

동축 공기다단 LPG화염의 NOx 생성특성에 관한 연구

김한석[†] · 안국영^{*} · 김호근^{**} · 유명종^{***} · 백승욱^{****}
 (2002년 8월 9일 접수, 2003년 1월 4일 심사완료)

Characteristics of NOx Formation in a Coaxial Multi-Air Staged LPG Flame

Han-Seok Kim, Kook-Young Ahn, Ho-Keun Kim,
 Myung-Jong Yu and Seung Wook Baek

Key Words: Multi-Air Staged(공기다단), Excess Air Ratio(과잉공기비), Swirl Number(선회수)
 NOx(질소산화물), WSGGM(회체가스 가중합산법), DOM(구분종좌법)

Abstract

Experimental and numerical studies have been done to examine the effects of excess air ratio and tertiary air swirl number on the formation characteristics of NOx in a pilot scale combustor adopting a multi-air staged burner. In numerical calculation the mathematical models for turbulence, radiation and nitric oxide chemistry were taken into account. The radiative transfer equation was solved using the discrete ordinates method with the weighted sum of gray gases model. In the NOx chemistry model, the chemical reaction rates for thermal and prompt NOx were statistically averaged using a probability density function. The results were validated by comparison with measurements. For the experiment, a 0.2 MW pilot multi-staged air burner has been designed and fabricated. Using the numerical simulation developed here, a variation of thermal and prompt NOx formation was predicted by changing the excess air ratio and tertiary air swirl number. As the excess air ratio increased up to 1.9, the formation of the total as well as thermal NOx at exit increased while the prompt NOx decreased. The formation of thermal NOx was more affected by concentration of O₂ and N₂ than gas temperature. When the tertiary air swirl number increased, the formation of the total as well as the prompt NOx slightly decreased.

기호설명

E_b : 흑체방사, W/m^2
 I : 복사강도, $W/(m^2 \cdot sr)$
 Nu : Nusselt 수
 q : 열유속, W/m^2

r : 반경방향좌표, m
 \hat{s} : Angular direction
 s : 계적 혹은, 연료에 대한 산소의 화학량론적 질량비
 t : 시간, s
 T : 온도, K
 u : 축방향 속도, m/s
 v : 반경방향 속도, m/s
 V : 부피, m^3
 w : WSGGM에서의 가중치 혹은, 접선방향 속도, m/s

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원
 E-mail : haskim@mailgw.kimm.re.kr
 TEL : (042)868-7368 FAX : (042)868-7284
^{*} 회원, 한국기계연구원
^{**} 한양대학교 대학원
^{***} (주)카이다스
^{****} 회원, 한국과학기술원

W : 분자량, kg/kmol

x : 축방향좌표

Y_i : 질량분율

그리스 문자

ε : 방사율

χ : 흡수계수 1/m

σ : Stefan-Boltzmann 상수
 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

ρ : 밀도 kg/m^3

μ, ζ : x 및 r 방향의 방향 여현

상첨자

' : 입사 방향

하첨자

b : 흑체

c : 중심선

g : 기체

w : 벽

η : 파수

t : Turbulence

l : Laminar

1. 서 론

화석 연료는 주로 에너지원으로 사용되어 왔으며, 20세기 중반까지는 배출가스에 대한 부담 없이 사용량이 증가되어 왔다. 그러나 삼림 면적이 감소되고, 또한 산업발달과 인구증가로 화석연료의 사용량이 급격히 증가됨에 따라 자연이 정화할 수 있는 한계를 벗어나고 있다. 연소가스 중의 질소산화물(NOx)은 광화학스모그의 원인으로 인체에 해를 끼칠 뿐 아니라, 산성비의 원인이 되며 식물에도 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

대부분의 저 NOx 연소방법으로는 주로 고온에서 공기중의 질소와 산소가 발생하는 Thermal NOx의 저감에 목적을 두고 있다. 고온 영역인 화염대의 온도를 낮추는 방법으로 공기 다단 연소방식, 연소가스 재순환 방식, 수분사 방식 등을

이용한 연구가 진행되고 있으며, 그 중 가장 많이 사용되는 다단 연소방식은 공기 혹은 연료를 다단으로 공급함으로써 급격한 연소 반응을 억제하여 화염대 온도를 저하시키는 방식으로 화염의 안정성, 열효율, 실용화 등이 유리하기 때문에 최근까지 비교적 많은 연구가 진행되고 있다.^(1~4)

Smart와 Webber⁽⁵⁾는 공기 역학적으로 연소반응을 조절하기 위하여 여러 형상의 연소기와 Quarl을 제작하여, 각각의 특성을 평가하였으며, 주 연소 영역에서 공기의 유로 변경 등으로 연소반응을 제어하는 경우 Thermal NOx 뿐만 아니라, Fuel NOx의 저감효과도 있다고 보고하였다. Honma와 Hase⁽⁶⁾는 2단 공기 공급형 분젠(Bunsen) 버너를 이용하여 화염대 내부의 NOx 등 가스 조성을 측정하였으며 화염대 부근에서 NOx의 급격한 상승은 Prompt NOx에 의한 것으로 예상하여 Prompt NOx의 중요성을 부각시켰다.

본 연구에서는 산업현장에 응용될 수 있는 동축 공기 다단형 저 NOx 연소기의 설계를 위한 기초자료를 제공하는데 목표를 두고 과잉공기비와 선회강도의 변화에 대한 실험과 계산을 병행하였다.

동축 공기 다단형 연소기는 0.2 MW 용량의 LPG용으로 제작하여 연소특성실험에 이용하였으며, 결과는 연소특성 파악과 계산 검증용으로 이용되었다.

다단형 연소실 내부의 복사열전달에 대한 계산은 복사 열전달에 주로 관여하는 수증기와 이산화탄소의 비회체 특성을 고려하기 위하여 회체가스 가중합산법(Weighted Sum of Gray Gases Model)^(7~10)과 구분종좌법(Discrete Ordinate Method)을 이용하였다. 그리고 NOx의 발생기구에 대한 모델은 층류 유동 상태를 모사한 모델에 난류효과를 고려하기 위해서 확률밀도함수(probability density functions)를 적용하였다.^(11,12)

2. 실험 장치 및 방법

연소 실험용으로 설계된 공기 다단형 연소기는 중심축에 연료 노즐과 동축으로 공기 공급단이 3단(중심에서 반경방향으로 1단, 2단, 3단)으로 Fig.1과 같이 구성되어 있으며, 선회기는 1단과 2

그리고 접선방향속도를 고려한 운동량 방정식, 난류방정식, 에너지방정식, 화학방정식을 연계하여 해석하였으며, 해석에 이용할 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho U \Phi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho V \Phi)}{\partial r} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + S_{\phi} \quad (1)$$

여기서 $\Phi=1$ 일 때 연속방정식, $\Phi=u, v$ 및 w 일 때가 운동량식이며, $\Phi=k$ 및 ε 일 때가 각 난류 운동에너지 및 소산율의 식이다. 그리고 Γ_{ϕ} 는 유효확산계수이며 유효점성계수는 다음과 같이 정의한다.

$$\mu_{eff} = \mu_i + C_{\mu} \cdot \rho \cdot k^2 / \varepsilon \quad (2)$$

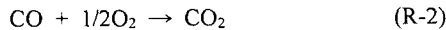
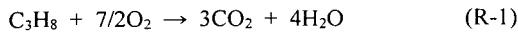
$\Phi = Y_i$ (fuel, O₂, CO, CO₂ 및 H₂O)일 때 화학종식이 되고, $\Phi = h$ 일 때 엔탈피 식이다. 엔탈피 h 는 화학종의 질량분율을 고려하여 다음과 같이 정의된다.

$$h = \sum_i Y_i h_i = \sum_i Y_i \int_{T_{ref}}^T C_{p,i}(T) dT \quad (3)$$

여기에서 각 기체의 비열 C_p 는 실험자료⁽¹⁵⁾를 바탕으로 1차식으로 근사한 식을 사용하였다. 그리고 벽면부근에서는 벽함수를 이용하였다.⁽¹⁶⁾

3.2 LPG의 연소

실험에 사용된 LPG의 경우 95%가 프로판(C₃H₈), 5%가 메탄(CH₄) 구성되어 있으며 순수 프로판과 LPG의 단열화염 온도차이는 약 5°C로 이에 따른 영향도 무시할 만할 것으로 생각되어 연소계산은 프로판에 대하여만 고려하였다. 프로판에 대한 산화반응모델은 다음과 같이 가정하였다.



와- 소산모델(Eddy dissipation model)에서 반응을 난류시간척도(Turbulence time scale, ε/k)과 연료, 산화제 및 생성물 중 가장 작은 농도를 가지는 화학종의 농도에 비례하는 식으로 표현된다.

$$R_{fu} = \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ a Y_{fu}, a \frac{Y_{O_2}}{s_1}, b \frac{Y_{CO}}{1+s_1} \right\} \quad (4)$$

(R-1)에 대한 반응률은

이며 (R-2)에 대한 반응률은

$$R_{CO} = \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left\{ a Y_{CO}, a \frac{Y_{O_2}}{s_2}, b \frac{Y_{CO_2}}{1+s_2} \right\} \quad (5)$$

이다. 여기서 s_1 과 s_2 는 연료와 일산화탄소(CO)에 대한 산소의 당량비를 나타낸다. 그리고 반응 모델에서 사용된 실험상수 a, b 는 Beretta 와 Mancini의 값⁽¹²⁾을 수정없이 사용하였다.

3.3 복사 열전달 해석

3.3.1 복사 열전달 방정식의 해석

복사 강도를 구하기 위해서는 복사 전달 방정식을 적당한 수치적 방법으로 모사하여야 하며 연소로 인하여 발생하는 기체의 흡수 및 방사를 고려한 복사 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dI(\vec{r}, \hat{s})}{ds} = -x I(\vec{r}, \hat{s}) + x I_b \quad (6)$$

구분종좌법(Discrete Ordinate Method)에 의한 복사 열전달 방정식은 전체 입사각 4π 를 L 개의 방향으로 나누면, 각각의 방향 l 에 대하여 원통형 좌표계에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_{4\pi} I d\Omega = \sum_{l=1}^L I' w' \quad (7)$$

w' 은 구적가중치(angular quadrature weight)를 나타낸다.

복사 열전달 방정식은 원통좌표계의 l 방향에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu' \left(\frac{\partial I_l}{\partial x} \right) + \frac{\xi'}{r} \frac{\partial(r I_l)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial(\eta' I_l)}{\partial \psi} = -x I_l + x I_b \quad (8)$$

여기에서 $\mu' = \cos \theta$, $\xi' = \sin \theta$, 그리고 $\eta' = \sin \theta \sin \psi$ 는 각각 축방향, 반경방향 및 접선방향의 방향 코사인을 나타낸다.

3.3.2 회체가스 가중합산모델(WSGGM)의 적용

회체가스 가중합산 모델을 사용한 k 번째 회체 밴드의 복사전달방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dI_k}{ds} = -x_k I_k + x_k w_k I_b \quad (10)$$

여기에서 x_k, I_k 및 w_k 는 각각 k번째 회체 밴드에서의 흡수계수, 방향복사강도, 기체의 가중치를 나타내며 I_b 는 흑체 복사강도이다. 총 복사강도는 각 회체 밴드의 복사강도를 구분 중좌법으로 구하여 전체의 합으로 구한다.⁽⁸⁾

$$I = \sum_k I_k \quad (11)$$

이산화탄소/수증기/기타 가스의 혼합에 있어서 Smith 등⁽¹⁷⁾은 k번째 회체가스에 대하여 3차 다항식(third order polynomial)를 이용하여 온도를 기준으로 한 방사율에 대한 가중치를 다음과 같이 나타내었다.

$$w_k(T) = \sum_{j=1}^4 b_{\epsilon,k,j} T^{j-1} \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^4 w_k(T) = 1 \quad (15)$$

여기서, $b_{\epsilon,k,j}$ 는 기체의 온도함수로 표현되는 계수이다. 에너지 보존식에 있어서 복사효과는 복사 열유속의 발산항으로 기여하게 되며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot q_r \\ & = -\sum_k \nabla \cdot q_{r,k} \\ & = \sum_k k_k \left[4\pi \int I_k(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega - 4\pi w_k I_b \right] \end{aligned} \quad (16)$$

여기서는 \vec{r} 과 \vec{s} 는 복사방향이고 Ω 는 입체각을 나타낸다.

3.4. NO의 생성

연소실 내에서 질소산화물(NOx)은 서론에서 언급한 것과 같이 대부분 NO의 형태로 존재하기 때문에 본 연구에서는 질소산화물(NOx)의 생성을 예측하는데 있어서 NO만을 고려하여 모델링을 하였다.

축대칭 연소기 내의 NO 생성에 대한 지배방정식은 정상상태를 가정하면 다음과 같은 형태를 가지게 된다.

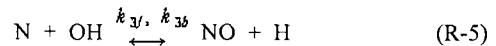
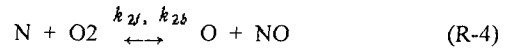
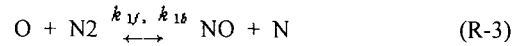
$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u Y_{NO})}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v Y_{NO})}{\partial r} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{NO} \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{NO} \frac{\partial Y_{NO}}{\partial r} \right) + \bar{S}_{NO} \end{aligned} \quad (17)$$

Fuel NO가 없는 화염에 있어 NO는 Thermal NO와 prompt NO 생성으로 나눌 수 있다. 시간 평균 NO생성 항인 \bar{S}_{NO} 는 각각의 독립된 반응물에 근거하여 결정한다.

난류화염에서 \bar{S}_{NO} 를 결정하기 위한 모델은 여러 가지 형태로 제안되었지만, 본 연구에서는 Peters와 Weber⁽¹⁸⁾의 접근 방법을 사용하였다.

3.4.1 Thermal NO

Thermal NO에 대한 생성기구는 Zeldovich가 최초로 반응기구를 제시하였고, Miller와 Bowman⁽¹⁹⁾이 확장시킨 다음과 같은 세개의 주요 반응기구를 이용하여 해석하였다.



반응 (R-5)는 (R-3)와 (R-4)에 비하여 무시할 만하기 때문에 Thermal NO는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{d[NO]}{dt} \\ & = \frac{2[O](k_{1f}k_{2f}[O_2][N_2] - k_{1b}k_{2b}[NO]^2)}{k_{2f}[O_2] + k_{1b}[NO]} \end{aligned} \quad (18)$$

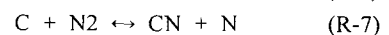
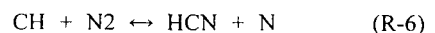
여기서 $[X_i]$ 는 몰농도이다.

Thermal NO의 생성은 주 연료인 탄화수소의 산화과정에 비하여 매우 느리므로 Thermal NO의 생성과정은 주 연료의 연소반응과 분리시킬 수 있으며 Thermal NO의 생성률은 연소반응의 평형상태를 가정하여 계산할 수 있으며 Thermal NO의 생성항(S_{f-NO})은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{f-NO} = W_{NO} \frac{d[NO]}{dt} \quad (19)$$

3.4.2 Prompt NO

탄화수소계 연료의 연소에서의 prompt NO의 생성기구는 Fenimore⁽¹⁾에 의하여 다음과 같이 제시되었다.



그리고 De Soete⁽²⁰⁾는 Prompt NO의 생성에 대하여 다음과 같은 화학반응을 추정하였다.

$$\frac{d[NO]_p}{dt} = C \frac{W^{1+b}}{\rho^{1+b}} [O_2]^b [N_2] [C_xH_y] \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (20)$$

$$S_{p-NO} = W_{NO} \frac{d[NO]_p}{dt} \quad (21)$$

여기서 $C = 6.4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 활성화 에너지 $E_a = 3.038 \times 10^8 \text{ J/kmol}$ 그리고 $b = 0.5$ 이다.

방정식 (18)과 (20)에서 제시한 NO의 생성에 관한 반응기구는 분자의 확산조건이 잘 정의된 층류 예혼합화염이나 충격파관에서의 실험 결과로부터 얻어진 것이다. 그러나 실제의 연소기 내에서는 화염은 난류 화염이며 난류 혼합 과정으로 인하여 화염 특성에 영향을 미치는 온도와 화학종의 농도는 교란이 일어나게 되며 이러한 교란을 고려해 주어야만 한다.

여기서는 Thermal NO와 Prompt NO의 생성에 난류효과를 고려하기 위하여 β -pdf를 적용하기로 한다. 이론적으로는 농도 및 온도의 결합 확률 밀도의 함수를 적용해야 하지만 본 연구에서는 온도만의 단일 확률 밀도 함수를 적용한다.⁽¹²⁾

NO 생성에 대한 지배방정식의 생성항인 \bar{S}_{NO} 는 순간 생성률 $d[NO]/dt$ 와 β -pdf로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{S}_{NO} &= \bar{S}_{i-NO} + \bar{S}_{p-NO} \\ &= W_{NO} \int_{T_{min}}^{T_{max} + \Delta T} \left\{ \frac{d[NO]_i}{dt} + \frac{d[NO]_p}{dt} \right\} \\ &\quad \times \beta_{pdf}(T; a, b) \frac{dT}{T_{max} - T_{min}} \\ &\quad + \frac{W_{NO}}{N} \sum_{i=2}^{N-1} \left\{ \frac{d[NO]_i}{dt} + \frac{d[NO]_p}{dt} \right\} \\ &\quad \times (T_{mi}) \beta_{pdf}(T_{mi}; a, b) \\ &\quad + \frac{W_{NO}}{N} \int_{T_{min} - \Delta T}^{T_{min}} \left\{ \frac{d[NO]_i}{dt} + \frac{d[NO]_p}{dt} \right\} \\ &\quad \times \beta_{pdf}(T; a, b) \frac{dT}{T_{max} - T_{min}} \quad (24) \end{aligned}$$

여기서

$$T_{mi} = T_{min} + \frac{2i-1}{2} \Delta T,$$

$$\Delta T = \frac{T_{max} - T_{min}}{N} \text{ 이며}$$

T_{min} 와 T_{max} 는 연소시 발생 가능한 최저 및 최고의 순간온도, N 은 적분을 위한 분할 숫자이다.

3.5 경계조건

3.5.1 온도

단열벽면에서 대류에 의한 열유속과 복사에 의한 열유속은 평형을 이루어야하므로 에너지방정식에 대하여 다음과 같이 구할 수 있다.⁽²¹⁾

$$-C_p \left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_w + q_{r, x_i} \Big|_w = 0 \quad (25)$$

3.5.2 복사열전달

복사열전달 방정식을 계산하는데 있어서 모든 경계조건은 회체이며 확산(diffuse) 한다고 가정하였다. 벽면의 경계조건은 수냉부의 고정온도조건과 세라크올로 도포된 단열 조건으로 구분하였다.

수냉부

연소실벽의 수냉부의 온도는 일정하다고 가정하여 다음과 같이 Denison and Webb⁽²²⁾의 조건을 이용하였다.

$$I_{k,u} = \epsilon_w w_k I_B + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \sum_{\mu' < 0} I' \Big| \mu' \Big| \Omega' \quad (26)$$

세라믹 단열재로 도포된 벽면

세라믹 섬유로 도포된 벽면을 단열조건으로 가정하면 다음과 같은 경계조건을 사용할 수 있다.⁽²³⁾

$$I_{k,u} = \frac{1}{\pi} \left(\sum_{\mu' < 0} I' \Big| \mu' \Big| w' - w_{r,k} (T_w C_p \left(\frac{\mu_l}{Pr_l} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_w) \right) \quad (27)$$

대칭면 $r=0$ 에서 $\Big| \mu' \Big| = \Big| \mu^l \Big|$ 이고 $\xi^l = -\xi^r$ 일 때

$$I_{k,u}^l = I_{k,u}^r \quad (28)$$

4. 결과 및 토의

Table 1의 과잉공기비가 1.1, 제 1과 제 3단 공기 공급단 선회수가 각각 1.62, 0.54인의 연소 조건에 대한 실험과 계산 결과를 비교하였으며, 이 결과를 바탕으로 과잉 공기비의 변화와 제 3 공기 공급단의 선회수 영향에 대한 세부 연소특성을 계산을 통하여 예상하였다.

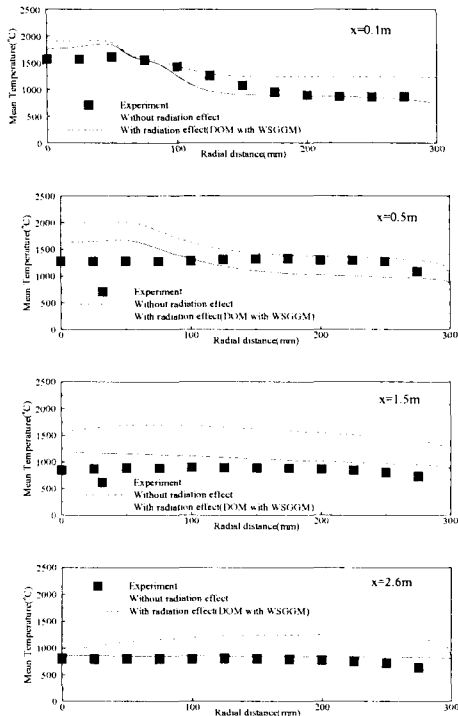


Fig. 3 Radial temperature distribution at various axial locations

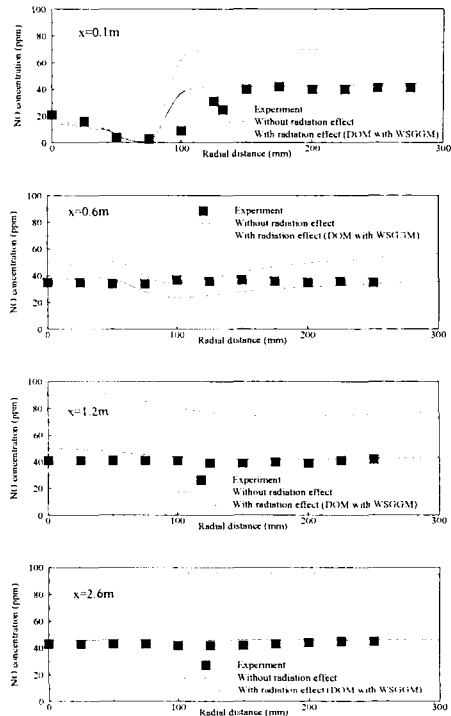


Fig. 4 Radial profiles of NOx at various axial locations

4.1 수치 계산결과에 대한 검증

축방향으로 버너 취부 벽면으로부터 $x = 0.1, 0.5, 1.5$ 그리고 2.6 m의 각 위치에서 반경방향으로 2.5 cm 간격으로 측정된 실험결과, 복사효과를 고려하지 않은 계산결과 그리고 CO_2 와 H_2O 의 비회체 특성을 고려하여 복사효과를 고려하여 계산된 온도의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 전반적으로 복사효과를 고려한 계산과 실험은 비교적 근사한 결과를 나타내고 있지만 $x = 0.5$ m위치에서 온도분포는 계산과 실험의 오차가 비교적 크게 발생함을 알 수 있다. 이것은 연소실의 수냉부가 5 cm 연소실벽에서 돌출 되어 있지만 계산시 고려하지 않았 기 때문으로 생각된다. 대체로 구분중좌법(Discrete Ordinate Method)과 회체가스가중합산법 (Weighted Sum of Gray Gases Model)을 이용한 계산은 실험과 비교적 유사한 결과를 얻음을 알 수 있었다.

Fig.4에는 Fig.3과 동일 조건에서 측정된 NO_x 조성의 실험과 계산결과를 비교하였다. 복사 효과를 고려하는 경우 실험과 계산 결과는 잘 일치

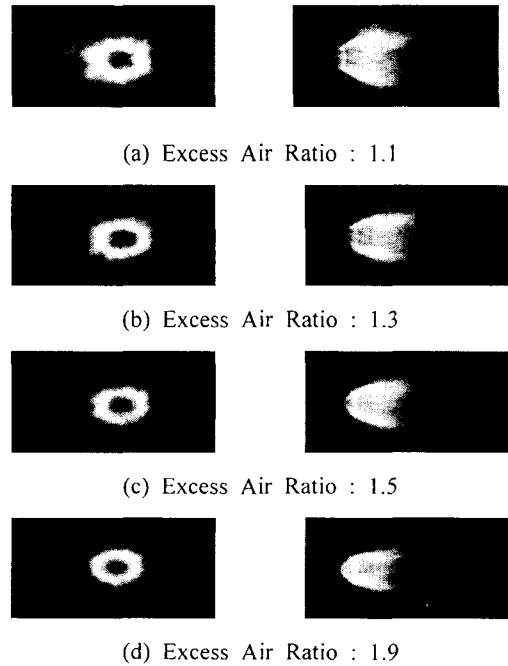


Fig. 5 Photographs of flame for excess air ratios

하였으며 복사 효과를 고려하지 않는 경우 약 150% 과대 평가 되었다. 따라서 본 연구에서 이용한 Thermal NOx와 Prompt NOx의 화학 모델은 비교적 적절함을 예상할 수 있었다.

4.2 과잉공기비 변화

Table 1의 연소조건 중 제 1과 제 3단 공기 공급단의 선회수를 1.38과 0.54로 하고 공기량 분배를 1단 : 2단 : 3단 = 20 : 45 : 35의 조건에서 각 단의 공기비를 동일하게 하여 총 공기량을 증가시킨 과잉공기비 증가에 대한 화염형상, 연소실 내부의 온도 그리고 Prompt NOx와 Thermal NOx의 발생분포 변화 등을 검토하였다.

과잉 공기비를 1.1에서 1.9까지 증가시킨 경우 화염형상의 변화를 화염대의 전면과 측면에서 가시화 한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 과잉공기비가 증가할수록 화염대의 폭과 길이가 감소함을

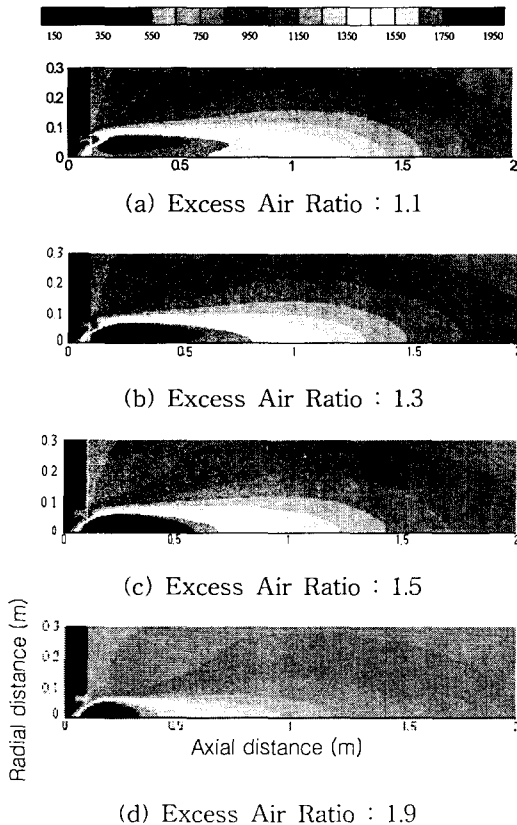


Fig. 6 Temperature distributions of multi air-staged burner flame for excess air ratios (K, $S_{Inner}=1.38$, $S_{Outer}=0.54$, air ratio=20:45:35, LPG)

하지 않는 잉여의 N_2 와 O_2 에 의한 냉각 효과로 온도가 낮아짐을 예상할 수 있다.

Fig. 7에는 Thermal NOx의 발생분포를 예상한 결과를 나타내었는데 과잉공기비가 증가할수록 Thermal NOx의 생성은 연소실의 넓은 영역에서 증가하는 것을 알 수 있다. Thermal NOx는 Zeldovich

반응에 의하여 주로 O_2 와 N_2 의 농도 그리고 온도의 영향을 받는 평형상수에 주로 지배되지만, Fig. 7의 결과로 보면 온도가 상대적으로 낮은 부분에서도 Thermal NOx의 생성이 증가됨을 알 수 있다. 따라서 본 결과에서 Thermal NOx는 온도저하 보다는 과잉공기로 인한 O_2 와 N_2 농도에 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

Fig. 8에는 Prompt NOx 발생분포를 예상한 결과를 나타내었다. 과잉공기비가 증가할수록 Prompt

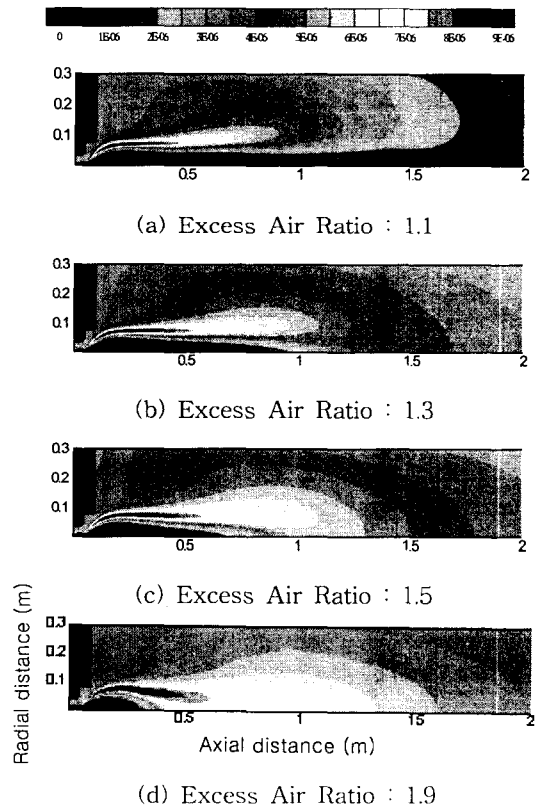


Fig. 7 Production of Thermal NOx in multi air-staged burner for excess air ratios ($kg/m^3/sec$, $S_{Inner}=1.38$, $S_{Outer}=0.54$, air ratio=20:45:35, LPG)

NOx의 발생영역은 감소됨을 알 수 있는데 이것은 Prompt NOx가 주로 CH 라디칼로부터 생성 (Fenimore, 1979)되기 때문에, 과잉공기비가 증가할수록 CH 라디칼이 많이 존재하는 연료 과농 지역이 상대적으로 감소하며 이에 따라 Prompt NOx의 발생 영역도 감소함을 알 수 있다.

Fig. 9는 과잉공기비에 대하여 연소실에서 발생하는 Thermal NOx와 Prompt NOx의 총발생량을 연소실 용적을 고려하여 예상한 결과이다. 이 결과로부터 과잉공기비가 증가할수록 Prompt NOx의 발생량은 감소하지만 이에 비하여 Thermal NOx 발생의 증가가 보다 크기 때문에 총 NOx 발생량은 5% 정도 증가함을 알 수 있다. 따라서 가능한 낮은 과잉공기비로 연소시키는 것이 NOx의 발생 억제뿐만 아니라 보일러의 열효율 그리고 송풍기의 동력비 절감

에 유리할 것으로 생각된다.

4.3 3단 공기 공급단의 선회수 변화

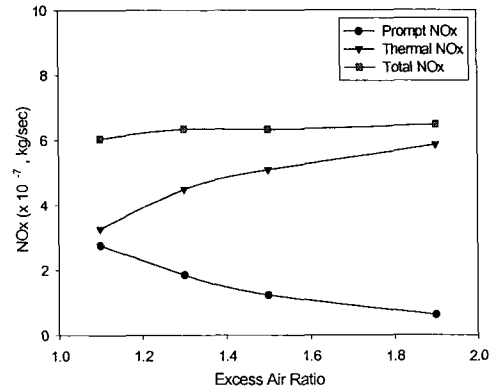


Fig. 9 Total production of Thermal and Prompt NOx for excess air ratios (kg/m³/sec)

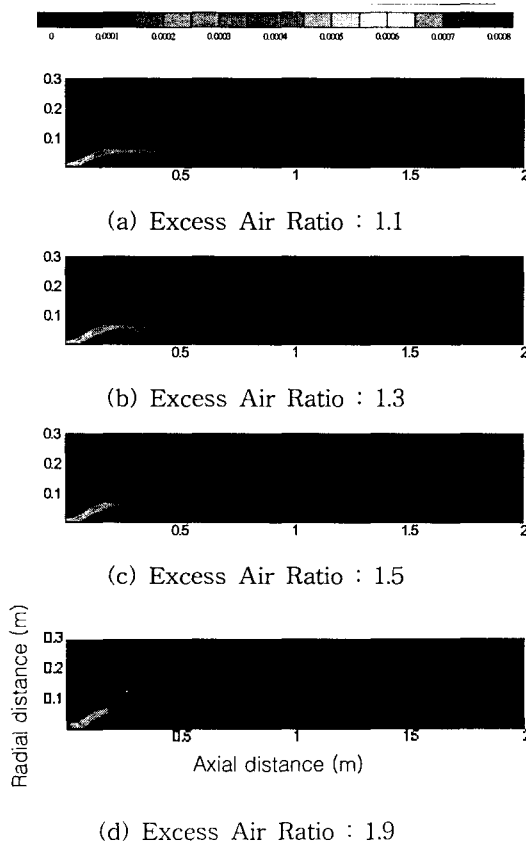


Fig. 8 Production of Prompt NOx in multi air-staged burner for excess air ratios (kg/m³/sec, S_{Inner}=1.38, S_{Outer}=0.54, air ratio=20:45:35, LPG)

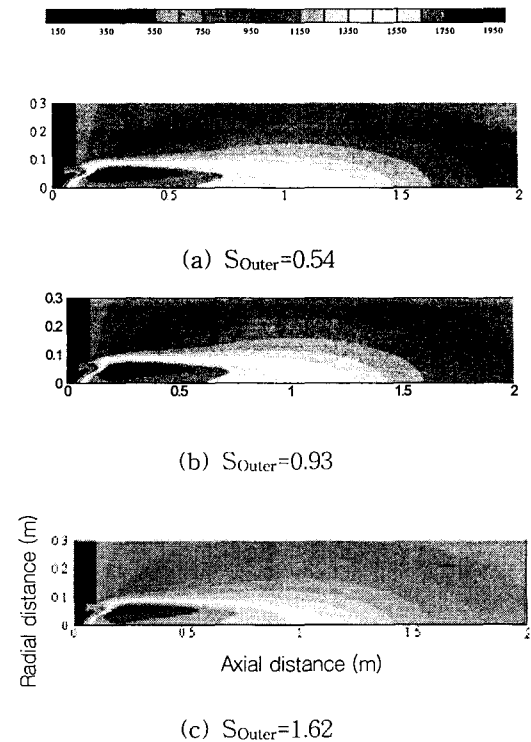


Fig. 10 Temperature distributions of multi air-staged burner flame for Outer staged air swirl numbers (K, S_{Inner}=1.38, air ratio=20:45:35, λ=1.1, LPG)

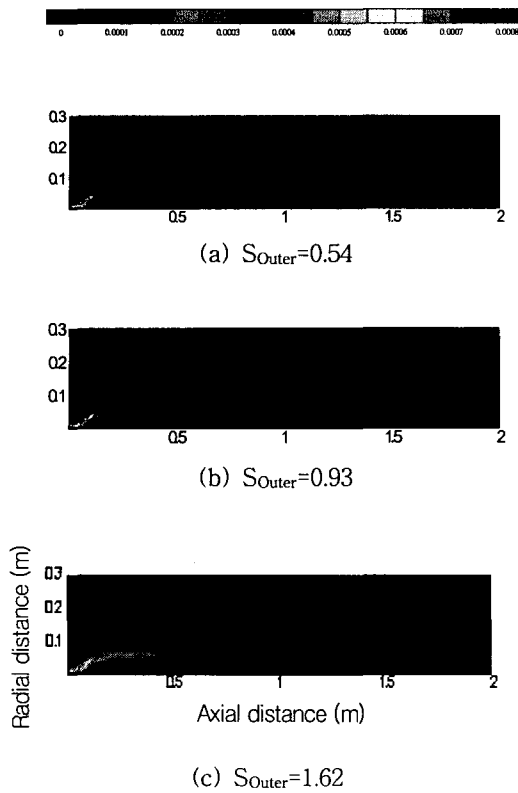


Fig. 11 Production of Prompt NOx for Outer staged air swirl numbers in multi air-staged burner flame (kg/sec, S_{inner}=1.38, air ratio=20:45:35, λ=1.1, LPG)

Fig. 10은 공기 분배비를 Table 1의 연소조건 중 3단 공기 공급단의 선회수를 0.54, 0.93, 1.62로 변화시킨 경우에 대한 온도분포의 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 10의 고온영역이 조금 커지는 것은 3단 공기 공급단의 선회수가 증가할수록 연소용 공기는 선회에 의하여 연료면인 중심으로 향하지 않고 반경방향으로 향하기 때문에,⁽²⁴⁾ 연료로의 원활한 공급이 어려워져 연소반응이 지체되기 때문으로 생각된다.

Fig. 11은 3단 공기 공급단의 선회수의 변화에 대하여 Prompt NOx의 생성분포를 예상한 결과이다. 3단 공기 공급단의 선회수가 증가할수록 Prompt NOx의 발생 영역이 조금 증가함을 알 수 있다. 3단 공기 공급단의 선회수가 증가할수록 Fig. 10의 결과에서 언급하였듯이 연소용 공기는 연료로의 원활한 공급이 어려워져 Prompt NOx의

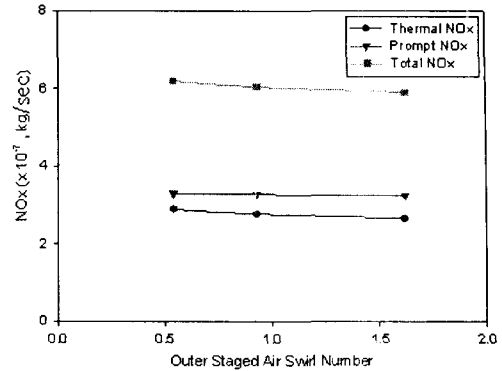


Fig. 12 Total production of Thermal and Prompt NOx for Tertiary staged air swirl numbers (kg/sec)

발생원이 되는 CH 라디칼이 존재하는 연료 과농 영역이 증가하기 때문으로 생각된다. Fig. 12의 연소실 용적을 고려하여 Thermal NOx와 Prompt NOx의 발생량을 예상한 결과로부터 3단 공기 공급단의 선회수가 증가할수록 Thermal NOx와 Prompt NOx의 발생은 감소된 것을 알 수 있다. 3단의 공기 공급단의 선회수가 클수록 공기유동은 중심에서 바깥 여 Prompt NOx의 발생 영역은 증가하지만 이 보다는 선회수 증가에 의한 재순환 유동의 강화로 연료/공기의 혼합효과가 증가되어 국부적인 연료 과농영역이 축소됨으로서 Prompt NOx의 발생이 감소되는 것으로 예상된다.

이상의 결과로부터 공기 다단 연소기를 이용한 LPG 연소시 공기 공급단의 선회강도를 변화시키는 경우 약 10%정도의 NOx가 저감됨을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 산업현장에 응용될 수 있는 동축 공기 다단형 저 NOx 연소기의 설계를 위한 기초자료를 제공하는데 목표를 두고 실험으로 검증한 수치해석 프로그램을 이용하여 0.2 MW용량의 실험용 LPG를 연료로 주연소 영역의 연소반응을 지배하는 과잉 공기비와 3단 공기 공급단의 선회조건에 대한 세부적 연소 영향을 예상하였다.

결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 과잉공기비를 증가시키면 Prompt NOx는 감소되며 연소영역의 온도는 저하되지만, N₂와 O₂

의 농도 증가로 Thermal NOx의 발생량은 증가하였고 NOx의 총 발생량도 증가하였다.

(2) 3단 공기 공급단의 선회수가 증가할수록 연료로의 원활한 공급이 어려워 Thermal NOx의 발생은 억제되며 Prompt NOx는 발생 영역은 증가한다.

(3) 공기 다단 연소기를 이용한 LPG 연소시 과잉 공기비를 증가시키면 NOx의 발생이 증가하지만 3단 공기 공급단의 선회강도를 증가하는 경우 약 10% 정도의 NOx가 저감됨을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Takashi, T. and Shigeru, H., 1996, "The effects of Fuel-Air Mixing On NOx Formation in Non-premixed Swirler Burners," *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 2733~2739.

(2) Toqan, M. A., Beer, J. M., Jansohn, P., Sun, N., Testa, A. and Teare, J. D., 1992, "Low NOx Emission from Radially Stratified Natural Gas-Air Turbulent Diffusion Flames," *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 1391~1397.

(3) Shihadeh, A. L., Toqan, M. A., Beer, J. M., Lewis, P. F., Teare, J. D., Jimenez, J. L. and Barta, N., 1994, "Low NOx Emission from Aerodynamically Staged Oil-Air Turbulent Diffusion Flames," *ASME J. Combustion Modeling, Scaling and Air Toxins*, Fact-Vol. 18, pp. 195~200.

(4) Hampartsoumian, E., Nimmo, W., Pourkashanian, M. and Williams, A., 1996, "The Prediction of NOx Emission from Spray Combustion," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 93, pp. 153~172.

(5) Smart, J. P. and Webber, R., 1989, "Reduction of NOx and Optimisation of Burnout with an Aerodynamically Air-Staged Burner and an Air-Staged Precombustor Burner," *Institute of Energy* December, pp. 237~245.

(6) Honma, R. and Hase, K., 1995, "Study on NOx Formation Mechanism in a Bunsen Flame," *JSME*, Vol 61, pp. 1177~398.

(7) Hottel, H. C. and Sarofim, A. F., 1967, "Radiative Transfer," Mc-Graw Hill, Inc.

(8) Choi, C. E. and Baek, S. W., 1996, "Numerical Analysis of a Spray Combustion with Nongray Radiation Using Weighted Sum Gray Gases Model," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 115, pp. 297~315.

(9) Liou, T. M., Lien, W. Y. and Hwang, P. W., 1994, "Large-Eddy Simulations of Turbulent Reacting Flows in a Chamber with Gaseous Ethylene and Injecting through the Porous Wall," *Combust. Flame*, 99, pp. 591~600.

(10) Yu, M. J. and Baek, S. W., 1999, "Modeling of a Pulvulized Coal Combustion with Non-Gray Gas Radiation Effects," *Proceeding of 17th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Heidelberg, Germany.

(11) Missaghi, M., Pourkashanian, M., Williams, A. and Yap, L., 1991, "The Predictions of NO Emissions from an Industrial Burner," *Second European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*, Lisbon.

(12) Beretta, A. and Mancini, N., 1996, "The Influence of the Temperature Fluctuations Variance on NO Predictions for Gas Flames," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 121, pp. 193~216.

(13) Drake, M. C., Correa, S. M., Pitz, R. W., Shyy, W. and Fenimore, C. P., 1987, "Superequilibrium Thermal Nitric Oxide Formation in Turbulent Diffusion Flames," *Comb and Flame*, Vol. 69, pp. 347~365.

(14) Gosman, A. D. and Ideriah, F. J. K., 1976, "TEACH-T : A General Computer Program for Two-Dimensional, Turbulent Recirculating Flow," *Imperial College*, London, U. K.

(15) Chase, M. Jr., Davies, C. A., Downey, J. R. Jr., Frurip, D. J., Mcdonard, R. A. and Syverd, A. N., 1985, "JANAF Thermochemical Tables," third edition, *American Chemical*

Society and American Institute of Physics.

- (16) Versteeg, H. K., and Malalasekera. W., 1995, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics," Longman Scientific & Technical.
- (17) Smith, T. F., Shen, Z. F. and Friedman, J. N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *ASME J. Heat Transfer*, 104, pp. 602~608.
- (18) Peters, A. A. F. and Weber. R., 1995, "Mathematical Modeling of 2.25MW Swirling Natural Gas Flame. Part 1: Eddy Break-up Concept for Turbulent Combustion; Probability Function Approach for Nitric Oxide Formation," *Combust. Sci. Tech.*, 110-111, pp. 67~101.
- (19) Miller, J. A. and Bowman, C. T., 1989 "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, 10, pp. 287~338.
- (20) De Soete, G. G., 1975, "Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation from Fuel Nitrogen," *Fifteenth Symposium (International) on Combustion. The combustion Institute*, pp. 1093~1102.
- (21) Choi, C. E. and Baek, S. W., 1996, "Numerical Analysis of a Spray Combustion with Nongray Radiation Using Weighted Sum Gray Gases Model," *Combust. Sci. Tech.*, 115, pp. 297~315.
- (22) Denison, M. K. and Webb, B. W., 1993, "A Spectral Line-Based Weighted-Sum-of-Gray Gases Model for Arbitrary RTE Solvers," *ASME J. Heat Transfer*, 115, pp. 1004~1012.
- (23) Yu, M. J. 2000, "Investigation of Combustion and NO_x Emission Characteristics for the Pulverized Coal Combustor with Radiation Effects," Thesis, Korea advanced Institute of Science and Technology, Taejon, Korea.
- (24) Kim, H. S., 2002, "Investigation of NO_x Formation Characteristics in Multi Air Staged Combustor," Ph. D. Thesis, Korea advanced Institute of Science and Technology, Taejon, Korea.