저신장율 대향류확산화염에서 소화하는 화염디스크로부터 화염구멍으로 천이에 관한 연구

박대근* · 박정*† · 윤진한** · 길상인**

A Study on Transition of Shrinking Flame Disk to Flame Hole at Low Strain Rate Counterflow Diffusion Flames

Dea Geun Park, Jeong Park, Jin Han Yun and Sang In Keel

ABSTRACT

Experiments have been conducted to clarify impacts of curtain flow and velocity ratio on low strain rate flame extinction, and to further display transition of shrinking flame disk to flame-hole. Critical mole fractions at flame extinction are examined in terms of velocity ratio, global strain rate, and nitrogen curtain flow rate. It is shown that multi-dimensional effects at low strain rate flames through global strain rate, velocity ratio, and curtain flowrate dominantly contribute to flame extinction and transition of shrinking flame disk to flame hole. Our concerns are particularly focused on the dynamic behavior of an edge flame in shrinking flame disk.

Key Words : Edge Flame Oscillation, Flame Disk, Flame Extinction, Flame Hole, Heat Loss, Lewis number

1. 서 론

화염 구멍(Flame Hole)과 화염 디스크(Flame Disk) 특성에 관한 연구는 S-curve의 중간가지(middle branch)거동을 이해하기 위한 열쇠이다.[1-3] 이러한 관점에서 화염 구멍과 원형 화염에 관한 연구들은 주로 화염 구멍을 통해서 소화파(extinction wave)에 대한 화염전파 특성을, 원형 화염를 통해서는 점화파(ignition wave)의 화염전파 특성을 이해하고자 하였다. 한편, 소화와 점화에 관한 연구들은 대부분 고신장율 화염에서 화염 구멍의 동적 거동 특성을 이해하려는 연구들이 주류를 이루고 있다.

에지화염(edge flame) 혹은 부분 예혼합 화염(partially Premixed flame)은 층류와 난류의 비예혼합화염(non-premixed flame)에서 나타날 수 있고 예혼합 화염과 확산화염의 중간범주에 속한다. 그리고 에지화염은 예혼합화염과는 달리 화염전파속도는 점화파 또는 실패파를 가질 수 있다. 실험과 수치해석의 연구들[4-7]에서 전파속도는 측면의 혼합 농도장의 구배, 화염의 곡률(flame curvature), 횡방향의 연료유동속도 등에 의존함을 보여 왔다. 또한 에지화염은 소화한계 부근에서 연료 루이스(Le_f)수, 복사 열손실 그리고 반경 방향의 열손실에 따라 화염 진동이 발생하게 된다.[8-10]

Park 등[11]은 저신장율 대향류확산화염에서 화염소화점에서 임계 몰분율 거동, 에지화염 소화특성 그리고 화염 진동 특성에 있어서 복사열손실의 역할뿐만 아니라 반경 방향의 전도열손실의 중요성을 인식하였다. 본 연구는 Park 등의 연구를 기반으로 저신장율 확산화염의 특성을 확장한 연구이다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 저신장율 대향류 확산화염에서 $Le_f > 1$ 인 경우 기존 연구들에 의해 잘 알려진 일차원 화염 진동이 발생하며 반경방향으로 화염 측면의 농도장은 부분 예혼합 구조를 갖기 때문에 에지화염의 동적

* 부경대학교 기계공학전공
*† 부경대학교 기계공학부
** 한국기계연구원 그린환경기계연구본부

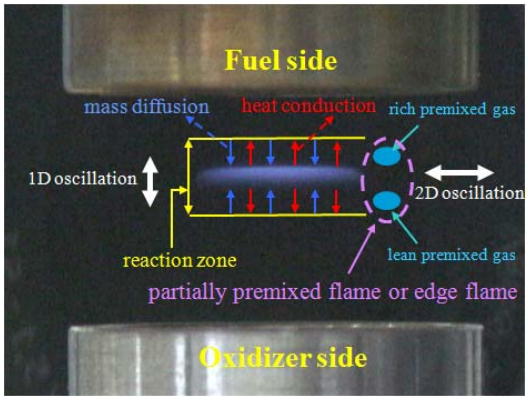


Fig. 1 Low strain rate counterflow configuration.

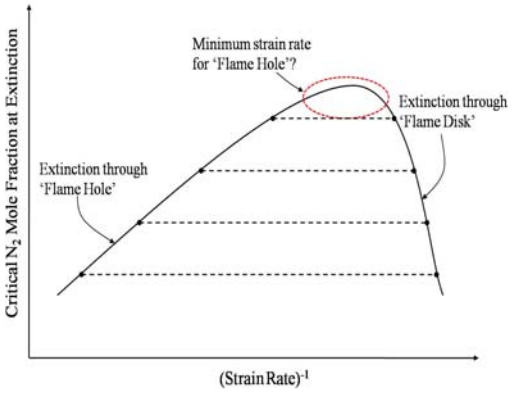


Fig. 2 C-curve dividing 'flame hole' and 'flame disk'

거동이 나타나게 된다. 저신장율 대향류확산화염 실험에서 화염복사와 반경방향 전도 열손실의 증가는 축방향과 측면방향의 진동모드의 화염의 임계 Le_f 수를 감소시킬 수 있음을 보였고, 저신장율 화염은 화염외부에서 화염중심부로 화염길이가 줄어들면서 소화되고, 고신장율 확산화염에서는 화염중심부부터 화염외부로 소화가 되는 것을 확인하였다 [11,12].

Lu와 Ghosal[2]은 고신장율 화염에서 화염구멍과 디스크 화염의 특성에 관한 수치 해석을 통해, Buckmaster의 1차원 에지화염 모델의 비정상상태 해로부터 에지화염 붕괴의 마지막 단계는 질량분율과 확산의 시간에 따른 변화의 균형으로 결정되어진다고 규명하였다. 여기서 화염구멍이 재점화의 최종 단계, 즉 화염구멍이 사라지는 단계에서 화염변위는 시간의 1/2 승에 따른다고 규명했다.

한편, C-곡선을 살펴보면 고신장율화염에서의 화염 소화는 화염 스트레로 인한 화학 반응 한계에 기인하고 저신장율화염에서는 화염 소화는 열손실에 기인하므로 Fig. 2와 같이 묘사될 수 있다. 고신장율에서는 화염구멍에 의해 소화가 일어나고 저신장율에서는 디스크화염의 외측에 형성되는 에지화염이 음의 화염 전파속도를 갖기 때문에 화염외측에서 중심부를 향해 소화가 일어난다. 결국 Fig. 2의 전환점(turning point) 근처에서는 화염 구멍에 의한 소화와 화염디스크의 최외각에서 음의 화염전파속도에 의한 화염 소화 현상이 공존하거나 천이가 발생할 것으로 판단된다. 따라서 에지화염 화염구멍이 나타날 수 있는 최소 신장율 값은 어떨지, 혹은 원형화염과 화염구멍의 공존할 수 있을 것인지 등이 주목된다.

기존 연구들에서는 저신장율 화염 거동에 대한 연구들이 상대적으로 문헌상에 보고된 예가 적기 때문에 본 연구에서는 저신장율 확산화염의 화염 소화 부근에서 속도비, 전체 화염신장율, 그리고 질소의 장막유동속도를 변화를 주면서 반경방향으로의 전도 열손실에 의한 다차원적 효과(multidimensional Effects)가 어떻게 나타나는지 관찰하였다. 또한 화염구멍을 통한 화염 소화와 디스크 화염의 에지화염의 음의 화염전파속도를 통한 화염소화 특성이 C-곡선 상에서 어떻게 존재하는지를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 3은 실험에 사용된 대향류버너의 개략도이다. 내경이 18 mm인 대향류 버너는 외부에 교란되는 화염을 제거할 수는 있는 구조로 제작되었다. 버너 노즐간의 간격은 15.0 mm로 유지하였다. 대향류 화염에서의 화염대는 산화체 측에 형성되는데, 화염대가 노즐에 부착되는 것을 막기 위해 연료를 상부 노즐에서 분사하고, 산화제는 하부 노즐에서 분사하여 실험하였다. 외부의 화염 교란을 막고 후류(wake flow)에 의해 생

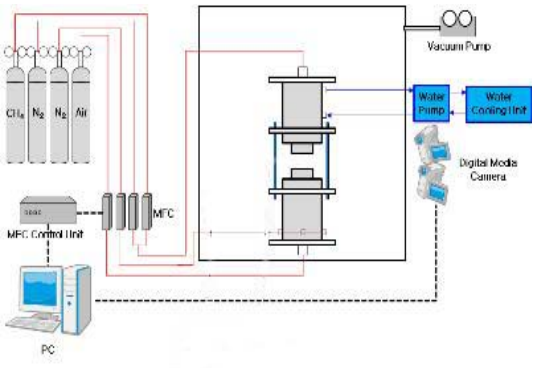


Fig. 3 Schematic diagrams of counterflow burner and flow system.

성되는 외부 화염을 제거하기 위해 질소 장막유동을 공급하게 되며 장막유동의 속도 변화는 국부 신장율(local strain rate)을 변화시키게 된다.

본 연구는 화염의 특성에서 다차원적 효과를 명확히 하기위해 속도비, 전체 신장율 그리고 장막유동의 유량을 변화시키면서 수행하였다. 속도비의 범위는 3에서 5, 전체 신장율의 범위는10 s^{-1} 에서 110 s^{-1}이다. 국부신장율 영향을 보기 위해 장막유동의 유량은 4 l/min에서 12 l/min 까지 변화를 주면서 비교하였다. 전체 신장율의 정의는 다음과 같다[13].

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

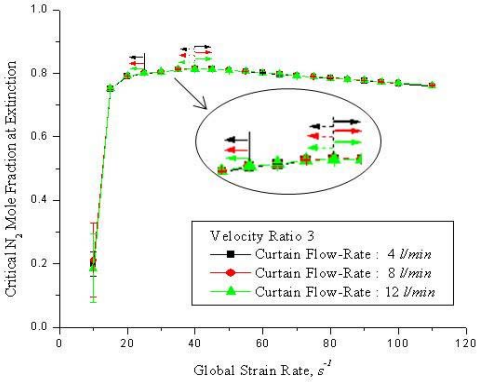
$$\text{where, } Vr = \frac{V_f}{V_a} \text{ (=속도비)}$$

여기서 V와 ρ는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며, L은 노즐간의 거리, 하첨자 a와 f는 각각 연료와 산화제를 나타낸다. 연료는 99.95%의 고순도 메탄(CH_4)를 사용하였으며, 희석제로는 고순도 질소(99.999%)를 사용하였다. 또한 산화제로 일반순도 99.95%의 공기를 사용하였다. 진동하는 화염의 거동을 관찰하기 위하여 화염 정면에서, 화염구멍을 통한 화염 소화과정을 관찰하기 위해 상부에서 디지털 미디어 카메라로 촬영하고 PC를 이용하여 분석하였다.

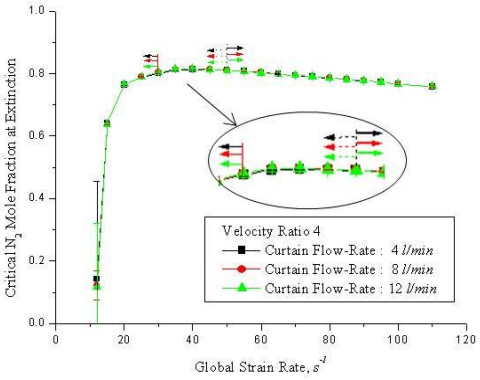
3. 실험결과 및 검토

Table 1 Divisions of extinction mode

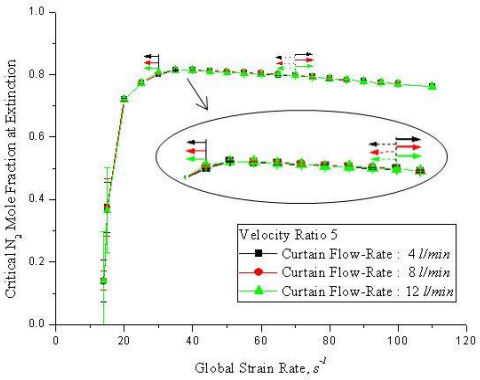
Contents \ Curtain flow-rate (a_g)		4 *l/min* (a_g)	8 *l/min* (a_g)	12 *l/min* (a_g)
Vr=3	Oscillation extinction	-25	-25	-25
	Shrinking extinction	30-40	30-40	30-40
	Flame hole extinction	45-	45-	45-
Vr=4	Oscillation extinction	-30	-30	-30
	Shrinking extinction	35-50	35-50	35-50
	Flame hole extinction	55-	55-	55-
Vr=5	Oscillation extinction	-30	-30	-30
	Shrinking extinction	35-70	35-70	35-70
	Flame hole extinction	75-	75-	75-



(a) Vr = 3

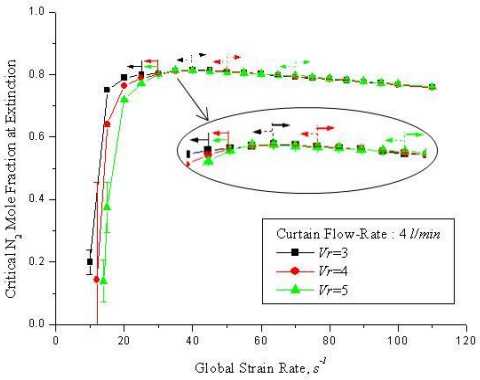


(b) Vr = 4

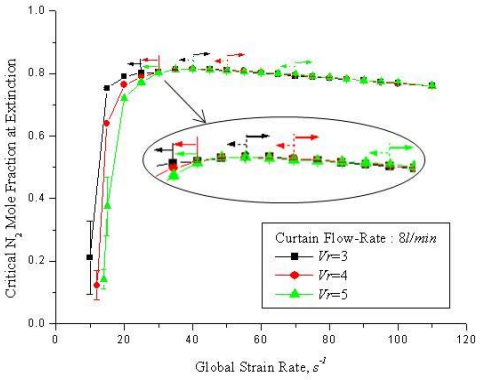


(c) Vr = 5

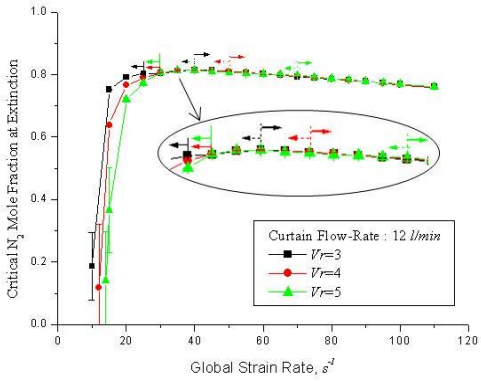
Fig. 4 Variations of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate in terms of curtain flow-rate at velocity ratios of (a) 3, (b) 4, and (c) 5.



(a) Curtain flow-rate =4 l/min



(b) Curtain flow-rate =8 l/min



(c) Curtain flow-rate =12 l/min

Fig. 5 Variations of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate in terms of velocity ration at curtain flow-rate of (a) 4 l/min, (b) 8 l/min, and (c) 12 l/min

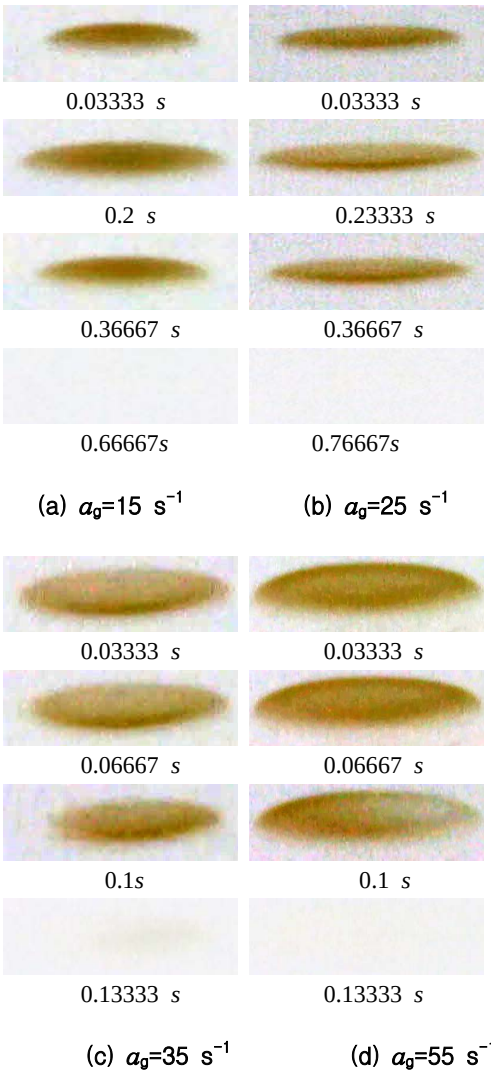


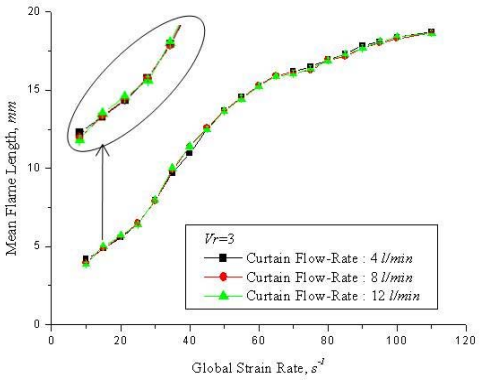
Fig. 6 Temporal evolution of flame extinction at the global strain rate of (a) 15 s^{-1}, (b) 25 s^{-1}, (c) 35 s^{-1}, (d) 55 s^{-1} ; Vr=4, Curtain flow-rate=8l /min

Fig. 4와 Fig. 5는 전체 화염 신장율에 따른 속도비 (a) 3, (b) 4, (c) 5와 장막유동유량 (a) 4 l/min, (b) 8 l/min, (c) 12 l/min에서 화염소화 한계 그래프이다. 실선의 화살표까지의 영역은 성장모드(growing mode)의 진동이 나타나고 화염이 외부에서 중심부 방향으로 소화한 지역을 나타내고 점선의 화살표까지의 영역은 진동이 나타나지 않고 화염이 외부에서 중심부 방향으로 줄어들면서 소화한 지역을 나타냈다. 굵은화살표부터는 화염구멍을 통해 소화되는 지역을 나타내고 있다. Table 1에서 각 조건에서 전체 신장율

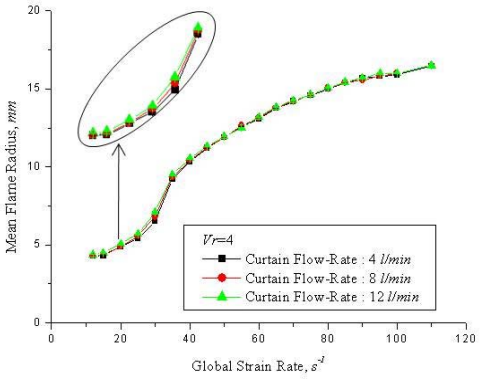
에 따른 화염소화 모드를 나타내고 있다. Maruta 등[14]은 유한한 버너 직경을 가지고 수행된 실험에서 1차원적 화염특성은 복사열손실에 의해 C-curve 형태로 화염소화가 나타남을 규명하고, Oh 등[15]은 2차원 수치해석을 통하여 측면 열손실 또한 C-curve에 기여한다고 규명한 바 있다. 본 실험에서도 전체 신장율에 따른 화염소화 거동은 C-curve의 형태를 따른다. 모든 고신장율 화염조건에서 복사 열손실과 부력효과를 무시할 수 있기 때문에 화염소화 임계 질소몰분율은 고신장율에서 하나의 곡선으로 일치한다. Fig. 4에서 장막유동의 속도변화는 임계 몰분율에 크게 영향을 주지 않았다. 그리고 Fig. 5 저신장율 소화화염에서 속도비 증가는 화염 소화의 임계 몰분율을 감소하게 한다. Fig. 6에서는 Vr=4, 장막유동 유량 8 l/min 조건에서 전체 신장율 (a) 15 s^{-1}, (b) 25 s^{-1}, (c) 35 s^{-1}, (d) 55 s^{-1}에 따른 화염소화직전의 사진들이다. a_g=15 s^{-1}조건에서는 완전한 디스크 화염이 나타지만 a_g=25 s^{-1}조건에서는 화염의 중심부가 외부보다 화염강도가 약하다는 것을 볼수 있다. 화염의 내부는 외부보다 상대적으로 화염강도가 낮지만 화염이 소화하기 직전에는 성장모드의 에지진동이 일어나면서 소화한다. 이것은 디스크 화염의 외측 에지화염의 음의 화염전파속도를 통한 화염 소화에 의해 화염이 소화되지만 이미 화염 내부에는 화염 강도가 약한 부분들이 존재하여 화염 구멍들이 나타나려고 한다는 것을 의미한다. a_g=35 s^{-1}

Table 2 Divisions of flame disk & flame hole

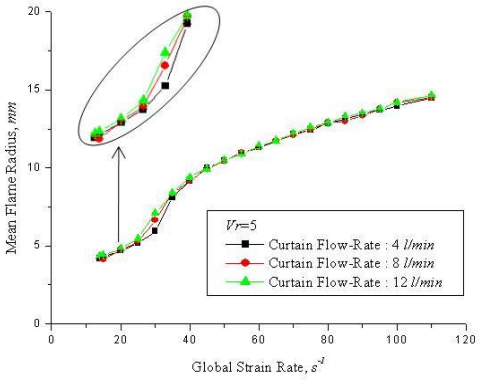
Contents \ Curtain flow-rate / a_g		4 *l/min* a_g	8 *l/min* a_g	12 *l/min* a_g
Vr=3	Flame Disk	-20	-20	-20
	Flame Disk&Hole	25-40	25-40	25-40
	Flame Hole	45-	45-	45-
Vr=4	Flame Disk	-20	-20	-20
	Flame Disk&Hole	25-50	25-50	25-50
	Flame Hole	55-	55-	55-
Vr=5	Flame Disk	-25	-25	-25
	Flame Disk&Hole	30-70	30-70	30-70
	Flame Hole	75-	75-	75-



(a) Vr=3

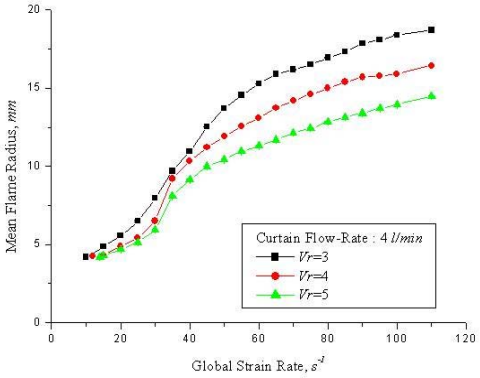


(b) Vr=4

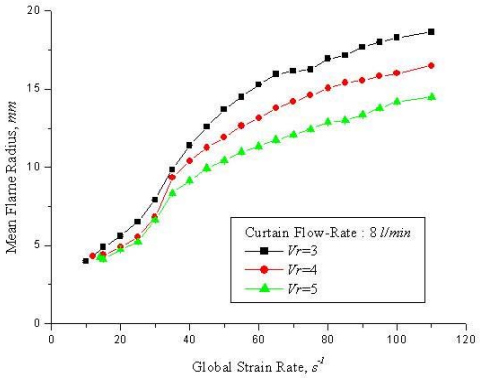


(c) Vr=5

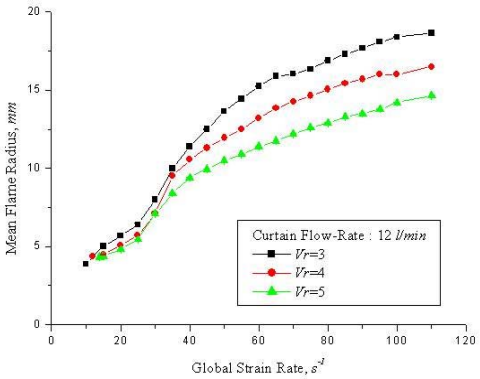
Fig. 7 Variation of mean flame radius with global starin rate in terms of curtain flowrate at the velocity ration of (a) 3, (b) 4, (c) 5.



(a) Curtain Flow-Rate = 4 l/min

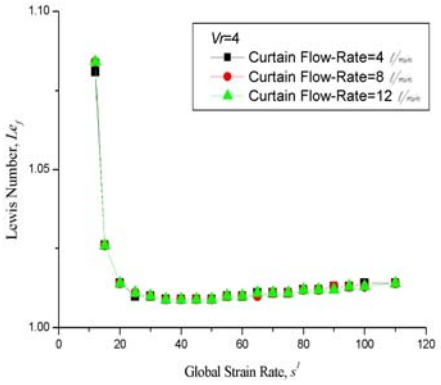


(b) Curtain Flow-Rate = 8 l/min

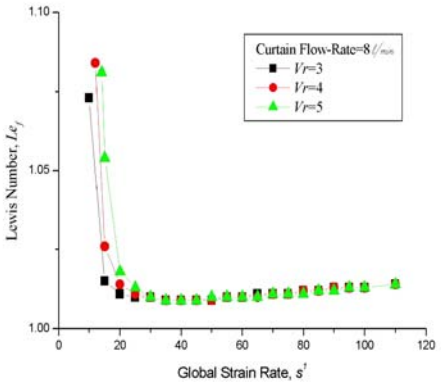


(c)Curtain Flow-Rate = 12 l/min

Fig. 8 Variation of mean flame radius with global starin rate in terms of velocity ratio at the curtain flowrate of (a) 4 l/min, (b) 8 l/min, (c) 12 l/min.



(a) Vr=4



(b) Curtain Flow-Rate = 4 l/min

Fig. 9 (a) Variation of Lewis number with global strain rate in terms of nitrogen curtain flowrate at the velocity ratio of 4 and (b) velocity ratio at the curtain flowrate of 8 l/min.

조건에서는 마찬가지로 화염내부가 외부보다 화염강도가 약하지만 소화직전에 성장모드의 진동이 나타나지 않고 화염이 외부에서 중심부로 줄어들면서 소화한다. a_g=55 s^{-1}조건에서는 화염이 화염 구멍을 통해 소화가 오른쪽 내부에서 시작되는 것을 볼 수 있다. 현재의 실험 범위 안에서 화염 구멍을 통해 화염이 소화하는 경우에는 화염 구멍이 화염 중심부에서 발생하는 것이 아니라 화염으로부터 유한한 거리에서 발생한다는 것을 확인 할 수 있다. Table 2에서 각 조건에서 전체 신장율에 따른 원형화염과 화염구멍을 구분지어 나타냈다.

이전 Park등의 연구에서 반경 방향의 전도열손실은 식(2)에 나타낸 바와 같이 화염반경과 반

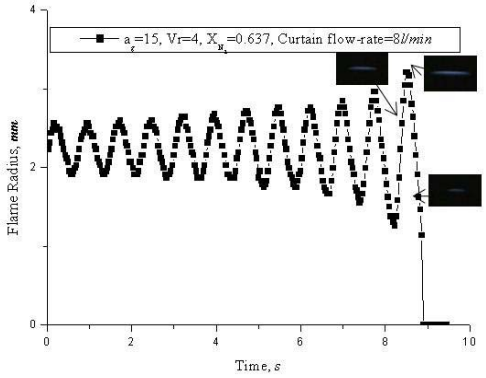
비례함을 보였다.

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

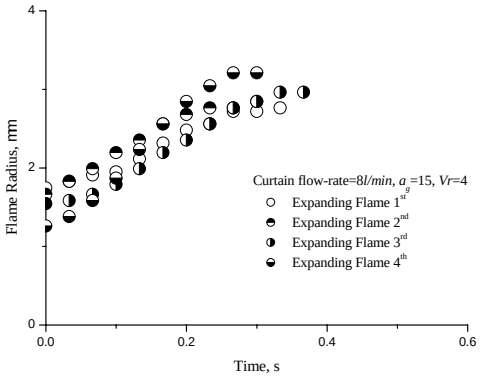
여기서 l_f는 반경 방향의 화염길이이다. Fig. 7에 보인 바와 같이 Vr=3의 조건에서는 장막유동의 속도 변화가 화염반경에 거의 영향을 주지 않았다. 그러나 Vr=4와 Vr=5의 조건에서는 장막유동의 속도가 증가함에 따라 화염반경은 미소하게 증가한다. 이것은 저신장율화염에서 장막유동의 속도 변화는 국부스트레인율을 증가시키는 효과보다는 반경방향의 열손실을 제어하여 화염소화에 영향을 끼친다는 것을 의미한다. 반면 고신장율에서는 화염의 외측으로부터 질소 유동을 유도하므로 반응에 참여하는 반응화학종의 농도의 감소를 통해 화염강도가 감소할 것으로 예상되지만 본 실험에서는 고신장율 확산화염에서는 장막유동의 속도변화가 크게 영향을 주지 못했다. 그리고 고신장율 확산화염에서 화염소화는 화염구멍을 통해 시작되므로 소화지점에서도 장막유동의 속도변화는 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 속도비에 따른 평균 화염반경을 나타내고 있다. 화염 반경은 전체신장율의 증가에 따라 증가하고 속도비의 증가에 따라 감소한다. 이 또한 속도비의 변화가 반경방향의 열손실을 통해 화염소화에 영향을 끼친다는 것을 나타낸다. Fig. 4와 5에서 저신장율과 고신장율 소화화염에서 진동의 경계를 명확히 나타내기 위해 Le_f 수의 변화를 Fig. 9에서 조사하였다. Fig. 9에서 고신장율 화염소화점에서 Le_f 수는 1근처이고 화염 반경이 충분히 크기 때문에 반경 방향의 열손실은 상대적으로 작다. 따라서 고신장율 화염에서는 에지화염 진동은 나타나지 않는다. 저신장율 화염에서 전체 신장율이 감소할수록 화염소화점에서 Le_f 수는 급격히 증가하고 또한 속도비가 증가할수록 화염소화점에서 Le_f 수는 증가한다. 이는 속도비가 증가할수록 에지화염 진동 불안정성은 상대적으로 잘 나타난다는 것을 의미한다. 그러나 Fig. 4에서 보는 바와 같이 장막유동의 속도변화는 Le_f 수에 크게 영향을 주지 않는다.

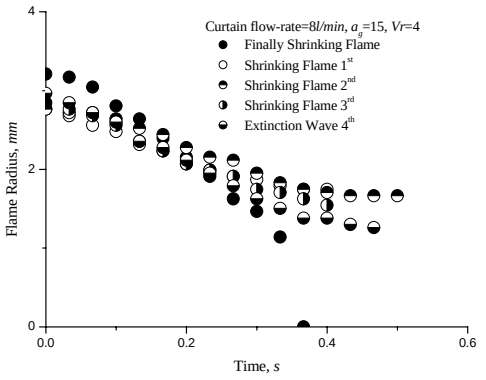
저신장율화염에서 시간에 따른 디스크화염 반경 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 에지진동모드의 화염은 팽창과 수축을 하는 동안 소화점에 도달할수록 가속화되는 것을 보여준다. 그리고 마지막 수축되는 소화직전의 후퇴파 곡선과 그 외의 다른 후퇴파 곡선은 상당한 차이점을 보인다. 이것은 마지막 수축되는 소화직전의 화염이 더 이상 지탱할 수 없음을 나타낸다.



(a) Growing oscillation mode



(b) Expanding flame



(c) Shrinking flame

Fig. 10 (a) Temporal variation of flame disk radius, (b) its temporal variation during the expanding flame period, and (c) that during the shrinking flame period; a_g= 15 s^{-1}, Vr=4, X_{N2} = 0.639 and Curtain flow-rate = 8 l/min

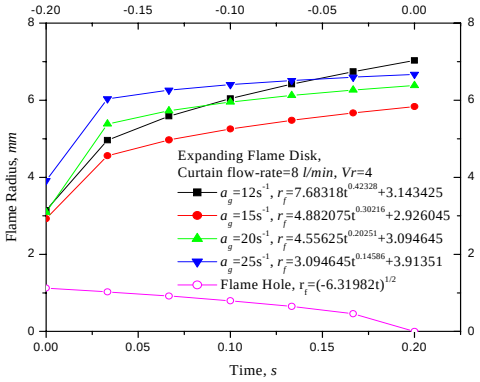


Fig. 11 Comparison among temporal variations of flame radius in the present expanding-flame disks and that of the shrinking flame hole described by Pantano and Pullin.

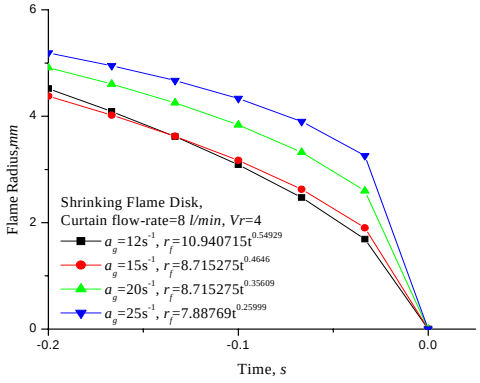


Fig. 12 Comparison among temporal variations of flame radius in the present shrinking-flame disks.

최근, Pantano and Pullin [16]은 재점화하는 화염구멍의 전개과정을 활성화에너지 한계를 이용한 점근해(asymptotic solution)를 구하기 위해 Buckmater's 1차원 에지화염모델을 해석하였다.

그들은 화염구멍이 재점화하는 마지막단계에서 화염구멍은 시간의 1/2 승에 따른 즉, $r_f=\sqrt{-6.31983t}$ 의 관계식을 규명한 바 있다. Fig. 11에서는 재점화하는 화염구멍과 에지화염 진동에서 재점화 단계로 도달하는 마지막 팽창단계를 비교하였다. 팽창하는 원형화염의 시간에 따른 변화는 Pantano and Pullin 등의 화염구멍과는 상당히 다르며, 팽창하는 원형화염의 함수관계조차도 복합적인 양상을 나타낸다. 한편, 원형화염에서 전체 신장율이 커질수록 화염이 안정화염으

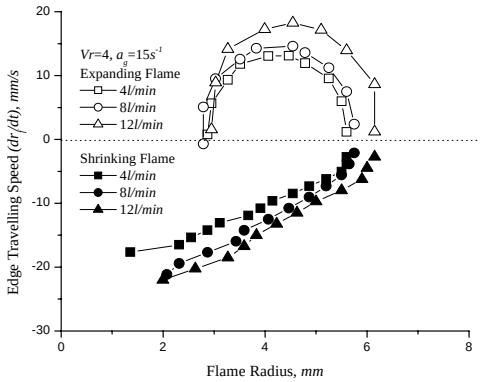


Fig. 13 Variations of edge travelling speed with flame radius according to curtain flowrate at a_g=15 s^{-1} and Vr=4.

로 되는데, 방정식에서 나타나듯이 시간에 대한 차수는 줄어들고 이는 전체 신장율이 커질수록 화염의 변위속도는 줄어드는 것을 알 수 있다.

또한 화염소화를 향해 수축하는 원형화염의 에지 변위 속도 $dr_f/dt=f(Vr,N_2,a_g,r_f)$ 거동이 어떻게 될지는 의문이다. Fig. 12는 진동하는 원형화염의 마지막 소화단계에서 시간에 따른 함수식으로 표현된 것을 나타냈다. 수축하는 디스크화염의 함수관계도 복합적인 양상을 나타내고 디스크화염의 에지 변위 속도(Edge Travelling Speed) 거동을 통해 복합적인 함수관계를 물리적으로 설명하고자 하였다. 소화되는 시간 동안의 디스크화염의 거동은 소화파(extinction wave)의 전형적인 거동이라는 것을 알 수 있다. 그러나 화염 팽창기간 동안에는 원형화염의 거동은 단지 Fig. 10의 결과로 점화파인지 실패파인지 명백하게 답할 수는 없다.

Fig. 13은 소화직전의 마지막 단계에서 a_g=15 s^{-1}, Vr=4 조건에서 장막유동의 속도변화에 따른 팽창과 수축의 디스크화염 에지 변위속도를 비교한다. 화염이 정체면(Stagnation plane)에 위치하면, 에지 화염 전파속도는 $V_f=dr_f/dt-ar_f$로서 표현된다. 여기서 a는 화염 외부에서의 국부 신장율을 말하므로 ar_f는 가스 유동속도를 말한다. 그러나 실제 화염은 정체면에 위치하지 않기 때문에 에지 화염 전파속도는 $V_f=dr_f/dt-Car_f$로 근사할 수 있다. C는 화염의 위치, 전체 신장율, 속도비, 장막유동에 의존한다. 본 실험에서 정체면에서 반경방향 속도와 화염면에서 반경방향 속도는 근사한 값을 가지므로 C는 1로 근사할 수 있다. 또한, 가스유동속도의 크기는 O(10) cm/s

이고, Fig. 13에서 보이는 것처럼 모든 에지 변위 속도는 O(10) mm/s이다. 그러므로 에지 화염 전파속도는 팽창 화염 기간 동안조차에서도 음의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. Fig. 13에서 수축하는 화염에서 화염반경이 감소하면서 에지 변위 속도는 증가하는 것을 함축적으로 보여주며 이것은 반경 방향의 열손실 증가에 의한 음의 에지 변위 속도에서 증가를 의미한다. 그리고 화염 안정화정도의 척도를 나타내는 화염 반경은 영의 에지 변위 속도(정지화염)를 갖기 위해서는 화염 반경이 더 증가하여야 함을 의미한다.

팽창과 수축하는 화염이 교차하는 에지 변위속도가 영인 지점은 팽창화염의 최고 반경을 의미한다. 앞에서 설명한 Figs. 4, 5와 Figs. 7, 8을 비교해 보면 성장모드의 진동이 나타나지 않는 부분, 즉 안정화화염의 평균반경을 찾아 볼 수 있다. 평균화염반경이 대략 7.5 mm 이상이면 화염은 안정화되고 그 이하에서는 불안정성 진동이 나타났다. 또한 반경방향의 열손실은 화염반경에 반비례하므로 화염반경이 감소할수록 반경방향의 열손실의 영향을 더 많이 받아 불안정성해진다는 사실을 앞에서 설명했다. 진동모드에서 불안정성 화염일수록 화염의 에지 변위 속도는 크다는 사실 또한 알 수 있다. 이 두 가지를 추론하여 볼 때 Fig. 13에서 장막유동유량이 12 l/min 조건에서 화염반경이 상대적으로 크다는 것을 볼 수 있다. 이는 장막유동의 속도 증가는 C-곡선의 저신장율에서 국부신장율의 증가 그리고 화염 반경 증가에 의해 화염 안정화에 기여하는 측면과 에지 화염 속도의 증가로 상대적으로 더 불안정해지는 측면의 두 가지 효과가 있다는 것을 알 수 있다. 결국 이러한 두가지의 상반되는 역할이 서로 상쇄되기 때문에 Fig. 4에서 장막유동 속도에 따른 화염 소화 임계몰분율은 크게 영향을 주지 못했다.

4. 결 론

저신장율 대향류 확산화염에서 수축하는 원형화염의 특성과 화염구멍과 원형화염을 구분짓기 위한 연구를 수행했다. 그리고 전체 신장율, 속도비 그리고 장막유동의 속도변화의 영향을 조사하였다. 그 결과는 다음과 같다.

C-curve상에서 성장모드의 진동으로 소화하는 영역, 진동없이 화염외부에서 내부로 수축하며 소화하는 영역, 화염구멍을 통해 소화가 시작되는 영역으로 3가지로 나눌 수 있고 디스크화염과 화염구멍의 공존 여부를 확인하였다.

고신장율 확산화염에서는 화염 소화부근에서 Le_f 수는 1근처의 값을 가지며 화염 반경이 충분히 커서 반경 방향의 열손실이 작아지므로 고신장율 화염에서는 에지화염 진동은 나타나지 않는다. 저신장율 소화화염에서는 전체 신장율이 감소할수록, 속도비는 증가할수록 Le_f 수는 증가한다. 이것은 속도비가 증가함에 따라 에지화염의 진동 불안정성이 심해진다는 것을 의미한다. 그러나 장막유동의 속도변화는 소화화염의 Le_f 수는 거의 영향을 주지 않았다.

마지막 단계에서 팽창하는 원형화염의 시간에 따른 변화는 Pantano and Pullin로부터 규명된 재점화 방향으로 수축하는 화염구멍과는 상당한 차이점을 보였다. 그리고 수축하는 원형화염의 함수적 관계는 복잡한 양상을 보여준다. 에지변위속도를 관찰한 결과, 에지화염 전파속도는 팽창하는 화염에서 조차도 음의 속도를 나타났다. 장막유동의 속도가 증가할수록 안정화되는 화염반경에 도달하였고, 장막유동의 속도 증가로 인하여 에지 변위 속도가 증가함을 보였다. 이것은 장막 유동 속도를 증가시키면 에지변위속도 증가를 통해 알 수 있지만 화염 불안정성은 증가하여야 하나 국부 신장율의 증가에 따른 화염강도의 강화 그리고 화염 반경 증가를 통한 열손실 감소를 통해 화염안정화에 기여하는 상반된 효과로 화염 진동 불안정성이 나타나는 전체 화염신장율의 변화와 화염소화가 발생하는 임계 몰분율의 변화는 거의 나타나지 않게 된다는 것을 의미한다.

참고문헌

[1] Short, M. and Liu, Y., “Edge-flame structure and oscillations for unit Lewis numbers in a non-premixed counterflow”, Combust. Theory Modelling, 8, 425-447, 2004.

[2] Z, Lu. and S. Ghosal, “Flame holes and flame disks on the surface of a diffusion flame”, J.FluidMech. 513, 287-307, 2004.

[3] A. Ciani, W. Kreutner, W. Hubschmid, C.E. Frouzakis, and K. Boulouchos, “Experimental investigation of the morphology and stability of diffusion and edge flames in an opposed jet burner”, Combust. Flame, 150, 188-200, 2007.

[4] J.W. Dold, "Flame propagation in a nonuniform mixture: Analysis of a slowly varying Triple Flame", Combust. Flame, 76, 71-88, 1989.

[5] L.J. Hartley, J.W. Dold, "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Propagating Triple-Flame", Combust. Sci. Tech., 80, 23-46, 1991.

[6] P.N. Kioni, B. Rogg, K.N.C. Bray, A. Liñán, "Flame spread in laminar mixing layers:

The triple flame", Combust. Flame, 95, 276-290, 1993.
[7] G. R. Ruetsch, , L. Vervisch, A. Liñán, "Effects of heat release on triple flames", Phys. Fluids., 7, 1447-1454, 1995.
[8] Thatcher, R.W. and Dold, J, W., "Edges of flames that do not exist: flame-edge dynamics in a non-premixed counterflow", Combust. Theory Modelling, Vol.4, pp. 435~475, 2000.
[9] Buckmaster, J. D., "Edge-flames", Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 28, pp. 435~475, 2002
[10] Buckmaster, J. D., "Large-Lewis-number Instabilities of Model Edge-flames", Combust. Flame, Vol. 127, pp. 2223~2233, 2001.
[11] Park, J. S., Hwang, D. J., Park, J., Kim, J. S., Kim, S., Keel, S. I., Kim, T. K., Noh, D. S., "Edge flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flame", Combust. Flame, 146, 612-619, 2006.
[12] J. Park, C. B. Oh, K. T. Kim, J. S. Kim, A. Hamins, "Multi-dimensional Effects on Low Strain Rate Flame Extinction in Methane/air Counterflow Non-premixed Flame", Proc. ASPACC, Vol. 5, pp 345~348, 2005.
[13] H.K. Chelliah, C.K. Law, T. Ueda, M.D. Smooke, F.A. Williams, "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., 23 (1990) 503.
[14] Kaoru Maruta, Masaharu Yoshida, Hongsheng Guo, Yiguang Ju, Takashi Niioka, "Extinction of low-stretched diffusion flame in microgravity", Combust.Flame, 112, 181-187, 1998.
[15] 오창보, 박 정, 김정수, Anthony Hamins, "미소 중력장에 있는 저신장율 화염소화에 미치는 다차원 효과", 대한기계학회논문집 B권, 제 29권 제 9호, pp. 988-996, 2005.
[16] Pantano, C. and Pullin, D.I., "On the dynamics of the collapse of a diffusion-flamehole", J.FluidMech., 480, 311-332, 2003.