

Horizontal Firing Boiler 의 열유동 해석

김광추* · 박만흥* · 김종길* · 최청렬** · 강대웅** · 김창녕***

Numerical Analysis on Flow and Heat Transfer of Horizontal Firing Boiler

K. C. Kim, M. H. Man, J. K. Kim, C. R. Choi, D. W. Kang, C. N. Kim

Key Words : Liquid Fuel Combustion(액체연료연소), Horizontal Firing Boiler(수평연소보일러), PDF(확률밀도함수), Nox(질소산화물)

Abstract

Numerical Analysis for liquid fuel combustion of horizontal firing boiler is performed. The mixture-fraction/PDF equilibrium chemistry model is used to predict the combustion of the vaporized fuel. P1 model for radiation effect is used. Superheater, reheater and economizer is modeled using porous with heat sink. Flow and temperature field is investigated, and distribution of thermal NOx and CO is investigated. Computation as the change of excess air and swirling is performed to investigate the change of thermal NOx.

1. 서 론

최근 우리나라는 OECD 가입과 발전시장의 개방에 따라 전세계적으로 심각하게 대두되고 있는 환경오염의 방지를 위한 연구가 절실히 요구된다. 특히 2003년 이후부터는 설비용량이 100MW 이상인 경우에 150 ppm(4% O₂)까지 저감하도록 배출허용기준을 강화할 예정이다.

발전설비에서 배출되는 대표적인 공해물질 중 황산화물의 저감 대책은 대부분 환경 규제치를 만족시킬 수 있을 정도의 연구 성과를 얻었으나, 질소산화물 저감기술은 아직 미흡한 실정이다. 질소산화물의 저감방법에는 전처리방법과 후처리방법이 각각 혹은 복합적으로 적용되는데, 노내 연소방법의 개선에 의한 전처리 방법이 대부분으로 아직까지 외국기술에 의존하고 있는 실정이다.

질소산화물의 발생은 크게 연료의 질소성분에 의한 연료 NOx 및 공기중의 질소성분에 의한 열적 NOx로 구성되며, 액체연료의 경우에는 열적 NOx가 질소산화물 발생량의 대부분을 차지한다. 열적 NOx의 발생은 보일러 연소실 내 온도분포,

화염형상 및 체류시간 등 다양한 인자에 의하여 결정되므로, 질소산화물의 저감을 위하여 이러한 요인을 분석하여 대책을 수립하여야 한다.

본 연구에서는 화력발전소에서 사용되고 있는 액체연료를 사용하는 horizontal firing(wall firing) 보일러에 대하여 연소에 따른 열유동 해석 및 과잉공기비와 swirling 속도변화에 따른 열적 NOx의 발생변화를 예측하여 보았다.

2. 이론해석

2.1 해석모델

본 수치계산에 사용된 horizontal firing 보일러에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다. 노즐은 연소실 4개의 수직면 중 1개의 면에 총 12개가 설치되어 있으며, 각 노즐은 실제 설비에서는 1, 2차 및 3차의 흡입구로 나뉘어 연료/공기는 1차측 흡입구를 통해, 2차 및 3차측 흡입구에서는 공기만이 흡입된다. 그러나 본 연구에서는 2차 및 3차측 흡입구는 하나의 흡입구로 단순화 하여 공기만이 유입되도록 하였다. 연소실 상단과 출구 사이에는 재열기(reheater), 과열기(super-heater) 및 절탄기(economizer) 등이 설치되어 있으며, 또한 외벽에도 과열기 관(tube)이 나선형으로 감겨져 있다.

* 한국전력기술㈜

** 경희대 대학원

*** 경희대

2.2 지배방정식

보일러 연소실내에서는 화학반응(연소) 등을 동반하는 유동장이 형성되며, 일반적으로 난류, 화학반응 및 대류/복사열전달 등이 수반된다. 본 연구에서는 이와 같은 연소 유동장을 지배하는 방정식으로 질량보존 방정식, 운동량보존 방정식 및 에너지 방정식 외에 난류모델로는 표준 $k-\epsilon$ 모델, 복사모델로는 P1 모델을 사용하였다. 또한 연료에 포함된 각 화학종의 계산을 위해서 화학종 보존방정식을 사용하였다. 연소모델로는 화력발전소의 여러가지 연료에 대해 광범위하게 사용할 수 있고, 난류확산 화염 및 이와 유사한 화학반응 과정을 정확히 예측할 수 있는 혼합분율/확률밀도함수 (mixture fraction/probability density function(PDF)) 모델을 적용하였다. 또한 NOx의 생성과 소멸을 예측하기 위해서 NOx 전달방정식을 사용하였다. 사용된 지배방정식 들은 다음과 같다.

질량보존 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho x_i) = S_m \quad (1)$$

여기서 S_m 은 휘발이나 증발에 의한 질량생성항이다.

운동량보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서, $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}$ 이다.

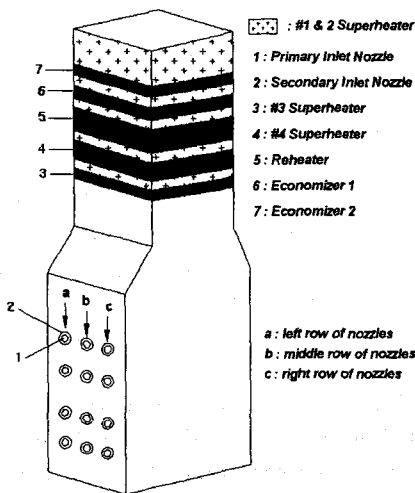


Fig. 1 Schematic view of horizontal firing boiler.

에너지보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j J_j + S_h \quad (3)$$

여기서, $h = \sum_i m_i h_i$, $h_i = \int C_{p,i} dT$ 이며, J_j 는 j 종의 flux이고, S_h 는 화학반응(chemical reaction)이나 복사(radiation) 등에 의한 생성항이다.

난류보존 방정식(Standard k-ε)

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

여기서, 각 방정식에 사용된 난류 변수들은 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92$$

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

화학종보존 방정식(Mixture Fraction/PDF)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} (J_{i,i}) + S_i \quad (6)$$

여기서, m_i 는 화학종의 질량분율(mass fraction)

$$J_{i,i} = -\rho D_{i,m} \frac{\partial m_i}{\partial x_i} - \rho D_{i,T} \frac{\partial T}{T \partial x_i}$$

$D_{i,m}$ 는 화학종의 확산계수(diffusivity coefficient),

$D_{i,T}$ 는 화학종의 열확산계수(thermal diffusivity coeff),

S_i 는 화학종의 생성항(source term)이다.

화학반응 모델

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{f}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \bar{f}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (7)$$

여기서, $f = \frac{Z_k - Z_{k0}}{Z_{kf} - Z_{k0}}$ 는 혼합분율(mixture fraction)

이며, \bar{f} 는 f 의 시간평균변화율이다.

복사 모델(P1 모델)

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0 \quad (8)$$

여기서, q_r 는 복사에 의한 flux 이며,

$$q_r = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \text{ 이고,}$$

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \text{ 이다.}$$

NOx 모델

$$\rho \frac{\partial Y_{NO}}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} \right) + S_{NO} \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial Y_{HCN}}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y_{HCN}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{HCN}}{\partial x_i} \right) + S_{HCN} \quad (10)$$

여기서, Y 는 가스상의 질량분율이며, S_{NO} , S_{HCN} 는 생성항이다.

2.3 경계조건

입구에서의 연료로 사용된 pentane(C5H12)의 총 공급량은 12.27 kg/s 이며 온도는 323 K 이다. 공기 공급량은 과잉공기가 0%일 때 총 176.47 kg/s 이며 온도는 633K 이다. 연소실 상부에는 다공성 매질(porous)을 사용하여 재열기, 과열기 및 절탄기 등에 따른 압력강하 및 열침(heat sink)조건을 수용할 수 있도록 하였다. 노내의 벽면에 대한 조건으로는 속도에 대해서는 점착조건을 사용하였으며, 열 전달 손실이 있는 경우에는 열유속(heat flux)조건을 부여하였고 그외의 벽면에 대해서는 단열(adiabatic)조건을 부여하였다. 또한 복사(radiation)에 의한 방사율(emissivity)로는 0.3 을 부여하였다. 노내의 압력강하 및 열손실에 대한 조건은 Table 1 에 나타내었다.

2.4 수치해석

보일러내의 연소에 따른 유동특성을 해석하기 위하여 상용 CFD 코드인 FLUENT 5.5 를 사용하였다. 격자는 보일러 형상의 복잡성으로 인해 노즐이 있는 연소실 영역은 비정규격자를 사용하였으며, 그외의 보일러 상부와 출구영역은 정규격자

Table 1 Boundary Conditions.

구 분	압력강하 [Pa]	열손실	비 고
Furnace	-	189.71	Wall Flux [W/m ²]
#1 Superheater	-	140.52	
#2 Superheater	-	140.52	
#3 Superheater	281.41	10 ⁵	Porous Heat Sink [W/m ³]
#4 Superheater	409.32	10 ⁵	
Reheaterr	511.65	10 ⁵	
Economizer 1	281.41	10 ⁵	
Economizer 2	281.41	10 ⁵	

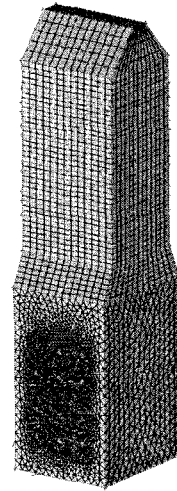


Fig. 2 Grid Systems

(structure grid)를 사용하였다. Fig. 2 는 계산에 사용된 격자망으로 전 영역에 대해 사용된 격자의 셀(cell)의 수는 39899 개이다. 수치계산시 대류항의 차분도식으로는 1차 상류도식(first order upwind scheme)을 사용하였으며, 압력장을 얻기 위하여서는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 또한 수치계산시 모든 종속변수에 대하여 하향이완(under relaxation)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 계산조건

본 연구에서는 horizontal-fired 보일러에 대해 수치계산을 실시하였다. 우선 기본모델은 Table 2 의

A-2의 조건으로 정하였다. 기본모델의 조건으로는 국내 200MW급 화력발전설비를 근간으로 연료공급량은 12.27 kg/s이며, 과잉 공기량은 10%로 정하였다. 공급공기의 분배는 1차 흡입구를 통해 40%, 2차 흡입구를 통해 60%의 공기가 공급된다. 이때 swirling의 속도는 1차측 흡입구에서의 속도가 40 rad/s이며, 2차측 흡입구에서의 속도가 20 rad/s이다. 기본모델을 토대로 연료의 공급량과 1차측 swirling의 속도는 모두 동일한 조건으로 고정하고 과잉공기량의 변화 및 2차측 흡입구에서의 swirling의 속도의 변화에 따른 변화를 고찰하였다.

Table 2 Calculation Conditions

구분	Excess Air[%]	Primary Air[%]	Secondary Air[%]	Swirling [rad/s]
A-1	0	40	60	20
A-2	10	40	60	20
A-3	20	40	60	20
A-4	30	40	60	20
B-1	10	40	60	10
B-2	10	40	60	30

3.2 보일러내 유동특성

Fig. 3은 b열 노즐(Fig. 1 참조)이 위치한 중심단면에서의 연료입자의 궤적(path line)을 도시하고 있다. 하부에 설치된 노즐로 갈수록 분사된 연료 입자들 중 일부는 분사되어 재순환을 함을 볼 수 있는 반면, 상부에 설치된 노즐로 갈수록 이러한 재순환은 둔화되며 대부분의 입자들이 상층하여 출구로 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 또한 노즐의 분사방향과 보일러의 형상으로 인해 연료입자들이 좌측벽면보다 우측벽면쪽에 치우쳐 빠져나가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4 ~ Fig. 5는 중심단면에서의 온도분포를 도시하고 있다. Fig. 4는 단면전체에서의 온도장을 도시하였으며, Fig. 5는 2000 K 이상의 고온영역을 도시하였다. 보일러내의 고온영역은 화염의 발생으로 인해 연소실내의 중심영역에 집중되어 나타났으며, 연소실 상부에서는 열침(heat sink)으로 인한 열손실로 인해 온도의 구배가 나타나며 출구로 갈수록 온도는 하강한다. 또한 동일 고도(level)라 할지라도 속도장의 영향으로 인해 좌측벽면보다 우측벽면쪽의 온도가 상대적으로 높게 나타났다.

Fig. 6은 중심단면에서의 열적 NOx의 분포이다. 가장 연소가 활발히 일어나는 고온영역인 연소실

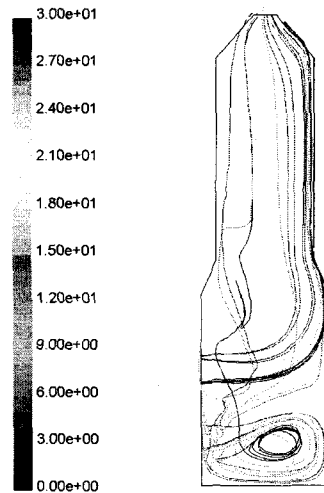


Fig. 3 Path line distributions from nozzles of b-array.

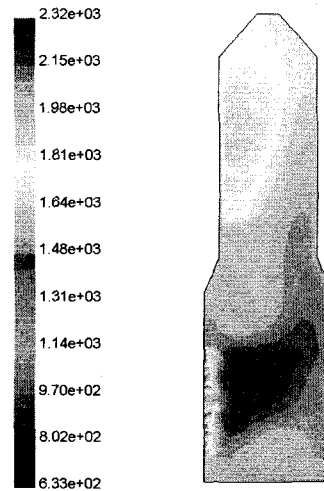


Fig. 4 Temperature distributions in vertical cross sectional area of b-array.

중심부에 NOx가 많이 발생하며 화염의 안쪽에서 가장 적게 나타났다. 이는 Fig. 4 ~ Fig. 5의 온도장과 유사한 결과로서 열적 NOx의 생성이 온도장에 영향을 받는다는 것을 보여준다

Fig. 7은 중심단면에서의 CO의 분포이다. CO의 분포가 가장 높게 나타나는 곳은 화염의 안쪽인 연료 plume의 중심부(core)로서 이곳은 fuel rich zone에 해당하는 곳이다. 반면 가장 낮게 나타난 곳은 노즐과 노즐사이로서 이곳은 서로의 화염이 영향을 미치는 영역으로서 연소가 가장 활발한 곳이다.

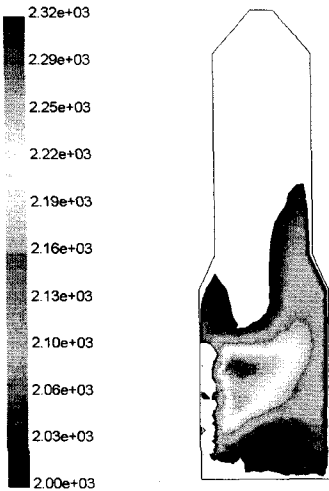


Fig. 5 High temperature distributions in vertical cross sectional area of b-array.

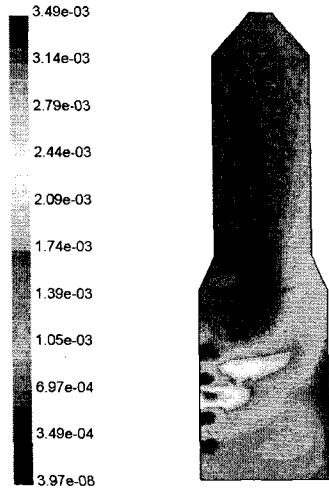


Fig. 6 Thermal NOx distributions in vertical cross sectional area of b-array.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 연소실의 가장 하부에 설치된 노즐군과 가장 상부에 설치된 노즐군에서의 수평 단면에서의 속도분포와 온도분포를 도시하고 있다. Fig. 8 의 결과를 보면 노즐에서의 분사속도가 동일할지라도 하부열보다 상부열에서의 속도장이 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 연소실에서의 부력 효과와 재순환영역에 기인한 것으로 판단되며, 이러한 결과는 화염의 길이가 하부보다는 상부쪽에서 더 길게 나타날 수 있다고 예상할 수 있다. Fig. 9 의 온도분포를 보면 이러한 영향으로 인해 하부보다 상부쪽에서의 온도가 더 높고 길게 나타남을 볼 수 있다. 또한 노즐에서의 swirling 의 방

향성으로 인해 온도장이 동일수평면상에서 한쪽으로 치우쳐 나타남을 볼 수 있으며, 이러한 현상은 연소실의 하부보다는 상부가 더 두드러지게 나타났다.

3.3 각종 인자에 따른 연소특성

3.3.1 과잉공기량의 변화

Fig. 10 은 과잉공기량의 변화에 따른 열적 NOx 의 체적평균 질량분율의 변화를 나타내고 있다. 대체적으로 과잉공기량이 증가할수록 산소량의 증가로 인해 열적 NOx 는 증가하며, 과잉공기비가 1.1 에서 열적 NOx 의 발생이 가장 적게 나타났다.

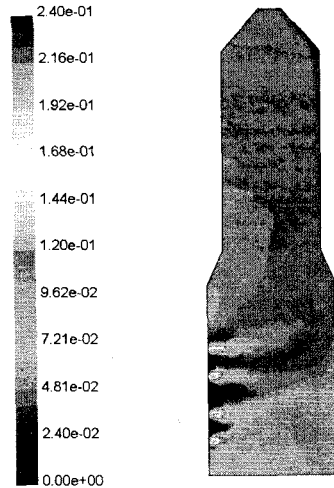


Fig. 7 CO distributions in vertical cross sectional area of b-array.

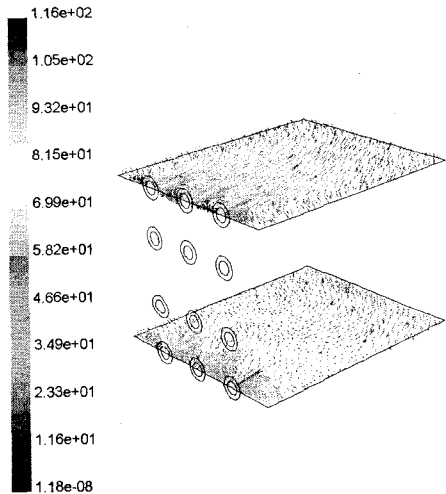


Fig. 8 Velocity distributions in horizontal cross sectional area of upper and lower nozzles.

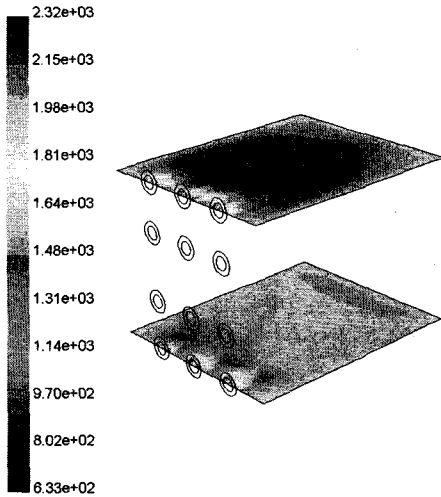


Fig. 9 Temperature distributions in horizontal cross sectional area of upper and lower nozzles.

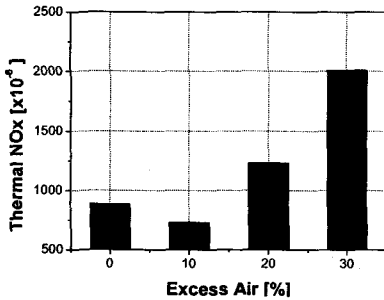


Fig. 10 Thermal NOx for various excess air.

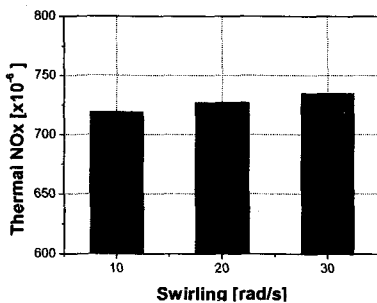


Fig. 11 Thermal NOx for various swirling velocity.

이러한 열적 NOx의 발생은 과잉공기비가 1.2를 지나면서 급격히 증가하였다. 이러한 결과는 기체 연료의 경우에는 공기와의 혼합상태가 양호하기 때문에 많은 과잉공기를 필요로 하지 않으며, 단지 완전연소를 시키기 위해서는 공급하는 공기량

이 많을수록 좋지만 열손실 및 증유연소의 NOx의 주발생 원인인 열적 NOx가 증가하므로 운전시 과잉공기비를 1.1 ~ 1.2 사이에서 운전하는 것이 보일러 효율과 NOx 발생 억제 측면에서 바람직하다고 판단된다.

3.3.2 Swirling 속도의 변화

Fig. 11은 swirling의 속도변화에 따른 열적 NOx의 변화를 도시한 것이다. swirling의 속도가 증가할수록 열적 NOx의 발생은 다소 증가하는 것으로 나타났으나 그차이는 미소하였다. 이는 swirling의 증가로 인한 난류강도의 증가가 연소성을 향상 시킴으로 인해 고온 영역이 확대되어 다소 증가한 것으로 판단되나 swirling에 따른 연소특성은 화염의 길이 및 연소영역에 대한 상세한 해석이 요구되므로 향후 버너주변에 대한 국부적인 상세 해석 및 swirling의 속도범위를 확장하여 해석할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 액체연료를 사용하는 horizontal firing 보일러에 대해 수치계산을 실시하였다. 우선 보일러내의 연소에 따른 유동장 및 온도장과 열적 NOx 및 CO의 분포를 고찰하였으며, 이를 토대로 노즐에서의 과잉공기량 및 swirling의 속도 변화에 따른 NOx의 발생변화를 예측하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과들은 향후 연소실내의 노즐부근에 대한 국부적인 상세해석을 추가로 실시하여, 보일러내의 NOx 저감을 위한 다양한 인자 및 운전조건에 따른 해석을 수행할 예정이다.

참고문헌

- (1) Weber, R., Smart, J.P. and Phelen, W.J., 1987, "NOx reduction with coal firing by application of both internal air staging and fuel rich pre-combustors", IFRF Doc. No. F037/a/16.
- (2) ABB, 1997, "Engineering development of coal-fired high performance power systems, ABB Power Plant Laboratories", Technical Report.
- (3) Xu, M. et al., 2000, "Modeling of the combustion process and NOx emission in a utility boiler, Fuel", vol. 79, pp. 1611 - 1619.
- (4) KOPEC, 2000, "보일러 열유동해석과 NOx 발생 예측 및 제어기술", 00-TR-AN-05.
- (5) KOPEC, 1999, "화력발전소 설비 개량화 기술개발", 99-TP-AL.
- (6) 장길홍 외 4인, 1999, "미분탄 연소의 NOx 저감에 대한 실험적 연구", 대한기계학회 춘계학술대회는문집, pp. 724 - 729.