

# 좁은 간격의 두 벽면 사이에서의 메탄-공기 예혼합 화염 전파에 벽면 상태가 미치는 영향

최원영\* · 권혁모\* · 이대훈\* · 권세진\*

## The Effect of Wall Condition on the Methane-air Premixed Flame Propagation between Narrow Two Walls

Wonyoung Choi\*, Hyuckmo Kwon\*, Daehoon Lee\*, Sejin Kwon\*

### ABSTRACT

Quenching phenomena is one of major concern in development of millimeter or sub-millimeter scale micro combustor for the size of the combustor is near extinction condition. In this work we focused on the effect of combustor wall condition that was parameterized by Perovskite LSC( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CoO}_3$ ) redox catalyst. The experiment was done by variable gap-width 2D wall equipment. The flame was produced by premixed methane-air jet issuing from millimeter-scale slot burner and it propagated through the narrow gap of the walls. By comparison of flame behaviour near catalyst-coated wall and simple glass wall, we investigated the effect of possible surface reaction on quenching phenomena. The flame between two plates was observed where the gap of the plates was reduced stepwise from 20mm to a distance of quenching occurrence. The two flames with and without surface modification were almost same by observation. But the gap for the occurrence of quenching was increased between catalyst-coated wall. So we concluded that surface reaction close to combustor wall has a negative effect on micro combustion.

**Key Words** : Premixed flame, Wall quenching, Catalyst, Perovskite, Surface reaction, Slot burner

### 기 호 설 명

LSC	Lanthanum Strontium Cobalt oxide	PAA	Poly Acrylic Acid
Re	Reynold Number	MFC	Mass Flow Controller
		DSLR	Digital Simple Lens Reflective camera

## 1. 서론

밀리미터 혹은 그 이하 스케일의 마이크로 연소기는 높은 에너지 밀도를 가지고 있다. 그 크기는 일반적인 배터리의 에너지 밀도에 비하여

수 배에서 수십 배에 달한다. 이는 마이크로 스케일에서의 연소현상을 이용하면 배터리 보다 훨씬 높은 에너지 밀도로 에너지를 생산할 수 있는 장치를 만들 수 있음을 뜻한다. 이러한 장치로는 여러 가지 형태의 마이크로 엔진과 마이크로 반응기나 개질기에 응용되는 마이크로 히터 등이 있다.

그러나 이러한 마이크로 연소 장치에 있어서는 일반적인 가공 방법의 한계에 따른 제작 문제,

\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

단면적/부피비 증가로 인한 열손실 문제, 연소실 크기에 따른 소염 문제 등이 있다. 특히 연소실의 크기가 작아질수록 소염 거리에 가까워지기 때문에 소염은 매우 중요한 고려 사항이 된다.

일반적으로 소염은 화염에서 생성되는 열보다 열손실이 커서 생기는 열소염과 벽면에서의 라디칼 소멸에 의한 화학소염으로 나눌 수 있다. 매크로 스케일 연소기에서는 연소실 벽면의 거칠기, 벽면의 불순물과 벽면에서의 화학 반응 여부 등의 벽면 상태를 무시할 수 있지만, 마이크로 스케일에서는 크기가 작아짐에 따라 연소실 벽면의 상태를 무시할 수 없게 되므로 그것의 영향을 받는 화학 소염을 고려하여야 한다.

그래서 이 연구에서는 벽면의 상태가 소염에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 밀리미터 스케일의 슬롯 버너와 2차원의 두 벽면을 장치하여 슬롯 버너의 화염이 두 벽면 사이에 위치하도록 하였다. 이는 연속적으로 연소할 수 있는 마이크로 연소기를 제작하기가 어렵기 때문에 그와 동일한 환경을 모사하기 위함이다. 벽면의 상태는 촉매를 코팅한 후 벽면에서의 화학 반응을 유발시키는 방법으로 변화시켰다. 그리고 벽면의 온도를 조절하여 촉매의 반응성을 조절하였다.

## 2. 실험장치 및 실험조건

### 2.1 촉매 코팅

본 연구에 사용된 촉매는 LSC( $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CoO}_3$ ) 촉매로 결정 구조는 Perovskite 구조를 취하고 있다. 산소가 관여하는 산화-환원 반응에서 높은 이온 전도성을 보이며, 2000K 이상의 높은 온도를 견딜 수 있고, 스프인 코팅이 가능하다는 특성이 있다.

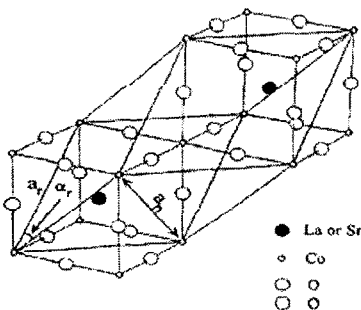


Fig. 1 LSC 촉매의 결정 구조

촉매 합성은 졸-겔 법을 이용하며 그 과정은 다음과 같다. 각 금속(La, Sr, Co)의 질산염을 증

류수에 녹인 후 PAA 수용액을 첨가한다. 이 용액에 질산을 혼합하여 pH를 1로 맞추어 투명한 졸 상태로 만든다. 이를 상온에서 12시간 건조하면 침도가 높은 겔 상태가 되며 이를 스프인 코팅한다.

스프인 코팅 과정은 다음과 같다. 스프인 코터를 이용하여 500RPM의 저속으로 10초간 회전 후 2000RPM의 고속으로 20초간 회전시킨다. 이를 상온에서 20시간 숙성(aging)후 로에서 400℃의 온도로 하소(calcination)시킨다. 이렇게 얻은 촉매 코팅의 두께는 알파 스텝 측정 결과 평균 150 nm이었다.

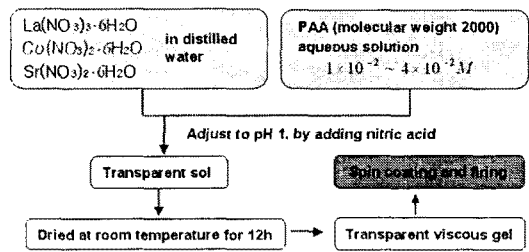


Fig. 2 LSC 촉매의 합성 과정

### 2.2 실험 장치

Fig. 3은 전체적인 실험 장치를 간략히 나타낸 그림이다. 장치는 간격을 조절할 수 있는 두 벽면과 그 중간에 위치한 슬롯 버너로 이루어져 있다. 메탄과 공기를 MFC로 혼합비를 조정하여 중간 탱크에서 혼합한 후 이를 슬롯 버너에 공급하여 예혼합 화염을 얻도록 하였다. 그리고 벽면의 간격에 따른 화염의 변화를 DSLR을 이용하여 촬영하였다.

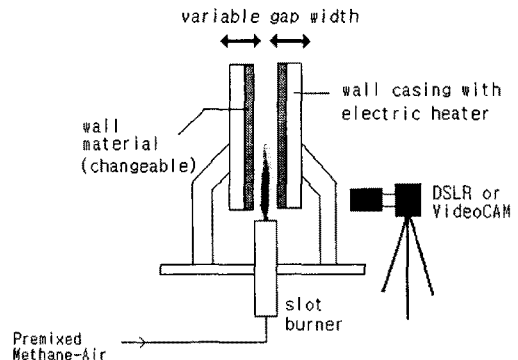


Fig. 3 실험 장치의 개요도

Fig. 4는 본 연구에서 사용된 슬롯 버너를 위에서 본 사진이다. 슬롯 너비는 11mm, 두께는 1mm

이다. 벽면은 슬롯의 너비 방향에 장치된다. 두 벽면의 간격과 표면 온도를 조절할 수 있으며 다양한 재료의 벽면으로 실험을 수행할 수 있다. 나사를 이용하여 좌우 벽을 동시에 움직여서 벽면의 간격을 조절하며 그 값은 디지털 마이크로미터로 측정되어 표시된다. 벽면의 온도는 내장된 열선 히터를 이용하여 약 800°C까지 높일 수 있다. 벽면은 어떤 재료이든 상관없이 가로/세로 100/150mm의 판재 형태로 가공하면 간단히 장착하여 실험할 수 있도록 되어 있다. Fig. 5는 본 연구에서 사용된 벽면 구조물에 유리벽을 장착하는 모습을 나타낸 사진이다.

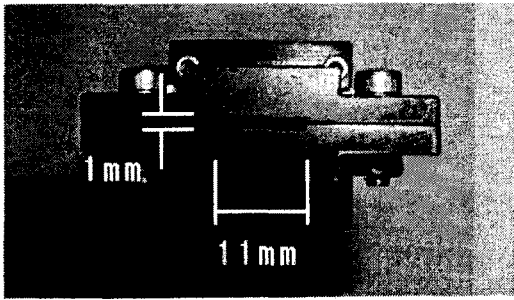


Fig. 4 슬롯 버너를 위에서 본 모습

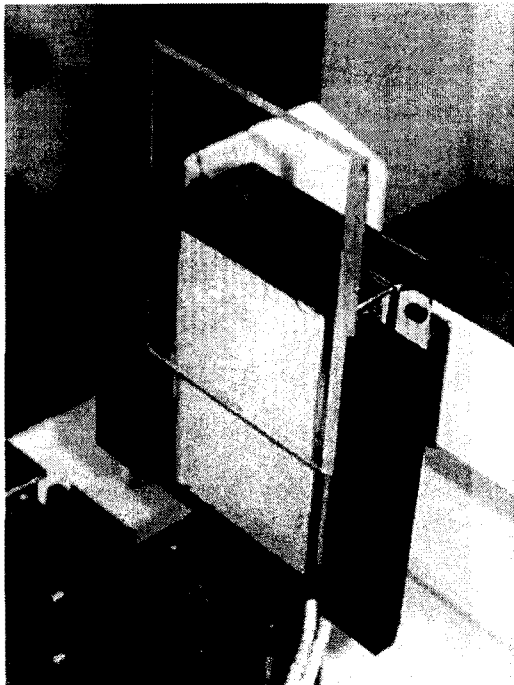


Fig. 5 벽면 구조물과 유리벽의 장착

## 2.3 실험 조건

본 연구에서는 Table 1과 같이 당량비 2.48인 메탄과 공기의 예혼합 가스를 분당 500ml의 유량으로 공급하였다. 이 때 레이놀즈 수를 계산하면 층류 영역에 속한다. 그러므로 이 슬롯 버너는 실제 마이크로 연소기에서의 층류 유동을 적절히 모사하였다고 볼 수 있다.

Table 1 연료-산화제 예혼합 가스의 조건

연료-산화제	메탄-공기
당량비( $\phi$ )	2.48
공급 유량(ml/min)	500
평균 공급 속도(cm/s)	52.08
레이놀즈 수(Re)	93.01

벽면의 간격을 20mm에서 시작하여 점차 줄여나가며 화염의 모양을 관측하였다. 이 때 슬롯의 좁은 쪽으로 바라본 화염의 모습을 DSLR로 촬영하였다. 그리고 이 과정을 소염이 일어날 때까지 반복하였다. 벽면은 강화 유리판을 사용하였으며 벽면의 온도를 조절하고, 촉매를 코팅한 벽면과 그렇지 않은 벽면에 관하여 실험을 수행하였다. 이를 표로 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 벽면의 온도와 촉매 코팅 조건

벽면 간격 20mm~소염	벽면 온도(°C)				
	히터 끔	100	200	300	400
촉매 코팅	코팅	○	○	○	○
	코팅 안함	○	○	○	○

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 벽면 간격에 따른 화염의 모양과 촉매 코팅의 영향

Fig. 6은 벽면 간격에 따른 화염의 모양을 나타낸 사진이다. 벽면의 온도는 300°C이고 위쪽은 촉매를 코팅하지 않은 경우, 아래쪽은 촉매를 코팅한 경우이다. 화염 아래의 숫자는 그 화염에 해당하는 벽면의 간격을 뜻한다.

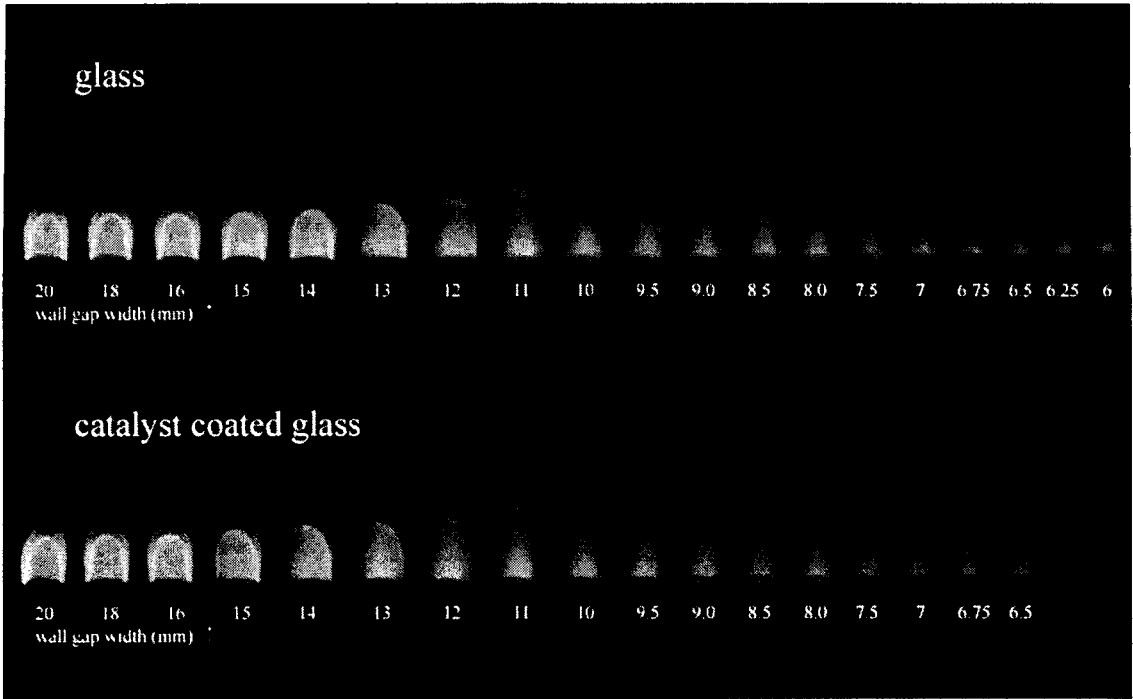


Fig. 6 벽면의 간격에 따른 화염의 모양. 벽면의 온도는 300℃

두 경우 모두 벽면 간격이 12mm 근처에서부터는 벽면의 영향을 받아 화염의 좌우측이 찌그러지는 모습을 보였다. 또한 간격이 좁아질수록 화염이 벽을 따라 조금씩 늘어지는 것을 볼 수 있었다. 이 때 간격을 더 줄이면 화염은 급격히 늘어졌으며 벽면 간격이 7.5~8.0mm에서 가장 길게 늘어졌다. 여기서 벽면 간격을 더 줄이면 화염은 다시 작아졌다가 소염이 일어나기 직전에 격렬하게 요동을 치다가 소염되었다.

위와 같이 촉매를 코팅한 벽면과 그렇지 않은 벽면에서 화염 모양의 변화는 거의 동일하였다. 따라서 벽면의 촉매 코팅으로 인한 화학 반응은 화염의 모양에는 큰 영향을 끼치지 않는다고 볼 수 있다.

### 3.2 소염이 일어나는 벽면 간격과 촉매 코팅의 영향

Fig. 7은 소염이 일어나는 벽면의 간격을 나타낸 그래프이다. 촉매를 코팅한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 더 넓은 간격에서도 소염이 일어남을 알 수 있다. 특히 벽면의 온도가 300℃ 이상일 때는 저온일 때에 비해 두 경우의 간격 차이가 약 9~10배로 현저하게 증가하는 모습을 보이고 있다.

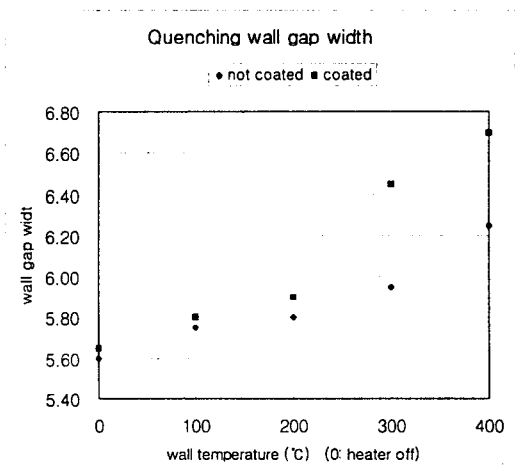


Fig. 7 소염이 일어나는 벽면의 간격

이것으로 벽면에 코팅된 촉매로 인한 표면 반응은 소염에 부정적인 영향을 끼친다고 볼 수 있다. 특히 벽면의 온도가 300℃ 이상으로 높은 경우에는 촉매의 반응성이 증가하게 되면서 그 영향이 더 커진 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

이 연구를 통하여 밀리미터 스케일의 슬롯 버너와 벽면의 간격, 온도와 재료의 변화를 줄 수 있는 벽면 구조물을 제작하였다. 그리고 이 장치를 이용하여 벽면의 상태가 메탄-공기의 종류에 혼합 화염의 모양과 소염에 미치는 영향을 알아보았다. 유리 벽면에 LSC 촉매를 코팅한 것과 코팅하지 않은 유리 벽면에 관하여 실험을 수행하였다.

벽면 간격에 대한 화염 모양의 변화는 촉매를 코팅한 경우와 그렇지 않은 경우 모두에서 거의 동일하였다. 이로부터 촉매로 인한 벽면의 상태의 변화는 화염의 모양에는 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있었다.

그러나 소염이 일어나는 벽면의 간격은 촉매를 코팅한 경우가 더 넓게 나타났다. 이것으로 벽면에서의 촉매 반응이 소염에 부정적인 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다. 특히 300°C 이상의 고온에서는 촉매의 반응성 증가로 그 영향이 더 커짐을 볼 수 있었다. 따라서 연소실 벽면의 촉매 코팅은 마이크로 연소기에 있어서 부정적인 영향을 주는 것으로 보인다.

이 연구의 결과는 추후 마이크로 연소기를 설계하는 데 있어 디자인 조건으로 활용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 연구는 연소기술 연구센터(CERC)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

#### 참고문헌

- [1] 나한비, 김세훈, 최원영, 권세진, "초소형 정적 연소기에서의 연소 한계에 대한 실험적 연구", *한국추진공학회 2003년도 춘계 학술대회 논문집*, 2003, pp. 270-273
- [2] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley and Sons, New York, 2001
- [3] Jeonghun Cho, Dae Hoon Lee and Sejin Kwon, 2003, "Experimental Study on Millimeter Scale Two Phase Catalytic Reactor," *Transactions of KSME (B)*, submitted.
- [4] D. H. Lee, J. H. Cho, S. J. Kwon, D. E. Park, E. S. Yun, J. S. Hwang and S. E. Park, "Nano Particulate Perovskite  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}\text{CoO}_3$  for the Application of Micro Power Device", AIAA

2003-6042

[5] Bernard Lewis, ~~Gastner~~ ~~Etbe~~, "Combustion, Flames and Explosions of Gases", Academic Press, Orlando, 1987

[6] 이태훈, "난류에 혼합 화염이 미연가스 영역의 난류 특성에 미치는 영향", 한국과학기술원 석사 학위논문, 1999

[7] L. J. Rosen and R. L. Axelbaum, "Suppression of cellular structure in slot burner flames", *Combustion and Flame*, Volume 126, Issues 1-2, July 2001, Pages 1433-1444