

진동하는 층류부상화염에서 화염곡률 효과에 관한 연구

윤성환* · 박 정† · 권오봉* · 윤진한** · 길상인**

A Study on Effects of Flame Curvature in Oscillatory Laminar Lifted-flames

Sung Hwan Yoon, Jeong Park, Oh Boong Kwon, Jin Han Yun, and Sang In Keel

ABSTRACT

Experiment is conducted to grasp effects of flame curvature on flame behavior in laminar lifted-jet flames. Nozzle diameters of 0.1 and 1.0mm are used to vary flame curvature of edge flame. There exist three types of edge flame oscillation. These edge flame oscillations may be caused by radial heat loss at all flame conditions, by fuel Lewis numbers near or larger than unity with the help of appreciable radial conduction heat loss, and by buoyancy effects. These are confirmed by the analysis of oscillation frequencies. It is however seen that the change of lift-off height through edge-flame oscillation is mainly due to radial heat loss irrespective of Lewis number and buoyancy.

Key Words :Edge flame, Flame Curvature, Jet Similarity, Oscillation, Schmidt Number

1. 서 론

본 연구는 Fig. 1과 같이 S-curve 상에서 묵시적으로 보여주듯 edge 화염은 동적 거동 특성을 나타내야 한다는 점에서 출발하였다. 층류부상화염에서 안정된 부상화염을 나타내는 경우 화염전파속도는 삼중점에서 유동속도와 균형을 이루며 그 지점은 S-curve 상에서 소화점으로 인식될 수 있다. 그러나 난류제트화염에서 화염구멍이 생성되어 하류로 이동한 경우는 스칼라산율의 감소로 중간가지(middle branch)로 움직이게 됨을 의미한다. 한편 S-curve의 중간가지에서는 안정적 정상상태의 해가 존재하지 않으므로 궁극적으로는 점화파에 의한 재점화 혹은 실패과에 의한 화염소화로 나타나야 한다는 점은 층류부상화염에서 예지화염이 동적 거동 특성에 매우 민감함을 의미한다. 최근 Park 등은[1] 저신장을 대향류확산화염에서 예지화염의 진동이 반경방향으로의 전도열손실에 기인하며 반경 방향으로의 전도 열손실이 화염진동을 유발하는 임계연료 루

이스 수를 감소시킨다는 것을 실험적으로 보였다.

안정된 층류부상화염을 고려해보면 삼지화염의 반경방향의 화염 크기는 유한하고 반경방향으로 상온의 공기에 노출되므로 전도열손실에 의한 영향을 받게 된다. 전도열손실로 화염온도가 감소하면 화염전파속도는 감소하므로 부상화염은 물리적으로 하류로 움직여야 한다. 이 경우 하류로 움직이면서 만일 삼지화염의 화염곡률반경이 증가하는 경우 다시 화염전파속도의 증가로 부상화염은 다시 상류로 움직여야 한다.

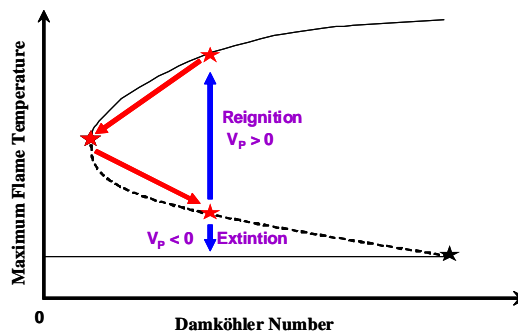


Fig. 1 Flame response on a S-curve.

* 부경대학교 기계공학전공
 † 부경대학교 기계공학부
 ** 한국기계연구원 그린환경기계연구본부

즉, 상류와 하류로 움직이면서 화염 곡률이 변화한다면 루이스수 수가 1보다 크지 않더라도 화염은 자체적으로 진동하는 특성을 보여야 함을 의미한다(자기 진동, self-oscillation). 한편 Chung 연구 그룹[2-7]을 포함하는 대부분의 연구들이 비반응 유동장의 제트 상사성(jet similarity)에 근거하여 성공적으로 전체적인 층류 부상화염 거동 특성을 묘사하여 왔고 대부분의 연구들은 노즐 직경이 0.1 mm 크기에서 실험이 수행되었다. 만일 위에서 제시한 자기 진동이 발생하더라도 1mm 정도의 진동을 보인다면 실험적으로 간과되거나 무시되어 왔을 수도 있다. 그러나 1 mm 크기의 자기진동은 0.1 mm 노즐에 대해 10D를 움직이는 것으로 이해되고 특히 본 연구실의 예비 실험에서 5 mm 노즐을 사용하여 질소를 희석한 프로판 부상화염에서 20 cm 이상, 1 Hz 이하로 진동하는 현상을 관찰한 점을 토대로 자기 진동 현상이 존재한다는 점에 본 연구는 동기 부여되었다. 한편 Won 등의 연구[7]에서 동축류 부상화염에서 화염 진동은 루이스수가 아닌 부력에 의한 것이고 주파수는 2-5 Hz 정도임을 중력 조건과 미소 중력 실험을 통하여 보인 바 있다. 따라서 이러한 부력의 효과 역시 상기 묘사된 자기 진동에 부가적으로 나타나야 할 것으로 판단된다. 또한, 예지화염은 스칼라소산율, 화염 곡률, 루이스수 등에 의해 민감하게 영향을 받으므로 층류부상화염 거동에서 역시 상기 인자들의 영향이 나타나야 한다.

따라서 본 연구에서는 화염의 곡률 효과가 부상화염 거동에 미치는 효과를 파악하기 위해 노즐 직경 0.1 mm, 1.0 mm인 부상화염 거동을 비교하는 연구를 수행하였다. 또한 연료 루이스 수와 부력 효과를 조절할 목적으로 프로판에 질소를 희석하여 실험을 수행하였다. 또한, 진동하는 화염에서 자기 진동 이외에도 연료 루이스수가 1 근처 혹은 1보다 큰 경우에 발생하는 열-물질 확산 불안정성 진동과 부력에 의한 진동을 명확히 하기 위해 관찰된 부상화염 높이에 대해 FFT 분석을 토대로 부상화염의 안정화 선도를 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

실험 장치는 유량 조절부, 노즐부, 측정부로 구성되어 있으며 그 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 실험에서 사용된 노즐은 부력의 효과를 물리적으로 최대한 줄이기 위해 특수 슈퍼 드릴로 가공된 내경이 0.1 mm의 스테인리스 강관과 노즐 직경에 따른 화염곡률 효과를 판별하고자 0.1 mm의 노즐보다 비교적 직경이 큰 1 mm로 된 황동관을 각각 사용하였다. 노즐 출구에서 완전

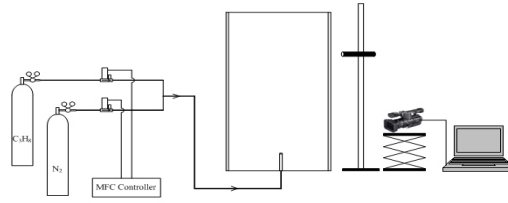


Fig. 2 Schematic drawing of experimental set-up.

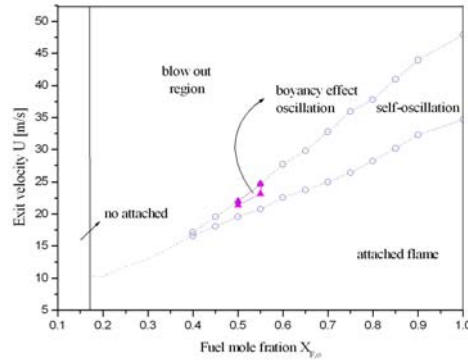


Fig. 3 Flame stability map in laminar jet lift-off flames; $D=0.1$ mm.

발달된 유동장을 얻기 위하여 노즐 길이를 Re 수에 의존한 층류 입구길이보다 충분히 긴 120, 360 mm로 하였다. 순도 99.99 % 프로판과 99.95 %의 질소는 압력 조절기로 조절되고 유량 조절은 버블미터로 검증된 20, 30, 50, 200, 500, 1000 ml/min의 규격의 MFC를 통해 노즐로 분사된다. 노즐부를 50 cm x 50 cm x 150 cm의 아크릴 칸막이실 안에 위치시키고 유입되는 공기에 의한 교란을 막기 위해 노즐 하부에 매쉬를 설치하였다. 화염의 부상높이는 카세토미터(cathetometer)와 디지털 VCR 카메라 (SONY, HDR-SR11)를 2차원 이송장치 위에 부착하여 이송시키며 측정하였고 화염의 선단과 노즐의 끝단을 기준으로 측정하였다. 얻어진 이미지들로부터 Matlab 기반의 프로그램으로 부상 높이에 대한 정보를 획득하게 된다.

3. 결과 및 논의

Figure 3은 노즐 직경 0.1 mm인 경우 프로판-물분율과 제트 노즐 출구 속도에 따른 층류부상화염 거동을 나타내고 있다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 화염 날림 영역, 진동하는 부상화염 영역 그리고 노즐 부착 화염의 영역이 존재함을 알 수 있다. 진동하는 부상화염은 순수 열손실에 의한 진동(자기 진동, self-oscillation)과 부력에 의한 진동이 함께 나타나는 영역으로 구분할 수 있

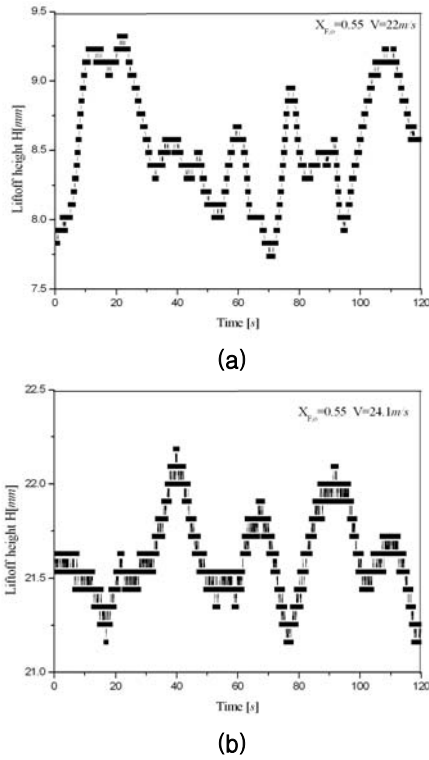


Fig. 4 Variations of Typical liftoff height; (a) self-oscillation at $X_{F,o} = 0.55$, $V = 22.0$ m/s and (b) oscillation due to buoyancy including self-oscillation at $X_{F,o} = 0.55$, $V = 24.1$ m/s; $D = 0.1$ mm.

다. $X_{F,o} < 0.18$ 에서는 과도한 질소희석으로 부착 화염 조차 발생하지 않는 조건이며, $0.18 < X_{F,o} < 0.4$ 에서는 연료 희박 조건에 출구속도 증가에 따른 화염스트레치 증가로 인해 부착화염이 부상 없이 화염 날림이 발생하는 조건이며, $X_{F,o} > 0.4$ 에서 부상화염이 존재하는 조건이다. 그림에서 원 모양의 사선 영역은 주로 0.02 Hz 근처의 불규칙한 자기진동을 나타내는 영역이고, 분홍색 실선 안은 후에 논의되겠지만 부력에 의해 6-7 Hz 정도의 진동이 나타나는 영역이다. 한편 0.1 mm 노즐인 경우 화염 부상 조건들에서 순수 프로판인 경우 연료 루이스 수는 0.53이고 $X_{F,o} = 0.4$ 인 경우가 0.98로 부상화염의 모든 조건에서 연료 루이스 수가 1보다 작기 때문에 열-물질 확산 진동불안정은 나타나지 않는 것으로 판단된다. 한편 이러한 점을 명확히 제시하기 위해 120 sec 동안 녹화된 부상 화염의 거동을 FFT를 이용하여 주파수 분석을 하였다.

Figure 4는 0.1 mm 노즐에서 시간에 따른 부상 높이 변화를 (a) 자기 진동만으로 나타나는

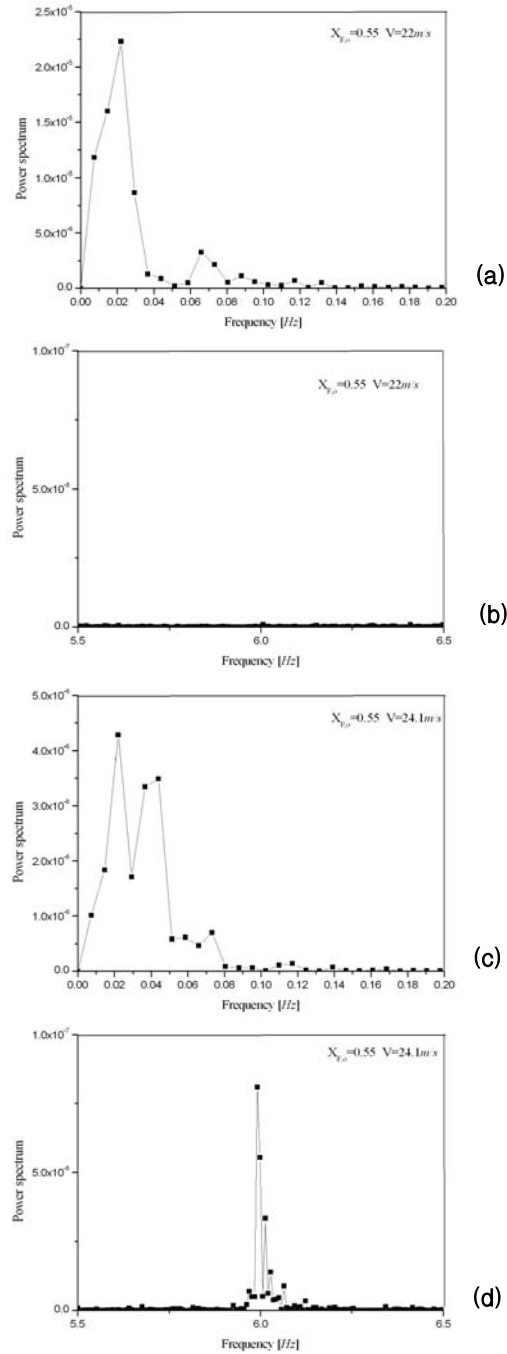


Fig. 5 Power spectrums with (a) the time signal during 120 sec and (b) selected time periods indicating buoyancy-induced oscillation at $X_{F,o} = 0.55$, $V = 22.0$ m/s, and (c) the time signal during 120 sec and (d) selected time periods indicating buoyancy-induced oscillation at $X_{F,o} = 0.55$, $V = 24.1$ m/s; $D = 0.1$ mm.

경우와 (b) 부력과 함께 나타나는 경우를 나타내었다. Fig. 4a는 $X_{F,o} = 0.55$ 에서 $V = 22 \text{ m/s}$ 에서의

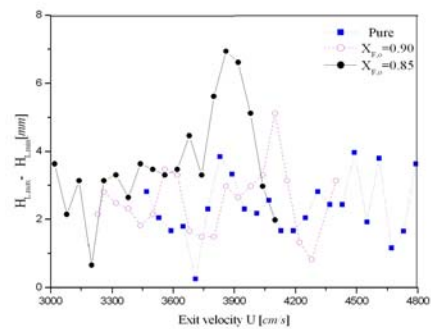
부상거동으로 0.02 Hz 미만의 매우 느린 진동이 불규칙적으로 나타남을 볼 수 있다. 한편 이러한 저주파수의 자기 진동의 발생 기구는 다음과 같이 이해된다. 즉, 삼지화염의 예혼합화염 가지를 통한 반경 열손실에 의해 화염강도가 약해져 화염전파속도의 감소를 유발하고 화염은 하류로 움직이게 된다. Ko 등이 제안한[4] 식(1)을 고려하면 이후 반경반향 연료 질량분율 구배는 하류로 가면서 감소하므로 화염 곡률 및 화염 전파속도의 증가를 유도하며 이로 인해 화염은 상류로 다시 이동한다. 이러한 순환구조가 자기진동을 유발하는 것으로 이해된다.

$$\frac{1}{r_{cur}^*} = \frac{\sqrt{2b}}{a} \frac{dY_F}{dx'} \quad (1)$$

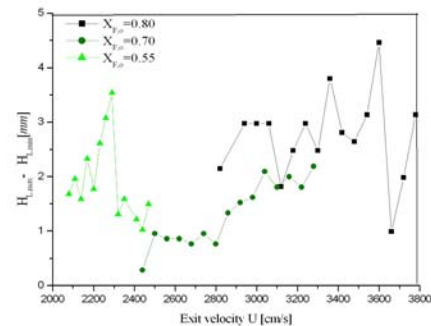
이러한 점을 보다 명확히 하기 위하여 $X_{F,o} = 0.55$, $V = 24.1 \text{ m/s}$ 에 대해 주파수 분석을 수행하여 Fig. 5에 나타내었다. Figs. 5a와 b는 $X_{F,o} = 0.55$, $V = 22.0 \text{ m/s}$ 인 경우에 대해 120 sec 간 촬영한 이미지들의 시간에 따른 부상높이를 분석한 결과이고, Figs. 5c와 d는 $X_{F,o} = 0.55$, $V = 24.1 \text{ m/s}$ 인 경우이다. Figs. 5(a)와 5(c)에 나타나듯이 약 0.022 Hz의 주파수가 화염의 전반적인 거동을 지배하고 있으며 이는 위의 조건에서 자기진동의 주파수에 기인한다. 또한 간헐적으로 나타나는 부력에 의한 진동 주파수를 알아보기 위해 부력 진동으로 판단되는 주파수를 별도로 Figs. 5(b)와 5(d)에 나타내었다. 그림에서 보듯 $V = 22.0 \text{ m/s}$ 인 경우는 부력에 의한 진동이 나타나지 않으며 $V = 24.1 \text{ m/s}$ 인 경우에는 약 7.38 Hz의 양상을 보이고 다른 부력에 의한 진동이 나타나는 구간에서도 FFT를 수행한 결과 근사한 주파수를 얻었다. 한편 이러한 진동은 기존 연구[7]에서 동축류 층류 부상화염에 이미 관찰된 바 있고 Fig. 3에 나타나듯이 0.022 Hz 저주파수 진동과는 확연히 차이가 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한, 부력에 의한 진동은 Fig. 3에서 보듯 연료분율이 0.5–0.55 사이에서만 관찰된다. 한편, Table 1에는 연료 혼합 강도별 연료 루이스 수⁸⁾를 나타내었다. Fig. 3과 비교해 보면 화염 진동이 발생하는 루이스 수는 0.53에서 0.98로 루이스 수가 1보다 작아 루이스 수에 의한 진동이 불가능하고 열손실에 의한 도움을 갖더라도 $Le_F > 1$ 에서 주로 질량-열확산 불안정성에 의한 진동이 발생하는 것으로 이해되어지나 현재의 결과는 오히려 연료 혼합강도 $X_{F,o} = 0.4$ 에서 화염 진동 불안정성이 발생하는 영역이 적고 순수 프로판에 가까울수록 화염 진동이 발생하는 영역이

Table. 1 Lewis number according to propane mole fraction

$X_{F,o}$	Le_f	$X_{F,o}$	Le_f
1	0.53	0.5	0.866
0.9	0.576	0.45	0.921
0.85	0.602	0.4	0.983
0.8	0.63	0.35	1.053
0.75	0.661	0.3	1.132
0.7	0.695	0.25	1.222
0.65	0.731	0.2	1.325
0.6	0.772	0.15	1.446
0.55	0.817	0.1	1.586



(a)



(b)

Fig. 6 Variations of the difference between maximum and minimum lift-off heights with nozzle exit velocity for several fuel mixture strengths; $D = 0.1 \text{ mm}$.

증가하는 점으로 미루어 현재 나타나는 진동은 질량-열확산 진동불안정성에 의한 진동이 아닌 것으로 판단된다. 이것을 확인하기 위하여 0.1 mm

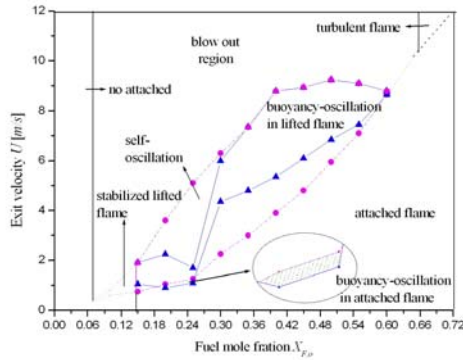


Fig. 7 Flame stability map in laminar jet lift-off flames; $D=1.0$ mm.

노즐인 경우 노즐 출구 속도와 연료 혼합 강도에 따라 화염 진동으로 인한 최대 및 최소 부상 높이가 차이를 Fig. 6에 나타내었다. 각 데이터는 화염 부상이 발생한 순간부터 화염 날림이 발생할 때까지의 노즐 출구 속도를 표시한다. 연료 혼합 강도와 노즐 출구 속도에 관계없이 부상 높이가 차이는 복잡한 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 결국 규칙성을 찾을 수 없고 루이스 수에 따른 질량-열 확산 불안정성의 물리적 경향을 따르지 않는 점으로 미루어 0.1 mm 노즐에서 나타나는 진동 불안정성은 삼지 화염의 반경 방향으로의 열손실만의 불규칙한 자기 진동임을 확인할 수 있다.

Figure 7은 노즐 직경 1.0 mm인 경우 프로판-물분율과 제트 노즐 출구 속도에 따른 층류부상화염의 안정화 선도를 나타내고 있다. 화염 날림 영역, 진동하는 부상화염 영역 그리고 노즐 부착화염의 영역이 존재하며 직경 0.1 mm과는 달리 안정된 부상화염이 존재함을 알 수 있다. $X_{F,o} < 0.07$ 에서는 과도한 질소희석으로 부착화염조차 발생하지 않는 조건이며, $0.07 < X_{F,o} < 0.15$ 의 실선과 점선 사이 영역은 화염 진동없이 안정된 부상이 존재하다가 화염 날림이 발생한 영역이다. $X_{F,o} > 0.6$ 에서는 난류영역에서 화염이 부상하는 조건으로 실험 영역에서 제외하였다. 따라서 Fig. 7에 나타낸 $0.15 < X_{F,o} < 0.6$ 인 층류영역에서 부상하기 시작하여 층류영역에서 화염날림이 일어나는 조건들에 해당한다. $0.15 < X_{F,o} < 0.25$ 사이에 부착화염에서 부력에 의한 화염 진동이 나타나는 영역을 나타낸다. Figs. 3과 7을 비교하면 부상화염이 발생하는 영역이 확장되었고 진동 불안정성이 발생하는 영역 역시 희박 연료 조건으로 확장된 것을 알 수 있다. 이것은 노즐 직경 증가에 따라 화염곡률반경이 증가하여 화염진파 속도가 증가하였기 때문이다. 또한 0.1 mm 노즐과 비교하여 부력에 의한 진동 불안정성이 나타

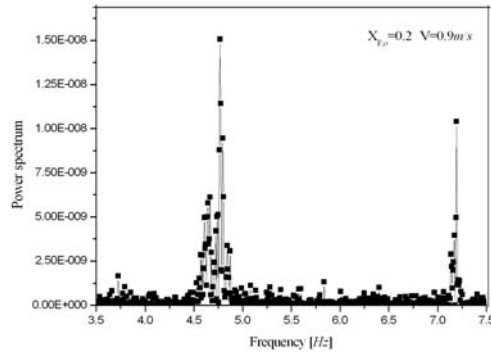
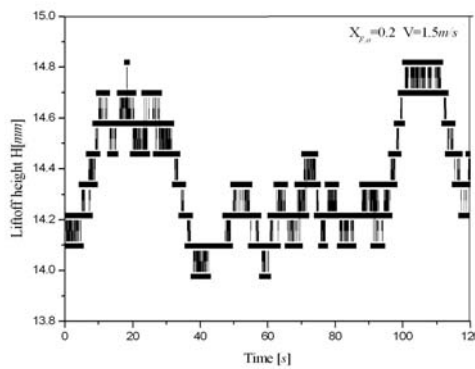
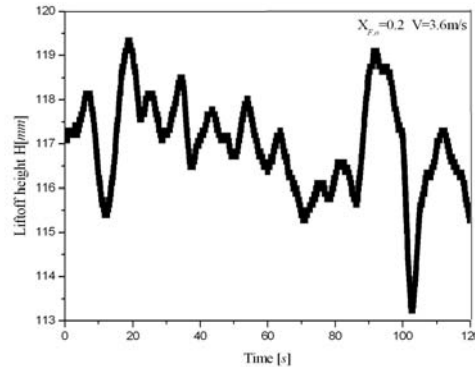


Fig. 8 Power spectrum for the buoyancy-oscillation in attached flame at $X_{F,o}=0.2$ and $V=0.9$ m/s; $D=1.0$ mm.



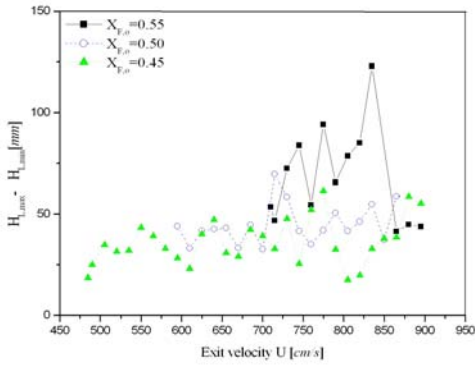
(a)



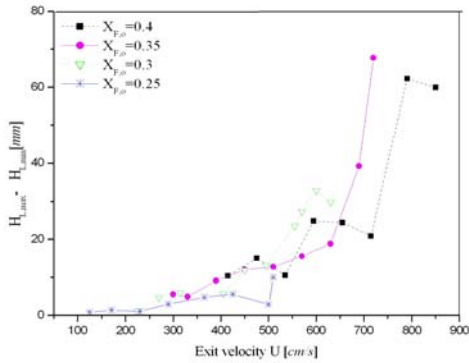
(b)

Fig. 9 Variations of Typical liftoff height; (a) oscillation due to buoyancy including self-oscillation at $X_{F,o}=0.2$, $V=1.5$ m/s and (b) self-oscillation at $X_{F,o}=0.2$, $V=3.6$ m/s; $D=0.1$ mm.

나는 영역이 확장된 것을 알 수 있다. 결국 노즐 크기 증가는 식(2)의 Froude 수의 정의에서 알



(a)



(b)

Fig. 10 Variations of the difference between maximum and minimum lift-off heights with nozzle exit velocity for several fuel mixture strengths; $D=1.0$ mm.

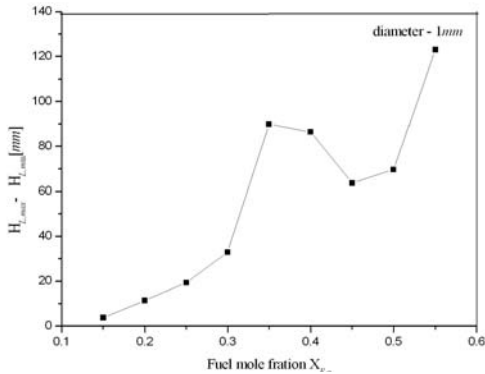


Fig. 11 Variation of maximum difference between maximum and minimum lift-off height with fuel mole fraction; $D=1.0$ mm.

$$Fr = \frac{U^2}{gL} \quad (2)$$

수 있듯이 부력 효과가 우세해지고, 또한 삼지화염의 곡률반경 증가에 의한 화염 전파속도 증가를 유발하는 두가지 측면을 갖는다는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 7에서 $0.15 < X_{F,o} < 0.25$ 사이에 부착화염에서 부력에 의한 화염 진동이 나타나는 영역에서의 진동 특성이 Won[7] 등의 동축류부상화염에서의 부력에 의한 화염 진동과 비교하기 위해 Fig. 8에 $X_{F,o}=0.2$ $V=0.9$ m/s일 때의 진동주파수를 분석한 것을 나타내었다. 약 4.8 Hz와 7.2 Hz의 우세한 진동 양상이 나타나며 이러한 것들은 Won 등[7]의 관찰과 유사하며 본 연구의 0.1 mm 노즐에서 나타났던 부력에 의한 진동임을 알 수 있다. 한편 노즐 직경 0.1 mm인 경우와 1.0 mm인 경우의 자기 진동과 부력에 의한 진동을 비교하기 위해 Fig. 9에 시간에 따른 부상높이 변화를 나타내었다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 노즐 직경이 0.1인 경우와 비교하였을 때 부력에 의한 화염 진동으로 부상화염의 최대 및 최소 부상높이 차이에 대한 정성적 경향들은 크게 다른 점이 없고 자기 진동에 비해 부상높이 변화의 기여는 여전히 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다. 결국 부력에 의한 효과로 화염 진동이 나타나지만 부상높이 변화의 주요한 원인은 삼지화염의 반경 방향으로의 열손실에 의한 자기 진동이 주원인임을 알 수 있다.

최근 park 등[1]은 저신장을 대향류확산화염에서 예지화염의 진동불안정성이 화염면에 따라 반경 방향으로의 전도열손실이 화염 진동을 유발하는 입계 루이스 수를 감소시키고 루이스 수가 1보다 작은 경우에도 예지 화염 진동 불안정성이 발생할 수 있음을 보고한 바 있다. 이러한 점을 연계하여 고려한다면 루이스 수가 1 근처 혹은 1보다 큰 경우 주기적인 진동 불안정성이 나타나야 하고 또한 측면 열손실이 이러한 루이스 수 효과와 합해져서 부상 화염 높이 변화는 커야할 것으로 판단된다. Fig. 10은 노즐 직경 1.0 mm에서 연료 혼합강도 $X_{F,o}$ 에 대해 출구 속도 증가에 따른 최대 부상높이와 최저 부상높이를 나타내고 있다. Fig. 10(a)는 노즐 출구 속도에 관계없이 부상화염 높이의 최대와 최소의 차이가 노즐 0.1mm인 경우와 마찬가지로 불규칙하게 나타난 경우이고 Fig. 10(b)는 기존의 열손실에 의한 진동과 달리 노즐 출구 속도 증가에 따라 부상화염 높이의 최대와 최소의 차이가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 10(a)는 루이스 수가 $X_{F,o}$ 가 0.45이상으로 연료 루이스 수의 최대는 0.92이므로 열 및 물질전달 차이에 의한 화염 진동이 발생하기 어려운 영역에 해당하고, Fig. 10(b)는 루이스 수가 $X_{F,o}$ 가 0.4이하로 루이스 수가 0.98 이상인 경우에 해당한다. 이것은 루이스 수가 1 근처 혹은 1보다 큰 경우에는 열손실에 의한 자기 진동 이외에도 질량-열확산 진동 불안정성이 크게 작용

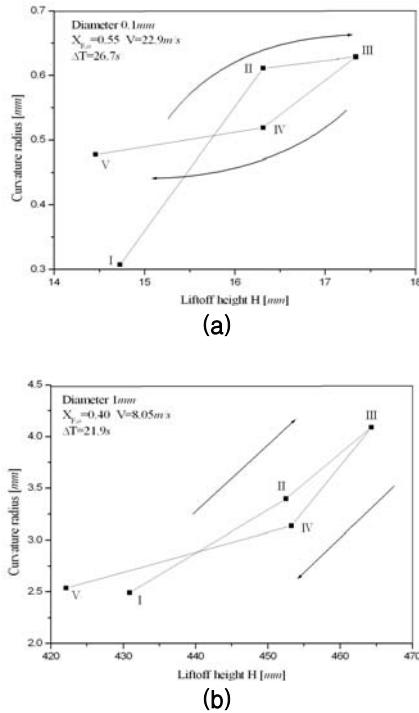


Fig. 12 Variation of radius of curvature of triple flame with lift-off height at (a) $X_{F,0}=0.55$, $V=22.9$ m/s, $D=0.1$ mm and (b) $X_{F,0}=0.4$, $V=8.5$ m/s, $D=1.0$ mm

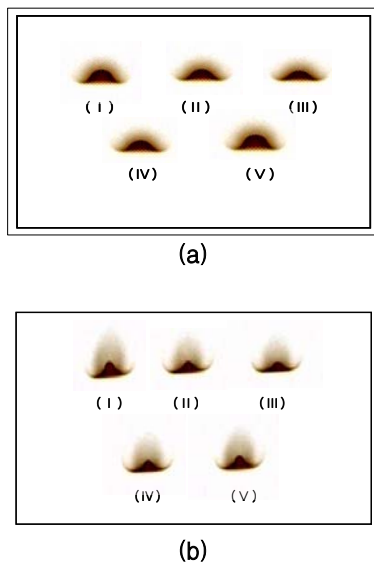


Fig. 13 VCR camera image of tribrachial flame for (a) $X_{F,0}=0.55$, $V=22.9$ m/s, $D=0.1$ mm and (b) $X_{F,0}=0.4$, $V=8.5$ m/s, $D=1.0$ mm

한다는 것을 의미한다. 또한 출구속도가 증가하면 일반적으로 스칼라 소산율이 증가하기 때문에 화염 강도는 약화되어 화염 불안정성은 증가하고 루이스 수 효과에 따른 진동 불안정성이 커져서 두가지 효과에 의해 노즐 출구 속도 증가에 따라 부상화염 높이 변화는 증가함을 의미한다.

이것을 명확히 하기 위해 Fig. 11에 노즐 1.0 mm인 경우에 대해 연료 혼합강도에 따른 부상 높이를 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 부력에 의한 화염 진동은 전 영역에 걸쳐서 넓게 분포하고 있음에도 불구하고 Fig. 9에 나타난 바와 같이 부상 높이를 변화시키는 데에는 크게 기여하고 있지 못함을 알 수 있다. 따라서 부상 화염의 진동의 원인은 열손실에 의한 자기 진동과 루이스 수 효과에 의해 설명될 수 있어야 한다. 연료 물질량이 0.3 이하인 모두 연료 루이스 수가 1보다 큰 경우에 해당하여 질량-열 확산 진동 불안정이 크게 존재하여야 함에도 불구하고 부상 화염이 노즐 근처에서 형성되고 연료 희석이 커서 특성화학반응시간이 매우 길어 반응 강도가 매우 낮은 화학반응에 의해 제어되는 영역 (chemically controlled regime)이기 때문에 열손실과 루이스 수에 의한 진동 불안정성이 크게 작용하지 않는다. 반면 연료 물질량이 증가하면 확산에 의해 물리적 과정으로 제어되는 영역 (diffusion controlled regime)이고 연료 물질량이 0.3에서 0.45인 영역은 연료 루이스 수가 0.92에서 1.13인 경우로 앞서 설명한 바와 같이 열손실에 의한 자기 진동 및 연료 루이스 수가 적당히 크고 열손실이 화염 진동을 유발하는 임계 루이스 수를 낮추는 효과와 결부되어 부상 화염의 높이 변동이 크게 나타내는 원인임을 알 수 있다. 한편 연료 물질량이 0.45 이상에서 부상 화염의 높이 변화가 다시 증가하는 것은 이 영역에서 연료 루이스 수는 0.92 보다 작아 질량-열 확산 불안정성에 의한 효과는 급격히 감소하고 부력에 의한 부상화염의 최대 및 최소 부상 높이를 변화시키는 기여 또한 작은 경우에 해당한다. 하지만 이 영역에서는 노즐 출구 속도가 급격히 증가한 경우에 해당하므로 스트레치 증가에 따른 화염전파속도의 감소로 인해 열손실에 의한 자기진동 효과가 크게 나타난 것으로 판단된다.

마지막으로 자기 진동이 열손실에 의해 화염 강도를 낮추고 화염 전파속도 속도가 감소하여 하류로 이동한 후 식(1)에 따라 화염 곡률 반경이 하류에서 증가하여야 한다. 이후 하류에서 화염 곡률 반경의 증가로 화염 전파속도가 증가하게 되면 다시 상류로 화염이 이동하는 것이 자기 진동의 기구임을 설명한 바 있다. 그러나 (1)식은 엄밀히 삼지화염이 정지화염(stationary flame)에 대해 유효한 식이므로 이를 현재와 같이 진동하는 화염에 대해서도 다시 확인할 필요

가 있다. Fig. 12은 0.1 mm 및 1.0 mm 노즐에 대해 각각 $X_{F,o}=0.55$, $V=22.9$ m/s와 $X_{F,o}=0.4$, $V=8.05$ m/s인 경우에 대해 각각 부상 화염 높이 따른 화염 곡률 반경의 변화를 나타내었다. 화염 곡률 반경은 디지털 VCR 카메라에 의한 예지 화염 이미지를 획득한 후 커브 피팅하여 얻어진 삼지화염 표면함수를 아래의 식(3)를 이용하여 계산하였다.

$$\frac{1}{R_{curv}} = \frac{\nabla \cdot (\nabla f)}{|\nabla f|} \quad (3)$$

여기서 f 는 $f=f(x,y)$ 인 삼지화염의 예혼합가지에 대한 표면 함수이다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 하류로 가면서 화염 곡률 반경이 증가하고 다시 상류로 가면서 화염 곡률 반경이 감소하는 것으로부터 현재의 자기 진동 현상을 입증하고 있다. Fig. 13는 각 데이터의 VCR 카메라 이미지를 나타내었으며 이미지에서 보듯 부상화염이 후류로 갈수록 과농 예혼합화염부의 가지가 낮아지므로 과농 예혼합화염부와 희박 예혼합화염부가 만나는 화염면이 전체적으로 평탄해지므로 화염곡률이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이에 대한 명확성은 삼지화염의 희박 예혼합화염부의 가지(branch)에서 화염면을 따라 측면 열손실을 온도 측정을 통하여 열손실을 입증하여야 하나 이것은 향후 실험이 수행될 예정이다.

4. 결론

자유제트 층류 부상화염에서 진동에 관한 현상을 규명하기 위해 0.1 mm 및 1.0 mm 노즐을 사용하여 실험을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

자유제트 층류부상화염에서 화염 진동 불안정성은 열손실에 의한 자기 진동, 부력에 의한 진동, 그리고 루이스 수에 의한 질량-열 확산 진동 불안정성에 의해 크게 나누어질 수 있고 이것을 토대로 자유제트 층류 부상화염의 안정화 선도를 획득하였다. 또한 0.1 mm 노즐을 사용한 경우는 삼지 화염의 곡률 반경이 작기 때문에 화염 스트레치가 커서 화염이 불안정하여 노즐 출구 속도가 상대적으로 큰 영역에서 부상 화염이 나타난다. 따라서 열손실에 의한 자기 진동이 주로 나타나며 부력에 의한 진동이 나타나는 영역은 좁은 지역에서 나타나고 부상 높이 변화의 기여 또한 상대적으로 작다.

1.0 mm 노즐을 사용한 경우는 상대적으로 노즐 직경이 커서 화염 곡률 반경이 크기 때문에 화염 스트레치 감소로 인해 화염 전파속도가 커

서 화염을 안정화시키는 역할을 하기 때문에 극도로 희석된 경우조차도 화염이 부착될 수 있으나 이 영역에서는 주로 특성화학반응시간이 매우 길어 물리적 과정 보다는 화학반응에 의해 제어되는 영역(chemically controlled regime)에 해당하므로 자기 진동 및 부력에 의한 영향이 화염 불안정성을 유발한다. 그리고 노즐 근처에서 주로 매우 긴 특성화학반응시간에 의해 화염이 불안정하여 바로 화염 날림을 일으킨다는 것을 알 수 있다. 그러나 연료 물분율이 증가하면 화학반응 보다는 물리적 과정에 의해 지배를 받는 경우(diffusion controlled regime)에 해당하며 열손실에 의한 자기진동, 부력에 의한 불안정성 진동, 루이스 수에 의한 진동이 공존하여 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 부력에 의한 불안정성 진동은 부상 높이 변화가 0.1 mm인 경우와 마찬가지로 상대적으로 기여가 크지 않으며 주로 열손실에 의한 자기 진동이 크게 작용하나 열손실이 열-물질 확산 진동 불안정성을 유발하는 임계 루이스 수를 낮추는 효과에 의해 연료 루이스 수가 1근처에서는 열손실에 의한 자기 진동과 루이스 수 효과에 의한 열-물질 확산 진동 불안정성이 중첩되어 부상 높이 변화가 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지자원기술개발에서 지원을 받아 수행되었고 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Park et al., *Combust. Flame* 146 (2006) 612-619.
- [2] Chung, S. H. and Lee, B. J. *Combust. Flame* 86 (1991) 62-72.
- [3] Lee, B. J. and Chung, S. H. *Combust. Flame* 107 (1997) 163-172.
- [4] Ko, Y. S., and Chung S. H., *Combust. Flame* 118:151-163 (1999).(6)
- [5] Lee, B. J., Cha, M. S., and Chung, S. H., *Combust. Sci. Technol.* 127:55-70 (1997).
- [6] Won, S. H., Chung, S. H., Cha, M. S., and Lee, B. J., *Proc. Combust. Inst.* 28:2093-2099 (2000).
- [7] Won, S. H., Kim, J., Shin, M. K., and Chung, S. H., Fujita, O., Mori, T., Choi, J. H., and Ito, K., *Proc. Combust. Inst.* 29:37-44 (2002)
- [8] <http://navier.engr.colostate.edu/tools/diffus.html>