

## V-t Characteristics in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixtures for Transient Impulse Voltages

李 福 熙\* · 李 京 沃\*\*  
(Bok-Hee Lee · Kyoung-Ok Lee)

**Abstract** - In this paper, breakdown voltages in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixtures were experimentally investigated to understand characteristics of dielectric strength and physical phenomena in nonuniform field disturbed by a needle shape protrusion. The test voltages are the lightning impulse(±1.2/44 μs) and the damped oscillatory impulse(±400 ns / 0.83 MHz) voltages which can be occurred by the operation of disconnecting switches in gas-insulated switchgears(GIS). The effects of the polarity and wave shape of the test voltages, and the gas pressure on the V-t characteristics were in detail examined. The V-t characteristic curves were measured in different two ways : (1) one is the method by taking the maximum voltage recorded at or prior to breakdown against the time to breakdown, that is, the procedures recommended in IEC 60060-1, (2) the other is the method by taking the voltage at the instant of chopping against the time to breakdown.

As a result, the V-t characteristics of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixtures in nonuniform electric field were significantly affected by the polarity and wave shape of the applied voltages. The positive breakdown voltages resulted in lower breakdown voltages in the time ranges considered, and the V-t curves for the negative oscillatory impulse voltage were extended over the longer time range. For the lightning impulse voltages, the V-t curves obtained by IEC Pub. 60060-1 were nearly same with the V-t curves obtained by the voltage at the instant of chopping against the time to breakdown. It is clear that the actual breakdown voltages were much lower than the maximum voltages appearing at or prior to breakdown because of the displacement current produced as a result of the dV/dt during the oscillatory transient voltage application. The scattering of the negative actual breakdown voltages was much larger than that of the positive.

**Key Words** : SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixtures, Nonuniform field, Time to breakdown, Lightning impulse voltage, Damped oscillatory impulse voltage, Displacement current, Breakdown voltages

### 1. 서 론

SF<sub>6</sub>가스는 화학적 안정성, 비가연성, 비독성 및 비폭발성 등 많은 장점을 갖고 있어 가스절연개폐장치(Gas-insulated switchgear: GIS)의 절연물질로서 현재 널리 사용되고 있지만, 자연상태에 노출되는 경우 온실효과로서의 환경오염, 고비용, 높은 비점 그리고 고압력 및 저온에서 액화의 문제 등을 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 혼합가스는 순수 SF<sub>6</sub>가스에 비해서 이물질의 존재나 전극표면 거칠기 등에 의한 강한 국부전장이 존재할 때 절연내력의 저하가 상대적으로 덜 민감하며, 보다 낮은 비점과 N<sub>2</sub>가스의 저렴한 절연비용의 경제성 등에서 장점을 갖기 때문에 향후 SF<sub>6</sub>가스의 대체 절연재료로써 전력기기의 절연시스템에 사용될 가능성은 매우 높다. 정극성의 임펄스전압에서는 N<sub>2</sub>가스의 혼합비율에 따라 미소하게 감소하는 특성을 보였지만, 부극성의 임펄스전압의 경우에는 N<sub>2</sub>가스의 혼합비율이 10 % 정

도까지 매우 급격히 점차 감소하는 경향을 나타내었다 [1]~[2]. SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 혼합가스의 절연파괴전압은 N<sub>2</sub>가스의 혼합비에 따라 낮아지므로 실용적인 측면을 고려하여 적절한 혼합비율에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 뇌임펄스 및 진동성 임펄스의 인가전압에 대한 절연파괴전압이 순수 SF<sub>6</sub>가스의 90% 이상이 되는 절연내력 특성을 갖는 10 %의 N<sub>2</sub> 가스를 SF<sub>6</sub>가스에 혼합한 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>(10%) 혼합가스에 대한 절연파괴특성을 중점적으로 분석하였다.

전력기기의 뇌임펄스전압 시험에서는 "절연파괴전압-시간 특성(Breakdown voltage-time 특성: 이하 V-t특성으로 표기)을 파악하는 것이 절연협조상 중요하지만, 현재까지의 V-t특성은 표준 뇌임펄스전압 파형에 대해서 절연파괴전압 특성의 검토가 주로 이루어져 왔다. 그러나 GIS내에 설치되어 있는 단로기의 조작에 의해서 발생하는 1 μs 이하의 상승시간 영역을 갖는 급준성 과도과전압(Very-fast transient overvoltage: VFTO)인 감쇠 진동성 임펄스전압은 고주파 진동성분을 포함하고 있으므로 피뢰기와 보호협조 측면에서 이에 대한 V-t특성의 파악은 매우 중요하다. 특히 VFTO는 GIS, 전력기구나 MOF의 2차측에도 영향을 미치게 되어 변압기와 부싱부에서의 절연파괴, 전력계통의 지속적인 절연파괴를 일으키는 MOF의 공진 현상 등 여러 가지 문제점이 대두되고 있다. GIS 안에 급속성 이물질이 존재하

\* 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 校 教 師 · 工 博

接 受 日 字 : 2001年 5月 18日

最 終 完 了 : 2001年 8月 13日

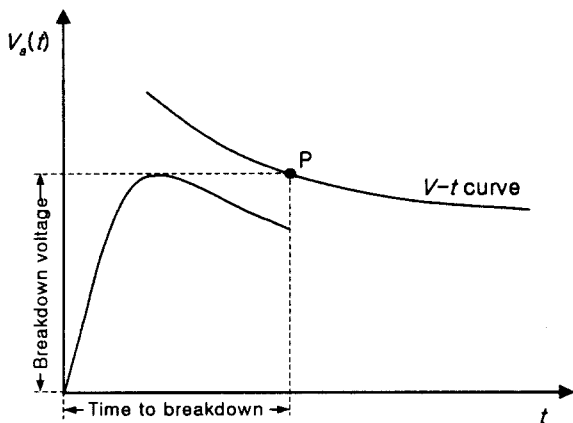
거나 돌기부가 있게 되면 VFTO에 의한 SF<sub>6</sub>가스의 절연내력은 대단히 저하되는 치명적인 문제점을 내포하고, 불꽃방전의 지연시간은 전력기기나 전력선로의 절연설계 및 보호장치의 협조체계 구성에서 중요한 자료가 된다 [3]~[4].

현재까지 임펄스전압에 대한 V-t특성곡선의 평가기준은 국제전기위원회(International Electrotechnical Commission: IEC) 규정 [5]에 의거하여 인가전압 파형에 대한 절연과피전압의 크기를 절연과피가 일어나기 이전에 인가된 최대값으로 하여 V-t곡선을 작성하였다. 하지만 감쇠 진동성 임펄스전압의 경우 절연과피시점에서의 전압은 뇌임펄스전압보다는 훨씬 낮으며, 절연과피가 파미 부근에서 일어나더라도 높은 피크전압을 취해야만 되는 모순이 발생하게 된다. 따라서 감쇠 진동성 임펄스전압에 대한 절연과피전압은 실제 절연과피전압보다도 낮은 값을 취하게 되는 현상이 나타나므로 가스절연기기의 보다 합리적인 절연설계를 위해서는 V-t특성에 대한 인가전압 파형의 영향 때문에 상승시간이 급준한 감쇠 진동성 임펄스전압 파형의 절연성능 평가의 경우 기존의 IEC규정에 따른 평가방법을 적용하는 데 있어서 재검토가 요망된다. 그러므로 본 연구에서는 GIS의 절연설계에 있어서 급준성 과도과전압인 진동성 임펄스전압 파형에 대한 V-t특성의 평가방법에 관한 검토를 목적으로 뇌임펄스전압에 대한 V-t특성을 얻는 방법으로 직접 평가하는 것에 대한 적합성 여부를 고찰하였다. VFTO에 대한 V-t특성의 정량적인 평가방법은 지금까지 Kind의 법칙 [6]을 적용하고 있으나 그 타당성이 확립되어 있지 않으므로 이에 대한 문제점과 V-t특성의 평가방법에 대한 새로운 방향을 제시해 보고자 한다.

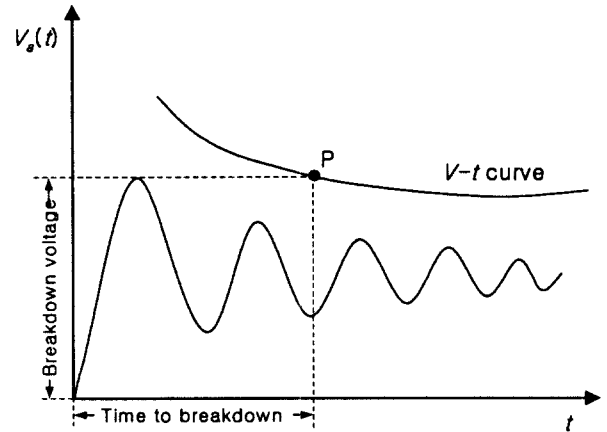
## 2. 가스절연재료에 대한 V-t특성의 검토

### 2.1 V-t특성의 평가방법

가스절연재료의 절연특성의 분석중의 하나인 V-t곡선은 50% 섬락전압보다 좀더 구체적인 절연특성을 얻을 수 있기 때문에 GIS의 절연설계 및 성능평가에서 보다 효과적인 것으로 판단된다.



(a) 뇌임펄스전압



(b) 진동성 임펄스전압

그림 1 뇌임펄스 및 감쇠 진동성 임펄스전압 파형에 대한 V-t곡선의 개략도

Fig. 1 Sketches of V-t curves for the lightning and damped oscillatory impulse voltages

IEC 60060-1 규정에 따른 뇌임펄스전압에 대한 V-t특성의 평가는 그림 1(a)에서 나타낸 바와 같이 「절연과피전압은 절연과피 순간 또는 그 이전에 시험 갭에 인가된 최대전압을, 절연과피시간은 시험전압이 인가되어 절연과피가 일어나기까지의 소요된 시간」을 취하여 V-t곡선으로 나타내는 방법으로 하고 있으며, 이 곡선을 임펄스 V-t곡선이라고도 한다. 또한 GIS의 운전중 단로기의 조작에 의해서 급준성 과도과전압이 발생하는데, 이에 대한 V-t특성의 산출에 있어서도 그림 1(b)에 나타낸 바와 같이 뇌임펄스전압의 경우와 동일한 방법을 적용하고 있다.

### 2.2 등면적칙을 적용한 V-t특성의 검토

GIS의 절연설계에 있어서는 절연과피가 일어나지 않는 설계조건을 적용한다. 하지만 GIS의 운반 및 설치 중에 전극표면의 결함이나 급속성 입자가 존재하는 경우 절연내력이 저하하여 절연과피를 일으키는 경우가 발생한다. 평등전장 또는 약간의 불평등전장에 대한 V-t특성곡선의 이론적 계산에는 등면적칙이 가장 많이 적용되고 있으며, 많은 연구자들의 결과가 대체로 일치하는 것으로 밝혀졌다. 등면적칙은 공기 중의 구갭의 전극계에 대해서 D. Kind에 의해 최초로 제안되었고, Kind의 등면적법칙이라고도 한다 [6]. 등면적칙에 의한 V-t특성의 정량적 평가를 위해서는 우선 방전 경로(리더)의 진전속도가 과도전압에 비례하고, 반대편 전극에 리더가 도달했을 때 절연과피가 일어난다고 가정할 경우, 등면적칙에 따라 그림 2의 파형에 대해서는 다음 식으로 V-t특성이 평가될 수 있다.

$$\int_{t_0}^{t_b} \{V_a(t) - V_{min}\}^k dt = A_f \quad (1)$$

여기서 V<sub>a</sub>(t)는 인가전압, V<sub>min</sub>은 최저절연과피전압, k는 전압에 의존하는 계수, t<sub>0</sub>는 V<sub>a</sub>(t) = V<sub>min</sub>이 되는 시간, 그리고 t<sub>b</sub>는 절연과피에 이르기까지의 시간이다. 또한 A<sub>f</sub>는 갭

조건에 의존하는 정수이며, 절연과피 조건을 의미한다. 파형이 다른 전압이 인가된 경우의 절연과피는  $A_f$ 가 동일한 조건에서 일어난다는 것이 Kind의 등면적칙이다. 즉,  $V_a(t)$ 의 파형을 이미 알고 있을 때, 적당한  $V_{min}$ 과  $A_f$ 를 주어서 식(1)을 만족하는  $t$ 를 구하면, 그의 파형에 대한  $V-t$ 특성을 산출할 수 있게 된다.

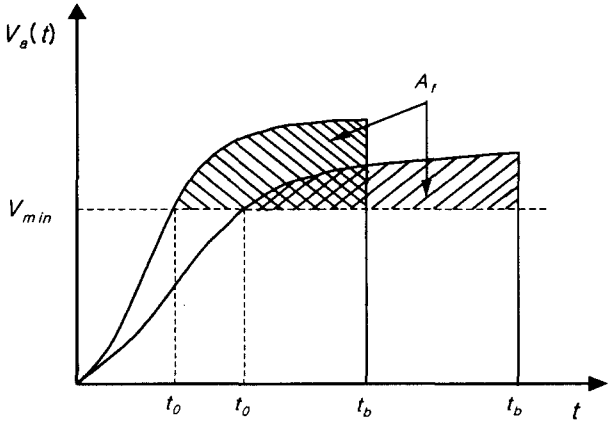


그림 2 Kind의 법칙에 따른 등면적칙  
 Fig. 2 Equal area criterion according to Kind's law

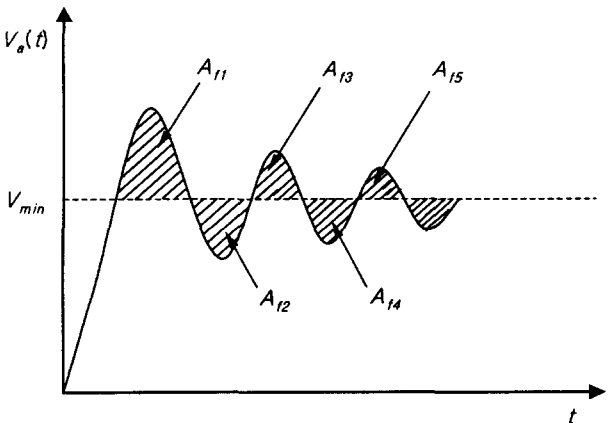


그림 3 등면적칙에 따른 진동성 임펄스전압 파형에 대한  $V-t$ 특성의 이론적 검토  
 Fig. 3 Theoretical considerations of the  $V-t$  characteristics according to the equal area criterion for a damped oscillatory impulse voltage waveform

결국 인가전압파형에 대한 파미부의 절연과피에 대해서는 IEC 60060-1 규정에 따르면 파미부에서 절연과피가 일어나더라도 그 이전의 임펄스전압의 피크값을 취하여  $V-t$ 곡선을 얻게 된다. 하지만 감쇠 진동성 임펄스전압의 경우 절연과피가 파미부에서 일어나더라도 뇌임펄스의 파미부에서 감쇠와 거의 같다면 큰 차이가 없지만, 그림 1(b)와 같이 절연과피시점(진동부의 최하점)에서의 전압이 뇌임펄스전압보다 훨씬 낮은 경우에는  $V-t$ 특성이 잘못 평가될 가능성이 있다. 또한 과도과전압에 대한 짧은 시간영역에서의  $V-t$ 특성은 뇌임펄스전압에 대한  $V-t$ 곡선으로부터 외삽법으로 구할 수 없으며, 과도과전압에 대한 실질적인 절연과피전압곡선은 뇌임

펄스전압에 대한  $V-t$ 곡선과의 사이에 확연한 불연속성이 나타나는 것으로 지적되었다. IEC 60060-1 규정에 의한  $SF_6$ 가스의 진동성 임펄스전압의  $V-t$ 곡선은  $4 \mu s$  이상의 긴 시간영역에서는 거의 평탄한 직선으로 나타났으며,  $1 \mu s$  이하의 짧은 시간영역에서는 정의될 수 없음을 나타내고 있다 [3]. 또한 진동성 임펄스전압의  $V-t$ 곡선의 절연과피전압은 등면적칙에 의해 구한  $V-t$ 곡선보다 높은 레벨에 위치하고 있으므로 낮은 전압레벨에서도 절연과피의 확률을 가지게 된다. 등면적칙을 적용한 감쇠 진동성 임펄스전압 파형에 대한  $V-t$ 특성의 이론적 검토를 위한 도식을 그림 3에 나타내었다. 감쇠 진동성 임펄스전압의 경우 빗금 친 면적의 합  $A_f (= A_{f1} - A_{f2} + A_{f3} - A_{f4} + A_{f5} - \dots)$ 가 등면적칙의 절연과피 조건이다. 감쇠 진동성 임펄스전압의 경우 IEC 60060-1 규정에 의한 뇌임펄스전압에 대한  $V-t$ 특성의 결정법과 동일한 방법으로 분석하여 왔으나 절연과피전압이 뇌임펄스전압파형에 의한 절연과피전압보다 오히려 낮아져 등면적칙에 의한 절연과피 조건을 만족하지 못하는 현상이 나타났다.

그러므로 VFTO에 대한  $V-t$ 특성의 결정은 IEC 60060-1 규정에 의한 분석 방법보다는 실제의 과도과전압에 대응할 수 있는 좀더 정확한 평가기법의 확립이 필요하며, 이에 대한 새로운  $V-t$ 특성의 정량적인 평가방법에 대한 타당한 이론의 정립을 위해서는 보다 심도있는 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

### 3. 실험장치 및 방법

GIS를 모의한 원통형 실험장치와 측정계의 개략도를 그림 4에 나타내었으며, 임펄스전압을 인가하기 위하여 66kV (BIL 350 kV) 콘덴서형 부상을 설치하고, 전극에 인가되는 실험전압을 가능한 전극 가까운 곳에서 정확하게 측정할 수 있도록 원추형의 전압프로브(주파수대역 : 40 Hz ~ 200 MHz)를 전극계의 상단부에 설치하였다.

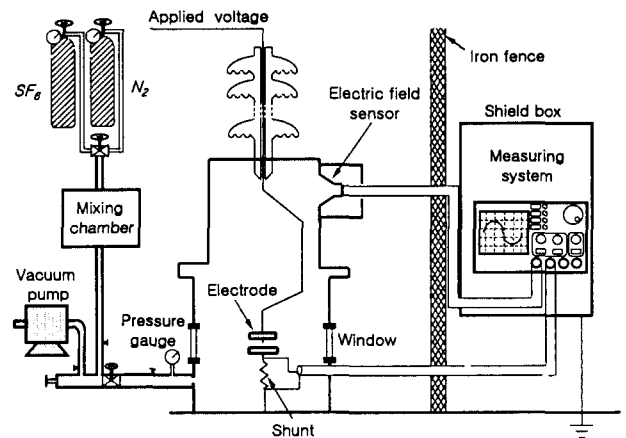
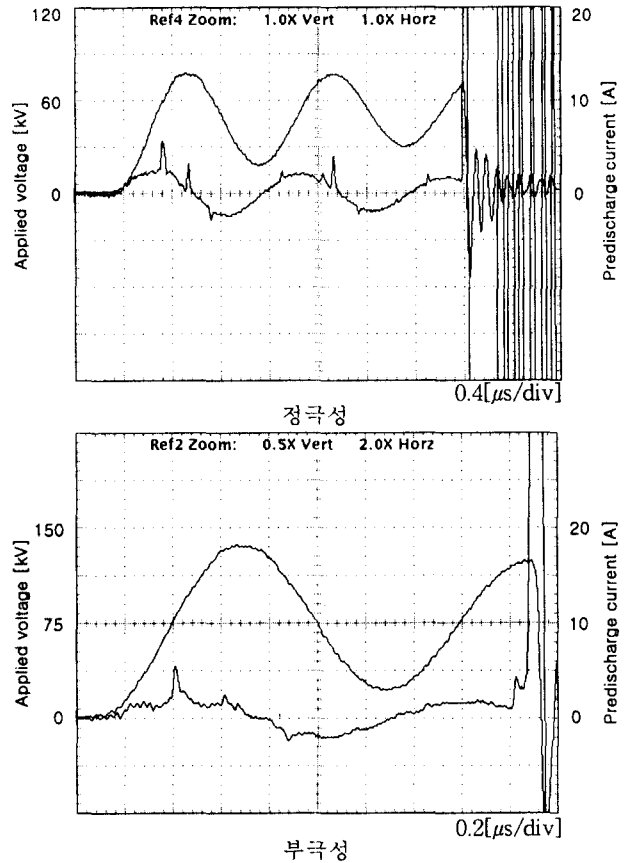


그림 4 실험장치의 개략도  
 Fig. 4 Schematic diagram of the GIS experimental apparatus

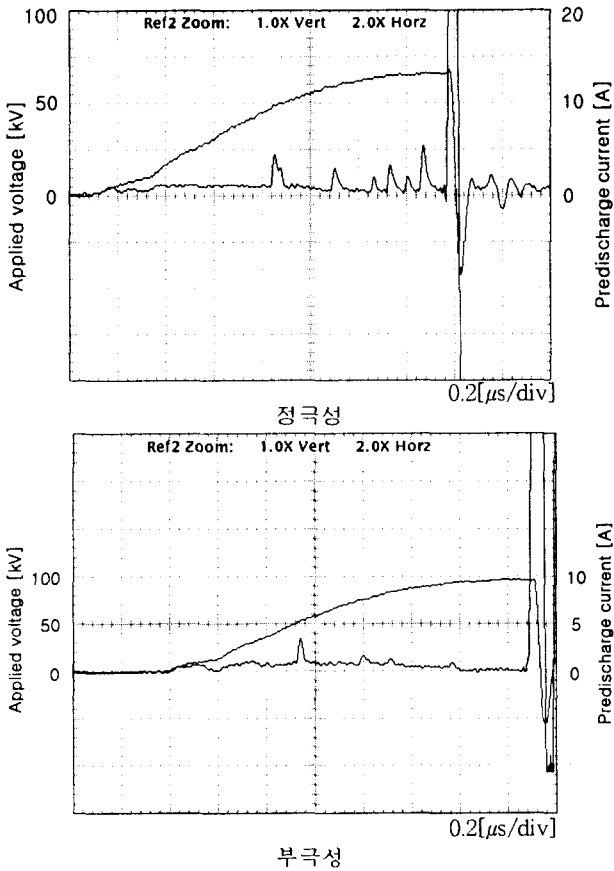
가스압력 0.1 MPa의  $SF_6 - N_2(10\%)$  혼합가스에서 정·부극

성의 뇌임펄스와 진동성 임펄스에 대한 인가전압 및 전구방전전류의 전형적인 파형을 각각 그림 5에 나타내었다. 뇌임펄스전압의 파형은 상승시간 및 50 % 감쇠시간이 각각 1.2  $\mu$ s, 44  $\mu$ s이며, 병렬충전식 8단 Marx 임펄스전압 발생장치를 이용하여 발생시켰다. 감쇠 진동성 임펄스전압은 Marx 임펄스전압 발생장치에 고압용 콘덴서, 인덕터 및 방전 구배를 조합하여 얻었으며, 파형은 상승시간, 50 % 감쇠시간 및 진동주파수가 각각 400 ns, 44  $\mu$ s, 0.83 MHz이었다. 전극은 GIS내에 존재하는 금속성 이물질에 의해서 형성되는 불평등 전장을 모의하기 위하여 바늘모양의 돌기전극을 평행평판 전극계의 상부 평판전극 중앙에 부착시킨 구조로 하였다. 상부의 평판전극은 직경이 70 mm인 동을, 하부의 평판전극은 직경이 90 mm인 스테인리스강을 사용하였고, 평행평판 전극 사이의 간격은 32 mm이며, 침상 돌기물의 곡률반경 및 길이는 각각 0.5 mm 및 10 mm이다. 실험전압의 변동에 의한 변위 전류 성분은 상부의 평판전극과 침전극을 전기적으로 절연하여 최소화시켰다.

$SF_6-N_2$  혼합가스의 혼합비율은 시험전압에서 절연내력이 순수  $SF_6$ 가스의 90 % 이상을 나타낸 90 %  $SF_6$ 가스와 10 %  $N_2$ 가스를 혼합한  $SF_6-N_2(10\%)$  혼합가스를 선정하였다 [2]. 가스의 혼합방법은 로타리펌프로 0.133 Pa까지 배기시킨 상태에서 실험용기에  $SF_6$ 가스를 소정의 부분압력까지 넣은 후  $N_2$ 가스를 실험조건의 가스압력에 이르도록 실험용기에 부착된 가스조절기를 이용하여 각각 봉입하였다.



(b) 진동성 임펄스전압



(a) 뇌임펄스전압

그림 5 뇌임펄스 및 진동성 임펄스전압과 전구방전전류의 전형적인 파형

Fig. 5 Typical waveforms of the predischarge currents and the lightning impulse and oscillatory impulse voltages

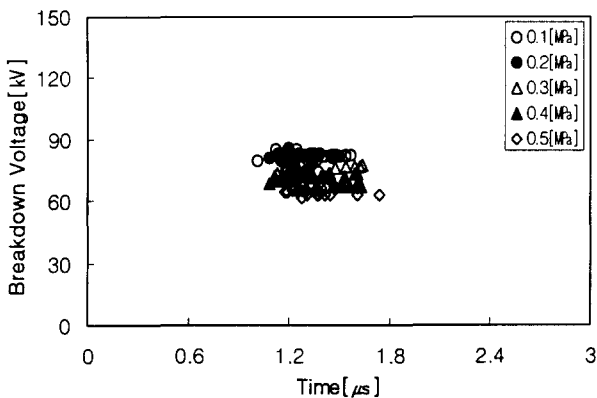
또한 실험을 실시하기 전에는 가스혼합의 안정화를 위하여 48시간의 휴지시간을 경유하였으며, 실험에 적용한 가스압력의 범위는 0.1~0.5 MPa이다.  $N_2$ 가스와  $SF_6$ 가스는 고등급(순도 99.9%)과 IEC 60376 규격에 맞은 상용등급(순도 99.9%)을 각각 사용하였다. 실험전압의 측정용 케이블은 2중 방사선으로 차폐시킨 동축케이블(특성임피던스 : 50  $\Omega$ )을 사용하였으며, 실험에서 사용된 모든 계측장치는 차폐함 안에 내장시키고, 전원을 절연변압기와 2중 라인필터를 통하여 공급함으로써 외부에서 발생하는 잡음과 외란의 영향을 최소화하였다. 동일한 극성 및 가스압력 조건에 대해서 뇌임펄스 및 진동성 임펄스의 실험전압 크기를 변화시켜 각각 30~40회씩 인가하였고, 각각의 인가전압은 1분 이상 간격의 휴지시간을 거쳐 이루어졌다. 전압프로브로 검출된 신호는 저장형 디지털 오실로스코프(500 MHz, 2.5 GS/s)로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

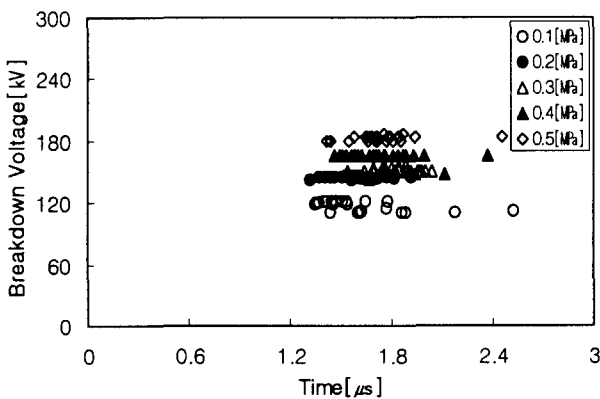
4.1 IEC 60060-1 규정에 의한 V-t 특성

4.1.1 V-t 특성의 가스압력 의존성

V-t 특성의 최대 절연파괴강도는 전극의 형상이 평등전장을 형성할 때 나타나지만, 실제 전력기에 적용되는 부품의 형상은 불평등전장 캡들을 피할 수 없다. 이러한 전극캡 중에서 절연파괴전압은 인가전압의 파형 및 극성에 크게 의존한다. 그림 6에서 나타낸 바와 같이 동일한 전극계에 정극성 뇌임펄스전압을 인가시킨 경우 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>(10%) 혼합가스의 V-t 특성은 순수 SF<sub>6</sub>가스의 V-t 특성과 비교해 보면 [7], 절연파괴까지의 지연시간이 짧으며, 절연파괴전압이 약간 낮고 인가전압의 피크값 부근에 거의 집중된 경향을 보이고 있다. 부극성의 경우가 정극성일 때보다 압력 의존성이 현저하고, 동일한 조건에서의 절연파괴전압도 높게 나타났으며, 절연파괴전압의 편차도 크게 나타났다. 정극성의 절연파괴전압은 가스압력의 증가와 더불어 약간 감소하는 경향을 나타내었지만, 부극성의 절연파괴전압은 가스압력의 증가에 따라 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 동일한 가스압력에서의 절연파괴전압의 편차도 작았으며, 절연파괴전압이 거의 변하지 않는 평탄한 V-t 특성을 나타내었다.



(a) 정극성

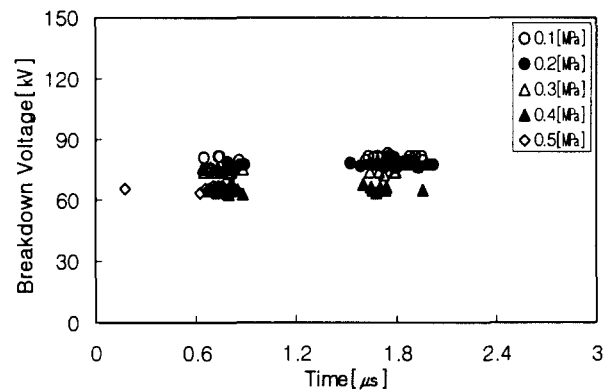


(b) 부극성

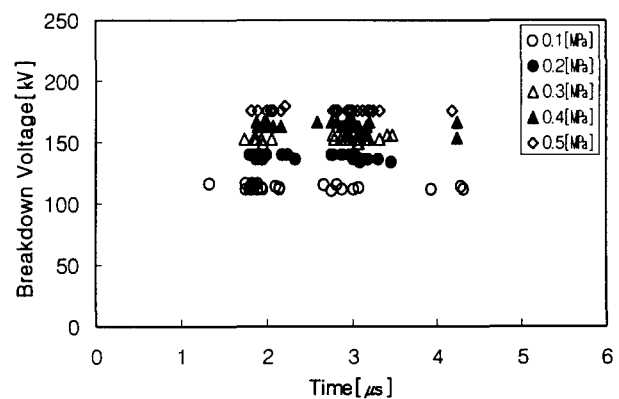
그림 6 뇌임펄스전압에 대한 V-t 특성의 가스압력 의존성  
Fig. 6 Gas pressure dependence of the V-t characteristics for the lightning impulse voltages

유사한 실험조건에서 가스압력의 증가에 따른 절연파괴전압의 감소에 대한 현상론적 결과는 이미 여러 연구자들에 의하여 발표되었으며 [8]~[13], 주로 침전극의 길이와 반경, 인가전압 파형 등의 영향을 받는 것으로 알려졌으나, 이의 발생원인에 대한 물성론적 근거는 아직 밝혀지지 않았다. 가스압력은 방전공간내에서의 전자나 이온의 거동특성에 영향을 미치게 되므로 가스압력의 증가에 따른 절연파괴전압의 감소도 전구방전 진전과정의 가스압력 의존성이 있는 것으로 생각할 수 있다. 또한 초기스트리머코로나에 의한 리더 발달의 전장 의존성과도 관련되어지며, 공간전하효과는 전장불평등의 정도, 전압상승률과 가스압력에 크게 의존하게 된다. 침전극의 길이가 길고 반경이 적어 침전극 끝단의 전장의 세기가 대단히 높고 집중되어 있는 경우는 초기스트리머코로나에 의한 임계체적의 형성이 쉬워져 가스압력의 증가와 더불어 리더의 형성과 진전이 용이하게 이루어지므로 절연파괴전압이 낮아지는 것으로 추정된다.

한편, 부극성의 경우에는 초기전자가 주로 음극표면으로부터의 전장방출에 의해서 공급되며, 초기스트리머코로나는 정이온이나 광자에 의한 2차전리작용을 수반하면서 성장하게 된다 [14]~[15].



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 7 진동성 임펄스전압에 대한 V-t 특성의 가스압력 의존성  
Fig. 7 Gas pressure dependence of the V-t characteristics for the oscillatory impulse voltages

절연파괴전압은 초기스트리머코로나 혹은 2차전리작용에 의해서 발생한 공간전하에 의한 전장완화작용의 영향을 받게 된다. 즉, 초기전자의 공급에 의한 통계적 지연시간과 공간전하에 의한 전장완화작용에 관련되는 형성 지연시간의 인가전압에 대한 극성의존성에 의해서  $V-t$ 특성의 차이가 나타나게 된다. 그림 7에 나타난 바와 같이 진동성 임펄스전압에 대한 절연파괴전압은 정·부극성 모두에서 뇌임펄스전압보다 낮으며, 뇌임펄스전압의 경우 계단상의 리더의 진전에 의해 절연파괴를 야기하지만, 진동성 임펄스전압의 경우에는 전구방전전류뿐만 아니라 고주파 진동전압에 의해 야기되는 변위전류 성분의 영향이 나타난다. 또한 진동성 임펄스전압에 대한  $V-t$ 특성도 뇌임펄스전압의 경우와 마찬가지로 정극성의 경우가 부극성에 비해서 가스압력에 대한 의존성이 작고, 거의 평탄한 특성을 보이고 있다. 정극성의 경우 스트리머코로나에 의해서 발생하는 공간전하는 수명이 비교적 짧은 정이온인데 비해서 부극성의 경우에는 부이온의 공간전하가 주종을 이루게 되어 절연파괴까지의 시간지연이 길게 나타난 것으로 생각할 수 있다. 즉, 정·부이온의 가스압력에 따른 공간전하작용이 전구방전의 진전에 영향을 미친 것으로 볼 수 있다.

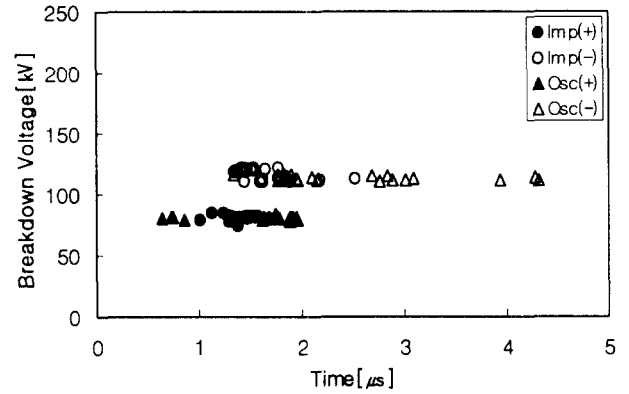
**4.1.2  $V-t$ 특성의 인가전압 파형 및 극성 의존성**

절연파괴전압은 전극의 형상, 가스의 조성, 인가전압의 파형과 극성 및 가스압력에 따라 변화한다.  $SF_6-N_2(10\%)$  혼합가스 중에서 정·부극성의 뇌 및 진동성 임펄스전압의 인가전압을 파라미터로 하여 각 가스압력에 대한  $V-t$ 곡선을 그림 8에 나타내었다. 뇌임펄스전압 및 진동성 임펄스전압의 절연파괴전압은 전반적으로 부극성이 정극성보다 높게 나타났으며, 그 차이는 가스압력이 높을수록 현저하였다.

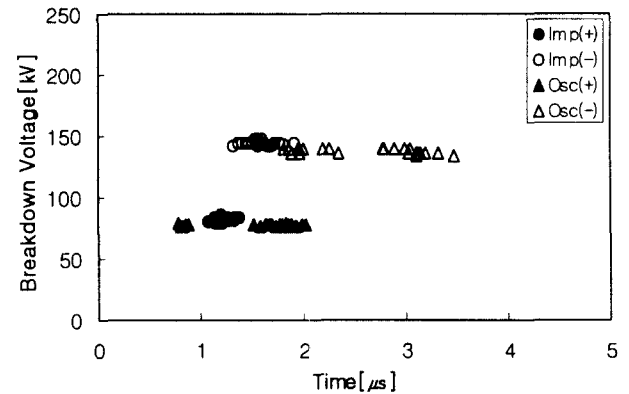
진동성 임펄스전압의  $V-t$ 특성은 절연파괴가 제1피크 이외에 제2~제5 피크 부근까지 폭넓게 나타났고, 정극성보다는 부극성의 쪽이 두드러졌다. 절연파괴가 일어나는 시간영역은 정극성의 경우 대체로 0.6~2.1  $\mu s$  범위이고, 부극성의 경우는 1.3~4.4  $\mu s$  범위이었으며, 특히 부극성의 진동성 임펄스전압을 인가한 경우 절연파괴까지의 시간지연이 가장 길게 나타났다. 이와 같은 특성의 차이도 정·부극성의 리더형상 및 진전 양상이 서로 다른 것이 주요 원인이고, 부극성에서는 코로나안정화작용으로 절연파괴전압이 높으며, 절연파괴까지의 긴 시간지연을 나타낸 것으로 여겨진다. 정극성의 경우  $SF_6$ 가스의 부이온으로부터 탈리작용에 의해서 발생하는 초기전자에 의한 리더의 발단과 진전으로 절연파괴에 이르기 때문에 전구방전은 대단히 빠른 속도로 진전하게 된다. 정극성의 경우 리더펄스 사이의 시간간격도 매우 짧고, 고속으로 진전하게 되어 절연파괴를 일으키므로 절연파괴까지의 시간지연이 비교적 짧으며, 공간전하의 영향도 적게 받은 것으로 볼 수 있다 [2]. 부극성의 경우 초기코로나에 의해서 발생한 정이온은 침상 돌기물의 끝 부근에 집중되어 있다가 돌기물을 통하여 흐르며, 방전공간에는 전자의 부착작용에 의해서 생성된 부이온이 주로 존재하게 된다. 부이온의 이동속도는 전자의 이동속도에 비하여 대단히 느리므로 전장완화작용이 지속되는 시간도 길어진다.

결국 부극성의 경우는 공간전하의 전장완화작용에 의해서 형성 지연시간이 길어지기 때문에 절연파괴에 이르기까지의

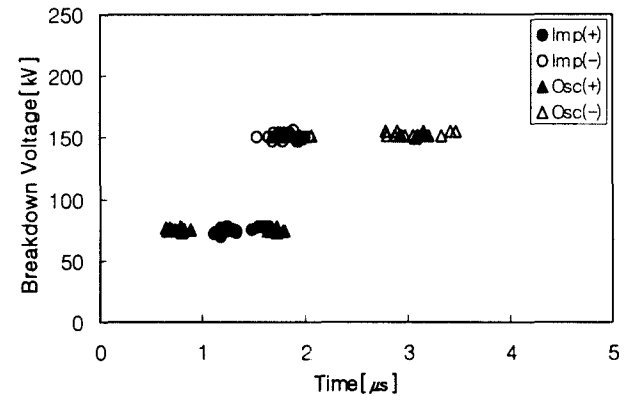
시간지연이 길게 되며 절연파괴전압도 높게 나타난 것으로 생각된다. 절연파괴까지 소요되는 시간은 진동성 임펄스전압을 인가한 경우가 뇌임펄스전압을 인가한 경우보다 길게 나타났으며, 진동성 임펄스전압에 대한 절연파괴는 진동의 피크 부근에서 데이터가 집중되어 있는 것이 특징이었다. 뇌임펄스전압을 인가시킨 경우 리더펄스의 크기는 리더의 진전과 더불어 증가하며 절연파괴에 이를 때까지 지속적으로 진전하게 된다.



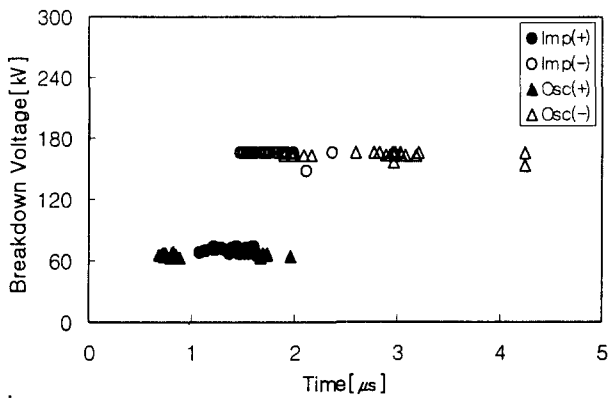
(a) 0.1 MPa



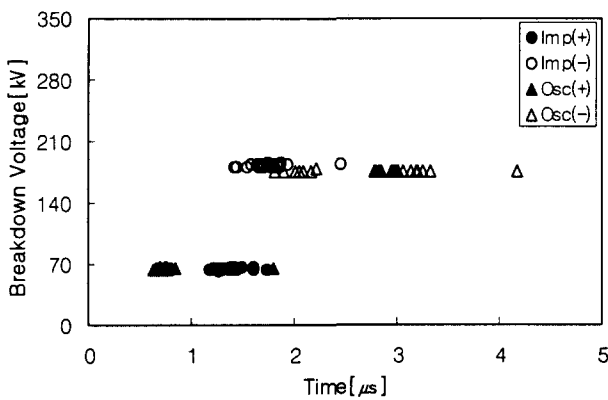
(b) 0.2 MPa



(c) 0.3 MPa



(d) 0.4 MPa



(e) 0.5 MPa

그림 8 V-t특성의 인가전압 파형과 극성의존성

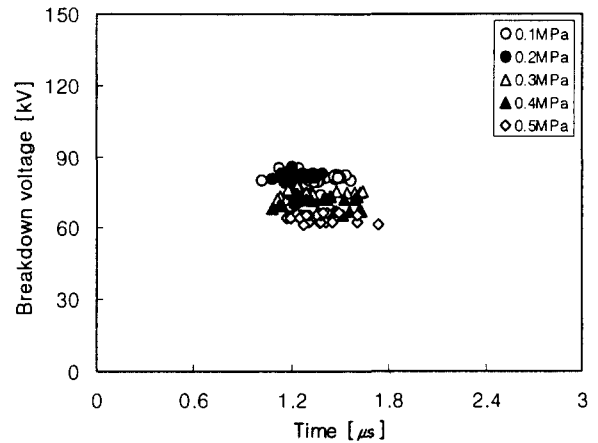
Fig. 8 Dependence of the V-t characteristics on the waveform and polarity of applied voltages

이에 반해서 진동성 임펄스전압을 인가시킨 경우는 인가전압의 변동에 따라 전구방전전류인 리더전류의 크기도 변동하며, 리더의 진전이 중단되기도 하기 때문에 절연파괴까지의 시간지연이 길게 나타난 것으로 볼 수 있다. 인가전압의 크기가 변동하여 리더의 진전에 요구되는 전압보다 작은 경우 리더의 진전은 중단되지만, 변위전류에 의해서 에너지공급이 지속되므로 리더의 상태가 소멸되지 않고 있다가 다시 전압이 상승하면 리더의 진전이 재개되는 형태의 전구방전이 진전되어 최종적으로 절연파괴에 이르게 된다.

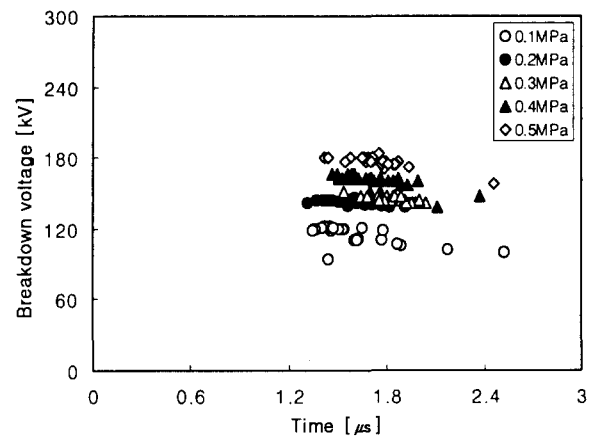
4.2 절연파괴시점에서 분석한 V-t특성

가스압력을 파라미터로 하여 뇌임펄스전압 및 진동성 임펄스전압에 대하여 절연파괴시점에서의 전압을 취하여 나타낸 V-t특성을 그림 9와 그림 10에 각각 나타내었다. 그림 9에서 나타난 바와 같이 뇌임펄스전압을 인가시킨 경우 절연파괴시점에서 분석한 V-t특성은 그림 6에서 나타낸 IEC 60060-1 규정에 의한 V-t특성과 비교해 볼 때 절연파괴전압만 약간 낮아졌을 뿐 특성은 거의 유사한 경향을 보였지만, 그림 10의 진동성 임펄스전압을 인가시킨 경우에는 그림 7의 IEC 60060-1 규정에 의한 V-t특성과 매우 다른 양상을

나타내고 있다. 즉, 절연파괴시점에서의 V-t특성에 대한 분석에서 주목되는 점은 진동성 임펄스전압의 경우 절연파괴가 제1진동의 피크부근에서만 일어나지 않고 제2~제5진동의 파미부에서도 절연파괴를 일으키며, 특히 부극성의 진동성 임펄스전압인 경우에는 정극성보다 절연파괴의 시간지연이 길게 나타나므로 절연파괴전압이 충분히 낮게 평가될 수 있다는 것이다. 이러한 차이의 이유에 대해서는 다음과 같은 점을 생각할 수 있다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 9 절연파괴시점에서 분석한 뇌임펄스전압에 대한 V-t 특성의 가스압력 의존성

Fig. 9 Gas pressure dependence of the V-t characteristics obtained by the actual breakdown voltages for the lightning impulse voltages

IEC 60060-1 규정에서 적용하고 있는 표준 뇌임펄스전압에 대한 V-t특성의 평가방법은 대체적으로 Kind 법칙에 잘 맞는 것으로 볼 수 있다. 즉, Kind의 등면적칙은 2중지수형의 단일임펄스전압이 인가되었을 때 최소절연파괴전압보다 높은 전압에 의해서 갭에 인가되는 에너지가 단지 전압의 크기와 시간만의 함수로 표현되는 경우에 해당하는 것으로

볼 수 있다. 그러므로 뇌임펄스전압을 인가한 경우 절연과  
 피가 인가전압의 과미부에서 일어나더라도 최저절연과피전  
 압보다는 높은 전압에서 일어나므로 IEC 60060-1 규정에  
 따른 평가방법의 적용은 타당하다고 사료된다.

하지만 감쇠 진동성 임펄스전압을 인가했을 때는 절연과  
 피가 그림 11에 나타난 바와 같이 최저절연과피전압보다 훨  
 씩 낮은 전압에서 일어나는 경우도 있으므로 IEC 60060-1  
 규정을 만족한다고 보기는 어렵다. 감쇠 진동성 임펄스전압  
 이 인가된 경우 갭 안에 입사되는 에너지는 단지 최소절연  
 과피전압보다 높은 전압과 이 전압이 지속되는 시간만의 합  
 수로 표현되는 양 이외에도 다른 형태로 공급되는 에너지가  
 있기 때문에 전구방전이 더 오랜 시간동안 지속되어 절연과  
 피까지의 시간이 길어지게 된다. 이것은 인가전압에 의해  
 공급된 에너지 이외에도 인가전압의 변동에 따른 변위전류

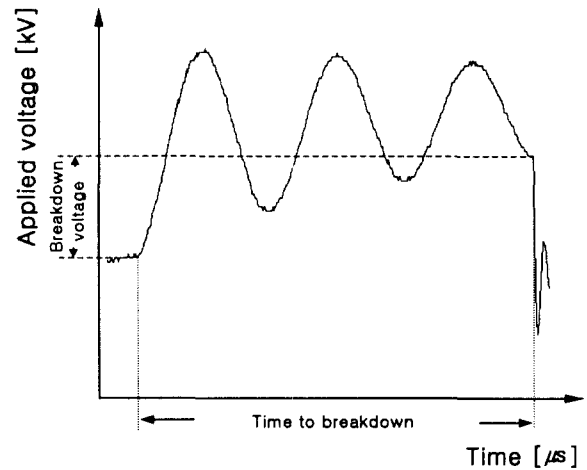


그림 11 감쇠 진동성 임펄스전압에 의한 절연과피 파형의 예  
**Fig. 11** An example of breakdown voltage waveform due to the damped oscillatory impulse voltages

에 의해 에너지가 공급되기 때문에 방전의 지속시간도 길어  
 지며, 절연과피전압도 뇌임펄스전압보다 낮은 상태에서 절연  
 과피가 일어나는 것으로 추정할 수 있다. 전술한 바와 같이  
 IEC 60060-1 규정은 최소절연과피전압보다 높은 전압이 인  
 가되므로 이에 의해 공급되는 에너지가 어느 한계를 넘어서  
 면 절연과피가 일어나는 것으로 본다. 그러나 진동성 임펄  
 스전압이 전극에 인가된 경우에는 그림 12에 나타난 바와  
 같이 인가전압의 변동에 따른 변위전류에 의해서도 방전간  
 극에 에너지가 공급되어 최저절연과피전압보다 훨씬 낮은  
 진동의 극소값 부근에서도 절연과피를 일으키기 때문에 IEC  
 60060-1의 규정을 그대로 적용하는 것은 커다란 오차를 가  
 져올 수 있다. 결국 리더의 진전에 따라 리더의 앞부분과  
 대향전극사이의 정전용량은 증가하여 변위전류에 의한 에너  
 지공급이 많아지므로 낮은 전압에서도 절연과피를 일으키게  
 된다.

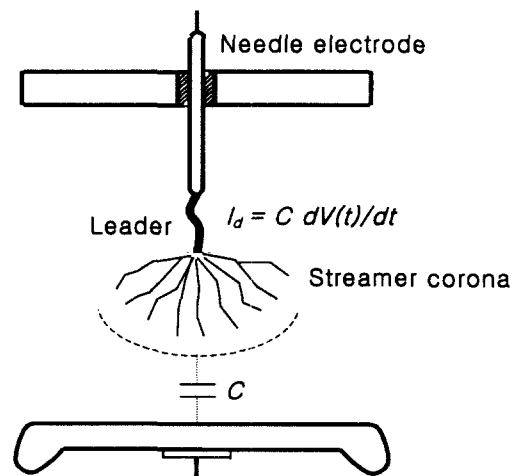
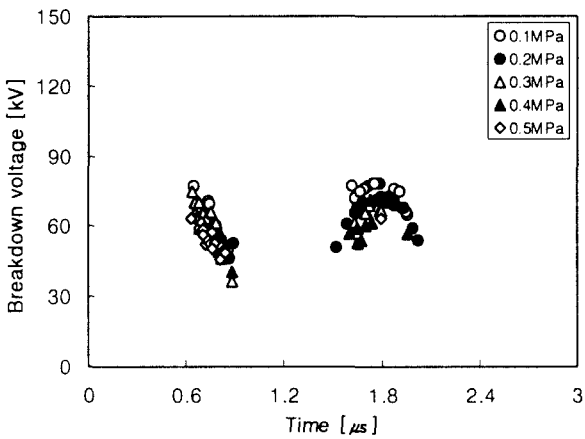
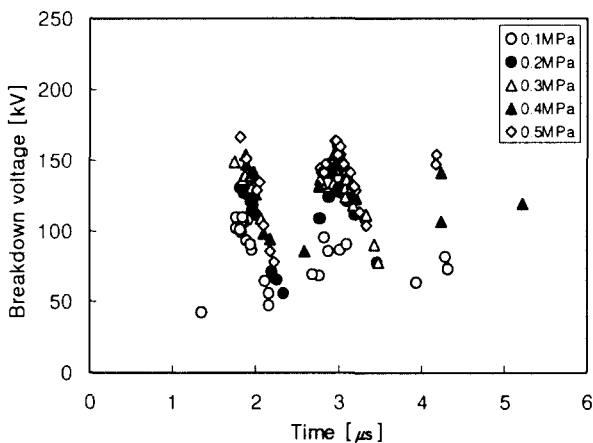


그림 12 진동성 임펄스전압에 의한 리더의 진전  
**Fig. 12** Leader propagation due to the oscillatory impulse voltages



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 10 절연과피시점에서 분석한 감쇠 진동성 임펄스전압  
 에 대한 V-t특성의 가스압력 의존성

**Fig. 10** Gas pressure dependence of the V-t characteristics  
 obtained by the actual breakdown voltage for the  
 damped oscillatory impulse voltages



### 5. 결 론

GIS 안에 금속성 돌기물이 존재하는 경우를 모의한 불평등전장 중에서  $SF_6-N_2(10\%)$  혼합가스의  $V-t$ 특성을 분석한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 뇌임펄스전압 및 진동성 임펄스전압의 절연파괴전압은 부극성이 높게 나타났으며, 그 차이는 가스압력이 높을수록 현저하였다.

(2) 정극성 뇌임펄스전압을 인가시킨 경우  $SF_6-N_2(10\%)$  혼합가스의  $V-t$ 특성은 부극성의 경우가 압력 의존성이 현저하고, 동일한 조건에서의 절연파괴전압도 높게 나타났으며, 절연파괴전압의 편차도 크게 나타났다.

(3) 진동성 임펄스전압의  $V-t$ 특성은 절연파괴가 제1진동 피크 이외에 제2~제5진동 피크부근까지 폭넓게 나타났고, 절연파괴가 일어나는 시간영역은 부극성의 경우가 절연파괴까지의 시간지연이 가장 길게 나타났다.

(4) 가스절연개폐장치의 절연성능평가에서 뇌임펄스전압의 경우에는 IEC 60060-1 규정에 의한  $V-t$ 특성과 절연파괴 시점에서의 절연파괴전압을 취하여 산출한  $V-t$ 특성은 거의 유사하였지만, 감쇠 진동성 임펄스전압의 경우에는 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. 결국 IEC 60060-1 규정에 의한 평등전장 또는 불평등전장의 정도가 작은 전극계에서의 뇌임펄스전압에 대한  $V-t$ 특성은 등면적법에 부합되지만, 불평등전장의 정도가 심한 전극계의 진동성 임펄스전압에 대한  $V-t$ 특성을 등면적법에 따라 평가하면 오차를 가져올 수 있다. 따라서 진동성 임펄스전압에 대한 GIS의 절연성능평가에서는 IEC 60060-1 규정에 의한  $V-t$ 특성의 분석방법을 그대로 적용할 것이 아니라 이에 적합한 절연성능 평가방법의 제안이 필요하며, 심층적인 연구가 요망된다.

### 참 고 문 헌

[1] 山田 達司, 高橋 俊裕, 戸田 恒雄, 大久保 仁 : “各種ガスと $SF_6$ による混合ガス中における部分放電の發生メカニズム”, 電學論B, 118卷 7/8号, pp. 837~842, 平成10年.  
 [2] 이복희, 이경옥, 김정일 : “ $SF_6-N_2$  혼합기체 중에서 불평등전계 갭의 임펄스 절연파괴 특성”, 전기학회 논문지, Vol. 49, No. 9, pp. 533~540, 2000.  
 [3] 吉田 智朗, 藤破 秀雄, 河本 正 : “ $SF_6$ 가스의雷サージに對する $V-t$ 特性の檢討”, 電學論B, 116卷 10号, pp. 1232~1239, 平成8年.

[4] B. Heers, A. Stepken : “Investigation on Discharge Development in  $SF_6$  for Oscillating Lightning Impulses and Fast Oscillating Overvoltages”, Proc. of 7th ISH, No. 31.06, pp. 29~32, 1991.  
 [5] IEC International Standard 60060-1, Pt. 1, : “General Definitions and Test Requirement”, 1999.  
 [6] Dieter Kind : “Die Aufbaufläche bei Stroßspannungsbeanspruchung Technischer Elektrodenanordnungen in Luft”, Elektro Technische Zeitschrift, 1958.  
 [7] 이복희, 이경옥, 이창준 : “가스절연개폐장치에 있어서 금속입자 존재시 임펄스전압에 대한  $SF_6$ 가스의 절연특성”, 조명·전기설비학회 논문지, Vol. 14, No. 1, pp. 22~29, 2000.  
 [8] N. H. Malik, A. H. Qureshi and G. D. Theophilus, “Static Field Breakdown of  $SF_6-N_2$  Mixtures in Rod-Plane Gaps”, IEEE Trans., Vol. EI-14, No. 2, pp. 61~69, 1979.  
 [9] K. Tekletsadik and L. C. Campbell, “ $SF_6$  Breakdown in GIS”, IEE Proc.-Meas. Technol., Vol. 143, No. 5, pp. 270~276, 1996.  
 [10] J. K. Nelson, “Positive Corona Processes in Electronegative Gaseous Dielectrics”, IEEE Trans., Vol. EI-20, No. 3, pp. 601~607, 1985.  
 [11] K. Mardikyan, “Breakdown Strength of Air,  $SF_6$  and a Mixture of Air plus  $SF_6$  Containing a Small Amount of  $SF_6$ ”, ETEP, Vol. 9, No. 5, pp. 313~316, 1999.  
 [12] N. Wiegart, et al : “Inhomogeneous Field Breakdown in GIS”, IEEE Trans., Vol. PD-3, No. 3, pp. 923~946, 1988.  
 [13] K. Mardikyan, O. Kalenderli, O. Ersen, E. Canarlan, “AC Breakdown Strength of  $N_2$ ,  $SF_6$  and a Mixture of  $SF_6+N_2$ , Containing a Small Amount of  $SF_6$ ”, IEEE Int. Symp. on Elect. Insul., pp. 763~765, 1996.  
 [14] 이복희, 이경옥, 이창준, 백승권 : “불평등전계 중에서 임펄스전압에 대한  $SF_6$ 기체의 전구방전과정의 분석”, 전기전자재료학회 논문지, Vol. 13, No. 1, pp. 85~93, 2000.  
 [15] 이복희, 이경옥, 백승권 : “ $SF_6-N_2$  혼합기체중에 뇌임펄스전압에 의해 형성된 불평등전장에서의 전구방전현상”, 전기학회 논문지, pp. 288~295, 2001. 6

저 자 소 개



이 복 희 (李 福 熙)

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

방문교수, 1999년 The university of Cincinnati 방문교수, 1990년~현재 인하대 공대 전자전기컴퓨터공학부 교수

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

Email : bhlee@inha.ac.kr



이 경 옥 (李 京 沃)

1960년 6월 24일 생. 1987년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988년~1991년 동양나일톤(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