

# 원통형 다공체의 외부와 내부에 안정화된 예혼합 화염 거동의 상사성

이대근<sup>\*†</sup>, 노동순<sup>\*</sup>

## Similarity in Stabilization Characteristics between Premixed Flames Attached to and Submerged in a Cylindrical Porous Medium

Dae Keun Lee<sup>\*†</sup>, Dong-Soon Noh<sup>\*</sup>

**Key Words** : Similarity, Stabilization, Porous medium, Submerged flame, Attached flame

본 연구에서는 원통형 다공체의 외부와 내부에 각각 안정화된 예혼합 화염의 이론해에 따른 거동의 상사성에 대해 논의한다.

먼저 외부에 안정화된 화염의 경우 1990년대에 예혼합 화염의 층류 연소속도 계측과 관련하여 일련의 연구가 진행된 바 있다[1]. 층류 연소속도 계측에 주로 사용되는 평판형 다공체에 부착된 예혼합 화염의 경우 다공체로의 기체상 전도 열전달이 화염 안정화 기구로서 작용하므로 열 손실의 영향이 필연적이며, 대향류 화염의 경우 화염 신장의 영향을 제거하기 위한 외삽이 필수적이므로 계측 불확실성이 존재한다. 이에 반해 원통형 다공체로부터 반경 방향( $r$ )으로 예혼합기가 공급될 경우  $1/r$ 에 비례하는 유속으로 인해 원통형 화염이 안정화되므로 열 손실과 화염 신장의 영향을 제거할 수 있다. 이러한 화염 안정화 기구를 규명하기 위해 Eng. 등은 활성화 에너지 접근법을 이용하여 혼합기 유량에 따른 열 손실, 화염 이격 거리, 화염 온도를 획득하였으며, 그 결과는 Fig. 1과 같다[1].

한편 다공체의 내부에 안정화된 화염은 내부 열재순환에 의해 초과엔탈피 현상이 발생한은 잘 알려져 있다. 이 때 기체상에 존재하는 diffusion-reaction wave는 고체상의 thermal diffusion wave와 동시에 움직인다. 따라서 일차원적으로 예혼합기가 공급되는 다공체 내에서는 열적 혹은 기하학적인 불균일(혹은 불연속)이 존재하지 않는다면 상기의 열적 파동들은 시간에 따라 느리게 이동한다. 이를 안정화시키기 위한 방법으로서 앞서 기술한 발산하는 유동을 채용할 수 있다. 원통형 다공체의 중심에서 반경 방향으로 예혼합기가 공급되고 적절한 방법을 통해 화염이 다공체 내부에 잠기도록 하면 시간에 따라 움직이지 않는 안정화된 화염을 획득할 수 있다[2, 3].

이처럼 원통형 다공체 내부에 안정화된 초과 엔탈피 화염에 대해 활성화 에너지 접근법 및 접합 접근법을 이용하여 그 안정화 기구를 규명하고자 하였다. 화염 반경이 화염 두께에 비해 충분히 크다는 가정 하에 1차원 직교좌표계 문제로 단순화한 후, 고체상의 열전도도가 기체상에 비해 매우 크다는 사실로부터 전통적인 화염대와 그 외부 영역으로 나누고 각각의 접근 해를 구한 후 접하는 방식으로 해를 구성하였다[4]. 그 결과로서 예혼합기 유량에 따른 화염 온도, 화염 반경 및 열재순환을 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 1과 Fig. 2를 비교하면 화염 거동의 상사성을 발견할 수 있다. 먼저 외부에 안정화된 화염의 경우 유량이 감소함에 따라 화염의 이격 거리가 선형적으로 감소하다가 다시 증가하는 turning-point 거동을 보인다(Fig. 1b). 화염 온도(Fig. 1c)는 그 지점 근처부터 현저하게 단조 감소하기 시작하며, 열 손실(Fig. 1a)은 점진적으로 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보인다. 이로부터 turning-point를 중심으로 유량이 큰 영역은 유동 발산에 의한 안정화, 작은 영역은 열 손실에 의한 안정화 영역으로 구분한다.

내부에 안정화된 초과 엔탈피 화염의 경우에도 유량이 감소함에 따라 화염 반경이 선형적으로 감소하다가 다시 증가하는 turning-point 거동이 예측된다(Fig. 2). 무차원 화염온도의 경우 1 이상의 값을 가지며 유량 감소에 따라 점진적으로 증가하다가 turning-point 근처에서 다시 감소하기 시작하며, 열 재순환의 경우에도 마찬가지 이다. 이러한 turning-point 거동이 나타나는 원인을 자세히 살펴보면, 유량이 큰 경우 화염대 내부에서 발생하는 기체-고체 간의 열적 상호작용(대류 열전달)이 그 얇은 두께로 인해 외부에서 발생하는 상호작용에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으나, 대류 열전달에 간여하는 파라미터가 유량의 역수에 비례하는 특성으로 인해 유량이 감소하면 화염대 내부의 상호작용이 무시할 수 없을 정도로 커지게 된다. 화염대

\* 한국에너지기술연구원 신연소연구실

† 연락저자, dklee@kier.re.kr

TEL : (042)860-3341

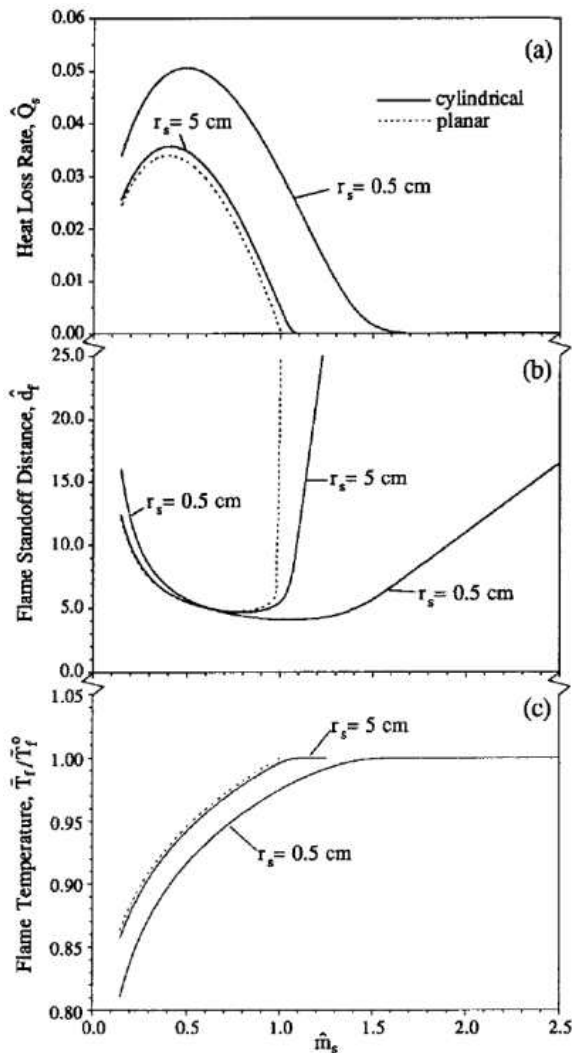


Fig. 1 Porous medium-attached flame responses to flow rate [1]

내부에서는 기체의 온도가 고체의 온도보다 매우 크게 되므로 이는 화염의 열 손실로서 작용하게 되고, 결과적으로 화염 온도 저하 및 연소 속도 감소로 이어진다. 따라서 다공체 내부 원통형 화염의 안정화 기구는, 유량이 매우 큰 경우 유동 발산에 의해 안정화되며(열 재순환이 무시할만한 수준이므로), 유량이 감소함에 따라 열 재순환에 의한 안정화로 바뀌며, 더욱 감소하여 turning-point 근처에 이르면 화염대 열 손실에 의한 안정화로 변화한다.

이처럼 원통형 다공체의 외부와 내부에 안정화된 화염은 열 손실 및 열 재순환에 의해 발생하는 sub-adiabatic 및 super-adiabatic flame의 특성을 가지며 안정화 기구 또한 서로 상이하다. 그러나 유량 변화에 대해 공통적으로 turning-point 거동을 보인다. 저자의 경험에 의하면 원통형 다공체에서 예혼합기가 공급되고 외부에

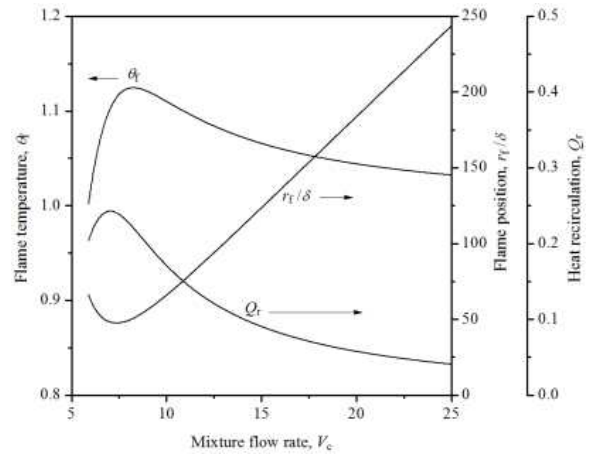


Fig. 2 Porous medium-submerged flame responses to flow rate

서 화염을 점화한 후 유량을 감소시키면서 화염을 내부로 진입시키고자 할 때 층류연소속도가 낮은 예혼합기의 경우 다공체 표면에서 화염 소화가 발생함에 반해, 층류연소속도가 빠르면 다공체 내부로 진입하나 점진적으로 전파하지 않고 순간적으로 이동한다. 이러한 현상은 본 연구에서 살펴본 다공체 외부와 내부에 안정화된 화염의 turning-point 거동과 관련 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 Non-CO<sub>2</sub> 온실가스 저감기술개발 사업단(2013001690014)에서 지원받았습니다.

## 참고 문헌

- [1] J. A. Eng, C. K. Law, D. L. Zhu, On burner-stabilized cylindrical premixed flames in microgravity, 25th Symposium (Int.) on Combustion, 1994, 1711-1718.
- [2] N. A. Kakutkina, V. S. Babkin, Characteristics of stationary spherical waves of gas combustion in inert porous media, Combust. Explo. Shock. 34 (1998) 123-132.
- [3] S. A. Zhdanok, K. V. Dobrego, S. I. Futko, Flame localization inside axis-symmetric cylindrical and spherical porous media burners, Int. J. Heat Mass Transfer 41 (1998) 3647-3655.
- [4] D. K. Lee, D.-S. Noh, Stabilization of excess enthalpy flames in radially diverging multi channels as a model cylindrical porous medium burner (to appear).