

열손실에 의한 확산-열 불안정성의 가속화

박준성* · 박 정** · 이기만* · 김정수* · 김성초*

Acceleration in Diffusive-thermal Instability by Heat Losses

June Sung Park, Jeong Park, Kee Man Lee, Jeong Soo Kim and Sungcho Kim

ABSTRACT

The dynamic behaviors of counterflow non-premixed flame have been investigated experimentally to study effects of heat losses on edge flame oscillation, which result from the advancing and retreating edge flame motion of outer flame edge at low strain rate flame. For low strain rate flame, lateral conduction heat loss in addition to radiation heat loss could be more remarkable than the others. Oscillatory instabilities appear at fuel Lewis number greater than unity. But excessive lateral conduction heat loss causes edge flame instability even at fuel Lewis number less than unity. The dramatic change of burner diameters in which flame length is an indicator of lateral conduction heat loss was applied to examine the onset condition of edge flame oscillation and flame oscillation modes. Especially, extinction behaviors quite different from the previous study were observed.

Key Words : Edge Flame, Flame Oscillation, Global Strain Rate, Lateral Conduction Heat Loss, Lewis Number.

1. 서 론

화염의 진동 불안정성(Oscillatory Instability)은 1차원 확산화염에서 발생할 수 있고, Kirkby 등은 1차원 평면 확산화염에서 수치 해석적 연구를 통해 충분히 큰 Lewis Number와 열손실에 의해 진동 불안정성이 발생함을 보고 한바 있다.[4] Lewis Number(이하 Le 수)는 열확산에 대한 질량확산의 비로 정의되는 무차원수이다. 이때 Le 수의 변화에 따라 나타나는 화염불안정성을 확산-열 불안정성(Diffusive-Thermal Instability)이라고 한다. 충분히 큰 Le 수를 갖는 1차원 예혼합화염에서도 화염 진동불안정성이 나타날 수 있고 열손실에 의해 영향을 받는다.[1,2] Shon 등은 비선형 수치해석을 통해 Le 수가 1보다 큰 확산화염에서 정상상태 소염조건에 접근하기 전 맥동 불안정성으로 인한 진동이 발생하고

결국 소화됨을 보였고, Le 수가 1보다 크지 않더라도 복사열손실(Radiative Heat Loss)에 의해 진동불안정성이 나타남을 보고 한바 있다.[6,30] 한편, Le 수가 1보다 매우 작게 되면 셀 불안정성(Cellular Instability)이 발생할 수 있다. 셀 불안정성은 Jacono에 의해 Le 와 초기혼합 강도에 의한 셀 화염의 특성을 실험적으로 구현된바 있다.[29]

에지화염(Edge Flame)혹은 부분 예혼합화염(Partially Premixed Flame)은 예혼합화염과 확산화염의 중간 범주에 속하는 것으로 과농 예혼합 화염과 희박 예혼합 화염이 만나는 삼중점을 시작으로(Triple Point) 길게 이룬 당량 혼합 비율면을 따라 확산화염(Trailing Diffusion Flame)이 분포되는 구조로 되어있다. 삼중점에서 화염 강도는 가장 강하며 당량비가 1인 지점 혹은 전파속도가 최대인 지점을 따라 전파한다. 에지화염의 중요한 특징은 주어진 조건에 따라 유동장과 삼중점이 균형을 지점으로 이동하며 이때 나타나는 삼중점의 움직임을 화염 변위속도(Flame Displacement Velocity)로 대표하여 나타낼 수 있다. 또한, 삼중점의 전파속도가 양의 값을 갖게

* 순천대학교 기계우주항공공학부

† 부경대학교 기계공학부, jeongpark@pknu.ac.kr

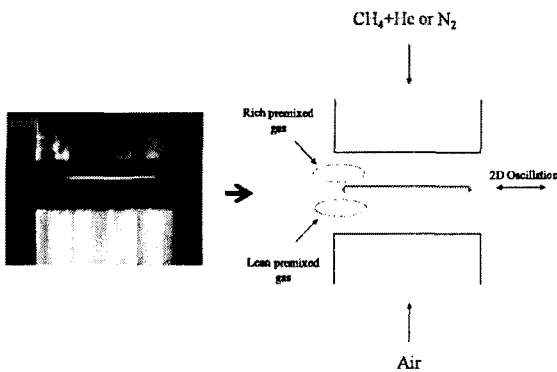


Fig. 1 Representative direct photo and schematic diagram of low strain rate counterflow flame configuration.

되면 미연가스로 전파하는 점화파(Ignition Wave), 음의 값을 갖게 되면 기연가스로 퇴각하는 실패파(Failure Wave)가 나타난다. 예지화염은 Flame Hole[8,9], 부상화염[10-12], Fuel Bed에서의 Spreading Flame[13], 2차원 혼합층에서의 점화화염[14], 그리고 양초화염[15] 등에서 관찰되었다. 예지화염의 거동특성에 대한 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

Ruetsch 등은 예지화염의 전파속도가 혼합분율(Mixture Fraction)의 구배가 증가할수록 감소하는 것을 보고한바있고[27], Im과 Chen은 직접 수치 모사(DNS)를 통해 수소-공기 확산화염에서의 스칼라 소산율(Scalar Dissipation Rate)과 화염 곡률(Flame Curvature)의 함수로서 화염변위속도의 특성을 연구한바 있다.[8] Cha와 Ronney는 대항류 슬롯-젯(Counterflow slot-jet) 버너에서 확산화염의 전파특성을 체계적으로 연구하였다.[30] 1보다 낮은 Le 수에서 1보다 큰 경우 보다 높은 화염 전파속도(Flame Propagation Speed)나타남을 보고하였다. 이는 Le 수의 감소에 따라 열확산에 의한 에너지 손실보다 물질확산에 의한 화학에너지 증가로 예지화염의 강도가 증가되어 예지화염의 전진 특성이 강해지기 때문이다.

화염 불안정성은 산화제나 연료측의 1보다 큰 Le 수가 필요로 하고 용적 열손실(Volumetric Heat Loss)은 진동 불안정성을 유발시킬 뿐만 아니라 그 정도를 증가시킬 수 있다.[15,16] 또한 이론당량(Stoichiometry) 조건보다 크게 멀어질 경우 불안정성이 나타날 수 있다. 단위 Le 수에서도 진동 불안정성은 나타날 수 있고, 특히 예지화염을 통해 나타나는 진동 불안정성의 시작 조건은 혼합강도(Mixture Strength), 유동속도, 복사열손실에 의해 영향을 받는다는 것을 확인한

바 있다.[15-17] Bucmaster와 Zhang에 의하면 1차원 S-curve(여기서 input은 Damköhler Number, response는 Temperature가 될 수 있음)의 Upper Branch에서 정상상태의 소염조건에 도달하기전 NSP(Neutral Stable Point)에서 시작되는 비정상상태의 해를 확인하였고, 2차원 화염에 대한 계산을 통해 더 높은 Damköhler Number에서 NSP가 위치한다고 주장하였다. 실제화염에서 진동불안정성은 보다 낮은 신장율의 화염 소화 조건 근처에서 발생할 수 있음을 설명할 수 있다.[22]

한편, 대항류 화염구조에서 Santoro등은 소화 Damköhler Number 근처에서 약한 섭동(Perturbation)을 이용하여 예지화염을 통해 나타나는 Flame Hole의 생성, 성장, 복원을 잘 묘사하였고,[18] Shay와 Roney는 축 기준으로 기울어진 대항류버너에서 국부적으로 의도된 신장율(Strain Rate)을 갖는 예지화염에 대해서 연구하였다.[19] Carnell과 Renfro는 화염 외부가 소화될 만큼의 높은 질소 장막유동(Guard Flow) 속도로 안정된 음의 예지화염(Stably Negative Edge Flame)을 형성하였다.[20] 그러나 이 연구들은 화염 스트레치(Flame Stretch)에 의해 생성되는 예지화염의 거동임을 주목해야 한다. Park등은 대항류 확산화염에서 저 신장율과 고 신장율에서 화염소화 거동의 실험과 2차원 직접수치모사(Direct Numerical Simulation)를 통해 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.[21] 고 신장율에서 화염은 화염 중심부에서 소화되기 시작하고 전체화염에 대해 빠르게 소화현상이 일어났으며, 저 신장율 화염 소화는 화염의 바깥부분에서 시작하여 화염중심부로 소화현상이 진행되며 동시에 화염길이가 감소하였다. 또한, 수치해석을 통해 저 신장율 화염소화는 복사 열손실뿐만 아니라 반경방향의 전도 열손실이 화염소화에 중대한 영향을 미친다는 것을 확인하고, 저 신장율에서의 화염의 길이가 측면 전도 열손실(Lateral Conduction Heat Loss)의 척도임을 밝힌바 있다.

최근 Park등은 실험적 연구를 통해 저 신장율 대항류 확산화염에서 화염의 진동불안정성은 복사 열손실뿐만 아니라 측면 전도 열손실 중대한 영향을 미친다는 것을 보인바 있다.[34] 화염 소화 조건 근처에서 감쇠, 조화, 성장모드의 화염진동 불안정성을 관찰하였고 특히 성장 모드는 화염소화 조건에서 만 관찰되었다. 본 연구는 Park등이 연구한 대항류 버너의 직경(26.0mm)보다 작은 18.0mm의 버너에서 연구를 수행하였다. 비교적 작은 직경의 버너에서의 작은 화염은 26mm의 버너 직경에서 보다 전체 화염에 더 큰 전도 열손실을 받게 된다. 본 연구는 연료의 희석제를 질소와 헬륨을 사용함으로써 화염소화 조

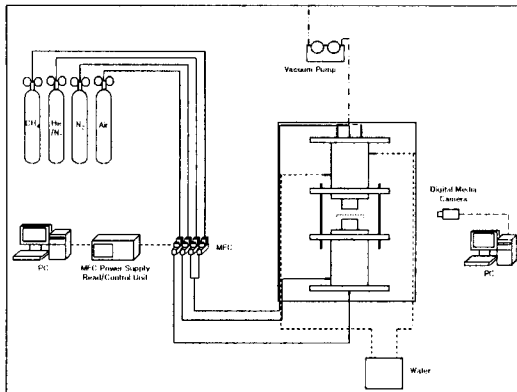


Fig. 2 Schematic diagram of counterflow burner and flow system.

건 근처에서의 Le_f 수 1보다 작게 그리고 크게 제어함으로써 성장모드의 진동불안정성의 거동 특성을 보고하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Figure. 2 는 실험에 사용된 대향류버너와 유로계 시스템에 대한 개략도이다. 대향류버너는 스테인리스 스틸(Stainless Steel)로 제작되었으며, 버너 내경은 18mm, 상부와 하부버너의 노즐 간격은 15mm로 유지하였다. 부력에 의한 노즐의 과열 방지와 온도 경계조건의 유지를 위해 상부 버너에 냉각수를 순환 시켰다. 또한 연소 후 발생하는 배기가스는 진공 펌프를 통해 외부로 배출 시켰다. 덕트 내부에는 미세한 메시 스크린(Mesh Screen)을 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동속도를 갖게 하였다. 외부 화염 교란을 막고 후류에 의한 외측 화염을 제거하기 위해 질소(N_2)를 장막 유동(Guard Flow)으로 사용하였고, 하부 버너의 외측 노즐에서 체적유량 7 L/min로 전 실험 범위에서 일정하게 공급하였다. 대향류 화염에서 화염대는 일반적으로 산화제측에 형성된다. 화염대가 노즐에 부착되는 것을 막기 위해 연료를 상부 노즐에서 공급하였고, 산화제는 하부 노즐에서 공급하였다. 연료는 99.95%의 고 순도 메탄(CH_4)을 사용하였으며, 희석제(Diluent)로는 고 순도 질소(N_2 , 99.99%)와 고순도 헬륨(He, 99.99%)을 각각 사용하였다. 질소는 소화조건 근처에서의 연료측 혼합물의 물분율에서 Le_f 수를 1보다 낮게 할 수 있어 과도한 열손실에 의한 불안정성의 관찰을 할 수 있을 것을 기대하고 선택하였으며, 헬륨은 Le_f 수를 1보다 높게 할 수 있어 Le_f 수에 따라 나타나는 불안정성의 거동을 명확히 할 수 있을 것으로 기대되

었기 때문이다. 또한 고 순도(99.99%) 공기를 산화제로 사용하였다. 각각의 가스탱크에 연결된 연료, 산화제 및 희석제는 질량 유량제어기(Mass Flow Controller)를 통해 제어되며, 질량 유량 제어기에 전원공급 및 제어를 하는 유닛(FM-30VE)은 PC를 통해 연료측과 산화제측을 동시에 조절 할수 있다. 실험은 전체 신장율(Global Strain Rate)을 일정하게 유지시키면서 희석제의 공급 유량을 증가시키면서 실행하였고, 일련의 모든 실험과정은 유량조절 프로그램을 통해 제어 하였다. 전체 화염 신장율은 Chelliah 등이 제안한 식을 수정하여 다음과 같이 정의 된다.[23]

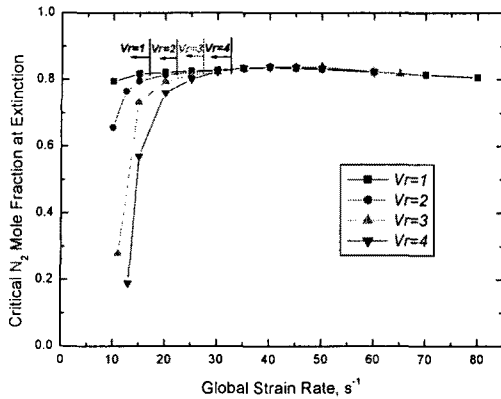
$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + Vr \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}} \right) \quad (1)$$

$$Vr = V_f / V_a$$

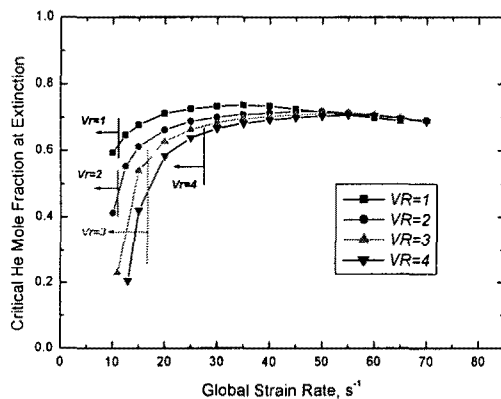
여기서 Vr 은 연료와 산화제측 버너 덕트 출구에서의 속도비(Velocity Ratio)를 의미한다. V 와 ρ 는 각각 버너 덕트 출구에서의 속도와 밀도를 나타내고, L 은 버너 덕트 노즐 간 거리를, 아래 첨자 f 와 a 는 각각 연료와 산화제를 의미한다. 본 실험에서 전체신장율의 범위는 5 s^{-1} 에서 80 s^{-1} 범위에서, 속도비는 1, 2, 3 그리고 4 에서 수행되었다. 화염의 동적 거동은 SONY사의 디지털 미디어 카메라(Digital Media Camera, HDV 1080i)를 이용하여 Frame rate 30 Hz, 셔터 속도(Shutter Speed) 1/120 sec로 실시간 촬영되었고, PC를 통해 분석하였다.

3. 실험결과 및 논의

Figure. 3 은 전체 화염 신장율과 속도비(Vr) 따른 화염 소화의 임계 물분율을 (a) 질소 와 (b) 헬륨 실험에 대해 각각 나타낸 그림이다., Fig. 3(a)에서 보이는 바와 같이 실험에서 얻어진 $Vr=1$ 에서의 화염 소화 임계물분율의 최대값(Turning Point)은 전체 신장율 30 s^{-1} 에서 나타나고 있고, 이는 속도비가 증가 할수록 더욱 높은 신장율에서 나타나고 있음을 확인할 수 있다.[28] 각 속도비에서 최대값 이후의 전체 신장율에서 소화 임계 물분율은 모든 속도비에서 거의 일치하고 있고 있으나, 저 신장율의 임계 소화 물분율은 Vr 이 증가할수록 낮아지고 있는 것을 확인할 수 있다. 최대값 이전의 신장율에서의 화염 소화 현상은 복사열손실에 기인하고, 이후의



(a)



(b)

Fig. 3 Critical mole fraction of fuel stream at extinction with global strain rate for diluent (a) N₂ and (b) He.

소화현상은 화염 스트레치(Stretch)에 의해 발생한다.[24]

측면 전도 열손실의 척도인 반경방향의 화염길이는 전체 신장율이 낮아질수록, 속도비가 증가할수록 감소한다. 즉, 과도한 전도 열손실이 화염 소화 임계 물분율을 감소시키는 요인임을 잘 보여주고 있고, 이는 다음과 같은 식으로 잘 묘사될 수 있다.

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

여기서 l_f 는 반경 방향의 화염길이이다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 화염길이가 작아질수록 반경 방

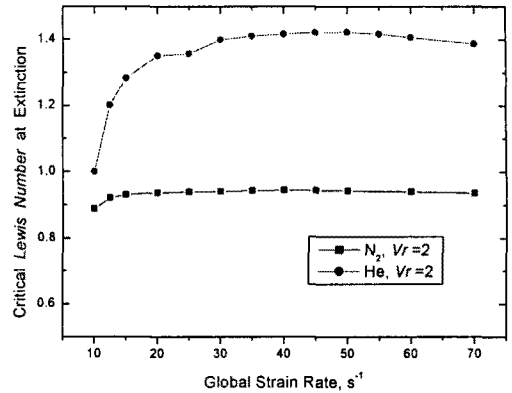
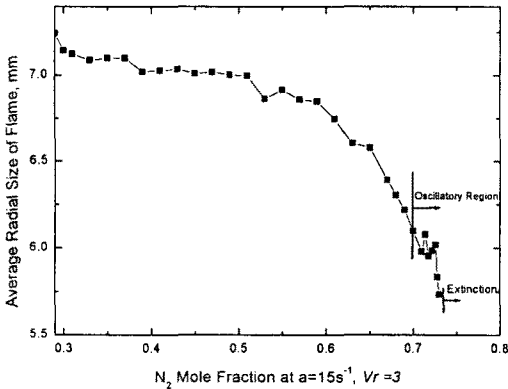


Fig. 4 Critical Lewis Number of fuel stream at extinction with global strain rate at Vr=2 for diluent N₂ and He.

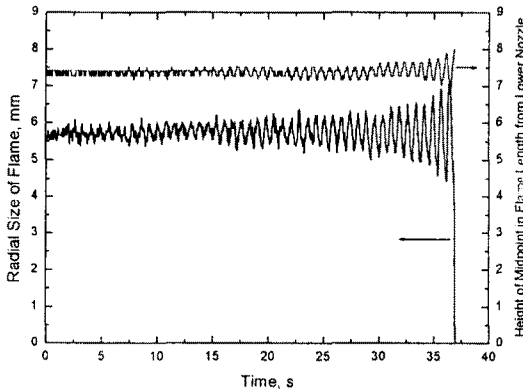
향의 열전달은 증가하게 된다. 속도비에 따른 화염 소화 임계 물분율의 차이는 전체 신장율이 증가할수록 줄어들고 있다. 전체 신장율이 증가할수록 화염의 두께는 줄어들면서 복사 열손실이 작아지고, 화염길이의 증가로 인한 반경 방향의 전도 열손실이 감소하기 때문이다.

Park등이 실험한 26mm의 버너에서의 결과와 비교하였을 때 저 신장율에서 모든 속도비에서 약 0.03에서 0.05정도 낮은 수치이다.[28] 또한 각 속도비에서의 최고값(Turning Point)이 더 높은 신장율에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 급격한 버너 노즐 크기의 변화로 인한 작은 크기의 화염이 상대적으로 화염 전체에 더 큰 전도열손실이 발생되었기 때문이다. Fig. 3에서 굵은 화살표는 화염 소화점에서 나타나는 화염진동(Flame Oscillation)의 전체 신장율에 의한 경계를 나타내고 있다. Park등은 연구에서 속도비가 1일 때 모든 신장율에서 화염진동이 관찰되지 않았고 속도비 2 와 3의 조건에서 매우 한정적으로 화염진동이 나타남을 보고한바 있다. 그러나 본 연구에서는 모든 속도비 조건에서 화염진동이 발생한 것이 관찰되었다. 상대적으로 작은 크기의 화염이 보다 더 큰 전도 열손실에 의해 화염진동을 일으킬 수 있는 속도비와 전체신장율의 조건을 확장 시킨 것이다[28]

Fig. 3(b)에서 헬륨을 희석제로 사용할 경우 질소를 사용할 경우보다 소화 임계 물분율이 매우 낮게 나타나고 있다. 질소를 희석할 경우보다 더 높은 열확산율(Thermal Diffusivity, α)과 Le_f 수($Le_f > 1$)를 갖는 메탄/헬륨-공기 화염은 열에너지(Thermal Energy)를 발생시키는 화학에너지의 공급과 열확산율의 불균형 의한 자체 불안



(a)



(b)

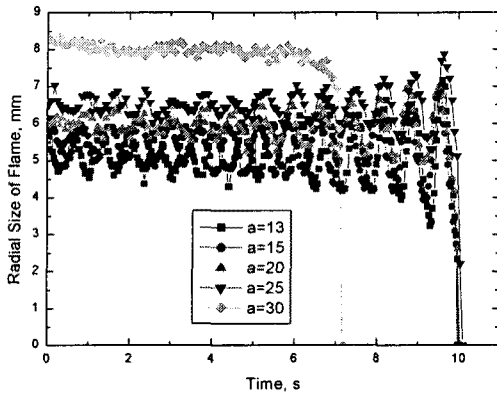
Fig. 5 (a) Average radial size of flame with various nitrogen mole fraction, (b) Temporal variation of the radial position of flame edge and height of midpoint in entire flame length from lower nozzle at extinction ; $Vr=3$, $a=15\text{ s}^{-1}$, $X_{N_2}=0.732$.

정성을 갖게 된다. 또한 Cha와 Ronney의 실험에서 $Le_f > 1$ 의 경우 화염강도의 대표적인 척도가 될 수 있는 화염 전파속도가 $Le_f < 1$ 의 경우보다 더 낮아지는 것을 보인바 있다.[30] Fig. 3(b)에서 화염진동이 나타나는 전체 신장율의 경계는 속도비가 증가할수록 증가하고 있으나 질소 희석조건에 비해 매우 불규칙적인 것을 확인할 수 있다.

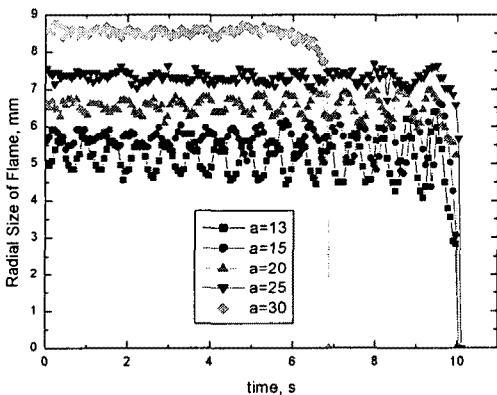
Fig. 4에서는 질소와 헬륨을 희석제로 사용한 경우에 대해 속도비 2에서 소화 임계 물분율의 Le_f 수를 나타낸 그래프이다. 화염 불안정성은 Le_f 수가 1보다 충분히 큰 경우에 나타난 것이

알려져 있지만, 기존 연구에서 $Le_f = 1$ 인 경우조차도 열손실이 큰 경우 화염진동이 발생함을 보인바 있다.[15-17] 그림에서 질소희석 Le_f 수의 범위는 0.88에서 0.94이다. 즉 과도한 열손실이 진동 불안정성을 유발할 수 있는 임계 Le_f 수를 낮게 한 것을 주목해야 한다.[1-7] 질소희석의 화염소화에서의 임계 Le_f 수는 거의 모든 전체 신장율에서 큰 변화가 없는 반면 헬륨을 희석하였을 경우 저 신장율에서 Le_f 수의 변화가 급격한 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 3(a)에서 보이는바와 같이 질소희석의 모든 속도비에서의 불안정성이 나타나는 전체 신장율의 경계가 속도비에 따르는 화염크기 감소 의한 측면 전도 열손실에 의해 의존함을 보이고 있는 것이다. 그러나 Fig. 3(b)에서 불안정성이 나타나는 경계는 속도비에 따라 증가하나 질소 희석의 경우에 비해 속도비에 따르는 경향성이 현저하게 떨어짐이 나타나고 있다. 이는 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 저 신장율에서의 헬륨희석 연료의 Le_f 수의 변화가 속도비에 따르는 측면 전도 열손실의 변화에 비해 크게 변하기 때문이다.

Figure. 5에서 (a)는 속도비 3과 전체 신장율 15 s^{-1} 에서 연료측 반응물의 질소 희석율에 따르는 반경방향의 평균화염 길이를 각 희석조건에서 5.7초간 시간 평균하여 나타낸 그림이고, (b)는 소화조건에서 방경방향의 화염길이와 하부 노즐에서부터 화염 중심까지의 높이를 시간에 따라 나타낸 그림이다. Fig. 5(a)에서 희석율 0.65까지는 화염 평균 길이는 희석율에 따라 비교적 완만하게 감소하고, 희석율 0.65 이상부터 화염길이 급격히 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 저 신장율의 대표적인 조건인 전체 신장율 15 s^{-1} 에서의 화염 소화현상은 복사 열손실외에 반경 방향의 전도 열손실이 중요한 영향을 받는다.[21,24,28] 즉, Fig. 5(a)에서 화염 소화조건 근처에서의 화염 길이의 급격한 감소는 과도한 측면 전도 열손실이 화염강도를 약하게 하는 것을 의미한다. 희석율 0.7이상부터 화염은 평균 화염길이의 심한 변동과 함께 화염 진동이 시작되고 질소 희석율 0.732에서 성장모드로 진동하다 결국 소화된다. Fig. 5(b)에서 반경방향의 화염길이는 약 1.6 Hz의 주기성을 가지며 진폭은 소화 직전까지 증가 하였다. Fig. 5에 도시한 예지화염의 동적거동은 Bucmaster와 Zhang이 제한한 것과 매우 유사하지만 직접 가시화를 통한 이미지 분석에서 삼지화염(Triple Flame)의 구조는 나타나지 않았다.[22] 앞에서 언급하였듯이 저 신장율 대향류 확산화염의 성장모드는 화염소화 직전에서만 관찰되었다. Fig. 5(b)에서 하부 노즐에서부터 화염 중심까지의 높이는 반경 방향의 화염길이의 변화와 같은 주기로 진동하고, 각 주기에서



(a)



(b)

Fig. 6 Temporal variation of the radial position of flame edge at extinction for diluent (a) N_2 and (b) He ; $V_r = 4$.

화염길이가 최대일 때 높이는 최소가 되며 성장 모드로 진동하다 결국 소화된다.

Figure. 6 는 $V_r=4$ 에서 전체 신장율에 따른 각 화염 소화 조건에서의 성장모드의 동적거동을 (a) 질소 희석 과 (b) 헬륨 희석의 경우에 대해 나타낸 그래프이다. 전체 신장율 $12s^{-1}$ 이하에서 화염은 점화 되지 않았다. Fig. 6(a)에서 전체 신장율 $13s^{-1}$ 에서 화염은 상대적으로 큰 진폭을 가지며 진동하였고, 전체 신장율이 증가 할수록 진폭이 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 비교적 높은 전체 신장율 $30s^{-1}$ 에서 화염은 더 이상 진동하지 않고 빠르게 소화한다. 이는 반응 지역으로의 강한 대류유동이 물질 전달을 증가시켜 화염을 안정화시키는 역할을 하기 때문이다.[6] Fig. 6에서 화염은 약 1.6Hz의 주기성을

갖는다. Park등이 연구한 26mm의 직경을 갖는 버너에서의 1.0Hz보다 빠른 주기를 나타내고 있다. 이는 상대적으로 큰 측면 전도 열손실이 화염 진동 불안정성을 가속화시키기 때문이다.[28] 화염 길이는 전체 신장율이 증가할수록 증가하고 있는 것을 알 수 있고, 안정된 조건인 전체 신장율 $30s^{-1}$ 에서는 화염길이가 급격히 증가하고 있다. Fig. 6(b)에서 헬륨을 희석제로 사용한 경우 질소희석의 경우보다 모든 소화 조건에서 화염진동의 진폭이 작은 것을 확인 할 수 있다. 본 실험에서의 직접 가시화를 통한 에지화염의 동적거동의 속도는 화염 에지의 삼중점 근처의 국부적 유동속도와 삼중점의 전파속도의 차이로 나타나는 화염 변위속도(Flame Displacement Speed)이다. 즉, Fig. 6 (a) 와 (b) 실험결과에서 나타난 화염변위속도 혹은 진폭의 차이로 삼중점의 전파속도의 계산 및 직접 비교는 어려운 점이 있다. 따라서 향후 연구를 통해 Le_f 수에 따르는 화염 불안정성에 대한 동적거동 특성에 대해 연구할 예정이며 유동가시화를 통해 이를 명확히 할 계획이다. 본 연구는 저 신장율 대향류 확산화염에서 화염소화 조건 근처에서의 과도한 반경방향의 열손실과 복사 열손실에 의해 에지화염의 진동불안정성 나타남을 제시 하였다. 저 신장율의 화염의 경우 부력의 효과는 고신장율 보다 현저하다. 본 연구에서는 유동자체에서 일어나는 부력의 효과를 최대한 배제하기 위해 비교적 낮은 밀도를 갖는 연료를 상부노즐에서 분사하였고, 속도비 ($V_r=V_f/V_a$)를 높여 상부노즐의 과열과 유동속도를 높이며 실험을 수행 하였다. 그럼에도 불구하고 부력의 효과는 정상 중력장에서 존재 하며 해석을 어렵게 한다. 수행된 실험결과로 상세한 논의는 어려움 있다. 그러나 부력은 국부적인 신장율의 증가는 역할을 하게 되며, 저 신장율에서 화염에서 물질 전달율을 증가시켜 화염을 안정화시키는 역할을 한다. 또한 Peclet Number의 상승으로 화염안정화에 기여한다.[6.15] 이상의 부력의 의한 안정화에도 측면 열손실과 복사 열손실에 의해 에지화염의 진동불안정성이 발생하며 [28], 버너노즐 크기의 급격한 변화로 인한 화염길이의 극단적 감소가 진동 불안정성이 유발되는 조건을 확장 시키는 것을 주목하여야 한다.

4. 결론

메탄/질소/헬륨-공기 저 신장율 대향류 확산화염에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 화염 소화 조건 근처에서 전체 신장율과 Le_f 수에 따른 에지화염의 동적 거동 및 진동 불안정성이 발생하

는 조건에 대해 관찰 하였다. 화염길이는 반경 방향의 열손실과 밀접한 관계가 있고[21,28], 화염 소화와 진동 불안정성에 중대한 영향을 준다. 저 신장을 화염의 소화 임계 물분율은 속도비가 증가할수록 감소하였고, 이 효과는 전체 신장이 증가할수록 감소하였다. 이는 속도비 증가로 인한 화염 반경 방향의 측면 전도 열손실에 기인한다. Park 등의 연구보다 작은 버너 직경 18mm에서의 화염길이의 급격한 변화는 화염 소화 임계 물분율을 더 낮게 하였고, 화염 진동이 일어나는 속도비에 따르는 전체 신장의 경계를 확장 시키는 역할을 하였다.[28] 또한 각 화염 소화점에서의 성장모드의 주기가 증가하는 것을 확인하였다. 이는 상대적으로 큰 측면 전도 열손실이 화염 진동 불안정성을 가속화시키기 때문이다.[1,2] 질소 희석조건에서의 속도비에 따르는 화염 불안정성의 전체 신장의 경계는 거의 일정한 전체 신장의 차이로 증가하나, 헬륨의 경우에는 불규칙적으로 증가하는 것을 확인 하였다. 이는 저 신장에서 소화점에서 각 희석제의 혼합물의 Le_f 수의 증가정도에 의존함을 확인할 수 있었다. 결과로서 저 신장을 대향류 확산 화염에서 에지화염의 진동 불안정성은 Le_f 수 뿐만 아니라 열손실에 중대한 영향을 받는다. 또한 복사 열손실외에 화염 크기에 밀접한 관계가 있는 측면 전도 열손실이 불안정성을 일으키는 조건에 큰 영향을 미치고 있다.

후 기

이 논문은 2007년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원됨.

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] Bucmaster, J. D., 2001, "Large-Lewis-Number instabilities of model edge-flames," *Combust. Flame*, Vol. 127, pp. 2223-2233.
- [26] Sohn, C. H., Kim, J. S., Chung, S. H., and Maruta, K., 2000, "Nonlinear Evolution of Diffusion Flame Oscillations Triggered by Radiative Heat Loss," *Combust. Flame*, Vol. 123, pp. 95-106.
- [27] Ruetsch, G. R., Vervish, A. Linan, 1995, "Effects of heat release on triple flame," *Phys. Fluids*, Vol. 7, pp. 1447-1454.
- [28] Park, J. S., Hwang, D. J., Park, J., Kim, J. S., Kim, S., Keel, S. I., Kim, T. K., Noh, D. S., 2006, "Edge flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flame," *Combust. Flame*, Vol. 146, pp. 612-619.
- [29] Jacono, D. L., Papas, P and Monkewitz, P, A., 2003, "Cell Formation in Non-premixed, Axisymmetric Jet Flame Near Extinction," *Combust. Theory Modeling*, Vol. 7, pp. 635-644.
- [30] Cha, M. S. and Ronney, Paul D., 2006, "Propagation rates of nonpremixed edge flame," *Combust. Flame*, Vol. 146, pp. 312-328.