

혼합층에서의 확산화염에 대한 flame hole dynamics 모델

김준홍* · 정석호** · 김종수†

Flame Hole Dynamics Model of a Diffusion Flame in Mixing Layer

Junhong Kim, S. H. Chung and J. S. Kim

ABSTRACT

The method of flame hole dynamics is demonstrated as a mean to simulate turbulent flame extinction. The core of the flame hole dynamics involves derivation of a random walk mapping for the flame holes, created by local quenching, between the burning and quenched states provided that the dynamic characteristics of flame edges is known. Then, the random walk mapping is projected to a background turbulent field. The numerical simulations are carried out with the further simplifications of flame string and unconditioned scalar dissipation rate. The simulation results show how the chance of partial quenching is influenced by the crossover scalar dissipation rate. Finally, a list of improvements, necessary to achieve more realistic turbulent flame quenching simulation, are discussed.

Key Words : Turbulent Flame Extinction, Flame Edge, Flame Hole Dynamics, Random Walk, Partial Quenching

1. 서론

화염 소화는 자연현상 중에서 가장 비선형적 물리현상 중 하나이다. 대개 화염이 내포하고 있는 열적에너지보다 훨씬 큰 활성화 에너지를 가진 화염의 경우, 소염 조건은 화염의 준정상 반응 곡선의 전환점에 해당하는 분기조건으로 생각할 수 있으며, 이 전환점으로부터 소염이 될 수 있는 유체역학 조건을 계산할 수 있다. 소염은 아임계 분기(subcritical bifurcation) 조건에 해당되므로, 소염은 급격한 형태로 발생하게 된다^[1]. 그러나, 이러한 예측은 층류의 경우는 잘 맞지만, 난류화염의 소화의 경우는 반드시 이를 따르는 것은 아니다.

난류화염은 층류화염소의 조합이란 개념으로 알려져 있으며, 난류화염에서 부분소화는 층류의

형태와 거의 비슷하다고 보고 있다. 하지만, 난류 화염에서 전체적으로 소화가 일어나는 경우는 각각의 부분 층류 화염소들의 소화와는 많이 다를 수 있다. 일반적으로 난류화염은 다소 넓은 범위의 유동 특성 시간에 해당되는 임의의 교란(random fluctuation)에 영향을 받는다. 각각의 화염소는 소염과 연소 상태사이에서 Random Walk Process를 따르기 때문에, 난류화염의 소화는 층류보다 좀 더 서서히 일어날 것이라 생각될 수 있다. 결과적으로, 전체적으로 소염이 일어나는 유체역학 조건의 평균값은 층류화염 소염의 조건과는 다를 수 있으며, 난류 소염 조건을 확인하는 일은 그리 쉬운 것이 아닐 것이다.

난류 화염 소염에 통계적으로 접근하는 가장 중요한 요소는 반응과 비 반응 상태 사이의 Random Walk Process이며, 이에 대해 1991년 Dold와 Hartley가 제안한 모델로서 flame hole dynamics가 있다^[2]. 이 모델은 반응과 비반응 상태 사이의 경계에 존재하는 구조인 선단 화염(edge-flame)에 기반을 두고 있다. 선단 화염은 화염선단에 가해지는 속도 조건에 따라서 기연가

* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

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

스나 미연가스로 전파될 수 있다. 결과적으로 층류 화염소의 부분소화에 의해서 발생하는 화염 구멍(flame hole)의 확장이나 축소는 선단 화염에 의해 결정된다. 만일 주어진 3차원 난류 유동장에 대해서, Flame Hole Dynamics에 따라 유도된 임의 거동 과정을 적용하여 모사한다면, 연소 상태에서 소화 상태로 점차적으로 천이되는 난류 화염 거동을 볼 수 있을 것이다.

선단 화염은 연소학계에서 가장 대두되고 있는 연구 주제 중에 하나가 되고 있다^{13,41}. 그러나 난류 화염의 소멸현상이 선단화염 이론으로 완전히 기술될 수 있다는 평가는 아직 받지 못하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 flame hole dynamics 모델을 어떻게 난류 화염 소멸 현상에 적용할 것인가에 대해서 논의 해보기로 한다. 난류 화염 소멸 현상을 기술하기 위한 모델로서는 초기 단계이기 때문에 물리적 수학적 개념을 그해 해치지 않는 한도에서 간략화한 부분이 많지만, 첫 번째로는 flame hole dynamics의 기본적인 개념에 대해서 언급될 것이며, flame hole dynamics 모델이 적용될 배경 난류장으로서 연료/산화제의 혼합층에 대한 DNS 결과에 대해 언급할 것이다. 마지막으로 이 모델을 배경 난류장에 적용하여 난류 연소에서의 부분소화 현상이 모사되는 것을 보여주고, 향후 좀 더 사실적인 소멸 현상을 얻기 위한 개발 방향에 대해 논의할 것이다.

2. Flame Hole Dynamics 개념

Flame Hole Dynamics는 화염안정화지역에서 국부적으로 소화된 화염의 기본적인 운동학적 모델이다. 화염의 소화는 연료와 산화제가 혼합지역 충분히 머물지 못해서 화학반응이 완결되지 못하는 경우 발생하고 있다. 따라서 화염의 소화 조건을 유동장의 특성유동시간을 통해서 예측하는 것이 가능하다. 이러한 특성예측의 기본적인

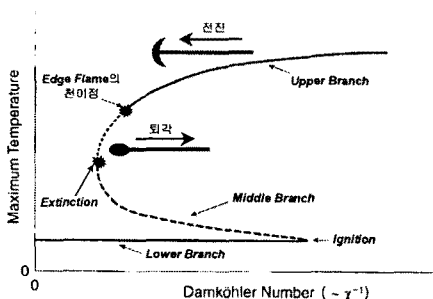


그림 1. Edge flame 전파속도와 화염의 특성을 나타내는 S-형 곡선.

결과가 그림 1에 표시되어있다.

화염의 기본적인 특성은 특성화학반응시간에 대한 특성유동시간인 Damkohler 수로 표현될 수 있다. 특성반응시간으로는 보통 분자간의 충돌빈도 (Frequency Factor)의 역수와 비례하며, 특성 유동시간은 Scalar Dissipation Rate (χ)의 역수로 주어질 수 있다. 따라서 Damkohler수는 유동장의 스칼라 소산률의 역수에 비례하게 된다. 이때 화염의 특성을 Damkohler수 또는 스칼라 소산률의 함수로 표현한 그림이 옆에 주어져 있다. 이러한 경우 3개의 특성 스칼라 소산률 (SDR)이 존재하는데 다음과 같다.

1. 소화 SDR (x_F) : 화염의 준정상 소멸이 발생하는 조건
2. 천이 SDR (x_C) : 화염과 소멸지경의 경계면인 Edge Flame 전파방향의 천이가 발생하는 조건
3. 점화 SDR (x_I) : 소멸된 화염이 다시 점화되는 조건

여기서, 일반적인 연소 조건에서 $x_F > x_C \gg x_I$ 의 관계가 성립된다. 위와 같은 화염의 점멸을 제어하는 조건을 국부소화화염에 적용할 경우 우리는 다음의 그림 2와 표 1에 제시된 바와 같이 네 가지 종류의 가상 화염 면을 구분할 수 있다.

- ① 연소되는 구획으로 주위에 연소되는 구획만 있는 경우
- ② 연소되는 구획으로 주위에 소화된 구획이 있는 경우
- ③ 소화된 구획으로 주위에 연소되는 구획이 있는 경우
- ④ 소화된 구획으로 주위에 소화된 구획만 있는 경우

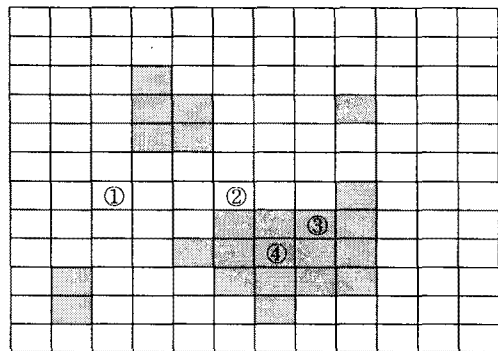


그림 2. 스칼라 소산률에 대한 점멸상태의 변화 Mapping (음영으로 처리된 부분은 소화된 화염면 구획을 나타낸다)

화염 구획의 종류	스칼라 소산률	연소 상태
①	$x > x_F$	소염
	$x < x_F$	연소
②	$x > x_C$	소염
	$x < x_C$	연소
③	$x > x_C$	소염
	$x < x_C$	연소
④	$x > x_I$	소염
	$x < x_I$	재점화

표 1. 화염면의 분류와 스칼라 소산률에 대한 점멸상태의 변화 Mapping

이들 네 가지 가상 화염구획에서 화염과 소염부의 경계가 없는 ①, ④은 준정상 소화조건과 준정상 점화조건에 의해서 화염의 점멸이 결정되지만, 화염과 소화부의 경계면이 있는 ②, ③ 구획들은 edge flame의 전진과 후퇴에 의해서 화염의 점멸이 결정된다. 이와 같은 운동학적 조건의 Mapping에 대한 요약이 위의 표에 주어져 있으며, 이러한 화염 점멸의 운동학적 조건이 Flame Hole Dynamics이다.

위의 기본적인 Flame Hole Dynamics Mapping에서 볼 수 있는 바와 같이 난류화염을 구성하고 있는 단위 층류화염소의 점멸상태는 소화 스칼라 소산률에도 영향을 받지만, edge flame의 전진과 퇴각을 결정하는 천이 스칼라 소산률에도 영향을 받고 있다는 점에 주의할 필요가 있다.

3. 연료/공기 혼합층에서의 수치모사

3.1. 혼합층의 직접수치모사 (DNS)

위에서 제시된 Flame Hole Dynamics를 이용하여 난류유동장에서 화염의 국부소화특성을 예측하기 위해서는 Flame Hole Dynamics를 제어하는 스칼라 소산률의 Random Walk에 대한 통계적 특성이 주어져야 된다. 여기에서는 연료/공기 Mixing Layer에서의 난류혼합에 대한 직접수치모사를 수행해서 스칼라 소산률의 불규칙한 전개에 대한 자료를 획득하였다.

연료/공기 Mixing Layer에 대한 직접수치모사의 결과가 아래에 표시되어 있다. 채택된 시스템은 유동방향으로 $0 < x/h < 10$ 이 설정되어 있으며, 수직방향으로 $0 < y/h < 2$ 로 설정되어 있고 여기에서 h는 채널의 폭의 반이다. 또한 x

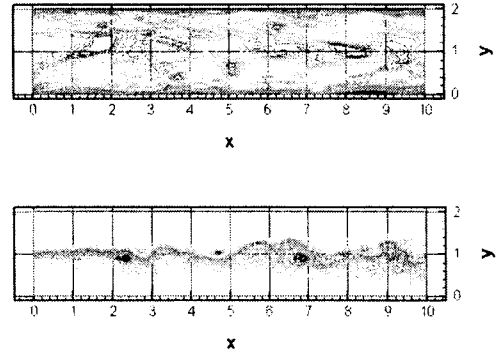


그림 3 DNS 결과에 대한 Snapshot; (위) 난류 유동장, (아래) 혼합분율로 표시된 난류 혼합층

$< 0, y/h = 1$ 에 연료와 공기를 분리하는 Splitter Plate가 설치되어 $x > 0$ 지역부터 연료/공기의 혼합이 발생하게 설정되었다. 또한 기하학적으로 균일한 연직방향으로 $0 < z/h < 5$ 이 설정되어 3차원 DNS를 수행하였다. DNS는 $64 \times 64 \times 64$ 의 격자를 이용하여 유한차분법을 이용하여 수행되었으며, y 방향의 경계조건으로는 벽면조건이 z 방향의 경계조건으로 주기조건이 채택되었다. 그림 3은 난류 Reynolds수 ($Re_t = 150$)에 대한 유동장 및 농도장의 z-축 중심면에 대한 Snapshot을 표시한 결과이다.

위의 그림에서 농도장의 분포는 $x/h \approx 3$ 지역에서부터 와동의 형성이 본격화되는 것을 볼 수 있으며, $x/h \approx 6$ 에서부터는 난류의 혼합이 매우 활발한 것을 볼 수 있다.

위의 계산결과로부터 난류유동장의 특성유동시간인 스칼라 소산률이 계산되었다. 스칼라 소산률을 계산하기 위해서 혼합분율 (Mixture Fraction, Z)을 $Z = (Y_F - Y_O + Y_{O2}) \div (Y_{F0} + Y_{O2})$ 로 정의하였으며, 정의상 혼합분율 Z는 연료경계에서 1로 산화제경계에서는 0으로 정규화된다. 이때, 스칼라 소산률은 $\chi = \nabla Z \cdot \nabla Z$ 로 주어

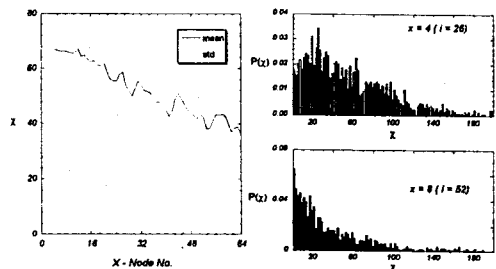


그림 4. x 방향에 따른 스칼라 소산률의 평균값과 표준편차의 변화

지며 항상 양의 값이다. 그림 4는 위의 경우에 대해서 추출한 스칼라 소산물의 통계적 특성을 도시한 그림이다. 여기에서 스칼라 소산물은 연료/공기 혼합장의 모든 경우에 대해서 추출된 것이 아니라, Mixing Layer의 중심축을 따라서 계산되었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 평균 스칼라 소산물은 하류방향에서 지속적으로 감소되고 있음을 알 수 있으나, 스칼라 소산물의 분산은 Mixing Layer의 와동형성과 관련해서 $x > 6$ ($i > 40$) 이상에서 평형을 찾고 있음을 볼 수 있다. 따라서 이 지역을 경계로 해서 스칼라 소산물의 확률밀도함수의 특징도 큰 차이를 보이고 있다. 평형지역에 이르기 전에서는 스칼라 소산물의 최대 확률이 유한한 값에서 나타나고 있으나, 분산과 평균치의 크기가 비슷한 평형지역에서는 스칼라 소산물의 확률밀도함수가 단조감소함수로 나타나는 것을 보여주고 있다. 이러한 특징은 추후 스칼라 소산물의 Random Function을 정의하는데 매우 유용한 정보를 제공할 것으로 예상된다.

3.2. 국부소화의 Lagrangian 수치모사

앞에서 주어진 난류화염을 구성하는 화염소의 기본적인 운동학적 조건 (즉, Flame Hole Dynamics)와 DNS를 통해서 얻어진 유동장의 Random Process 자료를 이용하여 난류화염의 국부적 소화특성에 대한 시간적 전개를 Lagrangian 기법을 이용하여 모사할 수 있다.

이번 연구에는 위에서 제시한 Lagrangian 수치모사기법의 타당성을 제시하는 모사로서 보다 단순화된 경우에 대해서 실시하고 있다. 이러한 단순화를 위해서 3차원 모델을 2차원으로 축소하였으며, 이에 따라서 화염면 (2차원 구조)을 혼합 경계층의 중심축을 따라서 형성되었다는 가상화염선 (1차원 구조)로 단순화시켜 Lagrangian 수치모사를 수행하였다. Lagrangian 수치모사는 주어진 소화 스칼라 소산물 (x_E)과 천이 스칼라 소산물 (x_C)에 대해서 위에서 보여준 DNS의 자료

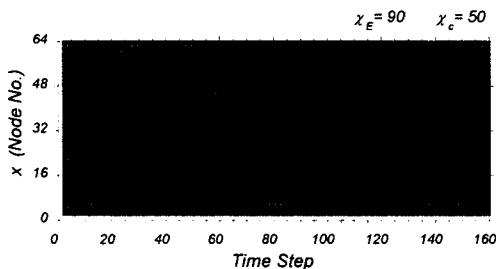


그림 5. $x_E = 90$, $x_C = 50$ 의 경우, 시간에 따른 화염의 점멸상태 변화

에 대해서 수행되었다.

그림 5는 $x_E = 90$ (1/s), $x_C = 50$ (1/s)의 경우에 대한 화염선 점멸상태의 불규칙한 전개를 보여주고 있다. 그림에서 청색은 화염이 소멸된 지역이며, 적색은 화염이 존재하고 있는 지역이다. 이때 가상화염선의 각 지점마다 주어진 특성 스칼라 소산물이 지속적으로 변화함에 따라서 화염의 소멸 및 edge flame의 전진 후퇴에 따른 소화와 재점화가 반복적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 수치모사에서 실시된 약 1200회의 Lagrangian Time Step 가운데에서 160회를 추출한 것을 보여주고 있으며, 스칼라 소산물이 큰 Splitter Plate의 가까운 부분에서 국부소

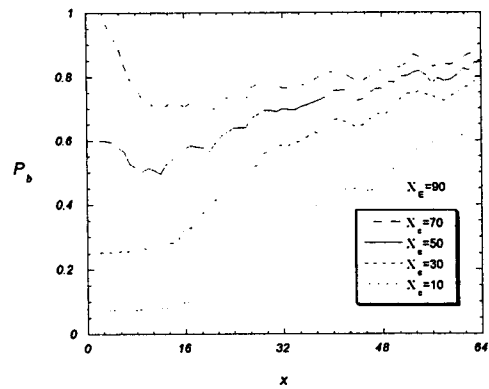


그림 6. 여러 가지 천이 스칼라 소산물에 대한 x 방향에 따른 국부 연소 확률분포

화 확률이 훨씬 큰 것을 잘 나타내고 있다. 또한 소화지역에 다시 점화지역으로 돌아오기까지의 소화지역에 대한 Passage Time이 직관적으로 약 10 Time Step 인 것도 알 수 있다.

위와 같이 실시된 Lagrangian 수치모사를 통해서 연료/공기 혼합경계층의 각 지역에서 국부 소화확률이 난류유동장의 특성인 스칼라 소산물을 통해서 얻어질 수 있으며, 그림 6에서 이에 대한 변화를 보여주고 있다.

그림 6을 통해서 난류화염의 소화에 대한 중요한 사실을 알 수 있다. 먼저 유동장의 평균 스칼라 소산물이 70/s로서 소화 스칼라 소산물 (90/s)을 초과하지 않음에도 불구하고 국부소화의 확률이 매우 높다는 점이다. 즉, 평균 스칼라 소산물만 고려하면 혼합경계층에서 화염의 소화가 발생하지 않는다고 예측할 수 있으나, 천이 스칼라 소산물이 작은 edge flame의 전진 및 후퇴에 영향을 받아서 실제의 국부 소화확률은 준정상 소화조건으로 예측된 것과 매우 다른 특징을 보이고 있다. 그림에서 확인될 수 있는 바와 같이 국부소화의 영향을 많이 받는 화염안정화

지역에서는 소화 스칼라 소산률 보다는 edge flame의 천이 스칼라 소산률에 의해서 연소확률이 더 큰 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다.

이와 같은 위치별 연소확률에 대한 결과를 이용하여 화염안정화 지역의 난류화염의 특성 및 안정화 기술 개발의 핵심적 자료인 화염부양높이(Flame Lift-off Height)를 경험적 모델을 사용하지 않고 예측할 수 있으며, 또한 지금까지 불가능했던 국부 소화면을 통해서 누출되는 미연 탄화수소의 발생량을 예측하는 것이 가능해졌다. 이와 같은 난류화염 모델링은 층류화염에 대한 기본자료, 화염소의 기본적인 운동학적 조건과 유체역학적 예측을 통합하여 경험식의 도입없이 최초의 정량적 예측이 시도되었다는 점에서 매우 의미가 크다고 할 수 있다.

4. 결론

실제 연소 현상에서 일어나는 화염 부상이나 화염 날림현상에 주된 역할을 하는 난류 화염 소화를 모사하기 위한 방법으로 Flame Hole Dynamics를 제시하였다. Flame Hole Dynamics의 핵심은 edge flame의 동적 특성에 대해서 심화와 소화를 오가는 화염 구멍에 대해서 random walk mapping을 하는 것이다. 본 연구에서는 3차원 혼합층에 대한 직접수치모사를 통해서 얻어진 배경 난류장에 대해서 random walk mapping을 적용하였다. 여기서, 화염면(2차원 구조)을 혼합 경계층의 중심축을 따라서 형성되었다는 가상화염선(1차원 구조)로 단순화시켜 Lagrangian 수치모사를 수행하였다. 결과에서, 부분 소화 확률이 난류 유동장의 기타 확률값들 뿐만 아니라 천이 스칼라 소산률에 의해서도 영향을 받는지 알 수 있었다.

비록 본 연구에서는 난류 연소에서 Flame Hole Dynamics가 어떻게 적용이 될 수 있는 보여주지만, 난류 화염 소화의 좀더 사실적인 모사를 위해서는 현 수치모사 적용방법이 좀 더 개선이 될 점이 많이 있다. 향후 연구에서 수행되어야 할 주된 개선점들을 다음과 같이 난이도 순에 따라서 나열하였다.

1. 더욱 사실적인 배경난류장에 대한 DNS가 필요하며, 높은 Reynolds수에 대해서 수행되어야 한다.
2. 고정되어 있는 화염위치가 아닌 순간 마다 변화되는 화염면을 추적하여 이에 대해서 Flame Hole Dynamics를 적용한다.
3. 스칼라 소산률에 대해 무한한 edge-flame의 전파속도특성 대신, 유한한 속도의 edge-flame 전파속도특성을 적용한다.

4. 연소 열방출에 의한 밀도 변화와 온도 변화에 따른 난류 특성값 들을 고려한다.

위의 네 가지 이외에도 장기적 관점에서 다소 광범위하게 연구되어야겠지만, 난류 화염 소화에 대한 사실적인 모델링에 대해서는 투자할 연구 가치가 분명히 있다.

후 기

이 연구(논문)은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd Ed., Benjamin Cummings, Menlo Park, CA., 1985.
- [2] Hartley, L. J., "The Structure of Laminar Triple-Flames: Implication for Turbulent Non-Premixed Combustion," Ph.D. Thesis, UMIST., 1991.
- [3] Buckmaster, J. D., "Edge-flames," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, pp. 435~475, 2002.
- [4] Nayagam, V. and Williams, F. A., "Lewis-number Effects on Edge-flame Propagation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 458, pp. 219~228.