

화염 불안정성이 난류 예혼합 화염의 전파 특성에 미치는 영향에 관한 연구

권재성* · 허강열**

Influence of Flame Instabilities on Propagation Characteristics of Stagnating Turbulent Premixed Flames

Jaesung Kwon*, Kang Y. Huh**

ABSTRACT

DNS is performed to examine the propagation characteristics of stagnating turbulent premixed flames. Results show good agreement with the recently proposed relationship for turbulent burning velocity, S_T . It is shown that S_T increases through a thinner flamelet, turbulence production and correlation between fluctuating velocity and buoyancy force respectively for diffusive-thermal, hydrodynamic and Rayleigh-Taylor instability. The mean curvature doesn't have significant effect on S_T at the leading edge.

Key Words : Turbulent premixed flames, Diffusive-thermal instability, Hydrodynamic instability, Rayleigh-Taylor instability

난류화염 전파속도(S_T)는 평균 반응속도를 나타내는 변수로서 공학적으로 중요한 의미를 가진다. 이에 관한 연구는 지속적으로 수행되어 오고 있으며 다양한 실험식 및 예측 모델이 제시되었다[1-2]. 최근 식 (1)~(2)와 같은 화염 선단부에서의 S_T 에 대한 새로운 예측식이 유도되어 다양한 연소 영역에서의 적용가능성이 검증되었다[3].

$$S_T = \frac{D_{tu} + D_{mu}}{L_w} = \frac{D_{tu}}{L_w} + \langle S_d \rangle_f \quad (1)$$

$$\frac{1}{L_w} = \frac{1}{L_m^*} - \langle \nabla \cdot \mathbf{n} \rangle_f \quad (2)$$

본 연구에서는 연소반응에 내재된 화염 불안정성이 난류화염 전파특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 예혼합 정체화염에 대한 직접수치 해석을 수행하였다. 계산 영역은 x, y, z방향에 대해 각각 2π , 3.5π , 2π 이며, 격자수는 $96\pi/\pi$ 이다. Fig. 1은 계산영역과 경계조건을 개략적으로 보여주고 있다. 또한, 입구에서의 난류 조건과 층류화염구조를 동일하게 지정하여 서로 다른 3종류의 화염 불안정성이 난류화염 전파특성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. Table 1

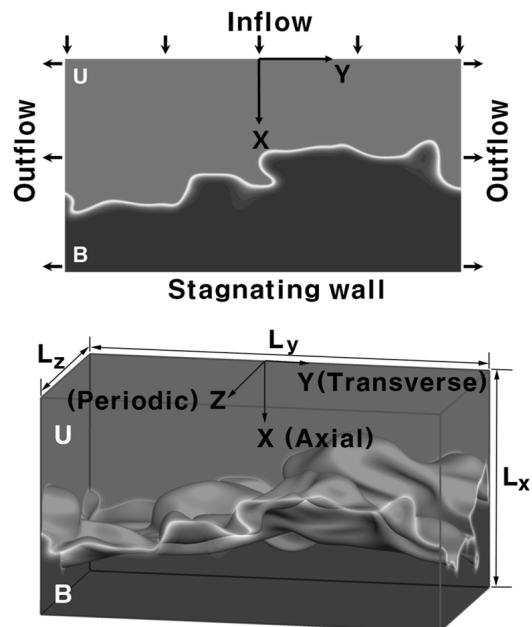


Fig. 1 A schematic configuration for a stagnating flame. 'U' and 'B' represent unburned and burned gas respectively.

* 포항공과대학교 기계공학과

† E-mail : huh@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2841 FAX : (054)-279-3199

과 같이 4개의 계산조건을 선정하였으며, C1을 기준 조건으로 하고 화학 반응은 식 (3)과 같은 Arrhenius 형태의 단일단계반응을 가정하였다.

$$\dot{w} = A\rho Y_R \exp(-T_a/T) \quad (3)$$

모든 계산조건에 대해 화염이 통계학적 정상 상태에 도달할 때까지 계산을 수행하고, x방향 대칭축을 기준으로 $\pm 0.1\pi$ 구간 내의 데이터에 대해 x방향으로의 평균을 하였다.

Table 1 Specifications of four stagnating flames

Case	A	T_a [K]	ρ_w/ρ_b	Le	g [cm/s ²]
C1	2130	4405	4.0	1.0	0.0
C2	727	3377	4.0	0.8	0.0
C3	97640	11050	6.0	1.0	0.0
C4	2672	4606	4.0	1.0	2.0

Table 2는 주요 변수에 대한 화염 선단부에서의 평균값을 나타내며, 식 (1)에 의해 예측된 S_T 는 모든 계산조건에 대해 DNS 결과에 잘 부합됨을 알 수 있다. 여기서 $1/L_m^*$ 과 D_{tu} 는 각각 난류에 의해 넓어진 화염두께와 난류확산계수를 의미한다.

Table 2 DNS results and predictions at the leading edge

Case	$S_{T,DNS}$	$S_{T,PRED}$	u'	D_{tu}	$1/L_m^*$	$\langle \nabla \cdot \mathbf{n} \rangle_f$
C1	2.02	1.77	0.77	0.060	24.41	2.87
C2	2.15	2.04	0.80	0.058	28.03	2.88
C3	2.13	2.06	0.80	0.072	23.98	2.63
C4	2.31	2.17	0.82	0.093	21.08	4.00

C2에서는 Le를 0.8로 지정하여 기준 조건에 대한 Diffusive-thermal instability의 영향을 알아보고자 하였다. Le가 1보다 작으면 $1/L_m^*$ 가 증가하는데 이것으로 층류화염 두께가 얇아짐을 알 수 있으며, 이는 열 확산이 물질 확산보다 느려 층류화염에서의 반응이 빨라지는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 화염 선단부에서의 난류강도 및 평균곡률은 기준 조건과 큰 차이를 보이지 않으므로 C2에서 S_T 가 증가하는 이유는 층류화염 구조의 변화로 설명할 수 있다.

C3에서는 반응물과 생성물의 밀도비를 기준 조건보다 1.5배 증가시킨 6.0으로 지정하여 Hydrodynamic instability의 영향을 알아보고자 하였다. C3의 경우 화염 선단부에서의 평균곡률은 약 8% 감소하였고, 층류화염 두께는 약 2% 증가하였다. 또한, 난류확산계수가 약 20% 증가하였다. 이것은 강해진 가스 팽창에 의해 속도 구배가 증가하고, 그 결과 생성된 난류에 의한

영향으로 볼 수 있다. 식 (1)에 의하면 평균곡률의 감소는 S_T 를 증가시키고, 층류화염두께의 증가는 S_T 를 감소시킨다. 하지만 C3의 경우 난류확산계수의 증가가 지배적으로 작용하여 S_T 를 증가시키는 것으로 볼 수 있다.

C4에서는 입구 유동과 같은 방향으로 중력을 부여하여 Rayleigh-Taylor instability의 영향을 알아보고자 하였다. 이 경우 화염선단부에서의 평균곡률은 약 40% 증가하고, $1/L_m^*$ 는 약 14% 감소하였다. 또한, D_{tu} 는 약 55% 증가하였다. 식 (1)에 의하면 평균곡률의 증가와 $1/L_m^*$ 의 감소는 $1/L_w$ 를 감소시키고 그 결과 S_T 도 감소시키는 요인이 된다. 그러나 u' 와 D_{tu} 의 증가가 지배적 요인이 되어 S_T 는 증가한다고 설명할 수 있다. Fig. 2는 화염 브러쉬(flame brush)내부에서의 rms 속도 변동을 나타내는데, C4의 경우 중력에 의해 강해진 rms 속도 변동이 확연하게 드러나며, 강화된 난류는 화염 선단부에서의 S_T 를 증가시키게 된다.

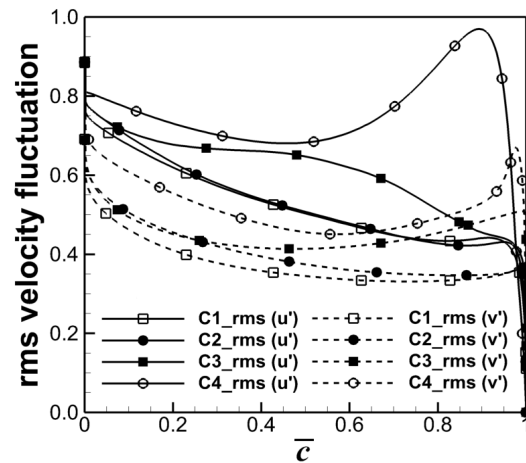


Fig. 2 rms velocity fluctuations in the axial and the transverse direction

참고 문헌

[1] J. F. Driscoll, "Turbulent premixed combustion: Flamelet structure and its effect on turbulent burning velocities", Prog. Energy Combust. Sci. 34 (2008) 91-134
 [2] C. J. Rutland, A. Trouvé, "Direct Simulations of Premixed Turbulent Flames with Nonunity Lewis Numbers", Combust. Flame 94 (1993), 41-57
 [3] D. Lee, K. Y. Huh, "Validation of analytical expressions for turbulent burning velocity in stagnating and freely propagating turbulent premixed flames", Combust. Flame (2011), doi: 10.1016/j.combustflame.2011.11.007