

반경방향 다중 채널 내 예혼합 화염의 안정화 특성과

맥동 불안정성에 관한 실험적 연구

이대근^{*†}, 고창복

An Experimental Study on the Flame Localization Characteristics and Pulsating Instability in a Radial Multi-channel

Dae Keun Lee^{*†}, Chang-Bog Ko

ABSTRACT

In order to simulate and visually observe combustion phenomena in cylindrical radial-flow porous inert media, a radial multi-channel burner, made of transparent quartz plates, was fabricated. Flame stabilization characteristics and its pulsating instability in the burner were experimentally investigated with respect to various mixture flow rates and equivalence ratio. As a result, five different flame behaviors, such as stable flame, pulsating instability, sudden extinction, blowout and unstable extinction, were observed. Mean radial position of circularly arranged multi-flame and its averaged burning velocity were measured and then compared to the freely propagating flame. The multi-flame pulsation frequency is about several tens of Hz and it is supposed to be generated by the heat diffusion enhancement to cold pre-mixture by the intensive gas-solid interaction.

Key Words : Radial multi-channel, Meso-scale channel, Premixed flame, Flame stabilization, Pulsating instability

불활성 다공체(porous inert medium, PIM) 내부에 존재하는 화염의 주변에서는 고체 상(phase)의 전도 및 복사 열전달에 의해 고온의 배기가스 열이 화염대 상류로 전달되어 차가운 예혼합기를 예열시키는 열 재순환이 발생하며, 조건에 따라서는 초과 엔탈피 현상이 나타난다. 이러한 열 에너지 집중화 현상은 고온을 필요로 하는 분야나 반응성이 떨어지는 연료의 연소, 혹은 공해물질 배출저감 측면에서 다양하게 응용되고 있다[1-2].

PIM 내부에서 화염의 전파 및 거동은 가스 상에서 발생하는 열화학적 반응대의 전파 속도와 고체 상을 따라 이동하는 열적 파동의 전파 속도에 따라 대별된다. 두 전파 속도가 다른 경우, 즉 화염의 상대적인 이동 속도가 매우 빠르거나 고체의 열확산도(thermal diffusivity)가 매우 작은 경우 두 상(phase) 간에 열적 상호작용은 미미하게 되고 고체 상은 화염에 대해 마치 체적 열손실(volumetric heat loss)처럼 작용한다. 반면에 두 전파 속도가 유사하면 활발한 열적 상호작용이 열 재순환을 유발하고 이로 인해 자유 전파

화염(freely propagating flame)에서는 볼 수 없었던 다양한 현상들이 발생하게 된다.

한편 단면의 대표 길이가 예혼합기의 소멸 거리(quenching distance)와 유사한 meso-scale 채널에 대해 내부에 존재하는 화염과 벽면 간의 상호작용 메커니즘은 전술한 PIM과의 상호작용과 기본적으로 동일하며, 화염 거동의 결과도 정성적으로 매우 유사하다. 이에 관해서는 저자[3-5]의 선행연구에서 밝힌 바와 같다.

균일한 기공률과 기공 크기를 가지는 PIM에 예혼합기가 단일 방향으로 공급될 때 그 내부에 안정화된 화염을 구현하는 것은 엄밀한 의미에서 매우 어렵다. 이는 예를 들어 주어진 당량비에서 PIM에 대해 화염이 정지하는 유량 조건이 유일하기 때문이며, 단일 채널[3]과 이를 적층하여 PIM을 모사한 다중 채널[5]에서도 동일한 현상이 관찰된 바 있다. PIM 내 연소를 안정적으로 구현하여 넓은 운전 영역을 갖도록 하기 위해서 불균일한 다공체를 유동방향으로 적층[6-8]하거나, 원통형의 PIM 내부로부터 예혼합기가 반경 방향으로 공급[9-11]되도록 할 수 있다. 후자의 경우 PIM 내부로 갈수록 유동 속도가 증가하므로 적절한 범위의 조건 하에서는 화염이 안정화되는 위치가 항상 존재한다.

* 한국에너지기술연구원

† 연락저자, dklee@kier.re.kr

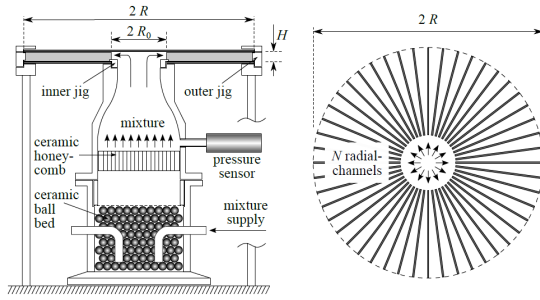


Fig. 1. Schematic of radial multi-channel burner.

본 연구에서는 선행 연구[11]의 결과를 바탕으로 중심에서 반경방향으로 예혼합기가 공급되는 원통형 PIM 내부에서 화염 안정화와 거동을 모델 연소기를 통해 모사하고 보다 상세히 살펴보는 데 그 목적이 있다. 이를 위해 Fig. 1에 도시된 반경방향 다중 채널(radial multi-channel, RMC) 연소기를 고안하였다. 총 72개의 발산형(diverging) 채널을 원주 방향으로 정렬하여 높이 $H = 5$ mm의 디스크를 형성하였으며 채널의 벽은 모두 석영이다. MFC로 정량 제어되는 C_3H_8 -air 예혼합기의 유동은 그림과 같이 균일화된 후 RMC의 중심에서 반경방향으로 공급된다. 화염의 안정화 위치 및 시간에 따른 거동은 RMC의 상부에 설치된 디지털 카메라와 고속 카메라를 이용하여 관찰하였고, 압력 센서를 이용해 화염에 의해 발생하는 음파를 계측하였다.

실험 결과, 예혼합기의 당량비 및 유량에 따라 크게 다섯 가지의 화염의 안정화 및 동적 거동이 관찰되었으며 이를 Fig. 2에 도시하였다. 먼저 안정화된 화염은 적절한 당량비 범위 내에서 유량이 작은 경우에 관찰되었으며, 72개 화염들의 반

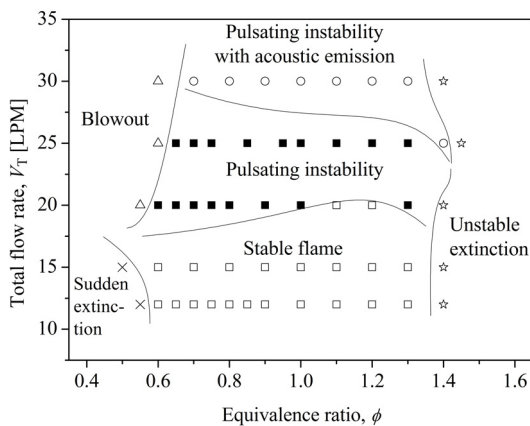


Fig. 2. Stabilization and dynamic behaviors of C_3H_8 -air premixed flame in RMC burner with respect to the equivalence ratio and the mixture flow rate.

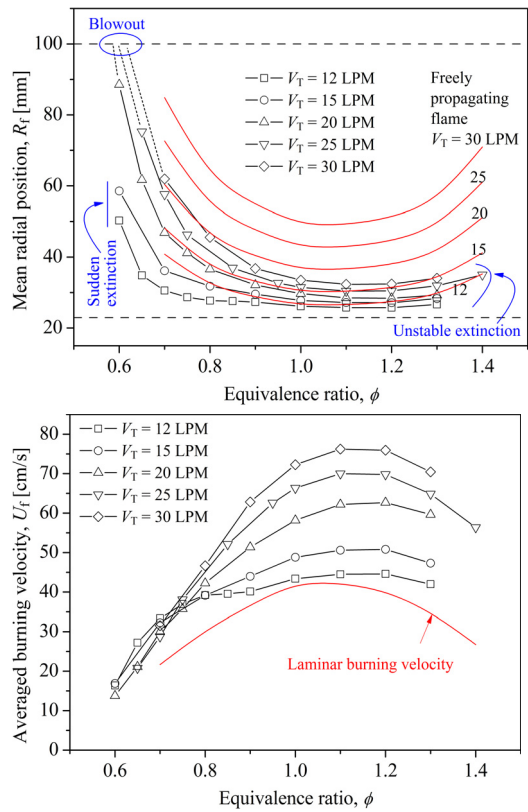


Fig. 3. Mean radial position (upper, a) and averaged burning velocity (lower, b) of multiple flames in RMC.

경 방향 위치가 거의 동일하여 원형의 배열을 이루었다. 유량이 증가함에 따라 각각의 화염이 반경 방향으로 진동하는 맥동 불안정성(pulsating instability)이 관찰되었으며, 유량이 더욱 증가하면 화염의 진동 폭이 증가하면서 귀로 들을 수 있을 정도의 음파 발산을 동반하였다. 한편 연료 희박조건인 당량비 약 0.6 이하에서는 유량이 작은 경우 화염들이 순간적으로 소화하였으며, 유량이 큰 경우 외부로 방출(blowout)되었다. 반면에 당량비 약 1.4 이상에서는 유량에 관계없이 급격한 화염 진동과 그로 인한 화염 소화가 관찰되었다.

화염의 안정화 및 맥동 불안정 영역에 대해 화염의 디지털 사진으로부터 개별 화염의 반경방향 위치를 측정하고 총 72개 화염에 대해 평균하여 원형 배열 화염의 평균 반경 R_r 를 도출하였다. Fig. 3a에 도시된 바와 같이 당량비 약 1.1 근처에서 R_r 는 유량에 관계없이 최소값을 가지며, 유량이 작을수록 더 작은 화염 반경을 갖는다. 자유 전파 화염의 경우와 비교하면 당량비 및 유량에 관계없이 항상 더 작은 화염 반경을 갖는데, 이는 벽면을 통한 열 재순환의 효과이다. 한편

급작스러운 화염의 소화는 그림에서 보듯이 상대적으로 작은 화염 반경에서 발생하는데, 이는 단일 채널 내 화염 전파에 관한 선행연구[3]에서 밝힌 바와 같이 채널의 직경이 작아지면 유량이 임계값 이하/이상으로 감소/증가할 때 화염의 역화/외부 방출 없이 순간적으로 소화하는 수동적 전파영역(passive propagating regime)과 관련이 있는 것으로 판단된다.

각 채널 내 화염이 1차원이라 가정하면 위 결과를 이용하여 단면 평균화된 연소속도(averaged burning velocity)를 계산할 수 있다. 이를 Fig. 3b와 같이 도시하면 두 가지 regime을 확인할 수 있다. 먼저 당량비 약 0.75 이하에서는 평균 연소속도가 유량에 크게 의존하지 않는 반면, 0.8 이상에서는 유량이 증가함에 따라 평균 연소속도도 크게 증가하여, 30 LPM의 경우 층류 연소속도의 최대값 대비 약 2배의 값을 갖는다.

백동 불안정성이 발생하는 경우 고속카메라로 관찰한 결과 모든 화염의 진동 주파수는 대동소이하며 채널 간의 위상차가 존재한다. 압력 센서를 이용한 측정과 FFT 결과에 따르면, 유량이 작은 경우에는 수 십 Hz 대역의 약한 피크가 관찰되나 유량이 증가할수록 약 200 Hz의 강한 피크가 중첩되어 발생하였다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원 기관고유사업의 일환으로 수행되었습니다(B3-2461-04).

참고 문헌

[1] J.R. Howell, M.J. Hall, J.L. Ellzey, Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media, *Prog. Energy Combust. Sci.* 22 (1996), 121 - 145.
 [2] M.A. Mujeebu, M.Z. Abdullah, M.Z.A. Bakar, A.A. Mohamad, M.K. Abdullah, Applications of porous media combustion technology - a review, *App. Energy* 86 (2009), 1365 - 1375.
 [3] D.K. Lee, K. Maruta, Heat recirculation effects on flame propagation and flame structure in a mesoscale tube, *Combust. Theory Model.*, 16, 507-536, 2012.
 [4] D.K. Lee, Application of combustion in porous inert medium to thermophotovoltaic generation of electricity and excess enthalpy combustion similarity to both single and multi-channels, 45th KOSCO Symposium.
 [5] D.K. Lee, S.I. Park, N.I. Kim, Experimental study of flame propagation and pulsating instability in a multiple-mesoscale-channel as a model porous medium burner, (will be re-

ported elsewhere).

[6] P.-F. Hsu, W.D. Evans, J.R. Howell, Experimental and numerical study of premixed combustion within nonhomogeneous porous ceramics, *Combust. Sci. Tech.* 90 (1993) 149-172.
 [7] B.J. Vogel, J.L. Ellzey, Subadiabatic and superadiabatic performance of a two-section porous burner, *Combust. Sci. Tech.* 177 (2005), 1323-1338.
 [8] S.G. Kim, D.K. Lee, D.-S. Noh, C.-B. Ko, Experimental investigation on the highly N₂-diluted CH₄-O₂ flame stabilization in an axially two-section porous medium, 46th KOSCO Symposium.
 [9] S.A. Zhdanok, K.V. Dobrego, S.I. Futko, Flame localization inside axisymmetric cylindrical and spherical porous media burners, *Int. J. Heat Mass Tran.* 41 (1998) 3647-3655.
 [10] V.I. Drobyshevich, Numerical study of combustion in a cylindrical porous burner, *Combust. Explo. Shock Waves* 44 (3) (2008) 262-265.
 [11] D.K. Lee, An experimental study on flame stabilization under radial mixture flow inside cylindrical porous media, 9th Asia-Pacific Conf. Combust., Gyeongju, Korea, 19-22 May 2013.
 [12] M. Akram, S. Kumar, Experimental studies on dynamics of methane-air premixed flame in meso-scale diverging channels, *Combust. Flame*, 158, 915-924, 2011.