

## 전력설비의 열화 진단을 위한 연면방전 모델에서의 코로나 방전 특성 분석

방만식<sup>1</sup>, 최재형<sup>1</sup>, 김우진<sup>1</sup>, 김영석<sup>2</sup>, 김상현<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

<sup>2</sup> 한국전기안전공사 전기안전연구원

### The Analysis of Corona Discharge of Surface Flashover Model for Aging Diagnosis of Power Facility

Man-Sik Pang<sup>1</sup>, Jae-Hyeong Choi<sup>1</sup>, Woo-Jin Kim<sup>1</sup>, Young-Seok Kim<sup>2</sup>, and Sang-Hyun Kim<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering and ERI, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

<sup>2</sup> Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation, Gapyeong 477-818, Korea

(Received February 8, 2011; Revised March 21, 2011; Accepted March 23, 2011)

**Abstract:** Recently, ultrasound, infrared detector, V-I characteristic, gas analysis, UV (ultra-violet rays) camera etc. is used as inspections and diagnoses of the safety of power equipment. Especially, UV camera have attracted a great deal of interest from the view point of easy judgement. UV camera is used corona discharge. One of the most important and difficult problems to be solved filer design, materials and corona discharge. This paper is studied on the temperature characteristics, UV generation and shape analysis and corona pulse count according to the electrode distance and applied voltage. Also, Corona discharge characteristics in air are analyzed using prototype UV camera of Korea. UV generation due to surface discharge of AC is higher than that of DC.

**Keywords:** Surface flashover, Corona discharge, Ultra-violet rays, Aging, Diagnosis

#### 1. 서론

전력설비 및 발전설비는 국가 기반시설로서 고전압에 의한 방전사고의 가능성을 항상 가지고 있다. 그러므로 설비의 진단, 유지관리 및 이상 유무를 빠른 시간 내에 인지하는 것이 중요하다 [1]. 그러나 조기 진단을 위한 초기방전은 귀에는 들리지 않는 초음파나 눈에 보이지 않는 자외선이 등이 발생하므로 발견하기 쉽지 않다. 최근에는 이러한 진단을 위해 열화가 진행된 상태 즉, 줄열에 의해 나타나는 온도변화를 적외선 카메라를 촬영하거나, 초음파 검출, HFCT

(high frequency communications terminal) 센서에 의한 검출 등을 이용하여 분석하고 있다 [2].

전력설비의 고전압 부위는 외부에 노출되어 있어 염수나 분진 등에 의해 오염되어 연면방전에 대한 사고 가능성이 높다. 한국전기안전공사 재해통계자료에 의하면, 옥외에 설치된 지지물 및 애자류에서의 설비 사고 점유율은 약 30% 정도 차지하며, 사고유형도 지지물의 연면을 통한 발열, 코로나 방전 등에 의한 절연파괴 사고가 대부분이었다 [2].

노출된 전기설비의 진단은 자외선 코로나 카메라, 적외선 열화장비, 초음파 장비 등을 이용하고 있지만, 이상여부를 판단하는 기준은 각 장비마다 상이하며,

a. Corresponding author: shkim@gsnu.ac.kr

특히 자외선 코로나 카메라를 통한 열화판정기준은 아직까지 정립되어 있지 않다 [3].

자외선 코로나 카메라는 미국의 캘리포니아 정전 사태 이후, 전력설비에 대한 사고 방지 목적으로 많이 활용되고 있으며, 내부의 광증배관 기술을 이용하여 코로나 방전에 따른 방전량과 이미지로 설비를 검사 또는 진단하고 있으며, 미국 전력연구센터에서는 ‘코로나/아크 관측에 대한 안내서’ 등을 통해 분석기법을 소개하고 있다 [4]. 하지만 주변 환경에 의해 방전량이 증가하는 것 등의 판정 기준이 모호하여 국내 환경에 맞지 않는 문제점이 있으며, 기준 모델의 전극계를 구성하여 코로나 방전 시 발생하는 여러 가지 특성을 분석하여 진단 기준을 제시할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 불평등전계를 모의한 침-평판 전극장치를 구성하고 코로나 방전 시 발생하는 온도, 소리, 자외선 특성을 조사하여 전력설비 열화 판정의 기본 자료로 활용하고, 자외선 코로나 카메라의 이미지와 비교 분석하였다.

## 2. 실험 방법

그림 1은 본 실험에 사용된 전극계를 나타낸다. 0.3 mm 두께의 스테인레스강 (SUS 304)의 침-평판 전극을 두께 5 mm의 유리강화섬유플라스틱 (glass fiber reinforced plastics, GFRP)판 위에 수평배치 하였으며, 침대 평판 전극 사이의 간격은 20 mm, 32 mm 및 45 mm로 변화시켰다.

그림 2는 실험장치의 구성도를 나타낸다. 전극계를 설치한 후, 고전압 발생장치를 이용하여 전압을 상승시켰으며, 측정은 10회 이상으로 하여 평균값을 사용하였다. 고전압 발생장치는 교류(AC)와 직류(DC) 전압원을 이용하였다. 고전압 인가에 따른 전극에서 발생하는 발열현상과 코로나 방전 현상을 측정하기 위해 적외선 열화상 카메라 (Fluke-TI32FT, -20~600℃), 소음측정기 (Svantek948, 0.5 Hz~20 kHz), 자외선 센서 (UV Sensor, 185~260 nm [5]), 자외선 코로나 카메라 (Opus I, EOST)를 활용하였으며, 코로나 노이즈, 전극 간 온도, 자외선 개수 및 자외선 형상 등이 동시에 측정될 수 있도록 구성되어 있다. 전압 인가시의 전극 간에 발생하는 온도는 적외선 카메라, 코로나 노이즈는 소음측정기로, 전류의 파형 및 전류치는 오실로스코프와 전류 프로브를 이용하여 각각 측정하였다.

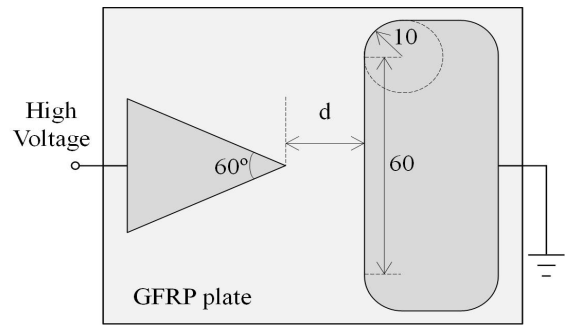


Fig. 1. Eelectrode system.

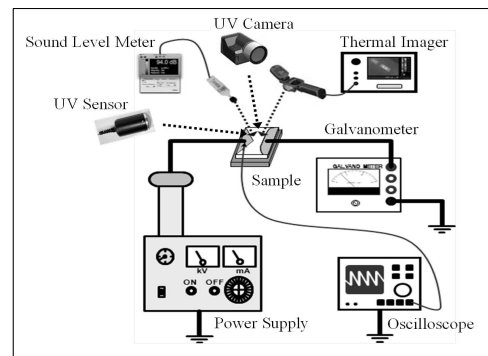


Fig. 2. Eelectrode configuration.

인가전압에 따른 자외선 (코로나) 개수 측정은 코로나 발생 시 검출되는 자외선량이 작아 투과형 광학 렌즈를 이용하였다 [6,7]. 자외선의 집광을 위한 경통 설계는 광학설계 프로그램을 이용하였으며 자외선 센서와 렌즈 (Fused Silica 렌즈)의 간격은 1,000 mm, 화각은 10°로 고정하였으며, 경통 후단에 자외선 센서를 부착하였다. 또한 자외선 센서의 출력값을 최대하기 위해 센서의 구동전압은 DC 400 V로 하였으며, 발생하는 자외선의 신호와 개수는 설치된 레코드에서 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 전극 간격에 따른 연면 방전 전압 의존성

그림 3은 대기중 에서 AC전압과 DC전압을 인가한 경우의 GFRP 연면전극간격에 따른 연면파괴전압 특성을 나타낸다. 그림중의 ○표시는 AC전압의 평균값

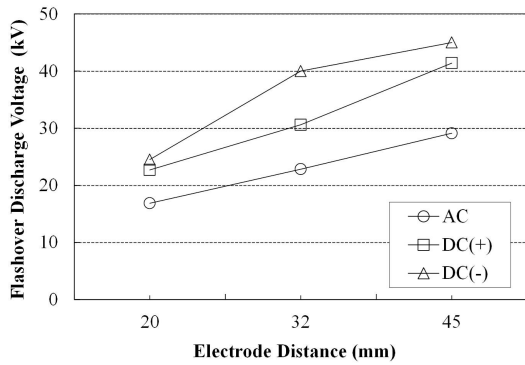


Fig. 3. Surface electrode distance dependence of surface breakdown voltage.

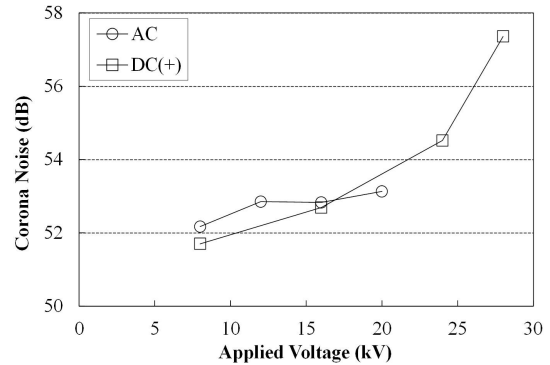


Fig. 5. Corona noise characteristic according to applied voltage.

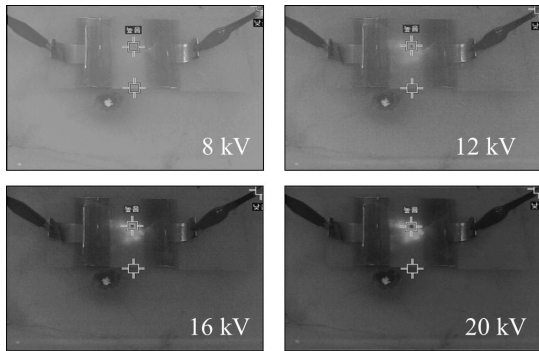


Fig. 4. Distribution of temperature between electrodes according to applied voltage.

이고, ◇표시 및 △표시는 각각 정침(침 전극에 +전압 인가)과 부침(침 전극에 -전압 인가)의 DC전압의 평균값을 나타낸다. 지금까지 보고된 결과 [8]와 같이 어느 경우에도 GFRP의 전극간격이 증가할수록 연면방전전압은 증가하고 있으며, 동일한 전극간격일 경우 DC의 정침, 부침 그리고 AC의 순서로 연면방전전압이 낮아짐을 알 수 있다.

**3.2 인가 전압에 따른 전극간 온도특성**

그림 4는 침-평판 전극간에  $d = 32 \text{ mm}$ 로 일정하고, AC전압을 인가한 경우의 온도분포 사진을 각각 나타낸다. 사진은 시료에서 700 mm 떨어진 거리에서 적외선 카메라로 촬영하였다. 8 kV 근처의 AC 전압에서부터 침선단에서 코로나 방전이 발생하며, 전압상승에 따라 코로나방전의 진전이 활발하였다.

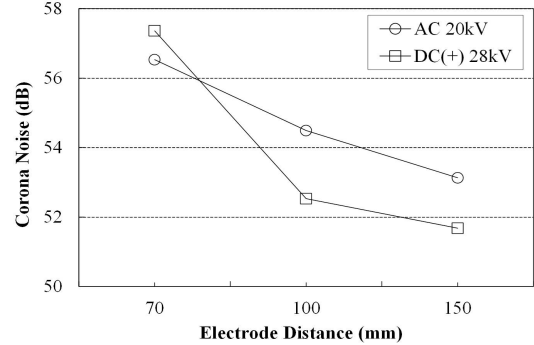


Fig. 6. Corona noise according to the measured distance.

최고온도는 평판전극 부근보다는 불평등 전계인 침선단 부근이며 인가전압이 상승함에 따라 최고온도가 높아짐을 알 수 있다. 최고온도는 20 kV에서 약 31°C로 나타났다. 이와 같은 현상은 DC전압을 인가한 경우도 유사하였다.

**3.3 전압변화에 따른 코로나 노이즈 특성**

AC 및 DC 전압을 인가한 조건에서 발생하는 코로나를 소음측정기로 측정된 코로나 노이즈를 그림 5에 나타낸다. 전극간격은 32 mm, 시료와 소음측정기의 거리는 700 mm이며 코로나 발생 시의 이득(gain, dB)만을 비교한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 인가전압 상승에 따라서 코로나 노이즈 이득은 증가하며, AC전압보다는 정침 DC전압에서 다소 높다. 특히 파괴전압 근처에서 이득변화의 상승폭이 큼을 알 수 있다. 예를 들면, 파괴전압인 정침 DC 28

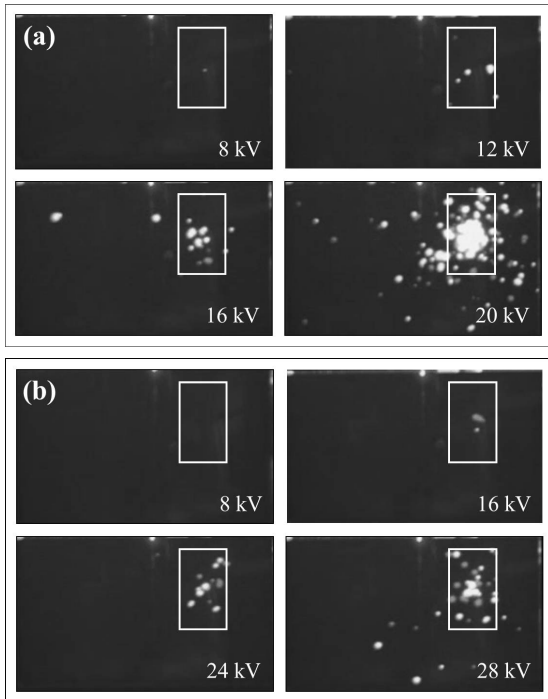


Fig. 7. Photographs of UV in corona discharge. (a) AC, (b) DC(+).

kV 근처에서의 코로나 노이즈 이득은 57.36 dB을 얻었다. 이것은 연면발전전압 근처에서는 코로나 발생과 더불어 전자증배가 지속적으로 증가하여 전극간에 충돌이 심하게 일어나기 때문이라고 생각된다.

한편, 그림 6은 AC 20 kV와 DC 28 kV 전압을 각각 인가하고, 시료와 소음측정기의 측정거리를 700, 1000 및 1500 mm로 변화시킨 경우의 코로나 노이즈 이득을 나타낸다. 일반적인 경우와 같이 그림에서 측정거리가 증가 할수록 코로나 이득은 선형적으로 감소하였다.

### 3.4 UV 카메라 코로나 영상

그림 7은 국내의 이오시스템(주)에서 개발 중인 UV카메라 시제품을 이용하여 32 mm인 침-평판 전극에서 AC전압 및 정침 DC전압을 인가하고, 4000 mm 거리에서 촬영한 코로나 방전 시 사진을 나타낸다. 사진에서 흰색 사각형 주위의 흰점이 전극간에 발생된 자외선이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 자외선 이미지 검출시점은 절연파괴 전압의 약 36% 범위에서부터 침선단 근처에서 발생하고, 전압 증가

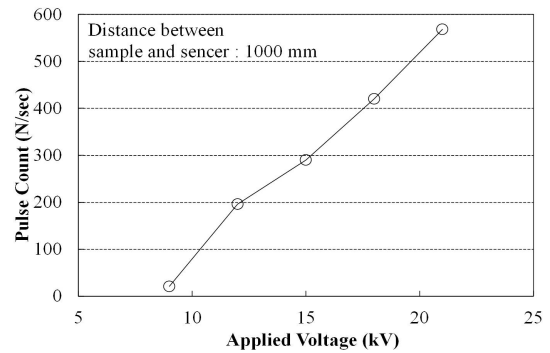


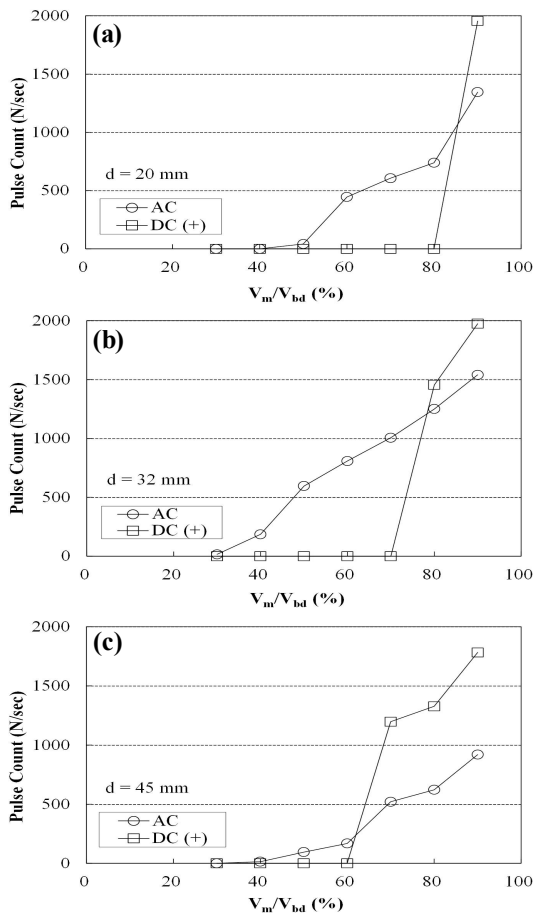
Fig. 8. Pulse count of corona.

에 따라서 흰점의 수와 크기가 증가하다가 연면파괴 전압의 90% 근처에서는 그 수와 크기가 급격히 상승한다. 또한, 자외선이 발생하여 전극간에서 GFRP 연면 전체적으로 분포되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 그림 (b)와 같이 정침 DC전압에서도 유사하나, AC전압 보다는 흰점의 수와 크기 및 분포가 작음을 알 수 있다. 따라서, 이와 같은 점을 감안할 때 UV카메라로 코로나 측정 시 DC보다는 AC 응용기기의 활용에 유효함을 알 수 있다. 차후 이오시스템(주)에서 개발한 UV카메라를 이용하여 코로나 (자외선) 발생 수, 크기와 면적 등을 재검토 할 필요가 있다.

### 3.5 자외선 센서를 이용한 전압변화에 따른 코로나 발생 개수

그림 8은 UV 센서를 이용하여 시료와 자외선센서와의 측정거리 1000 mm 거리에서 측정한 코로나 펄스 수를 나타낸다. 펄스 수는 AC 전압상승에 따라서 증가하며 연면파괴전압 (AC 22 kV)의 약 81%에 해당하는 18 kV에서는 자외선 개수가 1초당 약 450개이며, 약 95%에서는 약 600개의 UV광이 검출되는 것을 확인하였다.

그림 9는 연면전극 간격을 변화시킨 경우의 AC 및 정침인 DC전압에서의 코로나 발생개수를 나타낸다. 전압은 파괴전압 ( $V_{BD}$ )과 인가전압 ( $V_m$ )의 비로써  $V_m/V_{BD}$ 로 나타내고, 연면전극 간격은 20 mm, 32 mm 및 45 mm로 하였다. 그림 (a)에서 알 수 있는 바와 같이, AC전압의 경우에는  $V_m/V_{BD}$ 가 50% 이상에서 부터 발생하여 전압상승에 따라서 코로나 개수가 완만히 비례해서 증가한다. 반면, 정침 DC전압은 AC전압과 다르게 연면파괴 전압의 근처인  $V_m/V_{BD}$ 가 80%에서부터 발생하



**Fig. 9.** Pulse count of corona according to  $V_m/V_{BD}$ . (a)  $d=20\text{mm}$ , (b)  $d=32\text{mm}$ , (c)  $d=45\text{mm}$ .

여 짧은 기간 동안 코로나 개수가 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 특성은 전극 간격을 변화해도 유사한 결과를 나타냈다. 그러나 정침 DC전압인 경우 전극간격을 크게 하면, 코로나 발생 개수는 무관하나,  $V_m/V_{BD}$ 의 값이 작아짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

침-평판의 불평등 전계에서 방전모형을 선정하여, 전압에 따른 온도 특성, 자외선 발생량 및 형상 분석, 코로나 발생 개수를 측정하고, 기중 연면방전에 대한 AC 및 DC 코로나 방전 특성을 모의 분석하였다.

온도 특성은 전극 간격이 커지면 연면파괴 전압과 전극간의 최고 온도도 커지며, 코로나 노이즈는 DC전

압에서 인가전압 증가에 따라 노이즈의 폭이 커지나, 거리와는 반비례한다. 코로나 영상은 DC보다는 AC전압을 인가했을 때 UV 발생개수가 훨씬 많고 면적이 넓었으며, 정침 DC전압의 경우 침전극을 중심으로 코로나가 집중되었다. 코로나 노이즈 이득은 인가전압에 따라 증가하며, 특히 연면 파괴전압 근처에서 이득변화의 상승폭이 높았다. 센서를 이용한 코로나 펄스 수는 전압상승에 따라서 증가하며 AC 연면방전 전압인 22 kV의 약 81%에 해당하는 18 kV에서는 자외선 개수가 1초당 약 450개이며, 약 95%에서는 약 600개의 UV광이 검출되는 것을 확인하였고, 인가전압이 증가함에 따라 점차적으로 증가했다.

차후 동일한 조건에서의 관통파괴 특성을 조사하고 연면방전 특성과 비교 검토할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2010T100100339).

#### REFERENCES

- [1] K. M. Shong, Y. S. Kim, and J. S. Jung, *Trans. KIEE*, **58**, 1380 (2009).
- [2] K. M. Shong, S. B. Bang, C. M. Kim, Y. S. Kim and J. S. Jung, *Trans. KIEE*, **57**, 1606 (2008).
- [3] Y. S. Kim and K. M. Shong, *IEEE Trans. Power Deliv.*, **20**, 1976 (2005).
- [4] EPRI report 1001910, *Guide to Corona and Arcing Inspection of Overhead Transmission Lines*, (EPRI, 2002).
- [5] R. A. Pauchard, D. Manic, A. Flanagan, P. A. Besse and R. S. Popovic, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **47**, 168 (2000).
- [6] Y. S. Kim, M. I. Choi, C. M. Kim, S. B. Bang and K. M. Shong, *Proc. 41st KIEE Conf.* (ed. J. K. Park) (Korea Inst. Elec. Eng., Busan, Korea, 2010) p. 2165.
- [7] Y. S. Kim, and K. M. Shog, *Proc. 2010 ICSD 10th Conf.*, (ed. R. Gerhard) (Inst. Electric. Electron. Eng., Potsdam, Germany, 2010) p. 1.
- [8] H. R. Park, E. H. Choi, L. K. Kim and K. S. Lee, *J. KIEE*, **23**, 154 (2009).