

## 화재발생시 직류 플래시오버특성에 미치는 연소화염의 영향 Influence of Combustion Flame on Flashover Characteristics Due to Fire Occurrence

하장호<sup>†</sup> · 김인식 · 정우영\*

Jang-Ho Ha<sup>†</sup> · In-Sik Kim · Woo-Young Jung\*

삼척산업대학교, 경일대학교 전기공학과, \*현대소방  
(2003. 2. 28. 접수/2003. 6. 2. 채택)

### 요 약

본 연구에서는 파라핀 연소화염을 사용하여 침대침 및 구대구 전극배치에서 직류전압을 인가하였을 때, 대기압 공기의 플래시오버특성, 인가전압의 크기 및 극성에 따른 화염의 형상변화, 고온 연소화염의 열전리현상 및 플래시오버 특성에 미치는 상대공기밀도의 영향 등에 대해 조사하였다. 실험결과, 연소화염이 존재하면, 대기압 공기의 플래시오버특성은 매우 큰 영향을 받고 있다. 이는 전극의 형태에 따라 코로나풍과 쿨롱력이 작용함으로써 화염의 형상변화와 요동이 일어나기 때문이다. 또한 고온화염으로 인한 주변 공기의 상대공기밀도의 저하로 인해 플래시오버 특성은 더욱 낮아지고 있으며, 연소화염에 대한 열전리의 영향은 크지 않는 것으로 나타났다.

### ABSTRACT

In this paper, characteristics of the DC flashover voltage in the horizontal air gap of sphere-sphere/needle-needle electrode system were investigated when the combustion flame of paraffin oil was present between the two electrodes. The reduction characteristic of DC flashover voltage was discussed with the thermal ionization process, the relative air density and the deflection phenomena in the shape of flames that caused by the corona wind and Coulomb's force. As the results of an experimental investigation, It was found that the reduction characteristics of DC flashover voltages with flames were affected strongly by the flame deflection and the change of relative air density. It was also found that the thermal ionization phenomena were not important in the range of combustion flame temperature.

**Keywords** : Combustion flame, Electrical characteristics, Flashover voltage

## 1. 서 론

자연현상으로 인한 송전선로의 정전사고는 낙뢰와 산불화재로 대별할 수 있다. 이들 중 낙뢰는 하절기에 주로 발생되며, 건조한 날씨가 많은 동절기에는 산불화재가 많이 일어나고 있다.

산불화재는 재해 규모가 매우 크기 때문에 정부에서는 국가재난방지 차원에서 산불방지 종합대책을 수립하고 있으나, 그 피해는 해마다 증가하는 추세이다. 산림청 통계에 따르면 2002년도 전국에서 발생한 산불

은 599건이며, 피해면적은 약 3,600[ha]에 이르는 것으로 집계되고 있다.<sup>1)</sup>

우리나라는 대륙권 기후이기 때문에 건조기인 봄철(2~4월)에 산불이 가장 많이 발생되며, 연간 발생건수의 약 72[%]는 이 기간에 집중적으로 일어나고 있다. 산불화재의 가장 큰 특징은 울창한 수목에 의한 고열화염이 상승기류와 함께 전력선에 쉽게 접근할 수 있다는 점이다. 산림이 울창하고 가연성 낙엽이 많이 쌓인 지역에서 산불에 의한 불기둥 높이는 약 20~30[m]에 이르며, 화염 중심부의 온도는 약 1,200[°C], 주변 연기의 온도는 약 600[°C]에 이르는 것으로 추정되고 있다. 이러한 화염속에서는 고온의 이온화가스(hot

<sup>†</sup> E-mail: younguniv@hanmail.net

ionized gas)가 다량 존재할 것으로 예상되며, 이들 화염을 통하여 송전선로는 섬락사고를 일으키는 것으로 보고되고 있다.<sup>2,3)</sup> 전기설비기술기준 제124조 및 제148조에서는 산지등 사람의 왕래가 적은 장소를 통과하는 공칭전압 154[kV] 가공전선의 지표상 높이는 5[m] 이상이며, 식물과의 이격거리는 3.2[m]이상으로 규정하고 있으므로<sup>4)</sup> 송전선로 아래에서 화재가 일어나거나, 과수원 등에서 나뭇가지를 태우게 되면, 이러한 화염은 쉽게 선로에 접근할 수 있으므로 섬락사고를 일으킬 수 있을 것이다. 이때 대지간의 섬락시에는 전력선 구조물 부근에 순간적으로 높은 지락전류를 수반하기 때문에 화재를 진압하는 소방관에게도 매우 위험한 상황에 노출될 가능성이 있다.

이와같이 연소화염이 전력계통의 섬락사고에 중요한 영향을 미치고 있으므로 연소화염이 존재할 때, 대기압 공기의 절연내력 즉, 금속 전극과 화염사이의 플래시오버특성 뿐만 아니라 화염의 전기적 특성에 관해서는 지금까지 충분한 연구가 이루어지지 않고 있어 연구의 필요성을 느낀다.

본 연구에서는 산불이 발생된 상황을 실험실 규모에서 모의하기 위하여 대표적인 화염을 선정하고, 안정된 화염조건에서 직류 고전압을 인가하였을 때, 각종 전극 형상 및 화염위치에 따른 플래시오버전압 특성을 조사하였다. 또한 연소화염의 내부온도 및 주변공기에 대한 온도분포, 연소 화염에 대한 전리현상(ionization phenomena), 고온 화염으로 인한 주변공기의 상대공기밀도(relative air density)의 영향 등에 대해서도 조사하고자 한다. 침전극과 같은 불평등 전계에서는 코로나 풍이 발생될 수 있으므로 이러한 코로나풍의 영향과 인가전압의 크기 및 극성에 따른 화염형상의 변화 등 화염의 전기적 특성에 대해서도 관찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 전극은 Fig. 1과 같이 수평으로 배치된 침대침 전극을 사용하였으나, 평등전계를 얻을 경우에는 구대구 전극을 사용하였다. 침전극 및 구전극의 재질은 스테인레스강(stainless steel)이며, 침의 선단각은 약 30°이며, 구전극의 직경은 50.0[mm] 표준전극을 사용하였다.

실험은 직류 고전압을 사용하였으며, 시험용 변압기에서 발생된 교류 고전압을 정류하여 사용하였다. 정류장치는 실리콘정류기(일본, Tokyo Transformer Co. Ltd.)를 이용하였다. 고전압 발생 및 측정장치에 대해서는 이미 보고하였다.<sup>2)</sup>

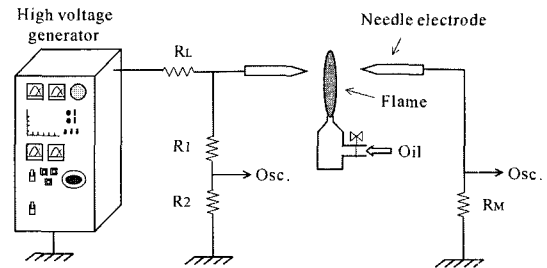


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

연소화염은 파라핀오일(normal paraffin oil, 순도 100[%])을 연료로 사용하였다. 이 파라핀오일은 석유계 연료이며, 주성분은 탄화수소이다. 이 연료의 조성은 탄소 75~90[%], 수소 8~25[%], 산소 0~3.3[%], 질소 0~2[%], 황 0~5[%] 등으로 되어 있다. 그리고 파라핀오일의 비점은 약 450~570[K], 밀도는 약 0.79~0.83[g/cm<sup>3</sup>], 발열량은 약 40~50[MJ/kg]이다. 파라핀오일은 액체 연료이며, 단위 중량당 발열량이 크기 때문에 연소장치를 소형으로 할 수 있으며, 연소 후에 회분(ash) 등에 의한 장치의 오손이 비교적 적게 발생하고, 저렴한 가격으로 안정되게 공급할 수 있는 장점이 있다.

연소의 형태는 실내에서 안정된 화염을 발생시킬 수 있는 심지 연소(wick type combustion)방식을 채택하였다. 이 연소방식은 액체 연료가 모세관 현상에 의해 심지를 통하여 흡인되므로 심지의 노출이 크지 않으면 안정된 자유화염을 용이하게 얻을 수 있다.

램프에서 발생된 화염은 외부 바람에 의해 흔들리지 않도록 1.2×1.2×1.7[m]인 칸막이를 설치하였다. 그리고 화염의 크기는 전압이 인가되지 않는 상태에서 육안으로 관찰하여 폭 0.5[cm], 높이 3[cm]정도로 일정하게 유지하였다.

Fig. 2는 파라핀 화염에 대한 주변 공기의 등온선 분포를 나타낸 것이다. Fig. 2에 대한 온도측정방법 및 등온도분포 특성에 대한 설명은 프로판 가스를 사용한 화염의 온도분포특성에서 이미 보고되었다.<sup>2)</sup>

화염 위치는 Fig. 3과 같이 접지전극과 화염의 거리  $l$ 과 전극간 갭길이  $d$ 의 비, 즉  $k=l/d$ 로서 표시하였다. 화염 위치는  $k=0, 0.5$  및  $1.0$ 으로 하였으며, 이것은 전극간 거리  $d$ 에 관계없이 각각 화염이 접지축 전극, 전극의 중앙 및 고압축 전극에 위치하고 있음을 나타내고 있다. 그리고 화염의 높이  $h$ 는 그림과 같이 전극축과 화염의 중심점사이의 거리로서 여기서는 모두  $h=0$ 이다.

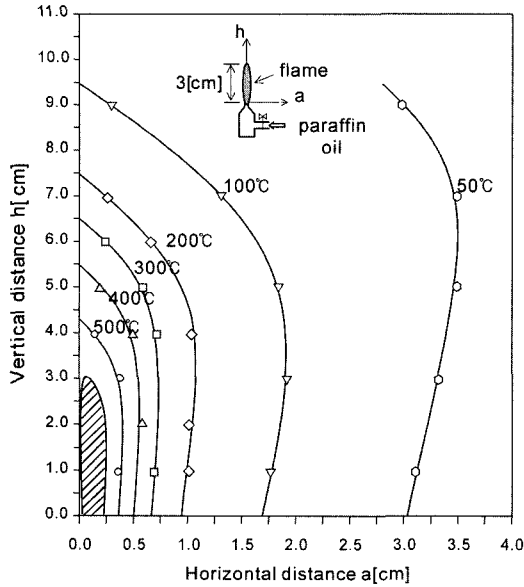


Fig. 2. Isothermal lines around the paraffin-oil flame.

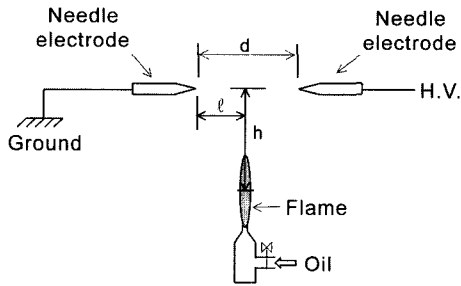


Fig. 3. Schematic diagram of the electrodes and flame.

Table 1. Specification of CCD camera

Item	Function
Imager	1"(9.1 mm×9.1 mm), Scanning Inter-line Transfer CCD
Resolution	1,008(H)×1,018(V)
Video Output	8Bit RS-422 Output
Size	44 mm(W)×48 mm(H)×136 mm(L)

인가전압에 의해 화염의 형상이 변화하는 것을 관측하기 위해 본 실험에서는 CCD카메라(PULNIX, type TM-1001)를 사용하였으며, 관측된 영상은 인터페이스카드(MV-1500)를 통하여 컴퓨터에 저장하였다. Table 1은 CCD카메라의 규격을 나타낸 것이다.

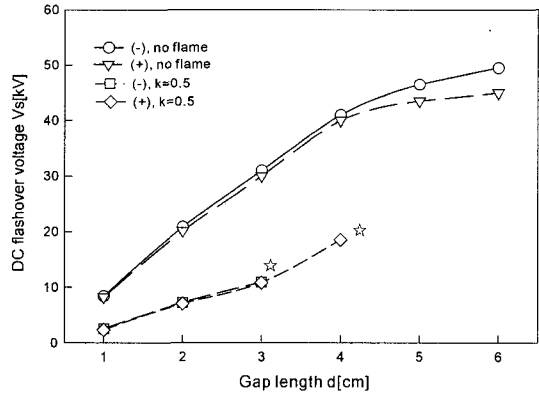


Fig. 4. DC flashover voltage vs. gap length with needle-needle electrode system.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 직류 플래시오버전압 특성

##### 3.1.1 침대침 전극인 경우

Fig. 4는 수평배치인 침대침 갭에서 전극간 화염의 위치변화에 따른 직류 플래시오버전압 특성을 나타낸 것이다. 여기서는 화염이 있는 경우와 없는 경우의 직류 플래시오버전압을 동시에 나타내었다.

화염이 없는 경우 Fig. 4와 같이 침대침 갭에서는 극성효과가 나타났으며, 이 때 침이 정극성인 경우가 부극성인 경우보다 플래시오버전압이 낮게 된다. 이는 코로나에 의해 정극성 침근방에서 전자사태에 의해 생성된 전자들은 침전극에 유입한 후 정이온이 공간전하로서 남게 되므로, 공간전하의 선단과 음극사이의 전계는 강하게 되어 스트리머(streamer)의 진전이 용이하기 때문이다.<sup>5)</sup> Fig. 4와 같이 직류 플래시오버 전압에서는 화염의 위치에 따른 영향은 거의 나타나지 않았다. k=0.5일 때, 화염이 없는 경우에 비해 화염이 존재할 때의 평균 플래시오버전압은 직류 정극성 및 부극성에서 각각 36.7 및 35.9[%]이다.

직류전압 인가시 어느 갭 이상에서는 플래시오버가 발생되기 전에 코로나풍에 의해 화염이 꺼지는 현상이 나타났으며, Fig. 4에서 이를 ☆표로 표시하였다. k=0.5인 경우 침전극이 정극성 및 부극성일 때 화염에 의한 섬락전압은 각각 갭길이 d=4[cm] 및 d=3[cm] 범위까지만 측정이 가능하였다. 그러나 화염 위치가 k=0.5가 아닌 경우 즉, k=0 또는 k=1.0일 때는 갭길이 d=1[cm]이내에서만 측정할 수 있었다.

Fig. 4와 같이 화염이 없는 경우 갭길이가 증가함에 따라 극성효과가 비교적 뚜렷이 나타나고 있으나, 화

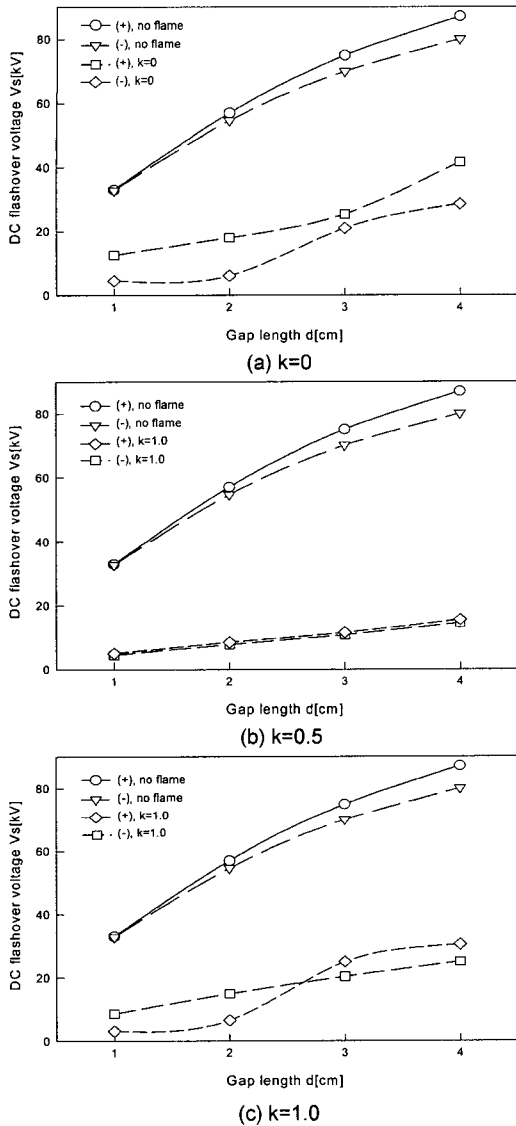


Fig. 5. DC flashover voltage vs. gap length with sphere electrode system.

염이 존재하는  $k=0.5$ 인 경우 전압극성의 영향은 거의 나타나지 않았다. 다만 전압 극성에 따라 코로나풍에 의한 화염의 소화현상에서는 차이가 나타났으며,  $k=0.5$  일 때 정극성인 경우  $d=4$ [cm], 부극성인 경우  $d=3$  [cm]보다 큰 갭에서는 코로나풍에 의해 화염이 소화되는 현상이 나타났다.

3.1.2 구대구 전극인 경우

Fig. 5는 수평배치인 구대구 갭에서 전극간 화염의 위치가  $k=0, 0.5$  및  $1.0$ 인 경우에 대하여 직류 플래시

오버전압 특성을 나타낸 것이다.

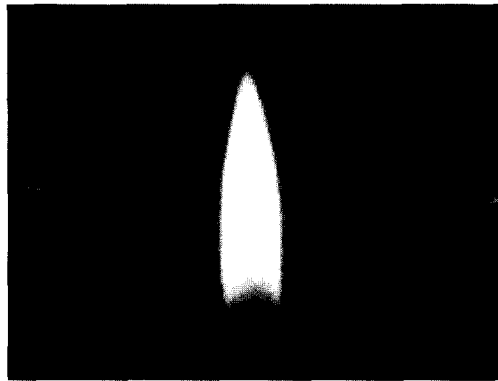
구대구갭에서는 전계가 거의 평등하기 때문에 코로 풍에 대한 영향은 나타나지 않았으며, 침대침 갭처럼 플래시오버가 발생되기 전에 화염의 소화현상은 일어나지 않았다. Fig. 5(a)는 화염위치가  $k=0$ 일 때의 특성이며, 갭길이  $d$ 가 증가함에 따라 전압극성에 대한 영향이 가장 현저하게 나타나고 있다. 화염의 존재 유무에 관계없이 Fig. 5(a)와 같이 모두 정극성이 부극성보다 높은 것으로 나타났다. 그러나 이러한 극성 효과는 화염의 유무에 따라 매우 상이하게 나타나고 있다. 즉, 화염이 없는 경우  $d=1.0$ [cm]에서 극성 효과는 거의 관측되지 않았으나, 갭이 증가할수록 현저하게 나타나고 있다. 한편, 화염이 존재할 경우에는 그림과 같이 갭 길이가 작은 경우에도 극성 효과는 매우 뚜렷하게 나타난다. 이는 고온의 화염에는 어느 정도 전기전도성을 가지고 있으며, 전계를 가하면 그 형상이 변하는 것으로 관측되었다.

Fig. 5(b)는 화염위치  $k=0.5$ 인 경우의 특성으로서 갭 길이  $d$ 가 증가함에 따라 플래시오버전압은  $k=0$  및  $k=1.0$ 에 비해 가장 낮고, 화염에 의한 극성효과도 가장 작은 것으로 나타났다. 이는 화염이 전극중앙에 위치하고 있으므로 정이온을 띤 화염은 고전압 전극의 정·부극성에 따라 반발력과 흡인력이 작용하지만 동일한 전압에서는 클론력의 크기와 화염의 변형도 동일한 것으로 생각된다. Fig. 5(c)는  $k=1.0$ 인 경우의 특성으로서 갭길이  $d$ 가 증가함에 따라 역시 플래시오버전압  $V_s$ 는 높아지고 있으나, 갭길이  $d=2$ [cm]이하에서는 부극성이 정극성보다 높게 나타났으나,  $d=3$ [cm]이상에서는 오히려 정극성이 부극성전압보다 높은 것으로 나타났다. 화염이 없을 때에는 일반적으로 정극성이 부극성보다 높게 나타나지만, 화염 위치  $k=1.0$ 인 경우에는 어느 갭길이 즉, 임계갭 이하에서 극성 효과는 역으로 나타나고 있다. 갭길이  $d$ 가 어느값 이상이 되면 정극성전압이 부극성보다 높은 것은 Fig. 5(a)와 동일한 현상이지만, 갭 길이가 작으면 화염의 형상에 대한 영향이 비교적 크게 나타난다. 즉, 화염의 위치  $k=1.0$ 인 경우, 화염은 고전압 구전극에 대해 부극성 전압일 때는 인력이 작용하지만 정극성에서는 반발력이 작용하게 된다. 따라서 정극성인 경우 화염에 의해 갭의 교락이 용이해지므로 플래시오버전압은 저하되는 것으로 생각된다.

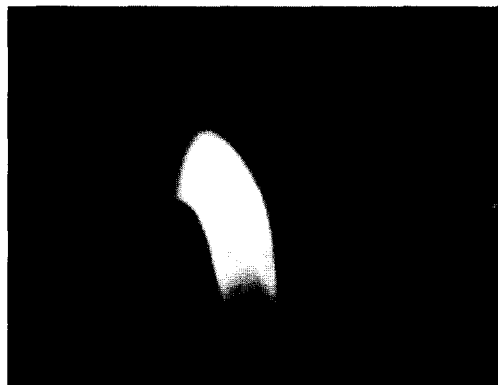
3.2 직류 전압 인가시 화염의 형상

3.2.1 직류 정극성인 경우

Fig. 6은 침대침 갭에 대한 정극성 직류전압 인가시,



(a) 0[kV]



(b) 3[kV]



(c) 5[kV]

**Fig. 6.** Shapes of flame in the DC positive voltage with  $k=0.5$ .

화염의 위치가  $k=0.5$ 일 때 전압크기에 따른 화염의 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 6과 같이 정극성 전압을 인가하면, 화염은 좌측에 있는 집지축 전극으로 기울어지는 것으로 나타났다. 이는 연소화염 자체가 정이온이 부이온보다 많이



(a) 0[kV]



(b) 3[kV]



(c) 8[kV]

**Fig. 7.** Shapes of flame in the DC positive voltage with  $k=1.0$ .

존재하고 있음을 나타낸다. 우측의 정극성 전압에 의해 화염은 반발력이 작용하고, 침대침 갭에서는 전압의 상승에 따라 코로나가 발생되므로 코로나풍에 의해 Fig. 6과 같이 화염의 형상은 더욱 크게 변화된다. 이와같이 화염 형상이 변형되는 이유는 인가전압이 상승하여 코로나 개시전압보다 크게 되면 화염에 작용하는

쿨롱력(Coulomb's force)외에 코로나로 인한 풍력(wind force)이 모두 우측의 접지축 전극으로 작용하기 때문이다. 대개 화염은 코로나풍에 의해 화염의 흔들림이 나타나게 된다. 여기서 더욱 전압을 증가시키면 화염의 심한 요동과 함께 대개 화염을 교락하여 플래시오버가 일어나는 것을 관측할 수 있다.

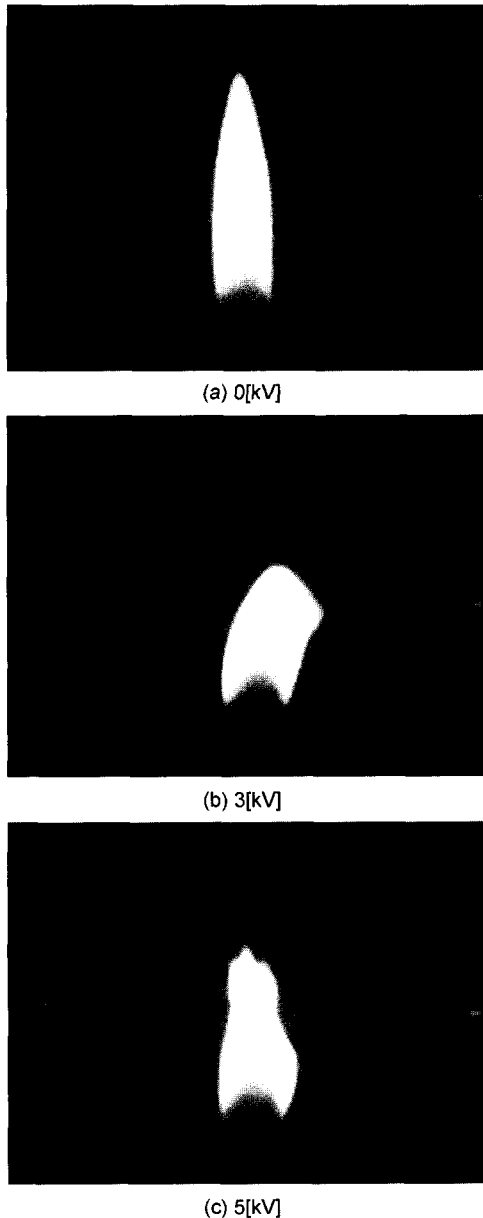


Fig. 8. Shapes of flame in the DC negative voltage with  $k=0.5$ .

Fig. 7은 구대구 갭에 대한 정극성 직류전압 인가시 화염의 위치가  $k=1.0$ 일 때 전압크기에 따른 화염의 형상을 나타낸 것이다.

구대구 갭은 준평등 전계이므로 코로나풍의 영향은 나타나지 않았다. 정극성 전압을 인가함으로써 대개 화염은 좌측에 있는 접지축 전극으로 기울어지는 것으로 조사되었다. 이는 연소화염이 전체적으로 정이온의 성질을 갖고 있음을 알 수 있다. 우측의 정극성 전압에 의해 화염은 반발력이 작용하므로  $k$ 의 위치에 관계없이 접지축 전극으로 기울어지는 것이다. 더욱 전압을 상승하면 대개 화염은 전기력선 방향으로 한층 더 기울어지고 있다. 구대구 전극에서는 침대침 전극과 달리 코로나풍에 의한 화염의 흔들림이 나타나지 않으므로 화염의 변형은 매우 안정된 모습을 나타내고 있다.

구대구 갭의 전계분포는 침대침 갭에 비해 평등한 분포이므로 침대침 갭에서 나타났던 코로나풍의 영향은 비교적 무시할 수 있다. 따라서 구대구 갭에서의 화염형상은 화염의 전하분포를 예측하는데 도움을 줄 수 있다. 구대구 갭에서도 전압이 인가되지 않는 형상에 비해 전압이 인가되면 화염의 전하에 의해 쿨롱력이 작용하여 화염의 높이는 낮아지고, 화염 폭은 증가하여 전극사이에 플래시오버가 일어나기 용이한 형상으로 변화된다.

### 3.2.2 직류 부극성인 경우

Fig. 8은 침대침 갭에 대한 부극성 직류전압 인가시 화염의 위치가  $k=0.5$ 일 때 전압크기에 따른 화염의 형상을 나타낸 것이다.

부극성 직류전압을 인가하면 연소화염은 우측에 있는 전원축 전극으로 기울어지는 것으로 나타났다. 이는 연소화염의 내부는 정이온으로 구성되어 있음을 나타낸다. 우측의 부극성 전압에 의해 화염은 흡인력이 작용하므로 전원축 전극으로 기울어질 뿐만 아니라 침대침 갭에서는 전압이 상승함에 따라 코로나가 발생되므로 코로나풍에 대한 영향이 나타나게 되어, Fig. 8과 같이 전압의 상승에 따른 화염의 형상은 전원축의 인력과 코로나풍에 의해 심한 요동현상이 관찰된다. 더욱 전압을 상승하면 화염은 코로나풍에 의해 심한 흔들림이 나타나게 되고, 이 때 화염을 통해 양쪽 전극이 교락하므로써 플래시오버가 발생된다.

Fig. 9는 구대구 갭에 대한 부극성 직류전압 인가시 화염의 위치가  $k=0$ 일 때 전압크기에 따른 화염의 형상을 나타낸 것이다. 직류 부극성 전압을 인가함으로써 화염은 우측에 있는 전원축으로 기울어지는 것으로 나타났다. 우측의 부극성 전압에 의해 화염은 흡인력이 작용하므로  $k$ 의 위치에 관계없이 전원축으로 기울

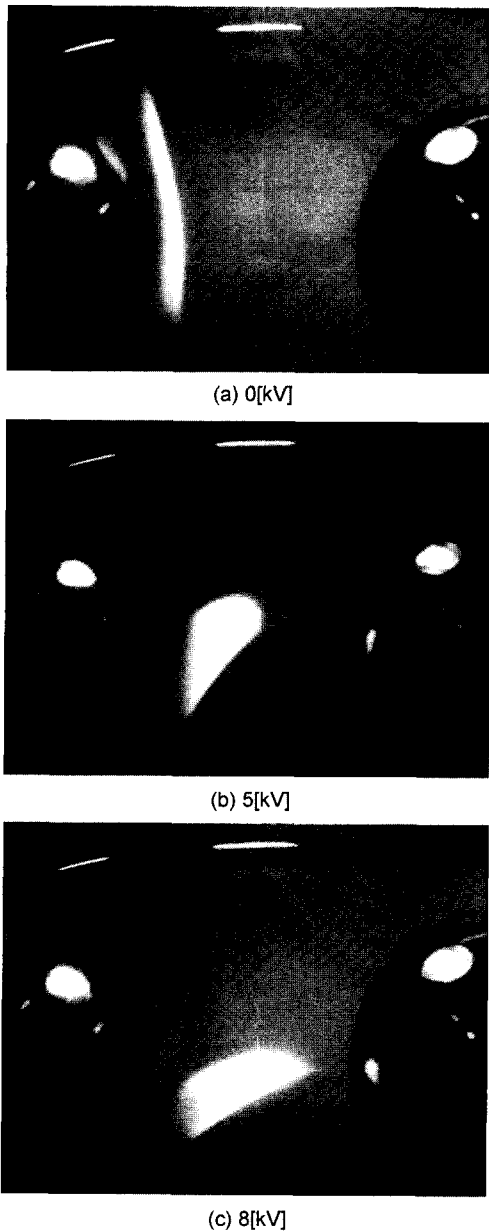


Fig. 9. Shapes of flame in the DC negative voltage with k=0.

어지는 것으로 나타났다. 비교적 낮은 인가전압에서도 화염은 크게 변형하는데 화염의 정전하에 의한 쿨롱력이 전원측 전극으로 향하기 때문이다.

더욱 전압을 상승하면 화염은 전기력선 방향으로 한층 더 기울어지고 있으며, 구대구 전극에서는 코로나 풍에 의한 영향이 무시되므로 화염의 변형은 매우 안

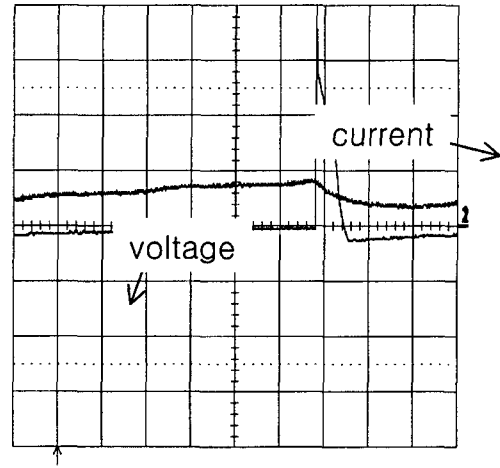


Fig. 10. Voltage and current waveforms in the needle gap with k=0.5, DC(+).

정된 모습을 갖는다.

연소화염은 전리현상에 의해 어느정도 도전성을 갖고 있으므로 전계를 가하면, 화염의 형상은 변화되는 것으로 나타났다. 탄화수소의 화염중에는  $H_3O^+$ ,  $C_3H_3^+$ ,  $C_2H_3O^+$  등의 정이온이 많이 포함되어 있는 것으로 보고되고 있으며,<sup>6)</sup> 그 중에서  $H_3O^+$  이온이 가장 많고, 그 농도는  $10^9 \sim 10^{12}$  [개/cm<sup>3</sup>] 정도이다. 그러나 이 정도의 농도는 연소반응의 전체에서 볼 때 아주 작은 값이라고 생각된다. 부전하를 가진 입자는 거의 대부분 전자이고, 그밖에  $O^-$ ,  $OH^-$ ,  $C_2^-$  등 부이온이 약간 존재하는 것으로 알려져 있다. 이온농도분포를 측정된 데이터를 보면  $H_3O^+$ ,  $C_3H_3^+$ 와 같은 정이온이 부이온보다 농도적으로 훨씬 많은 것으로 보고되고 있다.<sup>6)</sup>

### 3.3 섬락시의 전압 및 전류 파형

#### 3.3.1 직류 정극성인 경우

Fig. 10은 화염의 위치가 k=0.5인 경우, 침대침 겹에 대한 정극성 직류전압을 인가하였을 때 플래시오버가 발생하는 순간에서 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 여기서 인가전압이 직류이므로 파형은 그림과 같이 거의 수평선으로 나타난다. 스케일은 5.0[kV/div.]이며, Fig. 10과 같이 정극성 직류 약 4[kV]에서 플래시오버가 발생되고 있다. 전극사이에 흐르는 전류는 플래시오버 발생전에는 거의 무시되지만, 발생 순간 그림처럼 스파이크 모양으로 수직 상방향으로 큰 전류가 흐르는 것을 알 수 있다.

#### 3.3.2 직류 부극성인 경우

Fig. 11은 k=0.5인 경우 침대침겹에 대한 부극성 직

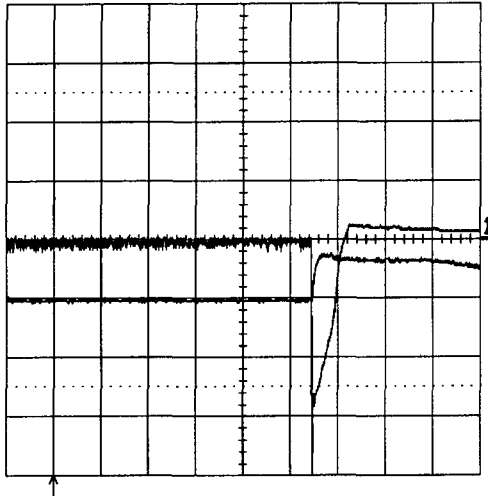


Fig. 11. Voltage and current waveforms in the needle gap with  $k=0.5$ , DC(-).

류전압을 인가하였을 때 플래시오버가 일어나는 순간에서 전압 및 전류파형을 나타낸 것이다. 플래시오버가 발생되기 전에는 Fig. 12과 같이 전압 및 전류 파형은 거의 수평선으로 나타난다. 스케일은  $5.0[\text{kV}/\text{div}]$ 이며, Fig. 11과 같이 부극성 직류 약  $5[\text{kV}]$ 에서 플래시오버가 발생되고 있다. 전극사이에 흐르는 전류는 플래시오버 발생전에는 거의 무시되어 영으로 나타나 있지만, 발생 순간 그림처럼 스파이크 모양으로 수직 하방향으로 큰 전류가 흐르며, 이 전류에 의해 전극사이는 전압파형의 변화가 일어나 부극성 전압이 감소함을 알 수 있다. 구대구 갭에서도 유사한 파형이 관측되고 있으나, 침대침에 비해 플래시오버 발생시 전류파형의 스파이크 모양이 대체로 큰 폭으로 나타나는 경우가 많다.

화염의 상승기류에 대한 유속의 크기를 풍속계로서 측정하였을 때, 화염의 높이  $h=3[\text{cm}]$ 에서 평균 약  $0.3\sim 0.4[\text{m/s}]$ 인 것으로 나타났다. 침대침 갭에서 직류 부극성전압을 인가한 경우 낮은 전압에서도 화염이 전원측 전극으로 흡인되는 것은 화염의 전하로 인해 정전력이 작용하기 때문이다. 그러나 인가전압이 코로나개시전압을 넘게 되면 전원측 전극으로부터 코로나풍이 생기므로 화염은 역으로 정전력에 대해 억제시키는 작용을 받게 된다. 한편 정극성 전압을 인가한 경우는 정전력도 코로나풍도 화염을 억제시키는 작용을 하므로 화염의 형상은 크게 왜곡되는 현상이 나타나고 있다.

### 3.4 연소화염에 대한 열전리 현상

열전리(thermal ionization)는 고온의 기체중에서 입

자 또는 전자의 상호 충돌 및 방사작용등에 의해 전리가 일어나는 현상이다. 만약 기체의 온도가 충분히 높게 되면, 기체분자 또는 원자는 높은 속도에너지를 얻을 수 있으므로 다른 원자나 분자를 충돌하여 전리시킬 수 있다. 이러한 열전리는 화염과 고기압 아크에 있어 주요한 전리원이 되고 있다. 기체의 연소 등 열운동에 의한 입자간의 충돌에 의해 발생하는 열전리과정을 해석하는데 있어서는 양이온과 전자사이의 재결합을 고려할 필요가 있다.

열역학 평형조건하에서 새로운 이온의 생성율은 이온의 재결합율과 동일하다는 가정을 사용하여 인도의 물리학자 M. N. Saha는 가스압력  $p$ 와 절대온도  $T$ 를 사용하여 다음 식 (1)과 같은 전리도  $\theta$ 에 대한 식을 유도하였다.<sup>7)</sup>

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

여기서  $\theta$ 는 전리도(ionization degree)이며, 중성입자 밀도  $n$ 에 대한 이온밀도  $n_i$ 의 비율로서  $\theta=n_i/n$ 로 표시하고, 그 최대값은 1이다. 그리고  $m_e$ 는 전자의 질량,  $h$ 는 플랑크의 상수이므로 이를 대입하면 식 (2)과 같다.

$$\frac{\theta^2}{1-\theta^2} = 2.4 \times 10^{-4} \frac{T^{5/2}}{p} \exp\left(-\frac{W_i}{kT}\right) \quad (2)$$

또한,  $T$ 는 기체의 온도[K],  $p$ 는 기체의 압력[Torr],  $W_i$ 는 기체 입자의 전리전압[eV],  $k$ 는 볼츠만의 상수이다. 이 식을 이용하여 전리도  $\theta$ 를 구하면 다음과 같다. 화염의 온도를  $1,200\sim 1,300[^\circ\text{C}]$  정도라고 가정하고,  $T=1,500[\text{K}]$ ,  $p=760[\text{Torr}]$ ,  $W_i=10[\text{eV}]$  및  $k=1.380 \times 10^{-23}[\text{J/K}]$ 를 대입한다. 여기서 기체의 전리전압은 기체의 종류에 따라 다르지만 일반적으로  $10[\text{eV}]$ 라고 하면, 전리도는  $\theta=1.24 \times 10^{-16}$ 으로 계산된다. 한편 열평형 상태에 있는 기체의 상태방정식은 다음 식 (3)과 같다.

$$p = n k T [\text{Torr}] \quad (3)$$

여기서 볼츠만의 상수  $k$ 의 값을 대입하고,  $p$ 를 [Torr], 가스밀도  $n$ 을  $[\text{m}^{-3}]$ 으로 나타내면 식 (4)과 같다.

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

이 식에서  $p=760[\text{Torr}]$ ,  $T=1,500[\text{K}]$ 를 대입하면  $n=4.9 \times 10^{24}$ 이 된다. 따라서 화염의 전하밀도는 온도  $1,500[\text{K}]$ 에서  $n_i=6.1 \times 10^8[\text{m}^{-3}]$ 이 된다.



**3.5 상대공기밀도의 영향**

L. Paris, R. Cortina 등은 대기압 공기중에서 갭계수를 사용하여 표준상태의 대기압 공기에 대한 플래시오버전압에 대한 실험식을 발표하였다.<sup>8)</sup>

도체 주변에 화염이 존재하게 되면, 이러한 조건들은 크게 변경되어야만 한다. 화염이 존재하지 않는 상태 즉, 정상적인 기상상태의 보정계수는 대개 10[%]이 내지만 화염이 존재할 경우에는 그 영향이 매우 크게 나타나고 있다. L. C. Aicher는 기상상태에 의한 플래시오버전압의 관계식을 다음 식 (5)과 같이 나타내고 있다.<sup>9)</sup>

$$V_s = V_t \frac{H}{\delta} \tag{5}$$

여기서 H는 습도보정계수,  $\delta$ 는 상대공기밀도,  $V_s$ 는 표준시험전압,  $V_t$ 는 시험전압을 나타내고 있다.

이 식을 사용하여 플래시오버 전압에 미치는 화염의 영향을 고려해 본다. 화염이 존재할 경우, 섬락전압값에 가장 큰 영향을 미치는 요소는  $\delta$ 이다.  $\delta$ 의 값은 일반적으로 다음 식 (6)과 같다.

$$\delta = \frac{0.392p}{273 + t} \tag{6}$$

여기서, p는 기압[mmHg]이며, t는 온도[°C]이다. 화염이 존재할 경우 습도는 최소가 되므로 습도보정계수의 영향은 매우 적으므로 이를 무시하면, 식 (5)은 다음 식 (7)과 같이 표시된다.

$$V_t = V_s \frac{0.392p}{273 + t} \tag{7}$$

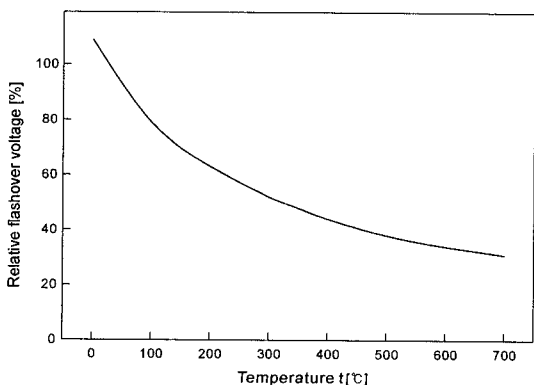


Fig. 12. Relationship between relative flashover voltage and temperature.

따라서 플래시오버전압은 온도 t에 반비례하고, 기압 p에 비례한다. 여기서는 화염이 존재할 경우와 같은 극한 상황에 대한 이론적인 온도보정계수를 조사하였다.

Fig. 12은 대기압 공기의 온도변화에 따른 상대적인 플래시오버전압을 나타낸 것이다. 화염이 존재하는 온도환경에서 즉, 약 350[°C] 또는 그 이상의 온도에서는 공기의 플래시오버전압은 그 표준상태인 20[°C]의 플래시오버 전압에 비해 약 50[%]이하로 감소되는 것을 알 수 있다. 온도가 약 700[°C]로 상승하게 되면, Fig. 12에서 보는 바와 같이 플래시오버 전압은 약 1/3로 감소하게 된다.

**4. 결 론**

본 연구에서는 파라핀 연소화염을 사용하여 침대침 및 구대구 전극배치에서 정극성 및 부극성 직류전압을 인가하였을 때, 1) 화염에 의한 대기압 공기의 플래시오버특성, 2) 인가전압의 크기 및 극성에 따른 화염의 형상변화, 3) 고온 연소화염의 열전리현상 및 4) 플래시오버 특성에 미치는 상대공기밀도의 영향 등에 대해 조사하였다. 침대침 갭과 같은 불평등 전계에서는 직류전압 인가시 코로나풍이 발생되었으며, 인가전압의 크기 및 극성에 따라 화염의 형상은 크게 변화되었다. 본 연구에서는 이러한 화염의 형상변화가 플래시오버 특성에 어떠한 영향을 미치고 있는지에 대해 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 화염이 존재하는 침대침 갭에서 직류전압 인가시 플래시오버가 발생되기 전 코로나풍에 의해 화염이 꺼지는 현상이 나타났다. 전압극성에 따라 코로나풍에 의한 화염의 소화현상은 차이가 나타났으며, k=0.5일 때 정극성은 d=4[cm], 부극성은 d=3[cm]보다 큰 갭에서 화염이 소화되었다.

(2) 구대구갭에서는 코로나풍의 영향은 무시됨으로 침대침 갭처럼 플래시오버가 발생되기 전 화염의 소화현상은 일어나지 않았다. 구대구갭에 대한 플래시오버 전압은 연소화염이 k=0일 때 화염의 존재 유무에 관계없이 모두 정극성이 부극성보다 높은 극성효과가 나타났다. 화염위치가 k=1.0인 경우에는 어느 갭 길이, 즉 임계갭 이하에서 극성 효과는 역으로 나타나고 있다. 그리고 k=0.5인 경우는 화염에 의한 플래시오버전압이 가장 낮고, 극성효과도 거의 나타나지 않았다.

(3) 연소화염이 존재하는 침대침 갭에서는 화염 자체가 정이온을 형성하고 있으므로 인가전압의 극성과 크기에 따른 쿨롱력이 작용하며, 또한 고전압 침전극으로부터 코로나풍이 발생되어 연소화염은 형상변화와

요동현상이 나타났다.

(4) 구대구 전극에서는 침대침 전극과 달리 코로나 풍에 의한 화염의 흔들림이 나타나지 않으므로 화염은 클롱력에 의해서만 변형되고, 변형시의 형상은 매우 안정되어 있었다.

(5) 열역학 평형조건으로 유도된 M. N. Saha의 식을 이용하여 연소화염의 전하밀도를 계산하였다. 대기압 공기에 대해 화염의 온도를 1,200~1,300[°C] 정도라고 가정하면 전리도는  $\theta=1.24 \times 10^{-16}$ 이며, 화염의 전하밀도는  $n_i=6.1 \times 10^8 [m^{-3}]$ 인 것으로 나타났다.

따라서 연소화염이 존재하면, 대기압 공기의 플래시오버특성은 매우 큰 영향을 받고 있다. 이는 전극의 형태에 따라 코로나풍과 정전력이 작용함으로써 화염의 형상변화와 요동이 일어나기 때문이다. 또한 고온화염에 의해 주변 공기의 상대공기밀도가 저하하여 더욱 공기의 플래시오버 특성이 낮아지고 있으며, 연소화염에 대한 열전리의 영향은 크지 않는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. 산불관련정보, “산림청 홈페이지”, <http://www.foa.go.kr:9100/webapp/plsql/fo9sr403>.
2. 김인식, 하장호, “화재발생에 따른 연소화염이 공기의 절

연내력에 미치는 영향”, 한국화재소방학회 논문지, 제6권 제1호, pp.30-38(2002).

3. J. R. Fonseca and A. L. Tan, “Effects of Agricultural Fires on the Performance of Overhead Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp.687-693(1990).
4. 김기욱, “전기관계법규”, 통일출판사, pp.309-350, (2000).
5. 정성계, 이덕출, “개정 신판 고전압공학”, 도서출판 문운당, pp.56-57(1997).
6. A. G. Gaydon and H. G. Wolfhard, “Flames : Their Structure, Radiation and Temperature”, 4th ed., Chapman and Hall, pp.340-372(1979).
7. E. Kuffel and W. S. Zaengl, “High Voltage Engineering Fundamentals”, Pergamon Press, pp. 311-335(1984).
8. L. Paris and R. Cortina, “Switching and Lighting Impulse Discharge Characteristics of Large Air Gaps and Long Insulator String”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 87, No. 4, pp.947-957(1968).
9. L. Aicher, “Variations in the Dielectric Strength of Air”, Allis-Chalmers Electrical Review, Third Quarter(1949).