

저신장율 대향류확산화염에서 에지화염 진동불안정성

박준성* · 김현표* · 박 정** · 김성초* · 김정수*

Edge-flame Instability in A Low Strain-rate Counterflow Diffusion Flame

June Sung Park* · Hyun Pyo Kim* · Jeong Park** · Songcho Kim* · Jeong Soo Kim*

ABSTRACT

Experiments in methane-air low strain rate counterflow diffusion flames diluted with nitrogen have been conducted to study the behavior of flame extinction and edge flame oscillation in which lateral conduction heat loss in addition to radiative heat loss could be remarkable at low global strain rates. Onset conditions of edge flame oscillation and flame oscillation modes are also provided with global strain rate. It is seen that flame length is closely relevant to lateral heat loss, and this affects flame extinction and edge flame oscillation. Edge flame oscillations in low strain rate flames are categorized into three: a growing oscillation mode, a decaying oscillation mode, and a harmonic oscillation mode. The regime of flame oscillation is also provided at low strain rate flames.

초 록

메탄/질소-공기 저 신장율 대향류 확산화염에서 화염소화 거동과 에지화염의 진동불안정성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 특히, 저 신장율 화염에서 복사열손실 뿐만 아니라 측면전도 열손실이 현저해진다. 각 전체 신장율에서 화염진동의 시작조건과 진동모드를 제안하였다. 화염길이는 측면전도열손실과 밀접한 관계를 가지고 있으며 화염소화와 화염진동에 중대한 영향을 미친다. 저 신장율 에지화염의 진동모드는 성장모드, 감쇠모드 그리고 조화모드로 요약된다. 또한, 각 진동모드의 조건을 전체신장율과 희석제의 물분율에 대한 안전화전도를 작성하였다.

Key Words: Edge Flam(에지화염), Flame Oscillation(화염진동), Global Strain Rate(전체신장율), Lateral Conduction Heat Loss(측면전도열손실)

1. 서 론

충분히 큰 Lewis number(이하 Le 수)를 갖는 1차원 예혼합 화염은 진동 불안정성(Oscillatory Instability)이 나타날 수 있고 열손실에 의해 영향을 받는다. 화염진동은 1차원 확산화염에서 일어날 수 있고 이론적 연구에 의하면 충분히 큰

* 순천대학교 기계우주항공공학과

** 순천대학교 기계우주항공공학과

연락처자, E-mail: jeongpark@sunchon.ac.kr

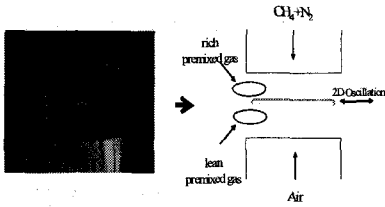


Fig. 1 Representative direct photo and schematic diagram of low strain rate counterflow diffusion flame configuration.

Le_f 수와 열손실에 의해 발생됨이 보고된바 있다. 또한 불안정성이 나타나는 임계 Le_f 수는 용적 열손실에 의해 낮아질 수 있다.[1,2] 예지화염은 Flame Hole, 부상화염(Lifted Flame),[4] 등에서 관찰되었었다. 화염 불안정성은 산화제나 연료측의 1보다 큰 Le_f 가 필요로 하고 용적 열손실은 안정된 화염의 진동불안정성을 유발시킬 뿐만 아니라 그 정도를 증가 시킬 수 있다.[2] 최근 Park 등은 높은 전체 신장율과 낮은 전체 신장율에서 대향류 확산화염의 소화거동을 실험적 연구 그리고 2차원 직접수치모사(DNS)를 통해 규명한 바 있다.[5] 특히, 수치해석을 통해 저신장율 화염소화는 복사 열손실 뿐만 아니라 반경방향의 전도 열손실이 소화에 영향을 미친다는 것을 확인하고, 저신장율 화염의 길이가 반경방향의 전도 열손실의 척도임을 밝힌바 있다. Fig. 1은 저신장율 대향류 확산화염의 직접 사진과 농도장을 나타내고 있다.

결과로서, 저신장율 화염의 소화조건 근처에서 여러 형태의 예지화염의 진동이 관찰되었고, 저신장율 화염의 진동불안정성은 복사 열손실뿐만 아니라 화염 반경 방향의 전도 열손실이 주요 불안정성 생성 메커니즘이 된다.

2. 실험장치 및 방법

대향류 버너의 내경은 26.0 mm, 버너 노즐간격은 15.0 mm로 유지하였다. 상부 노즐의 과일열을 막기 위해 물을 순환시켜 냉각하였다. 연료는 메탄, 희석제는 질소 그리고 산화제는

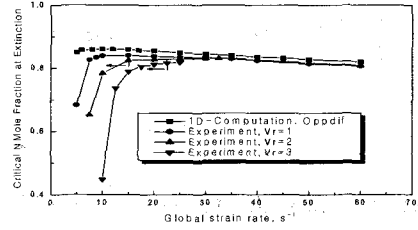


Fig. 2 Measured and computed critical nitrogen mole fractions of the fuel stream at extinction with global strain rate for various velocity ratio.

공기를 사용하였다. 화염의 동적 거동은 디지털 미디어 카메라를 이용하여 획득하였고, PC를 이용하여 분석하였다. 전체 신장율의 정의는 다음과 같다.

$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + Vr \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}} \right) \quad (1)$$

여기서 V 와 ρ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며, L 은 노즐간의 거리, 하첨자 f 와 a 는 각각 연료와 산화제를 나타낸다. Park등은 저신장율 화염의 소화는 복사 열손실 뿐만 아니라 측면 열손실에 기인함을 밝힌바 있다.[5] 따라서 이러한 효과를 명확히 보이기 위해 1차원 Oppdif 코드를 사용하여 수치 데이터와 실험을 비교 분석하였다.[7]

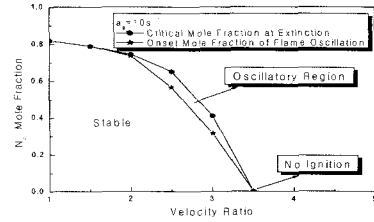
3. 결과 및 논의

Fig. 2은 전체 화염 신장율에 따른 화염 소화의 실험적, 수치적 임계 질소 물분율을 나타내고 있다. Oppdif코드는 1차원 계산이므로 버너직경의 효과는 나타나지 않는다. Fig. 2에 보인 바와 같이 수치적 계산에 의해 얻어진 화염소화 임계 물분율은 8 s^{-1} 에서 전환점을 갖는다. 8 s^{-1} 이하의 화염 소화는 복사열손실에 의해 발생하며, 8 s^{-1} 이상은 화염 스트레치에 의해 발생한

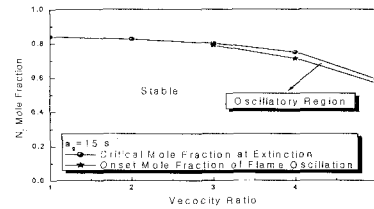
다.[6] 실험에서 얻어진 $V_r=1$ 에서의 화염 소화 임계 몰분율은 10 s^{-1} 과 15 s^{-1} 사이에서 최고값을 나타내고 있다. 그리고 V_r 이 증가할수록 전환점의 위치는 더욱 높은 신장율에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 높은 신장율에서의 화염소화 임계 몰분율은 모든 V_r 에서 거의 일치하고 있으나, 저신장율의 임계 몰분율은 V_r 이 증가할수록 낮아지고 있다. 측면 전도열손실의 척도인 반경방향의 화염길이는 전체 신장율이 낮아질수록, V_r 이 높아질수록 감소한다. 즉, 과도한 측면 열손실이 화염소화 임계 몰분율을 감소시키는 요인임을 잘 보여주고 있고, 식(2)로부터 잘 묘사될 수 있다.

$$q_r = k \frac{\partial T}{\partial r} \sim \frac{1}{l_f} \quad (2)$$

여기서 l_f 은 반경 방향의 화염길이이다. Fig. 2에서 굵은 화살표는 화염 진동(Flame Oscillation)의 전체 신장율에 의한 경계를 나타낸 것이다. $V_r = 1$ 에서는 전 영역에서 화염진동이 나타나지 않았다. V_r 이 증가 할수록 화염 진동이 나타나는 전체 신장율은 높아지는 것을 알 수 있었다. 또한, V_r 이 증가 할수록 화염 길이는 감소하고, 식(2)에서 알 수 있듯이 반경방향의 전도 열손실이 증가함으로써 화염 진동이 일어나는 조건을 변화시킨 것을 알 수 있다. Fig. 3는 전체 신장율 (a) $a_g = 10\text{ s}^{-1}$ 과 (b) $a_g = 15\text{ s}^{-1}$ 에서의 노즐 출구 속도비에 따른 소화 화염 임계 몰분율과 화염 진동의 시작 조건을 나타내는 안정화 선도이다. $a_g = 10\text{ s}^{-1}$ 에서 소화 임계 몰분율은 V_r 의 증가에 따라 급격하게 감소하고 있다. Fig. 3 (a) $a_g = 10\text{ s}^{-1}$ 에서 V_r 의 증가에 따라 화염길이의 감소와 함께 화염 강도가 매우 약해지는 것을 의미한다. 한편, 화염 불안정성은 Le_f 가 1보다 충분히 큰 경우에 나타나는 것으로 알려졌지만, 기존 연구들에서 $Le_f = 1$ 인 경우조차도 열손실이 큰 경우는 화염 진동이 발생함을 보인다. 본 연구에서 수행된 질소 희석연료의 Le_f 수의 범위는 0.757~0.946이다. 과도한 열손실이 화염의 진동불안정성을 유발할 수 있는 임계 Le_f 수



(a)



(b)

Fig. 3 Critical nitrogen mole fraction at extinction and onset nitrogen mole fraction of flame oscillation with velocity ration at (a) $a_g = 10\text{ s}^{-1}$ and (b) $a_g = 15\text{ s}^{-1}$

를 낮게 한 것임을 주목해야 한다.[2] Fig. 4는 시간에 따른 화염 반경방향의 위치를 각 화염진동 모드에 대해 나타낸 것이다. 관찰된 예지화염의 진동 모드는 감쇠모드, 조화모드, 성장모드로 요약된다. Fig. 5은 화염 안정화 선도와 진동모드를 전체 신장율에 따라 나타낸 그림이다. 본 연구에서 수행된 진동 불안정성에 대한 시작 조건 Le_f 수는 $a_g = 10\text{ s}^{-1}$ 에서 0.7912임을 주목해야 한다. 기존 연구결과보다 진동 불안정성이 나타나는 임계 Le_f 수가 현저히 낮아진 점으로부터 측면 열손실이 화염 진동에 미치는 영향을 확인하였다.

4. 결 론

메탄/질소-공기 저신장율 대항류 확산화염에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 화염 길이는 반경 방향의 열손실과 밀접한 관계가 있고 화염 소화와 진동 불안정성에 중대한 영향을 준다. 저신장율 화염의 소화 임계 몰분율은 속도비가 증가할수록 감소하였다. 이는 복사 열손실

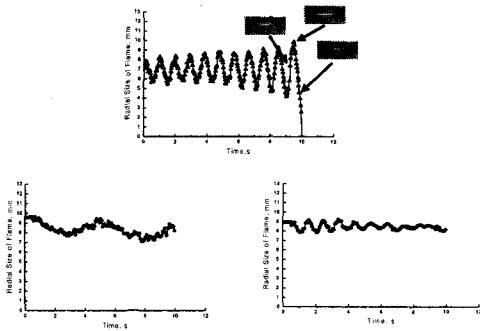


Fig. 4 Representative flame oscillation modes: (a) a glowing oscillation mode, $a_0=10 \text{ s}^{-1}$, $X_{N_2}=0.448$, $V_r=3$, (b) a harmonic oscillation mode, $a_0=10 \text{ s}^{-1}$, $X_{N_2}=0.407$, $V_r=3$, and (c) a decaying oscillation mode, $a_0=12.5 \text{ s}^{-1}$, $X_{N_2}=0.712$, $V_r=3$.

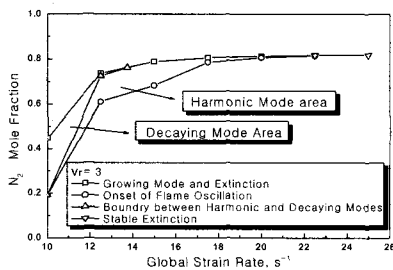


Fig. 5 Flame stability map and their flame oscillation modes with global strain rate; $V_r=3$.

뿐만 아니라 속도비 증가로 인한 반경 방향으로의 측면 열손실의 증가에 기인하며, 이것은 반경방향의 화염길이 감소로부터 확인할 수 있다. 전체 신장율이 증가할수록 화염 진동 불안정성이 나타나는 영역이 좁아지는 것은 반경방향의 화염길이 증가로 인한 반경방향측면 전도 열손실의 감소와 화염 두께 감소로 인한 복사 열손실이 감소하기 때문이다. 에지화염의 진동 모드는 성장모드, 감쇠모드 그리고 조화모드로 요약된다. 각 진동모드의 조건을 $V_r=3$ 에서 전체 신장율과 물분율에 대한 안정화 선도로 작성하였고, 반경 방향의 전도 열손실과 복사열손실이 각 화염 진동모드에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 저신장을 대항류 확산화염의 화염

소화와 에지화염의 진동 불안정성은 복사 열손실뿐만 아니라 측면방향의 전도 열손실에 의해 중대한 영향을 받는다.

4. 후 기

본 연구는 2006년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] Julin, G., Calvin, p., 1979, "Linear Stability Analysis of Non-adiabatic Flames: Diffusional-Thermal Model," *Combust. Flame*, Vol. 35, pp. 139-153.
- [2] Sohn, C. H., Chung, S. H., Kim, J. S., 1999, "Instability-Induced Extinction of Diffusion Flames Established in the Stagnant Mixing Layer," *Combust. Flame.*, Vol. 117, pp. 404-412.
- [3] Kukuck, S., Matalon, M., 2001, "The Onset of Oscillations in Diffusion Flames," *Combust. Theory Modelling.*, Vol. 5, pp. 217-240.
- [4] Lee, B. J., Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 109, pp. 163-172.
- [5] Park, J., Oh, C. B., Kim, K. T., Kim, J. S. and Hamins, A., 2005, "Multi-dimensional Effects on Low Strain Rate Flame Extinction in Methane/air Counterflow Non-premixed Flame," *5th Asia-Pacific Conference on Combustion*, pp. 345-348.
- [6] Maruta, K., Yoshida, M., Ju, Y, Niioka., 1996, "Experimental study on methane-air premixed flame at small stretch rates in microgravity," *Proc. Combust. Inst*, Vol. 26, pp. 1283.
- [7] Kee, R. J., Miller, J. A., Evans, G. H., Dixon-Lewis, G., 1988, "A computational model of the structure and extinction of strained, opposed flow, premixed methane-air flames," *Proc. Combust. Inst*, Vol. 22, pp. 1479