

(技術論文)

선회분류 연소기의 연소특성에 관한 연구

심순용* · 손강호** · 이창식**

(1993년 3월 20일 접수)

A Study on the Combustion Characteristics of Swirling Jet Combustor

S. Y. Shim, K. H. Sohn and C. S. Lee

Key Words : Swirl Flow(선회류), Turbulent Diffusion Flame(난류확산화염), Probability Density Function(확률밀도함수)

Abstract

This study is an analysis of the turbulent diffusion flame with swirl flow and the calculated results are compared with experimental data in case of various swirl numbers and air-fuel ratios. The mathematical model is restricted to single-phase, diffusion controlled combustion with swirl flow. Values of local flow properties were obtained by solving appropriate differential equation for continuity, momentum, stagnation enthalpy, concentration, turbulence energy, dissipation rate of turbulence energy, and the mean square of concentration fluctuation. The method is proposed for calculating the local probability of chemical reaction based on the use of the probability density function for the mixture fraction.

기 호 설 명

| | |
|------------|----------------------------|
| AF | : 공연비 |
| C_p | : 정압비열 |
| D_j | : 연소로의 직경 (m) |
| F | : 최대 확률에서의 f 값 |
| f' | : 혼합분율의 난동성분 |
| g | : 혼합분율 난동성분의 시간 평균자승값 |
| i | : 산소의 양론적 질량 |
| M | : 분자량 |
| R | : 일반 기체상수 (=8.314 kJ/kmol) |
| R_0 | : 버너노즐 직경 (m) |
| SN | : 선회수 |
| S_0 | : 생성항 |
| Pr, Pr_t | : 층류와 난류에 있어서의 Prandtl수 |
| k_p | : 격자점에서의 k 값 |
| α | : 시간분율 |

그리스 문자

| | |
|------------|--------------------|
| Γ_0 | : 변수 ϕ 의 교환계수 |
| μ | : 유효 점성계수 |
| σ | : 편차 |
| σ_f | : 유효 슈미트수 |
| ϕ | : 상태량 |
| φ | : 스윌러의 베인각도 |
| τ_w | : 벽면에서의 전단력 |

하첨자

| | |
|------|---------------|
| 0 | : 산소의 미혼합 상태량 |
| 1 | : 연료의 미혼합 상태량 |
| fu | : 연료 |
| ox | : 산소 |
| pr | : 연소 생성물 |
| j | : 화학종 |
| st | : 양론비 |

*정회원, 금성산전(주) 기술연구소

**정회원, 한양대학교 기계공학과

1. 서론

난류확산 연소과정을 거치는 연소로의 입구에 선회류를 발생시키면 주 유동에 원주방향으로 선회하는 속도성분의 추가로 인하여 연료분사노즐 주위 및 반응영역에서의 유동장이 복잡한 형태로 나타나게 되어 연료와 산화제의 혼합, 화염의 크기, 형상, 안정성 및 연소강도에 많은 변화가 생기게 된다. 따라서 선회류가 존재하는 영역에서의 연구는 비연소장의 경우 뿐만 아니라 연소장에 대해서도 많이 이루어지고 있으며 특히 연소로에서의 연구는 필수적이므로 본 연구에서는 선회류가 동반되는 연소로내에서의 난류 확산화염의 특성을 수치적 방법으로 해석하고 그 타당성을 검증하기 위해 실험을 실시하였다.

Spalding⁽¹⁾은 선회류가 없는 연소로에서의 유동 해석을 기준으로 하여 선회류를 추가함으로써 일어나는 유동의 변화와 온도변화를 수치적으로 해석하고 이를 실험치와 비교함으로써 선회류에서의 $k-\epsilon$ 난류모델 적용의 타당성을 증명하기 위하여 연소과정의 모델링에 있어 Arrhenius형의 생성항을 이용하여 연소 생성물의 생성속도에 따라서 반응속도가 선택되어지는 Eddy-break-up 모델을 이용하여 연소현상을 해석하였으나 난동성분에 대한 충분한 고려가 없었기 때문에 결과에 오차가 발생하였고, Eldin⁽²⁾은 선회류가 있는 3차원 가스터빈의 해석에 Spalding과 같은 난류 모델을 사용하여 속도와 온도를 실험치와 비교하였으나 온도의 시간변화에 따른 난동성분이 사각파의 형태로 분포한다는 가정을 사용하였기 때문에 정확성이 결여되었다.

Elgobashi⁽³⁾는 농도의 난동성분을 Clipped Gaussian 분포를 이용하여 확산화염에서 연료와 산소의 난동성분이 밀도와 농도에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하여 어느 정도 타당성있는 결과를 도출하였으나 속도항의 수치해석에 있어서 유량함수를 사용하였으며, 확률밀도함수를 수치해석적으로 결정하는 과정에 있어서도 Table화된 값으로부터 불러 사용하는 방법이었으므로 정확한 해를 구할 수 없었다.

그의 실험을 통하여 선회가 있는 연소로내에서의 속도와 온도를 측정하고 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델로 예측한 물성치와 비교하여 수치제산시 초기 조건의

중요성을 제시한 연구 등^(4,5)이 있었으나 연소과정의 모델링에 문제점이 있었다.

본 연구에서는 난류 확산화염의 특성을 수치해석을 통하여 예측하기 위해서 농도와 온도, 밀도, 속도 등과 같은 변수들의 시간평균값과 시간변화에 따른 각 변수들의 변화값의 분포에 대한 해석을 수행하였다. 이 과정에서 유동의 형태가 난류이기 때문에 종래의 연료와 산소는 같은 장소에 존재할 수 없다는 가정과는 달리 연료와 산소는 같은 장소에서 서로 다른 시간대에 존재할 수 있다는 전제하에 화염면의 형태는 일정하지 않게 된다는 가정을 세웠다.⁽⁷⁾ 따라서 연료와 산소의 농도값들은 시간의 변화에 따라 난동을 수반하게 되므로, 이러한 난동성분이 미연의 연료 질량분율에 영향을 미쳐 반응 속도에 영향을 주게 되므로 전체적인 연소특성을 결정하게 된다.

본 연구에서는 이러한 난동성분들의 영향을 수치 해석하기 위한 연소모델을 개발하여 적용하였으며 그 결과를 실험치와 비교하였다.

2. 이론해석

2.1 모델링

선회도와 당량의 변화에 따른 연소로내에서의 연소특성과 유동특성을 해석하기 위하여 Fig. 1과 같이 급확대 연소로를 해석모델로 선정하였으며 연료 노즐주위에 선회류가 형성되도록 하기 위해 선회기를 연소용 공기가 들어오는 관 끝에 설치하였다. 벽면은 등온으로 가정하였으며 실험에서는 열교환기로써 벽면의 온도를 일정하게 유지하였다.

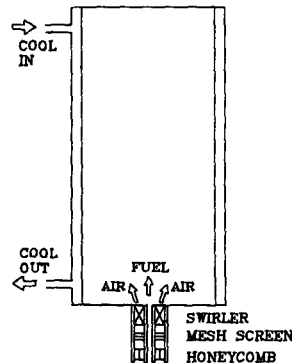


Fig. 1 Schematic diagram of the combustion chamber

연속방정식과 각각의 보존방정식은 2차원 축대칭 원통좌표계에서 포물선형의 보존방정식 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}[\rho U \phi] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r \rho V \phi] \\ &= \frac{\partial}{\partial x}[\Gamma_0 \frac{\partial \phi}{\partial x}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r \Gamma_0 \frac{\partial \phi}{\partial r}] + S_0 \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 난류모델

난류모델은 다음과 같은 정의를 사용하고 난류운동에너지 및 난류 소산율 보존방정식을 해석하는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

$$-\overline{\rho uv} = \mu_t \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right]; \quad -\overline{\rho uv} = \mu_t \left[\frac{\partial V}{\partial x} \right] \quad (2)$$

$$\mu_t = \frac{C_D k^2}{\epsilon} = \mu_{eff} - \mu \quad (3)$$

2.3 온도와 밀도계산

혼합물의 정제 엔탈피는 다음과 같고 에너지방정식은 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} h &= m_{fu} H_{fu} + \sum m_j C_{p_j} T + \rho [U^2 + V^2 + W^2] \quad (4) \\ & \frac{\partial}{\partial x}[\rho U h] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r \rho V h] \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial r} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

평균유동 및 난류의 운동에너지는 연료의 발열량에 비해 작으므로 무시하며, 공기와 연료혼합물의 밀도는 이상기체 방정식으로부터 계산된다.

$$\rho = \frac{P \sum (m_j / M_j)}{RT} \quad (6)$$

연료는 프로판(C_3H_8)을 사용하였고, 화학반응시 고려한 혼합물의 구성성분은 O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O 이다.

2.4 연소모델

2.4.1 연소현상에 대한 가정

(1) 두 반응물질의 turbulent transport coefficient 들은 모든 영역에서 동일하다.

(2) 1 kg의 연료는 항상 (i) kg의 산소와 반응하여 $(1+i)$ kg의 연소 생성물을 만든다.

(3) 연료와 산소는 동위치에 함께 존재하나 다른 시간대에 존재한다.

(4) 반응은 무한히 빨리 일어난다.

(5) 화학적 평형은 이루어진 것으로 한다.

종속변수인 혼합분율은 다음과 같이 정의된다.

$$f = \frac{(m_{fu} - m_{ox}/i)_M - (m_{fu} - m_{ox}/i)_A}{(m_{fu} - m_{ox}/i)_F - (m_{fu} - m_{ox}/i)_A} \quad (7)$$

2.5 난동성분에 대한 모델링

시간에 따라 무작위로 변동되는 난동량($\tilde{\theta}(t)$)의 시간 평균값(θ)을 구하기 위해서는 다음과 같이 정의되는 확률밀도함수($P(\tilde{\theta})$)를 알아야 한다.

$$P(\tilde{\theta}) \Delta \tilde{\theta} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum (\Delta t) \quad (8)$$

$\tilde{\theta}$: Fluctuation,

θ : Time mean value

$P(\tilde{\theta})$: Probability density function

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(\tilde{\theta}) d\tilde{\theta} = 1 \quad (9)$$

확률밀도함수($P(\tilde{\theta})$)를 알게 되면 시간 평균값은 다음의 정의에 의해 구할 수 있다.

$$\theta = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} \tilde{\theta}(t) dt \quad (10)$$

따라서,

$$\theta = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\theta} P(\tilde{\theta}) d\tilde{\theta} \quad (11)$$

여기서 Clipped Gaussian distribution을 확률밀도함수로 채택한다.

확률밀도함수를 정의하기 위해서는 두 개의 parameter가 정의되어야 하는데 그 하나는 시간 평균 혼합분율 f , 다른 하나는 다음 식으로 정의되는 편차 g 이다.

$$g = (\bar{f} - f)^2 = f'^2 \quad (12)$$

보존방정식의 각 항들과 f , g 에 대한 방정식은 Table 1에 나타내었다.

2.5.1 The clipped Gaussian distribution

Clipped Gaussian distribution에 대한 정의와 시간 평균값들을 구하는 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(\bar{f}) &= \exp\left[-\frac{(\bar{f}-f)^2}{2\sigma^2}\right] [U(\bar{f}-0) - U(\bar{f}-1)] / \\ & \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} + 2A_0 \delta(\bar{f}-0) + 2A_1 \delta(\bar{f}-1) \end{aligned} \quad (13)$$

$U(\xi)$: Heaviside step function

$U(\xi) = 0, \xi < 0$

$U(\xi) = 1, \xi > 0$

$\delta(f)$: Dirac delta function

Table 1 The form of flow governing equation

| | | |
|------------|-------------------------------------|--|
| ϕ | Γ_0 | S_0 |
| 1 | 0 | 0 |
| U | μ_{eff} | $-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}[\mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial x}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r \mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial r}]$ |
| V | μ_{eff} | $-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}[\mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial x}] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r \mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial r}] - 2\mu_{eff} \frac{V}{r^2} + \frac{\rho W^2}{r}$ |
| Wr | μ_{eff} | $-\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r}[\mu_{eff} W r]$ |
| k | $\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$ | $G_{k1} - \rho \epsilon$ |
| ϵ | $\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$ | $\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_{k1} - C_2 f \rho)$ |

$$G_{k1} = \mu_{eff} [2 \{ (\frac{\partial U}{\partial x})^2 + (\frac{\partial V}{\partial r})^2 + (\frac{V}{r})^2 \} + (\frac{\partial W}{\partial x})^2 + [r \frac{\partial}{\partial r} (\frac{W}{r})]^2 + (\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x})]$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U f) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V f) = \frac{\partial}{\partial x}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_f} \frac{\partial f}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_f} \frac{\partial f}{\partial r})$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U g) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V g) = \frac{\partial}{\partial x}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_g} \frac{\partial g}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_g} \frac{\partial g}{\partial r}) + C_{g1} G_{g1} - C_{g2} - C_{g2} \rho \frac{\epsilon}{k}$$

$$G_{g1} = \mu_{eff} [(\frac{\partial f}{\partial x})^2 + (\frac{\partial f}{\partial r})^2]$$

Table 2 Turbulent model constant

| σ_k | σ_ϵ | C_1 | C_2 |
|------------|-------------------|-------|-------|
| 1.0 | 1.3 | 1.44 | 1.92 |

$$A_0 = \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-\frac{(\bar{f}-F)^2}{2\sigma^2}] \frac{d\bar{f}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (14)$$

$$A_1 = \int_1^{\infty} \exp[-\frac{(\bar{f}-F)^2}{2\sigma^2}] \frac{d\bar{f}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (15)$$

$$f = A_1 + \int_0^1 \bar{f} \exp[-\frac{(\bar{f}-F)^2}{2\sigma^2}] \frac{d\bar{f}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (16)$$

$$g = A_1 + \int_0^1 \bar{f}^2 \exp[-\frac{(\bar{f}-F)^2}{2\sigma^2}] \frac{d\bar{f}}{\sigma\sqrt{2\pi}} - f^2 \quad (17)$$

상태량들의 시간 평균,

$$m_{fu} = m_{fu,1} A_1 + \int_{f_{st}}^1 (\frac{\bar{f}-f_{st}}{1-f_{st}}) \exp[-\frac{(\bar{f}-F)^2}{2\sigma^2}] \frac{d\bar{f}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (18)$$

$$m_{ox} = m_{ox,0} A_0 + \int_0^{f_{st}} (1-\frac{\bar{f}}{f})$$

$$\exp[-\frac{(\bar{f}-F)^2}{2\sigma^2}] \frac{d\bar{f}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (19)$$

$$m_{pr} = 1 - m_{ox} - m_{fu} \quad (20)$$

$$T = A_0 T_0 + A_1 T_1 + \int_0^1 [(\bar{h} - \bar{m}_{fu} H_{fu}) / \sum_j \bar{m}_j C_{pj}]$$

$$\exp[-\frac{(\bar{f}-F)^2}{2\sigma^2}] \frac{d\bar{f}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (21)$$

$$\rho = A_0 \rho_0 + A_1 \rho_1 + \frac{P}{R} \int_0^1 [1/\bar{T} (\sum_j \bar{m}_j / M_j)]$$

$$\exp[-\frac{(\bar{f}-F)^2}{2\sigma^2}] \frac{d\bar{f}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (22)$$

질량분율을 Clipped Gaussian 확률분포로 가정하여 수치해석할 경우 많은 시간이 소요되게 되므로 초기에는 질량분율의 확률분포를 다음의 식과 같은 Battlement 형태를 가진다고 가정하여 충분히 수렴시킨 후 Clipped Gaussian 분포를 이용한 계산을 수행하였다. 또 Clipped Gaussian 분포를 이용한 결과의 타당성을 검증하기 위하여 β 함수 형태의 확률분포를 가진 연소모델도 채택하여 수치 해석하였으며 이 결과들을 실험치와 비교하였다.

$$m_{fu} = \alpha \cdot m_{fu} + (1-\alpha) \cdot m_{fu-} \quad (23)$$

$$m_{ox} = \alpha \cdot m_{ox} + (1-\alpha) \cdot m_{ox-} \quad (24)$$

2.5.2 β 함수 형태의 확률분포

난동성분을 구하기 위한 확률밀도함수가 함수의 형태를 갖는다고 가정하면 상태량은 다음의 식에 의해 구할 수 있다.⁽⁹⁾

$$P(f, x_i) = \frac{f^{(a-1)}(1-f)^{(b-1)}}{\int_0^1 f^{(a-1)}(1-f)^{(b-1)} df} \quad (25)$$

$$\phi(x_i) = \int_0^1 \phi_m(f) \frac{f^{(a-1)}(1-f)^{(b-1)}}{\int_0^1 f^{(a-1)}(1-f)^{(b-1)} df} df \quad (26)$$

연산자 $B(a, b)$ 를 (Γ =감마함수)로 아래와 같이 정의한다.

$$B(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} = \int_0^1 f^{(a-1)}(1-f)^{(b-1)} df \quad (27)$$

따라서,

$$\phi(x_i) = \frac{1}{B(a, b)} \int_0^1 \phi_m(f) f^{(a-1)}(1-f)^{(b-1)} df \quad (28)$$

식(28)의 연산에 있어서는 혼합분율(f)의 증감을 작게 선택하지 않으면 수치적인 오차가 발생할 수 있으므로 혼합 평균상태량 $\phi(f)$ 를 보존량(f)의 다항식으로 표시하고 적분영역을 다음과 같이 두 영역으로 나눈다.

$$\begin{aligned} \phi_m(f) &= \sum c_{mn} f^n \quad 0 \leq f \leq f_{st} \\ \phi_m(f) &= \sum d_{mn} f^n \quad f_{st} \leq f \leq 1 \\ m &= 1, \dots, M \quad (M = \text{중속변수지수}) \\ n &= 1, \dots, N \quad (N = \text{다항식 차수}) \end{aligned}$$

따라서 상태량들의 시간 평균값은,

$$\begin{aligned} \phi(x_i) &= \frac{1}{B(a, b)} \left[\int_0^{f_{st}} \sum c_{mn} f^n f^{a-1} (1-f)^{(b-1)} df \right. \\ &\quad \left. + \int_{f_{st}}^1 \sum d_{mn} f^n f^{a-1} (1-f)^{(b-1)} df \right] \quad (30) \end{aligned}$$

여기서 a, b 값은 f 와 g 의 방정식으로부터 구하며, 연산자 TT 를 도입하여

$$\begin{aligned} TT &= \sum [d_{mn} + (c_{mn} - d_{mn}) \frac{\int_0^{f_{st}} f^{n+a-1} (1-f)^{b-1} df}{\int_0^1 f^{n+a-1} (1-f)^{b-1} df}] \\ &\quad \int_0^1 f^{n+a-1} (1-f)^{b-1} df \\ &= \sum [d_{mn} + (c_{mn} - d_{mn}) \text{BETA}(s, a+n, b)] \\ &\quad \text{BETA}(a+n, b) \quad (31) \end{aligned}$$

결론적으로 평균 혼합상태량은

$$\phi_m = \frac{TT}{\text{BETA}(a, b)} \quad (32)$$

혼합물의 다른 구성물($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{N}_2$)들의 질량분율은 원자수의 보존관계를 이용하여 계산된다.

2.6 경계조건

선회수(swirl number)는 선회정도를 나타내는 무차원수로서 축방향 운동량과 각 속도방향의 운동량비로 나타낸다.

$$S = \frac{G^w}{G_x \cdot \frac{d}{2}} \quad (33)$$

$$G^w = 2\pi\rho U_0^2 \frac{R_0^3 - R_2^3}{3} \tan\phi \quad (34)$$

$$G_x = 2\pi\rho U_0^2 (R_0^2 - R_2^2) \quad (35)$$

실험과 비교하기 위해 각 당량비와 선회수에 따라서 초기 입구속도를 결정하였으며 수치계산시 U_{in} 은 일정하다고 하였고, 난류 운동에너지와 난류에너지 소산율에 대해서는 각각 $0.003 U_{in}^2$ 과 $0.1 k^2$ 으로 주었다. 온도는 연료와 공기 모두 $T_{in} = 300 \text{ K}$ 로 일정하게 유지시켰고, 노즐입구의 압력은 0.1 MPa 로 일정하다고 가정하였다.

출구면의 경계조건은 Khalil⁽¹¹⁾의 실험결과와 수치해석의 결과에 따라서 출구면과 $0.166 D_f$ 떨어진 상류면의 모든 변수값이 변하지 않는다고 가정하였는데 실험결과에서도 온도값이 거의 변하지 않았다.

중심선에서의 모든 중속변수의 ϕ 값은 반경반향으로 변하지 않는다고 가정하였고 벽 부근에서는 유동특성의 급격한 변화로 인한 격자의 밀집과 낮은 Reynolds수의 효과로 인한 난류모델의 부정확성을 피하기 위하여 다음과 같은 벽면함수를 사용하였다.

$$y^+ = y \frac{C_b^{1/4} k_p^{1/2}}{\nu} \quad (36)$$

$$u^+ = u \frac{C_b^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w} \quad (37)$$

$$T^+ = \frac{(T - T_w) \rho C_p C_b^{1/4} k_p^{1/2}}{q_w} \quad (38)$$

이와 같은 무차원변수를 사용하여 가장 일반적으로 사용되는 벽면함수는 다음 식으로 주어진다.

$$u^+ = y^+ \quad (y^+ \leq 11.5) \quad (39)$$

$$u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5 \quad (y^+ > 11.5) \quad (40)$$

$$T^+ = Pr y^+ \quad (y^+ \leq 11.5) \quad (41)$$

$$T^+ = Pr_t (U^+ + J) \quad (y^+ > 11.5) \quad (42)$$

여기서, J 는 Jayatilleke 관계식을 사용하여

$$J = 9.24 [Pr / Pr_t]^{3/4} - 1 \quad (43)$$

$$[1 + 0.28 \exp(-0.007 Pr / Pr_t)]$$

로 주어지고 벽면을 제외한 나머지 영역에서의 ϵ 방정식의 계산은 다음 식으로 정의된다.

$$\epsilon_p = \frac{C_b^{1/4} k_p^{1/2}}{\kappa y_p} \quad (44)$$

여기서, κ 는 von Karman 상수로서 0.42이다.⁽⁸⁾

2.7 수치해석

지배방정식으로부터 이산화방정식을 얻기 위하여 계산영역을 검사체적으로 분할하여 검차체적 공식화(control volume formation) 방법을 사용 하였다. 이산화방정식의 해는 Patankar의 방법을 사용하여 구했으며 유동장은 SIMPLER(semi-implicit method for pressure linked equation revised) 알고리즘을 따라 계산하였다.

격자는 축방향으로 70개, 반경방향으로 30개 구성하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 연소로는 동축분류 연소로서 노즐출구에 선회류를 형성하기 위한 베인 선회기를 장착하였다.

실험장치는 크게 세 부분 즉, 연료 및 공기공급 계통과 연소실 그리고 온도 및 유량 측정장치로 구성 되어있다. 실험장치 개략도는 Fig. 2와 같다.

3.1.1 연료 및 공기 공급장치

연료는 유량계를 지나서 직접 노즐로 분사되며 공기는 인버터에 의해 제어되는 터보송풍기를 통하여 공급된다. 연료의 노즐출구에서의 속도를 알 수 있도록 연료유량이 측정될 수 있게 하였으며 공기 유량은 실험조건에 부합되는 당량비가 되도록 하였다. 연소용 공기가 노즐주위에서 일정 속도를 유지할 수 있도록 유량계와 노즐사이에 완충실을 설치하고 노즐 밀부분에 허니콤을 부착하였다. 선회기는 날개식 선회기를 사용하고 날개각도가 각각 10°, 45°인 경우에 대하여 실험하였으며 선회기의

선회밀도를 무시하였다.

3.1.2 연소실

노즐에서 분사된 연료는 선회기를 통과한 공기와 혼합하여 연소반응을 일으킨다. 연소실 벽에서의 열 플럭스를 일정하게 유지하기 위하여 연소로 외 벽이에 냉각수에 의해 연속 냉각되도록 하였다. 온도측정을 위해 열전대가 연소로의 축방향으로 자유롭게 움직일수 있도록 연소로 벽면을 Slit형으로 가공하고 X-Y 테이블을 제작하여 정밀한 변위 이동을 가능하게 하였다. X-Y 테이블의 구동은 서보 모터와 서보드라이버를 이용하였다.

3.1.3 측정장치

연료유량계 및 공기유량계는 가변변적 플로트식 가변유량계를 사용하였는데 밀도와 점성계수는 온도 300 K을 기준값으로 하여 수정하였다. 또한 압력은 대기압으로 고정하여 유량을 결정하였다.

연소가스의 온도를 측정하기 위해 R-TYPE 열전대에 애자를 끼우고 이를 이중관으로 제작된 프로브에 고정시켰다. 이중관안으로 냉각수를 흐르게 하여 열전대의 과열을 방지하고 프로브를 X-Y 테이블에 고정시켜 축방향과 반지름방향으로 온도를 측정하였다.

3.2 실험방법

원하는 상태의 화염을 얻기위해 연료의 유량을 변화시켜 화염의 형상을 비교하고 노즐 끝에서 보

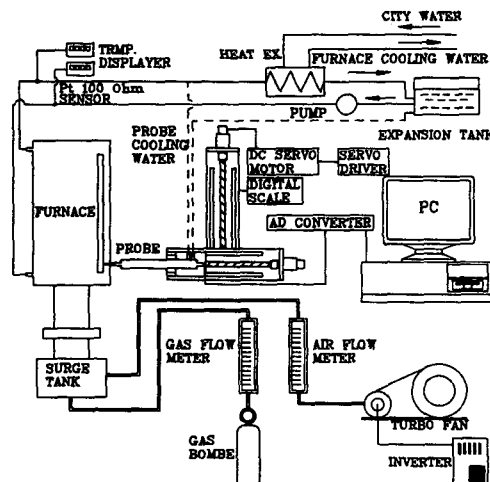


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

염이 되는 적절한 연료유량을 결정하는 예비실험을 하여 연료의 유량을 결정하였다. 실험 순서는 다음과 같다.

냉각수의 유량을 고정하고 소량의 공기와 연료로서 점화시킨다. 필요한 연료량으로 유량을 맞추고 인버터로 제어하여 공기유량을 조절함으로써 적당한 화염을 확인한다. 냉각수의 입구 및 출구온도가 일정하게 유지되고 화염이 안정되었을 때를 정상상태로 생각하고 각 지점의 온도를 측정하였다. 실험에 사용된 연료는 프로판 가스로서 그 조성비는 참고문헌(6)의 값을 취하였다.

열전대의 양단에 걸리는 전위차는 증폭기를 통하여 160배 증폭된 후 A/D 컨버터에서 디지털 데이터로 처리된다. 이 디지털 데이터 80000개를 산술 평균하여 평균 온도를 결정하였다. 이와 같은 실험을 선회기를 바꾸고 당량비를 변화시키면서 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3, 4는 수치해석의 타당성을 조사하기 위해 선회수 0.4와 이론당량비가 1이 되는 공연비 23.87의 공기와 프로판의 연소 온도분포를 같은 조건의 상태에서 실험한 온도값과 비교한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 β 함수 분포나 Clipped Gaussian 확률분포를 연소모델에 적용하였을 때 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었으나 Clipped Gaussian의 경우가 실험치에 보다 근접한 값으로 나타났다.

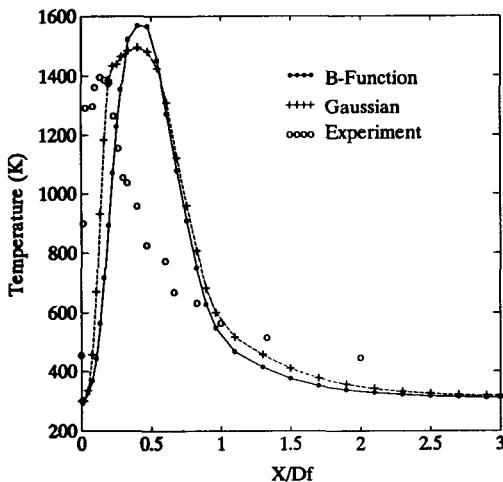


Fig. 3 Distribution of mean temperature(at R=0, SN=0.4)

입구영역에서 온도의 상승이 실험치보다 늦게 일어나지만 출구영역에서는 잘 일치하고 있다. 이는 수치계산상의 공기 초기속도를 노즐의 모든점에서 등속도로 가정한 데서 오는 오차와 선회기를 통과하는 과정에서의 선회밀도를 무시함으로써 생긴 오차일 것으로 예측된다. Clipped Gaussian 확률분포를 이용했을 시는 보다 정확한 온도예측이 기대되나 수치계산에 소비되는 시간이 β 함수 형태의 경우보다 3배 이상이 요구된다. 따라서 수치계산에 있어 경제성을 검토하여야 할 것이다. 즉, 연소 생성물의 정확한 농도 등을 해석하고자 할 때는 Clipped Gaussian을 이용함이 필요하며 화염의 특성을 예측하고자 할 때는 β 함수 형태도 무방할 것으로 판단된다.

선회에 의한 중심부에서의 화염의 역류는 실험을 통하여 중심부에서 노즐방향으로 향함을 확인 할 수 있었으며, 선회수 1.2의 실험은 아주 강한 선회 효과 때문에 화염이 출구쪽으로 쏠려가지 못하고 원주 방향으로 확대됨으로써 소멸되는 현상이 일어났다. 이러한 결과는 수치 계산결과에서 유선곡선과 등온선 형태가 입구 벽면근처에서 재순환영역이 사라지고 역류가 일어나는 지역이 벽면까지 확대되어 화염면이 벽면과 충돌함에서 예측할 수 있었다.

4.1 선회도에 따른 온도분포

Fig. 5, 6은 공연비 25.87, 35.01인 선회류의 유동 방향 중심선 온도분포를 선회도에 따른 변화를 실험치와 비교한 것이다. 선회수가 0.7 이상이면 X/

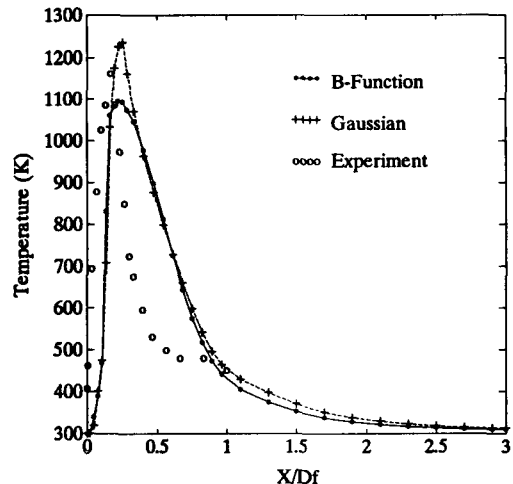


Fig. 4 Distribution of mean temperature(at R=0, SN=0.7)

$D_r=0.5$ 이하되는 곳에서 최고 온도가 나타나는데, 이는 화염면이 입구쪽으로 이동함을 의미한다. 따라서 난류 확산화염의 화염길이는 선회수가 증가하면 짧아지게 됨을 알 수 있다. Fig. 7은 각 선회수에 따른 연소로내의 산소농도의 분포를 나타낸 것이다. 앞의 결과에서 예측된 바와 같이 산소의 농도는 고온의 영역에서 급격히 줄어들음을 알 수 있고 농도의 최저치도 선회수가 증가할수록 노즐쪽으로 접근하였다.

의 온도분포로서 공연비가 증가할수록 온도가 떨어지고 있다. 이는 반응에 관여하지 않는 저온의 과잉공기로 인하여 연소로내의 연소가스 온도가 낮아짐을 의미한다. 수치 계산결과, 공연비가 큰 경우가 실험치와 정량적으로도 유사한 경향을 나타내었다. 이는 당량비가 작거나 선회수가 큰 경우 선회 밀도 등의 영향을 무시한 본 수치해석의 가정이 어느정도 타당성을 가지게 되므로 결과들이 잘 일치한다고 볼 수 있다.

4.2 당량비의 변화에 따른 온도분포

Fig. 8은 선회수 0.4일 때, 공연비 25.87과 35.01

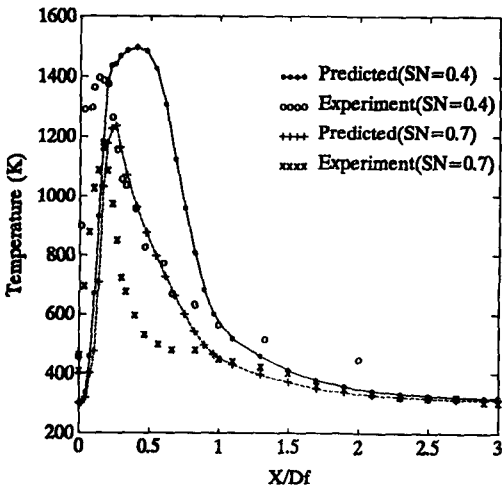


Fig. 5 Distribution of mean temperature(at R=0, AF=25.87)

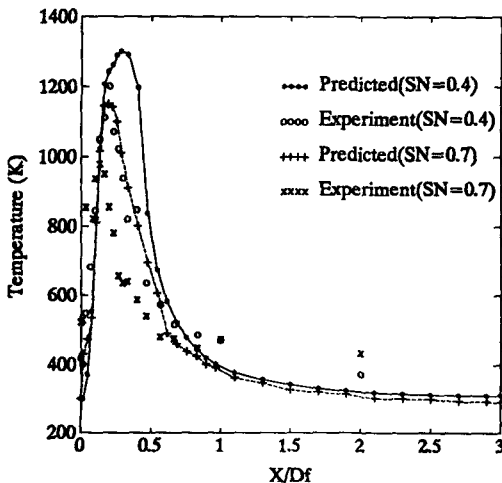


Fig. 6 Distribution of mean temperature(at R=0, AF=35.01)

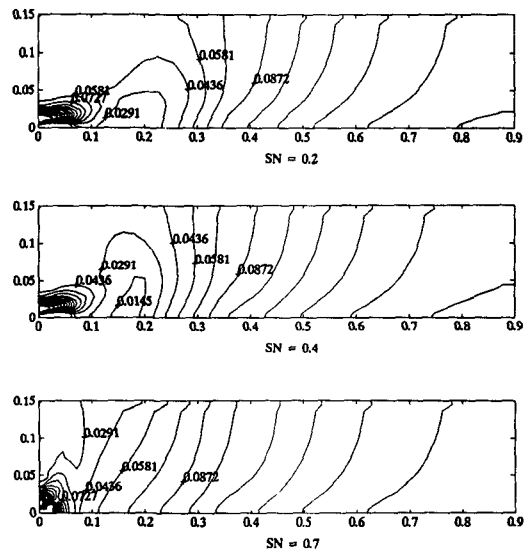


Fig. 7 Oxygen mass fraction distribution with variation of SN

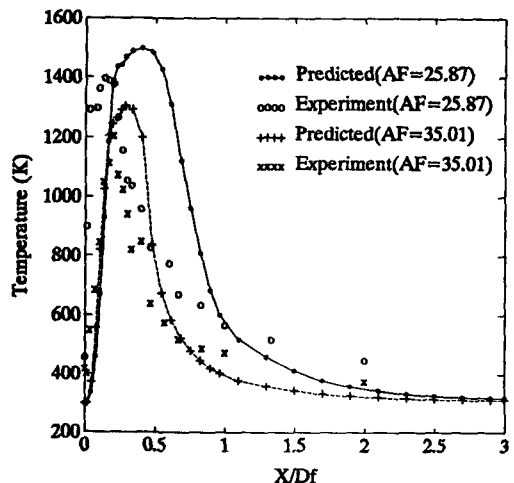


Fig. 8 Distribution of mean temperature(at R=0, SN=0.4)

4.3 선회도에 따른 속도분포

Fig. 9은 선회수의 변화에 따른 선회유동 중심선에서의 축방향 속도를 나타낸 것이다. 약선회(선회수 <math>< 0.6</math>) 시에는 노즐출구에서 속도가 급격히 떨어지고 강선회류의 경우 $X/D_f < 0.5</math>인 영역에서 속도가 음이된다. 이것은 유입되는 공기가 강한 선회류를 형성하면서 원주방향으로 확산되어 하류로 향하던 공기를 노즐방향으로 역류되게 한다. 선회수 0.4, 반경방향 0.1의 위치에서는 속도가 약한 상태의 음의 값을 나타내므로 재순환영역이 이루어지고 있음을 알 수 있고, 선회수 0.7의 경우, 좀 더 벽면 쪽으로 가깝게 위치한 곳에서 강한 재순환영역이$

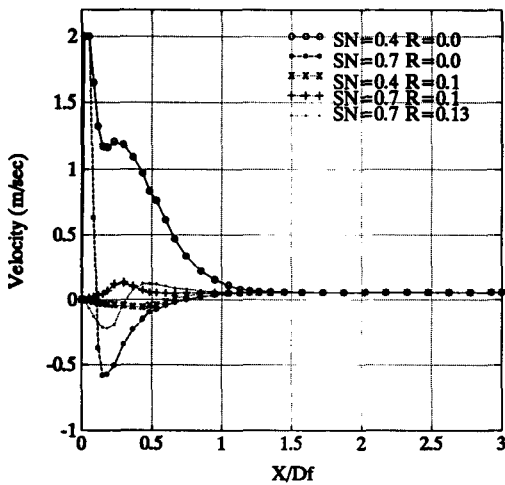


Fig. 9 Distribution of axial velocity(AF=25.87)

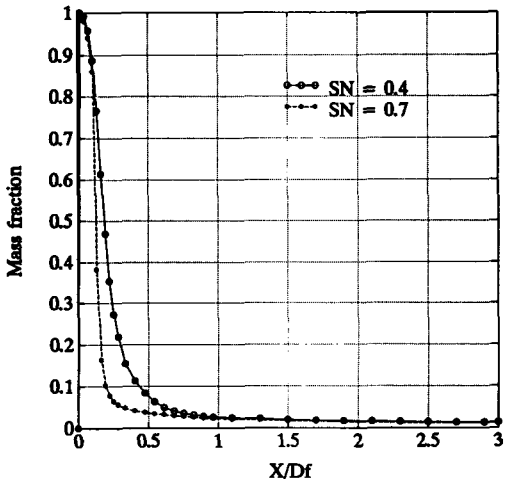


Fig. 10 Distribution of mean mass fraction(at R=0, AF=25.87)

형성됨을 알 수 있다. 따라서 선회강도가 커질수록 역류영역은 확대되고 재순환류는 좁은 영역에 걸쳐 강하게 존재하고 화염의 길이는 짧아져 이론 공연비 이상의 공기분사시에도 보염이 되는 잇점이 있다. Fig. 10은 선회수 0.4와 0.7에서의 평균 혼합분율을 나타낸 것으로 선회도가 클수록 노즐에 가까운 위치에서 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어짐을 나타내고 있다.

5. 결 론

선회를 수반하는 선회류 연소로의 화염의 구조를 선회수와 당량비를 변화시켜 연소모델을 적용하여 계산한 수치해와 같은 조건에서 실험한 실험치와 비교함으로써 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 선회가 존재하는 연소 유동장에 대하여 $k-\epsilon$ 난류모델과 확률밀도함수를 채택한 연소 모델을 사용하여 수치계산한 결과, 실험치와 정성적으로 유사한 경향을 나타내었다.

(2) 선회수의 증가는 원주방향 운동량의 증가를 의미하므로 화염영역이 반경방향으로 넓어지고 연소반응을 거친 고온의 생성물들이 노즐쪽으로 이동함에 의해 고온부가 입구 벽면쪽으로 이동하는 경향을 나타내었다.

(3) 낮은 선회수의 경우, 연소용 공기공급덕트와 스윙러에 의해 생성된 와류의 영향이 높은 선회수의 경우에 비해 상대적으로 크므로 계산치 보다 실제로는 더 빠른 연소반응을 나타내었다.

(4) 당량비가 감소하면 과잉 공기의 영향으로 중심부의 온도가 떨어지고 전체적으로 낮은 온도 분포를 나타내지만 이때의 수치계산결과는 실험치와 정량적으로도 유사한 결과를 나타내었다.

(5) 대칭면의 축방향속도는 노즐출구에서 급격히 떨어지고 강선회류에서는 $X/D_f < 0.5</math>인 영역에서 속도가 음이되면 선회강도가 커질수록 역류영역은 확대된다.$

참고문헌

(1) Khalil, E. E., Spalding, D. B. and Whitelaw, J. H., 1975, "The Calculation of Local Flow Properties in Two Dimensional Furnace," *Int. Journal Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 775 ~ 791.

- (2) Serag, Eldin, M. A. and Spalding, D. B., 1979, "Computations of Three Dimensional Gas-Turbine Combustion Chamber Flows," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 101, pp. 327~336.
- (3) Elgobashi, S. E., 1974, "Characteristics of Gaseous Turbulent Diffusion Flames in Cylindrical Furnace," *Ph. D. Thesis*, London University.
- (4) Ramos, J. I. and Somer, H. T., 1985, "Swirling Flows in a Research Combustor," *AIAA Journal* Vol. 23, pp. 241~248.
- (5) Habib, M. A. and Whitelaw, J. H., 1980, "Velocity Characteristics of Confined Coaxial Jets with and without Swirl," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 102, pp. 47~53.
- (6) North American Mfg. Co., 1989, *North American Combustion Handbook*.
- (7) Khalil, E. E., 1982, *Modelling of Furnaces and Combustors* Abacus Press.
- (8) Nallasamy, M. 1986, *Turbulence Models and Their Applications to the Prediction of Internal Flow*, *Computers and Fluids*, Vol. 15, pp. 151~194.
- (9) Vanka, S. P. 1985, "Calculation of Axisymmetric, Turbulent, Confined Diffusion Flames," *AIAA Journal*, Vol. 24, pp. 462~469.