

<논 문>

## 반응혼합층의 층류확산화염

신 동 신\*

(1994년 8월 13일 접수)

### Laminar Diffusion Flame in the Reacting Mixing Layer

Dong Shin Shin

**Key Words** : Ignition(점화), Premixed Flame(예혼합화염), Diffusion Flame(확산화염), Laminar Flame(층류화염), Reacting Mixing Layer(반응혼합층), Numerical Simulation(수치해석)

#### Abstract

Laminar flows in which mixing and chemical reactions take place between parallel streams of reactive species are studied numerically. The governing equations for laminar flows are from two-dimensional compressible boundary-layer equations. The chemistry is a finite rate single step irreversible reaction with Arrhenius kinetics. Ignition, premixed flame, and diffusion flame regimes are found to exist in the laminar reacting mixing layer at high activation energy. At high Mach numbers, ignition occurs earlier due to the higher temperatures in the unburnt gas. In diffusion regimes, property variations affect the laminar profiles considerably and need to be included when there are large temperature differences. The maximum temperature of a laminar reacting mixing layer is almost linear with the adiabatic flame temperature at low heat release, but only weakly at high heat release.

#### 1. 서 론

압축성 반응혼합층은 가스 터빈 연소기의 내부유동을 비롯하여 많은 유동에 존재한다. 이러한 반응혼합층은 연료와 공기의 두 개의 유동으로 나누어지는데 연료와 공기가 분자상태로 혼합되었을 경우 화학반응이 일어나기 시작한다. 연소화학반응에 따른 온도변화는 유동의 열역학적 성질을 변화시키며 유체를 팽창시키는데, 이러한 유동과 화학반응 사이의 강한 간섭은 반응유체의 연구를 어렵게 한다.

연소기내에서는 유동의 체류시간은 매우 짧으므

로 연소기, 특히 공기를 사용하는 램-제트(ram-jet) 로켓의 연소기는 연료와 공기의 효율적인 혼합을 요구한다. 일반적으로 층류유동보다 난류유동에서 혼합이 효율적이며, 이를 위해서 층류는 불안정해야 한다.

유동의 불안정성이 커짐에 따라 혼합층내의 연료와 공기의 혼합이 증가하므로 반응전단층의 불안정성을 이해하면 연료와 공기의 혼합 기술이나 유동 제어기술을 개발할 수 있다. 그러나 이러한 유동의 불안정성을 이해하기 위해서는 층류의 구조를 먼저 이해하여야 한다. 따라서 본 논문은 유동 불안정성을 이해하기 위한 준비단계로서 압축성 반응혼합층의 층류확산화염을 조사한 것이다.

Linān과 Crespo<sup>(1)</sup>는 연료와 공기의 비정상 혼합

\*회원, 홍익대학교 기계공학과

층에서 확산화염의 구조를 조사하였는데, 공간에 대해서는 1차원으로서 유동방향으로의 수직한 구배들만을 고려하였다. 그들은 큰 활성화 에너지 전개 (large activation energy asymptotics)를 통해 혼합층 유동장에 세 층류영역, 즉 점화, 예혼합화염 그리고 확산화염 영역이 존재한다는 것을 밝혔다. 점화 영역에서는 반응물질들이 서로 혼합하여 임의의 거리가 지난 후에 열폭발(thermal explosion)을 일으키며 점화한다. 점화영역화염에서 한쪽은 연료가 이론치보다 높고 다른 한쪽은 이론치보다 낮다. 예혼합화염은 혼합된 연료가 전부 연소될 때까지 화염이 연료나 공기 쪽으로 퍼져나간다. 예혼합화염 후에는 확산화염이 존재하며, 여기서 혼합은 화염에 수직한 방향의 확산에 의해서 이루어진다. 확산화염이 혼합층유동의 대부분을 차지하며 점화 및 예혼합화염 영역은 일부분을 차지하는데, 이러한 영역들은 매우 비선형적이어서 해석이 상당히 어렵다. Marble과 Adamson<sup>(2)</sup>은 정상상태의 2차원 혼합층에 대하여 경계층으로 가정한 후, asymptotics 해석을 하여 점화 및 확산화염 등에 대하여 연구하였다.

본 논문은 평행하게 진행하며 혼합과 화학반응을 일으키는, 두 반응물질로 이루어진 층류화염에 대한 것으로 층류화염에 대한 이해를 증진시킬 수 있을 뿐 아니라 그 결과를 혼합층의 불안정성 해석을 위한 기본유동으로 사용할 수 있다. 반응혼합층의 간단한 모델로서 공기와 연료의 평행한 유동을 사용하며 유한반응률을 가지는 비가역적 Arrhenius 형태의 화학반응을 고려하고, 지배방정식은 Marble과 Adamson<sup>(2)</sup>이 고려한 것과 같이 2차원 압축성 경계층 방정식을 사용하여 계산하며, 그 결과로부터 정상 층류확산화염의 구조를 살펴보도록 한다.

## 2. 지배방정식 및 수치해법

### 2.1 지배방정식

Fig. 1은 유동장을 나타낸다. 문제를 단순화시키기 위해서 유속이 빠른 부분을 연료, 유속이 느린 부분을 공기로 가정하며,  $U_1$ 과  $U_2$ 로 그 유속을 표시한다. 본 논문에서는 두 유동의 속도비,  $U_2/U_1$ 이 0.5인 경우만을 고려한다. 전 유동장에 있어서 전압은 다를지라도 정압은 일정하다고 가정한다. 따라서 연소열은 정압을 증가시키지는 않고 유체를

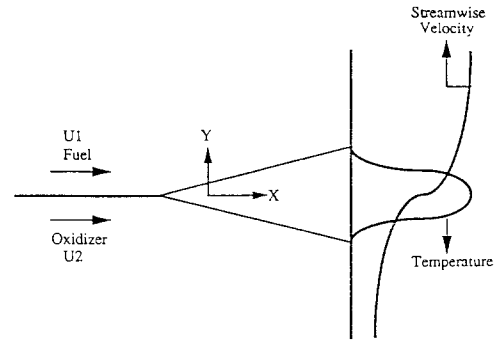


Fig. 1 Schematic diagram of mixing layer

팽창시키기만 한다. 이 가정으로 초음속유동내의 압축파나 팽창파는 본 유동에서는 존재하지 않는다. 프렌틀(Prandtl)수와 루이스(Lewis)수는 1로서 반응물질의 온도 및 농도의 확산율이 운동량 확산율과 같다고 가정한다. 프렌틀수를 0.7로 바꾸는 것은 단지 작은 정량적 차이를 일으킬 뿐이다. 확산계수는 온도  $T$ 와  $P$ 에 다음과 같이 의존한다고 가정한다.<sup>(3)</sup>

$$\mu \propto P^0 T^{0.7}; \quad \alpha \propto P^0 T^{0.7}; \quad D \propto P^{-1} T^{1.7} \quad (1)$$

$\mu$ 는 점성계수,  $\alpha$ 는 온도확산계수,  $D$ 는 물질확산계수를 나타낸다. 화학반응은 1단계 비가역반응으로서 연료  $F$ 가 공기  $O$ 와 반응하여 생성물  $P$ 를 만든다.



$\nu_F, \nu_O$  및  $\nu_P$ 는 각각 연료, 공기, 생성물의 이론계수(stoichiometric coefficient)들이다. 반응률은 빠른 반응(fast chemistry) 또는 화염면(flame sheet) 모델보다 실제 현상에 가까운 Arrhenius의 법칙을 따른다.

계산을 위한 지배방정식으로 화학반응을 포함하는 압축성 이상기체에 대한 2차원 정상 경계층 방정식을 사용한다. 점화 및 예혼합 화염 영역에서는 유동방향으로의 열 및 물질 전달을 유동방향에 수직한 방향으로의 그것들에 대하여 무시할 수 없기 때문에 위와 같은 지배방정식은 제한성을 지닐 수 있으나 본 연구에서는 Lin<sup>(4)</sup>과 Crespo<sup>(1)</sup>와 Marble과 Adamson<sup>(2)</sup>이 가정한 것과 같이 유동방향에 수직한 방향으로의 구배만을 고려하도록 한다. 질량, 운동량, 에너지 및 농도의 보존식과 이상기체 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho v u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho u T}{\partial x} + \frac{\partial \rho v T}{\partial y} = \frac{1}{Pr Re} \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{M_1^2 (\gamma - 1)}{Re} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + Da \omega_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho u y_i}{\partial x} + \frac{\partial \rho v y_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D \frac{\partial y_i}{\partial y} \right) + \omega_i \quad (6)$$

$$\rho T = 1 \quad (7)$$

모든 변수들은 연료유동의 변수들 및 입구 속도분포의 vorticity thickness로 무차원화되어 있으며,  $\rho$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $T$ 는 각각 밀도,  $x$ ,  $y$ 방향의 속도, 온도를 나타내고  $y_i$ 는 연료, 공기 및 생성물의 질량비이며, 하첨자  $i$ 는 연료, 공기 또는 생성물을 나타낸다. Vorticity thickness는 다음과 같이 정의한다.

$$\delta_w^* = \frac{U_1^* - U_2^*}{|du^*/dy^*|_{\max}} \quad (8)$$

상첨자 \*는 차원을 가지고 있음을 뜻한다.  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Sc$ ,  $Da$ 는 무차원수로서 각각 Reynolds 수, Prandtl 수, Schmidt 수, Damköhler 수 들이며,  $\gamma$ 는 비열비,  $M_1$ 는 연료유동의 Mach 수이다.  $\omega_T$ ,  $\omega_i$ 는 열생성률 및 물질  $i$ 의 반응률로서 다음과 같이 정의한다.

$$\omega_T = \frac{Q}{W_F \nu_F} (\rho y_F)^{\nu_F} (\rho y_O)^{\nu_O} \times \exp \left[ -\beta' \left( \frac{1}{T} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

$$\omega_i = \frac{W_i (\nu_i'' - \nu_i')}{W_F \nu_F} (\rho y_F)^{\nu_F} (\rho y_O)^{\nu_O} \times \exp \left[ -\beta' \left( \frac{1}{T} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

$W_i$ ,  $\nu_i'$ ,  $\nu_i''$ 는 각각 물질량, 그리고 반응물질 또는 생성물질의 이론계수(stoichiometric coefficient)들이다. 식 (2)와 같은 반응에서  $\nu_O'$ 은  $\nu_O$ ,  $\nu_O''$ 은 0이 된다.  $Q$ 는 반응열을 나타내는 무차원수로서 다음과 같다.

$$Q = \frac{[h_F W_F \nu_F + h_O W_O \nu_O - h_P W_P \nu_P]}{C_P T_{ref}} \quad (11)$$

$h_i$ 는  $i$ 물질의 생성 엔탈피,  $C_P$ 는 정압비열,  $T_{ref}$ 는 표준온도이다. 무차원 단열 화염온도(adiabatic flame temperature),  $T_{ad}$ 는  $Q$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$T_{ad} = Q + 1 \quad (12)$$

Damköhler 수  $Da$ 는 화학반응시간에 대한 대류유동시간의 비이며,  $\beta'$ 은 무차원 반응활성 에너지로서 다음과 같이 정의한다.

$$Da = \frac{\delta_{\omega_0}^*}{U_1^*} /$$

$$\left[ \frac{W_F \nu_F}{W_F \nu_F W_O \nu_O} B \rho_i^{*(\nu_F + \nu_O - 1)} \exp(-\beta') \right]^{-1} \quad (13)$$

$$\beta' = \frac{E^*}{R_u^* T_1^*} \quad (14)$$

$B$ 는 주기인수(frequency factor)이며,  $E^*$ 는 반응활성 에너지,  $R_u^*$ 는 일반기체상수(universal gas constant)이다. 본 논문에서는  $\nu_F$ ,  $\nu_O$ 는 1이고,  $\gamma$ 는 1.4인 경우만을 고려한다.

## 2.2 수치 해법, 경계조건 및 입구조건

위의 지배방정식은 공간좌표에 대해서 파라볼릭(parabolic)하므로 음해법이며 두 독립변수들에 대하여 2계의 정확도를 가지는 Crank-Nicolson법을 사용하여 계산하였다.

$y \rightarrow \pm \infty$ 일 때  $u$ ,  $\rho$ ,  $y_F$ ,  $y_O$ 에 대한 경계조건은 다음과 같이 상수로 지정한다.

$$u = \rho = y_F = 1, y_O = 0, \text{ as } y \rightarrow \infty \quad (15)$$

$$u = U_2, \rho = \rho_2, y_F = 0, y_O = 1 \text{ as } y \rightarrow -\infty \quad (16)$$

입구조건은 비반응 압축성 혼합층의 경우에 존재하는 속도 및 온도에 대한 상사해<sup>(3)</sup>를 사용하였다. 반응물질의 분포는 중심부에서의 연료 및 공기의 농도가 불연속이 되지 않도록 normalized error function을 사용하였으며, 입구에서 약간의 연료 및 공기가 혼합되는 것을 허용하였다.

## 3. 층류확산화염의 구조

### 3.1 점화, 예혼합화염 및 확산화염영역

Linán과 Crespo<sup>(1)</sup>는 활성 에너지 전개(large activation energy asymptotics)를 통해 확산화염의 구조를 조사하여 점화, 예혼합화염 그리고 확산화염 영역이 존재하는 것을 밝혔다. Jackson과 Hussani<sup>(4)</sup>는 같은 방법을 사용하여 위의 영역들이 속도가 빠른 유동에서도 존재함을 밝혔다. 무차원 반응 에너지 파라미터  $\beta'$ 이 6과 20인 두 가지 경우를 고려하여, 유한반응물을 가지는 압축성 반응혼

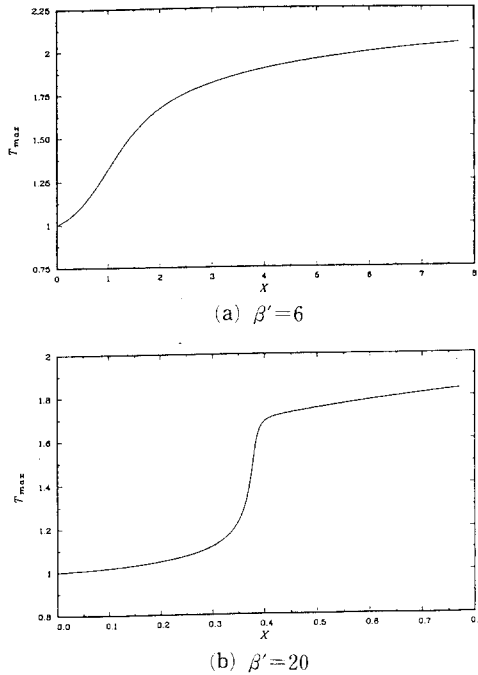


Fig. 2  $T_{\max}$  vs.  $x$ .  $M_1=0$ ,  $T_{ad}=4$

합층에서 위의 영역들이 존재하는가를 살펴보았다. Fig. 2a는  $\beta'=6$ 인 경우에 혼합층의 최고온도  $T_{\max}$ 를 유동방향좌표  $x$ 의 함수로 나타낸 것이다. 이 활성화 에너지의 경우에는  $T_{\max}$ 가  $x=0$ 의 입구온도로부터 예혼합화염의 최고온도를 거쳐 완만하게 확산화염의 최고온도로 변한다. 연료와 공기의 질량비가 중심부에서 1보다 상당히 작기 때문에  $x=6.5$ 에서  $T_{\max}$ 는 주어진 무차원 단일화염온도인  $T_{ad}=4$ 보다 작은 값을 나타내고 있다. Fig. 2b는 Fig. 2a와 같은 조건이나  $\beta'=20$ 인 경우의 결과를 나타낸 것이다.  $x=0.37$ 의 좁은 지역에서  $T_{\max}$ 가 급격히 증가하는데 이 지역이 예혼합화염의 점화위치에 해당한다. 이 점화지역의 시초에는 반응물은 혼합되나, 온도가 너무 낮기 때문에 반응이 거의 일어나지 않고 연료와 공기의 혼합이 일어나게 된다. 혼합된 연료와 공기 사이에서 반응이 일어나기 시작함에 따라 온도가 상승하며 반응물이 급격히 증가하고, 예혼합화염을 만든다. 경계층 방정식이 포물선형 미분방정식이기 때문에 이러한 점화 및 예혼합화염은 기연 지역에서 미연지역으로 열전달이 일어나서 유지되는 화염이 아니고 연료와 공기의 혼합 및 화학반응에 의하여 생성되는 예혼합화염으로 Linán과 Crespo<sup>(1)</sup> 및 Marble과 Adamson<sup>(2)</sup> 등의

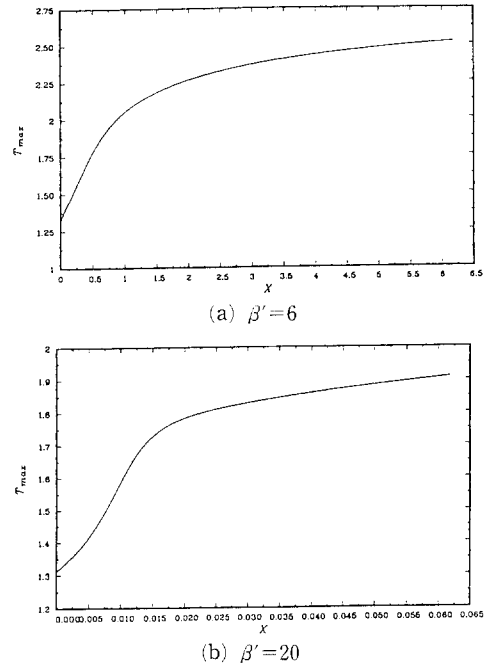


Fig. 3  $T_{\max}$  vs.  $x$ .  $M_1=5$ ,  $T_{ad}=4$

결과와 같은 형태의 예혼합화염이다. 이 예혼합화염은 예혼합된 기체가 전부 연소될 때까지 계속되는데, 점화 및 예혼합화염은 유동장의 매우 좁은 부분을 차지한다. 예혼합화염 뒤에 생기는 확산화염이 대부분의 혼합층을 차지한다.

Fig. 3은  $M_1=5$ 에서의 결과를 나타낸다. 활성화 에너지가 크면, 초음속에서도 점화 영역이 존재하며, 예혼합화염에서 확산화염으로 옮겨가는 것을 쉽게 볼 수 있다. 높은 마하수에서는  $x=0$ 에서의 입구 조건인 상사해의 온도분포가 점성가열 때문에 상당히 높아져 있다.

Fig. 4는 Fig. 2a와 같은 조건하에서 온도, 반응물, 질량비 등의 윤곽선(contour)을 나타낸 것이다. 반응물은 연료의 소비율,  $Da_{of}/\rho$ 로 정의한다.  $\beta'=6$ 의 경우에는 점화 및 예혼합화염을 구별하는 것이 쉽지 않다. 초음속에서도 정성적으로 비슷한 경향을 보인다. 그러나, Fig. 5a에서와 같이 높은 활성화 에너지( $\beta'=20$ )를 가지는 경우에는  $x$ 의 좁은 범위에 걸쳐 급격한 온도상승을 보이는데, 이것이 예혼합화염에 해당한다. 반응물의 윤곽선은 명백히 세 지역의 존재를 보이고 있다. Fig. 5b는 약  $x=0.37$ 에서 점화가 일어나는 것을 보이고 있다. 예혼합화염면은 모든 혼합물이 연소될 때까지

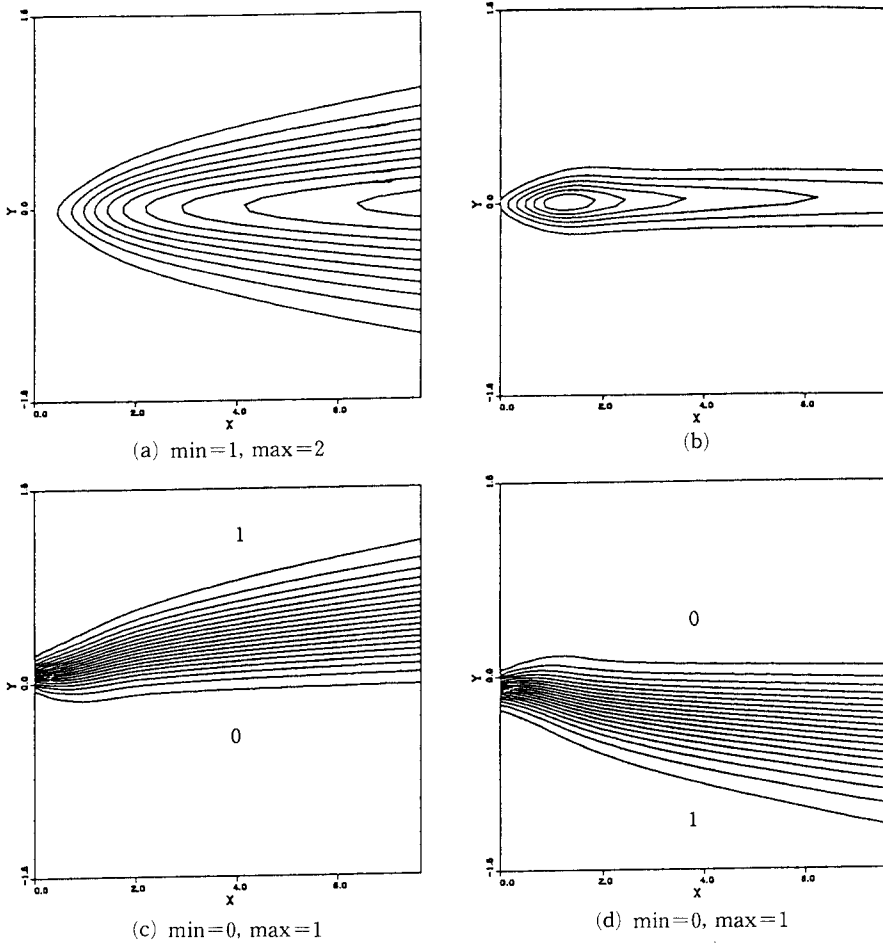


Fig. 4 Contours of the (a)  $T$  (b)  $Da\omega_F/\rho$  (c)  $y_F$  (d)  $y_O$ .  $\beta'=6, M_1=0, T_{ad}=4$

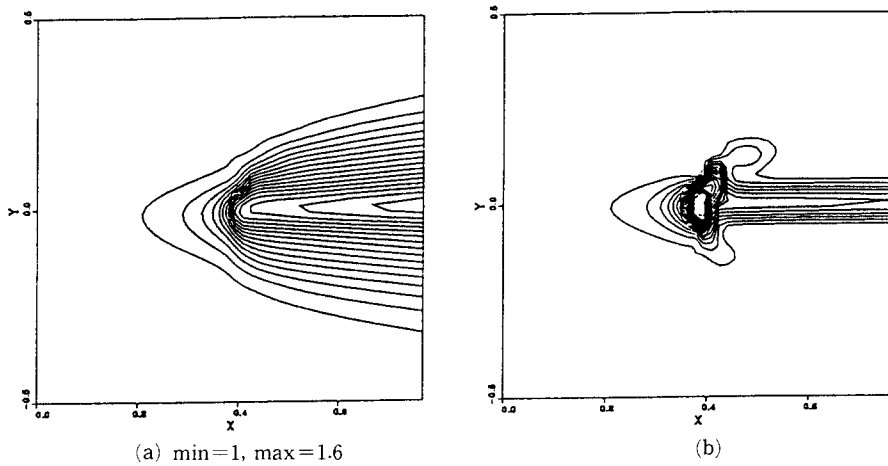


Fig. 5 Continued

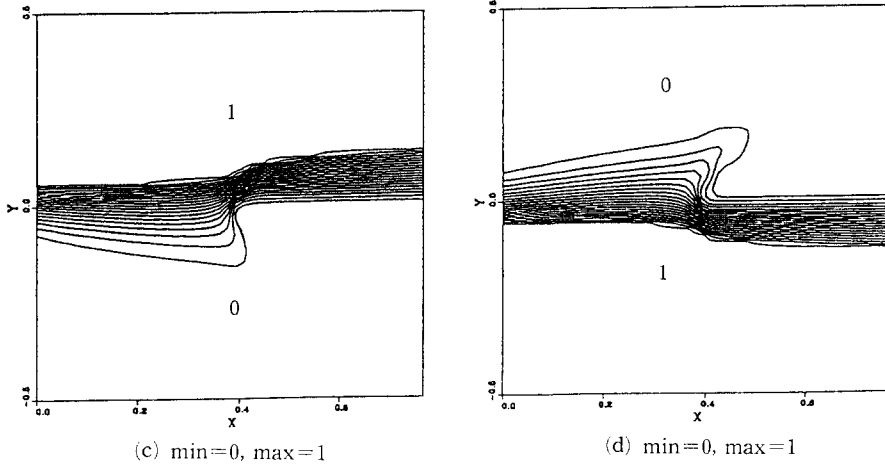


Fig. 5 Contours of the (a) T (b)  $Da\omega_F/\rho$  (c)  $y_F$  (d)  $y_O$ .  $\beta'=20$ ,  $M_1=0$ ,  $T_{ad}=4$

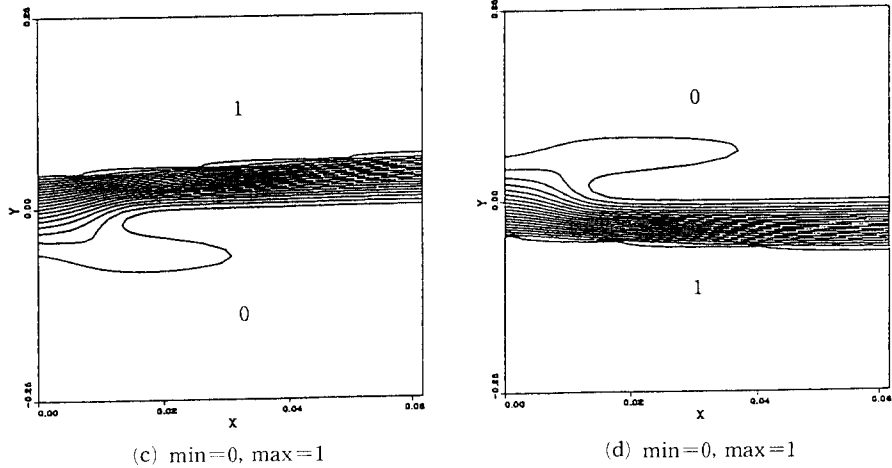
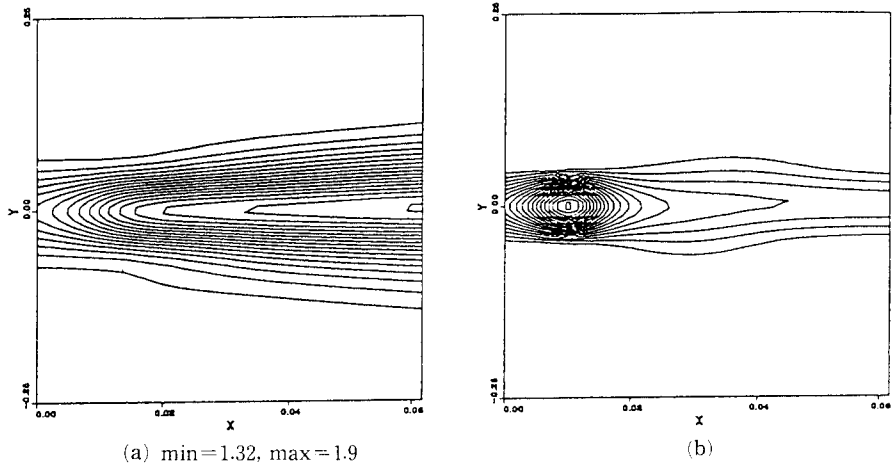


Fig. 6 Contours of the (a) T (b)  $Da\omega_F/\rho$  (c)  $y_F$  (d)  $y_O$ .  $\beta'=20$ ,  $M_1=5$ ,  $T_{ad}=4$

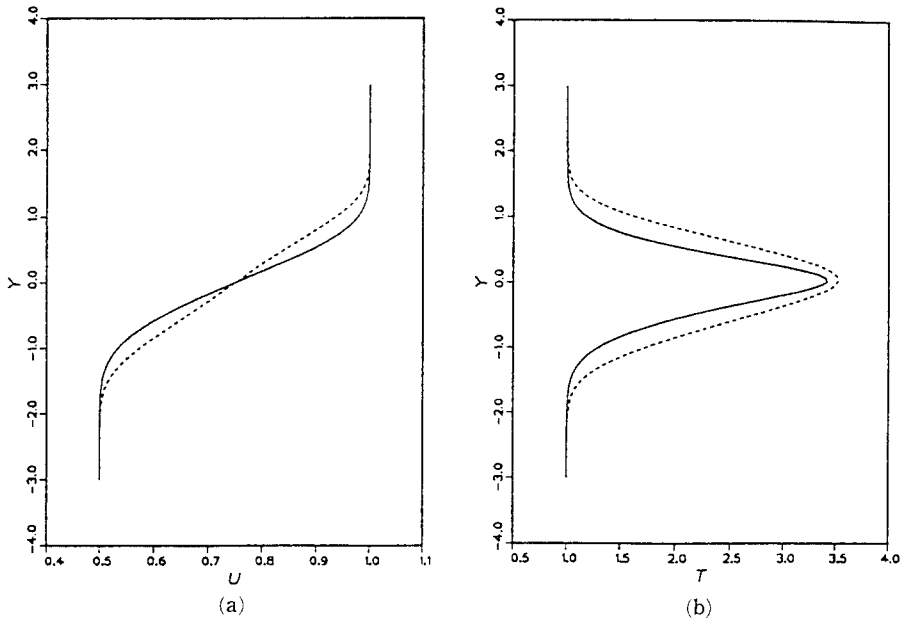


Fig. 7 Effect of variable properties on (a)  $u$  (b)  $T$ .  $Da=10, M_1=0, T_{ad}=8, x=7.7$ . —, constant property ; ---, variable property

바깥쪽으로 퍼져 나간다. 점화지역 바로 다음에 혼합층의 중심부에 위치하는 높은 반응물의 지역이 확산화염이 시작하는 곳이다. 여기서부터 확산화염의 특성이 현저하게 나타나며, 확산화염은 혼합층의 중심부에 존재한다. Fig. 5c는 연료 질량비의 윤곽선을 나타낸다. 연료의 질량비는  $y=\infty$ 의 1에서  $y=-\infty$ 의 0까지 변한다. 점화 전에 연료는 위쪽에서 아래쪽으로 확산되며, 예혼합화염( $x=0.37$ )에서 혼합물은 연소한다. 예혼합화염 뒤에는  $y=0$  아래에 더 이상의 연료가 존재하지 않는다. Fig. 5d는 공기의 질량비를 나타내는데 이는 연료에서의 현상을 역으로 보이고 있다.  $M_1 > 0$ 에서도 같은 경향을 보이는데, Fig. 6은  $M_1=5$ 에서의 결과이다. 온도는 그다지 급격한 상승은 보이지 않으며, 반응물 윤곽선으로부터 입구의 높은 온도 때문에 점화가 상당히 일찍 일어나고, 전체적으로 예혼합화염이 낮은 마하수의 유동보다 경사져 있지 않음을 알 수 있다. 질량비의 윤곽선으로부터 예혼합화염이 존재하는 것을 알 수 있다.

이상으로 층류 반응혼합층이 높은 활성 에너지를 가지는 경우에 점화, 예혼합화염, 확산화염 등이 존재하고, 높은 마하수에서는 미연가스의 높은 온도로 인해 점화가 일찍 일어나는 것도 알 수 있었

다. 다음에는 압축성 반응혼합층의 대부분을 차지하는 확산화염의 구조 및 성질에 대하여 자세히 살펴보도록 한다.

### 3.2 가변확산계수 및 연소열의 영향

가변확산계수의 중요성을 검토하기 위해서 같은 입구조건을 가지는 가변확산계수와 상수확산계수의 두 경우를 비교하였다. Fig. 7은  $x=7.7$ 일 때 두 경우의 층류화염 구조를 나타내며, Fig. 8은 같은  $x$ 에서 연소열과 확산화염의 vorticity thickness를 나타낸다. 가변확산계수들이 유동장의 형태를 상당

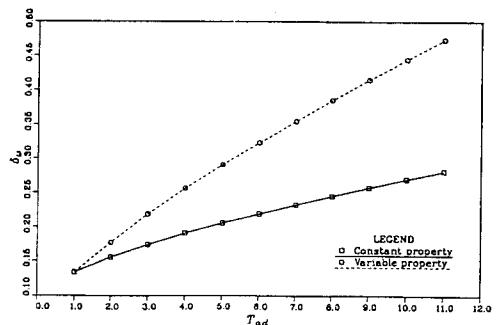


Fig. 8 The growth of vorticity thickness versus  $T_{ad}$ .  $Da=10, M_1=0, x=7.7$

히 변화시키므로 온도변화가 큰 경우에는 유동장 해석에 가변확산계수들을 고려하여야 함을 알 수 있다. 이 유동들은 전단층 두께의 선택 및 점성에 따라서 다른 레이놀즈수를 가질 수 있다.

Fig. 9는 같은 입구조조건을 가지나 다른 연소열을

가지는 경우를 비교한 것이다. 연료유동의 마하수  $M_1$ 은 1이며, 같은  $x$ 에서 확산화염의 구조를 비교한 것이다. 연소열이 증가함에 따라 온도가 증가하고 연료 소비율도 증가한다.

Fig. 10은 최고온도와 표준화된 생성물 두께를

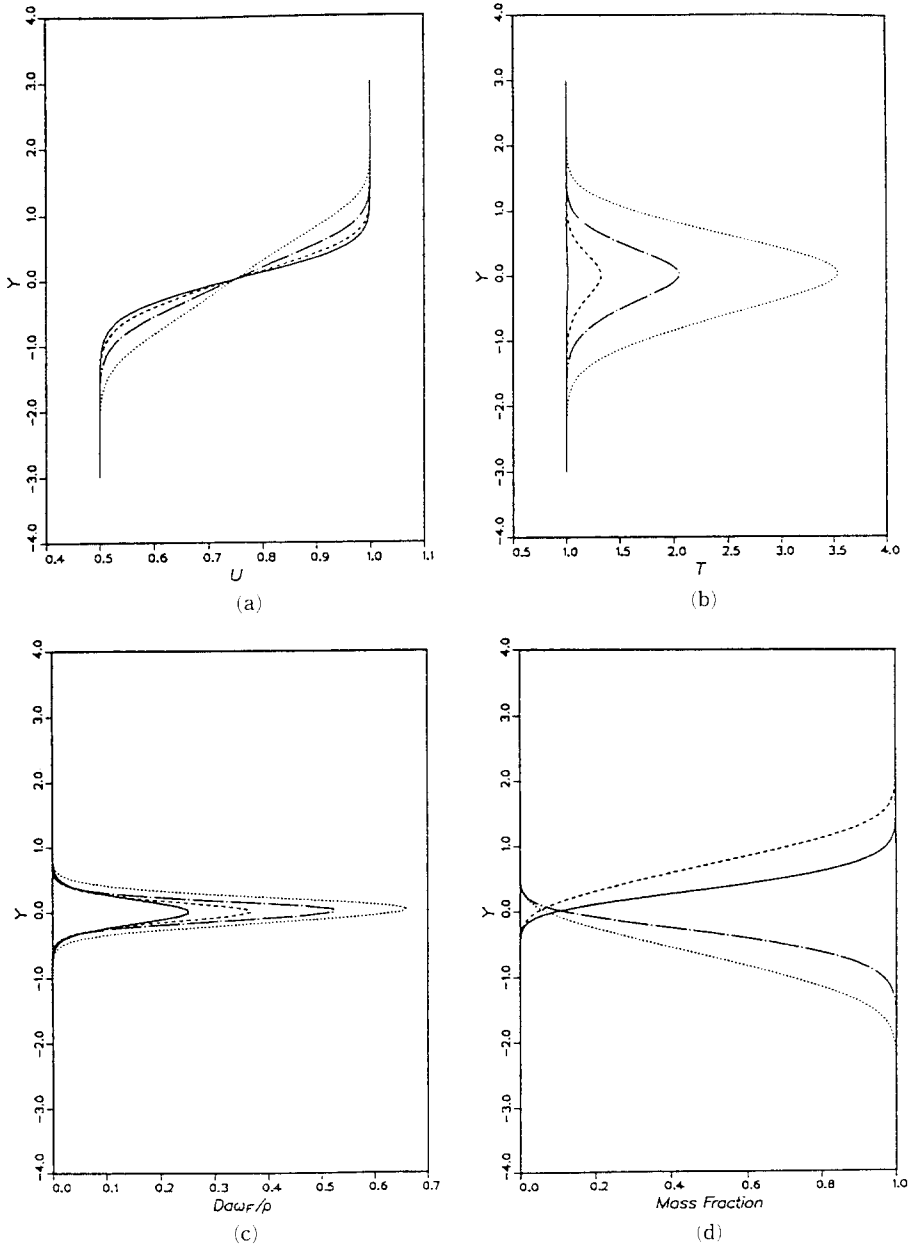


Fig. 9 Effect of heat release on laminar diffusion flame.  $Da=10$ ,  $M_1=1$ ,  $x=7.5$  (a)  $u$  (b)  $T$  (c)  $Da\omega_F/\rho$ . —,  $T_{ad}=1$ ; ---,  $T_{ad}=2$ ; ···,  $T_{ad}=4$ ; ····,  $T_{ad}=8$  (d)  $y_F$  and  $y_O$ . —,  $y_F$ ,  $T_{ad}=2$ ; ---,  $y_F$ ,  $T_{ad}=8$ ; ···,  $y_O$ ,  $T_{ad}=2$ ; ····,  $y_O$ ,  $T_{ad}=8$



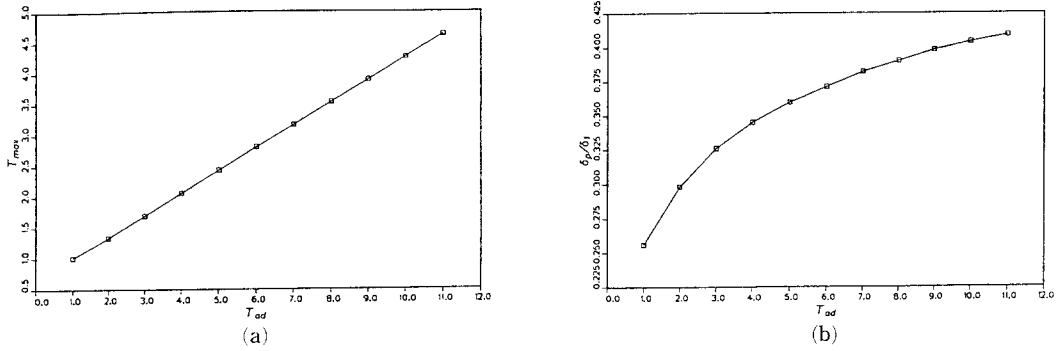


Fig. 10 (a)  $T_{\max}$  (b)  $\delta_T/\delta_1$  vs.  $T_{ad}$ .  $Da=10$ ,  $M_1=1$ ,  $x=7.5$

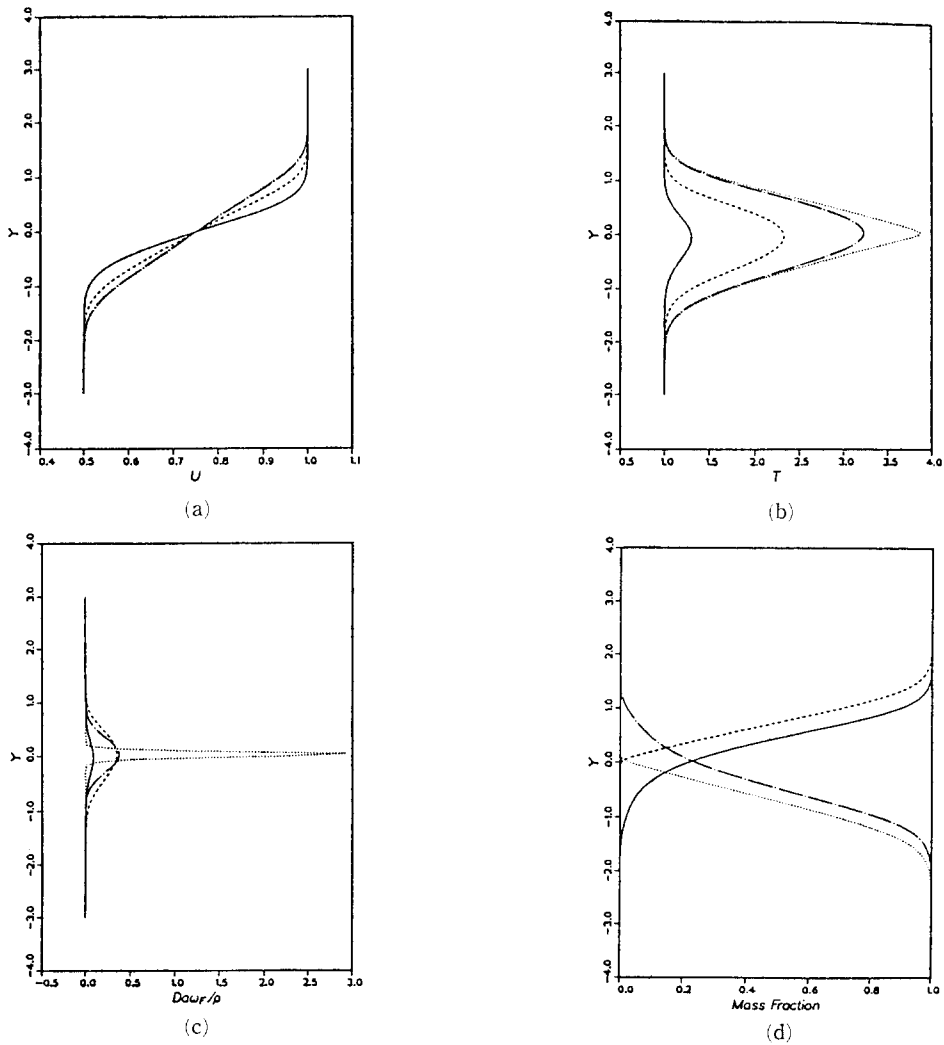


Fig. 11 Effect of Damköhler Number.  $T_{ad}=8$ ,  $M_1=0$ ,  $x=7.7$  (a)  $u$  (b)  $T$  (c)  $Da\omega_F/\rho$ . —,  $Da=0$ . 2; ---,  $Da=0.5$ ; ····,  $Da=2$ ; ·····,  $Da=1000$ . (d)  $y_F$  and  $y_O$ . —,  $y_F$ ,  $Da=0.5$ ; ---,  $y_F$ ,  $Da=1000$ ; ····,  $y_O$ ,  $Da=0.5$ ; ·····,  $y_O$ ,  $Da=1000$

연소열의 함수로 나타낸 것이다. 확산화염의 최고 온도는 일정한  $x$ 에서 단일화염온도에 대해 거의 선형적으로 변한다. 생성물 두께는 반응생성물의 점유공간을 나타내는 척도로서 다음과 같이 정의한다.

$$\delta_P(x) = \int_{-\infty}^{\infty} y_P(x, y) dy \quad (17)$$

위의 생성물 두께를 같은 위치에서 혼합층의 1% 두께(생성물의 농도가 그 최대값의 1%가 되는 두 점사이의 거리)로 표준화한다. 이러한 표준화된 두께는 다른 연구자들<sup>(5-7)</sup>에 의해서도 반응혼합층의 기준거리로써 많이 사용되었다. 최고온도와는 달리  $\delta_P/\delta_1$ 는 단일화염온도  $T_{ad}$ 에 대해서 선형적으로 변하지 않는다. 연소열이 낮은 경우, 생성물의 두께는  $T_{ad}$ 에 강하게 영향을 받았으나 높은 연소열로 갈수록 그 영향은 작아졌다.

### 3.3 Damkhöler 수의 영향

2.1절에서 Damkhöler 수  $Da$ 는 화학반시간에 대한 대류유동시간의 비로서 정의하였다. Damkhöler 수가 증가함에 따라 반응물 및 연소열도 증가한다. Fig. 11은  $M_1=0$ ,  $T_{ad}=8$ 인 경우에 여러 Damkhöler 수에 대하여 속도 및 온도를 보여주고 있다. Damkhöler 수의 영향은  $Da < 1$ 인 경우 상당히 컸으며 화학반응의 속도와 같이 연소생성물의 생성물과 연소열이 급격히 증가하고  $Da > 2$ 에서는 거의 일정한 값에 도달하였다. Heidarinejad와 Ghoniem<sup>(7)</sup> 그리고 Mungal과 Frieler<sup>(8)</sup>는 각각 수치계산(vortex method)과 실험을 통하여 비슷한 결과를 보고하였으나, 그들의 결과는 연소열이 낮은 경우에 국한되었다. 빠른 화학반응(fast chem-

istry)이 어느 정도에서 유효한가를 살피기 위해 매우 높은  $Da$ (~1000)를 사용하였다. 큰 Damkhöler 수에서는 반응영역이 매우 좁으며, 연료와 공기의 공존지역도 작다.  $Da \rightarrow \infty$ 이면, 연료와 공기는 어디에서도 공존하지 않으며, 반응 영역은 무한히 얇은 화염면이 된다.

Gibson과 Libby<sup>(9)</sup>에 따르면, 반응물이 그 최고값의 10%가 되는 두 점 사이의 거리인 반응영역 두께는 Damkhöler 수가 높은 경우  $Da^{-1/3}$ 에 비례하게 되는데, Fig. 12는 그와 같은 경향을 나타내고 있다.

## 4. 결 론

평행하게 진행하며 혼합과 반응을 일으키는 반응혼합층의 층류화염구조에 대해서 수치해석을 통하여 연구하였다. 반응혼합층의 간단한 모델로서 공기와 연료의 평행한 유동을 사용하고 유한반응물을 가지는 비가역적 Arrhenius 형태의 화학반응을 고려하며, 지배방정식은 2차원 압축성 경계층 방정식을 사용하였다. 활성 에너지가 높은 경우에 점화, 예혼합화염 및 확산화염이 존재하였으며, 마하수가 큰 경우에는 미연가스의 높은 온도로 인해 점화가 상당히 빨리 일어났다. 가변확산계수가 확산화염의 구조를 상당히 변화시켰다. 확산화염의 최고온도는 연소열이 낮은 경우 단일화염온도에 대해 선형적으로 변했으나 높은 경우에는 거의 변화가 없었다.

## 참고문헌

- (1) Linan, A. and Crespo, A., 1976, "An Asymptotic Analysis of Unsteady Diffusion Flames for Large Activation Energies," *Comb. Sci. Tech.*, Vol. 14, pp. 95~117.
- (2) Marble, F. E. and Adamson, T. C., 1954, "Ignition and Combustion in a Laminar Mixing Zone," *Jet Propulsion*, Vol. 24, No. 85.
- (3) White, F. M., 1974, *Viscous Flow*, McGraw Hill.
- (4) Jackson, T. L. and Hussani, M. Y., 1988, "An Asymptotic Analysis of Supersonic Reacting Mixing Layers," *Comb. Sci. Tech.*, Vol. 57, pp. 129~140.
- (5) Mungal, M. G. and Dimotakis, P. E., 1984,

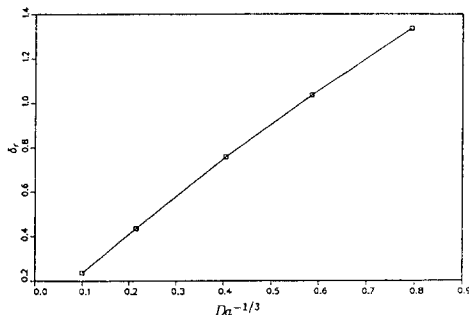


Fig. 12 Reaction zone thickness vs.  $Da^{-1/3}$ .  $T_{ad}=8$ ,  $M_1=0$ ,  $x=7.7$

- "Mixing and Combustion with Low Heat Release in a Turbulent Shear Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 148, pp. 349~382.
- (6) Hermanson, J. C. and Dimotakis, P. E., 1989, "Effects of Heat Release in a Turbulent Reacting Shear Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 199, pp. 333~375.
- (7) Heidarinedjad, G. and Ghoniem, A. F., 1989, Vortex Simulation of the Reacting Shear Layer ; Effects of Reynolds and Number, *AIAA Paper* No. 89-0573.
- (8) Mungal, M. G. and Frieler, C. E., 1988, "The Effect of Number in a Turbulent Shear Layer," *Comb. Flame*, Vol. 71, pp. 23~34.
- (9) Gibson, C. H. and Libby, P. A., 1972, "On Turbulent Flows with Fast Chemical Reaction. Part II. The Distribution of Reactants and Products Near a Reacting Surface," *Comb. Sci. Tech.*, Vol. 6, pp. 29~35.