

메소-스케일 연소 현상의 공학적 의미와 이해

김남일*†

Understanding and Engineering Meaning of Meso-Scale Combustion Phenomena

Nam Il Kim*†

ABSTRACT

Meso-scale combustion is defined as combustion phenomena within limited characteristic length scales that are comparable with the laminar flame length scales. In the laminar flame theory, four representative length scales have been involved; i.e., a reaction layer thickness, a thermal layer thickness, a quenching distance, and a Markstein length. When the effects of these length scales on the flame characteristics are understood, the laminar flame theories can be clarified. Therefore, a study on the meso-scale combustion phenomena should not be thought as just a specific phenomena occurring in an exceptional combustion condition. Instead, all combustion phenomena within meso-scale spaces need to be explained by our knowledge. During this challenge, our understanding on laminar flame structures can be extended. Considering that most turbulent combustion phenomena in engineering application are still have local laminar flame structures, studies on laminar flame structures need to be re-visited especially in academic aspects.

Key Words : Meso-scale combustion, Flame structure, Characteristic length scale, Laminar flame theory

최근, 국제적으로 많은 연구자들이 메소-스케일(meso-scale) 연소 현상에 관심을 가지고 있다[1]. 이러한 관심의 출발은 과거 마이크로 연소기 개발 등의 실용적 목적에서 좁은 공간에 보다 안정적인 화염을 유지하기 위한 연구에 기인한다. 현재에도 다양한 연구자들이 마이크로연소기와 같이 에너지변환의 공간효율을 높이는 연구에 관심을 가지고 있다. 하지만, 이와는 별도로 좁은 연소공간에 대한 다수의 연구 수행을 통해 그간 잘 알고 있다고 생각했던 층류화염의 구조에 대한 새로운 현상들을 발견하게 되었고, 이에 대해 새로운 관점에서의 이해가 필요하게 되었다.

지금까지 다양한 연구자들이 연소공학에서의 메소-스케일을 정의하였다. 단순하게는 밀리미터 길이 스케일의 구체적인 범위에 대한 정의도 있었고, 추상적으로 소염거리와 유사한 거리로 표현된 정의도 있었다[1]. 하지만, 본 연구 집단에서는 물리적으로 보다 의미 있는 또 하나의 정의를 더하고자 하며, 이는 ‘층류화염의 이론을

구성하는 길이 스케일과 직접 상호작용하는 공간 스케일’로 규정할 수 있다.

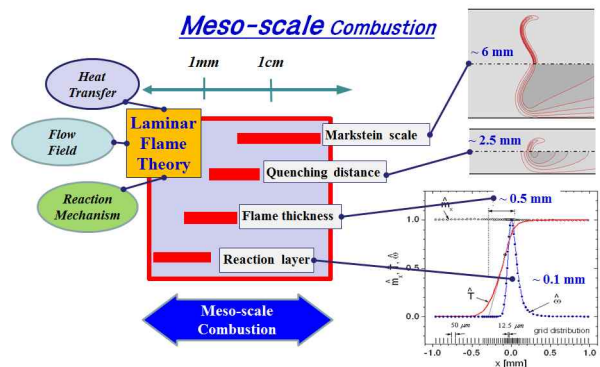


Fig. 1 Definition of Meso-scale in combustion phenomena and its relationship with other studies.

메소-스케일에 대한 정의를 Fig. 1에 대략적으로 조사하였다. 일부 결과는 기존의 예혼합화염 해석 결과를 사용하였다[2]. 연소이론의 근간이 되는 층류예혼합화염의 구조 및 특성에 대한 이론은 다양한 길이 스케일을 이용하여 구성되어 있다. 가장 대표적인 예로 반응대(reaction la

* 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과
 † 연락처, nikim@kaist.ac.kr
 TEL : (042) 350-3211 FAX : (042)-350-3210

yer) 두께, 화염 두께(flame thickness), 소염거리(quenching distance), 형상거리(Markstein scale) 등이 관여하고 있다. 일반적으로 상온 상압의 연소 조건에서 이들 길이스케일은 0.1 mm~10 cm 범위를 가지고 있다. 하지만 압력과 온도와 연료의 조성이 바뀐다면 이러한 물리적인 길이는 매우 다양하게 변화할 수 있다는 점에서, 화염 자체의 고유 길이와 비교하여 직접 상호작용할 수 있는 공간 스케일을 메소-스케일로 정의하는 것이 타당하다. 그간의 많은 연구들에 의해 이러한 길이 스케일 영역에서는 단지 공간의 크기를 바꾸는 것만으로 매우 다양한 현상이 발생하게 되며, 이러한 현상들을 기존의 층류화염의 이론을 토대로 설명하는 과정에서 그간 불명확하게 인지되었던 화염의 구조와 특성을 보다 구체화할 수 있었다.

본 연구집단에서 수행한 다수의 메소-스케일 연소 현상 연구 중 하나의 예로, Fig. 2에 나타난 환형단차확장관(Annular Stepwise Diverging Tube, ASDT)을 이용한 화염의 전파속도 측정 실험 결과를 살펴보기로 하자[3]. 실험장치는 석영관 내에 다수의 스텝단위의 환형블럭을 배열하여, 환형의 확장 유로를 구성하고 있다. 이 장치를 이용하면 간단한 조작으로 화염의 전파속도와 소염거리 등을 측정할 수 있다. 따라서 메소-스케일에서의 화염의 거동이 기존의 연소이론과 직접 상관관계를 가짐을 알 수 있다.

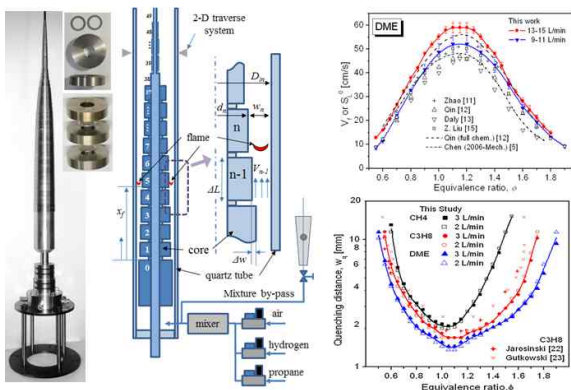


Fig. 2 Annular Stepwise Diverging Tube (left) and experimental results of burning velocity (right-top) and quenching distance (right-bottom). [3]

나아가 최근의 흥미로운 실험 결과를 한 가지 소개하자면, Fig. 3의 위쪽 ASDT 방법으로 취득한 아래쪽 Meso-scale 길이 변화에 따른 전파속도의 변화[3]가 아래쪽의 기존의 잘 알려진 압력과 전파속도의 상관관계[4]와 매우 유사한 특성을 가지는 것을 알 수 있다. 기존의 압력-속도 실험 결과는 압력의 변화에 따른 연소속도의 변화를 그림의 상관관계 식에서 지수 n 의 값

으로 표현한 것으로, n 이 양수인 경우는 압력 증가가 연소속도를 증가시킴을 의미하고, n 이 음수인 경우는 그 반대에 해당한다. 매우 다양한 연료 조성에 대해 일관되게 유사 특성이 있다고 보고되었으며, 이러한 결과는 화학반응 메커니즘에 반영된 바 있다. 하지만 유사한 형태의 실험 경향이 메소-스케일 연소기에서 관찰되고 있는데, 이러한 결과는 물리적으로도 매우 연관성이 크다.

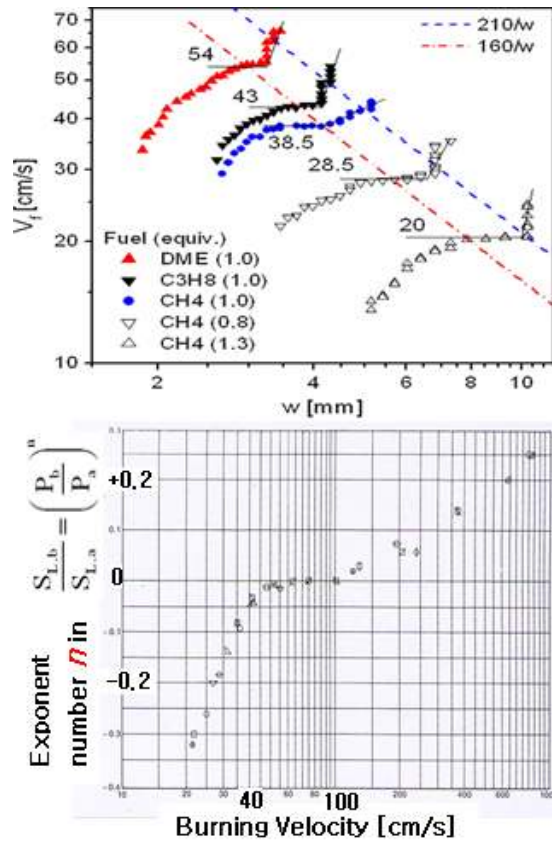


Fig. 3 Similarity between the relationship of scale-burning velocity (top) [4], and the relationship of pressure-burning velocity (bottom)

예를 들면, 연소속도와 압력의 관계는 화염의 상대적인 두께와 메소-스케일 연소공간의 길이 간의 비로 아래의 식과 같이 표현될 수 있다. 이 식을 통해 두 실험 결과는 물리적으로 매우 유사함을 알 수 있다. 실제 위의 압력-연소속도 관계실험은 유한한 크기의 정적 연소기에서 구현된 것으로 화염의 두께가 압력에 의해 상대적으로 변화할 때 일정한 연소공간의 크기와 직접 비교되어 연소속도에 일정한 변화가 발생할 수 있음을 의미한다.

$$\frac{S_{L,p}}{S_{L,0}} = \left(\frac{P_p}{P_0}\right)^n \sim \left(\frac{L_0/\delta_p}{L_0/\delta_0}\right)^n \sim \left(\frac{Pe_p}{Pe_0}\right)^n \sim (Pe^*)^n \sim \left(\frac{L}{\delta_f}\right)^n$$

따라서 우리가 지금까지 이해하고 있던 압력-연소속도의 관계 속에도 메소-스케일 현상이 내재되어 있을 가능성을 제시하고 있으며, 이를 통해 메소-스케일 연구가 단지 작은 연소기를 설계하는 관점을 벗어나 연소공학 이론 전반에 관여하고 있음을 유추할 수 있다. 추가적으로, 앞서 제시한 세 개의 메소-스케일 실험 결과들을 조합하면, 보다 중요한 연소공학적 결과를 도출하게 되는데, 이에 대해서는 향후 별도의 논문을 통해 발표될 예정이다.

메소-스케일 연소 현상 연구의 또 하나의 예를 들면, Fig. 4와 같이 좁은 채널 내부에 대향류 화염을 형성함으로써, 기존의 개방된 공간에서의 대향류화염의 실험 결과들과 직접 비교할 수 있는 다수의 흥미로운 결과를 도출할 수 있다는 것이다[5]. 수평면으로 배치된 메소-스케일 연소기 내부에서는 중력의 효과를 최소화 할 수 있었으며, 연소기의 형상 특성상 다양한 가시화 기법의 적용도 용이하다. 비예혼합화염(NPF), 부분예혼합화염(PPF), 예혼합화염(PF) 모두의 형성이 가능했으며, 하류 채널에서는 에지화염(Edge flame)의 거동을 실험할 수도 있었다. 또한 고온 분위기에서의 화염구조의 관찰이 용이하였다.

이처럼 메소-스케일에서의 대향류 연구의 결과로 화염의 저신장률 영역에서의 화염진동 현상을 보다 자세히 관찰할 수 있었으며, 메커니즘 역시 규명될 수 있었다. 이러한 연구는 현재 계속 진행 중이며, 다수의 연구 결과가 발표될 예정인 만큼, 이러한 접근법에 대한 국내 연구자들의 관심이 요구된다.

후 기

이 연구는 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013R1A2A2A01015816).

참고 문헌

[1] Y. Ju, K. Maruta, "Microscale combustion: Technology development and fundamental research," Prog. Energy Combust. Sci. 37 (6), 2011, pp. 669-715.
 [2] N.I. Kim, K. Maruta, "A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes," Combustion and Flame 146 (1-2), 2006, pp. 283-301.
 [3] Z. Liu, N.I. Kim, "An Assembled Annular Stepwise Diverging Tube for the Measurement of Laminar Burning Velocity

and Quenching Distance," Combustion and Flame 161, 2014, pp. 1499-1506.

[4] J. Manton, B.B. Milliken, "Proc. Gas Dyn. Symp. on Aerothermo chemistry," Aug. 22-24, 1955, Northwestern Univ. Evanston, Illinois.

[5] M.J. Lee, M.S. Cho, N.I. Kim, "Characteristics of Opposed Flow Partially Premixed Flames in Mesoscale Channels at Low Strain Rates," Proceedings of the Combustion Institute 35, 2015, pp. 3439-3446.

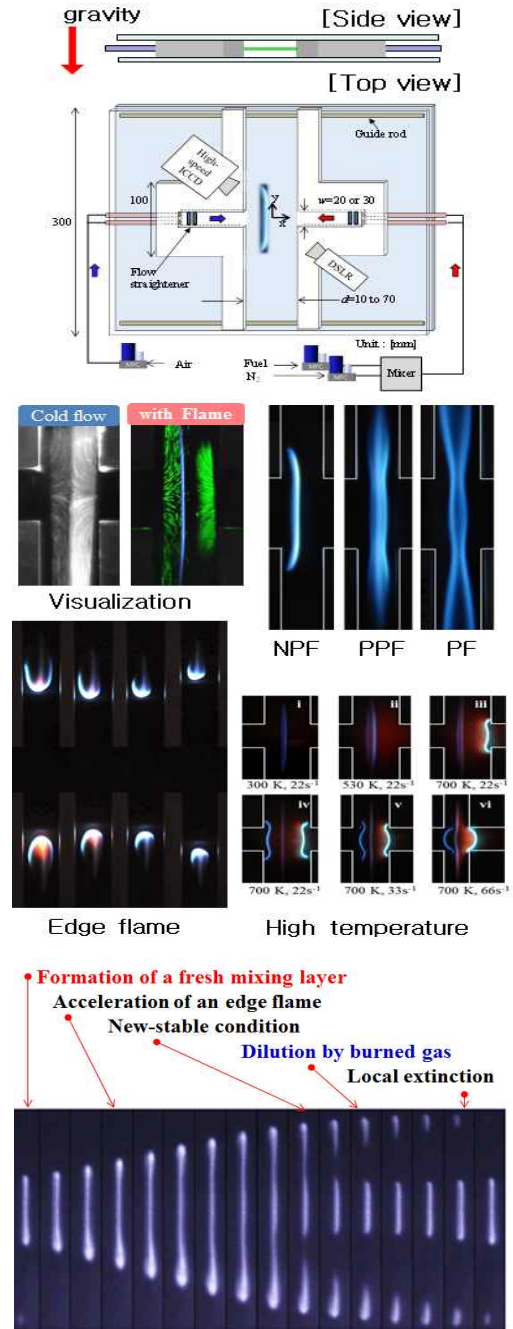


Fig. 4 Meso-scale counterflow burner (top), various flame behaviors (middle), Oscillation mechanism (bottom)