

스월이 있는 3차원 모델 연소기 내의 연소특성

김 만 영[†]

(2002년 8월 31일 접수, 2002년 11월 15일 심사완료)

Prediction of Combustion Characteristics in a 3D Model Combustor with Swirling Flow

Man Young Kim

Key Words: 3D Turbulent Reacting Flow(3차원 화학반응 난류유동장), Gas Combustion(기체연소), Thermal Radiation(열복사), Swirling Flow(스월유동), NOx(질소산화물)

Abstract

The objective of this work is to investigate the turbulent reacting flow in a three dimensional combustor with emphasis on thermal NO emission through a numerical simulation. Flow field is analyzed using the SIMPLE method which is known as stable as well as accurate in the combustion modeling, and the finite volume method is adopted in solving the radiative transfer equation. In this work, the thermal characteristics and NO emission in a three dimensional combustor by changing parameters such as equivalence ratio and inlet swirl angle have investigated. As the equivalence ratio increases, which means that more fuel is supplied due to a larger inlet fuel velocity, the flame temperature increases and the location of maximum temperature and thermal NO has moved towards downstream. In the mean while, the existence of inlet swirl velocity makes the fuel and combustion air more completely mixed and burnt in short distance. Therefore, the locations of the maximum reaction rate, temperature and thermal NO were shifted to forward direction compared with the case of no swirl.

기호설명

B_{pdf} : β -확률밀도함수

C_P : 비열, J/(kg·m)

G : 난류운동에너지 생성항

H_v : 연소 반응열, J/kg

h : 엔탈피

I : 복사강도, W/(m²·sr)

k : 난류운동에너지, m²/s²

k_{+i} : 반응계수, m³/(mol·s)

p : 압력

P : 확률밀도함수

R_{fu} : 반응률, kg/(m³·s)

T : 온도, K

u, v, w : 속도

Y_i : 화학종 i 의 질량분율

그리스문자

ϵ_w : 벽면 방사율

κ_a : 흡수계수, m⁻¹

μ_{eff} : 유효 점성계수, = $\mu + \mu_T$

σ_s : 산란계수, m⁻¹

Ω : 산란위상함수, sr⁻¹

Ω : 입체각, sr

[†] 회원, 현대자동차 승용디젤엔진시험팀
E-mail : manykim@hyundai-motor.com
TEL : (031)369-4733 FAX : (031)369-4643

상점자

f_u : 연료
 ox : 산화제

기호

[X] : 몰농도, mol/m^3

1. 서론

최근 들어 우리 나라 뿐만 아니라 전세계적으로 환경오염 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이 중에서도 질소산화물은 연소 공기 중에 포함된 질소 및 연료 중에 함유된 질소성분이 연소 온도의 영향을 받아 산소와 결합하여 생성되는 것으로서, 오존층의 파괴 및 광화학 반응과 관계되어 있을 뿐만 아니라 인체에도 심각한 부작용을 일으키는 것으로 알려져 있다.^(1,2) 최근 십수년간의 실험적 또는 이론적인 연구에 의하면, 질소산화물은 thermal, prompt 및 fuel NOx의 세가지 생성기구가 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ Thermal NOx는 질소를 포함하지 않는 연료를 연소시킬 때 연소용 공기 중의 산소가 분리, 산화하여 생성되는 것으로서 주로 고온의 연소가스가 존재하는 화염의 후류 영역에서 생성되고, prompt NOx는 주로 화염면 및 그 근방에서 생성되는 것으로서 탄화수소계의 연료의 연소시에 발생한다. 한편 fuel NOx는 연료내에 화학적으로 결합되어 있는 질소 성분이 연소과정에서 산화되어 생성되는 것으로서 화석연료의 연소시에 특히 중요하다. 연소 반응이 있을 때 각각의 질소산화물은 서로 상호작용을 하면서 생성 또는 다른 화합물로 변해가지만 이처럼 각각의 반응을 구별하여 그 생성기구를 살펴보는 것은 복합적인 반응이 일어나는 연소기 내에서의 질소산화물에 대한 연구를 수행하는데 있어서 필수적이다.⁽³⁾

본 연구의 목적은 3차원 연소기 내의 반응 유동장의 수치해석을 수행하여 연소기 내부의 열유동 특성을 살펴보고, 이를 통한 질소산화물의 분포를 해석하여 환경오염 물질의 생성 및 그의 저감 대책에 대한 기초자료를 제공하는 것이다. 이를 위하여, 기존의 3차원 화학반응 난류 유동장 해석 프로그램 및 복사열전달 해석 프로그램을 결합하여 반응유동장 해석을 수행하였고, 후처리 과정으로서 thermal NOx의 생성기구를 도입하여 질소산화물의 분포를 고찰하였다. 이러한 연구는 3차원 연소기 내의 연소 및 배출 특성에 대한 기

초연구가 될 뿐만 아니라, 본 연구에 사용된 방법론 및 개발된 프로그램은 최근들어 관심이 높아지고 있는 환경오염물질의 생성 및 그의 저감 대책의 제시에 있어서도 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 이론 해석

2.1 해석 모델

본 연구에서는 고려하고 있는 3차원 연소기를 Fig. 1에 나타내었다. 이 연소기의 가로, 세로 및 길이는 각각 0.18, 0.18 및 1.524 m이며, $x=0$ 인 입구 평면에 버너가 존재한다. 버너의 중심부에는 $w_1 \times w_1$ 크기의 연료가 들어가는 부분과 그 주위에 연소용 공기가 들어가는 부분($w_2 \times w_2$)으로 구성되어 있는데, 여기에서 w_1 과 w_2 는 각각 $w_1=0.0195$ m 및 $w_2=0.0507$ m 이다. 한편, 연소가스는 $x_0=1.524$ m에 있는 출구 평면을 통하여 연소기를 빠져나간다.

2.2 지배방정식

버너를 통하여 연소기 내부로 유입된 공기와 연료의 화학반응 유동장 및 이에 수반되는 질소산화물의 생성을 예측하기 위해서는 연소기 내부의 유체의 난류 유동, 화학반응 및 복사열전달 현상 등을 동시에 해석해야 한다.⁽⁴⁻⁶⁾ 화학반응 유동장을 지배하는 지배방정식은 연속방정식, 운동량 방정식, 난류 방정식, 에너지 방정식 및 각 화학종의 보존 방정식으로 구성되며, 각각은 다음과 같은 일반형으로 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (1)$$

여기에서, ϕ 는 대표종속변수로서 u, v, w, k, ϵ, h , 그리고 Y_i 를 나타내며 Γ_ϕ 는 각 종속변수에 대한 확산 계수, 그리고 S_ϕ 는 생성항이며, 이들은 Table 1에 정리되어 있다. 여기에서 G 는 난류 운동에너지의 생성항으로서

$$G = \mu_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

이며, $\mu_{eff} = \mu + \mu_T$ 로서 유효점성계수를 나타낸

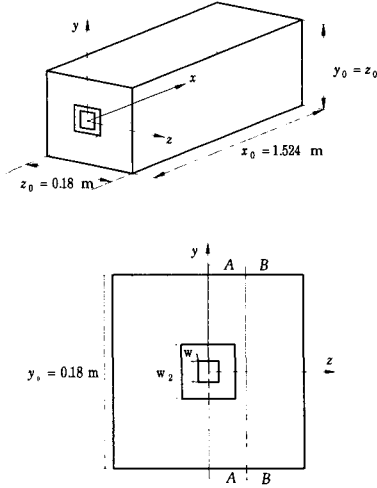


Fig. 1 Schematics of the problem

Table 1 Variables and source terms in Eq. (1)

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x})$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y})$
w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z})$
k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon$
ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$-\frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon)$
h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	$H, R_{fu} - \nabla \cdot q^R$
Y_{fu}	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{fu}}$	$-R_{fu}$
Y_{ox}	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{ox}}$	$-\frac{2W_{ox}}{W_{fu}} R_{fu}$
Y_{CO_2}	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{CO_2}}$	$\frac{W_{CO_2}}{W_{fu}} R_{fu}$
Y_{H_2O}	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{H_2O}}$	$\frac{2W_{H_2O}}{W_{fu}} R_{fu}$

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 0.9, \sigma_\epsilon = 1.3, \sigma_h = 0.9, \sigma_{i=fu, ox, CO_2, H_2O} = 0.9$$

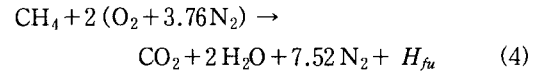
Table 2 Coefficients for specific heat

Chemical Species	a_0	b_0
CH ₄	2,786.7	1.5170
O ₂	953.7	0.1075
CO ₂	977.5	0.1836
H ₂ O	1,811.1	0.4759
N ₂	1,046.3	0.1066

다. 한편 h 는 엔탈피를 나타내며, 다음과 같이 정의된다. 즉,

$$h = \sum_k Y_k h_k = \sum_k Y_k \int_{T_{ref}}^T C_{p,k}(T) dT \quad (3)$$

여기에서 $C_{p,k}$ 는 각 화학종의 정압비열로서 JANAF 테이블에 주어진 값을 1차식으로 근사하여 사용하였다. 한편, 화학반응은 연료와 산화제가 단단계 비가역 전반응을 하는 것으로 가정하면 연료로 사용된 CH₄에 대한 반응식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾ 즉,



이때, H_{fu} 은 1 kg의 연료와 s kg의 공기가 반응하여 (1+s) kg의 연소생성물을 생성할 때 발생하는 생성열을 나타낸다. 이와 함께, 반응열, R_{fu} 은 Magnussen과 Hjertager⁽⁹⁾가 제안한 eddy dissipation 연소 모델을 사용하였으며, 그 표현식은 다음과 같다.

$$R_{fu} = A_{mix} \rho \frac{\epsilon}{k} \left[Y_{fu}, \frac{Y_{O_2}}{s}, B_{mix} \frac{Y_{H_2O} + Y_{CO_2}}{1+s} \right] \quad (5)$$

여기에서 모델상수 A_{mix} 와 B_{mix} 는 각각 4와 0.5이다.

2.3 열역학적 물성치

연료, 공기, 그리고 연소생성물 혼합기의 밀도는 다음과 같은 상태방정식을 따른다. 즉,

$$\rho = \frac{P}{RT \sum_j \frac{Y_j}{W_j}} \quad (6)$$

여기에서 R 은 일반기체 상수이다. 한편 혼합기의 비열은

$$C_{p,mix} = \sum_j Y_j C_{pj} \quad (7)$$

여기에서,

$$C_{pj} = a_{0j} + b_{0j} T \quad (8)$$

로서 화학종 j 의 비열을 나타내는데, 여기에서

계수 a_{0j} 와 b_{0j} 는 Table 2에 정리되어 있다.

2.4 복사열전달

에너지 방정식의 복사생성항 $-\nabla \cdot q^R$ 은 단위 체적당 순 복사열손실에 해당하는 것으로서 다음과 같이 주어진다.⁽¹⁰⁾ 즉,

$$-\nabla \cdot q^R = -x_a \left(4\pi I_b - \int_{4\pi} I d\Omega \right) \quad (9)$$

여기에서 매질의 복사강도 I 를 구하기 위하여 복사전달 방정식을 해석하는데, 이 복사전달 방정식은 임의의 위치 \vec{r} 에서 경로 \vec{s} 를 따라 흡수, 방사 및 산란하는 매질의 복사에너지의 보존식으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dI}{ds} = -(x_a + \sigma_s)I + x_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I^m \Phi^{m,m} d\Omega \quad (10)$$

윗 식 우변 첫째항은 흡수 및 산란에 의한 복사강도의 감소, 둘째항과 셋째항은 각각 방사 및 산란에 의한 복사에너지의 증가를 나타낸다. 한편, 본 연구에서 고려하고 있는 연료는 기체상태의 CH_4 이므로 연소생성물은 순수 기체상태의 CO_2 와 H_2O 이며, 연소 생성물 중에 입자가 포함되어 있지 않기 때문에 산란은 무시하였다 (즉, $\sigma_s = 0$). 또한 흡수계수는 복사에너지의 파장에 따라 심하게 변하는 비회체 특성을 가지고 있지만, 이를 고려할 경우 많은 계산시간이 소요되므로 본 연구에서는 연료 및 연소생성물에 의한 흡수계수를 다음과 같이 파장에 따라 변하지 않는 회체가스로 고려하였다.⁽¹¹⁾ 즉,

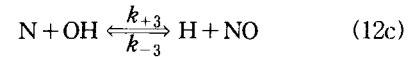
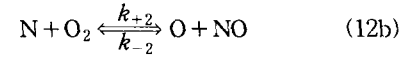
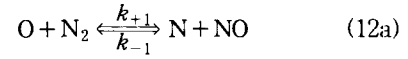
$$x_a = 0.3Y_{fu} + 0.1(Y_{\text{CO}_2} + Y_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (11)$$

2.5 질소산화물 생성 모델

질소산화물의 생성 모델에는 thermal NOx, prompt NOx 및 fuel NOx의 세가지 메카니즘이 있는 것으로 알려져 있다. 이 중에서 thermal NOx는 주로 연소용 공기중에 함유된 질소의 산화에 의하여 생성되며, prompt NOx는 화염 영역 근처에서 일어나는 빠른 속도의 화학반응에 의하여 생성되며, 마지막으로 fuel NOx는 주로 연료 중에 함유되어 있는 질소의 산화에 의하여 일어난다. 본 연구에서 다루고 있는 연료인 CH_4 에는 질소 성분이 없으므로 여기에서는 이러한 세가지

모델 중 특히 온도에 민감하다고 알려져 있는 thermal NOx 메카니즘만을 고려하기로 한다.

Thermal NOx는 연소 공기 중의 질소 성분이 연소 중 산화하여 발생하는 것으로서, 주로 다음과 같은 확장된 Zeldovich 메카니즘을 통하여 생성되는 것으로 알려져 있다.



여기에서 $k_{\pm i}$ 는 각 반응의 정반응 및 역반응 계수를 나타내며, 다음과 같이 온도의 함수로 표현될 수 있다. 즉,

$$k_{+1} = 1.8 \times 10^8 \exp(-38,370/T) \quad (13a)$$

$$k_{-1} = 3.8 \times 10^7 \exp(-425/T) \quad (13b)$$

$$k_{+2} = 1.8 \times 10^4 T \exp(-4,680/T) \quad (13c)$$

$$k_{-2} = 3.8 \times 10^3 T \exp(-20,820/T) \quad (13d)$$

$$k_{+3} = 7.1 \times 10^7 \exp(-450/T) \quad (13e)$$

$$k_{-3} = 1.7 \times 10^8 \exp(-24,560/T) \quad (13f)$$

이며 단위는 $\text{m}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$ 이다.⁽¹²⁾ 따라서 위의 반응식에 따른 NO의 생성률은

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{NO}]}{dt} = & k_{+1}[\text{O}][\text{N}_2] + k_{+2}[\text{N}][\text{O}_2] \\ & + k_{+3}[\text{N}][\text{OH}] - k_{-1}[\text{NO}][\text{N}] \\ & - k_{-2}[\text{NO}][\text{N}] - k_{-3}[\text{NO}][\text{H}] \quad (14) \end{aligned}$$

여기에서 몰농도 $[X_i]$ 의 단위는 mol/m^3 이다. 한편, 질소원자가 평형상태에 있고 위의 반응 (14)의 경우 $k_2[\text{O}_2]_{eq} \gg k_3[\text{OH}]_{eq}$ 상태에 있기 때문에 무시될 수 있다고 가정하면 윗 식은 최종적으로 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = \frac{2[\text{O}](k_1 k_2 [\text{O}_2][\text{N}_2] - k_{-1} k_{-2} [\text{NO}]^2)}{k_2 [\text{O}_2] + k_{-1} [\text{NO}]} \quad (15)$$

여기에서, O 라디칼의 농도가 평형상태에 있다고 가정하면 다음과 같이 산소의 농도로부터 O 라

디칼의 농도를 구할 수 있다.

$$[O] = 3.97 \times 10^5 T^{-1/2} [O_2]^{1/2} \exp(-31,090/T) \quad (16)$$

최종적으로 thermal NO의 생성률은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{thermal, NO} = W_{NO} \frac{d[NO]}{dt} \quad (17)$$

2.6 질소산화물의 생성과 난류 상호작용

윗 식 (17)로 표현되는 질소산화물의 생성률은 온도 및 주요 화학종의 농도에 비선형적으로 밀접한 관련을 가지고 있다. 따라서 난류 유동장에서 질소산화물의 생성률은 평균 온도 및 평균 농도 만으로는 정확한 값을 예측할 수 없으며 이들의 변동량을 함께 고려해야 한다.⁽¹³⁾ 통계적 접근 방법에 따르면 질소산화물의 평균 생성률 \bar{S}_{NO} 는 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다. 즉,

$$\bar{S}_{t-NO} = W_{NO} \int_0^1 \dots \int_0^1 \frac{d[NO]}{dt} (T) P(\phi_1, \dots, \phi_N) d\phi_1, \dots, d\phi_N \quad (18)$$

여기에서 P 는 확률밀도함수로서, 정확한 해석을 위해서는 확률밀도함수의 전달 방정식을 해석하여 P 를 구해야 하지만,⁽¹⁴⁾ 그러한 접근 방법은 엄청난 계산시간을 요구하고, 더구나 본 연구와 같은 3차원 해석에 적용시키기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 대부분의 다른 연구에서 도입하고 있는 것처럼 확률밀도함수를 beta 함수 형태의 확률밀도함수(beta pdf) B_{pdf} 로 가정하였으며, 또한 이 확률밀도함수는 다른 변수보다 온도에 특히 민감한 것으로 가정하였다.⁽⁷⁾ 즉,

$$B_{pdf}(T; a, b) = \frac{(T_b - T_u)^{2-a-b}}{B(a, b)} (T - T_u)^{a-1} (T_b - T)^{b-1} \quad (19)$$

여기에서

$$B(a, b) = (T_b - T_u)^{2-a-b} \int_{T_u}^{T_b} (T - T_u)^{a-1} (T_b - T)^{b-1} \frac{dT}{T_b - T_u} \quad (20)$$

의 형태를 갖는 beta 함수로서 $a > 0$ 및 $b > 0$ 이며, T_u 와 T_b 는 연소장에서 얻을 수 있는 최저 온도와 최고 온도를 나타낸다. 한편, 여기에서 계수 a 와 b 는 다음 식과 같이 평균 온도 T 와 변화량 T''^2 의 함수로 이루어진 계수이다. 즉,

$$a = T \left[\frac{T(1-T)}{T''^2} - 1 \right], b = \frac{1-T}{T} a \quad (21)$$

한편, T''^2 의 전달방정식을 해석하여 T''^2 를 구하는 대신, $a > 0$ 이라는 조건으로부터 다음과 같은 조건이 만족하도록

$$T''^2 < s_{pdf}(T - T^2) \quad (22)$$

계수 s_{pdf} 를 도입하여 a 와 b 를 구한다. 즉,

$$a = \frac{1-s_{pdf}}{s_{pdf}} \frac{T - T_u}{T_b - T_u}, b = \frac{1-s_{pdf}}{s_{pdf}} \frac{T_b - T}{T_b - T_u} \quad (23)$$

이며, 이때 s_{pdf} 는 $0.5 < s_{pdf} < 1.0$ 이지만, 본 연구에서는 통상적으로 사용하는 값인 $s_{pdf} = 0.6$ 을 사용한다. 따라서 최종적인 질소산화물의 평균 생성률 \bar{S}_{NO} 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\bar{S}_{t-NO} = W_{NO} \int_{T_u}^{T_b} \frac{d[NO]}{dt} (T) B_{pdf}(T; a, b) \frac{dT}{T_b - T_u} \quad (24)$$

한편, 윗 식은 T_u 와 T_b 근처에서 특이점을 가지고 있으므로 다음과 같이 근사하여 계산을 수행한다. 즉,

$$\begin{aligned} \bar{S}_{t-NO} &= W_{NO} \int_{T_u}^{T_u + \Delta T} \frac{d[NO]}{dt} (T) B_{pdf}(T; a, b) \frac{dT}{T_b - T_u} \\ &+ \frac{W_{NO}}{N} \sum_{i=2}^{N-1} \frac{d[NO]}{dt} (T_{mi}) B_{pdf}(T_{mi}; a, b) + \\ &W_{NO} \int_{T_b - \Delta T}^{T_b} \frac{d[NO]}{dt} (T_{mi}) B_{pdf}(T; a, b) \frac{dT}{T_b - T_u} \end{aligned} \quad (25)$$

여기에서,

$$T_{mi} = T_u + \frac{2i-1}{2} \Delta T, \Delta T = \frac{T_b - T_u}{N} \quad (26)$$

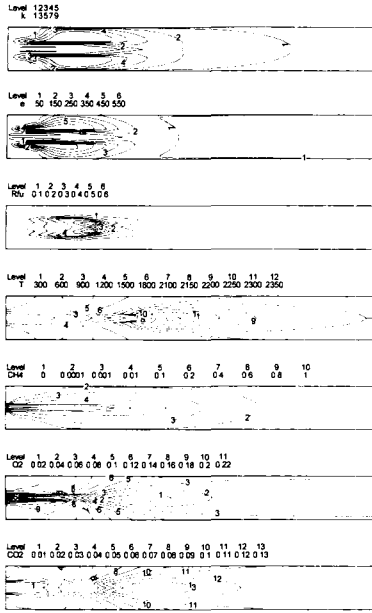


Fig. 2 Contour plots for $\lambda=0.8$ at $z=0$ plane

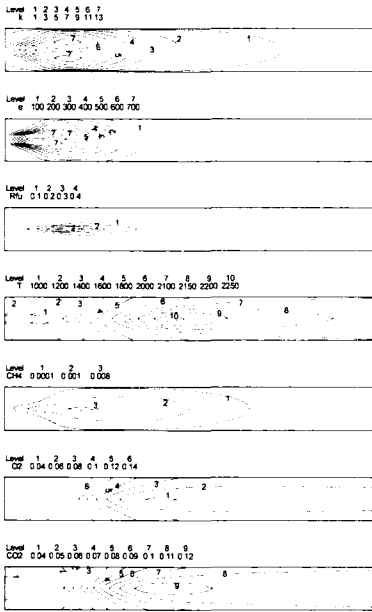


Fig. 3 Contour plots $\lambda=0.8$ for at $z=0.033$ m plane

2.7 수치해석 및 경계 조건

전술한 지배방정식은 SIMPLE 알고리즘에 기초한 CMJ3D 코드⁽¹⁵⁾를 이용하여 해석하였으며, 복사열전달의 경우 유한체적법⁽¹⁶⁾을 적용하였고,

격자계는 해의 정확도 및 계산시간을 고려하여, $(N_x \times N_y \times N_z) = (37 \times 21 \times 21)$ 시스템을 사용하였다.

한편, 입구에서 들어오는 연료 및 연소용 공기의 온도는 각각 300 K와 600 K이며, 공기의 축방향 속도는 15 m/s로 고정하였으며 연료의 속도는 입구에서의 당량비 λ 에 따라 다음과 같이 변화하도록 하였다.

$$u_{fuel} = 4.41 \lambda \quad (27)$$

스월이 있는 경우 축방향 속도는 그대로 유지하고 공기의 스월 속도를 스월 각도에 따라 변화시킨다. 한편, 출구에서의 축방향 속도는 전체적인 질량유량을 만족하도록 보정하였으며 이 외의 다른 모든 변수는 외삽하였고, 벽면에서의 속도는 점착조건 및 벽법칙으로 처리하였으며,⁽¹⁶⁾ 엔탈피는 단열조건을 사용하였다. 한편, 복사전달 방정식의 해석을 위하여 벽면 경계조건이 필요하며, 벽면 방사율 ϵ_w 인 확산적으로 방사 및 반사하는 벽면에서의 복사강도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.^(10,12) 즉,

$$I_w = \epsilon_w I_{bw} + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \int_{s' \cdot \vec{n}_w < 0} I_w^m |s' \cdot \vec{n}_w| d\Omega \quad (28)$$

여기에서 우변 첫째항과 둘째항은 각각 방사 및 반사된 복사강도를 나타낸다. 이와 함께, 입구는 각각 연료 및 공기의 온도를 갖는 흑체 벽면으로 처리하고 출구는 300 K의 온도로 유지되는 흑체 벽면으로 처리하였다. 본 연구에서 사용된 벽면의 방사율은 $\epsilon_w = 0.8$ 이다.

3. 결과 및 검토

아래에서는 입구에서의 당량비와 스월 각도를 변화시켰을 때의 3차원 연소기 내의 연소 특성 및 질소산화물 배출특성을 살펴보기로 한다.

3.1 당량비의 변화에 따른 연소 및 배출 특성

Fig. 2는 입구에서의 당량비가 0.8로 고정되어 있고 입구 스월이 없는 경우 $z = z_0/2$ 단면(즉, Fig. 1의 AA단면)에서의 유동장 및 연소특성을 나타내고 있다. 입구 평면의 버너를 통하여 들어

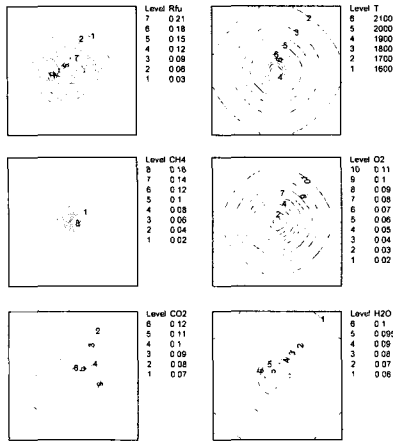


Fig. 4 Contour plots for $\lambda=0.8$ at $x=x_0/2$ plane

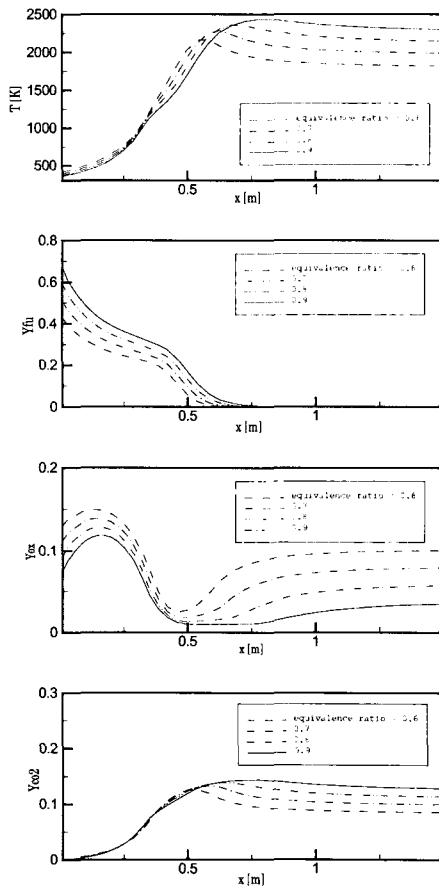


Fig. 5 Contour plots at the centerline

은 공기와 연료는 속도차에 의해 서로 섞이게 되

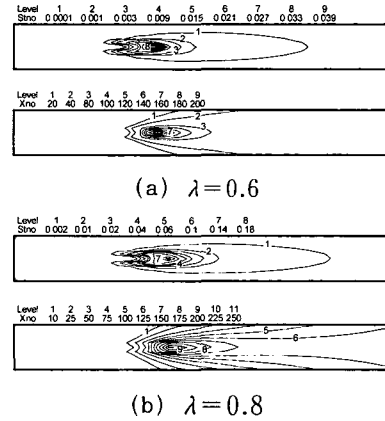


Fig. 6 Contour plots for thermal NO source (upper) and thermal NO (lower)

며 난류량인 k 와 ϵ 은 전형적인 후향계단에서의 형상을 보여주고 있다. 한편, 난류 혼합에 의하여 결정되는 반응물 R_{fu} 은 난류량 k 와 ϵ 이 큰 영역인 버너 부근에서 생성되기 시작하여 약 $x=x_0/4$ 에서 최고값을 나타낸 후, 유동이 발달하기 시작하는 영역에서 난류량이 감소하는 것과 더불어 그 값이 작아진다. 한편, 내부의 온도 분포는 전형적인 확산 화염의 형태를 보여주고 있음을 알 수 있다. 반응물이 최고인 영역의 뒤쪽인 $x=x_0/2$ 근처에서 최고 온도를 나타내며 (약 2,360 K) 2,000 K 이상인 온도로 연소기를 빠져나간다. Fig. 2에 있는 연료의 질량분율을 보면, 버너의 중심부에서 나온 연료는 반응에 의하여 급격히 감소하기 시작하여 최고온도 영역을 지나면서 거의 없어지고, 산화제인 산소는 반응물이 최고인 바로 뒷부분에서 최저값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편, 연소 생성물인 CO_2 는 연소기 내의 온도분포와 마찬가지로 반응물이 최고인 지점을 지나 $x=x_0/2$ 근처에서 최고값을 나타내며 출구 부근에서는 질량분율이 합이 약 0.2가 된다. Fig. 3은 $z_0=0.033$ m인 단면 (Fig. 1의 BB 단면) 에서의 값들을 나타내고 있는데, 대체로 AA 단면에서와 비슷한 경향을 보이고 있지만 그 값들은 작아졌음을 알 수 있다. 한편, Fig. 4는 각각 $x=x_0/2$ 인 단면에서의 물리량들의 값을 보여주고 있다. 비록 본 논문에 도시하지는 않았지만 이들을 출구단면에서의 값들과 비교해 보면, 우선 난류량들의 경우 아직 완전 발달하지 않은 $x=x_0/2$ 단면의 경우 중심부보다 전단층이 있는 중심 근처의 영역에서 높은 값을 나타내며

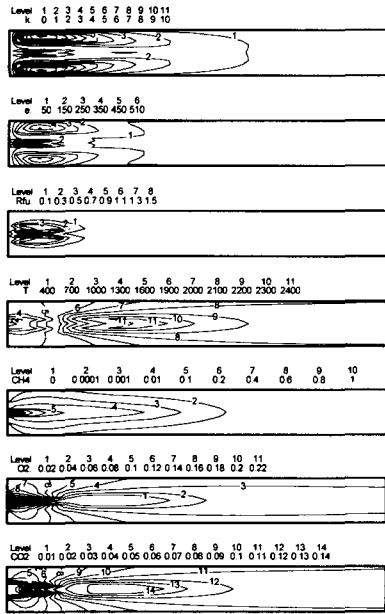


Fig. 7 Contour plots for $\lambda=0.8$ with swirl angle of 30° at $z=0$ plane

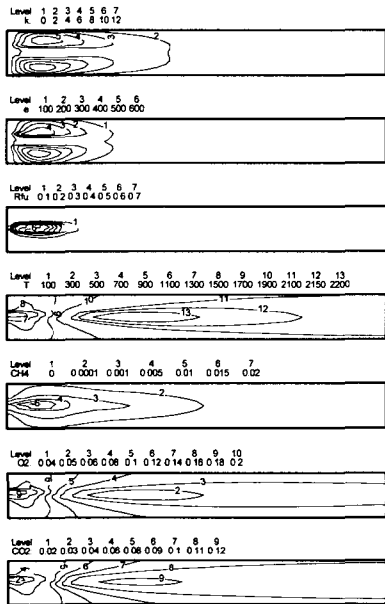


Fig. 8 Contour plots for $\lambda=0.8$ with swirl angle of 30° at $z=0.033$ m plane

따라서 아직 완전한 혼합이 일어나지 않았음을 알 수 있다. 연료의 반응률은 난류량이 큰 부근에서 최고값을 나타내고 있으며 이 부근에서 최고 온도가 형성되고 있다. 한편, 중심부근에 아직 연소되지 않은 연료가 남아 있으며 연소 생성물

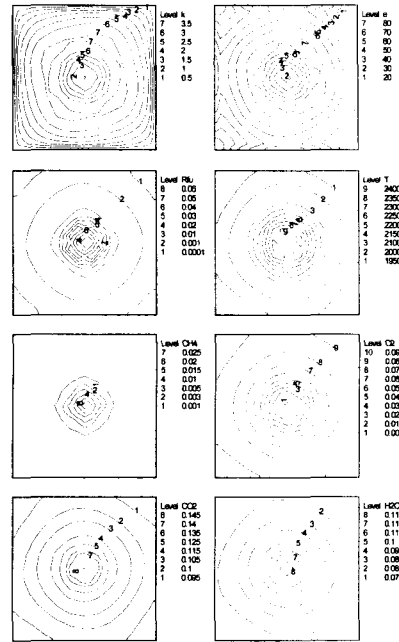


Fig. 9 Contour plots for $\lambda=0.8$ with swirl angle of 30° at $x=x_0/2$ plane

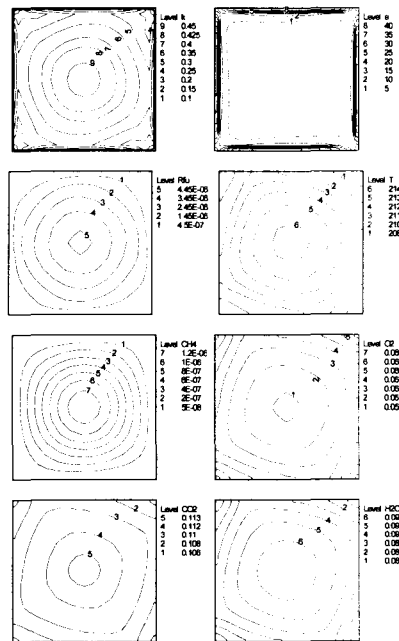


Fig. 10 Contour plots for $\lambda=0.8$ with swirl angle of 30° at $x=x_0$ plane

은 최고 반응률 및 최고 온도 영역에서 가장 높은 분포를 보이고 있다. 출구 평면의 경우 유동

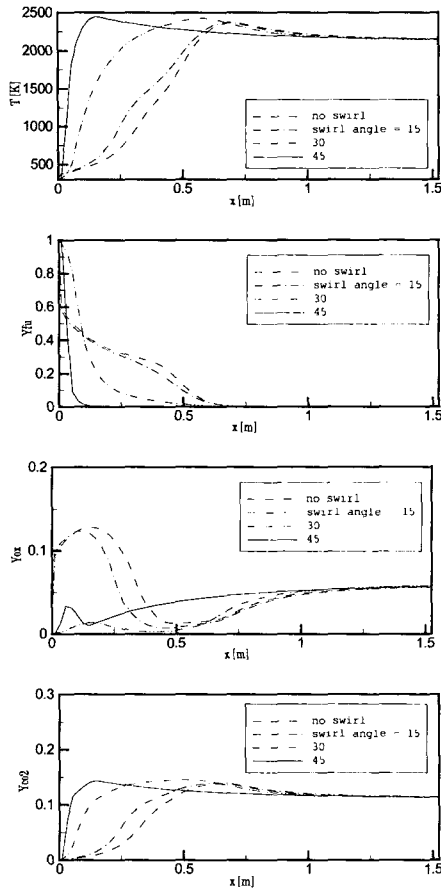


Fig. 11 Contour plots at the centerline with various swirl angles of 0, 15, 30, and 45

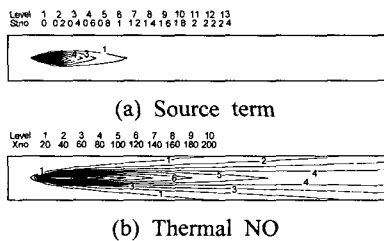


Fig. 12 Contour plots for (a) thermal NO source and (b) thermal NO for the cases of swirl angle of 45°

이 거의 완전 발달되어 있고 연소가 끝나 반응물 및 연료가 거의 남아 있지 않고 출구를 빠져나가는 기체는 대부분이 산소와 연소 생성물이다. Fig. 5는 입구의 당량비를 0.6, 0.7, 0.8 및 0.9로 변화시켰을 때 중심축에서의 값들을 보여

주고 있다. 연료의 반응률은 당량비의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있지만 온도와 이산화탄소의 경우 당량비가 증가함에 따라 점점 증가하고 있다. 여기에서 당량비가 증가한다는 것은 버너의 면적, 온도 및 공기의 속도를 일정하게 유지하였기 때문에 연료의 속도가 증가함을 의미하며, 따라서 보다 많은 연료가 유입되고 이로 인해 보다 활발한 연소 반응이 일어나게 되어 연소기 내의 온도가 좀 더 높아지고 연소생성물의 양이 증가하는 것이다.

한편, Fig. 6은 당량비가 0.6 및 0.8인 경우 NO의 생성량 및 NO의 분포를 보여주고 있다. 고온 영역 근처에서 NO의 생성량이 최고를 나타내고 있으며 이보다 약간 뒤쪽에서 NO의 최고값이 나타나고 있다.

3.2 입구 스월 각도의 변화에 따른 연소 및 배출 특성

Fig. 7과 8은 스월각도가 30° 이고 복사열전달이 없는 경우 각각 $z=0$ 및 $z=0.033$ m 단면에서의 내부의 유동 및 연소 특성을 나타낸 것이다. 전반적으로 스월이 없을 때와 같은 확산화염의 형태를 보여주고 있으나, 스월이 있음으로 해서 난류량 및 기타 물리량들이 앞쪽으로 당겨져 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 9와 10은 각각 $x=x_0/2$ 및 출구에서의 값들을 나타내고 있다. 반시계 방향의 스월 속도로 인하여 연소기 내부의 값들이 반시계 방향으로 편향되어 있음을 살펴볼 수 있다. 한편, Fig. 11은 스월각의 변화에 따른 중심축에서의 특성값들을 보여주고 있다. 우선, 반응률 R_{fu} 이 연소기 입구 쪽으로 점점 당겨지고 있으며 이로 인하여 최고 온도의 지점도 이동하고 있다. 한편 이로 인하여 입구 쪽에서 연료의 소모가 증가하고 연소 생성물의 발생도 입구 쪽으로 당겨지고 있음을 알 수 있다. Fig. 12는 당량비가 0.8이고 스월각이 30° 일 때의 질소산화물의 생성량 및 질소산화물의 분포를 나타낸 그림이다. 스월로 인하여 반응영역이 앞으로 이동하기 때문에 이와 더불어 질소산화물도 이동해 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 복사열전달을 고려한 3차원 연소기내의 화학반응 난류 유동장 해석을 통하여 연소기 내부의 열유동 특성 및 질소산화물의 생성

을 살펴보았다. 입구의 당량비에 따라 내부의 열 유동 특성이 변화하였으며 특히 당량비가 증가함에 따라 연료층의 속도가 증가하기 때문에 화염의 최고 온도가 점점 높아지며 그 위치 또한 출구 쪽으로 이동하였으며, 질소 산화물의 발생량도 증가하였다. 질소 산화물의 생성량은 화염의 최고 온도 뒤쪽에서 최고값을 나타낸다. 입구의 스월 속도가 존재하면 보다 많은 혼합이 이루어지기 때문에 반응 위치가 앞으로 이동하며 이로 인하여 화염의 최고 온도 및 질소산화물의 발생도 이동한다. 향후 비회체 영향을 고려한 실제가스 효과에 의한 반응유동장 및 NO의 생성에 관한 추가 연구가 요구된다.

참고문헌

- (1) Miller, J. A., and Bowman, C. T., 1989, "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Progress Energy Combust. Sci.*, Vol. 15, pp. 287~338.
- (2) Correa, S. M., 1992, "A Review of NOx Formation under Gas-Turbine Combustion Conditions," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 87, pp. 329~362.
- (3) Kuo, K. K., 1986, *Principles of Combustion*, John Wiley and Sons.
- (4) Chui, E. H., and Hughes, P. M. J., 1996, "Validation of NOx and NOx Precursor Predictions in Coal Flames," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 119, pp. 51~75.
- (5) Choi, C. E., and Baek, S. W., 1996, "Numerical Analysis of a Spray Combustion with Nongray Radiation Using Weighted Sum of Gray Gases Model," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 115, pp. 297~315.
- (6) Baek, S. W., Kim, H. S., Yu, M. J., Kang, S. J., and Kim, M. Y., 2002, "Application of the Extended Weighted Sum of Gray Gases Model to Light Fuel Oil Spray Combustion," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 174, pp. 65~98.
- (7) Peters, A. A. F., and Weber, R., 1995, "Mathematical Modeling of a 2.25 MW Swirling Natural Gas Flame. Part 1 : Eddy Break-up Concept for Turbulent Combustion ; Probability Density Function Approach for Nitric Oxide Formation," *Combust. Sci. Tech.*, Vols. 110-111, pp. 67~101.
- (8) Westbrook, C. K., and Dryer, F. L., 1984, "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion," *Progress Energy Combust. Sci.*, Vol. 10, pp. 1~57.
- (9) Magnussen, B. F., and Hjertager, B. H., 1976, "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Emphasis on Soot Formation and Combustion," *16th Symp. (Int.) on Combust.*, pp. 719~729.
- (10) Siegel, R., and Howell, J. R., 1981, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 2nd Edition, Hemisphere Pub., Washington.
- (11) Lockwood, F. C., and Naguib, A. S., 1975, "The Prediction of the Fluctuations in the Properties of Free, Round-Jet, Turbulent, Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 24, pp. 109~124.
- (12) Fluent NOx Module User's Guide, 1995.
- (13) Beretta, A., Mancini, N., Podenzani, F., and Vigevano, L., 1996, "The Influence of the Temperature Fluctuations Variance on NO Predictions for a Gas Flame," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 121, pp. 193~216.
- (14) Pope, S. B., 1985, "Pdf Methods for Turbulent Reacting Flows," *Progress Energy Combust. Sci.*, Vol. 11, pp. 119~192.
- (15) Cho, M. J., 1996, "An Investigation of Treatment Methods for Non-Orthogonal Terms and Wall Function Methods in the Numerical Analysis of 3-D Flow Fields with Arbitrary Boundaries," Ph. D. Thesis, KAIST, Taejon, Korea.
- (16) Baek, S. W., Kim, M. Y., and Kim, J. S., 1998, "Nonorthogonal Finite-Volume Solutions of Radiative Heat Transfer in a Three-Dimensional Enclosure," *Numer. Heat Transfer, Part B*, Vol. 34, no. 4, pp. 419~437.
- (17) Launder, B. E., and Spalding, D. B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, pp. 269~289.