

# Level-Set 방법이 적용된 Flame Hole Dynamics 모델을 통한 난류 혼합층 확산화염 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 turbulent diffusion flames in a turbulent mixing layer is investigated by the method of flame hole dynamics to develop a prediction model for the turbulent lift off. The present study is specifically aimed to remedy the problem of the stiff transition of the conditioned partial burning probability across the crossover condition by adopting level-set method which describes propagating or retreating flame front with specified propagation speed. In light of the level-set simulations with two model problems for the propagation speed, the stabilizing conditions for a turbulent lifted flame are suggested. The flame hole dynamics combined with 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. 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 in contrast to the stiff transition of resulted from the flame-hole random walk mapping and could be 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. 서론

실용적 연소기에서 많이 응용되는 화염의 형태로는 난류 제트 확산화염으로서, 노즐 부착 화염의 경우는 화염의 열전달에 의해 노즐이 열화 되기 때문에, 화염을 노즐로부터 부상을 시킴으로써 노즐의 열화를 방지할 수 있다. 최근 이산화탄소 저감을 위해 사용되는 순산소 연소기에서는

순산소 연소의 고온 특성으로 인해 심각해지는 연소기의 열화방지를 위해서 난류 부상화염의 안정화가 필수적인 기술로 요구되고 있다. 따라서, 난류 부상화염의 안정화 특성을 파악하고 예측하기 위해서는 물리적으로 타당한 난류확산화염 모델이 필요하다.

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 난류유동

\* 정회원, 서울대학교 정밀기계설계공공연구소

\*\* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

\*\*\* 정회원, 한국기계연구원, 환경기계기술연구부

† 정회원, 연락처, 한국과학기술연구원 대기자원 연구센터, E-mail : kimjs@kist.re.kr

의 임의 교란들에 의해 각각의 층류 화염면들이 연소 및 소염상태의 Random Walk Process를 따르기 때문에, 난류화염의 거시적 소화는 층류 화염 소화보다 점진적으로 일어난다고 생각할 수 있으며, 따라서 난류 소화는 Random Walk Process의 통계적 특성에 의해 제어된 것이다[1, 2].

거시적 난류화염 소화를 정확히 예측하기 위해서는, 결론적으로 이러한 반응과 비 반응 상태 사이를 불규칙하게 이동하는 Random Walk를 모사하는 정확한 물리적 모델 수립이 필요하게 된다. 이에 대한 모델로서 1991년 Dold와 Hartley는 Flame Hole Dynamics 모델을 제안하였는데[3], 이 모델의 개념은 다음과 같다. 층류 화염면의 국부적인 난류유동에 의해 생성된 화염 구멍은 미연가스와 기연가스에 의해 구분될 수 있는 화염 선단(Flame Edge)이 미연가스로 진전되거나 후퇴됨에 따라 축소 또는 확장이 될 수 있다. 만일 주어진 3차원 배경 난류유동장에 대해서, 이러한 Flame Hole Dynamics 모델에 따르는 화염구멍들의 임의 거동 과정을 통계적으로 모사한다면, 난류화염의 국부 소화확률을 예측할 수 있을 것이다. 특히, Flame Hole Dynamics의 기반이 선단 화염(Edge Flame)의 거동 특성에 바탕을 두었기 때문에 난류부상화염 예측도 가능할 것이다.

이러한 화염선단이론을 적용하여 난류화염의 소화과정에 대한 모사를 시도한 연구는 Dold와 Hartley의 초기연구를[3] 시작으로 Kim 등이 보여준 간단한 2차원 난류유동에 존재하는 1차원 난류화염선의 소화과정을 모사하였으며[1]. 최근에는 좀 더 현실적인 난류화염의 소화모사를 시도하기 위해서 혼합층 난류유동에 대한 3차원 직접 수치모사를 통해서 사실적 배경 난류장을 확보하였으며, 이에 대해 Flame Hole Dynamics 모델을 적용하여 난류화염의 소화과정에 대한 통계적 특성을 살펴보았다[2]. 하지만, 이러한 연구들은 Flame Hole Dynamics 모델의 Random Walk Mapping 특성으로 인해 화염구멍들에 존재하는 화염선단(Flame Edge)의 응답속도가 국부유동조건, 즉 스칼라 소산율에 무관하게 무한히 빠르다는 특성을 갖고 있다. 따라서 정확한 난류화염의 소화확률을 모사하기 위해서는, 스칼라 소산율에 변화하고 사실적인 유한한 전파속도를 가지는 선단화염의 특성을 모사할 수 있도록, 새로운 Flame Hole Dynamics 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 Flame Hole Dynamics 모델을 적용하여, 난류화염의 천이과정에 대한 통계적 특성과 부상특성이 기존 Flame Hole Dynamics의 결과와 비교하여 어떻게 변화되고 개선되었는지 살펴보고자 한다. 본 논문은 첫 번째로 Flame Hole Dynamics의 기본적인 개념에 대해서 화염선단들의 사실적인 속도의 전파 과정을 모사할 수 있도록 Level-Set 방법을 소개하고, 이 방법을 난류 혼합층 DNS의 배경 난류장에 대해서 다양한 선단화염의 전파속도 모델을 적용한 난류 소화과정 결과들을 살펴봄으로써 난류 부상화염의 안정화 현상에 대해 고찰해보고자 하였다. 그리고, 새로운 모델을 적용한 난류 소화 모사 결과에 대해 통계적인 분석을 통하여 기존 Flame Hole Dynamics 모델과 비교하고, 마지막으로 향후 사실적인 소염 현상을 모사하기 위한 연구의 개선 방향에 대해 논의될 것이다.

## 2. 수정된 Flame Hole Dynamics 모델

Flame Hole Dynamics를 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 스칼라소산률의 수열을 시간간격마다 추출해낸다. 일단 스칼라소산률이 얻어지면, Flame Hole Random Walk Mapping을 적용하여 가상 화염면들에서 점멸상태가 시간적으로 전개되는 현상을 관찰할 수 있으며, 이로부터 난류화염의 소화에 대한 통계적 특성을 분석할 수 있다. 본 장에서는 기존의 Random Walk Mapping의 한계점과 이를 개선하기 위한 새로운 Mapping 방법에 대해 논의하기로 한다.

### 2.1. Flame Hole Dynamics 모델의 한계

화염의 특성을 결정짓는 Damköhler 수의 역수인 스칼라 소산율은 다음과 같이 크게 3가지로 나눈다. 화염의 준정상 소염이 발생하는 조건인 소화 스칼라 소산율( $x_E$ ), 화염과 소염지역의 경계면(화염선단)의 전파방향의 천이가 발생하는 조건인 천이 스칼라 소산율( $x_C$ ), 그리고 소염된 화염이 다시 점화되는 조건인 점화 스칼라 소산율( $x_I$ )들로 나눌 수 있는데, 연료와 산화제의 Lewis 수가 1에 너무 멀지 않은 일반적인 연소조건에서는  $x_E > x_C \gg x_I$ 의 관계를 가지고 있다. 만일 화염면의 격자 구획마다 연소상태나 소화상태의 두 가지 경우로 구분 짓는다면, 그 구획의 스칼라 소산율이 3가지 특성 스칼라 소산율보다 크고 작음에 따라서 소염과 재점화가 결정될 수 있을 것

이다. 이러한 연소상태를 결정짓는 Flame Hole Dynamics Mapping의 개념은 Ref.[2]에 자세히 소개되었다.

기존의 Flame Hole Dynamics Mapping은 시행이 될 때마다 격자점마다 주어진 스칼라 소산률로부터 소염과 재점화가 바로 결정된다. 그러므로 화염면의 스칼라 소산률에 대한 화염선단의 응답특성이 무한히 빠르다는 것과, 국부 유동 조건과는 무관하게 Flame Hole의 화염선단의 전파 또는 후퇴속도  $S_r$ 가 일정하다는 가정이 포함되게 된다. 그러나, 실제 화염선단의 전파속도특성은 주어진 스칼라 소산률이 천이 스칼라 소산률에 가까울수록 전진/후퇴하는 속도가 "0"에 근접하게 되므로, 화염선단의 난류유동에 대한 응답속도는 매우 느려질 것이다. 또한,  $S_r$ 가 일정하다고 가정하므로 연료와 농도 조건에 대한 응답도 변화되지 않기 때문에 정확한 난류의 소염 특성의 예측도 어려울 것이다.

Flame Hole의 거동은 기존 Flame Hole Dynamics Mapping에서 개념적으로 기술된 바와 같이 두 가지의 화염 특성을 지니고 있다. 첫째로는 전체적으로 연소와 소염이 되어있는 준정상 화염의 영역은 소염 스칼라 소산률과 점화 스칼라 소산률에 의해 점멸이 결정되는 층류 확산화염편의 성질을 띄고 있으며, 둘째로는 연소와 소염의 경계가 되는 선단화염의 구역에서는 화염이 천이 스칼라 소산률을 기준으로 비정상적으로 거동이 되기 때문에 예혼합 화염처럼 전파되는 특성을 가지고 있다. 따라서 층류 화염편 모델과 유사한 준정상적인 기존 Flame Hole Dynamics Mapping 방법은 무한히 빠른 화염응답만을 모사할 수 있기 때문에, 화염 선단의 비정상적 전파 특성에 대한 모사를 위해서는 다른 방법이 도입되어야 한다. 본 연구에서는 전파되는 화염면을 추적하는 방법 중에서 방법론적으로 간단하고 계산 효율도 좋은 Level-Set 방법을 이용하고자 한다.[4]

## 2.2. Level-Set 방법을 적용한 Flame Hole Dynamics 모사

Flame Hole Dynamics 모델은 기존의 층류화염편 모델에 따른 화염점멸의 Mapping을 기반으로 하여, 천이 스칼라 소산률에 따라 화염경계면이 전파 또는 후퇴되는 상태를 결정하는 Mapping을 추가한 것으로 볼 수 있다. 따라서 유한한 전파속도가 고려되는 새로운 Flame Hole Dynamics 모델은 층류화염편의 소화 및 점화에 대한 Mapping과 Level-Set 방법을 사용한 화염경계면의 전파 모사로 이루어져 있으며, 이에 대한 요약은 Table 1에 주어져 있다.

스칼라소산률 ( $x$ )	연소상태	방법
$x < x_i$	점화	$G(x,y) > 0$ 로 강제 설정
$x > x_E$	소염	$G(x,y) < 0$ 로 강제 설정
$x_i < x < x_E$	화염면 전파에 의해 결정	Level-Set equation의 시간적분

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

먼저 소염인 영역은 Level  $G(x,y)$ 의 값이 음수, 화염이 존재하는 영역은 양수로 정의한다. 그러면 화염경계면, 즉 화염 선단의  $G(x,y)$ 값은 자연히  $G(x,y) = 0$  이 되게 되고, 이 Level-Set  $G(x,y) = 0$ 를 따르는 화염경계면들이 난류 확산화염의 소염구역과 화염구역을 구별 짓는다. 먼저  $t = t_0$  일 때의 배경 난류장으로 추출한 스칼라 소산률로부터 점화 및 소염 스칼라 소산률과 비교하여 Table 1에 따라 각 격자의  $G(x,y)$  값을 재설정한다. 그 후  $t = t_0 + \Delta t$  까지  $G(x,y)$ 에 대해서 Level-Set 식을 시간 적분하여 화염면의 전파를 모사하도록 한다. 여기서, Level-Set 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial G}{\partial t} + u \frac{\partial G}{\partial x} + w \frac{\partial G}{\partial z} = S_r(x) \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1)$$

$u, w$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 방향의 속도성분으로서 배경 난류장의 데이터 값을 도입하고,  $S_r(x)$ 는 화염선단의 전파속도로서 스칼라 소산률에 대한 함수로 표시할 수 있다. Eq. (1)의 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  $G(x,y)$  값을 재설정하게 되는데, 재설정 후에는 화염면 전체의 Level-Set 들에 대해서 규준화된 거리의 함수로서  $|\nabla G(x,y)| = 1$  를 만족하도록 다음과 같은 식을 시행한다[5, 6].

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

$G(x,y)$ 가 정상상태로 수렴할 때까지 ( $G_r = 0$ ), Eq. 2를 설정된 정확도까지 반복 수렴시킨다. 여기서,  $G^{**}$ 는 이전 시간단계에서 Eq. 1에 의해 최종적으로 계산된 Level-Set 들이며, 함수  $S(G^{**})$ 는

$G = G_0$  Level-Set을 기준으로 하여 미연가스 쪽 인지 기연가스 쪽인지를 나타내는 부호로서 다음과 같이 표시된다.

$$S(G^{xx}) = (G^{xx} - G_0) / (\sqrt{G^{xx} - G_0} + \epsilon) \quad (3)$$

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

### 3. 연료/공기 혼합층에서 Flame Hole Dynamics 수치모사

본 장에서는 앞의 Level-Set 방법을 통해 유한한 화염전파속도를 모사할 수 있는 Flame Hole Dynamics 모델을 이용하여, 연료/공기의 난류 혼합층에서 발생할 수 있는 난류 확산 화염의 소화과정을 살펴보기로 한다. 연료/공기의 난류 혼합층에 대한 배경난류장의 DNS 수치해석과 스킨라 소산률의 계산과 같은 방법론은 모두 Ref. 2에 자세히 소개하였다. 기존의 연구와 동일하게 가상 화염의 위치가 혼합층의 분리판(Split Plate)에서 하류쪽으로 연장된 면과 일치한다고 가정한다. 화염면은 당량혼합분율면(Stoichiometric Mixture Fraction Surface)에 위치하고 있기 때문에 난류에 의해서 위치가 항상 변화하고 있다. 하지만, 가상화염면에서도 스킨라 소산률이 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.

먼저 선단화염의 전파속도에 대한 대표적인 모델들을 적용하여 나타난 결과들을 살펴보고 이를 통해 난류 부상화염을 안정화시키기 위한 특성들을 알아본다. 화염 구멍에서 발생하는 선단화염(Edge Flame)의 전파속도는 천이 스킨라 소산률을 기준으로 전파의 방향이 바뀌는, 즉 전파속도의 부호가 바뀔 것이라는 개념을 기반으로, 전파속도를 스킨라 소산률에 대한 함수로 모델링을 할 수 있다. 따라서 이 전파속도 모델링을 적용한 난류 소화의 천이과정을 모사하였으며, 각 위치에 대한 난류 소화확률에 대한 통계적 분석과 기존 Flame Hole Dynamics 모델을 적용한 난류

소화의 수치모사 결과와 비교하였다.

#### 3.1. 난류 부상화염의 안정화

일반적으로 부상화염이 안정화되기 위해서는 다음과 같은 3가지 조건을 만족해야 한다.

1. 부상화염 선단의 Edge Flame의 전파속도  $S_e$ 와 그 위치의 국부 유동속도  $u_i$ 이 균형을 이루어야 한다. ( $S_e = u_i$ )
2. 1의 조건을 만족하는 위치에서 작은 섭동을 주었을 때 화염선단의 전파속도  $S_e$ 의 후류방향에 따른 변화율이 국부 유동속도  $u_i$ 의 변화율보다 커야 한다. (선형적 안정성:  $\partial S_e / \partial x > \partial u_i / \partial x$ )
3. 1과 2의 조건을 만족하더라도 난류 부상화염이나 화염면을 통과하면서 밀도변화가 급격함으로 인해 유동의 교란이 심하기 때문에 비선형적 안정화 조건도 필요하다. (비선형적 안정성:  $\partial S_e / \partial x - \partial u_i / \partial x > \epsilon$ )

난류 부상화염의 경우는 선단 화염들이 전파되다가 국부적으로 강한 에디를 만나면서 소염이 되고, 또다시 회복하는 Random Walk를 따르게 될 것이므로 3번째 조건인 비선형적 안정성을 따질 때는 각각  $S_e$ 와  $u_i$ 의 평균값들에 대한 후류방향에 따른 변화율을 도입할 수 있을 것이다.

이러한 안정화 조건들이 난류 부상화염에 적용이 될 수 있는지 알아보기 위해, 먼저 선단화염의 전파속도가 일정한 경우에 연료/산화제 혼합층에서 Flame Hole Dynamics를 통한 난류화염 소화 수치모사 결과를 살펴보자. Figure 1은 가상화염면( $y=0$  평면)에 위치한 유동속도와 스킨라 소산률에 대해  $z=0$ 에서의 시간평균,  $z$ -방향(Span-wise)평균, 그리고 시간과  $z$ -방향에 대한 평균으로 한 각각의 값을 주유동 방향( $x$ -방향)에 따라 도시한 것이다. 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 스킨라 소산률의 분포가 거의 동일한 거동들을 나타내는 것으로 보아,  $z$ -방향으로의 난류유동은 등방성을 띤다고 볼 수 있다. 그리고 시간에 따른 난류의 거동은 충분히 Random Walk를 따르기 때문에, 앞으로 이 혼합층에서의 주유동 방향에 따른 국부유동 및 스킨라 소산률, 그리고 이에 따른 전파속도는 모두 시간 및  $z$ -방향 평균값을 기준으로 분석하기로 한다. 주유동 방향에 따른 국부유동 속도는  $x=0$  지점에서부터 속도가 "0"에서 점차 증가하

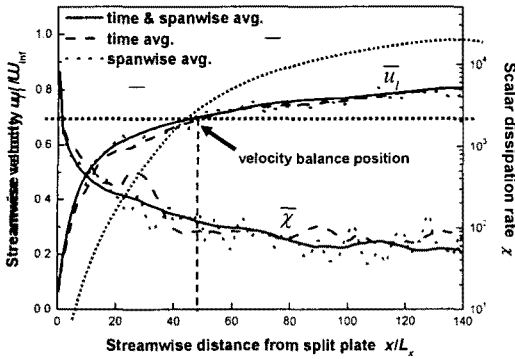


Figure 1 Mean profiles of streamwise velocity and scalar dissipation rate along the streamwise direction

여 정상상태의 값으로 변화된다. 이는 가상화염면이 분리판( $y=0$ )에서부터 주유동 방향으로 확장시킨 평면이기 때문에, 분리판 위치에서 속도의 접촉조건(no-slip condition)으로 인해 주유동 속도가 “0”에서 후류로 갈수록 난류유동에 의한 운동량이 유입되어 증가되는 것이다. 반면, 스칼라 소산률은 분리판에서 최대값을 나타내다가 후류로 갈수록 난류의 혼합과정으로 인해서 급격히 감소되는 경향을 보인다.

만일 Fig. 1a와 같이 화염 구멍에서 발생하는 화염전파속도를 스칼라 소산률에 상관없이 항상 일정한  $S_L/U_\infty = 0.70$ 으로 가정한다면,  $x=50$  근처의 위치에서  $S_L$ 와  $\tilde{u}_i$ 은 균형을 이룰 수 있다. 하지만, 평균유동속도의 변화량  $\partial \tilde{u}_i / \partial x$ 이 화염전파속도의 변화량  $\partial \tilde{S}_L / \partial x$ 보다 크므로 난류유동에 의한 섭동에 의해 안정화가 되기 어려울 것이다. 이를 확인하기 위해 Level-Set 방법을 이용하여 화염면의 전파과정을 Fig. 2에서처럼 두 가지 경우에 대해 모사하였다. 전파과정 모사의 초기조건은 속도 균형이 이루는  $x=50$ 의 위치보다 앞인  $x=30$  위치를 기점으로 상류 쪽에는 소화상태(검은색,  $G(x, y) < 0$ ), 하류쪽에는 연소상태(회색,  $G(x, y) > 0$ )로 설정하여 시작하고, 또 하나는 균형위치보다 뒤쪽인  $x=100$ 에 평면화염전단을 설정하여 모사한다. Fig. 2a의 경우는 화염이 안정화 되지 못하고 분리판까지 전파됨을 볼 수 있는데, Fig. 1a에서처럼 속도의 균형위치( $x=50$ )보다 앞에 있는 화염면은  $\tilde{S}_L$ 가  $\tilde{u}_i$ 보다 빠르기 때문에 계속 앞으로 전파하게 된다. Fig. 2b의 경우도 역시 같은 이유에 의해서 화염면이 국부유동속도에 의해 점차 밀려서 화염 날림이 일어남을 확인할 수 있다.

그러나, 실제현상에서는 앞서 언급했듯이 화염

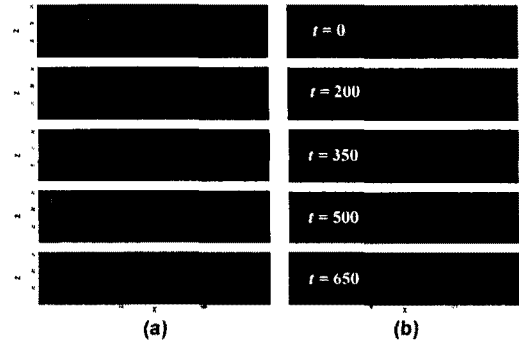


Figure 2 Level-Set evolution of flame front in the virtual flame surface for constant speed of edge flame; initial positions of the flame front are at (a)  $x=30$  and (b)  $x=100$ .

경계면의 화염전파속도가 낮은 스칼라 소산률을 경험하는 경우에는 미연가스 쪽으로 전파하고, 스칼라 소산률이 천이 스칼라 소산률  $\chi_c$ 에 가까워지게 되면서 전파속도는 “0”에 근접하게 되며,  $\chi_c$ 보다 큰 경우는 미연가스에서 화염 쪽으로 후퇴하는 음의 화염전파속도를 가질 것이다. Daou & Linan[7]과 Pantano & Pullin[8]은 화염전단에 대한 이론적 해석연구에서 화염전파속도를 앞의 개념을 바탕으로 다음과 같은 식으로 모델링을 하였다.

$$\frac{S_L}{S_L^*} = 1 - \frac{1 + 1/(\sqrt{\chi/\chi_c} - 1)}{1 + 1/(\sqrt{\chi_c/\chi} - 1)} \quad (4)$$

여기서,  $S_L^*$ 는 층류화염 전파속도이다.  $S_L$ 와 스칼라 소산률  $\chi$ 와의 관계를 Fig. 3에 도시하였다. 특기할 사항은  $\chi = \chi_c$ 을 기준으로 부호가 바뀌며,  $\chi$ 가 소염 조건  $\chi_c$ 에 접근할수록  $S_L$ 값이 수학적으로 음의 무한대로 접근하게 된다. 그러나 물리적으로는 선단화염이 후퇴하는 과정도 확산에 따른 열손실에 의한 것이므로, 후퇴속도도 확산 속도에 상응하는 크기를 가질 것이다. 본 연구에서는 Fig. 3에서 보듯이 속도의 최소하한속도(Cut-off speed)를 설정하고, 최대 후퇴전파속도를  $S_L^*$ 값의 2배로 가정한다. Fig. 2b의 계산에서는  $S_L^*/U_\infty = 3$ 으로 설정하며, 소화와 천이 스칼라 소산률은 각각  $\chi_c = 140$ 과  $\chi_c = 70$ 으로 설정한다.

가상 화염면에서 주유동 방향에 따른 스칼라 소산률은 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 분리판에 가까워질수록 급격히 증가하며, Fig. 3에서처럼

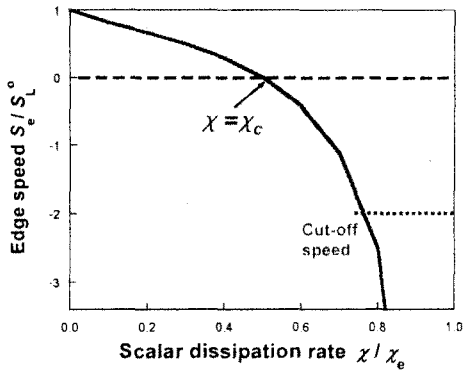


Figure 3 Modeling of edge flame speed in terms of scalar dissipation rate

전파속도는 스칼라 소산율이  $\chi_c$ 를 기준으로  $\chi_c$ 에 접근함에 따라 급격히 감소하는 함수의 형태를 가지고 있기 때문에, 이런 특성들을 바탕으로 가상 화염면 상의 각 위치  $x$ 에 대한 난류 선단 화염의 전파속도의 거동은 Fig. 1b와 같이 상류로 갈수록 급격히 감소하는 특성을 지닐 것이라고 예상할 수 있다. 만일 평균적인 선단화염 전파속도의 후류에 따른 변화가 국부화염 전파속도의 변화보다 큰 경우 ( $\partial S_e / \partial x > \partial \tilde{u}_i / \partial x$ ) 라면, 난류화염의 전파나 국부 유동의 섭동에 의해 평균적인 선단화염의 위치가 상류(하류)로 변화되더라도  $\tilde{u}_i$ 보다  $S_e$ 가 작아짐(커짐)으로 인해 균형을 이루는 위치로 복귀하여 안정화가 될 수 있을 것이다. 이를 확인하기 위해, Eq. 4를 적용한 Level-Set 모사를 시행하였다. 역시 초기 화염선단의 위치를  $x=30$ 와  $x=100$ 에서 각각 시행하였으며, 각 경우의 소화과정 결과들을 Fig. 4에 나타내었다. 국부적으로 강하고 약한 스칼라 소산율들이 인접하고 있기 때문에, Fig. 2와는 달리 앞으로 전파되는 선단화염과 후퇴하는 선단화염들에 의해 상당히 왜곡된 화염 선단들이 시간에 따라 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 주유동 방향에 따라 선단화염 전파속도의 변화가 평균속도의 변화율보다 큰 경우에 발생할 수 있으며, 이를 발생시키기 위해서는 주유동 방향에 대해 화염면을 따르는 스칼라 소산율의 변화나 농도의 난류 혼합물의 변화를 심화시키거나

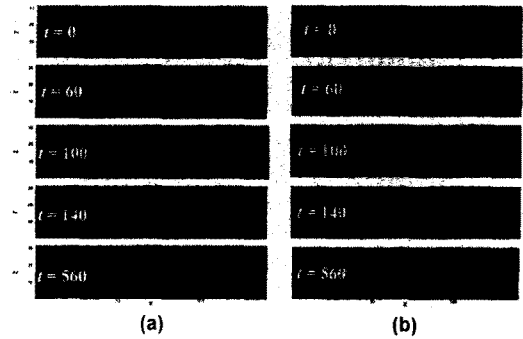


Figure 4 Level-Set evolution of flame front in the virtual flame surface for the modelled propagation speed of edge flame; initial positions of the flame front are at (a)  $x=30$  and (b)  $x=100$ .

평균유속의 변화율을 작게 하는 방법을 이용할 수 있을 것이다.

### 3.2. 수정된 Flame Hole Dynamics의 수치결과와 통계적 분석

화염편 소화 모델에 추가하여, 앞서 스칼라 소산율에 따른 선단화염의 전파속도 모델을 적용한 Level-Set 방법이 도입된 수정된 Flame Hole Dynamics의 수치모사의 결과를 살펴보도록 하고 기존의 Flame Hole Dynamics 수치모사와 비교해보도록 한다. 단, 화염편 모델을 적용하는 과정에서  $\chi < \chi_c$ 인 경우에 가상 화염면이 소멸상태에서 재점화가 되는 현상은 생략시키기로 한다. 일반적으로 점화 Damköhler수가 일반적으로 소화 Damköhler수보다 수백배에서 수천배에 이르므로, 재점화가 일어나기 위해서는 미연가스로 상당량의 열유입이 발생되지 않는 한 좀처럼 일어나지 않는다. 따라서 본 연구에서는 천이 스칼라 소산율과 소멸 스칼라 소산율은 특정값으로 설정하지만, 점화 스칼라 소산율은 "0"의 값으로 설정한다. 따라서, 상류 쪽에 발생하는 화염편 들은 모두 후류로부터 전파해오는 화염선단에 의한 것만으로 이루어진다.

Fig. 5는  $\chi_c = 140$ 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 초기조건인 평면적인 화염선단은 금방 임의적인 모양으로 변화하게 되고, Level-Set 식만을 고려한 Fig. 4의 결과와는 달리 후류 쪽의 화염면들은  $\chi_c$ 보다 큰 강한 국부 스칼라 소산율에

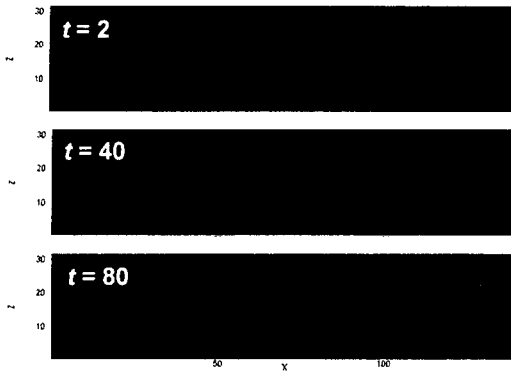


Figure 5 Zero Level-Set evolution of flame holes in the virtual flame surface with the modified Flame Hole Dynamics

의해 화염구멍들이 발생됨을 볼 수 있다. 시간이 전개됨에 따라 화염선단이 전파와 후퇴를 임의적으로 반복함으로써 평균적인 부상높이에 안정화되고 있으며, 후류의 화염구멍의 경계가 전파 또는 후퇴가 됨으로써 구멍이 확장이 되어서 커지거나 축소가 되어 때로는 소멸되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서, 난류화염의 통계적 확률은 층류 화염편의 소화 특성뿐만 아니라 화염구멍의 선단 부분의 전파 특성들에 의해서도 영향을 받을 수 있다.

선단화염의 전파특성이 난류 소화에 주는 영향을 확인하기 위해서, 무한한 선단화염의 응답특성을 내재하고 있는 기존 Flame Hole Dynamics 모델을 적용한 결과와 Fig. 5의 결과에 대한 국부 소화 확률들을 비교해보았다. Fig. 6은 주유동 방향  $x$ 에 따라 Level-Set 방법이 도입된 Flame Hole Dynamics 모사와 기존 Flame Hole Dynamics 모사 결과들에 대한 연소 확률이 변화되는 것을 도시한 것이다. 국부 연소확률은 주어진  $x$  위치에서 전체 샘플링 횟수에 대한 연소가 되는 상태( $G(x, y) > 0$ ) 횟수의 비로 정의한다. Level-Set에 대한 시간적분과 소화화염편에 대한 Mapping의 전체 횟수는 6000번이고  $z$ -방향으로의 그리드수는 128개이므로, 전체 샘플링 횟수는 백만 번에 가깝다. 기존 FHD 모델과 수정된 FHD모델의 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 모델의 것이 크다는 것을 의미한다. 소염 및 천이 스칼라

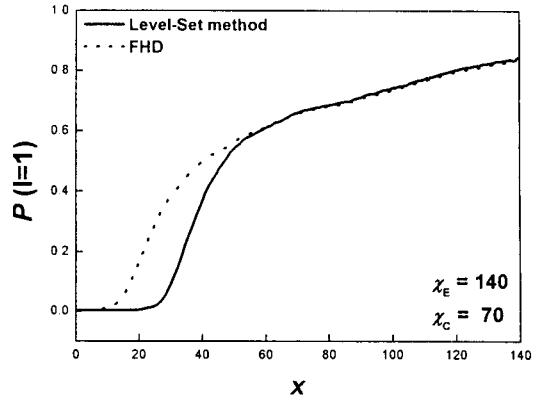


Figure 6 Variations of the partial burning ratio with the downstream distance  $x$  for Level-Set method and previous Flame Hole Dynamics model

소산률 들의 조건은 동일함에도 불구하고 선단화염의 전파특성의 차이로 인해서 다른 난류부상높이를 예측한다는 사실은 난류소화 특성이나 부상특성이 선단화염의 전파특성에 따라 달라짐을 알 수 있다.

선단화염 전파속도에 따른 난류소화 특성의 변화를 정확히 파악하기 위해서는 주유동 방향  $x$ 에 따른 변화만을 살펴보기에는 부족할 것이다. 왜냐하면 각 국부적인 화염편들이 연소나 소화 상태로 결정되는 데 가장 큰 영향을 받는 인자는 스칼라 소산률일 것이기 때문이다. 따라서 스칼라 소산률에 따른 조건부 연소확률을 살펴보았다. 기존 모델과 수정된 모델에 대한 각각의 조건부 연소확률은 Fig. 7과 8에 도시하였다. 정해진  $x$ 위치에서 특정한 스칼라 소산률의 구간  $\chi \sim \chi + \Delta\chi$ 에 대한 조건부 연소확률  $P(I=1, x|\chi)$ 은 전체 샘플링 횟수 중 국부 스칼라 소산률이  $\chi \sim \chi + \Delta\chi$  구간에 해당되는 횟수 중 연소 상태( $G(x, y) > 0$ )가 되는 횟수의 비이다. 따라서, 연소확률과 스칼라 소산률에 대한 조건부 연소확률의 관계식은 다음과 같다.

$$P(I=1, x) = \int_0^{\chi} P(I=1, x|\chi)P(x, \chi)d\chi \quad (5)$$

여기서  $P(x, \chi)$ 는 주어진 위치  $x$ 에서 스칼라 소산률이  $\chi \sim \chi + \Delta\chi$ 에 해당될 확률이다. 따라서, 첫 번째 적분항은 Flame Hole Dynamics 모델에 의해 영향을 받는 항이며, 두 번째 적분항은 순수하게 난류 유동특성에 의해 영향을 받는 항이다.

조건부 연소확률을 살펴보기에 앞서, 조건부

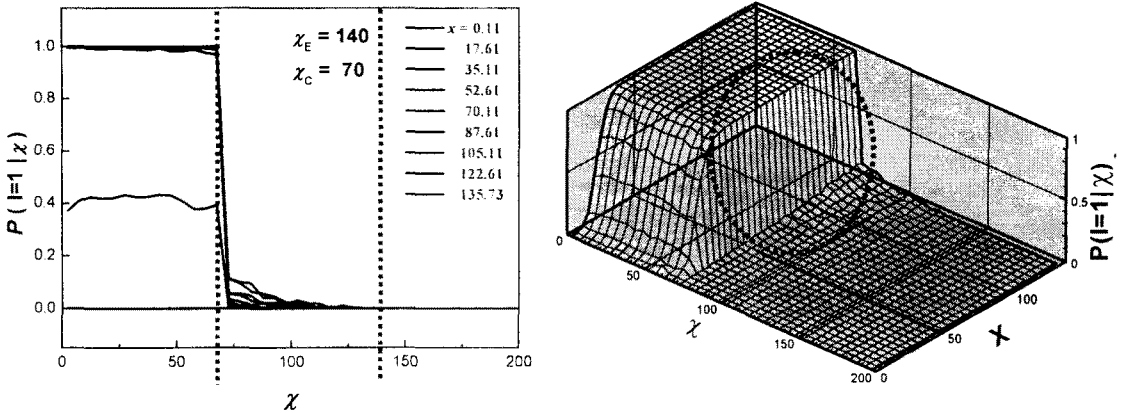


Figure 7 The partial burning probability conditioned with respect to the instantaneous scalar dissipation rate using the previous Flame Hole Dynamics model; (a) conditional probability at selected values of  $x$  and (b) three dimensional plot of the conditional probability

연소확률의 기본특성을 파악해보자. 순간적인 국부 스칼라 소산률이  $x_c$ 보다 크게 되면 무조건적으로 소화가 되어 확률이 "0"이 될 것이며,  $x_l$ 보다 작게 되면 무조건적으로 점화가 되어 확률은 "1"을 나타낼 것이다. 하지만, 본 연구에서는 앞서 논한 바와 같이 점화조건은 제외하였으며, 이는 사실상  $x_l=0$ 로 설정한 것과 동일한 결과이다. 혼합층에서 화염면이 아무리 후류 쪽으로 이동된다하더라도 국부 스칼라 소산률은 작은 값이긴 하나 양수이며 정확히 "0"이 될 가능성은 희박하므로  $x_l=0$ 일 때 재점화 현상은 사실상 제외된다.

기존 FHD 모델에 대한 조건부 연소확률을 Fig. 7에서 살펴보면, 천이 스칼라 소산률  $x_c=70$ 에서 급격하게 천이되며 그 이상에서는 연소될 확률이 거의 없음을 볼 수 있다. 이러한 사실은 화염구멍, 즉 화염의 소화과정은 종류화염면의 소화조건보다는 선단화염의 전파 또는 후퇴에 의해 지배받는 것을 알 수 있다. 하지만,  $x_c=70$ 을 기준으로 급격히 천이되는 현상은 다소 비현실적이다. 기존 FHD에서는 선단화염이 FHD mapping 조건에 의해 인접 격자로 전파하도록 연소상태  $I=1$ 로 설정함으로써 국부 스칼라 소산률에 즉각적으로 반응되도록 가정되었다. 하지만, 실제적으로는 Eq. 4와 같이 스칼라 소산률에 따라 선단화염의 응답특성은 달라진다. 작은 스칼라 소산률에서는 응답특성이 미연가스의 방향으로 빨라지지만,  $x_c=70$ 에 근접할수록 응답속도는 0이 되고, 그 이상이 되면 기연가스방향으로 응답이 점차 빨라진다. 따라서 적절한 선단화염의 응답특성을 고려한 조건부 연소확률은  $x_c=70$ 에서의 천이가 점진적인 형태를 가질 것

이다.

Level-Set 방법을 적용하여 적절한 선단화염의 응답특성이 고려된 FHD 모델에 대해 조건부 연소확률을 Fig. 8에서 살펴보았다. 전체적인 특성들은 기존 FHD 모델 결과(Fig. 7)와 비슷하지만,  $x_c=70$ 에서의 천이는 Fig. 7의 급격한 천이에 비해  $x_c=70$ 보다 약간 작은 구간은 선단화염의 느려진 전파반응에 의해서 연소확률이 작아지고, 큰 구역은 연소확률이 높아지는 점진적인 천이의 형태를 지니는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 Eq. 5의 전체적인 연소확률  $P(I=1, x)$ 는  $x_c=70$ 을 기준으로 조건부 연소확률이 상세될 수 있기 때문에 크게 변화되지 않을 것이다. 이는 Fig. 6에서 두 결과를 비교한 바와 같이 상류부분을 제외하고는 연소확률들이 거의 동일한 변화를 보여준다는 사실에서 확인할 수 있다.

조건부 연소확률은 상류와 하류에서 각기 다른 특성들을 나타내고 있다. 가장 상류부분은 스칼라 소산률에 관계없이 확률이 0을 나타내다가 후류로 갈수록 점진적인 천이 함수의 스케일이 1에 도달될 때까지 증가하는 거동을 보여준다. 상류지역에서의 조건부 연소확률은 천이 스칼라 소산률보다 작은 영역임에도 불구하고 상류로 갈수록 굉장히 작은 값을 나타낸다. 이는 상류부분에서는 소멸된 화염편들이 대부분이기 때문에 천이 스칼라 소산률보다 큰 조건의 화염면 격자들조차도 거의 대부분이 소멸된 화염면에 인접되어 있어서, 인접하는 대부분의  $x_c < x < x_c$  조건들에 의해서 화염선단이 재빨리 연소상태의 화염면으로 후퇴해버릴 수 있기 때문이다. 만일, 연소가 될 조건의 화염면이 소멸되는 조건의 화염면으로 완전히 둘러싸여 있다면 외부로부터 선단화염의 전파가 될 경로가 차단이 되어서 이 경우 또한



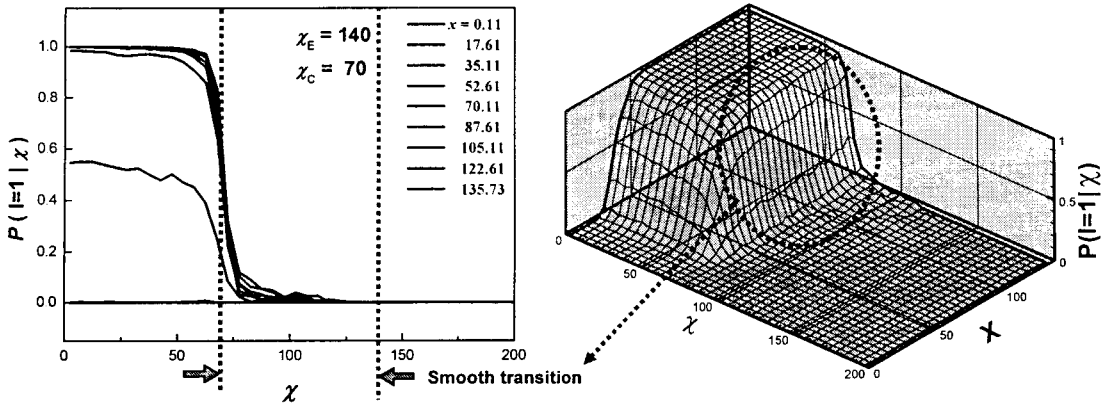


Figure 8 The partial burning probability conditioned with respect to the instantaneous scalar dissipation rate using the Flame Hole Dynamics model with Level-Set method; (a) conditional probability at selected values of  $x$  and (b) three dimensional plot of the conditional probability

연소가 되지 않을 것이다.

반면, 후류지역에서는  $\chi < \chi_c$ 의 경우에 연소확률이 거의 "1"을 나타낸다. 상류지역에서와는 달리 낮은 스칼라소산률들이 대부분을 차지함으로 인해 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.

Fig. 8처럼 후류로 감에 따라 조건부 스칼라소산률의 스케일이 변화되는 특성을 다음과 같은 함수로 나타낼 수 있을 것이다.

$$P(I=1, x|\chi) = A(x)F(\chi_c - \chi) \quad (5)$$

여기서,  $F(\chi_c - \chi)$ 는 Fig. 8의 후류부분의 형태와 같이 1에서부터 0까지  $\chi = \chi_c$ 를 기준으로 점진적으로 변화하는 형태를 hyper-tangent 함수로 가정된 함수로서 다음과 같이 표시할 수 있을 것이다.

$$F(\chi_c - \chi) \cong \frac{2}{\pi} \cdot 1 + \tanh^{-1} [\sigma(\chi_c - \chi)] \quad (6)$$

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

여기서 주지할 사실은 후류영역에서는 난류 연소확률이 난류조건  $P(x, \chi)$ 에 다소 관계없이 일정한 함수형태  $F(\chi_c - \chi)$ 로 표현될 수 있다는 사실이다. 만일  $A(x)$  함수의 특성이 향후 계속적인 연구를 통하여 파악이 되고, 조건부 연소확률분포  $P(I=1, x|\chi)$ 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 Dynamics를 적용하여 거시적인 난류 소화과정을 모사하고 이 모델에 대한 적용가능성을 살펴보았다. Flame Hole Dynamics 모델의 중심은 반응과 소멸을 오가는 화염구멍의 선단화염에 대한 동적특성을 모사하는 것이다. 이 동적특성을 기반으로 하여 DNS 수행으로 얻어진 배경난류장에 대해 Random Walk Mapping을 수행함으로써 난류의 소화과정을 모사하는 것이다. 기존의 Flame Hole Dynamics 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 Flame Hole Dynamics Mapping에 화염면 전파를 모사할 수 있는 Level-Set 방법을 도입하였다.

먼저 Level-Set 모사에 적용되는 전파속도에 대해 일정한 전파속도로 가정한 경우와 스칼라

소산물에 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 친이스칼라 소산물을 기준으로 전파방향이 바뀌는 형태의 연속함수로 적절히 가정하여 연료/산화제에 대한 난류혼합층의 가상화염면상에 Flame Hole Dynamics 수치모사를 해보았다. 주유동방향에 따른 가상화염면상의 연소확률변화를 기존 Flame Hole Dynamics 결과와 비교하였는데, 후류부분의 거의 차이가 없으나 상류부분에서는 연소확률의 차이가 발생하는 것으로 보아 난류부상화염의 선단에서는 선단화염의 전파가 대부분임을 알 수 있었다. 또한, 스칼라 소산물에 따른 조건부 연소확률을 확인하였는데, 기존 Flame Hole Dynamics의 결과와 거의 동일하게 친이스칼라 소산물을 기준으로 급격한 친이가 일어남을 볼 수 있었으며, 이로부터 난류화염의 소염을 지배하는 메커니즘은 층류화염면의 소화현상보다는 선단화염의 전파특성임을 알 수 있었다. 차이점으로는 유한한 선단화염의 응답특성으로 인해 기존의 모델보다는 연소확률의 친이가 더 점진적인 형태로 발생된다는 것이다. 더욱이, 조건부 연소확률의 스칼라 소산물에 대한 변화는 친이 스칼라 소산물을 기점으로 하는 특성함수로 나타낼 수 있어서 난류연소에 대한 수치모사를 간략화할 수 있는 가능성을 제시할 수 있었다.

현재 꾸준히 Flame Hole Dynamics 모델을 이용하여 난류 소화과정을 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 Flame Hole Dynamics 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, Flame Hole Dynamics 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 연

구의 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.