

동축류 제트에서 초기 온도 변화에 따른 난류 부상화염 특성

김길남* · 원상희** · 정석호***

Characteristics of Turbulent Lifted Flames in Coflow Jet with Initial Temperature Variations

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

ABSTRACT

Characteristics of turbulent lifted flames in coflow jet have been investigated by varying initial temperature through the heating of coflow air. In the turbulent regime, liftoff height increases linearly with fuel jet velocity and decreases nonlinearly as the coflow temperature increases. This can be attributed to the increase of turbulent propagation speed, which is strongly related to laminar burning velocity. Dimensionless liftoff heights are correlated well with dimensionless jet velocity, which are scaled with parameters determining local flow velocity and turbulent propagation speed. This implies that the turbulent lifted flames are stabilized by balance mechanism between local turbulent burning velocity and flow velocity. Blowout velocity can be obtained from the ratio of mixing time to chemical time. Comparing to previous researches, thermal diffusivity should be evaluated from the initial temperature instead of adiabatic flame temperature.

Key Words : turbulent lifted flame, initial temperature, liftoff height, balance mechanism, liftoff velocity, blowout velocity.

기 호 설 명

H_L : Liftoff height	$X_{F,o}$: Fuel mole fraction
V_{co} : Coflow velocity	T_{co} : Coflow temperature
U_{LO} : Liftoff velocity	$\tilde{\rho}$: Density ratio of fuel to air
U_{BO} : Blowout velocity	d_o : Nozzle inner diameter
U_{RA} : Reattachment velocity	ψ : Stoichiometric air to fuel mass ratio
$S_L^{o st}$: Stoichiometric laminar burning velocity	α : Thermal diffusivity

1. 서 론

최근에 들어 버너나 가스터빈에서 연소 효율과 관련하여 고온 공기 혹은 상승된 온도 환경에서의 연소특성이 널리 연구되고 있다. 연소 시스템의 안정과 관련하여 화염 안정성에 관한 연구는 매우 중요하며, 따라서 고온 공기류에서의 부상화염의 특성은 중요한 문제의 하나이다.

난류 부상화염에 관한 연구는 상온에서 다양한 가스 연료에 대해서 노즐 직경 변화, 연료 희석,

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

† E-mail : shchung@snu.ac.kr

TEL : 02)880-7114 FAX : 02)889-1842

** 서울대학교 정밀 기계설계 공동 연구소

*** 서울대학교 기계항공공학부

동축류 속도 변화 등의 효과를 고려하여 널리 연구되어 왔다^[1-5]. 연료 제트 속도가 증가함에 따라 노즐 부착 화염은 노즐에서 떨어져 안정화되어있는 부상화염이 되며, 속도를 계속해서 증가시킬 경우, 부상 높이는 속도에 따라 선형적으로 증가하며 일정속도 이상에서 화염날림 (blowout) 현상이 발생한다.

부상화염의 거동 특성은 층류와 난류 영역에서 각각 다르게 나타난다. 질소를 이용한 연료 희석비에 따라 층류영역, 천이영역, 그리고 난류영역에서의 부상화염을 관찰할 수 있다. 부상높이는 층류영역에서 제트 속도에 따라 비선형적으로 증가하고, 천이 영역을 거치며 감소하며, 마지막으로 난류영역에서 선형적으로 증가하는 모습을 보인다. 천이영역에서 부상높이의 감소는 슬리텐을 이용한 가시화 결과를 통해 밝혀졌듯이 jet breakup height 가 감소하기 때문이다^[1].

난류 부상화염의 부상 높이는 노즐의 직경에 무관하며 난류화염 전파속도와 평균 유동속도가 균형을 이루는 곳에서 안정화를 이룬다^[2,4]. 난류 부상화염이 안정화를 이루는 지점에서, 난류 화염 전파속도 및 순간 유동속도가 연구된 바 있다^[3]. 난류제트에서 발견되는 large scale motion 에 근거를 둔 화염 안정화 메커니즘을 생각할 때, 화염날림 속도는 화학반응 시간 특성과 large scale motion 에 의한 혼합 시간 특성의 비로 결정될 수 있다^[6].

연소 효율 향상을 목적으로 고온 연소와 관련하여 많은 연구가 이루어졌다^[7-9]. 연소 후 배기 가스를 통한 에너지 손실을 막고, 고온 연소를 통해 연소효율을 증가시키기 위한 재순환 연소 시스템이 연구되었다^[7]. 고온 환경에서 연소를 시킬 경우, 부상 높이와 NOx 배출량의 관계가 연구되었으며 레이저 진단을 통한 화염구조 해석에 대한 연구가 이루어졌다^[8,9].

본 연구에서는 동축류 버너를 제작하여 동축류의 온도를 900K 까지 변화시켜가며, 비예혼합 제트에서의 난류 부상화염을 기반으로 하여 온도 변화에 따른 화염 안정성에 대한 실험적인 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

실험장치는 동축류 버너, 유량조절 장치, 그리고 온도 제어 장치로 구성되어 있으며, 그 개략도는 Fig. 1 과 같다. 실험에 필요한 일정한 온도를 가지는 동축류 공기를 얻기 위하여, 각각 자동제어 (PID 콘트롤) 되는 2개의 히터를 사용하였다. 동축류로 사용되는 압축공기는 가열기(heater) 1을 지나며 예열된 후 동축류 버너에 공급된다. 이때, 열손실을 최소화하면서 고온의 동축류를 얻

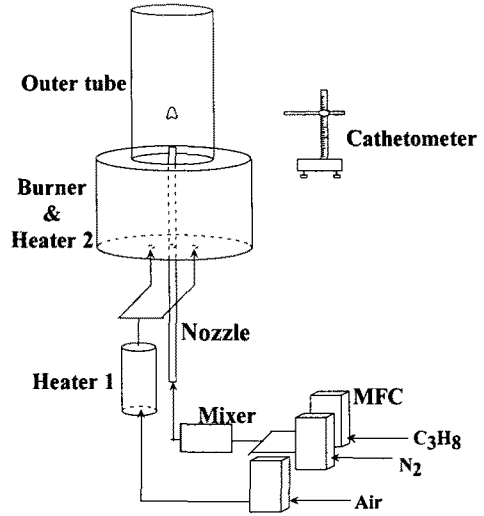


Fig. 1 Schematic of diagram of experimental setup

기 위하여 버너의 몸통부분으로 히터 2 를 사용하였으며, 그 개략도는 Fig. 2 와 같다.

연료 노즐은 관내 완전 발달된 유동장을 얻기 위하여 내경 1.65 mm, 길이 55cm 의 스테인레스 스틸관을 사용하였으며, 동축류를 구성하는 외부관의 직경은 133 mm 이다. 연료는 99.99 % 의 순도를 가지는 프로판을 사용하였으며, 희석제로는 질소를 사용하였다. 연료, 희석제 및 동축류 공기의 유량은 질량 유량계를 통해 제어하였다. 균일한 속도장 및 온도장을 가지는 동축류를 얻기 위하여 메탈 화이버 필터 (Fecralloy mat, $t=1\text{mm}$), 세라믹 비드, 그리고 세라믹 하니콤을 사용하였다.

동축류 공기의 온도 측정을 위하여, $t = 0.3\text{mm}$ 의 R-type 열전대를 사용하였으며, 온도측정은 동축류 공기 출구에서 이루어졌다. 동축류 공기의 온도는 실험 과정동안 $\pm 2\text{K}$ 의 오차를 보였다.

연료 출구 속도는 연료의 온도가 동축류 공기의 온도와 같다는 가정하에서 온도변화에 따른 밀도 차이를 고려하여 조절되었으며, 동축류 속도 또한 온도 변화를 고려하여 조절되었다. 연료의 출구 온도는 열전대를 이용한 측정결과 연료 유량 증가에 따라 동축류 온도와 비교하여 최고 10K 의 오차를 가졌다. 동축류 속도에 따른 부상높이의 변화를 배제하기 위해, 상대적으로 낮은 연료 출구속도를 가지는 영역에서는 동축류의 속도를 0.5 m/s 로 고정하였다. 동축류 공기의 온도가 700K, 900K 일 때, 동축류 속도를 0.85 m/s 까지 증가시켰을 때, 동축류 속도에 따른 부상높이의 변화는 거의 없다.

난류 화염의 부상 높이를 측정하기 위하여 카세

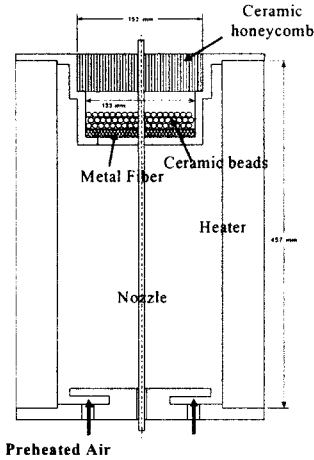


Fig. 2 Schematic diagram of burner

토미터를 이용하였으며, 디지털 카메라 (Nikon, D-100) 를 사용하여 화염을 가시화하였다.

3. 실험 결과

온도 변화에 따른 난류 부상화염의 특성을 살펴 보기 위해 동축류 공기의 온도 (T_{co}) 를 각각 300, 500, 700, 900K 로 일정하게 유지시키며, 화염 안정성을 조사하였다. 또한 연료 물분율 ($X_{F,o}$) 을 변화 시켜가며, 각각의 온도에서 질소 희석에 따른 부상 화염의 특성변화를 살펴보았다. $T_{co} = 900K$ 의 경우, 순수 프로판 연료에 대하여 $V_{co} = 0.5 \text{ m/s}$ 로 일정할 때 연료 출구 속도 (U_o) 변화에 따른 화염의 형상을 Fig. 3 에 나타내었다. 초기 온도가 900K의 경우에도 상온의 결과와 마찬가지로 연료 출구 속도의 증가에 따라 화염 부상이 일어나고 부상 높이가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.1 화염 부상높이 특성

동축류 온도가 300K 에서 900K 까지 증가함에 따라 각각의 일정한 온도에서 $X_{F,o}$ 를 변화시켜 가며, 연료 출구 속도에 따른 부상높이를 Fig. 4 에 나타내었다. $T_{co} = 900K$ 의 경우, 동축류 속도를 0.5 m/s 로 고정할 때, 화염 날림 영역에서 불안정한 모습을 보인다. 정확한 화염 날림 속도를 측정하기 위하여 동축류 속도를 0.85 m/s 로 변화시켰다. 이 때, 동축류 속도에 의한 부상 높이 변화는 최고 4mm 로, 그 영향이 거의 없음을 확인하였다.

$T_{co} = 300K$ 의 경우 $X_{F,o} = 0.6, 0.7$ 일 때 (점선 표시), 화염 부상이 생긴 후에 부상높이가 제트 속도에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다.

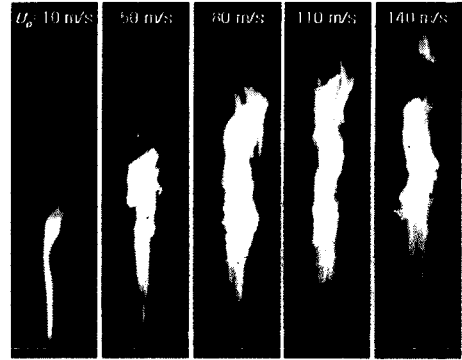


Fig. 3 Direct photo graphs for turbulent lifted flames for $T_{co} = 900K$

이는 천이 영역에서 부상화염이 존재할 경우, jet breakup height 가 제트 속도에 따라 감소하기 때문이다^[1].

난류 부상 화염의 경우 (실선 표시) 각각의 연료 물분율 및 초기 온도가 일정할 때, 출구 속도가 증가할수록 부상높이가 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 또한 일정한 제트 속도에서 초기 온도가 증가함에 따라 부상높이가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 초기 온도가 900K 까지 증가하는 경우에도 화염의 안정화 메커니즘은 상온의 경우와 유사함을 추측할 수 있다.

온도 변화에 따른 부상높이 변화를 자세히 살펴 보기 위해 $U_o = 20, 40, 60 \text{ m/s}$ 일 때, 각각의 제트 속도에서 동축류 온도를 증가시키며 부상높이를 측정하고, 이를 Fig. 5 에 나타내었다. 난류 화염의 부상높이는 초기 온도가 증가함에 따라 비선형적으로 감소하며, 일정 온도 이상에서 노즐에 부착하게 된다. 이는 연료 출구속도가 일정

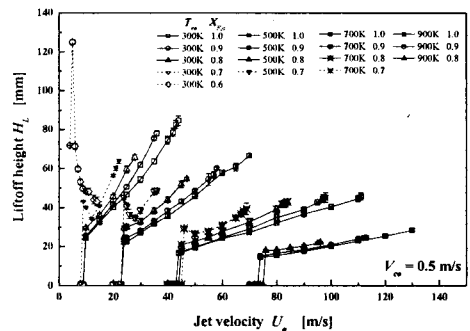


Fig. 4 Liftoff height variation with jet velocity when $T_{co} = 300, 500, 700, 900K$

할 경우, 초기 온도가 증가하면서 층류 연소속도

가 증가하기 때문이다.

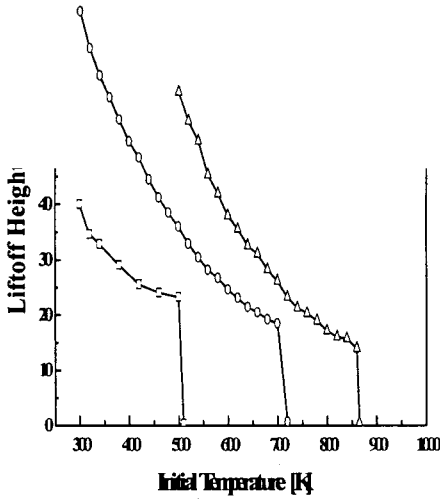


Fig. 5 Liftoff height variation with initial temperature when $U_o = 20, 40, 60$ m/s

3.2 화염 안정화

난류 제트 경계층에서 연료와 공기의 예혼합 영역에서 난류 부상화염은 난류화염 전파속도와 평균 유동속도가 균형을 이루는 점에서 안정화된다. 난류화염 전파속도는 층류화염 연소속도 ($S_L^o|_{st}$) 와 밀접한 관계를 가지며, 화염 안정화 영역에서의 평균 유동속도는 제트 속도, 연료 동점성 계수, 그리고 연료와 공기의 밀도 비에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 난류화염의 부상 높이는 층류화염 연소속도, 제트 속도, 동점성 계수, 밀도비에 의해 결정 될 수 있다^[2].

$X_{F,o}$ 및 T_{∞} 에 따른 층류화염 연소속도는 GRI-3.0 메카니즘을 적용한 1D-Premix code 를 사용해 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 6(a) 에 나타내었다^[10]. 또한 동점성 계수 및 연료와 공기의 밀도비는 Chemkin III 를 통해 계산할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 6(b) 와 같다. 이를 통해 초기 온도 및 연료 몰분율이 증가할수록 층류화염 연소속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 연료 몰분율이 증가함에 따라 동점성 계수는 감소하며, 밀도는 증가한다.

부상 화염이 난류화염 형태로 존재할 때 (Fig. 4 의 실선 데이터), 부상 높이 및 제트 속도를 다음과 같이 무차원화하고 이를 Fig. 7 에 나타내었다.

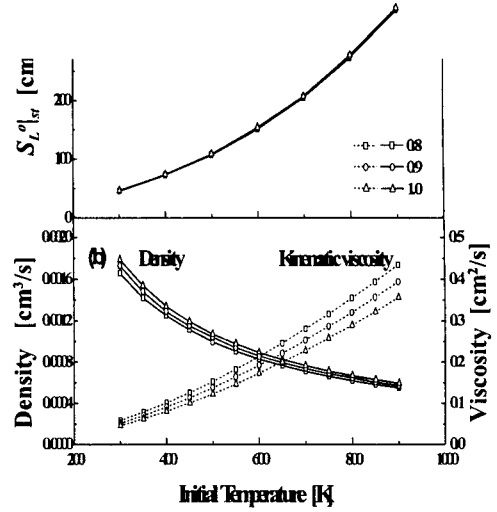


Fig. 6 (a) Stoichiometric laminar burning velocity, (b) Density and kinematic viscosity of C_3H_8 with initial temperature

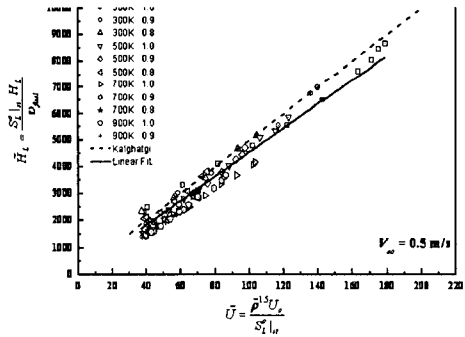


Fig. 7 Dimensionless liftoff height with dimensionless jet velocity for all turbulent lifted flames.

$$\begin{aligned} \tilde{U}_o &= (U_o \tilde{\rho}^{1.5}) / S_L^o|_{st} \\ \tilde{H}_L &= (H_L S_L^o|_{st}) / \nu_{fuel} \end{aligned} \quad (1)$$

무차원화 된 부상높이 (\tilde{U}_o) 는 무차원 속도 (\tilde{H}_L) 에 대해서, 다음과 같은 상관관계를 가지며, 상관 관계 계수는 0.94 이다.

$$(H_L S_L^o |_{st}) / v_{fuel} = 45 \times (U_o \tilde{\rho}^{1.5}) / S_L^o |_{st} \quad (2)$$

기존의 연구 결과 (Kalghatgi, 1984) 와 비교할 때^[2], 상관 관계 함수의 기울기가 각각 50 과 45 로 매우 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 난류 부상화염은 초기 온도가 900K 까지 증가할 경우에도, 초기 온도 조건 및 연료 물분율과 무관하게 난류화염 전파속도와 유동 평균 속도가 균형을 이루는 곳에서 안정화된다.

3.3 화염 부상 및 날림 속도 특성

연료 제트 속도가 증가함에 따라 노즐에서 떨어져 안정적인 부상화염을 이루는 화염 부상속도 (liftoff velocity, U_{LO}) 와 화염이 꺼지는 화염 날림 속도 (blowout velocity, U_{BO}) 에 대해 검토하였다. 노즐 부착화염에서 부상화염으로 변하는

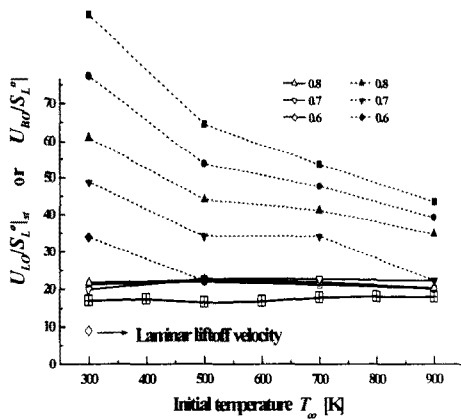


Fig. 8 $U_{LO}/S_L^o|_{st}$, $U_{RA}/S_L^o|_{st}$, and $U_{BO}/S_L^o|_{st}$ variations with initial temperature for fixed $X_{F,o}$.

순간의 속도와 부상화염에서 노즐 부착화염으로 변하는 속도사이에는 hysteresis 가 존재한다^[11]. 이 때, 부상화염에서 노즐 부착화염으로 변하는 순간의 제트 출구 속도를 화염 재부착 속도 (reattachment velocity, U_{RA}) 라 한다.

온도 변화 및 연료 물분율의 변화에 따른 U_{LO} 및 U_{BO} 특성을 살펴보기 위하여, 층류 연소속도를 이용해 U_{LO} 및 U_{BO} 를 무차원화 시키고, 그 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. $U_{LO}/S_L^o|_{st}$ 는 동 층류 온도와 무관하게 대체로 21 의 일정한 값을 갖는다. 같은 직경의 노즐을 사용하는 경우에도 화염부상 속도는 노즐의 두께 및 형상에 의해 차이가 나타날 수 있다^[12]. 화염 재부착 속도의 경우 노즐 두께 및 형상과 무관하게 노즐 직경에 따라 일정한 값을 가지므로, $X_{F,o} = 1$ 에서 온도

변화에 따른 화염 재부착 속도를 측정하고, 그 결과를 Fig. 8 에 함께 나타내었다. $U_{RA}/S_L^o|_{st}$ 는 $U_{LO}/S_L^o|_{st}$ 보다 4 가량 작은 값을 가지며, 온도에 무관하게 대체로 17 로 일정하다. 따라서 난류 부상화염의 경우, U_{RA} 및 U_{LO} 는 초기 온도 및 연료 물분율 변화에 따라 정해지는 층류 연소속도에 비례함을 알 수 있다.

$X_{F,o} = 0.8, 0.9, 1.0$ 일 때, $T_{co} = 900K$ 까지 초기 온도가 증가할수록 $U_{BO}/S_L^o|_{st}$ 는 감소하는 것을 확인할 수 있다. $X_{F,o} = 0.7$ 일 때, $T_{co} = 900K$ 에서 난류 부상화염이 관찰되지 않고 연료 유속의 증가에 따라 화염이 꺼지는 현상 (blowoff) 이 관찰되었다. Figure 8 에서 볼 수 있듯이 초기 온도가 증가하고, 연료 물분율이 감소할수록 난류 부상화염이 존재할 수 있는 $U_o/S_L^o|_{st}$ 의 범위는 좁아진다.

다양한 탄화수소 계열 연료에 대하여 화염 날림 속도가 다음과 같은 관계를 가지고 있음이 실험적으로 밝혀진 바 있다^[6].

$$U_{BO} = \frac{1}{\epsilon} d_o S_L^o \Psi^2 (\rho_o / \rho_\infty)^{0.5} / \alpha \quad (3)$$

이 때, ϵ 은 다양한 연료에 대해서 평균적으로 4.8 의 상수값을 가지며, 열전달 계수는 단일화염 온도에서의 값으로 간주하여 일정하다고 가정하였다.

$T_{co} = 300, 500, 700, 900K$ 일 때, 각각의 온도에서 연료 물분율을 1.0 에서 0.1 간격으로 감소 시켜가며 화염날림 속도를 측정하고, 이를 기존 연구 결과 (Broadwell, 1984) 를 바탕으로 Fig. 9 와 같이 나타내었다. 단일 화염온도에서의 열확산 계수를 사용한 결과는 (open symbol) $T_{co} = 300K$ 의 결과를 제외한 다른 온도 영역에서 기존 연구 결과와 많은 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서는 열전달 계수를 초기 온도 조건에서의 값으로 가정하고, 그 결과를 solid symbol 로 나타내었다. 화염날림 속도는 초기 온도 및 연료 물분율의 변화에 따라 0.99 의 상관 계수를 가지는 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있다.

$$U_{BO} = 0.093 \times [d_o S_L^o |_{st}^2 \Psi^2 (\frac{\rho_F}{\rho_{air}})^{1/2} / \alpha]^{0.63} \quad (4)$$

이는 Fig. 10 과 같이 열전달 계수가 일정한 온도에서 $X_{F,o}$ 에 따라 큰 변화가 없지만, 초기 온도가 증가함에 따라 큰 차이를 나타내기 때문이다. 그러므로 화염 날림속도의 상관 관계식에서 열전달 계수는 초기 조건에서의 값으로 하는 것이 바람직하다.

4. 결론

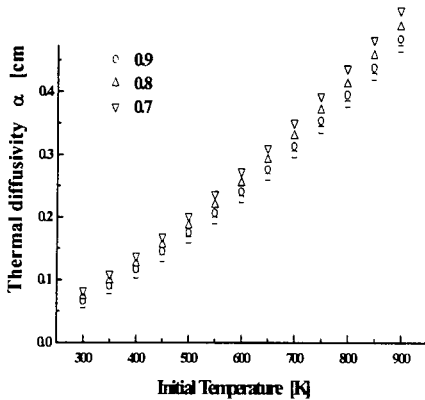


Fig. 10 Calculated thermal diffusivity using chemkin III with initial temperature variation when $X_{F,0} = 0.7, 0.8, 0.9,$ and 1.0

프로판올 연료로 하는 동축류 제트에서 동축류 공기의 온도를 변화시켜가며, 초기 온도 및 연료 물분을 변화에 따른 난류 부상화염의 특성을 살펴보았다.

초기 온도가 900K 까지 증가할 때, 온도가 일정할 경우 난류 화염의 부상 높이는 제트 속도에 따라 선형적으로 증가함을 확인 할 수 있다. 또한 일정한 연료 출구 속도에서 부상 높이가 온도 증가에 따라 비선형적으로 감소함을 확인하였다.

무차원 부상 높이 (\mathcal{U}_0) 는 무차원 부상 속도 (\mathcal{H}_L) 와 초기 온도 및 연료 물분율에 무관하게 좋은 상관 관계를 가지며, 기존의 상온에서 수행된 연구 결과와 잘 일치한다. 따라서 $T_{co} = 900K$ 까지 변할 때, 난류 부상화염은 상온의 경우와 마찬가지로 난류화염 전파속도가 평균 유동 속도와 같은 곳에서 안정화를 이룬다.

층류화염 연소속도로 무차원화 된 화염부상 속도 및 화염재부착 속도는 대략적으로 각각 21, 17의 일정한 값을 갖는다. 그러므로 난류화염에서 화염부상 속도 및 화염 재부착 속도는 층류화염 연소속도에 비례하여 증가한다.

초기 온도가 증가하고, 연료 물분율이 감소할수록 난류 부상 화염이 존재할 수 있는 U_{st}/S_L^0 영역은 감소한다. 또한 온도 및 연료 물분율 변화에 따른 화염날림 속도를 살펴본 결과, U_{BO} 는 T_{co} 및 $X_{F,0}$ 를 고려한 열전달 계수를 사용할 때, 기존 연구에서 사용된 변수와 좋은 상관 관계를 가질 수 있었다.

후 기

이 연구는 연소기술센터 (CERC) 와 서울대 기계항공공학부 BK-21 에 의하여 지원되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] B. J. Kim, J. S. Kim, and S. H. Chung, "Effect of dilution on the liftoff of non-premixed jet flames", *26th Proc. Combust. Inst.*, 1175-1181 (1994)
- [2] Gautam T. Kalghatgi, "Lift-off height and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air", *Combust. Sci. Technol.*, 41:17-29 (1984)
- [3] R. W. Schefer, and P. J. Goix, "Mechanism of flame stabilization in turbulent, lifted-jet flames", *Combust. Flame*, 112:559-574 (1998)
- [4] Gunnar Heskestad, "Turbulent jet diffusion flames: consolidation of flame height data", *Combust. Flame*, 118:51-60 (1999)
- [5] Christopher J. Montgomery, Carolyn R. Kaplan, and Elaine S. Oran, "The effect of coflow velocity on a lifted methane-air jet diffusion flame", *27th Proc. Combust. Inst.*, 1175-1182 (1998)
- [6] James E. Broadwell, Werner J. A. Dahm, and M. Godfrey. Mungal, "Blowout of turbulent diffusion flames", *20th Proc. Combust. Inst.*, 303-310 (1984)
- [7] Masashi Katsuki and Toshiaki Hasegawa, "The science and technology of combustion in highly preheated air", *27th Proc. Combust. Inst.*, 3135-3146 (1998)
- [8] Toshiro Fujimori, Dirk Riechelmann, and Jun'ichi Sato, "Effect of liftoff on NOx emission of turbulent jet flame in high-temperature coflowing air", *27th Proc. Combust. Inst.*, 1149-1155 (1998)
- [9] Tobias Plessing, Norbert Peters, and Joachim G. Wunning, "Laseroptical investigation of highly preheated combustion with strong exhaust gas recirculation", *27th Proc. Combust. Inst.*, 3197-3204 (1998)
- [10] Smooke, M. D., "Solutions of Burner - Stabilized Boundary Value Methods", *J. of Comput. Phys.*, 48:72-105 (1982)
- [11] J. Lee and S. H. Chung, "Characteristics of reattachment and blowout of laminar lifted flames in partially premixed propane jets", *Combust. Flame* 127:2194-2204 (2001)
- [12] S. H. Park, S. H. Won, M. S. Cha, and S. H. Chung, "프로판 동축류 확산 화염에서 화염 부상과 재부착에 관한 실험적 연구", *23회 KOSCO Symposium 논문집*, 119-124