

# 연소로에서 NO 배출 및 연소특성에 대한 수치해석적 연구

## Numerical Simulation of NO Emission and Combustion Characteristics in Furnace

전 영 남

조선대학교 공과대학 환경공학과

(1996년 8월 12일 접수, 1996년 12월 10일 채택)

Young-Nam Chun

*Department of Environmental Engineering, Chosun University*

(Received 12 August 1996; accepted 10 December 1996)

### Abstract

A screening study was performed in order to resolve the flow, combustion and emission characteristics of the gas furnace with co-axial diffusion flame burner. A control-volume based finite-difference method with the power-law scheme was employed for discretization.

Numerical procedure for the differential equation was used by SIMPLEST to enclosure rapid converge. A  $k-\epsilon$  model was incorporated for the closure of turbulence. The mass fraction and mixture fraction were calculated by conserved scalar method. An equilibrium analysis was employed to determine the concentration of radicals in the product stream and conservation equations were then solved for N and NO by Zelovich reaction scheme.

The method was exercised in a simple one-dimensional case first, to determine the effects of air ratio, temperature and residence time on NO formation and applied to a furnace with co-axial diffusion flame burner.

**Key words :** gas furnace, one-dimensional analysis,  $k-\epsilon$  model

## 1. 서 론

산업용 또는 발전용으로 석탄연료가 주로 이용되어 왔으나 미분탄 연소시 발생하는 대기오염물질인 미연 탄화수소 (unburned hydrocarbon), 일산화탄소 (CO), 검댕 (soot) 그리고 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 등의 문제가 야기되어 왔다. 따라서 최근에는 석탄의 대체연료로 메탄이 주성분인 천연가스의 사용이 날로 증가되어 가는 추세이다.

현재 국내외적으로 에너지 절약과 환경에 대한 관심이 고조되고 있는데 이러한 문제를 동시에 효율적으로 해결

하기 위해서는 연소로 내에서 일어나는 열유체 유동 및 반응장에 대한 정확한 이해가 필요하다. 특히 우리나라 환경기준치가 점차 선진국 수준으로 강화되는데 이러한 기준치를 만족시키기 위해서는 연소로, 버너 및 운전 조건에 대한 심도깊은 연구가 필요하다. 특히 대부분의 연소로는 대규모로서 건설이나 대기오염 제어장치, 운전조건의 변경에 따른 시설투자에 시간과 경비가 많이 든다는 점에서 고도기술의 타당성이 강조된다.

연소로의 컴퓨터 프로그램 개발은 1970년대 이전에는 주로 입력에 따른 출구에서의 결과를 도출해 내는 경험식에 의한 방법에 의존해 왔으며 (Field *et al.*, 1967),

구체적인 난류혼합을 고려한 수치모델의 효시는 Gibson과 Morgan (1970)에 의하여 이루어졌는데 이들은 수치해석적 방법으로 Gosman 등 (1969)이 개발한 2차원에 국한되는 stream function-vorticity 방법을 사용했다. 연소로에 대한 기존의 수치해석적 연구는 주로 미분탄 연소로에서 이루어졌다. 연소모델의 개발을 80년대 초에 미국의 Brigham Young University의 Smoot group과 영국의 Imperial college의 Lockwood에 의해서이다 (Lockwood *et al.*, 1984; Fletcher, 1983; Hill, 1983). 이들은 주로 2차원 원주대칭 형태 (axisymmetric)의 실험적 규모나 소규모 산업용 보일러에 응용을 위한 컴퓨터 프로그램 개발에 중점을 두어 세부 모델 개발 및 이를 바탕으로 구축한 종합모델의 타당성 검토를 하였다. Hill (1983)은 2차원 원주대칭형 실험실적 연소로에 대해 NOx 모델을 개발하였다. 이 연구의 목적은 석탄의 성상 및 버너 조건 등에 따른 반응 및 유동장 형태를 조정함으로써 배출되는 NOx의 양을 저감하여 scrubbing 등 경비가 많이 드는 종래의 방법을 최소화하고자 하였다. 이러한 NOx 모델 프로그램 Babcocks & Wilcox 그룹의 Fiveland 등 (1988)에 의해 후에 3차원 모델로 확대 응용되었다. Jang과 Acharya는 fuel NOx의 생성 및 소멸에 관한 연구로서 'moment closure 모델'을 제시하였다 (1991). 상기에서 알 수 있듯이 연소로에서 기존의 연구는 주로 석탄연료에 의한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 질소산화물에 대한 연구는 석탄과 중유연소시 많이 발생하는 연료 NOx (fuel NOx)에 대해 연구가 이루어졌다.

최근들어 열설비로부터 배출되는 대기오염 문제와 관련하여 천연가스 연소시 고온에 의해 연소로에서 발생하는 열적 NOx (thermal NOx) 생성 및 소멸에 대한 연구는 이론적, 실험적, 수치해석적 연구가 필요하다.

본 연구는 천연가스의 주성분인 메탄을 동축분류 확산 화염이 형성되는 버너가 장착된 2차원 축대칭 연소로에서 연소시 유동장, 온도장 및 NO의 농도분포를 구하였다. 이와 같은 수치결과로서 연소로내의 구체적인 속도, 온도와 NO 농도분포에 따른 결과를 토대로 연소로 설계시 필요한 기초자료의 제시와 질소산화물의 생성기전 (mechanism)을 검토하여 저공해 연소로의 방향을 제시한다.

## 2. 수치모델 및 수치해석 방법

### 2.1 지배 방정식

연소로내 2차원 난류유동의 해석을 위해 정상상태, 비압축성, 뉴우턴 유체로 가정할 때 일반 지배방정식 (general governing equation)은 2차원 원통좌표 (cylindrical coordinate)에서 다음 식 (1)과 같이 표시될 수 있다 (Jang *et al.*, 1987).

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_{\phi} \quad (1)$$

위 식에서  $\phi$ 는 일반적인 종속변수이고 축방향 (axial), 직경방향 (radial), 접선방향 (tangential)의 속도성분 ( $u, v, w$ ), 압력 ( $p$ ), 엔탈피 ( $h$ ) 및 질량분율 ( $f$ )이다.  $\Gamma_{\phi}$ 와  $S_{\phi}$ 는 각  $\phi$ 에 대한 확산계수와 생성항이며 이를 표 1에 제시하였다. 여기서  $G_{kl}$ 는 난류에너지 생성을 나타내며  $\sigma$ 는 난류 Prandtl수를 또는 Schmidt수를 상징한다. 난류유동은  $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 난류전단력항을 Boussinesq가정에 의하여 난류 또는 eddy점성계수 ( $\mu_t$ )와 평균속도 구배의 곱으로 표시되며, 난류점성계수  $\mu_t$ 는 아래와 같이 Prandtl-Kolmogorov관계식으로부터 얻어진다 (Bird *et al.*, 1960).

$$\mu_t = C_{\mu} \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (2)$$

### 2.2 난류 연소모델

연소모델은 fast chemistry 모델중 conserved scalar method (Bilger, 1976)를 이용하였다. 이 모델은 가연분으로의 산소산화 속도보다 반응속도 (chemical kinetics)가 훨씬 빠르기 때문에 전체 반응이 확산 속도에 지배된다는 이론으로 본 연구의 가스버너와 같은 확산화염 (diffusion flame)에 적용 되어진다.

정상상태 (steady state)의 연료와 공기의 화학종 질량 보존식 (mass conservation equation for chemical species)은 식 (3) 및 식 (4)와 같다.

$$\nabla \cdot (\rho u m_{fu}) = \nabla \cdot (\Gamma_{fu} \nabla m_{fu}) + w_{fu} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho u m_{ox}) = \nabla \cdot (\Gamma_{ox} \nabla m_{ox}) + w_{ox} \quad (4)$$

Conserved scalar를 만들기 위해서는 source term이 제로가 되도록 하고, 식 (4)에 산화제의 요구당량 질량  $i$ 를 나눈 후에 식 (3)에서 식 (4)를 빼면 식 (5)와 같다.

Table 1. Expression for  $\Gamma_\phi$  and  $S_\phi$  for k- $\epsilon$  turbulence model.

$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
$u$	$\mu_t$	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_t - \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_t r \frac{\partial v}{\partial r}) - \frac{\partial p}{\partial x}$
$v$	$\mu_t$	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_t - \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\mu_t r \frac{\partial v}{\partial r}) - 2\mu_t \frac{v}{r^2} + \frac{\rho w^2}{r}$
$w$	$\mu_t$	$-(\frac{\mu_t}{r^2} + \frac{\rho v}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mu_t}{\partial r})w$
$h$	$\frac{\mu_t}{\sigma_t}$	0
$k$	$\frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_{k1} - \rho \epsilon$
$\epsilon$	$\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_{k1} - C_2 \rho \epsilon)$
$f$	$\frac{\mu_t}{\sigma_f}$	0
$g$	$\frac{\mu_t}{\sigma_g}$	$C_{g1} G_{g1} - C_{g2} \rho \frac{\epsilon}{k} g$

$$G_{k1} = \mu_t [2 \{ (\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial r})^2 + (\frac{u}{r})^2 \} + (\frac{\partial w}{\partial x})^2 + (r \frac{\partial}{\partial r} (\frac{w}{r}))^2 + (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x})^2]$$

$$C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_\epsilon = 1.22 \quad \sigma_k = 0.9$$

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

$$C_{g1} = 2.8 \quad C_{g2} = 2.0 \quad \sigma_f = \sigma_g = 0.9$$

$$\nabla \cdot (\rho u (\frac{m_{fu} - m_{ox}}{i}))$$

$$= \nabla \cdot (\Gamma \nabla (\frac{m_{fu} - m_{ox}}{i})) + (w_{fu} - \frac{m_{ox}}{i}) \quad (5)$$

식 (5)의 source term이 제로이므로 conserved scalar는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\phi = m_{fu} - \frac{m_{ox}}{i} \quad (6)$$

식 (6)에서 정의되어진 conserved scalar ( $\phi$ )를 식 (7)과 같이 normalized시킨 conserved scalar가 난류반응 수치해석에 적용된다.

$$f = \frac{\phi - \phi_0}{\phi_1 - \phi_0} \quad (7)$$

식 (7)의  $f$ 에 대한 각 화학종의 혼합율 (mixture fraction)이 구해지며, 연소반응중 값은 변하지 않는다.

난류로 인한 혼합율  $f$ 의 평균값은 확률밀도 분포함수 (PDF, probability density function)인 clipped Gaussian PDF에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

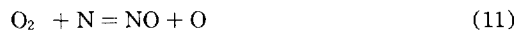
$$\bar{f} = \int_0^1 f \cdot P(f) df \quad (8)$$

$f$ 의 순간변동값 (fluctuation)은 다음과 같다.

$$g = \int_0^1 (f - \bar{f})^2 \cdot P(f) df \quad (9)$$

### 2.3 질소산화물 (nitric oxide)의 계산

석탄 연소시 고온에 의해 발생되는 열적 NO (thermal NO)의 생성을 반응식 (10)~(12)와 같이 제안된 Zeldovich mechanism에 의해 계산하였다.



식 (10)의 정반응(forward reaction)은 흡열(endothermic)반응으로 반응속도가 느리지만, 식 (11), (12)는 발열(exothermic)반응으로 반응속도가 빠르며 이 반응들은 주 연료인 석탄의 연소반응과 무관하다. 화학성분(O, O<sub>2</sub>, OH, H, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>)은 깁스 자유 에너지의 최소화(minimization of Gibbs free energy)법에 의해 결정되어지며, 화학종의 농도 계산은 CREK 코드(Gordon, 1971)에 의해 계산하였다.

정상상태의 N과 NO의 질량분율은 보존식 (13)에 의해 구한다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j M_{NO}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{NO} \frac{\partial M_{NO}}{\partial x_j} \right) + R_{NO}$$

$$\Gamma_{NO} = \frac{\mu_{eff}}{\sigma_j} \tag{13}$$

이때 다른 화학성분은 변하지 않으며 이 반응보다 빠르다.

식 (11)의 정반응 및 역반응의 두 보존식의 source term  $R_{NO}$ 는 반응에 참여하는 화학성분의 Zeldovich 반응의 반응율(reaction rate)의 합과 같다. 정반응과 역반응은 아레니우스 형태(Arrhenius expressions)로 식 (14)와 같다.

$$R = K \rho^2 F_1 F_2 \tag{14}$$

여기서,  $F_1$ 과  $F_2$ 는 반응에 참여하는 화학성분의 농도,  $K$ 는 반응율의 계수이다.

$$K = 10^B T^N \exp\left(-\frac{T_{act}}{T}\right) \tag{15}$$

식 (15)의 정반응 및 역반응에 대한 상수는 표 2와 같다.

### 3. 수치해석방법

식 (1)과 같이 표현된 일반적인 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서는 검사체적에 기초한 유한차분법(control-volume based finite difference method)을 이용하여 선형적인 이산화방정식을 유도하였다. 이 방정식은 line-by-line TDMA (tridiagonal matrix algorithm)에 의해 해를 구하였으며, 압력-속도의 상호연계 방법은 빠른 수렴을 위하여 SIMPLE (semi-implicit methods for pressure-linked equation)에 의해 변형된 SIMPLEST 알고리즘 (Spalding, 1988)을 사용하였고, 격자점 사이에서 임의의 함수값 보정은 Power-Low Scheme (Patankar, 1980)에 의해 실행되었다.

### 4. 수치결과 및 해석

#### 4.1 1차원적 해석

1차원적 해석을 위해 그림 1과 같이 연료는 289 K의 온도로 덕트(duct)의 좌측면으로 유입되고 공기는 810 K의 온도로 상부에서 균일하게 유입된다. 공기비(air ratio)의 변화에 대해 덕트내의 연료과농 및 회박의 광범위한 화학적 양론비(stoichiometry)가 형성된다. 또한 체류시간에 대한 질소산화물(NO)의 생성 및 소멸에 대한 영향을 규명하고자 혼합기(mixture)의 조성 변화 없이 유량(mass flow rate)을 변화시킨다.

그림 2는 확산에 의해 제어되는 연소시 conserved

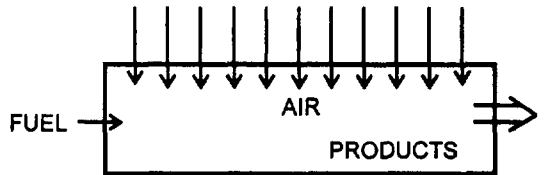


Fig. 1. One-dimensional test case.

Table 2. Constants used for the forward and reverse reactions.

Reaction	Forward			Reverse		
	10 <sup>B</sup>	T <sub>act</sub> <sup>*</sup>	N	10 <sup>B</sup>	T <sub>act</sub>	N
N <sub>2</sub> + O = NO + N	7.6 × 10 <sup>10</sup>	3.8 × 10 <sup>4</sup>	0	1.6 × 10 <sup>10</sup>	0.0	0
O <sub>2</sub> + N = NO + O	6.4 × 10 <sup>6</sup>	3.15 × 10 <sup>3</sup>	1	1.5 × 10 <sup>6</sup>	1.95 × 10 <sup>4</sup>	1
OH + N = NO + H	6.3 × 10 <sup>8</sup>	0.0	0.5	2.5 × 10 <sup>9</sup>	2.45 × 10 <sup>4</sup>	0.5

\* activation temperature (K)

scalar method에 의한 중심축상의 연료량(fuel fraction), 공기량(oxidant fraction), 전체량중 연료량과 공기량을 제외한 나머지만인 생성물(products) 및 식 (7)의 혼합물(mixture fraction)의 변화를 표시하였다.

체류거리가 증가됨에 따라 그림 1의 좌측 포트로부터 유입되는 연료는 체류거리가 증가됨에 따라 점차 작은 확산 및 연소로 인해 연료의 양이 감소된다. 반면 공기는 축방향 체류거리가 310cm인 공기비가 1인 지점까지 연료에 비해 상대적으로 공기량이 작은 연료과농(fuel-rich)의 상태가 되어 산화제는 모두 연소에 관여하여 소모되며 그후에는 과잉산소로 인해 덕트내에 산소가 잔류하게 된다.

연소생성물은 연료포트 선단에서 일정량 존재한 후, 체류거리가 증가됨에 따라 연소가 지속되어 공기비가 1인 지점까지 지속적으로 증가된 후 다시 감소된다.

혼합기 분율(mixture fraction)은 체류거리가 증가됨에 따라 연소로 인해 혼합기가 감소되어 지속적으로 감소됨을 알 수 있다.

그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 체류거리가 증가됨에 따라 온도는 연료포트 부근에서 1,150 K를 보인 후 점차 증가되어 공기비가 1인 축방향 거리가 310cm의 지점에서 최대값 2,560 K를 가진 후 급격히 감소된다. 체류거리가 증가됨에 따라 온도가 증가하는 것은 연료포트로부터 유입된 연료가 연료과농의 상태에서 점차 산화

제와 혼합되어 공기비가 증가되므로 충분한 연소가 이루어져 온도가 증가된다. 공기비가 1이후에 온도가 급격히 감소하는 것은 공기량의 과다로 인한 배기 폐열손실 때문이다.

NO는 연료포트 부근에서는 생성되지 않는다. 하지만 일정거리 이후에는 체류거리가 증가됨에 따라 증가하여 온도가 급격히 감소하는 최대 온도점 이후에도 NO가 증가하여 최대값 370 ppm을 보인 후 서서히 감소된다. 연료포트 부근에서 NO가 생성되지 않는 것은 낮은 연소 온도와 산화제인 산소량이 작아 NO로 산화되지 못하기 때문이다. 체류거리가 증가됨에 따라 NO의 농도가 증가하는 것은 온도증가로 인한 공기 중의 질소성분이 N로 분리되고 산화제 중의 산소량이 증가되기 때문에 N이 NO로 산화되는 양이 증가하기 때문이다. 최고 온도점 이후에도 NO의 양이 증가되는 것은 이미 고온의 영역에서 분리되어 NO로 전환되지 못한 잔여 N이 과잉산소에 의해 지속적으로 산화되기 때문이다. 체류거리의 증가와 함께 온도가 증가된 후 감소하여도 NO가 증가하는 것에서도 알 수 있듯이 연소시 체류시간의 감소는 NO 최대값을 저감시킬 수 있으므로 배출 NO의 양을 감소시킬 수 있다. 즉 연소로 설계시 산화성 분위기에서 NO로의 산화반응의 감소를 위해 연소로의 최적 직경 및 길이가 요구되어진다.

그림 4는 혼합기 속도변화에 대한 배출 NO의 농도를 나타낸 것이다. 혼합기 속도가 3m/s에서 7m/s로 증가함에 따라 NO의 농도는 덕트내 전체에 걸쳐 감소하는데 이는 혼합기가 덕트내에서 공기중의 질소성분이 NO

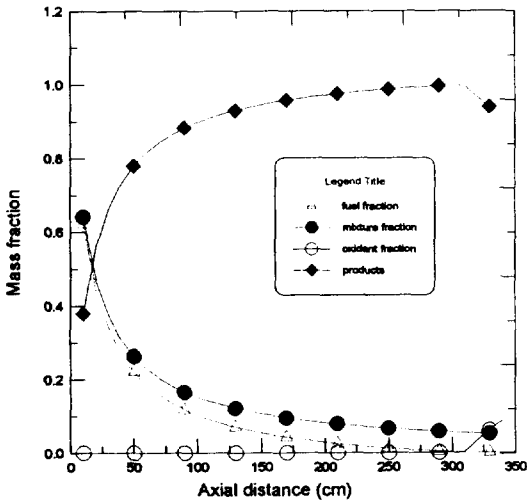


Fig. 2. Mass fraction of chemical species along the center line.

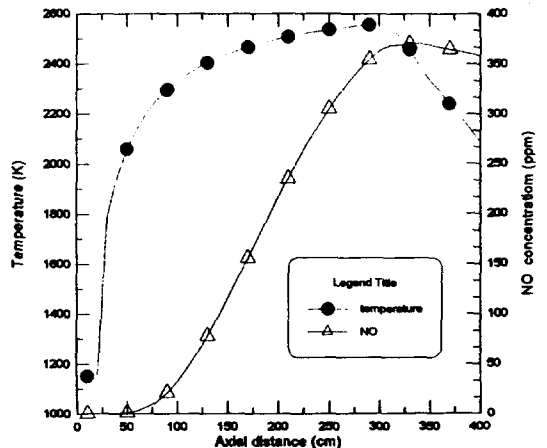


Fig. 3. NO and temperature distribution along the axis.

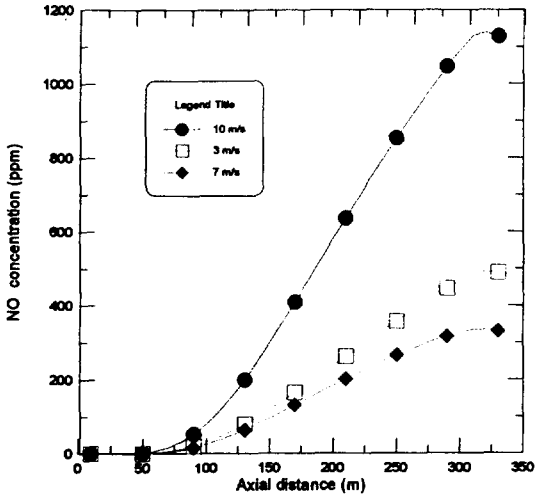


Fig. 4. NO profiles with mixture velocity along the axis.

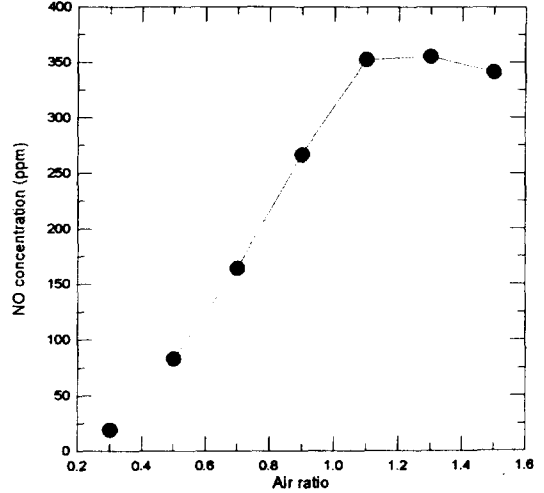


Fig. 5. NO concentration with air ratio.

로 산화반응의 체류시간이 짧기 때문이다. 한편 혼합기 속도가 7 m/s에서 10 m/s로 증가할 때 NO의 농도는 증가하는데 이때는 체류시간의 영향보다는 유체속도의 증가에 따라 연료와 공기의 혼합속도가 증가하여 연소성이 증가되어 덕트내 온도가 증가하여 열적 NO의 증가에 기인한다. 또한 혼합기의 속도에 무관하게 축방향 거리가 증가됨에 따라 배출 NO의 농도는 증가한다.

그림 5는 공기비 변화에 대한 배출 NO의 농도를 나타낸다. 공기비가 증가함에 따라 NO의 농도가 증가하여 공기비 1.2 부근에서 최대값을 가진 후 다시 감소한다. 공기비가 연료과농(fuel rich)의 영역에서 NO의 농도가 감소하는 것은 산소농도 감소로 인해 NO의 생성

량이 감소되고 또한 이미 생성된 NO가 환원성 분위기에서 N<sub>2</sub>로 환원되기 때문이다. 또한 공기과잉의 영역에서 NO의 농도가 감소하는 것은 과잉공기로 인한 배기열 손실이 발생하여 전체적으로 덕트내 온도가 감소하여 열적 NO가 감소되기 때문이다.

#### 4.2 연소로내 유동 및 배출특성

그림 6은 본 연구에 사용된 연소로의 형상 및 크기를 나타낸 것이다. 연소로의 길이는 320 cm이고 반경은 95 cm이다. 연료와 공기가 각각 공급되어 동축분류 확산화염(co-axial diffusion flame)이 형성되고 당량비는 1.1이다. 연료의 속도 및 온도는 각각 0.6 m/s, 289

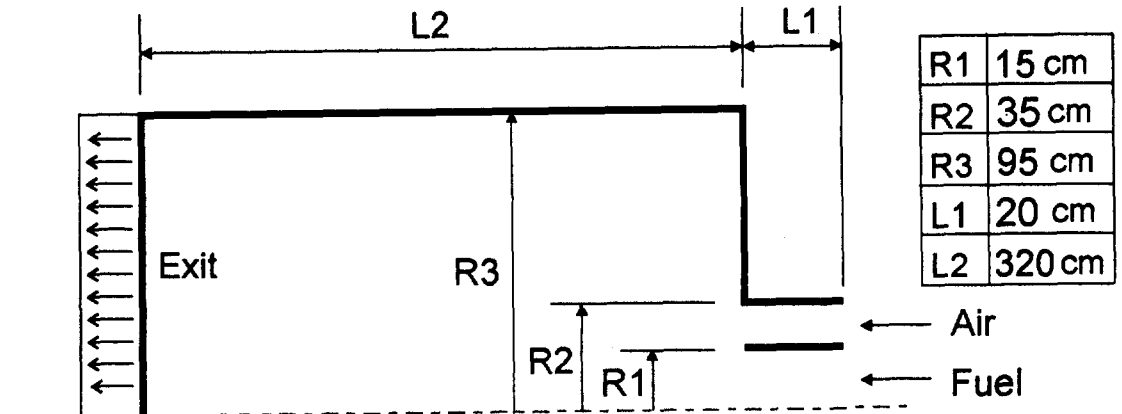


Fig. 6. Furnace configuration.

K로 공기의 속도 및 온도는 7m/s, 810 K로 유입된다.

그림 7은 연소로내 유체의 유동특성을 파악하기 위한 속도벡터를 나타낸다. 연료는 연소로 중심으로 유입되고 연소용 공기는 동축을 형성하여 연료포트 외부로 공기가 공급된다. 공급된 공기는 체류거리가 증가됨에 따라 연소로 벽이나 상대적으로 속도가 작은 연료흐름쪽으로 확산되어 속도 벡터값이 감소된다. 연소로 우측상단의 유동은 속도벡터의 방향에서도 알 수 있듯이 재순환영역(recirculation zone)이 형성된다.



Fig. 7. Velocity vector plot in the furnace.

그림 8은 연소로내 연료의 물분율을 나타낸 것이다. 2차원 등물분율선을 보면 연료가 연소로 중심선 부근에 대부분 존재하여 확산에 의해 점차 벽면쪽으로 공기와 혼합되는 것을 알 수 있다. 2차원 등물분율선에서는 확인이 곤란하나 3차원 그림을 보면 연료입구측의 연료량이 다량 유입되어 체류거리가 증가됨에 따라 연소로내로 확산되는 것을 알 수 있다. 즉, 연료포트로부터 공급된

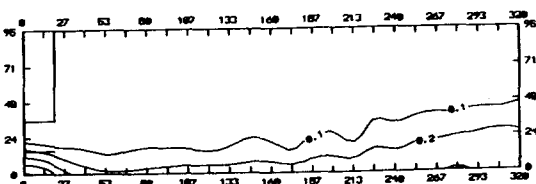
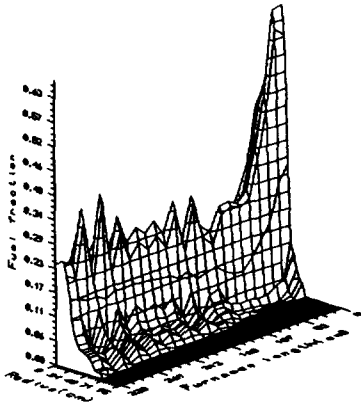


Fig. 8. Fuel fraction in furnace.

연료는 연소로로 공급된 직후 연소에 의해 소모되며 잔류연료는 체류거리가 증가됨에 따라 주위로 확산되는 것을 알 수 있다.

그림 9는 연소로내 산화제의 물분율을 나타냈다. 산화제는 공기포트 부근 및 재순환 영역에서 0.9로 다량 존재한다. 그림 7의 속도벡터에서 언급했듯이 연소로내 재순환 영역이 형성되는데 이 영역은 열이 축적되는 dead zone으로 화염을 안정화시키는데 일조할 뿐이고 공급된 공기는 거의 그대로 존재한다. 중심축 부근의 산화제는 체류거리가 증가됨에 따라 연소로 인해 감소된다.

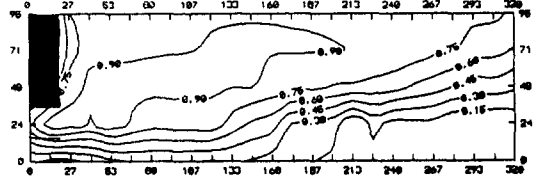


Fig. 9. Oxidant fraction in furnace.

그림 10은 연소로내 생성물의 물분율을 나타낸다. 연소생성물은 버너포트 부근에서 다량 생성된다. 체류거리가 증가됨에 따라 연소로 후류 중심선 부근에서 연소반응의 증가로 인해 생성물의 양이 점차 증가된다.

동축분류 확산화염은 연료와 공기가 혼합이 이루어지는 경계면에서 화염이 형성되어 생성량이 다량 존재하고 미연소 생성물은 체류거리가 증가됨에 따라 연소되어 후류쪽의 생성물량이 증가되는 것이다.

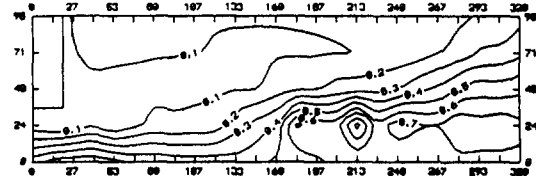


Fig. 10. Product fraction in furnace.

그림 11은 연소로내 온도분포를 나타낸다. 연소로내의 온도는 연료와 공기가 유입되어 확산에 의해 혼합되는 경계면에서 화염이 형성되어 열확산(thermal diffusion)에 의해 주위로 전달된다. 예혼합 화염에 비해 연소강도(combustion intensity)가 크지않아 버너근처에서 보다 일정체류시간이 지난 다음에 연소가 잘 진행되어 후류쪽의 온도가 높다. 하지만 재순환영역의 온도

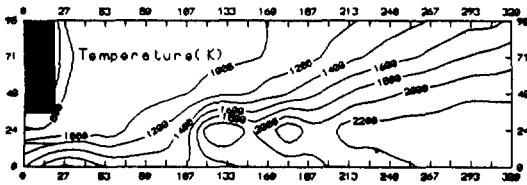


Fig. 11. Temperature distribution in furnace.

는 상대적으로 낮다.

그림 12는 연소로내 NO의 농도를 나타낸다. 가스연료 연소시는 연료중 질소성분이 없으므로 연료 NO (fuel NO)와 무관하고 탄화수소계 연료의 예혼합 화염 연소시 화염선단에서 형성되는 prompt NO 역시 본 연구의 경우 확산화염이 형성되므로 무관하다. 따라서 메탄연소시 생성되는 NO는 온도에 지배를 받는 열적 NO이다.

연소로내 NO의 농도는 이미 언급 되었듯이 온도에 지배를 받는데 그림 11에서 연소로내 온도분포와 잘 일치되는 것을 알 수 있다. 특히 연소로 후류의 연소온도가 높은 영역의 경우에 NO의 농도가 높고 재순환영역 부근의 농도가 작다.

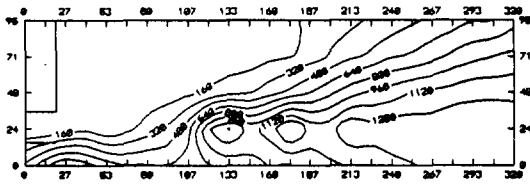


Fig. 12. NO concentration in furnace.

## 5. 결 론

확산연소시 혼합분율, 연소특성 및 배출특성 등을 수치해석적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 체류거리가 증가되어 연소온도가 최대값을 가진 후 온도가 감소하더라도 NO의 농도는 지속적으로 증가되어 서서히 감소된다. 따라서 산화성 분위기의 체류거리가 작을 수록 NO의 농도가 작다.

둘째, 동축분류 확산화염은 연료와 공기의 확산되는 지점에서 화염면이 형성되어 최대온도를 보이며, 이때 최대 NO의 값을 나타낸다. 연소로의 재순환 영역은 dead zone으로 온도가 낮아 NO의 발생량이 작다.

셋째, 가스연소시 연소효율의 향상 및 NO의 농도는 연소로의 형상 및 버너의 형태에 따라 내부유체 유동이 변화되고 온도 및 화학종의 농도분포가 변화된다. 따라

서, 본 수치해석적 연구와 같이 세밀한 유동 및 농도장의 해석이 요구되며, 아울러 배출 NO의 저감을 위한 최적조건의 해석이 가능하리라 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 1995년도 조선대학교 교내 학술연구비지원과 조선대학교 우수연구센터지원에 의하여 연구되었으며, 이 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Bilger, R.W.(1976) Prog. Energy Combustion Sci., 1(87).
- Bird, R.B., W.E. Steward, and E.N. Lightfoot, (1960) *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons New York.
- Field, M.A., D.W. Gill, B.B. Morgan, and P.G.W. Hawksley (1967) *Combustion of pulverized coal*, The British Utilization Research Association, Leatherhed, Surrey, England.
- Fletcher, T.H.(1983) A two-dimensional model for coal gasification and combustion, Ph.D Dissertation, Department of Chemical Engineering, Brigham Young University, Provo, Utah.
- Fiveland, W.A., R.A. Wessel, and D. Eskinazi (1988) Pollutant model for predicting formation and reduction of nitric oxides in three-dimensional, pulverized-fuel-fired furnaces, *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 110, 117-126.
- Gibson, M.M. and B.B. Margan (1970) Mathematical model of combustion of solid particles in a turbulent stream with recirculation, *Journal of the Institute Fuel*, 43, 517-530.
- Gordon, S. and B. McBride (1971) *CREK: A Computer Program for Calculations of Complex Chemical Equilibrium Compositions*, NASA SP-273.
- Gosman, A.D., W.M. Pun, A.K. Ruchal, D.B. Spaling, and R. Wolfshtein (1969) *Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows*, Academic Press London.
- Hill, S.C.(1983) Modeling of nitrogen pollutants



- in turbulent pulverized coal flames, Ph. D, Dissertantion Chemical Engineering Department, Brigham Young University provo, Utah.
- Jang, D.S.(1987) Single- and two-phase reaction flow predictions-modelling of nonequilibrium effects, turbulent particle dispersion and nitrogen oxide formation in pulverized coal combustion, Ph.D Thesis, Louisiana State University.
- Jang, D.S. and S. Acharya(1991) Moment closure model for nitrogen oxide formation in pulverized coal combustion, Accepted for publication in ASAM Journal of Energy Resources Technology.
- Lockwood, F.C., S.M.A. Rizvi, G.K. Lee, and H. Whaley(1984) Coal combustion model validation using cylindrical furnacedata, Twentieth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, 513-522.
- Patankar, S.V.(1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flows*, Hemisphere, Washington, D.C.
- Spalding, D.B.(1988) *PHOENICS Training Course Notes*, CHAM TR/300.