

# 저신장을 대향류화염에서 화염소화에 있어서 천이에 대한 연구

박대근\* · 박 정\*\* · 김정수\*\* · 배대석\*\*

## A Study on Transition of Flame Extinction at Low Strain Rate Counterflow Flames

DaeGeun Park\* · Jeong Park\*\* · JeongSoo Kim\*\* · Daesuk Bae\*\*

### ABSTRACT

Experiments were conducted to study the transition of shrinking flame disk to flame hole in counterflow diffusion flames. The studies of transition are well described by varying burner diameters, global strain rate and velocity ratio. It is experimentally verified that radial conduction heat loss is affected at even high strain rate flames for appropriately small burner diameters. It is also shown that flame extinction modes are grouped into three and particularly, hole or stripe is observed in sufficiently high strain rate flames. There exists critical radius according to burner diameter which divide flame extinction modes into three parts.

### 초 록

대향류확산화염에서 수축하는 화염디스크로부터 화염구멍으로 천이에 대한 실험 연구가 수행되었다. 이러한 연구는 버너직경, 전체신장을 그리고 속도비에 따라 묘사된다. 적절히 작은 버너 직경을 사용한 경우 고신장을 화염입에도 반경방향의 전도 열손실의 효과가 기여하는 것을 실험적으로 입증하였다. 그리고 화염소화 모드는 세 가지로 분류되며 특히, 충분히 큰 고신장을 화염의 표면에서 화염구멍 또는 줄무늬로 나타났다. 그리고 버너직경에 따라 화염소화모드를 구분 짓는 임계화염반경이 존재한다.

Key Words: Flame Extinction(화염소화), Flame Hole or Stripe(화염구멍 또는 줄무늬), Radial Conduction Heat Loss(반경방향의 전도열손실), Critical Flame Radius(임계화염반경)

### 1. 서 론

희석제 첨가로 나타나는 화염 소화 거동에 대한 기존 연구들은 Fig. 1과 같이 C-곡선으로 나타내며 고신장에서 화염소화는 화염스트레치에 기인하며, 저신장에 대한 화염소화는 복사 열손실에 기인하는 것으로 알려졌다. [1-2] 그러나 최근 본 연구 그룹에서 수행된 연구들에서

\* 부경대학원 에너지시스템공학과

\*\* 부경대학교 기계공학부

연락처, E-mail: jeongpark@pkn.ac.kr

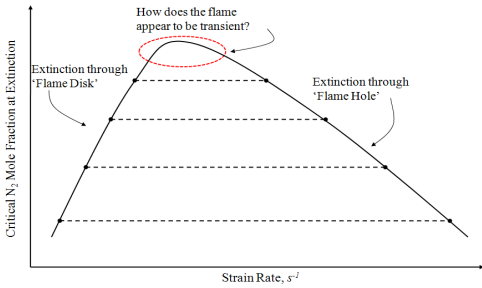


Fig. 1. A Schematic drawing of C-curve response

유한한 버너직경을 사용한 저신장을 화염의 소화에 있어서 복사열손실의 역할뿐만 아니라 반경방향의 전도열손실의 중요성을 인식하였다.[3]

Figure 1을 살펴보면 C-곡선에서 전환점을 기준으로 크게 저신장을 화염과 고신장을 화염으로 나뉘며, 저신장을 영역에서는 화염외부에서 화염중심부로 화염길이가 줄어들면서 소화가 진행되고 고신장을 영역에서는 화염 구멍(Flame Hole)을 통해 화염중심부부터 소화가 진행되는 것으로 알려져 있다. 그러므로 C-곡선의 전환점(Turning Point) 근처에서 천이 영역이 존재할 것으로 판단되고, 본 연구 그룹의 확장된 연구에서 전체화염신장율이 증가함에 따라 저신장의 수축하는 화염디스크로부터 화염구멍(flame-hole)으로 천이하는 과정을 체계적으로 보인바 있다.[4]

버너직경의 변화는 반경방향의 전도열손실에 직접적으로 영향을 주어 화염디스크로부터 화염구멍으로 천이과정 또한 영향을 받을 가능성이 있다. 본 연구는 버너 직경 18mm와 26mm의 대향류버너를 사용하고 전체화염신장율과 속도비에 따라 실험을 수행하여 이를 명확히 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

Figure 2는 실험에 사용된 대향류버너의 개략도이다. 대향류 버너는 외부에 교란되는 화염을 제거할 수 있는 구조로 제작되었다. 버너 노즐간의 간격은 15.0mm로 고정하였고, 버너 직경은 18mm, 26mm의 두가지 경우에 대해 실험을 수행

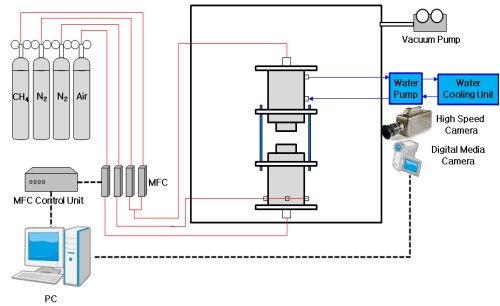


Fig. 2. Schematic diagram of counterflow burner and flow systems

하였다. 대향류 화염에서의 화염대는 산화제 측에 형성되는데 화염대가 노즐에 부착되는 것을 막기 위해 연료를 상부 노즐에서, 산화제는 하부 노즐에서 분사하여 실험하였다. 외부의 화염 교란을 막고 후류(wake flow)에 의해 생성되는 외부 화염을 제거하기 위해 질소 장막유동을 공급하게 된다. 그리고 연료 및 산화제 덕트 내부에는 미세한 매쉬 스크린(mesh screen)을 다단으로 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동속도를 갖게 하였고, 이를 마이크로마노미터를 이용하여 균일한 유동임을 검증하였다.

다차원적 효과를 명확히 하기 위해 속도비와 전체신장율을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 속도비의 범위는 3에서 5, 전체 신장율의 범위는 10에서 100s<sup>-1</sup>이다. 전체 화염신장율의 정의는 다음과 같다.

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

여기서  $Vr = V_f/V_a$ 는 속도비,  $V$ 와  $\rho$ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며,  $L$ 은 노즐간의 거리, 하첨자  $f$ 와  $a$ 는 각각 연료와 산화제를 나타낸다. 연료는 99.95%의 고순도 메탄을 사용하였으며, 희석제로는 고순도 질소(99.999%)를 사용하였다. 또한 산화제로 고순도 99.99%의 공기를 사용하였다. 진동하는 화염의 거동을 관찰하기 위하여 화염 정면에서 디지털 미디어 카메라로 촬영하고, 화염구멍을 통한 화염 소화과정을 관찰하기 위해 상부에서 고속카메라(Phantom v7.2)로부터 취득된 화염거동들은 Matlab기반의 프로그램을 통해 분석하였다.

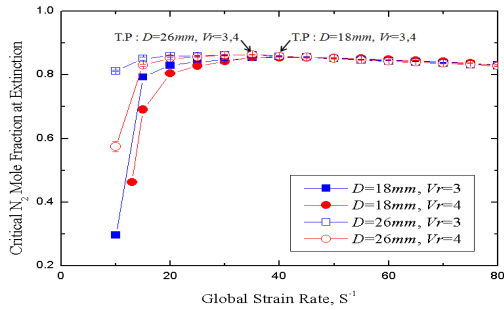


Fig. 3. Variations of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate at various flame conditions

### 3. 결과 및 논의

Figure 3은 전체화염신장율에 따른 화염소화임계물분율의 변화를 18mm와 26mm에 대해 비교하여 나타내었다. 현재의 실험 데이터들에서 알 수 있듯이 버너 직경이 작을수록 화염소화 임계물분율은 낮게 나타나고 전환점 또한 고신장을 영역으로 이동한 것을 알 수 있다. 화염소화 임계물분율이 작게 나타난 것과 전환점이 이동한 이유는 상대적으로 화염 길이가 감소하기 때문에 복사열손실에 추가하여 반경방향으로의 전도열손실에 기인하기 때문으로 이해된다. 그리고 고신장을 화염에서는 열손실과 부력효과를 무시할 수 있기 때문에 각 조건에서의 화염소화 임계물분율은 하나의 곡선으로 일치한다.

최근에 18mm 버너직경으로 수행된 천이에 관한 연구에서 전환점을 지나는 전체화염신장율임에도 화염면을 따라 반경방향의 전도열손실의 영향이 크게 작용하고 있다고 상세히 보인바 있다.[3] 이러한 점으로 볼 때 버너직경 18mm보다 큰 버너직경을 사용할 경우에 전환점을 지나는 전체화염신장율에서 반경방향의 전도열손실에 의한 영향이 상대적으로 감소하는 것을 의미하고 천이영역 상이하게 나타날 것으로 예상된다. 이것을 확인하기 위해 버너 상부에서 화염 소화의 동적 거동을 고속카메라로 촬영하고 분석하였다.

Figure 4는 18mm와 26mm 버너 직경에 대해 속도비 3인 경우에 화염 소화 모드를 나타내고

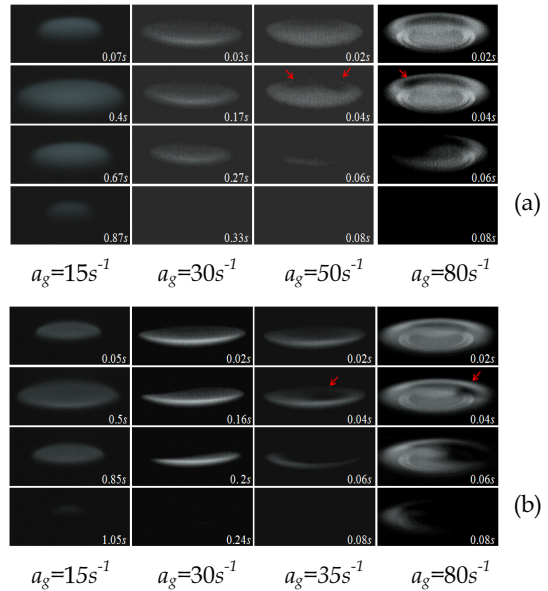


Fig. 4. Various flame extinction modes at the velocity ratio of 4 for (a) the burner diameters of 18 mm and (b) 26mm

있다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 전체화염신장율이  $15s^{-1}$ 의 경우 화염 소화는 화염디스크의 외각의 예지화염의 진동을 통하여 소화하는 것을 알 수 있다. 전체화염신장율이  $40s^{-1}$ 인 경우 화염 진동없이 화염디스크는 예지화염이 음의 전파속도를 가지면서 화염중심을 향해 수축하는 것을 볼 수 있다. 그리고 18mm 버너직경에 대해 전체화염신장율이 50,  $80s^{-1}$ , 26mm 버너직경에 대해 전체화염신장율 35,  $80s^{-1}$ 인 경우 화염 진동 및 화염 디스크의 수축없이 화염면 내부에 화염구멍 또는 화염줄무늬(Flame Stripe)가 발생하면서 화염 내부에서 외부로 음의 전파속도를 가지면서 화염 소화가 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 18mm 버너직경에 대해서 전체화염신장율  $50s^{-1}$ 인 경우는 화염소화시 화염구멍이 2개가 형성된 것을 볼 수 있다. 이는 화염중심부보다 화염중심으로부터 유한한 거리에서 화염온도가 낮다는 기존 연구결과와 일치함을 나타내고 있으며,[5] 이를 근거로 화염소화시 화염중심부로부터 유한한 거리에서 화염강도가 약해져 화염구멍이 2개가 형성된 것으로 판단된다. 그리고 버너직경 26mm에 대해 전체화염신장율  $35s^{-1}$ 인 경

우에는 전체화염신장율  $80s^{-1}$ 에 비해 화염구멍의 위치가 중심에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 고신장율 영역에서 전체화염신장율이 더 증가할수록 화염줄무늬 경향이 강해진다는 것을 의미한다. 그리고 18mm와 26mm 버너직경간의 반경방향의 전도열손실 효과와 천이영역구분을 명확히 하기 위해 속도비와 전체화염신장율에 따라 화염 소화 모드를 체계적으로 정리하여 Table 1과 같이 나타내었다.

Table 1에 나타낸 바와 같이 18과 26mm의 버너직경에 대해서 Regime I은 에지화염이 진동하면서 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역, Regime II는 에지화염 진동없이 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역, 그리고 Regime III는 화염디스크가 수축하지 않고 화염면에 화염구멍 또는 줄무늬 모양으로 소화되는 영역이다. 버너직경이 증가할수록 전환점의 위치와 각 Regime은 저신장율로 이동된 것을 알 수 있다. 특히, 18mm 버너직경을 사용한 경우를 살펴보면 고신장율 화염의 전형적인 소화기구라 할 수 있는 화염 구멍 또는 화염줄무늬에 의한 화염 소화 모드인 regime III는 전환점을 지나고 고신장율 화염에서 나타나고 또한 속도비가 증가할수록 더 높은 전체화염신장율에서 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 버너직경이 감소할수록 화염길이 또한 감소하기 때문에

Table 1. The classification of flame extinction modes at the burner diameters of 18mm and 26mm

		$a_g, s^{-1}$	
		18 mm	26 mm
$V_f=3$	Regime I	$\leq 25$	$\leq 25$
	Regime II	30-45	30
	Regime III	$50 \leq$	$35 \leq$
	Turning point	40	35
$V_f=4$	Regime I	$\leq 30$	$\leq 25$
	Regime II	35-55	30-35
	Regime III	$60 \leq$	$40 \leq$
	Turning point	40	35
$V_f=5$	Regime I	$\leq 30$	-
	Regime II	35-75	-
	Regime III	$80 \leq$	-
	Turning point	40	-

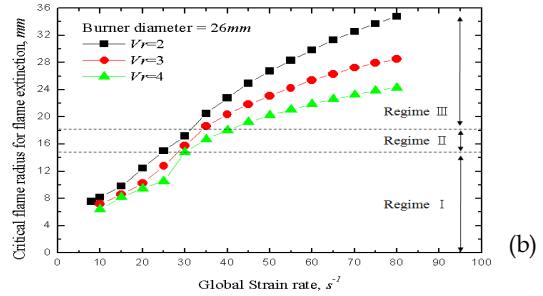
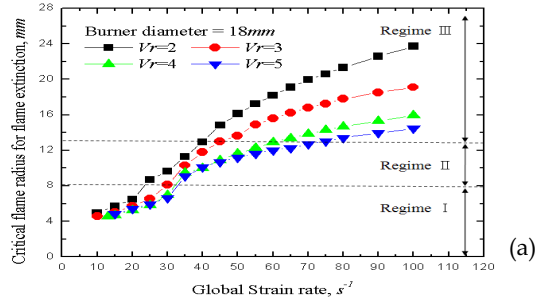


Fig. 5. Various of critical flame radius for flame extinction with global strain rate in terms of burner diameter of (a) 18mm, (b) 26mm

반경방향의 전도열손실에 의한 영향이 커져 고신장율 화염에는 반경방향의 전도열손실이 크게 작용함을 의미한다.

Figure 5는 버너직경에 따른 소화점 부근에서 평균 화염반경을 전체화염신장율에 따라 나타내고 있다. 위의 Table 1을 토대로 각 Regime의 경계를 점선으로 나타내었다. 에지화염 진동없이 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역인 Regime II의 경우 버너직경 18mm에 대해서는 화염반경 약 8mm, 버너직경 26mm에 대해서는 화염반경 약 15mm 이상일 경우에 나타났고, 그 미만인 경우에는 에지화염이 진동하면서 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역인 Regime I이 나타났다. 또한 화염구멍 또는 줄무늬 모양으로 소화되는 영역인 Regime III는 버너직경 18mm에 대해서는 화염반경 약 13mm, 버너직경 26mm에 대해서는 화염반경 약 18mm 이상에서 나타났다. Regime II의 영역은 18mm 버너직경으로 수행한 결과가 26mm 버너직경으로 수행된 결과보다 상대적으로 넓게 나타내고 있다. 이 또한 버너직경이 작을수록 저신장율 화염

소화기구인 반경방향의 전도열손실이 크게 작용함을 입증하고 있다. 그리고 26mm보다 큰 버너직경으로 수행했을 때는 Regime II의 영역이 더 감소되거나 소멸될 수 있을 것으로 예측된다. Fig. 5 (a)를 살펴보면 속도비 5인 경우, 전환점 ( $a_g=40s^{-1}$ )을 지난 고신장율 영역이라도 화염소화 모드가 Regime III로 나타나는 임계화염반경에 도달하지 못한다면 화염소화는 화염구멍을 통해 나타나지 않고 여전히 화염진동없이 수축하는 Regime II의 영역에 속해있는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 화염소화 모드는 C-커브에서의 전환점으로 나누는 것보다는 화염길이에 지배적인 것을 알 수 있다. 따라서 버너직경에 따라 화염소화 Regime을 구분짓는 임계화염반경이 존재한다는 것을 의미한다.

#### 4. 결 론

대향류 확산화염에서 수축하는 화염디스크로부터 화염구멍 또는 줄무늬 형태로 소화하는 영역으로 천이에 관한 실험적 연구가 수행되었고 그 결과는 다음과 같다.

버너 직경이 감소함에 따라 화염소화 임계질소물분율은 큰 버너 직경으로 수행했을 때 보다 상대적으로 낮게 나타났다. 이것은 작은 버너를 사용하는 경우 저신장율의 화염소화에 중대한 역할을 하는 반경방향 전도열손실의 효과가 크게 작용하기 때문이다. 그리고 18mm와 26mm 버너직경을 사용하는 경우 예지화염이 진동하면서 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역(Regime I), 예지화염 진동없이 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역(Regime II), 그리고 화염디스크가 수축하지 않고 화염구멍 또는 줄무늬 모양으로 소화되는 영역(Regime III)으로 세가지의 화염 소화 모드가 나타났다. 26mm의 버너직경으로 수행한 결과 18mm 버너직경으로 수행한 결과보다 각 Regime과 전환점이 저신장율 영역으로 이동하였고 이 또한 큰 버너직경으로 수행했을 때 반경방향의 전도열손실의 효과

가 감소되는 것을 의미한다. 그리고 각 Regime의 경계를 전체화염신장율을 따라 평균화염반경으로 나타낸 결과, Regime I과 Regime II는 18mm와 26mm의 각각 버너직경에 따라 약 8mm와 약 15mm에서, Regime II과 Regime III는 약 13mm와 약 18mm에서 구분 지을 수 있다. 이를 통해 화염소화 모드는 C-커브에서의 전환점으로 나누는 것보다는 화염길이에 지배적이고 버너직경에 따라 화염소화 Regime을 구분짓는 임계화염반경이 존재함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. Maruta, K., Yoshida, M., Guo, H., Ju, Y., and Niioka, T., "Extinction of Low-stretched Diffusion Flames in Microgravity," *Combust. Flame*, Vol. 112, pp.181-187, 1998
2. Bundy, M., Hamins, A., and Lee, K. Y., "Suppression limits of Low Strain Rate Non-premixed Methane Flames," *Combust. Flame*, Vol. 133, pp. 299-310, 2003
3. J. S. Park, D. J. Hwang, J. Park, J. S. Kim, S. C. Kim, S. I. Keel, T. K. Kim, D. S. Noh, "Edge flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flame", *Combust. Flame*, Vol. 146, pp.612-619, 2006
4. D. G. Park, J. H. Yun, J. Park, S. I. Keel, "A Study on Flame Extinction Characteristics along a C-curve", *Energy & Fuels*, Vol. 23, pp.4236-4244, 2009
5. J. H. Yun, D. G. Park, S. I. Keel, and J. Park, "Experimental Study on Behavior of Low Strain Rate Flame Disks in Counterflow Diffusion Flame," *Int. J. Spray & Combust. Dynamics*, Vol. 44, No. 4, pp.473-496, 2009