

DTF를 이용한 석탄연소특성과 NOx 발생 및 저감에 관한 연구

한웅**, 박주식*, 최상일*, 이익형***, 양현수**

Studies on Coal Combustion Characteristics and NOx Emission and Reduction in the Drop Tube Furnace

Woong Han, Chu-Sik Park, Sang-Il Choi, Ik-Hyung Lee, Hyun-Soo Yang

Key Words: NOx, coal combustion, drop tube furnace, reduction

Abstract

The objective of this study was to obtain basic data for the staged combustion toward the NOx reduction in coal combustion. Combustion and NOx emission/reduction were investigated by using DTF.

NOx emission was decreased with decreasing air ratio and with increasing volatile content in coal. In particular, effective NOx reduction was achieved at high temperature at the onset of combustion with fuel rich condition.

기호설명

E_a : Combustion efficiency by ash
trace method

N_R : N-release by ash trace method

$X_{\text{fuel-N} \rightarrow \text{NOx}}$: conversion ratio converted
fuel-N to NOx

1. 서 론

연소시 발생되는 배기가스에 의한 환

경오염 문제는 날로 심각해지고 있는데 특히, 질소산화물의 경우 인류의 건강과 생활 환경에 막대한 해를 끼친다. NOx의 대부분인 NO는 무색, 무취로 인체 및 동식물 등에 크게 영향을 미친다. 또한 대기중 산소와 반응하여 적갈색의 NO₂를 생성하기 때문에 광화학 스모그의 원인이 되기도 한다. 또한 햇빛의 존재하에 탄화수소와 반응하여 PAN (Peroxy acetyl nitrate: CH₃(CO)-OONO₂)과 같은 광화학적 산화물과 오존을 생성하여 인체와 동식물에 직접, 간접으로 영향을 미칠 뿐 아니라 생태계

* 한국에너지기술연구소
** 충남대학교 공업화학과
*** 한국중공업(주)

를 위협하고 있으므로 앞으로 이에 대한 규제는 더욱 심각해질 것으로 기대된다.

석탄의 연소시 발생하는 NO_x의 형태는 Fig. 1의 메카니즘에서 보여지는 바와 같이 (C)경로처럼 공기에 포함된 대기질소의 열고착화에 의해 생성되는 thermal NO_x⁽²⁾, (A), (B)경로와 같이 연료의 연소시 휘발분과 최에서 생성되는 fuel NO_x⁽³⁾ 그리고 (D)경로에 따라 N₂와 연료에서 생성된 라디칼(C, CH₂)과 반응하여 생성된 화합물이 산소와 반응하여 생성되는 prompt NO_x⁽⁴⁾로 구분할 수 있다. 석탄의 반응성과 석탄중의 질소함량, 석탄의 조성, 그리고 반응조건등이 fuel NO_x의 생성율에 미치는 주요 인자이며 thermal NO_x는 반응온도가 주요한 변수로 작용한다. 이러한 질소산화물의 생성 특성에 기초하여 질소산화물을 저감하려는 연구가 여러 방법으로 시도되고 있다. SO₂ 저감기술과는 달리 질소산화물의 저감기술은 연소 중 처리 방법이 주된 방법으로 제시되고 있다.

연소시 발생하는 질소산화물의 발생 및 저감에 관한 거동을 해석하고 그 배출량을 저감하는 연구는 꾸준히 수행되어 왔으며, 그중에서도 연소중 NO_x 저감에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있으며, 효과적인 연소로내 제어기술로는 Flue Gas Recirculation(FGR), Burner Out of Service(BOOS)와 Over-Fired Air(OFA)를 이용하여 효과적으로 NO_x를 제어하는 방법과 Reburning, fuel and Air Staging, Low NO_x Burner(LNB) 그리고 2단연소를 이용한 방법이 연구되어져 왔다.⁽⁵⁻⁷⁾ 연소중 NO_x저감에 사용되는 기술중에서 저 NO_x연소법은 연소조건 개선에 의해 효율적으로 제어하여 연소 영역내에서 NO_x의 생성반응을 억제하거나 환원반응

을 유도하여 NO_x배출량을 감소시키는 방법으로 현재 전세계적으로 활발히 연구되고 있다.

연료가 석탄인 경우, 연소온도 1500°C 이하에서의 질소산화물의 방출은 thermal NO_x 보다는 fuel NO_x가 지배적이다. 따라서 fuel NO_x의 제어에 의하여 NO_x 방출량이 효과적으로 저감되어질 수 있다. Fuel NO_x는 연소 영역내에서 공기가 부족한 환원성 분위기로 유지하는 경우 효과적인 저감이 가능하다.

본 연구에서는 석탄연소시 fuel NO_x 방출 특성을 고찰하기 위하여 수직관형 연소로인 DTF(Drop Tube Furnace, 이하 DTF라 함)를 사용 연소실험을 수행하였다. 연소실험은 연소온도, 공기비 그리고 반응거리를 변수로 하여 수행되었다. 또한 단계적 연소(다단연소)를 위한 기초자료 제공을 목적으로 질소산화물의 생성과 저감에 대해 고찰하였으며, fuel NO_x에 영향을 미치는 연소온도, 공기비, fuel-N의 해리도 및 체류시간의 변화에 따른 NO_x의 방출/저감 특성에 관해 고찰하였다.

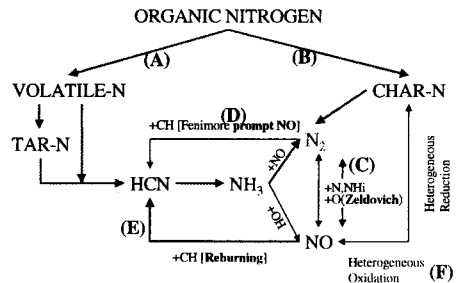


Fig. 1 Fate of fuel-N in coal combustion⁽¹⁾

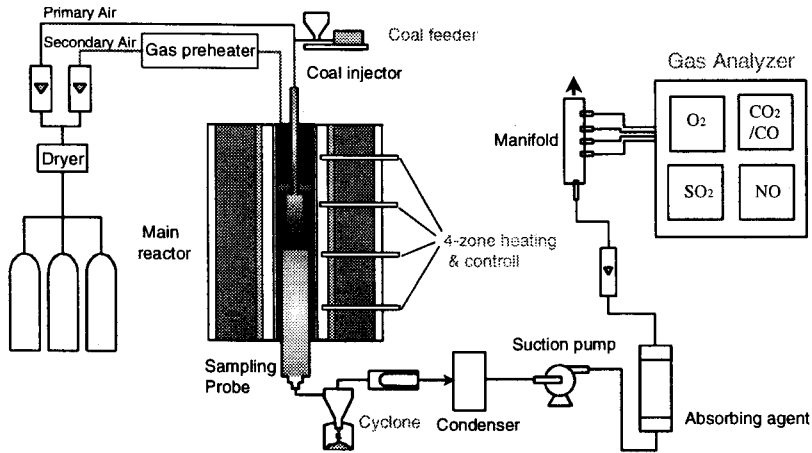


Fig. 2 Schematic diagram for Drop Tube Furnace

2. 실험

2.1. 실험장치의 구성

본 연구를 위한 실험장치는 NOx저감을 규명하고자 급속가열이 가능한 DTF (순간 가열율 : $10^4 \sim 10^5$ K/sec)를 이용하였다. DTF장치는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 시료 공급장치, 연소로, 시료포집 및 분석장치로 크게 나눌 수 있다. 특히 석탄연소시 외부로부터 가스 유입을 막기 위해 완전밀폐 되도록 보완 제작하였으며, 주연소로에서 시료의 공급과 배출의 균형을 유지하기 위해 주연소로에 압력계를 설치하여 조절하였다.

2.1.1. 시료공급장치

시료는 휘발분이 많이 함유되어 있는 Alaska탄과 휘발분이 적게 함유되어 있는 Drayton탄을 사용하였으며, 정량공급을 위해 자체 제작한 micro coal feeder를 사용하였고 석탄의 균일한 공급을 위해 진동장치를 사용하여 균일하게 공급

하였으며, 공급된 시료는 운반가스와 함께 주입기를 통과하여 주연소로로 공급된다. 석탄 공급은 0.1~1.0g/min 사이로 변화시키며 실험을 수행하였다. 이때 주입기는 미분탄의 가열을 막기 위해 3중 관으로 제작되었고 냉각수에 의해 냉각되어지도록 하였다.

2.1.2. 연소로

연소에 사용된 연소로는 가로, 세로, 높이 $600 \times 600 \times 1400$ mm이며, 내부에는 내경 $\phi = 60$ mm, 높이 1500mm인 플라이트 튜브를 사용하였다. 균일한 연소온도를 유지하기 위해 4단계로 제어되도록 구성하였다.

2.1.3. 시료 포집 및 분석

시료의 포집은 수냉각시스템으로 구성된 장치를 이용해 수직 상하 조절이 가능한 구조로 설계되었으며, 고체와 액체의 효과적인 분리를 위해 사이클론과 여과시스템을 사용하였다. 기상의 생성가스는 응축기를 통과시켜 수분을 제거한

후 실시간으로 분석이 가능하도록 구성하였으며, 분석항목은 O₂, CO, CO₂, SO₂, NO, NO_x이다. 분석에 사용된 O₂ 분석기는 SUMMITT사 Electro chemical형의 모델 2200D, CO와 CO₂분석기는 SUMMITT사의 NDIR형의 모델 702D를 사용하였다. SO₂는 Thermo Environmental사의 Pulsed Fluorescent형의 모델 40B 그리고 NO_x 분석기는 Thermo Environmental사의 Chemical luminescent형의 모델 10을 사용하였다.

2.1.4. DTF 유동조건

DTF내의 유동조건은 Fig. 1의 장치에서 보여진 바와 같이 연소를 위해 공급되는 공기는 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 primary air와 secondary air로 분리되어 정량적으로 공급되며 각각의 유동 조건은 Table 1과 같다. Secondary air는 honeycomb을 설치하여 균일하게 공급하였다.

석탄이 노출되는 부위에서의 유동은 순간적으로 와류가 형성되지만 0-3cm내에 유동은 안정하게 되었다.

석탄입자의 체류시간은 4차 Lunge-Kuntta Method를 이용하였다.

Table 1. Test Conditions in DTF

Primary Air	유량	0.5 liter/min
	유속	66.3 cm/sec
Secondary Air	유량	2.0 liter/min
	유속	1.18 cm/sec
Alaska	체류시간 (70cm)	2.62sec
	평균입경	29.9 μ m
Drayton	체류시간 (70cm)	2.64sec
	평균입경	30.3 μ m

2.2. 실험

석탄의 연소와 NO_x 방출 및 저감연구에 있어 주된 반응변수로는 반응온도, 공기-석탄비율과 체류시간(반응거리)이다. 연소온도의 영향을 확인하기 위해 1100, 1300, 1500 $^{\circ}$ C에서 수행하였으며, 공기-석탄비(Air Ratio, 이하 AR이라 함)는 0.6, 0.8, 1.0, 1.2로 변화를 주었다. 그리고 반응거리는 석탄이 공급되는 시점으로부터 5-70cm까지 변화를 시켰다.

또한 탄종에 따른 영향을 살펴보기 위해 대상석탄은 휘발분이 많이 함유되어 있는 준역청탄에 속하는 Alaska 석탄, 휘발분이 적게 함유되어 있는 역청탄에 속하는 Drayton 석탄을 선정하여 사용하

Table 2 A Result of Analysis of Alaska and Drayton Coal.

Coal	원소분석(wt.%)					공업분석(wt.%)			
	C	H	N	S	O	Volatile Matter	Moisture	Fixed Carbon	Ash
Alaska	63.19	5.671	1.165	0.601	11.143	49.39	10.05	31.49	8.18
Drayton	70.57	4.93	1.661	0.524	6.745	31.82	4.54	52.61	11.03

였다. DTF에서 사용된 시료는 입자크기에 의한 영향을 배제하기 위하여 200-400mesh의 입자를 선별하여 사용하였으며 평균입경은 Table 1에 나타나 있다.

본 연구에서는 대상탄 및 연소 후 포집된 촉의 분석은 Perkin Elmer 2400 원소분석기를 사용하여 C, H, N, S, O성분을 분석하였다. 그리고 공업분석에 사용된 기기는 LECO automatic proximate analyser를 사용하였다. Table 2에는 대상석탄의 분석결과를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 석탄의 연소성

연소효율을 계산하는 방법으로 회분추적법을 이용하였으며, 회분추적법에 의한 연소효율(전환율) 계산식⁽⁸⁾은 다음과 같다.

$$E_a = \left[1 - \frac{A_o \times (100 - A')}{A' \times (100 - A_o)} \right] \quad (1)$$

E_a : Burn-out

A_o : 건조 석탄의 회분 함량(%)

A' : 건조 촉의 회분 함량(%)

Fig. 3은 1100, 1300, 1500°C에서의 연소효율을 나타낸 것이다.

a의 경우에는 온도에 따라 연소 초기 조건인 반응거리 0-10cm에서 연소효율은 25-65%로 급격하게 증가하였다. 10cm이후의 반응거리에서 1100°C인 경우 반응거리가 증가함에 따라 완만하게 증가를 하였으며 공기비가 증가할수록 연소효율은 증가하였다. 1300, 1500°C인 경우 공기비에 관계없이 반응거리가 증

가함에 따라 완만하게 증가하였다.

b의 경우 a와 경향은 비슷하게 나타나지만 연소초기조건인 반응거리 0-10cm에서 연소효율이 50-75%로 급격하게 증가하였다. 10cm이후 연소효율은 1100, 1300°C에서 완만한 증가하였지만 1500°C인 경우에는 반응거리에 따라 연소성이 크게 증가하는 것을 보여 주었다.

Fig. 3의 결과에서 보여지는 바와 같이 반응거리 10cm이하의 연소 초기조건에서 Alaska탄이 Drayton탄에 비해 연소가 우수한 것으로 나타나는데 이는 Alaska탄에 함유되어 있는 휘발분이 Drayton탄에 비해 많이 함유되어 있어서 고온에 급격히 노출됨으로서 나타나는 현상이라 사료된다.⁽⁹⁾ 그리고 반응거리 10cm이후 연소효율이 완만하게 증가하는 것으로 보아 촉의 연소에 의한 것으로 판단된다.

3.2. 연소효율과 N-release

연소중 촉로부터 해리된 질소의 분율을 나타내는 N-release의 계산⁽¹⁰⁾에 사용된 식은 다음과 같다.

$$N_R = \frac{m}{m_o} \frac{x_j}{x_{oj}} \quad (2)$$

$N_R(t)$: j 구간에서 N-release

m : 촉에 함유된 질소성분

m_o : 원탄에 함유된 질소성분

x_j : j 구간에서 촉의 질량비

x_{oj} : j 구간에서 원탄의 질량비

Fig. 4는 1500°C, 반응거리 30cm에서 AR에 따른 N-release결과이고 Fig. 5은 AR=1.0에서 반응거리에 따른 N-release 결과이다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 AR=0.6에서 a는 50-80%, b는 60-90%의

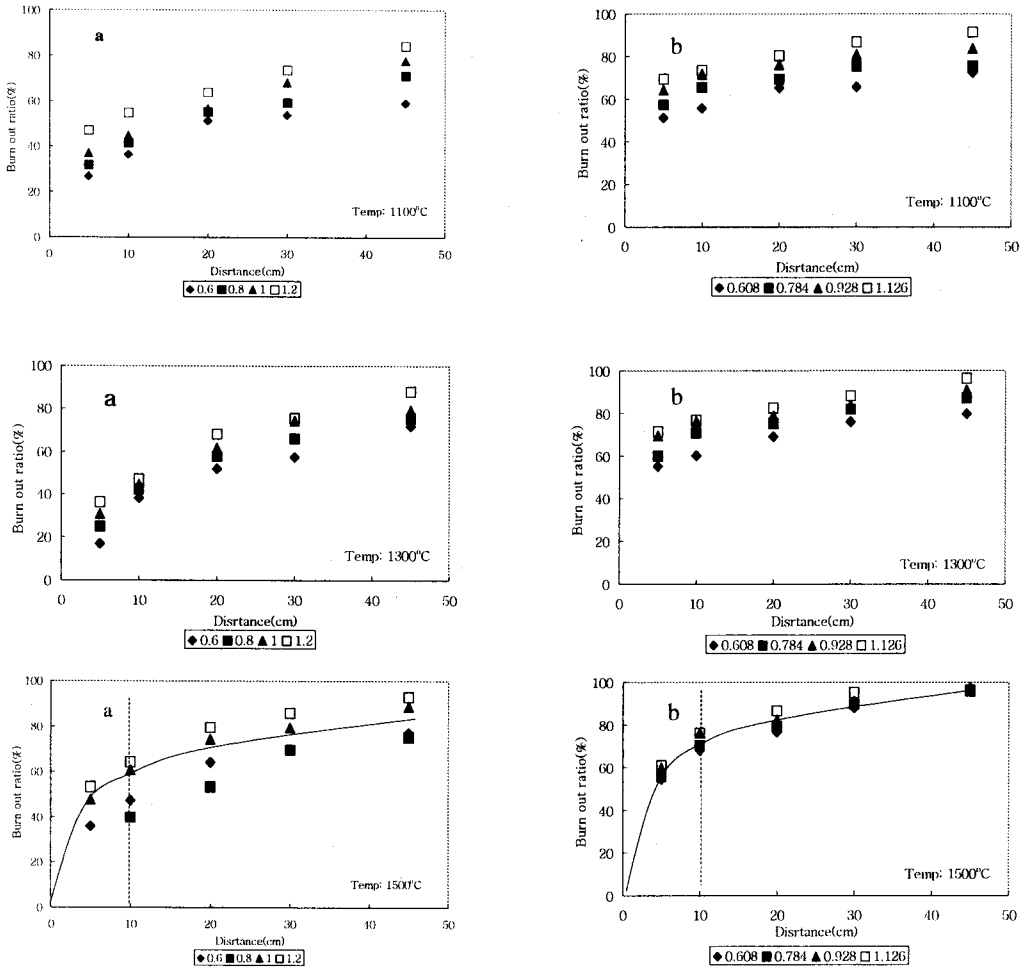


Fig. 3 Burn out ratio for Drayton Coal and Alaska Coal
(a: Drayton Coal, b: Alaska Coal)

N-release를 나타내었으며, 연소온도 증가와 공기비 증가에 따라 N-release는 크게 증가함을 알 수 있었다.

특히, 연소온도 1500°C인 경우 반응초기조건에서 a의 경우 80%, b의 경우 90%이상 N-release가 증가하게 되었다. 이는 석탄의 특성상 휘발성분에 대부분의 질소가 포함되어 있음을 보여주고 있는 것이다.

Fig. 5의 결과 연소초기 조건에서 a의

경우 30-50%, b의 경우 60%가량 N-release되었으며 a, b모두 반응거리가 증가할수록 N-release는 연소 초기조건에서 급격하게 증가하였고 반응거리 10cm이후 완만하게 질소가 해리되고 있음을 보여주었다.

특히, Alaska탄은 Drayton탄에 비해 높은 N-release를 보여주었는데 Fig. 4에서 언급한 바와 같이 석탄에 함유되어 있는 대부분의 질소가 휘발분에 함유되

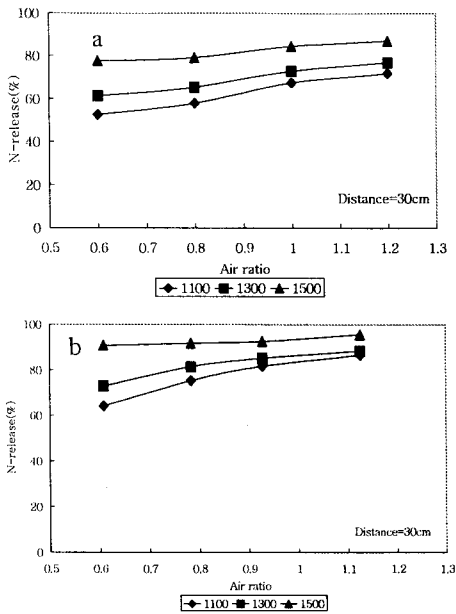


Fig. 4 Comparison of N-release with air ratio and reaction temperature (a: Drayton Coal, b: Alaska Coal)

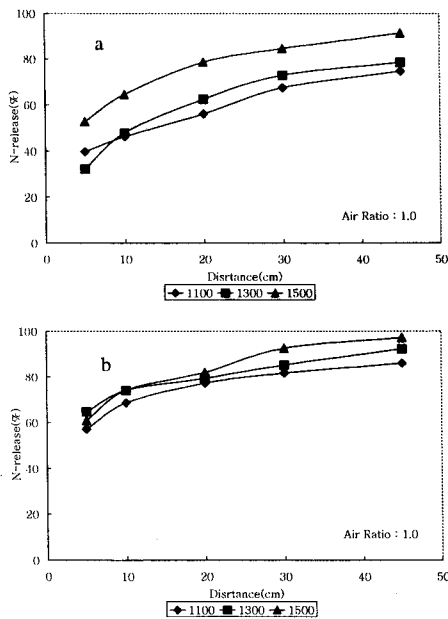


Fig. 5 Comparison of N-release with distance and reaction temperature (a: Drayton Coal, b: Alaska Coal)

어 방출되는 결과이며, 위의 결과 연소 시 휘발분에 함유되어 있는 질소성분은 Alaska탄은 70%이상, Drayton탄은 60% 이상 함유되어 있다는 결과를 얻었다. 이때 연소과정에서 연소초기 해리된 질소는 Fig. 1의 반응경로에 따라 N₂ 및 NO_x로 전환된다고 예상할 수 있다.

Fig. 6은 반응온도 1500°C에서 연소효율과 N-release를 비교한 결과이다. 일반적으로 휘발분이 적은 석탄일수록 연소효율에 비해 질소전환율이 높게 나타나는데⁽⁸⁾, 실험결과에서 보여지듯 a의 경우 연소효율보다 N-release가 높게 나타났다. 그러나 휘발분이 많은 b의 경우 연소효율과 N-release는 비례하는 결과를 보여주었다.

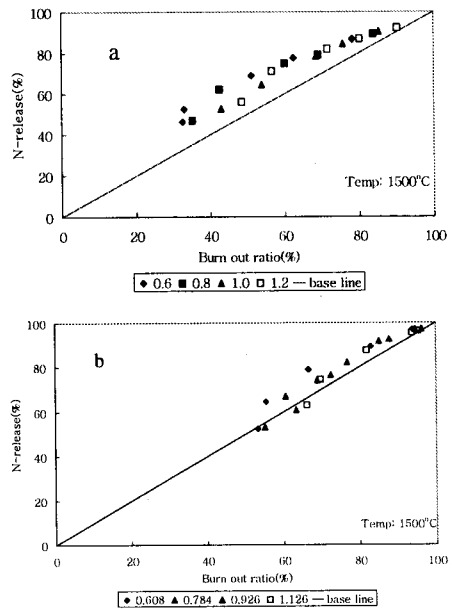


Fig.6 Comparison of burn out ratio and N-release (a: Drayton Coal, b: Alaska Coal)

결과로부터 석탄의 질소성분, 연소효

율과 N-release의 값으로 판단해 볼 때 연소 초기조건에서 NOx의 방출은 Drayton 탄의 경우 높고 Alaska탄의 경우 낮을 것으로 예상할 수 있었다.

3.3. NOx 방출

Fig. 7은 석탄의 등급에 따라 21개 석탄을 대상으로 미분탄 연료의 연소결과를 나타낸 것으로 5%의 과잉 O₂ 그리고 가열속도는 21kW(석탄공급량 2.27kg/hr)의 조건에서 예 혼합버너에 의해 얻어졌으며, 석탄에 함유되어 있는 질소와 NO 방출을 비교한 결과이다. Chen등의 결과⁽¹¹⁾에서 나타난 바와 같이 석탄내에 질소성분이 증가함에 따라 NO방출은 증가하는 경향을 보여주고 있다. 저급탄은 질소성분이 적고 고휘발분 역청탄보다 NO를 적게 생성한다.

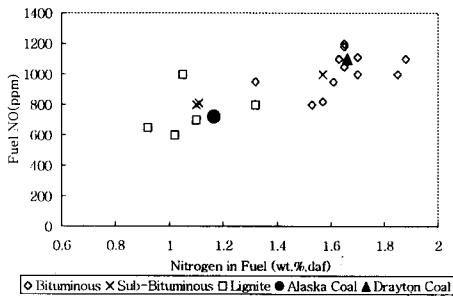


Fig.7 Fuel NO as a function of nitrogen content

본 연구에 사용된 석탄의 배출농도는 완전 연소되는 조건인 AR=1.2, 1500°C 그리고 반응거리 70cm에서 측정된 NO 농도 값으로서 표시된 것으로서 Alaska 탄은 준역청탄, Drayton탄은 역청탄의 경향을 나타내었다.

일반적으로 NOx의 생성은 석탄내에

함유되어 있는 질소성분의 증가에 따라 증가를 한다. 저등급 석탄은 석탄에 함유되어 있는 질소성분이 낮고 휘발분이 높은 역청탄 보다 적게 NOx를 생성한다. 석탄 등급에 따른 특성은 석탄에 함유되어 있는 질소의 산화에 영향을 끼친다.¹⁰⁾

Fig. 8은 반응온도 1500°C에서 반응거리와 공기비에 따라 측정된 결과로 O₂농도를 6%로 환산한 NOx방출 결과로 연소 초기 해리된 질소성분은 초기 잔존하는 산소와 반응하여 NOx를 생성하는데 위에서 언급한 바와 같이 석탄내 질소함유량이 높고 고등급탄에 속하는 a의 경우 b에 비해 많이 발생하였다.

a의 경우에는 공기비에 따라 NOx발생량에 급격한 차이를 보여주고 있으며, 연소 초기에서 10cm까지 NOx방출이 증가하였는데, Fig. 3에 나타난 바와 같이 연소 초기에 연소효율이 반응거리에 따라 급격하게 증가하는 결과와 Fig. 4의 N-release결과로 인해 연소 초기에 NOx가 급격하게 방출되는 것이라 판단되었다.

연소초기 10cm이후 AR<1의 조건에서는 반응거리가 증가함에 따라 NOx가 감소하는 결과를 보여주었다. AR=1.2의 경우에는 반응거리에 관계없이 농도가 일정함을 보여주고 있었다.

b의 경우에는 a와 달리 AR<1에서 연소 초기부터 급격하게 감소하기 시작하였으며, 반응거리가 증가할수록 감소하는 경향을 보여주었다. AR=1.126인 경우 방출농도는 일정함을 보여주었다.

Fig. 9는 반응거리 45cm에서 반응온도와 공기비에 따라 측정된 결과이며 배출가스 기준 6% O₂로 환산한 NOx방출

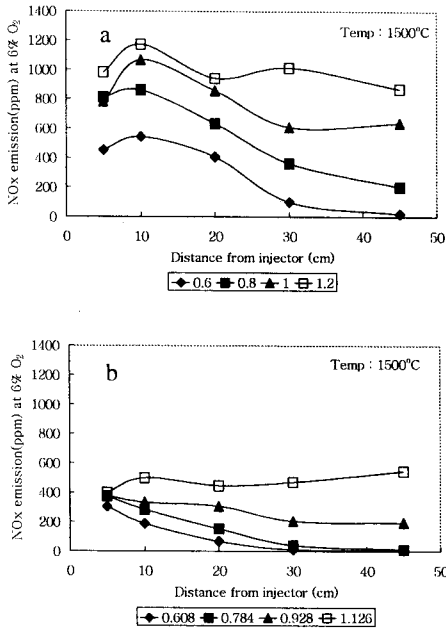


Fig. 8 NOx concentration with reaction temperature and distance (a: Drayton Coal, b: Alaska Coal)

결과이다. 결과에 나타난 바와 같이 a, b 모두 공기비가 감소함에 따라 NOx 방출 농도가 감소하는 경향을 보여주었다.

a의 경우 AR=0.6에서 AR=1.2로 증가 시 대략적으로 1100°C에서는 630ppm, 1300°C에서는 580ppm 그리고 1500°C에서는 820ppm으로 증가하였으며 b의 경우 AR=0.608에서 AR=1.126으로 증가 시 1100°C에서는 150ppm, 1300°C에서는 200ppm 그리고 1500°C에서는 450ppm으로 증가하여 연소온도가 증가함에 따라 NOx 방출농도가 크게 증가하였다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 보여지는 바와 같이 AR<1의 조건에서 반응거리에 따른 NOx감소 결과와 낮은 NOx방출 결과는 연소 초기 해리된 질소가 환원성분 위기에서 일부는 NOx로 산화되고 일부

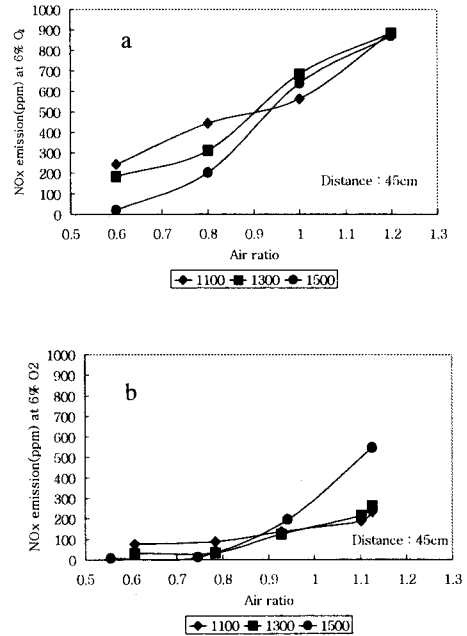


Fig. 9 NOx concentration with reaction temperature and air ratio (a: Drayton Coal, b: Alaska Coal)

는 탄화수소화합물의 질소종으로 잔존하여 Fig. 1의 (A)메카니즘을 통해 N₂로의 환원반응에 의하여 NOx가 감소된 것으로 판단된다.

Fig. 10의 결과는 석탄에 함유되어 있는 탄소로부터 연소후 CO와 CO₂로 전환된 것으로 배출되는 가스분석값에 의해 얻어진 탄소전환율과 fuel-N에서 NOx로의 전환율을 비교한 결과이다. fuel-N에서 NOx로의 전환율은 다음과 같은 방법에 의해 계산되어지며,

$$X_{fuel\ N \rightarrow NO_x} = \frac{NO_{xj}}{NO_{x0}} \quad (3)$$

NO_{xj} : j 구간에 발생한 NOx 농도

NO_{x0} : 이론적으로 계산된 NOx농도

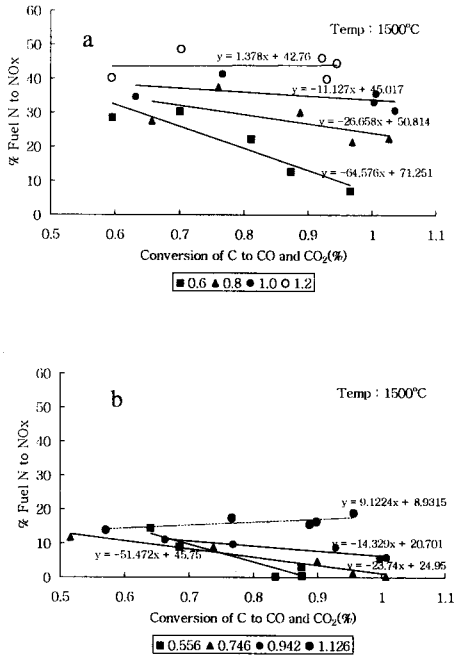


Fig. 10 Comparison of Fuel-N to NOx with Air ratio and carbon conversion (a: Drayton Coal, b: Alaska Coal)

a의 경우 탄소전환율이 증가함에 따라 fuel-N에서 NOx로의 전환율은 감소하는 경향이 나타났으며, 특히 공기비가 적을수록 감소폭이 급격함을 알 수 있었다. 그러나 AR=1.2인 경우에는 탄소전환율에 따라 fuel-N에서 NOx로의 전환율은 일정하게 나타났으며 발생한 fuel-N의 40%정도가 NOx로 전환되어지는 결과를 보여주고 있다. b의 결과에서 전반적인 경향은 a와 유사하였으며, 이때 NOx로의 전환율은 10%내외의 결과를 보여주었다.

3.4. NOx 저감

Fig.11은 1500°C, AR<1.0인 조건에서의 NOx 방출 결과로서 반응거리에 따른

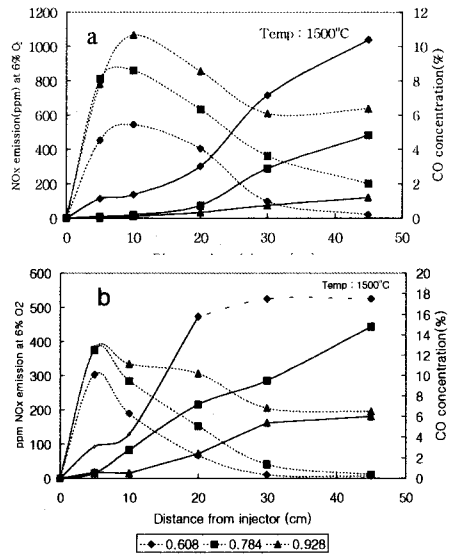


Fig.11 NOx and CO concentration with reaction distance

(a: Drayton Coal, b: Alaska Coal)

CO와 NOx농도 변화를 나타낸 것이다. 결과에서 보여지는 바와 같이 a는 b에 비해 초기 반응거리에서 NOx가 높게 방출되었다.

CO농도는 저공기비인 경우 반응거리에 따라 급격하게 증가하였으며 공기비가 증가함에 따라 완만하게 증가하는 결과를 보여주었다. b의 경우 AR=0.608에서 반응거리 20cm이후 결과값은 18%이상으로서 분석기의 분석 한계값을 상회한 결과이다.

AR<1이하에서 CO농도가 검출된 것은 불완전 연소가 됨으로서 반응에 참여하지 않은 탄화수소 성분이 존재하고 있음을 예측할 수 있었다. 이런 탄화수소 성분중에는 휘발된 질소종이 포함되어 있으며 Fig.1의 (A) 메카니즘에 의해 환원이 이루어짐으로서 NOx 농도가 급격하게 감소하는 결과를 나타낸 것으로 사료

된다. Fig. 11의 결과에서 석탄연소시 발생하는 최종 NOx 방출량이 연소초기의 NOx 생성량과 밀접한 연관이 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 탄종별 연소초기 방출되는 휘발분의 함량차이에 기인한 것으로 판단된다.

이상에서 얻어진 결과로부터 역청탄인 Drayton탄의 경우 효과적으로 NOx방출량을 저감하기 위해서는 반응초기 조건에서 $AR < 0.6$ 의 저공기비로 유지하여야 하며, 상대적으로 휘발분 함량이 많은 준역청탄인 Alaska탄은 다소 높은 $AR < 0.8$ 에서도 NOx를 효과적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

DTF에서 석탄의 연소반응 및 NOx저감을 위한 기초실험을 수행하고 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 석탄 연소시, 특히 연소초기에 N-release는 연소효율에 비교하여 높게 측정되었다. 1500°C에서 N-release는 휘발분이 많은 탄인 경우 90%정도이고 적은 탄의 경우 80%정도 이었다.
2. 연소초기 fuel-N에서 NOx로의 전환율은 Drayton탄은 40%, Alaska탄은 10%로 NOx는 연소초기에 생성이 이루어짐을 알 수 있었으며, $AR < 1$ 에서는 반응거리가 증가할수록 감소하지만 $AR > 1$ 에서는 NOx발생량은 일정한 값을 나타내었다.
3. 효과적인 NOx저감은 연소초기 저공기비로 유지하고 발생한 NOx를 환원시킨 다음 다단연소방식에 의하여 추

가 공기를 넣어줌으로서 가능하다고 사료된다.

5. 참고문헌

- (1) Smart, J. P. and Morgan, D. J., Fuel, 73, 1437, 1994
- (2) Zel'dovich, Y. B., Acta Phys.-Chim. URSS, 1946, 21, 577
- (3) Fenimore, C. P. and Jones, G. W., J. Phys. Chem., 1957, 61, 654
- (4) Fenimore, C. P., 13th Symposium on combustion, The Combustion Institute, p. 373, 1971
- (5) The Babcock & Wilcox Company, "Coal-fired NOx emission control technologies", 1989
- (6) Vander Lans, R. P., Glarborg, P. and Dam-Johansen, K., Prog. Energy Combust. Sci., 23, 349, 1997
- (7) Yamashita, H. and Tomita, A., Energy and Fuels, 7, 85, 1993
- (8) 최상일, "2단 동축형 Cyclone 연소기를 이용한 저공해 미분탄 연소특성 연구", The Korean Society of Combustion, 4, 67, 1999
- (9) Niksa, S. and Cho, S., Energy and Fuels, 10, 463, 1996
- (10) Chen, S. L., Heap, M. P., Persing, D. W. and Martin, G. B., Fuel, 61, 1218, 1982
- (11) Baxter, L. L., Mitchell, R. E., Fletcher, T. H. and Hurt, R. H., Energy & Fuels, 10, 188, 1996