

동축류 제트에서 초기 온도 변화에 따른 메탄 난류 부상화염 특성

최병철[†] · 정석호^{*}

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 turbulent lifted flames in coflow jets with the varying initial temperature have recently been investigated about only propane case diluted by nitrogen. The investigation has firstly improved a premixed flame model and a large scale mixing model among competing theories on the stabilization mechanism of turbulent flame to be suitable for a high temperature condition. In this research, about methane with good availability to apply for a practical combustor as clean fuel, its characteristics of turbulent nonpremixed flame have been studied experimentally. The results have shown an effectiveness of the premixed flame model and the large scale mixing model considered initial temperature variation. Additionally, considering the axial distance where the mean fuel concentration falls below the stoichiometric level along the center line of the jet according to diluting nitrogen, the premixed flame model have more accurately been improved.

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)
 $S_L^0|_{st}$: 이론공연비에서 층류화염 전파속도(m/s)
 $\nu_{F,0}$: 초기 온도에 대한 연료동점성도(cm^2/s)
 $\alpha_{st,0}$: 초기 온도에 대한 이론공연비에서의 열
적확산도(cm^2/s)
 V_{CO} : 동축류 공기의 속도(m/s)
 $\tilde{\rho}$: 초기 온도에 대한 연료 혼합기밀도(ρ_F)와
동축류 공기밀도(ρ_{Air})의 비
 ΔT : 기연가스와 미연가스의 온도차이(K)
 T_0 : 초기 온도(K)
 d_0 : 노즐직경(cm)
 \wedge : 큰스케일 혼합 모델에 관한 무차원 기호
 \sim : 예혼합 화염 모델에 관한 무차원 기호

[†] 최병철, 서울대학교 대학원
E-mail : chbych@snu.ac.kr
TEL : (02)880-1647
FAX : (02)889-1842

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

1. 서 론

난류 부상화염의 높이는 제트속도에 비례하여 선형적으로 증가하는 화염안정화 특성을 갖는다. 이는 제트속도에 따라 비선형적인 특성을 갖는 층류 부상화염과 구별된다. 이러한 흥미로운 특성 때문에 많은 연구들이 활발히 진행되어 오고 있으며 특히, 난류 비예혼합 제트에서의 화염안정화 특성에 관하여 다양한 이론들이 경쟁을 이루고 있다. 그 중에서도 Premixed Flame Model 과 Large Scale Mixing Model 이 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 Model 은 Vanquickenborne 과 Van Tiggelen 에 의해서 제안되었다.^[1] 그 이후에도 국부적인 평균 유동속도와 국부적인 난류화염 전파속도가 일치하는 부분에서 난류 부상화염이 안정화된다는 가정을 기초로 수소, 메탄, 프로판 그리고 에틸렌과 같은 다양한 연료에 대하여 Kalghatgi 에 의해서 그 특성들이 연구 되었다.^[2]

한편, Broadwell 은 난류 부상화염에 대하여 기연가스가 미연의 반응물 방향으로 재유입 됨으로 발생하는 혼합시간과 화학반응의 시간 비로부터 화염날림을 예측하였다. 그러나 이 이론은 부상화염의 선형적인 높이 예측에는 모순이 있었다.^[3] 그래서 Miake-lye 와 Hammer 는 Large Scale Dynamics 를 도입하여 이론공연비 선 상에 부과된 스트레인이 임계 스트레인에 도달할 때까지 화염은 존재한다는 Large Scale Mixing Model 로부터 제트속도에 대한 부상화염의 높이를 성공적으로 예측할 수 있었다.^[5]

최근 Chung 과 Kim 은 프로판 연료에 질소 희석을 시키면서 동축류 공기의 온도를 900K 까지 가변 되는 조건에서 부상화염의 높이와 화염날림을 Premixed Flame Model 과 Large Scale Mixing Model 을 각각 적용하여 해석하였다. 그 결과들은 초기 온도 조건에 해당하는 물성치들을 적용하고, 특히 Large Scale Mixing Model 에서 열적화산도를 기연가스의 온도 대신에 초기 온도에 대한 값으로 수정할 때에 부상화염의 높이 예측이 개선됨을 보여주었다. 그리고 초기 온도 변화에 따른 기연가스의 온도와 초기 온도와의 차이에 의한 부력

효과를 두 Model 에 적용하여 화염날림을 성공적으로 예측하였다.^[5]

본 연구에서는 앞선 난류제트의 이론들을 토대로 하여, 실용 연소기기에서 청정연료로써 활용도가 높은 메탄 연료에 질소를 희석시키면서 가변 되는 초기 온도에 대한 난류 부상화염의 특성들을 실험적으로 살펴보았다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 Fig. 1 과 같이 동축류 버너, 유량조절부 그리고 온도제어부로 구성하였다. 동축류공기는 일정한 듀티비의 오픈루프 형태로 제어되는 2.5kW 실린더형 히터를 통하여 예열된 후에 버너에 공급된다. 그리고 실험에 필요한 고온의 동축류를 얻기 위하여 버너 부분에서 현재의 온도를 피드백 받아서 일정한 온도로 제어되는 7.5kW 세라믹 히터를 버너와 일체형으로 구축하였다.

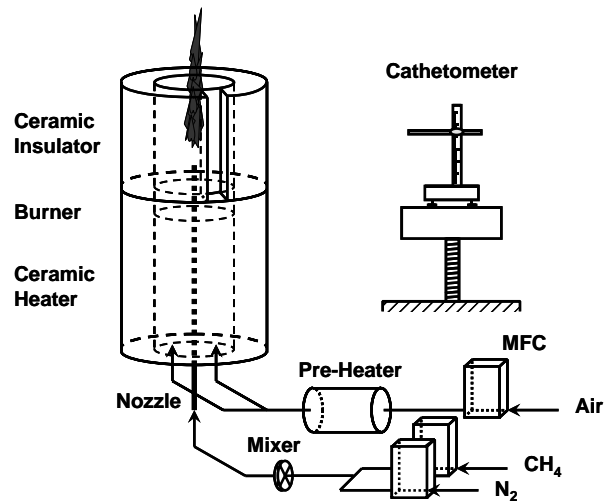


Fig. 1 Experimental Setup

연료노즐은 관내 완전 발달된 유동장을 얻기 위하여 내경 3.76mm, 길이 75cm 의 스텔레스 스틸관을 사용하였으며, 동축류를 구성하는 외부관은 외경 130mm, t=4mm 를 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 1mm 메탈화이버 매트, 세라믹 비드 그리고 세라믹 하니콤을 사용하였다. 또한 버너에서 배출되는 고온 동축류의 열손실을 최소화하면서 유동장 및 화염의 안정성을 유지하기 위하여 세라믹 단열재 및 파이프렉스 튜브를 사용하였다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 난류 부상화염의 거동

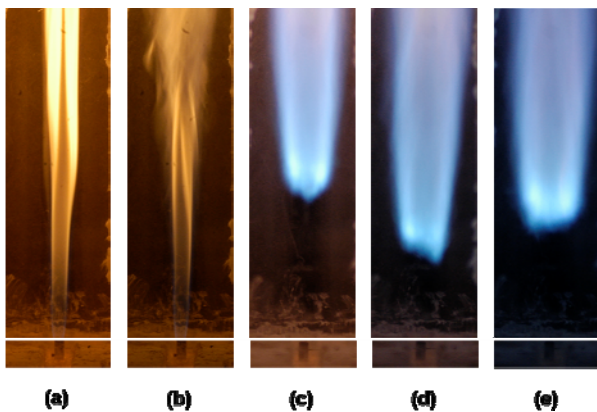


Fig. 2 Behavior of Turbulent Lifted Flames at $T_0=600K$, $X_{F,0}=0.74$, $V_{CO}=0.4m/s$; (a) $U_{RA}=27m/s$, $Re=1766$, (b, c) $U_0=37m/s$, $Re=2420$, (d) $U_{LO}=42m/s$, $Re=2747$, (e) $U_0=48m/s$, $Re=3139$

층류 부상화염은 제트속도에 따라 비선형적으로

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.^[7]

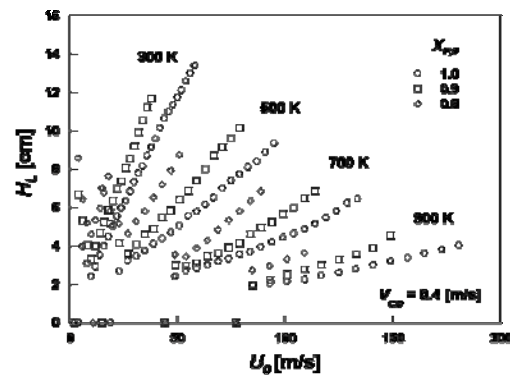


Fig. 3 Height of Turbulent Lifted Flame as Jet Velocity

질소 희석에 의한 메탄 연료몰분율과 동축류 공기의 초기온도를 가변 시켰을 때, 제트속도에 따른 측정된 부상화염의 높이 Fig.3과 같고 전체적으로 모두 선형적인 특성을 갖는다.

3.2 난류 부상화염 높이예측

난류 부상화염은 화염 선단의 농도장에서 Large Scale 스트레인에 의해서 안정화가 결정된다고 할 수 있다. 화염을 유지하기 위해서는 화염이 소멸되는 방향으로 작용하는 스트레인에 대해서 화학반응율이 그 임계 스트레인을 극복해야 한다. 당량비 1 근처에서 최대값을 갖는 화학반응율에서 화학반응 특성시간의 역수로 임계 스트레인을 $t_c \sim 1/(\alpha_{st}/S_L^0|_{st})^2$ 과 같이 나타내었다.^[3] 이때의 열적확산도는 기연가스의 온도를 기준한 것인데, 초기 온도가 가변되는 조건에 대하여 $\alpha_{st,0}$ 로 판정되었다.^[6] 따라서 Large Scale Mixing Model[3-6]을 적용한 무차원화된 부상높이와 제트속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{H}_L = \frac{H_L S_L^0|_{st}}{\alpha_{st,0}}, \quad \hat{U}_0 = \frac{U_0}{S_L^0|_{st}} \frac{Y_{F,st}}{Y_{F,0}} \quad (1)$$

Fig. 3과 같은 다양한 초기온도와 연료몰분율에 대한 난류 부상화염의 높이값들에 Large Scale Mixing Model을 적용하면, Fig. 4와 같이 나타내어지고, 다음과 같은 선형적인 상관관계를 확인할

수 있다.

$$\hat{H}_L = C_1 \times \hat{U}_0 \quad (2)$$

여기서, $C_1=315.58$, 상관계수 $R=0.99$ 이다.

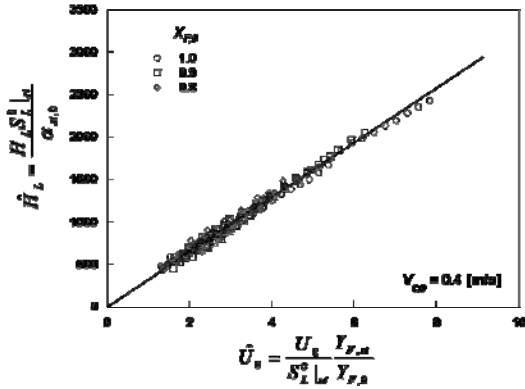


Fig. 4 H_L based on Large Scale Mixing Model

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, 이때의 층류화염 전파속도는 GRI-3.0 을 적용한 1D-Premix 코드^[8]를 이용하여 계산하였고, Premixed Flame Model 을 적용한 무차원화된 부상높이와 제트속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{H}_L = \frac{H_L S_L^0 |_{st}}{U_{F,0}}, \quad \tilde{U}_0 = \frac{U_0}{S_L^0 |_{st}} \tilde{\rho}^{1.5} \quad (3)$$

마찬가지로, Fig.3 의 난류 부상화염의 높이 값들에 Premixed Flame Model 을 적용하여 보면 Fig.5 와 같이 연료물분율에 대하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

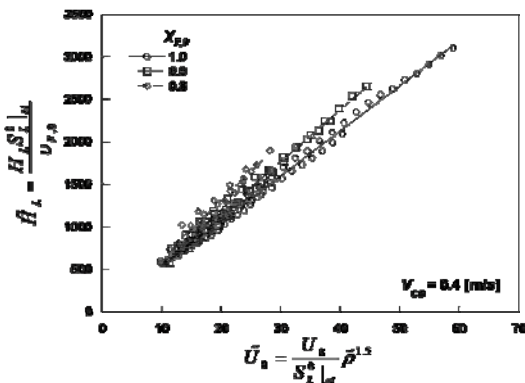


Fig. 5 H_L based on Premixed Flame Model

$$\begin{aligned} X_{F,0} = 1.0 &\rightarrow \tilde{H}_L = C_1 \times \tilde{U}_0 \\ X_{F,0} = 0.9 &\rightarrow \tilde{H}_L = C_2 \times \tilde{U}_0 \\ X_{F,0} = 0.8 &\rightarrow \tilde{H}_L = C_3 \times \tilde{U}_0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $C_1=52.70$, $R_1=0.99$, $C_2=60.73$, $R_2=0.99$ 그리고 $C_3=68.47$, $R_3=0.96$ 이다. 그러나 상온에서 다양한 연료에 대하여 $X_{F,0}=1.0$ 조건에서 약 $C=50$ 을 갖는 이전 실험결과^[2]들은 희석 효과를 적용하지 않은 모델이기 때문에 연료물분율에 따라 기울기 값이 차이가 발생하였다. 따라서 질소를 희석하면 제트의 중심선을 따라 이론공연비 부근 아래로 평균 연료농도가 떨어지기 때문에 이러한 추방향의 거리에 가상원점을 고려한 X_{st} ^[9, 10]와 연료노즐 직경을 무차원화하여 적용하면 식(3)을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_{st} = \left(4 \frac{Y_{F,0}}{Y_{F,st}} \tilde{\rho}^{0.5} - 5.8 \right) d_0 \quad (5)$$

$$\tilde{H}_L = \frac{H_L S_L^0 |_{st}}{U_{F,0}} \frac{X_{st}}{d_0}, \quad \tilde{U}_0 = \frac{U_0}{S_L^0 |_{st}} \tilde{\rho}^{1.5} \quad (6)$$

희석 효과를 적용하여 수정된 모델을 적용하여 보면 Fig.6 과 같이 다양한 연료물분율에 대해서 다음과 같은 상관관계를 갖는다.

$$\tilde{H}_L = C_1 \times \tilde{U}_0 \quad (7)$$

여기서, $C_1=2161.9$, $R=0.99$ 이다.

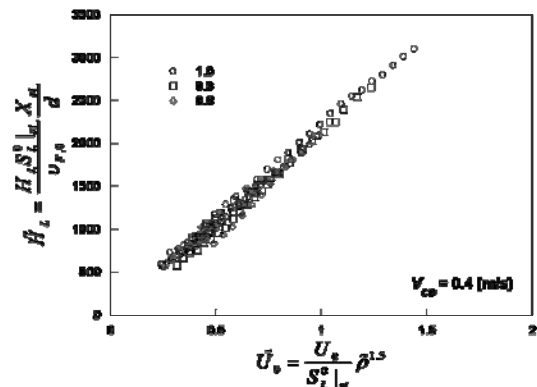


Fig. 6 H_L considered X_{st}/d based on Premixed Flame Model

메탄의 초기온도에 따른 난류 부상화염의 높이는 Large Scale Mixing Model 과 Premixed Flame Model 의 의해서 예측되는 것을 검증하였고, 질소 희석 효과를 고려하여 보다 정확한 높이 예측이 가능한 것을 검증하였다.

3.3 임계 속도

제트속도를 증가함에 따라, 노즐에 부착된 화염

이 부상(Liftoff)되는 제트속도인 U_{LO} 를 갖게 되고 부상된 화염의 높이는 점차 증가하다가 결국 화염 날림(Blowout)이 발생하는 제트속도인 U_{BO} 를 갖는다. 때로는 제트속도의 증가에 따라, 노즐에 부착된 화염이 부상되어 안정화되지 못하고 바로 화염 날림(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 농도장에 대하여 가상원점을 적용한 제트에 대한 상사해를 이용함으로써, 이들 임계 속도들은 제트속도와 층류화염 전파속도의 밸런스 메커니즘 뿐만 아니라, 연료질량분율, 축방향의 거리 및 노즐직경의 함수로 해석될 수 있다.^[11]

초기 온도 변화와 연료물질분율의 변화에 따른 임계속도의 측정에서, 고정된 연료공급 압력과 노즐 직경 때문에 Fig.7 과 같이 $0.65 < X_{F,0} < 0.75$ 부근에서 900K 이하의 모든 초기 온도 조건에서 화염날림을 관찰할 수 있었다. 즉, 약 $X_{F,0} > 0.8$ 경우에는 노즐출구 속도의 한계로 모든 초기 온도 조건에서 화염날림이 발생할 수 있는 조건이 아니었다. 한편, 노즐직경을 감소시키면, 상대적으로 큰 동점성도 값을 갖는 메탄의 특성 때문에 제트속도가 크지만 작은 Re 값을 갖기 때문에 난류 부상화염의 특성을 관찰하기에는 부적합하였다.

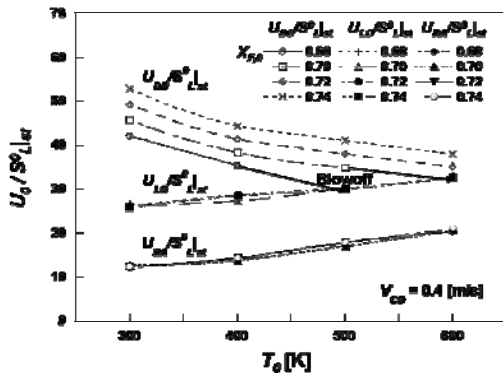


Fig. 7 Critical Velocities

난류영역에서 U_{LO} 와 U_{RA} 는 층류화염 전파속도에 대하여 거의 일정한 값을 갖는다고, 프로판에 질소를 희석한 연료의 경우에서, 확인 되었다.^[6] 그렇지만, Fig.7 과 같은 초기 온도와 연료물질분율의 범위에 대하여 U_{RA} 는 $987 < Re < 1,724$ 인 층류영역에, U_{LO} 는 $2,084 < Re < 2,751$ 인 천이 영역에 있었기 때문에 약간 선형적으로 증가하는 특성을 보였다.

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] 그러나 초기 온도의 변화에 대하여 열적확산도와 부력을 적용하면 U_{BO} 는 아래와 같이 예측될 수 있다.^[6] 따라서 Fig. 7 의 메탄에 대한 U_{BO} 값들을 이러한 Large Scale Mixing Model 을 적용하면 Fig. 8 과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{BO} = C_1 \times \left[d_0 S_L^0 |_{st}^2 \psi^2 \tilde{\rho}^{0.5} / \alpha_{st,0} (\Delta T / T_0)^{0.5} \right] \quad (8)$$

여기서, $C_1=0.0037$, $R=0.99$ 이다.

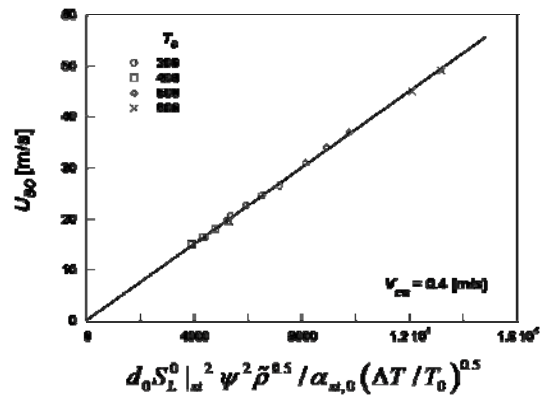


Fig. 8 U_{BO} based on Large Scale Mixing Model

미연가스와 기연가스의 밀도차이에 의한 유동 재유입에 의한 효과를 반영한 X_{st} 에 부상화염의 높이가 도달하면 화염날림이 발생한다는 초기 온도가 가변 되는 조건에서 Premixed Flame Model 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[6, 9, 10]

$$X'_{st} = X_{st} (\Delta T / T_0)^{0.5} \quad (9)$$

$$Re_X = \frac{X'_{st} S_L^0 |_{st}}{v_{F,0}}, \quad \tilde{U}_{BO} = \frac{U_{BO}}{S_L^0 |_{st}} \tilde{\rho}^{1.5} \quad (10)$$

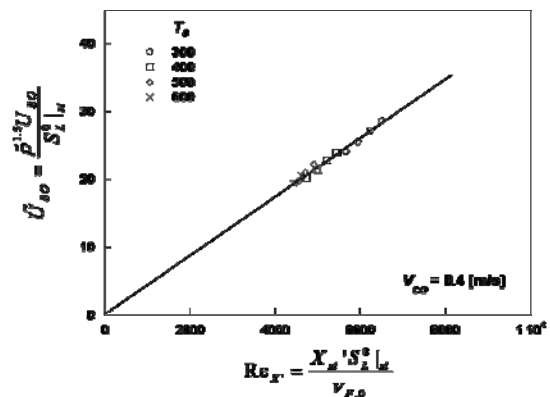


Fig. 9 U_{BO} based on Premixed Flame Model

마찬가지로, Fig. 7의 U_{BO} 값들을 식 (10)을 적용하면 Fig. 9와 같이 식 (11)의 상관관계를 갖는다.

$$\tilde{U}_{BO} = C_1 \times \text{Re}_{X'} \quad (11)$$

여기서, $C_1=0.0043$, $R=0.99$ 이다.

3.5 화염날림 시 부상화염 높이에측

노즐직경에 무차원화된 화염날림 직전의 부상화염의 높이는 연료혼합기와 공기의 밀도비와 이론공연비에 따라 선형적인 특성을 갖는다고 할 수 있다. 여기서 초기 온도에 따라 가변 되는 그 밀도비와 이론공연비를 보정함으로써 Large Scale Mixing Model 에 의한 U_{BO} 는 다음과 같은 식으로 예측 가능하다.^[6,9]

$$H_{BO}/d_0 = C_1 \times \tilde{\rho}^{0.5} \psi (\Delta T/T_0)^{0.5} \quad (12)$$

따라서, 메탄에 대한 화염날림 직전의 난류 부상화염의 높이에 대한 실험 결과값들은 식 (12)에 의하여 Fig.10 과 같이 나타낼 수 있고, 여기서, $C_1=1.03$, $R=0.99$ 이다.

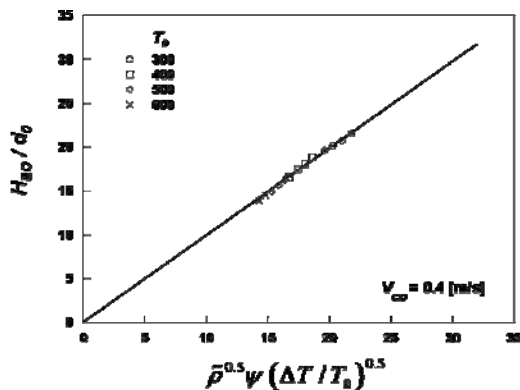


Fig. 10 H_{BO} based on Large Scale Mixing Model

4. 결 론

청정연료로써 실용 연소기기에서 활용도가 급증하고 있는 메탄을 연료로 하여, 동축류 제트에서 초기 온도의 가변에 따른 난류 부상화염 특성들을 Large Scale Mixing Model 과 Premixed Flame Model 을 도태로 하여 실험적으로 연구하였다.

메탄의 난류 부상화염의 높이, 화염날림 직전의 높이 및 임계속도들은 각각의 난류모델에 의하여 잘 연관 지어졌다. 특히, Premixed Flame Model 에 의한 난류 부상높이는 연료물분율의 감소에 따라 평균 연료농도가 이론공연비 부근 아래로 떨어지는 거리를 보정함으로써 보다 정확한 예측이 가능한 것을 검증하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 “미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발” 과제와 BK21 의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

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