

산업용 보일러의 질소산화물 제어를 위한 SNCR 적용 연구

신미수 · 김혜숙 · 장동순[†]

충남대학교

(2004년 9월 20일 접수, 2005년 2월 24일 채택)

Study of SNCR Application to Industrial Boiler for NOx Control

Mi-Soo Shin · Hey-Suk Kim · Dong-Soon Jang[†]

Chungnam National University

ABSTRACT : This study is to investigate the industrial boiler which can be significantly affected by the restriction of NOx. Note that the application of SNCR method to industrial boiler is usually known as not feasible due to the insufficient residence time for proper mixing. The purpose of this study is to investigate the applicability of the SNCR system application to the industrial boiler, which produces 40 tons of steam per hour using heavy oil.

For the industrial boiler with 3-D rectangular coordinate, the general coding are made for various turbulence modeling such as turbulent flow, turbulent fuel combustion, thermal NO formation and destruction together with the NO reaction with reducing agents. Further, the incorporation of drop trajectory model is successfully made in 3-D rectangular coordinate with Lagrangian frame and the main swirl burner effect on the characteristics of flame is considered. As expected a short flame was created and thereby NOx is removed more efficiently by increasing the proper region of temperature for NO reduction reaction.

The validation of program was made successfully by the comparison of experimental data. Based on the reliable calculation results, the SNCR method in a industrial boiler shows the possibility as one of viable NO reduction method by the use of well designed mixing air of reducing agent.

Key Words : SNCR, Industrial Bolier, SIMPLEC, $k-\epsilon$ Model, Tertiary Mixing Air

요약 : 본 연구는 향후 산업적으로 질소산화물 규제가 중요한 문제로 대두될 만한 산업용 보일러를 대상으로 수행하였다. 일반적으로 SNCR 방법의 산업용 보일러로의 적용은 혼합을 위한 충분한 체류시간을 제공하지 못한다는 점에서 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 본 연구의 목적은 SNCR 장치의 산업용 보일러 적용가능성을 조사하기 위한 것이다. 구체적으로 연료로 중유를 사용하는 시간당 스팀 발생량 40톤 규모의 산업용 보일러를 연구 대상으로 하였다.

산업용 보일러의 수치 해석을 위한 3-D 직교좌표계 프로그램에는 난류 유동, 난류 연소반응, NOx의 생성과 환원제와의 반응을 통한 소멸반응 등을 포함하고 있다. 또한 개발된 코드에는 Lagrangian 방법에 의한 입자계적 프로그램이 포함되어 있고, 주입구에서 접선방향으로의 선회효과를 계산에 의해 고려하였다. 선회버너 효과를 고려한 결과 단화염이 생성되었으며 NOx 환원반응에 적합한 온도 영역의 증가로 인해 NOx 제거효율도 향상되었다.

실험결과와의 비교를 통하여 프로그램을 검증하였으며, 계산결과 혼합용 공기 주입을 통한 환원제와의 혼합 향상을 통해서 SNCR 방법의 산업용 보일러 적용가능성을 확인하였다.

주제어 : SNCR, 산업용 보일러, SIMPLEC, $k-\epsilon$ 모델, 혼합용 공기

1. 서론

선택적 비촉매 환원법(SNCR)은 산성가스로 알려진 NOx를 연소로 후단에서 촉매를 사용하지 않고 제어하는 기술로서 연소로 및 소각시스템에 적용되고 있는 기술이다. 구체적으로 연소생성물인 질소산화물(NOx)과 환원제(암모니아나 요소)가 후 연소로 영역에서 적절한 난류 혼합이 이루어 진후 필요한 온도조건과 반응 시간이 주어질 경우 N₂

로 환원반응을 일으키는 것이다. SNCR 공정에 의한 NO의 N₂로의 환원 반응은 환원제 종류에 따라 약간의 차이는 있지만 대략 900~1100℃ 온도영역에서 이루어지며 이를 SNCR 공정의 온도창(temperature window)이라 부른다.

이와 같이 SNCR 공정의 중요한 3가지 변수는 (1) 질소산화물과 환원제의 난류혼합, (2) 환원반응의 활성화가 요구되는 온도 범위, (3) 화학반응에 필요한 반응시간이라고 할 수 있다. 그러나 많은 경우에 난류혼합과 화학반응에 필요한 반응시간은 소형장치를 제외하고는 구체적으로 구분하기가 불가능한 경우가 많다.

SNCR 공정에서 온도와의 상관관계 및 기본적인 화학반응 메커니즘을 밝히기 위한 연구는 많은 연구자들에 의해

[†] Corresponding author
E-mail: p_dsjang@cnu.ac.kr
Tel: 042-821-6677

Fax: 042-823-8362

이루어져 왔으며 구체적으로 실험실 규모에서의 실험에 의한 화학반응에 대한 기본 연구가 최근까지 보고되고 있다. NO의 제거효율은 보통 장치의 크기에 따라 다른 양상을 보이고 있는데 일반적으로 장치가 커질수록 효율이 떨어진다. 이는 장치가 커짐에 따라 효과적인 난류혼합이 어려워지기 때문으로 판단된다.¹⁻³⁾

위에서 언급한 바와 같이 암모니아를 사용한 SNCR 공정의 화학반응기전은 현재까지 많은 연구가 이루어진 상태이며, 온도와 혼합 및 화학반응에 필요한 체류시간이 중요한 인자로 대두되고 있는데 그 이유는 반응시간이 길어짐에 따라 그에 필요한 후연소로의 공간 확보 문제 등이 실질적인 문제로 작용할 수 있기 때문이다.^{4,5)} 즉, 적절한 후연소의 온도 영역이 주어질 경우 화학 당량비를 만족하는 환원제가 주입된다면 반응에 필요한 온도나 농도 그리고 화학 반응시간 등은 이미 결정된 변수이기 때문에 적절한 난류 혼합에 의하여 반응을 주어진 공간 내에서 완성시키는 일이 중요한 현안으로 부각되고 있는 것이다. 이를 위해서는 환원제 액적의 휘발화에 따른 난류 혼합을 정량화하는 일이 필요하며 본 연구에서는 난류유동에 대한 수치해석적인 방법을 이용하고자 하는 것이다. 구체적으로 본 논문에서는 액적의 휘발화와 궤적의 추적, 휘발화에 따른 난류 혼합, 환원제와 질소산화물의 반응모델 그리고 질소산화물의 발생모델 등을 다루고 있다.

2. 수학적 모델 및 방법

2.1. 일반지배방정식 및 해법

산업용 보일러 내부의 반응 및 유동 특성을 규명하기 위하여 3차원 직교좌표에서 프로그램을 개발하였다. 3차원 직교좌표계에 대한 기상상태의 일반 지배방정식은 다음과 같이 표현되며 단위체적당 시간에 따른 변화량은 유동 및 확산항 그리고 단위체적당의 생성항의 합으로 나타난다.⁶⁾

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi \quad (1)$$

(비정상항) (유동항) (확산항) (생성항)

위 식에서 ρ, \vec{u} 는 밀도와 속도 벡터이고 Γ_ϕ 와 S_ϕ 는 ϕ 에 대응되는 난류확산계수와 생성항이다. 일반 종속 변수 ϕ 는 x, y, z 방향의 속도(u, v, w), 온도(T), 엔탈피(h), 화학종의 질량분율(m_i), 난류운동에너지(k), 난류운동에너지의 소멸율(ϵ) 등을 나타낸다.

난류 유동해석은 다양한 특성 시간과 와류 크기에 대한 구체적인 계산이 필요하나 직접적인 해를 구하는 것이 쉽지 않으므로 주요 변수에 대한 시간평균을 사용하는 일반적인 방법으로 계산하였다. 이때 유동항과 같은 비선형항에 대한 시간 평균은 레이놀즈(Reynolds) 전단력과 같은 변동 상관항(turbulent fluctuation correlation)에 대한 모델이 요구된다. 레이놀즈 전단력은 Boussinesq 가정을 사용하였고,

난류점성계수 μ_t, μ_t 는 Launder와 Spalding이 제시한 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.^{7,8)}

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

위의 식 (1)의 2차 편미분 방정식은 검사체적에 기초한 유한 차분 방법을 사용하여 이산화 하였으며 운동량 방정식에 나타나는 속도와 압력의 연계는 SIMPLEC(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation Consistent) 알고리즘을 사용하였다. 이산화된 식 (3)의 형식은 선형이지만 종속 변수의 함수로 주어지는 선형계수에 내재된 비선형특성으로 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)에 의한 반복계산에 의해 해를 구하였다.⁹⁾

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (3)$$

a_E, a_W, a_N, a_S, a_P 는 각각 동쪽, 서쪽, 북쪽, 남쪽, 그리고 주요 격자점에서의 영향력 강도를 계수로 나타낸 것이다.

2.2. 난류 반응 모델

본 연구에 사용된 난류반응 모델은 eddy breakup 모델로서 이는 화학반응이 매우 빠른 유동장내의 전체적인 반응 속도(연소속도)는 난류혼합에 의해 지배되므로 결국 연소속도는 난류혼합속도와 같고, eddy의 붕괴속도와 비례한다는 것이다. 이러한 개념으로 Magnussen과 Hjertager가 아래와 같이 제안한 평균농도가 추가된 경험식을 이용하여 연료의 반응량을 다음과 같이 계산하였다.⁹⁾

$$\dot{w}_{fu} = \text{minimum of} \left| \overline{\rho A m_{fu}} \frac{\epsilon}{k}, \frac{\overline{\rho A m_{ox}}}{i} \frac{\epsilon}{k}, \frac{\overline{\rho A m_{pr}}}{1+i} \frac{\epsilon}{k} \right| \quad (4)$$

\dot{w}_{fu} 는 단위시간 단위체적당의 연료반응량으로서 연료의 질량분율(m_{fu})과 단위 질량당의 현열 엔탈피(h)에 영향을 주게 된다.

2.3. NO 생성 및 소멸 모델

난류 연소모델이 주요 화학종에 대한 전반적인 양상을 예측하는데 있어 성공적인 도구로 사용되고 있으나 국지적인 화염소멸을 구체화 할 수 없고 NO와 SOx 같은 화학적 동력학이 중요한 역할을 하는 오염물질에 대해 잘 예측하지 못하는 단점을 갖고 있다. 그러므로 본 연구에서는 NO 생성과 소멸에 대한 화학적 동력학을 난류 연소모델에 포함시켜 전체반응속도는 난류혼합과 화학반응의 조화평균(harmonic mean)에 의해 계산된다고 가정하였다.

$$\text{Total reaction rate} = \frac{1}{\frac{1}{\text{turbulent mixing rate}} + \frac{1}{\text{chemical reaction rate}}} \quad (5)$$

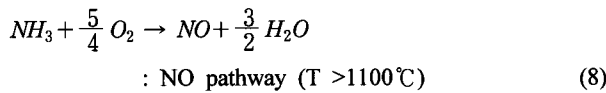
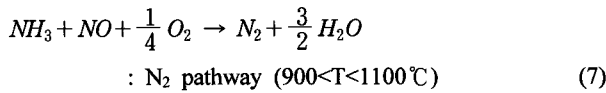
NO의 생성과 소멸에 대한 화학적인 동력학을 난류반응 모델에 포함시키기 위해 공정을 간략하게 언급하면 다음과 같다. 연료의 연소과정에서 NO는 연소공기 내 질소의 열적 산화에 의해서 thermal NO로 생성된다. 특히 연소온도가 1700 K 이상의 온도에서 충분한 시간동안 체류할 때 thermal NO는 연소공기 중의 질소에 의해 생성되며 식 (6)의 Zeldovich mechanism으로 표현된다.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_f \left(\frac{K_{pp}}{R_u T} \right)^{\frac{1}{2}} [N_2][O_2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

여기서, $k_f = 1.82 \times 10^{14} \exp\left[-\frac{38,370}{T}\right]$

화학종의 농도는 몰농도로 표현하며 K_p, P, R_u, T 는 각각 평형상수, 압력, 기체상수 그리고 화염온도(K)를 나타낸다.^{10,11)} 결국 연소가스의 화염온도, 체류시간, 그리고 과잉 산소 농도가 증가할수록 thermal NO의 농도는 증가하게 된다.

환원제로 암모니아가 사용될 때의 주요 반응식은 아래와 같다.



2.4. 액적 운동 지배방정식

암모니아 액적의 궤적이나 속도변화 추적을 위해 Lagrangian 접근방식을 사용하였으며 3차원 직교좌표계에 대한 액적의 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d u_p}{dt} = a(u_g - u_p) \quad (9)$$

$$\frac{d v_p}{dt} = a(v_g - v_p) - g \quad (10)$$

$$\frac{d w_p}{dt} = a(w_g - w_p) \quad (11)$$

여기서, $a = \frac{18\mu_g C_D Re}{\rho_p d_p^2 24}$

여기서 하첨자 p와 g는 입자상과 가스상을 의미하며 Re는 레이놀즈수이며 C_D 는 항력계수로 Wallis에 의해 주어진 식을 사용하였다.¹²⁾

3차원 직교좌표계에서 액적의 궤적추적을 위한 격자점에서의 운동양상은 검사체적을 8개의 영역으로 분류하여 각각의 영역에서 가능한 8개의 추적을 가상하였다. 각 액적의 궤적에서는 입자의 크기, 초기위치는 동일하며 액적의 유동숫자(number flow rate)는 하나의 궤적을 따라 균질으로 이동하기에 일정하다고 가정하였다.¹²⁾

액적의 휘발화율은 시간에 따라 일정하게 증발함(constant devolatilization rate)을 가정하였다.

이러한 액적의 휘발화는 단위시간 단위체적당의 연료 반응량에 의해 엔탈피와 기상의 NH_3 와 H_2O 지배방정식에 영향을 준다.

3. 수치해석결과 및 토론

본 연구는 시간당 40톤 규모의 산업용 증류 보일러를 대상으로 하여 연구가 수행되었으며 NOx 저감에 SNCR 방법을 도입하기 위하여 다양한 기초연구를 수행하였다. 3차원 직교좌표로 해석한 연소로의 난류 반응 프로그램과 액상 암모니아 주입 상황을 고려한 난류반응의 유동장, 온도장, 액적궤적 그리고 암모니아 혼합효과 등에 대한 일련의 수치모사를 수행하고 그에 따른 분석을 시도하였다.

본 연구에서 사용한 산업용 보일러에서 주로 사용되는 연료인 Bunker-C유의 분자식을 다음과 같이 가정할 경우 식 (12)의 연소반응식에 따라 노내 반응이 이루어진다. 보통 1톤의 증기를 생산하는데 70 L/hr의 연료를 소모하며 공연비 1.2를 가정하여 연료 및 산화제의 주입속도를 결정하였다.

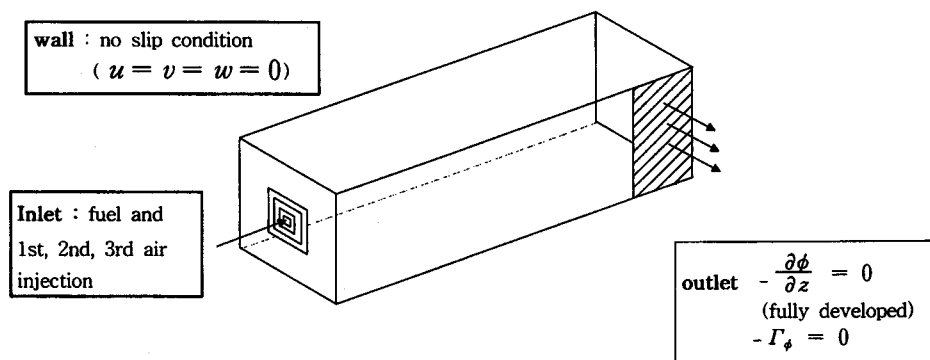
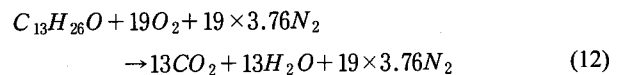


Fig. 1. Schematic diagram of industrial boiler and boundary conditions.

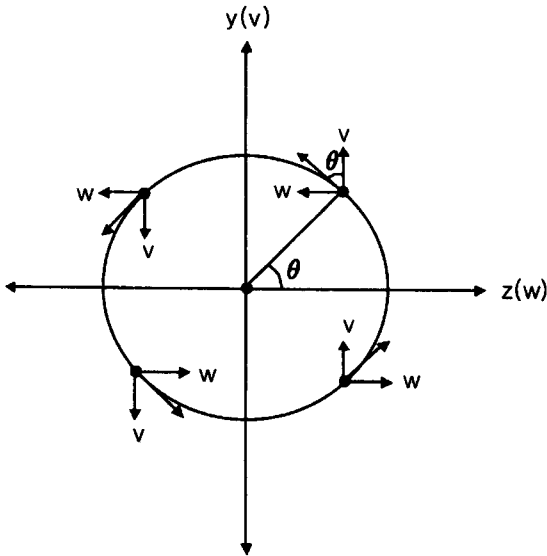


Fig. 2. Swirl angle and direction at inlet part.

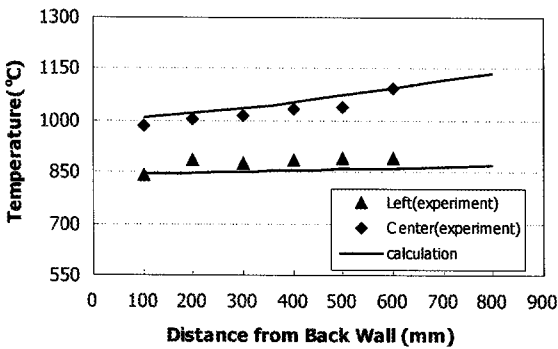


Fig. 3. Comparison of the experimental data with calculation.(boiler loading 60%)

대상이 되는 보일러의 도식도와 경계조건은 Fig. 1과 같다. 보일러는 길이 6.25 m, 높이 3.15 m, 폭 3.0 m이며 가운데로 연료가 주입되고 주위로 각각 1차, 2차, 3차 공기가 선회를 하면서 주입되며 보일러의 운전 부하량은 60%로 가정하였고 운전조건에 따른 유동과 온도분포 및 NOx 저감 효율을 검토하였다.

본 연구는 3차원 직교좌표계이므로 산화제로 사용한 공기의 주입구에 선회를 주는 방법을 접선 방향으로 아래와 같이 독특한 방법으로 고려하였다.¹³⁾ 아래에 나타난 Fig. 2는 반시계 방향으로 선회를 준 경우 공기주입구의 도식도를 구체적으로 나타낸 그림이다.

Fig. 3은 프로그램을 검증하기 위하여 보일러 부하량이 60%일 때 보일러의 뒤쪽 벽면 2곳에서 일정거리 떨어진 지점에서 측정된 현장실험¹⁴⁾ 온도분포 결과를 수치해석결과와 비교한 것이다. 계산결과는 측정에 의한 실험결과와 비교적 일치하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4는 산화제 주입시 선회버너 효과를 고려한 것으로 선회강도 변화에 따른 중심축에서의 계산값 변화를 보여주고 있다. 온도분포는 선회강도의 증가에 따라 연료와 산화제와의 원활한 혼합으로 최고온도 지점이 연소기 버너 쪽

으로 점점 당겨지고 있는 것을 볼 수 있으며, 연료의 분포는 선회강도가 클수록 연소로 앞부분에 연료가 주로 존재하고 x방향으로 1 m 이후 지점에서는 연료가 거의 나타나지 않고 있지만 선회가 없는 경우에는 연소로 후반부까지 연료가 존재하고 있어 장화염을 형성함을 알 수 있다. (c)는 산화제인 산소의 질량 분율을 나타낸 것인데 최고 온도를 나타내는 부분에서 최저값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 연소생성물인 CO₂는 (d)에 나타냈는데 최고온도가 나타나는 지점에서 최대값을 나타내고 있다.

Fig. 5는 보일러의 윗면 중앙에서 환원제로 암모니아를 주입한 경우에 대한 전반적인 계산결과를 나타낸 것이다. Fig. 5의 (a)는 속도 분포를 나타낸 것인데 산화제에 강선회를 주어서 주입하여 모서리 재순환 유동은 나타나지 않고 있으며 오히려 중심부 보다는 버너 위아래의 벽 근처에서 속도가 크게 나타나는 것을 보여주고 있다. (b)는 온도 분포를 나타낸 것인데 강한 선회 유동에 의해 고온영역이 버너 근처에 분포하는 것을 볼 수 있다. 또한 환원제가 주입에 따른 온도 변화는 거의 없지만 윗벽 근처에서 온도가 다소 저하되었으며 SNCR 방법은 온도의 영향이 민감하므로 온도 분포로부터 환원제의 주입위치 등을 결정하는데 좋은 자료로 사용될 수 있다. (c)는 환원제 주입시 NO의 농도분포를 나타낸 것인데 출구에서의 평균농도는 170 ppm 정도로 나타났다. (d)는 노즐에서 분사되는 암모니아의 분포를 좀 더 가시적으로 나타내기 위하여 입자궤적 분포를 나타낸 것인데 입자궤적이 분사노즐에서 널리 분포하지 못하고 대부분 노즐 근처에서 모두 휘발화 되는 것을 볼 수 있다.

환원제의 주입속도, 환원제 주입위치 및 효율적인 혼합을 위한 혼합용 공기주입에 따른 결과는 Table 1에 정리하였다. 환원제로 암모니아를 주입한 경우 주입하지 않은 경우에 비해서 출구의 NO 평균 배출농도는 약 280 ppm에서 170 ppm으로 40% 정도 저감되었다. 암모니아의 주입속도가 증가함에 따라 출구에서의 NO 평균농도는 감소하였고, 암모니아의 slip 현상은 2 m/sec, 5 m/sec에서는 나타나지 않았고 10 m/sec인 경우도 10 ppm 이하로 문제가 되지 않았다. 산업용 보일러의 경우 길이가 소형 연소로에 비해 길고 짧은 시간 안에 휘발화 되므로 출구에서의 암모니아 slip 문제는 나타나지 않는 것으로 판단된다.

환원제의 주입위치는 보일러 후단으로 갈수록 체류시간이 감소하여 암모니아가 NO와 충분히 반응할 시간을 확보하지 못하여 출구에서의 NO 평균농도가 증가하였다. 그러므로 SNCR 반응이 일어날 수 있는 적당한 온도영역이 확보된 경우 되도록 연소로 앞쪽에서 주입하는 것이 충분한 반응시간을 확보하여 NO 제거효율에 유리한 것으로 판단된다.

혼합용 공기를 주입한 경우 환원제만 주입한 경우에 비해 약 20% 정도 NO의 추가 저감효율을 나타내었다. 이처럼 혼합용 공기 주입을 통하여 환원제의 분사가 좀 더 효율적으로 이루어진 것을 알 수 있다.

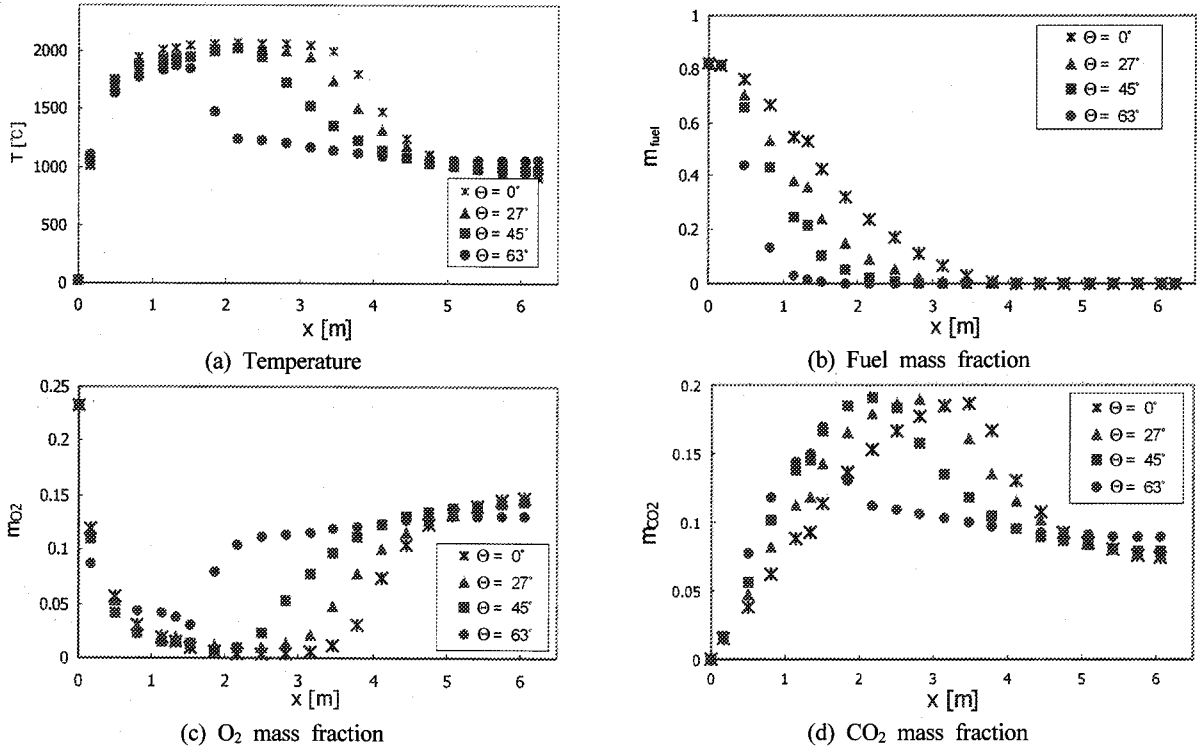


Fig. 4. Contour plots at the centerline with swirl angle.

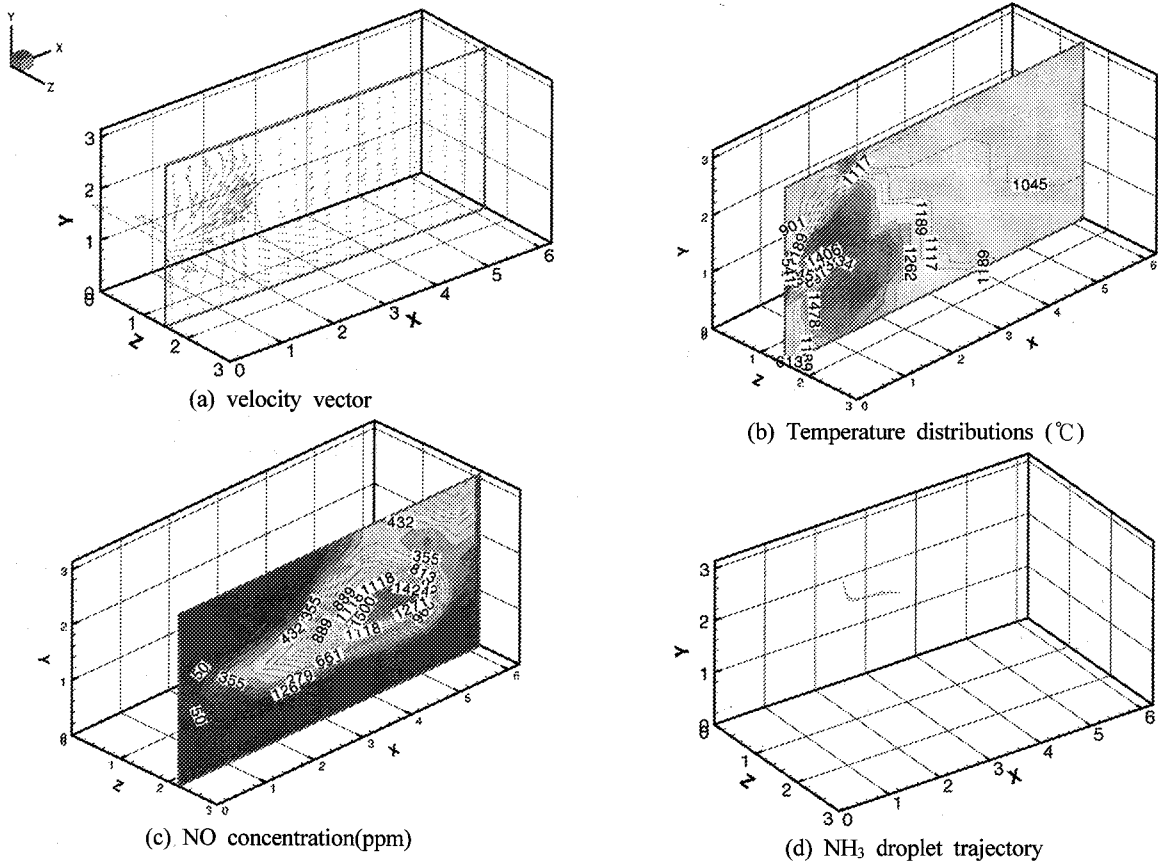


Fig. 5. Calculation results with NH_3 injection.

Table 1. Calculation results of various operating condition employed in 3-D boiler

Operating variables		NOx concentration of exit (ppm)	NOx removal efficiency(%)
Injection velocity of NH ₃ (m/sec)	2 m/sec	200	30
	5 m/sec (standard)	170	40
	10 m/sec	150	46
Injection location of NH ₃ (m)	1.2 m (standard)	170	40
	2.7 m	230	18
	4.0 m	240	14
Mixing air	none	170	40
	5 m/sec	140	50

4. 결론

본 연구에서는 3차원 직교좌표계에서 난류 반응 프로그램 및 SNCR 공정 적용을 위한 NO 반응모델, 액적 궤적 및 휘발화 모델을 포함한 종합 프로그램을 개발하였다. 선회버너 효과를 고려하여 산화제에 강한 선회를 준 경우 단화염을 형성하였으며 NO 제거효율도 증가하여 효과적인 난류혼합의 중요성을 확인할 수 있었다. 환원제의 slip 현상이 심각하게 야기되지 않는 범위 내에서 환원제의 주입 속도가 클수록, 주입위치는 반응에 필요한 체류시간을 확보할 수 있는 보일러 앞쪽에 위치하는 것이 출구 NO 농도의 감소에 효과적이었다. 결과에서 주입위치가 버너로부터 1.2 m 일 때 4.0 m에 비해 NO 저감효율이 20% 이상 증가한 것을 볼 수 있었다. 입자궤적 알고리즘 개발을 통한 보일러내의 입자궤적 분포는 가시적으로 환원제 액적의 거동 결과를 확인하는데 유효하였다.

또한 환원제와 배기가스의 초기혼합을 강화할 수 있도록 환원제 주입시 혼합용 공기와 함께 주입한 경우 주로 노즐 근처에만 분포하던 환원제가 보일러의 중심부까지 좀 더 효율적으로 분사되어 NO 출구 농도가 170 ppm에서 140 ppm으로 저감되어 NO제어에 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.

기호설명

- φ : general dependent variables
- S_φ : volumetric source per unit time
- Γ_φ : turbulent diffusion coefficient, [kg/m · sec]
- \vec{u}_g : velocity vector in x direction of gas [m/sec]
- \vec{v}_g : velocity vector in y direction of gas [m/sec]
- \vec{w}_g : velocity vector in z direction of gas [m/sec]
- u_p : velocity in x direction or axial velocity of particle, [m/sec]

- v_g : velocity in y direction or radial velocity of particle, [m/sec]
- w_g : velocity in z direction or tangential velocity of particle, [m/sec]
- ε : turbulent kinetic energy dissipation rate, [J/kg · sec]
- k : turbulent kinetic energy, $k = \frac{1}{2}(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})$, [J/kg]
- μ_t : turbulent viscosity, $\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$, [kg/m · sec]
- μ_g : dynamic viscosity of air, [kg/m · sec]
- ρ_g : density of air, [kg/m³]
- ρ_p : density of particle, [kg/m³]
- A_p : cross sectional area of particle, [m²]
- C_D : drag coefficient, $\frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_g u_{red}^2 A}$, [dimensionless]
- d_p : particle diameter, [m]
- m_i : mass fraction of chemical species

참고문헌

1. Teixeira, D. P., Himes, R. M., Smith, R. A., Musio, L. J., Jones, D. G., and Steinberger, J., Selective Non-catalytic Reduction(SNCR) Field Evaluation in Utility Natural Gas-Fired Boiler, DOE/PC/90363-T4, October (1992).
2. Lyon, R. K., "Thermal DeNOx," *Environ. Sci. Technol.*, **21**(3), 231~236(1987).
3. Gullett, B. K., M. Linda, M. L., Paul, W. G., James, M. C., "NOx Removal with Combined Selective Catalytic Reduction and Selective Noncatalytic Reduction: Pilot-Scale Test Results," *J. AWMA*, **44**, 1188~1194(1994).
4. Miller, J. A. and Bowman, C. T., "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **15**, 287~228(1989).
5. Lyon, R. K., "Communications to the Editor : The NH₃-NO-O₂ Reaction," *Int. J. Chem. Kinet.*, **8**, 315~318(1976).
6. Patanker, S. V., Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, New York(1980).
7. Hinze, J. O., Turbulence, McGraw-Hill, New York(1956).
8. Launder, B. E., Spalding, D. B., Mathematical models of turbulence, Academic press, New York(1972).
9. Magnussen, B. F. and Hjertager, H., "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion," 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 719(1977).
10. Antonella, F., Renato, G., Francesco, L., and Zandarya, S., "Removal of nitrogen oxides produced during waste

- incineration : operation of DeNOx system," First international conference on environmental engineering and renewable energy, Mongolia, pp. 187~196(1998).
11. Stephen, R. T., An introduction to combustion, McGraw-Hill, New York(2000).
 12. Williams, G. B., One-dimensional and two-phase flow, McGraw-Hill, New York(1969).
 13. 신미수, "산업용 보일러 시스템의 SNCR 공정과 집진·축열 장치 고도설계를 위한 수치해석," 충남대 박사학위 논문(2003).
 14. 김동찬, 김성수, 노남선, 김광호, 김상국, 신대현, 전상구, "선택적 비촉매 환원법에 의한 노내 탈질기술 개발," 에너지기술연구소(산업자원부) 최종보고서(2000).