

〈論 文〉

동축분류 층류제트 확산화염의 구조에 미치는 선회의 영향

김호영* · 민성기**

(1991년 10월 8일 접수)

The Effect of Swirl on the Structure of Concentric Laminar Jet Diffusion Flame

Ho Young Kim and Seong Ki Min

Key Words : Swirl Number(선회수), Strong Swirl(강선회), Weak Swirl(약선회), Co-Swirl, Counter-Swirl

Abstract

In order to predict the effect of swirl on the structure of concentric laminar jet diffusion flame, present study examined the effect of swirl on the flame characteristics by numerical analysis through theoretical model. The theoretical model has been developed for the co-axial laminar jet flame such that the fuel and air are supplying with swirl through inner and outer co-axial tube respectively. For the parametric study, swirl number, Reynolds number of fuel and air and directions of swirl are chosen as important parametes. The results of study show that the flame with wider width and shorter length is formed by larger swirl number. The important factor of the flame shape is the recirculating zone formed around jet axis near the exit of nozzle. In case of weak swirl, the effect of directions of swirl is not appeared. However, for the strong swirl, the flame with shorter length are appeared in case of counter-swirl compared with the case of co-swirl.

기 호 설 명

p : 압력
 r : 반경방향 좌표
 r_o : 내부노즐의 반경
 Re : 레이놀즈 수
 S : 선회수, 방직식의 생성함
 u : 축방향 속도
 $u_{avg,f}$: 연료노즐 출구의 평균속도
 $u_{avg,o}$: 공기노즐 출구의 평균속도
 v : 반경방향 속도
 w : 선회속도
 $w_{max,f}$: 연료노즐 출구의 최대 선회속도
 $w_{max,o}$: 공기노즐 출구의 최대 선회속도

W : 분자량
 x : 축방향 좌표
 Z : 혼합분율
 ρ : 기체밀도
 μ : 기체점도
 x : 연료노즐에 대한 공기노즐의 반경비

하첨자

f : 연료
 o : 공기

1. 서 론

연소과정에 있어서 연소효율의 향상 및 공해물질의 생성을 억제하기 위해서는 화염의 안정화를 통

*정회원 : 고려대학교 기계공학과

**정회원 : 고려대학교 대학원

한 적절한 연소조건을 확립하는 것이 필수적인 요건이 된다. 화염의 안정화는 연소 유동장내의 유동상태, 온도분포 및 혼합기의 분포상태에 따라 결정되므로 재순환 유동영역의 존재는 연소 유동장내의 연료와 산화제 간의 접촉을 용이하게 하여 적절한 혼합기를 생성시키는 물론 재순환되는 고온의 연소 생성물로 부터의 열전달에 의해 화학반응에 필요한 지속적인 열이 공급된다. 이로 인해 화염 전파속도와 유동속도가 잘 일치되는 감소된 유동영역이 생성됨으로써 화염의 안정화를 이룰 수 있다. 이와 같이 중요한 화염의 안정화를 위한 재순환 유동영역의 형성방법에는 분사구 앞쪽에 장애물 형태의 화염안정기(bluff bodies)를 설치하는 방법과 분사되는 연료나 공기에 선회유동(swirl flow)을 가하는 방법등이 있다.^(1,2) 위의 방법 가운데 선회유동을 사용하여 화염을 안정화시키는 방법에 대한 기존연구들은 1960년대 후반의 선회유동장의 유동특성에 관한 실험적 연구를 시초로 많은 연구 결과들이 보고되었다. Steiger와 Bloom⁽³⁾은 강한 선회가 있는 축대칭 층류제트나 웨이크(wake)의 자유혼합특성에 관하여 적분방법으로 경계층 형태의 지배방정식을 해석하여 유동에 미치는 선회의 영향을 고찰하였으며, Lavan 등⁽⁴⁾은 회전하는 원관내의 층류 점성 유동의 역전현상을 고찰하였다. Lilley와 Chigier⁽⁵⁾는 난류 경계층 선회 연소 유동장에 대해 연구하였으며 Lilley⁽⁶⁻⁹⁾는 난류 경계층 선회 화염에 대하여 유한차분법(FDM)을 사용하여 화염의 형상 및 연소강도에 미치는 선회의 효과를 여러 난류모델을 사용하여 해석하고 실용 연소기에 적용할 수 있는 일반적인 수학적 모델 및 난류모델들의 특징을 연구 검토하였다. Silvester 등⁽¹⁰⁾은 일반적인 선회유동 문제의 기초가 되는 회전속도가 다른 두개의 관으로 이루어진 층류 선회유동에 대해 유한요소법(FEM)을 사용하여 고찰하였다. 실험적 연구로서는 Chigier 등⁽¹¹⁾의 회전하는 원통형 철망에 의해 형성되는 자유소용돌이 공기유동이 메탄 및 프로판의 화염에 미치는 영향을 고찰하였고, Oven 등⁽¹²⁾은 LDV를 사용하여 강한 선회가 있는 자유제트 유동장에서 난류강도와 속도등을 측정하였으며 Gouldin 등⁽¹³⁾은 제한된 동축분류 선회제트로 구성된 연소기에서의 유동장을 LDV를 사용하여 측정하였고 Amhad 등⁽⁴⁾은 예혼합 화염에 미치는 강한 선회의 영향에 관한 연구등이 있다. 이상의 연구는 비반응 유동장 및 대형의 연소기에 형성되는 단일

제트의 난류화염에 관한 연구가 대부분이며 층류화염을 형성하는 작은 연소기에 대한 해석은 없는 실정이다.

본 연구에서는 작은 층류화염을 형성하는 소형의 연소기에 대해 화염의 안정화를 위하여 선회가 가해지는 동축분류 층류제트 확산화염의 구조에 미치는 선회의 강도, 연료와 공기의 출구 레이놀즈 수, 연료와 공기의 선회방향의 영향등을 이론적인 모델의 구성과 수치실험을 통하여 고찰한다.

2. 이론해석

2.1 기본이론

선회유동은 연소실이나 산업용 로에서 화염의 크기, 형태 및 연소강도를 조절하는 수단으로서 연소과정에서의 화염의 안정화 및 공해물질의 생성을 억제하는 목적으로 사용된다. 이와같은 선회유동의 생성방법에는 선회깃(swirl vane)을 사용하는 방법, 접선형 입구를 갖는 선회 생성기를 사용하는 방법 및 회전하는 원관에 의한 방법이 있고 생성되는 선회의 정도는 선회깃 각(Swirl Vane Angle)이나 다음과 같이 정의되는 선회수(Swirl Number)로 표시된다.

$$\text{선회수} = \frac{\text{선회 운동량의 축 방향 유속}}{\text{축운동량의 축방향 유속} \times \text{유효노즐 반경}}$$

위에서 정의된 선회수의 크기에 따라 제트유동에서의 선회유동을 분류하면 노즐 출구근처의 제트축주위에 재순환 영역의 존재유무에 따라 재순환 영역이 형성되면 강선회 유동이고 그렇지 않으면 약선회 유동으로 구분된다.

2.2 선회유동의 연소모델

본 연구에서 채택한 연소모델은 내부의 노즐에서는 기체연료가 분출되고 외부의 노즐에서는 공기가 분출되어 화염을 형성하는 Fig. 1과 같은 선회가 있는 동축분류 층류제트 확산화염으로써 선회유동은 각 노즐에 대해 중심축에서 0이고 반경에 따라 선형적으로 증가하는 강제회전(solid body rotation)의 분포형태를 택하였다.

선회가 있는 동축분류 층류제트 확산화염에 대한 연소모델로서는 국소평형모델(local equilibrium model)을 사용하였다. 국소평형모델은 연소 유동

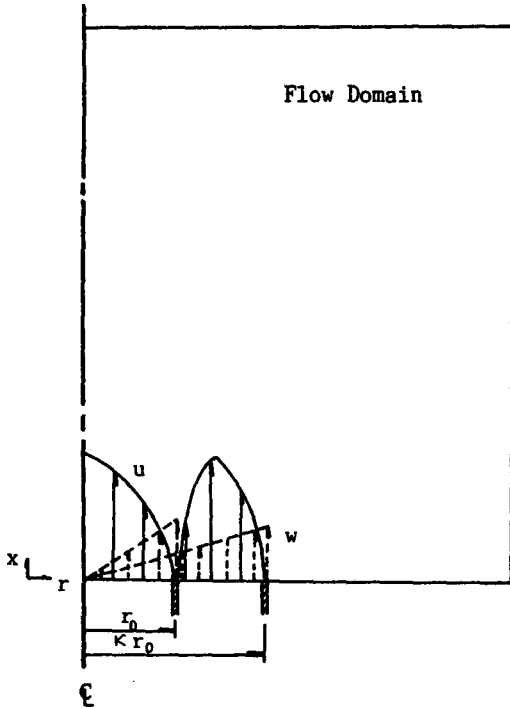


Fig. 1 A schematic model of concentric swirl jet combustion

장의 전 영역에서 화학반응이 무한히 빨리 일어나서 전 영역에서 국소적인 화학평형이 이루어진다고 가정하여 화학평형상태로부터 온도 및 농도 등의 여러 스칼라 양들을 계산하는 모델로서 연소시의 주요성분 농도나 온도의 예측에 있어서 상당히 정확한 결과를 준다고 알려져 있다⁽¹⁵⁾. 이 모델에서는 압력, 엔탈피와 원소의 질량분율을 알면 평형상태의 조성, 온도 및 밀도등이 결정되고 압력이 일정하고 열 및 모든 종의 확산계수가 같다고 가정하면 평형상태하의 스칼라 양들이 혼합분율만의 함수가 된다. 여기서 평형상태는 Gibbs 자유에너지 최소화법을 이용한 CEC71 Code⁽¹⁶⁾를 이용하여 계산한다. 계산방법을 간단히 살펴보면 CEC71 전산코드 내에 포함된 수 많은 화학종들에 대한 열역학적 Data 중에서 본 연구에서 고려한 화학종들 즉, C, H₂, O₂, CO₂, CO, H₂O 및 N₂에 관한 Data를 사용하여 혼합분율을 0에서 1까지 서서히 증가시켜 가며 CEC71 Code를 수행시키면 각각의 혼합분율에 대응하는 온도, 밀도 및 성분농도에 대한 결과가 얻어진다. 이 CEC71 Code는 이상 기체의 혼합물에만 적용되며 얻어진 결과들을 구간별로 나누어

곡선맞춤하여 혼합분율의 함수로 나타내고, 혼합분율 보존방정식을 해석하여 얻은 값을 이 함수식에 대입하면 온도, 밀도 및 성분농도등이 얻어진다⁽¹⁷⁾.

2.3 지배 방정식 및 경계조건

이상의 모델에 대한 선화가 있는 동축분류 층류 제트 확산화염의 연소현상을 규명하기 위하여 축대칭 원통좌표계에서 유도된 타원형 형태의 지배 방정식들은 다음과 같다.

○연속 방정식

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho v r) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = 0 \tag{1}$$

• 운동량 보존 방정식

$$\rho \left(v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + S_v \tag{2}$$

$$\rho \left(v \frac{\partial w}{\partial r} + u \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + S_w \tag{3}$$

$$\rho \left(v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + S_u \tag{4}$$

이때,

$$S_v = - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} (\mu v) + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{1}{r} \mu \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{4}{3} \frac{\mu}{r^2} v + \rho \frac{w^2}{r} \tag{5}$$

$$S_w = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mu w) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{\mu}{r^2} w - \rho \frac{v w}{r} \tag{6}$$

$$S_u = - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{2}{3} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (\mu v) \tag{7}$$

• 혼합분율 보존 방정식⁽¹⁸⁾

$$\rho \left(v \frac{\partial Z}{\partial r} + u \frac{\partial Z}{\partial x} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial Z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial Z}{\partial x} \right) \tag{8}$$

이상의 지배 방정식들을 해석하기 위하여 본 연구

에서 채택한 경계조건으로는 노즐출구에서는 내부 및 외부노즐에 대해 완전 확립된 관 유동 및 환상 유동(annular flow)의 속도분포 및 강체회전(solid body rotation)에 의한 선형분포를 갖는 선회속도를 사용하였고 노즐밖에서는 정지된 대기조건을 사용하였다.⁽¹⁹⁾ 또한 축 대칭 유동이므로 제트축 상에서는 반경방향 속도와 선회 속도는 0 이고, 이외의 모든 변수들에 대해서는 구배가 0 인 Neumann 형 경계조건을 사용하였으며, 제트축에서 먼 곳에서의 물리적 경계조건은 구배가 0 인 Neumann 조건이므로 계산시 각 변수들의 구배가 0이 되는 $r \rightarrow \infty$ 를 정한 후 각 변수들의 값들을 정지된 대기조건으로 놓아서 해석하였으며, 노즐 출구로부터 하류방향의 먼 곳에서는 Neumann 형 경계조건을 사용하였다. 이상의 경계조건들을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

*경계조건

• $0 < r < r_o, x=0$ 에서 • $xr_o < r < \infty, x=0$ 에서

$$\begin{aligned} u &= 2u_{avg,f} \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] & u &= 0 \\ v &= 0 & v &= 0 \\ w &= w_{max,f} \frac{r}{r_o} & w &= 0 \\ Z &= 1 & Z &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

• $r_o < r < xr_o, x=0$ 에서

$$\begin{aligned} u &= \frac{2 u_{avg,o}}{\left[1 + x^2 - \frac{1-x^2}{\ln(1/x)} \right]} \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{1-x^2}{\ln(1/x)} \ln \left(\frac{r}{r_o} \right) \right] \\ v &= 0 \\ w &= w_{max,o} \frac{r}{xr_o} \\ Z &= 0 \end{aligned}$$

• $r = \infty, 0 < x < \infty$ 에서 • $r = 0, 0 < x < \infty$ 에서

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial Z}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial Z}{\partial r} = 0 \quad v = 0 \quad w = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

• $0 < r < \infty, x = \infty$ 에서

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial Z}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

3. 수치해석

이상의 지배 방정식을 해석하기 위해 전 유동장에 대해 반경방향으로는 노즐 근처에서 더 정확히 해석하고자 미세격자를 사용하고 노즐밖에서는 불균일 격자를 사용하며, 축방향으로는 균일격자를 사용하였다. 또한 각 방정식의 대류와 확산항에 대해서는 Power Law Scheme⁽²⁰⁾을 사용하여 검사체에 걸쳐 적분하여 유한차분식을 얻었고, 유동장의 해석에는 SIMPLE Algorithm⁽²⁰⁾을 사용하였으며 축방향 속도와 반경방향속도에 대해서는 엇갈림 격자(staggered grid)를, 선회속도 및 혼합분율에 대해서는 일반격자를 사용하여 해석하고 각각의 종속변수는 TDMA를 사용하여 구한다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 수치적인 해를 얻기 위하여 기체 연료로는 프로판올, 산소의 공급원으로는 공기를 사용하였으며, 이때 사용된 중요성질들은 $W_f = 44.097 \text{ kg/kmol}$, $W_o = 32 \text{ kg/kmol}$, $\rho_f = 1.8594 \text{ kg/m}^3$, $\rho_o = 1.209 \text{ kg/m}^3$, $\mu_f = 8.06 \times 10^{-6} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $\mu_o = 1.9152 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $Pr = 0.7$ 들이다. 선회가 있는 동축분류 총류제트 확산화염의 구조 및 연소특성을 고찰하기 위하여 선회 강도, 선회방향 및 다음과 같이 정의되는 연료와 공기의 출구 레이놀즈 수의 변화에 따라 얻은 수치해의 결과는 다음과 같다.

$$Re_f = \frac{\rho_f u_{avg,f} 2r_o}{\mu_f} \quad (13)$$

$$Re_o = \frac{\rho_o u_{avg,o} D_h}{\mu_o} \quad (14)$$

여기서 수력반경 $D_h = 2(x-1)r_o$

4.1 선회가 있는 동축분류 총류제트 확산화염의 일반적 연소특성

Fig. 2는 연료와 공기의 선회수가 각각 0.4, 1.2 인 경우에 대해 축방향 여러위치에서 축방향 속도의 반경방향 분포를 도시한 것이다. 약선회인 (a)의 경우 노즐 출구의 주어진 속도로 부터 하류로 진행함에 따라 두 속도가 혼합되어 하나의 제트 유동의 형태로 되며 제트의 폭은 증가하는 일반적인 제트의 합류현상을 보여주나, 강선회의 경우 즉

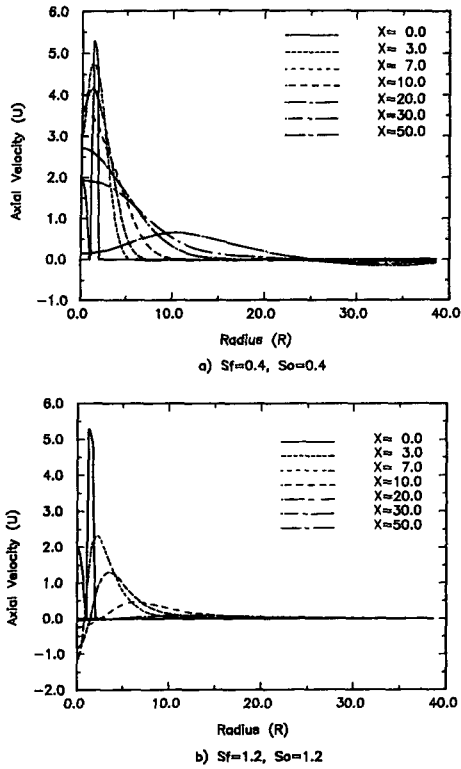


Fig. 2 Radial distribution of axial velocity at various axial locations ($Re_f=200, Re_0=200, \alpha=2.0$)

(b)의 경우는 선회효과로 인하여 강한 역 압력 구배가 생겨서 노즐 출구근처의 제트축 주위에서 축방향의 재순환 유동영역이 형성되므로 제트축 근처에서 음의 속도가 존재하며, 하류로 진행할수록 음의 속도는 감소하고 제트의 폭은 증가하며 약선회의 경우보다 더 가까운 축방향 위치에서 축방향 속도가 소멸된다. 따라서 선회강도가 큰 경우가 축방향 속도의 감소율이 더 큼을 알 수 있으며 이를 벡터선도로 나타내면 Fig. 3과 같다.

Fig.4는 연료와 공기의 선회수가 각각 0.4, 1.2인 경우에 대해 축 방향 여러위치에서 온도의 반경방향 분포를 도시한 것으로, 하류로 진행함에 따라 제트축 상의 온도는 점차 증가하고 온도의 최고점의 위치는 제트축으로부터 멀어지다 접근하며, 화염의 끝을 지난후 제트축 상에 최고온도점이 존재하며 온도도 감소함을 보여준다. 약선회인 경우 (a)와 강선회의 경우 (b)를 비교하면 강선회인 경우가 화염이 존재하는 각각의 축방향 위치에서 온도의 최고점의 반경방향 위치가 제트축으로부터 더 먼곳에 위치하나 제트축 상의 최고온도가 나타

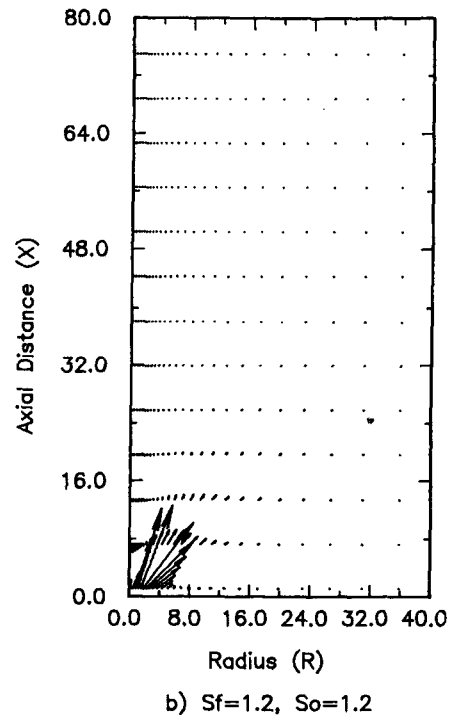
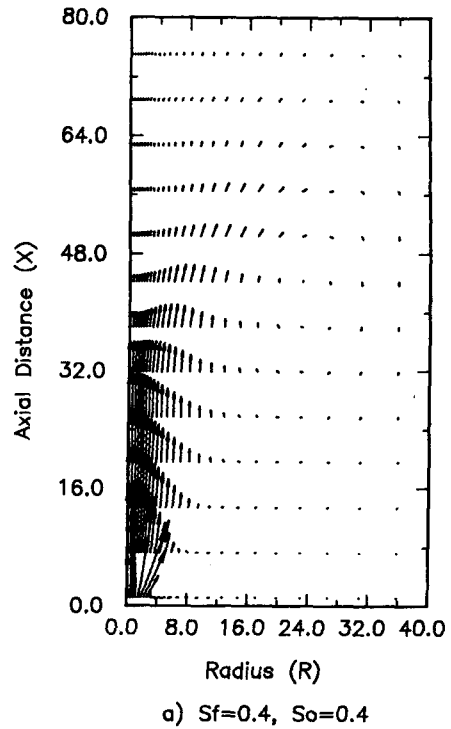
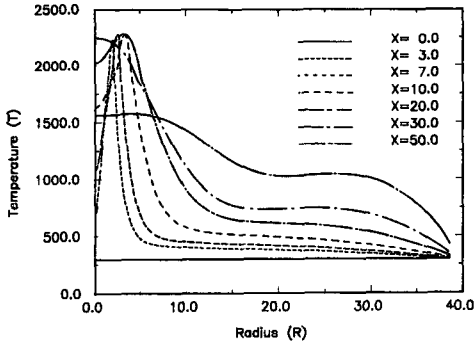
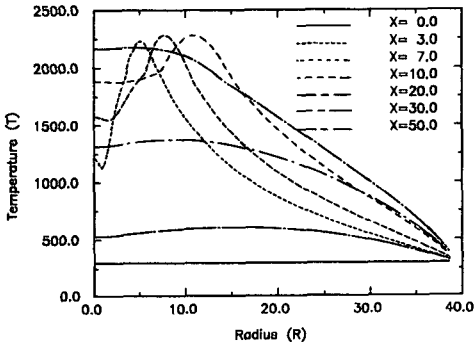


Fig. 3 Velocity vector field ($Re_f=200, Re_0=200, \alpha=2.0$)



a) $S_f=0.4, S_o=0.4$



b) $S_f=1.2, S_o=1.2$

Fig. 4 Radial distribution of temperature at various axial locations ($Re_f=200, Re_0=200, \kappa=2.0$)

나는 축방향 위치는 더 노즐가까이에 존재함을 알 수 있다. 이상의 온도분포는 선회강도가 큰 경우, 선회효과로 인한 원심력에 의해 화염의 폭은 커지거나 화염의 길이는 작아지는 화염의 형상변화에도 일치한다.

4.2 선회강도 변화에 따른 화염구조 및 연소특성

Fig. 5와 Fig. 6은 연료와 공기의 선회강도 변화에 따른 축방향 일정위치 $X=10.0$ 에서 축방향 속도와 온도의 반경반향 분포를 도시한 것이다. 선회강도가 증가할 수록 제트의 폭은 증가하고 중심축상의 축방향 속도는 점차 감소하여 선회수 1.2 이상에서는 음의 속도가 존재한다. 즉 본 연구와 같은 동축분류 층류제트 확산화염에서는 선회수가 1.2 이상에서 재순환 영역이 존재하므로 보통의 난류화염에 대해서는 0.6 이상이 강선회로 분류되는 것에 비해 층류제트 확산화염에 대해서는 더 큰 선회수인 1.2 이상을 강선회라 할 수 있는데, 이는 난류의 경우가 층류의 경우보다 확산율이 더 크기

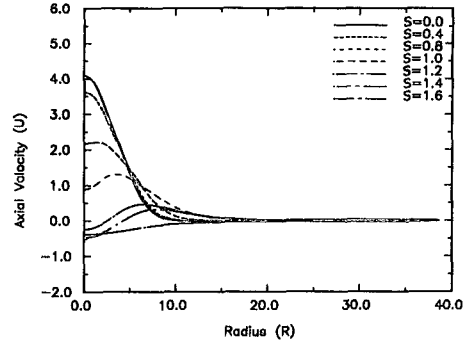


Fig. 5 Radial distribution of axial velocity with swirl number ($Re_f=200, Re_0=200, \kappa=2.0, X=10.0$)

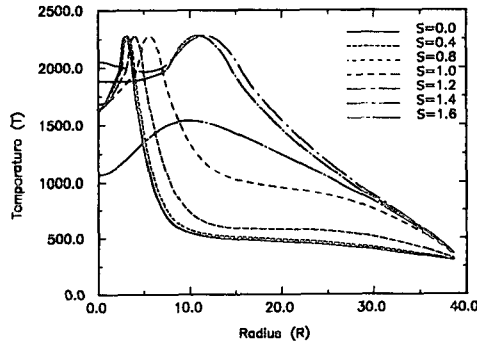


Fig. 6 Radial distribution of temperature with swirl number ($Re_f=200, Re_0=200, \kappa=2.0, X=10.0$)

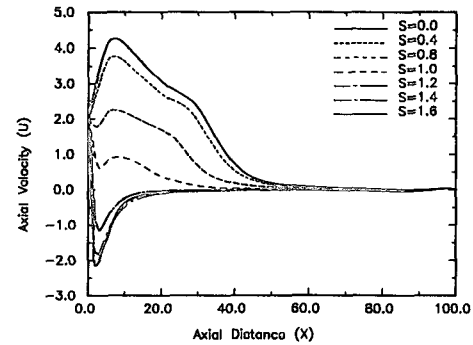


Fig. 7 Axial distribution of centerline velocity with swirl number ($Re_f=200, Re_0=200, \kappa=2.0$)

때문에 나타나는 현상으로 해석된다. 온도분포는 선회강도가 증가할 수록 최고점이 나타나는 반경방향의 위치, 즉 화염의 폭이 서서히 증가하여 강선회인 선회수가 1.2 일때 급격히 증가하여 선회수 1.4일때 최대가 되고 더 증가하면 감소하는 경향을 보여준다. 제트축상의 온도도 역시 선회수가 1.0에

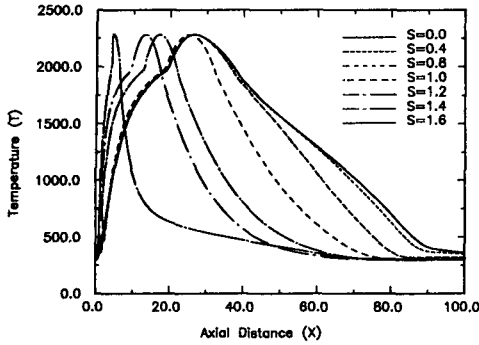


Fig. 8 Axial distribution of centerline temperature with swirl number ($Re_f=200$, $Re_0=200$, $\alpha=2.0$)

도달할 때까지는 약간 증가하나 강선회인 선회수 1.2인 경우에 급격히 증가하여 선회수 1.4일때 최대가 된후 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 Fig. 9에 나타난 화염의 형상변화와도 일치한다. 따라서 온도분포의 변화는 약선회에서 강선회로 바뀔때, 즉 재순환 유동영역의 존재에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 중심축상의 축방향 속도와 온도의 축방향 분포를 연료와 공기의 선회수 변화에 따라 도시한 것으로 선회수가 증가하여 0.8 이상에서 축방향 속도가 하류로 진행함에 따라 감소하기 시작하여 강선회인 선회수 1.2 이상일때 재순환 영역의 존재로 인한 노즐 출구 근처의 중심축 주위에서 음의 속도영역이 존재하며 그 속도의 크기도 선회수가 증가할 수록 증가함을 알 수 있다. 중심축상의 온도분포는 선회수가 증가하여 0.8에 도달할 때까지는 최고점이 나타내는 축방향 위치 즉 화염길이의 변화는 거의 없으나 1.0 이상에서는 약간 감소하며 강선회가 되면 급격히 감소함을 보여준다. 여기서 온도분포를 나타내는 Fig. 6과 Fig. 8의 경우, 반경방향 및 축방향의 어느위치에서 온도분포에 있어서 급격한 상승영역이 존재하는데, 이 위치는 연료의 질량분율이 0이 되는 점으로서 본 연구에서 채택한 연소 모델의 경우 기체연료가 최고 온도 위치에 도달하기 이전에 이미 화학반응에 의해 CO_2 , CO , H_2O 등의 연소 생성물로 변환되어 기체연료에 비해 상대적으로 고온인 연소생성물의 존재로 인해 온도의 급격한 상승이 일어나는 것으로 해석된다. 이상의 결과로부터 선회수가 증가하여 0.8에 도달할 때까지는 화염의 길이변화는 없으나

화염의 폭은 약간 증가하고, 1.0일 때는 화염길이는 약간 감소하고 폭은 증가하며 재순환 영역이 형성되는 강선회의 경우, 즉 선회수 1.2이상에서는 화염길이는 급격히 감소하고 화염의 폭은 증가함을 알 수 있다. 그러나 선회수 1.6인 경우는 선회속도가 너무 커서 제트축 근처에 존재하는 재순환 영역의 폭이 증가하여 노즐출구 근처에서 축방향 속도가 더 빨리 감소하기 때문에 화염의 길이와 폭이 감소함을 보여준다. 이는 Fig. 9에 도시된 선회수에 대한 화염의 형상변화에서도 볼 수 있다. 따라서 화염의 형상에 미치는 가장 큰 인자는 노즐출구 근처에 형성되는 재순환 영역의 유무 및 크기라 할 수 있다.

Fig. 10은 공기와 연료의 선회수 변화에 따른 화염길이의 변화를 도시한 것이다. 공기의 선회수가 0.4로 일정한 경우 연료의 선회수 변화에 따른 화염의 길이변화는 거의 없으나, 연료의 선회수가

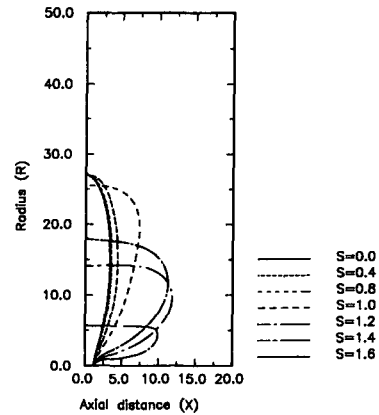


Fig. 9 Variation of flame shape with swirl number ($Re_f=200$, $Re_0=200$, $\alpha=2.0$)

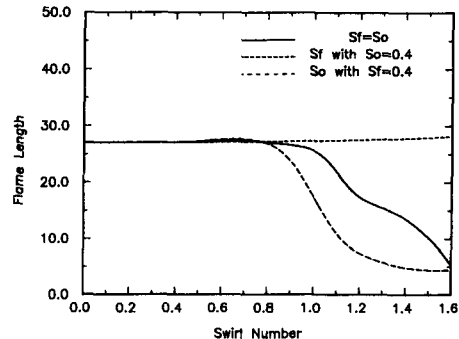


Fig. 10 Variation of flame length with swirl number ($Re_f=200$, $Re_0=200$, $\alpha=2.0$)

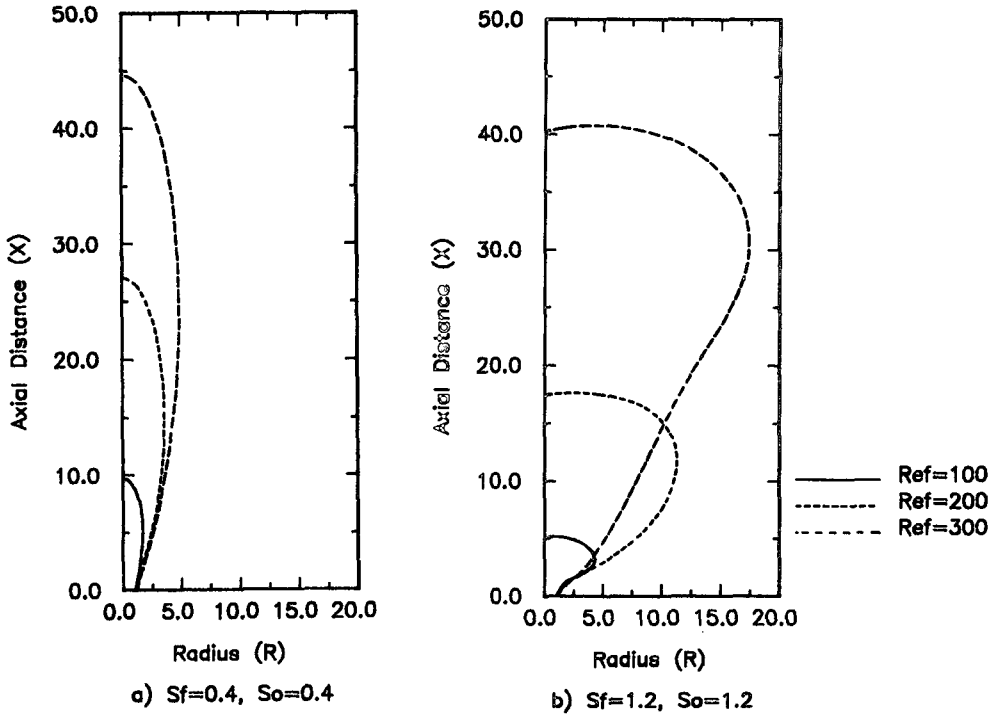


Fig. 11 Variation of flame shape with fuel Reynolds number ($Re_0=200$, $\alpha=2.0$)

0.4로 일정할 때 공기의 선회수가 증가하여 0.8이상이 되면 화염길이는 급격히 감소한다. 연료와 공기의 선회수가 같을때, 선회수 증가에 따른 화염의 길이변화는 앞에서 살펴본 바와 같이 선회수 1.0까지 거의 변화가 없으나 그 이상에서는 급격히 감소한다. 즉 화염길이에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 공기의 선회수이고, 공기의 선회수가 0.8 이상인 경우에는 연료의 선회수가 작은 경우가 큰 경우에 비해 화염길이는 더 감소함을 알 수 있다.

4.3 화염의 구조에 미치는 연료 및 공기의 출구 레이놀즈 수의 영향

Fig. 11은 선회수가 각각 0.4, 1.2인 약선회와 강선회인 경우에 대해, 공기의 출구 레이놀즈수가 200일 때 연료의 출구 레이놀즈 수 변화에 따른 화염의 형상변화를 비교 도시한 것이다. 연료의 출구 레이놀즈 수가 증가함에 따라 일정한 공기유량에 비해 분출된 연료유량이 증가하므로 화염의 길이 및 화염의 폭이 증가한다. 두 경우를 비교하면 강선회인 경우가 약선회인 경우에 비해 선회효과로 인하여 화염의 길이는 감소하나 화염의 폭은 크게

증가함을 보여준다. 또한 약선회인 선회수가 0.4의 경우 연료의 레이놀즈 수가 증가함에 따라 화염의 길이는 선형적으로 증가하나 강선회인 경우는 화염 길이의 증가율이 선회수 증가에 따라 약간 증가하는 현상을 보여주며 이를 Fig. 12에 도시하였다.

Fig. 13은 선회수가 각각 0.4, 1.2인 경우 연료의 출구 레이놀즈 수가 200일때 공기의 출구 레이놀즈 수 변화에 따른 화염의 형상변화를 도시한 것

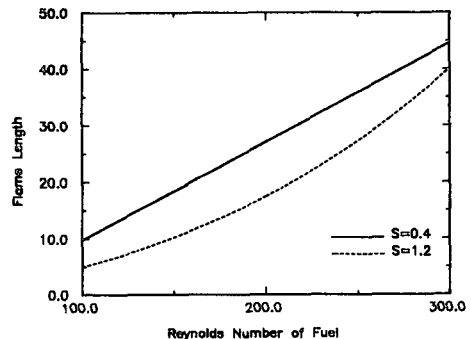


Fig. 12 Variation of flame length with Reynolds number of fuel ($Re_0=200$, $\alpha=2.0$)

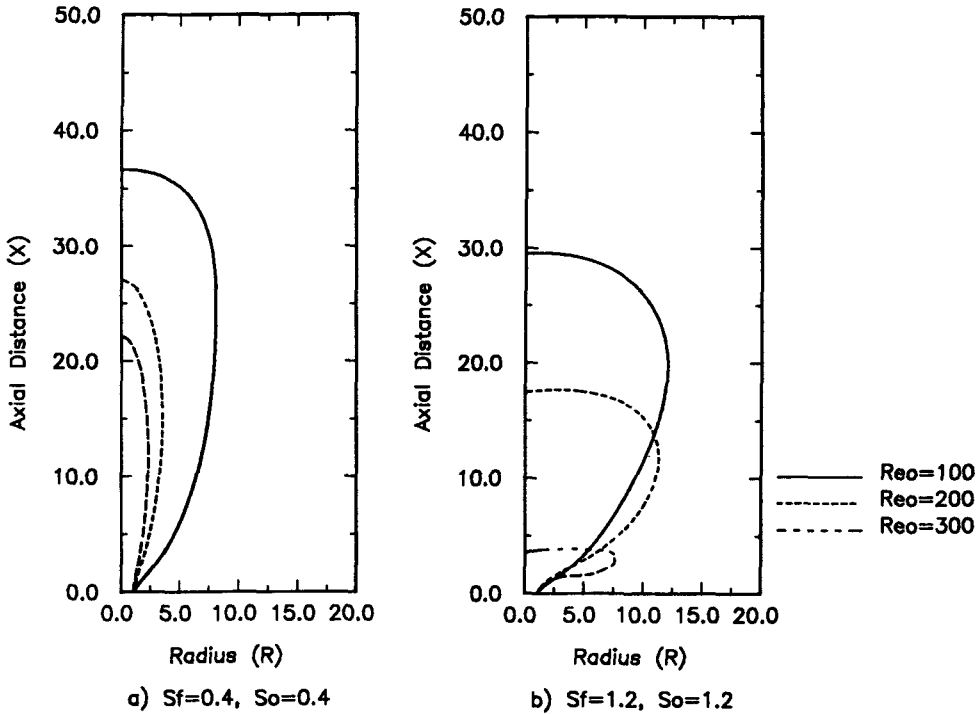


Fig. 13 Variation of flame shape with oxidizer Reynolds number ($Re_f=200, \chi=2.0$)

이다. 공기의 출구 레이놀즈 수가 증가함에 따라 일정한 연료유량에 비해 분출된 공기유량이 증가하여 산화제의 충분한 공급으로 인해 내부노즐에서 분출되는 기체연료가 확산되기 전에 화염이 형성되므로 화염의 길이 및 폭이 감소하는 경향을 나타낸다. 공기의 레이놀즈 수 증가에 따른 화염길이의 감소경향을 살펴보면 약선회의 경우는 그 감소율이 감소하나 강선회의 경우는 그 감소율이 증가함을 알 수 있다. 또한 이 경우도 강선회인 경우가 약선회의 경우보다 더 강한 선회효과로 인하여 노즐 출구 근처의 제트축 주위에 형성된 재순환 영역의 존재로 인하여 화염의 폭은 증가하고 길이는 감소함을 보여준다.

Fig. 14는 연료와 공기의 선회수가 0.4인 경우 연료와 공기의 출구 레이놀즈 수가 동시에 변할때의 화염의 형상변화를 도시한 것으로 연료와 공기의 출구 레이놀즈 수가 증가할 수록 출구유량이 증가하여 화염의 길이는 증가하나 각각의 경우 분출된 연료와 공기의 비가 같으므로 화염의 폭의 변화는 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 15는 연료와 공기의 선회수가 0.4인 경우

연료와 공기의 출구 레이놀즈 수가 각각 또는 동시에 변화할때 화염길이의 변화를 도시한 것으로 앞에서 살펴본 바와 같이 공기의 출구 레이놀즈 수가 일정하고 연료의 출구 레이놀즈 수가 증가할 경우 및 연료와 공기의 출구 레이놀즈 수가 동시에 증가함에 따라 화염의 길이는 선형적으로 증가하나, 그

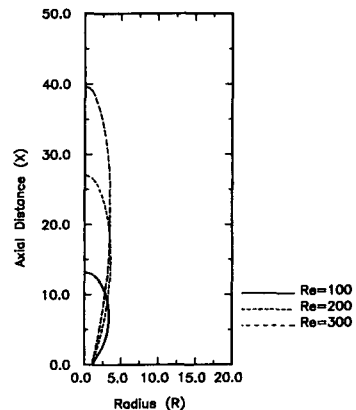


Fig. 14 Variation of flame shape with Reynolds number ($S_f=0.4, S_o=0.4, \chi=2.0$)

증가율은 전자의 경우가 화염을 형성하기 위하여는 더 많은 산화제가 필요하므로 더 크다. 또한 연료의 출구 레이놀즈 수가 일정한 경우 공기의 출구유량이 증가할 수록 충분한 산화제의 공급으로 인해

화염의 길이는 감소하며 그 감소율 또한 감소함을 알 수 있다.

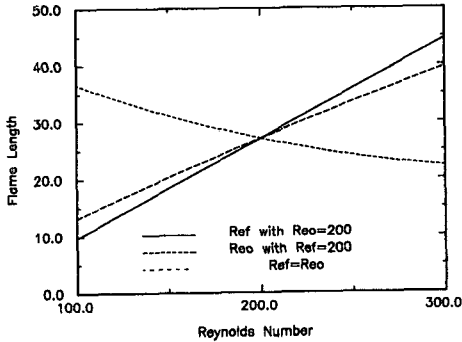


Fig. 15 Variation of flame length with Reynolds number ($S_f=0.4$, $S_o=0.4$, $\alpha=2.0$)

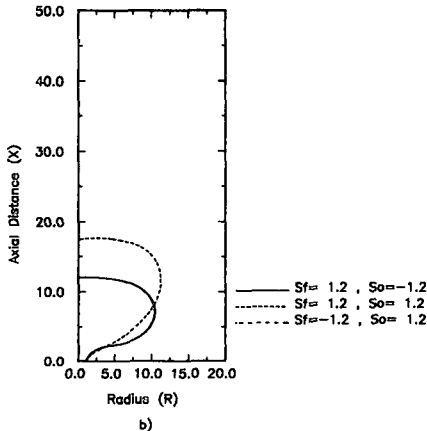
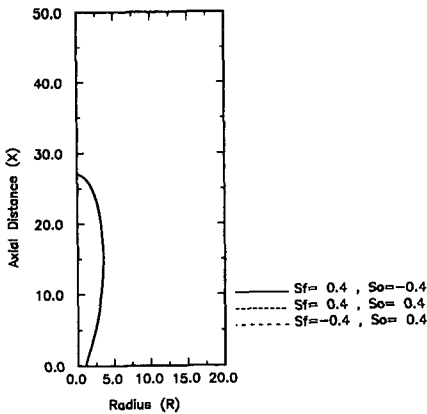


Fig. 16 Variation of flame shape with swirl direction ($Re_f=200$, $Re_o=200$, $\alpha=2.0$)

4.4 화염구조에 미치는 선회방향의 영향

Fig. 16은 연료와 공기의 출구 레이놀즈 수가 각각 200인 경우에 대해 선회수가 각각 0.4, 1.2인 경우 선회방향에 따른 화염의 형상변화를 도시한 것이다. 약선회인 선회수가 0.4인 경우는 연료와 공기의 선회방향에 관계없이 화염의 형상변화는 거의 없으나, 강선회인 선회수가 1.2인 경우는 연료와 공기의 선회방향이 다른 경우 즉 Counter-Swirl의 경우에 있어서 연료의 선회방향이나 공기의 선회방향을 변화로 인한 화염의 형상변화는 없으나 연료와 공기의 선회방향이 같은 경우 즉 Co-Swirl의 경우에 비해 화염의 길이는 급격히 감소하나 폭은 약간 감소함을 알 수 있다. 즉 Counter-Swirl의 경우는 Co-Swirl에 비해 서로 반대방향으로 회전하는 연료와 공기의 증대된 혼합에 의해 축방향 속도의 감소율이 더 크므로 화염의 길이는 감소함을 알 수 있다.

5. 결 론

선회가 있는 층류제트 확산화염의 구조 및 연소 특성에 미치는 선회강도와 노즐 출구 레이놀즈수 및 선회방향의 영향을 고찰한 결과들은 다음과 같이 정리된다

(1) 연료와 공기의 선회강도가 증가함에 따라 축방향 속도는 감소하고 선회수가 1.2 이상일때 노즐 출구 근처의 제트축 주위에서 재순환 영역이 형성되어 화염의 길이가 급격히 감소한다. 따라서 선회수가 1.2 이상일때의 층류제트 확산화염의 경우가 강선회임을 알 수 있고, 재순환 영역의 존재 여부가 화염의 형상변화에 영향을 미치는 가장 큰 인자임을 알 수 있다.

(2) 선회가 있는 동축분류 층류제트 확산화염에 대해 화염의 길이는 연료의 출구 레이놀즈 수에 따라서는 선형적으로 증가하나 공기의 출구 레이놀즈 수에 따라서는 감소한다.

(3) Counter-Swirl의 경우 연료의 선회방향의 변화나 공기의 선회방향을 변화가 화염의 구조에 미치는 영향은 거의 없다.

(4) 약선회의 경우는 선회방향의 영향은 거의 없으나 강선회의 경우 Counter-Swirl의 경우가

Co-Swirl의 경우보다 화염길이는 감소한다.

참고문헌

- (1) Beer, J. and Chigier, N., 1972, *Combustion Aerodynamics*, John Wiley & Sons.
- (2) Gupta, A.K., Lilley, D.G. and Syred, N., 1984, *Swirl Flows*, Abacuss Press.
- (3) Steiger, M.H. and Bloom, M.H., 1962, "Axially Symmetric Laminar Free Mixing with Large Swirl," *J. of Heat Transfer, Trans. ASME*, vol. 83, pp. 370~374.
- (4) Lavan, Z., Nielson, H. and Fejer, A.A., 1969, "Separation and Flow Reversal in Swirling Flows in Circular Ducts," *The Physics of Fluid*, Vol.12, No. 9, pp. 1747-1757.
- (5) Lilley, D.G. and Chigier, N.A., 1972, "An Inverse Solution Procedure for Turbulent Swirling Boundary Layer Combustion Flow," *J. of Computational Physics*, vol. 9, pp. 237~253.
- (6) Lilley, D.G., 1976, "Nonisotropic Turbulence in Swirling Flows," *Acta Astronautica*, Vol. 3, pp. 919-933.
- (7) Lilley, D.G., 1974, "Turbulent Swirling Flame Prediction," *AIAA*, Vol. 12, No. 2, pp.219~223.
- (8) Lilley, D.G., 1975, "Combustor Swirl Flow Modeling," *AIAA*, Vol.13, No. 4, pp. 419~420.
- (9) Lilley, D.G., 1979, "Flowfield Modeling in Practical Combustors : A Review," *J. of Energy*, Vol.3, No.4, pp.193~210.
- (10) Silvester and Thatcher, R.W., 1984, "The Specification and Numerical Solution of a Benchmark Swirling Laminar Flow Problem," *Computer & Fluids*, Vol. 12, No. 4, pp. 281~292.
- (11) Chigier, N.A., Beer, J.M., Grecov, D. and Bassindale, K., 1970, "Jet Flame in Rotating Flow Fields," *Combustion and Flame*, Vol. 14, pp. 171-180.
- (12) Oven, M., Gouldin, F. and Mclean, W., 1978, "Temperature and Species Concentration Measurements in a Swirl Stabilized Combustor," 17th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 363~374.
- (13) Gouldin, F.C., Depsky, J.S. and Lee, S.L., 1985, "Velocity Field Characteristics of Swirling Flow Combustor," *AIAA*, Vol.23, No.1, pp. 95~102.
- (14) Amhad, N.T., Andrews, G.E., Kowkabi, M. and Sharif, S.F., 1984, "Centrifugal Mixing Forces in Enclosed Swirl Flames," 20th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 259~267.
- (15) Bilger, R.W., 1976, "Turbulent Jet Diffusion Flames," *Progress in Energy and Comustion Sciences*, Vol.1, pp. 87~110.
- (16) Gordon, S. and McBride, B.J., 1971, *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks and Chapman-Jouguet Detonations*, NASA, SP-273.
- (17) 전철균, 1989, "두 개의 평행한 확산화염 간의 상호작용에 관한 연구", 박사학위 논문, 고려대학교.
- (18) Williams, F.A., 1985, *Combustion Theory*, The Benjamin Cummings Publishing Co.
- (19) Edelman, R.B., Fortune, O.F., Weilerstein, G., Cochran, T.H. and Haggard, JR, J.B., 1972, "An Analytical and Experimental Investigation of Gravity Effects Upon Laminar Gas Jet-Diffusion Flames," 14th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 259-267.
- (20) Patankar, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfr and Fluid Flow*, McGraw-Hill.