

## 연소화염이 존재하는 봉대평판 갭에서 봉전극 형상에 따른 공기의 방전 특성

(Discharge Characteristics of Air according to the Shapes of Rod Electrode in the Rod-Plane Gap having Flame on the Plane Electrode)

김인식\*

(In-Sik Kim)

### Abstract

In this paper, discharge characteristics of air in the vertical arrangement of three rods(dome-shaped, cylinder-shaped, and needle-shaped rod) and plane gap having propane flame on the plane electrode are examined under the application of a.c. and d.c. high-voltages. As the result of the experiment, flashover voltages in the presence of the flame are substantially lowered than those in the absence of flame, and relative a.c. flashover voltages in the dome-shaped, cylinder-shaped, and needle-shaped rod gaps are found 32.5%, 32.1%, and 26.4% respectively. The polarity effects with the d.c. voltages are shown, and flashover voltages in negative polarity are much lowered than those in positive one. The negative flashover voltages in the dome-shaped and cylinder-shaped gaps are found 18.3% and 18.7% respectively, but the positive ones are found 53.5% and 43.2% respectively. In the needle-shaped rod gaps, meanwhile, the flame is extinguished by corona wind, and the quenching voltages are found 28.4% under the application of a.c. voltages. The ion winds of corona and the reduction of air density are the main factors of flashover reduction owing to the flame in the case of a.c. voltages, but the electrifications of the positive ion by thermal ionization besides the above factors are remarkably found in the case of d.c. voltages.

Key Words : Flashover Characteristics, Combustion Flame. Electrode System, Discharge Characteristics

### 1. 서 론

기중절연을 사용한 고전압 설비에서 아크화염 또는 연소화염이 존재하거나, 송전선 아래에서 산불사고 등 화재가 발생하였을 때 절연내력 특성을 고려할 경우 화염의 영향은 중요한 요소가 된다.

지금까지 화염 자체에 대해서는 많은 연구가 수행되

\* 주저자 : 경일대학교 철도전기공학부  
\* Main author : Kyungil University, School of  
Railway and Electrical Engineering  
Tel : 053-600-5522, Fax : 053-600-5539  
E-mail : iskim@kiu.ac.kr  
접수일자 : 2013년 5월 22일  
1차심사 : 2013년 5월 29일  
심사완료 : 2013년 6월 24일

어 왔다[1-2]. 그러나 대부분 화염의 도전율이나, 임피던스 특성, 화염 플라즈마 온도특성, 연소현상 등 물리 화학적 특성에 관해 보고하고 있다. 예를 들면, K. Koyama 등은 MHD발전과 관련된 연구로서 칼륨 등을 시드(seed)한 화염의 도전율을 임피던스 법으로 측정하였으며[3], H. Kiwaki 등은 버너(burner)를 전극으로 하여 교류 브리지법을 사용하여 화염의 도전율을 구하였다[4]. 또한 고전압 및 방전공학적인 측면에서 금속전극 사이에 화염이 존재하는 경우 매질의 절연 특성에 대해서도 최근 많이 발표되고 있다[5-6]. 아크(arc)화염으로 인한 고온 전극 또는 고온 기체중의 방전 해석은 차단기 재점화와 관련된 연구로서 행해지고 있으며, 이 경우 절연특성은 팟센의 법칙에서 벗어나는 것으로 알려져 있다. 한편 가공전력선을 모의한 선도체를 고전압 전극으로 사용한 경우에는 심한 불평등 전계가 형성되므로 선도체 부근의 화염에는 정전력 외에 코로나 이온풍이 작용하는 것으로 보고하고 있다[7]. 이와 같이 화염이 존재하는 매질의 절연특성은 화염 형태, 코로나 유무, 전압 종류 및 극성 등 전계의 분포 상태에 따라 복잡한 현상이 나타나고 있어 많은 연구가 필요하다고 생각된다.

본 논문에서는 고전압 절연시스템에서 대표적인 3 종류의 봉전극을 사용하여 수직배치형 봉대 평판전극 시스템을 구성하였으며, 평판전극상에 연소화염이 존재할 때 봉전극 형상에 따른 공기의 섬락전압특성을 조사하였다. 상용주파수 교류 및 직류전압을 인가하여 화염이 없을 때와 화염이 존재할 경우의 섬락전압을 측정하여 상호 비교하였다. 또한 화염의 유무, 화염과 봉전극의 배치상태에 따른 코로나 및 섬락 발생 시 전압 및 전류파형을 관측하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 실험장치의 개략도이며, 봉대평판 전극을 수직 배치하였다. 전극재질은 스테인리스강(stainless steel)이며, 봉전극은 직경 10mm, 평판전극은 직경 150mm로 제작하였다. 그림 2와 같이 봉전극은 3종류로 하였으며, (a)선단을 반경 5mm인 반구형으로 한 것(이하 반구봉이라 함), (b)선단을 직각으로 평탄하게 한 것

(이하 평단봉이라 함), (c)선단각을 약 30° 원추형으로 한 것(이하 침단봉이라 함)을 사용하였다.

교류 고전압의 발생은 고압발생장치(High Voltage Generator)를 사용하였으며, 이 장치의 정격은 3kVA, 50kV이다. 직류 전압은 실리콘정류기를 사용하여 고전압 교류로 부터 정류하였다. 그림 1과 같이 고전압 측정은 High Voltage Probe와 디지털 오실로스코프를 사용하였으며, 보호용 저항으로서  $R_L=50k\Omega$ 을 삽입하였다. 연소화염은 평판전극 중앙노즐을 통해 발생하였으며, 화염의 크기는 무전압 상태에서 높이 3cm를 유지하였다.

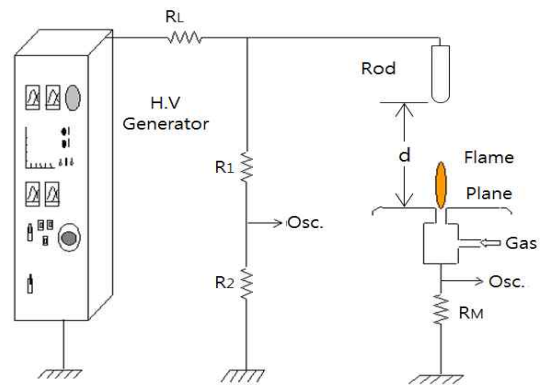


그림 1. 실험장치의 개략도  
Fig. 1. Experimental Arrangement

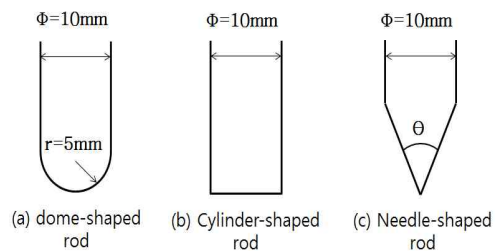


그림 2. 봉전극의 형상  
Fig. 2. Shapes of Rod Electrode

연료는 프로판 가스(propane gas)이며, 주성분은 메탄계의 탄화수소( $C_3H_8$ )이다. 물성은 0°C, 1기압에서 1ℓ의 질량은 2.02g이며 공기의 약 1.56배이고, 발열량은 약 23,550kcal/m<sup>3</sup>이다.

화염내부 및 주변 대기의 온도는 서미스터 온도계와 백금-백금로지움 열전대 온도계(thermometer)를 사

용하여 측정하였다. 그림 3은 화염으로부터 수직 거리에 대한 공기의 온도분포를 나타낸 것이다. 화염내부 온도는 약 660~700℃이며, 화염으로부터 거리가 증가할수록 대기온도는 급격하게 저하되는 것으로 나타났다.

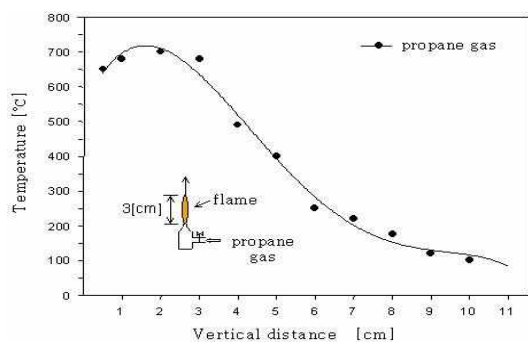


그림 3. 화염으로부터 수직거리에 대한 공기의 온도관계  
Fig. 3. Temperature relationship along the vertical distance

### 3. 실험결과 및 고찰

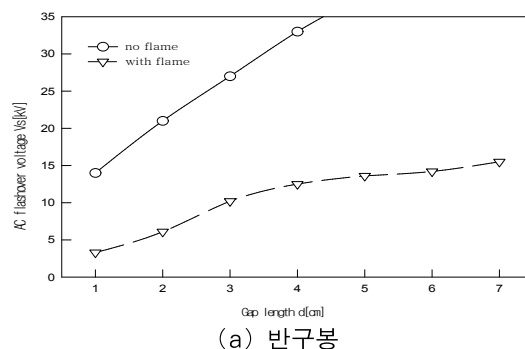
#### 3.1 교류전압 인가 시 섬락전압 특성

그림 4는 봉진극 형상에 따른 교류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 섬락전압은 실효값이며, 화염이 없을 때와 화염 존재시의 섬락전압을 나타내고 있다.

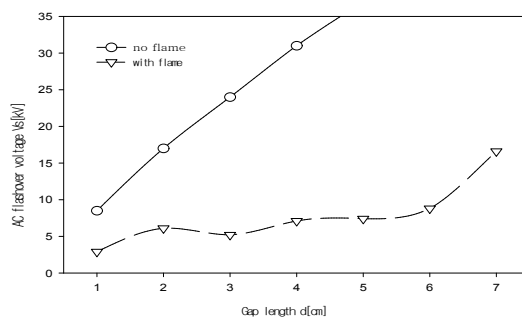
그림과 같이 화염 존재 시의 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 매우 낮은 것으로 나타났다. 화염 존재 시 절연내력의 저하를 나타내기 위해 화염이 없을 때의 섬락전압을 기준값(100)으로 하고, 화염 존재 시의 섬락전압을 상대값%으로 표시할 때, 그림 4 (a) 반구봉 갭인 경우 d=1cm, 2cm, 3cm 및 4cm에서 각각 24.0%, 30.1%, 37.8% 및 38.1%이며, 교류 섬락전압의 평균값은 32.5%인 것으로 나타났다.

그림 4 (b)는 평단봉 갭인 경우이며, d=1cm, 2cm, 3cm 및 4cm일 때 화염 존재 시의 섬락전압은 각각 34.1%, 35.8%, 21.6% 및 22.9%이며, 갭이 큰 영역에서 섬락전압은 상대적으로 낮았으며 섬락전압의 평균값은 32.1%인 것으로 나타났다. 이는 연소화염으로 인한 공기밀도의 저하에 기인하는 것으로 생각되며, 섬락전

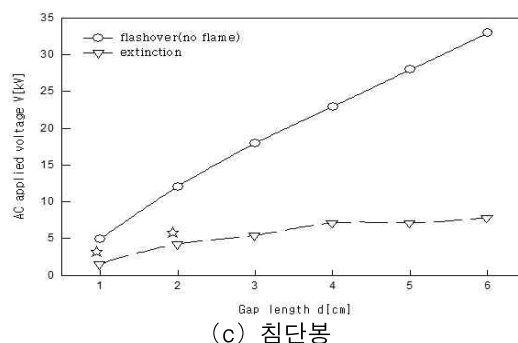
압에 미치는 공기밀도의 영향은 다음과 같이 고찰할 수 있다.



(a) 반구봉



(b) 평단봉



(c) 침단봉

그림 4. 갭길이와 교류섬락전압 및 소화전압  
Fig. 4. Relationship between a.c. flashover voltage and extinction voltage vs. gap length

기상상태에 따른 공기 갭의 섬락전압은 다음 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$V_t = V_s \frac{\delta}{H} \quad (1)$$

여기서  $V_t$ 는 임의 기상상태의 섬락전압,  $V_s$ 는 표준상태의 섬락전압,  $H$ 는 습도보정계수,  $\delta$ 는 상대 공기밀도이다. 화염이 존재하는 경우 습도는 최소가 되므로 습도보정계수를 무시하면 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$V_t = V_s \frac{0.392p}{273+t} \quad (2)$$

섬락 전압에 가장 큰 영향을 미치는 요소는  $\delta$ 이며,  $p$ 는 기압 mmHg,  $t$ 는 온도  $^{\circ}\text{C}$ 이다. 여기서 기압  $p$ 는 일정한 것으로 둘 수 있으므로, 온도  $t$ 에 대한 이론적 섬락전압은 그림 5와 같다.

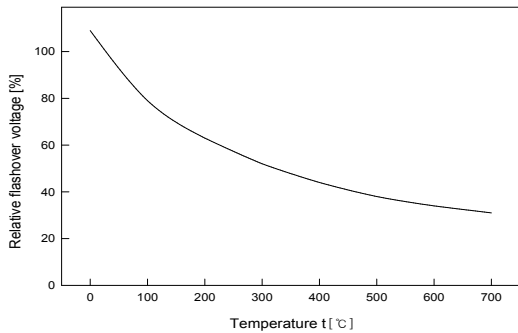


그림 5. 온도와 상대섬락전압의 관계  
Fig. 5. Relationship between relative flashover voltage and temperature

그림 5에서 상대섬락전압은  $300^{\circ}\text{C}$ 에서 약 52%,  $600^{\circ}\text{C}$ 일 때 약 34%인 것으로 나타나고 있다. 그림 4의 결과에서 반구봉 갭 및 평단봉 갭의 섬락전압의 평균 값은 각각 32.5% 및 32.1%였으며, 갭길이 4cm 이하에서 갭 사이 공기의 온도는 그림 3과 비교할 때 평균  $600^{\circ}\text{C}$  정도이므로 그림 5의 결과와 거의 일치됨을 알 수 있다.

그림 4 (c)는 침단봉 갭에 대한 교류 섬락 및 소화 전압 특성을 나타낸 것이다. 이 경우 활발한 침단 코로나에 의해 섬락 발생 전에 화염이 소화되었으므로 소화전압을 측정하였다. 갭길이가 비교적 작은 범위, 즉  $d=1\text{cm}$ 와  $2\text{cm}$ 에서는 섬락과 동시에 화염이 쓰러져 소화되는 현상이 일어났으며, 그림 4 (c)에서 섬락발

생을 ☆표로서 표시하였다. 이 때 화염 존재시의 섬락전압은 각각 23.6% 및 29.2%였다. 그러나  $d=3\text{cm}$  이상에서는 소화전압을 측정하였으며, 교류전압 인가시 평균 소화전압은 28.4%였다. 침단봉 갭에서는  $d=4\text{cm}$  이상으로 갭길이가 증가하면 소화전압은 거의 일정한 것으로 나타났다. 이는 코로나 이온풍의 세기는 전압에 비례하므로, 갭길이가 증가함에 따라 화염에 작용하는 코로나풍은 거의 일정한 것으로 생각된다.

그림 6은 침단봉 갭의 코로나 이온풍에 의한 화염의 소화 현상을 나타낸 것이다. 여기서 형상 A는 전압이 인가되지 않은 상태에서 화염형상을 나타내고 있으며, 전압인가 후 코로나가 발생하면 이온풍에 의해 화염의 크기는 낮아지며, 더욱 전압을 상승시키면 형상 B와 같이 평판전극으로 기울어진 후 소화되는 것으로 나타났다.

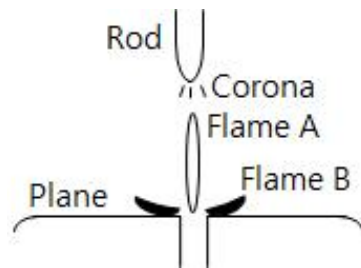
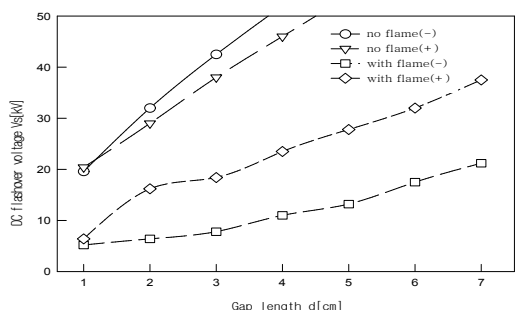


그림 6. 화염의 소화현상  
Fig. 6. Extinction phenomena of the flame

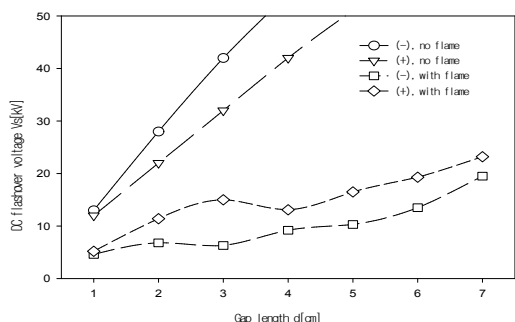
### 3.2 직류전압 인가 시 섬락전압 특성

그림 7은 봉전극 형상에 따른 직류섬락전압 특성을 나타낸 것이다.

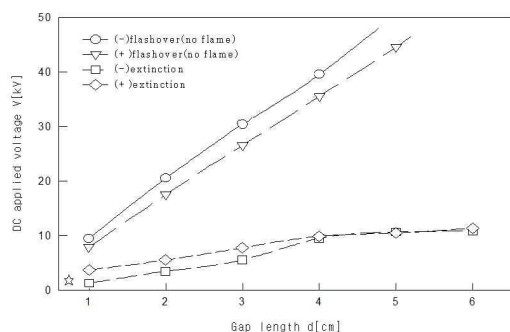
화염의 유무에 따른 섬락전압을 함께 표시하였으며, 화염 존재 시의 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 크게 저하된 것으로 나타났다. 또한 직류전압 인가 시 극성효과가 나타났으며, 3종류의 봉갭에서 화염이 없을 때 부극성 섬락전압은 정극성의 경우보다 약간 높은 것으로 나타나고 있으나, 화염이 존재하면 부극성 섬락전압이 정극성보다 낮은 것으로 나타났다.



(a) 반구봉



(b) 평단봉



(c) 침단봉

그림 7. 갭길이와 직류섬락전압의 관계  
Fig. 7. Relationship between d.c. flashover voltage vs. gap length

그림 7 (a)은 반구봉 갭인 경우이며 d=2cm, 3cm 및 4cm에서 화염 존재 시 정극성 섬락전압은 각각 55.8%, 52.6% 및 52.1%이며, 부극성 섬락전압은 각각 19.1%, 14.8% 및 21.1%이었다. 따라서 부극성일 때 섬락전압의 평균값은 약 18.3%이며, 이는 정극성일 때의 평균값 약 53.5%보다 매우 낮은 것으로 나타났다. 그림 7 (b)은 평단봉 갭인 경우이며, d=2cm, 3cm 및 4cm에서

정극성 섬락전압은 각각 51.8%, 46.8% 및 31.1%이며, 부극성 섬락전압은 각각 24.2%, 15.0% 및 17.0%이었다. 역시 부극성일 때 섬락전압의 평균값은 18.7%이며, 정극성일 때의 평균값 43.2%보다 크게 낮은 것으로 나타났다. 이는 화염 내부의 열전리(thermal ionization) 작용으로 화염은 양이온(positive ion)으로 대전되어 인가 전압의 극성에 따른 정전력이 작용하는 것으로 생각된다. 여기서 화염의 열전리 현상은 다음과 같이 고찰할 수 있다.

가스압력  $p$ 와 절대온도  $T$ 를 사용하여 전리도  $\lambda$ 는 다음 식 (3)과 같다[9-10].

$$\frac{\lambda^2}{1-\lambda^2} = \frac{1}{p} \frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h} (kT)^{5/2} \exp\left(-\frac{W_i}{kT}\right) \quad (3)$$

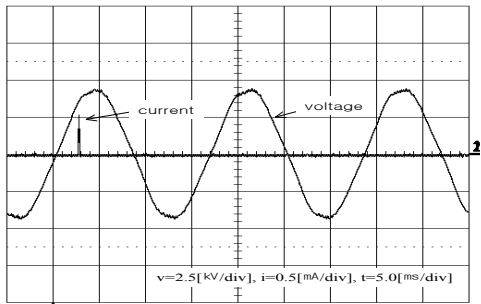
이 식에서  $\lambda$ 는 전리도(ionization degree),  $m_e$ 는 전자의 질량,  $h$ 는 플랑크 상수,  $T$ 는 기체 온도,  $p$ 는 기체 압력,  $W_i$ 는 기체의 전리전압,  $k$ 는 볼츠만 상수이다. 본 실험에서 사용된 연소화염 온도를 적용하여 화염의 전리도를 구하면  $\lambda=6.57 \times 10^{-14}$ 로 계산된다. 기체의 상태방정식으로부터 가스밀도  $n \text{ m}^{-3}$ 을 표시하면 식 (4)과 같다.

$$n = 9.66 \times 10^{24} \frac{p}{T} \quad (4)$$

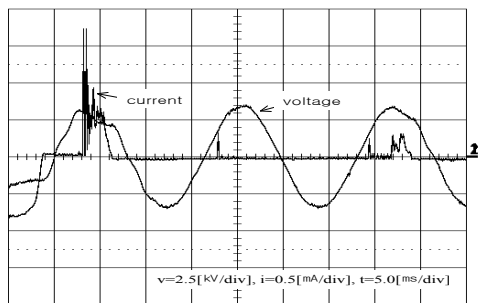
이 식에서  $p=760 \text{ Torr}$ ,  $T=923 \text{ K}$ 를 대입하면  $n=7.95 \times 10^{24}$ 이므로 화염내부의 전하밀도  $n_i$ 는  $n_i=5.22 \text{ m} \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 인 것으로 계산된다. 따라서 이동도가 큰 전자에 의해 이동되고 화염은 양전하(positive charge)로 대전되는 것으로 생각된다.

그림 7 (c)은 침단봉 갭의 직류 소화전압 특성을 나타낸 것이다. 이 경우 활발한 침단코로나에 의해 섬락 발생 전에 화염은 소화되었으며, 정극성 및 부극성 전압에 대한 소화전압의 평균값은 각각 24.8% 및 12.2%인 것으로 나타났다. d=4cm 이내일 때 소화전압은 갭길이에 비례하여 증가되고 있으나, d=4cm 이상에서는 갭길이가 증가하여도 소화전압은 거의 일정한 것으로 나타났다. 이는 동일한 전극배치의 교류전압 특성과 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 d=4cm 이내에서 소

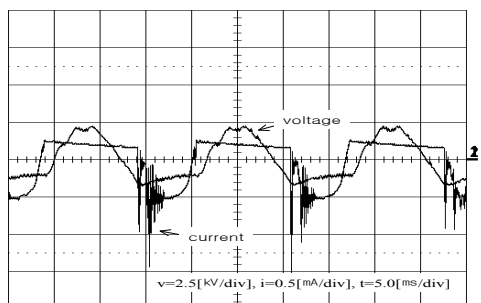
화전압은 극성효과가 나타났으며, 부극성이 정극성보다 약간 낮은 것으로 나타났다.



(a) 화염이 없는 경우



(b) 화염외부에 봉전극 배치된 경우



(c) 화염내부에 봉전극 배치된 경우

그림 8. 침단봉 갭의 전압 및 전류 파형  
Fig. 8. Voltage and current waveforms of the needle-shaped rod gap

그림 8은 침단봉 갭에서 화염의 유무에 따른 교류 전압 및 전류파형을 나타낸 것이다. 여기서 그림 8 (a)는 화염이 없는 경우의 파형으로서 정극성 전압에서 최초로 코로나가 발생됨을 나타내고 있다. 그림 8 (b)는 침단봉 전극이 화염 외부에 배치된 경우이며, 코로나 및 섬락은 정극성 전압에서 발생됨을 알 수

있다. 그림 8 (c)는 침단봉 전극이 화염내부에 배치된 상태로서 코로나 및 섬락은 부극성에서 활발하게 일어남을 알 수 있다. 이는 화염의 열전리에 의해 생성된 양이온 하전입자가 공간전하로서 작용하는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수직배치형 봉대 평판전극에서 평판 전극상에 프로판 화염이 존재할 때 봉전극 형상에 따른 공기의 섬락전압 특성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 화염 존재시 반구봉, 평단봉 및 침단봉 갭에서 교류섬락전압의 평균값은 각각 32.5%, 32.1% 및 26.4%이며, 가장 섬락전압이 낮은 조건은  $d=4\text{cm}$ 인 평단봉 갭으로서 이 경우 상대 섬락전압은 21.6%였다. 한편 침단봉 갭일 때 갭길이가 증가하면 코로나 이온풍에 의해 화염은 소화되었으며, 평균 소화전압은 약 28.4%인 것으로 나타났다.
- (2) 직류 섬락전압은 극성효과가 나타났으며, 반구봉 및 평단봉 갭의 부극성 섬락전압의 평균값은 각각 18.3% 및 18.7%이며, 정극성일 때의 평균값은 각각 53.5% 및 43.2%로서 부극성인 경우가 훨씬 낮은 것으로 나타났다. 한편 침단봉 갭에서는 침단 코로나에 의해 섬락 발생 전에 화염은 소화되었으며, 정극성 및 부극성에서 소화전압의 평균값은 각각 24.8% 및 12.2%인 것으로 나타났다.
- (3) 침단봉 갭에 대한 코로나 및 섬락 발생 시 교류 전압 및 전류파형을 관찰하였으며, 화염이 없는 경우와 화염 외부에 침선단이 배치된 경우는 교류 정극성에서 섬락과 코로나가 활발하였으나, 침선단이 화염 내부에 배치된 경우는 교류 부극성에서 코로나와 섬락이 발생한 것으로 나타났다.
- (4) 화염 존재 시 교류 섬락전압의 저하에 미치는 주요 요인은 코로나 이온풍의 발생과 고온 화염에 의한 공기밀도 저하이며, 직류 섬락전압에서는

상기 요인 외에 열전리 작용에 의한 화염의 양이 온 대전현상이 큰 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다.

이상의 결과는 화염 플라즈마에 의한 절연 파괴 메카니즘의 규명이나, 화염이 존재하는 각종 고전압 설비 등에서 합리적 절연 설계의 기본 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

◇ 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.

**감사의 글**

2012년 경일대학교 교내 일반연구비 지원에 의해 수행된 과제임.

**References**

- [1] J. A. Barnard, J. N. Bradley, "Flame and Combustion Phenomena," 2nd ed., Chapman and Hall, pp. 142-185, 1985.
- [2] J. D. Boom, A. Konov, "The Effect of DC Electric Field on the Laminar Burning Velocity of Air Flames", Proc. of the Combustion Institute, Vol. 32, No. 1, pp. 1237-1244, 2009.
- [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, K. Lee, "Flashover Characteristics of the Horizontal Air-Gaps Caused by Combustion Flames", Journal of KIEE, Vol. 16, No. 1, pp. 27-34, 2002.
- [6] 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, 2010.
- [7] K. S. Park, I. S. Kim, "Influence of Combustion Flame on Breakdown Characteristics of Vertical Model Power Lines", Journal of KIEE, Vol. 22, No. 4, pp. 85-92, 2008.
- [8] G. Gallet, et al "General Expression for Positive Switching Impulse Strength Valid up to Extra Long Air Gaps", IEEE Trans. PAS, Vol. 94, No. 6, pp. 1989-1993, 1975.
- [9] E. Kuffel, W. S. Zaengle, "High Voltage Engineering, Fundamentals", Pergamon Press, pp.297-377, 1984.
- [10] S. V. Shevnov, "Simulation of Thermal Ionization in a Dense Plasma by the Feynman Path Method", Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 112, No. 4, pp.668-693, 2011.