

뇌임펄스전압에 대한 SF₆와 dry-air의 절연특성

(Dielectric Characteristics of SF₆ and Dry-Air Gases under Lightning Impulse Voltage)

이 봉* · 유양우 · 김동규 · 이복희**

(Feng Li · Yang-Woo Yoo · Dong-Kyu Kim · Bok-Hee Lee)

요 약

본 논문은 준평등전계에서 뇌임펄스전압에 대한 SF₆와 dry-air의 절연과괴 특성에 대하여 기술하였다. 준평등전계로 사용된 구-평판전극계의 전계이용률은 71[%]이다. SF₆는 0.1~0.2[MPa] 범위에서, dry-air는 0.2~0.6[MPa]에서 SF₆와 dry-air의 절연과괴전압을 임펄스전압의 극성과 가스압력에 따라 측정·분석하였다. 그 결과 뇌임펄스전압에 대한 두 가스의 절연과괴전압은 정극성이 부극성보다 높았으며, SF₆의 절연과괴전압이 dry-air의 절연과괴전압보다 약 2.67배정도 높았다. 본 연구결과는 뇌서지에 대하여 우수한 성능을 가지는 배전기기에서 SF₆의 대체가스 성능 평가에 유용한 정보가 될 것이다.

Abstract

This paper describes dielectric characteristics of SF₆ and dry-air gases under lightning impulse voltages in a quasi-uniform electric field. In order to simulate to a quasi-uniform electric field, electric field utilization factor of the used sphere-plane electrode is 71[%]. The gas pressure of SF₆ ranges from 0.1 to 0.2[MPa] and that of dry-air ranges from 0.2 to 0.6[MPa]. Electrical breakdown voltages of SF₆ and dry-air gases are measured and analyzed as functions of the polarity of lightning impulse voltage and gas pressure. As a result, the electrical breakdown voltage of both gases under the positive lightning impulse voltage is higher than that under the negative one. The electrical breakdown voltage in SF₆ is almost higher than 2.67 times compared to dry-air. The results presented in this paper can be used as a useful information to evaluate the capability of alternative insulation gases for SF₆ in power distribution equipment with prominent ability against lightning surge.

Key Words : Dry-Air, SF₆, Lightning Impulse Voltage, Quasi-Uniform Electric Field,
Power Distribution Equipment

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 인하대학교 전자·전기공학과 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2010년 5월 18일
1차심사 : 2010년 5월 25일
심사완료 : 2010년 6월 13일

1. 서 론

차단기나 단로기 같은 개폐차단장치의 절연매질로 소호능력이 우수한 SF₆가스를 주로 사용하고 있다. 하

지만 SF₆가스의 지구 온난화계수(Global Warming Potential)는 이산화탄소(CO₂)의 약 23,900배로서, 1997년에 채택된 국제연합 규약 교토의정서에서 규제 대상의 기체로 지정되었다. 2005년 2월에 교토의정서가 정식 발효됨에 따라 전력기기에 사용되는 SF₆ 가스의 사용량 및 방출량의 감소가 큰 과제로 되고 있다 [1-3].

따라서 배전용 전력기기에 친환경 가스가 SF₆의 대체가스로 주목을 받고 있다. SF₆/N₂ 혼합가스도 SF₆의 대체가스로 고려됨에 따라 SF₆/N₂ 혼합가스에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 이유는 N₂가스는 가격이 싸며, 공기 중에 많이 존재하고 있기 때문이다. 하지만 SF₆를 포함한 혼합가스의 결점은 비싼 분리회수 비용이다. 최근 SF₆의 사용량 및 방출량을 감소하기 위하여 선진국에서는 84[kV]미만의 배전급 GIS에 대하여 건조공기(dry-air)와 질소(N₂) 등 친환경가스를 SF₆의 대체가스로 사용하고 있다. 원칙상 CO₂ 가스는 응용면에서 SF₆의 강력한 대체가스의 후보자로 고려되었지만 거부된 것은 배출이 제한된 가스이기 때문이다[4].

본 논문에서는 고품질의 배전급 친환경전력기기의 절연설계를 위하여 준평등전계에서 가스절연기기의 운전 중에 발생할 수 있는 너서지 전압에 대한 SF₆와 dry-air의 절연파괴특성과 전구방전진전과정을 비교하기 위하여 절연파괴전압, 전구방전전류를 측정·분석하여 배전용 전력기기의 절연설계에 참고로 사용될 임펄스절연파괴에 대한 기초 특성에 대하여 기술하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험계

준평등전계에서 순수 SF₆와 dry-air의 너임펄스전압에 대한 절연 특성을 비교·분석하기 위하여 그림 1과 같은 실험 장치와 측정시스템을 구성하였다.

실험용기는 내경 396[mm]인 스테인레스강을 이용하여 원통형으로 제작하였으며, 내부에 설치한 전극에 시험전압을 인가하기 위하여 66[kV](BIL 350[kV])용 콘덴서형 부싱이 설치되어 있다. 인가전압은 병렬충

전식 4단 임펄스발생장치를 이용하여 표준 너임펄스 전압(1.2/50[μ s])을 발생시켜 사용하였다.

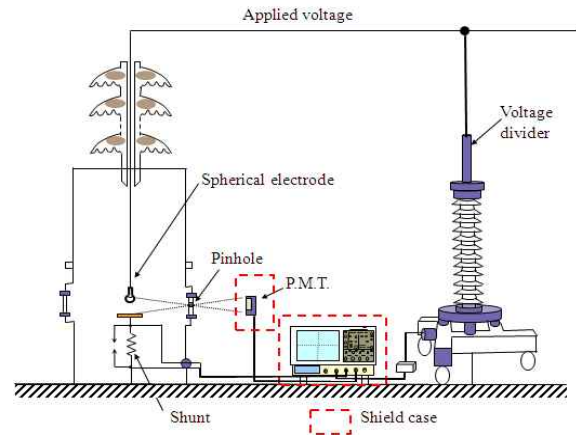


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. A schematic diagram of the experimental apparatus

준평등전계를 모의하여 실험용기의 하부에 구-평판전극을 제작하여 설치하였으며, 구-평판전극의 절연파괴전압은 분압비가 10,000 : 1인 분압기로, 전구방전전류는 전극하부에 설치된 분류기를 이용하여 오실로스코프로 관측하였다. 계측용 전원은 절연변압기와 필터를 경유하여 공급하고, 노이즈를 차단하기 위해서 오실로스코프와 광전자증배관은 차폐함 내부에 설치하였다. 인가전압과 전구방전전류의 측정용 케이블은 동축케이블을 2중 메쉬로 차폐하였다.

구-평판 전극계와 전류측정용 분류기의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 구-평판 전극계에서 구의 지름은 50[mm]이고, 평판전극의 지름은 90[mm]이며, 구-평판전극사이의 거리는 14[mm]이었다. 또한 전계이용률 ξ 는 평균전계와 최대전계의 비이다.

$$\xi = V / (dE_{\max}) \tag{1}$$

최대전계 E_{\max} 는 전압 V 에 비례하므로 전계이용률 ξ 는 전압에 의존하지 않고 전극의 형상과 배치에 의하여 결정된다. 본 실험에 사용된 구-평판전극의 전계이용률은 71[%]이다. 평판 전극 하단에 전구방전전류를 측정하기 위한 분류기를 설치하였다.

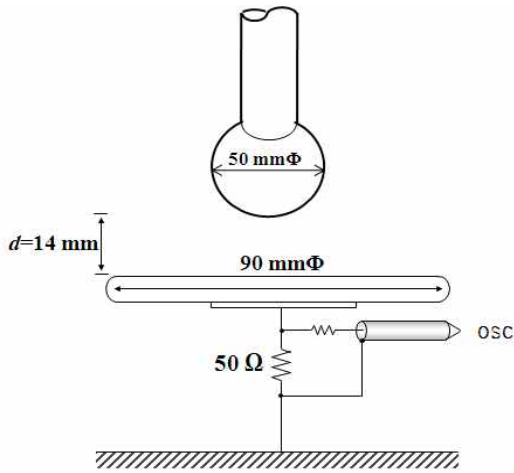


그림 2. 구-평판 전극계 구성도
Fig. 2. A configuration of the sphere-plane electrode system

2.2 실험방법

유회전 펌프로 실험 용기를 수 mTorr까지 배기시킨 다음, 고순도 SF₆ 혹은 dry-air를 주입하였으며, SF₆의 경우, 챔버 내의 가스압력을 0.1~0.2[MPa]범위에서, dry-air의 경우, 가스압력을 0.2~0.6[MPa]범위에서 단계적으로 증가시켜 가면서 실험하였다. 정·부극성의 임펄스전압은 실험용기의 부싱을 통해 구 전극에 인가하였다.

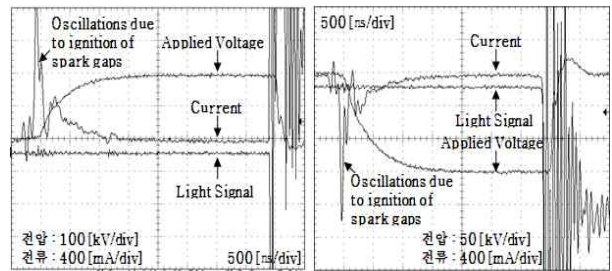
인가전압의 측정에는 분압기를 사용하였고, 전구방전전류는 50[Ω] 분류기로 측정하였으며, 분류기의 출력단에 20 : 1 감쇠기를 연결하여 전류를 검출하였다. 또한 전구방전에서 절연파괴에 이르기까지 발생하는 전구방전과정동안 발생하는 방전광은 광전자증배관을 이용하여 관측하였다. 측정된 인가전압, 전구방전전류, 광 신호를 오실로스코프(band width: 500[MHz], sampling rate: 2.5[GS/s])를 통해 동시에 관측하였다.

3. 결과 및 검토

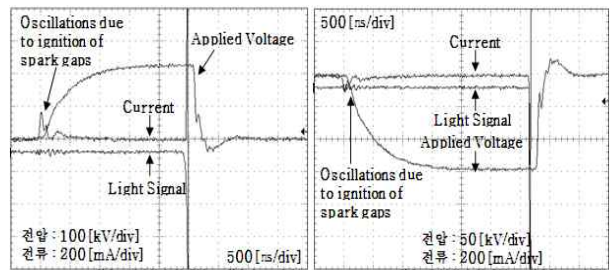
3.1 뇌임펄스전압에 대한 SF₆와 dry-air의 절연파괴전압의 비교

현재, 25.8[kV]급 가스절연개폐장치(gas insulated

switchgear: GIS)에서는 절연매질로 SF₆를 사용하고 있으며, 사용하고 있는 SF₆가스압력의 범위는 0.1~0.2[MPa]이다. 한국산업표준 KS C 4502에서는 배전용 GIS에 대한 뇌임펄스전압의 정격내전압을 150[kV] 이상으로 규정하고 있다[5].



정극성 부극성
(a) SF₆-0.15[MPa]



정극성 부극성
(b) dry air-0.4[MPa]

그림 3. 뇌임펄스전압, 전구방전전류와 방전광의 대표적인 파형

Fig. 3. Typical waveforms of the lightning impulse voltage, pre-breakdown current and luminous signals

본 연구에서는 SF₆의 압력 0.15[MPa]에서 절연파괴전압이 150[kV]이상이 되도록 전극계를 구성하여 SF₆와 dry-air에 대한 절연내력실험을 수행하였다. 정·부극성의 뇌임펄스전압을 SF₆와 dry-air에 각각 인가하여 측정된 절연파괴전압과 전구방전전류, 방전광 신호의 대표적 파형을 그림 3에 나타내었다. 가스압력이 0.15[MPa]인 SF₆에 정·부극성 뇌임펄스를 인가하였을 경우, 측정된 절연파괴전압과 전구방전전류, 방전광 신호의 대표적인 파형을 각각 그림 3 (a)에 나타내었다. 이때 정극성과 부극성 절연파괴전압은 각각

187.5[kV]와 153.9[kV]이었다. 가스압력이 0.4 [MPa] 인 dry-air에 정·부극성 뇌임펄스를 인가하였을 경우, 측정된 절연파괴전압과 전구방전전류, 방전광 신호의 대표적인 파형을 그림 3 (b)에 나타내었으며, 이때 정극성과 부극성 절연파괴전압은 각각 198.7[kV]와 150.1[kV]이었다.

결과적으로 14[mm]인 짧은 갭간격을 가지는 구-평판전극, 즉 갭간격이 짧은 준평등전극계에서는 절연파괴가 주로 스트리머에 의하여 일어나며, 정극성이 부극성보다 절연파괴전압이 높았다. 구-평판전극으로 이루어진 준평등전계 내에서 구전극으로부터 평판전극쪽으로 진행되는 정극성 스트리머는 다음과 같이 설명할 수 있다. 구전극에 전압이 인가되면 구전극 주위에 전리 영역이 형성된다. 이 전리 영역에서 가스의 부이온 또는 수분과 같은 불순물의 탈리작용에 의해서 공급되어지는 초기전자는 전리영역에 들어오게 되면 전자의 충돌전리에 의해서 1차 전자사태가 발생되고, 인가전압의 영향으로 전압이 인가된 전극 방향으로 방사상으로 진전하게 된다. 전자사태가 양극에 도달하면 이동속도가 늦은 정이온이 남게 되며, 이 전하밀도가 크면 공간전하전계는 새로운 전자사태를 발생, 흡수하여 음극을 향하여 성장한다.

한편 부극성의 경우에는 초기전자가 주로 구전극표면으로부터의 전계방출에 의해서 공급되어지며, 구전극에 전압이 인가되면 전극 주위의 전계의 세기가 전자의 충돌에 의한 가스분자의 임계전리전압 이상이 되면 1차 전자사태가 전극과 반대방향으로 성장한다. 인가전압이 증가함에 따라 1차 전자사태가 성장되어 감에 따라 선단에는 많은 전자들이 모이게 되고 더 많은 광전자들이 방출되어지며, 1차 전자사태의 끝단에서 2차 전자사태가 발생한다. 이러한 일련의 과정이 되풀이 되면서 부극성 스트리머가 평판전극을 향해 진전하게 된다[6-7]. 그림 3의 전압과 전구방전전류의 파형에서도 알 수 있듯이 준평등전계에서는 아주 짧은 시간에 절연파괴가 일어나기 때문에 공간전하 효과보다 초기전자의 공급메커니즘의 영향이 지배적이다. 따라서 초기전자발생전압이 높은 정극성이 부극성보다 절연파괴전압이 높다. 또한 $pd > 0.1$ [MPa·cm]인 범위에서 섬락이 Townsend형 방전이 아니라 스트

리머에 의하여 일어나며, pd 와 파괴전압률이 클수록 스트리머가 발생하기 쉽다[6].

준평등전계에서 SF₆와 dry-air의 절연파괴전압은 가스의 종류, 온도, 인가전압의 파형 및 극성, 전계이용률, 가스압력 등 여러 가지 요인의 영향을 받는다[8]. 가스압력은 방전공간 내에서의 전자나 이온의 이동특성에 지배적인 영향을 미치므로 V-p특성은 특히 파미부분에서 일어나는 최저 절연파괴전압을 취하게 되므로 전구방전의 형성과정의 해석에서 중요한 요소이다[9].

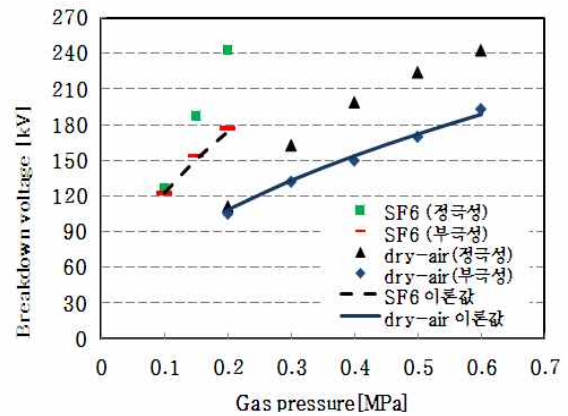


그림 4. 뇌임펄스전압에 대한 SF₆와 dry-air의 압력에 따른 절연파괴 특성

Fig. 4. Dielectric characteristics as a function of gas pressure in SF₆ and dry-air under lightning impulse voltages

정·부극성의 뇌임펄스전압에 대한 SF₆와 dry-air의 압력에 따른 절연파괴전압 특성을 그림 4에 나타내었다. 가스압력이 증가함에 따라 절연파괴전압이 증가하였으며, 압력이 낮은 경우, 극성에 대한 절연파괴전압의 차이는 거의 없지만 압력이 증가함에 따라 극성에 대한 절연파괴전압의 차이가 점차 크게 나타났다. SF₆는 압력이 0.15[MPa] 이상에서, dry-air는 압력이 0.4[MPa] 이상에서 배전용 전력기기의 BIL에 해당하는 절연파괴전압이 150[kV] 이상이다.

여러 연구자에 의한 실험결과를 종합하여 볼 때 부극성의 뇌 임펄스 절연파괴전압은 가스 압력의 평방근에 비례하여 절연파괴전압 V는 가스압력 p의 함수로서 표현된다[6,10].

$$V = K\sqrt{p} \quad (2)$$

여기에서 K는 전극형상, 절연가스의 종류에 의하여 정해지는 정수이다.

이 계산은 그림 4에서와 같이 준평등 전계에서의 부극성의 뇌임펄스전압을 인가할 경우, 실측치와 비교적 잘 일치한다. 그림 4에서의 SF₆와 dry-air에서의 정수 K 값은 각각 123과 77을 취하였다.

3.2 뇌임펄스전압에 대한 dry-air의 절연 파괴전계

통상 절연물이 전기적으로 파괴될 때의 전계값을 파괴전계강도 또는 절연내력이라 한다. 대기압 공기의 절연내력은 전극배치에 의하여 크게 변화되며, 기체의 절연내력은 온도가 일정하면 기압과 더불어 증대한다. 준평등전계에서 갭 중의 최대전계가 방전개시전계 E_d 에 도달되면 방전이 개시된다. 대기압 중에서 공기의 방전개시전계 E_d 는 식 (3)과 같은 실험식으로 나타낼 수 있다[6].

$$E_d = 24\delta(1 + 0.328/\sqrt{\delta d}) \text{ [kV/cm]} \quad (3)$$

여기서 δ 는 상대공기밀도(20[°C], 0.1[MPa]의 공기를 1로 하는 공기밀도)이다. 압력 p 를 [Pa], 온도 t 를 [°C]로 표시하면 다음 식으로 된다.

$$\delta = 0.00289p/(273 + t) \quad (4)$$

식 (3)에서 $\delta=1$, $d=1$ 인 경우, $E_d \approx 32$ [kV/cm]로 되므로 30[kV/cm]의 값은 평등전계중에서 공기의 방전개시전계로 이용되고 있다. 그러나 이와 같은 이상적인 조건에서의 절연내력을 실용의 전극배치에 적용하는 것은 어려우며, 인가전압의 극성, 파형, 전극의 형상에 따라 방전개시전계 E_d 는 상당히 다르다.

준평등전계에서 임펄스전압에 대한 dry-air의 절연내력을 분석하기 위하여 그림 4에서와 같이 압력에 따라 측정된 절연파괴전압을 식 (5)를 이용하여 임펄스에 대한 절연파괴전계를 산출하여 그림 5에

도시하였다[6].

$$E_d = \frac{V_d}{d \cdot \eta} \text{ [kV/cm]} \quad (5)$$

여기서 d 는 갭길이 ; η 는 전계이용률, V_d 는 절연파괴전압이다.

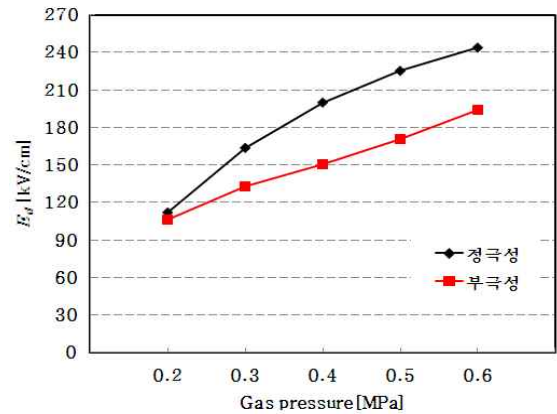


그림 5. 뇌임펄스전압에 대한 dry-air의 압력에 따른 절연내력 특성

Fig. 5. Breakdown strength characteristics as a function of gas pressure in dry-air under lightning impulse voltages

그림 5에서 절연파괴전계는 압력의 평방근에 비례함을 알 수 있다. 대기압 중에서의 공기의 방전개시전계 30[kV/cm]와 비교하기 위하여 0.2~0.6[MPa]에서의 단위 가스압력에 대한 절연파괴전계 E/p 를 표 1에 나타내었다.

표 1. 가스압력별 E/p

Table 1. E/p according to gas pressure

| 압력[MPa] | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| E/p [kV/cm·MPa] | 530 | 443 | 376 | 341 | 323 |

표 1에서 가스압력이 증가함에 따라 dry-air의 단위 가스압력에 대한 절연파괴전계는 감소하는데 이는 공간전하 효과에 의한 것으로 판단되며, 또한 상승시간이 상대적으로 느린 교류나 직류 전압의 경우, 방사성

물질에 의한 방사선에 의해 절연파괴를 일으키기에 충분한 전자의 수가 존재하게 된다. 그러나 인가전압이 짧은 임펄스 전압에서는 인위적으로 조사하지 않는 이상, 임펄스 전압의 피크가 직류 절연파괴 전압에 도달되어도 절연파괴는 일어나지 않으며, 절연파괴를 일으키려면 피크 전압을 직류나 교류에서의 절연파괴 전압보다 더 높여야 한다. 따라서 임펄스전압에서의 절연파괴전계는 직류나 교류에서의 절연파괴전계보다 높다[11].

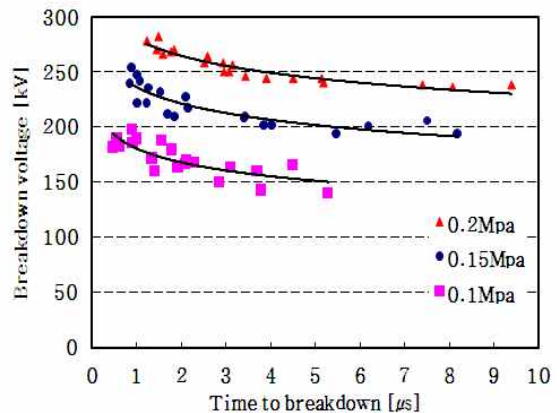
3.3 뇌임펄스전압에 대한 SF₆와 dry-air의 V-t 특성

전력기기의 뇌임펄스 시험에서는 절연파괴전압-시간(Breakdown voltage-time: V-t) 특성을 파악하는 것이 전력기기의 절연설계나 절연협조에서 기초가 되는 중요한 자료이다[12]. 뇌임펄스전압이 인가된 경우, 절연파괴가 반드시 인가전압의 피크 값 또는 피크 값의 부근에서만 일어나는 것이 아니다. 따라서 본 연구에서는 한국공업규격 및 국제전기위원회 규격(IEC-60.2)에 의거하여 절연파괴 되기까지 인가된 전압의 피크값과 절연파괴까지의 시간을 취하는 방법으로 SF₆와 dry-air의 V-t특성을 평가하였다[13].

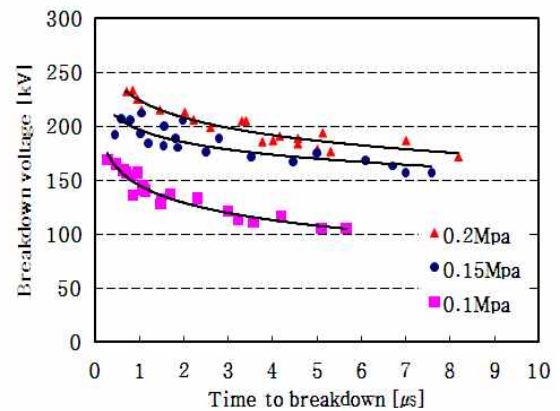
준평등전계에서 임펄스전압에 대한 SF₆의 V-t특성을 그림 6에 나타내었다. 그림 6 (a)에 정극성 임펄스 전압에 대한 SF₆의 V-t특성을 나타냈으며, 그림 6 (b)에 정극성 임펄스전압에 대한 SF₆의 V-t특성을 나타내었다. 정극성의 경우가 부극성의 경우보다 압력의존성이 크게 나타났으며, 동일한 조건에서 정극성이 부극성보다 절연파괴까지의 시간지연도 더 길게 나타났다. 이러한 차이는 주로 초기전자의 발생메커니즘과 전구방전의 진전양상의 차이 때문인 것으로 분석된다.

준평등전계에서 임펄스전압에 대한 dry-air의 V-t 특성을 그림 7에 나타내었다. 그림 7 (a)에서와 같이 정극성 임펄스전압을 구-평판전극에 인가할 경우, 절연파괴가 일어나기까지의 시간이 길어짐에 따라 절연파괴전압이 점차 감소하며, 0.3[MPa] 압력 이상에서

가스압 0.1[MPa]인 SF₆의 V-t특성의 절연레벨에 도달하는 것으로 나타났다. 절연파괴전압시간이 길어짐에 따라 dry-air에서의 V-t곡선은 SF₆에서의 V-t곡선보다 상대적으로 완만하게 낮아지는 동시에 절연파괴 시간도 dry-air가 SF₆보다 짧게 나타났다. 또한 0.2~0.3[MPa]의 압력에서 절연파괴전압이 나타나는 시간이 점차 길어졌으며, 가스압력이 0.4[MPa] 이상에서는 임계절연파괴전압이 일어나는 시간이 짧아졌다. 그림 7 (b)에서와 같이 부극성 임펄스전압을 구-평판전극에 인가할 경우, 절연파괴시간이 길어짐에 따라 절연파괴전압이 점차 감소하며, dry-air에서의 V-t곡선은 SF₆에서의 V-t곡선보다 상대적으로 완만하게

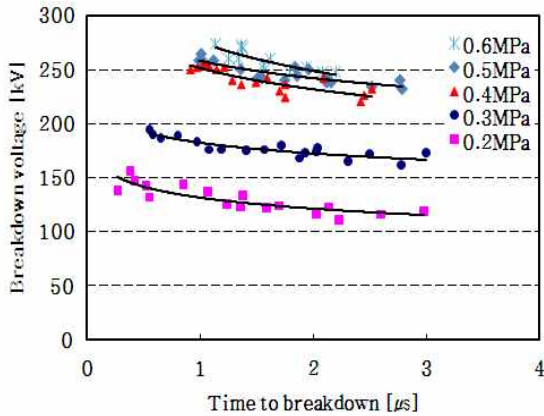


(a) 정극성

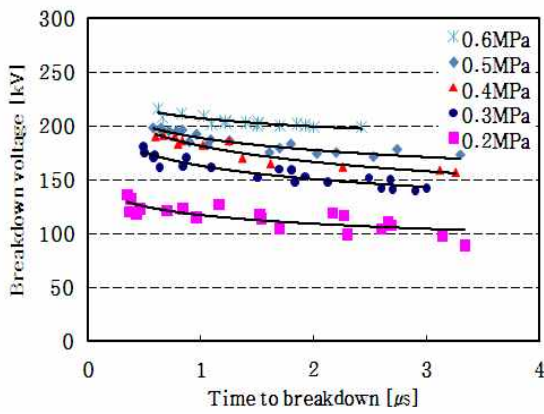


(b) 부극성

그림 6. 뇌임펄스전압에 대한 SF₆의 V-t 특성
Fig. 6. V-t characteristics in SF₆ under lightning impulse voltages



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 7. 뇌임펄스전압에 대한 dry-air의 V-t 특성
Fig. 7. V-t characteristics in dry-air under lightning impulse voltages

낮아졌다. 이러한 특성은 동일한 조건에서 SF₆가 dry-air보다 전자부착성이 높기 때문에 SF₆의 절연 파괴지연시간이 dry-air의 절연파괴지연시간보다 길게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

배전 기기의 절연에 사용될 dry-air의 뇌임펄스절연 파괴에 대한 기초 특성을 얻을 목적으로 준평등전계에서 뇌임펄스전압에 대한 SF₆와 dry-air의 절연파괴 전압 특성을 비교·분석한 실험결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 준평등전계에서 dry-air의 절연파괴는 주로 스트리머방전에 의하여 일어났으며, 초기 전자방출이 쉽게 발생하는 부극성이 정극성보다 절연 파괴전압이 낮게 나타났다.
- (2) 준평등전계에서 가스압력이 증가함에 따라 dry-air의 절연파괴전압은 증가하였으며, 정극성과 부극성의 절연파괴전압차이도 점차 커졌다.
- (3) 뇌임펄스전압을 SF₆와 dry-air에 각각 인가하였을 때 SF₆는 압력이 0.15[MPa] 이상부터 부극성에서 절연파괴전압이 150[kV] 이상이었으며, dry-air는 압력이 0.4[MPa] 이상부터 부극성에서 절연파괴전압이 150[kV] 이상 임을 확인하였다.
- (4) SF₆와 dry-air의 절연파괴전압은 가스압력의 평균에 비례하였다.
- (5) 인가전압의 지속시간이 길수록 절연파괴전압이 낮아지는 V-t 특성을 나타내었다. dry-air에서의 V-t 곡선은 SF₆에서의 V-t 곡선보다 상대적으로 완만하게 낮아졌으며 절연파괴까지의 시간도 dry-air가 SF₆보다 짧았다.
- (6) dry-air의 압력을 0.4[MPa] 이상으로 할 경우, 현재, 배전용 가스개폐장치에 사용되고 있는 SF₆가스의 절연내력에 도달할 수 있다. 따라서 배전용 전력기기에서 친환경적인 면과 비용절감을 고려하여 SF₆의 대체가스로 dry-air를 사용할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였으며, 본 연구에서 얻은 데이터는 친환경적인 배전용 전력기기의 개발 및 설계에 유용한 정보가 될 것이다.

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 (과제번호 : 2009T100100515) 수행된 과제임.

References

[1] H. Saitoh, K. Morita, T. Kikkawa, N. Hayakawa and H. Okubo, "Impulse partial Discharge and Breakdown Characteristics of Rod-Plane Gaps in N₂-SF₆ Gas Mixtures", IEEE Trans. on DEI, Vol.9, No.4, pp.544~550, 2002. 8.

- [2] Y. Hoshina, M. Sato, M. Shiike, M. Hanai and E. Kaneko, "Lightning impulse breakdown characteristics of SF₆ alternative gases for gas-insulated switchgear", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 153, No.1, pp.1~6, 2006.
- [3] Shuhei Kaneko, Member, Shigemitsu Okabe, Senior Member, "N₂가스의非標準雷インパルス波形に對する絶縁特性と評價法", IEEJ Trans. PE, Vol.127, pp.854~861, No.7, 2007.
- [4] Hitoshil Saitoh, Keiichi Morita, Takashi Kikkawa, Naoki Hayakawa and Hitoshi Okubo, "Impulse Partial Discharge and Breakdown Characteristics of Rod-Plane Gaps in Air and N₂ Gases", Electrical Engineering in Japan, Vol. 148, No. 3, pp.36~43, 2003.
- [5] 한국산업규격 KS C 4502:1999, 단로기, p.6, 2006. 2.
- [6] 李福熙: 高電壓大電流工學, 淸文閣, pp.8~61, 1993.
- [7] 李京沃, "불평등전계에서 SF₆-N₂ 혼합가스의 방전특성", 인하대학교 박사논문, pp.13~16, 2001.
- [8] Olivier. G, Gervais. Y, "A New Approach to Compute Uniform Field Breakdown of Gases", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 97, No. 3, pp.969~976, 1978.
- [9] 이복희, 이경옥, 이창준, "가스절연개폐장치에 있어서 금속입자 존재시 임펄스전압에 대한 SF₆ 가스의 절연특성", 조명전기설비학회 논문지, Vol. 14, No. 1, pp.22~29, 2000.
- [10] F. Pinnekamp and L. Niemeyer, "Quantitative Model of Breakdown in SF₆ in Inhomogeneous Gaps", J. Phys. D : Appl. Phys., 16, pp.1293~1312, 1983.
- [11] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel "High Voltage Engineering: Fundamentals", Oxford; Boston : Butterworth-Heinemann, pp.359~361, 2000.
- [12] T. Nitta, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, "Voltage-Time Characteristic of Electrical Breakdown in SF₆", Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions, Vol. 94, Part. 1, pp.108~115, 1975.
- [13] High-voltage test techniques - Part 2: Test procedure, International Standard IEC60060-2, p.5, 1994.

◇ 저자소개 ◇



이 봉(李 峰)

1978년 9월 5일생. 2006년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : lifeng197895@hanmail.net



유양우(柳 良佑)

1958년 2월 2일생. 2009년 2월 인하대공 학대학원정보전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 기초전력 연구원실장.

Tel : (02)885-9443

E-mail : yyw57@snu.ac.kr



김동규(金 東奎)

1983년 3월 14일생. 2009년 2월 호서대 공대 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : electric02@naver.com



이복희(李 福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기 공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경 대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr