

연소화염이 플래시오버 특성에 미치는 영향

(The Influence of Flashover Characteristics Caused by Combustion Flames)

김인식 * · 김이국 * · 박재용 * · 이상우 * * · 김충년 * * · 지승욱 * *

(In-Sik Kim · Lee-Kook Kim · Jai-Yong Bak · Sang-Woo Lee · Chung-Nyun Kim · Seung-Wook Jee)

School of Elec. Eng., Kyungil University * , School of Elec. Eng., Yeungnam University * *

Abstract

In this paper, reduction characteristics of the ac flashover voltage in the horizontal air gap of sphere-sphere and needle-needle electrode system were investigated when the combustion flame was present near the high-voltage electrodes. The reduction characteristics of ac flashover voltage were discussed with the thermal ionization process, the relative air density and the deflection phenomena in the shape of flames that changed by the corona wind and coulomb's force. As the results of an experimental, It was found that the reduction of flashover voltages in sphere-sphere system, in comparison with the no-flame case, are 79.9 [%] for $k=0$, 82.9 [%] for $k=0.5$, 87.5 [%] for $k=1.0$, 85.0 [%] for $h=0$ [cm], 40.8 [%] for $h=5$ [cm] and 28.2 [%] for $h=9$ [cm] when ac voltage is applied.

1. 서론

연소화염에 의한 절연과피 특성은 특수 분위기의 방전현상에 대한 연구뿐만 아니라, 예로 연소가스를 사용하는 MHD발전에서 전극 부근에서의 방전현상과 밀접한 관계가 있다.

또한, 아크 화염을 발생하는 차단기의 절연회복 특성, 연소가스를 통과시키는 전기집진기의 방전현상 등에 대한 기초 자료를 얻을 경우에도 활용될 수 있다. 연소화염 자체의 전기적 특성에 대해서는 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔으나, 이들 연구의 대부분은 화염에 대한 자체의 임피던스 특성이나, 전위분포에 따른 화염의 저항을 및 전압·전류 특성 등 물리적 현상에 관해 주로 보고하고 있다 [1-2]. 그러나 고전압 및 방전 공학적 측면에서 화염의 존재에 의한 금속 전극과 화염사이의 플래시오버특성에 대한 연구는 거의 발표되지 않고 있다.

한편, 송전선로 아래에서 산불 화재가 일어난 경우에는 연소 화염에 의해 선로의 절연내력은 크게 저하되는 것으로 보고하고 있다[3-4].

우리 나라는 국토의 대부분이 산지로 구성되어 있으며, 많은 송전선로가 화재에 노출된 산림지역을 통과하고 있다. 따라서 산불로 인한 송전선로의 피해를 예방하고, 또한 효율적으로 대처하기 위해

서는 산불에 의한 플래시오버 특성에 대한 기초 연구가 요망되고 있다.

따라서 본 연구는 구대구 및 침대침 전극을 수평으로 배치하고, 상용 주파수의 교류 전압을 인가하였을 때, 플래시오버 전압에 미치는 화염의 영향을 조사하였다. 수평전극 사이에서 화염의 위치를 변화시킨 경우와 전극과 화염의 상호 높이를 변화시킨 경우에 대한 플래시오버 전압을 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

전극은 구대구 및 침대침 전극을 사용하였으며, 그림 1은 구대구 전극에 대한 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 전극 재질은 스테인레스 강(stainless steel)이며, 구전극은 직경 50[mm]인 표준 전극이며, 침전극은 선단각이 약 30도이다.

본 실험에서는 교류 및 직류 고전압을 사용하였으며, 교류 고전압은 용량 3[kVA]인 고전압 발생장치(High Voltage Generator, 일본, Matsunaga Mfg. Co. Ltd.)를 사용하였다. 이 장치는 1차 입력 전압 220[V], 60[Hz], 단상이며, 2차 출력 전압은 50[kV]이다. 직류 고전압은 상기 고전압 발생장치의 시험용 변압기에서 발생된 교류 고전압을 정류

하여 사용하였다. 정류장치는 실리콘정류기(일본, Tokyo Transformer Co. Ltd.)를 이용하였다.

고전압의 측정은 그림1에서 R_1 및 R_2 로 나타낸 고전압 프로브(High Voltage Probe, 분압비 5000:1)와 디지털 오실로스코프(미국, LeCroy Co., type 9350AL)를 사용하였다. 또한 그림1에서 R_L 은 방전에 의한 전극의 손상을 방지하기 위해 삽입된 보호용 저항이며, $R_L=50[k\Omega]$ 이다. 또한 오실로스코프를 이용하여 방전전류를 관측하기 위해 본 실험에서는 측정용 저항 $R_M=10[k\Omega]$ 을 연결하였다. 방전에 의한 측정기의 손상을 방지하기 위해 네온 램프를 측정용 저항과 병렬로 접속하였다.

연소화염은 파라핀 오일(normal paraffin oil, 순도 100%)을 연료로 사용하였다. 이 파라핀 오일은 석유계 연료이며, 주성분은 탄화수소이다. 이 연료의 조성은 대략 탄소 75-90, 수소 8-25, 산소 0-3.3, 질소 0-2, 황 0-5[%] 등으로 되어 있다. 그리고 파라핀 오일의 비점은 약 450-570[K]이며, 밀도는 약 0.79-0.83[g/cm³], 발열량은 약 40-50[MJ/kg]이다. 파라핀 오일은 액체 연료이며, 단위 중량당 발열량이 크기 때문에 연소 장치를 소형으로 할 수 있으며, 연소 후 회분 등에 의한 장치의 오손이 비교적 적게 발생하는 장점이 있다. 화염의 크기는 전압이 인가되지 않는 상태에서 육안으로 관찰하여 폭 0.5[cm], 높이 3[cm] 정도로 일정하게 유지하였다.

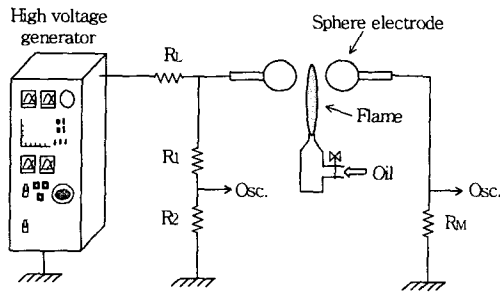


그림 1 실험 장치의 개략도
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

2.2. 화염의 온도 분포 측정

그림 2는 화염에 대한 수직축을 기준으로 하여 상방향 거리 h 에 대한 화염 주위의 온도 분포를 나타낸 것이다. 온도의 측정에 있어서 100[°C] 미만의 낮은 온도는 서미스터 온도계를 사용하였으며, 고온부의 온도 측정은 약 1,600[°C]까지 측정 가능한 열전대 온도계(thermometer, class 0.5, 일

본 Shimadzu. Co., 백금-백금 로지움 thermocouple)를 사용하여 측정하였다.

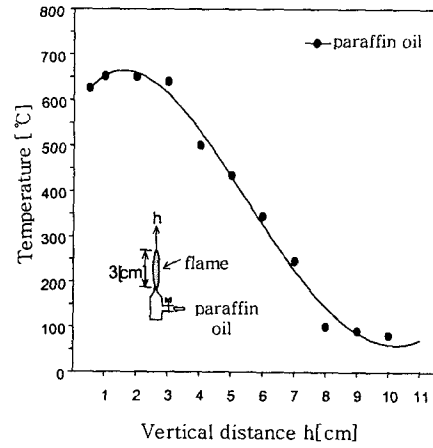


그림 2 화염의 수직거리에 대한 온도분포
Fig. 2 Temperature distribution along the vertical distance

그림 2에서 나타난 바와 같이 파라핀을 연료로 한 소규모 화염의 내부 온도는 약 650[°C]이며, 화염으로부터 수직 거리 h 가 증가함에 따라 온도는 급격히 낮아지고 있다. 그러나 화염으로부터 수직 거리가 증가하여 약 $h=9\sim 10[cm]$ 이상 떨어지면 실내 공기와 온도차가 적어지므로 거리에 따른 온도 분포는 완만하게 감소되고 있다.

2.3. 실험 방법

본 실험에서 절연과피전압의 측정치는 동일한 조건에서 5회 측정하여, 그 평균값을 사용하였다. 그리고 화염의 위치는 그림 3과 같이 접지축 전극으로부터 화염의 거리 l 과 전극의 갭간 거리 d 의 비, 즉 $k=l/d$ 로서 표시하였다.

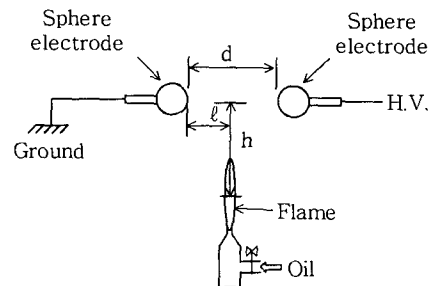


그림 3 전극 및 화염의 배치도
Fig. 3. Schematic diagram of the electrodes and flame

화염의 위치는 $k=0$, $k=0.5$ 및 $k=1.0$ 으로 하였으며, 이것은 전극의 갭간 거리 d 에 관계없이 각각 화염이 접지측 전극, 전극의 중앙 및 고압측 전극에 위치하고 있음을 나타내고 있다. 화염의 높이 h 는 그림과 같이 전극축과 화염사이의 거리이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 화염 위치에 따른 플래시오버 특성

3.1.1. 구대구 갭인 경우

그림 4는 구대구 갭에 대한 화염의 위치에 따른 교류 플래시오버전압을 실패치로서 나타낸 것이다. 여기서 $k=0$, $k=0.5$ 및 $k=1.0$ 이며, 화염의 높이는 $h=0$ 이다. 그림에서 갭간 거리가 비교적 작은 경우에는 $k=0.5$ 에서 플래시오버전압이 가장 낮고, $k=0$ 과 $k=1.0$ 일 때 플래시오버 값은 그 차이가 크지 않았다. 그러나 갭이 비교적 큰 $d=4$ [cm]인 경우 플래시오버전압은 $k=1.0$, $k=0$ 및 $k=0.5$ 의 순으로 높게 나타나고 있다. 화염이 없을 때의 섬락전압을 기준(100[%])으로 하였을 때, $k=0$, $k=0.5$ 및 $k=1.0$ 일 때 섬락 전압의 평균값은 각각 79.9, 82.9 및 87.5[%] 저하된 것으로 나타났다. 이는 화염위치에 따른 화염의 형상변화가 플래시오버특성에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

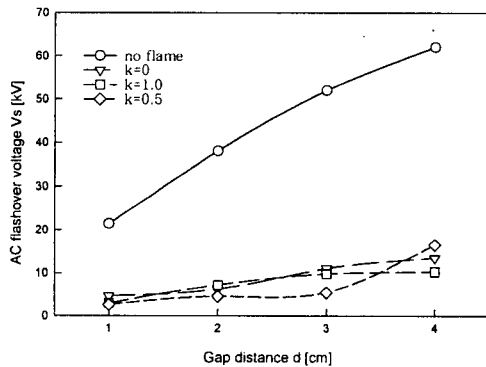


그림 4 구대구갭의 교류섬락전압과 갭간거리의 관계
Fig. 4 AC flashover voltage vs. gap distance with sphere-sphere electrode system

3.1.2. 침대침 갭인 경우

그림 5는 갭간 거리 $d=6$ [cm]에 대한 침대침 갭에서 전극간 화염의 위치변화에 따른 교류 섬락전압 특성을 실패치로 나타낸 것이다. 여기서 화염의 위치는 $k=0$, $k=0.5$ 및 $k=1.0$ 으로 하였으며, 화염의 높이는 $h=0$ [cm]이다. 섬락전압에 대한 화염의 영향을 비교하기 위해 그림 5에서는 화염이 없을 때의 값을 동시에 나타내었다. 갭간 거리 $d=1$ [cm]일 때

섬락전압은 위치에 관계없이 거의 동일하였으나 $d=2$ [cm]인 경우 $k=0.5$ 에서 가장 낮고, $k=0$ 및 $k=1.0$ 의 순으로 높게 나타났다. 한편 침전극에서는 코로나풍에 의해 어느 갭 이상에서는 플래시오버가 발생되기 전에 화염이 꺼지는 현상이 나타났다.

그림 5의 ☆표는 코로나풍에 의해 화염이 꺼지는 것을 나타내고 있다. 그림과 같이 섬락전압의 측정은 화염의 소화로 인해 $k=0$, $k=0.5$ 및 $k=1.0$ 인 경우 각각 $d=2, 3$ 및 4 [cm]까지만 측정하였다.

화염이 없는 경우의 플래시오버전압을 100[%]으로 하였을 때, $k=1.0$ 인 경우의 화염에 의한 섬락전압은 화염이 없을 때의 섬락전압에 비해 평균 62.7[%] 저하된 것으로 나타났다.

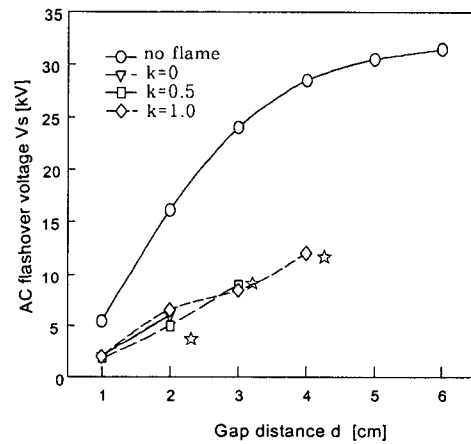


그림 5 침대침갭의 교류섬락전압과 갭간거리의 관계
Fig. 5 AC flashover voltage vs. gap distance with needle-needle electrode system

3.2. 화염높이에 따른 플래시오버 특성

3.2.1. 구대구 갭인 경우

그림 6은 갭간 거리 $d=4$ [cm]까지 변화시킨 경우, 전극으로부터 화염의 높이 h 에 따른 교류 플래시오버전압을 나타낸 것이다. 이 때 섬락전압은 실패치이며, 높이는 $h=0$, $h=5$ 및 $h=9$ [cm]이다. 그리고 화염 위치는 모두 $k=0.5$ 이다. 그림 6에서 $h=0$ [cm]일 때 섬락전압은 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내고 있으나, $h=5$ 및 $h=9$ [cm]에서는 높이 h 와 갭간 거리 d 에 비례하여 섬락전압은 증가하였다. 화염이 없는 경우의 섬락전압을 100[%]로 하였을 때, $h=0$ [cm]인 경우, 섬락전압의 평균값은 15[%]이지만, $h=5$ 및 $h=9$ [cm]인 경우 섬락전압의 평균값은 59.2 및 71.8[%]로 나타났다. 섬락전압은 갭간 거리 d 와 화염 h 에 비례하고 있으며, $d=4$ 및 $h=9$ [cm]일 때 가장 높게 나타났으며, 이때의 섬락전압은 85.4[%]이다. 이것은 $h=0$ [cm]인 경우 인가전압

에 의해 화염의 형상이 변화하지만, h가 크게 되면 인가전압에 따른 화염의 형상변화에 대한 영향은 거의 나타나지 않고, 공기의 상대공기밀도에 의해 많은 영향을 받는 것으로 생각된다.

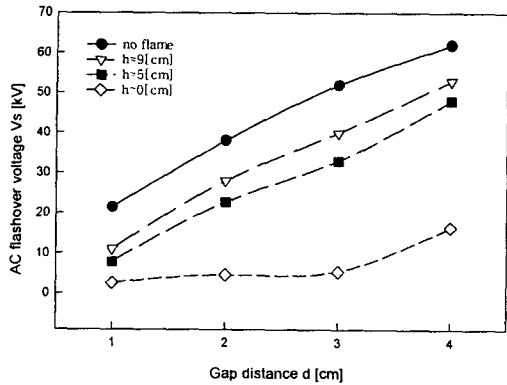


그림 6 구대구갯의 교류섬락전압과 갯간거리의 관계
Fig. 6 AC flashover voltage vs. gap distance with sphere-sphere electrode system

3.2.2. 침대침 갯인 경우

그림 7은 수평배치인 침대침 갯에서 화염높이 h를 변화시켰을 때, 갯간 거리 d에 대한 교류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 여기서 교류 섬락전압은 실효치이다. 화염의 높이는 h=0, 3, 5, 7 및 9 [cm]이며, 화염 위치는 모두 k=0.5이다. 화염에 의한 교류섬락전압은 높이 h와 갯간 거리 d에 비례하는 것으로 나타났다. h=0 및 h=3[cm]와 같이 화염의 높이가 작은 범위에서는 침전극으로부터 코로나풍에 의해 그림 7의 ☆표와 같이 화염의 소화현상이 나타났다. 따라서 이 범위에서는 갯간 거리 d=3[cm]까지만 조사하였다.

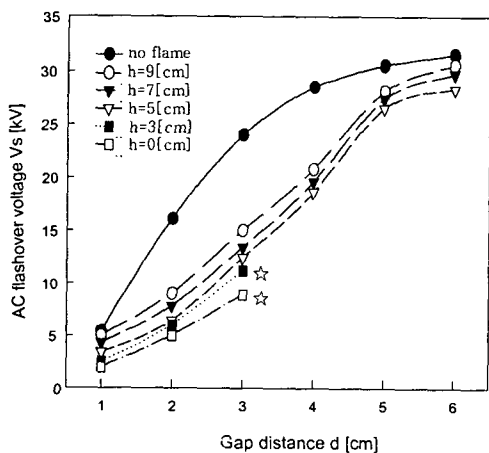


그림 7 침대침갯의 교류섬락전압과 갯간 거리의 관계
Fig. 7. AC flashover voltage vs. gap distance with needle-needle electrode system

화염이 없을 때의 섬락 전압을 100[%]로 하였을 때, h=0[cm]인 경우의 평균 섬락전압은 35.0 [%]이지만, h=5, 7 및 9[cm]인 경우, 섬락전압의 평균값은 65.8, 72.7 및 78.6[%]인 것으로 나타났다. 이는 화염높이 h가 current 대공기밀도가 증가되므로, 섬락전압을 상승하는 것으로 판단된다.

3.3. 플래시오버시의 극성

그림 8은 갯간 거리 d=2[cm]이며, k=0.5인 구갯에서 화염에 의한 플래시오버시의 극성을 나타낸 것이다. 그림 8과 같이 전압의 파고값 7[kV]에서 화염에 의해 섬락이 발생된 것을 나타내고 있으며 섬락은 정극성에서 일어나고 있다. 그러나 전극이 화염 voltage ! 경우에는 대개 섬락은 부극성에서 일어나고 있다. 침갯인 경우에도 역시 정극성에서 코로나와 플래시오버가 발생되고 있다.

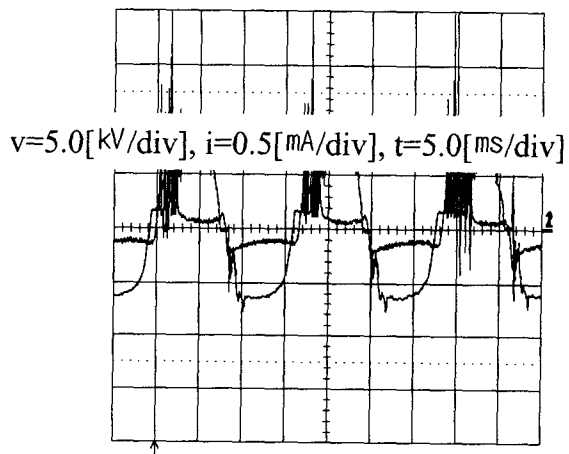


그림 8 구대구갯에 대한 전압 및 전류파형(k=0.5)
Fig. 8 Voltage and current waveforms with k=0.5

3.4. 열전리의 영향에 대한 고찰

열전리(thermal ionization)는 고온의 기체에서 입자, 또는 전자의 충돌이나 방사작용 등에 의해 발생하는 전리작용이다. 열역학 평형조건하에서 새로운 이온의 생성율은 이온의 재결합율과 같지 않으면 안 된다. 이러한 가정을 사용하여 인도의 물리학자 M. N. Saha는 가스압력 p와 절대온도 T를 사용하여 다음 식과 같은 전리도 θ 에 대한 식을 유도하였다[5].

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

여기서 θ 는 전리도(ionization degree)이며, 중성 입자밀도 n에 대한 이온밀도 n_i 의 비율로서 표시

된다. 전자질량 m_e 와 플랑크 상수 h 을 대입하면 다음 식과 같다.

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

여기서 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 θ 을 구하기 위해 일반적인 화염 온도 및 기체의 전리전압을 사용하여 $T=1,500$ [K], $p=760$ [Torr], $W_i=10$ [eV] 및 $k=1.380 \times 10^{-23}$ [J/K]를 대입하였다.

그 결과, 전리도 $\theta=1.24 \times 10^{-16}$ 으로 계산된다. 한편 열평형 상태에 있는 기체의 상태방정식은 다음 식과 같다. $p = nkT$ [Torr] 여기서, k 의 값을 대입하고 p 을 [Torr], 가스밀도 n 을 [m^{-3}]으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$n = 9.66 \times 10^{24} \frac{p}{T}$$

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

한편 문헌에 의하면 일반적인 정상 상태의 대기압 공기중에 대한 이온 밀도는 약 $2 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8$ [m^{-3}]이므로[6], 소규모 화염의 최고온도에서도 열전리의 영향은 크지 않다고 생각된다. 열전리에 대한 상기조건을 수치계산한 결과에 따르면 전리도 $\theta=0.5$ 가 되려면 온도 $T=1.1 \times 10^4$ [K]가 요구되고 있다. 따라서 화염에 의한 섬락전압의 저하요인은 열전리의 영향, 공기밀도의 저하, 전극의 온도 상승 및 연소 생성물의 영향 등을 생각할 수 있으나, 앞에서 기술한 바와 같이 열전리의 영향과 전극의 온도상승은 비교적 그 영향이 적은 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구는 구대구 및 침대침 전극에서 상용주파수의 교류전압을 인가하였을 때, 화염에 의한 섬락전압의 저하특성을 조사하였다. 갭간 거리를 최대 6[cm]까지 변화시켰을 때, 전극사이에 화염이 존재하는 경우, 화염의 위치에 따른 섬락특성과 전극과 화염의 상호 높이에 따른 섬락특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 구대구 갭에서 화염의 위치가 $k=0$, $k=0.5$ 및 $k=1.0$ 일 때, 화염에 의한 교류 섬락전압의 평균값은 화염이 없을 때의 섬락전압에 비해 79.9, 82.9 및 87.5[%] 저하된 것으로 나타났다.

2) 침대침 갭인 경우는 $k=1.0$ 일 때, 화염에 의한 섬락전압은 화염이 없을 때의 섬락전압에 비해 평균 62.7[%] 저하된 것으로 나타났다.

3) 화염의 높이에 따른 교류섬락 특성에서 화염 높이 h 와 갭간 거리 d 에 비례하여 섬락전압은 상승하였다. 구대구 갭에서 $h=0$, $h=5$ 및 $h=9$ [cm]일 때 교류 상대 섬락전압의 평균값은 85.0, 40.8 및 28.2[%] 저하된 것으로 나타났으며, 침대침 갭인 경우는 $h=5$, 7 및 9[cm]일 때 섬락전압의 평균값은 34.2, 27.3 및 21.4[%] 저하된 것으로 나타났다.

4) 화염의 존재에 의해 교류 섬락전압이 저하되는 원인은 주로 전압에 의한 화염의 형상변화와 주변 공기의 상대공기밀도의 저하에 기인하는 것으로 생각된다.

5) 열전리에 관한 Saha의 식을 이용하여 전리도를 계산하였다. $p=760$ [Torr] 및 $T=1,500$ [K]에 대한 화염의 전하밀도는 약 $n_i=6.1 \times 10^8$ [m^{-3}]인 것으로 나타났다. 따라서 본 실험과 같은 소규모 화염은 열전리의 영향이 크지 않은 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] K. Koyama, T. Sekiguchi, "The Measurement of the Electrical Conductivity of Seeded Flame Plasmas," Trans. on IEE Japan, Vol.87-6, No. 945, pp.1145-31151, 1987.
- [2] H. Kiwaki, S. Komeji, "Electrical Properties of Combustion Flames," Journal of Applied Physics Japan, Vol.41, No. 10, pp.1077-1084, 1972.
- [3] Electric Power Research Institute, "Transmission Line Reference Book, 345kV and Above/Second Edition," pp. 381-419, 1989.
- [4] H. J. West, D. W. McMullan, "Fire Induced Flashovers of EHV Transmission Lines," IEEE-PES Winter Meeting, New York, Paper A73047-2, February 1978.
- [5] E. Kuffel, W. S. Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamentals," Pergamon Press, pp. 311-335, 1984.
- [6] 정성계, 이덕출, "개정 신판 고전압공학" 도서출판 문운당, pp. 56-57, 1997.