

저신장을 대향류확산화염에서 진동불안정성을 갖는 에지화염의 동적거동

박준성* · 김현표* · 박 정* · 김정수* · 길상인**

Dynamic Behaviors of Oscillating Edge-Flame in Low Strain Rate Counterflow Diffusion Flames

June Sung Park, Jeong Park, Hyun Pyo Kim, Jeong Soo Kim and Sang In Keel

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 flame length is less than the burner diameter and thus lateral conduction heat loss in addition to radiative heat loss could be remarkable at low global strain rates. Critical mole fraction at flame extinction is examined with velocity ratio and global strain rate. Onset conditions of edge flame oscillation and flame oscillation modes are also provided with global strain rate and added nitrogen mole fraction to fuel stream (fuel Lewis number). It is seen that flame length is closely relevant to lateral heat loss, and this affects flame extinction and edge flame oscillation considerably. Edge flame oscillations in low strain rate flames are experimentally described well and 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. Important contribution of lateral heat loss even to edge flame oscillation is clarified.

Key Words : Decaying Mode, Edge Flame, Flame Oscillation, Global Strain Rate, Growing Mode, Harmonic Mode, Lateral Conduction Heat Loss, Lewis Number

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.[1,2] Le_f 수는 열확산과 질량확산의 비를 나타내는 무차원수이다. 이때 Le_f 수의 변화에 따라 나타나는 화염 불안정성을 물질-열확산 불안정성(Diffusive-Thermal Instability)이라고 한다. 화염진동은 1차원 확산화염에서 일어날 수

있고 이론적 연구에 의하면 충분히 큰 Le_f 수와 열손실에 의해 발생됨이 보고된바 있다.[4] 또한 불안정성이 나타나는 임계 Le_f 수는 용적 열손실에(Volumetric Heat Loss)에 의해 낮아질 수 있다.[5-7] 에지화염(Edge Flame) 혹은 부분 예혼합 화염(Partially Premixed Flame)은 예혼합 화염과 확산화염의 중간 범주에 속하는 것으로 과농 예혼합화염과 희박 예혼합화염이 만나는 삼중점(Triple Point)을 시작으로 확산화염(Trailing Diffusion Flame)이 분포하는 구조로 되어 있다. 삼중점은 화염강도가 가장 강하며 당량비가 1인 지점 혹은 전파속도가 최대인점을 따라서 전파한다. 삼중점의 전파속도는 양의 값을 가지면 미연 가스로 전파하는 점화파(Ignition wave), 음의 값을 갖게 되면 기연가스로 퇴각하는 실패파

* 순천대학교 기계우주항공공학부

† 연락저자, jeongpark@sunchon.ac.kr

** 한국기계연구원 청정환경기계연구센터

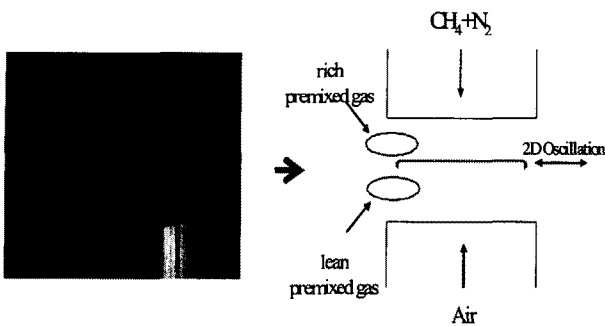


Fig. 1 Representative direct photo and schematic diagram of low strain rate counterflow diffusion flame configuration.

(Failure Wave)가 나타난다. 예혼합 화염도 확산화염도 아닌 중간 형태로 화염이 전파하며, 화염전파 특성이 여전히 잘 알려져 있지 않기 때문에 지난 20년 동안 뜨거운 이슈가 되어 왔다. 예지화염은 Flame Hole, [8,9] 부상화염 (Lifted Flame), [10-12] Fuel Bed에서의 Spreading Flame, [13] 2차원 혼합층에서의 점화 화염 (Ignited Flame), [14] 그리고 양초 화염 (Candle Flame), [15] 등에서 관찰되었었다. 화염 불안정성은 산화제나 연료측의 1보다 큰 Le_f 가 필요로 하고 용적 열손실은 안정된 화염의 진동불안정성을 유발시킬 뿐만 아니라 그 정도를 증가시킬 수 있다. [15,16] 또한 이론당량비 (Stoichiometry) 보다 먼 조건에서 불안정성이 나타난다. 단위 Le_f 에서도 나타날 수 있고 예지화염의 진동불안정성을 갖는 시작조건은 혼합강도 (Mixture Strength), 유동속도, 복사 열손실에 의해 영향을 받는다는 것을 확인한 바 있다. 한편, 대향류 화염 구조에서 Santoro 등은 소화 Damköhler number 근처에서 약한 섭동 (Perturbation)을 이용하여 Flame Hole의 전체과정 (Flame Hole 생성, 성장, 복원)을 잘 묘사하였고, [18] Shay와 Ronney는 축 기준으로 기울여진 대향류 버너에서 국부적으로 의도된 신장율을 갖는 예지화염에 대해 연구 하였다. [19] Carnell과 Renfro는 화염 외부가 소화될 만큼의 높은 질소 장막유동 (Guard Flow) 속도로 예지화염을 형성 하였다. [20] 그러나 이 연구들은 스트레치 (Stretch)에 의해 생성 되는 예지 화염의 거동임을 주목해야 한다. Buckmaster와 Zhang [22]에 의하면 1차원 S-curve(여기서 input은 Damköhler number, response는 Temperature가 될 수 있음)의 Upper

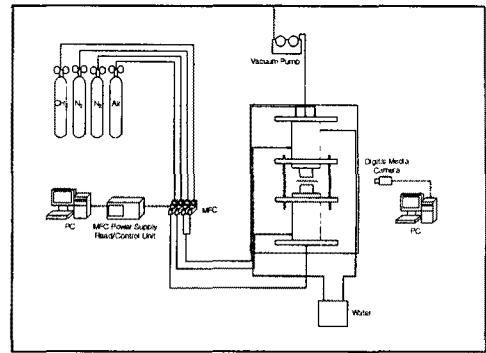


Fig. 2 Schematic diagram of counterflow burner and flow system.

branch에서 정상상태의 소염조건에 도달하기 전 NSP (Neutral Stable Point)에서 시작되는 비정상상태의 해를 확인하였고, 2차원 화염에 대한 계산을 통해 더 높은 Damköhler number에서 NSP가 위치 한다고 주장하였다. 실제 화염진동은 보다 더 낮은 신장율 화염의 소화 조건 근처에서 발생할 수 있음을 설명 할 수 있다.

최근 Park 등은 높은 전체 신장율과 낮은 전체 신장율에서 대향류 확산화염의 소화거동을 실험적 연구 그리고 2차원 직접수치모사 (DNS)를 통해 규명한 바 있다. [21] 고신장율 화염에서의 소화는 화염 중심부로부터 소화가 시작되어 빠르게 전체 화염이 소화되며, 저신장율 화염은 화염외부에서 화염중심부로 화염길이 줄어듦에 소화된다. 또한, 수치해석을 통해 저신장율 화염소화는 복사 열손실 뿐만 아니라 반경방향의 전도 열손실이 소화에 영향을 미친다는 것을 확인하고, 저신장율 화염의 길이가 반경방향의 전도 열손실의 척도임을 밝힌 바 있다. Fig. 1은 저신장율 대향류 확산화염의 직접사진과 농도장을 나타내고 있다. 혼합구조가 전형적인 부분 예혼합 화염을 나타내게 된다. 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. 본 연구는 저신장율 화염소화 근처에서 나타나는 예지화염의 진동 불안정성 시작조건과 화염진동모드에 대해 구체적으로 제시하였고, 특히 실험적으로 보고된 바 없는 소화직전의 화염 성장모드가 나타남을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 2 에 나타난 바와같이 대향류 버너의 내경은 26.0 mm, 버너 노즐간 간격은 15.0 mm로 유지하였다. 내경 10.0 mm 버너의 선행 연구에서 저신장을 화염의 불안정성은 관찰되지 않았다. 비교적 작은 버너 내경에 의한 작은 크기의 화염이 과도한 열손실에 의해 화염의 진동불안정성이 발생하기 보다는 빠른 소화가 발생하였기 때문이다. 이러한 이유로 26.0 mm 내경의 버너 크기로 설계하였고, 상부 노즐의 과열을 막기 위해 물을 순환시켜 냉각하였다. 버너 덕트 내부에는 일련의 미세 스크린을 설치하여 균일한 유동속도를 갖게 하였고, 진공 펌프를 사용해 연소생성물을 외부로 배출시켰다. 또한, 연료가 주위 공기와 2차 연소되는 것을 막기 위하여 하부 노즐을 통해 질소 장막유동(Curtain Flow, 7L/min)을 분사하였다. 연료는 메탄(순도99.95%), 희석제는 질소(순도99.95%) 그리고 산화제는 공기(순도99.95%)를 사용하였다. 상부노즐의 과열 방지와 온도 경계조건의 유지를 위하여 상부노즐에서 연료를 분사하여 화염대의 위치를 제어하였다. 화염의 동적 거동은 디지털 미디어 카메라(JVC, GZ-MC500)를 이용하여 획득하였고, PC를 이용하여 분석하였다. 실험방법은 전체 신장율을 고정시킨 후 연료와 희석제의 유량을 동시에 변화시키면서 화염의 동적 거동을 관찰하는 방법으로 수행되었다. 전체 신장율의 범위는 5 s^{-1} 에서 60 s^{-1} 였다. 전체 신장율의 정의는 다음과 같다.[23]

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

여기서 V 와 ρ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며, L 은 노즐간의 거리, 하첨자 f 와 a 는 각각 연료와 산화제를 나타낸다. Park등은 저신장을 화염의 소화는 복사 열손실 뿐만 아니라 측면 열손실에 기인함을 밝힌바 있다.[21] 따라서 이러한 효과를 명확히 보이기 위해 1차원 Oppdif 코드를 사용하여 수치 데이터와 실험을 비교 분석하였다.[25] 유사변수 개념을 근간으로 둔 Oppdif코드는 속도, 온도, 화학종의 방정식을 풀게되고, 복사항은 광학적 박복사모델(Optically Thin Model)을 사용하였다. 부력항은 첨가되지 않았고, 화학반응 모델은 GRI-V3.0 상세기구, 열화학적 물성치는 Chemkin, 전달 물성치는 Tranfit을 사용하였다. 실험에 적용된 연료

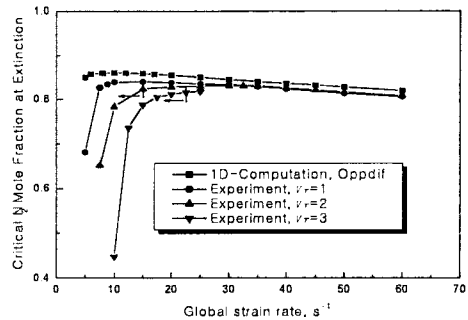


Fig. 3 Measured and computed critical nitrogen mole fractions of the fuel stream at extinction with global strain rate for various velocity ratio.

의 Le_f 수 범위는 0.757에서 0.946이고, 산화제의 Le 수는 1.050이다. 희석제로 채택된 질소는 연료 측 덕트 노즐 경계에서 반응물의 Le_f 수를 1보다 낮게 유지할 수 있어 열손실에 대한 불안정성을 명확히 할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 실험 결과 및 논의

Fig. 3은 전체 화염 신장율에 따른 화염 소화의 실험적, 수치적 임계 질소 물분율을 나타내고 있다. 실험의 전체 신장율은 질량 유량 제어기(Mass Flow Controller)의 용량의 한계에 의해 60 s^{-1} 로 제한되었다. Oppdif코드는 버너 덕트 노즐 간의 유효거리를 고려하여 계산되지만, 1차원 계산이므로 버너직경의 효과는 나타나지 않는다. 그러나 유한한 직경을 가진 실제 버너는 다차원 효과(Multidimensional Effects)를 갖는다는 것이 보고된바 있다.[21] Fig. 3에 보인 바와 같이 수치적 계산에 의해 얻어진 화염소화 임계 물분율은 8 s^{-1} 에서 전환점(Turning Point)을 갖는다. 8 s^{-1} 이하의 화염 소화는 복사열손실에 의해 발생하며, 8 s^{-1} 이상은 화염 스트레치에 의해 발생한다.[24] Vr (Velocity Ratio)은 식(1)에서와 같이 반응물의 노즐 출구 속도비를 나타낸다. 실험에서 얻어진 $Vr=1$ 에서의 화염 소화 임계 물분율은 10 s^{-1} 과 15 s^{-1} 사이에서 최고값을 나타내고 있다. 그리고 Vr 이 증가할수록 전환점의 위치는 더욱 높은 신장율에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 높은 신장율에서의 화염소화 임계 물분율은 모든 Vr 에서 거의 일치하고 있으나, 저신장율의 임계 물분율은 Vr 이 증가할수록 낮아지고 있다.

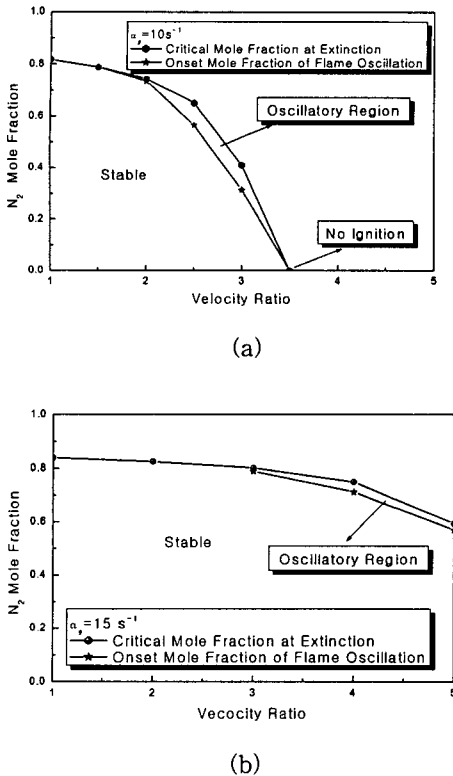


Fig. 4 Critical nitrogen mole fraction at extinction and onset nitrogen mole fraction of flame oscillation with velocity ratio at (a) $a_g=10s^{-1}$ and (b) $a_g=15s^{-1}$

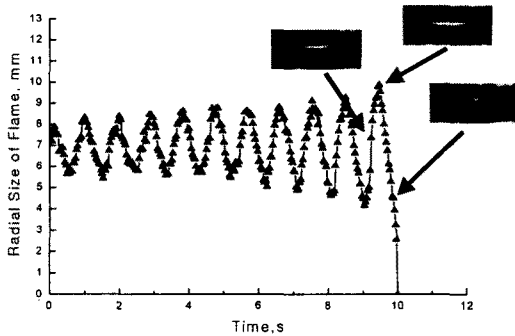
측면 전도열손실의 척도인 반경방향의 화염 길이는 전체 신장율이 낮아질수록, V_r 이 높아질수록 감소한다. 즉, 과도한 측면 열손실이 화염소화 임계 물분율을 감소시키는 요인임을 잘 보여주고 있고, 식(2)로부터 잘 묘사될 수 있다.

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

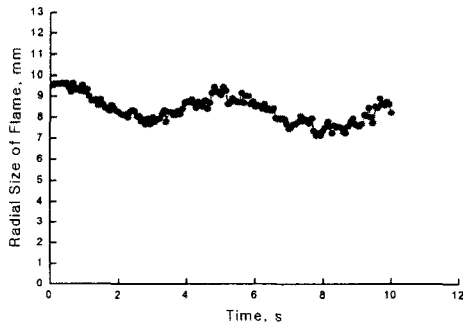
여기서 l_f 은 반경 방향의 화염길이이다. Park등이 설명한 바와 같이 저신장율 화염소화에서 복사 열손실 뿐만 아니라 반경방향의 전도 열손실이 큰 영향을 주고 있는 것을 알 수 있다.[21] V_r 에 따른 모든 화염 소화 임계 물분율의 차이는 전체 신장율이 증가할수록 줄어들고 있다. 전체 신장율이 증가할수록 화염의 두께는 줄어들며 복사 열손실이 작아지고, 화염 길이 증가로 인한 반경방향의 열손실이 줄어들기 때문이다. 계산에 의한 임계 물분율은 GRI-V3.0 상세기구와 실제 희석된 메탄화염과의 불일치 때문에 고 신장율에

서 실험값보다 높게 나타나고 있으나 복사 열손실과 반경방향의 전도 열손실 그리고 부력효과가 줄어들어 그 차이는 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

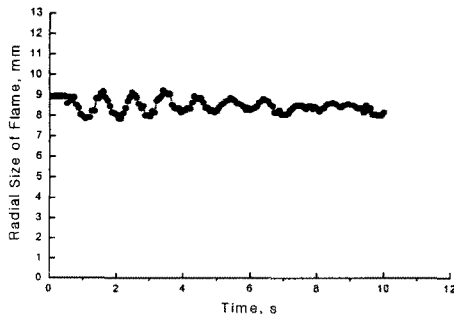
Fig. 3에서 굵은 화살표는 화염 진동(Flame Oscillation)의 전체 신장율에 의한 경계를 나타낸 것이다. $V_r = 1$ 에서는 전 영역에서 화염진동이 나타나지 않았고, $V_r = 2$ 에서는 $15 s^{-1}$ 이하에서, $V_r = 3$ 에서는 $22.5 s^{-1}$ 이하에서 화염 진동이 관찰되었다. V_r 이 증가 할수록 화염 진동이 나타나는 전체 신장율은 높아지는 것을 알 수 있었다. 또한, V_r 이 증가 할수록 화염 길이는 감소하고, 식(2)에서 알 수 있듯이 반경방향의 전도 열손실이 증가함으로써 화염 진동이 일어나는 조건을 변화시킨 것을 알 수 있다. Park등의 미소중력(Microgravity)하의 내경 15.0 mm 대향류 버너 실험에서 화염 진동은 관찰되지 않았음을 주목해야한다.[21] 과도한 열손실에 의해 화염 진동보다는 소화가 앞서 일어난 것이다. 본 연구에서는 제시되지 않았지만 선행된 10.0 mm내경의 대향류 버너에서도 화염 진동은 관찰되지 않았다. 이러한 이유로 화염 소화 근처의 불안정성을 관찰하기 적합한 26.0 mm의 버너로 설계하였고, 다양한 실험 변수를 통해 화염 진동의 조건과 동적 거동을 명확히 하였다. Fig. 4는 전체 신장율 (a) $a_g=10 s^{-1}$ 과 (b) $a_g=15 s^{-1}$ 에서의 노즐 출구 속도비에 따른 소화 화염 임계 물분율과 화염 진동의 시작 조건을 나타내는 안정화 선도 이다. $a_g=10 s^{-1}$ 에서 소화 임계 물분율은 V_r 의 증가에 따라 급격하게 감소하고 있다. $V_r = 3.5$ 에서는 점화가 되지 않았다. Fig. 4 (a) $a_g=10 s^{-1}$ 에서 V_r 의 증가에 따라 화염길이의 감소와 함께 화염 강도가 매우 약해지는 것을 의미한다. 더 높은 전체 신장율 (b) $a_g = 15 s^{-1}$ 에서 임계 물분율은 $a_g=10 s^{-1}$ 의 경우와 비교했을 때 매우 완만하게 변화하는 것을 알 수 있다. 본 연구에는 제시되지 않았지만 $a_g=30 s^{-1}$ 에서는 V_r 의 변화에도 임계 물분율은 거의 변하지 않은 것을 확인할 수 있었다. 이는 Fig. 3에서 확인한 바와 같이 전체 신장율이 높아질수록 화염두께의 감소로 인한 복사열손실의 감소와 화염 길이의 증가로 측면 방향의 전도 열손실이 감소하기 때문이다. 화염 진동은 저신장율에서는 존재하나 고신장율에서는 존재하지 않았고, 신장율이 감소할수록 화염진동의 영역이 넓어는 것을 확인할 수 있다. 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 보인바있다.[15-17] 본 연구에서 수행된 질소 희석연료의 Le_f 수의 범위는 0.757~0.946이다. 과도한 열손실이 화염의 진동



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 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, $a_0=12.5 \text{ s}^{-1}$, $X_{N_2}=0.712$, $V_r=3$.

불안정성을 유발할 수 있는 임계 Le_1 수를 낮게 한 것임을 주목해야 한다.[1-7] 전체 신장율이 낮아 질수록 화염 길이는 감소하여 열손실이 고

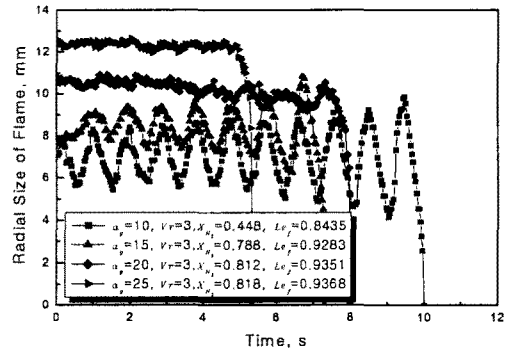


Fig. 6 Temporal variation of the radial position of flame edge at extinction for various global strain rates

신장율 화염보다 현저해진 것이다. Fig. 5는 시간에 따른 화염 반경방향의 위치를 각 화염진동 모드에 대해 나타낸 것이다. 관찰된 예지화염의 진동 모드는 감쇠모드, 조화모드, 성장모드로 요약된다. Fig. 5 (a)에서 성장모드는 화염소화 직전에서만 관찰되었다. 화염은 약 1 Hz의 주기성을 가지며 진폭은 소화 직전까지 증가하였다. 왼쪽 상단의 사진은 점화파가 일어날 때의 직접 사진이다. 예지화염이 미연 가스로 전진하는 점화파로 강한 발광 강도가 나타난다. 우측 하단은 소화 직전 기연 가스로 후퇴하는 실패파로서 매우 낮은 화염 화염강도에 의해 낮은 발광 강도를 갖는다. 조화모드의 대표적인 경우를 나타내고 있는 Fig. 5 (b)는 화염 반경 길이의 변화가 거의 일정한 진폭을 가지며 진동을 하고 있다. 조화모드는 약 0.2Hz에서 1.0Hz의 주기성을 가지며 나타낸다. Fig. 5 (c)에서 화염은 주기성을 가지며 진동을 하나 시간이 지날수록 진폭이 감소하고 주기성을 잃는 감쇠 모드를 나타내고 있다. Fig. 5에서 도시한 예지화염의 동적 거동은 Buckmaster와 Zhang이 제안한 것과 매우 유사하지만 직접 가시화로 삼지화염(Triple Flame) 구조는 나타나지 않았다.[22] 앞서 언급했듯이 저신장율 대향류 확산 화염의 성장모드는 화염소화 직전에서만 관찰되었다. $V_r=3$ 에서 전체 신장율에 따른 각 소화조건에서의 화염소화 거동은 Fig. 6에 도시하였다. $a_0=10 \text{ s}^{-1}$ 에서 화염은 상대적으로 큰 진폭을 가지며 진동하였고, 전체 신장율이 증가할수록 성장모드의 진폭이 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 $a_0=25 \text{ s}^{-1}$ 에서는 화염이 진동하지 않고 빠르게 소화한다. 화염 길이는 전체 신장율이 증가할수록 커지고 있고 화염 진동은 높은 신장율에서 안정화되는 것을 확

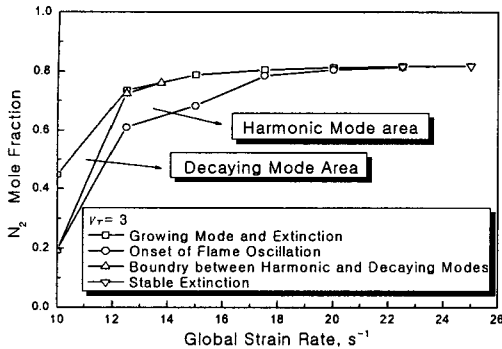


Fig. 7 Flame stability map and their flame oscillation modes with global strain rate; $V_r=3$.

인할 수 있다. 이것은 식(2)에서 알 수 있듯이 화염 길이 증가로 인한 반경 방향의 열손실이 줄어들기 때문이다. Fig. 7은 화염 안정화 선도와 진동모드를 전체 신장율에 따라 나타낸 그림이다. 여기서 사각형은 성장모드로 진동하다 결국 소화되는 조건을 의미한다. 원은 화염 진동의 시작 조건을 나타내고 삼각형은 감쇠모드와 진동모드 영역의 경계 조건이다. Fig. 6에서와 같이 전체 신장율 22 s^{-1} 이하의 화염 소화조건에서 성장모드로 진동하고 결국 소화된다. 감쇠모드는 전체 신장율 10 s^{-1} 에서 물분율 0.192-0.448 사이에서 관찰되고, 물분율 0.192에서 감쇠모드와 조화모드가 동시에 관찰되었다. 조화모드 영역은 전체 신장율이 증가할수록 확장되었고, 감쇠모드는 $a_g=14 \text{ s}^{-1}$ 이상에서는 나타나지 않았다. 조화모드의 영역은 $a_g=15 \text{ s}^{-1}$ 이상부터는 신장율에 따라 감소함을 알 수 있다. 비교적 높은 전체 신장율인 22 s^{-1} 부터 화염의 진동불안정성은 관찰되지 않았다. Fig. 6에서 확인했듯이 높은 전체 신장율의 화염 안정화는 화염 길이 증가로 인한 반경 방향의 열손실 감소에 기인한다. 본 연구에서 수행된 진동 불안정성에 대한 시작 조건 Le_r 수는 $a_g=10 \text{ s}^{-1}$ 에서 0.7912임을 주목해야 한다. 기존 연구결과보다 진동 불안정성이 나타나는 임계 Le_r 수가 현저히 낮아진 점으로부터 측면 열손실이 화염 진동에 미치는 영향을 확인하였다.[15-17] 또한, 기존 연구들은 화염 스트레치에 의한 소화 조건 근처에서 수행했지만[15-17] 본 연구에서는 저신장율의 소화조건 근처에서 과도한 반경 방향의 열손실과 복사 열손실에 의해 예지화염의 진동불안정성이 나타날 수 있다는 것을 제시하였음을 주목해야 한다. 저신장율 화염의 경우 부력의 효과는 고신장율에서 보다 현저하다. 본 연구에서 수행된 실험결과로는 상세한 논

의에 어려움이 있다. 그러나 부력은 국부적인 신장율을 증가시키는 역할을 하게 되어 Fig. 3에 보이는 바와 같이 저신장율 영역에서는 화염을 안정화 시키는 효과를 갖게 한다. 부력의 효과는 Le_r 측면에서 열확산율의 변화가 없다고 가정하면 물질 전달율을 증가시키는 역할을 하고, 유동속도의 증가에 의한 Peclet Number의 상승으로 화염 안정화에 기여한다.[6,15] 이상에서 논의된 바와 같이 부력의 효과는 저신장율 화염을 안정화 시키려는 경향을 갖게 되더라도 불구하고 과도한 측면 전도 열손실 효과로 인해 화염진동이 발생한다는 점을 주목하여야 한다. 결과로서 저신장율 대향류 확산화염의 소화 및 진동 불안정성은 Le_r 수 뿐만 아니라 열손실에 의해 중대한 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4. 결론

메탄/질소-공기 저신장율 대향류 확산화염에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 화염 소화 조건 근처에서 전체 신장율과 Le_r 수에 따른 예지화염의 동적 거동을 관찰하였다. 화염 길이는 반경 방향의 열손실과 밀접한 관계가 있고 화염 소화와 진동 불안정성에 중대한 영향을 준다. 저신장율 화염의 소화 임계 물분율은 속도비가 증가할수록 감소하였다. 이는 복사 열손실 뿐만 아니라 속도비 증가로 인한 반경 방향으로의 측면 열손실의 증가에 기인하며, 이것은 반경방향의 화염 길이 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. 또한, Shon 등이 보고한 비교적 낮은 물질 전달율을 상쇄하는 유동속도에 의한 안정화와 일치한다.[6] 예지화염의 진동 모드는 성장모드, 감쇠모드 그리고 조화모드로 요약된다. 성장모드는 화염의 진폭이 소화가 일어나기 전까지 증가하였고, 높은 전체 신장율에서는 더 이상 관찰되지 않았다. 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. 본 연구에 수행된 화염 불안정성이 나타나는 임계 Le_r 수는 0.7912이고, 이 값을 기존연구와 비교했을 때 매우 낮다는 점이 주목된다.[15-17] 상대적으로 작은 크기의 버너직경에서 반경 방향의 열손실이 불안정성이 나타나는 임계 Le_r 수를 낮춘 것이다.[5-7] 저신장율 대향류 확산화염의 화염 소화와 예지화염의 진동 불안정성은 복사

열손실뿐만 아니라 측면방향의 전도 열손실에 의해 중대한 영향을 받는다.

후 기

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

참고문헌

- [1] Margolis, S. B., 1980, "Bifurcation phenomena in burner-stabilized premixed flames," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 22, pp. 143-149.
- [2] Bucmaster, J. D., 1983, "Lecture on mathematical combustion," *SIAM*, Vol. 43, pp. 1335-1349.
- [3] Bucmaster, J. D., 2002, "Edge-flames", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.28, pp.435-475.
- [4] Kirkby, L. L., Schmitz, R. A., 1996, "An Analytical Study of the Stability of a Laminar Diffusion Flame", *Combust. Flame*, Vol. 10, pp. 205-220.
- [5] Julin, G., Calvin, p., 1979, "Linear Stability Analysis of Non-adiabatic Flames: Diffusional-Thermal Model," *Combust. Flame*, Vol. 35, pp. 139-153.
- [6] 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.
- [7] Kukuck, S., Matalon, M., 2001, "The Onset of Oscillations in Diffusion Flames," *Combust. Theory Modelling.*, Vol. 5, pp. 217-240.
- [8] Im, H. G., Chen, J. H., 1999, "Structure and Propagation of triple flames in Partially Premixed Hydrogen-Air Mixtures," *Combust. Flame*, Vol. 119, pp. 436-454.
- [9] Lyons, K. M., Watson, K. A., Carter, C. D., Donbar, J. M., 2005, "On flame holes and local Extinction in lifted-jet diffusion flames," *Combust. Flame*, Vol. 142, pp. 308-313
- [10] Lee, B. J., Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 109, pp. 163-172.
- [11] Lee, J., Won, S. H., Jin, S. H., Chung, S. H., 2003, "Lifted flames in laminar jets of propane in coflow air," *Combust. Flame*, Vol. 135, pp. 449-462.
- [12] Upatnieks, A., Driscoll, J. F., Rasmussen, C. C., Ceccio, S. L., 2004, "Liftoff of Turbulent Jet Flames-Assessment of Edge Flame and Other Concepts using cinema-PIV," *Combust. Flame*, Vol. 138, pp. 259-272.
- [13] Ross, H. D., 1994, "Ignition of and flame spread over laboratory-scale pools of pure liquid fuels," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 20, pp. 17.
- [14] Hartly, L. J., Dold, J. W., 1991, "Flame propagation in a nonuniform mixture: analysis of a propagating triple-flame," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 80, pp. 23-46.
- [15] Short, M., Liu, Y., 2004, "Edge-flames Structure and Oscillations for Unit Lewis Numbers in a Non-premixed Counterflow," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 8, pp. 425-447.
- [16] Kurdyumov, V. N., Matalon, 2004, "Dynamics of an edge flame in a mixing layer," *Combust. Flame*, Vol. 139, pp. 329-339.
- [17] Daou, R., Daou, J., Dold, J., 2004, "The effect of heat loss on flame edge in a non-premixed counterflow within a thermo-diffusive model," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 8, pp. 683-699.
- [18] Santoro, V. S., Liñán, A., Gomez, A., 2000, "Propagation of edge flames in counterflow mixing layer : experiments and theory," *Proc. Combust. Inst*, Vol. 28, pp. 2039-2046.
- [19] Shay, M. L., Ronney, P. D., 1998, "Nonpremixed edge flames in spatially varying straining flows," *Combust. Flame*, Vol. 112, pp. 171-180.
- [20] Carnell Jr, W. F., Renfro, M. W., 2005, "Stable negative edge flame formation in a counterflow burner," *Combust. Flame*, Vol. 141, pp. 350-359.
- [21] 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.
- [22] Bucmaster, J. D., Zhang, Y., 1999, "A Theory of Oscillating Edge-flames," *Combust. Theory Modelling.*, Vol. 3, pp. 547-565.

- [23] Chellian, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, M. D., Williams, F. A., 1990, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-nitrogen Diffusion Flames," Proc. Combust. Inst, Vol. 23, pp, 503.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Bowman, C. T., Hanson, R. K., Davison, D. F., Gardiner, W. C., Lissianski, V., Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., Goldenberg, M., 1999, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- [27] Kee, R. J., Rupley, F. M., Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II," Sandia Report SAND 89-8009B.
- [28] Kee, R. J., Dixon-Lewis, g., Warnatz, J., Coltrin, M. E., Miller, J. a., 1994, " A Fortran Code Package For the Evaluation of Gas-phase Multicomponent transport," Sandia Report SAND86-8246.
- [29] Bucmaster, J. D., 2001, "Large-Lewis-Number instabilities of model edge-flames," *Combust. Flame*, Vol. 127, pp. 2223-2233.