

미분탄 연소에서 NO_x 저감을 위한 공기다단의 효과

장길홍 · 장인갑 · 선철영 · 천무환 · 양관모

Effect of Air Staging on NO_x Reduction in Pulverized Coal Combustion

Gil Hong Jang, In Gab Chang, Chil Young Sun, Mu Hwan Chon, Gwan Mo Yang

Key Words : Air staged combustion, Primary zone air ratio, NO_x emission

Abstract

The influences of air staging on NO_x emission and burnout of coal flames were investigated using 1MWth combustion test facility. The experiments showed that variation of overall excess air ratio led to a relatively higher NO_x emission level for $\lambda=1.2$. When air staging was applied to the combustion air, it was confirmed that a fuel rich primary combustion zone was established and unburned char was burned completely by mixing with the staged air supplied radially around the flame. The NO_x emissions were reduced by increasing the staged air flow rate, and staging air was suggested to be more than 40% of the total combustion air for the substantial NO_x reduction.

기호설명

- λ_p 1차영역 공기비 (Primary zone air ratio)
Tx 연소율(burnout)
S 선회강도(swirl number)

1. 서론

NO_x 저감 기술은 1970년대 후반부터 많은 연구들이 수행되어 그 이론들이 확립되고 있는데, 그 중 1차 NO_x 환원기술은 미분탄 연소시스템을 위해 개발되고 있다. 1차 NO_x 환원기술은 주로, 휘발성 물질에 지배되는 연료 과잉 영역(fuel rich zone, $\lambda < 1$)을 형성시키고, 이 영역에 존재하는 탄화수소계 중간생

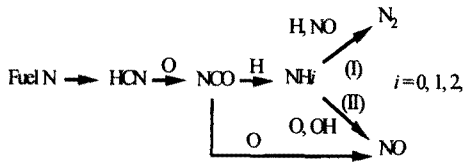


Fig. 1 Mechanism of NO_x formation and reduction.

성물에 의해 Fig.1 과 같이 NO는 N₂로 환원되어 NO_x를 저감시킨다. 대표적인 1차 NO_x 환원기술은 다음과 같다.

- ① 버너에서 공기다단(air staging)
- ② 노내에서의 공기다단(OFA)
- ③ 버너에서 연료다단(fuel staging)
- ④ 연소실에서 연료다단(reburning)

일반적으로 공기 다단기술을 적용한 상용플랜트에서는 약 400ppm (6% O₂), 다중 공기다단과 재연소 기술을 적용한 현대적 보일러에서는 200~250ppm (6% O₂)의 NO_x가 방출되는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 NO_x 저감기술을 규명하기 위하여 제작/설치된 1.0MW_{th} 석탄 실험연소로에서 공기다단 연소실험을 통한 연소성능과 공해물질 배출특성에 대한 결과를 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 2는 본 연구에 사용된 공기다단용 버너의 개략도를 나타낸 것이다. 중심에서 중심(core)공기가 공급되고, 그 주위로 1차공기와 석탄이 분사되며 바깥으로 2차공기가 공급된다. 설치된 버너의 형식은 중심, 1차, 2차공기 및 석탄은 켈(quarl) 내로 공급되고, 3차공

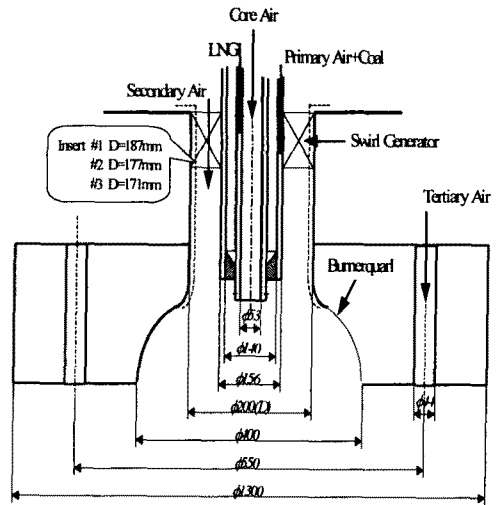


Fig. 2 Air-staged burner.

기는 켈 외부에서 4개의 덕트를 통해 공급되는 EASB (externally air staging burner)형식이다. 여기서 1차영역 공기비 λ_p 는 식(1)과 같이 공급되는 석탄이 요구하는 이론 공기량(즉, 과잉공기비가 1.0일때의 공기량)에 대한 켈 내부로 실제 공급되는 공기량의 비로 정의하며, 석탄이 1차적으로 연소되는 환원영역(reduction zone)의 공기비를 의미한다.

$$\lambda_p = \frac{\text{air supply through quarl}}{\text{stoichiometric air requirement}} \quad (1)$$

3.2 분석 및 측정

실험탄 및 회분(ash)의 성상을 파악하기 위해 공업 및 원소분석을 수행하였는데, 전자는 TGA-501 (LECO사)로, 후자는 CHN-600 (LECO사)과 SC-432(LECO사)로 분석하였다. 또한 연소율(burnout, Tx)은 연소로의 수평관 입구에서 샘플링된 회분을 분석하여, 식 (2)와 같이 구하였다.

$$T_x = \left(\frac{1 - A_0/A_1}{1 - A_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서 A_0 는 연소전의 회분량(wt%)이고, A_1 은 연소후의 회분량(wt%)이다.

연료의 열적특성을 분석하기 위해 열중량 분석기(TGA131, CHAN사)를 사용하였으며, NO_x는 유인송풍기 전단에서 화학발광식 분석기(Model 42, Thermo Environment사)를 사용하여 측정하였다. 연소로내의 온도 및 산소농도분포는 수냉식 프로브를 노내부에 직접 삽입하여 측정위치를 옮겨가며 측정하였다. 내화물 및 연소로내의 온도측정에는 R-type의 열전대로 측정하였으며, 흡입된 연소가스를 이용하여 산소농도를 동시에 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 연료탄의 특성

Table 1에는 실험에 사용된 호주산 Blair-athol 탄과 중국산 Datong 탄의 특성을 나타내었다. 석탄공급 장치에서 공급되는 미분탄 입자는 80 μm 이하의 크기를 가지는 입자가 83.4%를 차지하고 있다. 발전소에서는 역청탄의 경우 미분탄 입자는 75 μm이하가 75%가 되는 탄을 사용하고 있으므로, 본 연구에 사용된 것과 거의 유사하다. Fig. 3은 미분탄에 대한 열중량분석(TGA) 결과이다. 비등온시 온도변화에 따른 시료의 무게변화와 감소속도를 나타낸 것으로 내고 있다. 연소시작점(IT)을 무게변화가 1%/min 이상인 온도, 연소반응 종료점(BT)는 역시 무게변화가 1%/min 이하인 온도라고 정의하고, 무게변화가 최대인 점(PT)와 최대 무게변화량(dw/dt)max를 정리하면 Table 2와 같다.

Table 1 Coal analysis

Item	Blair-athol	Datong	
Proximate Analysis (wt%)	Moisture	8.2	2.53
	Volatiles	28.3	32.56
	F.Carbon	55.4	56.22
	Ash	8.1	8.69
Ultimate Analysis (wt%)	c	71.0	72.14
	h	3.9	4.30
	n	1.9	1.21
	s	0.3	0.53
	o	14.1	12.91
	a	8.8	8.91
	w	-	-
Heating Value (kJ/kg)	HHV	27,027	27,994
	LHV	26,126	27,006

석탄의 무게 감량 기울기는 탄종에 관계없이 거의 동일 무게 감량 기울기를 보이며, 280℃ 부근에서 급격한 무게 감량이 이루어졌다. 또한 최대로 활성화화되는 온도는 각각 405℃(Blair-athol)와 412℃(Datong)이며, 이때 최대 무게 변화량((dw/dt)max)은 각각 0.0307%/sec 과 0.0224%/sec 이다. 연소시작점(IT)는 거의 동일하지만, 연소반응 종료온도(BT)는 약 30℃정도 Datong 탄이 높았다. 따라서 Blair-athol 탄의 연소성이 좋은 것으로 사료된다.

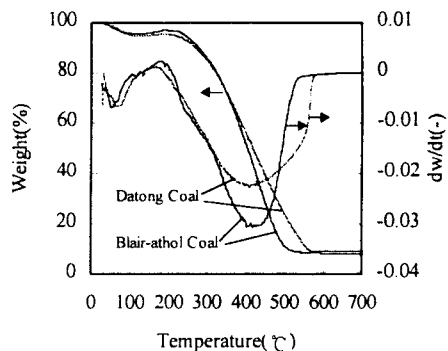
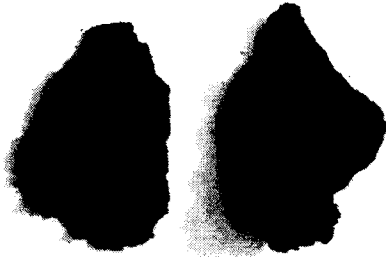


Table 2 Result of TGA

Item	Blair-athol	Datong
IT	320 °C	324 °C
BT	492 °C	521 °C
PT	405 °C	412 °C
(dw/dt) _{max}	0.0307%/sec	0.0224%/sec

호주산 Blair-athol 탄을 연소시켰을 때 연소로 내부에 형성된 슬래그는 연소로 Roof 와 버너주변에서 형성되기 시작하여 벽면까지 형성되어 있었으나 수평관의 입구에는 형성되지 않았다. 슬래그의 형태는 반복되는 연소과정에 의해 퇴적과 용융이 반복되는 현상을 가졌다. 그러나 중국산 Datong 탄의 슬래그는 연소로 Roof 와 버너주변 뿐



(a) Blair-athol coal



(b) Datong coal

Fig. 4 Photography of slag

만 아니라 연소로 내부 전반에 걸쳐 형성되어 있었으며, 특히 수평관 입구를 막아 연소로 내의 압력 조절을 방해하기도 하였다. Datong 탄의 슬래그의 형태는 고온에 의해 용융되어 Bottom ash hopper 로 탈락된다. Fig. 4 는 호주산 Blair-athol 탄과 중국산 Datong 탄의 연소 후 발생된 슬래그의 형상을 나타낸 사진이다.

3.2 공기다단시 연소특성

Table 3 은 공기다단 실험을 하기 위한 연소용공기의 분배비율을 나타낸다. Fig. 5 는 실험조건별 NOx 와 연소율의 변화를 나타내었다. 2 차공기가 100%공급되는 실험조건 2 를 기준으로 중심공기가 다단 공기로 공급되면 NOx 가 저

Table 3 Experimental codition

	1	2	3	4	5
Core(%)	25	0	25	0	0
2nd(%)	75	100	50	60	40
3rd(%)	-	0	25	40	60
λp	1.2	1.2	0.87	0.80	0.62

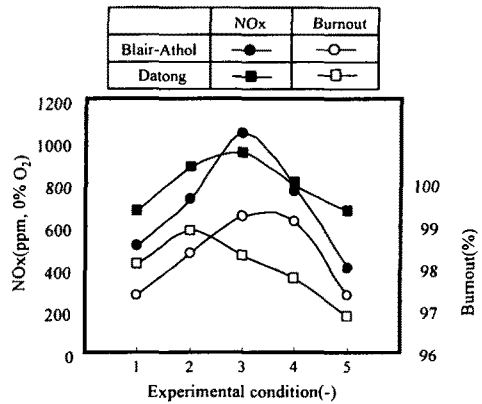


Fig. 5 Effect of experimental condition on NOx emission

감되지만, 연소율도 감소한다(실험조건 1). 또한 3 차공기를 다단공기로 공급하면, 다단 공기량이 40%이하인 경우에는 Datong 탄 실험조건 3의 연소율을 제외하고 NOx 배출과 연소율이 증가하였지만(실험조건 3,4), 다단공기량을 40%이상으로 점점 증가시킬수록 NOx와 연소율이 감소하는 경향을 보였다(실험조건 5). Fig. 6은 λ_p 의 변화에 따른 NOx 배출 특성을 나타낸 것이다. λ_p 가 0.6에서 0.9로 증가함에 따라 NOx 배출은 증가하였다. Fig. 7은 λ_p 의 변화와 연소율과의 관계를 나타낸 것으로, λ_p 가 증가해도 연소율이 큰 변화는 없으나, 전

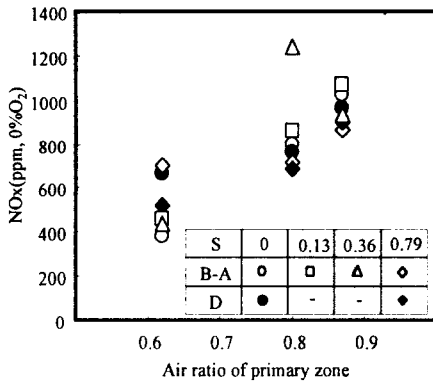


Fig. 6 Effect of primary zone air ratio(λ_p) on NOx emission

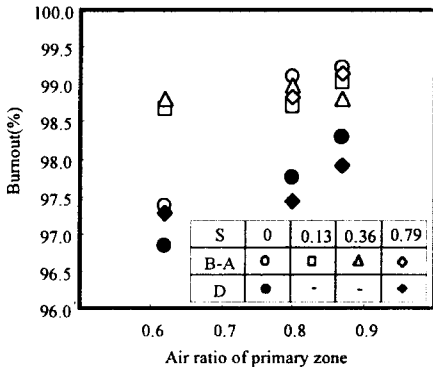


Fig. 7 Effect of primary zone air ratio(λ_p) on burnout

체적으로 조금 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 8은 중심공기가 NOx 배출과 연소율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 전반적으로 3차 공기 즉 다단공기의 비율이 40% 이상이 되면, NOx가 감소하기 시작함을 알 수 있었다. 다단공기 비율이 0인 조건(다단연소를 하지 않는 경우)을 제외한 나머지 조건에서는 중심공기가 공급되는 조건(점선)이 공급되지 않는 조건(실선)보다 NOx를 많이 배출하고 있다. 또한 중심공기가 공급되면, 연소율은 증가하지만, NOx 역시 증가하게 되는 것을 알 수 있다.

NOx의 생성은 Fig. 1과 같이 설명된다. 석탄에 포함된 연료-N은 화염속에서 HCN으로 급속하게 전환되고, O 및 H와 반응하여 상대적으로 천천히 NH_i ($i=0, 1, 2, 3$)로 전환된다. NH_i 는 O 및 OH 라디칼과 반응하면, NO를 생성하지만 NO와 반응하면 N_2 로 환원된다. 연료-N에 의해 생성된 HCN의 가스상 반응이 난류확산 석탄화염에서는 NOx의 생성을 지배하므로, NOx는 석탄의 휘발성 물질에 의해 생성되고, 탈휘발과정 동안에 형성된 석탄가스분위기에 의해 제어되어 최소화 되는 것으로

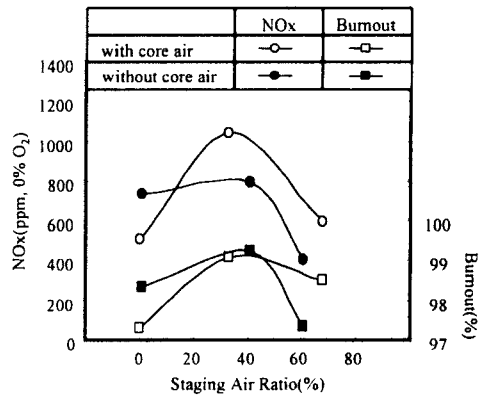


Fig. 8 Effect of staging-air on NOx, burnout(S=0)

사료된다. 또한 만약 석탄입자가 산소가 희박한 영역에서 탈휘발 된다면 휘발성 질소화합물(NH₃)이 Fig. 1의 (I)반응과 같이 열분해에 의해 생성된 탄화수소계 중간생성물(H) 또는 NO와 반응하여 질소분자로 감소된다.

본 연구에 사용된 EASB 버너는 연료가 과농한 1차 반응영역을 형성시키므로 이 영역에서 미 연소된 확(char)가 잔존하게 되고, 이것은 화염의 외부 즉, 버너의 쉘 외부에서 공급되는 공기(3차 공기)의 주입에 의해 완전연소 된다. 중심공기의 공급이 NO_x의 저감에 기여를 하지 못하는 것은 중심공기가 석탄 이송용 공기(1st air)와 함께 1차영역으로 유입하여 1차영역공기비율을 증가시키게 되므로, Fig. 1의 (II)반응과 같이 휘발성 질소화합물이 O 및 H와 반응하여 NO를 생성시키기 때문인 것으로 사료된다. 또한 중심공기의 공급은 1차영역에서 상대적으로 난류강도를 증가시키게 되므로 석탄과 공기의 혼합을 원활하게 하여 연소를 촉진시키게 되어, 국소적인 고온영역을 형성시켜 열적 NO_x의 발생 역시 증가된 것으로 사료된다. 그러나 다단공기(3차공기)가 공급되지 않고 중심공기가 공급되는 조건이 NO_x 배출이 감소한 것은 2차공기가 다단공기의 역할을 한 결과로 사료된다.

4. 결론

IMW_h 실험연소로에서 NO_x 저감을 위한 공기다단의 효과를 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. λ_p 가 낮을수록 즉, 1차 영역에서 연료가 과농할수록 NO_x가 저감되

는 것은 환원영역이 형성되어 휘발성 질소산화물이 N₂로 전환되기 때문이다.

2. 다단공기량이 증가할수록 NO_x가 저감되며, 다단공기의 공급량은 전체 공기량의 40%이상이어야 한다.
3. 다단공기가 공급되는 경우에 중심공기의 공급은 연소율은 증가시켰지만, 1차영역의 λ_p 를 증대시켜 휘발성 질소산화물이 O 및 OH와 반응하여 NO를 생성하므로 NO_x 배출 저감에는 효과가 없었다.
4. 다단공기가 공급되지 않는 경우에 중심공기의 공급은 2차공기가 다단공기로 되어 NO_x 배출을 저감시켰으나, 연소효율 증대면에서는 효과가 없었다.

참고문헌

- (1) H.Maier, H.Splithoff, A.Kicherer, A.Fingerle and K.R.G.Hein, *Fuel*, Vol. 73 No.9, pp.1447~1452, 1994
- (2) U.Schnell, M.Kaess, H.Brodbek, *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 93, pp 91-109, 1993
- (3) 장길홍, 장인갑, 정석용, 선철영, 천무환, *대한기계학회 99년도 춘계학술대회 논문집(B)*, pp.724~729, 1999
- (4) R.Weber, J.P.Smart and W.J.Phelan, *IFRF Doc. No. F037/a/16*, 1987.
- (5) R.Weber and J.P.Smart, *IFRF Doc. No. F037/a/16*, 1987.