

# 수직배치 구대평판 공기 갭에서 연소화염 존재시의 절연파괴 특성

(Breakdown Characteristics of a Vertical Sphere-Plane Air Gap in the Presence of Combustion Flame)

김인식\*

(In-Sik Kim)

## Abstract

In this study, breakdown characteristics of a vertical sphere-plane air gap in the presence of combustion flame were examined under the application of a.c. and d.c. high-voltages in order to investigate the effect of flame on the dielectric strength of air. Propane gas is used as the fuel of the flame, and the temperature distribution of air around the flame is measured. The polarity effects for the d.c. voltages and breakdown voltages of air when applied both of a.c. and d.c. voltages were examined in the case of the variation of the gap length and the horizontal distance between the flame and the high-voltage sphere electrode. The influence of relative air density, electrification and shape changes of the flame as factors that affect the breakdown voltages were discussed.

Key Words : Combustion Flame, Breakdown Characteristics, Polarity Effect

## 1. 서 론

대기압 공기나 각종 기체(SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub> 등)의 절연파괴현상에 대해서는 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 절연매질로서 대기압 공기는 가격이 가장 싸며, 손쉽게 얻을 수 있으며, 용기도 필요하지 않기 때문에 송전선, 배전선 등의 절연에 가장 많이 이용되고 있다.

한편 전력계통이 점차 확대됨에 따라 고전압 도체 부근에 연소화염이 존재하는 특수 환경도 많이 발생

되고 있다. 예로서 송전선 아래에서 산불 등 화재가 발생한 경우, 기중절연을 사용한 각종 배전기기에서 화재가 일어난 경우, 차단기 아크에 의한 재점호현상을 억제하는 경우 등에서는 화염의 영향이 매우 중요하게 된다[1-2].

화염자체에 대한 전기적 특성은 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나 이러한 연구는 대부분 화염 자체의 임피던스 특성이나, 전위분포에 따른 화염의 저항률, 기타 물리적 특성 등에 대해 보고하고 있다. 예를 들면 K. Koyama 등은 MHD발전과 관련하여 칼륨 등을 시드(seed)한 화염의 도전율을 임피던스 법으로 측정하였으며, 또한 H. Kiwaki 등은 버너(burner)를 전극으로 하여 교류 브리지를 형성함으로써 화염의 도전율을 구하였다. 그러나 고전압 및 방전공학적

\* 주저자 : 경일대학교 철도전기공학부 교수  
Tel : 053-850-7143, Fax : 053-850-7602  
E-mail : iskim@kiu.ac.kr  
접수일자 : 2011년 2월 24일  
1차심사 : 2011년 3월 1일  
심사완료 : 2011년 3월 30일

측면에서 금속전극 사이에 화염이 존재하는 경우 절연내력에 미치는 영향에 대해서는 많이 발표되지 않아 연구의 필요성을 느낀다[3-4].

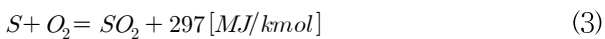
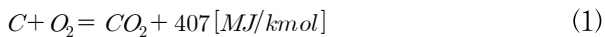
송전선 아래 발생된 화염에 의해 도체와 대지사이 섬락사고가 일어나는 상황은 수직배치 침대 평판전극으로 모델화될 수 있으나, 이 경우 침 전극으로부터 발생된 코로나 풍(corona wind)에 의해 화염은 소화되는 것으로 나타났다[5-6].

따라서 본 논문에서는 화염의 소화현상이 없는 조건에서 절연과피특성에 미치는 화염의 영향을 조사하기 위해 수직배치 구대평판전극으로 구성하였다. 평판전극 중앙에 화염이 존재할 때, 전극 간 갭 길이 변화에 따른 직류 및 교류전압에 대한 절연과피전압을 조사하였다. 또한 고전압 도체에 화염이 접근할 경우 절연내력에 미치는 영향을 조사하기 위해 구전극과 화염의 수평거리를 변화시킨 경우에 대해서도 절연과피전압을 측정하였다.

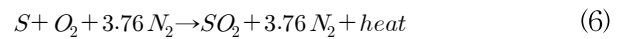
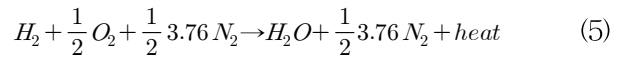
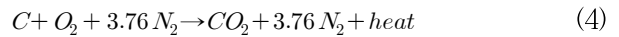
## 2. 화염의 연소반응

일반 중력장에서 화염의 연소현상으로서 화염내부에 연료와 공기(또는 산소)가 공급되면, 화학반응에 의해 반응영역으로부터 빛과 열을 발생한다. 연소 가스는 자연대류에 의해 상부로 이행하므로 보통 측면보다는 화염상부에서 고온이 발생된다.

연소에 의해 열을 발생하는 성분원소는 주로 탄소(C), 수소(H), 황(S)이므로 이들 가연(可燃)원소의 연소 화학방정식은 다음과 같다[7].



연료의 연소에 의해 생성되는 고온 가스를 연소가스라 하고, 일반 연소성분에 대한 연소반응식은 다음과 같다.



따라서 가연성 연료 중 탄소, 수소, 황 성분은 산소와 결합하는 연소과정에서 다량의 연소열을 발생하게 된다.

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 고전압 발생 및 측정

그림 1은 전극구성과 연소화염을 나타낸 실험장치의 개략도이다. 교류 고전압의 발생은 고전압 발생장치(high voltage generator; 일본 Matsunaga co.)를 사용하였으며, 직류 고전압은 정류회로와 실리콘정류기(일본 Tokyo Transformer co.)를 사용하였다. 고전압 측정은 고압프로브(high voltage probe)와 디지털 오실로스코프(미국 LeCroy co.)를 사용하였으며, 고압프로브는 그림 1에서  $R_1$ ,  $R_2$ 이며, 보호용 저항  $R_L=50[k\Omega]$ 은 방전에 의한 전극 손상을 방지하기 위한 것이다.  $R_M=10[k\Omega]$ 은 방전전류 측정용 저항이다. 그림 1과 같

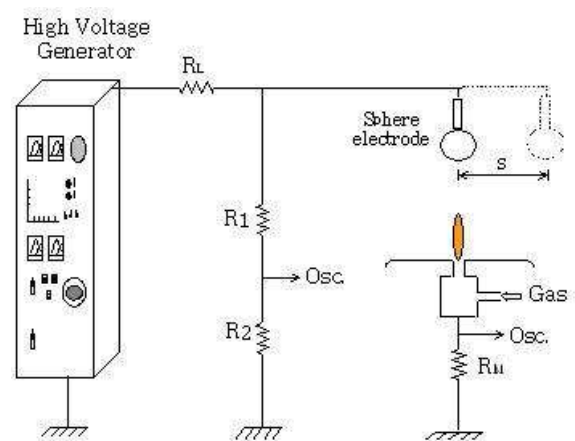


그림 1. 실험장치의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

이 평판전극 중앙에 직경 2[mm]의 화염 노즐을 설치하고, 하부에서 공급된 프로판 가스(propane gas)에 의해 일정한 화염을 발생시켰다. 전극은 스테인레스강(stainless steel)이며 구 전극은 직경 50[mm], 평판전극은 직경 150[mm]로 제작하였다.

연료인 프로판 가스는 무색무취이며, 주성분은 메탄계의 탄화수소(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)이다. 0[°C] 1기압에서 1[ℓ]의 질량은 2.02[g]으로 공기의 약 1.56배이며, 발열량은 약 23,550[kcal/m<sup>3</sup>]이다.

화염의 크기는 전압이 인가되지 않는 상태에서 높이 3[cm]로 일정하게 유지하였으며, 이는 압력밸브와 유량계를 조정함으로써 요동이 없는 안정 화염을 얻을 수 있었다.

### 3.2 연소화염의 온도분포

화염의 내부온도 및 화염주위의 대기온도를 측정하였다. 온도측정 시 100[°C] 이하 저온부는 서미스터 온도계를, 고온부는 약 1,600[°C]까지 측정 가능한 백금-백금로지움으로 구성된 열전대 온도계(thermometer; 일본 Shimadzu co.)를 사용하였다.

프로판 화염의 주위 공기에 대한 등온선분포는 이미 보고하였다[5]. 등온선분포로부터 거리에 따른 온도 변화량 즉 온도구배로 나타내면, 수평방향의 온도구배가 수직방향보다 큰 것으로 나타나고 있다. 이는 자연 대류에 의해 연소가스가 화염의 수직 상방향으로 진행하기 때문이라고 생각된다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 갭길이에 따른 절연파괴 전압 특성

그림 2는 교류전압 인가 시 수평거리 s=0[cm]일 때, 갭길이에 따른 절연파괴 전압특성을 나타낸 것이다.

측정치는 실효값이며 화염이 없을 때와 화염이 존재할 때의 파괴전압을 함께 나타내었다. 그림과 같이 화염이 존재할 때의 파괴전압은 화염이 없는 경우에 비해 매우 저하된 것으로 나타났다. 여기서 화염 존재

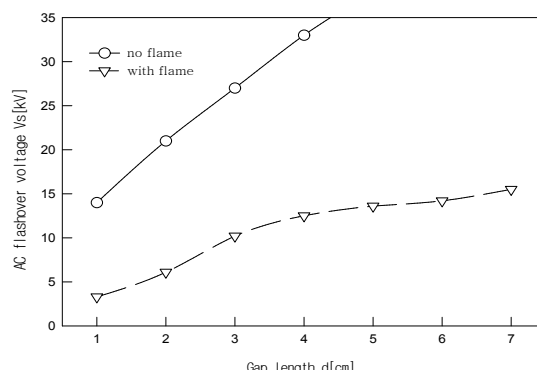


그림 2. 갭길이에 따른 교류 절연파괴 전압의 관계  
Fig. 2. Relationship between a.c. flashover voltage vs. gap length

시 절연내력의 저하를 나타내기 위해 화염이 없을 때의 파괴전압을 기준값(100)으로 하고, 화염이 존재할 때의 파괴전압을 상대값[%]으로서 표시하였다. 실험 결과, 갭길이 d=1[cm], 2[cm], 3[cm] 및 4[cm]일 때, 화염 존재 시 파괴전압의 상대값은 각각 23.6[%], 29.1[%], 37.8[%] 및 37.9[%]인 것으로 나타났다. 따라서 비교적 단 갭에서 구대평판 전극인 경우, 연소화염이 존재할 때의 교류 절연파괴전압은 화염이 없는 경우에 비해 평균 32.1[%], 약 1/3의 절연내력을 갖는 것으로 나타났다. 이는 고온 화염으로 인해 공기 갭에서 상대공기밀도의 저하에 기인하는 것으로 생각된다. 여기서  $V_s$ 를 표준상태의 절연파괴전압,  $p$ 를 기압[mmHg],  $t$ 를 온도[°C]라 하면, 온도와 기압변화에 따른 파괴전압  $V_t$ 는 다음 식과 같이 표시될 수 있다[8].

$$V_t = V_s \frac{0.392 p}{273 + t} \quad (7)$$

그림 3은 대기압 공기의 온도변화에 따른 절연파괴 전압의 상대값을 나타낸 것이다.

그림 3과 같이 화염주위의 온도환경인 약 350[°C]에서 공기의 파괴전압은 표준상태인 20[°C]에 비해 약 50[%]이하로 감소되는 것을 알 수 있다. 온도가 약 600~700[°C]로 상승하게 되면, 절연파괴 전압은 약 1/3로 감소된 것을 알 수 있다. 따라서 화염이 존재하지 않는 정상적 기상상태에서의 보정계수는 대개 수

[%] 이내이지만, 화염이 존재하게 되면 그 영향은 매우 크다는 것을 알 수 있다.

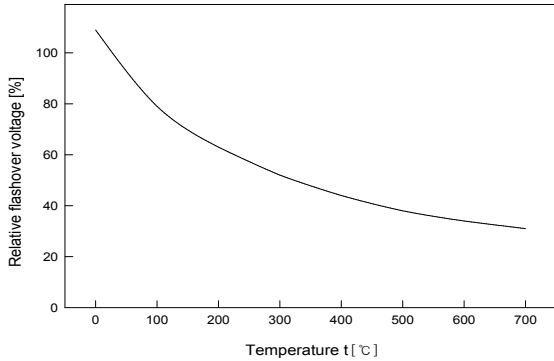


그림 3. 온도와 상대적 절연파괴 전압의 관계  
Fig. 3. Relationship between relative flashover voltage and temperature

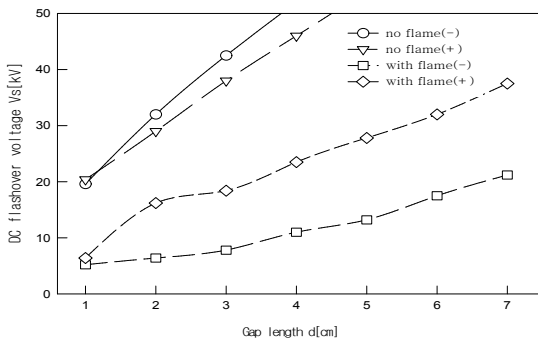


그림 4. 갭길이와 직류 절연파괴 전압의 관계  
Fig. 4. Relationship between d.c. flashover voltage vs. gap length

그림 4는 직류전압 인가 시 수평거리  $s=0$ [cm]일 때, 갭길이에 따른 절연파괴특성을 나타낸 것이다. 여기서 화염이 존재할 때의 파괴전압은 화염이 없는 경우에 비해 크게 저하된 것으로 나타났다. 또한 직류전압에서는 극성효과가 뚜렷이 나타나고 있다. 그림 4에서 화염이 없는 경우에는 부극성의 파괴전압이 정극성인 경우보다 약간 높았으나, 화염이 존재할 때는 부극성 파괴전압이 정극성보다 상당히 낮은 것으로 나타났다.

실험결과, 갭길이  $d=2$ [cm],  $3$ [cm] 및  $4$ [cm]일 때, 정극성 전압에 대한 파괴전압의 상대값은 각각 55.8%,

52.6[%] 및 52.1[%]이였으나, 부극성인 경우는 각각 19.1[%], 14.8[%] 및 21.1[%]인 것으로 나타났다.

따라서 부극성인 경우 파괴전압의 평균값은 18.3[%]이며, 이는 정극성일 때의 평균값 53.5[%]보다 매우 낮은 것을 알 수 있다. 이는 전압극성에 따라 화염 형상의 변화에 기인하는 것으로 생각된다. 화염은 어느 정도 전리(ionization) 상태에 있으므로 정부이온이 존재하나, 이동도가 큰 전자는 전극으로 쉽게 이동하여 화염 중에는 정이온(positive ion)이 다수 존재하는 것으로 생각된다. 따라서 대전된 화염은 외부 전계에 대해 흡인 또는 반발력이 작용하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 수평거리에 따른 절연파괴 전압 특성

그림 5는 교류전압 인가 시, 갭길이  $d=1$ [cm]에서  $d=5$ [cm]까지 변화시킨 경우, 수평거리  $s$ 에 따른 화염에 의한 절연파괴 특성을 나타낸 것이다. 여기서 파괴전압은 실효값이며, 수평거리는 화염 중심으로부터  $s=5$ [cm]까지 변화시켰다. 그림 5에서 보듯이와 같이 교류 파괴전압은 갭길이  $d$  및 수평거리  $s$ 에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 수평거리에 대한 절연파괴전압의 변화를 나타내기 위해 여기서는 수평거리에 대한 전압상승률로 표시하였다.

실험결과 갭길이  $d=1$ [cm],  $3$ [cm] 및  $5$ [cm]인 경우 수평거리  $s$ 의 증가에 따른 파괴전압의 평균상승률은 각각 1.9[kV/cm], 2.7[kV/cm] 및 3.2[kV/cm]인 것으로 나타났다. 이는 수평거리  $s$ 가 증가함에 따라 공기 갭에서 대기 온도는 저하되고, 상대공기밀도는 증가하기 때문이라고 생각된다.

그림 6은 직류전압 인가 시, 갭길이  $d=2$ [cm] 및  $d=4$ [cm]에서 수평거리  $s$ 에 대한 절연파괴전압 특성을 나타낸 것이다. 그림과 같이 수평거리  $s$ 가 작은 범위에서 극성효과는 크게 나타났으나, 어느 범위 이상  $s$ 가 증가하면 극성효과는 나타나지 않았다. 극성효과를 나타내는 범위에서 부극성의 파괴전압은 정극성에 비해 매우 낮은 것으로 나타났다. 그리고 정극성의 파괴전압은 수평거리에 비례하여 완만하게 증가되고 있으나, 부극성의 파괴전압은 수평거리  $s=2$ [cm]까지는 매우 낮지만,  $s=3$ [cm]부터는 정극성의 파괴전압과 거의

동일한 값으로 나타나고 있다. 직류전압에 대해서는 극성효과가 나타나는 범위, 즉  $s=3[\text{cm}]$ 까지의 평균상승률로서 나타내었다.

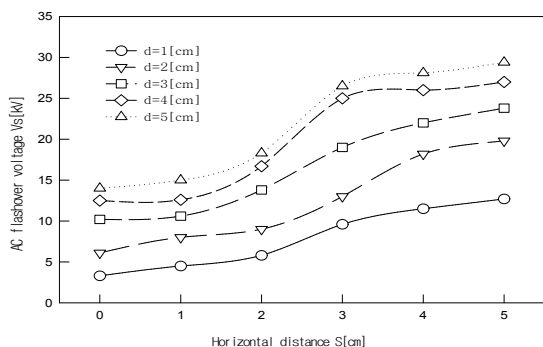
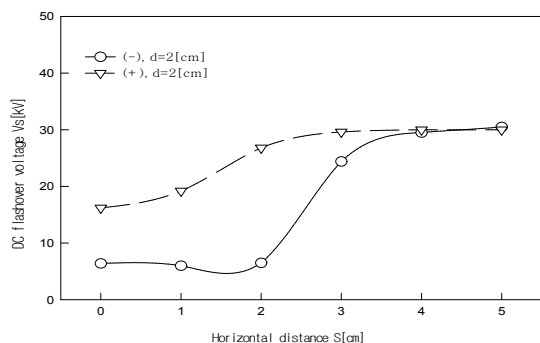
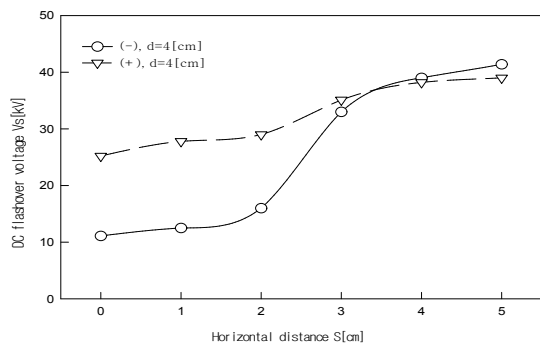


그림 5. 수평거리와 교류 절연파괴 전압의 관계  
Fig. 5. Relationship between a.c. flashover voltage vs. horizontal distance



(a)  $d=2\text{cm}$



(b)  $d=4\text{cm}$

그림 6. 수평거리와 직류 절연파괴 전압의 관계  
Fig. 6. Relationship between d.c. flashover voltage vs. horizontal distance

실험결과, 갭길이  $d=2[\text{cm}]$  및  $4[\text{cm}]$ 인 경우, 수평거리  $s$ 에 따른 정극성 파괴전압의 평균상승률은 각각  $4.4[\text{kV/cm}]$  및  $3.3[\text{kV/cm}]$ 이였으며, 부극성일 때는 각각  $6.0[\text{kV/cm}]$  및  $7.3[\text{kV/cm}]$ 로 나타났다. 따라서 정극성 평균상승률의 평균값은 약  $3.8[\text{kV/cm}]$ 이며, 부극성일 때의 평균값은 약  $6.7[\text{kV/cm}]$ 로서 부극성일 때가 정극성에 비해 약 2배 높은 값을 나타내고 있다. 이는 화염에 의한 절연파괴전압이 부극성에서 매우 낮은 것을 의미하고 있다. 이는 부극성 전압에서 화염과 구전극 사이에 작용하는 인력에 의해 화염은 전극사이 가교 역할을 하기 때문인 것으로 생각된다.

그림 7은 수평거리  $s$ 에 구전극이 위치하고 있으며 정극성 전압이 인가된 경우, 화염의 형상변화를 나타낸 것이다. 여기서 화염 형상 A는 전압이 인가되지 않은 상태이다. 전압을 상승시키면 화염은 열전리로 인해 미약하게 정전하로 대전되어 있음으로 인가 전계에 의해 화염은 반발력이 작용하여 형상 B와 같이 기울어지게 된다. 전압이 더욱 상승되면 C와 같은 형상으로 변형되고 있다.

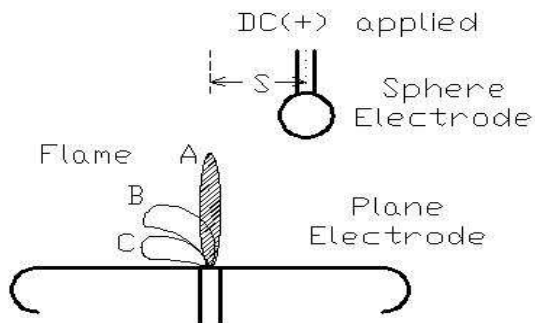


그림 7. 정극성 직류전압에 대한 화염형상  
Fig. 7. Shapes of the flame with the positive d.c. voltages

그림 8은 부극성 전압에 대한 화염 형상을 나타낸 것이다. 역시 전압이 인가되지 않는 상태에서는 형상 A와 같이 표시되지만, 전압인가에 따라 형상이 변화된다.

부극성 전압에서 화염과 구전극은 흡인력이 작용하므로 인가전압의 상승과 함께 화염은 가늘게 신장되면서 형상 B에서 C로 변화하게 된다.

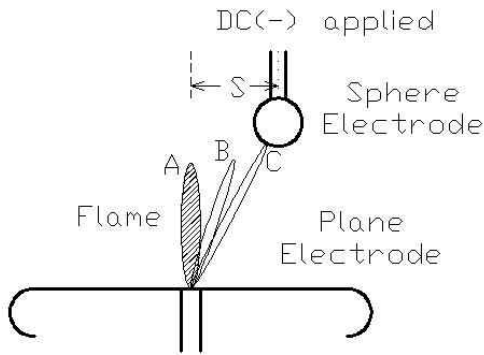


그림 8. 부극성 직류전압에 대한 화염형상  
Fig. 8. Shapes of the flame with the negative d.c. voltages

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대기의 절연파괴 특성에 미치는 화염의 영향을 조사하기 위해 수직배치형 구대평판전극에서 연소화염 존재 시, 교류 및 직류 절연파괴전압을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 직류 및 교류전압에 대해 화염이 존재할 때의 파괴전압은 화염이 없는 경우에 비해 크게 저하된 것으로 나타났다. 수평거리  $s=0[\text{cm}]$  일 때, 비교적 단 갭에서 연소화염이 존재할 때의 교류 절연파괴전압은 화염이 없는 경우에 비해 평균 32.1[%], 약 1/3인 것으로 나타났다.
- (2) 정상적 기상조건에서 파괴전압에 미치는 상대공기밀도의 영향은 대개 수[%]이내지만, 고온 화염이 존재하면 그 영향은 매우 큰 것으로 나타났다. 대기온도가 약 350[°C] 및 700[°C]로 상승하게 되면, 대기의 절연파괴전압은 20[°C]에 비해 각각 약 1/2 및 1/3로 감소된 것으로 나타났다.
- (3) 직류전압 인가 시 화염에 의한 절연파괴특성에서는 극성효과가 나타났으며, 부극성이 정극성보다 낮은 것으로 나타났다. 수평거리  $s=0[\text{cm}]$  일 때, 갭 길이에 따른 정극성일 때의 파괴전압 평균값은 53.5[%], 부극성의 평균값은 18.3[%] 것으로 나타났다.
- (4) 수평거리  $s$ 에 따른 직류 파괴전압에서도 수평거리  $s$ 가 비교적 작은 범위에서 극성효과가 나타

났으나,  $s$ 가 어느 범위를 초과하면 극성효과는 나타나지 않았다. 이 때 부극성의 파괴전압이 정극성보다 매우 낮은 것으로 나타났다.

이상의 결과는 화염이 발생할 수 있는 환경조건, 즉 가공 송전선로 또는 기중절연이 사용된 각종 배전기기 등에서 절연파괴 사고의 대책 수립과 설계 시 기초자료로서 활용될 수 있다.

#### References

- [1] K. Shong, W. Han, "Experimental Verification According to an Accidental Model in a Metal-Clad Switchgear at 22.9kV" Trans. on KIEE, Vol. 55P, No. 2, pp.110-113, 2006.
- [2] John J. Shea, "Conditions for Series Arcing Phenomena in PVC Wiring", 51st IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2005, pp.167-175, 2005.
- [3] K. Koyama, T. Sekiguchi, "The Measurement of the Electrical Conductivity of Seeded Flame Plasmas," Trans. on IEE Japan, Vol.87-6, No. 945, pp.1145-1151, 1987.
- [4] H. Kiwaki, S. Komeji, "Electrical Properties of Combustion Flames," Journal of Applied Physics Japan, Vol.41, No. 10, pp.1077-1084, 1972.
- [5] I. Kim, "The Influence of Combustion Flame on AC and DC Flashover Characteristics in the Air-Gaps Simulated Overhead Power Lines", Journal of KIEE, Vol. 24, No. 5, pp. 152-159, May 2010.
- [6] I. Kim, K. Lee, "Flashover Characteristics of the Horizontal Air-Gaps Caused by Combustion Flames", Journal of KIEE, Vol. 16, No. 1, pp. 27-34, 2002.
- [7] J. A. Barnard, J. N. Bradley, "Flame and Combustion Phenomena," 2nd ed., Chapman and Hall, pp. 142-185, 1985.
- [8] D. Yoon, K. Lee, "A Study of the Characteristics of a Partial Discharge of SF<sub>6</sub> Following a Fault", Journal of KIEE, Vol. 21, No. 9, pp. 152-159, November 2007.

#### ◇ 저자소개 ◇



##### 김인식(金寅湜)

1953년 10월 3일생. 1974년 영남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1991년 미국 University of Southern California Visiting Scholar. 현재 경일대학교 철도전기공학부 교수.