

공기다단 석탄버너에서 연소공기 유동조건에 따른 NOx 배출특성에 관한 연구

김혁제[†]·송시홍*·김상현*·이익형*

A study on the NOx emission characteristics with combustion air flow conditions in air-staged coal burner

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

Key Words: Air-staged coal burner(공기다단 석탄버너), Flow divider(플로우 디바이더), NOx(질소산화물)

Abstract

Coal-burning utilities are facing a major NOx control compliance challenge due to the heavy emission regulation. In response to this challenge, some applicative technologies to effectively reduce NOx are developed and applied in the pulverized coal power plants. One of these is low NOx burner(LNB) equipped with multi-staged air register.

In this study, NOx emission rate and flame shapes are investigated with secondary and tertiary air flow conditions in air staged coal burner, and the optimal windows of flow conditions to minimize NOx emission rate are found out. The test conditions treated in this study are the flow rate, swirl direction and intensity and throat injection velocity of secondary and tertiary air.

기호설명

- D₁ : 석탄노즐 직경(mm)
- D₂ : 플로우 디바이더 직경(mm)
- D₃ : 쓰로트 직경(mm)
- m_c : 석탄질량유량(kg/h)
- m₁ : 일차공기량(kg/h)
- m₂ : 이차공기량(kg/h)
- m₃ : 삼차공기량(kg/h)
- CR2 : 2차베인 폐도(%)
- CR3 : 3차베인 폐도(%)

1. 서론

최근 세계적으로 전기에너지의 수요는 폭발적인 증가 추세를 보이고 있으며 이에 따라 전력 생산을 위한 화력발전소의 필요성은 더욱 높아지고 있다. 특히 대부분의 대형 화력발전소는 가스 및 액체 연료보다는 매장량이 풍부하고 단가가 낮고 가격변동이 안정적인 석탄을 주 연료로 사용하고 이런 대형발전소에서 채택하고 있는 석탄 연소설비의 대부분은 연소효율개선, 화염 안정성 및 공해물질 배출량 저감을 위해 적절한 연료 분사 시스템 및 산화제 공급 방식을 갖춘 연소장치를 필요로 한다. 특히 석탄연소장치에서 공해물질(NOx, CO, UBC 등)의 발생조건을 최소로 하는 연료와 산화제의 혼합 및 산화제 분사조건을 만족시

† 정회원, 두산중공업 기술연구원
E-mail : hjking@doosanheavy.com
TEL : (055)278-8137 FAX : (055)278-8569
* 두산중공업 기술연구원

키는 석탄 버너의 개발은 더욱 중요시되고 있다.

석탄버너에서 연소용 공기의 분사 패턴, 공기 유입구의 분할, 분사속도 및 유량분배 등은 초기 착화, 화염안정성, 화염구조 및 공해물질 배출특성에 중요한 영향⁽¹⁾을 미치므로, 각 버너 제작사는 연소공기를 강제로 분할할 수 있는 구조의 특수한 플로디바이더(spacer flow divider)를 사용⁽²⁾하거나, 축류선회기로 선회량을 조절하는 방식⁽³⁾ 등을 채택하여 공기다단 석탄버너(air-staged coal burner)에 적용하고 있는 추세이다.

본 연구는 공기 2단 석탄버너에서 연소용 공기가 화로내로 분사되는 조건이 연소특성에 어떤 영향을 미치는지 조사한 것이다. 이를 위하여 연료 공급조건은 일정하게 유지한 채 석탄버너로 공급되는 연소공기의 분할비율 및 선회수 변화에 따른 화염형상의 변화와 화로출구 공해물질 배출량을 측정하였다. 아울러 버너 쓰로트(throat) 크기를 변경하여 화로로 분사되는 연소공기 속도 변화에 따른 영향을 조사함으로써, 공기 다단 석탄버너에서 최적 연소를 위한 각 영향인자의 효과를 조사하였다. 이를 통하여 다단 공급되는 연소공기의 유효 운전범위 및 최적 공기 다단 석탄버너의 기본형상을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 화로 및 버너

본 연구에 이용된 버너시험설비의 구성은 Fig. 1과 같으며, 연소로는 미분탄 버너를 포함한 연소장치와 질소산화물 저감을 위한 연소기술의 실증시험에 그 목적을 두고 두산중공업(주)에서 제작한 것으로 직경 2m, 길이 6m의 내화물과 수냉벽 구조이며 연소용량은 약 3MW로 석탄뿐만 아니라 가스 및 오일연소도 가능하다. 본 연소시험설비에서 석탄은 원탄(raw coal)을 일정한 양으로 미분기에 공급하고 미분기에서 분쇄되어 배출되는 미분탄(pulverized coal)을 이송, 분리 및 저장 후 ejector를 통해 버너로 공급되는 간접연소시스템(indirect firing system)으로서, 주요 구성품은 raw coal bunker, raw coal feeder, crusher, pulverizer, hot gas generator, cyclone bag filter, exhaust fan, pulverized coal bin, pulverized coal ejector 등으로 구성되어 있다.

연소공기는 FDF(Forced Draft Fan)과 IDF(Induced Draft Fan)으로 구성된 평형통풍방식을 채택하여 연소공기량의 변화에도 화로 내부압을 일정하게 유지하도록 하였다. 연소공기의 온도는 2단의 gas cooler에 의해 배가스(flue gas)와 열교환시켜 버너 입구에서 최대 350℃까지 조정할 수 있도록 구성되어 있다.

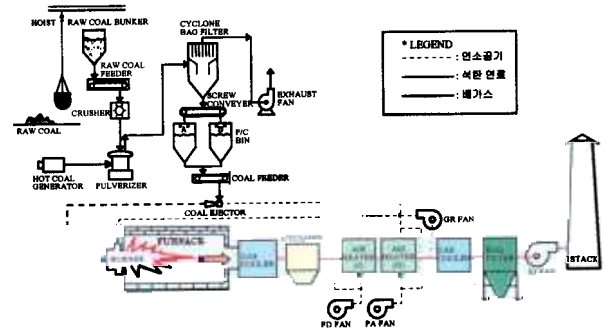


Fig. 1 Schematic diagram of coal combustion system

본 실험적 연구를 진행하기 위해 제작된 석탄 버너는 Fig. 2와 같다. Wind box는 2차공기 및 3차공기를 분할 공급할 수 있는 2중 box로 구성되어 있어서 그 양 및 유로가 독립 제어되는 특징을 갖는다.

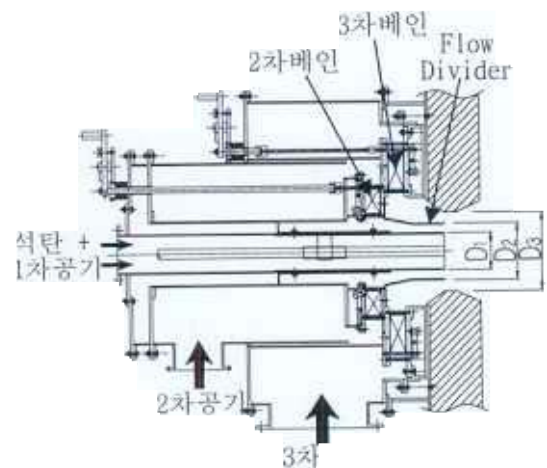


Fig. 2 Schematic diagram of coal burner

그리고 각각의 연소공기는 가변 조정용 radial vane에 의해 화로에 분사될 때 선회강도(swirl intensity)를 조정할 수 있도록 구성되어 있다. 즉, 이 버너는 1차 공기에 의해 미분탄을 화염대로 공급

하는 미분탄 노즐, 연소에 필요한 공기를 분할 공급 하는데 사용하는 2차, 3차 공기wind box, 그리고 화염안정화 및 연료와 산화제의 혼합을 촉진하기 위해 연소용 공기에 선회를 가하는 swirler 등으로 구성되어 공기 다단 연소가 가능토록 하였다.

2.2 연료 및 측정장치

본 연구에 사용된 석탄은 역청탄(bituminous coal)으로써 그 성상은 Table 1과 같고 연소에 투입된 석탄 질량유량(m_c)은 250kg/h를 공급하였다. 이때 버너로 공급되는 미분탄의 입도(fineness)는 200mesh 통과율이 80~90%가 유지되도록 운전하였다.

Table 1 Coal Analysis Data

Components		Fractions(wt%)
공업분석	휘발분	36.27
	고정탄소분	57.24
	수분	0
	회(Ash)	6.49
원소분석	C	79.70
	H	4.69
	N	1.20
	S	0.22
	O	7.70

본 연소시험설비에서 측정되는 물리량은 버너 및 화로로 유입되는 공기 및 연료의 유량, 온도 및 압력과 화로내의 온도, 압력 및 화염상태 그리고 연소 후 배출되는 공해물질 농도 등을 측정할 수 있도록 구성되어 있다. 각각 측정 장치의 제원은 Table 2에 나타냈으며 계측되는 각 신호는DAS(Data Acquisition System)을 통해 제어실의 컴퓨터에 입력/저장된다. 거의 대부분의 값들이 원격으로 실시간 데이터 수집이 가능하지만 미분탄이 연소되고 나오는 ash는 특별한 포집 방법을 동원하여 받아내고 이후에 따로 회중 미연분량을 따로 측정하였다. 또한 ash의 포집을 위해서는 상당한 시간이 소모되므로 전체적인 시험 시간을 결정하는 중요한 요인이다.

Table 2 Specification of measurement instruments

측정 물리량		측정장치
배가스 농도	O ₂	SERVOMEX paramagnetic oxygen analyzer
	CO/CO ₂	SERVOMEX infra-red gas analyzer
	NO _x	Chemiluminescence NO/NO _x analyser
온도	Air	RTD(Resistance Temperature Detector) sensor
	Furnace Wall	R-type thermocouple
	Flue Gas	R-type thermocouple
유량	Air	Vortex flowmeter
	Coal	Load cell
화염 형상	Rear View	CCV camera
	Side View	Endoscope

2.3 실험방법

본 연구에서는 공기 다단 버너의 연소공기 분사조건에 대해 화염형상, 배가스 농도, 연소 공기 및 화로 벽과 출구 배가스 온도 등을 측정하여 각 조건별 연소 특성을 비교하였다. 공해물질 배출 성능 평가를 위한 배가스 농도는 화로 출구부터 500mm 떨어진 거리에 probe를 삽입하여 제습 및 filtering 과정 후 가스 분석 시스템에 유입 되어 O₂, CO, CO₂, NO_x성분이 분석되고, 아울러 버너로 유입되는 연료 및 각 연소 공기의 물리량과 연소상태 파악을 위한 화로벽 온도 등도 측정되었다.

2차 및 3차공기의 분사조건에 따른 최적의 버너 조합을 평가하기 위하여 동일한 미분탄 분사조건에 대해 다양한 버너 형상 및 운전조건을 제어인자로 선정하여 실험을 진행하였다. 즉 2차, 3차공기 유입라인에 각각 유량 제어 밸브(flow control valve)를 설치하여 각각의 유량을 조정하고 2차, 3차공기를 분할해 주는 플로디바이더의 직경을 다양하게 선정하여 연소공기 분사유로의 단면적 변화에 따른 영향 및 버너 쓰로트 직경 변화에 따른 영향도 아울러 조사하였다. 이때 모든 실험 조건에 대해 화로 출구 O₂는 3.0~3.5vol%가 되도록 연소조건을 조정하였고, 일차 공기량(m_1) 550kg/h를 포함하여 총 연소 공기량($m_1+m_2+m_3$)은 2500±30 kg/h가 되도록 유지하였다.

그리고 2차, 3차공기 각각의 유량제어 및 선회베인 조작을 통한 다양한 운전조건을 채택하여 연소공기 유량분할 영향, 선회변화 영향 및 분사속도 영향을 조사하였다. 본 연소시험을 통해 위와 같은 영향 인자들을 변화에 따른 최적의 조합을 이루는 버너 형상 및 NO_x 저감 효과를 유발하는 인자를 조사하고 그 연소 특성을 조사하였다

3. 실험결과 및 고찰

3.1 2차공기 분사유로 및 유량의 영향

연소공기의 유량 및 분사면적에 대한 연소특성을 살펴보기 위해 Table 3과 같이 3개의 2차, 3차공기 분사유로면적이 다른 버너를 선정하여 연소실험을 수행하였다. 각각의 버너에 대해 2차 및 3차 공기 베인의 폐도(closing rate, CR) 즉, CR₂는 25%, CR₃는 80%로 고정된 상태에서 2차 공기유량을 변화시켰을 때, NO_x 배출량의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 분사면적이 다른 모든 버너에 대해 2차 공기량의 변화에 따라 NO_x의 양이 상당히 급격하게 감소되다가 일정한 양을 넘어가면 다시 증가하는 추세를 보여 준다. 이는 2차공기량의 증가에 따라 NO_x가 증가한다는 결과⁽¹⁾와는 달리 특정 유량영역이 NO_x를 최소화시키는 버너부의 당량비 조건을 만족시킨다는 것을 의미한다⁽⁴⁾.

Table 3 Flow Divider dimension of test burners

버너종류 직경구분		A-1	A-2	A-3	B-1
		D1 (mm)	내경 132	<--	<--
	외경	122	<--	<--	<--
D2 (mm)	내경	167	221	241	167
	외경	176	230	250	176
D3(mm)		285	<--	<--	240

또한 최저 NO_x 값을 갖는 특정 유량의 구간을 Fig. 3에서 살펴보면 4개의 버너가 각각 다른 구간을 갖는데, 이는 2차공기 분사유로의 단면적에 최적 2차 유량값이 정성적으로 비례하는 것으로 나타난다.

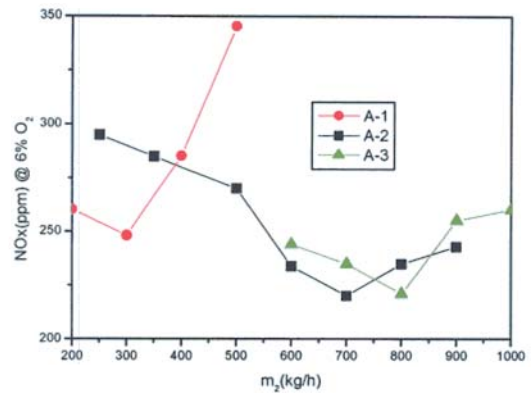


Fig. 3 NO_x emission characteristics with secondary air flowrate

3.2 2차공기 선회방향 영향

2차공기의 선회 방향에 대한 영향을 조사하기 위해 3차공기의 선회방향을 고정한 채 2차베인의 폐도(CR₂)에 따른 화염 변화 특성 및 공해물질 배출 특성을 조사하였다. 이때 이용된 버너는 Table 3의 A-2 버너이고, 여기서 3차 베인의 선회량은 일정하게 유지된 상태이며, 2차 베인의 선회방향이 3차 베인의 방향과 같은 방향이면 양(+), 반대방향이면 음(-)의 부호를 사용하였다.

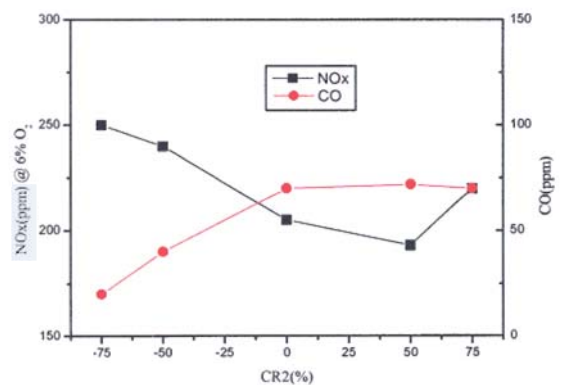
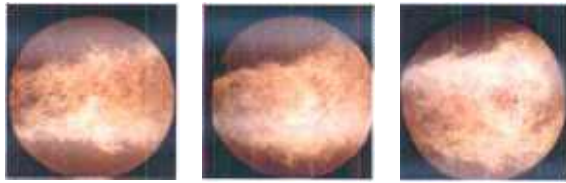


Fig. 4 NO_x & CO emission characteristics with secondary vane closing rate

2차 베인의 CR₂가 음에서 양으로 변함에 따라 Fig. 4에 NO_x 및 CO의 배출 경향을 살펴보면, NO_x의 경우 그 발생량이 점차 감소하다가 최소화(CR₂ = 50%) 된 후 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. CO의 발생량은 NO_x와 반대 경향을 보여주고 있다.



(a) CR=-75% (a) CR=0% (a) CR=75%

Fig. 5 Flame shape change with secondary vane closing rate

그리고 Fig. 5에서 보는 것처럼 선회각 음(-)의 영역에서는 화염 폭이 좁은 경향이 있고, 양(+)의 영역에서는 CR2이 증가함에 따라 화염의 폭이 상대적으로 넓어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 연소공기의 선회 방향 및 크기가 화염전단의 당량비에 영향을 미치고 궁극적으로는 NOx 배출량에 영향을 주고 있음을 알 수 있고, 최저 NOx 배출량을 갖는 2차공기의 특정 선회영역이 있음을 확인할 수 있었다.

3.3 3차공기 선회강도 영향

3차공기의 선회 강도에 대한 영향을 조사하기 위해 2차 선회각을 고정한 채 3차 베인의 폐도(CR3)에 따른 NOx 배출 특성을 Fig. 6에 나타내었다. 이때 A-2버너에 대해 CR2는 50%로 고정하고, 3차 베인의 폐도는 60, 80%에서 실험하였다.

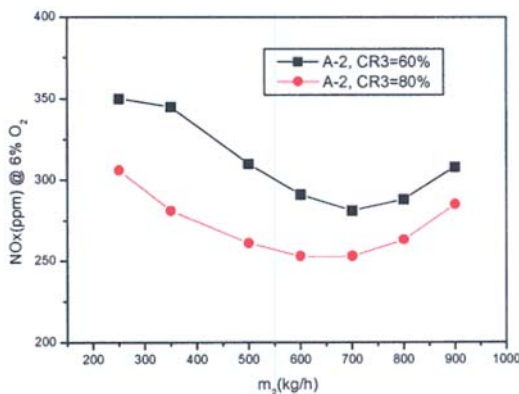


Fig. 6 NOx emission characteristics with tertiary swirl intensity

3차베인의 선회도(CR3)가 증가함에 따라 전반적으로 NOx 배출값이 감소함을 알 수 있다. 이는 선회력에 의해 초기 화염대내로 공급되는 3차공기의 양

이 줄어들므로써 air-staging 효과⁽⁵⁾가 커졌기 때문으로 여겨진다. 또한 동일버너에서 NOx 배출량이 최소가 되는 2차공기의 유량은 3차공기의 선회도와 거의 관계가 없음을 알 수 있다.

3.4 스로트(throat) 분사속도 변화특성

화로로 분사되는 연소공기의 속도에 대한 영향을 조사하기 위해 버너 throat 직경을 변경하여 연소실험을 수행하였다. A-1 버너와 flow divider 및 노즐의 크기는 동일하고 throat 직경을 240mm 적용한 버너를 B-1라 명명하고, 그 결과를 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 화로내 연소공기의 분사속도가 큰 B-1 버너가 2차공기 유량이 큰 영역에서 NOx 저감에 최적영역을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

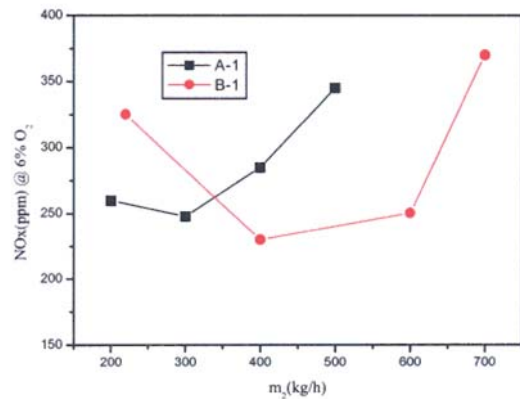


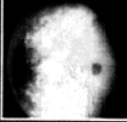
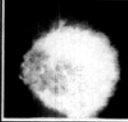
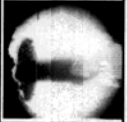
Fig. 7 NOx emission characteristics with throat diameter

3.5 연소조건별 화염특성

공기 2단 석탄버너에 대해 지금까지 논의된 연소용 공기의 조건에 따른 화염형상, NOx 및 UBC 변화 경향을 Table 4에 종합적으로 나타냈다. 연소공기의 유량, 분사속도 및 선회 변화에 따라 화염은 넓고 짧은 형상부터 lift flame까지 다양하게 나타나고 이에 따라 NOx 및 UBC 값이 변화하였다. UBC 값은 long flame인 경우 크게 나타나는데, 이는 화염후단의 좌(char) 연소영역에서 체류시간이 짧아졌기 때문으로 여겨지며, NOx 값은 short flame과 long flame의 중간 영역에서 최저값을 갖는 것을 확인하였다. 화염형상에 따른 NOx 배출특성에 관한 IFRF(International Flame Research Foundation)의 연구⁽⁶⁾에서와 마찬가지로 short flame 및 long flame은 화염내에서 적정 당

량비 조건을 벗어난 것으로 여겨지며, 다만 공기유동 제어를 통해 그 중간영역(Type 3)의 화염형성⁽¹⁾이 화염내 NO_x 저감의 관건으로 여겨진다.

Table 4 Flame, NO_x and UBC characteristics with combustion air conditions

주요변수		화염형성방향		
2차 공기	유량증가	←	→	→
	속도증가			→
	선회증가	←		
3차 공기	유량증가		→	
	속도증가	←		
	선회증가	←		
화염형상				
NO _x (ppm)	350이상	180~280	350이상	
UBC(wt%)	0.32	0.48	0.66	

4. 결 론

공기 2단 석탄버너에서 연소용 공기가 화로내로 분사되는 조건에 따른 연소특성을 조사한 결과 NO_x 저감에 최적인 다음과 같은 2차, 3차공기의 적정 조건을 얻을 수 있었다.

우선 NO_x 배출량이 최소화되는 2차 공기의 유량 조건이 존재함을 알 수 있는데, 이는 2차공기의 분사 유로 면적 및 버너 throat 면적에 따라 그 값이 달라짐을 알 수 있었다. 그리고 2차공기의 선회가 3차공기와 역방향의 선회조건에서 배출되는 NO_x 값이 순방향의 경우보다 상대적으로 높고, 순방향의 경우 NO_x 배출량은 2차공기의 선회정도(CR2)에 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다.

3차공기의 선회도가 증가하면 2차공기 유량에 관계 없이 전반적으로 NO_x 배출량이 감소함을 알 수 있었는데 이는 화염공간내로 공급되는 공기유량의 감소에 의한 것으로 추정된다.

아울러 본 연구에서는 각 변수별 화염형상 및 그에 따른 NO_x와 UBC를 측정하여 정리하였으며 각 변

수별 최적조건이 존재함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구를 위해 연소실험에 참여했던 두산중공업 발전기술연구팀 팀원께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) R.P. van der Lans, P. Glarborg and K. Dam-Tohansen, 1997, "Influence of Process Parameters on Nitrogen Oxide Formation in Pulverized Coal Burners", Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 23, pp. 349-377.
- (2) Tadashi, I., Hideki, Y., Shigeki, M. and Hiroshi, K., 1992, "Advanced Technology for Coal Fired Boilers", 日立評論, vol. 74 No. II.
- (3) A.D. Larue, H.S. Blinka, 2001, "Lower NO_x/Higher Efficiency Combustion Systems", Pollutant Control Symposium.
- (4) 김상현, 송시홍, 이건명, 김혁제, 이익형, 2001, "미분탄 버너의 설계인자가 NO_x 생성에 미치는 영향", 대한기계학회 추계학술대회는문집B, pp. 102-105.
- (5) 송시홍, 이기풍, 김혁제, 박석호, 2001, "액체 연료용 버너에서 NO_x 저감을 위한 연료2단 분사 Y-jet 노즐에 관한 기초연구", 대한기계학회 논문집 B권, 제25권 제11호, pp. 1616-1623.
- (6) R. Weber, A.A.F Peters and P.P. Breithaupt, 1993, "Mathematical Modeling of Swirling Pulverized Coal Flames", ASME, FACT-Vol. 17, pp. 71-86.