

# 코로나방전 탐지기술과 수변전설비의 검출사례 분석

김종민 <삼성방재연구소 선임연구원>  
유재익 <삼성방재연구소 책임연구원>  
김세동 <두원공과대학 교수/공학박사/기술사>

## 1 개 요

최근 산업의 급속한 발전에 따른 각종 전력기기의 초고압화, 대용량화가 진행되어 왔으며, 이에 따른 전력 계통의 안정성 및 신뢰성 향상 등을 통하여 고품질의 전력을 공급하고자 절연물 상호간의 절연협조, 절연물의 건전성 평가 등과 같은 사전예방진단 시스템에 대한 많은 연구가 활발히 진행되어 왔다.

그러나 송배전선로, 애자 및 각종 접속 금구류 등이 제작 및 설치불량, 염분이나 온습도 등의 환경 조건에 의한 훼손 및 노후 등으로 인한 결함 요인으로 아크방전, 단락, 지락 등의 사고로 인한 대형 정전사고가 국내외 지속적으로 발생하고 있는 추세이다.

일반적으로 고전압 이상 전력설비의 아크방전, 단락, 지락 등의 사고는 항복전압(breakdown voltage)에 도달한 절연상태가 깨지면서 발생되고 있으며, 급작스런 기계적 물리적 원인에 의한 사고 이외 제품 결함 및 시공 불량, 환경 조건 등의 영향에 의한 점진적인 절연 파괴는 공기 중의 임계전압이 초과하는 시점의 코로나 방전현상이 선행될 수 있다.

따라서 전기설비 절연저하의 초기 단계인 코로나

방전 개소에 대하여 원인과 향후 영향 분석을 통한 사전 교체 및 보수 처리의 필요성이 대두되어 왔다. 이를 위해 시각적 관찰, 초음파를 활용하는 방법, 자외선 및 적외선 센서식 카메라를 이용하는 방법 등이 코로나 방전개소 검출방법으로 현장에서 응용되고 있으나 경제성, 검출 결과의 신뢰성, 활선 검출 작업시의 편의성 및 안전성 등과 관련하여 여러 가지 문제점이 제기되고 있다.

따라서 본 고에서는 최근 확대 보급 중인 활선상태 사전 예방진단 기술 중 하나인 자외선 코로나 탐지 장비와 관련하여 전자기 원리에 입각한 코로나 방전에 대해 기술하고, 최근 다양한 코로나 방전 검출기법 중 최근 활용도가 증가하고 있는 자외선 센서식 카메라를 이용하는 방법과 수변전설비의 검출 사례를 기술한다.

## 2. 코로나 방전 이론

### 2.1 코로나 방전

코로나 방전은 뾰족한 침전극(針電極)의 주위에 불균일한 전계가 생김에 따라 일어나는 지속적인 방전

의 총칭이다. 이 때 침전극 주변에 보이는 발광 부위를 '코로나'라고 하며, 코로나 방전에 의한 전류는 수 [μA]정도이다. 기체 중에 이온을 증가시킬 수가 있기 때문에 집진기(集塵機) 등에 응용되기도 한다.

불꽃방전 시 코로나는 주방전로(主放電路)가 형성되기 이전에 나타나며, 발광은 전계가 집중되는 침전극 주위에 한정하여 나타난다. 또한 코로나는 침전극의 전극과 전극 사이에 인가하는 전위차에 의해 상태가 변화하며, 양극 측의 침전극에 발생하는 것을 '정극성 코로나'라 하고 음극측의 것을 '부극성 코로나'라고 한다.

침(針)과 평판(平板) Gap 전극의 경우, 침전극을 양극으로 한 정극성 코로나는 전극간에 걸리는 전압의 상승에 따라 전극 끝부분에 밀착된 글로우 코로나로부터 코로나 방전 소음을 동반하는 브러시 코로나를 거쳐서 스트리머 코로나로 되었다가 스트리머 코로나가 맞은편 평판전극에 도달하면 전로 파괴가 되어 불꽃방전이 일어난다. 브러시코로나는 Gap의 길이가 15[cm] 이하의 짧은 경우에는 형성되지 않고 곧바로 스트리머 코로나로 옮겨 간다.

부극성 코로나는 정극성에 비해서 낮은 전압에서 형성되며 스트리머를 동반하는 글로우 코로나가 형성되지만, 정극성과 달리 크게 성장하지 않고 글로우코로나 상태로 전로파괴에 이른다. 전로파괴에 이르는 전압은 Gap 길이가 긴(3[cm] 이상) 경우 정극성 코로나의 경우보다 높다.

침과 침 Gap의 경우, 시계추 코로나의 형성은 나타나지 않고 글로우코로나와 브러시코로나가 나타난다. 대기중에서 Gap 길이가 10[cm] 이하인 경우 브러시코로나의 형성없이 전로파괴에 이른다.

## 2.2 전력설비의 코로나 방전

고전압 이상의 선로, 애자 등과 같은 전력설비의 충전부와 절연체에 인접한 공기의 절연성이 부분적으로

로 파괴되어 빛과 잡음을 내는 현상을 송배전 및 수변전 시설의 코로나 방전 현상이라 한다.

이와 같은 코로나 방전 현상은 인접 공기중의 전기가 국부적으로 임계값을 넘어서면 나타나기 시작하는데, 이를 코로나 발생의 임계전압 또는 파열극한 전위경도(공기의 절연한도)라 하며, 코로나발생 임계전압  $E$ ([kV])의 수식은 다음과 같다.

$$E = m_o \times m_1 \times 24.3 \times d \times \delta \times \log_{10} \left( \frac{D}{r} \right) \quad (1)$$

여기에서,  $m_o$  : 전선의 표면계수,  $m_1$  : 일기계수 (맑은날 1. 우천시 0.8),  $\delta$  : 상대공기밀도 ( $= \frac{0.386b}{273+t}$ )

식 (1)에서 보는 바와 같이 임계전압이 높을수록 코로나 발생이 적으며, 코로나 방전에 직접적인 영향을 미치는 요소는 대기압, 온도, 습도 등이다. 대기압이 낮으면 임계전압이 또한 낮아지면서 코로나는 증가하게 되고 높은 습도는 코로나 방전을 지속적으로 유지시키게 되며 온도가 높아지면 낮은 대기압, 낮은 임계전압으로 인한 높은 코로나 방전현상을 발생시킨다. 전선 표면으로부터 거리에 따른 선로의 전위경도는 그림 1과 같이 표현된다.

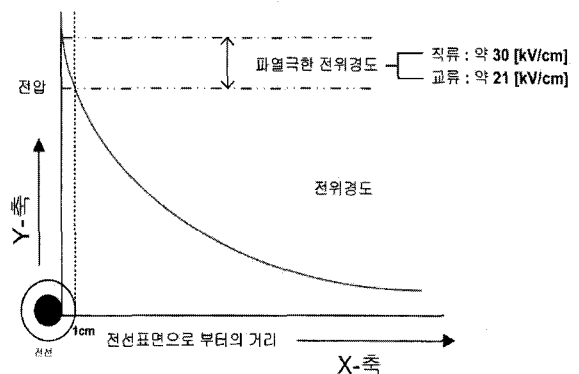


그림 1. 전위 경도

## 2.3 코로나 방전의 영향 및 대책

시간적, 공간적으로 방전 에너지의 집중도가 작기 때문에 수소 가스와 같이 최소 착화 에너지가 특히 작은 물질을 제외하면 착화원이 되지 않는 대신 질소 및 산소 등의 성분과 결합하면서 질산화합물(NO<sub>3</sub>)과 오존(O<sub>3</sub>)이 생성되며, 오존과 질산화합물은 산화력이 강하기 때문에 애자나 전선 등의 재질 부식을 가속화시키고 절연소재의 열화를 초래하는 일이 많고 장기적으로는 중대한 절연의 문제를 야기시킨다.

이외에도 코로나(전력) 손실, 코로나 잡음, 통신선의 유도장해, 소호리액터의 소호능력 저하 등의 영향을 주게 되는데 코로나 방전 시 전력 손실은 다음과 같다.

$$P = \frac{241}{\delta} (f+25) \sqrt{\frac{d}{2D}} (E - E_0)^2 \times 10^5 \text{ [kW/km/line]} \quad (2)$$

단,  $E$  : 전선의 대지전압[kV],  $E_0$  : 코로나 임계 전압[kV],  $f$  : 주파수,  $d$  : 전선의 지름[cm],  $D$  : 선간거리[cm],  $\delta$  : 상대공기밀도이다.

또한 코로나 잡음은 라디오 및 텔레비전 잡음 장애와 가청소음 장애를 초래하고, 코로나 전류 중의 제3고조파 성분이 중성점 전류로 나타나 중성점 직접접지 방식의 송전선로 부근의 통신선에 유도장해를 주게 되며, 1선 지락시 건전상 대지전압 상승에 의한 코로나 발생은 고장점의 잔류 전류의 유효분을 증가해서 소호능력을 저하시키게 된다.

따라서 절연저하 초기 단계인 코로나 방전현상이 발생되지 않도록 하는 것이 전력설비의 신뢰성 향상에 기본이 되는 부분이라 할 수 있으며, 설계 또는 시공 단계에서 코로나 발생을 최소화하기 위해서는 임계 전압을 높이는 일환으로 전선 굵기를 크게 하거나 복도체를 사용하게 하고 있다.

## 3. 코로나 방전의 검출 및 탐지 방법

### 3.1 코로나 방전의 검출 및 장비 동향

전기에너지는 운동에너지, 열에너지 등 다양한 에너지 변환이 가능하고 이동, 저장 등이 용이하다. 전기 사고에 의해 열에너지로 전환되는 과정은 각 설비의 조건에 따라 달라지며, 고전압으로 갈수록 절연 파괴에 의한 방전사고가 많아진다. 특히 고전압 이상의 전력설비 열화 사고에 대해서는 적외선 열화상 카메라를 이용하여 전기설비의 과부하, 절연 파괴 등에 의해 발생하는 열에너지를 효과적으로 검출함으로써 사고를 미연에 방지하는데 큰 역할을 해 오고 있었으나, 열화상 카메라에 의한 열화 개소는 이미 재료의 열화로 인한 설비의 오염이 상당량 진행되었을 가능성이 높기 때문에 열화 시점보다 이전 단계인 미소한 누설 전류에 의한 코로나 방전개소에 대한 검출 또한 중요하게 다루어지고 있다.

기존 코로나 검출장치는 초음파를 집중하여 확인하는 방법으로 안테나와 증폭장치 등이 있었으나, 대상물의 코로나 발생 위치를 정확하게 분석할 수 없으며, 검사자의 주관에 따라 타겟이 벗어난 경우 코로나 검출이 실패할 수도 있는 단점이 있다. 그러나 최근 코로나 방전현상 검출의 신기술로 대두되어 확대 보급되고 있는 코로나 카메라는 초기 방전현상에서 발생하는 자외선을 검출하여 영상으로 보여 주는 특징이 있어 기존 초음파에 의한 검출 장비에 비해 정확한 방전위치를 검출할 수 있게 되었다.

자외선 카메라는 앞에서 언급하였듯이 전기에너지의 방전 현상을 초기에 검출할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 장비를 생산하는 곳은 세계적으로 미국, 이스라엘, 남아프리카공화국 등이 있다.

미국의 경우 일본의 소니(SONY)사와 기술 제휴된 에드먼드(Edmund)사에서 출시되었으며, 자외선 파장범위가 300~420(nm)로 되어 있다. 또한 남아

프리카 공화국에서 생산되는 자외선 카메라는 자외선 검출범위가 240~280(nm)로 눈에 보이지 않는 자외선 영역의 검출이 가능하며, SCIR에서 생산되는 자외선 카메라중 CoroCam 504와 MultiCam의 경우 자외선 및 적외선 이미지의 동시 검출이 가능한 것으로 되어 있으나, 실제 전력계통에 적용되었을 경우 적외선 열화상으로의 방사율에 따른 오차 등을 해결해야 하는 문제가 있다.

이스라엘의 경우 DayCor II 모델의 자외선 카메라가 Ofil사에서 제작되어 코로나 및 아크를 탐지할 수 있으며, 미국전기연구원(EPRI)에 의해 응용 연구 및 실전 테스트가 진행되어 지상 송전선의 코로나 및 아크검사 가이드가 제공되고 있다. 자외선 검출영역은 240~280(nm)로 되어 있으며, 검출되는 직경이 남아공의 장비보다 큰 것으로 나타나 있어 검출 분해능 등이 탁월한 성능을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

표 1은 기존의 코로나 측정 장비와 장단점을 비교하여 나타낸 것이다. 표에서도 알 수 있듯이 기존에는 초음파, UHF 안테나 등이 주를 이루었으며, 대상물의 위치에서 정확한 사고 발생 지점을 찾기는 매우 어려웠다. 자외선 검출장치를 이용하여 이러한 단점을 쉽게 극복할 수 있다. 가장 큰 특징으로는 사고 발생 지점을 정확하게 확인할 수 있으며, 전문가가 아니라도 쉽게 이해하고 접근할 수 있는 이미지 분석이 가능하다는 것이다. 또한 자연계에서 방출되는 자외선 영역이 아니라 코로나 발생시에만 나타나는 자외선 영역 중 특정대역을 검출함으로써 획기적으로 노이즈를 없앨 수 있다는 장점을 가지고 있다.

표 1. 코로나 측정 장비의 장단점 비교

구분	초음파, UHF 안테나 등	자외선 검출
코로나 검출 대상	조음파, 전자파	자외선
대상물 위치	광범위, 개괄적	정확한 위치 검출
분석 방법	사용자의 주관 개입	이미지 판독으로 객관성 확보
노이즈	환경에 민감	특정대역의 자외선 검출로 거의 없음
활용성	전력설비 전반	전력설비와 주변 시설의 영향 포함

### 3.2 DayCor II 장비 특징 및 탐지 방법

지구 상의 태양 복사(solar radiation) 측정 자료를 보면, 대기권에 도달하는 에너지는 대부분 가시광선 영역으로 되어 있음을 알 수 있으며, 코로나 방전은 230~405(nm) 파장 대역의 자외선을 방출하게 되며 자외선 검출장치는 230~280(nm)의 파장대역에 있는 자외선 영역을 검출하게 된다.

그림 2는 Solar Blind 필터의 코로나 방전 탐지영역을 나타낸 것이며, 태양에서 방출되는 자연적인 자외선 범위를 벗어난 것으로 노이즈를 최소화 할 수 있고, 불꽃방전 이전 상황을 검출함으로써 사고발생 추이를 주기적으로 점검할 수 있다는 장점이 있다. 그림 3은 자외선 검출장비의 개념도를 나타낸 것이다

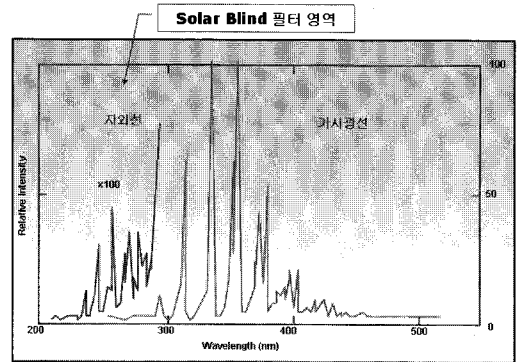


그림 2. Solar Blind Filter와 태양 복사

이 장비에는 Counting, Gain, Display Mode, Visible Zoom의 기능이 있으며, Counting은 코로나가 발생하는 횟수를 나타내는 것으로 이를 선택하면 일정 공간내에서의 코로나의 발생 횟수를 측정할 수 있다. 자외선의 양을 정량화할 수 있으며, 각 Gain 상태에서 자외선의 크기는 다르게 나타난다. Display Mode는 액정 화면에 나타나는 이미지를 실화상, 자외선 이미지, 자외선 이미지와 실화상을 동시에 나타나게 하는 기능을 가지고 있으며 그림 3과 같이 활선상태에서 코로나 방전상태와 실화면을 동시에

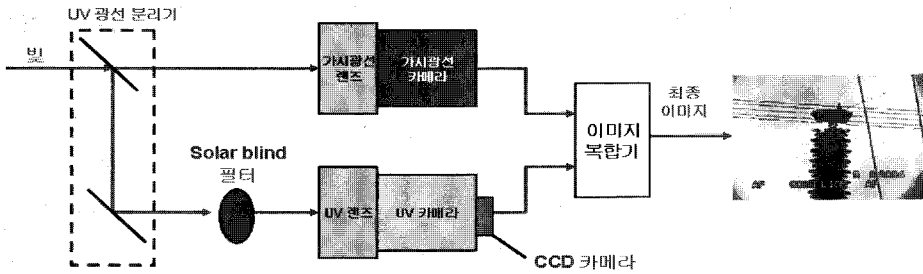


그림 3. 자외선 검출장비의 개념도

제공할 수 있다.

이와 같은 장비를 사용하면 쉽게 하루 중 어느 시간 대나 어떤 날씨 조건에도 송전 설비 곳곳에서 발생하는 방전 현상을 원거리에서 발견할 수 있어 원거리에서도 전력설비의 상태를 점검하는 것이 가능하며, 탐지 방법은 장비 유형에 따라 지상 순찰, 차량 탑재, 항공기 장착 등으로 활용하여 측정할 수 있다.

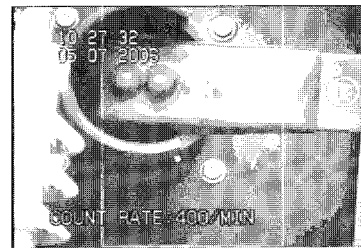
#### 4. 수변전설비의 유형별 검출사례

자외선 특정대역의 검출을 통한 전력설비의 코로나 방전 검출은 암류(dark current)가 발생되는 시점에서 검출이 가능하다는 장점이 있다. 이는 사고가 발생하기 훨씬 이전의 상태를 나타내는 것으로 시차적인 관점에서 보면 지속적인 모니터링을 통하여 예방 또는 교체시기를 진단하고 사고를 미연에 방지할 수가 있어 여러 가지 전력설비 활선 진단기법 중 효과적인 방법의 하나가 될 것이다. 여기에서는 수변전설비의 유형별 코로나 방전 검출사례를 기술하고자 한다.

##### 4.1 22.9(kV) 배전반 내부 진공차단기의 코로나 현상

그림 4는 옥내 및 옥외 22.9(kV) 배전반 내부에 설치된 진공차단기(VCB) 후면에서 검출된 코로나 현상이다. 분당 코로나 방전 횟수인 Count Rate는 3115/[min]으로 측정되었고, 차단기와 전원 부스

접속구역인 스켈톤과 차단기 외함 틈새에서 방출되는 코로나 현상으로 절연파괴로 인한 사고 징후를 보여주고 있으므로 정전을 수반한 정밀진단이 요구되는 부분이다.



(a)



(b)

그림 4. 22.9(kV) 배전반 내부 진공차단기의 코로나 현상

##### 4.2 22.9(kV) 배전반 내부 진공차단기 단락 표시판의 코로나 현상

그림 5는 옥외 22.9(kV) 배전반 내부에 설치된 진공차단기(VCB) 후면에서 검출된 코로나 현상이

다. 분당 코로나 방전 횟수인 Count Rate는 927/[min]으로 측정되었고, 차단기의 각 상별로 설치된 단락 방지판과 차단기 외함 사이에서 코로나 방전현상이 검출되고 있으며, 애자 하부에 보여지고 있는 오염 흔적과 경년 열화 등에 대한 정밀분석을 통하여 단락 방지판을 포함한 차단기의 전체적인 세정조치가 필요한 부분이다.

하여 습도가 70[%] 이상을 나타내고 있었고, 다음 날 습도가 40[%]인 맑은 날씨에 재측정해 본 결과 Count Rate가 100/[min] 수준의 방전현상이 간헐적으로 나타났다. 이는 습도 및 대기압의 변화에 따라 급격하게 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 Count Rate는 이상 여부를 판정하기 위한 절대적인 기준으로 삼기에는 많은 어려움이 있다.

### 4.3 154/22.9[kV] 유입식 변압기 2차측 22.9[kV] 버스 지지애자의 코로나 현상

그림 6은 154/22.9[kV] 유입식 변압기 2차측 22.9[kV] BUS 지지애자에서 나타난 연면방전에 의한 코로나 현상이다. 방전 현상에 따른 열화로 인하여 폴리머 지지애자 표면이 변색 진행 중으로 지속 방치 시 절연파괴로 인한 지락사고의 사전 징후를 보여주고 있다. 측정 당시 흐리고 보슬비가 내린 날씨로 인

### 5. 맺음말

본 고에서는 향후 전력설비의 효율적인 유지 및 보수를 통한 신뢰성 증대를 위하여 송배전 선로에서 사용되고 있고, 최근 국내에 확대 보급되고 있는 자외선 코로나 탐지카메라의 개요와 검출 사례를 살펴보았다.

시각적으로 코로나 방전현상과 발생위치를 정확히 검출해 낼 수 있는 신기술 장비로써 향후 효과적인 응용이 기대되는 장비이나, 검출된 코로나 방전현상에

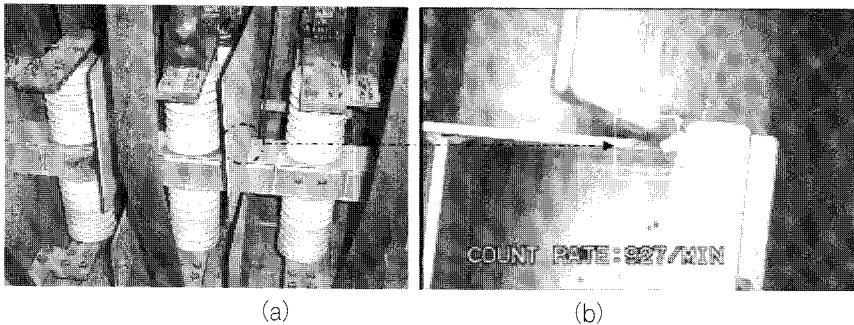


그림 5. 22.9[kV] 배전반 내부 진공차단기 단락표지판의 코로나 현상



그림 6. 22.9[kV] 유입식 변압기 2차측 22.9[kV] BUS 지지애자의 코로나 현상

대한 판정 기준과 향후 예상수명 판독하는 기술이 전 세계적으로 현재까지는 미흡하여 그 필요성이 대두되고 있는 실정이며, 국내의 경우 또한 절실히 요구되고 있다.

Ofi사에서 주관하는 UGM(User Group Meeting) 자료에 의하면 해외 각 지역 중 구주 및 미주 지역의 코로나 현상 분석에 대한 접근 방법이 한국이나 중국 등 아시아 지역에서 추구하는 방법과는 다소의 차이가 있음을 인지할 수 있다.

즉 구주 및 미주 지역의 경우 기본적으로 코로나 방전의 발생량보다는 발생 지점을 정확히 발견하고 원인을 밝히는데 주안점을 두고 있어 관련된 각종 Case를 서로 공유하여 원인에 대한 검토 의견을 교환하는 활동이 활발하게 이루어지고 있는 추세이며, 따라서 판정기준에 대한 시급한 요구보다는 발생 현상과 원인에 대하여 코로나 진단 장비 외 적외선 열화상 카메라 등 기타 추가 장비를 동원한 정밀한 조사가 이루어져야 한다고 판단하고 있다.

그러나 국내의 경우 진단 시 측정된 코로나 방전현상에 대하여 판정 기준과 현재 상태, 그리고 향후 예상 수명 등을 요구하는 의뢰인이 대부분이기 때문에 장비 사용자들의 니즈가 판정 기준에 대한 기준 정립이 우선적으로 개발되어야 한다는 생각이 우세한 실정이다.

장비 에이전트사에서도 전문기관에 의뢰하여 판정 기준을 제시하고자 노력하고 있으나, 설비 종류와 코로나 방전현상에 영향을 주는 각종 환경 조건이 워낙 다양하기 때문에 일부분에 해당된 내용이고, 초보 단계의 수준이기 때문에 코로나 방전현상 탐지기술 및 기술에 대한 데이터 축적과 상호 공유는 기본적으로 지속되어야 한다.

기본적으로 코로나 방전의 발생량보다는 발생 지점을 정확히 발견하고 원인을 밝히는 것을 포함하여 결과에 대한 Reporting 기술과 다양하게 존재하고 있는 각종 환경 조건에 대한 일반화된 방정식 개발 등이

연구되어야 할 과제이며, 측정 데이터에 대한 판정 기준과 수명 예측에 대한 연구 활동도 반드시 촉구되어야 할 것이다.

### 참고문헌

- (1) 송길영, 송배전공학, 동일출판사, 2006.
- (2) Ofi사 UGM(User Group Meeting) 스테디 자료, 2006.
- (3) 한국전기안전공사 전기안전연구원, '코로나 카메라를 이용한 22.9(kV) 배전선로에서의 탐지기술, 2006.
- (4) 자외선 코로나 방전 검출진단 결과(국내 12개 제조사업장 대상), 삼성방재연구소, 2006.
- (5) Ofi사 인터넷 사이트 및 User Guide.

### ◇ 저 자 소 개 ◇

#### 김종민

1992~1995년 한국전기안전공사 근무. 1995년~현재 삼성방재연구소 선임연구원. 2007년 서울산업대학교 대학원(안전공학) 재학.  
주관심분야 : 전기 안전 및 화재 예방

#### 유재익

1999년 한림대학교 수학과 및 전자공학과(복수전공) 졸업. 2004년 서울산업대학교 대학원(안전공학) 졸업(석사). 한국전기하이테크 PSDTECH(주) 근무. 현재 삼성방재연구소 책임연구원.  
주관심분야 : 접지 및 고조파



#### 김세동(金世東)

1956년 3월 3일생. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동대학원 졸업. 2000년 서울시립대학교 전기전자공학부 대학원 졸업(박사). 한국전력공사 건설처 근무. 한국건설기술연구원 수석연구원 역임. 현재 두원공과대학 교수. 건축전기설비기술사. 본 협회 편수위원/학술이사.

주관심분야 : 전기설비 및 에너지진단, 최적 설계