

## 고온 동축류에서 층류 화염의 부상특성

김길남\* · 원상희\* · 차민석\*\* · 정석호\*\*\*

### Characteristics of Laminar Lifted Flame in High Temperature Coflow

Kil Nam Kim\*, Sang Hee Won\*, Min Suk Cha\*\*, and Suk Ho Chung\*\*\*

#### Abstract

Characteristics of laminar lifted flames of propane highly-diluted with nitrogen have been investigated at various temperatures of coflow air. At various fuel mole fractions, the base of laminar lifted flames has the structure of tribrachial (or triple) flame. The liftoff heights are correlated well with the stoichiometric laminar burning velocity considering initial temperature at a given coflow velocity. It shows that lifted flames are stabilized on the basis of the balance mechanism between local flow velocity and the propagation speed of tribrachial flame, regardless of the temperature of coflow and fuel mole fraction. Lifted flames exist for a jet velocity even smaller than the stoichiometric laminar burning velocity, and liftoff velocity increases more rapidly than stoichiometric laminar burning velocity as coflow temperature increases. These can be attributed to the buoyancy effect due to the density difference.

**Key Words:** Tribrachial flame, Laminar lifted flame, High temperature air, Buoyancy effect

#### 기호설명

- $d$  : 노즐직경  
 $H_L$  : 부상화염높이  
 $U_o$  : 노즐 출구 속도  
 $U_{LO}$  : 화염부상시의 출구 속도  
 $V_{co}$  : 동축류의 출구속도  
 $T_{co}$  : 동축류의 온도  
 $SL_{st}^o$  : 이론당량비의 연소속도  
 $X_{F,o}$  : 프로판의 질소에 대한 희석비

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 한국기계연구원

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

#### 1. 서론

최근에 들어 버너나 가스터빈과 관련하여 고온공기 분위기에서의 연소특성이 널리 연구되고 있으며, 특히 고온 환경에서의 화염 안정화에 관한 연구는 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 고온 동축류 버너를 제작하여 동축류의 온도를 변화시켜가며 비예혼합 제트에서의 층류 부상화염을 기반으로 하여 화염의 안정성에 대한 실험적인 연구를 수행하였다.

층류 부상화염에 관한 연구는 상온의 환경에

서 질소희석이나 공기 부분예혼합 등의 효과를 고려하여 많은 연구가 이루어져왔다[1,2]. 비예혼합 제트에서 연료의 출구 속도가 증가함에 따라 화염 부상이 발생하고, 부상 높이는 비선형적으로 증가한다[3,4]. 이 때, 부상화염은 과농예혼합화염과 희박예혼합화염, 그리고 확산화염이 삼중점에서 공존하는 삼지화염의 구조를 가지며 삼지화염의 특성상 부상화염은 이론 당량비를 가지는 등농도선을 따라 전파한다[1-5]. 삼지화염의 전파속도는 유동 재분배 (redirection) 효과, 열발생 효과, 그리고 화염 곡률등에 의해 정확한 계측이 어려우나 층류에서의 연소속도와 연관지어 설명할 수 있다[6,7,9]. 부상화염은 삼지화염의 전파속도와 유동속도가 균형을 이루는 지점에서 안정화되며, 이런 안정화 메카니즘은 제트 출구 속도의 증가에 따른 비선형적인 부상높이의 증가를 잘 설명하고 있다.

본 연구에서는 동축류의 속도를 일정하게 유지한 상태에서 동축류의 온도를 증가시켜가며 질소 희석을 통한 층류 상태의 부상 화염 특성을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

실험장치부는 고온 동축류 버너, 유량조절부 및 화염 측정부로 구성되어 있는데 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험에 필요한 일정한 온도의 고온 동축류를 얻기 위해 각각 자동제어 (PID 콘트롤) 되는 2개의 히터를 사용하였다. 이 때, 동축류로 사용되는 압축공기는 가열기(heater) 1을 지나며 예열된 후 버너에 공급되며 열손실을 최소화하고 고온의 동축류를 얻기 위해 Fig. 2와 같이 원통형 가열기 2를 직접 버너의 몸통으로 사용하는 버너를 설계 제작하였다.

연료 노즐은 관내에서 완전 발달된 유동장을 얻기 위해 내경 4.3mm, 길이 50cm의 스테인레스 직관을 사용했으며, 동축류를 구성하는 외부관의 직경은 133mm이다. 연료는 질소로 과다 희

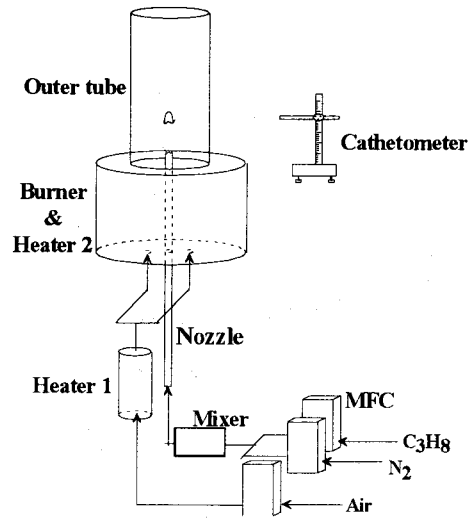


Fig. 1 Schematic of diagram of experimental setup

석한 프로판 ( $C_3H_8$ )을 사용하였으며 유량제어는 질량 유량계 (mass flow controller)를 통해 이루어졌다. 프로판과 질소의 충분한 혼합이 이루어지도록 유리구슬을 채운 혼합기를 설치하고, 균일한 속도장을 가지는 동축류를 얻기 위해 메탈화이버 (fecralloy mat,  $t=1mm$ ) 와 세라믹 하니콤을 이용하였다.

균일한 온도장을 얻고 안정된 부상화염을 관찰하기 위해 내경 65mm, 높이 1m의 파이프스 재질의 외부관을 이용하여 주위로부터의 공기 유입을 차단하였다. 동축류의 온도 측정은 직경 0.3mm의 S형 열전대를 이용하였다. 이 때 동축류의 온도는  $\pm 2K$ 의 오차를 가지며, 노즐 출구에서의 연료의 온도와 동축류의 온도는 연료의 유량에 따라 최대 25K의 편차를 보였다.

동축류의 속도는 각각의 온도에서 밀도 차이에 의한 속도변화를 고려하여 22cm/s와 50cm/s로 각각 일정하게 유지하였으며, 연료출구 속도는 동축류의 온도와 같다는 가정하에서 조절되었다. 카세토미터를 이용하여 부상 높이를 측정하였으며, 35mm 카메라를 사용하여 화염을 가시화 하였다.

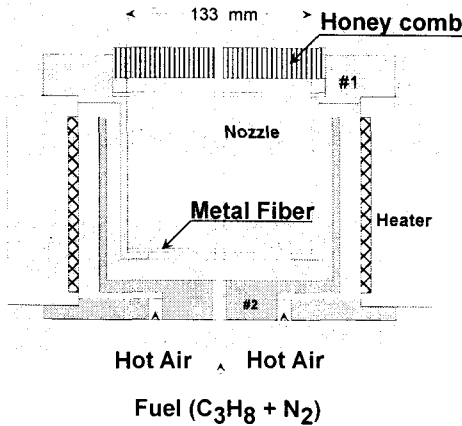


Fig. 2 Schematics of high temperature coflow burner

### 3. 결과 및 검토

연료 제트속도가 작을 때 노즐에 부착되어 있던 화염은 속도가 증가함에 따라 화염부상 (lift off) 이 생기고 삼지화염 구조를 가지는 안정된 부상화염을 이루며, 부상높이  $H_L$ 은 비선형적으로 증가한다. 이러한 부상높이의 변화 특성을 동축류의 온도  $T_{co}$ 와 연료 몰분율  $X_{F,o}$ 를 변화시켜가며 연료 제트속도에 따라 조사하였다. 본 연구에서는  $T_{co} = 300, 400, 500K$ 의 경우 동축류의 속도  $V_{co}$ 를 22cm/s로 고정시켰으며,  $T_{co} = 600, 700, 800, 900K$ 의 경우에는  $V_{co} = 50cm/s$ 로 고정시켰다. 이는 고온 영역 (600 - 900K)에서 안정된 부상화염을 얻기 위해 빠른 속도의 동축류가 필요한데, 비교적 온도가 낮은 영역 (300 - 500K)에서는 이 속도에 맞춰 유량을 제어 할 수 없었기 때문이다.

상온의 동축류에서  $X_{F,o} < 0.087$ 인 경우 과도한 질소희석으로 인해 화염이 존재하지 않는다 [3]. 또한 비교적 높은 온도 ( $T_{co} > 600K$ )의 동축류에서,  $X_{F,o} > 0.087$ 의 경우 부상화염이 불안정해진다. 이러한 이유로 적절한 실험조건에서 층류 부상높이의 변화특성을 살펴보았다.

### 3.1. 부상높이 변화 특성

동축류의 온도가 300K에서 900K까지 증가할 때, 주어진 온도에서 연료 몰분율을 변화시키며 연료 제트속도에 따른 부상높이의 변화를 Fig. 3에 나타냈다. 고온 동축류의 경우에도 부상높이는 비선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 주어진  $U_o$ 에서 연료 몰분율과 동축류의 온도가 증가함에 따라 부상높이가 감소함을 확인할 수 있다. 이러한 경향들은 당량비가 1인 지점을 따라 유동속도와 삼지화염의 전파속도가 일치하는 지점에서 화염이 안정화를 이룬다는 안정화 메커니즘을 통해 이해할 수 있다 [4,5].

$X_{F,o} = 0.043, V_{co} = 50cm/s$  일 때,  $T_{co} = 600, 700, 800, 900K$ 로 변화시켜가며 부상높이가 각각 10, 20mm인 경우의 직접사진을 Fig. 4에 나타내었다. 부상화염 선단은 과농예혼합, 희박예혼합, 그리고 확산화염으로 이루어진 삼지화염 구조를 가진다. 이를 통해 고온 동축류에서 질소로 한 프로판의 경우에도 상온에서의 층류 부상화염의 경우와 마찬가지로 기본 구조가 삼지화염 구조를 가짐을 알 수 있다. 또한, 일정한 부상화염 높이에서 동축류의 온도가 증가할수록 과농예혼합 화염의 길이가 증가하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 온도가 증가할수록 동일한 부상높이를 가지기 위해 연료출구 속도가 증가하기 때문이다.

### 3.2. 부상화염의 안정화 특성

부상높이는 당량비가 1인 궤적을 따라 삼지화염의 전파속도와 유동속도의 균형을 통해 예측할 수 있으며, 삼지 화염의 전파속도는 층류 연소 속도와 상관관계를 가지고 있다. 초기 온도와 연료 몰분율에 따른 층류 연소 속도는 GRI-3.0 메커니즘을 이용한 1D-Planar code를

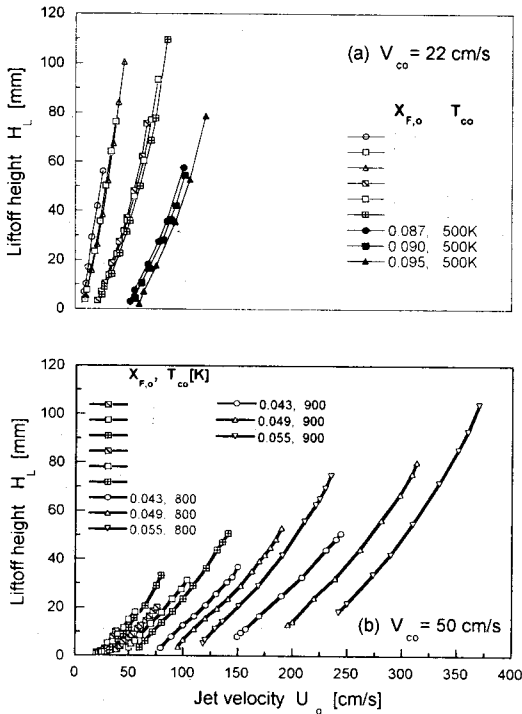


Fig. 3 Liftoff height variation of stationary lifted flame with jet velocity

통해 수치적으로 계산할 수 있으며[9], 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이를 통해 동축류의 온도와 연료 물질분이 증가할수록 층류 연소속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3에서의 제트속도에 따른 부상높이 변화를 제트속도와 층류 연소속도의 비 ( $U_o/S_L^o|_{st}$ )로 Fig. 6에 나타내었다.  $U_o/S_L^o|_{st} > 1$  인 지역에서 각각 상관관계 상수 0.97, 0.99를 가지는 다음과 같은 상관관계를 가진다.

$$H_L = 9.20(U_o/S_L^o|_{st})^{2.71}; V_{co} = 22 \text{ cm/s}$$

$$H_L = 9.37(U_o/S_L^o|_{st})^{3.01}; V_{co} = 50 \text{ cm/s}$$

이를 통해, 일정한 동축류의 속도에서 부상높이는 제트속도와 층류 연소속도에 따라 결정됨을 알 수 있다.

동축류의 속도가 22cm/s이고  $U_o/S_L^o|_{st}$ 가 작을

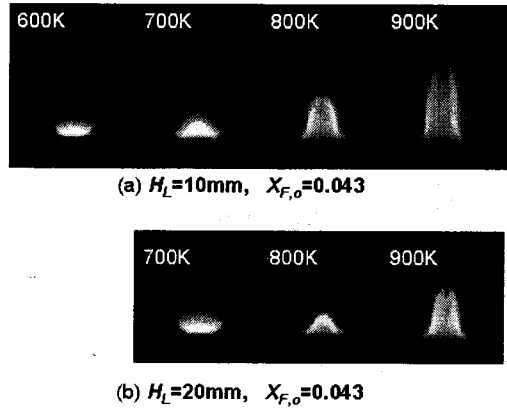


Fig. 4 Direct photographs of lifted flames

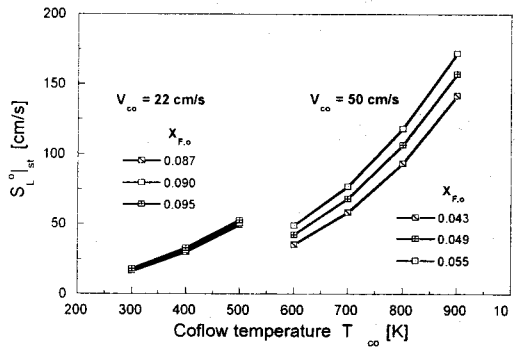


Fig. 5 Calculated stoichiometric laminar burning velocity

경우  $U_o/S_L^o|_{st}$ 에 따른 부상 높이는 동축류의 온도 변화에 의해 잘 일치하지 않는다. 이러한 차이를 설명하기 위해 각각의 연료 물질분에서 온도에 따른 기연가스와 미연가스의 밀도 차이를 Fig. 7에 나타내었는데, 밀도차이는 연료물질분에 무관하게 동축류의 온도에 따라 비교적 일정한 값을 가지며 비교적 낮은 동축류의 온도에서 밀도차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 밀도 차에 의해 부력효과가 생기게 되므로 비교적 낮은 유속에서 동축류의 온도가 낮을 경우, 부력효과가 화염 안정화에 중요한 역할을 하게 된다. 그러므로 Fig. 6(a)에서 일정한  $U_o/S_L^o|_{st}$ 에서 동축류 온도에 따른 부상높이의 차이는 부력효과에 기인함을 유추할 수 있다.

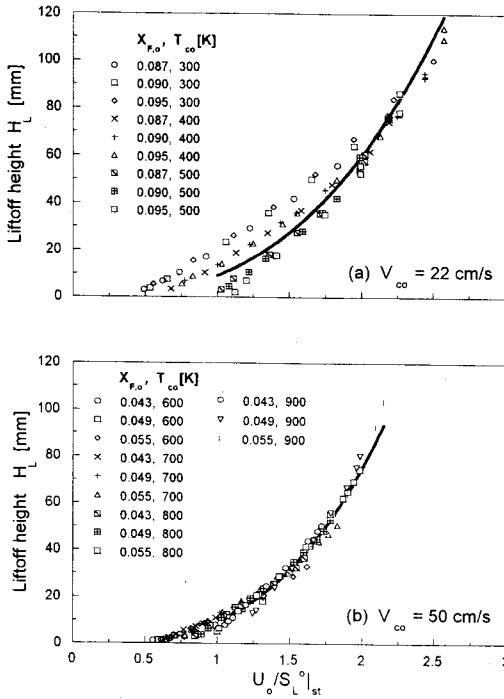


Fig. 6 Liftoff height variations with  $U_0/S_{L^0|st}$

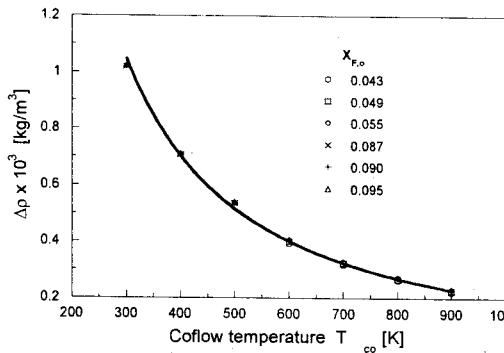


Fig. 7 Difference between unburnt gas density and burnt gas density

3.3. 화염부상 속도 특성

화염이 노즐로부터 떨어져 부상하기 시작하는 부상속도  $U_{Lo}$ 와 층류 연소속도  $S_{L^0|st}$ 를 동축류의 온도에 대하여 나타내면 Fig. 8과 같다. 일정한 연료 물분율에서 동축류의 온도가 낮을

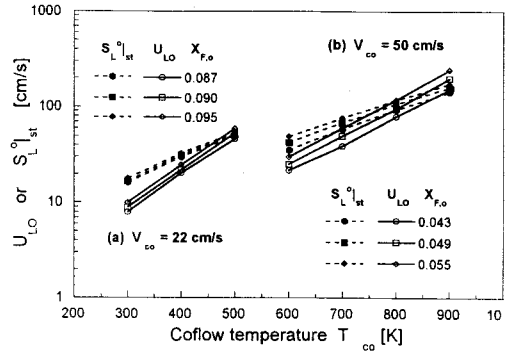


Fig. 8 Liftoff velocities and stoichiometric laminar burning velocity with coflow temperature

경우  $U_0 < S_{L^0|st}$ 인 영역에서도 부상화염이 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 유동장내의 속도와 삼지 화염의 전파속도가 균형을 이루는 곳에 부상화염이 위치하게 된다는 설명과는 모순되지만 부력의 효과로 설명할 수 있다[8]. 화염의 부상높이가 낮은 경우 부력효과에 의해 공기 유입량이 증가함으로써 국부적인 유동속도가 증가하기 때문에 층류 연소속도보다 낮은 제트속도에서도 부상화염이 존재할 수 있다. 또한, 동축류를 구성하는 온도의 증가에 따른 부상속도의 증가는 층류 연소속도의 증가에 비해 더 급격하게 이루어진다. 따라서 온도가 증가할수록  $U_0$ 가 작은 경우의 부상높이는 부력 효과가 작은  $U_0$ 가 큰 경우의 특성에서 크게 벗어나지 않게 되며, 이러한 특성은 Fig. 6에 잘 나타나 있다.

4. 결론

동축류의 온도를 변화시켜가며 질소로 과다 희석된 프로판을 연료로 사용하여 층류 부상화염을 형성시키고 그 특성을 실험적으로 연구하였다. 주어진 실험 범위 내에서 부상화염은 동축류의 온도에 무관하게 삼지 화염의 구조를 가짐을 확인하였으며, 또한 상온에서 이루어진 기

존의 연구결과와 유사하게 고온의 경우에도 부상높이는 연료 제트속도의 증가에 따라 비선형적으로 증가하였다. 부상높이를  $U_0/S_L^0|_{st}$ 를 이용하여 나타내면, 일정한 동축류의 속도에서 동축류의 온도나 연료 물분율에 무관하게  $U_0/S_L^0|_{st}$ 에 따라 일정한 부상 높이를 가진다. 이를 통해 고온의 환경에서도 부상화염의 안정화는 화염 전파속도와 유동속도가 균형을 이루는 곳에서 이루어진다는 것을 확인하였다.

유동의 속도가 층류 화염전파속도보다 낮은 경우에도 밀도차에 의해 생기는 부력 효과에 의해 부상화염이 존재할 수 있음을 보였으며, 동축류의 온도를 증가시킴에 따라 미연가스와 기연가스의 밀도차가 감소하게 되어 부상화염의 안정화에 영향을 미치는 부력의 영향이 감소하고 있음을 유추할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 연소기술연구센터 (CERC) 와 한국생산기술연구원의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Lee, J., Kim, J. S., and Chung, S. H., "Effect of Dilution on the Liftoff of Non-Premixed Jet Flames," *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, Vol. 25, 1994, pp. 1175-1181.
2. Lee, B. J., Cha, M. S. and Chung, S. H., "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 127, 1997, pp. 55-70.
3. Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combustion and Flame*, Vol. 86, 1991, pp. 23-40.
4. Lee, B. J. and Chung, S. H., "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combustion and Flame*, Vol. 109, 1997, pp. 163-172.
5. Ghosal, S. and Vervisch, L., "Stability Diagram for Lift-off and Blowout of a Round Jet Laminar Diffusion Flame", *Combustion and Flame*, Vol. 123, 2001, pp. 646-655.
6. Reustch, G. R., Vervisch, L., and Linan, A., "Effects of Heat Release of Triple flames," *Phys. Fluids*, Vol. 7, 1995, pp. 1447-1454.
7. Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N. and Mansour, M. S., "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame," *Combustion and Flame.*, Vol. 115, 1998, pp. 335-353.
8. Won, S. H., Cha, M. S., Lee, B. J., and Chung, S. H., "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Dilyted Propane," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, 2000, pp. 2093-2099.
9. Smooke, M. D., "Solutions of Burner - Stabilized Boundary Value Methods", *J. of Comput. Phys.*, Vol. 48, 1982, pp. 72-105.