

층류 부상 화염의 화염부상 높이 감소 구간에서 교류 전기장이 인가된 화염에 관한 영향

서보현* · 반규호* · 김경택** · 박정** · 길상인*** · 김세원**** · 정석호*****

*부경대학교 기계공학과 · **부경대학교 의생명기계전기융합공학 · ***한국기계연구원 · ****한국생산기술연구원
***** King Abdullah University of Science and Technology, Clean Combustion Research Center

Effect of AC Electric Field on Decreasing Liftoff Height in Laminar Lifted Jet Flames

B. H. Seo*, K. H. Van*, G. T. Kim**, J. Park**, S. I. Keel***, S. W. Kim**** and S. H. Chung*****

*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University

**Dept. Interdisciplinary Program of Marine-Bio, Electric& Mechanical Engineering, Pukyong National University

***Korea Institute of Machinery and Materials

****Korea Institute of industrial Technology

*****King Abdullah University of Science and Technology, Clean Combustion Research Center

(Received 2 May 2017, Received in revised form 11 June 2017, Accepted 16 June 2017)

ABSTRACT

An experimental study has been conducted to elucidate the effect of AC electric field on behaviors of laminar lifted flame in nitrogen-diluted methane coflow-jets. Our concerns are focused on the regime to show a decrease in liftoff height, H_L with increasing nozzle exit velocity, U_O (hereafter, decreasing- H_L). The H_L with U_O near flame extinction were measured by varying the applied AC voltage, V_{AC} and frequency, f_{AC} in a single electrode configuration. The behavior of H_L with a functional dependency of V_{AC} and f_{AC} was categorized into two regime : (I) H_L decreased for nozzle diameter, $D=1.0$ mm, and (II) H_L increased in the increase of f_{AC} for a fixed V_{AC} in a $D=4.0, 8.4$ mm. The lifted flames in decreasing- H_L region was unstable in high voltage regimes while the H_L showed a decreasing tendency with U_O except them. Such behaviors in H_L were also characterized by functional dependencies of related physical parameters such as V_{AC} , f_{AC} , U_O , fuel mole fraction ($X_{F,O}$) and D .

Key Words : Electric field, Decreasing lifted off height, Buoyancy, Radiation, Ionic wind effect.

1. 서론

최근 수년간 연구를 기반으로 전기장을 이용한 화염 제어에 관한 많은 연구가 진행되었다. 화염 내 전기장을 인가하면 반응을 및 이온 확산을 증가로 인한 화염 안정화는 이전 연구를 통해 보고됐다 [1,2]. 또한, 전기장으로 인한 가속된 전자와 화염 내의 중성 입자가 충돌하여 운동량이 전달되며, 그 결

과 중성 입자는 Bulk Flow를 형성하여 화염에 영향을 미치게 된다[3,4].

층류 제트 화염에 있어서 전기장과 플라즈마에 관한 연구는 전기장으로 인한 화염 전파 속도 증가, 화염 안정화[1,2]를 비롯한 질소 산화물(NO_x) 및 일산화탄소(CO) 등 연소 배출물 감소에 기여하였다 [5-7]. 선행 연구에 따르면 화염 안정화를 목적으로 전기장과 플라즈마를 인가하였을 경우, 반응을 증가로 인한 부상 화염의 재부착 지연[8], 삼지 화염의 화염 전파 속도 증가[1] 및 화염의 부상과 화염의 날림(Blowout)[2], 부상 화염의 진동[9]에 대한 현상을 연구한 바 있다.

현재까지 층류 부상 화염은 난류 강도가 강하지 않은 난류 화염에서 난류 화염을 파악하는 중요한

† Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요소로 산업용 버너와 가스 터빈 설계에 있어서 중요 인자이다. 따라서, 층류 부상 화염의 화염 안정화 메커니즘에 많은 연구가 진행되었다[10,11]. 층류 부상 화염 안정화 메커니즘은 Schmidt 수(Sc)의 범위가 $Sc < 0.5$, $Sc > 1$ 인 경우 화염 전파 속도와 국부 유동 속도의 벡터 합으로 표현되며, 그 지점에서 이론 당량비를 따라 안정화 된 부상 화염의 화염 선단은 희박, 과농, 예혼합 및 확산 화염이 동시에 존재하는 삼지 화염(Tribrachial flame)의 구조를 가지게 된다[10-13].

최근 연구 결과에 따르면 질소가 희석된 메탄 연료를 사용한 동축류 제트 실험에서 안정화 메커니즘이 존재하지 않는 조건($0.5 < Sc < 1$)임에도 U_0 의 증가에 따라서 H_L 가 증가하는 부상 화염을 규명하였다[14]. 이전 연구결과에 따르면 질소를 희석한 메탄 동축류 제트 실험에서 Sc 의 범위가 $0.5 < Sc < 1$ 일 경우, U_0 가 증가함에도 H_L 는 감소하는 상이한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이전 연구팀은 이를 실험적, 수치해석 적으로 분석한 결과 부력의 영향이 지배적인 것으로 보인 바 있다[15].

앞선 연구 결과를 기반으로, 본 연구는 질소가 희석된 메탄 화염에서 U_0 가 증가함에 따라 H_L 감소 구간에서의 전기장을 인가하였을 경우, H_L 의 변화와 화염 안정성에 대한 보고에 초점을 두어 실험을 수행하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장비에 대한 개략도이다. 실험 장치는 동축류 버너, 노즐부, 유량 조절부, 전원 공급기, 그리고 측정부로 구성되어 있다. 연료는 99.999% 고순도 메탄과 희석제는 99.999%의 고순도 질소를 사용하였다. 동축류 버너의 내부는

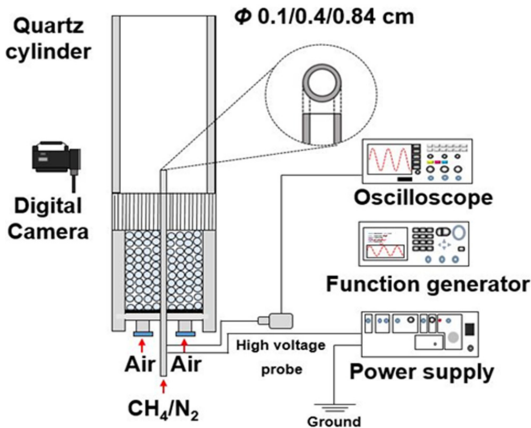


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set up about coflow burner configuration.

노즐을 제외한 모든 부분을 acetal resin을 사용하여 제작하여 전기 절연성을 주었다. 동축류의 속도는 7 cm/s로 일정하게 유지하였으며, 모든 실험 조건에서 U_0 분포가 균일할 수 있도록 버너 내부에 허니콤(Honeycomb)과 유리구슬(Glass bead)을 설치하였다. 노즐은 스테인리스 강(Stainless steel)로 제작되었으며, 부력의 효과를 비교하기 위해 다양한 D 를 사용하였으며, 내경은 각각 1.0, 4.0, 8.4 mm이다. 노즐 출구에서는 완전히 발달한 유동을 얻기 위해 Reynolds 수(Re)에 따른 충분한 노즐 길이를 설정하였다. 외부 환경에 의한 교란을 차단하기 위해 외부 채널 지름 10 cm, 길이 40 cm 원형 아크릴 칸막이를 설치하였다. 공기 압축기의 특성상 대기의 공기를 압축하여 연구에 사용하게 되는데, 대기 공기의 상태가 항상 일정하지 않기 때문에 항온항습실 내부에 공기 압축기를 설치하여 항온항습실의 내부 온도 22~24°C 습도 40~44%로 일정하게 유지하였다. 화염의 길이와 폭 및 너비를 측정하기 위해, 디지털카메라(SONY, HDR-CX560)와 카세트미터를 2차원 이송장치 상단에 부착 후 화염의 선단과 노즐의 끝단을 측정하였다. 전원공급기로는 60~1,000 Hz까지 주파수 조절이 가능한 AC 전원기를 사용하였으며, 인가 교류 전압(V_{AC})의 세기는 RMS 값으로 0~7 kV까지, 인가 직류 전압(V_{DC})은 0~10 kV까지 인가하였다. 버너의 중앙에 위치한 노즐에 전기장을 형성하기 위하여 노즐에 직접 연결하였으며, 접지는 건물의 전지와 연결하였다. 전기장의 세기는 Function Generator와 Oscilloscope를 통하여 확인하였다.

전류를 측정하기 위해 전자의 이동에 주목해야 한다. 하지만 노즐에 교류 또는 음 전압을 인가하였을 경우, 노즐로부터 방출되는 전자와 화염에서 생성되는 전자와 이온들의 상호작용으로 인해 전자의 측정이 제한적이다. 이는 본 연구에서 향후 측정할 계획이다. 본 연구는 H_L 의 감소가 시작되는 U_0 ($U_{0,1.0} = 120$ cm/s, $U_{0,4.0} = 30$ cm/s, $U_{0,8.4} = 11$ cm/s)에서 화염을 점화 후 U_0 를 감소시키며 H_L 를 측정하였다. 열적 정상 상태 유동(Thermally steady state flow)을 위해 충분한 시간이 지난 후 전기장을 인가하였고 이를 Matlab을 기반으로 분석하였다.

3. 결과 및 논의

3.1. Decreasing- H_L

Fig. 2는 $D = 1.0$ mm에 전기장을 인가하지 않았을 경우, U_0 에 대한 Decreasing- H_L 의 직접적인 이미지와 수치해석 결과이다. 선행 연구팀은 U_0 의 증가에 따라서 동축류의 유동이 부력에 의해 화염 내부로 유입되는 유동의 감소로 화염의 H_L 가 감소하는 것을 선행 연구에서 밝혀낸 바 있다[15].

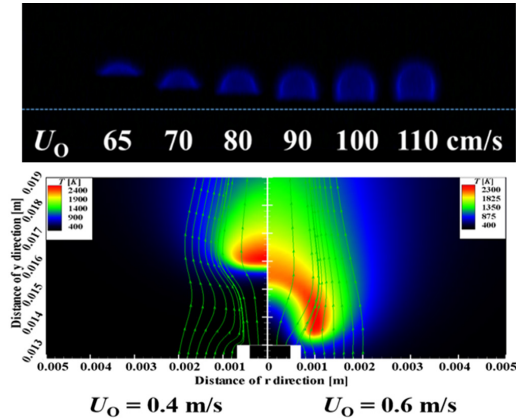


Fig. 2. Direct image and numerical simulation of decreasing lift off height (H_L) without electric field.

3.2. H_L 변화

3.2.1. DC

교류 전기장(AC)은 직류 전기장(DC)을 기반으로 사인 함수(Sinusoidal)의 형태로 변하게 된다. 따라서 본 연구는 AC에 대한 화염의 효과를 분석하기 위해 DC에 대한 연구를 진행하였다.

Fig. 3은 $D = 4.0$ mm인 경우 $V_{DC} = \pm 0.04, \pm 0.08, \pm 1, \pm 5, \pm 10$ kV를 인가한 조건의 H_L 의 변화를 나타낸 그래프이다. 인가 V_{DC} 을 $-1.0 \leq V_{DC} \leq -0.04$ kV를 인가한 경우, H_L 변화는 전기장을 인가하지 않은 결과와 차이는 미미하였다. 인가된 V_{DC} 가 -5 kV인 경우부터 화염의 H_L 가 전체적으로 감소하며 인가된 V_{DC} 가 -10 kV인 경우, 화염의 H_L 이 전기장을 인가하지 않은 H_L 과 비교하여 소폭 감소한 것을 확인 하였다. $V_{DC} \leq +5$ kV가 인가된 경우, 화염의 H_L 의 변화에 미치는 영향은 적다. $V_{DC} = +10$ kV인 경우, 화염의 H_L 의 변화가 전기장을 인가하지 않았을 때와 비교

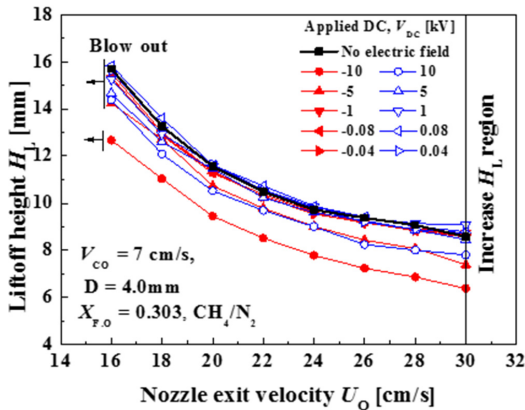


Fig. 3. Lift off height (H_L) as function of the nozzle exit velocity (U_0) on $D = 4.0$ mm with DC electric field (V_{DC}).

하여 소폭 감소한다. 결론적으로 DC 전기장의 음전압에 인한 화염의 H_L 의 변화의 원인은 화염 내부에 비교적 많이 분포된 있는 양이온에 의한 것으로 유추할 수 있다.

3.2.2. AC

Fig. 4는 각 D 에 대해 ((a) $D = 1.0$ mm (b) $D = 4.0$

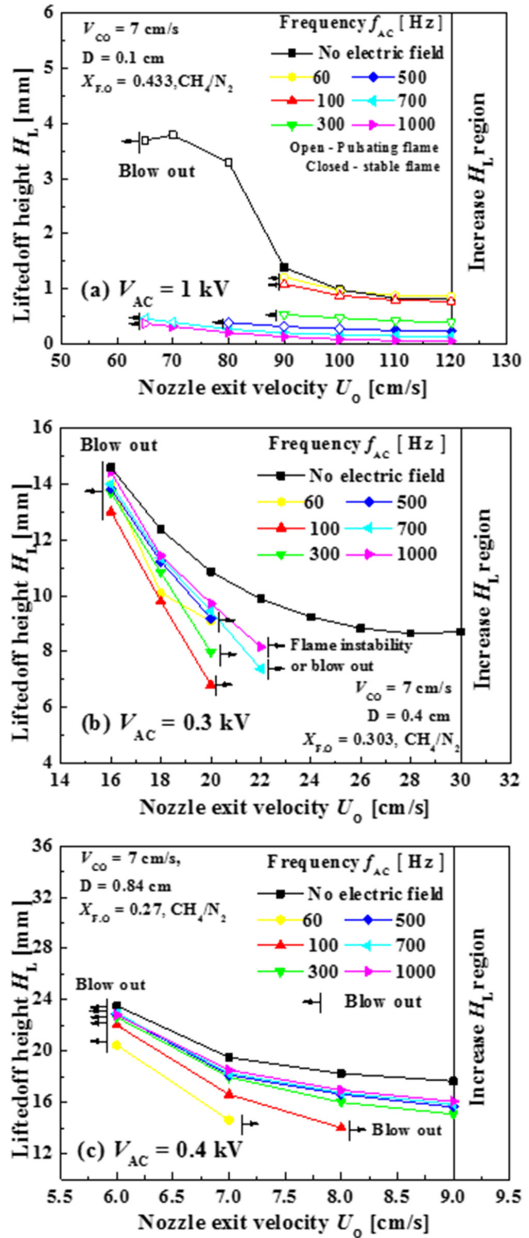


Fig. 4. Lift off height (H_L) as a function of the nozzle exit velocity (U_0) with applied voltage and frequency (D [mm], $X_{F,O}$) = (a) (1.0, 0.433), (b) (4.0, 0.303), (c) (8.4, 0.27) with electric field (V_{AC} , f_{AC}).

mm (c) $D = 8.4$ mm) U_0 의 증가에 따라 화염의 H_L 가 감소하는 구간(Decreasing- H_L)의 안정화 된 화염의 H_L 를 측정할 수 있는 임계전압(Critical voltage, $V_{C,D}$)을 선정하였으며($V_{C,1.0} = 1$ kV, $V_{C,4.0} = 500$ V, $V_{C,8.4} = 400$ V) 임계 전압, $V_{C,D}$ 내에 전기장을 인가했을 경우, V_{AC} 와 f_{AC} 에 따른 Decreasing- H_L 의 H_L 변화를 나타낸 그래프이다. 모든 D 에 대해서 전기장을 인가하지 않은 조건 보다 전기장을 인가한 경우, H_L 이 감소하였다.

$D = 1.0$ mm인 노즐에서 전기장을 인가하지 않았을 경우, 화염 H_L 가 소염 거리(Quenching distance, 약 1.5 D)[20]보다 높아지면 화염이 소화 영역 근처에서 부력에 의한 자기 진동(Buoyancy driven self excitation)하였다[16,17]. 높은 $V_{AC} (\geq 500$ V)와 낮은 $f_{AC} (\leq 300$ Hz) 일수록 화염의 불안정성(Flame instability)이 증폭되었다. 동일 V_{AC} 에 대해서 f_{AC} 가 증가할수록 화염 H_L 과 화염 진동 영역도 감소하는 것을 기반으로 화염의 불안정성 감소를 확인하였다. $D = 4.0$ mm인 경우, Decreasing- H_L 구간내 전기장을 인가하지 않은 조건에서 화염 소화영역 근처 자기진동을 보이지 않는 안정적인 화염이 관찰 되었다. $D = 4.0$ mm의 $V_{AC} \geq 500$ V 조건에서 f_{AC} 에 관계없이 Decreasing- H_L 구간에서 모두 화염 날림(Blowout) 현상이 발생하였다. $V_{AC} \leq 500$ V 영역에서 V_{AC} 의 증가에 따라 H_L 가 낮은 구간(높은 U_0 구간)에서 화염 불안정성(Flame instability)과 화염 날림(Blowout) 현상을 보였다. $D = 8.4$ mm인 경우 Decreasing- H_L 구간 내 전기장을 인가하지 않은 조건에서, 화염 소화영역 근처 자기 진동을 보이지 않는 안정적인 화염을 나타낸 조건에서 전기장을 인가한 경우, $V_{AC} \geq 500$ V일 때 f_{AC} 에 관계없이 Decreasing- H_L 구간 내의 화염이 모두 노즐에 부착되는 부착 화염(Attached Flame)이나 화염 날림(Blowout) 현상이 발생하였다. $V_{AC} \leq 500$ V인 조건에서 V_{AC} 의 증가에 따라 H_L 가 낮은 구간(높은 U_0 구간)에서 화염 날림(Blowout)만 나타났다. $V_{AC} \leq 500$ V인 조건에서 V_{AC} 의 증가에 따라 H_L 가 낮은 구간(높은 U_0 구간)에서 화염 날림(Blowout) 현상만 나타났다. $D = 8.4$ mm에 대한 AC전기장의 효과는 $D = 4.0$ mm와 유사한 경향성을 나타냈다. $D = 4.0, 8.4$ mm의 각 노즐에 동일 V_{AC} 에 대해 f_{AC} 가 증가할수록 화염 H_L 가 증가하는 결과는 $D = 1.0$ mm인 경우와 상반된 결과이다. 이에 따라, H_L 가 소염 거리(Quenching distance)보다 높은 조건($D = 4.0, 8.4$ mm)일 때, 동일 V_{AC} 에서 f_{AC} 의 증가에 대한 H_L 감소의 메커니즘은 향후 실험적, 수치해석적으로 검증할 예정이다.

3.3. 전기장을 인가한 화염 H_L 특성화

Decreasing- H_L 구간 내 H_L 변화에 영향을 미치는

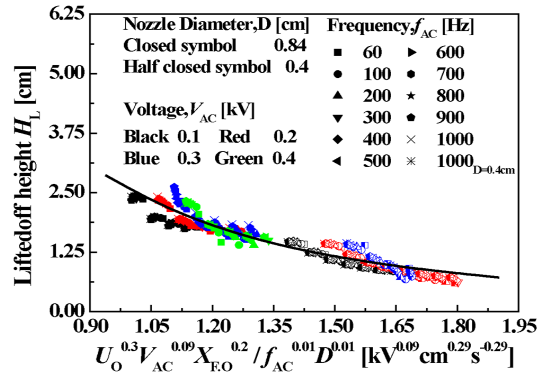


Fig. 5. The functional dependence of relate physical parameters for decreasing- H_L with applied electric field (V_{AC} , f_{AC}).

실험적, 물리적 요인들의 함수로 특성화 작업을 Fig 5에 나타내었다. 특성화 그래프의 H_L 는 소염 거리(Quenching distance)를 고려한 D 의 1.5배 ($1.5D$) 이상 H_L 만을 사용하였다[20]. 전기장이 인가된 $D = 1.0$ mm 노즐의 H_L 는 1.0 mm의 소염 거리(1.5 mm)보다 낮게 측정되어 특성화에 제외되었다. Decreasing- H_L 구간 내 AC 전기장에 의한 H_L 감소는 V_{AC} , f_{AC} , U_0 , X_{FO} 그리고 D 로 표현되며 상관식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$H_L = a \times x^b \quad (1)$$

(with correlation coefficient of 0.91)

여기서 $a = 2.52984$, $b = -1.95899$ 이다. 특성화 그래프의 x 축의 단위는 $[kV \cdot cm/s]$ 이므로 상관식 (1)의 x 는 부상 화염의 H_L 감소에 대해 V_{AC} 와 U_0 가 지배적임을 의미한다. U_0 , V_{AC} , X_{FO} 의 증가에 따라 H_L 는 감소하며, f_{AC} , D 의 감소에 따라서 H_L 가 감소하는 특성을 나타낸다. 이때의 상관계수, R는 0.91이다.

3.4. 전기장 인가 조건 내 H_L 감소 메커니즘 규명을 위한 실험

본 연구는 화염 전파 속도(Flame propagation speed)와 국부 유동 속도(Local flow velocity)가 균형을 이루는 부상 화염에 전기장이 인가된 조건에서 H_L 감소 원인을 전기장으로 인한 화염 전파 속도 증가(Enhancement of tribrachal flame edge speed)[1], 전기장으로 인한 제트 유동의 불안정성(Flow instability)[18]으로 인한 국부 유동속도의 감소와 이온풍 효과(Ionic wind effect)[19]에 의한 국부 유동 속도 억제, Lorentz Force에 의한 반응률 및 이온 확산을 증가[3,4]로 예측하였다.

Fig. 6은 $D = 1.0$ mm의 Decreasing- H_L 구간 내 $X_{FO} = 0.436$, $U_0 = 80$ cm/s, $V_{AC} = 900$ V 조건에서 f_{AC} 의

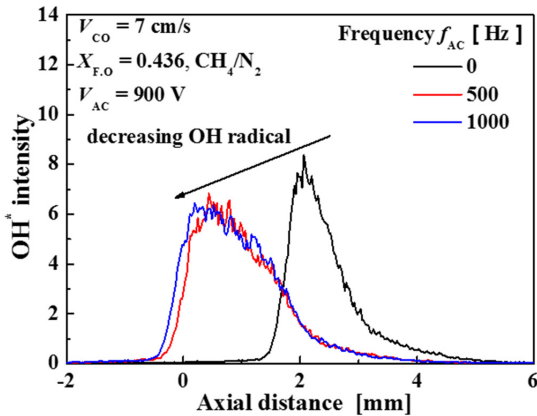


Fig. 6. The OH* chemiluminescent intensity as a function of axial distance with variation of f_{AC} and at fixed $V_{AC} = 900$ V in $D = 1.0$ mm.

증가에 따른 OH* maximum radical을 Nozzle axial distance로 나타낸 그래프와 직접적인 이미지는이다. f_{AC} 증가에 OH* 라디칼은 감소하는 경향성을 나타낸다. OH* 라디칼은 열 방출량(Heat release rate)의 주요 인자로 OH* 라디칼 감소는 화염 전파 속도 감소로 유추된다. 이는 선행 연구[1]와 상반된 결과이며 향후 $D = 4.0, 8.4$ mm의 추가 연구로 결과를 검증할 예정이다.

부력의 영향이 지배적인 Decreasing- H_L 에서 Coflow

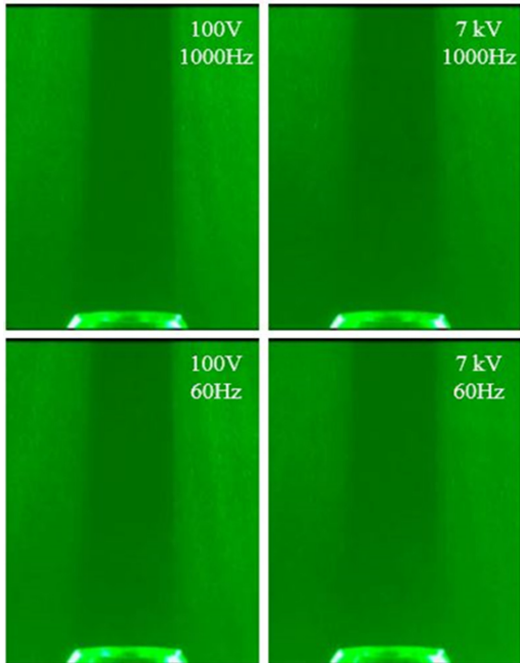


Fig. 7. The direct image of visualization coflow jet flow with electric field at $D = 8.4$ mm, $X_{F,O} = 0.275$, $U_o = 20$ cm/s.

field의 전기장 효과를 측정하기 위해 TiO_2 를 동축류 유동에 희석하여 가시화하였다. $V_{AC} = 0.1, 7$ kV, $f_{AC} = 60, 1000$ Hz를 인가한 결과를 Fig. 7에 나타냈으며 전기장에 의한 제트유동 불안정성은 측정되지 않았다. 따라서, Decreasing- H_L 구간 내 H_L 감소에 의한 전기장 효과는 이온풍 효과(ionic wind effect)로 판단되나 이온풍 효과(ionic wind effect)로만 H_L 감소의 메커니즘을 규명하기는 제한적이다. H_L 감소에 대한 전기장의 효과는 이온풍 효과[19]와 Lorentz Force에 의한 반응을 증가 및 이온 확산율 증가[3,4]의 복합적인 영향[1]으로 판단되어 향후 추가적인 연구가 요구된다.

4. 결론

질소를 희석한 메탄 동축류 제트 화염에서 노즐 출구 속도(U_o) 증가에 따른 화염 부상 높이(H_L) 감소 구간(Decreasing- H_L)에 대해 전기장을 인가한 경우 H_L 변화에 대하여 실험적으로 연구하였다. 전기장이 인가된 조건에서 Decreasing- H_L 구간 내 H_L 는 전기장을 인가하지 않은 H_L 보다 감소하였다. OH* maximum radical을 측정하여 삼지 화염 전파 속도 (Tribrachal flame edge speed)의 증가하지 않음과 가시화를 통해 전기장으로 인한 유동의 불안정성이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 즉 Decreasing- H_L 구간에서 H_L 의 감소의 원인은 이온풍 효과(Ionic wind effect)와 전기장으로 인한 반응을 증가 및 이온 확산율 증가의 복합적인 영향으로 판단된다.

후기

This work was supported by the Near Zero Emission of the Korea Institute of Energy Technology and Planning (KETEP), granted financial resource from Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea(No.20152010103050).

References

- [1] S. H. Won, S. K. Ryu, M. K. Kim, M. S. Cha, S. H. Chung. Effect of electric fields on the propagation speed of tribrachal flames in coflow jets. Combust Flame. (2008) 152: 496.
- [2] M. K. Kim, S. K. Ryu, S. H. Won, S. H. Chung. Electric filed effect on liftoff and blow-off of nonpremixed laminar jet flames in a coflow. Combust Flame. (2010) 157:17.
- [3] M.S. Cha, Y. Lee, Premixed Combustion Under Electric Field in a Constant Volume Chamber, IEEE

- Trans. Plasma Sci 40 (2012) 3131-3138.
- [4] Y. Xiong, M.S. Cha, S.H. Chung, AC electric field induced vortex in laminar coflow diffusion flames, Proc. Combust. Inst., 35 (2015) 3513-3520.
- [5] J. Lawton, F.J. Weinberg, (1970). Electrical aspects of combustion. 14. Oxford: Clarendon Press 283.
- [6] F.J. Weinberg, Advanced Combustion Method, Academic Press, New York, (1989).
- [7] S.M. Lee, C.S. Park, M.S. Cha, S.H. Chung, IEEE Trans. Plasma Sci. 33(5) (2005) 1703-1709.
- [8] S. H. Won, M. S. Cha, C. S. Park, S. H. Chung. Effect of electric field on reattachment and propagation speed of tribrachial flames in laminar coflow jets. Proc. Combust Inst. (2007) 31:963
- [9] S.K. Ryu, Y.K. Kim, M.K. Kim, S.H. Won, S.H. Chung, Observation of multi-scale oscillation of laminar lifted flames with low-frequency AC electric fields. Combust. Flame 157 (1) (2010) 25-32.
- [10] S. H. Chung and B. J. Lee. On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Non-premixed Jet. Combust. Flame (1991) 86:62.
- [11] B. J. Lee, S. H. Chung. Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet. Combust. Flame (1997) 109:163.
- [12] S. H. Chung. Stabilization, propagation and instability of tribrachial triple flame. Proc Combust Inst. (2007)31:877.
- [13] Chen, Y. C. and Bilger, R. W. Stabilization Mechanisms of Lifted Laminar Flames in Axisymmetric Jet Flows. Combust. Flame (2000) 122:377.
- [14] N. P.Sapkal, W. J. Lee, J. Park, O.B. Kwon. A Study on Laminar Lifted Jet Flames for Diluted Methane in Co-flow Air. J. Korean Soc. Combust. (2015) 20 (3) 1-7.
- [15] N. P. Sarpkal, G. H. Van, J. Park, B. J. Lee, S. H. Chung. Decreasing Liftoff Height Regions on Diluted Methane Co-flow Jet Flames. (2016) The 53th KOSCO Symposium.
- [16] S. H. Won, S. H. Chung, M. S. Cha, B. J. Lee. Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane. Proc. Combust. Inst. 28 (2000) 2093-2099.
- [17] S. H Won, J. Kim, M. K. Shin, S. H. Chung, O. Fujita, T. Mori, J. H. Choi and K. Ito. Normal and Microgravity Experiment of Oscillating Lifted Flames on Coflow. Proc. Combust. Inst. (2002) 29, 37-44.
- [18] G. T. Kim, D. G. Park, M. S. Cha, J. Park, S. H. Chung. Flow instability in laminar jet flames driven by alternating current electric fields. Proc. Combust. Inst. (2016) 000: 1-8.
- [19] M. K. Kim, S. H. Chung, H. H. Kim. Effect of electric fields on the stabilization of premixed laminar Bunsen flames at low AC frequency: Bionic wind effect. Combust. Flame (2012) 159:1151.
- [20] N. Peters, F. A. Williams. Liftoff characteristics of turbulent jet diffusion flames. AIAA Journal. (1983) 21:423-429.