

메소 스케일 사각 채널 내 예혼합 화염의 거동에 미치는 벽면 물성의 영향에 관한 실험적 연구

곽영태* · 이대근** · 고창복*

Experimental Study of Material Effects on the Flame Behaviors in Meso-scale Rectangular Channels

Young Tae Guahk*, Dae Keun Lee**, Chang-Bog Ko*

ABSTRACT

Flame behaviors in meso-scale rectangular channels are largely influenced by heat recirculation through wall. In order to investigate the effects of wall thermal property on the heat recirculation and flame behaviors, meso-scale rectangular channels, of which upper and lower walls are made of quartz, stainless steel and silicon carbide and front and rear walls of quartz for flame visualization, were fabricated in this study. As a result, characteristic mixture velocities of propane-air flame, such as transition, stationary, and instability onset velocities, were measured for each channel and various mixture conditions. The results show that thermal conductivity has a close relationship to the characteristic velocities.

Key Words : Premixed flame, Meso-scale channel, Heat recirculation, Material effects, Flame transition, Pulsating instability

단면의 대표 길이가 주어진 예혼합기의 소멸 거리(quenching distance)와 유사한 메소 스케일의 채널 내부에 화염이 존재할 때 그 거동은 벽면의 영향을 크게 받는다. 채널의 크기가 작아짐에 따라 뜨거운 기연가스로부터 벽면으로의 대류 열전달이 증가하고, 뜨거운 벽면은 전도 및 복사 열전달에 의해 미연가스 측으로 열을 수송하며, 이는 다시 차가운 미연가스를 예열하는 열 재순환이 발생하기 때문이다. 이러한 강한 상호작용 하에서는 기존의 자유 전파 화염(freely propagating flame)에서는 볼 수 없었던 다양한 현상들이 발생한다.

D.K. Lee 등의 선행연구[1]에 따르면 메소 스케일 채널 내 화염 전파는 능동 전파영역(self propagation regime, SPR)과 수동 전파영역(passive propagation regime, PPR)으로 대별된다. SPR에서는 기존 자유 전파화염 이론과 같이 두 개의 branch를 갖는데, 각각의 branch에서 채널에 대한 상대적인 화염의 전파속도가 영에 가까워질 때 벽면과의 강한 상호작용으로 인해 기존 이론에서는 볼 수 없었던 spike 모양의 branch가 형성된다. 이 spike branch 상에서 화염은 유속에 따라 서서히 상류로/하류로 전파(slowly advancing/receding)하며, 그 사이에 유

일한 안정화 속도(stationary velocity)를 갖는다. 또한 spike branch로부터 유속을 감소시키면 상류로의 전파속도가 갑자기 증가하는 지점이 나타나는데 이때의 유속을 천이 속도(transition velocity)라 한다. 한편 PPR은 기존의 소멸거리 이하에서 나타나는데 화염이 자체적으로 유지되지 못하고 열 재순환에 의해 겨우 유지되고 있는 상태이다. 따라서 유속을 증가·감소시키면 갑작스런 소화 현상이 발생한다.

본 연구에서는 선행연구[1]에서 확인한 다양한 화염 거동들이 채널 벽면의 물성에 따라 어떠한 영향을 받는지를 실험을 통해 확인하는데 그 목적이 있다. 열 재순환에 있어서 벽면은 기연가스로부터 미연가스로의 열을 수송하는 역할을 담당하므로 그 물성(열전도도 등)에 따라 화염 거동은 크게 달라질 것으로 예상된다. 이와 관련한 이론적인 접근은 선행연구[1]가 있으며, 실험적인 접근은 Zamashchikov의 연구[2]가 유일하다. 그러나 후자의 경우 불투명한 채널로 인해 화염 거동을 직접 관찰하지는 못하였고, 적외선 영상을 통한 벽면 온도 분포로부터 간접적으로 화염의 존재 및 위치를 확인하였다.

Fig. 1은 메소 스케일 사각 채널 내 예혼합 화염의 전파 및 동적 거동에 미치는 벽면 물성의 영향을 알아보기 위해 제작한 화염 가시화가 가능한 연소기의 단면도이다. 두께 1 mm의 판으로 가공된 시험 물질로 사각 채널의 위·아래 벽을

* 한국에너지기술연구원

† 연락처, dklee@kier.re.kr

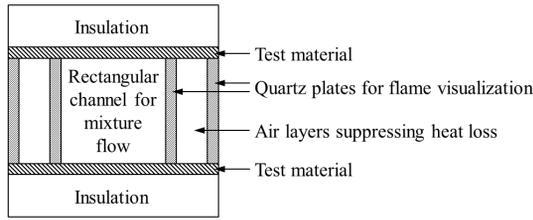


Fig. 1. Cross-sectional view of the meso-scale rectangular channel

삼고, 그 사이에 두께 1 mm의 석영판을 세워서 화염 가시화가 가능하도록 하였다. 외부로의 열 손실 효과를 억제하기 위해 위아래 벽면은 25 mm 두께의 세라믹 보드로 단열하였고, 좌우 벽면은 석영유리를 덧대어 두께 1.5 mm의 공기층이 형성되도록 하였다. 채널의 단면 형상은 한 변의 길이가 5 mm인 정사각형이며, 축 방향 길이는 20 cm이다. 시험 물질로는 석영(quartz), 스테인리스 스틸(AISI316), 탄화규소(SiC)의 세 가지 재료를 사용하였으며, 대표 물성은 Table 1에 제시하였다. 산화제로는 공기, 연료로는 순도 99.5 %의 C₃H₈을 사용하였고, 실험은 당량비 0.6~1.0, 예혼합기 평균 유속 5~140 cm/s의 범위에서 수행하였다. 실험은 먼저 적절한 점화 절차를 통해 화염을 입구로부터 5~15 cm에 위치시킨 후 조건을 설정하여 실험하였다.

Fig. 2는 당량비 및 시험 물질에 따른 천이 속도, 안정화 속도, 진동시작 속도를 나타낸다. 먼저 천이 속도의 경우 시험 물질별로 큰 차이를 보이지 않으며, 층류 연소속도와 유사한 경향을 보인다. 이로부터 천이 속도 이하에서는 자유 전파 화염과 유사한 거동을 보이며, 벽면과의 상호 작용이 급격히 작아짐을 알 수 있다.

안정화 속도는 물성에 관계없이 당량비 증가에 따라 점차 증가하며, 실험 조건 내에서 층류 연소속도 대비 최대 약 3배에 달하는 값을 갖는다. 한편 당량비 약 0.7 이상에서는 석영-스테인리스 스틸-탄화규소의 순서로 큰 안정화 속도를 갖는데 이로부터 열전도도가 작을수록 더 큰 유속에서 화염이 안정화됨을 알 수 있다.

한편 진동시작 속도의 경우는 열전도도가 작은 순서대로 높은 값을 가지는데, 이는 안정화 속도의 경향과는 반대이다. 주어진 물질에 대해 Fig. 2b와 2c를 비교하면 당량비에 따라 안정화 속도와 진동시작 속도의 크기가 역전되는 당량비

Table 1. Thermal property of test materials

Materials	Thermal conductivity, [W/m · K]
Fused silica (quartz)	1.38
Stainless steel (AISI 316)	13.4
Sintered SiC	114

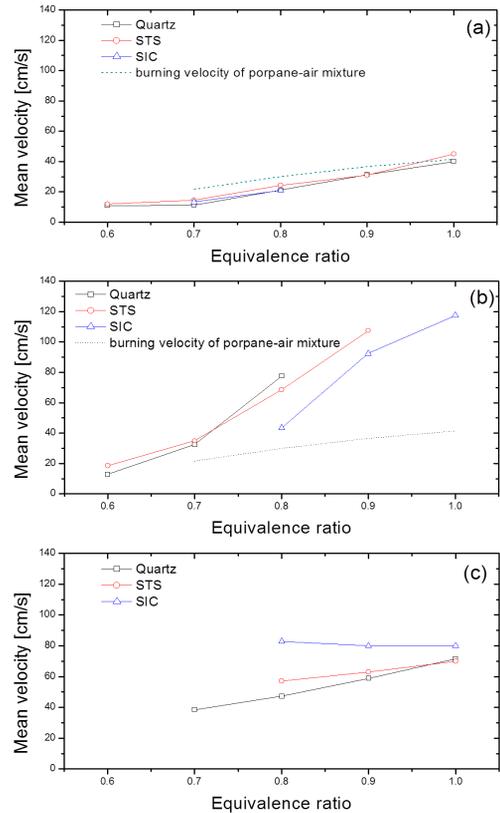


Fig. 2. Material effects on the characteristic mixture velocities: (a) transition velocity, (b) stationary velocity, (c) instability onset velocity.

가 존재한다. 예를 들어 석영의 경우 당량비가 작을 때에는 진동 시작속도가 안정화 속도보다 크므로 화염 진동은 slowly receding하는 화염에서 발생하나, 당량비가 커지면 slowly advancing하는 화염에서 진동이 발생한다. 이로부터 화염 진동의 시작은 주어진 예혼합기의 발열량과 그에 따르는 벽면 온도 구배에 영향을 받아 발생하는 것으로 판단된다.

후 기

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

참고 문헌

[1] 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.
 [2] V.V. Zamashchikov, Experimental investigation of gas combustion regimes in narrow tubes, *Combust. Flame*, 108, 357-359, 1997.