

고온 동축류버너에서 층류부상화염 특성

김길남* · 원상희* · 차민석** · 정석호***

Characteristics of Laminar Lifted Flame in High Temperature Coflow Burner

K. N .Kim, S. H. Won, M. S. Cha and S. H. Chung

Key Words: lifted flame, high temperature coflow, liftoff velocity, laminar burning velocity

Abstract

Characteristics of lifted flame for highly diluted propane with nitrogen in high temperature coflowing air have been experimentally investigated, and the stabilization mechanism of lifted flame in high temperature air coflow have been proposed. As the coflow temperature increases, the liftoff height of flame decreased due to the increase of stoichiometry laminar burning velocity. At same coflow temperature, the difference of liftoff height between the fuel mole fractions has been disappeared by scaling the liftoff velocity with stoichiometry laminar burning velocity. It has been found that lifted flame can be stabilized for even smaller fuel velocity than stoichiometry laminar burning velocity. This can be attributed to buoyancy effect and the liftoff velocity characteristics for coflow temperature support it.

기호설명

- $X_{F,o}$: Fuel Mole Fraction
- V_{co} : Coflow Velocity
- T_{co} : Coflow Temperature
- U_o : Fuel Jet Velocity
- $U_{L,o}$: Liftoff Velocity
- $(S_L^0)_{st}F_o$: Laminar Burning Velocity
- H_L : Liftoff Height

1. 서론

실제 실용연소기의 대부분을 차지하는 가스터빈이나 내연기관에서 연료는 고온의 공기와 혼합되어 연소과정을 이룬다. 따라서 고온 환경에서의 연소현상을 규명하는 과정은 선행되어야 하지만 아직까지 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 특히 고온에서의 화염의 안정화 특성은 실제 실용 연소기에서 매우 중요

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
 ** 한국기계연구원
 *** 서울대학교 기계항공공학부

한 문제이므로, 본 연구에서는 고온 동축류 버너를 제작하여 난류화염의 기본 모델이 될 수 있는 층류에서의 부상화염을 기반으로 하여 화염의 안정성 문제에 대해서 실험적인 연구를 수행하였다.

부상 화염은 과농 예혼합 화염과 희박 예혼합 화염, 그리고 확산 화염이 삼중점에서 공존하는 삼지화염의 구조를 갖고 있다.^[1-4] 삼지 화염의 특성상 화염은 이론 당량비인 지점을 따라 전파하며, 이 경우 유동의 재분배 (redirection) 효과에 의해 층류 화염 전파속도보다 빠른 전파 속도를 갖게 된다.^[5,6]

이론 당량비인 등 농도선을 따라 화염의 전파속도와 유동장의 속도가 일치하는 지점에서 화염이 안정화되며, 제트의 출구 속도에 따라 부상높이는 비선형적으로 증가함은 이미 밝혀진 바 있다.^[1,2]

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

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치부는 고온 동축류 버너, 유량 조절부 및 화염 측정부로 구성되어 있다. 전체적인 실험장치의 구성은 Fig. 1 과 같고, 실험에 필요한 고온의 동축류를 얻기 위해 2개의 히터를 사용하였다. 이 때 일정한 온도를 얻기 위해 각각의 히터의 온도를 자동제어 (PID 콘트롤) 하였다.

고온 동축류 버너는 열손실을 최소화하고 고온의 동축류를 얻기 위해 원통형 히터를 직접 버너의 몸통으로 이용하였고, 충분한 열과 균일한 온도장을 얻기 위해 Fig. 2의 #1 과 #2 의 형태로 버너

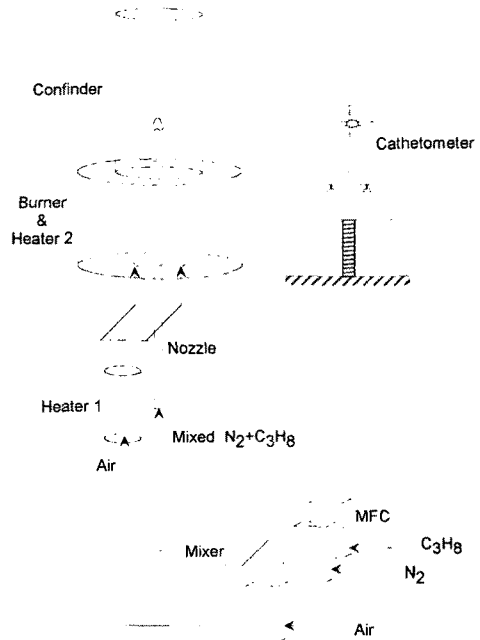


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

를 제작하였다. 버너에서 사용된 히터는 2.7 W/cm^2 의 2.6 KW 용량의 세라믹 히터를 사용하였다. 노즐은 i.d. = 4.4mm, o.d. = 6.3mm 의 관을 사용하였으며, 동축류를 구성하는 외부관의 직경은 133mm 이다. 연료는 질소 (N_2) 를 이용해 과다 희석한 프로판 (C_3H_8) 을 사용하였으며, 산화제로는 압축공기를 이용하였다. 연료와 공기의 유량제어는 질량 유량계 (mass flow controller) 를 사용하였으며, 프로판과 질소의 충분한 혼합이 이루어지도록 유리구슬 (glass bead) 을 채운 혼합기 (mixer) 를 설치하였다. 동축류 부분에서는 균일한 속도장을 얻기 위해 메탈화이버 (federalloy mat, $t=1\text{mm}$) 와 세라믹 하니콤 (ceramic honey comb) 을 설치하였다. 고온의 동축류로 인해 외부로부터의 공기유입량이 많아지게 되는데, 이는 동축류의 온도장을 불균일하게 만드는 원인이 될 수 있다. 따라서

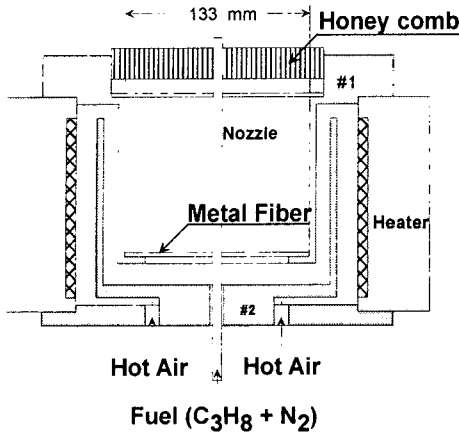


Fig. 2. Schematics of high temperature coflow burner.

균일한 온도장을 얻고 안정된 부상화염을 관찰하기 위해 내경 65mm, 높이 1m의 pyrex재질의 컨파인더 (confinder) 를 사용하였다.

동축류의 온도는 직경 0.3mm의 s-type 열전대를 이용하여 동축류 출구에서 측정하였으며, 이 때 온도는 컨파인더 영역안쪽에서 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 오차를 가진다. 동축류의 속도는 각각의 온도에서 밀도 차이에 의한 속도변화를 고려하여 22cm/s와 50cm/s로 각각 일정하게 유지하였다.

부상화염의 특성을 고찰하기 위해 카세토미터 (cathetometer) 를 이용하여 층류 부상화염의 높이를 측정하였으며, 35mm 카메라 (CANNON EOS-5) 를 사용하여 화염의 형상을 관찰하였다.

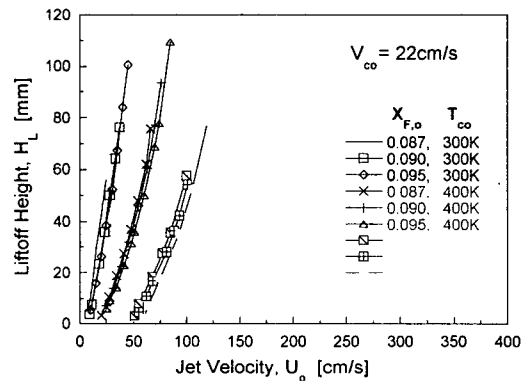
3. 결과 및 검토

본 연구에서는 실험조건의 다양성으로 인한 현상 이해의 어려움을 막기 위해, 각각의 온도에 따라 동일한 속도를 가지는 동축류 안에서 연료 (C_3H_8) 의 몰분율과 질소로 과다 희석된 연료의 유속

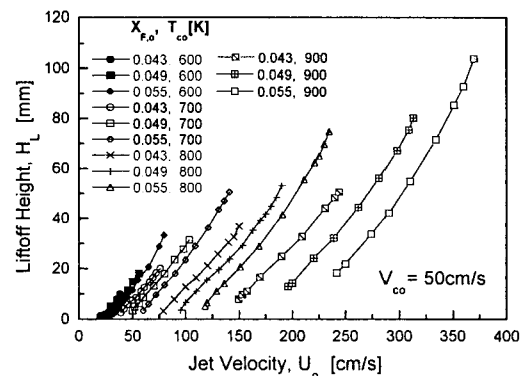
(fuel jet velocity) 을 변화시켜가며 나타나는 화염의 특성을 고찰하였다.

3.1 온도와 속도변화에 따른 화염특성

동축류의 속도 (V_{co}) 를 22cm/s로 일정하게 유지한 상태에서 동축류의 온도 (T_{co}) 를 300K, 400K, 500K로 변화시켜가면서 연료 제트속도 (fuel Jet velocity) 에 따른 부상높이의 특성을 Fig. 3(a) 에 나타내었고, Fig. 3(b) 는 동축류의 속도를 50cm/s로 고정시키고 온도를 600K,



(a) $V_{co} = 22\text{cm/s}$



(b) $V_{co} = 50\text{cm/s}$

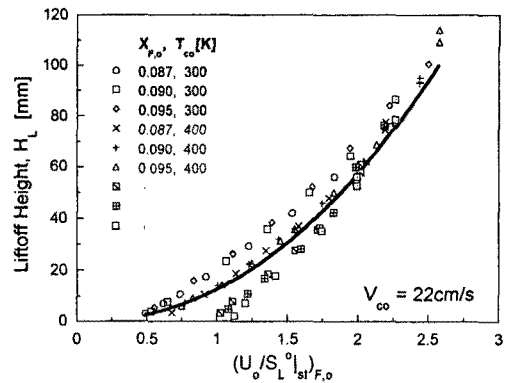
Fig. 3 Liftoff height variation of stationary lifted flame with jet velocity at various fuel mole fraction and coflow temperature.

(a) $V_{co}=20\text{cm/s}$, (b) $V_{co}=50\text{cm/s}$

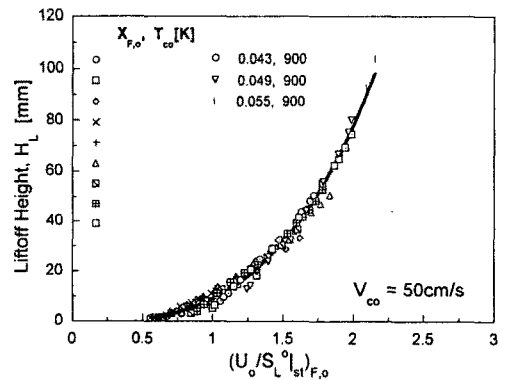
700K, 800K, 900K로 변화시킬 때의 부상 높이의 변화 특성을 나타낸다. 이 때 $X_{F,o}$ 는 연소가 일어나기 전의 연료 몰분율 (fuel mole fraction) 을 나타낸다. 여러 가지 동축류 온도 경우에서 연료 몰분율을 일정하게 유지하지 못했는데, 그 이유는 동축류의 온도가 300K일 때는 $X_{F,o} < 0.087$ 에서 과도한 질소회색으로 화염이 존재하지 않고^[3,7], 고온의 경우는 300K에서 이용한 회색비를 사용해 실험할 때 화염이 불안정해지기 때문이다. 그래서 300K, 400K, 500K영역과 600K, 700K, 800K, 900K의 온도 영역에서 각각 다른 몰분율에서 실험을 수행하였다. Fig. 3의 전체적인 경향을 살펴보면, 일정한 몰분율을 가지는 경우에 동축류의 온도가 증가함에 따라 부상높이는 낮아지며, 같은 온도에서 몰분율을 증가시킬수록 부상높이가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 동축류의 온도가 증가하고, 몰분율이 증가할수록 층류 화염 전파속도가 증가하기 때문이다.^[2,7]

부상화염의 안정화는 당량비가 1인 지점을 따라 삼지 화염의 전파속도와 유동장내의 속도가 일치하는 지점에서 이루어지며, 삼지 화염의 전파속도는 층류 화염 전파속도 ($S_L^0|_{st}$) 와 상관관계를 갖고 있다.^[1-7] 이러한 점에 착안하여 GRI3.0 메카니즘을 적용한 1D-Planar Code 에서 $X_{F,o}$ 와 초기온도와 연료의 몰분율에 따른 층류 화염전파속도를 계산하고^[9,10], Fig. 3의 연료 제트속도에 따른 화염의 부상특성을 연료 제트속도와 층류 전파속도의 비 ($U_o/S_L^0|_{st}$) 로 Fig. 4에 나타내었다. 이 그래프에서 일정한 동축류의 속도를 가질 경우 부상 화염의 부상높이는 연료 제트속도와 층류 화염전파속도에 따라 결정됨을 알 수 있다.

연료의 몰분율 ($X_{F,o}$) 을 0.043으로 고



(a) $V_{co} = 22\text{cm/s}$



(b) $V_{co} = 50\text{cm/s}$

Fig. 4 Liftoff height variation of stationary lifted flame scaled jet velocity with laminar stoichiometric velocity at various coflow temperature and fuel mole fraction.

(a) $V_{co}=22\text{cm/s}$, (b) $V_{co}=50\text{cm/s}$

정시키고 동축류의 온도 (T_{co}) 를 600K, 700K, 800, 900K로 변화시키면서 부상화염의 높이가 10mm, 20mm일 때의 화염 특성을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5를 살펴보면 부상화염의 높이가 일정할 경우 동축류의 온도가 증가할수록 화염의 길이가 길어지는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 온도가 증가할수록

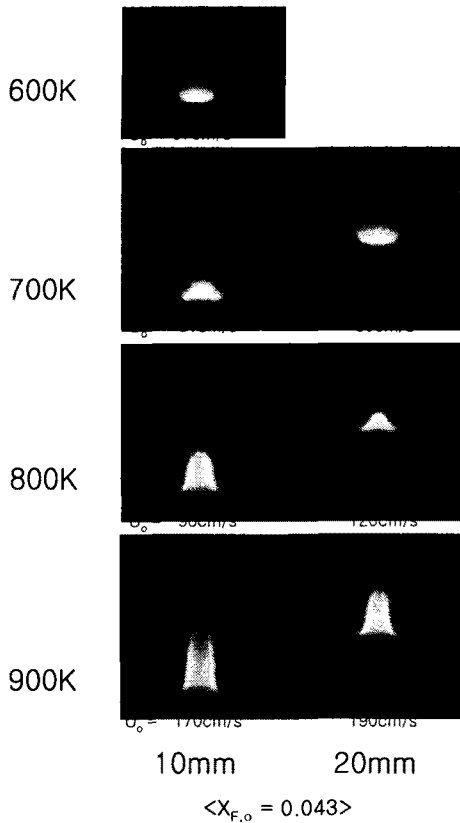


Fig. 5 Direct photograph of stabilized lifted flame with various coflow temperature at $X_{F,o}=0.043$ when liftoff height is 10mm, and 20mm

동일한 부상높이를 가지기 위해 연료출구 속도가 증가하기 때문이라고 추측할 수 있다. 또한 동축류의 온도가 다를 경우에도 화염의 모습은 삼지화염 구조를 가지며 일정한 온도에서 같은 경향의 부상특성을 보이고 있다.

3.2 화염의 부상특성

동축류의 온도가 300K, 400K, 500K일 때 $V_{co}=22\text{cm/s}$ 로 고정하고 연료 물분율을 0.087, 0.090, 0.095로 변화시켜가며 화염이 노즐로부터 떨어져 부상하기 시

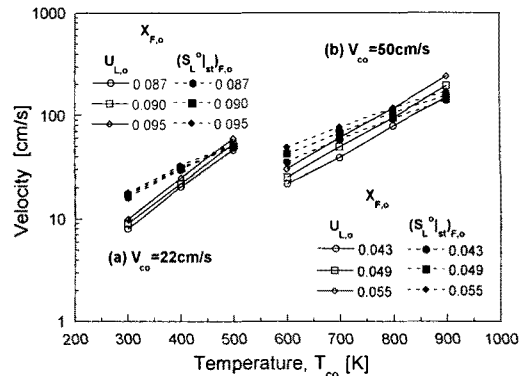


Fig. 6 Liftoff velocities and stoichiometric laminar burning velocity with coflow temperature at various fuel mole fraction.

작하는 연료 제트속도 ($U_{L,o}$) 와 1D-Planar Code를 이용해 구한 층류 화염전파속도 ($S_{L^0}|_{st}$) 를 동축류의 온도에 대하여 나타내면 Fig. 6과 같다. 또한 동축류의 속도를 50cm/s로 일정하게 유지하고 온도가 600K, 700K, 800K, 900K 일 때, 연료의 물분율을 0.043, 0.049, 0.055로 변화시켜가며 측정된 liftoff velocity ($U_{L,o}$) 와 층류 화염전파속도 ($S_{L^0}|_{st}$) 도 Fig. 6에 함께 나타냈다. 이때 liftoff velocity ($U_{L,o}$) 는 화염이 노즐로부터 떨어져 부상하기 시작하는 연료 제트속도를 의미한다.

연료 물분율이 일정한 경우에 liftoff velocity는 동축류의 온도에 따라 증가하는 경향을 보인다. 일정한 연료 물분율에서 낮은 온도에서는 제트속도가 화염전파속도보다 낮은 경우에도 부상화염이 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 유동장내의 속도와 삼지 화염의 전파속도와 균형을 이루는 곳에 부상화염이 위치하게 된다는 설명과는 모순된다. 하지만 최근의 연구결과에 의하면 이는 부력의 효과로 인한 현상으로 설명될 수 있다.^[7] Fig.

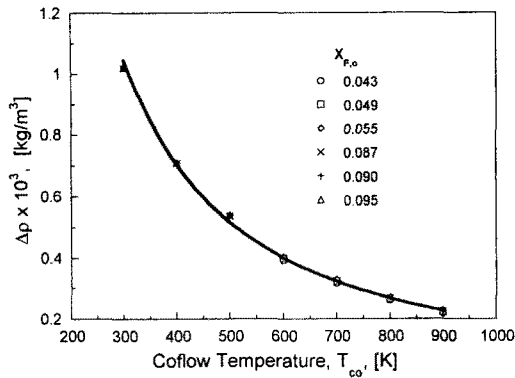


Fig. 7 Difference between unburnt gas density and burnt gas density

6을 살펴보면 일정한 연료 물분율에서 동축류의 온도가 증가할 때, liftoff velocity가 층류 화염전파속도보다 큰 지점이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 고온의 동축류가 형성될수록 미연가스와 기연가스의 밀도차가 작아지게 되어 부력효과가 작아지기 때문이라고 해석할 수 있다.

동축류의 온도에 따른 미연가스와 기연가스의 밀도차이를 동축류의 온도에 따라 Fig. 7에 나타내었는데, 동축류 온도가 증가할수록 온도 차이에 의한 밀도차가 줄어들어 화염에 의한 부력효과가 감소하고 있음을 알 수 있다.

3. 결론

고온의 동축류 버너에서 프로판에 대하여 질소희석을 통해 부상화염의 특성 및 안정화 메카니즘을 실험적인 방법을 통해 연구하였다. 동축류의 온도에 관계없이 부상화염은 삼지화염의 구조를 가지며, 이론 당량비를 가지는 등농도선을 따라 화염 전파속도와 유동 속도가 일치하는 지점에서 안정화된다는 사실을 확

인할 수 있었다.

유동의 속도가 층류 화염전파속도보다 낮은 경우에도 화염의 부력 효과에 의해 부상화염이 존재할 수 있음을 보였으며, 동축류의 온도를 증가시킴에 따라 온도 차이에 의한 밀도차가 감소하게 되어 화염의 부력에 의한 영향이 줄어들고 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 한국생산기술연구원의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Chung, S. H. and Lee, B. J., 1991 "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet", *Combust. Flame*, Vol.86, pp.23-40
- (2) Lee, B. J. and Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet", *Combust. Flame*, Vol. 109, pp. 163-172
- (3) Lee, B. J., Kim, J. S., and Chung, S. H., 1994, "Effect of Dilution on the Liftoff of Non-Premixed Jet Flames", *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, Vol. 25, pp. 1175-1181
- (4) Lee, B. J., Cha, M. S. and Chung, S. H., 1997, "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet", *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 127, pp. 55-70
- (5) Reustch, G. R., Vervisch, L., and

- Linan, A., *Combust. Flame.* Vol. 95, pp. 276-290(1993)
- (6) Ghosal, S. and Vervisch, L., 2001, "Stability Diagram for Lift-off and Blowout of a Round Jet Laminar Diffusion Flame", *Combust. Flame.*, vol. 123, pp. 646-655
- (7) Won, S. H., Cha, M. S., Lee, B. J., and Chung, S. H., 2000, "Lifted Flame Stabilization in Developing and Developed Regions of Coflow Jets for Highly Diluted Propane", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, pp. 2093-2099
- (8) Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N. and Mansour, M. S., 1998, "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame", *Combust. Flame.*, vol. 115, pp. 335-353
- (9) Smooke, M. D., *J. Computat. Phys.* 48:72-105(1982)
- (10) GRI-MECH 3.0, available from http://www.me.berkeley.edu/gri_mech