

동축류 제트에서 전기장에 의한 화염 안정성 증진에 대한 실험적 연구

원상희* · 류승관** · 정석호** · 차민석***

Experimental Study on the Stability Enhancement of Nonpremixed Flames in Coflow Jets

Sang Hee Won, Seung Kwan Ryu, Suk Ho Chung, and Min Suk Cha

ABSTRACT

The enhancement of flame stability in coflow jets has been investigated experimentally by observing the liftoff behaviors of nonpremixed propane and methane flames in the electric fields. The liftoff or blowoff velocities has been measured in terms of the applied AC voltages and frequency. The experimental results showed that the liftoff velocity could be extended significantly just by applying the high voltage to the central fuel nozzle both for propane and methane. As increasing the applied voltage, the liftoff velocity increases almost linearly with the applied voltage and have its maximum value at certain applied voltage. After that, the liftoff velocity showed decrease with the applied voltage. Through the experimental observation, we found that the liftoff velocity could be correlated well with the applied voltage and frequency in the linearly increasing regime. And after having maximum in the liftoff velocity, it was observed that the liftoff velocity decreases with the applied voltage irrespective of AC frequencies. To visualize the change of flame structure with electric fields, planar laser induced fluorescence technique was adopted, and the enhancement of flame stability has been explained based on the flame structural change in electric fields.

Key Words : 화염 부상, 화염 날림, 전기장, 동축류 제트

1. 서론

화염의 안정성 문제는 가스터빈 및 기타 실용 연소기에 있어서 가장 근본이 되는 문제라고 할 수 있다. 특히 최근에 들어서 석유자원의 고갈과 더불어 석탄 등의 다양한 형태의 연료를 사용하는 경우 연료 특성의 변화로 인한 연소기에서의 화염 안정성 문제는 더욱 중요한 인자로서 부각이 될 수 있다. 한편 미 DOE 산하의 National Energy Technology Laboratory에서 2002년에

발표한 "Vision 21 Timeline"에서는 향후 21세기 또한 화석연료를 이용한 전력 및 동력생산의 시대가 될 것임을 예견하면서 이를 위해서는 특히 연료 다변화가 가능한 연소기의 필요성에 대해 언급한 바가 있다. 이를 위해서 최근에는 플라즈마 및 전기장을 이용한 화염의 안정성 증진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

화염에 있어서 전기장 효과에 대한 연구는 이미 오래전부터 수행되어 왔다. [1, 2] 전기장 및 플라즈마를 이용한 화염의 안정성 증진에 대한 연구는 주로 실용적인 측면에서 접근되었기 때문에 대부분 난류 화염의 증진에 대한 연구가 대다수이다. [3-5] 그러나 최근에는 전기장에 의한 화염 안정성에 대한 기본적인 고찰을 위해서 층류 부상화염의 재부착 및 삼지화염의 전파속도의 증

* 한국과학기술연구원

† 연락처자, wsh@kist.re.kr

** 서울대학교

*** 한국기계연구원

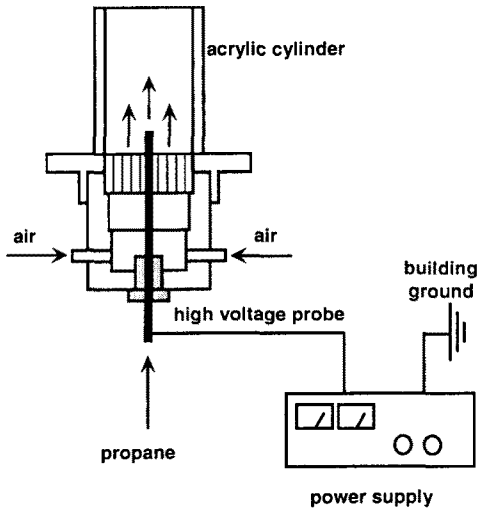


그림 1. 실험장치 개요도

진 효과에 대해 관찰된 바가 있으며, 실험적으로 전기장에 의해 부상화염의 재부착 속도가 증가하며, 이 때 화염의 전파속도가 전기장 강도에 비례하여 증가함이 밝혀진 바가 있다. [6]

노즐 부착화염의 부상 특성 및 부상 화염에 대한 연구는 그동안 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 층류 제트에서의 화염의 부상 특성은 삼지 화염의 전파 속도와 유동의 국부 속도의 균형으로 설명이 가능하다. [7] 또한 연료의 Schmidt 수가 1보다 클 경우 특정 제트속도에서 노즐 부착화염이 안정적인 부상화염으로 천이되는 부상 특성에 대한 연구가 수행된 바가 있으며, Schmidt 수가 1보다 작은 경우 화염 부상후 바로 화염 날림이 발생한다고 밝혀진 바가 있다. 실제 화염의 부상 특성에 작용하는 주요 인자로서는 노즐로의 열손실 및 제트 및 주변 동축류에 의한 유동의 Stretch 및 Strain 효과, 그리고 Flame kernel에서의 반응성 변화 [8]로써 설명이 되어 왔으나, 이러한 복잡한 특성으로 인해 실제 화염 부상의 자세한 메커니즘에 대한 이해는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 위에서 언급한 바와 같이 실제 층류 부상화염의 재부착 현상 및 전파속도가 전기장에 의해 대단히 민감하게 증진됨을 관찰한 결과로부터 화염의 부상 특성에 대한 연구를 수행하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 동축류 버너, 유량 조절부, 전원

공급기, 그리고 측정 및 가시화부로 그림 1과 같이 구성되어 있다. 동축류 버너의 중앙 연료 노즐은 스테인레스 스틸로 제작되었으며, 내경은 0.254 mm, 외경은 1.588 mm이다. 노즐의 길이는 10 cm로 출구에서의 속도 분포가 완전발달되도록 고려하였다. 동축류 속도는 모든 실험 조건에서 3 cm/s로 일정하게 유지하였으며, 출구 속도 분포가 균일할 수 있도록 동축류 내부에 하니콤과 glass bead를 설치하였다. 동축류 버너는 연료 노즐을 제외한 모든 부분을 acetal resin으로 제작하여 전기 절연성이 유지되도록 하였다. 또한 연료로는 CP(Chemically-pure) 등급의 프로판과 메탄을 사용하였으며, 연료 및 공기의 유량은 습식 유량계로 보정한 질량 유량계 (MKS)를 이용하여 조절하였다.

전원 공급기로는 60 - 1000 Hz까지 주파수 조절이 가능한 AC 전원을 상용하였으며, 삼각함수 파형의 전압을 얻기 위해 Function Generator를 같이 사용하였다. 전압은 RMS 값으로 10 kV까지 조절하였다. 동축류 버너의 중앙 노즐에 전기장을 형성시키기 위해서 고전압 terminal을 노즐에 직접 연결하였으며, 접지는 건물의 접지와 연결을 하였다. 이 경우 전기장의 형성과 안정성에 대한 부분은 기존의 연구에서 이미 언급한 바가 있으므로 생략한다. [6]

전기장에서 화염의 전형적 특성은 제트의 출구 속도 U_0 와 인가 교류 전압 V_a 과 주파수 f 를 변화시켜가면서 디지털 카메라를 이용하여 측정하였다. 또한 전기장에 의한 화염 형상의 변화를 가시화하기 위해 OH 라디칼에 대한 PLIF 기술을 적용하였다. Planar LIF 기법을 이용한 가시화를 위해서 Nd:YAG 레이저 (Continuum, PL8000)와 색소 레이저 (Continuum, ND6000), 그리고 주파수 변조기 (Continuum, UVT)를 이용하여, OH

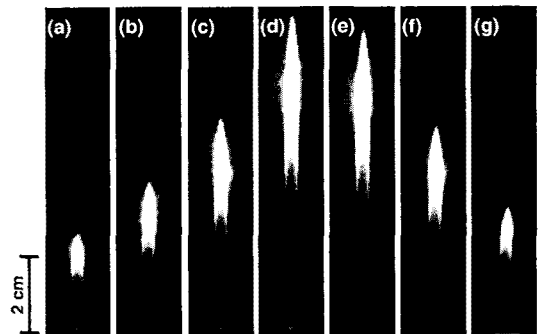


그림 2. $f = 500$ Hz인 경우, 인가전압의 변화에 따른 화염부상 직전의 직접사진; (a) $V_a = 0$ kV, $U_0 = 9.6$ m/s, (b) 0.4 kV, 15.0 m/s, (c) 1 kV, 21.8 m/s, (d) 2 kV, 32.8 m/s, (e) 3 kV, 31.2 m/s, (f) 4 kV, 21.3 m/s, (g) 5 kV, 12.6 m/s.

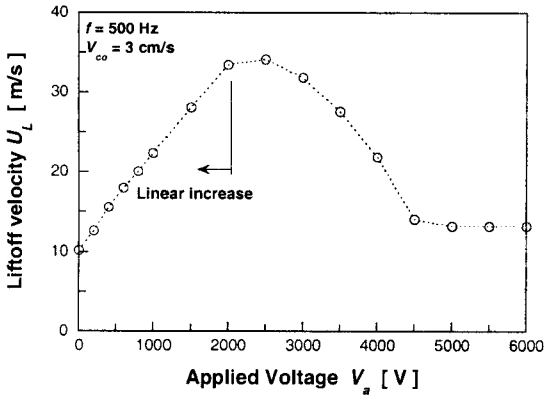


그림 3. 프로판의 $f = 500$ Hz일 경우 부상 속도의 인가전압에 따른 변화

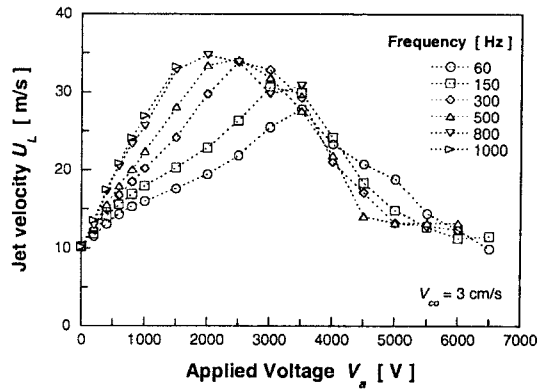


그림 4. 주파수 변화에 따른 프로판의 인가전압에 대한 부상 속도 변화

라디칼의 282.95 nm 근처의 $Q_1(6)$ 의 여기라인의 평면 레이저광을 조사하고, 90도 방향에서 ICCD 카메라 (Princeton Instrument)와 광학 필터 (UG-11, WG305)를 이용하여 측정하였다. [9]

3. 결과 및 토의

3.1 전기장에서의 화염 부상 속도

일반적으로 제트에서 화염의 부상 특성은 다음과 같이 정의되어 진다. 초기 제트의 출구 속도가 낮은 경우 화염은 노즐에 부착된 안정적 부착 화염을 형성하게 된다. 이때 제트의 출구 속도를 증가 시키게 되면 일반적으로 층류 유동에서는 화염의 길이가 제트 속도에 선형적으로 증가하게 된다. 그러다 특정 속도에 이르게 되면, 연료의 Schmidt 수가 1보다 큰 경우에는 화염 부상(Liftoff)가 발생하여 특정 부상 높이를 갖는 부상화염을 관찰할 수 있다. 그러나 연료의 Schmidt 수가 1보다 작은 경우에는 화염의 부상 후 지속적인 부상 높이의 증가를 보이다가 마침내 화염 날림이 발생한다(Blowoff). 또한 안정적인 부상화염의 경우 지속적으로 제트의 속도를 높게 되면, 부상 높이는 제트속도와 비선형의 관계를 갖으며 증가하게 되며, 특정 제트 속도 이상에서는 또 다시 화염 날림이 발생하게 된다(Blowout). [7]

본 연구에서는 이러한 노즐 부착 화염의 부상 속도의 전기장에 의한 변화를 관찰하고자 하였다. 그림 2는 AC 전압의 주파수가 500 Hz인 경우 각각의 인가 교류 전압에 대해서 화염 부상의 발생하기 전 제트 속도에서의 화염의 직접사진을 나타낸 것이다. 사진에서 보듯이 인가전압을 증가시키에 따라 초기에는 더 높은 제트 속도에서

도 안정적인 부착 화염을 관찰할 수 있었다. 전기장이 없는 경우 화염의 부상이 $U_o = 10.2$ m/s 인 경우에 발생한 반면에, 전기장이 존재하는 경우에는 화염의 부상이 지연되어 $V_a = 2$ kV 인 경우에는 U_o 가 32.8 m/s까지 증가함을 알 수 있다. 이는 전기장이 없는 경우와 비교하면 제트 속도로는 약 300% 이상의 화염 안정성이 증진된 결과라고 할 수 있다. 그러나 V_a 가 2 kV를 넘는 경우에는 이러한 부상 속도의 증진 효과는 다시 감소함을 관찰할 수 있었다.

그림 3은 위에서 언급한 $f = 500$ Hz인 경우 화염의 부상 속도를 측정된 결과이다. 위에서 언급한 바와 같이 부상 속도는 $V_a < 2$ kV인 경우 전압에 대해 선형적인 증가를 보이고 있다. 특히 V_a 가 400 V 보다 낮은 경우에는 부상 후에 안정적인 부상화염이 관찰되었으며, 부상 높이 및 화염 날림에는 전기장의 효과가 미비하였다. 따라서 그림에서 보듯이 선형적으로 증가하는 구간의 대부분에서 제트의 출구 속도가 부상화염의 날림

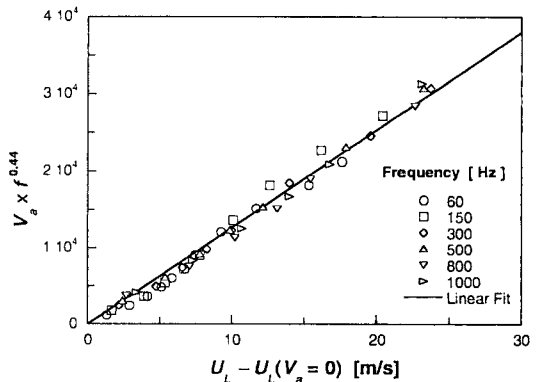


그림 5. 선형증가 영역에서 프로판의 부상 속도와 인가전압 및 주파수와의 관계

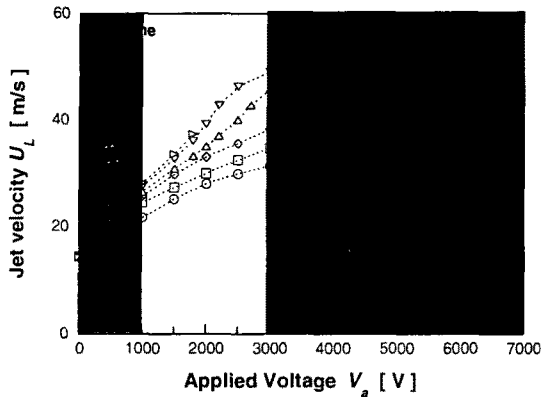


그림 6. 주파수 변화에 따른 메탄의 인가전압에 대한 부상 속도 변화

속도인 약 12 m/s 보다 훨씬 크기 때문에 이 영역에서 부상된 화염은 바로 날림 현상을 보인다. 또한 그림 2에서 언급한 바와 같이 과도한 전압이 노즐에 걸렸을 경우 부상 속도의 증가는 최대값을 가진 이후 점차 인가전압의 증가에 따라 감소함을 알 수 있었다. 그리고 인가 전압이 5 kV를 넘는 경우 불규칙적으로 노즐과 화염 사이에서 소음이 발생하였으며, 비록 그림에는 나타나지 않았으나 10 kV 이상의 전압을 인가한 경우 화염 밀면과 노즐 사이에서 arc discharge가 발생하기도 하였다. 본 연구에서는 전기장에 의한 영향만을 고려하기 위해 인가 전압의 최고값을 10 kV로 제한하였다.

그림 4는 다양한 교류 전기장의 주파수 변화에 따른 부상 속도의 증진 특성을 인가 전압에 대해서 나타낸 결과이다. 주파수의 변화에도 불구하고 위에서 언급한 선형적인 부상 속도의 증가 영역은 각각 존재함을 알 수 있다. 또한 그림에서 보듯이 주파수가 증가함에 따라서 부상 속도의 증가 또한 관찰되었다. 이는 기존의 화염의 재부착에 대한 연구결과와는 상반되는 결과이다. [6] 부상화염의 재부착 속도의 증가는 주파수의 증가에 대해 반비례관계를 갖고 있었으나 본 연구의 부상화염의 부상 속도는 주파수와 비례하여 증가하는 특성을 보이고 있다. 그림에서 보듯이 각 주파수에 따른 부상속도의 인가전압에 대한 최대값도 변화하는 것을 알 수 있다. 여기서 흥미로운 것은 이러한 최대값은 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 갖는 것이며, 이러한 최대값의 발생이후 감소하는 영역에서는 주파수 변화에 거의 상관없는 경향을 보인다는 것이다. 비록 현 시점에서 부상 속도의 증가와 감소가 전기장에 의한 것임에는 확실하나, 실제 물리적 설명을 위해서는 향후 많은 연구가 필요할 것이다.

그림 5는 화염 부상 속도가 인가전압에 대해

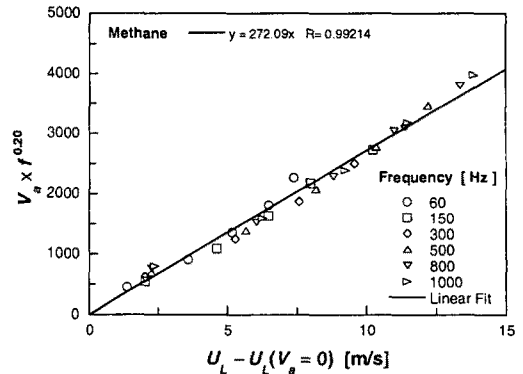


그림 7. 선형증가 영역에서 메탄의 부상 속도와 인가전압 및 주파수와의 관계

선형적으로 증가하는 영역에 대해 주파수와 선형성의 기울기의 관계를 찾아낸 후 이를 이용하여 해석한 결과이다. 그림에서 보듯이 화염의 부상 속도는 인가전압에 대해 선형적인 증가를 보이며, 교류 주파수의 0.44제곱에 대해 역시 선형적인 특성을 가지며 상관계수는 0.99이다.

본 연구에서는 위의 전기장에 대한 화염의 부상속도 증가의 특성을 연료의 변화에 따라 파악하기 위해서 메탄의 경우에 대해서도 실험을 수행하였다. 그림 6은 각각의 주파수 변화에 따른 인가 전압에 대한 메탄 화염의 부상 속도에 대한 실험 결과이다. 실험 결과 메탄의 경우에도 인가 전압에 따라 부상 속도가 증가함이 관찰되었다. 그러나 프로판의 경우에는 선형적인 증가 영역이 부상 속도가 최대값을 갖는 근처까지 선형성이 유지가 되었음에 반해 메탄의 경우에는 $V_a < 1$ kV인 영역에서만 부상속도의 선형적 증가가 유지되었다. 이러한 차이가 나는 이유는 우선적으로 메탄의 경우 프로판에 비해서 비에혼합 화염

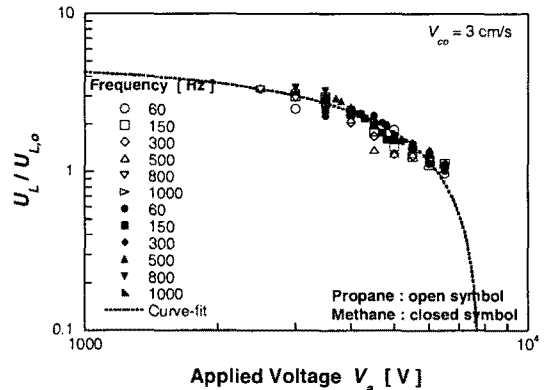


그림 8. 프로판과 메탄의 부상 속도 감소 영역에서 부상 속도와 인가전압과의 관계

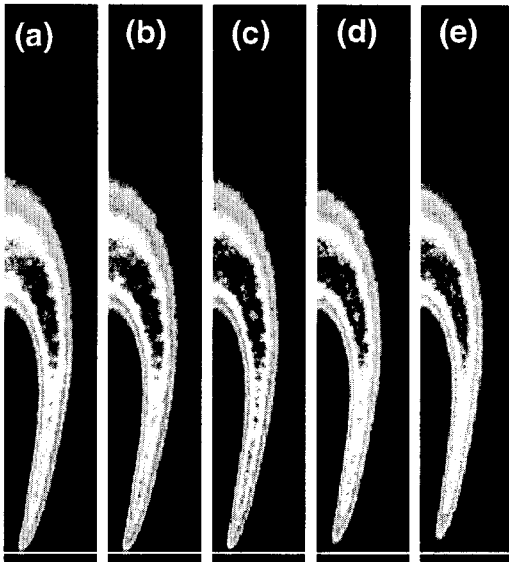


그림 9. $f = 60$ Hz, $U_o = 7$ m/s인 경우 인가전압 증가에 따른 OH PLIF 이미지; (a) 0, (b) 1, (c) 2, (d) 3, and (e) 4 kV

의 크기가 같은 노즐 직경을 사용할 경우 4배 정도 작기 때문에 사료된다. 뒤의 OH PLIF의 결과에서 설명할 것이지만, 전기장에 의한 부상 속도의 지연은 교류 전기장의 인가로 인해 화염 내부에 존재하는 이온의 반응성 증진으로 인한 것으로 유추되고 있다. 이러한 경우 화염의 크기 또한 부상 속도의 결정에 있어서 전기장 효과의 변화의 주요 인자일 수 있음을 유추할 수 있다. 따라서 향후의 연구에서는 노즐 변화 및 화염의 크기 변화 또한 고려할 사항이라고 사료된다. 그림 7은 선형적 증가 구간에 대한 메탄 연료의 전기장의 인가전압과 주파수 변화의 부상속도와 관계도를 도출한 결과이며, 프로판 연료의 경우 주파수의 0.44제곱에 비례함에 비교하여 메탄의 경우는 0.2제곱에 비례함을 알 수 있었다.

그림 8은 프로판과 메탄의 경우 인가 전압의 증가에도 불구하고 부상속도가 감소하는 영역에 대한 해석 결과이다. 실제 프로판 연료의 전기장의 없을 경우 부상 속도는 10.2 m/s이며 메탄의 경우에는 14.4 m/s로 차이가 난다. 따라서 본 연구에서는 화염의 부상 속도를 각 연료의 전기장이 없는 경우의 부상 속도 $U_{L,o}$ 로 나누어 인가 전압에 대한 부상 속도를 주파수에 따라 나타내었다. 그림에서 보듯이 연료의 변화에 관계없이 $U_i/U_{L,o}$ 는 인가전압에 대해 감소하는 것을 알 수 있다. 인가전압의 증가에 따른 부상 속도의 감소현상은 과도한 전기장 강도에 의해서 화염 내부에 존재하는 이온의 과도한 움직임으로 인한 것으로 유추하고 있다. 실제 전기장 강도가 적절

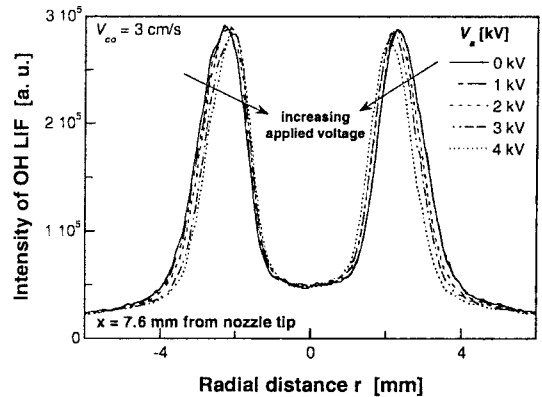


그림 10. 노즐에서 7.6 mm 하류에서 반경방향으로의 OH LIF 신호의 분포

히 낮은 영역에서는 교류 전기장의 강도에 의해 화염내 이온의 부수적인 움직임이 확산화염의 반응을 촉진시킬 수 있을 것으로 가정할 수 있다. 그러나 이러한 이온의 움직임이 과도할 경우 오히려 반응에 부정적 영향을 미칠 수 있다고 판단하고 있다. 그러나 본 연구의 현 시점에서는 이에 대한 자세한 물리적 설명은 불가능하다. 따라서 이 부분에 대한 연구 또한 향후 심도있게 진행되어야 할 것이다.

3.2 PLIF를 통한 화염 구조 변화

그림 9는 $f = 60$ Hz이고 $U_o = 7$ m/s인 경우에 대하여 인가 교류 전압을 변화시켜가며 OH 라디칼 LIF 신호를 평면이미지로 나타낸 것이다. 일반적으로 OH 라디칼의 LIF 신호는 확산화염의 경우 이론 당량비 근처에서 강한 것으로 알려져 있다. [10] 따라서 그림에서 보는 OH LIF의 신호로부터 화염의 이론당량비의 전기장에 의한 변화 및 화염 구조의 변화 특성을 파악하고자 하였다. 그림에서 보듯 인가전압의 증가로 인한 전기장 강도가 증가함에 따라 확산화염의 밑부분에 존재하는 Edge flame이 후류방향으로 약간의 이동이 있음을 알 수 있다.

그림 10은 위의 실험 결과에서 노즐로부터 7.6 mm 후류에서 반경방향으로의 OH LIF 신호의 분포를 나타낸 것이다. 전기장의 강도가 증가할수록 OH LIF의 분포가 중심축으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로부터 전기장에 의해서 화염 선단은 전기장 강도가 증가할수록 후류로 이동하지만 전체적인 화염의 형상은 중심축으로 모이게 되어 최종적으로 화염면으로부터 화염 선단으로의 열공급이 증가하는 것으로 유추할 수 있으며, 이로 인해 부상 속도가 증가한다

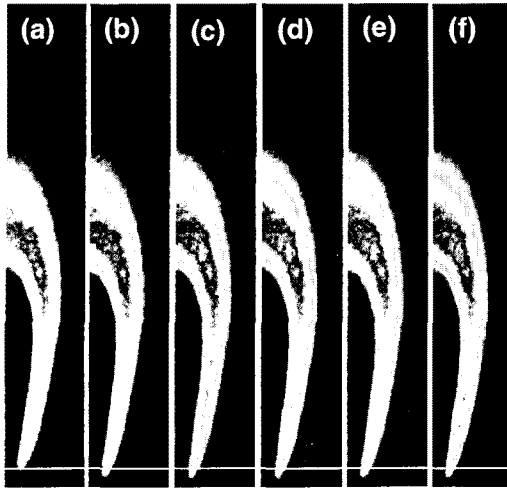


그림 11. $V_a = 3\text{kV}$, $U_o = 7\text{ m/s}$ 인 경우 주파수 변화에 따른 OH PLIF 이미지; (a) 60, (b) 150, (c) 300, (d) 500, (e) 800, and (f) 1000 Hz.

고 설명할 수 있다. 그러나 앞서 여러번 언급한 바와 같이 이러한 설명을 뒷받침하기 위해서는 더욱 정교한 실험적, 이론적 접근이 필수적이다.

그림 11은 인가 교류 전압이 3 kV로 일정할 경우 교류 전압의 주파수를 변화시켜가며 측정된 OH PLIF 이미지이다. 그림에서 보듯이 주파수가 증가함에 따라서 화염 선단이 노즐쪽으로 이동하는 것을 알 수 있으며, 특히 그림 12의 주파수가 각각 150, 300, 500 Hz의 결과를 60 Hz의 결과로 뺀 이미지에서 보듯, 주파수가 증가함에 따라 화염 선단의 OH LIF 강도가 증가함을 알 수 있었다. 실제로 화염의 노즐에서의 부상 특성에 영향을 미치는 인자로서, 화염 선단의 방울물의 변화 [8], 노즐로의 열손실, 속도 분포에 따른 화염의 Stretch 변화 등 많은 요소가 존재한다. 따라서 현재의 실험적 관찰 결과로부터 실제 전기장의 부상 속도의 증진 및 안정성 증진을 물리적으로 정확히 설명하기는 힘든 실정이다. 그러나 본 연구에서 제시한 실험 결과로부터 실제로 전기장에 의해서 화염의 구조 변화가 존재하며, 이로 인해 노즐 부착화염의 안정성이 증진됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

전기장에 의한 노즐 부착 화염의 안정성 증진 효과를 파악하기 위해서 교류 전원기 및 동축류 버너를 이용하여 제트속도를 변화시켜가며 화염의 부상 속도를 관찰하였다. 실험 결과 일정한 제트 속도 영역에서 프로판 및 메탄 연료의 경우 화염의 부상속도가 인가전압에 대해 선형적으로

증가함을 밝혔다. 또한 이러한 부상속도의 증진 현상은 인가전압에 대해서 최대값이 존재함을 관찰하였으며, 프로판과 메탄에 대해서 선형적 증가 구간에서 인가전압과 교류 주파수에 대해서 부상 속도의 변화 특성을 밝혔다. 또한 과도한 전기장이 인가되었을 경우 화염의 부상 속도가 인가 전압에 대해서 선형적으로 감소함을 관찰하였으며, 이 영역에서 교류 주파수의 영향이 미비함을 알 수 있었다. 이러한 전기장의 효과로 인한 부상 속도의 증진 특성을 파악하기 위해 레이저 유도 형광법을 이용하여 화염내의 OH 라디칼의 분포를 측정하였으며, 인가전압의 증가 및 교류 주파수의 변화에 따라 화염의 구조가 변하게 되어 부상 속도의 증진 및 변화를 유도함을 알 수 있었다. 그러나 이러한 전기장에 의한 부상 속도의 증진 특성을 보다 정확히 물리적으로 설명하기 위해서는 향후 많은 연구가 필요함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원의 “미래형 자동차 배기가스 제로화 기술 개발”과제의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. Lawton and F. Weinberg, "Electrical Aspect of Combustion," Clarendon Press. (1969).
- [2] F. Weinberg, "Advanced Combustion Methods," Academy Press. (1986).
- [3] S. M. Lee, C. S. Park, M. S. Cha, S. H. Chung, *IEEE trans. Plasma Sci.* 33 (5) (2005) 1703-1709.
- [4] K. Criner, A. Cessou, J. Louiche, P. Vervisch, *Combust. Flame* 144 (2006) 422-425.
- [5] A. Yu. Starikovskii, *Proc. Combust. Inst.* 30 (2005) 2405-2417.
- [6] S. H. Won, M. S. Cha, C. S. Park, S. H. Chung, *Proc. Combust. Inst.* 31 (2007) 963-970.
- [7] S. H. Chung, *Proc. Combust. Inst.* 31 (2007) 877-892.
- [8] F. Takahashi, V. R. Katta, *Proc. Combust. Inst.* 30 (1) (2005) 383-390.
- [9] S. H. Won, S. H. Chung, M. S. Cha, B. J. Lee, *Proc. Combust. Inst.* 28 (2000) 2093-2099.
- [10] T. Plessing, P. Terhoven, N. Peters, M. S. Mansour, *Combust. Flame* 115 (1998) 335-353.