

# 층류화염편 모델을 이용한 난류 비예혼합 화염장 해석

김 용 모\*

## Flamelet Modeling of Turbulent Nonpremixed Flames

Yong-Mo Kim

**Key Words :** Nonpremixed turbulent combustion, Flamelet Modeling, Spray combustion, Unsteady flamelet, multiple flamelets.

### Abstract

The flamelet concept has been widely applied to numerically simulate complex phenomena occurred in nonpremixed turbulent flames last two decades, and recently broadened successfully the applicable capabilities to various combustion problems from simple laboratory flames to gas turbine engine, diesel spray combustion and partially premixed flames. The paper is focused on brief review of recently noticeable work related to flamelet modeling, which includes Lagrangian flamelet approach, RIF concept as well as steady flamelet approach. The limitation of steady flamelet assumption, the effect of transient behavior of flamelets, and the effect of spray vaporization on PDF model have been discussed.

### 1. 서 론

비예혼합 난류 화염장내에서 일어나는 복잡한 물리적 현상들을 모사하기 위해 층류화염편 (laminar flamelet) 모델은 널리 사용되어 왔으며, 최근 들어 제트화염[2-4], 가스터빈 연소기[5], 디젤 분무연소[6,7] 및 부분예혼합 화염[8] 등의 여러분야에 대해 그 적용성이 확대되고 있다[9]. 이에 대한 이유로서, 층류

화염편 모델은 상세화학반응, 편중확산 및 soot 생성과정과 같은 복잡한 연소현상들을 난류유동장과 분리하여 효과적으로 고려할 수 있다는 점을 들 수 있다. 층류화염편 모델들의 공통된 특징은 난류화염내의 국소화염구조를 본질적으로 1 차원적인 층류화염구조를 가지는 층류화염편의 앙상블로 가정하는 것이다. 이때, 난류유동은 층류화염편들을 신장시키거나 주름지게 함으로써 층류화염편내의 물질 및 열에 대한 분자단위 확산을 지배하여 화학반응에 영향을 미치게 된다. 이때, 층류화염편들에

\*한양대학교 기계공학부

대한 난류의 영향은 스칼라 소산율  $\chi$ 로 정의되는 하나의 파라미터를 통해 나타나며 이 스칼라 소산율은 층류화염편내의 확산시간의 역수에 비례한다.

층류화염편의 지배방정식에 구하기 위해서는 두 가지 서로 다른 방법이 존재한다. 첫번째로는, 층류화염편을 층류 대향류 확산화염(laminar counterflow diffusion flame)으로 가정하는 것이다. 이때, 나타나는 2 차원 화염구조는 상사해 변환을 통해 1 차원으로 나타낼 수 있으며, Sandia 연구소에서 개발한 OPPDIF 코드[10]등을 통해 해석할 수 있다. 또 다른 방법으로서, Peters 는 화학종 및 에너지 보존방정식으로부터 층류화염편내 반응면에 수직방향을 주방향으로 하는 좌표변환을 통해, 혼합분율을 매개변수로 층류화염편내의 혼합과정 및 화학반응을 동시에 지배하는 1 차원 상미분 연립방정식을 유도하였다 [1,11]. 이렇게 서로 다른 접근방법에 의해 구해지는 층류화염편 방정식들은 서로 밀접한 연관[11]을 가지나, 본 연구자의 경험으로는 두번째로 제시한 Peters 방정식으로 불리우는, 혼합분율공간에서 층류화염편방정식을 직접적으로 구하는 방법이 첫번째 방법인 대향류 확산화염 방정식을 사용하는 것보다 몇가지 장점을 가진다고 생각되어진다. 우선, 대향류 확산화염 방정식을 사용하는 것은 연료와 산화제 사이의 공간좌표에 따라 구해지는 수치해를 혼합분율에 대해 나타내야하는 추가적인 좌표변환을 필요로 하므로, Peters 방정식을 사용하는 것이 보다 직접적이고 편리하다. 이러한 장점은 이후에 설명하였듯이, 비정상 층류화염편 방정식을 CFD solver 내에서 반복적으로 풀어야 하는 경우 매우 유리하다. 또 한가지 이유로서,

Ferreira 는 위의 두 가지 방법을 이용해 수소제트화염을 해석한 수치연구를 통해, 전체변형율(global strain rate)를 파라미터로 하는 대향류 확산화염방정식으로는 라디칼들이 비평형화학반응에 의한 초과평형농도가 하류로 감에 따라 평형상태로 변해가는 감쇠율을 적절히 예측할 수 없음을 밝힌바 있다[12].

층류화염편 모델을 사용하는 일반적인 방법은 층류화염편들의 난류장에 대한 반응속도가 무한히 빠르다고 가정하는 것이며, 이때, 난류화염계산에 앞서 층류화염편 방정식의 정상상태 해를 구함으로써 순간적인 열화학적 상태량들을 테이블화시킨 층류화염편 라이브러리(flamelet library)를 구성할 수 있다. 그러나, 층류화염편에 대한 정상상태 가정이 더 이상 유효하지 않은 몇 가지 상황들이 존재하며, 이를 해결하고자 하는 몇 가지 주목할 만한 연구들이 최근에 진행되었다. 예를 들어, 부상화염내의 국소소염 및 재점화, 그리고 고압 분사된 분무연소시 자발화 및 연소현상등과 같이 본질적으로 비정상적인 연소현상들에 대해서는 정상상태 층류화염편모델을 사용할 수 없게 된다. 또한 정상상태 층류화염편모델을 사용하는 경우, 복사열전달 및 NOx 생성과 같이 매우 느리게 일어나는 물리현상을 고려하기 위해서는 별도의 모델링을 필요로 하는 제약이 따르게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제들에 대한 최근 주목할 만한 연구들을 소개하고자 한다.

## 2. Flamelet Equations

### 2.1 The counterflow diffusion flame

층류화염편 가정하에 물리적인 국부

화염구조는 Fig. 1 에서 나타낸 층류 대향류 확산화염으로 생각할 수 있다 [1]. 이때, 확산화염면은 일반적으로 정체면(stagnation plane)의 산화제쪽에서 나타나는 이론당량 혼합기에서 형성된다.

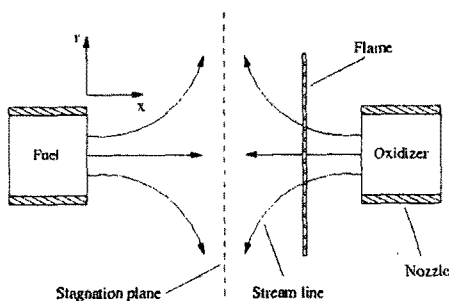


Fig. 1 Configuration of laminar counter flow diffusion flame

이러한 이차원적인 유동구조는 상사해 변환을 통해 아래와 같이 1 차원적인 지배방정식으로 표현될 수 있다[10].

$$\rho \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho Y_i V_i) - \dot{w}_i = 0 \quad (1)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) + \sum_{i=1}^N \rho c_{p,i} Y_i V_i \frac{\partial T}{\partial x} + \sum_{i=1}^N h_i \dot{w}_i - \frac{\partial p}{\partial t} + \dot{q}_{rad}'' = 0 \quad (2)$$

여기서, 확산속도는 다음과 같다.

$$V_i = \frac{1}{X_i M} \sum_{j=1}^N M_j D_{ij} \frac{\partial X_j}{\partial x} - \frac{D_i^T}{\rho Y_i} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

이와 같은 방법을 통해 상세화학반응과 자세한 분자단위 물질전달량을 고려한 해석이 가능하였으며, 대표적인 예로서 Sandia 연구소의 OPPDIF 코드[10]를 들 수 있다. 이 경우, 비평형 화학반응의 정도를 나타내는 파라미터는 전체변형율  $K$  로 주어지며, 이는 계산상에서 속도구배  $a$  로 변환되어진다. 이때, 대

표적인 스칼라소산율은  $a$  를 통해 구해진다.

## 2.2 The Peters transformation

위에 제시한 대향류 확산화염 방정식과는 또 다른 방법으로서, 화염장내의 물리적 좌표계에서 나타나는 화학종 및 에너지 보존방정식을 Fig. 2 와 같이 혼합분율의 등위면으로 변환시키고 order of magnitude analysis 를 통해 다음과 같은 층류화염편 방정식을 유도할 수 있다[1,11].

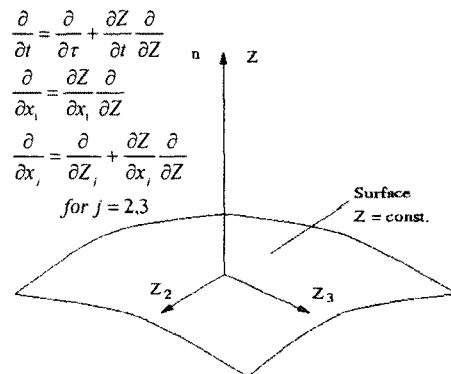


Fig. 2 Peters transformation

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{\chi}{2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + \frac{\dot{w}_i}{\rho} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\chi}{2} \frac{1}{c_p} \frac{\partial^2 h}{\partial Z^2} - \frac{\chi}{2} \frac{1}{c_p} \sum_{k=1}^N h_k \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} - \frac{1}{\rho c_p} \left( \sum_{k=1}^N h_k \dot{w}_k - \frac{\partial p}{\partial t} + \dot{q}_{rad}'' \right) \quad (5)$$

여기서, 식(4)와 (5)는 모든 화학종에 대해 동일한 확산계수를 갖는다는 가정에 유도되었다. Pitsch 와 Peters [11]는 편중확산을 고려하도록 확장된 Peters 방정식을 유도하였으며, 대향류화염 방정식, 식(1)과 (2)와의 연관성을 상세히 언급하였다.

계산이라는 측면에서 볼 때, 층류화염

편 방정식에 대한 정상상태 해를 구하는 경우, 효율적이고 빠른 modified damped Newton 알고리즘[13]을 사용할 수 있으나, 비정상 계산을 위해서는 충분한 시간 정확도를 보장할 수 있는 LSODE 등과 같은 stiff ODF solver 를 사용하여야 한다.

### 3. Flamelet Modeling

#### 3.1 Steady flamelet approach

층류화염편들의 난류장에 대한 반응속도가 무한히 빠르다고 가정한다면, 국소화염구조는 난류화염장 계산과는 별도로 식(1)과 (2) 또는 식(4)과(5)의 정상상태 해로부터 구할 수 있다. Lentini [2]등은 이를 복사열전달등에 의한 비단열화염계산으로 확장하여, 단열상태로부터의 이탈정도를 나타내는 엔탈피손실(enthalpy defect)  $\zeta$ 를 도입하였다.

이때, 비예혼합 난류화염장내의 한 지점은 다양한 스펙트럼의 스칼라소산율과 엔탈피손실을 갖는 층류화염편에 의해 순간적인 열화학적 상태량 (온도, 질량분율, 반응율 등)가 정의되므로, 그 지점에서의 평균상태량은 층류화염편내의 혼합상태를 지배하는 혼합분율  $Z$ , 비평형화학반응을 지배하는 스칼라소산율  $\chi$ , 그리고 단열상태로부터 이탈정도를 나타내는 엔탈피손실  $\zeta$ 의 다중확률 밀도함수를 통해 다음과 같이 구할 수 있다 [2,4].

$$\tilde{\phi} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^1 \int_0^1 \phi(Z, \chi_{st}, \zeta) \tilde{P}(Z, \chi_{st}, \zeta) dZ d\chi_{st} d\zeta \quad (6)$$

스칼라소산율이 층류화염편의 비평형화학반응에 미치는 영향을 설명하기 위해, Fig. 3 은 CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>-공기 제트화염에 대

해 구성한 flamelet library[4]를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)을 보면, 이론당량비 ( $Z_{st}=0.295$ ) 근처에서 나타나는 온도의 최고값은 스칼라소산율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 급격한 난류혼합에 따라 스칼라소산율이 증가하면, 층류화염편내에서 화염면으로의 분자단위 물질 및 열확산이 항상 시키게 됨으로 반응면에서의 불완전연소가 일어남을 의미한다. 스칼라소산율이 일정한 값( $\chi_{st} \approx 1995 \text{ sec}^{-1}$ )을 넘어서게 되면, 층류화염편은 더 이상 화염을 유지하지 못하고 소멸이 일어나게 된다. 반대로, 스칼라소산율이 0 에 가까이 갈수록 층류화염편은 화학평형상태에 가까워진다. Fig. 3(b)에 나타낸 OH 라디칼의 경우,  $\chi_{st} \approx 150 \text{ sec}^{-1}$  근방에서 초과평형농도가 존재함을 알 수 있으며, 스칼라소산율이 작아짐에 따라 화학평형농도로 감소하게 된다. 이는 매우 빠르게 일어나는 반응에 의해 형성된 라디칼 풀(pool)이 느리게 일어나는 삼체재결합 반응을 통해 소멸되어가는 것을 반영한다. 이러한 비평형화학반응의 영향은 NO 생성율에 직접적인 영향을 미치는 O 라디칼의 경우 보다 현저하게 나타나게 되며, Fig. 3(c)의 경우 O 라디칼의 최대값은 화학평형상태보다 20 배정도 크게 나타남을 알 수 있다. 한가지 더 언급해야 할 것은, NOx 생성과 같이 매우 느리게 일어나는 물리현상은 정상상태 층류화염편 가정에 타당하지 않다는 점이다. 따라서, steady flamelet library 를 사용하는 경우, NOx 생성량을 층류화염편 방정식으로 분리시켜 별도로 모델링하고 후처리과정[4]을 통해 구해야 하므로, 주로 thermal NO 생성만을 고려하는데 국한되어 왔다.

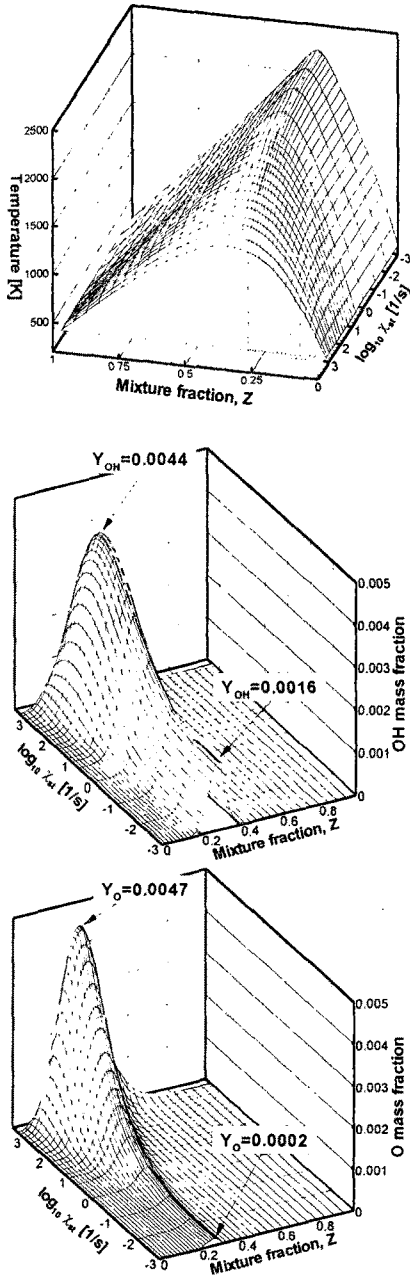


Fig. 3 The  $Z-\chi_{st}$  database of temperature and mass fractions of O and OH at adiabatic ( $\zeta=0$ ) in a steady flamelet library for the CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> flame

### 3.2 Lagrangian flamelet approach

Pitsch 등은 제트화염의 경우 스칼라소산율의 유동방향 변화가 매우 급격하게 나타나므로, NO<sub>x</sub> 생성 및 복사열전달과 같이 매우 느리게 일어나는 물리적 현상을 고려하고자 할 때, 층류화염편의 비정상적 거동을 무시할 수 없음을 밝히고, 이를 고려하기 위해 비정상 층류화염편 모델을 제안하였다 [3].

이 모델의 기본적인 생각은, steady flamelet library를 사용하는 대신에, 연료노즐로부터 유입된 층류화염편이 이론당량선을 따라 하류로 이동하면서 스칼라소산율의 급격한 감소와 함께 겪게 되는 변화를 라그랑지적 관점에서 해석하는 것이다. 이를 통해, 앞서 밝혔듯이 정상 층류화염편 모델에서처럼 복사열전달 및 NO<sub>x</sub> 생성에 대해 별도의 모델링을 필요로 하지 않고, 직접 비정상 층류화염편방정식, 식(4)과 (5)에 포함시켜 고려할 수 있으므로, theraml NO 뿐만 아니라 prompt NO 및 연료 과농혼합기에서의 NO-reburn의 영향을 고려할 수 있다. 층류화염편 모델에서 편중확산을 고려하는 경우, 일반적으로 레이놀즈수가 큰 제트화염에서 편중확산을 노즐근방에서 나타나는 층류영역에 국한되어 나타나며, 전체 화염영역의 경우 난류혼합이 훨씬 지배적이므로, 편중확산을 고려하여 계산한 steady flamelet library를 화염장 전체에 사용하는 것은 부정확한 예측결과를 가져오게 된다. Pitsch는 위에 설명한 라그랑지 층류화염편 모델을 사용하여, 제트화염 내에서 편중확산의 영향을 해석한 바 있다[3]. 또한, 최근에는 이러한 라그랑지 층류화염편 모델을 LES (Lagrange Eddy Simulation) 계산과 결합시켜, 층류화염편 모델이 LES 계산에서도 성공적으로

사용될 수 있음을 보였다 [14]. 그러나, 현재 이 모델은 제트화염이나 파일로트 화염과 같이 일방향성 유동특성을 가지는 경우에만 적용할 수 있으며, 또한 국소화염 및 재점화와 같은 현상을 고려할 수 없는 제약을 가진다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 다중 층류화염 모델로 확장하는 동시에 각 층류화염의 체류시간 및 공간적 분포를 통계적으로 모델링해야 할 것으로 사료된다.

### 3.3 Modeling for local extinction and re-ignition processes

부상화염등에서 나타나는 화염안정화 메커니즘은 그 물리적인 중요성에 의해 지난 수십 년간 많은 실험 및 이론적 연구들이 진행되어 왔으나 아직도 명확히 이론적인 설명이 되지 못하고 있는 주제이다. 초기에 Brays 와 Peters 는 정상 층류화염 모델에서 나타나는 평균 스칼라소산율에 대한 모델링을 새로 제안하여, 부상화염높이를 예측한 바 있다 [15]. 하지만, 소염된 층류화염편들이 재점화되는 현상을 스칼라 소산율과 초기 혼합상태등에 영향을 받는 비정상적인 현상이므로 정상상태 층류화염 모델로서 고려할 수 없다. Ferreira 는 이러한 비정상거동의 영향을 고려하기 위해 특성화염시간과 반응진행변수를 추가로 도입한 “unsteady flamelet library”을 사용하였다[12]. 반면, Chen 등은 부분에혼합 화염에 적용할 수 있는 모델로서 G-방정식을 사용한 level set approach 와 비예혼합 층류화염 모델을 결합시키므로써 화염안정화 메커니즘에서 나타나는 국소소염 및 재점화현상을 모델링하였다[8].

### 3.4 RIF(Representative Interactive Flamelet) concept

고압으로 분사된 분무연소장의 경우, 시간에 따른 급격한 혼합분율의 변화가 존재하므로, 더 이상 층류화염편들이 스칼라소산율의 변화에 준정상상태로 적용할 수 없는 상황이 존재한다. 이러한 조건하에서 일어나는 층류화염편들의 비정상적 거동 및 자발화현상등을 모델링하기 위해, Pitsch 와 Peters 는 RIF (Representative Interactive Flamelet) 모델을 개발하였다[6]. RIF 모델에서는 층류화염 모델 사용함으로써 상세화학 반응을 난류유동장과 효과적으로 분리하여 고려하였으며, 각각의 층류화염편은 자신의 영역에서 통계적으로 평균된 스칼라소산율에 대응하는 비정상상태의 거동을 나타내게 된다. 따라서, Fig. 4 에서 나타나듯이 비정상 층류화염 계산에 의한 국소화염구조와 CFD 계산에 의한 난류유동장의 결과가 시간변화에 따라 반복되면서 상호결합하여 분무연소장의 변화를 모사하게 된다. RIF 모델의 장점은 자발화 및 예혼합-확산화염의 모드전환 그리고 NOx 및 soot 생성에 대한 상세메커니즘들을 각각을 별도로 모델링없이 상세화학반응식을 통해 고려할 수 있다는데 있다.

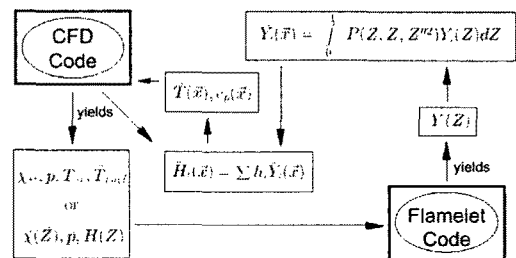


Fig. 4 RIF (Representative Interactive Flamelet) concept

최근들어, Barths 등은 여러 개의 층류화염편들이 각각 주어진 공간 및 시간에 따라 분포할 수 있는 확률밀도함수를 구함으로서, 공간적으로 스칼라소산율의 비균일 분포를 고려할 수 있도록 확장한 multiple-RIF 모델인 Eulerian Particle Flamelet 모델[7]을 제안하였다. 또한 Coelho 등[16]은 실제버너내의 정상상태 난류연소장에서의 연소과정 및 공해생성을 예측하기 위해 위의 이러한 multi-RIF 모델을 적용하였다.

### 3.5 Effect of spray vaporization on PDF approach

지금까지 비정상 고압분무연소장에 적용된 RIF 모델의 경우[6,7]나 정상상태 분무연소장에 정상 층류화염편모델을 적용한 연구들[17]을 통해 층류화염편 모델은 분무연소장을 예측하는 데 충분한 가능성을 가지고 있다고 알려졌다. 이와는 별도로 확률밀도함수를 사용하는 연소모델을 분무연소장에 확장하여 사용하는 경우, 액적증발에 의한 영향들을 별도로 고려하지 않고 그대로 사용되어 왔다. 그러나, 최근에 Reveillon 과 Vervisch[18]는 액적증발을 수반하는 균일한 난류유동장에 대한 DNS 결과를 토대로, 액적증발이 혼합분율의 분산과 스칼라소산율에 미치는 영향을 무시할 수 없음을 밝힌바 있다. 이 연구결과에서는 액적증발의 시간척도가 상대적으로 작아질수록 혼합분율의 분산은 훨씬 더 커지고, 이에 따라 스칼라소산율 역시 증가함을 나타내었다. 이를 바탕으로 액적증발이 혼합분율의 분산과 스칼라소산율에 미치는 영향을 고려할 수 있는 의 영향을 나타내는 SDM(Single Droplet Model)을 제안하였다.

이와는 별도로, Demoulin 과 Borghi [19]

는 MIL (Lagrangian Intermittent Model) 모델을 분무연소장으로 확장하는 과정에서 혼합분율의 분산에 대한 수송방정식에서 액적증발에 의해 나타나는 항들을 액적표면에서의 델타함수로 가정한 확률밀도함수를 통해 보다 간단히 모델링하였으며, 액적증발에 의해 연료증기가 연소장에 생성되므로, PDF 모델에서 혼합분율의 상한경계가 1 보다 작아짐을 고려해야 하기 위하여 이 값에 대한 추가적인 수송방정식을 풀어야 함을 지적하였다.

## 4. 결론

본 논문을 통해, 층류화염편 모델의 공통된 물리적 가정과 이를 통해 유도되는 층류화염편의 지배방정식을 살펴 보았다. 그리고, 정상 층류화염편 모델에서 스칼라소산율을 통해 난류혼합이 국소화염구조의 비평형화학반응에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 정상상태 층류화염편 가정의 적용한계와 이를 개선하고자하는 비정상 층류화염편 모델에 대한 여러가지 연구들을 소개하였다. 마지막으로 PDF 모델을 이용한 난류연소모델을 분무연소장으로 확장하는 데 있어서, 액적증발이 미치는 영향을 고려한 연구들에 대해 언급하였다.

## 참고문헌

- (1) Peters, N. (1984) Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion, Prog. Energy Combust. Sci. vol. 10, pp.319-339.
- (2) Marracino, B. and Lentini, D. (1997) Radiation modeling in non-luminous nonpremixed turbulent flames, Combust.

- Sci. and Tech., vol.128, pp.23-48.
- (3) Pitsch, H (2000) Unsteady flamelet modeling of differential diffusion in turbulent jet diffusion flames, *Combustion and Flame*, vol.123, pp.358-374.
  - (4) Kim, S.-K., Kang, S.-M., and Kim Y.-M. (2000) Flamelet modeling of flamelet structure and NO<sub>x</sub> Formation in the turbulent nonpremixed CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> jet flames, preparing for publication.
  - (5) Barths, H., Peters, N., Brehm, N., Mack, A., Pfitzner, M, and Smiljanovski, V. (1998) Simulation of pollutant formation in a gas turbine combustor using unsteady flamelets, 27<sup>th</sup> Symposium (Int.) on combustion, pp.1841-1847, The Combustion Institute, Pittsburgh.
  - (6) Pitsch, H, Barths, H, and Peters, N. (1996) Three-dimensional modeling of NO<sub>x</sub> and soot Formation in DI-diesel Engines using detailed chemistry based on the Representative Interactive Flamelet approach, SAE paper 962057.
  - (7) Barths, H., Hasse, C., Bikas, G., and Peters, N. (2000) Simulation of combustion in DI diesel engines using an Eulerian Particle Flamelet Model, 28<sup>th</sup> Symposium (Int.) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh.
  - (8) Chen, M., Herrmann, M., and Peters, N. (2000) Flamelet modeling of lifted turbulent methane/air and propane/air jet diffusion flames, 28<sup>th</sup> Symposium (Int.) on combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh.
  - (9) Peters, N (2000) *Turbulent combustion*, Cambridge university press.
  - (10) Lutz, A., Kee, R., J., Grcar, J. F., and Rupley (1996) OPPDIF: A Fortran program for computing opposed-flow diffusion flames, Sandia Report, SAND96-8243, Livermore.
  - (11) Pitsch, H. and Peters, N. (1998) A consistent flamelet formulation for non-premixed combustion considering differential diffusion effects, *Combustion and Flame*, vol.114, pp.26-40.
  - (12) Ferreira, J. C. (1996) Flamelet modelling of stabilization in turbulent non-premixed combustion, PhD thesis, ETHZ Zuerich, Switzerland.
  - (13) Grcar, J. F. (1992) The TWOPNT program for boundary value problems, Sandia Report, SAND91-8320, Livermore.
  - (14) Pitsch, H. and Steiner, H. (2000) Large-eddy simulation of a turbulent piloted methane/air diffusion flame (Sandia Flame D), *Physics of Fluids*, vol.12, no.10, p.4.
  - (15) Bray, K. N. C. and Peters, N. (1994) Laminar flamelets in turbulent flames, In Libby P. A. and Williams, editors, *Turbulent Reacting Flows*, pp.66-113, Academic Press.
  - (16) Coelho, P. J., and Peters, N. (2000) Numerical simulation of a MILD combustion burner, submitted to *Combustion and Flame*.
  - (17) Hollmann C. and Gutheil, E., (1996) Modeling of turbulent spray diffusion flames including detailed chemistry, 26<sup>th</sup> Symposium (Int.) on combustion, pp.1731-1738, The Combustion Institute, Pittsburgh.
  - (18) Reveillon, J. and Vervisch, L. (2000) Spray Vaporization in Nonpremixed Turbulent Combustion Modeling: A Single Droplet Model, *Combustion and Flame*, vol.121, pp.75-90.
  - (19) Demoulin, F. X. and Borghi, R. (2000) Assumed PDF modeling of turbulent spray combustion, accepted for publication in *Combust. Sci. and Tech.*