

역산화염에서 부상 상태의 진동현상에 관한 연구

원장혁* · 서정일* · 배수호* · 신현동**

The Periodic Motion of Lifted Flames in Inverse Coflow Jets

Jang Hyeok Won, Jeong Il Seo, Soo Ho Bae and Hyun Dong Shin

ABSTRACT

The lifted oscillating flame has been studied using experiments of inverse diffusion flames that the air jet injected into a methane background. To find out the characteristics of inverse diffusion flames, fundamentally flame stabilized diagram is investigated with various air and fuel jet velocities. It has five regions - flame extinction, stable attached flame, anchored flame, liftoff flame and blow off region. In inverse diffusion flame, lifted flames were observed near the blow off region. As long as flames lift off, flames oscillate by periods. In this oscillating lifted flame region, the frequency of 1 and under were observed in various air and methane jet velocities. Characteristics of lifted flames are also examined by using the ICCD direct image. And intensity of flame chemiluminescence is very different in rising and falling period from photographs. For the present, it is predicted that the changes of flame structure are related with flame oscillation, but more experiments will be needed to make clear the phenomenon.

기 호 설 명

| | | | |
|-------|-----------------------|-----------|-------------------------|
| V_a | Air velocity | L_{rod} | length of air tube |
| V_f | Fuel velocity | D_{rod} | diameter of air tube |
| L | length of quartz tube | D | diameter of quartz tube |

Key Words : Liftoff, Inverse Diffusion, Oscillating Flame, Flame Instability

1. 서 론

현재까지 화염의 안정화 메커니즘을 이해하기 위해 부상화염에 대한 수많은 연구가 수행되어왔다. 이러한 부상 화염은 희박 예혼합화염, 과농 예혼합화염, 그리고 확산화염이 공존하는 삼지화염의 구조를 갖고 있다. 삼지화염의 특성은 화염의 안정화와 난류 화염의 소멸 및 재점화를 이해

하는데 중요한 역할을 하게 된다. 이에 삼지화염은 많은 연구자들에 의해 이론적, 수치 해석적 및 실험적으로 연구되고 있다.

Won 등[1]은 동축류 버너에서 프로판에 대해서 질소 희석을 통해 부상화염의 특성을 실험적인 방법으로 관찰하였다. 이를 통해 노즐에 부착 화염(attached flames)과 진동화염(oscillating lifted flames), 그리고 안정적인 부상화염(stationary lifted flames)을 발견하였으며, 안정적인 부상화염의 경우 질소 희석의 차이에 따라 제트의 발달 영역과 완전 발달된 영역에 존재하는 두 가지의 부상 특성을 규명하였다. 또한 화염의 하강구간(falling period)과 상승구간(rising period) 동안

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

† E-mail : wjh76@kaist.ac.kr

TEL : 042-869-3057

** 한국과학기술원 기계공학과

연소율(burning rate)의 증가와 감소로 인해 부력이 주기적으로 영향을 주어 3-4.5Hz로 진동하는 화염이 관찰되었다. 게다가 일반 중력장에서 안정적인 부상화염과 진동화염에 대해 미소 중력장에서 실험을 행하였으며, 이로부터 화염의 불안정성이 부력에 기인함을 규명하였다[2].

한편, 역확산화염(IDF, inverse diffusion flame)은 기존의 일반 확산화염(NDF, normal diffusion flame)의 특수한 경우인 underventilated 조건의 화염으로서 연구되어 왔다[4]. 그리고 Wu 등[5]은 IDF에서 메탄화염의 구조와 특성으로 화염 종류를 구분하였고, 일반 확산화염과 유사성을 관찰하였다. 일반적으로 역확산화염과 일반 확산화염은 매연(soot)발생으로 인한 화염 밝기의 차이를 제외하고 수학적으로 동일하다고 알려져 있다. 그리고 노즐끝단에서의 화염구조의 차이로 인해 역확산화염은 일반 확산화염에 비해 낮은 레이놀즈수에서도 화염날림이 발생한다.

일반 확산화염과 마찬가지로 역확산화염에서도 분류 속도의 증가에 따라 노즐에 부착된 화염이 부상하여 안정적으로 존재할 것으로 예측되나, 이에 대한 연구사례는 많지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 연료로서 메탄을 사용하여 산화제와 연료의 유속에 대해 역확산화염의 부상특성을 관찰하였다. 특히 화염의 부상 후 발생하는 주기적인 화염의 진동현상에 초점을 맞춰 이러한 현상을 발생시키는 메커니즘(mechanism)을 조사하였다.

2. 실험장치

2.1 실험장치와 조건

본 연구에서는 역확산화염의 부상특성을 관찰하기 위해 연료와 산화제의 위치가 바뀐 버너형상을 띄고 있다. Fig. 1은 이러한 역확산 연소기와 실험장치의 개략도이다. 안쪽 노즐에서 공기를 분사하고 바깥쪽에서 연료를 분사하는 역확산 구조의 버너를 구성하였고 각각의 내경은 10.08 mm, 60.65 mm이다. 주변의 공기와의 상호작용을 막기 위해 석영관(quartz tube, 내경 : 60.65 mm, 높이 : 400 mm)을 사용하였다. 분사되는 공기와 석영관 벽면과의 상호작용을 최소화 하고자 공기 출구 직경에 비해 대략 6배의 크기로 연료 축 직경을 제작하였다. 버너 아랫부분에서 허니컴(honeycomb)을 통해 메탄이 나오며 그 윗부분에 수축노즐(contraction)을 사용하여 균일 유동장을 구성하였다. 연료와 공기의 유량은 Mass Flow Controller (MFC)에 의해 조절된다.

실험에 사용한 연료는 메탄(99.99% purity)이고 산화제는 공기이다. 노즐에서 분사되는 공기는 $V_a = 0-100\text{cm/s}$, 메탄은 $V_f = 0-4\text{cm/s}$ 의 유속

를 사용하였으며 노즐 끝단에서의 레이놀즈수는 최고속인 $V_a = 100\text{cm/s}$ 일 때 $Re = 680$ 정도로서 층류유동임을 확인하였다. 노즐에서는 공기가 분사되며 주변에서는 연료가 상대적으로 낮은 속도로 분사된다.

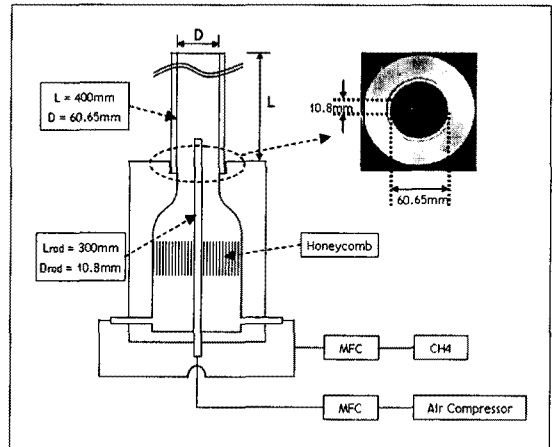


Fig. 1 Experimental setup

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 화염 안정화 선도 및 화염길이 변화

역확산화염의 안정화 특성을 알아보기 위해 연료와 공기의 유속을 변화시키면서 실험을 수행하였다. Fig. 2는 연료와 산화제의 유속을 가용범위 내에서 변경하면서 측정한 화염 안정화 선도이다. 화염 날림 경계에서의 화염의 거동에 대해 부분적으로 들뜨는(anchored)경계와 부상(liftoff)하는 경계를 관찰할 수 있었으며, 크게 5가지 영역으로 구분할 수 있었다.

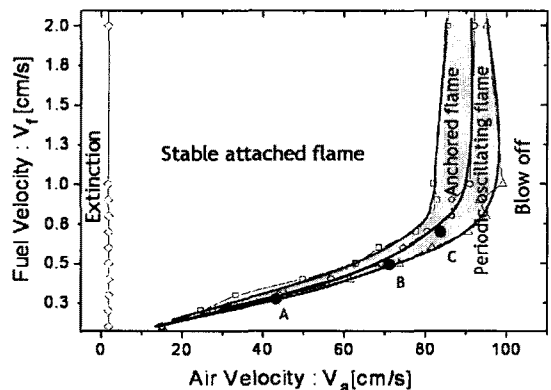


Fig. 2 Flame stabilization diagram of inverse diffusion flames

즉, 화염 소멸(flame extinction), 노즐 부착 화염(attached flame), 들뜸 화염(anchored flame), 부상 화염(liftoff flame), 화염 날림(blow off) 영역을 관찰 하였다.

화염 소멸 영역은 공기의 부족으로 화염이 노즐 안쪽으로 들어가며 꺼지게 되는 영역이며, 연료의 공급 속도에 관계없이 일정한 공기의 공급 속도에서 소멸이 발생하게 되었다. 이후 노즐에서 나오는 공기가 증가함에 따라 노즐에 안정적으로 화염이 붙어서 존재하는 영역(stable attached region)이 넓게 존재한다. 들뜸 영역(anchored region)에서는 화염이 노즐끝단에서 부분적으로 들뜨게 되는 영역이며, 공기의 유속이 그 이상이 되면 화염은 부상하게 되고 부상된 화염은 주기적으로 상승과 하강을 반복하며 진동하는 형태를 볼 수 있다(periodic oscillating region). 주기적인 진동현상을 보이는 부상화염은 연료와 공기의 유속에 따라 Fig. 2에서처럼 분포하게 된다.

이러한 역확산화염의 화염 날림 경계지역에서의 화염거동은 기존의 연구와 비교했을 때, 다음과 같은 특징이 있었다. Wu 등[5]의 실험 결과처럼 단순히 노즐 부착화염에서 화염 날림으로 천이되는 것이 아니라 그전에 일정 영역동안 부상된 화염이 존재하며, 주기적인 진동을 가지고 떨게 됨을 관찰하였다.

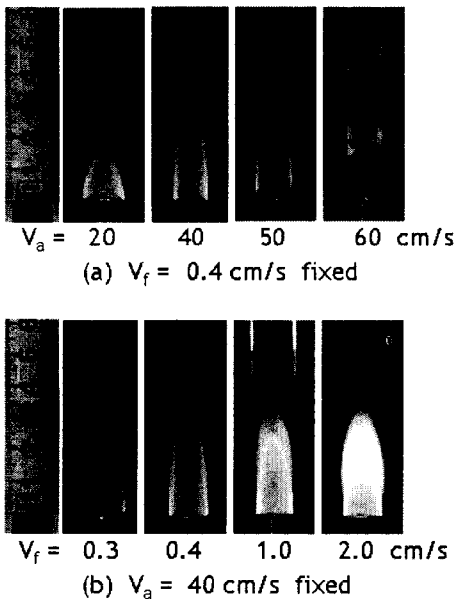


Fig. 3 Direct photographs of flames with air jet velocity (V_a) and fuel jet velocity (V_f)

Fig. 3은 공기와 연료의 공급 유속에 따른 역확산화염의 거동 변화를 나타내는 화염의 직접사진이다. Fig. 3 (a)는 일정한 연료 유속에 대해 공기 유속을 증가시킬 때의 직접사진으로 화염이 부착되어 있다가 유속증가에 따라 화염이 들뜨게 되고 이후 부상됨을 알 수 있다. Fig. 3 (b)는 일정한 공기 유속에 대해 연료 유속증가에 따라 들뜸 화염에서 안정적으로 노즐에 부착되는 화염으로 천이되고 이후 연료 유속의 증가에 따라 매연을 과도하게 발생하게 된다.

Fig. 4는 안정적으로 노즐에 부착된 화염영역에서 주어진 연료와 공기의 유속에 따른 화염 길이의 변화를 나타낸다. 화염의 길이는 노즐의 끝단에서 청염(blue flame)의 끝단까지의 길이로 정의하였으며, 청염은 510 nm의 필터를 사용하여 얻었다. 연료의 공급 유속이 일정할 때 노즐에서 분사되는 공기의 유속이 증가할수록 화염의 길이는 점진적으로 증가하지만, 공기의 공급유속이 일정할 때 공급되는 연료의 유속이 증가할수록 화염의 길이는 짧아지는 경향을 보이지만 그 영향은 공기 유속증가에 따른 화염길이 변화에 비해 매우 작은 편이다.

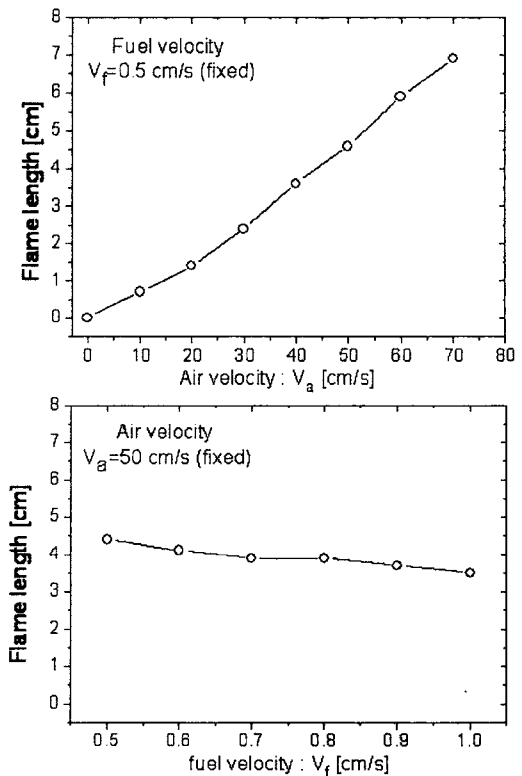


Fig. 4 Variation of flame length with various air and fuel jet velocities

3.2 부상화염의 진동

부분적으로 들뜨던 화염은 노즐에서 분사되는 공기의 속도가 증가함에 따라 $Re = 700$ 정도 이하의 층류상태에서 부상이 일어나며, 부상된 화염은 항상 일정한 형태로 진동하는 모습을 보인다. 본 연구에서 관찰된 진동화염은 기존의 연구들[1-3]과 달리 모멘텀과 부력의 비를 나타내는 Richardson 수가 1정도로 모멘텀에 비해 부력의 효과가 매우 작은 경우이다.

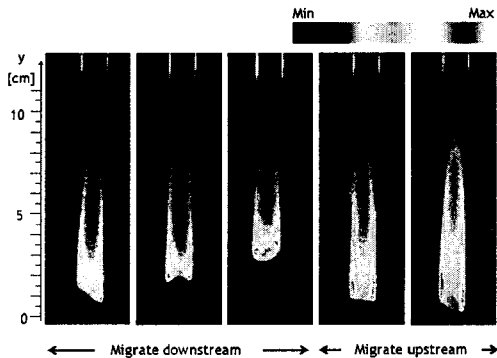


Fig. 5 History of oscillating lifted inverse diffusion flames pictured by ICCD camera ($V_f = 0.5\text{cm/s}$, $V_a = 72\text{cm/s}$)

Fig. 5는 진동하는 화염의 1 주기 동안의 움직임을 이미지 프로세싱을 통해 나타낸 것이다. 노즐에 붙어있던 화염은 유속의 증가로 인해 어느 순간 노즐에서 떨어져 빠르게 상승하게 되며 상승이 최고점에 도달한 이후에 상승 때보다 비교적 느린 속도로 하강하게 된다. 화염은 이러한 상승구간과 하강구간을 반복하게 되며, 이때 상승시 화염의 하류부근의 화염강도가 크게 약해지며 최고점에 다다른 이후 약해졌던 하류 부근의 화염강도가 커지면서 하강하는 모습을 보인다.

화염강도가 차이나는 것은 화염 구조의 변화와 관계가 있다고 판단되며, 정성적으로 화염강도의 변화를 살펴보고 화염구조의 변화가 미치는 영향을 보기 위해 ICCD (Intensified CCD camera)를 이용하여 화염의 자발광을 측정 한 사진이다. 상승과 하강시 하류(downstream)부근의 화염강도는 큰 차이를 보이며 이는 확산화염의 기존 연구에서처럼 화염 선단의 화염 구조가 삼지화염구조를 보이기 때문이라 판단된다[1-3]. 위의 자발광 사진에서는 화염선단의 화염구조의 변화를 확인하기 어렵지만 향후 OH-PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence)를 이용하여 이와 같은 화염구조 변화를 측정할 계획이다.

이러한 화염의 움직임으로부터 몇 가지 조건

(Fig. 2 - A, B, C)에 대해 진동수를 측정하였다. 진동수는 부상높이(liftoff height)의 변화를 기준으로 1주기에 걸린 시간을 측정하여 구하였으며 이는 Figs. 6,7에 나타내었다.

Fig. 6 에서 노즐 끝단부터 청염(blue flame)의 끝까지의 길이를 화염 끝단 높이(flame tip height)로 정하였고, 동일하게 화염 선단(flame base)부분까지의 길이를 부상높이(liftoff height)로 정의하였다. 진동영역의 A, B, C조건에서 한 주기동안의 화염 부상 높이와 화염 끝단 높이의 변화는 거의 sin곡선의 형태를 보이고 있다.

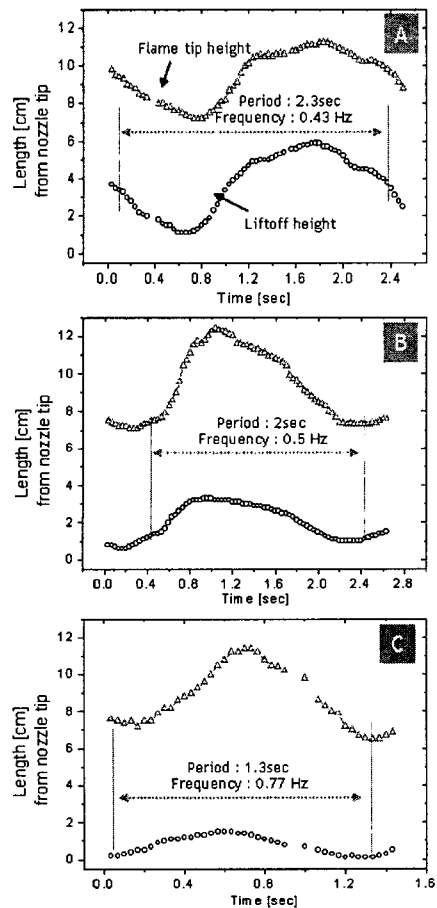


Fig. 6 History of liftoff heights of oscillating lifted inverse diffusion flames (A : $V_f = 0.7\text{cm/s}$, $V_a = 83\text{cm/s}$, B : $V_f = 0.5\text{cm/s}$, $V_a = 72\text{cm/s}$, C : $V_f = 0.3\text{cm/s}$, $V_a = 44\text{cm/s}$)

공기와 연료의 유속의 변화가 진동수에 미치는 영향을 알아보기 위해 하나의 유속 조건을 고정하고 다른 하나를 변화시키며 실험해본 결과, 연

료의 유속을 고정하고 공기의 유속을 증가시킬 때에는 연료의 유속(0-1cm/s)에 비해 공기의 유속(0-100cm/s)이 상당히 크기 때문에 진동수는 공기 유속에 따라 크게 변하게 됨을 확인하였다. 즉, 공기유속이 빨라질수록 진동수가 선형적으로 감소함을 관찰하였다(Fig. 8). 이는 공기유속이 빨라질수록 화염이 하강하는 동안 걸리는 시간이 늘어남에 기인한다.

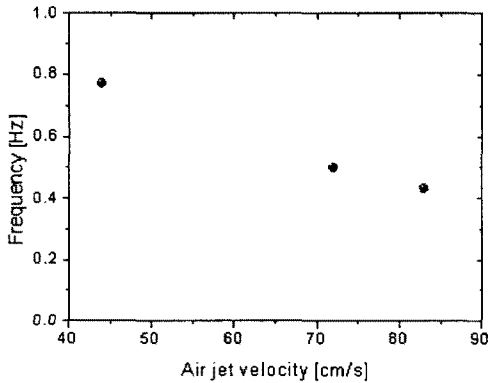


Fig. 7 Frequency of inverse diffusion flame of methane (case A,B,C)

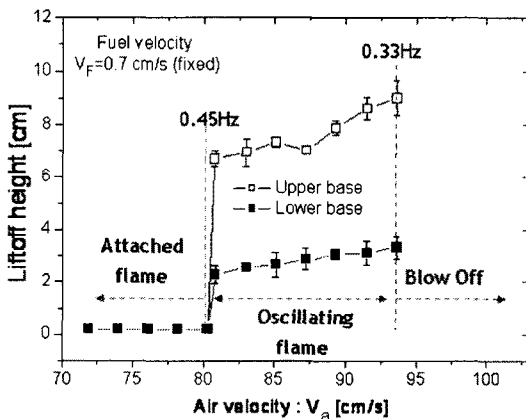


Fig. 8 Variation of liftoff height with air jet velocities ($V_f = 0.7\text{cm/s}$ fixed)

반대로 공기의 공급 유속이 일정한 경우에는 연료 유속의 증가가 화염의 진동수에는 거의 영향을 미치지 않으며 단지 전체 화염을 상류쪽으로 이동시킴을 확인하였다.

진동 화염의 상승과 하강구간은 화염선단의 구조변화가 중요한 인자로 생각되며, 향후에는 Rayleigh scattering method를 통해 화염 하류 부근의 연료와 공기의 농도분포를 알아보고, OH-PLIF를 이용하여 화염 선단의 삼지화염 구조를 보다 명확히 확인할 예정이다.

4. 결론

본 연구는 역확산화염의 부상특성을 실험적으로 연구하였으며 이로부터 화염의 진동현상과 그것에 메커니즘을 조사하였다. 부상화염의 진동을 발생시키는 요인을 찾아내고 메커니즘을 설명하는 것은 화염 안정화 측면에서 중요한 부분이 될 것이다.

(1) 역확산화염(IDFs)의 구조적 특징으로 인해 일반확산화염(NDFs)보다 낮은 레이놀즈수의 층류유동에서 화염 부상이 발생하며, 일반확산화염과 다르게 안정적인 부상 화염이 존재하지 않고 부상된 화염이 주기적으로 진동하게 됨을 관찰하였다.

(2) 역확산화염에서도 노즐부착화염에서 즉시 화염날림으로 천이되는 것이 아니라 부상화염이 존재함을 실험을 통해 관찰하였다. 부상화염은 일정한 주기를 갖고 진동하게 되며 진동수는 대략 0.3-1Hz이다. 이러한 진동수는 대략적으로 노즐에서 분사되는 공기의 유속에 반비례하여 변함을 관찰하였다.

후기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. H. Won, S. H. Chung, M. S. Cha and B. J. Lee, "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane", *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 28, 2000, pp. 2093-2099.
- [2] 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 in Coflow", *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 29, 2002, pp. 37-44.
- [3] J. Kim, K. N. Kim, S. H. Won, O. Fujita, J. Takahashi and S. H. Chung, "Numerical Simulation and Flight Experiment on Oscillating Lifted flames in Coflow Jets with Gravity Level Variation", *Combustion and*

Flame, Vol. 145, 2006, pp. 181-193.

[4] S. Leonard, G. W. Mulholland, R. Puri and R. J. Santoro, "Generation of CO and Smoke During Underventilated Combustion", *Combustion and Flame*, Vol. 98, 1994, pp. 20-34

[5] Kuang-Tsai Wu and Robert H. Essenhigh, "Mapping and Structure of Inverse Diffusion Flames of Methane", *Twentieth Symposium on Combustion*, 1984, pp. 1925-1932.