

Level-Set 방법이 적용된 Flame Hole Dynamics 모델을 통한 난류 혼합층 확산화염의 모사

김준홍^{*†} · 정석호^{**} · 안국영^{***} · 김종수^{****}

Simulation of a Diffusion Flame in Turbulent Mixing Layer by the Flame Hole Dynamics Model with Level-Set Method

Junhong Kim^{*†}, S. H. Chung^{**}, K. Y. Ahn^{***} and J. S. Kim^{****}

ABSTRACT

Partial quenching structure of diffusion flames in a turbulent mixing layer has been investigated by the method of flame hole dynamics in order to develop a prediction model for the phenomenon of turbulent flame lift off. The present study is specifically aimed to remedy the shortcoming of the stiff transition of the conditioned partial burning probability across the crossover condition by employing the level-set method which enables us to include the effect of finite flame edge propagation speed. In light of the level-set simulation results with two models for the edge propagation speed, the stabilizing conditions for turbulent lifted flame are suggested. The flame hole dynamics combined with the level-set method yields a temporally evolving turbulent extinction process and its partial quenching characteristics is compared with the results of the previous model employing the flame-hole random walk mapping based on three critical scalar dissipation rates. The probability to encounter reacting state, conditioned with scalar dissipation rate, demonstrated that the conditional probability has a rather gradual transition across the crossover scalar dissipation rate. Such a smooth transition is attributed to the finite response of the flame edge propagation.

Key Words : Turbulent Flame Extinction, Flame Edge, Flame Hole Dynamics, Level-Set Method, Partial Quenching, Propagation Speed

1. 서 론

난류 제트 확산화염은 실용적 연소기에서 많이 적용되는 화염의 형태이며, 최근에는 화염으로부터의 과도한 열전달을 감소시키기 위해서 화염을 노즐로부터 부상을 시키기 위한 연구가 진행되기도 한다. 특히 열효율의 개선과 이산화탄소의 효과적인 분리를 위해 채택되고 있는 순산소 연소기에서는 순산소 연소의 고온 특성으로 인해 심

각해지는 연소기의 열화방지를 위해 안정적인 난류 부상화염이 연소형태로 선호되고 있다. 따라서, 난류 부상화염의 안정화 특성을 파악하고 예측하기 위해서는 물리적으로 타당한 난류확산화염 모델이 개발될 필요가 있다.

난류부상화염을 포함한 실용적 연소기에서 관측되는 난류확산화염은 다양한 유동조건에서 연소되고 있는 층류화염편의 집합체로 인식될 수 있는 것으로 알려져 있으며, 이 때 난류화염에서 국부적으로 발생하는 소화현상은 층류화염편의 소화현상과 거의 비슷하다고 보고 있다. 하지만, 난류화염에서 발생하는 거시적인 소화현상에서는 매우 넓은 대역의 유동특성시간을 갖는 난류유동의 임의 교란들에 의해 각각의 층류 화염

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 한국기계연구원, 환경기계기술연구부

**** 한국과학기술연구원 대기자원 연구센터

† 연락처, toad75@snu.ac.kr

편들이 각기 다른 연소 및 소염상태의 Random Walk Process를 따르기 때문에, 난류화염의 거시적 소화는 층류화염 소화보다 점진적으로 일어난다고 예측할 수 있으며, 또한 난류화염의 소화현상은 Random Walk Process의 통계적 특성에 의해 제어되는 것으로 볼 수 있다[1, 2].

거시적 난류화염의 소화현상을 정확히 예측하기 위해서는, 결론적으로 이러한 반응과 비반응상태 사이를 불규칙하게 이동하는 Random Walk를 모사할 수 있는 적절한 물리적 모델의 수립에 대한 필요성이 대두되게 된다. 이러한 요구에 대응하기 위한 모델로서 1991년 Dold와 Hartley[3]는 Flame Hole Dynamics (이하 FHD로 표기) 모델을 제안하였는데, 이 모델의 개념은 다음과 같다. 층류화염편의 국부적인 난류유동에 의해 생성된 화염 구멍은 화염구멍의 경계에 존재하면서 반응면과 소염면을 구분하는 화염선단(Flame Edge)이 미연가스로 전진되거나 후퇴됨에 따라 축소 또는 확장이 될 수 있다. 만일 주어진 3차원 배경 난류유동장에 대해 이러한 FHD 모델에 따르는 화염구멍들이 불규칙하게 반복되는 생성, 소멸, 팽창 및 축소 과정을 통계적으로 해석한다면, 난류화염의 국부 소화확률을 예측할 수 있다는 것이다.

이러한 화염선단이론을 적용하여 난류화염의 소화과정에 대한 모사를 시도한 연구는 Dold와 Hartley[3]의 초기연구를 시작으로, Kim[1] 등은 간단한 2차원 난류유동에 존재하는 1차원 난류화염선의 소화과정을 모사하였다. 최근에는 좀 더 현실적인 난류화염의 소화모사를 시도하기 위해서 채널 혼합층의 난류유동에 대한 3차원 직접수치모사를 통해서 사실적 배경 난류장을 확보하였으며, 이에 대해 FHD 모델을 적용하여 난류화염의 소화과정에 대한 통계적 특성을 살펴보았다[2].

FHD 모델에서 가장 핵심적인 사항은 화염의 점멸상태를 결정짓는 Random Walk Mapping을 설정하는 것이다. 하지만 기존 연구들에서 채택된 Random Walk Mapping에서는 화염구멍의 화염선단에서 국부유동조건(스칼라 소산율)에 대한 화염점멸상태의 응답이 즉각적으로 이루어지기 때문에 선단화염의 전파속도는 항상 무한히 빠르다는 가정이 내재적으로 적용된다. 따라서 정확한 난류화염의 소화확률을 모사하기 위해서는, 스칼라 소산율의 함수로 주어지는 유한한 전파속도가 고려된 선단화염의 특성을 모사할 수 있도록 새로운 FHD 모델과 적용방법이 개선되어야 할 것이다.

본 연구에서는 기존 난류 혼합층 3차원 DNS를 통해 얻어진 배경 유동장을 채택하고 이 배경 난류장에 국부유동조건(스칼라 소산율)에 따라 변화되는 유한한 선단화염의 전파속도를 고려하

는 수정된 FHD 모델을 적용하여, 난류화염의 전이과정에 대한 통계적 특성과 부상특성이 기존 FHD의 결과와 비교하여 어떻게 변화되고 개선되었는지 살펴보고자 한다.

본 논문은 첫 번째로 기존 FHD의 기본적인 개념과 한계점에 대해서 소개하고 이를 보완하기 위해 화염선단들의 사실적인 속도의 전파 과정을 모사할 수 있도록 Level-Set 방법을 제시하였다. 이 방법을 난류 혼합층 DNS의 배경 난류장에 대해서 다양한 선단화염의 전파속도 모델을 적용한 난류 소화과정 결과들을 살펴봄으로써 난류 부상화염의 안정화 조건에 대해 고찰해보고자 하였다. 그리고, 새로운 모델을 적용한 난류 소화 모사 결과에 대해 통계적인 분석을 통하여 기존 FHD 모델과 비교함으로써 사실적인 모사 측면에서 향상된 점을 확인해보고, 마지막으로 향후 더욱 사실적인 소염 현상을 모사하기 위한 연구의 개선 방향에 대해 논의하고자 한다.

2. 수정된 Flame Hole Dynamics 모델

FHD를 이용하여 난류화염의 소화과정을 모사하기 위한 수치해석은 2단계로 구성된다. 먼저 난류 채널 혼합층에서 유동장 및 농도장이 직접 수치모사를 이용하여 계산되고, 계산된 농도장의 분포로부터 가상화염면의 '각' 격자점마다 임의적으로 전개되는 스칼라소산율의 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 부분소화현상 및 천이현상에 대한 통계적 특성을 분석할 수 있다. 본 장에서는 기존의 Random Walk Mapping의 한계점과 이를 개선하기 위한 새로운 Mapping 방법에 대해 먼저 논의하기로 한다.

2.1. 기존 FHD 모델의 한계

층류화염소의 특성은 Damköhler 수 또는 그 수의 역수에 비례하는 스칼라 소산율을 인자로 사용하여 표현될 수 있으며, 여기에서는 특성 확산시간의 역수의 의미를 갖고 있는 스칼라 소산율을 인자로 채택하고 있다. 특히, 주요 화학종의 Lewis 수가 1에서 멀지 않은 화염은 다음의 3가지 특성 스칼라 소산율에 의해서 층류화염소의 기본특성이 규정될 수 있다. 이들 특성 스칼라 소산율들은 화염의 준정상 소염이 발생하는 조건인 소화 스칼라 소산율(χ_B), 화염과 소염지역의 경계선(화염선단)의 전파방향의 천이가 발생하는 조건인 천이 스칼라 소산율(χ_C), 그리고 소염된

화염이 다시 점화되는 조건인 점화 스칼라 소산율(χ_I)들로 나눌 수 있는데, 연료와 산화제의 Lewis 수가 1에 너무 멀지 않은 일반적인 연소 조건에서는 $\chi_E > \chi_C \gg \chi_I$ 의 관계를 가지고 있다. 만일 화염면의 격자 구획마다 화학반응상태를 연소상태나 소화상태의 두 가지 경우로 구분 짓는다면, 그 구획의 스칼라 소산율이 3가지 특성 스칼라 소산율보다 크고 작음에 따라서 소염과 재점화가 결정될 수 있을 것이다. 이러한 연소상태를 결정짓는 FHD Mapping의 개념은 Ref.[2]에 자세히 소개되었다.

위와 같이 3개의 특성 스칼라 소산율에만 의존해서 구성된 Random Walk Mapping을 이용하여 FHD를 적용할 경우, 각 격자면에서 화염의 점멸상태의 천이과정에 대한 서술이 생략되므로, 매 시간간격마다 격자 화염면은 주어진 유동조건(즉, 스칼라 소산율의 공간적 분포)에 대응하는 이원적(binary) 평형상태의 점멸상태를 보여야 한다. 이러한 동적 응답특성은 스칼라 소산율에 무관하게 미연가스와 기연가스 사이의 화염경계의 응답속도가 무한히 빠르다는 것을 내재적으로 의미하게 된다.

그러나, 실제 부분에혼합(partially premixed)면에서 화염전단의 전파속도특성은 화염면의 점멸특성에 지대한 영향을 미치는 것으로 파악된 천이 스칼라 소산율 근처에서는 전진/후퇴하는 속도가 "0"에 근접하게 되므로, 화염전단의 난류유동에 대한 응답속도는 매우 느려질 것이다. 따라서 Flame Hole의 경계지역에서는 화염전단의 느린 응답특성으로 인해서 매우 커다란 비평형 효과가 나타날 것으로 예측되고 있으며, 이러한 비평형 효과를 고려할 수 있는 개선된 Mapping이 개발될 필요성이 대두되고 있다.

Flame Hole의 거동은 기존 FHD Mapping에서 개념적으로 기술된 바와 같이 두 가지의 화염 특성을 지니고 있다. 첫째로는 전체적으로 연소와 소염이 되어있는 준정상 화염의 영역은 소염 스칼라 소산율과 점화 스칼라 소산율에 의해 점멸이 결정되는 층류 확산화염면의 성질을 띄고 있으며, 둘째로는 연소와 소염의 경계가 되는 선단 화염의 구역에서는 화염이 천이 스칼라 소산율을 기준으로 비정상적으로 전진 또는 후퇴하기 때문에 예혼합 화염처럼 전파되는 특성을 가지고 있다. 그러나 층류 화염면 모델과 유사한 기존의 준정상적인 FHD Mapping 방법은 무한히 빠른 화염응답만을 모사할 수 있기 때문에, 화염 전단의 비정상적 전파특성에 대한 모사를 위해서는 새로운 방법이 도입되어야 한다. 본 연구에서는 전파되는 화염면을 추적하는 기법 중에서 적용이 간단하고 계산 효율도 좋은 Level-Set 방법을 이용하여 개선된 FHD를 제안하고자 한다[4].

2.2. Level-Set 방법을 적용한 FHD 모델

기존의 FHD 모델은 층류 화염면 모델에 따른 화염점멸의 Mapping을 기반으로 하여, 천이 스칼라 소산율에 따라 화염선단이 전파 또는 후퇴할 수 있는 경계선을 결정하는 Mapping을 추가한 것으로 볼 수 있다. 따라서 유한한 전파속도가 고려되는 새로운 FHD 모델은 층류화염면의 소화 및 점화에 대한 Mapping에 Level-Set 방법을 채택하여 화염경계선의 유한한 속도의 전파를 모사할 수 있도록 구성되었으며, 이에 대한 요약이 아래의 Table 1에 주어져 있다.

Table. 1 The flame hole random walk mapping using level-set method with scalar dissipation rate

스칼라소산율 (χ)	연소상태	방법
$\chi < \chi_I$	점화	$G(x,z) > 0$ 로 강제 설정
$\chi > \chi_E$	소염	$G(x,z) < 0$ 로 강제 설정
$\chi_I < \chi < \chi_E$	화염면 전파에 의해 결정	Level-Set Equation의 시간적분

먼저 Level $G(x,z)$ 의 값을 소염인 영역에서는 음수로, 화염이 존재하는 영역에서는 양수로 설정한다. 그러면 화염경계선, 즉 화염 선단의 $G(x,z)$ 값은 자연히 $G(x,z) = 0$ 이 되게 되고, Level Set $G(x,z) = 0$ 를 따르는 화염경계들이 난류 확산화염의 소염구역과 화염구역을 구별 짓는다. 먼저 $t = t_0$ 일 때의 배경 난류장에서 추출한 스칼라 소산율로부터 점화 및 소염 스칼라 소산율과 비교하여 Table 1에 따라 각 격자의 $G(x,z)$ 값을 재설정한다. 그 후 $t = t_0 + \Delta t$ 까지 $G(x,z)$ 에 대해서 Level-Set 식을 시간 적분하여 화염면의 전파를 모사하도록 한다. 여기에서, 이류와 전파에 의한 경계면의 이동을 표현하는 Level-Set 식은 다음과 같이 표현된다.

$$G_t + uG_x + wG_z = S_c(\chi) \sqrt{G_x^2 + G_z^2} \quad (1)$$

위의 Level-set 식에서 u, w 는 각각 x 와 z 방향의 속도성분으로서 배경 난류장의 데이터 값을 도입하고, $S_c(\chi)$ 는 화염전단의 전파속도로서 스칼라 소산율에 대한 함수로 표시할 수 있다. Eq. 1의 각항들은 2차정확도의 상류도식법을 적용하여 차분화 하였으며 1차 Euler 외삽법으로 시간 차분을 하였다[4].

Table 1과 같이 Level-Set 식에 대한 시간 적분을 하기 전에 점화 및 소염 조건에 따라 $G(x,z)$ 값을 재설정하게 되는데, 재설정 후에는 화염면 전체의 Level-Set 들에 대해서 규준화된 거리의 함수로서 $\nabla G(x,z) = 1$ 를 만족하도록 Level Set을 조절하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 다음과 같은 식을 시행하여 Level set을 재설정한다[5, 6].

$$G_r = S(G^{ex})(1 - \sqrt{G_x^2 + G_z^2}) \quad (2)$$

$G(x,z)$ 가 정상상태로 수렴할 때까지 ($G_r = 0$), Eq. 2를 설정된 정확도까지 반복 수렴시킨다. 여기서, G^{ex} 는 이전 시간단계에서 Eq. 1에 의해 최종적으로 계산된 Level-Set 들이며, 함수 $S(G^{ex})$ 는 $G = G_o$ Level-Set을 기준으로 하여 미연가스 쪽인지 기연가스 쪽인지를 나타내는 부호로서 다음과 같이 표시된다.

$$S(G^{ex}) = (G^{ex} - G_o) / (\sqrt{(G^{ex} - G_o)^2 + \epsilon}) \quad (3)$$

여기서, ϵ 은 작은 값을 가지는 파라미터이다. 이러한 반복적인 규준화 과정은 $G(x,z)$ 값에 대해 Table 1과 같은 점화 및 소염 조건에 따른 임의적인 재설정에 의해 생성된 화염경계선 ($G(x,z) = 0$)의 위치를 그대로 보존하게 하면서 Level Set들을 거리의 함수로서 규준화를 시키기 때문에, 점화 및 소화 모사를 위한 재설정에 따른 Level Set의 섭동에 상관없이 그 후에 시행되는 Eq. 1의 시간적분 해가 안정화되는 역할을 담당한다.

3. 연료/공기 혼합층에서 FHD 수치모사

본 장에서는 앞장에서 소개한 Level-Set 방법을 통해 유한한 화염전파속도를 반영할 수 있는 FHD 수치모사를 이용하여, 연료/공기의 난류 혼합층에서 발생할 수 있는 난류 확산 화염의 부분소화과정을 살펴보기로 한다. 연료/공기의 난류 혼합층에 대한 배경난류장의 DNS 수치해석과 스칼라 소산율의 계산의 방법론은 모두 Ref. 2에 자세히 소개하였다. Fig. 1에 난류 혼합층 DNS에 대한 개략도와 가상 화염면 위치를 표시하였는데, 기존의 연구와 동일하게 가상 화염의 위치가 혼합층의 분리판(split plate)에서 하류쪽으로 연장된 면과 일치한다고 가정한다. 화염면은 당량혼합분률면(stoichiometric mixture fraction

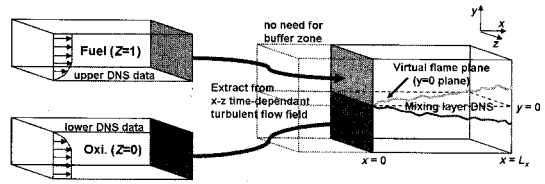


Fig. 1 Schematic of mixing layer DNS

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 난류 화염면을 추적하기 위한 추가적인 계산부담을 피하기 위해서도 화염면의 위치를 $y=0$ 평면에 고정하기로 한다.

Level-set 기법을 채택한 개선된 FHD는 두 단계에 거쳐서 채널 난류혼합층에 적용되었다. 먼저 난류확산화염의 부상특성을 안정화시키기 위한 수치모사가 진행되었다. 선단화염의 응답특성은 더 이상 무한히 빠르지 않고 유한한 화염선단의 전파속도에 영향을 받게 된다. 따라서 주변유동조건의 특성에 따라서 화염이 안정적으로 부상되지 못하고 분리판에 부착되거나 날려가는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 부상지역의 부분소화에 대한 통계적 특성을 파악할 수가 없게 된다. 부상화염의 안정화를 시험하기 위해서 여기에서는 두 가지의 다른 선단화염의 전파속도에 대한 모형이 도입되어 우리가 제안하고 있는 부상화염의 안정화 조건을 확인하였다. 일단 난류화염이 안정적으로 부상되면, 난류화염의 부분소화특성에 대한 통계적 특성을 파악할 수 있다. 이를 통해서 개선된 FHD를 기존의 FHD와 비교하여 통계적 특성을 고찰하였으며, 또한 얻어진 수치모사결과와 개선된 현실성을 확인할 수 있다.

3.1. 난류 부상화염의 안정화

채널난류혼합층에서 난류확산화염의 안정적인 부상특성을 파악하기 이전에 부상화염의 안정화조건을 먼저 알아보기로 하자. 일반적으로 부상화염이 안정화되기 위해서는 다음과 같은 3가지 조건을 만족해야한다.

1. 난류부상화염의 선단에서 난류선단의 전파속도 $S_{T,e}$ 와 그 난류부상화염의 선단위치에서의 평균 유동속도 \bar{u} 가 균형을 이루어야 한다. ($S_{T,e} = \bar{u}$)
2. 1의 조건을 만족하는 위치에서 작은 섭동을 주었을 때 난류화염선단의 난류전파속도

$S_{T,e}$ 의 후류방향에 따른 변화율이 평균 유동 속도 \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. ($\partial S_{T,e}/\partial x - \partial \bar{u}/\partial x > \epsilon$)

이러한 안정화 조건들이 난류 부상화염에 어떻게 적용이 되는지 알아보기 위해, 먼저 선단화염의 전파속도가 스칼라 소산율과 무관하게 일정한 경우에 대해서 연료/산화제 혼합층에서 FHD를 통한 난류화염의 부분소화현상의 수치모사 결과를 살펴보자.

주유동 방향 (x -방향)에 대한 가상화염면 ($y=0$ 평면)에 위치한 유동속도와 스칼라 소산율의 변화가 Fig. 2에 도시되어 있다. 이들 값들은 시간과 z -방향에 따라 변화할 수 있는 값들이므로, (1) $z=0$ 에서의 시간평균 (파선), (2) z -방향 (Span-wise)평균 (점선), 그리고 (3) 시간과 z -방향에 대한 평균으로 (실선) 한 각각의 값을 주유동 방향(x -방향)에 따라 도시하고 있다. 시간평균은 시간간격 $\Delta t=0.1$ 으로 6000번의 샘플링을 시행한 것이며, 이는 한 지점에서 약 30번 정도로 큰 에디의 운동이 지나갈 정도의 시간이다. 각 3가지 평균 방법들을 통한 속도와 스칼라 소산율의 분포가 거의 동일한 거동들을 나타내는 것으로 보아, z -방향으로의 난류유동은 등방성을 띤다고 볼 수 있으며 시간적으로도 정상상태(stationary)에 이르렀다고 볼 수 있다. 따라서 혼합층에서의 주유동 방향에 따른 국부유동 및 스칼라 소산율, 그리고 이에 따른 전파속도는 모두 시간과 z -방향 평균값을 기준으로 분석하기로 한다.

주유동 방향에 따른 국부유동 속도는 $x=0$ 지점에서부터 속도가 "0"에서 점차 증가하여 균일유동상태의 값으로 변화된다. 이는 가상화염면이 분리판($y=0, x<0$)에서부터 주유동 방향으로 연장시킨 평면($y=0, x\geq 0$)이기 때문에, 분리판 위치에서 속도의 점착조건(no-slip condition) 때문에 주유동 속도가 "0"의 값을 갖게 되며, 후류로 갈수록 난류유동에 의한 운동량이 유입되어 증가되는 것이다. 반면, 스칼라 소산율은 분리판에서 최대값을 나타내다가 후류로 갈수록 난류의 혼합과정으로 인해서 급격히 감소되는 경향을 보인다.

다음으로 주유동 방향에 따른 난류화염 선단의 전파속도 $S_{T,e}$ 의 변화 특성도 Fig. 2에 도시되어

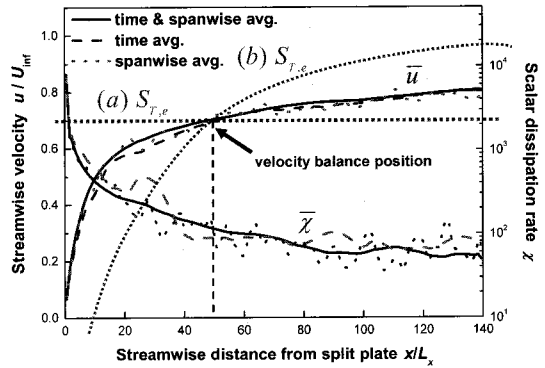


Figure 2 Mean profiles of streamwise velocity and scalar dissipation rate and turbulent edge propagation speed (with (a) constant laminar edge speed and (b) edge speed given by Eq. (5)) along the streamwise direction

있다. 난류화염 부상선단에서는 국부 선단화염들이 불균일하게 전파 및 후퇴함으로써 화염 선단면이 왜곡되면서 각 왜곡된 면마다 스칼라 소산율에 따라 변화되는 선단화염 전파속도로 전파되기 때문에, 정량적인 난류화염 선단의 전파속도를 정의하기는 어렵다. 하지만, $S_{T,e}$ 은 국부 선단화염 전파속도 S_e 의 크기와는 밀접한 관계를 가지고 있을 것이므로, $S_{T,e}$ 와 S_e 의 관계를 살펴봄으로써 $S_{T,e}$ 의 정성적인 변화특성을 파악할 수 있을 것이다.

난류 예혼합화염 전파속도와 같은 개념으로 가상화염 평면상에서 전파하는 난류 선단화염 전파속도는 국부적으로 왜곡되어 있거나 조각난 화염편 선단들의 전파 속도에 대한 적분 값이므로 다음과 같이 표시될 수 있을 것이다.

$$S_{T,e}L_z \approx \sum_i^N \left(\int_{l_i} S_e dl_i \right) \quad (4)$$

여기서 L_z 는 z -방향의 계산영역이며, i 는 난류화염 부상 선단 부근에서 왜곡되어 생성되는 화염경계선에 대한 인덱스이며 N 은 난류화염 부상 선단 부근의 화염경계선 i 의 개수, 그리고 l_i 는 i 번째 화염편의 둘레길이의 좌표벡터이다. 난류화염 부상 선단에서 왜곡이 발생되어 생기는 화염경계선의 개수 N 은 선단 위치에서의 난류의 섭동 혹은 스칼라 소산율의 섭동 강도에 따라 변화될 것이다. 일반적으로 인덱스가 짝수번째의 경계선은 후류방향으로, 홀수번째의 경계선은 전

류방향으로 전파되므로, 충분한 시간이 흐른 뒤에는 첫 번째 경계선을 제외하고는 소멸되는 것이 보통이며, 다른 경계선이 존재하더라도 잔류 시간은 비교적 짧을 것이다. 따라서 화염 선단면이 하나만 존재한다면($N=1$), $S_{T,e}$ 는 S_e 와 거의 비례적인 관계를 가지고 있을 것이다.

연료/산화제 혼합층의 난류소화과정 모사에서 선단화염 전파속도를 $S_e/U_\infty=0.70$ 으로 가정한 경우의 $S_{T,e}$ 가 Fig. 2의 (a)에 도시되어 있다. 이 경우 선단화염 전파속도가 스칼라 소산율에 관계없이 일정하고 또한 크기가 평균의 자유유동과 유사하므로 난류유동 섭동의 크기보다 매우 클 것이다. 따라서 전파되는 동안의 Single sheet regime의 난류혼합화염과 유사하게 화염선단면의 형태도 크게 왜곡되지 않을 것이며, 난류 선단화염 전파속도 $S_{T,e}$ 는 Fig. 2의 (a)에서처럼 주유동 방향 위치에 관계없이 거의 일정한 형태를 보일 것이다. 이와 같은 경우, $x=50$ 근처의 위치에서 $S_{T,e}$ 와 \bar{u} 는 균형을 이룰 수 있을 것이다. 하지만 주유동 방향에 따른 평균유동속도의 변화량 $\partial\bar{u}/\partial x$ 이 난류 선단화염 전파속도의 변화량 $\partial S_{T,e}/\partial x$ 보다 크므로, 난류 유동에 의한 섭동에 의해 상류쪽으로 약간 이동된다면 $S_{T,e}$ 가 \bar{u} 보다 커지게 되고 따라서 난류 화염 선단은 점차 상류의 분리판 쪽으로 부착이 될 것이다. 반면 난류화염 선단의 위치가 $x=50$ 보다 후류에 위치한다면 $S_{T,e}$ 가 \bar{u} 보다 작아지게 되어서 화염날림이 발생되어 부상화염이 안정화가 되기 어려울 것이다.

이를 확인하기 위해 Level-Set 방법을 이용하여 화염면의 전파과정을 Fig. 3에서처럼 두 가지 경우에 대해 모사하였다. 전파과정 모사의 초기 조건은 속도 균형이 이루어질 것으로 예상되는 $x=50$ 의 위치보다 앞인 $x=30$ 위치를 기점으로 상류 쪽에는 소화상태(검은색, $G(x, z) < 0$), 하류쪽에는 연소상태(회색, $G(x, z) > 0$)로 설정하여 시작하고, 또 하나는 예상균형위치보다 뒤쪽인 $x=100$ 에 평면화염선단을 설정하여 모사한다. Fig. 3a,b 경우 모두 선단 화염면은 크게 왜곡되지 않은 상태로 전파되고 있음을 볼 수 있다. 화염선단의 층류전파속도가 주유동의 평균속도와 유사한 크기를 갖고 있어 주유동의 난류속도의 섭동량보다 화염선단의 층류속도가 매우 큰 경우에 해당된다. 따라서 비교적 작은 화염면의 교란만 발생할 것이며, 결과적으로 난류화염선단 전파속도 $S_{T,e}$ 는 S_e 보다 약간 큰 값을 나타낼 것이다. Fig. 3a의 경우는 화염이 안정화 되지 못하고 분리판 까지 전파됨을 볼 수 있는데, Fig. 2

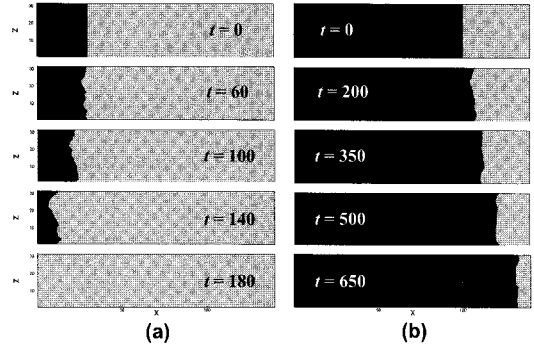


Figure 3 Level-Set evolution of flame front in the virtual flame surface for constant speed of edge flame; initial positions of the flame front are at (a) $x=30$ and (b) $x=100$

처럼 속도의 균형위치($x=50$)보다 앞에 있는 화염면은 $S_{T,e}$ 가 \bar{u} 보다 빠르기 때문에 계속 앞으로 전파하여 결국은 분리판에 부착되게 된다. Fig. 3b의 경우는 이와 반대로, \bar{u} 가 $S_{T,e}$ 보다 빠르기 때문에 화염면이 국부유동속도에 의해 점차 밀려서 화염 날림이 일어남을 확인할 수 있다.

그러나, 실제현상에서는 앞서 언급했듯이 화염 경계선의 화염선단이 낮은 스칼라 소산율을 경험하는 경우에는 미연가스 쪽으로 전파하고, 스칼라 소산율이 천이 스칼라 소산율 χ_c 에 가까워지게 되면서 전파속도는 "0"에 근접하게 되며, χ_c 보다 큰 경우는 미연가스에서 화염 쪽으로 후퇴하는 음의 화염전파속도를 가질 것이다. Daou & Linan[7]은 이러한 선단화염과 혼합층 두께(스칼라 소산율)와의 관계를 이론적 해석방법으로 보여주었으며, 이의 결과를 바탕으로 Pantano & Pullin[8]는 다음과 같은 식으로 전파속도와 스칼라 소산율의 관계를 설정하여 화염 구멍의 거동에 대해 통계적 특성을 살펴보았다.

$$\frac{S_e}{S_L^0} = 1 - \frac{1 + 1/(\sqrt{\chi/\chi_E} - 1)}{1 + 1/(\sqrt{\chi_c/\chi_E} - 1)} \quad (5)$$

여기서, S_L^0 는 층류화염 전파속도이다. S_e 와 스칼라 소산율 χ 와의 관계를 Fig. 4에 도시하였다. 특기할 사항은 $\chi = \chi_c$ 을 기준으로 부호가 바뀌며, χ 가 소염 조건 χ_E 에 접근할수록 S_e 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 Fig. 4에서 보듯이 화염선단 전파속도

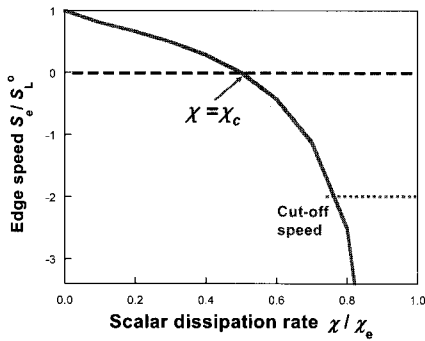


Figure 4 Modeling of edge flame speed in terms of scalar dissipation rate

최소화한속도(Cut-off speed)를 설정하여, 최대 후퇴전파속도를 S_e^L 값의 2배로 가정하였다. Fig. 3b)의 계산에서는 $S_e^L/U_\infty = 3$ 으로 설정하며, 소화와 천이 스칼라 소산율은 각각 $\chi_E = 140$ 과 $\chi_C = 70$ 으로 설정한다.

선단화염 전파속도를 일정하다고 가정한 경우와는 달리 Eq. 5와 같이 스칼라 소산율이 증가함에 따라서 S_e 값이 감소하도록 모델링을 한 경우, 주유동 방향에 따라 $S_{T,e}$ 가 어떻게 변화되는지 살펴봄으로써 화염의 부상이 가능한지 예측해보도록 한다. 가상 화염면에서 주유동 방향에 따른 스칼라 소산율은 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 분리판에 가까워질수록 급격히 증가하며, Fig. 4처럼 선단화염 전파속도 S_e 는 스칼라 소산율이 χ_E 에 접근함에 따라 급격히 감소하는 함수의 형태를 가지고 있기 때문에, 상류로 갈수록 S_e 의 통계적인 값 역시 급격히 감소될 것이다. 이런 특성들을 바탕으로 가상 화염면 상의 각 위치 x 에 대한 난류 선단화염의 전파속도의 거동은 Fig. 2의 (b)와 같이 상류로 갈수록 급격히 감소하는 특성을 지닐 것이라고 예상할 수 있다. 이와 같이 주 유동 방향 x 에 따른 난류부상화염 선단의 난류화염 전파속도 변화가 평균 난류유동속도의 변화보다 충분히 큰 경우라면 $(\partial S_{T,e}/\partial x - \partial \bar{u}/\partial x > \epsilon)$, 선단화염의 전파/후퇴에 의한 화염선단면의 왜곡이나 국부 난류유동의 섭동에 의해 평균적인 선단화염의 위치가 상류(하류)로 변화되더라도 $S_{T,e}$ 가 \bar{u} 보다 작아짐(커짐)으로 인해 균형을 이루는 위치로 복귀하여 안정화가 될 수 있을 것이다.

이를 확인하기 위해, Eq. 5를 적용한 Level-Set 모사를 시행하였다. 역시 초기 화염선단의 위치를 $x = 30$ 와 $x = 100$ 에서 각각 시행하

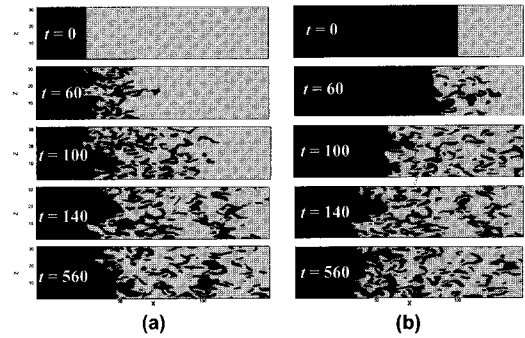


Figure 5 Level-Set evolution of flame front in the virtual flame surface for the modelled propagation speed of edge flame; initial positions of the flame front are at (a) $x = 30$ and (b) $x = 100$

였으며, 각 경우의 화염면 점멸의 전개과정에 대한 수치모사 결과들을 Fig. 5에 나타내었다. 국부적으로 강하고 약한 스칼라 소산율들이 인접하고 있기 때문에, Fig. 3와는 달리 앞으로 전파되는 선단화염과 후퇴하는 선단화염들에 의해 상당히 왜곡된 화염 선단들이 시간에 따라 매우 불규칙하게 전파되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 평균적으로 $x = 50$ 근처의 위치에 안정적으로 부상됨을 알 수 있다. 또한, 화염의 선단으로부터 후류로 밀려나서 오목하게 된 부분들 중에서는 점차 닫히게 되어 화염구멍이 형성함을 알 수 있으며, 이러한 화염구멍들은 시간이 지남에 따라 스칼라 소산율의 변화에 의해 확장 또는 축소되기도 한다.

결론적으로 난류 부상화염이 안정화되는 현상은 주 유동 방향에 따라 선단화염 전파속도의 변화가 평균속도의 변화율보다 큰 경우에 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 부상화염을 안정화시키기 위해서는, 연소기 내의 형상이나 유동조건을 적절히 조절을 하여, 화염안정화 지역에서 주 유동 방향에 대해서 화염면상의 스칼라 소산율의 감소를 심화시키거나 평균유속의 변화율을 작게 하는 방법을 이용하여 충분한 안정화 조건을 확보하여야 할 것이다.

3.2. 수정된 FHD의 수치결과와 통계 분석

3개의 특성 스칼라 소산율에 기반한 화염편 모델에 추가하여, 스칼라 소산율에 따른 선단화염의 전파속도 모델을 적용한 Level-Set 방법이 도입된 수정된 FHD의 수치모사의 결과를 살펴보고 기존의 FHD 수치모사와 비교해보도록 한다. 단, 화염편 모델을 적용하는 과정에서 $\chi < \chi_I$ 인 경우에 가상 화염면이 소멸상태에서 재점화가 되

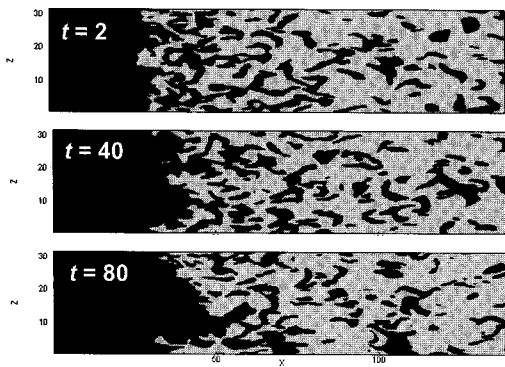


Figure 6 Zero Level-Set evolution of flame holes in the virtual flame surface with the modified Flame Hole Dynamics

는 현상은 생략시키기로 한다. 일반적으로 점화 Damköhler수가 소화 Damköhler수보다 여러 차수 이상 크기 때문에, 재점화가 일어나기 위해서는 미연가스로 상당량의 열유입이 발생되지 않는 한 좀처럼 일어나지 않는다. 따라서 본 연구에서는 천이 스칼라 소산율과 소염 스칼라 소산율은 특정값으로 설정하지만, 점화 스칼라 소산율은 “0”의 값으로 설정한다. 결과적으로, 상류 쪽에서 생성되는 화염면들은 모두 후류로부터 전파해오는 화염편에 의한 것만으로 이루어진다.

Figure 6는 $\chi_E = 140$ 과 $\chi_C = 70$ 의 경우에 수치모사 통해 얻은 소화과정 결과를 시간에 따라 도시한 그림이다. 초기조건으로는 $x = 30$ 의 위치에 평면화염선단을 설정하였다. $t = 2$ 일 때의 결과에서 보듯이 비 균일한 스칼라 소산율에 의해 화염선단이 전파되거나 다른 일부는 후퇴가 됨으로써 초기조건의 평면적인 화염선단은 금방 임의적으로 왜곡된 모양으로 변화되고 있다. 또한, Level-Set 식만을 고려한 Fig. 5의 결과와는 달리 후류 쪽의 화염면들은 χ_E 보다 큰 강한 국부 스칼라 소산율이 있는 지역에서 준정상 소염에 의해서 추가적인 화염구멍들이 발생됨을 볼 수 있다. 시간이 전개됨에 따라 화염선단이 전파와 후퇴를 임의적으로 반복함으로써 평균적인 부상높이에 안정화 되고 있으며, 후류지역에서는 화염구멍의 경계가 전파 또는 후퇴가 됨으로써 구멍이 확장이 되어서 커지거나 축소가 되어 때로는 소멸되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서, 난류 화염의 통계적 확률은 층류화염편의 소화 특성뿐만 아니라 화염구멍에서 관찰할 수 있는 선단부분의 전파 특성들에 의해서도 큰 영향을 받을 수 있다.

선단화염의 전파특성이 난류 소화에 주는 영향을 확인하기 위해서, 무한한 선단화염의 응답특

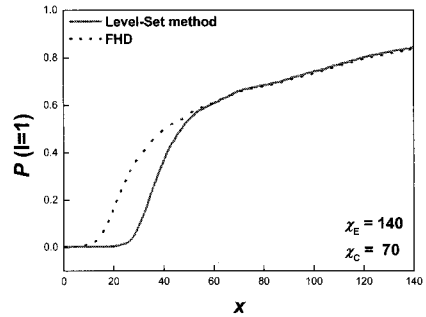


Figure 7 Variations of the partial burning ratio with the downstream distance x for Level-Set method and previous Flame Hole Dynamics model

성을 내재하고 있는 기존 FHD 모델을 적용한 결과와 Fig. 6의 결과에 대한 국부 소화 확률들을 비교해보았다. Fig. 7은 주유동 방향 x 에 따라 Level-Set 방법이 도입된 FHD 모사와 기존 FHD 모사 결과들에 대한 연소 확률이 변화되는 것을 도시한 것이다. 국부 연소확률은 주어진 x 위치에서 전체 샘플링 횟수에 대한 연소가 되는 상태($G(x, z) > 0$) 횟수의 비로 정의한다. Level-Set에 대한 시간적분과 화염편에 대한 Mapping의 전체 횟수는 6000번이고 z -방향으로의 그리드수는 128개이므로, 전체 샘플링 횟수는 10^6 번에 가깝다.

기존 FHD 모델과 수정된 FHD 모델의 국부 연소 확률들은 선단화염들의 불규칙적인 운동들에 의해 각각의 특정 높이들을 기점으로 “0”의 값에서 점진적으로 증가됨을 확인할 수 있으며, $x = 60$ 이후로는 동일한 확률분포를 보여준다. 하지만 $15 < x < 60$ 사이의 영역에서는 기존 FHD 모델의 연소 확률이 수정된 FHD 모델보다 상당히 높음을 볼 수 있으며, 이는 평균적인 부상높이가 수정된 FHD 모델에서 높다는 것을 의미한다. 즉, 기존의 FHD에서는 화염면 점멸이 천이 스칼라 소산율 근처에서 가장 급격히 발생하게 된다. 그러나 여기에 화염선단의 전파속도를 추가할 경우, 천이 스칼라 소산율 근처에서는 화염선단의 전파속도가 “0”에 가까운 반면, 주유동의 속도는 아직도 후류방향을 향하고 있으므로, 화염의 선단은 평균적으로 후류로 이동하게 되며, 결과적으로 개선된 FHD에서는 화염의 부상높이가 더 크게 예측된다.

부분소화 난류화염을 모델링하는 과정에서는 부상높이보다도 국부적인 화염편의 연소상태에 대한 통계적 정보가 더욱 필요하다. 국부적인 화염편들이 연소나 소화 상태로 결정되는데 가장 큰 영향을 주는 인자는 스칼라 소산율이며, 따라

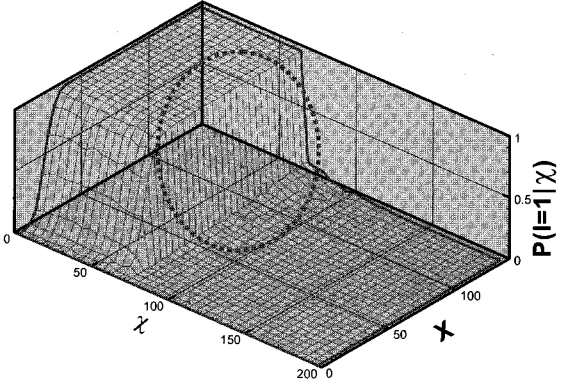
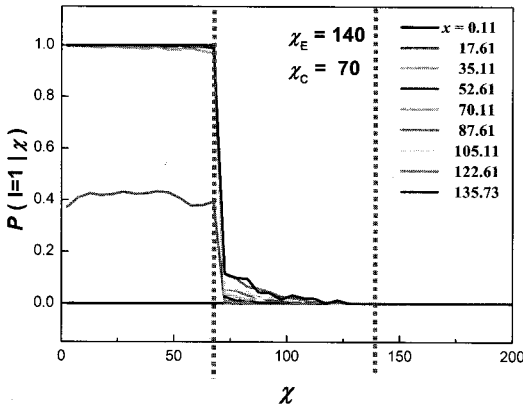


Figure 8 The partial burning probability conditioned with respect to the instantaneous scalar dissipation rate using the previous Flame Hole Dynamics model; (a) conditional probability at selected values of x and (b) three dimensional plot of the conditional probability

서 스칼라 소산율에 따른 조건부 연소확률을 살펴보았다. 기존 모델과 수정된 모델에 대한 각각의 조건부 연소확률을 Fig. 8과 9에 도시하였다. 정해진 x 위치에서 특정한 스칼라 소산율의 구간 $\chi \sim \chi + \Delta\chi$ 에 대한 조건부 연소확률 $P(I=1, x|\chi)$ 은 전체 샘플링 횟수 중 국부 스칼라 소산율이 $\chi \sim \chi + \Delta\chi$ 구간에 해당되는 횟수 중 연소 상태($G(x, z) > 0$)가 되는 횟수의 비이다. 따라서, 연소확률과 스칼라 소산율에 대한 조건부 연소확률 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$P(I = 1, x) = \int_0^{\infty} P(I = 1, x|\chi)P(x, \chi)d\chi \quad (6)$$

여기서 $P(x, \chi)$ 는 주어진 위치 x 에서 스칼라 소산율의 확률밀도함수이다. 따라서, 첫 번째 적분항은 Flame Hole Dynamics 모델에 의해 주로 영향을 받는 항이며, 두 번째 적분항은 난류 유동특성에 의해서 지배되는 항으로 해석될 수 있다.

조건부 연소확률을 살펴보기에 앞서, 조건부 연소확률의 기본특성을 먼저 파악해보자. 순간적인 국부 스칼라 소산율이 χ_E 보다 크게 되면 무조건적으로 화염편이 소화되어 조건부 연소확률이 “0”이 될 것이며, χ_I 보다 작게 되면 무조건적으로 점화가 되어 확률은 “1”을 나타낼 것이다. 하지만, 본 연구에서는 앞서 논한 바와 같이 $\chi_I = 0$ 로 설정하여 점화조건은 제외시켰다는데 유의해야 된다. 혼합층에서 후류 쪽으로 이동할 지라도 국부 스칼라 소산율은 작은 값이긴 하나 언제나 양수이기 때문에 재점화 현상은 사실상

제외된다. 한편 $\chi_I < \chi < \chi_E$ 의 영역에서는 스칼라 소산율의 증가에 따라서 조건부 연소확률이 단조적으로 감소하게 된다.

기존 FHD 모델에 대한 조건부 연소확률을 Fig. 7에서 살펴보면, 천이 스칼라 소산율 $\chi_C = 70$ 에서 급격하게 천이되며 그 이상에서는 연소될 확률이 거의 없음을 볼 수 있다. 이러한 사실로부터 화염구멍, 즉, 화염의 국부적인 소화상태는 층류화염편의 소화조건보다는 선단화염의 전파 또는 후퇴에 의해 지배받는 것을 알 수 있다. 하지만, Fig. 8에 나타난 $\chi_C = 70$ 을 기준으로 조건부 연소확률이 급격히 천이되는 현상은 다소 비현실적이다. 기존 FHD에서는 선단화염이 FHD mapping 조건에 의해 인접 격자로 전파해서 연소상태 인덱스를 $I=1$ 로 설정함으로써 국부 스칼라 소산율에 즉각적으로 반응되도록 가정되었다. 하지만, 실제로는 Eq. 4와 같이 스칼라 소산율에 따라 선단화염의 응답특성은 달라진다. 작은 스칼라 소산율에서는 응답특성이 미연가스의 방향으로 빨라지지만, $\chi_C = 70$ 에 근접할수록 응답속도는 0이 되고, 그 이상이 되면 기연가스방향으로 응답이 점차 빨라진다. 따라서 적절한 선단화염의 응답특성을 고려한 조건부 연소확률은 $\chi_C = 70$ 에서의 천이가 점진적인 형태를 가질 것이다.

Level-Set 방법을 적용하여 적절한 선단화염의 응답특성이 고려된 FHD 모델에 대해 조건부 연소확률이 Fig. 9에 도시되었다. 전체적인 특성들은 기존 FHD 모델 결과(Fig. 8)와 비슷하지만, 크게 두 가지의 특징적인 차이를 보이고 있다. 먼저 Fig. 8에서는 조건부 연소확률이 $x=0$ 에서부터 증가하여 $x=50$ 부근에서 평형상태를 보이

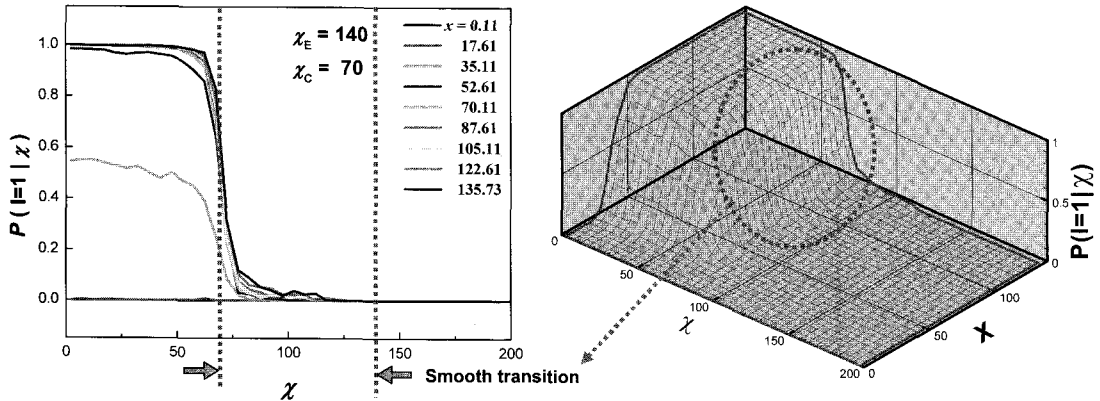


Figure 9 The partial burning probability conditioned with respect to the instantaneous scalar dissipation rate using the Flame Hole Dynamics model with Level-Set Method; (a) conditional probability at selected values of x and (b) three dimensional plot of the conditional probability

지만, Fig. 9에서는 $x = 30$ 에서부터 조건부 연소 확률이 증가를 시작해서 $x = 60$ 부근에서 포화상태에 도달하게 된다. 또한 천이 스칼라 소산율을 전후한 조건부 연소확률의 분포도 Fig. 9에서는 점진적으로 변화하는 함수의 형태를 보여주고 있다. 즉, $\chi_C = 70$ 보다 약간 작은 구간은 선단화염의 느린 전파반응에 의해서 연소확률이 작아지고, 큰 구역은 연소확률이 높아지는 점진적인 천이의 형태를 지니는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 Eq. 6의 전체적인 연소확률 $P(I=1, x)$ 는 $\chi_C = 70$ 을 기준으로 조건부 연소확률이 상쇄될 수 있기 때문에 크게 변화되지 않을 것이다. 이는 Fig. 7에서 두 결과를 비교한 바와 같이 상류부분을 제외하고는 $x > 60$ 에서 두 연소확률들이 거의 동일한 변화를 보여준다는 사실에서 확인할 수 있다.

조건부 연소확률은 상류와 하류에서 각기 다른 특성들을 나타내고 있다. 상류지역에서의 조건부 연소확률은 천이 스칼라 소산율보다 작은 영역임에도 불구하고 상류로 갈수록 굉장히 작은 값을 나타낸다. 이는 상류부분에서는 소염된 화염편들이 대부분이기 때문에 천이 스칼라 소산율보다 큰 조건의 화염편 격자들조차도 거의 대부분이 소염된 화염편에 인접되어있어서, 인접하는 대부분의 $\chi_C < \chi < \chi_E$ 조건들에 의해서 화염선단이 재빨리 연소상태의 화염편으로 후퇴해버릴 수 있기 때문이다. 반일, 연소가 될 조건의 화염편이 소염되는 조건의 화염편으로 완전히 둘러싸여 있다면 외부로부터 선단화염의 전파가 될 경로가 차단이 되어서 이 경우 또한 연소가 되지 않을 것이다. 반면, 후류지역에서는 $\chi < \chi_C$ 의 경우에 연소확률이 거의 "1"을 나타낸다. 상류지역과 달

리 낮은 스칼라 소산율들이 대부분을 차지하기 때문에 연소상태의 화염편이 대부분이며, 따라서 $\chi < \chi_C$ 조건의 화염편은 연소상태의 화염편에 대부분 둘러싸여져 화염전파에 의해 연소상태가 될 확률이 높아지는 것이다. 또한, $\chi_C < \chi < \chi_E$ 조건들의 화염편들도 인접한 연소상태의 선단화염들의 느린 전파응답특성으로 인해 "0"가 아닌 연소확률을 보여주고 있다.

Figure 9처럼 후류로 감에 따라 조건부 스칼라 소산율의 스케일이 변화되는 특성을 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있을 것이다.

$$P(I=1, x|\chi) = A(x)F(\chi_C - \chi) \quad (7)$$

여기서, $F(\chi_C - \chi)$ 는 Fig. 9의 후류부분의 형태와 같이 1에서부터 0까지 $\chi = \chi_C$ 를 기준으로 점진적으로 변화하는 형태를 hyper-tangent 함수로 가정된 함수로서 다음과 같이 표시할 수 있을 것이다.

$$F(\chi_C - \chi) \cong \frac{2}{\pi} \{1 + \tanh^{-1}[\sigma(\chi_C - \chi)]\} \quad (8)$$

여기서, σ 는 천이 스칼라에서 조건부 연소확률이 점진적으로 천이되는 정도를 조절하는 파라미터이며, 선단화염의 전파에 의해 점진적인 천이가 발생되므로 전파속도 S_L^0 와 관련되는 값일 것이다. $A(x)$ 함수는 $x = 0$ 일 때는 "0"이며 x 가 증가할수록 "1"에 접근하는 형태의 함수가 된다.

여기서 주지할 사실은 후류영역에서는 난류 연소확률이 난류조건 $P(x, \chi)$ 에 다소 관계없이 일

정한 함수형태 $F(\chi_C - \chi)$ 로 표현될 수 있다는 사실이다. 만일 $A(x)$ 함수의 특성이 향후 계속적인 연구를 통하여 파악이 되고, 조건부 연소확률분포 $P(I=1, x|X)$ 를 다양한 유동 조건에 적용할 수 있다면, 난류 연소에 대한 수치모사에 대해 상당히 간략화를 할 수 있을 것이며, 이에 따른 계산 효율도 굉장히 향상될 것이다.

4. 결론

난류 연소 현상에서 일어나는 화염 부상이나 화염 날림현상을 예측하기위해서, Flame Hole Dynamics (FHD)를 적용하여 거시적인 난류 소화 과정을 모사하고 이 모델에 대한 적용가능성을 살펴보았다. FHD 모델의 중심은 반응과 소염을 오가는 화염구멍의 선단화염에 대한 동적특성을 모사하는 것이다. 이 동적특성을 기반으로 하여 DNS 수행으로 얻어진 배경난류상에 대해 Random Walk Mapping을 수행함으로써 난류의 소화과정을 모사하는 것이다. 기존의 FHD 모델을 이용한 연구에서는 Mapping의 특성상 선단화염의 전파속도가 무한히 빠른 응답특성으로 인해, 선단화염의 전파속도 특성을 반영할 수 없었다. 이번 연구에서는 다양한 선단화염 전파속도를 적용할 수 있도록 기존 FHD Mapping에 화염면 전파를 모사할 수 있는 Level-Set 방법을 도입하였다.

먼저 Level-Set 모사에 적용되는 전파속도에 대해 일정한 전파속도로 가정한 경우와 스칼라 소산율에 변화하는 전파속도 함수로 가정한 경우에 대한 난류 소화과정 모사 결과들을 비교 해보았다. 이로부터 난류 부상화염이 안정화되기 위해 필요한 조건들에 대해 제시할 수 있었다.

선단화염의 전파속도에 대해 천이스칼라 소산율을 기준으로 전파방향이 바뀌는 형태의 연속함수로 적절히 가정하여 연료/산화제에 대한 난류혼합층의 가상화염면상에 FHD 수치모사를 해보았다. 주유동 방향에 따른 가상화염면상의 연소확률 변화를 기존 FHD 결과와 비교하였는데, 후류부분에서는 거의 차이가 없으나 상류부분에서는 연소확률의 차이가 발생하는 것으로 보아 난류부상화염의 선단에서는 선단화염의 전파가 대부분임을 알 수 있었다. 또한, 스칼라 소산율에 따른 조건부 연소확률을 확인하였는데, 기존 FHD의 결과와 유사하게 천이스칼라 소산율을 기준으로 천이가 일어남을 볼 수 있었으며, 이로부터 난류화염의 소염을 지배하는 메커니즘은 층류화염편의 소화현상보다는 선단화염의 전파특성을 알 수 있었다. 차이점으로는 유한한 선단화염의 응답특성으로 인해 기존의 모델보다는 연소확률의 천이가 더 점진적인 형태로 발생된다는

것이다. 더욱이, 조건부 연소확률의 스칼라 소산율에 대한 변화는 천이 스칼라 소산율을 기점으로 하는 특성함수로 나타낼 수 있어서 난류연소에 대한 수치모사를 간략화 할 수 있는 가능성을 제시할 수 있었다.

현재 꾸준히 FHD 모델을 이용하여 난류 소화 과정을 모사하려는 시도가 계속되고 있지만, 많은 가정과 간략화가 적용되어 있다. 향후 연구에서 고려되어야 할 개선점들은 다음과 같다. 먼저 $y=0$ 평면에 고정되어 있는 평면적 화염면이 아닌, 3차원적으로 난류에 의해 굴곡진 화염면을 시간 순간마다 추적하여 FHD 모사를 수행할 예정이며, 또한 연소시 발생하는 열에 의한 밀도변화와 온도변화에 따른 난류특성 값과 전파특성 값의 변화를 고려할 것이다. 따라서, 이와 같이 추가적으로 모델을 점차 개선해나간다면, FHD 모델은 화염소 가정이 적용될 수 있는 현상영역 내에서는 물리적인 기술이 타당하기 때문에, 화염안정화 지역의 난류화염의 특성 및 화염부상높이들을 경험적 모델을 사용하지 않고 예측할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

후 기

이 연구(논문)은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구의 수치계산은 한국과학기술정보연구원의 '제5차 슈퍼컴퓨팅 응용연구 전략지원 프로그램'의 IBM690+ 머신에서 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Lee, S. R., Na Y. and Kim J. S, "Application of the Flame Hole Dynamics to a Diffusion Flame in Channel Flow," *KSME Int. J.* Vol. 17, 2003.
- [2] 김준홍, 정석호, 안국영, 김종수, "난류 혼합층에서 확산화염에 대한 flame hole dynamics 모델," 한국연소학회지 제8권 제3호 pp. 15-23, 2003.
- [3] Hartley, L. J., "The Structure of Laminar Triple-Flames: Implication for Turbulent Non-Premixed Combustion," Ph.D. Thesis, UMIST., 1991.
- [4] Sethian, J. A., "Level set methods," Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [5] Sussman M, Smereka P and Osher S, "A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow," *J. Comput.*

Phys. Vol. 114, pp.146-59, 1994.

[6] V Smiljanovskiy, V Mosery and R Kleinz, "A capturing-tracking hybrid scheme for deflagration discontinuities," *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 1, pp. 183-215, 1997.

[7] 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.

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