

자외선 카메라 개발을 위한 직류 연면방전 특성

(Characteristics of DC Surface Discharge for the Development of UV Camera)

방만식* · 최재형 · 김우진 · 김영석 · 김상현**

(Man-Sik Pang · Jae-Hyeong Choi · Woo-Jin Kim · Young-Seok Kim · Sang-Hyun Kim)

Abstract

Recently, UV(ultra-violet rays) camera has attracted a great deal of interest from the view point of easy judgement in inspections and diagnoses of the safety of power equipment. Especially, UV camera is applied the inspection of UV with corona discharge. One of the most important and difficult problems is the basic research of filter design, materials and corona discharge.

In this paper, we will report on the UV generation, corona pulse count and the polarity effect of positive and negative DC surface discharge in air. Also, corona discharge characteristics are analyzed using prototype UV camera of Korea. UV generation and corona pulse count due to surface discharge in positive needle is higher than that of negative needle.

Key Words : DC Corona Discharge, Corona Pulse Count, Polarity Effect, UV Image

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전에 따라 각종 전력설비의 초고압화 대응량화가 진행되고 있다. 이에 따라 전력설비의 안정성 및 신뢰도 향상을 위하여 사전예방 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다

전력설비에 이상이 발생했을 때 효과적으로 검출하기 위해서는 초음파, 적외선 감지, 전압-전류 특성, 가스감지, UV 카메라 등 다양한 신호를 진단하는 기술이 발전하였다[1-2]. 일반적으로 전력설비의 아크방

전, 단락, 지락 등의 사고는 절연상태가 깨지면서 발생되고 있다. 절연과과 초기단계에는 전계가 집중되어 있는 부분에만 먼저 자속방전인 코로나(corona)의 부분방전이 발생한다. 그러나 코로나 발생 시에는 자외선과 같은 전자파, 산화질소(NO), 오존(O₃), 전자충격 등 다양한 형태의 신호가 검출된다[3]. 따라서 코로나 방전에 대하여 원인과 향후 영향분석을 통한 사전 교체 및 보수처리의 필요성이 대두된다.

특히 원자력 발전 설비의 노후화에 따른 안전에 대한 감시 및 점검이 절실히 요구되고 있다. 주요 점검 항목은 현재 정전상태에서의 점검 예를 들면, 변압기의 경우 절연유의 산기, 수분, 내압시험 부싱(bushing)의 접촉저항, 절연, 선간 저항 등을 계측기에 의해 측정 분석하여 확인하고 있다. 최근 기존 설비 항목 외 UV 카메라를 이용하여 무정전 상태에서 코로나 방전

* 주저자 : 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원
** 교신저자 : 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원 교수
Tel : 055-772-1714, Fax : 055-761-8820
E-mail : shkim@gsnu.ac.kr
접수일자 : 2011년 3월 7일
1차심사 : 2011년 3월 10일
심사완료 : 2011년 3월 25일

을 시각적으로 확인하고, 국부적 발열 검출을 동시에 점검하여 설비관리의 효율성, 손실의 최소화를 꾀하고자 한다[4-5].

UV 카메라는 방전에 의해 발생한 자외선을 전자로 변환하고, 증폭시켜 필터를 통과시켜 최종적으로 우리가 눈으로 볼 수 있는 가시광선의 이미지로 나타내어 열화 상태를 판단하는 장비이다. 현재 UV 카메라의 자외선 검출범위는 240~280[nm] 범위의 파장으로 이스라엘, 남아공, 일본과 에드먼드 합작으로 개발하여 시판되고 있으나, 가격이 고가이고 감도와 이상 판단 기준이 없다. 국내에서는 삼성테크윈, 이오시스템(주) 등 5개 업체가 적외선 열화상 카메라 제작 기술을 보유하고 있다. 그러나 부분방전을 시각적으로 측정할 수 있는 자외선 검출 기술은 이오시스템(주)이 유일하게 보유하여 UV 카메라 개발을 하고 있으나, 코로나 방전 특성의 기초연구와 더불어 필터 설계 및 핵심부품 연구 등의 원천 기술의 부족으로 국산화 개발이 어려운 실정이다.

이와 같은 관점에서 본 연구에서는 불평등 전계하에서 모의 방전모형을 선정하고, 기중에서의 정침 및 부침 DC 연면방전 특성을 비교 검토하였다. 전극간격과 인가전압에 대한 자외선 발생량 및 형상, 코로나 발생시 펄스 수 등을 측정 분석하여 UV 카메라 개발의 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1에 실험장치의 개략도를 나타낸다. 주요 부분은 고전압 발생장치, 전극계 및 측정부로 구성된다.

방전 특성은 DC 연면 방전 특성을 DC(+)와 DC(-) 극성으로 나누어 측정하였다. 연면 방전 특성을 위한 전극계는 그림 2와 같이 5[mm] 두께의 유리강화섬유 플라스틱(GFRP : glass fiber reinforced plastics)판 위에 0.3[mm] 두께의 스테인레스 강(SUS 304)의 침(곡률각 : 60°)-평판 전극을 붙이고 수평배치 하였다. 평판전극의 단부는 전계집중을 피하기 위하여 곡률반경을 10[mm]로 처리하였으며, 전극간격(d)은 20, 32 및 45[mm]로 변화시켰다.

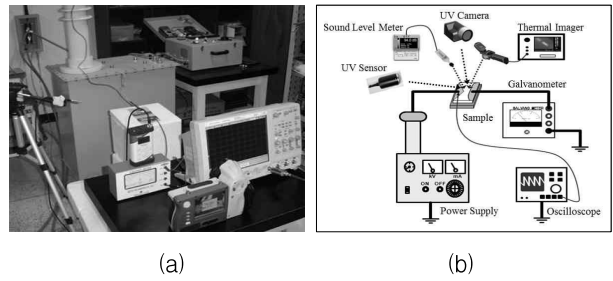


그림 1. 실험장치; (a) 사진, (b) 개략도
Fig. 1. Experimental apparatus; (a) photograph, (b) schematic diagram

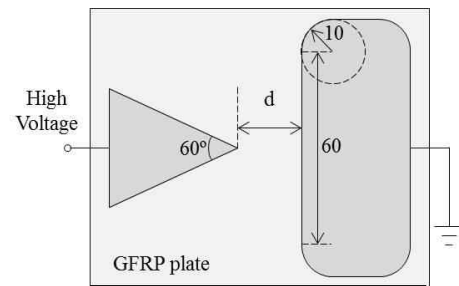


그림 2. 전극계의 형상
Fig. 2. Electrode configuration

시료에 인가되는 전압은 DC의 고전압 발생장치(최대전압 100[kV])를 사용하였다. 전압은 수동으로 일정 간격으로 전압을 상승하여 인가하였으며, 측정치는 10회 이상의 값을 평균하여 사용하였다. 침 전극에 고전압측 부상을 통하여 고전압이 인가되는 경우를 정침(침에 +전압을 인가)이라 하고, 접지측에 연결되는 경우를 부침(침에 -전압을 인가)이라 했다. 시료에 고전압 발생장치에서 전압을 인가하면 코로나의 부분방전과 동시에 코로나 노이즈, 자외선 개수 및 자외선 형상 등이 동시에 측정될 수 있도록 구성되어 있다. 전압 인가시의 전극간에 발생하는 코로나 노이즈는 소음측정기(Svantek 948, 0.5~20[kHz])로 측정하였다. 또한, 인가 전압에 따른 자외선(코로나) 개수 측정은 이미 보고된 장비와 동일한 장비를 사용하였다[7]. 코로나 발생시 검출되는 자외선량이 작아 투과형 광학렌즈를 이용하여 집광하였다[8]. 집광을 위한 렌즈의 최적화를 위해 렌즈와 시료와 거리는 1,000[mm], 화각은 10[°]로 고정하였다. 광학렌즈의 후단에 자외선 센서(UV tron R9533)를 부착하고, 센서에 구동 전압을 DC

400[V]를 인가하였다. 자외선 개수는 레코드를 설치하여 출력되는 펄스신호를 컴퓨터로 계산되었다.

실험 방법은 전극계를 설치하고 에틸알코올과 초음파 세척기로 GFRP표면과 전극을 세척 건조시킨 후, 대기 중에서 직류 전압을 인가하였다. 그리고 + 및 -극성을 바꿔가면서 전극간격에 따른 연면 파괴전압을 측정하였다. 코로나가 개시되는 전압과 연면파괴전압 간의 전압을 등분한 후 각 전압에서의 코로나 노이즈, 자외선 개수를 측정하였으며 특히 코로나 발생 시 발생하는 자외선의 형상과 면적크기는 일정거리에서 현재 개발한 시제품 UV 카메라(Opus I, EOST)로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전극 간격에 따른 연면 방전 전압의 존성

전력설비 중에서 상대적으로 코로나 및 자외선 발생이 많은 고체형 부식의 대표적인 구조를 그림 3에 나타낸다. 일반적으로 구리 도체위에 절연지 등의 절연체를 감고 애관에 삽입하고 절연유를 채워 절연하는 구조이다[6]. 주요 절연요소는 플랜지 상부의 기중의 연면방전이 발생할 수 있는 기중 단부 절연(A), 고체 절연체의 관통파괴가 발생할 수 있는 부식 바디 절연(B), 플랜지 하부의 기체 혹은 액체 중 연면방전이 발생할 수 있는 하부 단부 절연(C)와 탱크와 부식 도체 간의 관통파괴가 발생할 수 있는 하부 절연(D)로 구성된다. 특히 시스템의 가장 취약점인 A 및 C 부분의 연면 방전 현상을 파악하는 것은 설비의 사고 진단을 위해서 매우 중요하다.

그림 4는 대기중에서 정침 및 부침 DC전압을 인가한 경우의 GFRP 연면전극간격에 따른 연면파괴전압 특성을 나타낸다. 그림 중의 ■ 표시 및 ▲ 표시는 각각 정침(침에 +전압 인가) 및 부침(침에 -전압 인가)의 DC 연면파괴 전압의 평균값을 나타낸다. 지금까지 보고된 결과[9-10]와 같이 어느 경우에도 GFRP 연면전극간격에 따라 연면파괴전압은 증가하고 있으며, 동

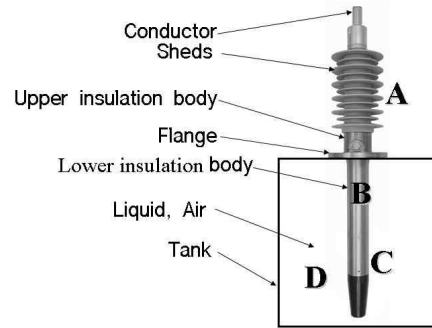


그림 3. 변압기용 부식의 개략도
Fig. 3. Insulation configuration of a transformer bushing

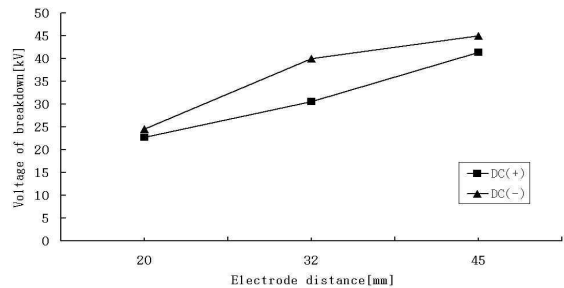


그림 4. 연면 파괴전압에 따른 연면 전극간격 의존성
Fig. 4. Surface electrode distance dependence of surface breakdown voltage

일한 연면전극간격일 경우 DC의 부침이 정침의 경우보다 연면파괴전압이 높음을 알 수 있다.

3.2 코로나 노이즈 특성

그림 5는 연면 전극간격이 32[mm]인 경우의 침-평판 전극간에 발생하는 코로나(자외선)를 소음측정기로 측정된 코로나 노이즈의 이득(gain, [dB])을 정침 및 부침의 DC 전압에서 비교한 결과를 나타낸다. 시료와 소음측정기 측정거리는 700[mm]이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 코로나 노이즈 이득변화는 부침보다는 정침인 DC 전압에서 다소 높다. 또한 어느 경우에도 인가전압 상승에 따라서 코로나 노이즈 이득은 약간 증가하며, 특히 연면 파괴전압 근처에서 이득변화의 상승폭이 큼을 알 수 있다. 예를 들면 정침 DC 전압을 인가한 경우 연면파괴전압의 50%인 16[kV]

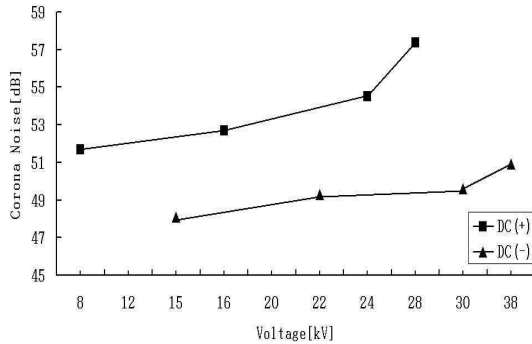


그림 5. 전압변화에 따른 코로나 노이즈 특성
Fig. 5. Corona noise characteristic according to applied voltage

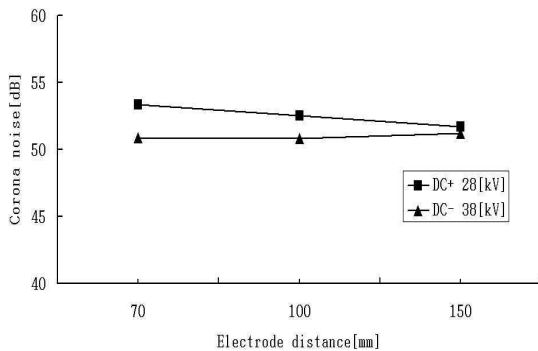
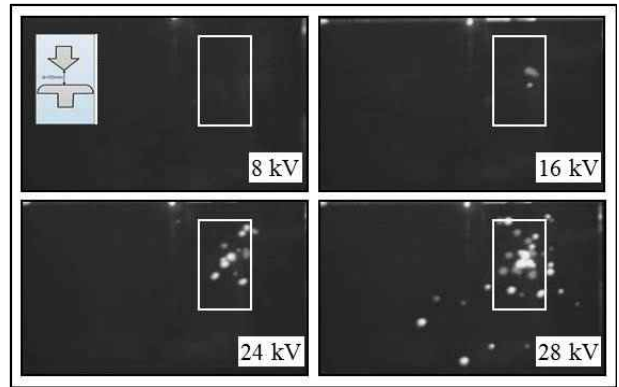


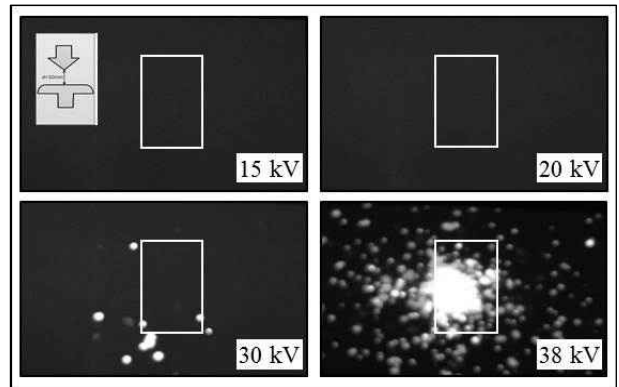
그림 6. 측정거리 변화에 따른 코로나 노이즈
Fig. 6. Corona noise according to the measured distance

에서는 약 52[dB]이나, 90[%]인 28[kV]에서의 코로나 노이즈 이득은 57[dB]을 얻었다. 이것은 연면 파괴전압 근처에서는 코로나 발생과 더불어 전자증배가 지수적으로 증가하여 전극간에 충돌이 심하게 일어나 코로나 노이즈가 높아졌기 때문이라고 생각된다. 또한 부침의 경우도 유사한 경향을 나타내나 정침의 경우보다는 코로나 노이즈 이득이 낮음을 알 수 있었다.

한편, 그림 6은 각각의 연면 파괴전압의 90[%]인 정침 및 부침인 DC 전압을 각각 인가하고 시료와 소음 측정기의 측정거리를 변화시킨 경우의 노이즈 이득을 나타낸다. 측정거리는 700, 1,000 및 1,500[mm]에서 측정하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 정침 및 부침 DC인 경우 어느 경우나 측정거리가 증가해도 코로나 이득은 큰 변화가 없었다. 일반적인 경우 측정거리 에 따라 코로나 노이즈 이득은 감소하는 경향은 있으



(a)



(b)

그림 7. 연면 방전시의 자외선 사진;
(a) DC(+), (b) DC(-)

Fig. 7. Photographs of UV in surface discharge;
(a) at DC(+), (b) at DC(-)

나 본 실험에서는 실험상의 문제로 장거리에서 측정은 어려워 단거리에서 측정했기 때문이라고 생각된다.

3.3 자외선 이미징

그림 7의 (a) 및 (b)는 현재 개발 중인 시제품 UV카메라를 이용하여 d=32[mm]로 일정히 하고, 침-평판 전극에서 정침과 부침인 DC 전압을 인가한 경우의 자외선 이미징을 나타낸다. 촬영거리는 4,000[mm]이고, 1,000[frame/sec]으로 촬영한 연면방전시의 코로나 방전 사진을 나타낸다. 사진에서 흰점은 전극간에 발생된 자외선이다.

그림 (a)에서 알 수 있는 바와 같이, 정침인 경우에

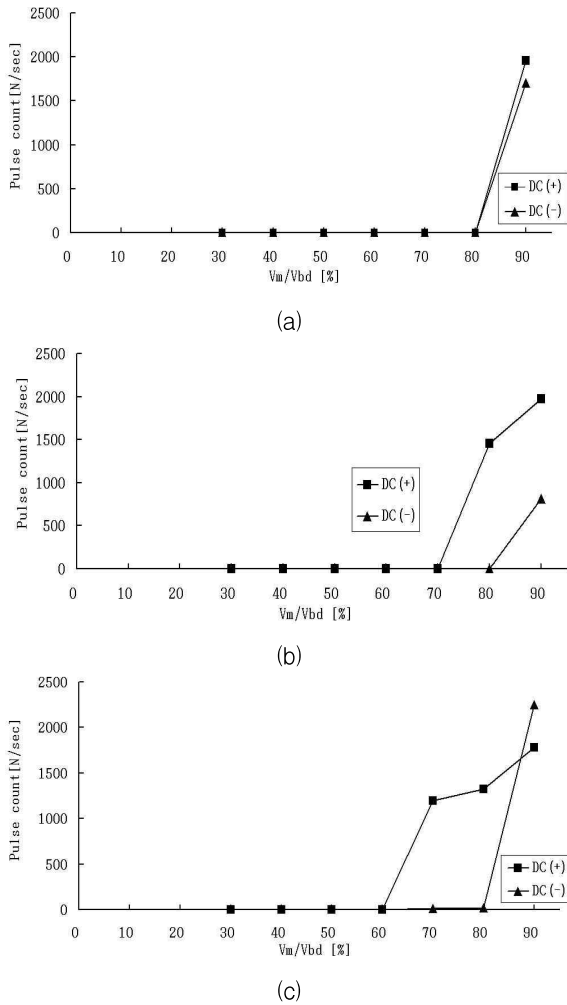


그림 8. 연면 방전 시 V_m/V_{bd} 에 따른 코로나 개수;
 (a) $d=20$ [mm], (b) $d=32$ [mm],
 (c) $d=45$ [mm]

Fig. 8. Numbers of corona according to V_m/V_{bd} ;
 (a) at $d=20$ [mm], (b) at $d=32$ [mm],
 (c) at $d=45$ [mm]

발생되는 자외선은 절연과피 전압의 약 50[%]인 16[kV] 근처에서부터 침전극 선단 근처에서 흰점인 자외선이 발생하고, 전압 증가에 따라서 흰점의 수와 크기가 증가하다가 연면 파괴전압의 90[%]인 28[kV] 근처에서는 흰점의 수와 크기가 전극간에서 GFRP 연면 전체적으로 분포되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 그림 (b)와 같이 부침인 DC 전압에서도 유사하나, 자외선의 발생은 정침보다는 늦은 절연과피 전압의 70[%]인 30[kV]에서부터 나타났다.

3.4 전압변화에 따른 자외선 발생개수

그림 8은 UV 센서를 이용하여 시료와 자외선 센서와의 측정거리 1,000[mm] 거리에서 측정된 자외선 개수를 나타낸다. 코로나 방전시 발생하는 펄스 수를 이미지화하여 계산하였다. 그림에서 (a), (b) 및 (c)는 연면전극 간격(d)을 20, 32 및 45[mm]로 변화시킨 경우의 정침 및 부침인 DC 전압에서의 자외선 발생개수를 나타낸다. 전압은 파괴전압(V_{bd})과 인가전압(V_m)의 비인 V_m/V_{bd} 로 나타낸다. 그림 (a)에서 알 수 있는 바와 같이 정침 및 부침인 DC 전압에서는 어느 경우이나 자외선 개수는 연면과피 전압의 근처인 V_m/V_{bd} 가 80[%]에서부터 발생하여 급격히 증가하다가 90[%] 근처에서 초당 2,000개의 자외선이 발생하다가 연면과피가 일어났다.

연면 전극 간격을 증가시키면 그림 (b) 및 (c)와 같이 자외선 발생 개수는 유사하나, V_m/V_{bd} 의 값이 작아짐을 알 수 있다. 그러나 정침인 경우가 부침 보다는 자외선 발생이 약간 활발하다. 앞의 자외선 이미징의 결과를 뒷받침 하고 있어, UV 카메라로 자외선 측정 시에는 DC의 경우는 자외선 발생이 적고, 전력 기기가 장시간 열화되거나 절연사고로 인한 절연과피 근처에서 발생하기 때문에 사고 예방과 조기진단에 어려움이 있을 가능성이 있다. 차후 개발할 UV 카메라를 이용하여 자외선 발생 수, 크기와 면적 등을 재검토할 필요가 있다.

4. 결론

침-평판 전극의 불평등 전계에서 자외선 발생량 및 형상 분석, 코로나 발생 개수를 측정하고, 기중 연면방전에 대한 정침 및 부침 DC 코로나 방전 특성을 분석하였다.

코로나 노이즈 이득변화는 부침보다는 정침인 DC 전압에서 다소 높으나 연면 파괴전압 근처에서는 이득변화의 상승폭이 매우 컸다.

정침 DC 전압에서 발생하는 자외선은 절연과피 전압의 약 50[%]에서부터 침 전극 선단 근처에서 발생하고, 전압 증가에 따라서 자외선의 수와 크기가 증

가하다가 연면과괴전압 근처에서는 활발하여 GFRP 연면 전체적으로 분포되었다. 부침인 DC 전압에서도 유사하나, 자외선의 발생은 정침보다는 늦게 발생하였다.

자외선 개수는 정침 및 부침 DC 전압에서는 어느 경우어나 연면과괴 전압의 근처인 V_m/V_{bd} 가 80[%]에서 부터 발생하여 급격히 증가하다가 90[%]근처에서 초당 2,000개의 자외선이 발생하다가 연면과괴가 일어났다. 그러나 부침보다는 정침인 경우가 자외선 발생이 약간 활발했다.

특히 부침인 DC 전압의 경우는 자외선 발생이 활발하지 않음을 확인하였다. 따라서 부침인 DC 전압이 인가되는 전력기기에 UV 카메라로 사고 예방과 열화 진단을 하는 경우는 초기의 조기진단에는 어려움이 있을 가능성이 있어 검토가 필요하다.

차후 현재 개발중인 UV 카메라를 이용하여 자외선 발생 수, 크기와 면적 등을 재검토할 필요가 있다.

감사의 글

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

References

[1] 김광화 외, “변압기 절연유 노화 센서 진단용 계측기 개발연구(최종보고서)”, 한국전기연구소, 1993.
 [2] 송현선, 이상돈, “주상변압기의 열화진단을 위한 원격측정”, KIEE, Vol. 17, No. 1, pp. 37-44, 2003.
 [3] M S Naidu, V Kamaraju, “High Voltage Engineering”, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1995.
 [4] EPR, “Guide to Corona and Arcing Inspection of Substations”, 2002.
 [5] 김영석, 최명일, 김종민, 방선배, 송길목, “광학렌즈가 부착된 자외선 센서 어레이를 이용한 폴리머 애자의 코로나 방전 신호 분석과 판별 방법 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2165-2166, 2010.
 [6] L. L. Alston, “High Voltage Technology”, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1995.
 [7] D. J. Kweon, S. B. Chin, H. R. Kwak, “The Analysis of Ultrasonic Signals by Partial Discharge and Noise From the Transformer”, IEEE Trans. POWER Deliv., Vol. 20, No. 3, pp.1976-1983, 2005.

[8] Y. S. Kim, K. M. Shog, “Measurement of Corona Discharge on Pplymer Insulator through the UV rays Sensor includin Optical Lens”, Proc. of ICSD 10th Conference, pp. 1-4, 2010.
 [9] 일본전기학회, “방전 핸드북”, 일본전기학회, 1982.
 [10] 박혜리, 최은혁, 김이국, 이관식, “Dry-Air 중의 전극형상 및 에폭시수지의 크기변화에 따른 연면방전특성 연구”, KIEE, Vol. 23, No2, pp. 154-160, 2009.

◇ 저자소개 ◇



방만식(龐萬植)

1968년 10월 1일생. 1990년 경상대학교 전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



최재형(崔在亨)

1979년 6월 3일생. 2005년 경상대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김우진(金宇鎭)

1987년 2월 1일생. 2011년 경상대학교 전자공학과 졸업. 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.



김영석(金榮錫)

1974년 4월 27일생. 1996년 경상대학교 전기공학과 졸업. 1999년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2002년 일본 야마구치대학 전기전자공학과 객원연구원. 2003년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일생. 1974년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 일본 오사카대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986~1989년 한국전기연구원 초전도 연구실 실장. 1999~2001년 경상대학교 공과대학 학장. 1989년~현재 경상대학교 전기공학과 교수.