

대향류 확산화염에서 에지화염이 화염소화에 미치는 영향

정용호* · 박대근* · 박 정** · 윤진한** · 권오봉* · 길상인**

* 부경대학교 기계공학과, ** 한국 기계연구원 그린환경에너지기계본부

Effect of Outer Edge Flame on Flame Extinction in Counterflow Diffusion Flames

Yong Ho Chung*, Dae Geun Park*, Jeong Park**, Jin Han Yun**
Oh Boong Kwon* and Sang In Keel**

* Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

** Environment & Energy Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received August 9, 2011 ; Revised October 20, 2011 ; Accepted October 20, 2011)

Key Words: Extinction(화염 소화), Flame Length(화염 길이), Heat Addition(열 공급), Heat Loss(열 손실), Oscillation(진동), Outer Edge Flame(바깥 에지화염)

초록: 대향류 확산화염의 화염소화에 있어서 에지화염 역할에 관한 실험적 연구가 진행되었다. 속도비, 버너직경, 그리고 버너간격을 변화시키며 수행된 실험에서 전체인장률에 따른 화염소화 임계질소분율의 그래프는 c-커브 형태로 나타났다. 고신장률화염에서는 화염소화 임계질소분율의 그래프가 하나의 곡선으로 일치하였으며, 화염이 일차원의 응답특성을 갖는 것을 확인하였다. 화염 소화는 바깥 에지화염이 반경방향으로의 진동 후에 화염 중심으로 수축하며 소화하는 영역, 진동 없이 화염중심으로 수축하며 소화하는 영역, 그리고 바깥 에지부분의 수축과 진동 없이 화염중심에 화염 구멍이 생기며 소화하는 영역으로 세 가지 모드로 나타났다. 화염 표면온도 측정과 에너지 방정식의 각항을 수치해석 한 결과를 토대로 에지화염부분에서의 반경방향 전도 열손실이 에지화염의 불안정을 야기한다는 것과 전도를 통한 열 공급뿐만 아니라 대류를 통한 열 공급도 바깥 에지화염의 안정화에 기여한다는 것을 보였다. 그리고 반경방향의 전도열손실이 수축하며 소화하는 메커니즘의 지배적인 역할을 함을 보였다.

Abstract: The present study on nitrogen-diluted non-premixed counterflow flames with finite burner diameters experimentally investigates the important role of the outer edge flame in flame extinction. Flame stability diagrams mapping the flame extinction response of nitrogen-diluted non-premixed counterflow flames to varying global strain rates in terms of the burner diameter, burner gap, and velocity ratio are explored. There exists a critical nitrogen mole fraction beyond which the flame cannot be sustained, and also the curves of the critical nitrogen mole fraction versus the global strain rate have C-shapes in terms of burner diameter, burner gap, and velocity ratio. In flames with sufficiently high strain rates, the curves of the critical nitrogen mole fractions versus global strain rate collapse into one curve, and the flames can have the 1-D flame response of typical diffusion flames. Three flame extinction modes are identified: flame extinctions through the shrinkage of the outer edge flame with and without an oscillation of the outer edge flame prior to the extinction and flame extinction through a flame hole at the flame center. The measured flame surface temperature and a numerical evaluation of the fractional contribution of each term in the energy equation show that the radial conductive heat loss at the flame edge destabilizes the outer edge flame, and the conductive and convection heat addition to the outer edge from the trailing diffusion flame stabilizes the outer edge flame. The radial conductive heat loss at the flame edge is the dominant extinction mechanism acting through the shrinkage of the outer edge flame.

1. 서론

대향류 확산화염에서 다양한 화염소화 거동의 이해는 화염 안정화를 평가하는데 매우 중요하다. 대향류 화염의 연구는 Tsuji⁽¹⁾ 등이 화염 구조

와 화염 소화 거동을 명확히 정의하기 위해 사용되었으며, 특히 고신장률 화염 소화 한계를 주요 타깃으로 화염 구조와 화염 소화에 대한 많은 양의 연구가 진행되었다.⁽²⁻⁶⁾ 한편, 최근의 몇몇 연구에는 저신장률 확산 화염의 소화 거동에 대해 연구를 진행하고 있다.

연소 시스템에서는 본질적으로 복사 열손실로

* Corresponding Author, jeongpark@pknu.ac.kr

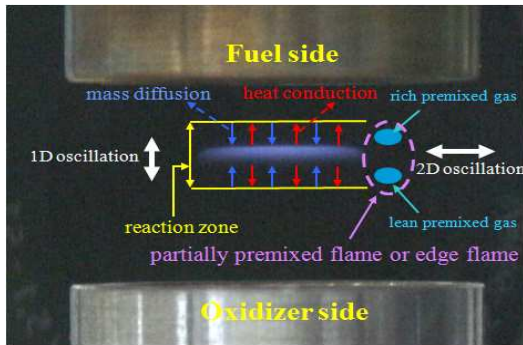


Fig. 1 Low strain rate counterflow flame configuration and its physical description

인해 단일 조건이 유지되지 않는다. JAMIC drop tower에서 진행된 미소중력 조건의 화염 소화에 관한 연구에서 저신장률 화염의 소화는 복사 열 손실에 기인하고 고신장률 화염의 소화는 스트레치에 기인한다고 보고된 바 있다.⁽⁷⁾ 한편 Frate 등의 무한대의 버너직경에 기반을 둔 상사성 개념 하에서 수행된 수치해석 결과에 따르면 2s⁻¹의 신장률에서 화염 두께는 약 2~3cm 정도이고, 따라서 실험 결과를 1차원 상사성 개념 하에서 해석하기 위해서는 화염길이 적어도 20cm는 되어야함을 의미한다.⁽⁸⁾ 그리고 확장된 연구에서⁽⁹⁾ 충분히 큰 버너직경에서의 화염소화가 화염 구멍 또는 화염 줄무늬로 이루어짐을 보였다. 이는 매우 큰 버너직경에서 저신장률의 화염소화는 복사 열손실에 기인하여 화염 구멍을 통해 이루어진다는 것을 의미한다. 그러나 버너직경 26mm의 대향류 화염 실험에서는 저신장률 화염은 소화가 화염구멍 또는 줄무늬가 나타나지 않고 반경방향으로 진동 후에 수축하며 소화되고, 고신장률 조건에서는 진동 없이 화염 중심부에 화염 구멍이 생기며 소화가 발생했다.⁽¹⁰⁾

대향류 확산화염의 에지 부분은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 과농 예혼합화염과 희박 예혼합 화염이 만나는 삼중점을 시작으로 확산화염이 분포되는 부분 예혼합 화염의 구조를 갖고 있다. 바깥 에지화염이 만일 정지화염이라면 화염 전파속도와 국부 유동속도와 균형을 이루며 안정화된다. 에지화염의 전파속도는 혼합강도, 연료 농도, 부력, 루이스 수, 선평 확산 등에 의해 결정된다.⁽¹¹⁾ 게다가 확산화염과 에지 부분의 예혼합 가지와의 전도열전달도 에지화염 전파 속도와 화염 안정화를 제어하는 요소가 될 수 있다.^(12,13) 따라서 유한한 버너직경의 대향류 확산화염에서 바깥

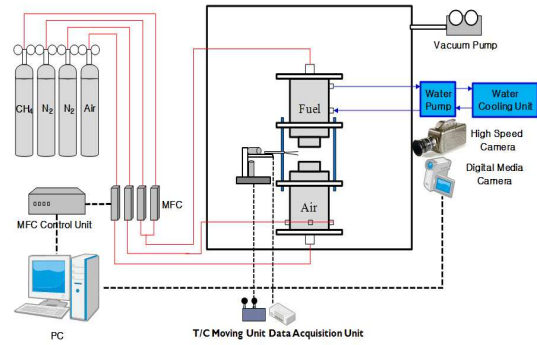


Fig. 2 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems

에지화염의 안정화 혹은 불안정화 메커니즘은 화염 구조와 소화 거동에 중요한 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 이 점을 명확하게 하기 위해 다양한 버너 직경에서 속도비, 버너간의 간격, 그리고 전체 신장률을 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 대향류 버너의 개략도이다. 내경이 18, 26, 그리고 46mm인 대향류 버너는 외부에 교란을 방지할 수 있는 구조로 제작되었다. 연료를 상부 노즐에서 분사하고, 산화제는 하부 노즐에서 분사하여 실험하였다. 외부의 화염 교란을 막고 후류(wake flow)에 의해 생성되는 외부 화염을 제거하기 위해 질소장막유동을 공급하였고, 장막 유동의 유량은 화염 소화 거동과 화염 진동 불안정성에 영향을 미치지 않는 것으로 보고되었기 때문에⁽¹⁴⁾ 10 l/min으로 고정하여 실험을 수행하였다. 버너 상하부 노즐에는 메쉬스크린을 다단으로 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동속도를 갖게 하였고, 이를 마이크로마노미터를 이용하여 균일한 유동임을 검증하였다. 연료는 99.95%의 고순도 메탄을 사용하였으며, 희석제로 99.999%의 고순도 질소를 사용하였다. 또한 산화제로 99.99%의 고순도 공기를 사용하였다. 부력에 의한 유동의 영향을 최소화하기 위해 상부노즐의 출구속도가 부력에 의한 유동속도보다 높은 조건에서 실험을 수행하였고 부력에 의한 유동속도의 정의는 다음과 같다.⁽¹⁵⁾

$$V_b \approx 0.3 \sqrt{g D_{eff}} \quad \text{where, } D_{eff} = \sqrt{\frac{DL}{2}} \quad (1)$$

여기서 D는 버너직경, L은 버너사이의 간격을 의미한다. 속도비의 범위는 1에서 4, 전체 신장률

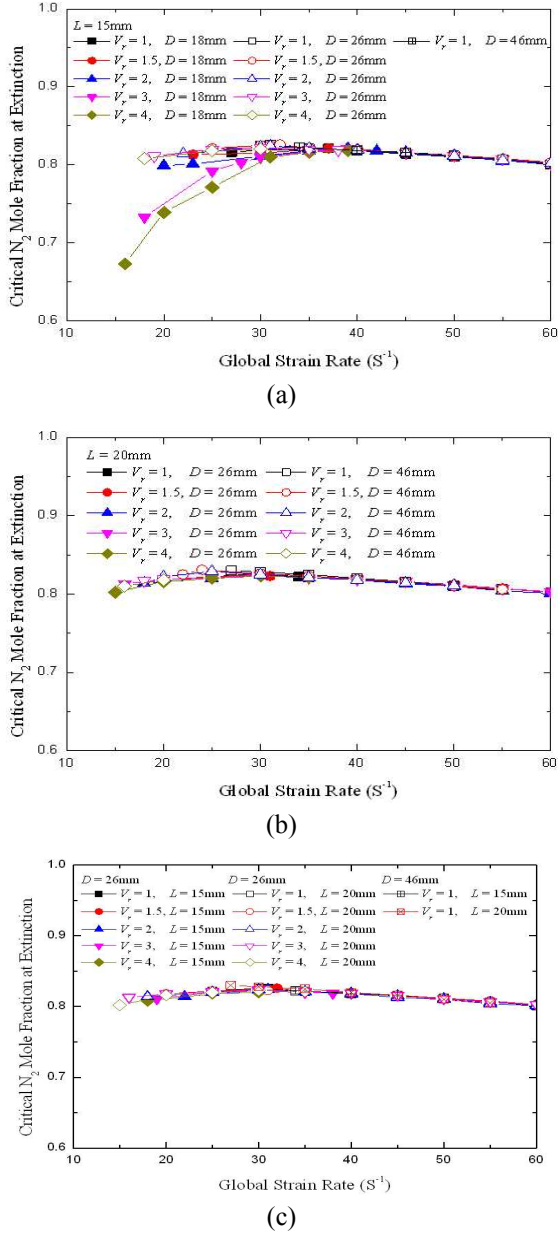


Fig. 3 Critical nitrogen mole fractions at flame extinction versus global strain rate

은 최대 $80s^{-1}$ 까지 실험을 수행하였다. 전체 신장률의 정의는 다음과 같다.⁽¹⁶⁾

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

where, $V_r = \frac{V_f}{V_a}$ (=속도비)

여기서 v 와 ρ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며, l 은 노즐간의 거리, 하첨자 a 와 f 는 각각 연료와 산화제를 나타낸다. 혼합층 두께

($\sim \sqrt{\alpha/a_g}$)는 $D=26mm$, $L=20mm$, $V_r=4$, 그리고 전체신장률 $15s^{-1}$ 에서 $4.56mm$ 로 가장 크게 나타났으며, 이를 고려하여 혼합층 두께가 버너 림에 간섭이 되지 않는 조건으로 실험을 수행하였고, 일부 속도비가 큰 조건에서는 화염이 버너의 하부 노즐에 부착되어 실험조건에서 제외하였다. 소화진행이 빠른 화염구멍을 관찰하기 위하여 상부에서 고속카메라로 촬영하고 진동하는 화염의 거동을 관찰하기 위하여 화염 정면에서 디지털 미디어 카메라로 촬영하고 이를 Matlab기반의 프로그램으로 분석하였다. 화염표면의 온도 측정은 열전대를 삽입함으로써 화염소화가 이루어지는 것을 방지하기 위해 화염소화 지점의 임계 질소분율의 90%조건에서 이루어졌으며, 직경 $75\mu m$ 의 R-type 열전대를 사용하여 화염 중심으로부터 반경방향으로 $0.5mm$ 간격으로 화염 온도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 3은 전체신장률에 따른 화염소화 임계질소분율을 그래프로 나타낸 것이다. 고신장률 영역과는 달리 저신장률 영역에서는 버너직경과 버너간의 간격이 증가함에 따라 화염 소화 임계 질소분율은 높게 나타나고, 속도비의 증가에 따라 화염 소화 임계질소분율은 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 저신장률 영역에서 버너직경, 속도비, 그리고 버너간격의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 고신장률 화염에서는 열손실과 부력효과를 무시할 수 있기 때문에 각 조건에서의 화염소화 임계질소분율은 하나의 곡선으로 일치하며, 화염이 일차원 응답의 거동특성을 따르고 있음을 나타낸다.

Fig. 4는 전체신장률에 따른 소염직전의 화염반경을 나타낸 것이다. 화염반경은 속도비가 증가함에 따라 감소하고, 버너직경과 버너간격, 그리고 전체신장률이 증가함에 따라 증가한다. 이는 식 (3)과 같이 본 연구 그룹의 연구에서⁽¹⁷⁾ 밝힌 바 있는 반경방향의 전도 열손실이 화염 반경에 반비례한다는 것과 잘 일치하고 있다.

$$q = k \frac{\partial T}{\partial x} \sim \frac{1}{l_f} \quad (3)$$

where, l_f = Radial flame length

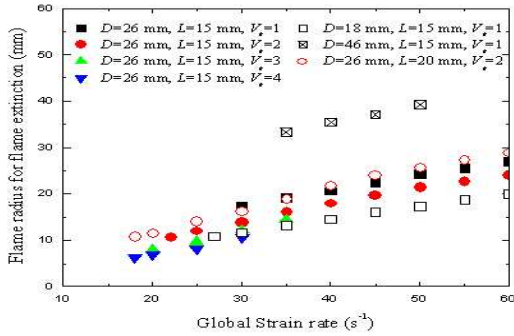


Fig. 4 Variation flame length with global strain rate at various flame conditions

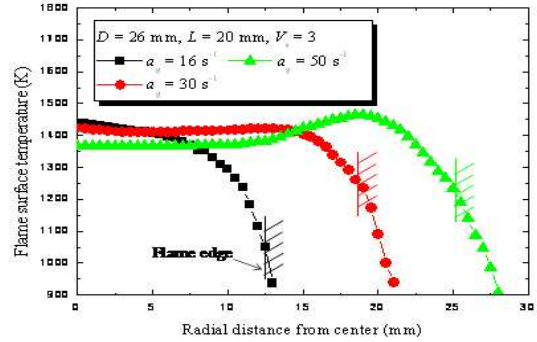


Fig. 6 Measured the flame surface temperatures at 90%-dilution condition of flame extinction

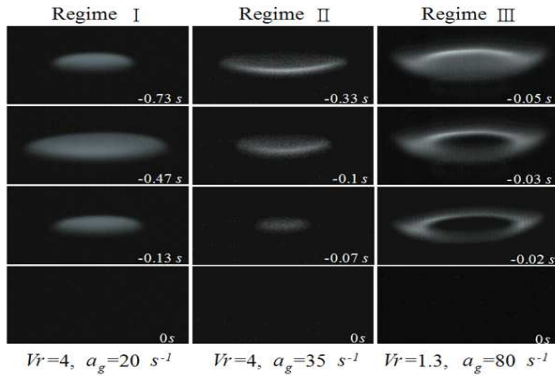


Fig. 5 Various flame extinction modes for the burner diameters of 26 mm

Fig. 5는 버너직경 26mm에서 수행된 실험에서 조건에 따른 화염 소화모드를 나타내었다. Regime I은 에지화염의 진동 후에 화염 중심으로 수축하며 소화하는 저신장률의 소화 영역이며, Regime III에서는 에지화염의 진동 없이 화염 중심에 화염 구멍이 생기며 소화가 이루어지는 고신장률의 화염 소화 영역이다. 그리고 Regime II는 에지화염의 진동 없이 화염 중심으로 수축하며 소화가 되는 Regime I과 Regime III의 천이영역에 해당한다. 따라서 화염 소화모드는 전체신장률에 따라 3가지의 Regime으로 구분되는 것을 알 수 있다. 이러한 소화모드가 상이하게 나타나는 것을 명확히 하기위해 각 영역에서 측정된 화염 표면온도를 Fig. 6에 그래프로 나타내었다.

Fig. 6은 화염 소화 지점의 90%희석 조건에 서열전대를 이용해 측정된 화염 표면의 온도를 화염 반경에 따라 나타낸 그래프이다. 전체신장률 16s⁻¹의 그래프를 보면 화염의 중심이 가장 온도가 높고 가장자리로 갈수록 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 30s⁻¹에서도 화염 중심이

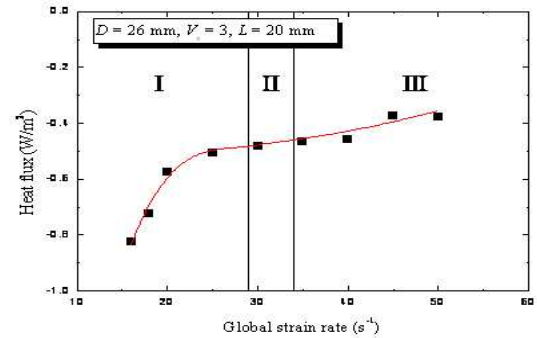


Fig. 7 Conductive heat loss at the outer flame edge versus global strain rate at 90%-dilution of flame extinction in case of L=20mm, D=26mm, and Vr=3

가장 온도가 높지만 반경에 따라 미약하게 감소하다가 약 13mm지점에서부터 가파르게 감소하는 모습을 볼 수 있다. 그러나 50s⁻¹에서는 화염중심이 가장 온도가 낮게 나타나고 약 11mm지점에서 온도가 미약하게 증가하다가 약 17mm지점에서 가장 높은 온도를 나타내고 급격히 감소하였다. 이러한 온도 분포가 화염 안정화 또는 불안정화에 어떻게 영향을 미치는지는 차후 수치해석 결과와 비교하여 언급하겠다.

Fig. 7은 DNS방식으로 수행한 수치해석으로 얻은 화염 소화 지점의 90%희석 조건에서 전체신장률에 따른 바깥 에지화염의 전도열손실을 나타낸 것이다. 그래프에 표시한 Regime은 전체신장률에 따라 3가지의 소화모드가 나타나는 영역을 표시한 것이다. 전도열손실은 Regime I에서 Regime II로 전화되는 동안 급격히 감소하고, Regime III까지는 조금씩 감소한다. 이는 Regime이 I에서 III으로 갈수록 전체신장률은 증가하고, 화염길이 또한 증가 하는데 화염길이는 반경방향의 전도 열

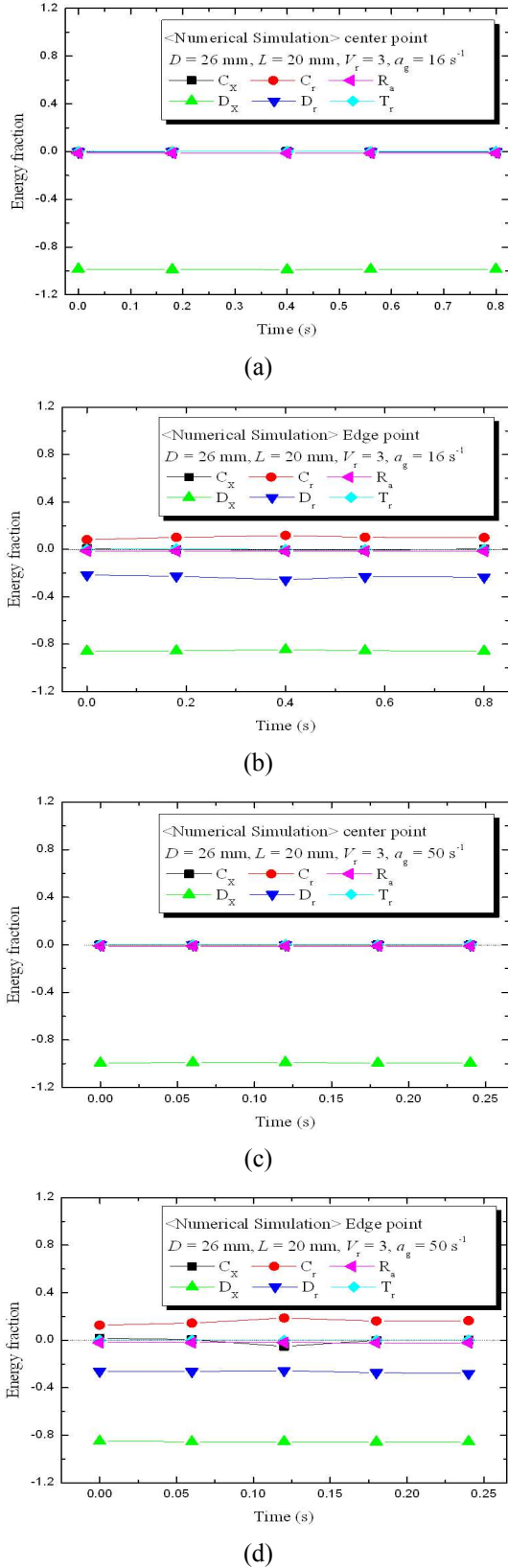


Fig. 8 Temporal variations of the individual energy fraction at the flame center and near the flame edge at the representative low and high strain rate flames in normal gravity

손실과 반비례관계에 있기 때문에 고신장률로 갈수록 전도열손실이 감소하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 온도분포와 반경방향의 전도열손실이 화염 소화 거동과 진동 현상에 어떻게 작용하는지 규명하기 위해 수치해석을 수행하였다.

$$\underbrace{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{T_r} = -\underbrace{\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x}}_{C_x} + \underbrace{-\rho c_p v \frac{\partial T}{\partial r}}_{C_r} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x})}_{D_x} + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial T}{\partial r})}_{D_r} + \underbrace{\sum_{i=1}^n \rho c_{p,i} D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}}_{M_x} + \underbrace{\sum_{i=1}^n \rho c_{p,i} D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r}}_{M_r} + \underbrace{\dot{q}_r}_{R_r} - \underbrace{\sum_{i=1}^n W_i h_i^o \dot{\omega}_i}_{C_s} \quad (4)$$

Fig. 8은 대표적인 저신장률 화염과 고신장률 화염의 화염 중심부와 에지부분에서 에너지방정식의 각 항을 비정상 2차원 상태로 수치해석 통해 시간에 따라 나타낸 것이다. 수치해석 방법은 본 연구그룹의 이전연구에서 수행된 계산방법으로 수행되었다.⁽¹⁸⁾ 수치해석에 사용된 에너지방정식은 식 (4)와 같다.

위 식에서 C_x 항과 C_r 항은 각각 축 방향과 반경 방향의 대류 항, D_x 항과 D_r 항은 축 방향과 반경 방향의 전도 항, M_x 항과 M_r 항은 축 방향과 반경 방향의 확산에 의한 에너지 전달 항, R_a 항은 복사열손실 항, C_s 항은 화학 에너지 항을 나타낸다. Fig. 8의 화염 중심부의 결과를 살펴보면 고신장률과 저신장률 화염 모두 축방향의 전도열손실이 가장 크게 나타났으며, 다른 항들은 무시할 수 있을 정도로 낮게 나타났다. 반면, 에지부분의 경우를 살펴보면 축방향의 전도열손실에 추가하여 반경방향 전도열손실과 반경방향의 대류 항이 우세하게 나타났다. 여기서 반경방향의 대류 항은 저신장률의 경우보다 고신장률의 경우에서 증가하여 나타났다. 이는 고신장률 영역의 에지화염이 안정화에는 화염 중심으로부터의 전도를 통한 열 공급 외에도 반경방향의 대류 항이 안정화에 기여한다는 것을 의미한다.

위의 결과를 종합적으로 보면 각 Regime 별 화염소화 메커니즘을 설명할 수 있다. Fig. 8에서 보인 바와 같이 저신장률 영역에서 에지화염은 반경방향의 대류 항에 비해 반경방향의 전도열손실이 지배적으로 나타났다. 대향류확산화염의 정지화염에서 에지화염의 전파속도는 국부 유동속도와 균형을 이루게 되며, 서로 균형을 이루기 위해서 에지화염의 전파속도는 기연가스 쪽으로 전파하는 음의 전파속도를 가지게 된다. 에지화

Table 1 The classification of flame extinction modes at various flame conditions

V_f	Regime	D=18 L=15 (mm)	D=26 L=15 (mm)	D=26 L=20 (mm)	D=46 L=15 (mm)	D=46 L=20 (mm)
		a_g, s^{-1}	a_g, s^{-1}	a_g, s^{-1}	a_g, s^{-1}	a_g, s^{-1}
1	I	-	-	-	-	-
	II	27-36	30	25-34	-	-
	III	37≤	31≤	35≤	34≤	27≤
	T.P.	37	31	30	-	-
1.5	I	-	-	-	-	-
	II	23-38	25-31	20-34	-	22-23
	III	39≤	32≤	35≤	-	24≤
	T.P.	37	31	30	-	24
2	I	≤23	≤28	≤27	-	-
	II	24-41	29-30	28-34	-	20-24
	III	42≤	31≤	35≤	-	25≤
	T.P.	39	31	30	-	25
3	I	≤28	≤28	≤28	-	-
	II	29-44	29-38	29-34	-	18-20
	III	45≤	-	35≤	-	-
	T.P.	39	32	31	-	-
4	I	≤30	≤29	≤29	-	-
	II	32-39	30	30-35	-	16-20
	III	-	-	-	-	-
	T.P.	-	-	32	-	-

염의 전과속도는 희석제의 첨가와 열손실로 인해 염의 방향으로 커지게 되며, 이는 화염이 수축하게 되는 메커니즘으로 이해된다. 그리고 Fig. 6에서 $16s^{-1}$ 인 저신장률 화염의 그래프를 살펴보면 화염 온도가 화염 중심부가 가장 높고 반경에 따라 급격하게 낮아지는 모습을 볼 수 있다. 이 때문에 화염 중심으로부터 에지화염으로 충분한 열공급을 하게 되고 화염은 다시 팽창되며, 이러한 이유로 에지화염 진동이 나타난다.

Fig. 6의 $30s^{-1}$ 에 해당하는 전체신장률이 다소 높아진 경우에는 온도는 여전히 화염중심이 높게 나타나고 있으나, 유한한 거리의 반경까지 거의 온도 변화가 없다가 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 화염 중심부에서 에지화염으로 충분한 열공급이 되지 않아 진동 없이 수축하며 소화가 되고, 이는 Regime II의 소화 모드가 된다. 반면 고신장률의 에지화염은 중심부보다 에지부분이 온도가 더 높고 Fig. 8의 결과와 같이 반경방향의 전도 열손실과 함께 반경방향의 대류항도 지배적으로 작용한다. 그러므로 고신장률 영역의 에지화염에서는 반경방향의 전도열손실과 반경방

향의 대류 항이 서로 상쇄되어 희석제의 첨가와 열손실에도 수축현상이 일어나지 않고 온도가 가장 높은 상태로 안정하게 유지된다. 이러한 현상이 고신장률 화염의 소화에서 에지화염이 정지해 있을 수 있는 메커니즘으로 판단된다. 그리고 희석제의 첨가로 화염이 약해지면서 온도가 가장 낮게 나타나는 화염중심부에서 화염 구멍이 생기며 소화가 이루어진다. 이것이 고신장률의 화염 소화모드인 Regime III의 소화모드에 해당된다. 이처럼 유한한 버너직경의 대향류 확산화염에서 화염 진동과 소화 메커니즘은 에지화염의 불안정으로 설명 될 수 있으며, 에지화염은 화염소화에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

Table 1은 각 실험 조건별로 나타난 화염 소화모드를 분류해 놓은 것이다. 속도비가 증가할수록 고신장률 영역의 소화모드인 Regime III와 전환점은 고신장률 영역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 버너직경과 버너간격이 감소하거나 속도비가 증가할수록 저신장률의 화염 소화모드가 고신장률 영역 쪽으로 더욱 확장되어 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 화염길이가 감소할수록 반경방향의 전도열손실이 증가하여 반경방향의 전도열손실이 지배적으로 작용하여 나타나는 소화모드의 영향이 고신장률 영역으로 확장된 것으로 이해될 수 있으며 이전 본 연구그룹에서 저신장률화염의 화염소화가 복사열손실에 추가하여 반경방향의 전도열손실에 기인한다고 보인 사실과 일치하고 있다.⁽¹⁰⁾

4. 결론

화염 소화에서 에지화염의 역할을 명확하게 하기 위해 대향류 확산화염에서 속도비, 전체신장률, 버너 간격, 버너직경을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 화염소화 임계질소물분율은 전체신장률에 따라 전형적인 C-curve로 나타났다. 화염 소화 모드는 에지화염의 진동 후 화염 중심으로 수축하며 소화되는 소화모드(Regime I), 에지화염의 진동 없이 수축하며 소화되는 소화모드(Regime II), 그리고 화염 중심에 화염 구멍이 생기면서 소화되는 소화모드(Regime III)로 나누어졌다. 화염의 반경방향에 따라 측정된 화염 표면의 전도열손실은 저신장률 화염에서 가장 높게 나타났으며 고신장률 화염에서 가장 낮게 나타났

다. 비정상 2차원조건에서 에너지방정식을 통한 수치해석 결과 모든 경우에서 축방향의 전도열손실이 가장 크게 나타났으며, 저신장률에서는 축방향의 전도열손실에 추가하여 반경방향의 전도열손실이 지배적으로 나타났다. 반면 고신장률 영역에서는 축방향의 전도열손실, 반경방향의 전도열손실, 그리고 반경방향의 대류 항이 지배적으로 나타났으며, 반경방향의 대류 항이 에지화염의 안정화에 기여한다는 것을 알 수 있었다.

위의 사실을 토대로 화염 소화 메커니즘을 설명할 수 있었다. 저신장률의 화염은 에지부분에서 희석제의 첨가와 반경방향의 전도열손실에 따라 에지화염의 전파속도가 음의 방향으로 증가하면서 화염이 수축하고, 화염 중심으로부터 열 공급으로 다시 확장된다. 이로 인해 진동 현상이 나타나고 결국 수축하면서 소화되는 Regime I의 소화모드가 나타난다. 그리고 전체신장률이 다소 증가한 경우의 조건에는 여전히 화염중심의 온도가 가장 높지만 일정거리까지 온도 변화가 거의 없기 때문에 열 공급이 충분히 되지 않아 수축하는 화염을 다시 확장시키지 못하고 소화가 이루어지는 Regime II의 소화모드가 나타난다. 고시장을 조건은 저신장률과는 달리 에지화염은 반경방향의 대류 항이 반경방향의 전도열손실과 상쇄되어 화염이 수축하지 않고 온도가 가장 높은 상태로 안정하게 유지되며, 희석제의 첨가로 화염이 약해지면서 온도가 가장 낮은 화염 중심에서 화염구멍으로 소화가 이루어지는 Regime III의 소화모드가 나타난다.

실험 조건에 따른 화염 소화모드가 나타나는 영역이 상이하게 나타났다. 화염 소화모드는 화염길이 즉, 반경방향의 전도열손실이 증가할수록 저신장률의 화염소화모드가 고신장률 영역으로 확장되어 나타났다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 일반연구자사업(2010-0021916)의 연구비를 지원받아 수행되었고 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Tsuji, H., 1982, "Counterflow Diffusion Flames," *Energy Combust.*, Vol. 9, pp. 93~119.

(2) Smooke, M.D., Puri, I.K. and Seshadri, K., 1986, "A comparison Between Numerical Calculations and Experimental Measurements of the Structure of a Counterflow Diffusion Flame Burning Diluted Methane in Diluted Air," *Combust. Inst.* pp. 1783~1792.

(3) Peters, N. and Kee, R.J., 1987, "The Computation of Stretched Laminar Methane-Air Diffusion Flames Using a Reduced Four-Step Mechanism," *Combust. Flame.*, Vol. 68, pp. 17~29.

(4) Chelliah, H.K., Law, C.K., Ueda, T., Smooke, M.D. and 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," *Combust. Inst.* Vol. 23, pp. 503~511.

(5) Sung, C.-J., Liu, J.B. and Law, C.K., 1995, "Structural Response of Counterflow Diffusion Flames to Strain Rate Variations," *Combust. Flame.*, Vol. 102, pp. 481~492.

(6) Smooke, M.D., Yetter, R.A., Parr, T.P., Hanson-Parr, D.M., Tanoff, M.A., Colket, M.B. and Hall, R.J., 2000, "Computational and Experimental Study of Ammonium Perchlorate/Ethylene Counterflow Diffusion Flames," *Combust. Inst.*, Vol. 28, pp. 2013~2020.

(7) Maruta, K., Yoshida, M., Guo, H., Ju, Y. and Niioka, T., 1998, "A Computational Study of Flame Radiation in PMMA Diffusion Flames Including Fuel Vapor Participation," *Combust. Flam.*, Vol. 112, pp. 181~187.

(8) Frate, F.C., Bedir, H., Sung, C.-J. and T'ien, J.S., 2000, "On Flammability Limits of Dry CO/O₂ Opposed-jet Diffusion Flames," *Combust. Inst.*, Vol. 28, 2047~2054.

(9) Han, B., Ibarreta, A.F., Sung, C.-J. and T'ien, J.S., 2005, "Experimental Low Stretch Gaseous Diffusion Flames in Bouyancy-Induced Flowfields," *Combust. Inst.*, Vol. 30, pp. 527~535.

(10) Park, J. S., Hwang, D. J., Park, J., Kim, J. S., Kim, S. C., Keel, S. I., Kim, T. K. and Noh, D. S., 2006, "Edge Flame Instability in Low-Strain-Rate Counterflow Diffusion Flames," *Combust. Flame.*, Vol. 146, pp. 612~619.

- (11) Chung, S. H., 2007, "Stabilization Propagation and Instability of Tribachial Triple Flame," *Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 877~892.
- (12) Ruetsch, G.R., Vervisch, L. and Liñán, A., 1995, "Effects of Heat Release on Triple Flames," *Phys. Fluids.*, Vol. 7, pp. 1447~1454.
- (13) Yoon, S. H., Han, J. K., Park, J., Yun, J. H. and Keel, S. I., 2011, "Self-Excitation in Laminar Free-Jet Propane Flames Diluted with Nitrogen," *Combust. Flame.*
- (14) Bundy, M., Hamins, A. and Lee, K.Y., 2003, "Suppression Limits of Low Strain Rate Non-Premixed Methane Flames," *Combust. Flame.*, Vol. 133, pp. 299~310.
- (15) Cha, M. S. and Ronney, P. D., "Propagation Rates of Nonpremixed Edge Flames," *Combust. Flame.*, Vol. 146, 2006, pp. 312~328.
- (16) Chelliah, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, M. D. and 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," *Combust. Inst.*, Vol. 23, p. 503,
- (17) Park, D. G., Park, J., Yun, J. H. and Keel, S. I., 2008, "Study on Outer Edge Flame Effect of Flame Extinguish in Counterflow Diffusion Flames," *KOSCO*, Vol. 13, pp. 16~25.
- (18) Yun, J. H., Park, D. G., Keel, S. I. and Park, J., 2009, "Behavior of Low Strain Rate Flame Disks In Couterflow Diffusion Flame," *Int. J. Spray and Combust. Dynamics*, Vol. 1, pp. 473~496.