

동축공기 난류제트확산화염의 화염날림 근처에서의 변형률 및 OH 특성

황정재^{*,**} · 김태성^{*} · 윤지수^{*} · 윤영빈^{**}

Strain Rates and OH Layer Characteristics in Stabilization Region for Turbulent Non-premixed Jet Flames Close to Blowoff

Jeongjae Hwang^{*}, Taesung Kim^{*}, Jisu Yoon^{*}, Youngbin Yoon^{**}

ABSTRACT

Simultaneous measurements of planar laser-induced fluorescence (PLIF) of OH radicals and particle image velocimetry (PIV) were used to investigate the strain rates and OH structure characteristics of turbulent syngas non-premixed jet flames close to blowoff. Mean values of the maximum principal strain rate on OH layer decreases with the axial distance, and its standard deviation is significantly large upstream. Strain rate on stabilization region of the stable flame is only about a half of that of the flame near blowoff.

Key Words : Turbulent jet flame, Extinction, Strain rate, OH PLIF, PIV

동축공기를 사용하는 난류 제트확산화염은 비교적 간단한 구조, 높은 안전성 및 혼합 특성 등의 장점으로 인해 그 컨셉이 상용 연소기에서 널리 쓰이고 있다. 이러한 동축공기 확산화염은 일정한 연료 속도에서 동축공기의 속도를 증가시키게 되면 어느 속도 조건에서 화염이 노즐에서 떨어지게 된다. 노즐에서 떨어진 화염은 예혼합 화염 혹은 에지 화염의 전파와 유동이 균형을 이루는 지점에서 부상화염이 형성되거나 그러한 조건들이 이루어지지 않을 경우 화염날림이 발생한다. 약 0.5 mm 정도 두께의 노즐에서의 동축공기 화염 날림은 일반적으로 두 타입으로 나타나는데[1,2], 상대적으로 작은 연료속도 조건(regime I)에서의 화염의 날림은 노즐 림 바로 위쪽에서의 희박 한계 소염에 의해 지배되고, 상대적으로 큰 연료속도 조건(regime II)에서의 화염의 날림은 노즐 출구 약간 후류에서의 높은 변형률 혹은 높은 스칼라 소산률에 의해 지배된다. 각각의 국부 소염의 현상은 Fig. 1에 나타나있다.

난류 제트 확산화염에서 OH 혹은 CH PLIF와 PIV를 이용하여 화염의 구조와 변형률, 와류도, 팽창률 등의 유동 특성의 관계를 파악한 연구가 많이 이루어져왔다. Donbar 등[3]은 PIV/CH-PLIF를 이용한 메탄 제트 확산화염의 연구를 통해 화염의 화학 반응은 크게 진동하며 작용하는 변

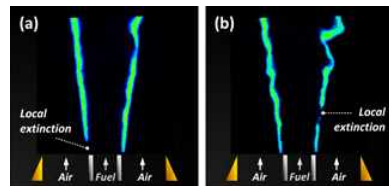


Fig. 1 Local extinctions in (a) regime I and (b) regime II

형율에 잘 반응하지 않음을 보고하였다. Hult 등 [4]은 고주파수의 PIV/OH-PLIF를 이용하여 화염의 국소 소염이 국소 변형률과 볼텍스 구조와 잘 일치함을 보였다. Sutton과 Driscoll[5]은 국소 소염이 강한 스칼라 소산율과 잘 일치함을 보였다.

본 연구에서는 H₂/CO 합성가스의 난류 제트 확산화염에서 높은 변형률과 혹은 높은 스칼라 소산률에 의해 지배되는 regime II에서의 화염 날림에 대하여 PIV/OH-PLIF 동시 측정을 수행하였다. 이를 통하여 화염면에서의 변형률과 OH의 두께가 화염날림 근처의 화염에서 어떠한 특성을 보이는지를 파악하였고, 안정한 화염에서의 그것들과 비교하였다.

본 연구에서 사용된 확산화염 연소기가 Fig. 2(a)에 나타나있다. 연소기의 단면은 200 X 200 mm이고 아래 가운데에 연료 노즐의 직경은 3 mm, 노즐 림의 두께는 0.45 mm, 그리고 동축공기 노즐의 직경은 12.4 mm이다. 연료조성 100/0,

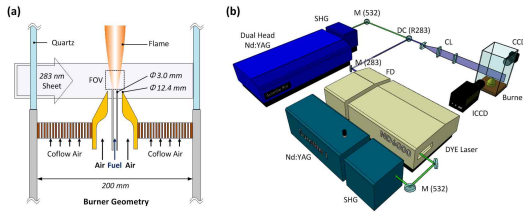


Fig. 2 Burner geometry (a) and the setup for PIV/OH-PLIF measurements (b).

75/25, 50/50 H₂/CO 조건에서 각각 실험을 수행하였고 각 조건에서 regime I/regime II 그리고 화염날림 조건/안정 조건을 각각 비교하였다. PIV/OH-PLIF 동시측정을 위해 Fig. 2(b)와 같은 시스템을 구성하였다. 우선 PIV 측정을 위해 추적 입자는 1 μm 직경의 ZrO₂를 사용하였고 각각 연료와 공기의 라인에 공급하였다. 듀얼 헤드 Nd:YAG 레이저를 사용하였고 1600 X 1200 화소의 CCD로 이미지를 획득하였다. OH-PLIF 측정을 위해 Nd:YAG 레이저와 Dye 레이저를 사용하여 282.93 nm의 빔을 만들었고 유도된 306-320 nm의 형광신호는 512 X 512 의 ICCD로 획득하였다. 이미지의 타겟은 노즐 바로 위쪽의 13.5 X 14.5 mm이다. 각 조건에서 120장의 이미지를 획득하였다. H₂/CO 100/0(H100), 75/25(H75), 50/50(H50) 각각 조건에서 regime I(1)과 regime II(2,4)의 조건에 대해 실험을 수행하였다.

120장의 OH-PLIF 이미지와 PIV 데이터를 통해 평균화된 화염과 유동장의 특성을 파악하였다. Fig. 3에 $x/d_f = 1.0, 2.5, 4.0$ 각각의 축방향 위치에 대한 속도 분포와 OH 세기의 분포가 나타나있다. 후류로 갈수록 top-hat 분포에서 가우시안 분포로 바뀌지만 중앙의 최대 속도는 거의 감소하지 않음을 확인하였다. OH 층은 후류로 갈수록 펼쳐지고 그 두께도 상당히 증가함을 보

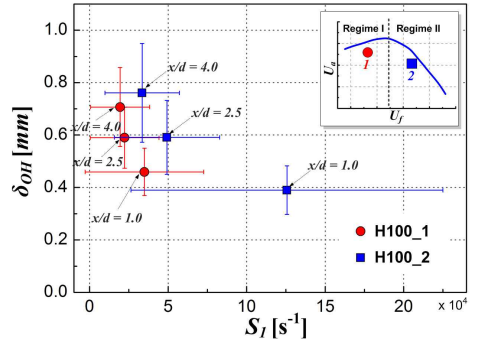
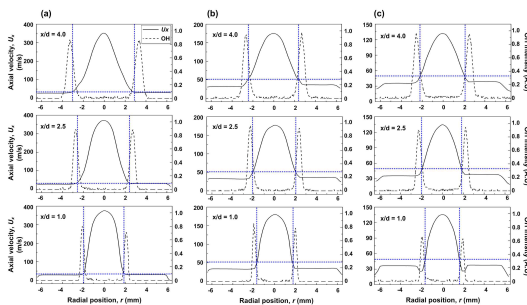
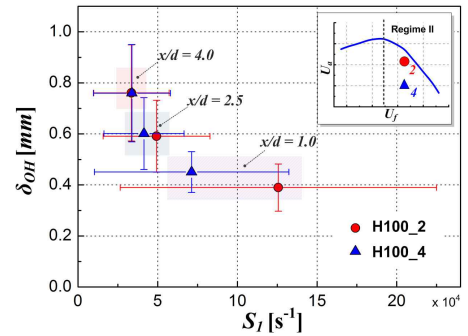


Fig. 4 Averaged OH layer thickness plotted against averaged compressive principal strain rate upon the OH layer for three different axial locations ($x/d_f = 1.0, 2.0,$ and 4.0). Symbols refer to H100_1 (●) and H100_2 (■).

이며 합성가스의 CO 함유량이 증가할수록 그것의 펼침 정도가 크게 감소함을 확인하였다. 또한 가장 상류에서 OH 신호의 세기가 작는데 이는 반응물의 감소로 볼 수 있고 이 부분에서 국부소멸이 일어날 가능성이 많을 것으로 생각된다. 그러므로 화염날림은 이 부분의 국소소멸에 의해 지배된다고 볼 수 있다.

동시측정한 순간장들의 결과를 바탕으로 OH 상의 변형율과 OH 두께의 분포 및 그들의 관계를 살펴보았다. 변형율은 주변형율(principal strain rate)의 최대값 S_I 을 추출하였고 그 값을 추출하는 기준은 OH 신호의 최대값의 선을 사용하였다. Fig. 4에 H100의 화염에서 regime I과 regime II 화염에 대한 비교가 각 지점에 대해 나타나있다. 각 점은 각 축방향의 위치에 대한 평균값을 나타내고 에러바는 표준편차를 보여준



다. Regime I에서의 S_L 및 화염 두께는 regime II에서보다 훨씬 작는데 이는 regime I에서의 화염 날림이 높은 변형율이나 높은 스칼라 소산율에 의한 것이 아님을 말해준다. 또한 상류에서의 S_L 은 아주 크고 표준편차도 아주 큼을 확인할 수 있다.

Fig. 5에 regime II에 있는 연료노즐의 속도가 같은 H100 화염 중 화염날림 근처의 화염과 안정한 화염에 대한 비교가 나타나있다. 그림에서 알 수 있듯이 후류에서는 S_L 및 화염 두께가 거의 같지만 상류의 노즐 근처에서는 차이가 큼을 알 수 있다. 안정한 화염이 날림 근처의 화염의 절반 정도의 S_L 값을 가지고 약 10% 이상 화염 두께가 큰 것을 확인할 수 있다. 즉, 화염 날림 근처로 갈수록 상류의 노즐 위 화염안정화 지점에서의 변형율은 증가하고 OH 두께는 감소하는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 서울대학교 IAAT와 연계된 미래창조과학부의 중견연구자지원사업(2010-0015100)과 산업통상자원부의 재원으로 KETEP의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업 (No. 2011951010001C)의 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] F. Takahashi and W.J. Schmolli, "Lifting criteria of jet diffusion flames", Proc. Combust. Inst., Vol. 23, 1991, pp. 677-683.
- [2] J. Hwang, N. Bouvet, K. Sohn and Y. Yoon, "Stability characteristics of non-premixed turbulent jet flames of hydrogen and syngas blends with coaxial air" Int. J. Hydrog. Energy, Vol. 38, 2013, pp. 5139-5149.
- [3] J.M. Donbar, J.F. Driscoll and C.D. Carter, "Strain rates measured along the wrinkled flame contour within turbulent non-premixed jet flames", Combust. Flame 125 (2001) 1239-1257.
- [4] J. Hult, U. Meier, W. Meier, A. Harvey and C.F. Kaminski, "Experimental analysis of local flame extinction in a turbulent jet diffusion flame by high repetition 2-D laser techniques and multi-scalar measurements", Proc. Combust. Inst. 30 (2005) 701-709.
- [5] J.A. Sutton and J.F. Driscoll, "Imaging of local flame extinction due to the interaction of scalar dissipation layers and the stoichiometric contour in turbulent non-premixed flames",

Proc. Combust. Inst. 31 (2007) 1487-1495.