

미분탄 버너의 설계인자가 NOx 생성에 미치는 영향

김상현* · 송시홍* · 이건명* · 김혁제* · 이익형*

The Effect of Pulverized Coal Burner Design Parameters on NOx Emission

Sang Hyeun Kim, Si Hong Song, Gun Myung Lee, Hyuk Je Kim, Ik Hyung Lee

Key Words : NOx(질소산화물), Coal Burner(석탄버너), Taguchi method(다구찌법)

Abstract

Numerical simulations of coal combustion were carried out to identify what kind of burner design parameters are affecting the NOx emission. Where used burner design parameters are primary air velocity, secondary air velocity, 2nd/3rd air ratio, tertiary air velocity, and tertiary air injection location. Taguchi method was used to find the effective burner design parameters related to NOx formation. The results of numerical simulations showed that secondary air velocity and 2nd/3rd air ratio was the key parameters reducing the NOx emission. The total number of simulation cases was reduced by Taguchi method.

기호설명

- U : 축방향속도
- V : 반경방향속도
- W : 접선방향속도
- Γ_{ϕ} : 난류교환계수
- S_{ϕ} : 기체상의 생성항
- $S_{\phi p}$: 고체상의 생성항

1. 서론

본 연구에서는 저 NOx 미분탄 버너를 설계할 때 고려되는 많은 인자들 중에서 NOx의 형성에 크게 영향을 미치는 인자를 찾고자 한다.

미분탄 연소용 버너의 경우에 특정한 형상이 존재한다고 보기 힘들지만 일반적으로 벽면연소식 보일러에 사용되는 선회형 연소기를 기준하면, 그 형태는 버너의 중심부에서 미분탄이 분사되고 그 주위를 둘러싸고 있는 공기노즐에서 연소용 공기가 선회를 하면서 화로로 공급되는 형태이다. 개념적으로는 아주 간단한 형태이지만 버너 인접 영역에서의 공력학적인 특성에 따라 NOx 발생량은

아주 크게 달라진다. 그러므로 버너 인접 영역의 공력학적인 특성을 크게 변화시킬 수 있을 것으로 판단되는 인자들을 선정하고 그 중에서 특히 큰 영향력을 가진 설계 인자 찾기 위해 수치해석 방법을 이용하여 석탄 연소를 해석하고 그 결과들을 다구찌 방법을 이용하여 분석하였다.

2. 이론해석

2.1 화로 운전조건 및 미분탄의 성상

본 연구에 사용된 연소로와 버너는 Fig.1에 도시된 것과 같이 원통형으로 중심부에 버너가 부착되어 있다. 본 해석에서는 버너의 쉘(quarl)의 영향을 배제하였으므로 해석영역은 사각형 형상을 갖는 아주 단순한 형태가 된다.

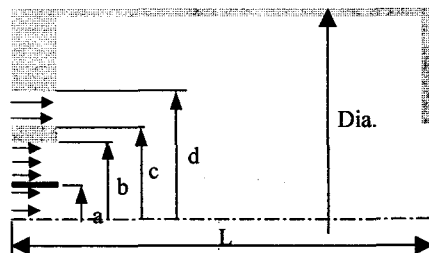


Fig.1 Schematic diagram of furnace

* 두산중공업 기술연구원

그리고 해석에 사용된 석탄은 south africa 에서 채굴된 것으로 그 성상은 table1 에 나타난 것과 같다. 그리고 버너로 공급되는 공기의 조건은 table2 에 제시된 것과 같다.

Table1 South africa coal properties

	Dry	DAF		Dry	DAF
C	74.75	83.71	VM	32.0	35.98
H	4.02	4.52	Char	56.9	64.02
N	1.61	1.81	Ash	11.1	-
O	8.05	9.05	Total	100	100
S	0.8	0.9			
Ash	11.07	-			
Total	100	100			

Table 2 Burner operating conditions

At the pulverized coal and transport air inlet			
Coal mass flow rate(dry)	0.1 kg/sec		
Air mass flow rate(dry)	0.205 kg/sec		
Temperature	343 K		
Density	$(273.15/343) \times 1.292 = 1.028 \text{ kg/m}^3$		
Turbulent intensity	10%		
At the 2ry combustion air inlet			
Mass flow rate(dry)	0.205 kg/sec	0.409 kg/sec	
Temperature	573K		
Density	$(273.15/573) \times 1.292 = 0.616 \text{ kg/m}^3$		
Swirl number S_2	0.4	0.8	1.2
Turbulent intensity	20%		
At the 3ry combustion air inlet			
Mass flow rate(dry)	0.8187 kg/sec	0.614 kg/sec	
Temperature	573K		
Density	$(273.15/573) \times 1.292 = 0.616 \text{ kg/m}^3$		
Swirl number S_2	0.4	0.8	1.2
Turbulent intensity	20%		

2.2 기체상 방정식

본 연구에서는 해석의 편의를 위하여 축대칭 2차원으로 단순화하여 계산하였다. 축대칭 원통 좌표계에서 난류유동에 대한 기체상의 지배방정식은 다음과 같다.

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

질량보존 방정식에서는 ϕ 가 1이고, 축방향, 반경방향, 접선방향 운동량 방정식에서는 각각

U, V, W 가 된다. k-ε 난류모델을 사용하면 ϕ 는 난류 운동에너지 k와 난류소산율 ε을 나타낸다. 에너지 보존식을 표현할 때는 ϕ 가 엔탈피를 나타내게 된다. 난류교환계수인 Γ_ϕ 는 운동량방정식에서는 유효점성을 나타내고, k와 ε 방정식에서는 μ_{eff}/σ_k 와 $\mu_{eff}/\sigma_\epsilon$ 을 나타낸다. 그리고 화학종보존과 에너지보존식에서는 Γ_ϕ 가 μ_{eff}/σ_ϕ 을 나타낸다.

2.3 고체상 방정식

미분탄 입자의 속도와 궤적은 다음과 같은 식을 이용하여 구한다.

$$\frac{du_{pi}}{dt} = \frac{1}{\tau} (u_i - u_{pi}) + g(\rho_p - \rho_g) / \rho_p$$

$$\frac{dx_{pi}}{dt} = u_{pi}, \quad i=1,2,3$$

여기서 하첨자 p는 고체상, g는 중력가속도를 나타낸다. τ 는 $\rho_p D_p^2 / 18 \mu C_D (Re_p / 24)$ 이다. 입자의 온도는 다음과 같은 에너지 수지에 의해 구한다.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + \epsilon_p a_p \sigma (T_{4R} - T_p^4)$$

그리고 미분탄의 휘발화 모델은 2-경쟁률 모델(two-competing rate model)을 사용하였으며, 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{m_v(t)}{m_{p,0} - m_a} = \int (\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2) \exp\left(-\int (R_1 + R_2) dt\right) dt$$

여기서 R_1 과 R_2 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R_1 = A_1 \exp(-E_1 / RT_p)$$

$$R_2 = A_2 \exp(-E_2 / RT_p)$$

좌 연소 모델은 kinetics/diffusion limited rate model로 아래와 같다.

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi D^2 P_o \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

여기서, R_1 은 확산물이고, R_2 는 반응물이다.

3. 버너 인자의 배치

3.1 인자의 선정

미분탄 버너의 연소 중에 발생하는 NOx의 생성에는 산소농도가 중요한 역할을 하고 있으며, 또한 미분탄의 체류시간과도 깊은 관계가 있다. 따라서 이러한 조건을 충족시키는데 기여할 수 있을 것으로 판단되는 설계인자 5 개를 선정하였다. 더 많은 인자를 고려하면 좋겠으나, 인자가 많아지면 수행해야 할 해석의 경우가 과도하게 증가하는 단점이 있으므로 가능한 경우의 수를 줄이기 위한 수단이다.

이렇게 선정된 인자는 아래와 같은 5 가지이다.

- ①. 1 차공기 속도
- ②. 2 차공기 속도
- ③. 3 차공기 속도
- ④. 2 차/3 차 공기비
- ⑤. 3 차공기의 투입위치

3.2 직교배열표를 이용한 실험의 배치

인자가 많을 시에는 일반요인배치법으로 모든 실험을 할 수 없기 때문에 적은 수의 실험으로 많은 효과를 얻기 위한 목적으로 만들어 놓은 직교배열표를 이용하는 것이 유용하다. 직교배열표를 사용하면 실험의 횟수를 줄일 수 있을 뿐 아니라 요인 변동의 계산이 용이하여 결과의 분석이 용이하고, 실험의 크기를 확대시키지 않고도 실험에 많은 인자를 짜 넣을 수 있어 실험의 실사가 용이한 장점이 있다.

이러한 직교배열표를 이용해 위에서 선정된 5 개의 요인인자를 배치하면 table 3 과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Table 3 의 결과를 보면 5 개의 인자를 분석하는데 단 8 회의 해석만 수행하면 된다. 만약 이를 일반요인배치법을 이용해 전체를 해석하고자 했다면 32 회의 실험이 필요하게 된다. 여기에 선회의 강도 변화에 따른 다양한 현상을 알고자 한다면 더 많은 해석을 수행해야 하므로 결국 많은 시간적 소모가 발생하게 된다.

Table 3 disposition of parameters

요인배치	A	B	C	D	e	F	e	실험조건
인자이름	1차공기 속도	2차/3차 공기비	2차공기 속도	3차공기 속도	error	3차공기 투입위치	error	
수준	0	15	4:6	10	30		R_2	
	1	25	2:8	30	50		$2 \times R_2$	
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	0	0	0	0	0	0	$A_1 B_1 C_1 D_1 F_1$
2	0	0	0	1	1	1	1	$A_1 B_1 C_1 D_2 F_1$
3	0	1	1	0	0	1	1	$A_1 B_2 C_1 D_1 F_1$
4	0	1	1	1	1	0	0	$A_1 B_2 C_1 D_2 F_1$
5	1	0	1	0	1	0	1	$A_2 B_1 C_1 D_1 F_1$
6	1	0	1	1	0	1	0	$A_2 B_1 C_1 D_2 F_1$
7	1	1	0	0	1	1	0	$A_2 B_2 C_1 D_1 F_1$
8	1	1	0	1	0	0	1	$A_2 B_2 C_1 D_2 F_1$
	a	b	ab	c	ac	bc	abc	

4. 해석 결과

4.1 분산분석

Table 3 에 주어진 8 개의 경우에 대하여 해석을 수행하여 발생하는 NOx 값을 예측한 결과가 table 4 에 나타나 있다. Table 4 에 도시된 결과는 인자 배치에 따라 얻어진 8 가지의 경우에 대하여 투입되는 공기의 스펙강도가 달라짐에 따라 배출되는 NOx 의 양이 포함되어 있다.

Table 4 Predicted NOx of orthogonal array

요인배치	A	B	C	D	e	F	e	2:0.4	2:0.8	2:0.8	2:1.2	
수준	0	15	4:6	10	30		R_2	3:0.8	3:0.4	3:0.8	3:1.2	
	1	25	2:8	30	50		$2 \times R_2$					
	U_{max}	1	2	3	4	5	6	7				
1	$A_1 B_1 C_1 D_1 F_1$	0	0	0	0	0	0	347	546	307	310	
2	$A_1 B_2 C_1 D_1 F_1$	0	0	0	1	1	1	256	400	231	253	
3	$A_1 B_1 C_2 D_1 F_1$	0	1	1	0	0	1	556	557	556	432	
4	$A_1 B_2 C_2 D_1 F_1$	0	1	1	1	1	0	537	507	540	559	
5	$A_2 B_1 C_1 D_2 F_1$	1	0	1	0	1	0	612	573	538	431	
6	$A_2 B_2 C_1 D_2 F_1$	1	0	1	1	0	1	246	558	540	424	
7	$A_1 B_1 C_2 D_2 F_1$	1	1	0	0	1	1	0	241	566	225	228
8	$A_1 B_2 C_2 D_2 F_1$	1	1	0	1	0	0	1	475	543	480	277

Table 4 에 도시된 해석 결과를 분산분석표 (ANOVA)를 이용해 유효인자를 찾을 수 있다. Table 5 에 도시된 결과를 보면 B(2nd/3rd air ratio)인자와 C(2nd air velocity)인자가 NOx 의 형성에 크게 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 즉 B 와 C 를 제외한 나머지 인자들은 NOx 의 생성에는 크게 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.

Table 5 ANOVA analysis

요인	SS	ψ	MS	F0	F(0.05)	F(0.10)
B	0.067	1	0.067	11.17	10.13	5.54
C	1.209	1	1.209	201.50	10.13	5.54
D	0.028	1	0.028	4.67	10.13	5.54
F	0.044	1	0.044	7.33	10.13	5.54
e	0.018	3	0.006			

4.2 NOx의 생성 특성

Fig.2에 도시된 결과는 NOx의 배출량이 많은 경우에 화로 각 단면에서의 휘발분, 산소, NO, 및 NO₂의 분포를 나타내고 있으며, fig.3의 결과는 NOx의 배출량이 가장 적은 경우에 휘발분, 산소, NO, 및 NO₂의 분포를 나타내고 있다. 이 두 경우에서 가장 주목할 만한 점은 산소와 휘발분의 분포이다. 즉 산소 농도가 영역에서 휘발분의 농도가 높은 쪽이 NO의 배출량이 작다는 점이다. 즉 NO의 생성을 최대한 억제하기 위해서는 가급적 산소 농도가 낮은 영역에서 최대한 휘발분의 방출을 유도할 수 있어야 한다는 것을 확인할 수 있다.

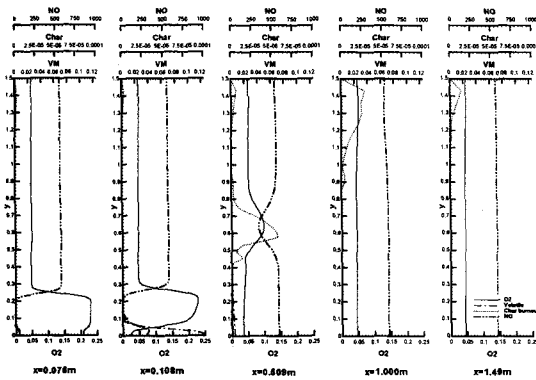


Fig.2 Species distribution in case of high NOx emission

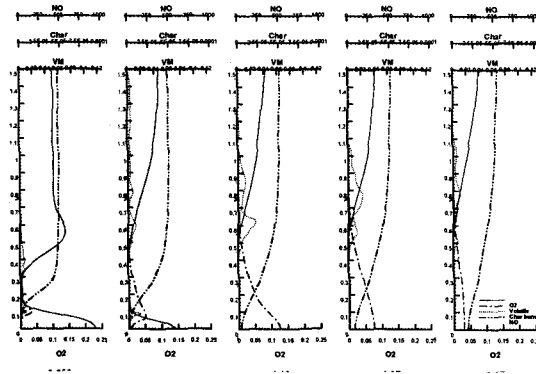


Fig.3 Species distribution in case of low NOx emission

5. 결론

미분탄 버너의 많은 설계인자들 중에서 NOx의 생성과 밀접한 연관이 있을 것으로 생각되는 1차공기속도, 2차/3차공기비, 2차공기속도, 3차공기속

도, 및 3차공기의 투입위치를 중심으로 다구찌방법을 이용하여 연소해석을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- ①. NOx의 생성에 가장 영향을 크게 미치는 인자는 2차공기속도와 2차/3차공기비임을 ANOVA 분석을 통해 알 수 있었다.
- ②. 2차공기 속도는 낮은 값을 가질 때 NOx의 생성을 억제하는 효과가 있다.
- ③. 2차공기보다 3차공기쪽으로 많은 유량을 분배하는 것으로 유리하다.

후 기

본 연구는 국립환경연구원의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 이상복, "기초부터 현장적용까지 알기쉬운 다구찌기법", 2000, 상조사
- (2) Kobayashi, H., Howard, J.B., and Sarofin, A.F., "Coal Devolatilization at High Temperatures", 16th Symposium (international) on Combustion, 1976, pp.411-425
- (3) Morsi, A.P. and Alexander, A.S., "An Investigation of Particle Trajectories in Two Phase Flow Systems", Journal of Fluid Mechanics, Vol.55, pp.193-208
- (4) Assay, B.W., Smoot, L.D. and Hedman, P.O., "Effect of Coal Moisture on burnout and nitrogen oxide formation", Combustion and Science and Technology, Vol.35, 1983
- (5) "FLUENT 5 User's Guide", FLUENT Inc.