

〈논 문〉 SAE NO. 943736

선회분류 연소로의 연소 생성물 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Combustion Products of Swirling Furnace

심 순 용,* 노 재 성,** 이 창 식***
S. Y. Shim, J. S. Roh, C. S. Lee

ABSTRACT

This paper describes the effects of combustion parameters on the characteristics of combustion products in swirling flow furnace. The concentration of combustion products and temperature distribution of flow field in the furnace have been investigated by numerical method. The fuel was injected into the furnace and the swirling device was constructed with three kinds of vane swirler at inlet port of furnace.

The results of this study showed that the effect of combustion parameters on the concentration characteristics of carbon monoxide and nitrogen monoxide of combustion products. It was found that the pollutant formation was dependent on the equivalence ratio and swirl intensity level.

주요기술용어 : Swirling Flow(선회류), Pollutant Formation(오염물질 생성)

기 호 설 명

AF	: Air/fuel ratio	κ	: Kinetic energy of turbulence
$C_{p,mix}$: Specific heat of the mixture	k_f	: Reaction rate constant
D_f	: Diameter of furnace	M	: Molecular weight
EQ	: Equivalence ratio	m	: Mass fraction
f	: Mixture fraction	R	: Universal gas constant
g	: Concentration fluctuation	R_0	: Burner exit radius(m)
H_{fu}	: Lower heating value of fuel	S_0	: Source term
h	: Stagnation enthalph		
i	: Stoichiometric mass of oxidant		<Greek letters>
K_p	: Equilibrium constant	α	: Proportion of time
		Γ_0	: Exchange coefficient for variable ϕ

* 정회원, 금성산전(주) 연구소

** 정회원, 현대자동차(주)

*** 정회원, 한양대학교 기계공학과

ε	: Dissipation rate of turbulent kinetic energy
κ	: Von Karman constant
μ	: Viscosity
μ_t	: Turbulent viscosity
μ_{eff}	: Effective viscosity
σ_f	: Effective Schmidt number
Φ	: Extensive property
$C_D, \sigma_\kappa, \sigma_\varepsilon, C_1, C_2$: Turbulent model constants
σ_g, C_{g1}, C_{g2}	: Model constants of g equation

<Subscripts>

A	: Air stream
F	: Fuel stream
fu	: Fuel
α	: Oxygen
pr	: Product
N_2	: Nitrogen
CO	: Carbon oxide
NO	: Nitrogen oxider
i, j, κ	: Coordinate directions
st	: Stoichometric

1. 서 론

최근 대기 오염 문제가 심각해짐에 따라 각종 연소 장치의 오염 물질 저감에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 대기 오염은 주에너지원인 화석 연료의 연소 과정에서 발생하는 오염의 물질이 대기로 방출됨에 기인한다. 탄산가스, 산화질소, 아황산 가스 등의 각종 오염 물질들은 인체에 극히 유해할 뿐 아니라, 지구의 온난화, 토양의 산성화 등 환경 오염의 원인이 하나가 되고 있다.

이와 같은 화석 연료의 연소 과정에서 발생하는 일산화탄소와 산화질소 등에 의한 대기오염을 줄이기 위해서는 불완전연소가 일어나지 않도록 연소 장치의 성능 개선 및 연소 성능을 향상시키는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 선회류를 수반하는 연소로의 연소 조건을 변화시켰을 때, 연소 생성

물의 농도 분포를 고찰하여, 대기오염 물질의 생성 인자들의 영향을 제시하고자 한다. 연구 대상으로 하는 선회 분류 연소기는 연소로 내의 공기 유입면에 선회기를 설치하여 선회류를 생성하여 연료와 공기의 혼합을 향상시키고 화염을 안정시키는 효과가 있으며, 이와 같은 선회류는 연소로 외에도 열교환기, 원심 분리기 등에 광범위하게 적용되고 있다.

선회 분류 연소에 관한 연구는 Spalding¹⁾의 선회류 연소장에 관한 연구를 비롯하여 여러 연구자들에 의하여 연구되어 왔다. Spalding은 κ - ε 난류 모델을 이용하여 선회류가 없는 연소로 및 선회류가 있는 연소로에서의 유동 및 온도 변화를 수치 해석적인 방법으로 예측하고 이를 실험치와 비교하여 연소장 해석에 있어서 κ - ε 난류 모델의 타당성을 입증하였다. 또한 연료의 보존 방정식에 나타나는 생성항을 Arrhenius 방정식 형태로 나타내어, 반응 속도가 연소 생성물의 생성 속도에 따라서 결정되는 Eddy-Break-up 모델로 연소 현상을 해석하였다.

Eldin²⁾은 선회류가 있는 가스 터빈의 3차원 해석에 κ - ε 난류 모델을 적용하고 사각과 형태의 농도 변동을 가정하여 속도와 온도 분포를 구하고 실험치와 비교하였다. Bilger³⁾는 난류 확산 화염에 대해 Zeldovich 메커니즘을 이용하여 NO의 생성량을 구하였고 보존 방정식에서 NO 생성항을 산소 및 질소의 농도항으로 나타내었다. Takagi와 Okamoto⁴⁾는 선회가 있는 화염에서의 공해 물질에 대한 특성을 실험을 통하여 규명하였다. 산화질소를 비롯하여 일산화탄소 및 탄화수소의 생성량을 서로 다른 당량비에 대하여 구하였다.

梶田⁵⁾는 프로판 가스의 난류 확산 화염에 대해 CO 및 NO의 생성 메커니즘을 제시하고 실험적으로 구한 반응 상수를 이용하여 반응율을 계산하였다.

수치 해석적 방법을 통해 난류 확산 화염의 특성을 정확하게 예측하기 위해서는 무엇보다도 유동장의 정확한 해석이 우선되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 선회 분류 연소로 내의 연소 특성을 해석하기 위하여 연료 및 공기의 혼합 분율을 나타내는 변수를 정의하고 이 변수의

변동량을 구하여 반응속도 및 온도, 밀도, 화학종의 농도등을 구하였다. 또한 연소로 내의 온도 특성, 연소 생성물 중의 산화질소, 일산화탄소의 질량 분율을 보존 방정식으로부터 구하고, 선회분류 연소로 내의 연소 생성물의 농도 분포 특성을 규명하였다.

2. 이론 해석

2.1 해석 모델

본 연구에 적용한 해석 모델은 연료 노즐로부터 연료가 분출되고 그 주위의 공기 유속에 설치된 선회기에 의하여 선회 분류가 공급되는 동축 선회 분류 연소로이며, 그 구조 개요는 Fig.1과 같다. 연료는 프로판 가스(C_3H_8)를 사용하였고 선회기는 베인 선회기를 적용하였으며 연소로 출구를 대기에 개방함으로써 압력을 일정하다고 가정하였다.

벽면 온도는 Fig.1과 같이 냉각수의 열교환에 의하여 일정하게 유지되고 로내의 유동은 축대칭 비압축성 2차원 정상 상태의 난류유동으로 가정하였다. 여기서 중력, 부력의 영향 및 복사 열전달 효과를 무시하였다.

2.1.1 지배 방정식 및 난류모델

각 상태량을 구하는데 사용한 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho v r \Phi) &= \frac{1}{\Gamma_\Phi} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r}) &+ S_\Phi \end{aligned} \quad (1)$$

난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

$$-\overline{\rho u'v'} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad -\overline{\rho u'u'} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \quad (2)$$

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

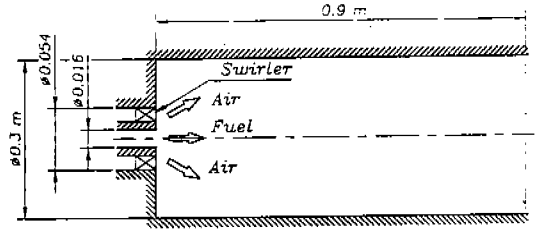


Fig.1 Schematic diagram of furnace model

2.1.2 온도 계산

한편 온도 계산을 위한 연소로 내의 가스 혼합물의 정체 엔탈피와 에너지 방정식은 다음식으로 표시된다.

$$\dot{h} = m_{fu} H_{fu} + \sum_i m_i C_{pi} T + \rho(u^2 + v^2 + w^2) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho v r h) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_\Phi \frac{\partial h}{\partial r}) \end{aligned} \quad (5)$$

온도를 구하기 위하여 식 (4)를 변형하고 운동에너지 항은 연료의 발열량에 비해 작은 값이므로 무시하면

$$T = \frac{h - m_{fu} H_{fu}}{\sum_i m_i C_{pi}} \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다.

2.1.3 혼합 분율과 농도 변동량

$$f = \frac{\Phi_M - \Phi_A}{\Phi_F - \Phi_A} \quad (7)$$

연료 1kg당에 대해 i kg의 산소가 혼합되어 있는 경우에 대해 혼합분율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{(m_{fu} - m_{ox}/i)_M - (m_{fu} - m_{ox}/i)_A}{(m_{fu} - m_{ox}/i)_F - (m_{fu} - m_{ox}/i)_A} \quad (8)$$

난류에 의한 혼합 분율의 변동을 고려하기 위하여 변동량 g 를 아래의 식과 같이 정의한다.

$$g = (f - \bar{f})^2 = f^2 \quad (9)$$

2.2 연소 모델

본 연구에 적용한 연소 모델에 대한 가정은 다음과 같다.

- (가) 연료와 산소는 서로 다른 시각에 같은 곳에 존재할 수 있다.
- (나) 반응은 1단계 반응이며 비가역적이다.
- (다) $f=0$ 와 $f=1$ 에서 Double Delta 함수를 확률 밀도 함수로 사용한다.
- (라) 두 반응물의 난류 확산 계수는 물리적 영역내의 모든 장소에서 같다.
- (마) 1kg의 연료와 i kg의 공기가 반응하여 $(1+i)$ kg의 연소 생성물을 형성한다.

2.2.1 확률 밀도 함수

확률 밀도 함수는 Delta 함수를 이용하는 Double Delta 확률 밀도 함수를 사용한다. 확률 밀도 함수의 형태는 다음 식으로 표시된다.

$$P(x, f) = \alpha \cdot \delta(f - f^+) + (1 - \alpha) \cdot \delta(f - f^-) \quad (10)$$

여기서 α, f^+, f^- 는 f 의 평균값과 난동량을 나타내는 변수 g 로 부터 결정된다.

- (가) $g^{\frac{1}{2}} < (f_{max} - f), g^{\frac{1}{2}} > (f - f_{min})^{\frac{1}{2}}$ 인 경우

$$\alpha = 0.5 \quad (11)$$

$$f^+ = f + g^{\frac{1}{2}}, f^- = f - g^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

- (나) $g^{\frac{1}{2}} > (f_{max} - f)$ 인 경우

$$\alpha = \frac{f - f^-}{f_{max} - f^-} \quad (13)$$

$$f^+ = f_{max}, f^- = f - \frac{g}{f_{max} - f} \quad (14)$$

- (다) $g^{\frac{1}{2}} > (f - f_{min})$ 인 경우

$$\alpha = \frac{f - f_{min}}{f^+ - f_{min}} \quad (15)$$

$$f^+ = f + \frac{g}{f^+ - f_{min}}, f^- = f_{min} \quad (16)$$

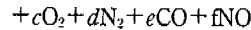
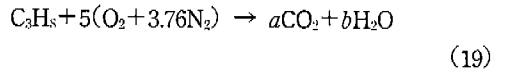
따라서 연료와 산소의 시간 평균 질량 분율은 시간 분율 α 에 따라 다음 식으로 계산된다.

$$m_{fu} = \alpha m_{fu}^+ + (1 - \alpha) m_{fu}^- \quad (17)$$

$$m_{ox} = \alpha m_{ox}^+ + (1 - \alpha) m_{ox}^- \quad (18)$$

2.2.2 화학 반응식

공기는 산소와 질소만으로 구성되어 있다는 가정하에 연료와 공기가 연소할때의 반응식은 식 (19)와 같으며, 생성물은 이산화탄소, 수증기, 일산화탄소 및 일산화질소가 생성된다고 가정하였다.



2.2.3 유동장의 해석

선회 분류 연소로의 유동장 해석을 위해 질량, 운동량, 난류 운동에너지, 난류 소산율 등은 식 (1)로 부터 구하였다. 식 (1)에 나타낸 Φ, Γ, S_0 는 각각 상태량, 확산계수, 생성항을 의미하며 각 상태량에 대한 값들은 Table 1과 같다.

$$G_{x1} = \mu_{eff} \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left\{ r \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w}{r} \right) \right\}^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$$

여기서 $\delta_c = 1.0, \delta_s = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$ 를 적용하였다.

Table 1 Diffusion coefficients and source terms

Φ	Γ_ϕ	S_ϕ
1	0	0
u	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial P}{\partial x}$
v	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) - 2\mu_{eff} \frac{v}{r^2} + \rho \frac{w^2}{r} - \frac{\partial P}{\partial r}$
rw	μ_{eff}	$-\frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mu_{eff} rw)$
κ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\kappa}$	$G_{\kappa 1} - \rho \epsilon$
ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{\kappa} (C_1 G_{\kappa 1} - C_2 f \rho \epsilon)$

2.3 연소 생성물 농도

유동장의 해석을 바탕으로 엔탈피와 생성물 중 산화질소, 일산화탄소 등의 질량 분율을 다음과 같이 구하기로 한다.

2.3.1 산화질소

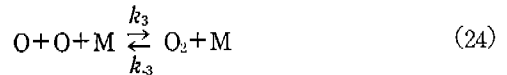
산화질소의 질량 분율을 m_{NO} 라 하고 보존 방정식 적용하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho u m_{NO}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v m_{NO}) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{NO}} \frac{\partial m_{NO}}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{NO}} \frac{\partial m_{NO}}{\partial r} \right) + R_{NO} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 R_{NO} 는 일산화질소가 발생율이고 모델 상수 σ_{NO} 는 0.9를 사용하였다. 연료가 질소 성분을 포함하고 있지 않을 경우 일산화질소의 생성은 공기중의 질소로부터 발생하게 된다. 이 때의 일산화질소의 생성 기구는 Zeldovich 메커니즘으로 나타낼 수 있다.



식 (22)에 의한 일산화질소 생성의 경우 산소 원자에 의해 반응이 일어나게 되므로 다음과 같은 반응식을 가정한다.



일산화질소의 생성 구조를 위와 같이 가정하였을 때 NO의 반응속도는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [NO] = \frac{2(O_2)^{\frac{1}{2}}}{(K_{P,O} R_{i,T})^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{k_1 k_2 (N_2) (O_2)^{\kappa-1} \kappa-2 (NO)^2}{k_2 (O_2) + k_{-1} (NO)} \quad (25)$$

$$R_{NO} = \rho \frac{dm_{NO}}{dt} \quad (26)$$

위 식에서 k 는 반응속도 정수이며, 아래와 같은 Arrhenius식으로 표시된다. Table 2에 나타낸 반응정수는 문헌 (5)에 제시된 값을 인용하였다.

Table 2 Reaction rate constants

k	A	n	E/R_0
k_1	1.36×10^{11}	0	37940
k_{-1}	1.55×10^{10}	0	0
k_2	6.43×10^6	1	3145
k_{-2}	1.55×10^{10}	1	19440
k_3	2.62×10^{10}	-0.84	0
k_{-3}	1.78×10^{15}	-1	59360

$$k = AT^n \exp[-E/(R_0 T)] \tag{27}$$

2.3.2 일산화탄소

일산화탄소에 대한 질량 분율을 m_{CO} 라 하면 식 (1)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho u m_{CO}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v m_{CO}) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{CO}} \frac{\partial m_{CO}}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{CO}} \frac{\partial m_{CO}}{\partial r} \right) + R_{CO} \end{aligned} \tag{28}$$

식 (28)을 풀기 위해서는 일산화탄소의 생성을 R_{CO} 를 구하여야 하나 난류 중에서의 반응 속도에 관해서는 아직 해명되지 않은 부분이 많고, 몇 개의 모델이 제시되어 있을 뿐이다.

Magnussen⁶⁾에 의하면 반응속도는 저온의 경우는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$R_{CO} = -3 \frac{M_{CO}}{M_{fi}} R_{fi} - C_R \frac{\rho E}{K} m_{CO} \cdot m_{pr} \tag{29}$$

여기서

$$R_{fi} = -C_R \frac{\rho E}{K} m_{fi} \cdot m_{pr} \tag{30}$$

이며 C_R 은 실험 상수로서 본 연구에서는 100.0으로 하였다.

한편, 고온 영역에서의 CO 연소 속도에 대해 수많은 반응속도 식이 제안되어 있으나 그 중

Howard⁷⁾가 제안한 다음 식⁷⁾을 채택하기로 한다.

$$\begin{aligned} \frac{dm_{CO}}{dt} &= -1.3 \times 10^{17} m_{CO} m_{ox}^{\frac{1}{2}} m_{H_2O}^{\frac{1}{2}} \\ & \exp\left(-\frac{15100}{T}\right) \end{aligned} \tag{31}$$

이 경우 CO의 생성을 $R_{CO} = -3 \frac{M_{CO}}{M_{fi}} R_{fi} + M_{CO} \cdot \frac{dm_{CO}}{dt}$ 로 나타낼 수 있고 이 때의 R_{fi} 는 Edelman 등의 실험결과⁸⁾에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{fi} &= -M_{fi} \cdot 5.52 \times 10^{11} P^{-0.825} m_{fi} m_{O_2} T \\ & \exp\left(-\frac{12200}{T}\right) \end{aligned} \tag{32}$$

수치계산에 있어 R_{CO} 는 식 (30)과 식 (32)를 비교하여 절대치가 작은 쪽을 채택한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동장 및 온도장 해석

선회류를 동반하는 연소로의 유동장을 속도 벡터로 나타내면 Fig.2와 같다. 여기서 세 가지의 그림은 각각 선회수가 0.2, 0.4, 0.7인 경우의 속도

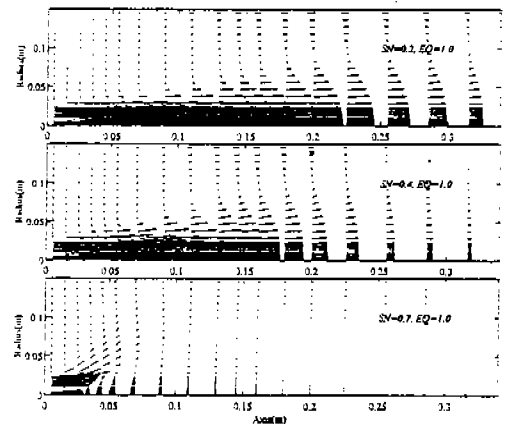


Fig.2 Vector diagram of velocity(SN=0.2, 0.4, 0.7)

분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 선회수가 클수록 반경방향의 속도분포가 크게 나타나고, 재순환 영역이 연소로의 하단부에 가깝게 위치하는 것으로 나타났다. 특히 선회수 0.7인 경우는 중앙부에서 연소 가스가 다시 노즐방향으로 역류되는 현상이 현저하게 나타나고 있다. 연소로 내의 온도 분포를 나타낸 것이 Fig.3으로서 선회수가 증가할수록 고온영역이 노즐쪽으로 이동하고 있으며, 이는 화염이 점차 입구에 접근

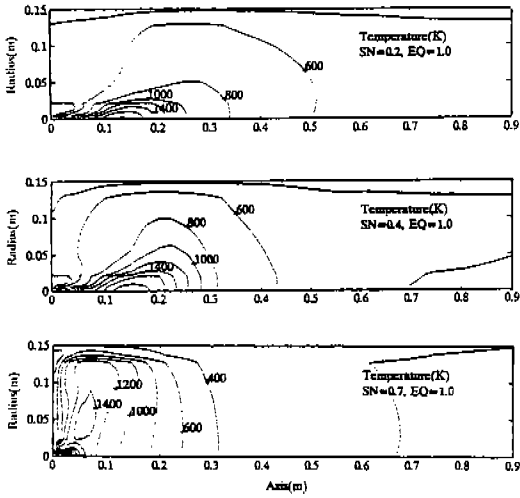


Fig.3 Isothermal lines at various swirl number

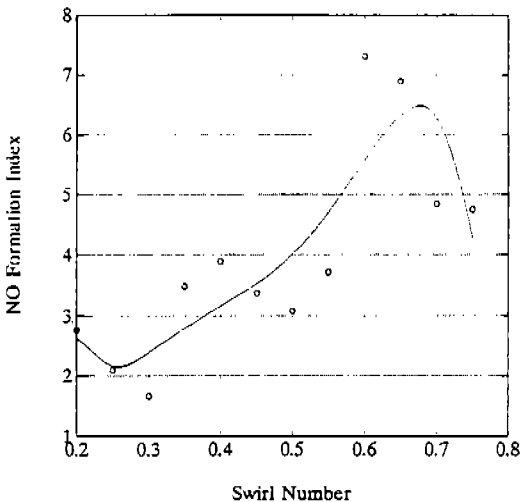


Fig.4 Effect of swirl number on the NO formation

하고 있음을 나타낸다.

3.2 일산화질소의 농도 분포

Fig.4는 당량비가 1.0일 때 연소로 전체에서 발생하는 일산화질소의 질량분율을 동일한 연소로에서 연소 조건이 다를때 비교할 수 있도록 발생지수로 나타낸 것이다. 선도에 의하면 선회수가 증가할수록 일산화질소의 발생은 증가하는 추세에 있으나, 선회수 0.6을 넘으면 오히려 감

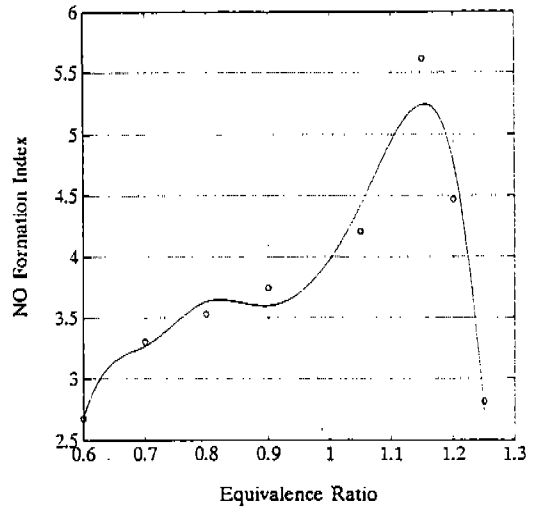


Fig.5 Effect of equivalence ratio on the NO formation

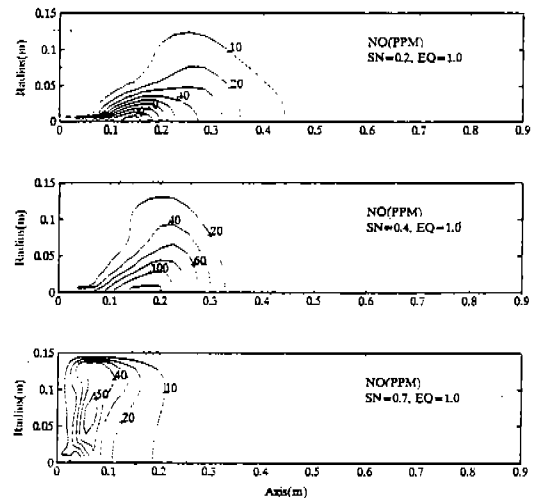


Fig.6 Distribution of NO at various swirl number

소하는 경향을 보이고, 선회수가 0.4이고 당량비가 변화에 따른 일산화질소의 발생지수를 나타낸 것이 Fig.5이며 당량비가 1.1일 때 가장 높은 수치를 나타내고, 이보다 당량비를 증가시키거나 감소시켜도 발생지수는 줄어든다. 따라서 일산화질소의 생성은 화염의 온도에 크게 의존한다는 것을 의미하며, 과잉 공기가 많을수록 일산화질소의 발생은 저하하는 경향을 보였다. Fig.6은 선회도 변화에 따른 일산화질소의 질량분율을 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 선회수가 증가함에 따라서 일산화질소의 생성량은 온도 분포에 크게 의존하고 있어 온도 분포가 변화함에 따라 최대 생성 영역이 연소로의 노즐 입구쪽으로 이동하고 있음을 보여주고 있다. 선회수가 0.2, 0.4, 0.7인 경우를 비교하면 선회수가 0.2일때 연소로의 중간 부분까지 일산화질소의 농도가 존재하고 있으나 낮은 수치를 보이고 있고, 선회수 0.4, 0.6인 경우는 0.2인 경우에 비하여 고온의 영역이 존재하므로 이 영역에서는 높은 수치를 나타낸다. 선회수 0.7일 경우는 화염의 분포와 마찬가지로 일산화질소의 질량분율 역시 연소로 입구에 치우쳐 있으나 0.6일 경우에 비해 낮은 수치를 나타내고 있는데 이는 온도의 분포에서도 선회수 0.7일 경우가 낮은 값을 보이고 있는 것과 관련이 있는 것으로 볼 수 있다.

3.3 일산화탄소의 농도 분포

Fig.7은 선회수를 변화시켰을 때의 일산화탄소의 발생지수를 나타낸 것이다. 선회수를 증가시키기에 따라 일산화탄소의 발생도 증가하여 일산화탄소의 생성 역시 화염의 온도에 의존하고 있다는 것을 알 수 있으나 선회수 0.4 근처에서 감소하는 경향을 나타내고 있어 선회수 0.4일 때가 연소 조건이 양호한 상태임을 보여주고 있다. Fig.8은 당량비를 변화시켰을 경우의 일산화탄소 발생지수를 나타낸 것으로 당량비 0.8이하에서는 일산화탄소의 발생은 거의 없으나, 0.9를 넘으면 일산화탄소의 발생이 급격히 증가하게 되어 당량비 1.15 근처에서 최대값을 나타낸다. Fig.9는 선회수 0.4일때 노즐로부터 70mm 떨어진 위치에서의 일산화탄소 농도를 당량비를 변화시

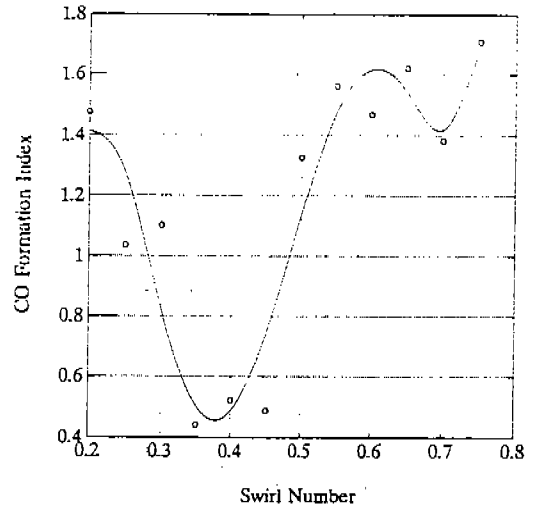


Fig.7 Effect of swirl number on the CO formation

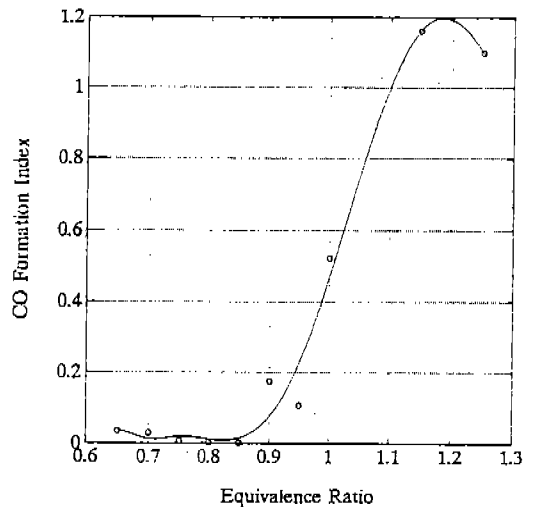


Fig.8 Effect of equivalence ratio on the CO formation

켰을 때 고찰한 것으로, 당량비 0.8인 경우는 일산화탄소가 거의 존재하지 않는 것으로 나타내고 있고, 당량비가 증가할수록 일산화탄소의 발생도 증가하는 것으로 나타났다. 이때 당량비가 1.2에서 1.0으로 감소되어도 일산화탄소의 발생은 크게 저하되지 않으나, 1.0에서 0.8로 되었을 경우 급격히 감소함을 보여 당량비 1.0이하에서는 연소에 관계하는 공기의 양이 일산화탄소의 생성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. Fig.10은 노

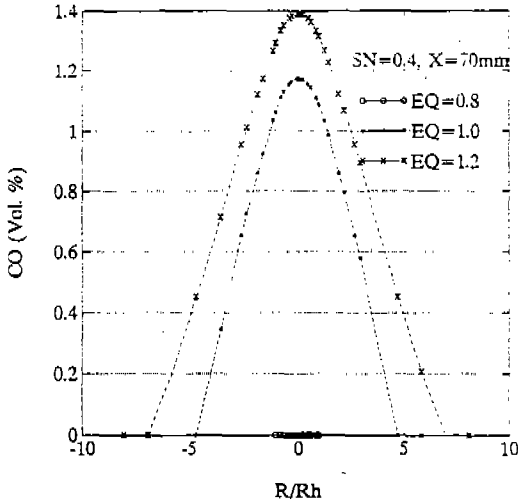


Fig.9 Distribution of CO at various equivalence ratio

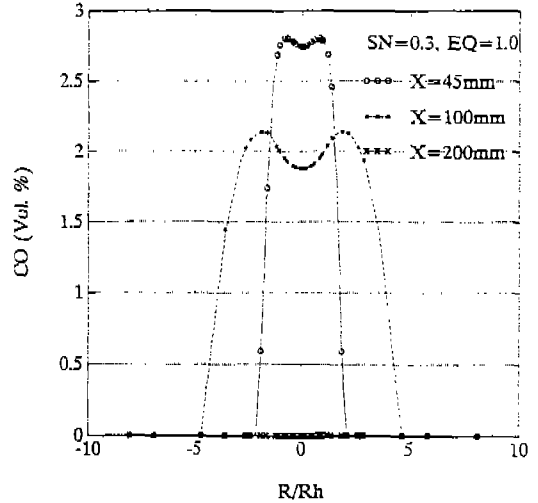


Fig.11 Distribution of CO according to distance from nozzle exit(SN=0.3)

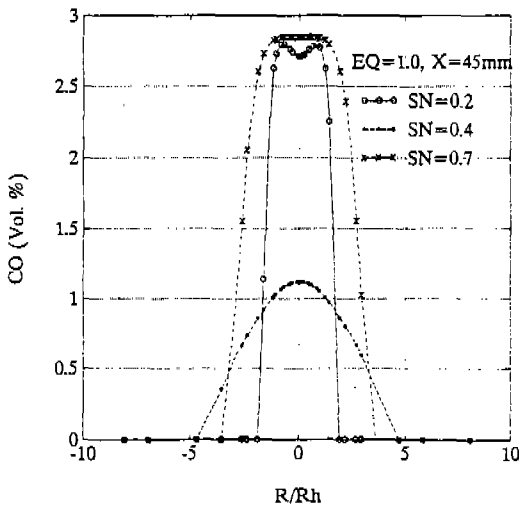


Fig.10 Distribution of CO at various swirl number

즐로부터 45mm 떨어진 곳에서의 각 선회수에 대한 축방향으로의 일산화탄소 농도 분포를 나타낸 것으로 선회수 0.2, 0.7인 경우에 비해 0.4인 경우가 반경방향으로 퍼지면서 낮은 수치를 나타내고 있다. 따라서 본 연구의 대상이 되는 형태의 선회 분류 연소로의 경우 선회수 0.4일때 가장 낮은 수치의 일산화탄소가 생성되고 있음을 알 수 있다. 선회수가 0.3일때 X=45, 100, 200mm 떨어진 곳에서의 일산화탄소의 분포 형태를 나

타낸 것이 Fig.11이다. 결과에 의하면 100mm 정도에 이를때까지 일산화탄소의 농도는 어느 정도 존재하나, 200mm의 위치에서는 일산화탄소의 발생은 10^{-8} 의 값으로 크게 감소되어 거의 존재하지 않고 있음을 나타내어 일산화탄소의 농도 분포 영역이 노즐 부근에 집중되어 있고 후류쪽에서는 극히 미소한 양이 생성된다는 것을 나타내고 있다. 따라서 일산화탄소의 대부분은 유속은 빠르지만 농혼합기가 존재하고 또 비교적 온도가 높은 영역에 존재함을 알 수 있다.

4. 결 론

선회 분류 연소로의 연소 특성과 연소 생성물 농도분포를 해석하고 연소장에 미치는 공기-연료의 당량비, 선회도 등의 영향을 예측한 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 선회 분류 연소로의 연소 생성물 중 일산화질소, 일산화탄소의 생성 농도 및 연소장의 연소 특성을 규명하는 해석 기법을 확립하고 그 타당성을 입증하였다.
- 2) 당량비가 일정한 경우 선회수가 증가하면 화염이 입구쪽으로 이동하는 것과 함께 일산화질소의 농도 역시 연소로의 후류에서 감소하는 경향을 나타내었다.

- 3) 일산화질소의 발생은 온도의 분포에 강한 의존성을 나타내고, 선회수가 증가함에 따라 발생량도 증가하나, 선회수가 0.6을 넘으면 감소하는 경향을 나타내었으며, 당량비의 경우 당량비 1.1을 기준으로 당량비가 감소하거나 증가하여도 일산화질소의 발생은 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 일산화탄소의 경우 발생량은 선회수의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내나, 선회수 0.4 근처에서 줄어드는 경향을 보였으며, 당량비 0.8이하에서는 거의 일산화탄소가 존재하지 않으나, 0.9 근처에서 급격히 상승하여 1.15에서 최대값을 나타내었으며, 모든 경우에 있어 일산화탄소의 분포는 거의 화염 존재 영역 근처에서만 이루어지고 연소로 출구에서는 10^{-8} 의 값을 보여 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Spalding D.B., "The Influences of Laminar Transport and Chemical Kinetics on the Time-Mean Reaction Rate in a Turbulent Flame", 17th International Symposium on Combustion, pp.431-440, 1978.
2. Serag-Eldin M.A. and Spalding D.B., "Computations of Three-Dimensional Gas-Turbine Combustion Chamber Flows", Journal of Engineering for Power, Vol. 101, pp.327-336, 1979.
3. R.W.Bilger, "Turbulent Flows with Nonpremixed Reactants", 16th International Symposium on Combustion, pp.121-129, 1976.
4. Toshimi Takagi, Tatsuyuki Okamoto, "Characteristics and Pollutant Formation in Swirling Flames", Combustion and Flame. pp.69-79, 1981.
5. 梶田, "ガスタービン燃焼器の排氣生成物に関する研究", Ph.D. Thesis, Kobe University, 1986.
6. Magnussen B.F., Hjertager B.H., 1978, 16th Symposium on Combustion, pp.719-728
7. Howard J.B., Williams G.C., 1974, 14th Symposium on Combustion, pp.975-986.
8. Edelman R.B., Weilerstein G., 1980, "Emission from Continuous Combustion Systems", Pleum Press.