

SF₆-N₂ 혼합기체 중에서 불평등전계 갭의 임펄스 절연파괴 특성

論文

49C-9-7

Impulse Breakdown Characteristics of Nonuniform Field Gap in SF₆-N₂ Mixtures

李福熙* · 李京沃** · 金正一***

(Bok-Hee Lee · Kyoung-Ok Lee · Jung-Il Kim)

Abstract - Lightning impulse (1.2/44[μ s]) and damped oscillating impulse (Osc./44[μ s] : 0.83[MHz]) breakdown characteristics in sulphur-hexafluoride/nitrogen (SF₆-N₂) mixtures were investigated. The predischage currents were observed to clarify the breakdown mechanism. The experiments were carried out under nonuniform electric fields disturbed by a needle-shaped protrusion whose length and diameter are 10[mm] and 1[mm] at total gas pressure up to 0.5[MPa] with nitrogen concentrations varying from 5 to 20[%] in the mixture. The electrical breakdowns of SF₆-N₂ mixtures for both the positive and negative polarities develop with steplike pulses in leader mechanism and the breakdown voltage - time (V-t) characteristics were affected by the space charge. The voltage-time curves for the negative oscillating impulse voltage were extended over the longer time range. The minimum breakdown voltages for the negative lightning and oscillating impulse voltage were higher than those for the positive ones. In particular, the positive breakdown voltages were independent of the gas pressure.

Key Words : SF₆-N₂ 혼합기체, 뇌 임펄스전압, 진동성 임펄스전압, 절연파괴, V-t 곡선, 전구방전전류

1. 서 론

SF₆(Sulfur Hexafluoride)가스는 우수한 절연성능, 화학적 안정성 및 아크 소호특성 때문에 기체절연물질로서 고전압 전력기기 및 케이블의 절연시스템에서 사용이 증대되어 왔다. 그러나 SF₆가스의 절연내력은 전극표면 거칠기에 매우 민감하고[1], 기체절연개폐장치 안에 설치되어 있는 단로기, 차단기의 개폐조작 혹은 지락사고가 발생하게 되면 상승시간이 수 [ns], 진동주파수가 수 [MHz]이상의 급준성 과도과전압(Very Fast Transient Overvoltages)을 발생한다. 또한 SF₆가스는 비점(-64[$^{\circ}$ C])이 비교적 높고, 지중 또는 옥내에서 주로 사용되며, 특히, 기체절연개폐장치 안에 존재하는 금속성 이물질 또는 돌기부에 의해서 형성된 불평등전계 부분의 절연내력은 급준성 과도과전압에 대하여 현저히 저하되는 등의 문제를 내포하고 있다. 따라서 SF₆가스에 다른 가스를 혼합시켜 이러한 문제점을 해결할 수 있는 혼합기체의 개발에 대한 연구가 이루어지고 있다[2-6].

절연내력, 경제성 및 환경친화 등의 측면에서 SF₆-기체혼합물(C₂F₆, CO₂, Air 및 N₂가스 등)의 적용이 이루어지고 있으며, 이들 중에서 프레온가스나 4염화탄소는 순수 SF₆가스보다 약 1.1~2.5배

정도로 높은 절연강도를 갖지만 비점이 높아 사용할 수 없는 것도 있다. 또한 C₂F₆ 및 CO₂계 혼합기체들 중에는 C₂F₆CO₂와 같은 유독성 불순물을 포함하거나 아크가 발생하면 이들 기체들로부터 탄소(C)가 생성된 후 절연물체에 침적되어 전도층을 형성하는 등의 문제가 나타나는 것으로 보고되고 있다[7-8]. 따라서 공기의 주성분으로 비점(-196[$^{\circ}$ C])이 낮고, 가격이 저렴하며, 무독성 및 비가연성 등의 화학적 안정성이 우수한 N₂가스를 SF₆가스에 혼합한 SF₆-N₂ 혼합기체의 적용은 새로운 연구대상으로 매우 유망하게 대두되고 있다[9,10]. 결국, SF₆-N₂ 혼합기체는 순수 SF₆가스에 비해서 이물질의 존재나 전극표면 거칠기 등에 의한 강한 국부전계가 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 절연재료로써 전력기기의 절연시스템에 사용될 가능성이 높다[11-15].

그러므로 본 연구에서는 금속성 이물질이 GIS 내부에 존재하는 경우를 모의한 평판 전극계에 바늘모양의 침전극이 설치된 불평등전계 중에서 N₂가스를 SF₆가스에 일정한 혼합비율로 첨가하면서 절연내력과 방전특성을 파악하기 위하여 SF₆-N₂ 혼합기체의 혼합비에 따른 절연파괴전압특성을 측정·분석하였다. 이 때 실험전압으로는 가스절연기기의 운전 중에 발생할 수 있는 정·부극성의 뇌 임펄스전압과 진동성 임펄스전압을 각각 인가시켰다. 혼합비율은 SF₆가스와 N₂가스의 부분압력에 대한 비율로 환산하여 0, 5, 10, 15, 20[%] N₂가스를 SF₆가스에 혼합하였다. 그리고 각각의 혼합비율에 따라 실제 GIS의 사용 기체압력을 고려하여 SF₆-N₂ 혼합기체의 압력이 0.3[MPa]인 경우를 선정하였다. N₂가스를 SF₆가스에 10[%] 첨가한 N₂(10[%])-SF₆ 혼합기체의 절연파괴전압-시간

* 正 會 員 : 仁 荷 大 電 子 電 氣 컴퓨터工學部 教授 · 工 博

** 正 會 員 : 仁 荷 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

*** 準 會 員 : LG產電 電 力 技 術 試 驗 센터 研究員

接受日字 : 2000年 3月 31日

最終完了 : 2000年 8月 24日

특성, 절연파괴전압-압력특성, 이들에 대한 인가전압의 파형 및 극성의 영향과 가스압력의 의존성 등에 대하여 전구방전전류의 특성을 기초로 중점적으로 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험계의 개략도를 그림 1에 나타내었으며, 스위치 S_1 을 개방시키고 구갯 C_2 를 단락시킨 상태에서 Marx 임펄스전압 발생장치만의 동작으로 뇌 임펄스전압을 발생시킨다.

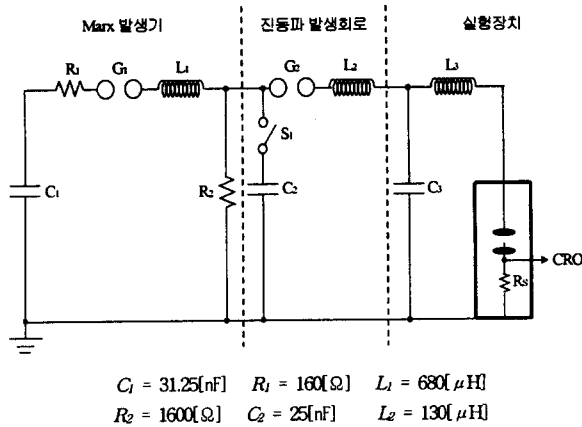


그림 1 실험계의 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

뇌 임펄스전압의 파형은 기기의 뇌 충격시험전압으로 정해지고 있는 표준 뇌 임펄스전압 파형에 대한 규격의 범위 이내인 1.2/44 $[\mu\text{s}]$ 이었다. 또한 진동성 임펄스전압은 스위치 S_1 을 투입시킨 상태에서 Marx 임펄스전압 발생장치가 동작하여 방전갯 C_2 가 선택됨에 의해서 발생한다. 진동성 임펄스전압 파형은 주로 회로의 정전용량(C_2)과 인덕턴스(L_2)에 의해 결정되고, 리드선의 인덕턴스(L_3)와 실험장치 및 부싱의 정전용량(C_3)에 의해 많은 영향을 받으며, 파형의 상승시간, 50[%]감쇠시간 및 진동주파수가 각각 0.4 $[\mu\text{s}]$, 44 $[\mu\text{s}]$, 0.83 $[\text{MHz}]$ 이었다. 모의 GIS 실험장치는 내경 396 $[\text{mm}]$ 의 스테인리스강을 이용해서 원통형으로 설계·제작하였으며, 전극에 인가되는 실험전압을 측정하기 위한 전계센서를 전극계의 상단부에 설치하였다[2-4]. GIS내에 바늘모양의 금속성 돌기물이 존재하는 것을 모의한 전극계의 상부전극은 반경 45 $[\text{mm}]$ 인 스테인리스강을 사용하였고, 하부전극은 반경 35 $[\text{mm}]$ 인 동으로 제작하였다. 하부전극의 중앙에 바늘모양의 돌기물(길이 10 $[\text{mm}]$, 반경 0.5 $[\text{mm}]$)을 설치하고, 인가전압의 변동에 따른 변위전류를 최소화시켜 전구방전전류를 정확하게 검출하기 위하여 하부전극과 돌기물을 전기적으로 절연시켰다.

2.2 실험 방법

시험 용기는 절연기체의 순도를 유지하기 위하여 진공펌프를 사용해서 용기 내부의 압력을 0.133 $[\text{Pa}]$ 까지 배기시켰다. 그리고 절

대압력 0.1~0.5 $[\text{MPa}]$ 의 범위에서 상용 등급의 SF_6 (순도: 99.95[%]) 가스에 고등급의 N_2 (순도: 99.999[%])가스를 0, 5, 10, 15, 20[%]의 압력비율로 혼합시킨 $\text{SF}_6\text{-N}_2$ 혼합기체의 임펄스전압에 대한 전구방전전류와 절연파괴특성을 측정·분석하였다. 기체의 혼합방법은 Dalton의 분압법칙에 따라 각 시료의 조절기를 이용하여 조정하면서 용기에 부착된 압력계로 혼합비를 확인하면서 붐입하였다. 전극에 인가되는 임펄스전압의 검출기인 전계센서의 감도는 뇌 임펄스전압에 대한 저항분압기의 응답과 비교·교정하였으며, 전계센서의 주파수대역은 40 $[\text{Hz}]$ ~200 $[\text{MHz}]$ 로 실험전압을 정확하게 측정할 수 있다[4].

절연파괴전압 및 전구방전전류의 측정은 정·부극성의 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압을 각각 30~50회씩 인가하여 이루어졌다. 전구방전전류를 측정하기 위해서 바늘모양의 돌기물에 접속한 분류기 저항 R_3 는 50 $[\Omega]$ 으로 두고, 분류기로 검출된 신호는 동축케이블에 접속된 감쇠기(감쇠비 10 : 1)를 거쳐 인가전압과 동시에 오실로스코프(LeCoray 9304A)로 실시간 관측·저장되었다. 또한 측정용 케이블은 2중 메쉬선으로 차폐하였고, 실험에 사용된 모든 측정장치는 차폐함 안에 내장시켜 외부 잡음과 외란의 영향을 억제시켰다.

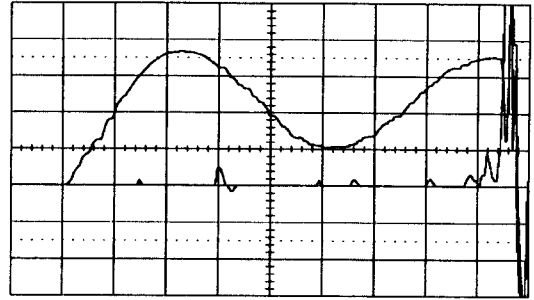
3. 결과 및 고찰

3.1 절연파괴전압과 전구방전전류의 특성

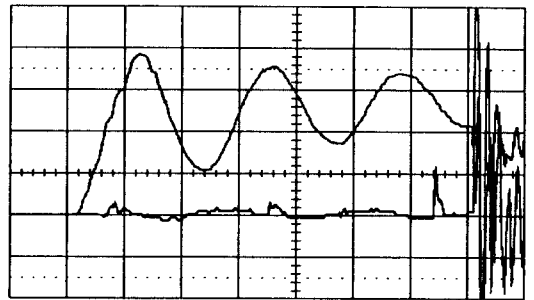
전력기기의 뇌 임펄스전압 시험에서는 절연파괴전압-시간 특성($V\text{-}t$ 특성)을 파악하는 것이 절연협조상 특히 중요하지만, 현재까지의 $V\text{-}t$ 특성은 표준임펄스전압과 같이 잘 정의된 파형에 대해서 절연강도의 검토가 주로 이루어져 왔다. GIS내에 설치되어 있는 단로기의 조작에 의해서 발생하는 과도과전압은 고주파 진동성분을 포함하고 있으므로 피뢰기와 보호협조면에서도 1 $[\mu\text{s}]$ 이하인 시간영역에서의 $V\text{-}t$ 특성은 매우 중요하다. 특히 불꽃방전의 지연시간은 전력기구나 전력선로의 절연설계 및 보호장치의 협조체계 구성에서 중요한 자료가 된다[16]. 실험전압을 전극사이에 인가시킨 경우 충격전압의 순시값이 직류 절연파괴전압 이상이 되더라도 곧바로 절연파괴되지 않고, 어느 정도 시간이 경과된 후에 절연파괴가 일어난다. 이와 같이 전압을 인가한 순간부터 절연파괴가 일어난 시점까지 경과된 시간을 불꽃방전의 시간지연이라고 한다 [17-19].

최근의 논문에서는 순수 SF_6 가스에 대한 절연파괴현상들을 조사했으며, SF_6 가스의 절연내력에 미치는 전구방전특성과 이에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 요인들을 검토하였다[2]. SF_6 가스에 대한 혼합기체로서는 화학적으로 안정하며 용점이 매우 낮은 N_2 가스가 고려되고 있다. 압력 0.3 $[\text{MPa}]$ 의 N_2 (10[%]) -SF_6 혼합기체에서 정·부극성의 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압과 전구방전전류 파형의 예를 그림 2에 나타내었으며, 전구방전은 리더의 계단상 진전에 의해서 이루어짐을 알 수 있다. 뇌 임펄스전압이 인가된 경우에는 초기스트리머코로나에 의해서 형성된 리더가 인가전압의 증가 또는 리더의 진전에 따라 리더펄스는 점차 커지게 되며, 결국 전극사이를 교락하여 절연파괴에 이르는 것으로 볼 수 있다. 정극성의 경우 리더펄스 사이의 시간간격은 부극성에 비해 매우 짧으며 작은 리더의 계단상 진전임을 알 수 있다. 또한 부극성 전구방전전류 파형에는 스트리머코로나에 의한 전류 이외에 이온성

전류성분이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 진동성 임펄스전압이 인가된 경우 전구방전전류에는 미세하지만 인가전압의 변동에 따른 변위전류가 검출되었으나 펄스상의 리더전류와는 충분히 구분할 수가 있다. 스트리머코로나에 의한 리더의 형성과 이의 계단상 진전을 쉽게 알 수가 있다. 그러나 뇌 임펄스전압이 인가되었을 때와 같이 리더전류펄스가 진전됨에 따라 점차적으로 증가하는 것이 아니라 인가전압의 변동에 따라 리더전류의 펄스의 크기도 변화하고 리더의 진전이 중단되기도 하는 형태의 전구방전양상이 관측되었다. 그리고 진동성 임펄스전압이 인가된 경우 리더의 스텝핑 시간이 뇌 임펄스전압을 인가했을 때보다 길게 나타났으며, 이것으로부터 리더의 진전속도가 늦음을 알 수 있다. 결국 절연파괴는 리더메커니즘에 의해서 이루어짐을 전구방전전류의 파형으로부터 알 수 있었다. 그림 2에서 나타낸 바와 같이 뇌 임펄스전압 또는 진동성 임펄스전압이 인가된 경우 절연파괴가 반드시 인가전압의 피크값 또는 피크값의 부근에서만 일어나는 것은 아니다. 따라서 본 연구에서는 SF₆-N₂ 혼합기체의 V-t특성을 평가하기 위한 기준으로써 한국공업규격 및 국제전기위원회(IEC 60-2)규정에 의거하여 설정하였다. 즉, 절연파괴전압은 절연파괴 이전에 시험 갭에 인가된 최대 전압을, 절연파괴시간은 전압이 인가되어 절연파괴가 일어나기까지의 시간을 적용하는 방법으로 하였다. V-t특성을 얻게 되면 50[%]점락전압보다 좀더 구체적인 특성을 얻을 수 있기 때문에 가스절연개폐장치의 절연설계 및 평가에서 보다 효과적이므로 일반적으로 적용되고 있는 V-t특성의 평가방법이다.

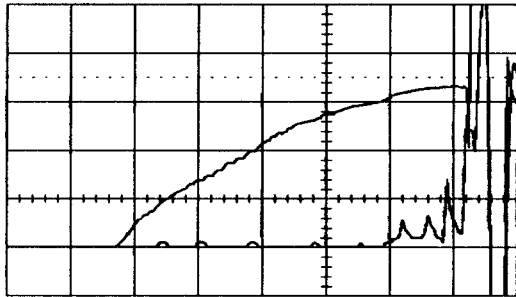


인가 전압 : 30[kV/div], 0.2[μs/div]
전구방전전류 : 200[mA/div], 0.2[μs/div]
정극성

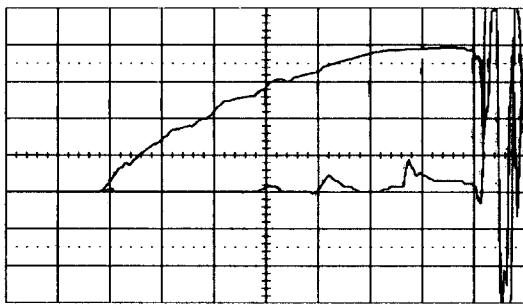


인가 전압 : 40[kV/div], 0.5[μs/div]
전구방전전류 : 200[mA/div], 0.5[μs/div]
부극성

(b) 진동성 임펄스전압



인가 전압 : 30[kV/div], 0.2[μs/div]
전구방전전류 : 400[mA/div], 0.2[μs/div]
정극성



인가 전압 : 40[kV/div], 0.2[μs/div]
전구방전전류 : 200[mA/div], 0.2[μs/div]
부극성

(a) 뇌 임펄스전압

그림 2 인가전압과 전구방전전류의 파형(0.3[MPa])

Fig. 2 The waveforms of the applied voltage and predischage current(0.3[MPa])

특히 V-t특성은 방전현상의 메커니즘이 명확하게 밝혀지지 않은 절연물을 사용하는 고전압 전력기기의 절연설계나 절연협조에서 기초가 되는 중요한 자료이다.

3.2 혼합비에 따른 절연파괴전압의 특성

기체압력 0.3[MPa]에서 N₂가스의 혼합비율에 따른 정·부극성의 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압에 대한 SF₆-N₂ 혼합기체의 절연파괴전압을 그림 3에 나타내었다. 최근에 발표한 논문에서 SF₆가스의 절연파괴전압은 가스압력에 대하여 비선형적이지만[2], N₂가스의 절연파괴전압은 거의 직선적으로 상승한다. 이것은 SF₆가스가 부성기체이기 때문에 강력한 전자친화력에 기인되는 코로나 안정화작용이 크게 영향을 주는 것이지만, N₂가스는 화학적으로 안정되어 전자친화력이 없어 코로나 안정화작용이 작용하지 않기 때문인 것으로 생각한다. SF₆-N₂ 혼합기체에서 SF₆가스는 매우 높은 전자친화력으로 전자를 포획하여 부(-)이온을 형성시켜 절연파괴를 일으키는 전리증식을 억제시키는 것으로 보고되고 있다[6,9]. 그리고 N₂가스의 화학적 안정성 때문에 절연파괴 진전과정이나 기구에 영향을 거의 미치지 않으므로 N₂가스의 혼합비율이 증가하여도 절연파괴전압은 약간만 감소하는 것으로 판단된다. 그

림 3에서 SF_6-N_2 혼합기체의 절연파괴전압은 전반적으로 모든 인가전압의 파형과 극성에서 N_2 가스의 혼합비율에 따라 점차 감소의 경향을 보였으며, 정극성의 임펄스전압을 인가했을 때 부극성의 경우보다 절연파괴전압이 매우 낮게 나타났다. 또한 절연파괴전압이 낮은 정극성의 임펄스전압에서는 감소 변화가 거의 평탄한 감소특성을 보였지만, 부극성의 임펄스전압의 경우에는 N_2 가스의 혼합비율이 10[%]정도까지 매우 급격한 감소의 변화를 보이다가 그 이상의 혼합 비율에서는 점차 평탄한 감소의 경향을 나타내었다. 또한 진동성 임펄스전압에 대한 절연파괴전압은 정·부극성 모두에서 뇌 임펄스전압보다 낮게 나타났다. 이러한 이유는 뇌 임펄스전압의 경우 침 전극 앞에서의 전하이동에 따른 전구방전전류에 의해 절연파괴를 야기하지만, 진동성 임펄스전압의 경우에는 전구방전전류뿐만 아니라 스트리머 선단과 반대쪽 전극사이의 정전용량의 상승 그리고 고주파 진동전압에 의해 야기되는 변위전류성분의 영향이 더해지기 때문인 것으로 생각된다.

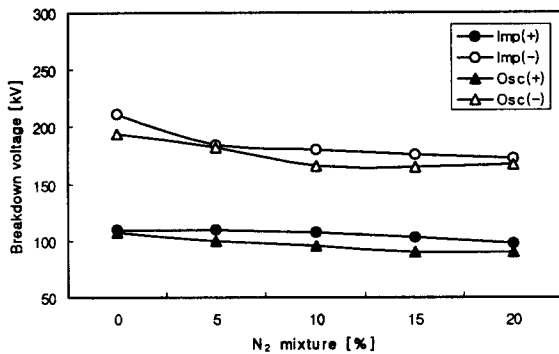


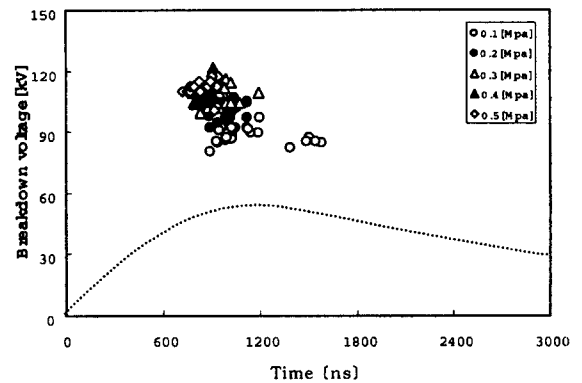
그림 3 N_2 가스의 혼합비율에 따른 절연파괴전압의 특성(기체압력 : 0.3(MPa))
 Fig. 3 Breakdown voltage characteristics on the portion of N_2 gas mixed in SF_6 (gas pressure : 0.3(MPa))

절극 인가전압 중 정극성의 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압에서 절연파괴전압이 가장 낮게 나타났으므로 실용적 측면을 고려하면 이에 대한 혼합비에 따른 절연파괴전압의 특성을 집중적으로 분석하는 것은 중요한 의미를 갖는다고 사료된다. 예컨대, N_2 가스의 혼합비율에 따른 SF_6-N_2 혼합기체에 대한 절연파괴전압의 특성을 동일 압력에서 정극성의 임펄스전압으로 순수 SF_6 가스의 그것과 비교 분석한 결과, 뇌 임펄스전압의 경우에는 5, 10, 15, 20[%] N_2 가스의 혼합비율에서 각각 SF_6 가스 절연내력의 약 100[%], 98[%], 95[%], 90[%]정도를 나타내었고, 진동성 임펄스전압의 경우에는 94[%], 90[%], 84[%], 84[%]정도의 절연내력을 갖는 것으로 분석되었다. 따라서 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압의 인가전압에 대하여 절연파괴전압이 특히 낮은 정극성의 경우 순수 SF_6 가스의 90[%] 이상이 되는 절연내력의 특성을 나타내는 $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합기체를 적용하는 것이 순수 SF_6 가스를 대체할 절연기체로써 타당하다고 사료된다. 그러므로 본 연구에서는 실제 기체절연시스템에서 절연재료로써의 적용 가능성이 높을 것으로 판단되는 $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합기체에 대한 절연파괴특성을 중점적으로 측정 및 분석하였다.

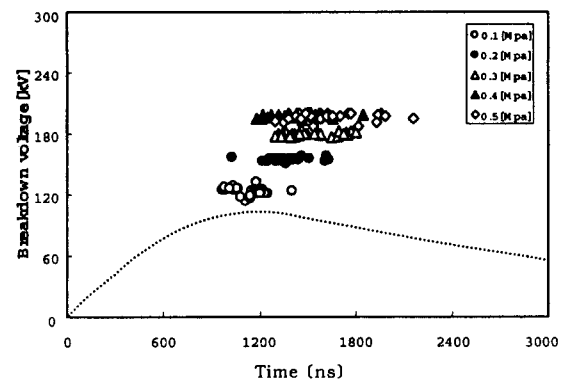
3.3 V-t 특성

3.3.1 기체압력 의존성

SF_6-N_2 혼합기체에 대한 최대 절연파괴강도는 전극의 형상이 평등전계를 형성할 때 얻어진다. 그러나 실제 현장에서의 적용은 불평등전계 갭들을 피할 수 없다. 이러한 전극의 갭 중에서 절연파괴전압은 인가전압의 파형 및 극성에 강하게 의존한다. 일반적으로 코로나개시전압은 전극의 형상에 따라 다르며, 높은 전압이 인가되는 전극이 부극성일 때 더 낮았으나 절연파괴전압은 오히려 전압이 인가되는 전극이 정극성일 때 더 낮게 나타났다.



(a) 정극성



(b) 부극성

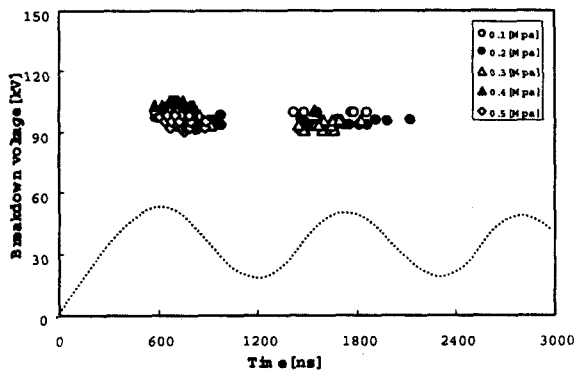
그림 4 뇌 임펄스전압에 대한 V-t특성의 기체압력 의존성

Fig. 4 Dependence of the V-t characteristics under the lightning impulse voltage on the gas pressure

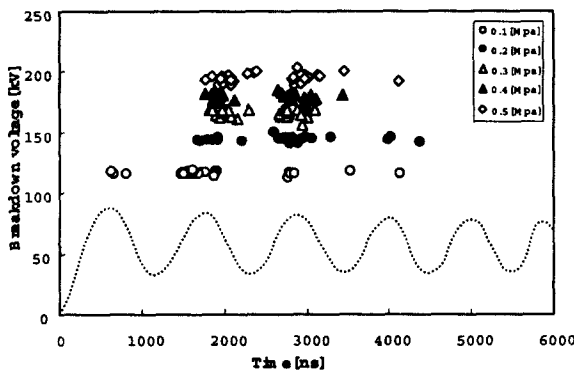
그림 4와 그림 5에는 기체압력을 파라미터로 하여 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압에 대한 $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합기체의 V-t 특성을 나타내었으며, 그림의 점선은 절연파괴시점을 알아 볼 수 있도록 인가전압의 파형을 나타낸 것이다. 그림 4에서 나타낸 바와 같이 동일한 전극계에 정극성의 뇌 임펄스전압을 인가시킨 $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합기체의 절연파괴특성은 최근에 발표되었던 순수 SF_6 가스의 절연파괴특성과 비교해 보면[4], 절연파괴까지의 지연시간이 짧으며, 절연파괴전압이 피크값 부근에서 거의 집중된 경향을 보였다. $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합기체는 순수 SF_6 가스의 특성

과 같이 부극성인 경우가 정극성일 때보다 압력 의존성이 현저하고, 동일한 조건에서의 절연파괴전압도 높게 나타났으며, 절연파괴전압의 편차도 크게 나타났다. 또한 전구방전의 압력의존성과 $V-t$ 특성의 압력의존성의 상관관계를 보면, 뇌 임펄스전압인 경우 정극성은 절연파괴전압 및 전구방전전류 모두 기체압력의 증가와 더불어 상승하는 경향을 나타내었지만, 부극성은 기체압력의 증가와 더불어 절연파괴전압이 상승하지만 코로나개시전류는 오히려 감소의 경향을 나타내었다. 이러한 차이는 주로 초기전자의 발생메커니즘과 전구방전의 진전양상이 다르기 때문인 것으로 분석된다.

뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압에 대한 불평등전계 중에서 SF_6 가스와 SF_6-N_2 혼합기체의 절연파괴는 코로나개시전압을 상당히 초과하는 전압에서 일어나는 것이 특징이었다. 정극성의 경우 초기전자는 부이온이나 수분 등 불순물로부터의 탈리작용에 의해서 공급되어지며, 이들의 초기전자에 의해서 형성된 리더의 진전으로 절연파괴에 이르게 된다. 그리고 동일한 기체압력에서의 절연파괴전압의 편차도 작았으며, 절연파괴전압이 지연시간에 거의 변하지 않는 거의 평탄한 $V-t$ 특성을 나타내었다. 이와 같은 특성은 전압의 인가시간이 길어져도 약점이 증가할 확률이나 전극계에서의 더 이상의 열화는 없으며, 단지 전극계 자체의 특성이 두드러지기 때문에 나타난 현상이라고 볼 수 있다.



(a) 정극성



(b) 부극성

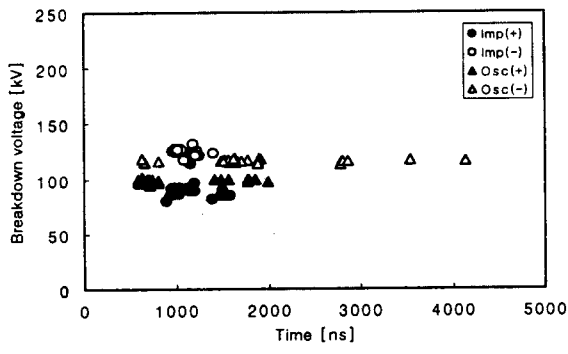
그림 5 진동성 임펄스전압에 대한 $V-t$ 특성의 기체압력 의존성
 Fig. 5 Dependence of the $V-t$ characteristics under the oscillating impulse voltage on the gas pressure

한편, 부극성의 경우에는 초기전자가 주로 음극표면으로부터의 전계 방출에 의해서 공급되어지며, 초기코로나는 초기전자 뿐만 아니라 정이온이나 광자에 의한 2차전리작용을 수반하면서 성장하게 된다[2-4]. 절연파괴전압은 초기코로나 혹은 2차전리작용에 의해서 발생한 공간전하에 의한 전계완화작용의 영향뿐만 아니라 공간전하의 재결합 또는 부착작용도 방전의 진전과정에 크게 영향을 미치게 된다. 즉, 초기전자의 공급에 의한 통계적시간지연과 공간전하에 의한 전계완화작용에 관련되는 형성시간지연의 인가전압에 대한 극성의존성에 의해서 $V-t$ 특성의 차이가 나타나게 된다. 그림 5에서 나타난 바와 같이 진동성 임펄스전압에 대한 $V-t$ 특성에서 부극성의 경우는 기체압력의 의존성이 크게 나타났지만, 정극성의 경우에는 거의 기체압력에 의존하지 않았으며, 거의 평탄한 특성을 보이고 있다. 실제 현장에서는 일반적으로 기체압력을 높게 하여 절연내력의 향상을 도모하는 경우가 있으나 정극성의 진동성 임펄스전압에 대한 $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합기체의 절연파괴전압은 상기와 같이 기체압력에 따라 거의 변화가 없으므로 가스절연시스템의 절연설계에 있어서 특별히 주의하여야 할 사항이라고 생각된다. 정극성의 경우 스트리머코로나에 의해서 발생하는 공간전하는 수명이 비교적 짧은 정이온인데 비해서 부극성의 경우에는 부이온의 공간전하가 주종을 이루게 된다. 정·부이온의 기체압력에 따른 공간전하작용의 영향이 전구방전의 진전에 반영된 것으로 볼 수 있다. 그림 2의 전구방전전류의 파형으로부터 알 수 있듯이 특히 정극성의 경우의 공간전하는 정전하이지만 그의 양이 매우 적고, 전류파형은 거의 스트리머코로나에 의해서 형성되어 있다. 또한 공간전하의 영향이 적으므로 리더펄스 사이의 시간간격도 짧으며, 이와 같은 방전진전현상이 기체압력에 거의 영향을 받지 않기 때문에 $V-t$ 특성도 기체압력의 의존성이 거의 나타나지 않은 것으로 볼 수 있다.

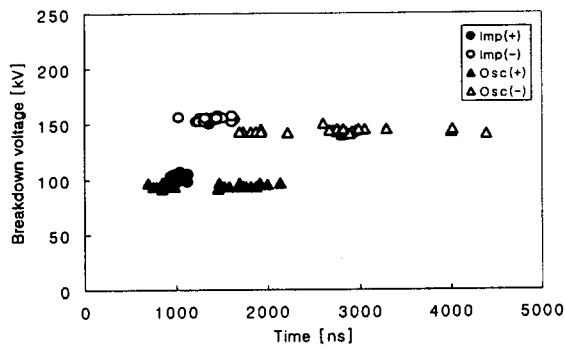
3.3.2 인가전압의 파형 및 극성의존성

정·부극성의 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압을 파라미터로 하여 기체압력의 변화에 따른 $V-t$ 특성을 그림 6에 나타내었다. $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합기체의 $V-t$ 특성은 인가전압의 파형 및 극성과 기체압력에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 정극성의 뇌 임펄스전압의 경우 절연파괴전압은 기체압력에 따라 다소 다르지만 부극성보다 약 50~90%정도, 진동성 임펄스전압의 경우에는 약 30~100%정도로 낮았다. 최소절연파괴전압이 나타나는 시간영역은 부극성의 뇌 임펄스전압의 경우 0.1[MPa]의 기체압력을 제외하고 정극성보다 대략 0.5~1[μ s]정도, 진동성 임펄스전압의 경우에는 모든 기체압력의 조건에서 대략 2~4[μ s]정도 긴 시간영역이 있으며, 기체압력이 증가할수록 그 차이는 크게 나타났다. 특히 부극성의 진동성 임펄스전압을 인가한 경우에 시간지연은 가장 길게 나타났다. 이와 같은 특성의 차이도 초기전자의 공급메커니즘과 정·부극성의 리더 형상 및 진전양상이 다른 것이 주요 원인이고, 더욱이 부극성에서는 코로나안정화작용이 현저하기 때문에 최종적인 절연파괴전압이 대단히 높으며, 절연파괴까지의 긴 시간지연을 나타낸 것으로 여겨진다. 또한 정극성의 경우 수명이 약 10~30 [ns]인 SF_6 가스의 부이온으로부터의 탈리작용에 의해서 발생하는 초기전자에 의하여 발단되는 리더의 진전으로 절연파괴에 이르기 때문에 전구방전은 대단히 빠른 속도로 진전하게 된다. 그림 2의 전구방전전류의 파형에서도 알 수 있는 바와 같이 리더펄스 사이

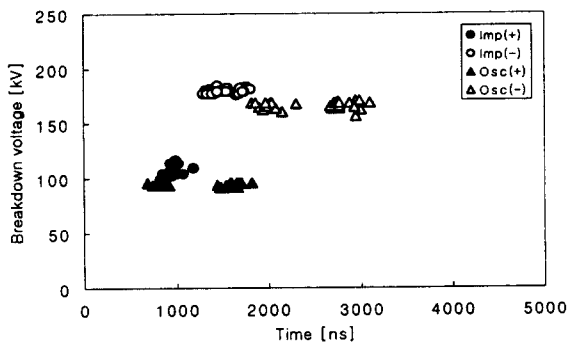
의 시간간격도 매우 짧고, 빠른 속도로 진전하게 되어 절연파괴를 일으키므로 절연파괴까지의 시간지연이 비교적 짧으며, 공간전하의 영향도 적게 된다. 그러나 부극성의 경우 초기코로나에 의해서 발생한 정이온은 바늘모양의 돌기물의 끝부분에 집중되어 있다가 서서히 돌기물을 통하여 흐르며, 방전공간에는 전자의 부착작용에 의해서 생성된 부이온이 존재하게 된다. 이러한 현상은 전구방전 전류에 이온성 전류성분이 많이 포함되어 있다는 것으로도 알 수 있다. 부이온의 이동속도는 전자의 이동속도에 비하여 대단히 느리므로 전계완화작용이 지속되는 시간도 길어진다. 결국 부극성의 경우는 공간전하의 전계완화작용에 의해서 형성시간지연이 길어지기 때문에 절연파괴에 이르기까지의 시간지연이 길게 되며 절연파괴전압도 높게 나타난 것으로 생각된다. 절연파괴까지의 소요되는 시간은 진동성 임펄스전압을 인가한 경우가 오히려 뇌 임펄스전압을 인가한 경우보다 길게 나타났으며, 진동성 임펄스전압에 대한 진동의 퍼크값 부근에서 데이터가 집중되어 있는 것이 특징이다.



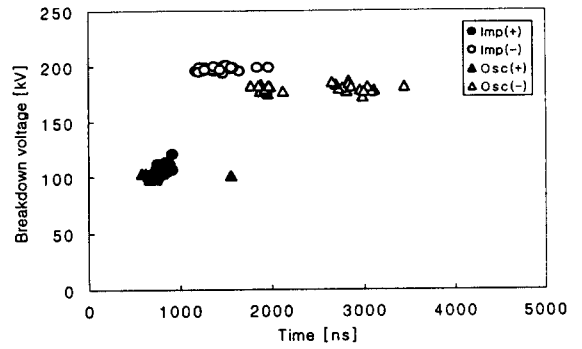
(a) 0.1[MPa]



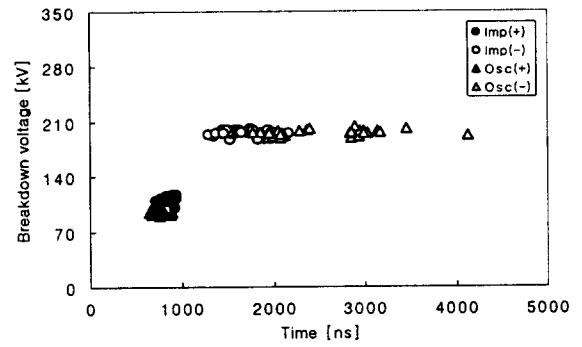
(b) 0.2[MPa]



(c) 0.3[MPa]



(d) 0.4[MPa]



(e) 0.5[MPa]

그림 6 $V-t$ 특성의 인가전압의 파형 및 극성의존성

Fig. 6 Dependence of the $V-t$ characteristics on the waveforms and polarities of the applied voltages

또한 부극성의 진동성 임펄스전압이 인가된 경우 절연파괴까지의 시간지연이 가장 길게 나타났다. 뇌 임펄스전압을 인가시킨 경우 리더펄스의 크기는 리더의 진전과 더불어 증가하며 절연파괴에 이를 때까지 지속적으로 진전하게 된다. 이에 반해서 진동성 임펄스전압을 인가시킨 경우는 인가전압의 변동에 따라 전구방전전류인 리더전류의 크기도 변동하며, 리더의 진전이 중단되기도 하기 때문에 절연파괴까지의 시간지연이 길어진 것으로 볼 수 있다. 인가전압의 변동이 있을 때 인가전압이 리더의 진전에 요구되는 전압보다 작은 경우 리더의 진전이 중단되지만, 변위전류에 의해 에너지공급이 지속되므로 리더의 상태가 소멸되지 않고 있다가 다시 전압이 증가하면 리더의 진전이 재개되는 형태로 전구방전이 진전되어 이것에 의해 최종적으로 절연파괴에 이르게 된다.

3.4 V-p 특성

불평등전계 중에서 $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합기체의 $V-p$ 특성은 순수 SF_6 가스에서와 같이 인가전압의 파형 및 극성, 불평등전계의 정도, 돌기물의 형상 및 반경, 그리고 돌기물 길이의 치수 등 여러 가지 요인의 영향을 받는다[8]. 기체압력은 방전공간 안에서의 전자나 이온의 거동특성에 지배적인 영향을 미치므로 $V-p$ 특성은 절연파괴기구의 해석에서 중요한 요소이다. $V-t$ 곡선의 절연파괴전압 중에서 최소절연파괴전압을 취하여 기체압력의 변화에 따른 $V-p$

특성을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 뇌 임펄스전압의 경우 인가전압의 극성에 관계없이 0.4[MPa] 부근의 기체압력에서 최소절연 파괴전압은 최대값을 가지며, 기체압력의 증가와 더불어 거의 일정한 특성을 나타내었다. 그러나 부극성의 진동성 임펄스전압의 경우 최소절연파괴전압은 기체압력에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 정극성의 뇌 임펄스전압에 대한 최소절연파괴전압은 기체압력에 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났으며, 진동성 임펄스전압에 대한 최소절연파괴전압은 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 정극성의 실험전압을 인가한 경우 바늘모양의 금속성 돌기부 끝단에서 발생하는 전구방전의 진전과정 동안에 광전리작용에 의하여 전자 공급이 원활하게 이루어지기 때문에 부극성에 비해 낮은 전압에서 빠른 속도로 방전이 진전된다. 따라서 광전리작용은 기체압력에 대한 의존성이 거의 없으므로 절연파괴 전압은 기체압력에 관계없이 거의 일정한 것으로 볼 수 있다.

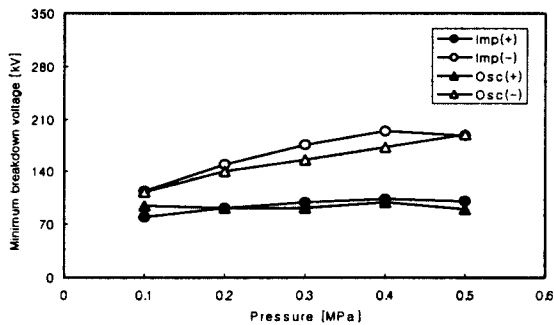


그림 7 최소절연파괴전압-기체압력의 특성
Fig. 7 The minimum breakdown voltage vs. gas pressure characteristics.

또한 $V-t$ 특성곡선에서 알 수 있는 바와 같이 진동성 임펄스전압이 인가된 경우에는 뇌 임펄스전압에 비하여 인가전압의 변동에 따라 방전지속시간이 길어지므로 공간전하작용의 영향이 크게 나타나게 된다. 진동성 임펄스전압이 인가된 경우 기체압력이 높아질수록 초기스트리머코로나전류의 크기는 감소하며, 공간전하에 의한 전계완화작용이 약해지게 되어 리더의 생성이 쉬워지기 때문에 절연파괴전압이 다소 낮아지는 것으로 생각된다. 그리고 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압 모두에서 정극성의 경우가 부극성일 때보다 최소절연파괴전압이 현저하게 낮고, 기체압력의 변화에 거의 영향을 받지 않으며, 특히 0.5[MPa]의 기체압력에서는 그 차이가 100[kV] 이상의 전압을 나타냈다. 인가전압의 극성에 따라 최소절연파괴전압의 차이가 크게 나타나는 것은 초기전자의 발생메커니즘과 전구방전의 진전에 대한 공간전하효과로 인하여 전계완화작용의 극성의존성이 다르기 때문인 것으로 생각된다. 부극성의 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압의 경우 최소절연파괴전압은 기체압력의 의존성이 크지만, 정극성의 경우에는 그다지 기체압력의 의존성이 나타나지 않았다. 정극성의 경우는 초기스트리머코로나의 발생전압, 스트리머의 리더로의 천이 및 리더의 진전에 요구되는 전압이 기체압력에 거의 영향을 적게 받는 것으로 생각할 수 있다. 결국, 이러한 현상은 정극성의 경우 부이온이 스트리머코로나의 발생과 더불어 바늘모양의 돌기물을 통하여 사라지고 정이온의 공간전하가 지배적이며, 부극성의 경우에는 정이온보다 수명이 긴 부이온이 지배적인 영향을 미치는 결과에 기인된다고 볼 수 있

다. 또한 정극성과 부극성의 절연파괴전압과 절연파괴까지의 시간 지연이 각각 다르게 나타나는 것은 정·부극성에서 지배적으로 작용하는 공간전하의 수명과 전계완화작용의 정도 그리고 정·부극성 리더진전에 필요한 에너지가 다르기 때문이다. 따라서 SF_6-N_2 혼합기체를 GIS의 절연재료로 사용하는 경우 성능평가에서 뇌 임펄스전압 시험 이외에 운전 중에 발생하는 과도과전압에 대한 절연특성의 평가와 시험을 병행하는 것이 보다 합리적이고 효과적일 것으로 판단된다.

4. 결 론

SF_6-N_2 혼합기체는 무독성이고, 비가연성 물질로서 순수 SF_6 가스보다 비교하여 높은 압력에서도 액화되지 않는 낮은 융점, 동기차단기의 회복전압 상승률(RRRV)에 대한 성능향상 그리고 저비용의 경제성 등에서 장점을 갖기 때문에 최근에 이르러 기체절연송전선로(GITL)와 차단기를 중심으로 매우 유망한 연구의 대상이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 VFTO에 대한 불평등전계 중의 SF_6-N_2 혼합기체의 절연특성 및 방전현상 등에 대하여 분석 및 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) SF_6-N_2 혼합기체 중에 농인 불평등 전극계의 최저절연파괴 전압은 N_2 가스의 혼합비에 따라 큰 변동을 나타내지 않았다.
 - (2) 불평등전계가 형성된 $N_2(10\%)-SF_6$ 혼합기체의 절연특성은 전반적으로 순수 SF_6 가스와 유사한 특성을 나타내었고, 뇌 임펄스전압의 부극성인 경우 정극성보다 절연파괴전압에 대한 압력의 의존성이 현저하며, 더욱이 정극성의 진동성 임펄스전압에서는 기체압력의 변화에 거의 의존하지 않았다.
 - (3) 불평등 전극계에 인가된 뇌 임펄스전압 및 진동성 임펄스전압 모두에서 정극성의 경우가 부극성일 때보다 최소절연파괴전압이 현저하게 낮았고, 기체압력의 변화에 거의 영향을 받지 않았다.
 - (4) 절연파괴까지의 지연시간은 부극성의 진동성 임펄스전압을 인가한 경우 가장 길게 나타났으며, 순수 SF_6 가스와 동일한 경향을 나타내었다.
- 본 연구에서 분석한 SF_6-N_2 혼합기체의 절연특성에 대한 결과는 기체절연재료로 사용하는 전력설비에 관련된 기술개발, 전력설비의 GIS 설계나 절연협조 및 연구분야에서 기초지식으로써 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(관리번호 : 99-030)의 주관으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] N. H. Malik, A. H. Qureshi, "Breakdown mechanism in Sulphur-Hexafluoride", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-13, No 3, pp. 135~145, 1978.
- [2] 이복희, 이경옥 외2 "불평등전계중에서 임펄스전압에 대한 SF_6 기체의 전구방전과정의 분석",

한국전기전자재료학회 논문지, 제 13권, 제 1호, pp. 85~93, 2000.

[3] B.H. Lee and K.O. Lee, "Breakdown Characteristics of SF_6 Gas under VFTOs in Non-uniform Field", Proc. of the Korea-Japan Joint Workshop on Plasma Technologies and Applications, pp. 81~88, 1998.

[4] 이복희, 이경옥, 이창준, "가스절연개폐장치에 있어서 금속입자 존재시 임펄스전압에 대한 SF_6 가스의 절연특성", 조명·전기설비학회 논문지, 제 14권, 제 1호, pp. 22~29, 2000.

[5] L. Niemeyer, L. Ulich and N. Wiegart, "The Mechanism of Leader Breakdown in Electro-negative Gases", IEEE Trans., Vol. EI-24, No.2, 1989.

[6] 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発生メカニズム", 電學論B, 118巻 7/8호, pp. 837~842, 平成10年.

[7] M. O. Pace, L. G. Christophorou, D. R. James, R. Y. Pai, R. A. Mathis and W. Bouldin, "Improved unitary and multi-component gaseous insulators", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-13, No 1, pp. 31~36, 1978.

[8] N. H. Malik and A. H. Qureshi, "A review of electrical breakdown in mixture of SF_6 and other gases", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-14, No 1, pp. 1~11, 1979.

[9] L. G. Christophorou and R. J. Van Brant: " SF_6/N_2 mixtures basic and HV insulation properties", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol. 2, No 5, pp. 952~1003, 1995.

[10] A. H. Mufti and N. H. Malik: "Pulsative Corona from free spherical conducting particles in SF_6/N_2 mixtures", IEEE International Symposium on Elect. Insul., pp. 797~799, 1996.

[11] G. R. Govinda Raju and M. S. Dincer, "Measurement of ionization and attachment coefficients in SF_6 and SF_6-N_2 ", J. Appl. Phys., Vol. 53, No. 12, pp. 8562~8567, 1982.

[12] 板橋 正明, 坂本 浩樹, 岸田 良二, 米澤 吉積 敏昭: " SF_6 가스絶縁開閉機器の寒冷地域における温度變化の實測", 電氣學會電力·エネルギー部門大會, No. 652, pp. 1085~1086, 平成5年.

[13] X. Waymel, V. Delmon, T. Reess, A. Gibert, P. Domens: "Impulse Breakdown in Point-Plane Gaps in SF_6-N_2 Mixtures", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 283~286, 1997.

[14] J. D. Morgan and M. Abdellah, "Impulse breakdown of covered cylinders in SF_6 and SF_6 -gas mixtures", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-23, No 3, pp. 467~473, 1988.

[15] T. B. Diarra, A. Beroual, F. Buret, E. Thuries, M. Guillen, Ph. Roussel, " N_2-SF_6 mixtures for high voltage gas insulated lines", Proc. of 10th Int. Symp. on High Voltage Engineering, pp. 101~104, 1997.

[16] N. Wiegart, et al., "Inhomogeneous Field Breakdown in

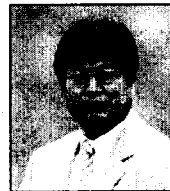
GIS" The prediction of Breakdown Probabilities and Voltages", Proc. of IEEE PES., 87 WM-192-8, 1987.

[17] I. M. Bortnik and V. P. Vertikov, "Discharge Development in SF_6 ", Proc. of 3th ISH, Paper No. 32-11, 1979.

[18] H. Hiesinger, "Statistical time-lag in case of VFT breakdown", Proc. of 6th ISH, paper No. 32-23, 1989.

[19] G. Riquel, Z. Y. Ren and L. Lefrancois, "Comparison between VFT and lightning impulse breakdown voltages for GIS insulation in presence of defects on live-conductors", Proc. of 6th ISH, Paper No. 23-09, 1989.

저 자 소 개



이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~1989년 일본 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland university 방문

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

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

Email : bhlee@inha.ac.kr



이경옥 (李京沃)

1960년 6월 24일생. 1987년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 032-870-1038, Fax : 032-875-1344

Email : kyoungok_lee@hanmail.net



김정일 (金正一)

1971년 5월 30일생. 1998년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 LG산전 전력기술시험센터 연구원

Tel : 043-261-6582, Fax : 043-261-6628

Email : jikimb@lgis.com