

# 불평등전극계에서 뇌임펄스전압에 대한 N<sub>2</sub>기체의 절연파괴 특성

( The breakdown characteristics of N<sub>2</sub> gas with lightning impulse voltage in the non-uniform electrode)

이복희 · 이봉\* · 조정현

(Bok-Hee Lee · Feng Li\* · Jeong-Hyeon Joe)

인하대학교 IT공대 전기공학부

## Abstract

This paper presents the experimental results on breakdown characteristics in N<sub>2</sub> gas under non-uniform electric fields caused by both the positive and negative lightning impulse voltages. N<sub>2</sub> gas have an advantage of eco-friendly and cost reduction, and safety aspects. In order to analyze the impulse pre-breakdown processes in N<sub>2</sub> gas, we carried out measurements and observations of the impulse breakdown voltages, pre-breakdown current and luminous signals. They were measured by a voltage divider, a shunt and a photo-multiplier tube, respectively. Additionally, the characteristics of discharge channels were observed by high speed cameras. The breakdown voltages in the positive polarity was lower than those in the negative polarity.

## 1. 서 론

가스절연개폐장치(GIS)의 절연사양을 결정하는 주요 요인 중에는 뇌서지 시간영역의 과전압이 있다. 현재 GIS의 주요 절연매체로 사용되는 SF<sub>6</sub>기체의 지구온난화계수(GWP)는 CO<sub>2</sub>기체의 약 23,900배이며, 1997년의 교토의정서에서 규제대상으로 된 기체이다.[1-3] 따라서 배전 기기에서 친환경적 기체가 SF<sub>6</sub>기체의 대체기체로 주목을 받고 있으나 친환경적 기체의 전류차단능력과 절연성능이 SF<sub>6</sub>기체보다 일반적으로 많이 낮다. 이런 약점을 극복하기 위하여 전류차단능력의 향상을 위하여 차단부는 진공차단기 적용을 제창하고 있다. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합기체도 SF<sub>6</sub>기체의 대체기체로 고려되고 있다. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 혼합기체에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데 그 이유는 N<sub>2</sub>기체는 가격이 싸며, 공기 중에 많이 존재하고 있기 때문이다. 하지만 SF<sub>6</sub>기체를 포함한 혼합가스의 결점은 비싼 분리회수 비용이다. 이러한 요소를 고려하여 배전 기기에서 대기에 해가 없는 건조공기, N<sub>2</sub>기체 및 기타 기체를 사용하고 있다. 원칙상 CO<sub>2</sub>기체는 응용 면에서 SF<sub>6</sub>기체의 강력한 후보자로 고려되었지만 거부된 것은 배출이 제한된 기체이기 때문이다.[4]

현재 N<sub>2</sub>기체, 건조공기가 대체기체로서의 관심을 많이 가지고 있지만, 매우 높은 불평등전계에서의 임펄스절연파괴 특성에 대한 보고가 부족한 상태이다.

본 연구에서는 불평등전계에서의 순수 N<sub>2</sub>기체의 임펄스에 대한 절연파괴특성과 전구방전진전과정을 해석하기 위하여 절연파괴전압, 전구방전전류를 측정하고, 고성능 카메라를 이용하여 방전광을 촬영하고 분석하여 배전 기기의 절연설계에 참고로 사용될 불평등전계에서

임펄스절연파괴의 기초 특성을 얻고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험계의 구성

불평등전계에서 순수 N<sub>2</sub>기체가 임펄스전압에 대한 절연 특성을 분석하기 위하여 그림 1과 같이 실험계와 측정시스템을 구성하였다.

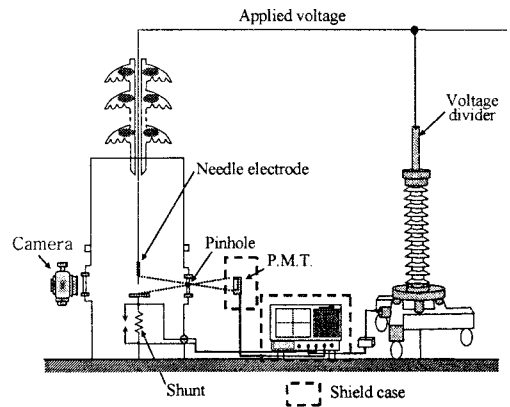


그림 1. 실험장치의 개략도

Fig. 1. A schematic diagram of the experimental apparatus

실험장치는 내경 396 [mm]인 스테인레스강을 이용하여 원통형으로 제작하였으며, 내부전극에 전압을 인가하기 위하여 66 [kV](BIL 350[kV])용 콘덴서형 부싱이 설치되어 있고, 1.2/50 [ $\mu$ s] 표준 뇌임펄스전압은 병

렬충전식 4단 Impulse Generator를 사용하여 실험장치에 인가하였다. 불평등전계를 모의하여 실험용기의 하부에 침-평판전극을 제작하여 설치하였으며, 침-평판전극에서 발생하는 절연파괴전압은 분압비가 10,000:1인 분압기로, 전구방전전류는 전극하부에 설치된 분류기를 이용하여 오실로스코프로 관측하였다. 또한 측정장비의 보호용으로 분류기에 스파크 갭을 병렬로 설치하였으며, 인가전압과 전구방전전류의 측정용 케이블은 동축케이블을 2중 메쉬 와이어(Mesh Wire)로 차폐하였고, 전자파의 영향을 줄이기 위하여 실험에 사용된 오실로스코프는 차폐함 내에 내장시켰다.

불평등전계를 모의하기 위하여 구성한 침-평판전극계와 전류측정용 분류기의 개략도를 그림 2에 나타내었다.

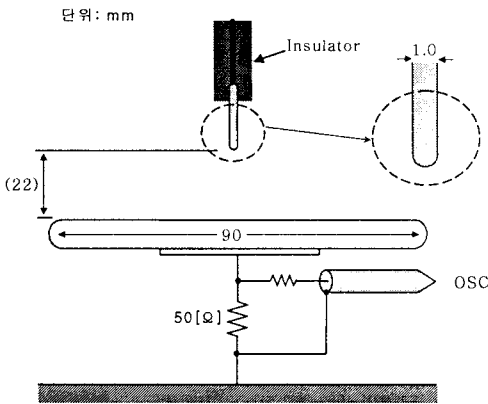


그림 2. 침-평판 전극계 구성도  
Fig. 2. A schematic diagram of the needle-plane electrode system

침-평판 전극계에서 침 전극의 끝단 직경은 1 [mm]이고, 길이 15 [mm]이며, 평판 전극은 직경 90 [mm]의 크기로 침 전극 하부에 갭의 간격이 22 [mm]가 되도록 설치하였다. 평판 전극 하단에는 전구방전전류 측정용 분류기를 설치하였다.

## 2.2. 측정방법

실험 용기에 유회전 펌프를 연결하여 실험 용기내의 기체를 수 mTorr까지 배기시킨 다음, 고순도 N<sub>2</sub>기체를 주입하였으며, 챔버 내의 기체압력을 0.1~0.5 [MPa]범위에서 단계적으로 증가시켜 실험을 수행하였다. 정·부극성의 뇌임펄스전압(1.2/50 [μs])은 실험용기의 절연부상을 통해 침 전극에 인가하였다.

인가전압의 측정에는 분압기를 사용하였고, 전구방전전류는 50 [Ω] 분류기로 측정하였으며, 분류기의 출력단에 100:1 감쇠기(attenuator)를 연결하여 전류를 검출

하였다. 또한, 전구방전에서 절연파괴에 이르기까지 발생하는 전구방전과정동안 발생하는 광은 광전자증배관(Photo-Multiplier Tube, Hamamatsu H9305-04)을 이용하여 관측하였다. 오실로스코프(band width: 500 [MHz], sampling rate: 2.5 [GS/s])를 통해 인가전압, 전구방전전류, 광 신호를 측정하였다.

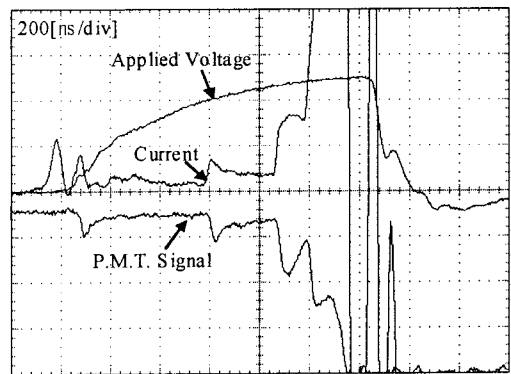
실험에 사용한 뇌임펄스전압은 측정장비의 정확한 동작에 악영향을 미치기 때문에 계측용 전원은 절연변압기와 필터를 사용하여 공급하고, 방사 노이즈를 차단하기 위해서 오실로스코프와 광전자증배관은 차폐함 내부에 설치하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 전압과 전류 파형

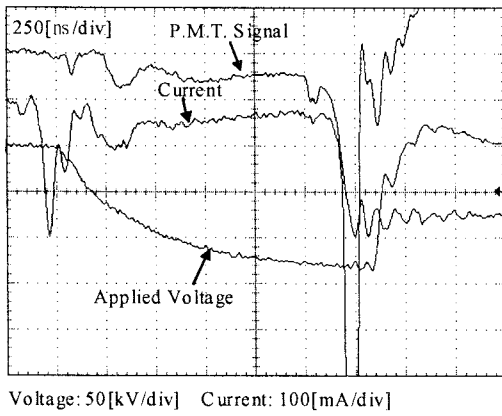
그림 3에서는 기체압력이 0.2 [MPa]일 때, 정·부극성의 뇌임펄스전압을 인가하여 측정한 절연파괴전압과 전구방전전류, 방전광 신호의 대표적 파형을 나타내었다.

그림 3(a)에서 정극성 뇌임펄스를 인가한 경우, 전구방전전류 신호와 방전광 신호는 일대일 대응관계로 나타났으며, 초기코로나가 발생하는 시점은 전구방전전류의 신호보다는 방전광 신호로부터 보다 명확하게 결정할 수 있다. 순수 N<sub>2</sub>기체는 전자 부착능력이 없으므로 SF<sub>6</sub> 기체처럼 전류펄스가 빈번히 일어나지 않고 초기코로나의 발생으로 인하여 리더가 형성·진전하여 절연파괴가 일어난다. 초기코로나가 발생하면 직접 절연파괴가 일어나는 경우가 많다. 그림 3(b)에서 부극성 뇌임펄스를 인가한 경우, 초기코로나가 발생하는 시점은 정극성 전구방전과 비슷하지만 초기코로나가 발생하면 직접 절연파괴가 일어났다. 하지만 전계완화작용으로 인해 정극성보다 상대적으로 절연파괴전압이 높게 나타났다.



Voltage: 20 [kV/div] Current: 100 [mA/div]

(a) 정극성

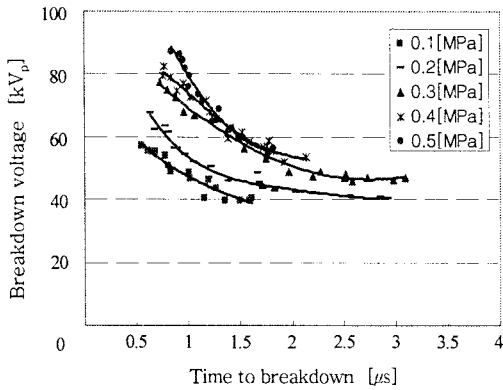


(b) 부극성

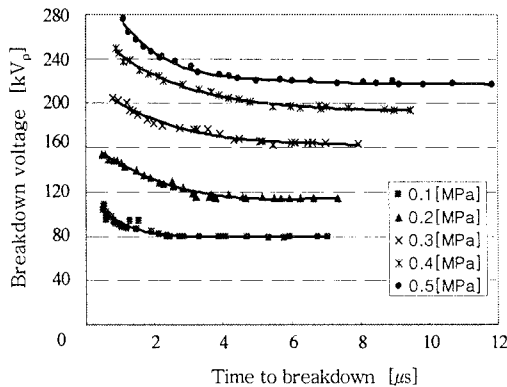
그림 3. 0.2 [MPa]의 N<sub>2</sub>기체 중에 인가된 뇌임펄스전압, 전구방전전류와 방전광 신호

Fig. 3. Waveforms of the applied lightning impulse voltage, pre-breakdown current and luminous signals in N<sub>2</sub> gas of 0.2 [MPa]

### 3.2. N<sub>2</sub>기체 중에서 V-t 특성



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 4. N<sub>2</sub>기체 중에서의 V-t 곡선

Fig. 4. The V-t curves in N<sub>2</sub>

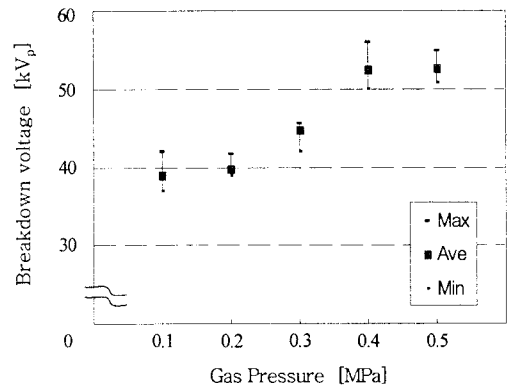
N<sub>2</sub>기체의 임펄스전압에 대한 단시간 V-t 특성을 그림 4에 나타내었다.

그림 4(a)에서와 같이 정극성 임펄스전압을 침-평판 전극에 인가할 경우, 절연파괴가 일어나는 시간이 길어짐에 따라 절연파괴전압이 점차 감소하며, 0.1~0.3 [MPa] 압력에서 임계절연파괴전압이 나타나는 시간이 점차 길어지다가 0.4 [MPa]과 0.5 [MPa]에서는 임계절연파괴전압이 나타나는 시간이 줄어들었다. 그림 4(b)에서와 같이 부극성 임펄스전압을 침-평판 전극에 인가할 경우, 압력이 증가함에 따라 절연파괴시간이 점차 길어지는 것을 볼 수 있다. 그리고 같은 압력에서 정극성보다 부극성의 절연파괴시간이 길게 나타난다.

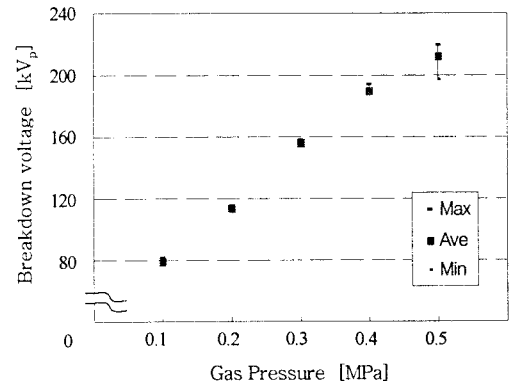
따라서 뇌서지에 대한 절연내력 평가에서 부극성 절연파괴전압보다 정극성 절연파괴전압으로 평가하는 것인 보다 효과적이다.

### 3.3. N<sub>2</sub>기체 중에서 V-p 특성

인가전압의 형태와 극성을 파라미터로 하여 N<sub>2</sub>기체의 절연파괴전압-기체압력(V-p)특성을 그림 5에 나타내었다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5. N<sub>2</sub>기체 중에서의 V-p 특성

Fig. 5. The V-p characteristics in N<sub>2</sub>

불평등전계에서 순수 N<sub>2</sub>기체의 절연파괴전압-기체압력 특성(V-p특성)은 인가전압의 파형과 극성, 불평등전계의 정도, 돌기물의 형상 및 반경, 그리고 돌기물 길이의 치수 등 여러 가지 요인의 영향을 받는다.[2] V-p특성은 일반적으로 최소절연파괴전압을 취하게 되므로 파미시간의 영향이 크게 작용하며, 가스압력은 V-p특성의 절연파괴기구 해석에서의 중요한 요소이다.

그림 5(a)에서와 같이 정극성일 경우, 0.1~0.4 [MPa] 까지는 압력이 증가함에 따라 절연파괴전압이 증가하였으며, 그림 5(b)에서와 같이 부극성일 경우, 압력이 증가함에 따라 절연파괴전압이 선형적으로 증가하였다. 절연파괴전압은 정극성의 경우가 부극성일 때보다 현저하게 낮았다.

### 3.4. 절연파괴시의 방전광 현상

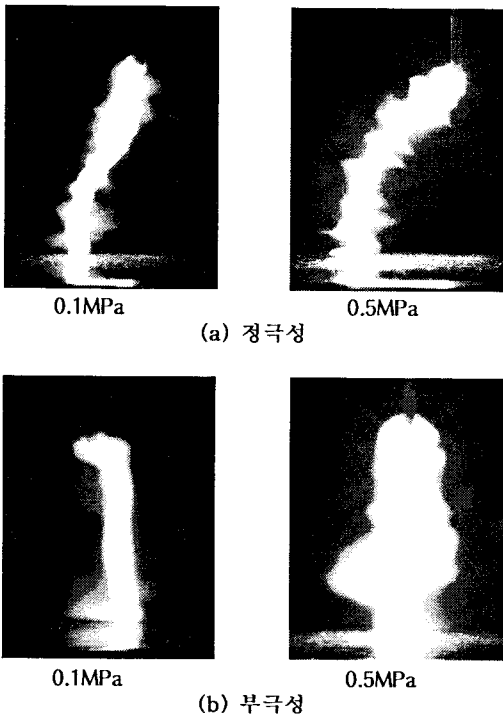


그림 6. N<sub>2</sub>기체 중에서의 방전현상  
Fig. 6. Discharge light images in N<sub>2</sub> gas

N<sub>2</sub>기체 중에서 정·부극성의 뇌임펄스전압이 인가되어 섬락이 발생하기까지의 전체진전과정동안에 발생하는 방전광에 대한 현상을 알아보기 위해서 고성능 디지털 카메라(Canon, EOS 20D)를 이용하여 촬영하였다.

그림 6의 사진은 가시적으로 정극성보다 부극성일 때의 빛의 강도가 높고, 방전 채널의 굵기도 굵은 것을 알 수 있다. 압력이 증가함에 따라 부극성이 정극성보다 더 굵어짐을 알 수 있다. 정극성의 경우 방전경로가

기체압력의 증가에 따라 꼬불꼬불한 형상으로 진전하며, 전체 방전경로의 길이는 증가하는 것으로 보인다. 그러나 부극성의 경우 방전경로는 거의 직선상으로 나타났으며, 방전경로의 광의 세기는 기체압력의 증가에 따라 밝게 나타났다.

### 4. 결론

N<sub>2</sub>기체 중에서 뇌임펄스전압에 의한 전구방전특성과 방진진전경로의 고찰을 위한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절연파괴전압은 압력이 증가함에 따라 증가함을 볼 수 있었고, 순수 SF<sub>6</sub>기체보다 훨씬 낮았다.
- (2) 불평등전계 중에서 N<sub>2</sub>기체의 절연내력은 부극성인 경우가 정극성의 경우보다 압력의존성이 높았으며, 정극성의 경우에는 0.4 [MPa] 이상에서는 기체압력의 변화에 의존하지 않았다.
- (3) 정극성의 방전채널의 진전경로는 압력이 증가함에 따라 부극성의 경우보다 상대적으로 길었으며, 부극성 방전채널의 굵기는 정극성의 것보다 굵게 나타났고, 부극성에서 방전채널은 점차 굵어졌다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. Saitoh, K. Morita, T. Kikkawa, N. Hayakawa and H. Okubo, "Impulse partial Discharge and Breakdown Characteristics of Rod-Plane Gaps in N<sub>2</sub>-SF<sub>6</sub> Gas Mixtures", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 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 SF<sub>6</sub> alternative gases for gas-insulated switchgear", IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 153, No.1, pp. 1~6, 2006. 1.
- [3] Shuhei Kaneko, Member, Shigemitsu Okabe, Senior Member, "N<sub>2</sub>가스의非標準雷인펄스波形に對する絶縁特性と評價法", IEEJ Trans. PE, Vol.127, 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 N<sub>2</sub> Gases", EEJ, Vol. 148, No. 3, pp. 36~43, 2004.