

공기 다단공급식 미분탄 버너의 NO_x 저감 특성

박주식* · 김성완* · 최상일*

NO_x Reduction Characteristics of Air Staging Burner for Pulverized-coal Combustion

Chu Sik Park*, Sung Won Kim* and Snag Il Choi*

Key Words : NO_x reduction, low NO_x burner, pulverized coal combustion

Abstract

The combustion test used DTF was performed to obtain the characteristics of NO_x emission and reduction. In this test, major factor of NO_x emission was a stoichiometric air ratio. At the onset of combustion to be rich oxygen, NO_x was produced rapidly. Optimum condition for NO_x reduction was formed under about AR:0.7 in the combustion test of Alaska coal. Investigations were undertaken with 200KW(th) test combustor. In combustion test, the major variables were coal feed ratio of center/outer, stoichiometric air ratio at the onset of combustion. The lowest NO_x emission, 182ppm(6% O₂ base), was achieved at about AR:0.6 of the first combustion stage with low NO_x burner. Also, unburned carbon content of char collected in this combustion condition was about 1wt%.

1. 서론

화석연료의 연소과정에서 발생하는 오염물질 중 질소산화물(NO_x)의 대부분은 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO₂)로 존재하고 발생한 NO_x의 95%이상이 일산

화질소 형태로 존재한다. 연소과정에서 생성되는 NO_x는 석탄에 함유되어 있는 질소성분의 산화에 의해 발생하지만 thermal NO_x와 같이 공기에 존재하는 분자질소에 의해 형성되기도 한다. 이점에서 NO_x는 석탄에 존재하는 다른 오염물질인 sulphur, chloride heavy metals들과는 다른 경향을 나타낸다.

석탄의 연소시 발생하는 NO_x는 Fig. 1의 메카니즘에서 보여지는 바와 같이 크게 세가지로 구분되어진다. Thermal NO_x(C 경로)는 연소용 공기에 존재하는 질소의 열고착화에 의해 형성되고 전체

* Korea Institute of Energy Research.
Taejon 305-343. Korea

발생 NOx의 10-20%정도를 차지한다. 1500℃이하의 영역에서 thermal NOx의 방출량은 10%이하로 크게 영향을 미치지 못한다. 그러나 1500℃이상에서는 thermal NOx의 방출이 지수적으로 증가하기 때문에 연소온도의 제어가 NOx의 방출에 크게 영향을 미친다. Prompt NOx(D 경로)는 연소공기에 존재하는 N2와 화염영역에서 생성되는 라디칼(C, CH, CH2, C2H 등)의 반응에 의해 생성된 물질과 산소가 반응함으로써 생성된다. Prompt NOx는 탄화수소가 존재하는 경우 초기 화염영역에서만 발견되며, thermal NOx와 fuel NOx의 량에 비해 상대적으로 무시할만하다. Fuel NOx는 석탄에 함유되어 있는 질소 종의 산화에 의해 생성이 된다. Fuel NOx는 전체 발생된 NOx의 70-95%를 차지하며 (A)경로로 휘발분과 함께 방출되는 volatile-N은 fuel-NOx의 50-70%이고 (B)경로로 좌의 연소에 의해 방출되는 char-N은 fuel NOx의 20-30%정도를 차지한다.

질소산화물의 생성특성에 기초하여 NOx를 저감하려는 연구가 여러 방법으로 시도되고 있다. NOx의 저감 방법으로는 연소설비 개선과 연소방법의 개선에 의한 연소중 처리방법 그리고 SNCR과 SCR과 같은 연소후 처리방법이 있다. 그러나 연소후 처리방법은 많은 운전비용 및 초기 설치비가 소요되는 문제가 있다. 저 NOx 연소기술에는 버너 미세 조율, 공기다단(Over-Fired Air, OFA), 배기가스 재순환(FGR), reburning, fuel and air staging(FS and AS), low NOx burner(LNB)등이 있다. 저 NOx 연소기술의 공통된 요소기술은 연소온도의 제어와 연료대 공기비의 제어에 근거하고 있다.

본 연구에서는 저 NOx 버너의 개발을

목적으로 단계적인 연소에 의한 NOx 방출특성 고찰을 위한 Drop Tube Furnace (이하 "DTF"라 함) 연소실험과 시험용 저 NOx 버너 연소시험을 수행하였다. DTF 연소실험에서는 연소온도, 공기비 그리고 반응거리(체류시간)등이 주요 변수로 다루어졌으며 시험용 저 NOx 버너 연소시험에서는 연료대 연소용공기의 비, 2차 공기의 분배비등이 주요변수로 다루어졌다.

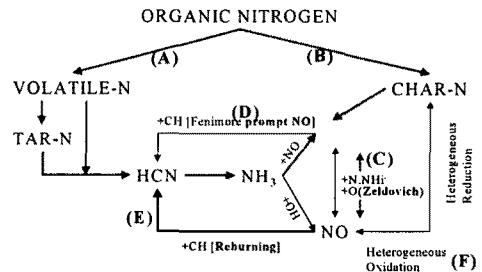


Fig. 1 Fate of fuel-N in coal combustion.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험장치

2.1.1 DTF 연소실험 장치

단계적 연소에 의한 NOx의 저감 특성을 규명하고자 사용된 장치는 급속 가열(순간 가열율: $10^4 - 10^5$ K/min)이 가능한 수직관형 연소로인 DTF장치를 이용하였다. DTF 장치는 Fig. 2에 나타나 있으며, 시료공급장치, 주연소로, 포집 및 가스분석장치로 구성되어 있다.

시료 공급장치는 정량적으로 공급하기 위해 자체 제작된 micro coal feeder를 사용하였다. DTF 주연소로는 가로, 세로, 높이 600× 600× 1400mm이며, 내부에는 내경 $\phi = 60$ mm, 높이 1500mm인 플라이

트 튜브를 설치하였다. 균일한 연소온도 유지를 위해 4 영역으로 구분하여 온도를 제어하였다. 2차 공기의 공급을 위하여 내경 $\phi=4\text{mm}$, 높이 100mm인 알루미늄 튜브를 주연소로의 플라이트 튜브와 injector 사이에 4곳으로 분배 설치하였다. 2차 공기는 공기 공급위치 조절을 위해 상하 이동이 가능하도록 구성하였다.

O₂ 분석기는 Electro chemical 방식의 SUMMITT 2200D, CO와 CO₂ 분석기는 NDIR 방식의 SUMMITT 702D, SO₂ 분석기는 Pulsed Fluorescent 방식의 Thermo Environmental 40B 그리고 NO_x 분석기는 Chemical luminescent 방식의 Thermo Environmental 10이었다.

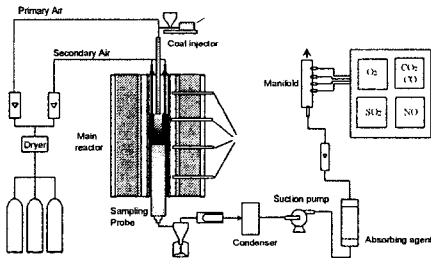


Fig. 2 Schematic diagram of DTF for staged combustion.

2.1.2 시험용 저 NO_x 버너 연소시험

Fig. 3은 연소로의 설계도면을 나타낸 것으로 6단으로 분리되도록 하여 총길이 3600mm로 제작되었으며 연소실 내벽은 내벽으로부터 castable, fire brick, insulation의 순서로 3단 단열 처리하였고 내경은 700mm가 되도록 하였다.

연소 시 시료 포집을 위한 포집구는 연소실과 대류 영역 사이에 설치하였으며, 이 때 고체시료는 싸이클론과 필터에 의하여 분리 포집되어 분석되고 연소가스는 수분 제거기를 거쳐 가스 분석기로 보내어져 분석되어지도록 하였다.

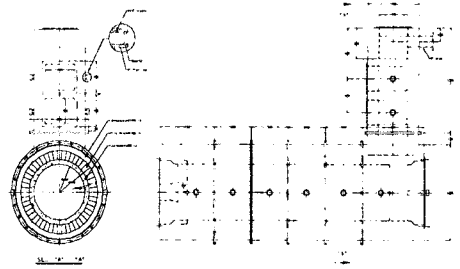


Fig. 3 Test combustor

Fig. 4는 연소시험에 사용된 저 NO_x 버너의 설계도면이다. DTF 실험결과를 토대로 공기 다단공급에 의한 NO_x 저감효과를 실증하기 위하여 제작되었다. 버너는 2차 공기의 화염 영역 유입을 한시적으로 억제 가능하도록 2차공기와 1차공기 유로 사이의 diffuser 끝 부분에 축선에 평행한 분리 판을 설치한 것과 중심부 외측에서 공급되는 미분탄이 버너 출구에서 분사되며 화염영역 내에서 신속하게 가열됨으로써 짧은 시간동안에 휘발분 방출을 이룰 수 있도록 한 것을 특징으로 한다.

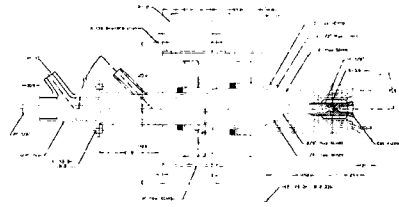


Fig. 4 Low NO_x burner

2.2. 연소시험 방법

2.2.1. DTF 연소실험

본 실험에 사용된 시료는 휘발분이 많이 함유된 Alaska 석탄(이하 “A탄”이라 함)과 휘발분이 적게 함유되어 있는

Drayton석탄(이하 “D탄”이라 함)이었다.

시료는 입자크기에 의한 영향을 배제하기 위해 200-400mesh로 체가름되어 사용되어졌다.

석탄 연소와 단계적 연소에 의한 NOx 생성 및 저감을 위한 반응변수로는 연소 온도, 공기-연료 비(Air ratio, 이하 AR이라 함)와 체류시간(반응거리)이다. 연소 반응의 경우 반응온도는 1100, 1300, 1500℃, 공기비는 0.6-1.2 그리고 반응거리는 석탄이 공급되는 시점으로부터 50cm까지 변화시키며 수행되어졌다.

단계적 연소의 경우 반응온도는 석탄의 연소성 및 반응성을 나타내는 1500℃에서 수행하였다. 공기비는 1단에서 0.6 그리고 2단에서 연소에 필요한 후속적인 공기를 공급해 주었으며 최종 공기비는 1.2로 조절하였다.

시료석탄의 분석결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. A Result of Analysis of Alaska and Drayton Coal

		Coal	
		Alaska	Drayton
Ultimate Analysis (wt%)	C	63.19	70.57
	H	5.671	4.93
	N	1.165	1.661
	S	0.601	0.524
	O	11.143	6.745
Proximate Analysis (wt%)	V. M.	49.39	31.82
	Moisture	10.05	4.54
	F. C.	31.49	52.61
	Ash	8.18	11.03

2.2.2. 시험용 저 NOx 버너 연소시험

버너의 연소시험에서 총 석탄 공급량은 30kg/hr로 고정하였다. 또한 총 공기 공급비는 이론적 산소 배출농도 3%를 기준으로 한 AR:1.148이었다.

시험용 저 NOx 버너 연소시험에서는

석탄의 공급을 내측과 외측으로 분기하는 석탄의 분배비 변화와 2차 공기의 공기비 변화가 주요 시험 변수이었다.

석탄의 분배비 변화 시험은 내, 외부 각각 10/20, 12.5/17.5, 15/15(center/outer) kg/hr로 설정되어 수행되었다.

2차 공기 공급비 변화 연소시험에서는 석탄 공급량을 내, 외부 각각 15, 15kg/hr로 고정하고 최대 선회강도하에서 2차 공기의 내, 외부공급량에 변화를 주어 1차 공기와 2차 공기 중 내부로 공급된 공기를 포함 공기비가 각각 0.86, 0.8, 0.71, 0.61가 되도록 공급하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. DTF 연소실험 결과

3.1.1. 반응온도 및 공기비의 영향

Fig. 5는 반응온도 1100, 1500℃에서 공기비와 반응거리의 변화에 따라 측정된 NOx 농도 결과를 나타내었다. NOx 농도는 배출되는 산소를 농도 6%로 환산하여 산출된 값이다. A탄의 경우 연소 초기 10cm에서 NOx의 대부분이 발생하였다. 반응온도가 1100℃에서 AR < 1인 경우 반응거리 10cm까지 급격하게 NOx 농도가 400ppm까지 급격하게 증가하였으며 반응거리 10cm 이후 NOx 농도는 서서히 감소하는 결과를 보여주었다. AR > 1인 경우 NOx의 생성은 같은 경향을 나타내었으며 AR < 1의 경우보다 전체적으로 100ppm 정도가 높게 나타났다.

반응온도 1500℃인 경우 공기비에 따라 NOx 농도차이가 크게 나타났다. AR > 1의 조건에서는 초기 발생된 NOx보다 반응거리가 증가할수록 미소하게 증가하는 경향을 나타내었으며 AR < 1의 조건에서는 공기비가 낮아질수록 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다.

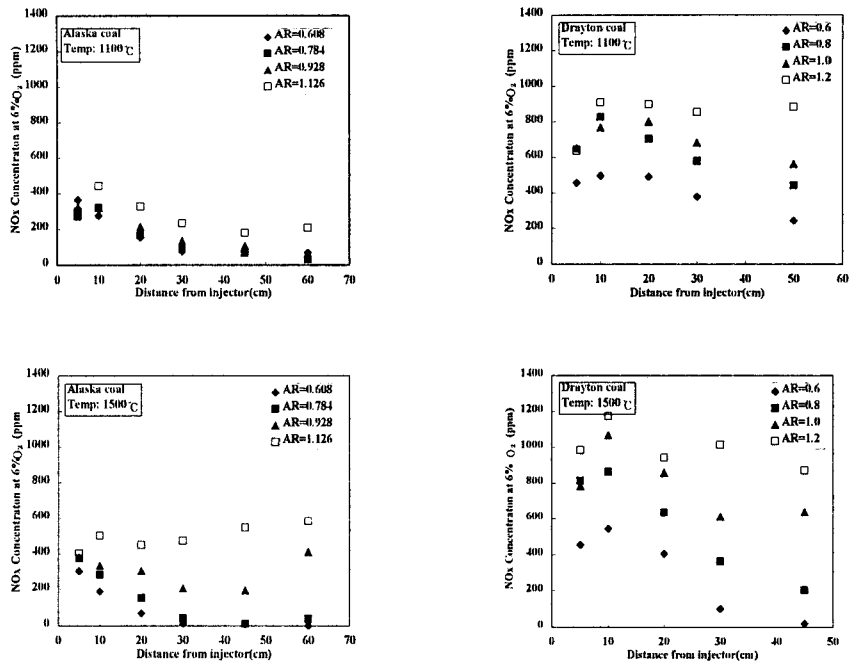


Fig. 5 NOx concentration against air ratio and distance with temperature

D탄의 경우 1100°C에서 반응거리 10cm까지 AR < 1의 조건에서는 NOx농도가 급격하게 증가하여 900-1000ppm정도로 측정되었으며, 반응거리 10cm이후부터는 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. AR > 1의 조건에서는 발생된 NOx는 반응거리에 따라 일정하게 유지되었다.

반응온도1500°C에서 공기비가 0.6일 때 연소초기 NOx의 생성이 가장 낮았으며 반응거리에 따라 NOx양이 급격하게 감소하여 30cm이후 50ppm정도가 발생되었다. 하지만 공기비가 0.8, 1.0인 경우에는 연소초기 800-1000ppm으로 급격하게 발생된 후 반응거리에 따라 서서히 감소하였다. 공기비가 1.2인 경우 NOx농도는 초기 급격하게 발생된 후 반응거리에 따라 일정하게 유지되었다.

낮은 공기비에서 보여주는 이와 같은 결과는 연소초기 탈휘발과정에서 생성되는 휘발분의 양이 온도가 증가할수록 증가하고 증가된 휘발분에 의해 생성된 NOx는 환원이 이루어지기 때문이다.

3.1.2. 2단 연소에 의한 NOx 저감

단계적 연소를 위해 반응온도는 1500°C, 공기비는 연소초기 환원이 가장 크게 나타나는 AR = 0.6으로 하였으며 2단에서는 A탄은 10cm 이후 그리고 D탄은 20cm 이후에 반응거리에 따라 완전연소에 요구되는 공기를 공급하는 방식으로 하여 최종 공기비를 1.2로 조절하여 수행하였다. Fig. 6의 결과는 AR = 0.6과 AR = 1.2에서 단계적 연소에 의해 측정된 NOx 농도를 나타내었다. 단계적 연소에 의한 연소 후 포집된 찰로부터 산출

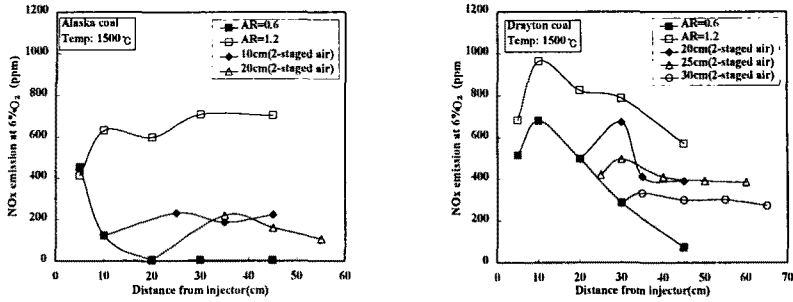


Fig. 6 Variation of NOx Concentration by 2-staged Combustion of Alaska and Drayton Coal.

된 Burn out은 A탄과 D탄 모두 95% 이상의 결과를 나타내었다.

A탄인 경우 AR = 0.6, 반응거리 10cm에서 측정된 NOx 농도는 100ppm 정도이었으며 2단으로 공기를 공급한 결과 200ppm으로 증가한 다음 반응거리에 따라 일정하게 유지되었다. 20cm에서 측정된 NOx 농도는 20ppm 정도이었으며 2단으로 공급한 결과 급격하게 200ppm으로 증가한 후 감소되었다. 이와 같이 A탄은 연소초기에 AR = 1.2로 공급하게 되면 NOx 농도는 600ppm 이상이 발생하는 반면 2단으로 공급하여 최종공기비를 1.2로 하는 경우 200ppm이하로 감소되는 결과를 나타내었다.

D탄인 경우 AR = 0.6, 반응거리 20cm에서 측정된 NOx 농도는 500ppm 정도이었으며 2단으로 공기를 공급한 결과 초기 급격하게 700ppm까지 상승한 다음 감소하여 400ppm으로 감소한 다음 반응거리에 따라 일정하게 유지되었다. 30cm에서 측정된 NOx 농도는 300ppm 정도이었으며, 2단으로 공급한 결과 미소하게 350ppm으로 증가한 다음 반응거리에 따라 서서히 감소되었다. 이와 같이 D탄은 연소초기에 AR = 1.2로 공급하게 되면 NOx 농도는 900ppm 이상이 발생되

는 반면 2단으로 공급하여 최종공기비를 1.2로 하는 경우 400ppm 이하로 감소되는 결과를 나타내었다.

3.2. 저 NOx 버너 연소시험 결과

3.2.1 내, 외부 석탄공급비 변화

Fig. 7은 석탄 공급비 변화에 따른 NOx 방출농도 변화 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 NOx 방출농도는 산소농도 6%로 환산된 결과 치이다.

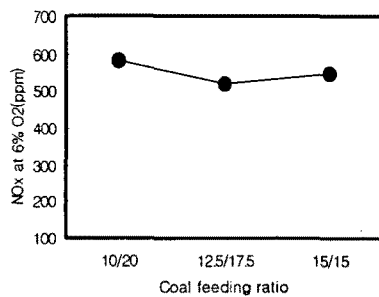


Fig. 7 Variation of NOx against coal feeding ratio

시험용 저 NOx 버너에서는 석탄 공급비 변화가 NOx 방출농도에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다. 미세한 차이를 보이지만 석탄공급조건 12.5/17.5의

조건에서 가장 낮은 522ppm의 방출농도를 보여주었다.

석탄공급비 변화 시험에서 포집된 최악의 미연탄소분 함량은 모두 1% 미만이었어서 연소가 안정적으로 진행되었음을 확인할 수 있다. 석탄공급비 15/15의 연소조건에서 가장 낮은 0.31%의 미연탄소분 함량을 보여주었다.

3.2.2. 2차 공기공급비 변화

석탄공급비는 연소가 가장 안정적으로 진행된 15/15의 조건으로 설정하고 내측 공기비의 조절, 즉 3차 공기량의 조절에 따른 NOx 방출농도의 변화를 관찰하고자 하였다. Fig. 8에서 NOx의 함수로 표기된 X축의 inner air ratio는 석탄공급량 대 1차 및 2차 내부로 공급된 공기량의 양론비를 나타낸 것이다.

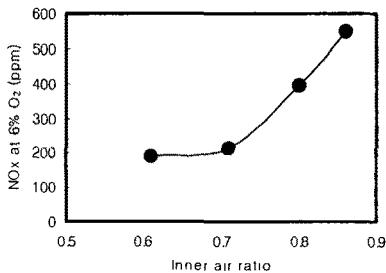


Fig. 8 Variation of NOx against inner air ratio

그림에서 보여주는 바와 같이 NOx 방출농도는 내측 공기비 0.86에서 548ppm으로 측정되었으며 이후 공기비가 낮아짐에 따라 급격히 감소되어 공기비 0.61에서는 가장 낮은 189ppm이 검출되었다. 또한 이와 같은 급격한 NOx 방출농도 감소현상은 공기비 0.71 이후에 둔화되어짐을 보여주고 있다.

미연탄소분의 함량은 공기비 0.86에서

가장 낮은 0.31%로 분석되었다. 공기비가 0.8로 감소됨에 따라 미연탄소분의 함량은 1.66%로 증가되었으며, 이후 공기비의 감소는 미연탄소분의 변화에는 크게 영향을 미치지 못하여 공기비 0.71과 0.61에서는 미연탄소분이 1.41%로 분석되었다. 공기비 감소에 따라 미연탄소분이 다소 증가하지만 1% 내외의 미연탄소분 함량 결과는 저공기비의 조건에서도 연소가 안정적으로 진행되었음을 보여준다.

4. 결론

NOx의 생성 및 환원 특성규명을 위한 DTF연소실험결과와 시험용 저 NOx 버너 연소시험결과로부터 다음과 같은 결론을 정리할 수 있었다.

4.1. NOx emission 특성 연구

석탄의 연소시 방출되는 NOx는 산소가 풍부한 연소초기에 대부분 생성되어진다.

NOx 방출량에 상관성을 가지는 가장 중요한 인자는 연소초기 환원영역에서의 석탄공급량 대 공기공급량의 공기비이다.

다단 연소개념에서 1차 환원영역의 최적 공기비는 탄종에 따라 다르며, 탄종별 최적공기비는 연소초기 weight loss 특성과 밀접한 상관성을 갖는 것으로 판단된다.

4.2. 저 NOx 버너 연소시험

연소초기 연소분위기를 활성화시키고 화염의 안정성을 확보할 수 있는 버너의 구조를 갖는 것이 NOx 저감 및 연소효율 향상을 위한 가장 중요한 인자이다.

연소 및 화염의 안정성이 유지될 때 NOx 방출량 저감을 위한 1차적인 인자

는 1차 연소영역에 직접적으로 영향을 미치는 1차 공기 및 2차 내부 공기량 대 석탄 공급량의 양론비이다.

참고문헌

- (1) L.J. Muzio and G.C. Quartucy, Prog. Energy Combust. Sci., 23, 233 (1997).
- (2) S. C. Hill and L. D. Smoot, Prog. Energy and Combust. Sci., 26, 417 (2000)
- (3) A. Kicherer, H. Spliethoff, H. Maier and K. R. G. Hein, Fuel, 73, 1443 (1994)
- (4) G. G. DeSoete, E. Croiset and J. R. Richard, Combustion and Flame, 117, 140 (1999)
- (5) H. Lin, E. Hampar and B.M. Gibbs, Fuel, 76, 985 (1997).
- (6) J.C. Stansel and D.J. Frey, U.S. TRW REPORT (1987).
- (7) T. Hulgaard and K. Dam-Johansen, AIChE J., 39, 1342 (1993).