감하고, 보다 낮은 비점과 저렴한 절연재료 비용 등의 경제성 등에서 장점을 갖기 때문에 앞에서 언급한 문제점들을 해소할 수 있을 것으로 예상되므로 향후 SF₆가스의 대체 절연재료로서 전력기기의 절연시스템에 사용될 가능성은 매우 높다 [7]~[9].

GIS의 성능과 운전효율의 향상을 위해서는 가스절연 기기의 절연과피 현상과 절연내력에 직접적으로 영향을 미치

* 正 會 員 : 仁荷大 電子電氣컴퓨터工學部 教授 · 工博

** 正 會 員 : 仁荷大 師範大學 附屬高 教師 · 工博

*** 正 會 員 : 仁濟大 電子工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2001年 3月 30日

最終完了 : 2001年 5月 17日



는 전구방전의 진전기구에 대한 해석은 매우 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 GIS내에 금속성 이물질이 존재하는 경우 SF₆-N₂ 혼합가스에서 절연파괴를 일으키는 전구방전의 진전과정을 분석할 목적으로 현장의 가스절연기에서 빈번히 발생하는 뇌저지를 모의한 정·부극성의 뇌임펄스전압을 만들어 실험에 적용하였으며, 실험실 안의 온도범위는 상온(18~23 ℃)이었다. 전구방전전류의 측정용 광대역 분류기를 제작하여 이의 응답특성을 측정된 후 사용하였고, GIS 안에서 이물질이 존재하는 경우를 가정해서 침전극을 평판전극계에 부착시킨 불평등전장을 구성하였으며, 가스압력의 범위는 0.1~0.5 MPa이다. 실험전압은 용량성 전장센서 그리고 전구방전전류는 고응답 분류기를 이용하여 계측하였으며, 전구방전전류를 기초로 리더 사이의 시간간격, 절연파괴까지의 시간 지연 등에 대해서 중점적으로 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

불평등전장에서 SF₆-N₂ 혼합가스의 전구방전특성을 분석하기 위하여 바늘모양의 침을 평행평판 전극계의 상부 평판전극 중앙에 부착시켰다. 평행평판 전극사이의 간격은 32 mm로 하였고, 침상 돌기물은 곡률 반경 및 길이가 각각 0.5 mm 및 10 mm로 하였다. 상부의 평판전극은 직경이 70 mm인 동, 하부의 평판전극은 직경이 90 mm인 스테인리스강을 사용하였다. 실험전압의 변동에 의한 변위전류 성분을 최소화하기 위해서 상부의 평판전극과 침전극을 전기적으로 절연시켰다. 실험장치는 IEC 517의 규격을 적용하여 열적, 전기적 및 기계적인 강도를 충분히 만족하는 내경 396 mm의 스테인레스강을 이용하여 금속 외함을 원통형으로 제작하였다.

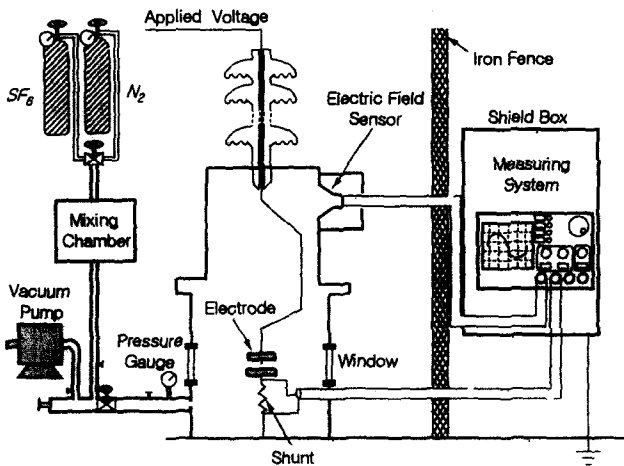


그림 1 실험장치의 개략도

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental apparatus

뇌임펄스전압을 인가하기 위하여 66 kV(BIL 350 kV) 콘덴서형 부상과 전극에 인가되는 실험전압을 가능한 전극 가까

운 곳에서 정확하게 측정하기 위하여 원추형 제작된 전장센서를 전극 상단부에 설치하였으며 [10], 실험장치의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

실험전압으로는 정·부극성의 뇌임펄스전압을 병렬충전식 8단 Marx형 임펄스전압 발생장치를 이용하여 발생시켰고, 이 뇌임펄스전압의 파형은 1.2/44 μs이었다. 인가전압의 측정에 사용된 용량성 전장센서는 200 MHz의 주파수대역을 가지므로 정확한 실험전압의 검출이 가능하였다. 전구방전전류의 측정용 분류기는 500 Ω의 금속피막저항 10개를 원통형으로 병렬 접속하여 50 Ω으로 하였으며, 섬락시 과전압에 대한 계측기의 보호장치로써 고성능 피뢰기를 사용하였다. 이 때 분류기의 순수 응답시간은 1.2 ns이고, 주파수대역은 DC~290 MHz이었다.

2.2 실험 방법

SF₆-N₂ 혼합가스의 비율은 절연내력, 경제성 및 주위환경 등을 고려하여 10 %의 N₂가스와 90 %의 SF₆가스인 N₂(10%)-SF₆ 혼합가스로 하였으며, Dalton의 분압법칙에 따라 각각의 시료 조절기와 실험용기에 부착된 압력계를 이용하여 봉입하였다. 로타리펌프로 실험용기를 0.133 Pa까지 배기시킨 다음에 SF₆가스를 선정된 부분압력까지 넣은 후 N₂가스를 소정의 가스압력까지 봉입하였으며, 실험에 적용한 가스압력의 범위는 0.1~0.5 MPa까지로 하였다. N₂가스는 고등급(순도 99.999 %)이었으며, SF₆가스는 IEC 376 규격에 맞은 상용등급(순도 99.95 %)을 사용하였다.

인가전압과 전구방전전류의 측정용 케이블은 2중 망사선(double mesh wire)으로 차폐시킨 특성임피던스 50 Ω의 동축케이블을 사용하였고, 실험에서 사용된 모든 계측장치는 차폐함 안에 내장시켰으며, 계측기용 전원은 절연변압기와 2중 라인필터를 통하여 공급함으로써 외부에서 발생하는 잡음과 외란의 영향을 최소화하였다. 전구방전전류의 파형을 측정하기 위하여 침전극에 부착된 분류기를 통한 신호는 동축케이블을 통해 10 : 1 감쇠기를 경유하여 오실로스코프로 관측되었다. 이 때 전장센서로 감지된 인가전압과 분류기로 측정된 전구방전전류는 모두 저장형 디지털 오실로스코프(500 MHz, 2.5 Gs/s)로 관측되었다. 전장센서의 주파수대역은 40 Hz~200 MHz로 인가전압을 정확하게 측정할 수 있었으며, 동일한 조건에 대해서 정·부극성의 뇌임펄스전압을 약 30~40회 인가하여 절연파괴전압과 전구방전전류를 측정하였다.

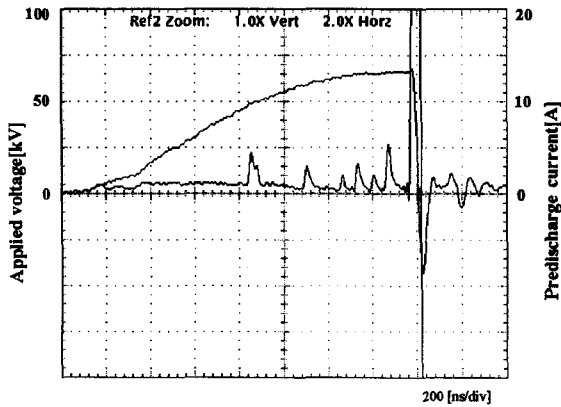
3. 결과 및 고찰

3.1 전구방전전류의 파형

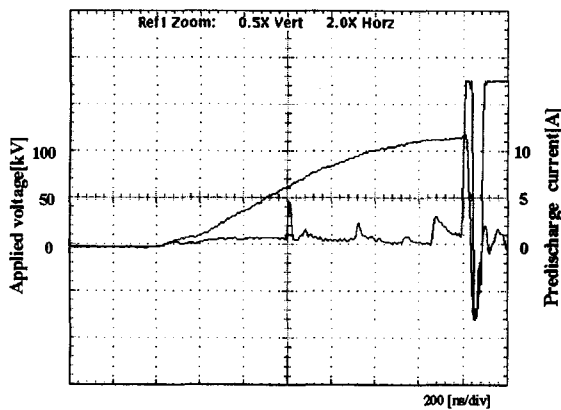
전구방전현상의 해석은 SF₆-N₂ 혼합가스의 절연특성 즉, V-t특성과 V-p특성의 해석에 기초가 되며, 이들 특성의 근본 원인의 파악을 비롯하여 방전의 진전과정과 메커니즘의 분석에서 대단히 중요하다. 불평등전장에서 전구방전의 진전특성은 인가전압의 파형, 극성 그리고 가스압력의 변화에 따라서 다르게 나타난다. 갭에 인가되는 전압은 방전진전의 특성을 지배하는 시간범위에서 변화하며, 절연내력의 실질적

인 변동을 가져오게 되므로 인가전압과 관련되는 전반적인 요인의 영향을 정확하게 이해하기 위해서는 스텝핑시간, 통계적 시간지연, 형성 시간지연 등 여러 가지 요인들을 개별적으로 검토하는 것이 바람직하다 [3].

그림 2에는 N₂(10%)-SF₆ 혼합가스에서 뇌임펄스전압에 대한 전구방전전류의 대표적인 파형을 나타내었다. 전구방전의 진전과정은 극성에 관계없이 스트리머코로나를 경유하여 리더전류펄스가 간헐적으로 수 회 나타난 후 절연파괴에 이르는 것으로 관측되었다.



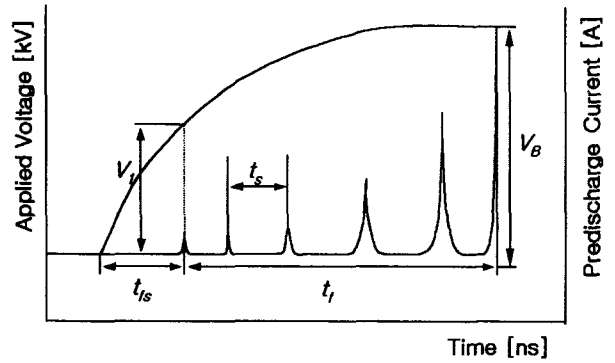
(a) 정극성



(b) 부극성

그림 2 뇌임펄스전압에 대한 전구방전전류의 전형적인 파형
Fig. 2 Typical waveforms of the predischARGE current under the lightning impulse voltages

전구방전의 진전과정은 인가전압의 극성에 관계없이 '리더 진전에 의한 절연파괴'라는 근본적인 특성은 동일하지만, 부극성의 경우가 정극성의 경우보다 리더전류펄스 사이의 시간간격이 넓으며, 이온성 전류성분을 많이 포함하고 있음을 알 수 있다. 가스압력의 증가와 더불어 초기스트리머코로나 전류의 크기는 감소하였으며, 리더의 진전횟수는 증가하였다. 전구방전현상을 해석하기 위해서 정의한 파라미터를 그림 3에 나타내었다.

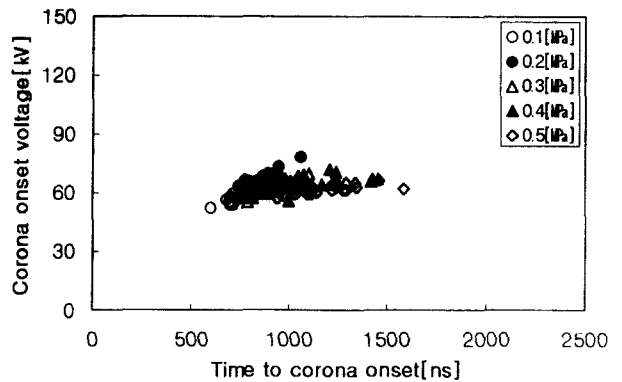


V_1 : 초기코로나 개시전압 t_s : 리더펄스 사이의 시간간격
 t_{1s} : 통계적 시간지연 t_f : 형성 시간지연

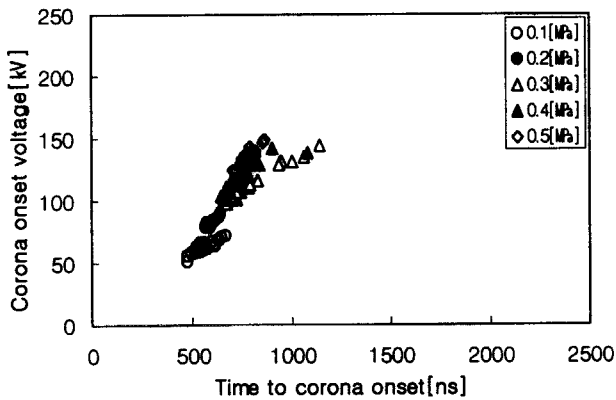
그림 3 전구방전전류 특성의 분석을 위한 파라미터의 정의
Fig. 3 Definition of parameters for the analysis of predischARGE current characteristics

3.2 초기코로나 개시전압-시간 특성

전구방전의 진전과정은 초기스트리머코로나에 의해서 전구방전이 개시되고, 계단상 리더(step leader)가 형성되며, 리더의 진전으로 절연파괴를 이루는 형태이다. 따라서 리더의 진전과 공간전하효과에 직접적으로 관련성이 있는 초기코로나 개시전압을 측정하고 검토하는 것은 바람직하므로 N₂(10%)-SF₆ 혼합가스 중에서 정·부극성의 뇌임펄스전압이 인가된 경우에 나타나는 코로나현상을 분석하였다. 코로나 안정화효과는 순수 SF₆가스 혹은 SF₆가스의 혼합물과 같은 전기적 부성가스들에서 현저하게 나타나며, 절연파괴전압의 가스압력 의존성에 관계한다 [11]. N₂(10%)-SF₆ 혼합가스의 가스압력 변화에 따른 코로나 개시시간 t_{1s} 대 초기코로나 개시전압 V_1 의 관계를 그림 4에 나타내었다. 정극성의 뇌임펄스전압이 인가된 경우 부극성의 경우보다 코로나 개시전압이 낮았으며, 초기코로나 개시전압의 편차도 거의 없었다. 이러한 원인은 정극성의 경우 초기전자가 부이온 또는 불순물로부터의 탈리작용에 의해 발생될 확률이 높기 때문인 것으로 생각된다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 4 초기코로나 개시전압-시간 특성

Fig. 4 First corona onset voltages-time characteristics

부극성의 경우에는 초기전자가 전장방출에 의해 발생되더라도 스트리머코로나를 형성하는데 요구되는 에너지의 양이 압력의 함수로 작용하기 때문에 가스압력이 높아짐에 따라 코로나 개시전압도 대체로 상승하는 경향을 나타내었다. 전반적으로 보면 코로나 개시전압은 불규칙한 분포를 나타내는 것으로 볼 수 있는데, 이것은 가스압력과 인가전압의 상승시간에 의해서 변화되는 방전공간의 전장분포에 의한 초기전자의 발생 비율과 초기코로나의 발생조건이 다르기 때문인 것으로 생각된다.

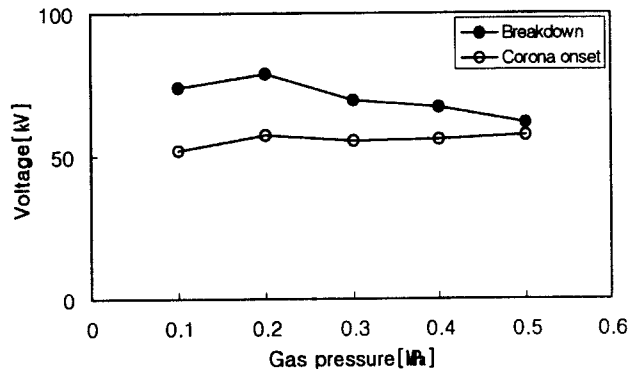
3.3 절연파괴전압과 초기코로나 개시전압의 비교

정·부극성의 뇌임펄스전압을 인가시킨 경우 $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합가스의 가스압력에 따른 최소절연파괴전압과 초기코로나 개시전압의 비교를 그림 5에 나타내었다. 최소절연파괴전압과 초기코로나 개시전압의 형태는 가스의 종류에 따라 유사한 특성을 보이고 있다. 정극성의 임펄스전압을 인가한 경우 낮은 가스압력에서는 최소절연파괴전압과 초기코로나 개시전압의 차이가 크게 나타났다. 반면에 부극성의 경우 절연파괴전압과 초기코로나 개시전압은 미소한 경향의 차이는 보이지만 가스압력의 변화에 따라 거의 선형적으로 증가하는 특성을 나타내었다. 정·부극성의 경우 초기단계에 돌기물의 끝단에서 발생하는 스트리머코로나와 공간전하의 형성과 영향에 대한 모형을 그림 6에 나타내었다.

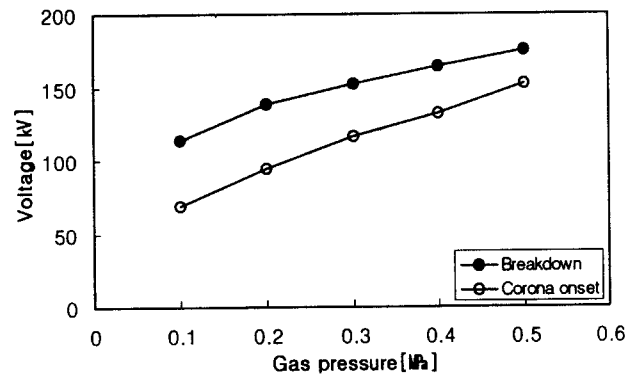
그림 6(a)에 나타낸 바와 같이 정극성의 경우 인가전압에 의해 형성된 전리영역내에서 SF_6 의 부이온 또는 수분과 같은 불순물의 탈리작용으로 발생한 초기전자에 의해서 스트리머코로나는 돌기물의 끝단을 향하여 형성된다. 초기스트리머코로나에 의해서 생성된 전자나 부이온은 침전극(+)으로 유입되고, 침전극의 앞단에는 정이온이 잔류하게 되며, 정이온은 후속 스트리머코로나의 크기나 공간전하의 양과 분포가 가스압력에 영향을 받는다. 가스압력이 증가할수록 확산이 억제되므로 스트리머코로나의 크기는 감소하고, 공간전하의 확산이 억제되어 전장강화 효과가 발생하는 조건이 되면 리더의 진전이 용이해져서 절연파괴전압은 낮아지는

결과를 가져오게 된다.

정극성의 경우 최소절연파괴전압은 0.2 MPa의 가스압력에서 가장 높게 나타났으며, 이것은 스트리머코로나 방전에 의해 생성된 공간전하의 영향으로 볼 수 있다. 0.2 MPa의 가스압력을 기점으로 최소절연파괴전압이 점차 감소하는 것은 스트리머코로나에 의해서 발생한 공간전하의 영향이며, 침전극의 굵기와도 관련이 있을 수도 있다. 즉, 가스압력이 증가함에 따라 공간전하(정이온)의 확산과 소멸이 억제되어 계단상 리더의 발생과 진전이 용이하게 되어 절연파괴전압이 낮아지는 현상을 보인다.



(a) 정극성



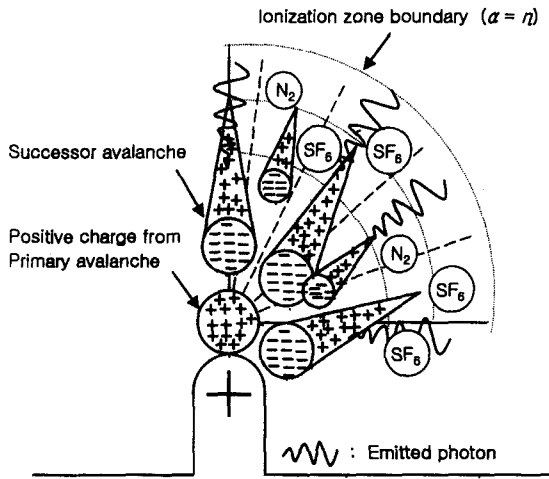
(b) 부극성

그림 5 절연파괴전압과 초기코로나 개시전압의 비교

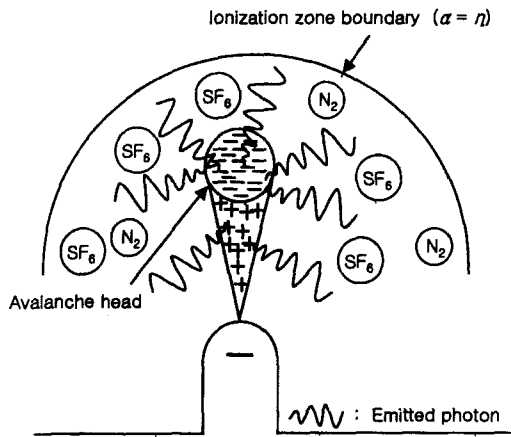
Fig. 5 Comparison between the breakdown voltage and first corona onset voltage

반면에 부극성의 경우 그림 6(b)에 나타낸 바와 같이 침전극에서의 전장방출에 의해서 초기전자가 발생하여 침전극으로부터 방사상의 방향으로 스트리머코로나가 형성된다. 스트리머코로나에 의해서 생성된 정이온은 침전극(-)으로 유입되며, 침전극의 앞단에는 부이온이 잔류하게 되어 침전극의 끝단을 차폐하게 된다. 따라서 침전극 끝단의 전장의 세기는 인가전압에 의한 전장의 세기에서 공간전하(부이온)에 의한 전장의 세기를 뺀 값으로 되어 초기전자 즉, 후속 스트리머코로나의 발생을 억제하게 된다. 침전극 끝단의 공

간전하가 소멸되면 후속 스트리머코로나가 발생하며, 공간전하의 양과 소멸시간이 가스압력에 영향을 받으므로 당연히 절연파괴전압이 가스압력에 따라 변화하게 된다. 즉, 정극성의 경우와는 반대로 가스압력이 증가함에 따라 침전극 앞단의 공간전하(부이온)의 확산에 의한 소멸이 억제되는 전장안정화작용에 의해 절연파괴전압이 증가하는 것으로 판단된다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 6 스트리머코로나의 발생에 대한 모형
Fig. 6 Model for the initiation of streamer corona

3.4 리더펄스 사이의 시간간격

전구방전전류의 파형을 기초로 해서 초기 리더가 다음 리더를 발생시키도록 이온화 영역의 끝단까지 진전하는데 소요되는 시간인 리더사이의 시간간격(리더의 스텝핑시간: t_s)을 분석하였다. $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합가스의 전구방전전과정은 스트리머코로나에서 리더로 천이하게 된다. 따라서 t_s 는 리더의 진전과정을 설명하기 위한 중요한 파라미터가 된다. 리더의 스텝핑시간 t_s 는 전자와 가스분자 사이의 충돌 및 리

더 전류밀도에 의하여 결정되고, 스트리머코로나 전류의 크기와 가스압력의 영향도 받는다. 지금까지 실험적인 관찰과 이론적인 해석에 의해 정립된 리더의 스텝핑시간은 스케일링법칙에 의해 해석되어 왔다 [12] ~ [13].

스케일링법칙에 의한 리더의 스텝핑시간 t_s 를 유도해 보면, 스트리머코로나에 의해서 생기는 선전하밀도 λ 는 인가전압 V 에 비례하고, 스트리머코로나 전하 q_c 는 V^2/p 에 비례하므로

$$q_c \equiv \frac{\pi \epsilon_0 V^2}{E_{cr}} = \frac{V^2}{p} \tag{1}$$

가 된다. 여기서 E_{cr} 은 스트리머통로의 임계전장의 세기이다. 이 때 q_i 를 이온이 이동하면서 생기는 공간전하라고 하면, 전장의 증분 ΔE 는

$$\Delta E = \frac{q_i}{4\pi \epsilon_0 r_{st}^2} \tag{2}$$

로 나타낼 수 있다. 펄스를 발생하는 공간전하를 만들기 위한 전하 q_i 는

$$q_i = v_{di} \cdot t_s \cdot \lambda \tag{3}$$

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

$$t_s = \frac{q_i}{v_{di} \cdot \lambda} = \frac{4\pi \epsilon_0 \Delta E}{v_{di}} \cdot \frac{r_{st}^2}{V} \tag{4}$$

이고, 스트리머 반경 r_{st} 는 가스압력 p 에 반비례하므로 식 (4)를 식 (5)로 나타낼 수 있다. 즉,

$$t_s = \frac{K}{V \cdot p^2} \tag{5}$$

이다. 이 때, K 는 물기물의 형상과 인가전압의 파형에 의해 정해지는 정수이다. 이와 같이 리더의 스텝핑시간 t_s 에 관한 특성은 인가전압에 반비례하고, 가스압력의 제곱에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 스케일링법칙의 이론을 근거로 하여 $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합가스에 대한 리더의 스텝핑시간 t_s 의 분포를 그림 7에 나타내었다.

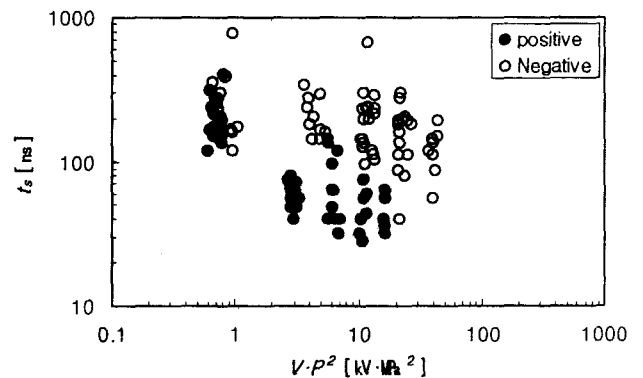


그림 7 리더 스텝핑시간
Fig. 7 Leader stepping time

본 연구의 실험결과로부터 K 값은 부극성이 정극성의 경우보다 약 8배정도 크게 나타났다. 결국, 온도가 일정할 때 리더의 스텝핑시간과 가스압력의 관계에서 리더의 스텝핑시간 t_s 가 가스밀도 혹은 가스압력에 반비례한다는 것은 기체방전이 전자의 충돌전리작용에 의해서 발생된다는 것을 입

증한다. 또한 가스압력과 인가전압의 증가에 따른 t_s 의 감소는 SF₆ 이온의 이동과 직접적인 관련이 있으며, 스트리머코로나에 의하여 SF₆⁺(SF₆)_n과 같은 정이온이 형성되어 이들의 이동속도는 가스압력의 증가와 더불어 감소하므로 t_s 가 짧아지게 되는 것으로 해석된다 [14]. 결국 정극성 경우 스트리머코로나에 의해 형성된 SF₆⁺의 정이온 형태인 이들의 이동속도가 압력이 증가할수록 감소하여 t_s 는 짧아지지만, 부극성의 경우에는 공간전하인 부이온의 전장완화작용에 의해서 길게 나타나기 때문에 정극성보다 t_s 가 길게 나타나는 것으로 생각된다. 또한 부극성의 경우가 정극성에 비하여 전구방전 전전과정의 불안정성 때문에 리더의 스텝핑시간 편차가 대단히 크게 나타난 것으로 볼 수 있다.

3.5 절연파괴 시간지연

가스절연개폐장치의 절연협조 및 과전압보호에 대한 절연설계는 실질적으로 절연가스의 V-t특성을 활용한다. 절연파괴전압보다 높은 전압이 전극에 인가된 경우 절연파괴는 반드시 일정한 시간이 경과된 후에 일어난다. 전압이 인가된 후 절연파괴까지의 시간지연은 크게 통계적 시간지연(statistical time lag : t_s)과 형성 시간지연(formative time lag : t_f)으로 나누어진다. 통계적 시간지연은 전압이 인가된 시점으로부터 초기전자가 발생되기까지 소요되는 시간을 말하며, 형성 시간지연은 초기전자의 발생으로부터 이것에 의해 방전이 진전되어 섬락 즉, 절연파괴까지 이르는 시간을 나타낸다. 이와 같이 절연파괴까지의 시간지연은 전력설비에 과도과전압이 발생할 경우 전력설비에 영향을 줄 것인지 아닌지를 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 본 실험에서는 가스압력의 의존성을 가지는 통계적 시간지연과 형성 시간지연의 특성을 분석하였다.

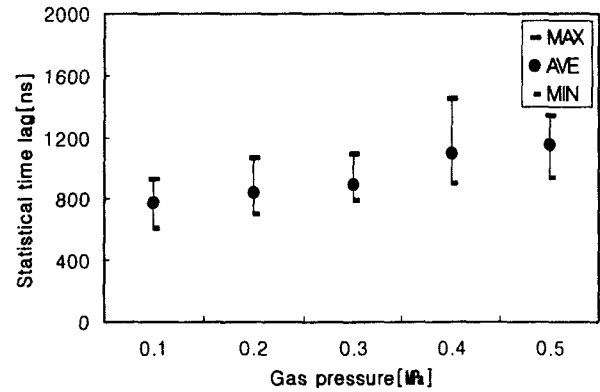
3.5.1 통계적 시간지연

통계적 시간지연은 물리적으로는 초기전자가 발생하기까지 걸리는 시간이지만, 초기전자가 발생한 시점을 검출하는 것은 매우 어렵다. 전압의 인가시점에서 초기전자가 발생하기까지의 시간에 비해서 초기전자가 발생하여 스트리머코로나를 발생하기까지의 시간이 매우 짧기 때문에 본 연구에서는 공학적으로 많이 적용되고 있는 전압의 인가시점부터 초기 스트리머코로나가 발생하기까지의 시간을 통계적 시간지연으로 정하였다.

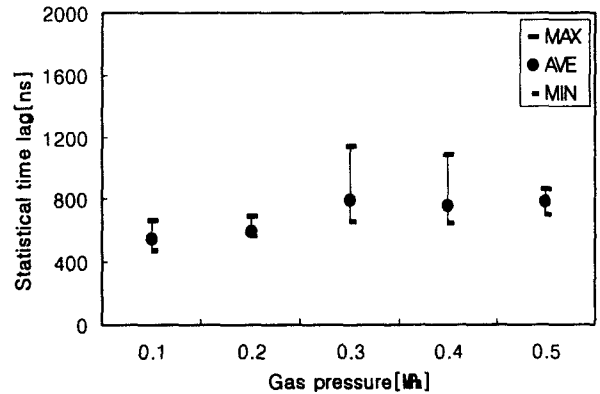
N₂(10%)-SF₆ 혼합가스의 실험결과로부터 분석한 통계적 시간지연을 그림 8에 나타내었다. 통계적 시간지연은 초기전자의 발생메커니즘과 관련이 깊으며, 초기전자의 발생이 많으면 초기 스트리머코로나의 발생이 용이하므로 절연파괴까지의 시간도 더 짧아지게 된다 [15]. N₂(10%)-SF₆ 혼합가스 중에서 초기전자는 주로 정극성의 경우 SF₆가스의 부이온 또는 불순물로부터 탈리작용에 의한 전자방출이나 여기원자 혹은 분자의 충돌 누적전리에 의해서 발생하므로 가스압력에 대한 의존성이 나타난다. 하지만, 부극성의 경우 불평등 전장에서 음극으로부터의 전장방출에 의한 초기전자의 발생은 대부분 미소돌기 부분으로부터의 전자방출에 의해서 공급되므로 가스압력의 의존성이 거의 나타나지 않은 것으로 판단된다 [2]~[3].

가스압력이 증가할수록 초기 스트리머코로나 발생까지의

시간이 점차적으로 길어지는 것을 알 수 있는데, 가스압력이 증가함에 따라 전극내의 하전입자의 자유행정 거리가 짧아져 부이온 또는 불순물로부터의 탈리에 필요한 에너지를 얻기가 어려워지므로 통계적 시간지연이 길어지는 것으로 생각할 수 있다. 또한 정극성의 경우 부극성보다 통계적 시간지연이 길게 나타났으며, 가스압력이 증가할수록 초기코로나가 발생되기까지의 시간이 약간 길어지고, 초기전자의 발생이 매우 불규칙적인 것으로 나타났다.



(a) 정극성



(b) 부극성

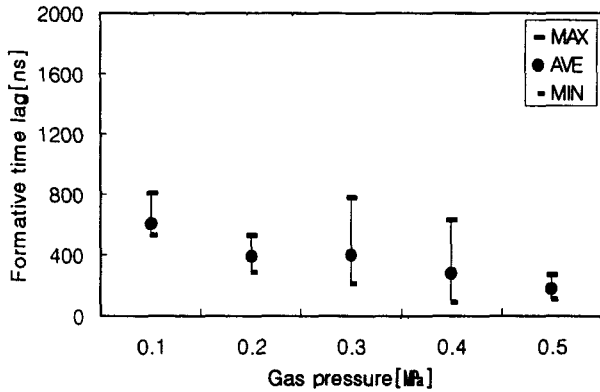
그림 8 가스압력에 따른 통계적 시간지연

Fig. 8 Statistical time lags as a function of the gas pressure

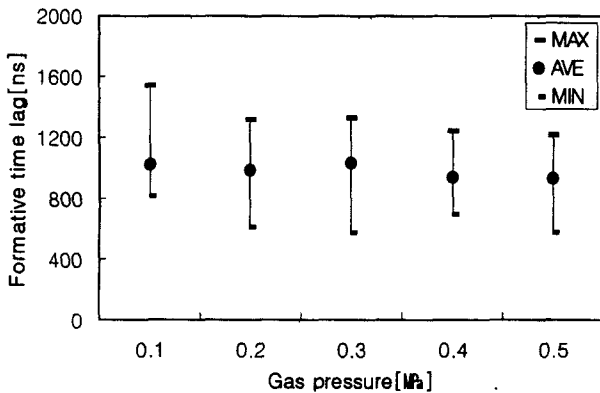
3.5.2 형성 시간지연

형성 시간지연은 엄밀하게 말하면 초기전자가 발생한 시점부터 방전이 진전되어 절연파괴까지 이르는 시간이지만, 본 실험에서는 초기 스트리머코로나의 발생시점부터 절연파괴까지의 시간간격을 형성 시간지연으로 정의하였다. 형성 시간지연은 방전의 진전과정으로 절연파괴전압을 초과하는 전압, 전장분포, 전극형상, 가스압력 및 인가전압의 극성 등에 영향을 받는다. N₂(10%)-SF₆ 혼합가스의 실험결과로부터 분석한 형성 시간지연을 그림 9에 나타내었다. 가스압력이 증가함에 따라 정극성의 경우 형성 시간지연은 급격히 감소하는 경향이나 부극성의 경우는 약간 감소하는 것으로 나타

났다. 정극성의 경우 정극성 스트리머코로나에 의해서 발생된 정이온과 전자의 수명이 부이온에 비하여 대단히 짧기 때문에 방전의 진전은 빨리 이루어지고 가스압력에 영향을 크게 받게 되며, 형성 시간지연은 정극성의 경우 부극성과 비교해서 가스압력의 증가에 대하여 급격하게 짧아지는 특성이 나타난 것으로 판단된다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 9 가스압력에 따른 형성 시간지연

Fig. 9 Formative time lags as a function of the gas pressure

부극성의 경우 형성 시간지연이 정극성보다 훨씬 길게 나타났는데, 그 이유는 정극성의 경우 스트리머코로나에 의한 리더 진전과정이 지배적이지만, 부극성의 경우에는 정극성에 비해 이동속도가 매우 늦은 부이온에 의해서 리더의 진전이 영향을 받기 때문에 리더의 진전이 늦어져 형성 시간지연이 길어지게 된다. 즉, 절연파괴에 이르기까지의 시간지연이 길게 되며 절연파괴전압도 높게 나타난 것으로 생각된다. 부극성에서의 형성 시간지연은 약간 짧아지는 경향을 나타내었으며, 정극성보다는 낮은 가스압력에서 길게 나타나는 특성을 볼 수 있었다.

4. 결 론

GIS안에 금속성 돌기물이 존재하는 경우를 모의한 불평등전장에서 N₂(10%)-SF₆ 혼합가스의 절연파괴전압에 영향을

미치는 전구방전현상을 분석·검토한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전구방전의 진전과정은 스트리머코로나를 경유하여 리더전류펄스가 간헐적으로 수 회 나타난 후 절연파괴에 이르며, 인가전압의 극성에 관계없이 리더기구에 의해 절연파괴가 발생하는 것으로 밝혀졌다.

(2) 초기코로나 개시전압은 정극성의 경우 가스압력의 변화에 관계없이 거의 같은 크기로 나타났지만, 부극성의 경우에는 가스압력이 상승할수록 증가하는 현상을 보였으며, 정극성의 스트리머코로나 개시전압이 부극성보다 낮게 나타났다.

(3) 리더의 스텝핑시간은 인가전압의 크기에 반비례하고 가스압력의 제곱에 반비례하여 짧아지며, 동일한 조건에서 부극성의 경우가 정극성의 경우보다 약 8배정도 길게 나타났다.

(4) 초기전자의 발생기구와 리더진전에 대한 공간전하의 영향 때문에 통계적 시간지연과 형성 시간지연은 가스압력의 의존성이 극성에 따라 현저하게 변동하였다.

참 고 문 헌

- [1] Bok-Hee Lee and tKyoung-Ok Lee : "Breakdown Characteristics of SF₆ Gas under VFTOs in Non-uniform Field ", Proc. of the Korea-Japan Joint Workshop on Plasma Technologies and Application, pp. 81~88, Oct., 1998.
- [2] T. Kawamura, B. H. Lee, T. Nishimura and M. Ishii : "Breakdown Characteristics of SF₆ Gap Disturbed by a Metallic Protrusion under Oscillating Transient Overvoltages", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, pp. 2043~2049, 1994.
- [3] 이복희, 이경옥, 이창준, 백승권 : "불평등전계 중에서 임펄스전압에 대한 SF₆기체의 전구방전과정의 분석", 전기전자재료학회 논문지, Vol. 13, No. 1, pp. 85~93, 2000.
- [4] L. G. Christophorou and R. J. Van Brant : "SF₆/N₂ mixtures basic and HV insulation properties", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol. 2, No 5, pp. 952~1003, 1995.
- [5] N. H. Malik and A. H. Qureshi, "A review of electrical breakdown in mixture of SF₆ and other gases", IEEE Trans., Vol. EI-14, No 1, pp. 1~11, 1979.
- [6] A. H. Mufti and N. H. Malik : "Pulsative Corona from free spherical conducting particles in SF₆/N₂ mixtures", IEEE Int. Symp. on Elect. Insul., pp. 797~799, 1996.
- [7] M. F. Fréchette, S. Kamel, R. Bartnikas and R. Y. Larocque : "Negative Corona Discharge in Air with Small SF₆ Content", IEEE Int. Symp. on Elect. Insul., pp. 801~805, 1996.
- [8] X. Waymel, V. Delmon, T. Reess, A. Gibert, P. Domens : "Impulse Breakdown in Point-Plane Gaps in SF₆-N₂ Mixtures", 10th International Symposium on High Voltage Engineering(ISH), pp. 283~286, 1997.

- [9] T. B. Diarra, A. Beroual, F. Buret, E. Thuries, M. Guillen, Ph. Roussel, "N₂-SF₆ mixtures for high voltage gas insulated lines", Proc. of 10th ISH, pp. 101~104, 1997.
- [10] Bok-H Lee : "Breakdown Behavior of SF₆ Gas in Nonuniform Electric Field under Transient Impulse Voltages", J. of the Korea Phys. Soc., Vol. 34, No. 3, pp. 248~253, 1999.
- [11] H. Okubo, M. Yoshida, A. Suzuki, T. Kato, N. Hayakawa, M. Hikita : "Discrimination of Partial Discharge Type in SF₆ Gas by Simultaneous Measurement of Current Waveform and Light Emission", IEEE Int. Symp. on Elect. Insul., pp. 107~110, 1996.
- [12] I. Gallimberti, L. Ullrich and N. Wiegart : "Streamer and Leader Formation in SF₆ and SF₆ Mixture under Positive Impulse Condition : I. Corona Development", J. Phy. D ; Appl. Phys. 12, pp. 2351~2361, 1986.
- [13] H. Ueno, H. Ohnishi, K. Tada, M. Onoda and H. Nakayama : "Influence of Creeping Distance and Gas Pressure on Negative Creeping Discharge for Composite Insulation Consisting of SF₆-N₂ and Solid Dielectric under Pulse Voltage", J. Phys. D: Appl. Phys., 1998.
- [14] T. Kawamura and B. H. Lee : "Transient Impulse Breakdowns of SF₆ Gas in Inhomogeneous Electric Fields", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38, pp. 4898~4909, 1999.
- [15] H. Heisinger : "Statistical time-lag in case of Very Fast Transient Breakdown", Proc. of 6th ISH, No. 32-23, New Orleans, 1989.

저 자 소 개



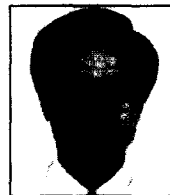
이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일 생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988년~1989년 일본 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland university 방문교수.

1999년 Cincinnati university 방문교수. 1990년~현재 인하대 공대 전자전기컴퓨터공학부 교수.

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

Email : bhlee@inha.ac.kr



백승권 (白承權)

1955년 8월 26일 생. 1979년 인하대 공대 전자공학과 졸업. 1981년 인하대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1989년 일본 경응대 대학원 전자공학과 졸업(공박). 1996년 일본 경도대학 방문교수. 1991년~현재 인

제대 공대 전자공학과 부교수

Tel : 055-320-3190, Fax : 055-333-3261

Email : elecpsk@ijnc.inje.ac.kr



이경옥 (李京沃)

1960년 6월 24일 생. 1987년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988년~1991년 동양나일론(주) 근무. 1991년 인천전문대

제어계측과 강사. 1991년~현재 인하사대부고 교사. 2001년~현재 인천전문대 전기과 강사.

Tel : 032-870-1045, Fax : 032-875-1344

Email : kyoungok_lee@hanmail.net