

Edge Flame : Why Is It So Hot in Combustion ?

김중수 (한국과학기술연구원 환경공정연구부, kimjs@kist.re.kr)
J. S. Kim (KIST, Environment and Process Research Division)

1. 서론

증기운 폭발현상의 소화를 고려하여 보자. 증기운 폭발은 가연성 가스가 누출되어 공기와 혼합되어 거대한 가연성 증기운을 형성한 후에 점화될 경우 난류화염의 전파속도가 지속적으로 가속되어 강력한 충격파를 동반하는 폭발로 친이되는 현상이다. 증기운 폭발을 다루는데 있어서 중요한 측면은 증기운 내의 가연성 예혼합기의 질량을 추정하여 증기운 폭발의 잠재적 위력을 평가하는 작업이다. 그러나 가연 질량을 추정하기 위한 연소의 종결점을 합리적으로 설정하기는 매우 어려운 실정이다. 일례로 저위 가연한계(Low Flammability)를 연소의 종결점으로 가정할 수 있으나, 저위 가연한계가 난류화염에도 적용이 가능하다는 보장은 없다. 또한 난류에 의해서 증기운의 농도장이 불균일하므로 농도장의 통계적 특성이 연소의 종결점에 미치는 영향도 분명하지가 않다.

이와 같이 난류화염의 소화조건에 대한 예측이 중요한 시스템을 자주 발견할 수 있다. 즉 내연기관의 소염층의 두께를 예측하는 문제에서부터, SCRam Jet 엔진과 같이 극한 조건에서 작동하는 추진기관의 소화조건까지 난류화염의 소화현상과 관련된 매우 중요한 문제들이 산재해있다.

충류화염의 소화조건을 예측하는 것이 준정상상태 화염해의 전환점을 이용하는 방법론이 널리 이용되는 것과 달리, 난류화염의 소화조건을 예측할 수 있는 확고한 방법론이 아직은 확립되어 있지 않은 상태이다. 특히 화학반응률의 비선형성이 커짐에 따라서 화학반응은 전달현상이 발생하는 지역보다 점근적으로 얇은 지역에 국한되어 발생하기 되며, 이러한 경우 난류연소상태를 대표할 수 있는 화학반응률을 찾아내기가 더욱 어려워진다. 따라서 기존의 moment 기법을 채택하는 수치해석프로그램을 활용하여 소화를 예측하였다 하여도, 이는 수치해석에 의한 물리적 현상의 모사가 아니라, 경험적으로 가정된 화학 반응률에 기인하는 numerical artifact일 가능성이 매우 크다.

여기에서는 난류화염이 소화되는 물리적 과정을 모사할 수 있는 모델로 **Edge Flame**의 개념을 활용한 난류연소모델에 대해서 간단하게 소개하고자 한다. [1, 2]

2. 전제 조건

Edge Flame을 활용한 난류화염의 소화예측은 모든 종류의 난류화염에는 적용되지 않는다. 이러한 모델이 성립되기 위해서는 난류화염 내에 edge flame이 존재할 수 있어야 한다. Edge flame이 존재하기 위해서는 난류화염이 충류화염소의 집합체로 구성되어있는 충류화염소 영역에 속해야만 한다. 최근 Kobayashi등이 수행한 고압조건 연소실험에서 보여진 바와 같이 [3], 압력이 높아짐에 따라서 화염두께가 얇아져서 충류화염소의 존재가 보다 명확히 관찰될 수 있다. 따라서 연소가 고압조건에서 발생하는 대부분의 추진기관에서는 난류화염이 충류화염소영역에 해당된다는 가정은 적절한 것이며, edge flame을 활용한 소염조건 예측 방법도 적용될 수 있다 [4].

난류화염의 소화와 관련되어 유념하여야 될 또 다른 사실은 난류화염이 전체적으로 한 순간에 소화가 되지 않는다는 점이다. 난류화염이 소화되기 위해서는 난류화염의 일부에서 국부소염(Local Quenching)이 발생하며, 국부소염에 의해서 형성된 quenching hole들이 단계적으로 확장되어서 난류화염의 거시적 소화로 이어진다는 점이다. 여기에서 quenching hole의 확장과 축소를 조절하는 매카니즘이 연소되는 영역과 소화된 영역의 경계에 존재하는 화염의 선단구조인 edge flame이다.

3. Edge Flame은 어떤 화염인가 ?

국부적으로 소화된 화염의 선단에 존재하는 화염이 edge flame으로 불리기 시작한지는 오래지 않다. 그 이전에는 이와 같은 화염을 triple flame 또는 tribrachial flame (삼지화염)으로 칭하는 것이 보통이었다. 그러나 Buckmaster가 지적했던 바와 같이 triple flame은 확산화염에서 형성될 수 있는 edge flame의 한 종류이며 [2], 예혼합화염의 소화된 선단은 삼지화염의 형상을 보이지 않기 때문에, edge flame이 소화된 화염의 선단을 일반적으로 칭하기에 보다 타당할 것이다. 전술된 바와 같이 edge flame은 확산화염과 예혼합화염 모두에서 발생할 수 있다. 그러나 지금까지 연구가 주로 확산화염의 edge flame인 triple flame을 중심으로 이루어졌기 때문에, edge flame의 특성을 triple flame을 중심으로 요약하고자 한다.

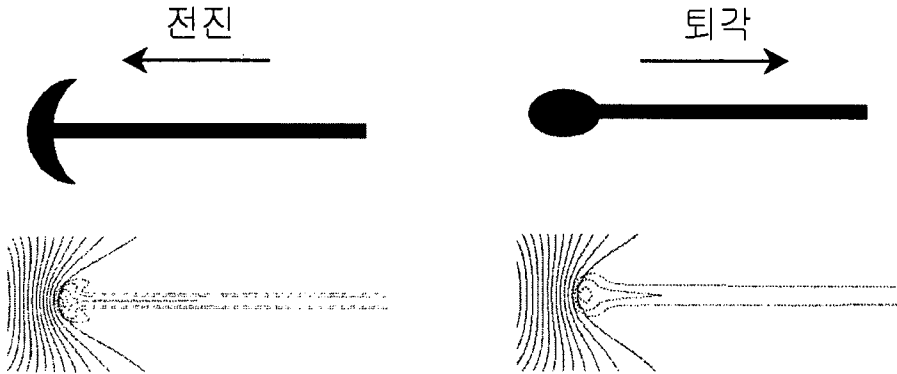


그림 1. Triple flame의 개략도 및 온도분포 특성. 좌측의 전진하는 삼지화염에서는 두 개의 날개형태의 예혼합화염이 존재하나, 퇴각하는 삼지화염에서는 예혼합화염이 날개의 형태로 존재할 수 없다.

Triple flame의 일반적인 형태가 그림 1에 도시되어 있다. 확산화염의 일부에서 소화가 발생하면, 소화된 지역을 통해서 연료와 산화제가 예혼합되고, 이렇게 형성된 예혼합기가 가연한계 범위 안에 있는 지역에서는 예혼합화염이 형성될 수 있다. 이때, 혼합분율 Z 가 당량 혼합분율 Z_{st} 보다 작은 지역에서는 혼합기가 희박하므로 희박예혼합 화염이 형성될 수 있으며, 혼합분율이 당량 혼합분율보다 큰 지역에서는 과농 예혼합화염이 형성된다. 특히 두 개의 예혼합화염과 확산화염이 만나는 삼중점부터 당량혼합분율의 면을 따라서 길게 확산화염이 존재한다. 또한 예혼합화염의 강도도 삼중점에서 가장 강할 것이기 때문에, 화염의 edge는 유동장과 삼중점의 전파가 균형을 이룰 수 있는 위치를 찾아 계속적으로 이동할 것이다.

Triple flame의 구체적인 모양은 triple flame의 삼중점이 예혼합기 쪽으로 전진하거나 아니면 퇴각하거나에 따라서 모양이 달라질 수 있다. 그림 1의 첫째 그림은 미연지역으로 전진하는 triple flame의 형상을 나타낸 것으로, 삼중점에서 멀어질수록 화염전파속도가 줄어드는 희박 예혼합화염과 과농 예혼합화염이 삼중점의 전진속도와 평형을 이루어 마치 가운데 있는 확산화염에 두 개의 날개와 유사한 형상을 한다. 그러나 퇴각하는 Triple Flame은 두 개의 예혼합화염의 전파방향이 예혼합화염의 기연가스가 있는 후류 쪽이므로 평형위치를 확보할 수 없으며, 두 개의 날개가 없이 전체적으로 면봉의 끝과 같은 형상을 보여주게 된다.

그러나 edge flame의 보다 중요한 특성은 화염에 주어진 연소조건에 따라서 미연지역으로 전진하거나 또는 기연지역으로 후퇴할 수

있다는 점이다. 이와 같이 전진 또는 퇴각하는 edge flame의 해를 Buckmaster는 ignition wave 또는 failure wave라 칭하고 있다 [5]. Ignition wave와 failure wave의 일반적인 특성이 화염의 특성온도의 Damköhler수의 함수로 표시한 아래의 그림 2에 도시되어 있다. 소화조건에 가까운 지역에서는 failure wave solution이 발견되고 있으며, 따라서 소화지역이 확장되는 특성이 있다. 반면 평형조건에 가까워지면 ignition wave solution이 발견되어 소화지역이 축소되게 된다. 또한 ignition wave solution 과 failure wave solution 사이의 천이가 발생하는 천이 Damköhler 수가 존재한다.

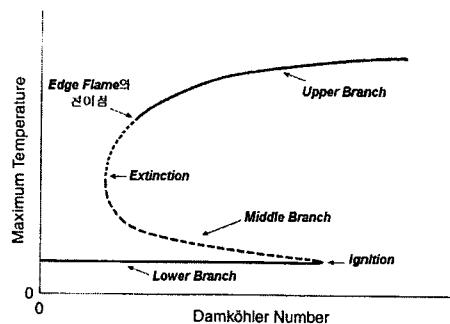


그림 2. Edge flame 전파속도와 화염의 특성을 나타내는 S-형 곡선.

Ignition wave와 failure wave solution들의 천이가 일어나는 천이조건을 파악하는 것은 난류화염의 quenching hole들이 팽창할 수 있는 연소조건을 확인하기 위한 중요한 작업이다.

Ronney는 이러한 조건을 실험을 통해서 찾아낸 바가 있다 [6]. 2차원 대향류 유동장에 화염을 형성시킨 후에 버너사이의 거리를 줄여서 화염의 준정상 소화조건을 먼저 확인하였다. 이후에 대향류 버너를 경사지게 설치하여 대향류 유동장내에 위치마다 선형적으로 화염 스트레치에 변화를 주었다. 이러한 경우 화염 스트레치가 큰 지역에서는 화염이 존재할 수 없지만 화염 스트레치가 작은 지역에서는 화염이 존재하며, 화염의 선단이 위치한 점에서의 화염 스트레치를 edge flame 속도의 천이가 발생하는 천이 화염 스트레치로 지정할 수 있다. 이 실험에서 밝혀진 사실은 Lewis 수가 1 보다 매우 작지 않다면, 천이 화염 스트레치가 준정상 소화 화염 스트레치보다 항상 작다는 사실이다. 이러한 현상은 화염의 선단에서 추가적인 열손실이 발생하기 때문으로 설명될 수 있다.

아직 화염스트레치 (또는 Damkohler수) 에 대한 edge flame의 전파속도를 정확히 측정할 실험은 존재하지 못하고 있다. Ignition wave에 대한 edge flame의 전진속도에 대한 일부가 Chung [7] 및 Ronney [8] 등에 의해서 측정이 시도된 바는 있으나 전체 영역에 대한 실험이 시도되지는 못하고 있다. 반면 Dold 등은 수치 모델을 활용하여, edge flame의 전파속도를 Damkohler 수의 함수로 계산하여 일반적인 특성을 제시한 바가 있으며, 보다 자세한 내용은 제 5절에서 취급될 것이다.

4. Dold의 접근법

Edge flame의 개념을 활용해서 난류화염의 소화를 예측할 수 있는 수학적 모델이 Dold와 Hartley에 의해서 제시된 바가 있다 [9]. 그러나 그들의 접근법을 제시한 논문이 출간되지 않고 단지 Hartley의 박사학위논문에서만 언급이 되었던 관계로 많은 사람들에게 알려진 접근법은 아니다.

화염의 변화를 나타내는 상태변수 Y 를 혼합분율 Z , 혼합분율에 직교하는 좌표 r 과 시간 좌표 t 의 함수들로 표시할 수 있다. 이럴 경우, 화염면은 당량혼합분율 Z_q 가 위치하는 면에 고정될 수 있으며, 난류화염내의 교란에 대한 화염면의 변화를 고려하여 난류화염의 거시적인 소화를 예측할 수 있다.

이러한 서술법을 도입하기 위해서 먼저 화염면을 그림 3과 같이 여러 개의 충분히 작은 구획으로 나눌 수 있으며, 여기에 초기조건으로 임의의 quenching hole 들을 분포시킬 수 있다.

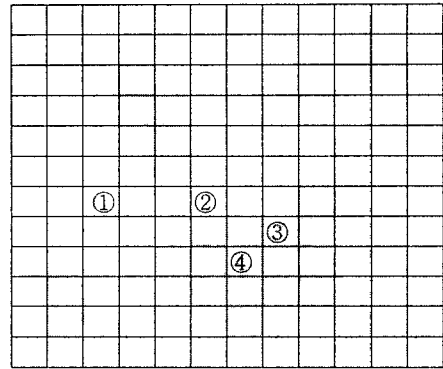


그림 3. 화염구획의 종류

그러면 quenching hole 들의 기하학적인 조건에 따라서 다음의 4가지 다른 구획들이 정해질 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

위와 같은 4종의 화염면의 변화를 결정하는 스칼라 소산률 Σ 는 다음의 3 가지의 특성치를 갖고 있다.

1. Σ_q : 준정상 소화조건에 해당하는 Σ
2. Σ_c : edge flame 전파방향의 천이가 발생하는 Σ
3. Σ_i : 접화조건에 해당하는 Σ

Lewis수가 1에 가까운 경우에는 $\Sigma_q > \Sigma_c \gg \Sigma_i$ 의 크기에 대한 관계식이 성립한다.

경우 1에 해당하는 주위가 모두 화염면으로 둘러싸인 화염구획은 해당 구획에 가해진 스칼라 소산률이 Σ_q 이상으로 올라가야만 화염면이 소화될 수 있다. 그러나 주위의 일부가 소화된 경우 2에 해당하는 화염구획은 edge flame의 퇴각에 의해서 소화가 발생하는 Σ_c 가 quenching hole로 천이되는 임계치일 것이다. 이와 같은 맥락에서 주위의 일부가 화염면인 경우 3에 해당하는 소화구획은 스칼라 소산률이 Σ_c 이하로 변화할 경우 edge flame의 전진에 의해서 다시 화염면으로 회생될 수 있으며, 소화된 구획으로 둘러싸인 경우 4의 구획은 스칼라 소산률이 Σ_i 이하로 변할 때만이 화염면으로 회생이 가능하다. 그러나 접화조건에 해당하는 스칼라 소산률이 매우 작은 값을

가치므로, 재점화에 의한 직접적인 연소상태의 천이보다는 edge flame의 전진에 의한 화염면의 회생확률이 훨씬 더 크다고 할 수 있다. 이러한 화염면 변화의 기본적인 mapping 조건이 아래의 표 1에 요약되었다.

표 1. 화염구획의 종류와 스칼라 소산률에 따르는 연소상태의 Mapping

화염 구획의 종류	스칼라 소산률	연소 상태
①	$\Sigma > \Sigma_q$	소염
	$\Sigma < \Sigma_q$	연소
②	$\Sigma > \Sigma_c$	소염
	$\Sigma < \Sigma_c$	연소
③	$\Sigma > \Sigma_c$	소염
	$\Sigma < \Sigma_c$	연소
④	$\Sigma > \Sigma_i$	소염
	$\Sigma < \Sigma_i$	재점화

이러한 간단한 연소상태 mapping을 활용하여 난류화염의 거시적 소화를 예측할 수 있다. 층류화염소의 소화조건에 대한 기본적인 mapping을 표 1 과 같다는 가정 하에, 각각의 화염구획에 주어진 난류유동장에 해당하는 스칼라 소산률의 random walk을 적용할 수 있다. 그러면 그림 3에 주어진 quenching hole의 초기상태에서 지속적으로 소화와 회생이 반복되면서 난류화염에서 화염면의 확률의 변화에 대한 평형치로 수렴할 것이다. 따라서 난류화염내에 화염면이 소멸되는 난류유동의 조건으로부터, 난류화염의 거시적 소화조건이 도출될 수 있다.

이와 같은 방법을 활용하여 Hartley와 Dold는 작은 수의 경우에 대해서 난류화염에서 연소가 발생하는 구획의 확률을 계산하는 Lagrangian 수치모사를 실시하였다. 그들이 발견한 사실은 스칼라 소산률의 평균치가 증가할수록 화염내에서 부분적으로 소화될 확률이 점진적으로 증가하며, 스칼라 소산률의 평균치가 Σ_q 과 Σ_c 사이의 특정한 값에 이르면 난류화염의 완전한 소화가 발생한다는 사실을 밝힌 바가 있다. 이와 같이 난류화염의 연소상태를 유동조건에 대한 평균치로 서술한 관계식은 난류화염에 대한 수치모사를 실시할 경우, 각 grid의 연소상태 및 소화조건을 판별할 수 있는 subgrid model로 활용될 수 있다.

지금까지 설명된 기법은 Lagrangian기법을 이용하여 quenching hole의 동적 특성을 모사

할 수 있는 가장 단순한 기법의 하나이다. 위에서 설정된 화염의 연소상태 변화에 대한 보다 정교한 기본 mapping을 설정하여 Lagrangian 모사가 가능할 수 있다. 또한 edge flame의 전파에 관한 완벽한 정보를 포함하는 hole dynamics를 모사하기 위해서는 Eulerian 기법을 활용한 수치모사기법도 가능할 수 있다. 그러나 Eulerian 기법을 채택한 DNS를 수행할 경우, 수치해석의 난이도 및 계산비용이 급격히 증가할 것을 예측하는 것은 어렵지 않으며, 또한 계산의 정확도에 대한 개선도가 클 것인지도 아직 미지수이다.

5. Lewis수의 영향

지금까지는 edge flame을 채택한 모델을 활용하여, turbulent flame brush의 연소상태를 예측할 수 있는 모델에 대하여 알아보았다. 그러나 edge flame도 일반 화염과 같이 매우 복잡한 동적 특성을 보여주고 있다. 특히 기하학적인 특성에 의해서 열확산과 물질확산의 균형이 edge flame의 동적 특성에 미치는 영향이 매우 클 것임을 상상하는 것은 어렵지 않다. 따라서 열확산의 반응물 확산에 대한 비를 나타내는 Lewis 수가 edge flame의 동적 특성에 미치는 영향을 살펴보는 것은 Lewis 수가 1에서 벗어나는 화염의 소화특성을 예측하는데 중요한 시사점을 제공할 것이다.

Lewis수가 1보다 작은 시스템에 대한 동적 특성의 변화를 Thatcher와 Dold의 최근 논문이 아주 잘 보여주고 있다 [10]. 2차원 대향류에 위치한 확산화염의 일부가 유동이 균일한 폭방향의 한 쪽에서 소화되었을 때, 선단이 전진 또는 퇴각할 수 있는 edge flame이 형성된다. 이러한 화염형상에 대해서 Lewis 수와 Damköhler수를 변화시켜가면서 edge flame의 전진속도의 변화와 이에 따르는 화염구조의 변화를 수치해석을 이용하여 모사를 수행하였다.

Lewis 수가 감소함에 따라서 열확산에 의한 열에너지의 손실과 비교해서 물질확산에 의한 화학에너지의 유입이 강화되므로, 화염의 선단에서 화학반응의 강도가 증폭되게 되며, edge flame은 소화된 지역으로 전진하려는 특성이 강화된다. 따라서 Thatcher와 Dold의 수치모사에서는 Lewis수가 작아짐에 따라서 edge flame이 퇴각하는 failure wave solution이 나타나는 영역이 축소함을 보여주고 있다. (즉, Σ_c 가 Σ_q 에 가까워진다) 특히 Lewis수가 더욱 감소하여, 특정한 Lewis수 L_c 에 다다르게 되면, edge flame의 천이점이 준정상 소화조건 (즉, S-curve의 전환점)과 일치하는 교차현상이 발생하게 되며, Lewis 수가 L_c 보다 작아지게 되면, 소화조건 보다 큰 화염 스트레치 조건에

서도 전진하는 edge flame이 존재할 수 있다.

소화조건을 통과한 후에도 전진하는 edge flame이 존재하기 위해서는 일정한 전체 조건을 만족시켜야한다. Edge flame의 꼬리 쪽으로 먼 지역에 있는 화염은 일반적 확산화염과 동일한 성질에 접근적으로 접근할 것이다. 따라서 이러한 화염은 정상적인 조건에서는 소화조건을 통과한 상태에서 화염의 상태로 남아있을 수가 없다. 그러나 Lewis 수가 감소함에 따라 확산화염에서도 diffusional-thermal instability (이하 DTI)에 의해서 cellular instability가 발생할 수 있으며 [11], 불안정성의 결과로 일정한 간격의 띠 형태를 갖는 새로운 형태의 화염으로 재구성될 수 있다. 이러한 bifurcation 현상을 거침에 따라서 새로이 생성된 화염은 소화조건을 이미 통과한 상태에서도 화학반응을 유지할 수 있게된다. 이와 같은 확산화염에서 발생할 수 있는 셀 불안정성의 구체적인 성질이 이미 Kim의 해석에 의해서 밝혀진 바가 있으며 [12], Lee와 Kim이 [13] Thatcher와 Dold가 채택한 유동장과 동일한 유동장에서 수행한 비선형상태의 수치모사에서는 다양한 띠 형태의 화염형상이 소화조건을 통과한 연소조건에서도 존재할 수 있음을 밝힌 바 있다. 따라서 소화조건 이후에도 전진하는 edge flame이 존재하기 위해서는 DTI에 의한 띠 형태의 화염이 먼저 형성되어야 하므로, DTI가 발생할 수 있는 임계 Lewis수는 언제나 L_c 보다 약간 커야된다. 특히 Thatcher와 Dold의 수치모사에 의하면 소화조건 이후에도 전진하는 edge flame에서는 항상 확산화염 지역에서 띠 형태의 화염구조가 발견되었다.

또한 Thatcher와 Dold의 수치모사에서는 소화점을 통과한 뒤에는 다양한 형태의 bifurcation해가 발생하였는데, 이는 불안정성에 의한 확산화염의 bifurcation과 밀접한 관계가 있는 것으로 예측되고 있다. 그러나, 아직 이러한 해들 사이의 정확한 비선형적 관계는 밝혀지지 않았다.

Thatcher와 Dold의 수치모사 및 Lee와 Kim의 수치모사 결과로부터 Lewis수가 매우 작은 화염에서는 준정상 소화조건보다 가혹한 연소조건에서도 화염이 존재할 수 있을 뿐만 아니라, 전진하는 edge flame 때문에 이미 소화되었던 영역도 반응지역으로 회생될 수 있는 가능성이 있다는 사실을 알 수 있다. 이러한 조건을 활용한 새로운 난류계산을 실시할 경우, 기존의 결과와는 매우 상이한 난류화염의 소화조건을 도출할 수 있다.

Lewis수가 작은 경우에는 edge flame의 강도가 증가하는 것과 반대로 Lewis수가 큰 경우

에는 과도한 열손실에 의해서 edge flame의 강도도 약해진다. 이러한 결과로 edge flame퇴각하는 지역이 확장되며, 따라서 난류화염의 소화조건도 준정상 소화조건보다 훨씬 앞서서 발생할 수 있다. 더욱이 Lewis수가 DTI에 의해서 맥동 불안정성이 발생할 수 있는 영역으로 진입할 경우에는 edge flame도 맥동 불안정성을 보일 수 있다. 최근에 Buckmaster는 Lewis 수가 매우 큰 경우 맥동 불안정성을 보이는 edge flame에 대한 수치모사결과를 제시한 바가 있다 [14]. 그러나 아직까지 edge flame의 맥동 불안정성에 대한 자세한 동적 특성을 밝혀줄 수 있는 수치실험은 수행된 바가 없다.

예혼합화염과 확산화염의 맥동불안정성에 대한 비선형 안정성 해석의 결과를 인용하면 이들 화염의 맥동 불안정성은 stable limit cycle에 존재하지 않는 subcritical bifurcation의 특성을 보이는 것으로 확인되었으며, 이로 인해서 맥동 불안정성이 발생하기 이전의 상태에서도 초기의 섭동이 충분히 크기만 하다면 맥동의 진폭이 한없이 증가하다가 결국은 화염의 소화로 이어진다는 사실도 확인되었다 [15, 16]. 그러나 edge flame에 대한 맥동 불안정에서는 limit cycle의 비선형적 특성뿐만 아니라, 맥동 불안정성이 발생할 수 있는 임계 Lewis수가 확산화염 또는 예혼합화염의 맥동 불안정성에 대한 임계 Lewis수와 어떠한 관계를 갖고 있는지도 아직 밝혀져야 될 과제의 하나이다.

6. 결론

지금까지 edge flame에 대한 기본 특성과 edge flame을 활용한 난류화염의 소화조건을 예측할 수 있는 난류연소의 모델링 기법에 대해서 간단히 알아보았다. 또한 Lewis수의 변화에 따라서 발생할 수 있는 edge flame의 다양한 동적 특성에 대해서도 알아보았다.

지금까지 알려진 동적 특성에서와 같이 edge flame은 기존의 예혼합화염 및 확산화염이 보일 수 있는 다양한 형태의 불안정성에 기인한 동적 특성을 보일 수 있음이 확인되었으나, 구체적인 수학적 물리학적 특성은 아직 밝혀진 바가 없다. 특히 이러한 동적 특성이 난류화염이 소화되는 현상에 지대한 영향을 미치므로 이에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 될 것이다.

또한 edge flame을 활용한 난류화염의 모사 기법은 난류화염의 거시적인 소화조건을 예측하는데 활용될 수 있을 뿐만 아니라 지금까지 만족할 만한 모델이 없었던 불연탄화수소의 발생량을 예측하는데도 활용될 수 있는 모델이므로 이에 대한 보다 많은 연구 노력이 투입될

필요가 있다.

후기

이 연구는 한국과학재단의 특정기초연구사업의 지원을 받아서 수행되었습니다.

참고문헌

1. Dold, J. W., *CF* **76**, 71 (1989).
2. Buckmaster, J. D., *CST* **115**, 41 (1996).
3. Kobayashi, H., Tamura, T., Maruta, K., Niioka, T., and Williams, F. A., *PCI* **26**, 389 (1996).
4. Linan, A., and Williams, F. A., *Fundamentals Aspects of Combustion*, Oxford Univ. Press (1993).
5. Vedarajan, T. G., Buckmaster, J. D., and Ronney, P. D., *PCI* **27**, 537 (1998).
6. Shay, M. L., and Ronney, P. D., *CF* **112**, 171 (1998).
7. Chung, T. M., Ko, Y. S., and Chung, S. H., Poster No. 5-G02, 28th Int'l Symp. Combustion (2000).
8. Aung, K., and Ronney, P. D., Paper No. 99F-43, *WSS/CI Meeting* (1999).
9. Hartley, L. J., Ph.D. Thesis, UMIST (1991).
10. Thatcher, R., and Dold, J. W., To Appear in *CTM* (2000).
11. Kim, J. S., Williams, F. A., and Ronney, P. D., *JFM* **327**, 273 (1996).
12. Kim, J. S., *CTM* **1**, 13 (1997).
13. Lee, S. R., and Kim, J. S., *CTM* **4**, 29 (2000).
14. Buckmaster, J. D., and Zhang, Y., *CTM* **3**, 535 (1999).
15. Joulin, G., and Sivashinsky, G., *CST* **55**, 83 (1987).
16. Sohn, C. H., Chung, S. H., and Kim, J. S., *CF* **117**, 404 (1999).