

준평등전계에서 임펄스전압에 대한 N₂가스의 절연파괴특성

(Dielectric Characteristics of N₂ Gas under Impulse Voltage in a Quasi-Uniform Electric Field)

이복희* · 김동규 · 이 봉

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

요 약

본 논문은 준평등전계중에서 임펄스전압에 대한 N₂가스의 절연파괴특성에 관한 것으로 실험은 1.2/50 [μ s] 표준뇌임펄스전압, 180/2500 [μ s] 개폐임펄스전압과 500[ns]/1[MHz] 급준성 과도과전압이 인가된 전극계에서 이루어졌다. 구-평판 전극의 간격은 14[mm]이고, 전계이용률은 71.2[%]이었으며 가스압력은 0.2~0.6[MPa]범위로 하였다. 그 결과 절연파괴는 스트리머방전에 의하여 일어났으며, 절연파괴전압은 상승시간이 빠른 급준성 과도과전압에서 가장 높게 나타났다. 정극성 절연파괴전압이 부극성보다 높았으며, 정극성의 경우 절연파괴까지의 시간도 더 긴 것으로 나타났다.

Abstract

This paper presents dielectric characteristics of N₂ gas under impulse voltages in a quasi-uniform electric field gap. The experiments were carried out at the test gap applied by the 1.2/50 [μ s] lightning impulse voltage, 180/2500 [μ s] switching impulse voltage, 500[ns]/1[MHz] very fast transient overvoltage(VFTO). The gap separation of sphere-to-plane electrodes was 14[mm] and the electric field utilization factor was about 71.2[%]. The gas pressure ranges from 0.2 to 0.6[MPa]. As a result, the electrical breakdowns are occurred by streamer discharge. Breakdown voltages are linearly increased with the gas pressure and the highest breakdown voltage is appeared under the VFTOs having fast rising time. Breakdown voltages under the positive impulse voltages were higher than those under the negative ones, and also the time to breakdown in the positive polarity is longer than that in the negative polarity.

Key Words : Impulse Voltage, VFTO, Breakdown Voltage, Quasi-Uniform Field, V-t Curve, V-p Curve

* 주저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2010년 5월 17일
1차심사 : 2010년 5월 20일
심사완료 : 2010년 6월 8일

1. 서 론

최근 환경의 보전에 대한 관심이 높아지면서 온실가스에 대한 규제로서 교토의정서가 정식 발효됨에 따라 대다수의 가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear: GIS)의 절연물로 쓰이고 있는 6불화유황(sulfur hexafluoride: SF₆)가스는 사용하지 못할 처지가 되었다. SF₆가스의 지구온난화 계수(Global Warming Potential: GWP)가 이산화탄소의 23,900배로 매우 높아 대기 중으로 방출될 경우에는 온실효과를 야기시키기 때문에 대체가스의 적용이 시급하다 [1]. 또한 전기적 방전에서 SF₆가스의 분해물질(S₂F₁₀ 가스, S₂O₂F₁₀ 가스 등)은 SF₆가스보다 반응성 및 독성이 상당히 높고 위험하다고 알려져 있다[2]. 이러한 SF₆가스는 비점(-64[°C])이 비교적 높고, GIS 내에서 전극표면의 결함이나 자유롭게 움직일 수 있는 금속성 입자가 존재 할 경우 강한 국부전계에 의한 절연내력의 저하가 현저하다.

본 연구에서는 배전용 전력기기에서 SF₆가스의 대체가스로 질소(Nitrogen: N₂)가스의 사용가능성을 분석코자 순수 N₂(순도99.9[%])가스의 1.2/50[μs] 표준 뇌임펄스전압, 180/2,500[μs] 개폐임펄스전압, 500[ns]/1[MHz] 급준성 과도과전압에 대한 절연과피특성을 파악하기 위하여 구-평판 전극계에서 절연과피전압과 전구방전전류, 방전광 파형의 측정을 토대로 절연과피전압-압력특성(V-p특성), 절연과피전압-시간특성(V-t특성)을 분석하여 N₂가스의 절연과피특성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 실험계 구성

준평등전계에서 N₂가스의 표준 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압, 급준성 과도과전압에 대한 절연과피특성을 비교·분석하기 위하여 그림 1과 같이 실험계를 구성하였다. 본 연구에 사용된 실험 용기는 내경 396[mm]인 스테인레스강을 사용하여 원통형으로 제작하였으며, 실험장치의 상단에 66[kV](BIL 350[kV])

용 콘덴서형 부상이 설치되어 있고, 시험전압은 병렬 충전식 4단 임펄스발생기를 이용하여 인가하였다.

절연과피전압은 분압비가 10,000 : 1인 분압기로, 전구방전전류의 측정을 위해 50[A/V]의 비를 갖는 분류기를 전극 하부에 설치하였고, 전구방전과정에서 발생하는 방전광 신호는 광전자증배관(Photo-Multiplier Tube: PMT)을 이용하여 측정하였으며, 측정된 전압파형, 전류파형, 방전광신호는 4채널의 500[MHz]대역을 갖는 오실로스코프로 동시에 관측하였다.

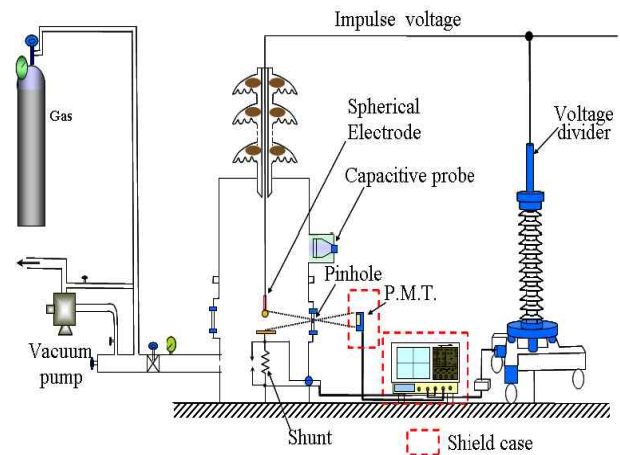


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. A schematic diagram of the experimental setup

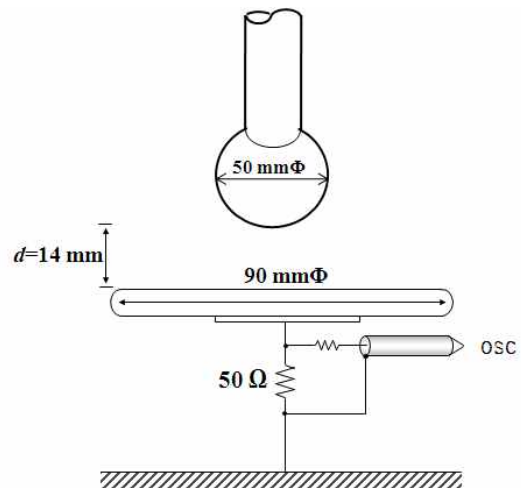


그림 2. 구-평판 전극계 구성도
Fig. 2. A configuration of the sphere to plane electrode system

본 연구에 사용된 전극의 재질은 스테인리스 스틸이며, 준평등전계를 모의하기 위하여 그림 2와 같이 실험용기 내에 구-평판전극을 설치하였다. 구 전극의 지름은 50[mm], 평판 전극의 지름은 90[mm], 전극간 거리는 14[mm]로 설치하였다. 이때 구-평판전극계의 전계이용률은 71.2[%]이다.

2.2 실험방법

유회전 진공펌프를 사용하여 실험용기를 수 [mTorr]까지 배기시킨 다음 N₂가스를 주입하였다. 실험 용기 내의 N₂가스의 압력은 0.2~0.6[MPa] 범위에서 단계적으로 증가시키면서 실험하였다. 인가전압은 그림 3과 같은 등가회로에 의해서 표준 뇌임펄스전압은 스위치 SW를 개방시키고, 구갯 G₂를 단락시킨 상태에서 뇌임펄스전압을 발생시키며, 개폐임펄스전압은 R_d와 R_e의 저항값을 바꿔 발생시키고, 급준성 과도과전압은 스위치 SW를 투입시킨 상태에서 임펄스전압발생장치가 동작하여 방전구갯 G₂가 선택되어 발생된다.

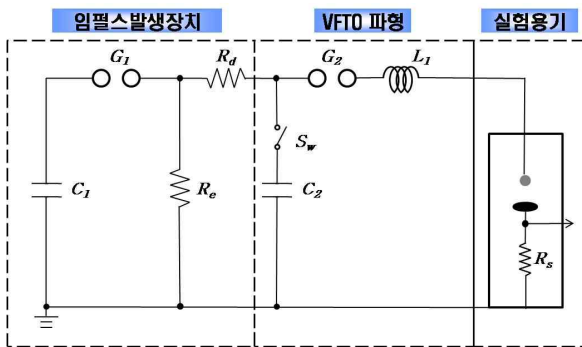


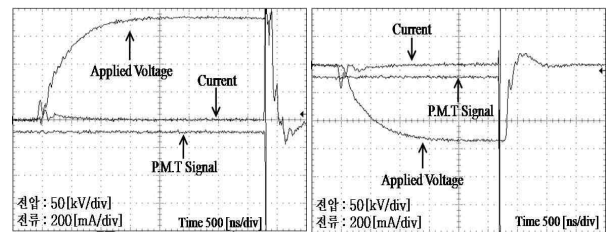
그림 3. 임펄스전압 발생장치의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of the impulse voltage generator

3가지 임펄스전압을 동일한 조건에서 압력에 따른 N₂가스의 50[%] 절연파괴전압(V₅₀)과 절연파괴전압-시간특성을 측정하고 분석하였다. V_{50%}은 보간법으로 동일한 전압을 10회 측정하여 50[%]의 확률로 절연파괴가 일어난 전압으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

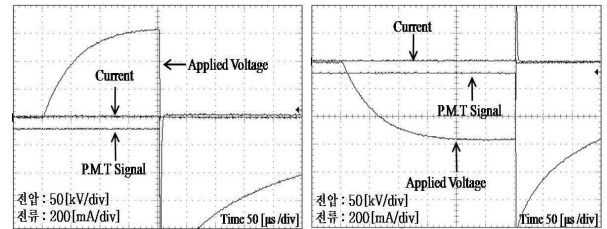
3.1 절연파괴특성

가스압력이 0.5[MPa]인 N₂가스에 정·부극성의 표준 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압, 급준성 과도과전압을 인가하였을 경우, 인가전압과 전구방전전류, 방전광 신호의 대표적인 파형을 그림 4에 나타내었다.



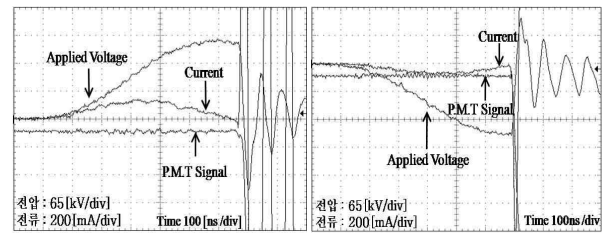
정극성 부극성

(a) 표준 뇌임펄스전압



정극성 부극성

(b) 개폐임펄스전압



정극성 부극성

(c) 급준성 과도과전압

그림 4. 0.5[MPa]인 N₂가스에서 임펄스전압, 전구방전전류, 방전광의 파형
Fig. 4. Waveforms of the applied impulse voltage, pre-breakdown current and luminous signal in N₂ at 0.5[MPa]

그림 4 (a)는 정극성과 부극성 뇌임펄스전압을 인가할 경우 절연파괴전압은 각각 185[kV]와 150.2[kV]이고, 그림 4 (b)는 정극성과 부극성 개폐임펄스전압을 인가할 경우 절연파괴전압은 각각 155.6[kV]와 142.8[kV]이며, 그림 4 (c)는 정극성과 부극성 급준성 과도과전압을 인가할 경우 절연파괴전압은 각각 207.9[kV]와 165.9[kV]이다. 한국 산업표준 KS C 4502에서 22.9[kV]급 배전용 단로기의 기본 뇌임펄스절연레벨은 뇌임펄스에 대한 내전압을 150[kV]이상으로 규정하고 있으며[3], 본 연구에서는 N₂가스의 압력이 0.5[MPa]이상일 때 부극성에서 절연파괴전압이 150[kV] 이상이었다.

또한 전구방전진류파형에서와 같이 초기코로나의 발생이 검출되지 않았으며, 초기코로나가 발생하는 동시에 절연파괴가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 여기에서 전구방전의 방전메커니즘을 살펴보면 정극성의 경우 전극에 전압이 인가되면, 전극주위에 전리 영역이 형성된다. 이 전리영역은 전계의 세기가 매우 강하며, 기체의 부이온 또는 수분과 같은 불순물의 탈리 작용에 의해서 공급되어지는 초기전자가 전리영역에 들어오게 되면, 전자의 충돌전리에 의해서 1차 전자사태가 발생되고, 인가전압의 영향으로 전압이 인가된 전극으로 방사상으로 진전하게 된다. 또한 1차 전자사태가 이동하는 동안에 원자들은 계속해서 전리작용을 일으키게 된다. 여기상태에 있던 원자들은 안정화상태가 되면서 광전자를 방출하게 된다. 이러한 광전자들에 의해서 2차 전리작용이 발생되어 2차 전자사태가 성장하게 되고, 2차 전자사태는 1차 전자사태의 끝단을 향해서 이동하여 부착하는 과정을 되풀이하며 방전이 진전되어 간다[4]. 부극성의 경우는 전극에 전압이 인가되면 전극 주위의 전계가 전자의 충돌에 의한 가스분자의 임계전이전압 이상이 되면 1차 전자사태가 전극과 반대방향으로 성장되어 간다. 1차 전자사태가 성장되어감에 따라 선단에는 더 많은 전자들이 모이게 되고 더 많은 광전자들이 방출되어 간다. 1차 전자사태가 전리영역의 경계점($\alpha=\eta$)까지 성장하게 되면, 전자들은 가스분자에 부착되어 부이온을 형성하여 진전한다[5-6]. 따라서 준평등전계에서는 주로 스트리머 방전에 의하여 절연파괴가 일어난다.

3.2 V-p 특성

V-p특성은 일반적으로 최소절연파괴전압을 취하게 되므로 파미시간의 영향이 크게 작용한다. 또한 가스 압력은 방전공간 안에서의 전자나 이온의 이동특성에 큰 영향을 미치므로 V-p특성의 절연파괴특성 해석에서 중요한 요소이다. 구-평판전극에서 N₂가스에서 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압, 급준성 과도과전압을 인가한 때 절연파괴전압의 압력에 대한 의존성을 그림 5에 나타내었다. 절연파괴전압은 3종류 인가전압 모두 압력이 상승함에 따라 정·부극성 모두 상승하였으며, 급준성 과도과전압, 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압 순으로 높았고, 정극성이 부극성보다 높았다.

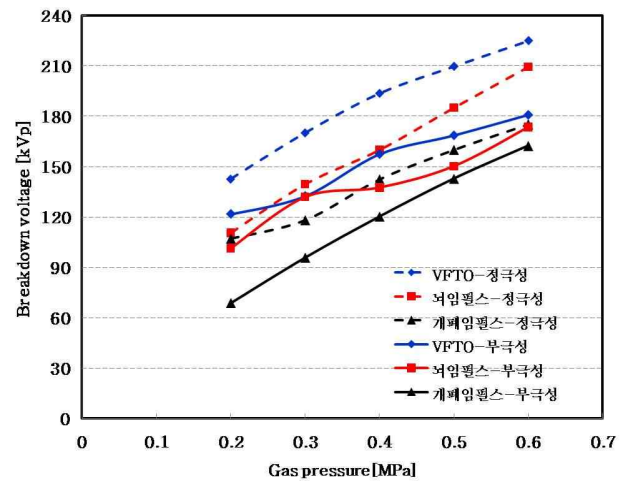


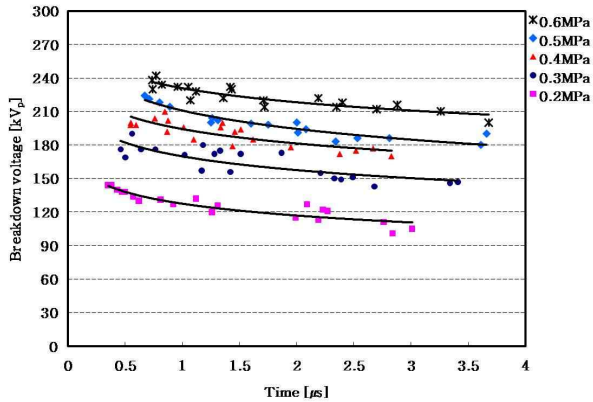
그림 5. N₂가스에서 V-p특성
Fig. 5. V-p characteristics in N₂ gas

준평등전계의 구-평판전극계에서는 그림 4와 같이 초기코로나의 발생과 동시에 절연파괴가 일어난다. 따라서 초기전자 발생이 쉬운 부극성이 정극성보다 절연파괴전압이 낮아지게 된다.

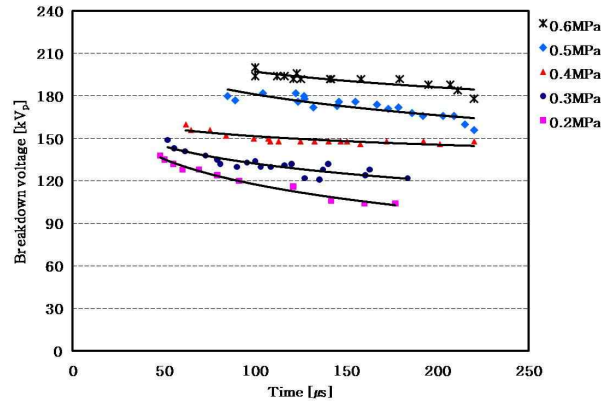
3.3 V-t 특성

전력기기에서 절연물이 뇌서지와 같은 이상전압에 의하여 절연파괴가 일어날 때, 전압이 인가되는 시점부터 절연파괴가 일어나기까지는 어느 정도의 시간이

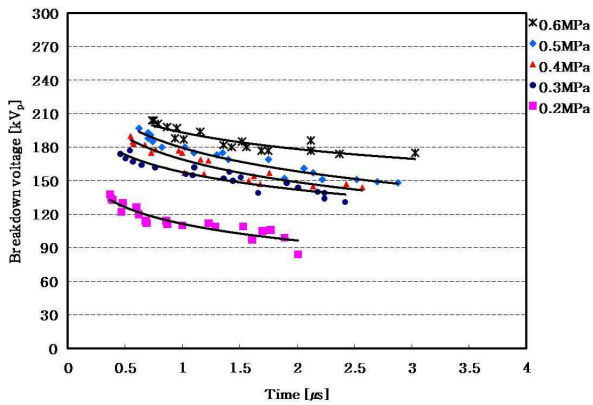
준평등전계에서 임펄스전압에 대한 N₂가스의 절연과괴특성



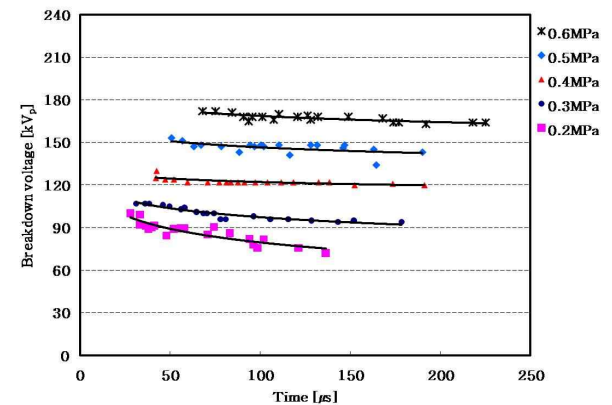
(a) 정극성



(a) 정극성



(b) 부극성



(b) 부극성

그림 6. N₂가스에서 뇌임펄스전압에 대한 V-t특성
Fig. 6. V-t characteristics in N₂ gas under lightning impulse voltages

그림 7. N₂가스에서 개폐임펄스전압에 대한 V-t특성
Fig. 7. V-t characteristics in N₂ gas under switching impulse voltages

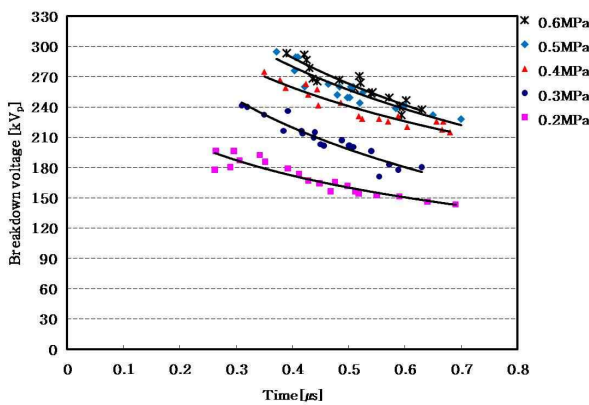
필요하다. 특히 뇌임펄스전압, 급준성 과도과전압과 같이 매우 짧은 파두시간을 갖는 이상전압이 GIS 혹은 전력기기에 침입할 경우, V-t 특성을 파악하는 것은 전력기기의 절연협조에 아주 중요하다[7].

N₂가스에서 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압, 급준성 과도과전압을 인가하였을 때 가스압력에 따른 정·부극성에 대한 V-t특성곡선을 그림 6~8에 나타내었다. 그림 6은 구-평판전극계에서 N₂가스에 뇌임펄스전압 정·부극성 인가시 가스압력을 파라미터로 나타낸 V-t특성이다. 가스압력이 증가함에 따라 절연과괴전압이 상승하였으며, 또한 전압을 인가한 후 절연과괴

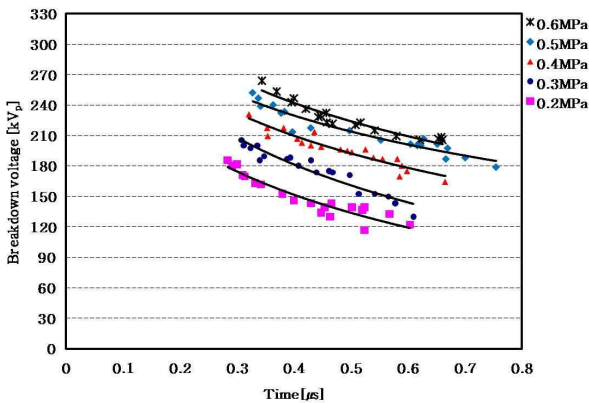
가 일어나기까지의 시간도 점점 길어졌다. 이와 같은 특성의 차이는 정·부극성 초기전자의 공급메커니즘의 양상이 서로 다르기 때문에 최종적인 절연과괴전압과 절연과괴까지의 시간도 차이가 나는 것으로 판단된다.

N₂가스중에 설치된 구-평판전극계에 개폐임펄스전압을 인가하였을 경우 가스압력을 파라미터로 하여 측정된 V-t특성을 그림 7에 나타내었다. 뇌임펄스전압에 대한 특성과 비교할 경우, 개폐임펄스전압에 대한 절연과괴전압이 낮은 반면에 절연과괴까지의 시간이 상당히 길었다. 하지만 뇌임펄스전압의 경우와 마

찬가지로 압력이 상승함에 따라 절연파괴전압도 상승하였으며, 정극성이 부극성에 비하여 절연파괴가 일어나는 시간도 더 길게 나타났다. N₂가스중에 설치된 구-평판전극계에 급준성 과도과전압을 인가하였을 경우, 가스압력을 파라미터로 하여 측정한 V-t특성을 그림 8에 나타내었다. 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압과 비교할 경우, 절연파괴전압이 가장 높았으며, 절연파괴까지의 시간도 가장 짧았다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 8. N₂가스에서 급준성 과도과전압에 대한 V-t특성
Fig. 8. V-t characteristics in N₂ gas under VFTOs

그림 6~8에서 설명한 바와 같이 절연파괴전압은 급준성 과도과전압, 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압 순으로 나타났다. 이것은 Kind 범칙에서 알 수 있듯이 절연파괴를 일으키기에는 소정의 에너지가 필요하므로

상승시간이 빠른 임펄스전압일수록 더 높은 절연파괴전압을 갖기 때문이다[8].

4. 결 론

본 논문은 N₂가스에서 구-평판전극계의 인가전압과 가스압력에 의한 임펄스전압 절연특성에 관한 것으로, 1.2/50[μs] 뇌임펄스전압, 180/2500[μs] 개폐임펄스전압, 500[ns]/1[MHz] 급준성 과도과전압을 인가하여 측정한 절연파괴전압과 전구방전전류, 방전광 파형을 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절연파괴전압은 급준성 과도과전압, 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압 순으로 높았으며, 3가지 인가전압 모두 초기코로나가 발생하는 동시에 절연파괴가 일어났다.
- (2) 가스압력이 증가함에 따라 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압, 급준성 과도과전압의 정·부극성 모두 절연파괴전압이 상승하였으며, 정극성이 부극성 보다는 더 높았다. 또한 절연파괴가 일어나기까지의 시간은 정극성이 부극성 보다는 더 길었다.
- (3) N₂가스에서는 가스 압력이 0.5[MPa]이상일 때 부극성 뇌임펄스전압에서 150[kV]이상의 절연파괴전압을 나타내었으며, 절연파괴전압은 전계이용률과 직접적으로 관련되므로 실용화를 위해서는 전계이용률에 따른 절연파괴전계의 세기에 대한 자료가 필요하며, 이에 대해서는 후속연구를 수행할 예정이다.

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 Air and N₂ Cases", JIEE, Vol. 148, No. 3, pp. 36~43, 2004.
[2] L. G. Christophorou and R. J. Van Brant, "SF₆/N₂ mixtures basic and HV insulation properties", IEEE Trans on

Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.952~1003, 1995.

[3] 한국산업규격 KS C 4502:1999, 단로기, p.6, 2006.2.

[4] 李京沃, “불평등전계에서 SF₆-N₂ 혼합가스의 방전특성”, 인하대학교 박사논문, pp.13~15, 2001.

[5] M. Abdel-Salam, A. A. Turky and A. A. Hashem, “The Onset Voltage of Coronas on Bare and Coated Conductors”, J. Phys. D: Appl. Phys, Vol.31, No.4, pp.2550~2556, 1998.

[6] N. Hayakawa, K. Hatta, S. Okabe, H. Okubo, “Streamer and Leader Discharge Propagation Characteristics Leading to Breakdown in Electronegative Gases”, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, No. 4, pp. 842~849, 2006.

[7] T. Niita, Y. Shibuya, Y. Fujiwara, “Voltage-Time Characteristic of Electrical Breakdown in SF₆”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.94, No.1, pp.108~115, 1975.

[8] 이복희 역, 고전압대전류공학, 청문각, pp.16~17, 1998.

◇ 저자소개 ◇



이복희(李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 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



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



이 봉(李 峰)

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

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : lifeng197895@hanmaill.net