

초기 온도 변화를 갖는 동축류 제트에서 메탄 난류 부상화염의 특성

최 병 철* · 정 석 호†

(2008년 9월 30일 접수, 2008년 11월 5일 수정, 2008년 11월 14일 심사완료)

Characteristics of Methane Turbulent Lifted Flames in Coflow Jets with Initial Temperature Variation

Byung Chul Choi and Suk Ho Chung

Key Words : Methane(메탄), Turbulent(난류), Lifted Flame(부상화염), Coflow Jet(동축류 제트), Initial Temperature(초기 온도).

Abstract

Characteristics of methane turbulent non-premixed flame have been studied experimentally in coflow jets with initial temperature variation. The results showed that the premixed flame model and the large-scale mixing model for turbulent flame stabilization were effective for methane fuel considered initial temperature variation. Especially, the premixed flame model has been improved by considering nitrogen dilution for the liftoff height of turbulent lifted flame. In estimating blowout velocity and the liftoff height at blowout with the premixed flame model and the large-scale mixing model, the two turbulent models were excellently correlated by considering the effect of physical properties and buoyancy for the initial temperature variation.

기호설명

$X_{F,0}$: 노즐출구에서 연료몰분율
 $Y_{F,0}$: 노즐출구에서 연료질량분율
 $Y_{F,st}$: 노즐출구에서 이론공연비의 연료질량분율
 X_{st} : 평균연료농도가 이론공연비를 만족시키는
 축방향거리 [cm]
 ψ : 이론공연비
 H_L : 부상화염 높이 [cm]
 H_{BO} : 화염날림 직전의 부상높이 [cm]
 U_0 : 노즐출구에서의 평균 제트속도 [m/s]
 U_{BO} : 화염날림 시의 평균 제트속도 [m/s]

U_{LO} : 화염부상 시의 평균 제트속도 [m/s]
 U_{RA} : 화염재부착 평균제트속도 [m/s]
 $S_L^0|_{st}$: 이론공연비 층류화염 전파속도 [m/s]
 $\nu_{F,0}$: 초기 온도에 대한 연료동점성도 [cm²/s]
 $\alpha_{st,0}$: 초기 온도에 대한 이론공연비에서의 열적
 확산도 [cm²/s]
 V_{CO} : 동축류 공기의 속도 [m/s]
 $\tilde{\rho}$: 초기 온도에 대한 연료 혼합기밀도 (ρ_F)
 와 동축류 공기밀도(ρ_{Air})의 비 $\left(\frac{\rho_F}{\rho_{Air}}\right)$
 ΔT : 기연가스와 미연가스의 온도차이 [K]
 T_0 : 초기 온도 [K]
 d_0 : 노즐직경 [cm]

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
 E-mail : shchung@snu.ac.kr
 TEL : (02)880-7114 FAX : (02)883-0179

* 서울대학교 대학원

^ : Large-scale Mixing Model에 관한 무차원
 기호
 ~ : Premixed Flame Model에 관한 무차원 기호

1. 서론

난류 부상화염의 높이는 제트속도에 비례하여 선형적으로 증가하는 화염 안정화 특성을 갖는다. 이는 제트속도에 따라 비선형적인 특성을 갖는 층류 부상화염과 구별된다. 특히, 난류 비예혼합 제트에서의 화염 안정화 특성에 관하여 다양한 이론들이 경쟁을 이루고 있다. 그 중에서도 Premixed Flame Model과 Large-scale Mixing Model이 난류화염의 안정화 및 화염날림 예측에 여전히 유효하게 적용되고 있다.

난류 부상화염의 선단은 예혼합 상태이고 평균 유동속도와 평균 난류화염 전파속도가 균형을 이루고 있다는 이론인 Premixed Flame Model은 Vanquickenborn과 Van Tiggelen에 의해서 제안되었다.⁽¹⁾ 그 이후에도 국부적인 평균 유동 속도와 국부적인 난류화염 전파속도가 일치하는 부분에서 난류 부상화염이 안정화된다는 가정을 기초로 수소, 메탄, 프로판 그리고 에틸렌과 같은 다양한 연료에 대하여 Kalghatgi에 의해서 그 특성들이 연구되었다.⁽²⁾

한편, Broadwell은 난류 부상화염에 대하여 기연가스가 미연의 반응물 방향으로 재유입에 의해 발생하는 혼합시간과 화학반응의 시간 비로부터 화염날림을 예측하였다. 그러나 이 이론은 부상화염의 선형적인 높이 예측에는 모순이 있었다.^(3,4) 그래서 Miake-lye와 Hammer는 Large Scale Dynamics를 도입하여 이론공연비 선 상에 부과된 스트레인이 임계 스트레인에 도달할 때까지 화염은 존재한다는 Large-scale Mixing Model로부터 제트속도에 대한 부상화염의 높이를 성공적으로 예측할 수 있었다.⁽⁵⁾

최근 Kim과 Chung은 프로판 연료에 질소 희석을 시키면서 동축류 공기의 온도를 900 K까지 가변 되는 조건에서 층류 및 난류 화염에 대해서 부상화염의 높이와 화염 날림의 특성들을 연구하였다. 특히, 프로판의 난류 부상화염에 대해서는 Premixed Flame Model과 Large-scale Mixing Model을 각각 적용하여 해석하였다. 그 결과들은 초기 온도 조건에 해당하는 물성치들을 적용하고, 특히 Large-scale Mixing Model에서 열적확산도를 기연가스의 온도 대신에 초기 온도에 대한 값으로 수정할 때에 부상화염의 높이 예측이 개선됨을 보여주었다. 그리고 초기 온도 변화에 따른 기연 가스의 온도와 초기 온도와의 차이에 의한 부력 효과를 두 Model에 적용하여 화염날림을 성공적으로 예측하였다.^(6,7)

본 연구는 앞선 난류제트의 이론들을 토대로 하는 확장적인 연구로, 실용 연소기에서 청정연료로써 활용도가 높은 메탄 연료에 질소를 희석시키면서 가변 되는 초기 온도에 대한 난류 부상화염의 특성들을 실험적으로 살펴보았다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 Fig. 1과 같이 동축류 버너, 유량조절부 그리고 온도제어부로 구성하였다. 동축류공기는 일정한 듀티비의 오픈루프 형태로 제어되는 2.5 kW실린더형 히터를 통하여 예열된 후에 버너에 공급된다. 그리고 실험에 필요한 고온의 동축류를 얻기 위하여 버너의 동축류 출구에서 현재의 온도를 피드백 받아서 일정한 온도로 제어되는 7.5 kW의 히터를 버너와 일체형으로 구축하였다. 그 히터는 AC 220 V 단상으로 구동되고 주변은 원통형의 세라믹 재질로 단열되어 있다. 연료노즐은 관내 완전 발달된 유동장을 얻기 위하여 내경 3.76 mm, 길이 75 cm의 스텐레스 스틸관을 사용하였으며, 동축류를 구성하는 외부관은 외경 130 mm, t = 4 mm를 갖는다. 연료는 99.95 %의 순도를 갖는 메탄을 사용하였으며, 희석제로는 질소를 사용하였다. 연료, 희석제 및 동축류 공기의 유량은 질량 유량계를 통하여 제어하였다. 버너부에서는 균일한 속도장 및 온도장을 가지는 동축류를 얻기 위하여 1 mm메탈화이버 매트, 세라믹 비드 그리고 세라믹 하니콤을 사용하였다. 또한 버너에서 배출되는 고온 동축류의 열손실을 최소화하면서 유동장 및 화염의 안정성을 유지하기 위하여 세라믹 단열재 및 파이렉스 튜브를 사용하였다.

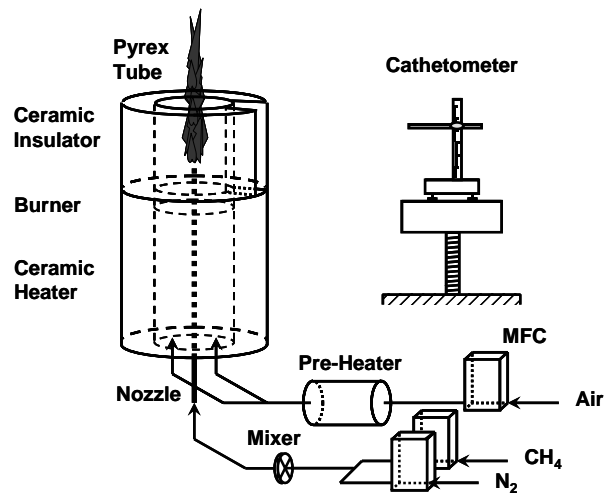


Fig. 1 Experimental setup

한편, 동축류 공기의 온도 측정을 위하여 K형 열전대를 사용하였으며, 실험을 위한 동축류 온도의 기준위치는 초기 온도 변화에 따라 가변 되는 노즐길이를 고려하여 연료노즐 끝점에서 측정을 하였으며 실험하는 과정 동안에 최대 ±1 K의 오차를 보였다. 그리고 버너에서 배출되는 동축류 공기의 반경방향의 온도는 ±2 K의 오차를 가졌고, 축방향 온도는 화염날림이 발생하는 직전 부상화염 선단의 위치에서 최대 -20 K (@ $T_0 = 700$ K)의 열손실에 의한 온도구배를 가졌다. 그리고 동축류 공기와 노즐 연료의 온도차이는 모든 실험 조건에서 최대 10 K편차를 보였다. 이와 같이 열손실을 최소화한 결과로 난류화염의 높이가 제트속도에 대하여 선형적으로 증가함을 확인하였다. 또한 버너 출구에서 연료의 온도와 동축류 공기의 온도는 같다는 가정 하에서 온도변화에 따른 밀도 차이를 고려하여 각각의 속도를 조절할 수 있었다. 그리고 동축류 속도에 대한 부상화염의 높이 변화를 배제하기 위하여 모든 초기 온도의 경우에서 그 속도를 0.4 m/s로 고정하여 실험하였다. 그리고 난류 부상화염의 높이를 측정하기 위하여 디지털 카세토미터를 이용하였고, Nikon 디지털 카메라 D-100을 이용하여 화염의 직접사진을 획득하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 난류 부상화염의 거동

층류 부상화염은 제트속도에 따라 비선형적으로 부상높이가 증가하지만, 난류 부상화염은 제트속도의 증가에 따라 그 높이가 선형적으로 증가(Fig. 2 (d)→(e))하며, 층류에서 난류로의 천이 구간에서는 부상화염의 높이가 제트속도의 증가에 따라 감소(Fig. 2 (c)→(d))하는 특성을 갖는다. 그리고 노즐로부터 난류 에디가 나타나기 시작하는 지점까지의 높이차인 breakup length를 가지는 부착화염(Fig. 2(b))과 부상화염(Fig. 2(c))이 부상화염의 히스테리시스 영역에서 확인되었다.⁽⁸⁾

Fig. 3은 질소 희석에 의한 메탄 연료물분율과 동축류 공기의 초기 온도를 가변 시켰을 때, 제트속도에 따라 측정된 부상화염의 높이를 나타낸다. 700 K 이후로는 breakup length가 거의 나타나지않았고 난류영역에서의 부상화염 높이는 모두 선형적인 특성을 보였다.

3.2 난류 부상화염 높이에측

난류 부상화염은 화염 선단의 농도장에서 Large-scale 스트레인에 의해서 안정화가 결정된다고 할 수 있다. 화염을 유지하기 위해서는 화염이 소멸

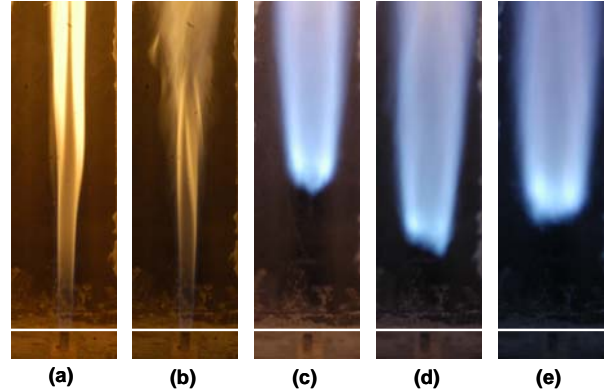


Fig. 2 Behavior of turbulent lifted flames at $T_0 = 600$ K, $X_{F,0} = 0.74$, $V_{CO} = 0.4$ m/s ; (a) $U_{RA} = 27$ m/s, $Re = 1766$, (b, c) $U_0 = 37$ m/s, $Re = 2420$, (d) $U_{LO} = 42$ m/s, $Re = 2747$, (e) $U_0 = 48$ m/s, $Re = 3139$

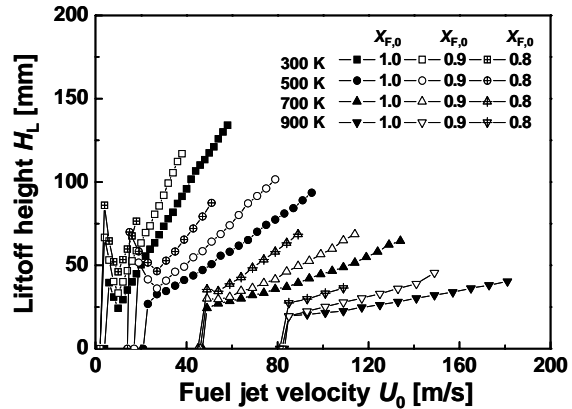


Fig. 3 Height of turbulent lifted flame as jet velocity

되는 방향으로 작용하는 스트레인에 대해서 화학 반응율이 그 임계 스트레인을 극복해야 한다. 당량비 1 근처에서 최대값을 갖는 화학반응율에서 화학반응 특성시간 $t_c \sim 1/(\alpha_{st}/S_{L,st}^0)^2$ 의 역수로 임계 스트레인을 나타내었다.⁽³⁾ 이때의 열적확산도는 기연가스의 재유입 효과를 고려하여 기연가스의 온도를 기준한 것이다. 따라서 Large-scale Mixing Model을 적용한 무차원화된 부상높이와 제트속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$H_L = 14 \frac{\alpha_{st,b}}{S_{L,st}^0} \frac{Y_{F,st}}{Y_{F,0}} U_0 \quad (1)$$

따라서 Large-scale Mixing Model을 적용한 무차원화된 부상높이와 제트속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{H}_L = \frac{H_L S_{L,st}^0}{\alpha_{st,b}}, \quad \hat{U}_0 = \frac{U_0}{S_{L,st}^0} \frac{Y_{F,st}}{Y_{F,0}} \quad (2)$$

Fig. 4는 식 (2)를 이용하여 예측한 부상높이는 각 초기온도에 대하여 Large-scale Mixing Model에

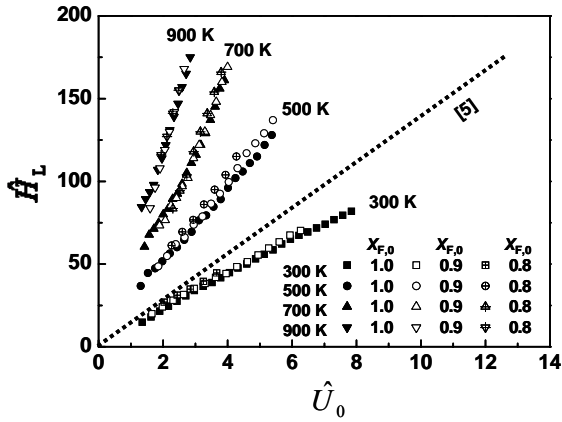


Fig. 4 H_L based on large-scale mixing model of $\alpha_{st,b}$

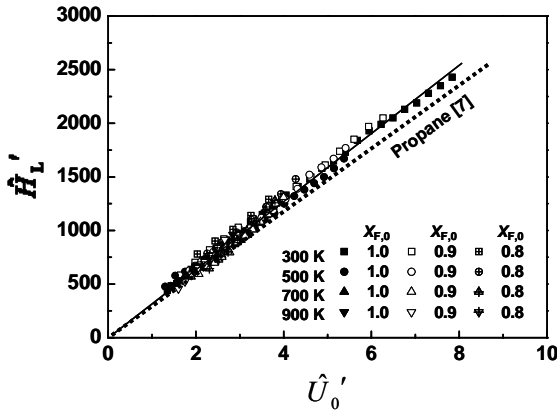


Fig. 5 H_L based on large-scale mixing model of $\alpha_{st,0}$

대하여 상당히 이탈되어 있는 것을 확인하였다.

최근에 보고된 바와 같이 Large-scale Mixing Model의 열적확산도는 미연가스의 초기 온도에 대한 $\alpha_{st,0}$ 가 적합한 것으로 판정되었다.⁽⁷⁾ 따라서 무차원화된 부상높이와 제트속도는 다음의 식 (3)과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\hat{H}'_L = \frac{H_L S_{L,st}^0}{\alpha_{st,0}}, \quad \hat{U}'_0 = \frac{U_0}{S_{L,st}^0} \frac{Y_{F,st}}{Y_{F,0}} \quad (3)$$

Fig. 3과 같은 다양한 초기 온도와 연료몰분율에 대한 난류 부상화염의 높이 값들에 식 (3)과 같은 Large-scale Mixing Model을 적용하면, Fig. 5와 같이 나타내어지고, 식 (4)와 같은 선형적인 상관관계를 확인할 수 있다.

$$\hat{H}'_L = 321.26 \times \hat{U}'_0, \quad R = 0.99 \quad (4)$$

메탄의 난류 부상화염의 높이를 예측하는데 있어서, Large-scale Mixing Model의 열적확산도는 기연가스의 온도가 아닌 미연가스의 초기 온도

에서 역 평가되어야 하는 것을 확인하였다. 이는 기연가스의 재유입에 의한 혼합 특성보다 미연가스 상단에서의 혼합 특성이 메탄 난류 부상화염의 높이를 결정하는 데에도 중요하게 작용되는 것을 의미한다.⁽⁷⁾

한편, 난류 부상화염은 난류 제트의 경계층을 이루는 연료와 공기의 예혼합 영역에서 난류화염 전파속도와 평균 유동속도가 균형을 이루는 곳에서 안정화된다고 할 수 있다. 그리고 난류화염 전파속도가 최대가 되는 지점 즉, 난류 부상화염의 높이가 최소가 되는 지점에서의 난류화염 전파속도가 층류화염 전파속도와 같다고 가정하고 있다.⁽²⁾ 따라서, Premixed Flame Model을 적용한 무차원화된 부상높이와 제트속도는 다음과 같다.^(2,7)

$$\tilde{H}_L = \frac{H_L S_{L,st}^0}{\nu_{F,0}}, \quad \tilde{U}_0 = \frac{U_0}{S_{L,st}^0} \tilde{\rho}^{1.5} \quad (5)$$

이때 층류화염 전파속도는 GRI-3.0을 적용한 1D-Premix 코드⁽⁹⁾를 이용하여 계산하였다. 마찬가지로, Fig. 3의 난류 부상화염의 높이들에 Premixed Flame Model을 적용하여 보면 Fig. 6과 같이 연료몰분율에 대하여 다음의 식 (6)-(8)과 같은 결과를 얻었다.

$$X_{F,0} = 1.0 \rightarrow \tilde{H}_L = 53.28 \times \tilde{U}_0, \quad R = 0.99 \quad (6)$$

$$X_{F,0} = 0.9 \rightarrow \tilde{H}_L = 58.45 \times \tilde{U}_0, \quad R = 0.99 \quad (7)$$

$$X_{F,0} = 0.8 \rightarrow \tilde{H}_L = 65.25 \times \tilde{U}_0, \quad R = 0.96 \quad (8)$$

상온에서 $X_{F,0} = 1.0$ 의 다양한 연료에 대하여 약50의 기울기 값을 갖는 이전 Kalghatgi의 실험결과⁽²⁾들은 희석 효과를 적용하지 않은 모델이기 때문에, 본 실험에서는 연료몰분율에 대하여 기울기 값이 차이가 발생하였다. 이러한 질소희석에 대한 연료농도의 영향을 고려하여 식 (5)를 아래와 같이 나타내었다.

$$\tilde{H}'_L = \frac{H_L S_{L,st}^0}{\nu_{F,0}}, \quad \tilde{U}'_0 = \frac{U_0}{S_{L,st}^0} \tilde{\rho}^{1.5} / Y_{F,0} \quad (9)$$

다양한 연료몰분율에 대한 부상높이는 희석 효과를 고려하여 수정된 식 (9)을 적용하면 Fig. 7 및 식 (10)과 같은 상관관계를 갖는다.

$$\tilde{H}'_L = 50.48 \times \tilde{U}'_0, \quad R = 0.98 \quad (10)$$

초기 온도에 따른 난류 부상화염의 높이는 Large-scale Mixing Model과 Premixed Flame Model에 의해서 메탄연료에 대해서도 잘 예측되는 것을 검증하였고, 특히 Premixed Flame Model을 통해서 메탄의 난류 부상화염의 높이를 예측하기 위해서는 질소 희석 효과를 고려해야지 보다 정확한 난류 부상화염의 높이를 예측 가능한

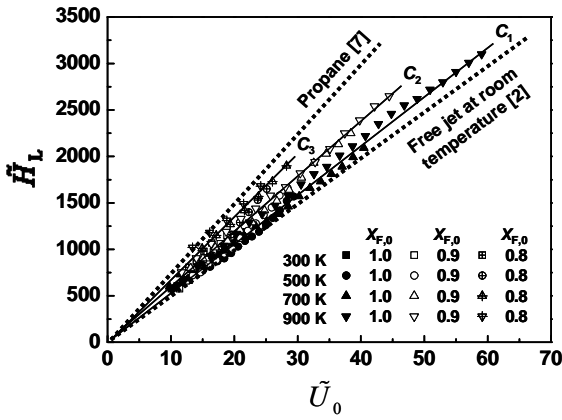


Fig. 6 H_L based on premixed flame model

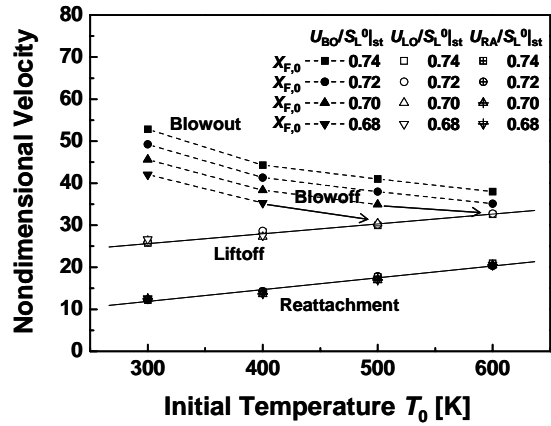


Fig. 8 Critical velocities

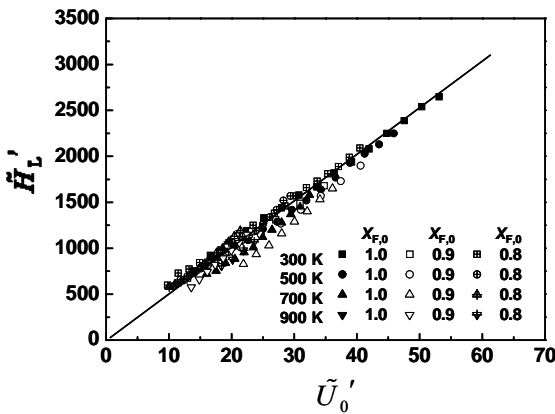


Fig. 7 H_L considered $Y_{F,0}$ based on premixed flame model

것을 확인하였다.

3.3 임계 속도

제트속도를 증가함에 따라, 노즐에 부착된 화염이 부상(Liftoff)되는 제트속도인 U_{LO} 를 갖게 되고 부상된 화염의 높이는 점차 증가하다가 결국 화염날림(Blowout)이 발생하는 제트속도인 U_{BO} 를 갖는다. 때로는 제트속도의 증가에 따라, 노즐에 부착된 화염이 부상되어 안정화되지 못하고 바로 화염날림(Blowoff)이 발생하는 U_{BF} 갖기도 한다. 게다가 부상된 화염에서 제트속도를 점차적으로 줄이면, 재부착(Reattachment)되는 화염이 발생하는 U_{RA} 를 갖고, 재부착 화염과 부상화염은 히스테리시스 구간을 갖는다. 그리고 층류의 속도장과 농도장의 경우에는 가상원점을 적용한 제트에 대한 상사해를 이용함으로써, 이들 임계

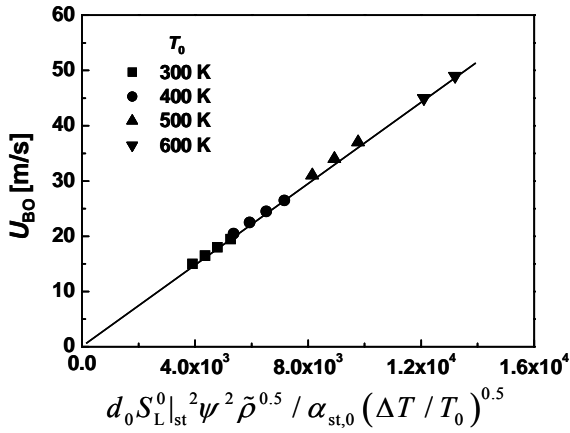
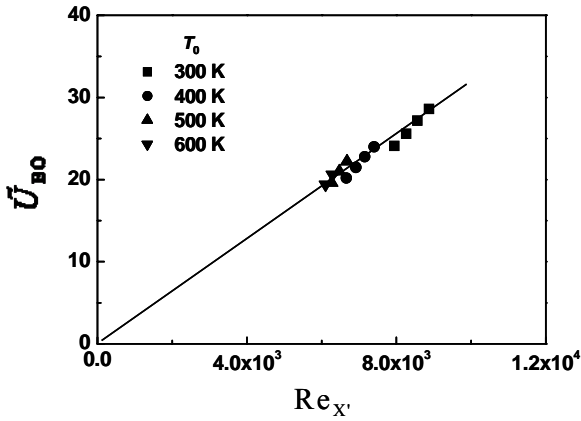
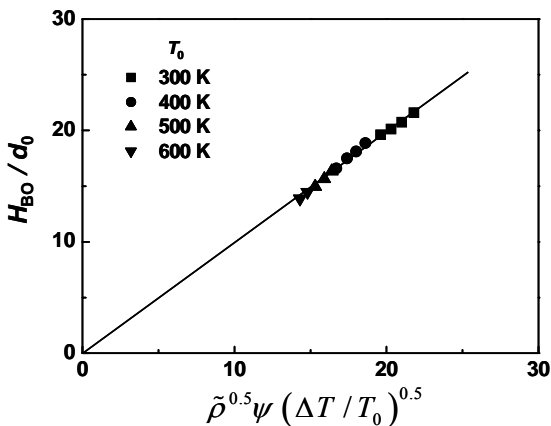
속도들은 제트속도와 층류화염 전파속도의 밸런스 메커니즘, 연료질량분율, 축방향의 거리, 그리고 노즐직경에 관한 함수로 해석될 수 있다.⁽¹⁰⁾

초기 온도 변화와 연료몰분율의 변화에 따른 임계속도의 측정에서, Fig. 8과 같이 $0.65 < X_{F,0} < 0.75$ 부근에서 600 K이하의 초기 온도 조건에서 화염날림을 관찰할 수 있었다. 약 $X_{F,0} > 0.8$ 경우에서는 모든 초기 온도 조건에서 화염날림이 발생하기 이전에 제트속도가 제한되었다. 이는 본 실험에서 채택된 연료공급 압력과 노즐 직경으로는 연료유량을 그 이상 증가시킬 수 없었기 때문이다. 또한 700 K 이상의 초기 온도에서 노즐에 부착된 화염은 제트속도를 증가시키면 바로 화염날림(Blowoff)이 발생하였고 부상화염 이후의 화염날림(Blowout) 현상이 나타나지 않았다.

프로판에 질소를 희석한 연료의 경우에서, 난류영역에서 U_{LO} 와 U_{RA} 는 층류화염 전파속도에 대하여 거의 일정한 값을 갖는다고 확인 되었다.⁽⁷⁾ 그러나 본 실험에서는 Fig. 8과 같은 초기 온도에 대하여 $U_{LO}/S_L^{0.1st}$ 와 $U_{RA}/S_L^{0.1st}$ 는 약간 선형적으로 증가하는 특성을 보였다. U_{RA} 는 $987 < Re < 1724$ 인 층류영역에, U_{LO} 는 $2084 < Re < 2751$ 인 천이 영역에 각각 있었기 때문에 난류영역의 이전 결과와는 구별된다. 그러나, U_{BO} 는 $2718 < Re < 4265$ 의 난류영역에서 나타났으며 자세한 분석을 아래에서 다루겠다.

3.4 화염날림 속도예측

U_{BO} 은 화학적 시간과(t_c) 재유입되는 공기와 제트유동 간의 혼합되는 시간($t_d \sim d/U_0$)의 비로 표현되는 임계값을 통하여 예측될 수 있다.⁽³⁾ 그리고 초기 온도의 변화에 대하여 열적확산도

Fig. 9 U_{BO} based on large-scale mixing modelFig. 10 U_{BO} based on premixed flame modelFig. 11 H_{BO} based on large-scale mixing model

와 Froude number $Fr_f \sim 1/(\Delta T/T_0)^{0.5}$ 로 표현되는 부력을 적용하면 U_{BO} 는 아래의 식 (11)와 같이 예측된다.⁽⁷⁾ 따라서 Fig. 8의 메탄에 대한 U_{BO}

값들을 이러한 Large-scale Mixing Model을 적용하면 Fig. 9과 같이 표현되고, 여기서, $C_1 = 0.0038$, $R = 0.99$ 이다.

$$U_{BO} = C_1 \times \left[d_0 S_{L|st}^0 \psi^2 \tilde{\rho}^{0.5} / \alpha_{st,0} (\Delta T / T_0)^{0.5} \right] \quad (11)$$

평균 연료농도가 제트의 중심선을 따라 이론공연비 이하로 떨어지는 지점의 축방향 거리를 X_{st} 라고 한다. 이때, 가상원점을 고려하고 미연가스와 기연가스의 밀도차이에 의한 유동 재유입에 의한 효과를 반영한 X_{st} 는 식 (12)과 같다. 그리고 H_{BO} 에 초기 온도 변화에 대한 부력의 영향을 반영한 것이 식 (13)이다. 부상화염의 높이가 X_{st} 에 도달하면 화염날림이 발생한다는 Premixed Flame Model은 식 (14)와 같이 표시된다.^(7,11,12)

$$X_{st} = \left(4 \frac{Y_{F,0}}{Y_{F,st}} \tilde{\rho}^{0.5} + 5.8 \right) d_0 \quad (12)$$

$$X_{st}' = X_{st} (\Delta T / T_0)^{0.5} \quad (13)$$

$$\tilde{U}_{BO} = \frac{U_{BO}}{S_{L|st}^0} \tilde{\rho}^{1.5}, \quad Re_x = \frac{X_{st}' S_{L|st}^0}{\nu_{F,0}} \quad (14)$$

마찬가지로, Fig. 8의 U_{BO} 값들을 식 (14)을 적용하면 Fig. 10와 같이 식 (15)의 상관관계를 갖는다.

$$\tilde{U}_{BO} = 0.0032 \times Re_x, \quad R = 0.99 \quad (15)$$

3.5 화염날림 시 부상화염 높이에측 노출직경에 무차원화된 화염날림 직전의 부상화염의 높이는 연료혼합기와 공기의 밀도비와 이론공연비에 따라 선형적인 특성을 갖는다고 할 수 있다. 여기서 초기 온도에 따라 가변 되는 그 밀도비와 부력의 영향을 보정함으로써 Large-scale Mixing Model에 의한 U_{BO} 는 다음과 같은 식으로 예측 가능하다.^(3,7,13)

$$H_{BO} / d_0 = C_1 \times \tilde{\rho}^{0.5} \psi (\Delta T / T_0)^{0.5} \quad (16)$$

따라서, 메탄에 대한 화염날림 직전의 난류 부상화염의 높이에 대한 실험 결과값들은 식 (16)에 의하여 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있고, 여기서, $C_1 = 0.99$, $R = 0.99$ 이다.

4. 결 론

청정연료로써 실용 연소기기에서 활용도가 급증하고 있는 메탄을 연료로 하여, 동축류 제트에서 초기 온도의 가변에 따른 난류 부상화염 특성들을 Large-scale Mixing Model과 Premixed Flame Model을

토대로 하여 실험적으로 연구하였다.

메탄의 난류 부상화염의 높이는 최근에 보고된 바와 같이 Large-scale Mixing Model에서 기연가스온도의 열적확산도 (a_{stb}) 대신에 미연가스온도의 열적확산도 (a_{st0})에 의해서 잘 예측될 수 있었다. 그리고, Premixed Flame Model에 의한 난류 부상높이는 질소희석에 의한 연료농도 Y_{F0} 의 변화를 고려해야 보다 정확한 예측이 가능한 것을 확인하였다.

화염날림 직전의 높이 및 화염날림의 속도들은 초기 온도 변화에 대한 물성치와 부력의 영향을 고려한 기존의 Large-scale Mixing Model과 Premixed Flame Model에 의한 결과들과 일치하였다.

후 기

본 연구는 Oxy-Fuel Combustion R&D Organization (OCRO)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Vanquickenborne, L. and van Tigglen, A., 1983, "The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames," *Combust. Flame* 10, pp. 59~69.
- (2) Kalghatgi, G.T., 1984, "Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air," *Combust. Sci. Technol.* Vol. 41, pp. 17~29.
- (3) Broadwell, J.E., Dahm, W.J.A. and Mungal, M. G., 1984, "Blowout of Turbulent Diffusion Flames," *Proc. Combust. Inst.* 20, pp. 303~310.
- (4) Dahm, W.J.A. and Dibble, R.W., 1988, "Coflowing Turbulent Jet Diffusion Flame Blowout," *Proc. Combust. Inst.* 22, pp. 801~808.
- (5) Miake-Lye, R. C. and Hammer, J. A., 1988, "Lifted Turbulent Jet Flames: A Stability Criterion Based on the Jet Large-Scale Structure," *Proc. Combust. Inst.* 22, pp. 817~824.
- (6) Kim, K.N., Won, S.H. and Chung, S.H., 2005, "Laminar Lifted Flame in Coflow Jet with Initial Temperature Variations," *Proceedings of the KSME 2005 spring annual meeting*, pp. 1895~1900.
- (7) Kim, K.N., Won, S.H. and Chung, S.H., 2006, "Characteristics of Turbulent Lifted Flames in Coflow Jets with Initial Temperature Variation," *Proc. Combust. Inst.* 31, pp. 1591~1598.
- (8) Lee, B.J., Kim, J.S. and Chung, S.H., 1994, "Effect of Dilution on the Liftoff of Nonpremixed Jet Flames," *Proc. Combust. Inst.* 25, pp. 1175~1181.
- (9) Smith, G.P., Golden, D.M., Frenklach, M., Moriarty, N.W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C.T., Hanson, R.K., Song, S., Gardiner, W.C., Lissianski, V.V. and Qin, Z., http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- (10) Lee, J. and Chung, S.H., 2001, "Characteristics of Reattachment and Blowout of Laminar Lifted Flames in Partially Premixed Propane Jets," *Combust. Flame* 127, pp. 2194~2204.
- (11) Kalghatgi, G.T., 1981, "Blow-Out Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames. Part 1: in Still Air," *Combust. Sci. Technol.* Vol. 26, pp. 233~239.
- (12) Birch, A.D., Browun, D.R., Dodson, M.G. and Thomas, J.R. 1978, "The Turbulent Concentration Field of a Methane Jet," *J. Fluid Mech.* 88(3) , pp. 431~449.
- (13) Cha, M. S., "A Study on the Laminar and Turbulent Lifted Flames in Jets," Ph.D. Thesis, Seoul National University, 1999.