

대향류 확산화염의 소멸특성에 미치는 직류전기장의 영향에 관한 실험적 연구

박익형* · 김민국* · 원상희** · 차민석† · 정석호*

Experimental Study on the Effect of DC Electric Field on Extinction Characteristics of Counterflow Diffusion Flame

I. H. Park*, M. K. Kim*, S. H. Won**, M. S. Cha†, and S. H. Chung**

ABSTRACT

The effect of DC electric fields on the flame extinction was investigated experimentally in counterflow configurations for the methane/oxygen/nitrogen diffusion flame. The electric fields was applied by connecting the high voltage and ground terminals to the upper and lower burners, respectively. In case of having electric fields, several modes of flame extinction was observed according to the electric field intensity and strain rate defined by the exit velocity. To visualize and characterize the flame structure and intensity, planar LIF technique was adopted for OH radicals. Consequently, several length scales, including the flame width, thickness, and height from the burner tip, were introduced to explain the various flame behaviors and to characterize the flame extinctions. It was found that the variation of flame width and the chemical reaction are strongly related to a critical electric field intensity, thus the various modes of diffusion flame extinction could be observed due to the electric fields.

Key Words : Electric field, Ionic Wind, Saturation, Extinction, Strain Rate

기 호 설 명

E : Electric Field Strength

V : Voltage

a : Strain Rate

U_O : Oxidizer Nozzle Exit Velocity

U_F : Fuel Nozzle Exit Velocity

X : Mole Fraction

L : Distance between Burners

subscript

F : Fuel

O : Oxidizer

1. 서 론

전기장이 화염에 미치는 영향에 관한 연구는 오랜 연구 분야의 하나로써 화염전파속도의 증가,

화염의 안정화, 배출물의 감소, 소멸한계의 확장 등의 측면에서 많은 연구들이 수행되어 왔다 [1~9]. 그 과정에서 전하를 띤 이온들에 작용하는 전기력에 의한 이온풍 효과(Ionic wind effect)와 전기장에 의한 화학 반응의 변화가 중요하게 다루어 졌다.

Hu[2]등은 Co-flow와 Candle type 메탄-공기 화염에서 전기장의 효과를 관찰하였고, 이를 이온풍 효과로 설명하였다. Saito[3]등의 연구에서

* 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처자, shchung@snu.ac.kr

** 한국과학기술연구원(KIST)

‡ 한국기계연구원(KIMM)

는 전기장 하에서 매연이 감소됨을 보고하였으며, 이를 이온풍 효과에 의한 mixing의 강화로 인하여 화염의 강도가 증가한 결과로 설명하였다. 또, Ueda[4]등은 액적 확산 화염에서 이온풍 효과에 의해서 화염의 Burning Rate Constant가 증가한다는 결과를 보고 하였다.

그러나 Miller[5]와 Chen[6]등은 전기장의 효과를 이온풍 효과만으로는 설명될 수 없는 경우를 보고하였다. Heinsohn[7]등은 프로판 대향류 확산화염에서 전기장에 의한 화염의 소멸 한계 확장을 보고하였는데, 이를 설명하기 위해 화학 반응의 변화를 제안하였으며, Sher[8,9]등은 전기장의 구배에 의한 화염 소멸과 이온풍에 의한 화염의 소멸 현상을 보고하였다.

그러나 기존의 연구 결과들이 버너의 형상, 화염 형상 등의 차이로 인하여 화염의 소멸 현상에 미치는 전기장의 효과에 대하여 서로 상반된 결과를 보이는 등 일반적인 해석을 도출하기에는 미흡하다고 하겠다.

또한, 기존의 연구들은 일반적으로 높은 스트레인을 조건에서 수행되어 상대적으로 스트레인이 작은 조건에서 복사열손실과 반경방향 열손실 효과의 증가[10,11]로 인한 소멸 현상에 대한 전기장의 영향에 대한 연구가 이루어지지 못하였다.

이에 본 연구에서는 대향류 버너를 사용하여 전기장에 의한 화염의 소멸 특성을 넓은 범위의 스트레인을 조건에서 살펴보았다.

2. 실험 장치 및 방법

실험에 사용한 버너의 개략적인 모양은 Fig. 1과 같다. 2.8mm × 20mm × 2의 Double Slit을 통해서 질소로 희석한 연료와 산화제를 서로 반대 방향으로 공급하여 대향류 확산 화염을 만들었다. 연료로는 순도는 99.95%의 메탄을 사용하였으며, 산화제로는 순도 99.999%의 공기를 사용하였다. 외부의 공기에 의한 교란을 차단하기 위하여 질소를 차폐 가스로 사용하였다.

각각의 유량은 질량유량계 (Mass Flow Controller)를 사용하여 제어했으며, 균일한 출구 유속 조건을 위하여 Porous Plate를 사용하였다. 버너 사이 간격은 16mm로 고정하였다.

직류 전원 장치(Korea Switching, DC Plus Voltage Power Supply)를 이용하여 산화제가 공급되는 상부 버너에 고전압을 걸어주었으며, 연료가 공급되는 하부 버너에는 그라운드를 연결하여 버너 사이에 전기장을 형성하였다. 화염 지역에 균일한 전기장이 걸리게 하기 위하여 Porous Plate의 크기를 노즐 출구 영역보다 크게 하였다. 유속은 약 10cm/s에서 60cm/s까지 바꾸면서,

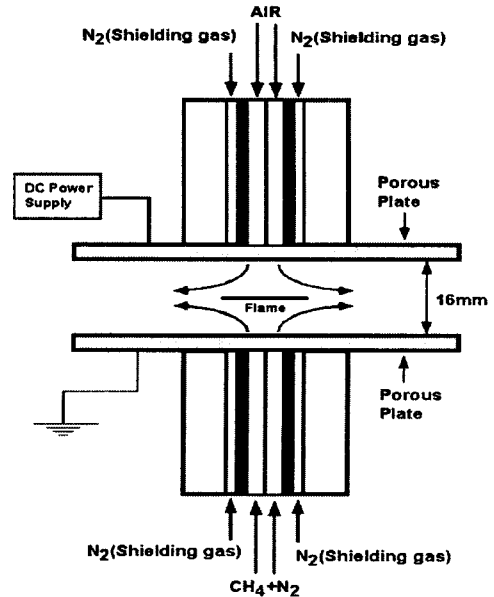


Fig. 1 Schematic of Burner Geometry

각각의 유속 조건에서 전기장의 크기의 변화에 따른 화염의 변화를 살펴보았다.

오실로스코프(Tektronics TDS1012B)와 1000배 프루브(Tektronics P6015A)를 통해서 화염이 소멸되는 순간의 전압을 측정하였다.

디지털 카메라(Nikon D100)를 이용한 화염의 직접사진과 레이저유도형광법 (laser induced fluorescence : LIF)을 이용한 OH LIF 이미지를 동시에 측정하였다. 이때, Nd:YAG 레이저 (Continuum, PL 8000)와 Dye 레이저 (Continuum, ND6000)를 통해 얻은 여기광 (282.744nm)사용하였으며 레이저와 동기된 ICCD 카메라(Princeton Instrument, ICCD-MAX)에 광대역 필터(UG11, WG305)를 사용하여 OH LIF 이미지를 얻어내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기장과 스트레인에 따른 소멸한계

전기장의 크기와 스트레인에 따른 소멸 한계를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 이때 스트레인과 전기장의 세기는 각각 $a_0 = U_0/L_0$, $E_0 = V_0/L_0$ 의 식으로 결정하였다.

연료 물분율 $X_F = 0.19$ 에 대하여 전기장이 걸리지 않은 경우 ($E_0 = 0$), 화염의 소멸 스트레인은 50[1/s]과 20[1/s]의 두 가지 값을 갖는다.

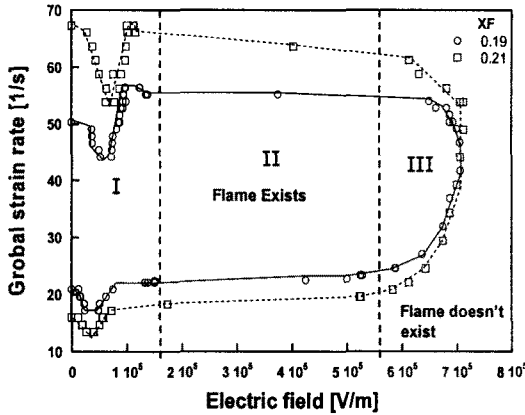


Fig. 2 Flame Extinction Map

이는 각각 유속 증가에 따른 Damköhler 수의 감소로 발생하는 소염과 유속이 작은 경우에 화염의 크기가 작아지면서 주변으로의 열손실 효과가 증가하여 발생하는 소염 한계를 나타낸다.

전기장이 존재하는 경우에도 이러한 두 가지 형태의 소염특성이 나타나며, 연료 볼분율 $X_F = 0.19$ 의 경우 스트레인을 32[1/s] 값을 경계로 스트레인에 의한 두 가지 소염현상이 구분지어 진다.

전기장의 크기가 비교적 작은 경우(영역 I), 높은 스트레인에 의한 소염 영역($a_o > 32[1/s]$)내의 소염한계는 전기장의 증가에 따라 감소하다가 증가하는 경향을 보였다. 반면에 낮은 스트레인에 의한 소염 영역($a_o < 32[1/s]$)에서는 전기장의 증가에 따라 소염한계가 증가하다 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 소염한계의 변화 경향은 화염폭의 변화와 관련하여 설명될 수 있었으며 이는 이후 내용에서 자세히 다루도록 하겠다.

높은 스트레인을 영역의 소염 한계에 있어서 전기장의 크기가 약 $1.35 \times 10^5 \text{V/m} \sim 6.5 \times 10^5 \text{V/m}$ ($\Delta \sim 5.15 \times 10^5 \text{V/m}$)로 변할 때 소염한계 스트레인은 약 $55.2[1/s] \sim 54.0[1/s]$ ($\Delta \sim 1.2[1/s]$)의 변화를 보였으며, 낮은 스트레인을 영역의 소염 한계에서는 전기장의 크기가 약 $1.4 \times 10^5 \text{V/m} \sim 4.9 \times 10^5 \text{V/m}$ ($\Delta \sim 3.5 \times 10^5 \text{V/m}$)로 변할 때 소염한계 스트레인은 약 $22.2[1/s] \sim 22.4[1/s]$ ($\Delta \sim 0.2[1/s]$)의 변화를 나타냈다. 따라서 전기장의 변화에 대하여 소염한계의 변화가 매우 작은 영역(영역 II)이 존재함을 알 수 있다.

전기장의 크기가 영역 II 이상으로 증가하면, 화염의 소염한계는 높은 스트레인과 낮은 스트레인의 경우 모두 감소하였으며, 최대 전기장의 크기 $7.07 \times 10^5 \text{V/m}$ (이때 $a_o \sim 41.6[1/s]$) 이상에서는 스트레인에 관계없이 화염이 모두 소염되었

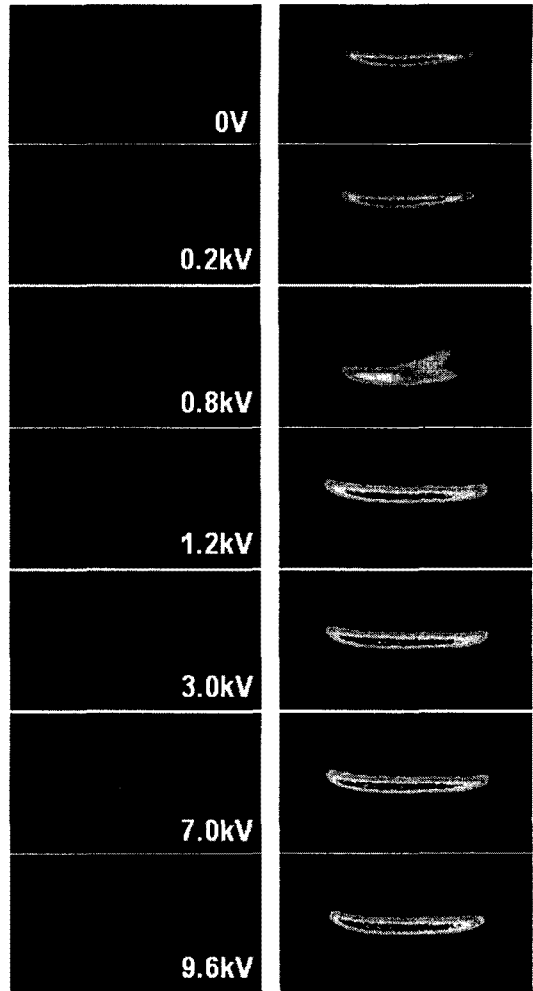


Fig. 3 Direct Photos and OH LIF Images

다.

3.2 화염 강도와 위치의 변화

전기장과 스트레인에 따른 소염 특성을 화염 강도와 위치를 통해 살펴보았다. 확산 화염의 경우 화염은 연료와 산화제가 이론당량비로 혼합되는 위치에 존재하며 이 지점에서 화염 강도는 최대가 된다. 따라서 본 연구에서는 화염의 위치와 강도의 변화 경향을 이론당량비 부근에서 최대 신호를 갖는 것으로 알려져 있는 OH LIF 신호 측정하여 사용하였다[14]. Fig. 3은 $U_0 = 22 \text{cm/s}$, $X_F = 0.19$ 에서의 인가전압에 따른 OH LIF 신호의 이미지와 동시에 계측한 직접사진을 나타낸다. 화염은 대부분의 전기장 조건에서 안정적으로 존재하였으나, 인가전압 0.8kV 부근에서 불안정한 거동을 보였다.

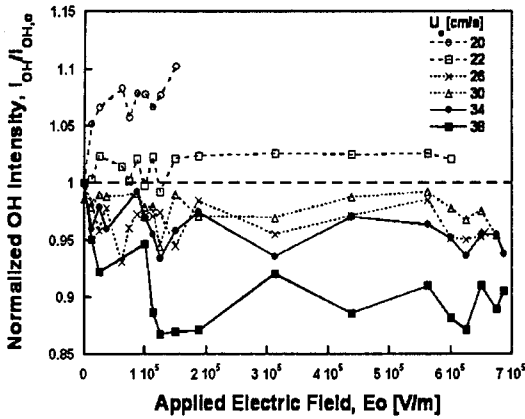


Fig. 4 OH Intensity according to E in each U_0

안정적인 화염에 대하여 초기 유속과 전기장에 따른 OH LIF 강도변화를 전기장이 없는 경우의 OH 강도비로 나타내었다.(Fig. 4)

출구 유속이 26cm/s 이상의 경우 OH 강도의 비는 전체 인가 전기장 조건에 대해 1보다 작아지며, 유속이 클수록 전기장의 증가에 따른 OH 강도의 비는 크게 감소하는 경향을 나타냈다. 출구 유속이 22cm/s 이하의 경우 전기장의 증가에 따라 OH 강도의 비는 1보다 커지며, 이 경우는 유속이 작을수록 전기장에 따라 크게 증가하는 경향을 보였다. 또한 전기장에 대한 화염 강도의 변화는 유속 조건에 따라 차이가 있으나 특정 전기장의 크기 이상에서 매우 작아지는 경향을 보인다. 그러나 OH LIF 신호의 측정 과정에 발생한 실험적 오차로 인해 기준이 되는 전기장 크기를 결정하기는 어렵다.

Figure 5는 초기유속과 전기장에 따른 화염 위치의 변화를 나타낸다. 화염 위치는 중심축을 기준으로 OH 신호가 최대가 되는 지점을 측정하여 얻었다. 전기장에 따른 화염의 위치의 변화는 초기 낮은 전기장 영역에서 급격하게 변하다가 특정 전기장의 세기 이상에서는 변화폭이 현저히 줄어들게 된다. 유속 조건 22cm/s에서 전기장에 대한 화염 위치의 기울기 변화를 전기장의 크기에 대해 살펴보면(Fig. 6) 전기장의 변화율에 대한 화염 위치의 변화율이 급격히 감소하다가 1.8×10^5 V/m 이상에서는 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 변화율이 거의 일정하게 유지되기 시작하는 전기장의 크기는 유속 조건에 따라 차이가 있으나 1.2×10^5 V/m ~ 1.88×10^5 V/m 범위 안에 존재하였다.

Lawton과 Weinberg는 화염에 대한 전기장의 효과를 이온풍으로 설명하였다.[1] 이는 화염장에 존재하는 전하를 띤 이온들이 전기장 방향으로 힘을 받게 되어 유동장에 영향을 주게 된다는 것

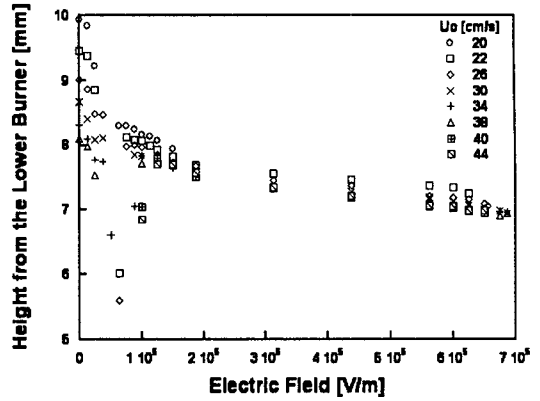


Fig. 5 Flame Height in several U_0 on E

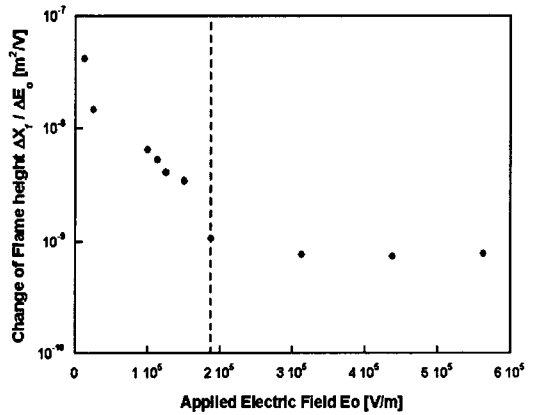


Fig. 6 Change of Flame Height with E_0

이다. 이러한 이온풍의 효과는 본 실험의 화염의 위치의 변화를 발생 시키며, 그 결과 화염은 전기장 방향으로 이동하게 된다. 또한 Lawton과 Weinberg는 이러한 이온풍의 효과가 전기장의 세기에 따라 증가하다가 특정임계 전기장, E_c 이상에서 그 효과가 현저히 감소한다고 보고한바 있다. 이는 특정값 이상의 전기장에서 화염 내의 입자들의 이동성(Mobility)이 급격하게 증가하여 이온풍의 영향이 사라진다고 보고하였으며, 그 임계값을 1.5×10^5 V/m으로 제시하였다. 이 값은 본 실험에서 구한 임계값의 범위(1.2×10^5 V/m ~ 1.88×10^5 V/m)와 잘 일치한다. 따라서 전기장이 임계값이하인 영역(영역I)에서는 화염의 소멸 특성이 이온풍의 영향에 좌우되는 것으로 사료된다.

3.3 화염폭의 변화

앞서 전기장의 크기가 임계치보다 작은 영역I에서 화염의 소멸특성에 이온풍 효과가 중요하게

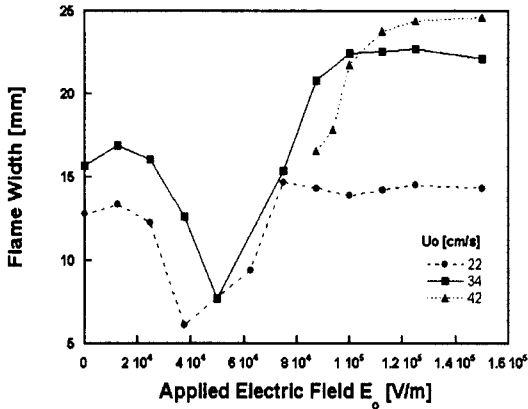


Fig 7. Flame Width with Eo

작용함을 확인하였다. 그러나 전기장에 대하여 단조변화를 보이지 않는 소염한계의 경향은 이 영역에서 전기장에 대하여 단조증가하는 이온풍 효과만으로는 설명되지 않는다.

낮은 스트레인율에서의 소염현상의 경우 작은 출구 유속 조건에 의해 화염의 폭이 작아지면서 복사열손실과 반경방향 열손실 효과의 증가하여 소염이 발생한다.[10,11] 따라서 이러한 특성을 살펴보기 위하여 화염의 폭의 변화를 측정하였다. Figure 7은 전기장이 낮은 경우(영역I)에서 화염의 폭 변화를 나타낸다.

그림에서 화염의 폭이 전기장에 의해서 감소하다 증가함을 알 수 있다. 화염폭의 감소는 주변으로의 열손실 효과를 증가시키며, 그 결과 화염의 강도가 감소되어 소염한계가 축소된다. 이는 영역 I에서 높은 스트레인율의 소염 한계특성이 전기장의 증가에 대하여 감소, 증가하는 경향과 일치한다. 따라서 일반적으로 높은 스트레인율의 소염특성에 대한 연구에서 무시되었던 열손실 효과는 전기장에 의한 화염폭의 변화로 인하여 소염 한계 변화에 중요하게 작용하게 됨을 알 수 있다.

낮은 스트레인율의 소염의 경우는 전기장이 없는 경우에 있어서도 화염폭의 감소로 증가된 열손실 효과로 인하여 소염이 발생하므로, 전기장의 증가에 따라 화염폭이 감소하게 되면, 이러한 열손실 효과가 가중되어 소염한계는 더욱 좁아질 것으로 예상할 수 있다. 그러나 본 실험에서 낮은 스트레인율의 소염한계 경향은 전기장의 증가에 따라 확장되었다가 좁아지는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 화염폭의 감소/증가에 의해 기대되는 열손실의 증가/감소의 경향과는 일치하지 않는다. 그러나 Figure 4에서 낮은 스트레인율 영역에서 OH 강도가 전기장의 증가에 대하여 증가함을 보였다. 이는 전기장 의해 화염강도가 증가하여 소염 한계가 확장될 수 있음을 의미한

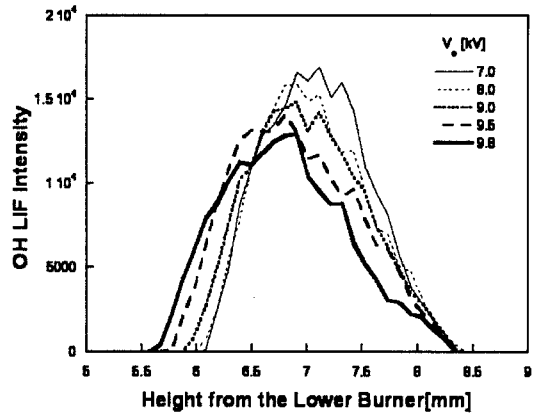


Fig 8. OH distribution in High E

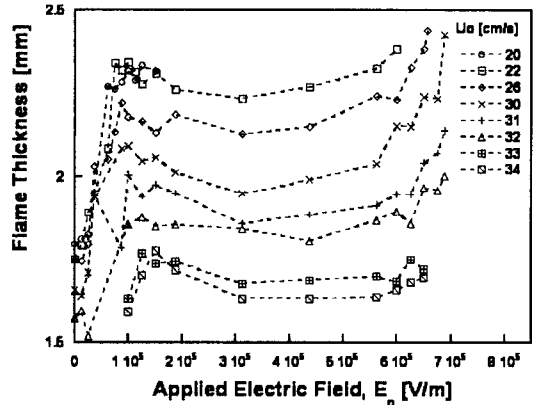


Fig. 8 Flame Thickness according to E in each Uo

다. 따라서 낮은 스트레인율의 소염특성에 있어서는 전기장에 의한 화염강도의 증가와 화염폭의 변화에 의한 영향이 동시에 작용하여 소염 한계가 확장되었다가 감소하는 것으로 사료된다.

3.4 화염 두께의 변화

확산화염이 소염 조건에 근접하게 되면 연료, 산화제의 유출량이 증가하여 반응지역이 넓어지게 되며, 그와 함께 화염의 강도도 감소하게 되어 소염에 이르게 된다. Figure 8은 유속조건과 전기장에 따른 화염 두께의 변화를 나타낸다. 이때 화염의 두께는 OH 강도를 구한 구간의 평균 두께를 사용하였다.

영역I, II에 대한 화염 두께 변화의 경향은 앞서 살펴본 전기장에 대한 OH강도와 화염 높이의 변화 경향 일치하는 것으로 나타났다. 영역III의 경우 전기장의 증가에 따라 화염 두께가 증가함을 알 수 있다. Figure 9는 영역III에 해당하는 인가

전압의 변화에 대한 중심축의 OH 신호의 강도와 분포를 나타낸다. 전기장에 의해 반응지역의 넓어지면서 화염 강도가 감소하며, 그 결과 소염한계에 이르게 되는 것으로 사료된다.

이러한 소염현상은 임계값을 갖는 이온풍 효과로 설명될 수 있었던 영역I, II의 전기장 크기 이상의 전기장 조건에서 발생하는 것으로 이는 또 다른 임계값이 존재할 수 있음을 의미한다.

Lawton 등은 전기장의 크기가 약 $5.7 \times 10^5 \text{V/m}$ 이상에서 breakdown이 발생함을 보고하였다. [1]. 따라서 plate 양단에 전기장이 매우 크게 형성되면, 전자가 반응지역 뿐만 아니라 비반응 지역까지 축적되면서 breakdown이 발생할 수 있게 된다. 본 실험의 경우에는 이러한 breakdown 현상으로서의 천이 과정에서 화염이 급격하게 전기장의 영향을 받아 소염되는 것으로 생각되며 정확한 임계값의 측정을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다고 하겠다.

결과적으로 영역III의 소염한계는 breakdown 현상으로서의 천이 과정에 의한 영향과 스트레인을 따른 두 가지 소염 특성에 의해 결정되게 된다.

4. 결 론

전기장이 화염의 소염 특성에 미치는 영향에 대하여 대향류 확산화염에 대하여 넓은 스트레인을 범위에서 살펴보았다. 전기장과 스트레인의 크기에 따라 구분된 영역별로 소염현상에 중요하게 작용하는 영향을 화염의 위치, 화염폭, 그리고 화염의 두께의 길이차원의 물리량을 이용하여 알아보았다.

그 결과 화염의 소염 특성은 낮은 전기장의 세기(영역I)에서 이온풍의 효과로 인하여 크게 영향을 받는다. 이온풍 효과의 임계값 이상(영역II)에서는 전기장의 효과가 현저히 사라지며, 이후 breakdown 발생 영역에 접근함에 따라 다시 전기장의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

또한 전기장이 존재하는 경우의 소염특성 연구에서는 높은 스트레인의 소염 현상의 경우에도 전기장에 의해 감소되는 화염폭에 의한 열손실 효과를 고려해야 함을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 산업자원부 지원의 미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발 과제에 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. Lawton, F. J. "Weinberg, Electrical Aspects of Combustion", Clarendon Press, Oxford, 1969
- [2] J. Hu, B. Rivin, E. Sher, "The effect of an electric field on the shape of co-flowing and candle-type methane-air flames", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 21, 2000, pp.124-133
- [3] M. Saito, M. Sato, K. Sawada, "Variation of flame shape and soot emission by applying electric field", *Journal of Electrostatics*, Vol. 39, 1997, pp 305-311
- [4] T. Ueda, O. Imamura, K. Okai, M. Tsue, M. Kono, J. Sato, "Combustion behavior of single droplets for sooting and non-sooting fuels in direct current electric fields under microgravity". *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.29, 2002, pp.2595-2601
- [5] W. J. Miller, "Ion sampling from hydrocarbon combustion plasma", *14th Annual ASTM Committee B-14 Conference of Mass Spectrometry, Dallas, Texas, 1966 May*
- [6] C.P. Chen, R.J. Heinsohn, L.N. Mulay, "Effect of magnetic and electric fields on chemical equilibrium", *151st National Meeting of American Chemical Society, Pittsburg, Pa., 1966 March*
- [7] R. J. Heinsohn, D. E. Wulfhorst, P. M. Becker, "The effects of an electric field on an opposed-jet diffusion flame", *Combust. Flame*, Vol. 11, 1967, pp.288-296
- [8] E. Sher, A. Pokryvailo, E. Jacobson, M. Mond, "Extinction of Flames in a nonuniform Electric Field", *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 87, 1992, pp.59-67
- [9] E. Sher, G. Pinhasi, A. Pokryvailo, R. Baron, "Extinction of Pool Flames by Means of a DC electric Field", *Combust. Flame*, Vol. 94, 1993, pp.244-252
- [10] J. Park, C. B. Oh, K. T.Kim, J. S. Kim, A. Hamins, "Multi-dimensional effects of Low Strain Flame Extinction in Methane/Air Counterflow Non-premixed Flames", *5th ASPACC*, July 17-20, Adelaide, Australia, 2005
- [11] K. Maruta, M. Yoshida, H. Guo, Y. Ju, T. Nioka, "Extinction of Low-Stretched Diffusion Flame in Microgravity", *Combust. Flame*, vol. 112, 1998, pp.181-187

- [12] A. Liñán, "The asymptotic structure of counterflow diffusion flames for large activation energies", *Acta Astronautica*, vol. 1, 1974, pp.1007-1039
- [13] I. K. Puri, K. Seshadri, "Extinction of Diffusion Flames Burning Diluted Methane and Diluted Propane in Diluted Air", *Combust. Flame*, Vol. 65, 1986, pp.137-150
- [14] Plessing, T., Tefhoeven, P., Peters, N. and Mansour, M. S., "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame," *Combust. Flame*, Vol. 115, 1995, pp. 335-353.