

난류 혼합층 확산화염에서 부상선단의 난류전파속도에 대한 연구

김준홍[†] · 정석호* · 안국영** · 김종수***

Study on the Turbulent Edge Propagation Speed of a Lifted Diffusion Flame in Turbulent Mixing Layer

Junhong Kim, S. H. Chung, K. Y. Ahn and J. S. Kim

ABSTRACT

Leading front of a lifted diffusion flame in turbulent mixing layer was investigated in order to find a appropriate definition of the turbulent edge propagation speed. The turbulent lifted diffusion flame was simulated by employing the flame hole dynamics combined with level-set method which yields a temporally evolving turbulent extinction process. By tracing the leading front locations of the temporal flame edges, temporal variations of the liftoff height, local flow velocity, and edge propagation speed at the leading front were investigated and they demonstrated the flame-stabilization condition of the turbulent lifted flame. Finally, a turbulent edge propagation speed was defined and its temporal variation from the simulation was discussed.

Key Words : Turbulent Lifted Flame, Flame Edge, Flame Hole Dynamics, Level-Set Method, Turbulent Edge Propagation Speed

1. 서 론

실용적 연소기에서 가능한 높은 유량공급의 필요에 따른 화염 날림 방지나 노즐의 열화 방지를 위해, 난류 비예혼합 화염에서 발생할 수 있는 난류 부상현상에 대한 화염 안정화 연구는 중요하게 여겨지고 있다. 하지만 난류 비예혼합 화염의 안정화를 위한 연소기 설계나 운전 조건에 결정적인 자료가 될 수 있는 난류화염내의 구조나 정량적인 유동속도나 화염의 전파속도 특성들은 정확한 난류 비예혼합화염의 예측모델의 미흡과 실험적 한계성으로 인해 정확히 파악되지 못하고 있는 실정이며, 단지 이론적 연구에서는 층류화염면의 영역에 속하며 난류의 강도가 비교적 약해서 선단화염 면이 크게 왜곡되는 않는 경우의 난류 비예혼합화염의 전파속도는 난류 강도의 제

곱근에 비례한다는 정성적 특성만이 제시되고 있다 [1].

난류부상화염을 포함한 실용적 연소기에서 관측되는 많은 경우의 난류확산화염은 다양한 유동조건에서 연소되고 있는 층류화염면의 집합체로 인식될 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이러한 영역에 속하는 화염의 경우에는 난류 부상화염의 선단이 부분 소화로 발생하는 선단화염(edge-flame)의 전파속도와 국부 유동속도의 차이로 인해 불균일하게 전파 또는 후퇴되는 선단화염들로 이루어져 있을 것이며, 이들의 통계적 성향에 따라 부상특성도 결정될 것이다. 따라서 층류화염면 영역에 속해있는 난류 확산화염의 경우에 선단화염들의 동역학적 특성이 적절히 고려된 Flame Hole Dynamics 모델을 이용하여 난류 부상화염을 모사한다면, 모사된 난류부상 선단에서의 특성들을 파악함으로써 좀더 실질적인 부상화염 특성을 비추어 볼 수 있을 것이다. 본 연구에서는 난류 혼합층 확산화염에서 선단화염면에 대해 적절한 전파속도를 고려하기 위하여 level-set 방법을 포함한 Flame Hole Dynamics 모델을 이용하여 난류 부상화염을 모사하고 [2], 이 결과로

† 정회원, 연락처자, 서울대학교
정밀기계설계공동연구소, E-mail : toad75@snu.ac.kr
* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
** 정회원, 한국기계연구원, 환경기계기술연구부
*** 정회원, 한국과학기술연구원 대기자원 연구센터

부터 난류 부상화염 선단에서의 화염 특성들을 살펴보고자 한다. 이로부터 부상화염 안정화 조건을 확인해보고, 최종적으로 난류 선단화염 전파속도를 적절히 정의하여 이의 특성도 살펴보고자 한다.

2. 난류 부상화염에 대한 수치해석

Flame Hole Dynamics(이하 FHD)를 이용하여 난류화염의 소화과정을 모사하기 위한 수치해석은 2단계로 구성된다. 먼저 난류 채널 혼합층에서 유동장 및 농도장이 직접수치모사를 이용하여 계산되고, 계산된 농도장의 분포로부터 가상화염면의 각 격자점마다 임의적으로 전개되는 스칼라 소산율의 수열을 매 시간간격마다 추출해낸다. 일단 스칼라 소산율이 얻어지면, Flame Hole Random Walk Mapping을 적용하여 가상 화염면들에서 점멸상태가 추계적으로 전개되는 현상을 관찰할 수 있으며, 이로부터 난류화염의 부분 소화현상 및 부상현상에 대한 통계적 특성을 분석할 수 있다.

연료/공기의 난류 혼합층에 대한 배경난류장의 DNS 수치해석과 스칼라 소산율의 계산의 방법론은 모두 Ref. 3에 자세히 소개하였다. 기존의 연구와 동일하게 가상 화염의 위치가 혼합층의 분리판(Split Plate)에서 하류쪽으로 연장된 면과 일치한다고 가정한다. 화염면은 당량혼합분률면(Stoichiometric Mixture Fraction Surface)에 위치하고 있기 때문에 난류에 의해서 위치가 항상 변화하고 있다. 하지만, 가상 화염면에서도 스칼라소산율이 난류에 의해 항상 불규칙하게 변화하고 있으므로, 화염면이 불규칙하게 점멸되는 상황을 모사할 수 있고 3차원적인 난류화염면을 추적하기 위한 추가적인 계산부담을 피하기 위해서도 화염면의 위치를 $y=0$ 평면에 고정하기로 한다.

화염선단들의 전파/후퇴 및 생성/소멸을 결정하는 Flame Hole Random Walk Mapping은 층류 화염면 모델에 따른 화염점멸의 Mapping을 기반

으로 하여, 천이 스칼라 소산율에 따라 화염선단이 전파 또는 후퇴할 수 있는 경계면을 결정하는 Mapping을 추가한 것으로 볼 수 있다. 따라서 FHD 모델은 층류화염면의 소화 및 점화에 대한 Mapping에 Level-Set 방법을 채택하여 화염경계면의 전파를 모사할 수 있도록 구성되어 있다[2]. 국부적인 스칼라 소산율에 따른 선단화염 전파속도의 변화특성은 다음과 같이 모델화하였다[4, 5].

$$\frac{S_c}{S_L^0} = 1 - \frac{1 + 1/(\sqrt{\chi/\chi_E} - 1)}{1 + 1/(\sqrt{\chi_C/\chi_E} - 1)} \quad (1)$$

여기서, S_L^0 는 층류화염 전파속도이다. 특기할 사항은 $\chi = \chi_C$ 을 기준으로 부호가 바뀌며, χ 가 소염 조건 χ_E 에 접근할수록 S_c 값이 수학적으로 음의 무한대로 접근하게 된다. 그러나 물리적으로는 선단화염이 후퇴하는 과정도 확산에 따른 열손실에 의한 것이므로, 후퇴속도 역시 확산속도에 상응하는 크기를 가질 것이다. 본 연구에서는 화염선단 전파속도의 최소하한속도(Cut-off speed)를 설정하여, 최대 후퇴전파속도를 S_L^0 값의 2배로 가정하였다. 본 난류부상화염의 계산에서는 $S_L^0/U_\infty = 3$ 으로 설정하며, 소화와 천이 스칼라 소산율은 각각 $\chi_E = 140$ 과 $\chi_C = 70$ 으로 설정한다 [6].

3. 결과 및 토의

3.1. 난류 부상화염의 부상 선단

난류 부상화염에 대한 수치해석 결과로부터 부상화염 선단의 화염과 유동 특성을 살펴보기 전에, 우선적으로 부상화염 선단의 위치에 대한 정확한 정의를 내려야한다. 왜냐하면 난류 부상화염의 선단은 불규칙적이고 불균일한 국부 유동조건들에 의해 부상 선단도 간단한 모양이 아니라 매우

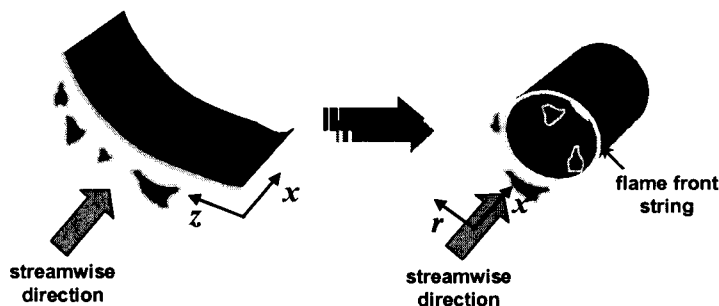


Figure 1 Concept of turbulent lifted flame front

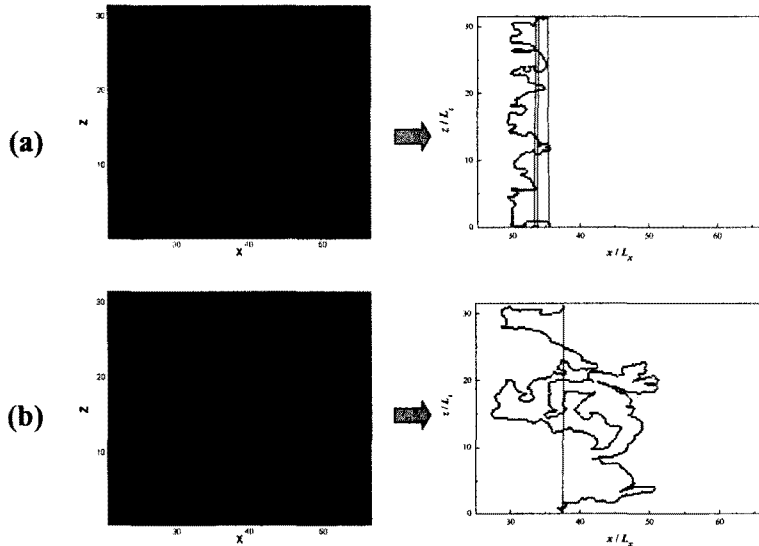


Figure 2 Front tracing for turbulent flame front; (a) $t / t_{\text{ref}} = 0.6$,
(b) $t / t_{\text{ref}} = 3.0$.

왜곡되어 있고 수많은 화염섬(island)과도 혼재되어 있을 수 있기 때문이다. 간단한 예로 본 연구에서 계산된 난류 혼합층 확산화염의 계산에서 발생될 수 있는 부상 선단의 모양은 Fig. 1의 왼쪽 그림과 같이 화염 평면에서 후류에 대부분의 반응 지역들과 상류에 발생하는 불규칙적인 화염섬들이 산발적으로 있을 것이다. 그러면 여기서 발생하는 문제는 화염 선단이 화염섬들의 집합으로 보아야 되는지, 아니면 화염섬이 아닌 전체 연료/산화제가 공급되어 발생하는 부분 예혼합 지역의 전체 폭(z -direction)을 잇는 화염 경계 중 가장 상류의 것을 선택해야 되는지가 될 것이다. 본 계산에서 폭(z -direction) 방향의 경계조건이 periodic 경계조건임을 고려했을 때, 일반적인 난류 축제트에서 부상화염을 상상하면 Fig. 1의 오른쪽 그림처럼 부상화염 선단은 전체 환을 잇는 제일 상류 선단과 나머지 화염섬들로 구성될 것이다. 이 난류제트 부상화염에서 선단의 정의를 일관되게 정의할 수 있는 형태는 전체 환을 잇는 선단일 것이며 모든 화염 경계면 중 가장 유일(unique)하게 식별할 수 있는 경계면이다. 따라서, 본 연구에서 부상 선단은 전체 폭을 잇게 되는 최 상류의 화염 경계면으로 정의한다.

Fig. 2는 시간에 따른 난류화염의 시간 전개과정(왼쪽)과 각 시점에서 부상 선단의 위치들을 추출한 그림(오른쪽)을 나타내었다. Fig. 2(a)는 평면화염을 초기조건으로 시작하여 시간이 얼마 지나지 않아 난류장에 의해 화염 선단이 약하게 왜곡되어 전체 폭을 잇는 유일한 화염경계면만 존재하고 화염섬 들은 보이지 않는 경우이다. 이 경우 다소 복잡하지만 유일한 선단 선을 추출할

수 있었다. Fig. 2(a)보다 더욱 시간이 지나서 난류 부상화염이 준정상상태에 근접한 때의 화염의 선단 형태를 Fig. 2(b)에서 살펴보면, 매우 왜곡되어 있는 주 부상 선단과 일부 부분적으로 발생되어 있는 화염섬들이 크고 작게 존재하는 것을 볼 수 있다. 하지만 부상선단은 전체 폭을 잇는 화염 경계면만을 고려하기 때문에 오른쪽과 같은 선단 위치만이 논의에 고려된다.

각 계산 시점마다 Fig. 2와 같이 추출된 부상 선단의 위치들로부터 시간 전개에 따른 왜곡된 부상 선단의 길이를 살펴보았다. Fig. 3은 부상 선단의 길이와 계산 영역 폭의 비 L_T/L_z 를 시간에 따라 도시한 그래프인데, 초기 조건으로 $x = 30$ 에서 평면 선단화염으로 설정하여 시간이 지날수록 점차적으로 선단이 왜곡되어 가는 결과를 대변하듯, L_T/L_z 는 1에서 시작되어 급격하게 증가를 하다가 평균 12.8 배의 길이를 중심으로 매우 불규칙하게 증감을 거듭하고 있다. 이는 불규칙적이고 산발적으로 발생하는 전파 또는 후퇴하는 선단화염들에 의해 fractal이 증가하다가, 일부는 국부적으로 후퇴하는 선단에 의해 발생하는 오목한 모양의 선단 부분이 단혀서 화염구멍으로 변화되거나 반대로 선단의 일부가 상류로 급격히 전파되어 나간 화염선단의 혹이 화염섬으로 끊어지기 때문에, 부상 선단의 길이가 급격히 줄어들게 된다. 물론 반대의 현상으로 부상 선단 뒤쪽의 화염구멍이 열려서 부상 선단으로서 합류하거나, 혹으로 떨어져나갔던 화염섬이 다시 부상 선단으로 합류하게 되는 경우는 급격히 부상 선단의 길이가 늘어나게 된다.

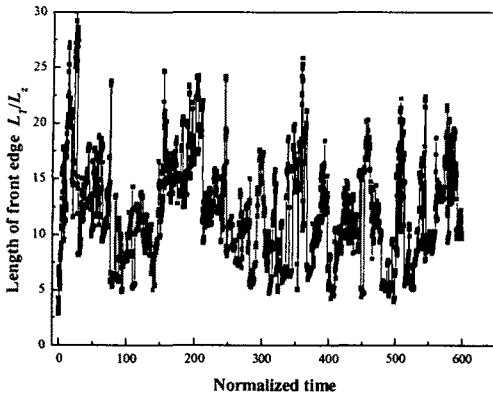


Figure 3 Temporal variation of the length of the turbulent flame front

3.2. 부상선단에 선단화염들의 전파특성

앞 장에서 부상선단을 정의하고 이로부터 선단의 정확한 위치를 파악함으로써 부상선단에서의 화염 특성들을 알아볼 수 있게 되었다. 먼저 각 시간마다 파악될 수 있는 난류 부상 높이, 부상 위치에서의 스칼라 소산율, 국부 유동속도, 그리고 선단화염 전파속도를 순서대로 살펴보고자 한다. 이 값들은 모두 각 시간마다 대표할 수 있는 대표 평균값으로서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{\phi} = \frac{1}{L_T} \int_{L_r} \phi(x, z) dL_T \quad (2)$$

여기서, L_T 는 부상 선단의 길이, ϕ 는 부상높이 H_T , 국부 주유동속도 u_x , 선단 전파속도 S_e , 그리고 스칼라 소산율 χ 를 뜻한다. 이 식에서는 각 경계면 (x, z)위치 마다 ϕ 값이 다르기 때문에

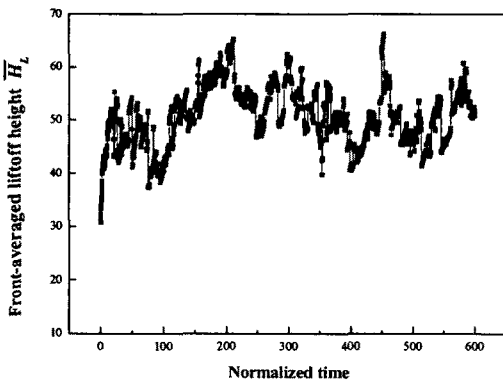


Figure 4 Temporal variation of the front-averaged liftoff height

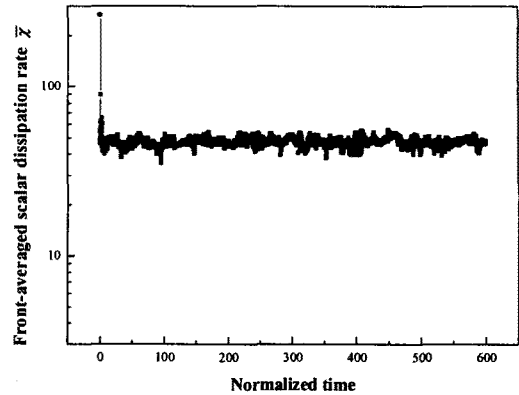


Figure 5 Temporal variation of front-averaged scalar dissipation rate

이렇게 미소길이에 대한 가중 평균을 실시하게 된다.

먼저 부상높이의 시간에 따른 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 초기조건 $x = 30$ 에서 시작되어 급격히 후류로 밀리다가 평균위치 $x = 50.7$ 을 기준으로 표준편차 5.5 가량으로 불규칙하게 진동하고 있음을 알 수 있다.

부상 선단위치에서의 평균적인 스칼라 소산율의 변화는 Fig. 5에 표시하였다. 평면화염이 초기 조건인 $x = 30$ 에서 시작될 때의 평균 스칼라 소산율은 $\bar{\chi} = 263$ 으로서 화염의 소염 스칼라 소산율 $\chi_E = 140$ 보다 큰 값에 의해서 부상 선단 부분들의 전파속도들은 대부분 후퇴하는 전파속도를 가지고 있을 것이며 따라서 Fig. 4와 같이 재빨리 후류로 후퇴되게 된다. 부상 선단이 후퇴되면 선단의 평균 스칼라 소산율은 상류의 난류 혼합특성에 의해 스칼라 소산율이 Fig. 5와 같이 감소되며 준정상 상태로 부상이 되어 거의 일정한 분포를 보여주며, 시간평균값으로는 $avg(\bar{\chi}) = 34.9$ 이다. 이 값에 상응하는 Eq.(1)의 선단화염속도 값 $S_e(avg(\bar{\chi}))/U_\infty$ 은 0.678로서 부상 평균위치 $x = 50.7$ 에서의 평균 주유동속도 u_x/U_∞ 값 0.71과 거의 비슷한 값을 가지고 있어서 부상화염이 안정화될 요건 중 하나인 선단화염의 전파속도와 국부유동속도의 균형조건을 만족함을 보여준다. 참고로 부상화염이 안정화되기 위해서는 다음과 같은 3가지 조건을 만족해야 할 것이다[2].

1. 난류부상화염의 선단에서 부상선단의 전파속도 $S_{T,e}$ 와 그 난류부상화염의 선단위치에서의 평균 유동속도 \bar{u} 가 균형을 이루어야

한다. ($S_{T,e} = \bar{u}$)

- 1의 조건을 만족하는 위치에서 작은 섭동을 주었을 때 난류화염선단의 난류전파속도 $S_{T,e}$ 의 후류방향에 따른 변화율이 평균 유동속도 \bar{u} 의 변화율보다 커야만 원위치로 회복될 수 있는 선형안정성을 확보할 수 있다. ($\partial S_{T,e}/\partial x > \partial \bar{u}/\partial x$)
- 1과 2의 조건을 만족하더라도 매우 큰 난류 교란에 대한 충분한 비선형적 안정성을 확보하여야만 된다. ($\partial S_{T,e}/\partial x - \partial \bar{u}/\partial x > \epsilon$)

마지막 3번째 비선형적 안정성 조건을 만족하는지 살펴보기위해서, 시간에 따른 부상선단의 평균유동속도와 평균선단전파속도의 변화를 Fig. 6에서 살펴보았다. Fig. 6(a)의 부상선단의 평균유동속도의 경우는 평균값 $avg(\bar{u}/U_\infty) = 0.71$ 이고, 표준편차 $std(\bar{u}/U_\infty) = 0.021$ 로서 크게 변화되지 않고 있는 반면, Fig. 6(b)의 부상선단의 선단전파속도는 평균값 $avg(\bar{S}_e/U_\infty) = 0.76$ 이고, 표준편차 $std(\bar{S}_e/U_\infty) = 0.086$ 로서 변화폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 특히 계산 초기에는 Fig. 5에서 설명한 것처럼 선단화염이 국부 스칼라 소산율이 높은 지역($x=30$)에서 시작

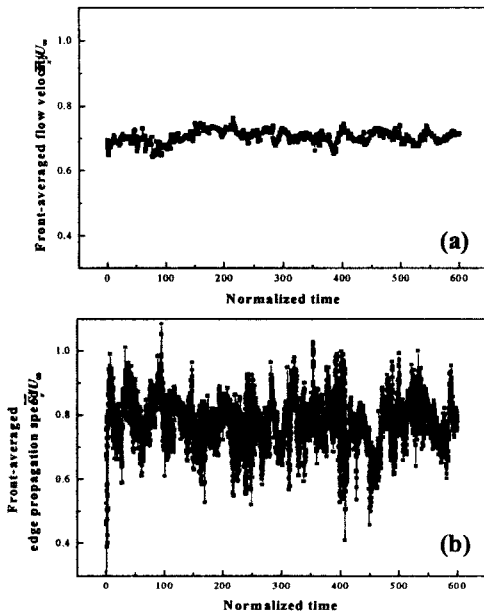


Figure 6 Temporal variation of front-averaged flow velocity (a), and front-averaged edge propagation speed (b).

되었기 때문에 선단전파속도가 낮은 값을 가지다가 부상 선단이 재빨리 후류로 밀리면서 선단전파속도의 평균값으로 회복됨을 알 수 있다. 이로부터 난류 부상 선단이 준정상적으로 안정화되는 동안에는 난류유동의 교란과 불규칙한 국부 스칼라 소산율에 의한 전파속도 교란에 의해 선단면이 상당히 왜곡되어 비선형 특성을 가질 것이지만, 섭동에 의한 선단전파속도의 변화 $std(\bar{S}_e/U_\infty)$ 가 국부유동속도의 변화 $std(\bar{u}/U_\infty)$ 보다 충분히 커서 안정성 조건의 3번째 조건을 만족시킴을 확인할 수 있다.

부상선단에서의 국부유동속도와 선단화염 전파속도의 더 상세한 분석을 위해서 각각에 대한 확률밀도 분포를 Fig. 7에서 살펴보았다. Fig. 7의 유동속도와 선단화염 전파속도의 확률밀도는 각 시간마다의 선단길이 평균으로부터 샘플링된 것이 아닌, 모든 선단위치와 모든 시간에 대해 샘플링된 것을 확률밀도로 표시한 것이다. 그 결과, Fig. 7(a)의 부상선단의 유동속도는 전형적인 난류특성인 log-normal에 가까운 분포를 보여주고 있으며, Fig. 7(b)의 선단화염 전파속도의 확률밀도 분포는 평균값을 최대치로 해서 분산이 Fig. 7(a)에 비해 상당히 넓음을 보여주고 있다. 또한 선단전파속도가 부분적으로 음수를 가지는 확률이 존재함을 보아, 부상 선단의 일부분들은 미연가스에 상대적으로 후퇴하는 선

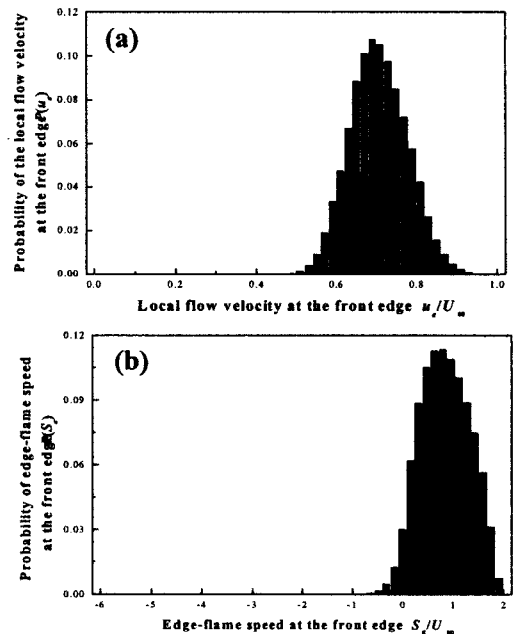


Figure 7 Probability density of the local flow velocity at the front edge (a), and edge propagation speed at the front edge (b).

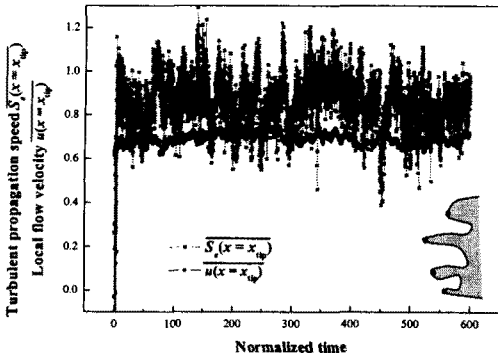


Figure 8 Temporal variations of turbulent propagation speed and local flow velocity on the basis of turbulent edge definition

단화염으로 구성되어 있음을 알 수 있지만 대부분은 미연가스로 전파하는 선단화염으로 구성되어 있음을 확인할 수 있다.

따라서 난류 부상화염 선단의 대부분은 전파되는 선단화염들로 구성되어 있기 때문에, 부상 선단에서 화염이 상류로 전파되어 나가는 형태는 Fig. 8의 개념적인 그림에서처럼 국부적으로 상류로 제일 빠르게 전파되는 부분 선단화염들에 의해 이끌려 나갈 것이다. 그러므로 난류 선단 화염전파속도를 간략히 정의할 수 있는 방법으로는 상류 쪽으로 가장 앞서 나아가는 선단화염들의 국부 선단전파속도에 대한 평균치로 생각할 수 있을 것이다. 따라서 난류 선단화염 전파속도를 다음과 같이 정의내리기로 한다.

$$S_{T,e} \equiv \overline{S_e(x=x_{ip})} \quad (3)$$

이에 대한 시간변화와 동일한 위치에서의 국부 유동속도들의 평균치 $\overline{u(x=x_{ip})}$ 의 시간변화를 Fig. 8에 도시해보았다. 난류 선단전파속도 $S_{T,e}$ 도 역시 국부 유동속도에 비해 Fig. 6처럼 섭동에 의한 변화가 더 큰 것을 볼 수 있으며, 따라서 비선형적 안정성 조건을 재확인할 수 있다. 하지만, $S_{T,e}$ 의 시간평균값은 0.86으로서 유동속도의 시간평균값 0.69에 비해 약간 큰 값을 나타내며, 이는 가장 빨리 전파되는 선단들만 샘플링이 된 결과에 기인한 것이다. 따라서 Eq.(3)의 정의를 통해 난류 선단전파속도의 대략적 특성을 파악할 수 있었지만, 더욱 물리적으로 정확한 정의를 위해서는 더 많은 다른 경우에 대한 분석과 논의가 필요할 것이다.

4. 결론

난류 부상화염 선단의 화염특성과 난류 선단화염 전파속도 특성을 살펴보기 위해서, 난류 혼합층 직접수치모사(DNS)에 Flame Hole Dynamics 모델을 적용하여 난류 부상화염을 모사하였으며, 이 결과에 대해 매 시간마다 부상 선단의 위치를 파악하여 그 위치로부터 화염 특성값 들을 추출하였다. 부상 선단의 선단 길이는 계산영역의 폭에 비해 약 10배에서 20배 가량 증가함을 볼 수 있었으며, 이는 선단전파에 대해 난류유동 섭동에 의한 왜곡과 불균일한 국부 스칼라 소산율에 의해 발생하는 선단화염 전파속도의 불균일로 인한 왜곡으로 발생된다. 부상선단에서 국부유동속도와 선단화염전파속도의 시간변화와 확률밀도분포를 살펴봄을 통해, 부상되어 있는 동안에 선단화염전파속도의 섭동에 의한 변화율이 국부유동속도의 변화율보다 크음을 확인할 수 있었으며, 이는 난류 부상화염 안정화 조건으로서 충분한 비선형 안정성 $(\partial S_{T,e} / \partial x - \partial \bar{u} / \partial x > \epsilon)$ 이 필요함을 증명해 준다.

선단화염전파속도의 확률밀도 분포를 통해 부상 선단의 선단화염들은 대부분 미연가스로 전파하는 특성을 가지고 있음을 확인하였으며, 이를 바탕으로 난류 선단화염 전파속도를 왜곡된 선단 모양 중에서 가장 상류 쪽으로 앞서 나아가는 선단화염 부분들의 국부 선단 전파속도에 대한 평균치로 정의하였으며, 난류 선단화염 전파속도의 계산 결과 또한 부상화염 안정화조건을 만족시킴을 보여준다.

후 기

이 연구(논문)은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구의 수치계산은 한국과학기술정보연구원의 '제 6차 슈퍼컴퓨팅 응용연구 전략지원 프로그램'의 IBM690+ 머신에서 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Peters, N., *Turbulent Combustion*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] 김준홍, 정석호, 안국영, 김종수, "Level-set 방법이 적용된 Flame Hole Dynamics 모델을 통한 난류 혼합층 확산화염 모사," 제28회 KOSCO Symposium 논문집, pp. 102-111, 양양, 2004 .6. 4
- [3] 김준홍, 정석호, 안국영, 김종수, "난류 혼합층에서 확산화염에 대한 flame hole dynamics 모델," 한국연소학회지 제8권 제3호 pp. 15-23,

2003.

[4] Daou, J., and Linan, A., "The role of unequal diffusivities in ignition and extinction fronts in strained mixing layers, *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 2, pp. 449-477, 1998.

[5] Pantano, C. and Pullin, D. I., "A statistical description of turbulent diffusion flame holes," *Combust. Flame*, Vol. 137, pp. 295-305, 2004.

[6] Shay, M. L. and Ronney, P. D., "Nonpremixed Edge Flames in Spatially Varying Straining Flows," *Combust. and Flame*, Vol. 112 pp. 171, 1998.