J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 20, No. 6, December 2009, 675-680

석탄 연소시 연료 NOx 배출 특성에 관한 연구

김성수 · 최현진 · 이현동* · 김재관* · 홍성창,†**

경기대학교 대학원 환경에너지시스템공학과, *한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소, **경기대학교 환경에너지시스템공학과
(2009년 9월 10일 접수, 2009년 10월 7일 채택)

A Study on Fuel NOx Emission Characteristics in Coal Combustion

Sung Su Kim, Jin Hyun Choi, Hyun Dong Lee*, Jae-Kwan Kim*, and Sung Chang Hong,†**

Department of Environmental Energy Systems Engineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon-si, Gyeonggi-do 442-760, Korea
**Fossil Fuel Combustion Power Generation Laboratory, Daejeon 305-760, Korea*
***Department of Environmental Energy Systems Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do 442-760, Korea*
(Received September 10, 2009; accepted October 7, 2009)

SM탄(인도네시아산)을 이용하여 NOx 배출 특성을 조사하였다. 실험은 석탄 거치 후 승온하며 연소하는 방법과 승온 후 석탄을 주입하는 방법을 이용하였다. 산소희박 분위기에서는 배출 NOx가 연소온도와 반비례의 관계를 나타내었으며 이는 fuel N이 강한 환원 분위기에서 N_2로 전화되기 때문인 것으로 나타났다. 또한 주입 가스량 증가 시에는 산화 분위기에 의해 fuel N이 NO로 산화되어 total fuel NO가 증가하는 경향을 나타내었다. 제조 온도에 따른 char의 연소시 발생되는 NO의 분석으로 total fuel N, volatile-N, char-N이 각각 NO로 전화되는 부분으로 구분될 수 있었으며 실험결과 본 연구에 사용된 SM탄은 total NOx의 대부분이 volatile-N에 기인하는 것으로 나타났다.

This article describes NO emission characteristics in SM coal combustion. Combustion experiments was performed in the method of increasing temperature after feeding coal and feeding coal after increasing temperature. NOx emission is in inverse proportion to combustion temperature at the fuel rich condition and it was caused by conversion fuel N to N_2 at the strong reduction condition. In addition, feeding gas flow rate increased as total fuel NOx increase by conversion of fuel N to NO at the oxidation condition. It could be separated in total fuel-N, volatile-N, char-N to NO according to analysis of total fuel NO emission from char combustion at each temperature. In the result, almost total NOx emission was caused by volatile-N in SM-coal.

***Keywords**: coal combustion, char-N, reduction, NOx emission*

1. 서　　론

우리나라의 에너지원 중에서 석탄의 소비율은 2006년 기준으로 석유(43.6%) 다음으로 높은 24.3%를 차지하고 있으며, 대부분의 소비처인 전력부분에서 석탄화력은 전체 발전량의 약 36%를 차지하고 있다[1,2]. 이러한 석탄 연소시 발생하는 대기오염물질과 회분(Ash) 등 연소부산물은 석탄의 종류 및 물성과 연소조건 등에 따라서 달라질 수 있다. 이 때 발생하는 대기오염물질 중 대표적인 오염물질이 NOx이며, 일반적으로 NO, NO_2, N_2O를 지칭하지만[3] NO_2, N_2O는 발생량이 작아 무시할만하다[4]. 연소시 발생되는 NOx와 SOx는 산성비의 원인으로 건축물의 부식, 토양과 수질의 오염 등을 야기하며 대기중의 수분 및 탄화수소와 반응하여 광화학 스모그(smog)를 발생시키고 오존층 고갈을 유발시켜 인체에 커다란 피해를 끼친다[5-7].

석탄 연소시 발생하는 NOx는 질소의 기원과 생성 기구에 따라 대기 중 질소의 열고착화에서 기인하는 thermal NOx[8], 연료에서 생성된 라디칼(C, CH_2)과 반응하여 생성된 화합물이 산소와 반응하여 생성되는 prompt NOx[9], 그리고 연료 속의 N 성분에 기인하는 fuel NOx[10]로 대별되고 있다. 일반적인 NO의 생성 메커니즘은 Figure 1[11]과 같다. Thermal NOx는 전체 NOx의 약 10～20% 정도를 차지하며[12], prompt NOx는 탄화수소의 존재하에 초기 화염영역에서만 발견되는데 thermal 및 fuel NOx에 비해 무시할 정도로 적은 양이다. Fuel NOx는 공기중의 질소를 기원으로 하는 thermal 및 prompt NOx와는 달리 연료중의 N 성분에 기원하며[13] 석탄 내에 함유되어 있는 탄소 또는 다른 원자에 결합된 질소종의 산화에 의하여 생성이 된다[14]. Fuel NOx는 전체 NOx의 75～95%를 차지하며, volatile-N이 NOx로 산화되는 것이 50～70%, char-N이 NOx로 산화되는 양이 20～30% 정도이다. 따라서 석탄연소시 질소산화물 방출을 효과적으로 저감하는 것은 주로 thermal NOx 보다는 fuel NOx의 제어에 있다고 할 수 있다.

한편 fuel N의 NOx로의 산화는 온도가 높을수록, 산소의 농도가 높을수록 증가하며, 연료 중 N 비율이 높아지면 오히려 전화율이 저하되는 경향이 있다[13]. 그리고 공기희박 분위기 즉 환원분위기로 연소조건을 만들어 줄 경우 fuel NOx 저감에 더 효과적이다[15]. 석탄의 연소 중 NOx의 생성은 fuel N의 형태와 휘발생성물에 크게 영향을 받는다. Fuel NOx의 전구체는 fuel-N으로부터 생성되는 HCN과 NH_3이

† 교신저자 (e-mail: schong@kyonggi.ac.kr)

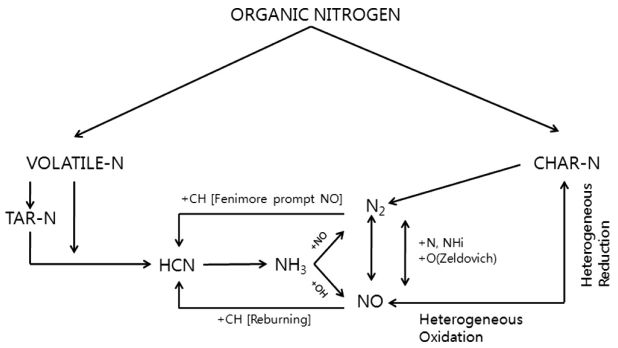

Figure 1. Fate of fuel-N in coal combustion[11].

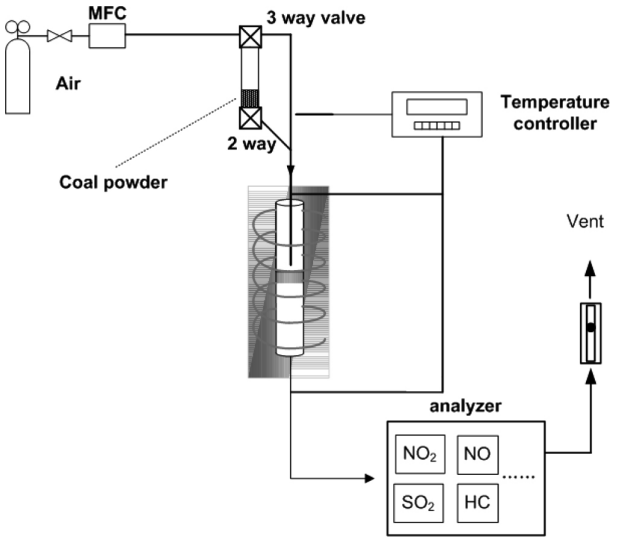

Figure 2. Schematic diagram of combustion system.

며 휘발분에 함유되어 있는 HCN 및 NH_3의 양은 구별이 명확하지 않은 실정이다[16]. 석탄 내에 함유되어 있는 성분 중 HCN의 양보다 NH_3의 양이 증가하면 NOx의 환원은 증가하고 HCN의 양이 증가하면 NOx의 환원은 감소하게 된다. 특히 저급탄인 경우에는 NH_3의 양이 HCN의 양보다 상대적으로 더 방출이 된다[17]. 상기에서 서술한 바와 같이 석탄의 연소시 다양한 조건들이 발생되는 fuel NOx에 영향을 미칠 수 있으며 이들에 의한 NOx의 증감현상을 잘 이용한다면 인체에 유해한 NOx 발생 저감을 유도할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 SM탄(인도네시아산)을 이용하여 fuel NOx의 생성에 영향을 미치는 여러 가지 인자 중에서 온도 및 주입 가스량 변화에 따른 NOx의 발생 특성을 조사하고자 하였으며, fuel NOx 중 volatile-N과 char-N 기원 NO를 분리하여 fuel N의 해리특성을 조사하고자 하였다.

2. 실 험

2.1. 실험장치

본 연구를 위한 실험장치의 개략도를 Figure 2에 나타내었다. Muffle furnace를 이용하여 등속 가열이 되도록 하였으며, 장치는 크게 가스 주입부분, 연소 부분, 그리고 반응가스 분석부분으로 구성되어 있다. 가스공급관은 전체를 스테인레스관으로 제작하였으며, 석탄이 연소로 유입되는 부분은 Y형 관으로 특수 제작하였고 3way 밸브와 2way 밸브를 이용하여 석탄을 유입하였다. 연소 부분은 내경 8 mm, 외경 10 mm, 높이 70 cm인 특수 석영관으로 제작하였으며, 석탄을 고정하기 위하여 석영솜을 사용하였다. 또한 압력에 의하여 솜이 하부로 밀려나지 않도록 석영관에 특수 처리를 하였다. 연소시 온도 측정을 위하여 석영솜 윗단 부분과 접촉되도록 K-type의 열전대를 설치하였으며, 연소로 내부에 동일한 형태의 열전대를 사용하여 온도를 조절하였다. 유입되는 O_2/Ar은 실린더로부터 mass flow controller (MKS Instruments, Co., USA)를 사용하여 유량을 조절하였다. 배출되는 NOx의 농도를 측정하기 위하여 NO, NO_2는 TESTO 360 (testo社, Germany)을 사용하였으며 분석기로 유입되기 전에 수분은 완전히 제거하였다.

Table 1. The Physical Analysis for SM Coal

Proximate analysis (wt%)			
Volatile matter	moisture	Fixed carbon	Ash
44.2	21.7	32.84	1.32

Ultimate analysis (wt%)				
C	H	O	N	S
70.49	5.92	21.18	0.67	0.06

Ash analysis (wt%)					
SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2
1.56	47.99	21.06	9.71	18.85	0.46

2.2. 실험 방법

대상탄인 SM탄의 연소 실험은 흔히 사용되는 drop tube furnace (DTF)를[15] 사용하지 않고 특수 제작된 실험장치를 사용하여 B1 (Batch combustion method 1), B2 (Batch combustion method 2)의 방법으로 수행되었다. B1 연소는 등속 가열이 가능한 연소로에서 석탄이 충전(充塡)된 상태로 10 ℃/min의 속도로 승온하며 연소되어 배출되는 연소가스를 측정한 것이고, B2를 이용한 연소는 공연소로 상태에서 로를 원하는 연소온도까지 승온하여 그 온도를 유지한 상태에서 석탄 일정량을 주입하고 연소시켜 배출되는 연소가스를 측정하는 방법이다.

석탄의 연소와 배출되는 fuel NOx의 특성 연구에 있어 주된 반응변수는 온도, 유량(공기량), 석탄의 입경이다. 연소온도의 영향을 알아보기 위하여 로(furnace)의 온도를 600～900 ℃까지 변화시켜 연소시켰으며, 유량은 0.5～1.5 L/min로 조절하였다. 또한 석탄 입경에 따른 영향을 조사하기 위하여 100 mesh 이하, 40～50 mesh, 10～20 mesh의 크기로 선별하여 NOx 배출특성을 분석 하였으며, fuel NOx 중 char-N to NOx와 volatile-N to NOx를 구분하기 위하여 석탄 시료를 inert한 Ar 분위기로 온도에 따라 건조하여 연소시켜 배출되는 NO의 특성을 조사하였다. 입경 영향을 제외한 모든 연소실험은 석탄 주입의 용이성을 위하여 40～50 mesh의 크기(약 359 μm)로 수행되었다. 또한 본 연구에서 사용된 SM탄의 원소분석은 TruSpec (LECO Co., USA)과 SC-432DR (LECO Co., USA)을 사용하였고, 공업분석은 automatic proximate analyzer (LECO Co., USA), 회분분석은 ICP-OES (Perkin-Elmer Inc., USA)를 사용하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. B1, B2 연소

대상탄인 SM탄의 연소 실험은 B1 연소와 B2 연소를 이용하여 수

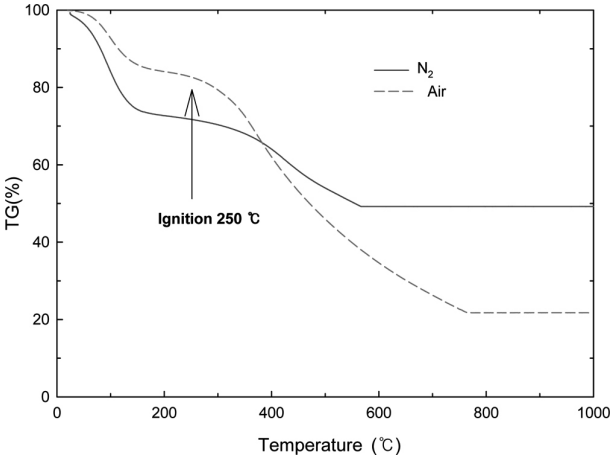

Figure 3. TG for non-isothermal combustion of SM coal.

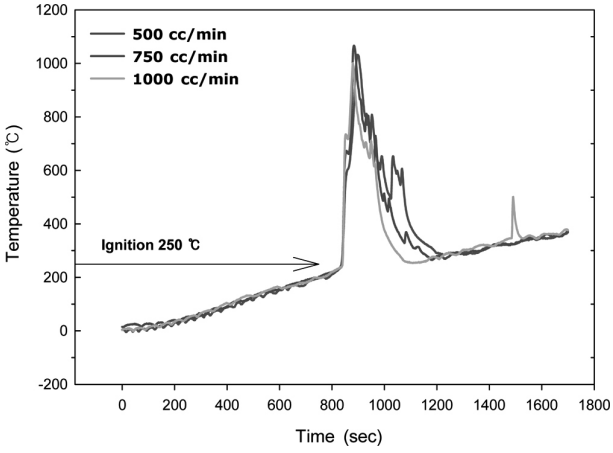

Figure 4. Upside temperature on coal B1 combustion according to gas flows (coal : 0.2 g of SM coal, flow : various (21% O_2/Ar)).

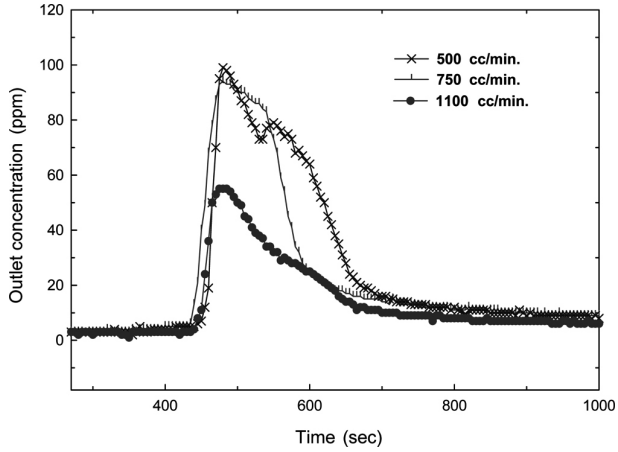

Figure 5. Outlet NO concentration on coal B1 combustion according to gas flows (coal : 0.2 g of SM coal, flow : various (21% O_2/Ar)).

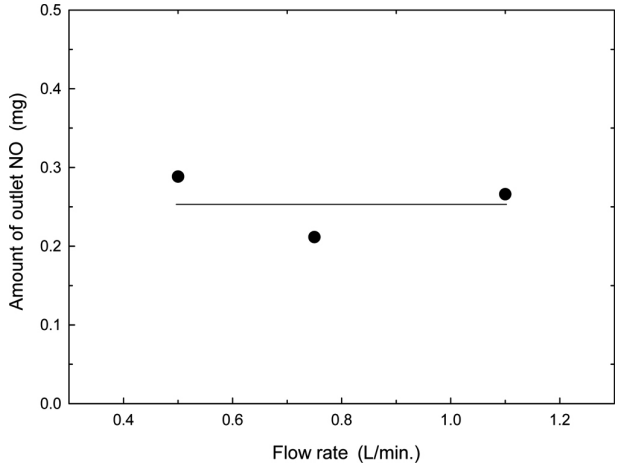

Figure 6. Outlet NO mass on coal B1 combustion according to gas flows (coal : 0.2 g of SM coal, flow : various (21% O_2/Ar)).

행되었다. B1 연소와 TG 실험을 동일한 조건으로 수행하여 착화온도 차이에 의한 연소 실험 장치의 신뢰성을 확보하고자 하였다. Figure 3은 SM탄의 공기 및 질소 분위기의 TG 실험결과이고, Figure 4는 B1 연소 실험시 온도 거동 결과를 나타낸 것이다. 실험결과에서 나타난 것처럼 약 250 ℃에서 두 실험 모두 동일하게 착화되어 연소되는 것을 확인할 수 있다. 또한 주입 가스량(21% O_2/Ar)이 증가할수록 온도 거동의 폭이, 즉 연소 종결 시간이 단축되는 것을 확인할 수 있으며 이는 가스량 증가에 따른 연소성 증가에 기인한 것으로 판단된다.

Figure 5는 B1 연소시 발생되는 NO의 농도 변화를 시간에 따라 나타낸 그림이다. 시간에 따른 NO의 농도는 착화된 후 발생하기 시작하여 연소가 끝나면서 농도가 감소하였으며, 주입 가스량이 증가할수록 발생되는 NO의 농도는 감소하였다.

Figure 6은 주입 가스량에 따라 발생된 NO를 질량으로 환산하여 나타낸 것으로 주입 가스량이 증가하여도 발생량은 크게 감소하지 않고 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 알려져 있는 공기량과 배출 NOx의 비례관계[18]와는 다른 결과인데, 일반적으로 연소되는 온도(700~900 ℃)보다 상대적으로 낮은 온도(250 ℃ 부근)에서 연소될 경우 주입 가스량이 증가하여도 해당온도에서 해리될 수 있는 N 성분이 일정하여 발생 NO가 가스량에 대해 영향 받지 않기 때문인 것으로 판단된다.

한편 연소온도에 따른 배출 NO의 분석을 위한 B2 연소법을 고찰하고자 하여 Figure 7에는 B2 연소를 이용한 연소의 대표적인 그래프를 나타내었다. Furnace를 700 ℃로 유지한 상태에서 석탄을 주입하였을 때 연소에 의한 발열로 온도의 상승과 NO, SO_2, CO_2가 발생하고 O_2는 감소하였다가 연소가 끝난 후에 다시 원래의 농도를 찾아가는 거동을 나타내고 있다. 이는 석탄이 잘 연소되어 나타난 결과라 할 수 있다. 한편 NO_2는 발생되지 않아 본 연구에서는 NO_2의 영향은 배제하였다.

3.2. 연소온도, 주입 가스량에 따른 배출 NO 특성

B2 연소법을 이용하여 연소온도에 따른 SM탄의 연소시 배출 NO의 특성을 조사하였다. Figure 8은 석탄을 주입하여 연소될 때의 석탄의 온도를 나타낸 것으로 높은 온도에서 연소시킬수록 SM탄의 자체 발열량에 의하여 온도가 더 증가하는 경향을 나타내고 있다. Figure 9는 연소온도에 따른 발생 NO의 거동을 나타낸 그림인데 B2 연소법의 대표도인 Figure 7과 마찬가지로 연소시 발열에 의한 온도상승과 동일한 시간대에서 NO의 발생이 관찰되고 있다. 다만 각 연소온도에 따라 상이한 NO 발생을 나타내고 있어 온도에 따라 정량적으로 표현하기 위하여 Figure 10에 발생 NO를 질량으로 환산하여 나타내었다. SM탄 연소시 발생되는 NO는 0.75 L/min의 주입 가스량 조건에서 연

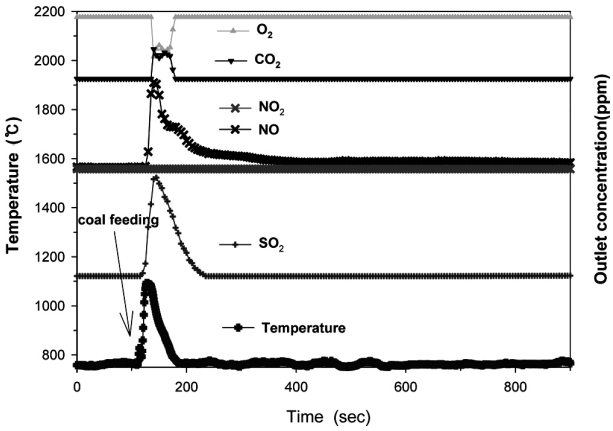

Figure 7. Outlet concentration and temperature profile on coal combustion at 700 ℃ using B2 combustion (coal : 0.2 g of SM coal, 21% O_2/Ar 750 L/min.).

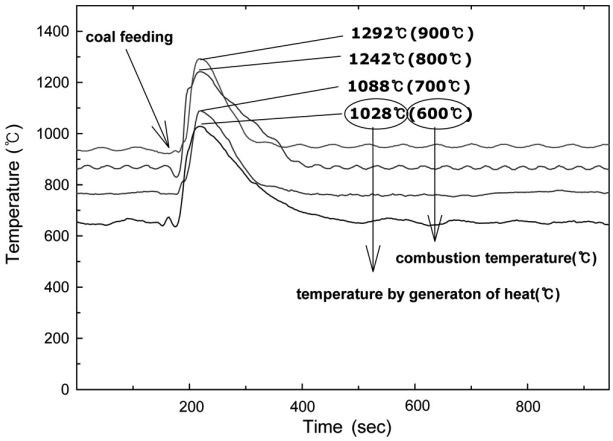

Figure 8. Upside temperatures on coal combustion according to temperatures using B2 combustion (coal : 0.2 g of SM coal, flow : 0.75 L/min. 21% O_2/Ar).

소온도 700 ℃까지 발생 NO가 증가하는 경향을 나타내다가 연소온도 800 ℃ 영역에서 다소 감소하게 되고 900 ℃ 영역에서는 급격한 감소를 나타낸다. 이는 1차 NOx 환원기술인 연료 과잉 영역(fuel rich zone, λ < 1)에서 존재하는 탄화수소계 중간생성물질에 의해 NO가 N_2로 환원되는 메카니즘[19] 즉, Figure 11에서의 경로 1로 반응이 진행되는 결과라 판단되고, 이의 확인을 위하여 Qudrupole mass (pfeiffer vacuum社, Germany)를 이용한 실험을 수행하였다.

Figure 12는 같은 연소조건인 0.75 L/min의 주입 가스량으로 연소온도에 따른 N_2의 생성량을 나타낸 그림이며 Y축의 intensity는 석탄 연소시에 연소온도에 따라 발생되는 N_2의 양을 상대적으로 비교하기 위한 양을 의미한다. 실험결과 0.75 L/min의 주입 가스량에 대한 연소시 연소온도가 증가할수록 생성되는 N_2의 양은 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 상기의 1차 NOx 환원기술의 메카니즘에 비추어 볼 때 연소온도가 증가할수록 환원분위기가 증가하여 N_2의 발생이 증가하였다고 할 수 있다. Figure 13은 유량과 온도를 각각 0.75 L/min와 900 ℃로 고정한 조건에서 가스를 7%, 14%, 21% O_2를 사용하여 연소하였을 때 생성되는 상대적 N_2의 양을 나타낸 그림이며 생성되는 N_2는 산소농도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 연소온도가 증가할수록, 산소농도가 희박할수록 환원분위기 증가에 의해

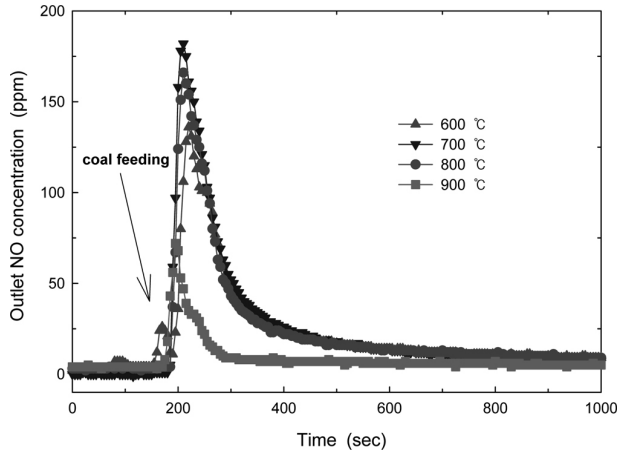

Figure 9. Outlet NO concentration on coal combustion according to temperatures using B2 combustion (coal : 0.2 g of SM coal, flow : 0.75 L/min. 21% O_2/Ar).

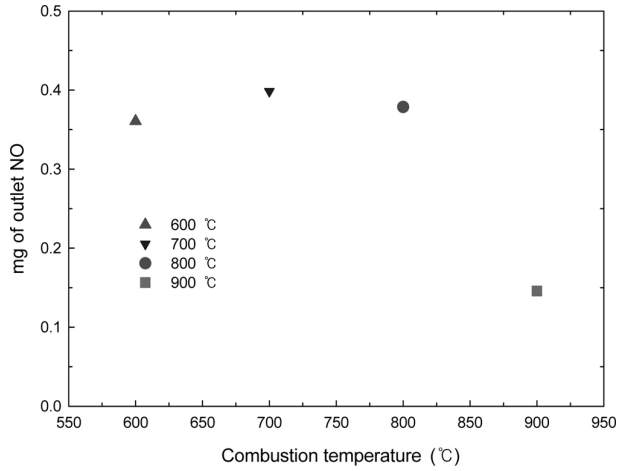

Figure 10. Outlet NO mass on coal combustion according to temperatures using B2 combustion (coal : 0.2 g of SM coal, flow : 0.75 L/min. 21% O_2/Ar).

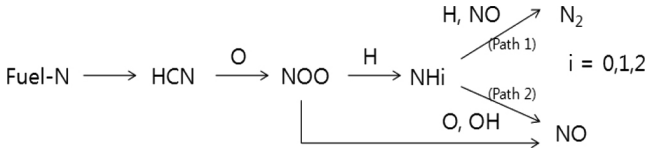

Figure 11. Mechanism of NOx formation and reduction.

fuel NO의 N_2로의 전화는 증가하게 된다고 할 수 있다. 이에 의하여 상기 Figure 10에 나타난 900 ℃ 영역에서의 NO 발생량의 감소는 Figures 12, 13의 결과에 의해 잘 설명될 수 있다.

한편 일반적으로 연료과잉 조건보다 공기과잉 조건으로 연소하였을 경우 발생 NOx가 증가하고 과잉공기율 즉, 주입 공기량이 증가할수록 발생되는 NOx는 증가한다고 알려져 있다[13,18]. 따라서 본 연구에서도 주입되는 가스량(21% O_2/Ar)을 증가시켰을 경우 fuel N 성분이 NO로 전화되는 것이 증가하여 전체 발생 NO가 증가하는지 여부를 확인하기 위하여 주입 가스량을 증가하여 Figure 14에 나타내었다. 실험결과 Figure 11에 나타난 경로 2에 의하여 주입 가스량이 증가하면 발생 NO가 연소온도와 함께 증가하는 것을 확인할 수 있었고,

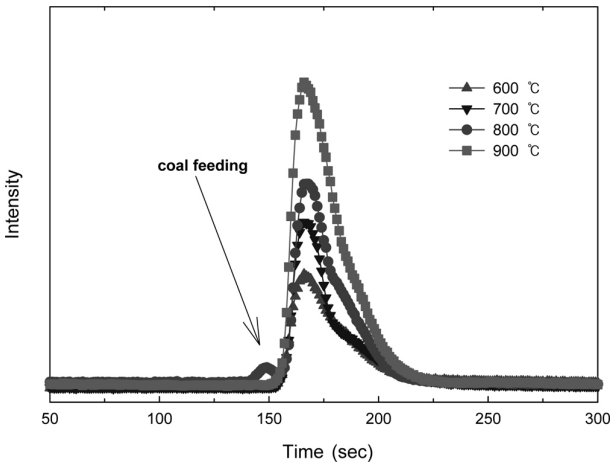

Figure 12. Converted fuel N to N_2 intensity on coal combustion according to temperatures using B2 combustion (coal : 0.2 g of SM coal, flow : various (21% O_2/Ar)).

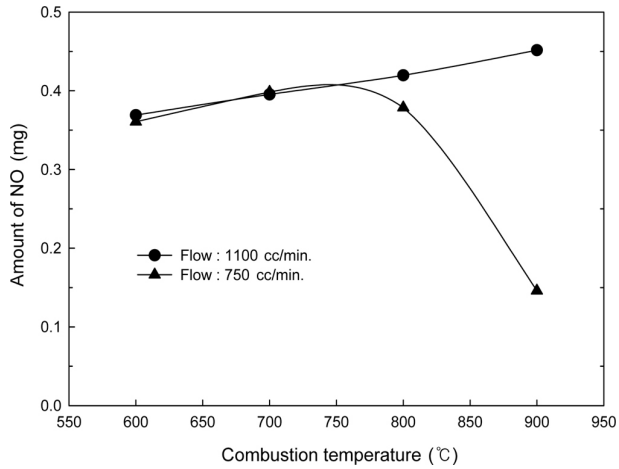

Figure 14. Outlet NO mass on coal combustion according to temperatures using B2 combustion (coal : 0.2 g of SM coal, flow : various (21% O_2/Ar)).

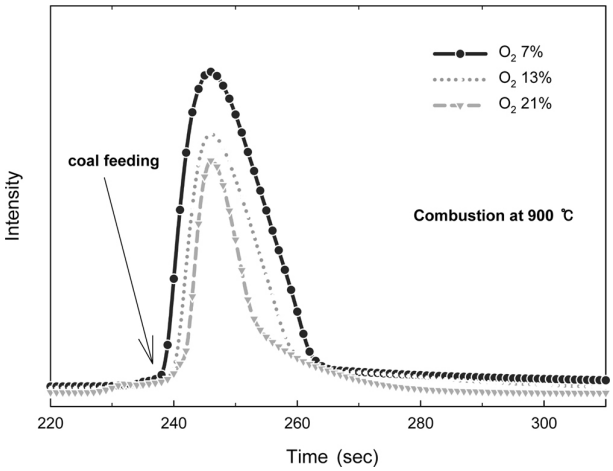

Figure 13. Converted fuel N to N_2 intensity on coal combustion according to flows using B2 combustion (coal : 0.2 g of SM coal, flow : 0.75 L/min. various O_2/Ar).

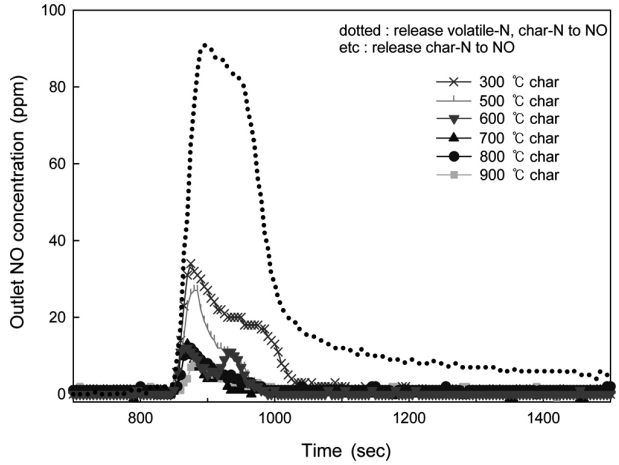

Figure 15. Outlet NO concentration on coal & char B1 combustion according to treated temperatures (coal : 0.2 g of SM coal, flow : 0.75 L/min. 21% O_2/Ar).

이는 주입되는 산소량의 증가에 의하여 fuel N이 NO로 전화되는 반응이 증가한 것이라 할 수 있다. 또한 연소온도 600, 700 ℃에서 발생 NO의 질량(mg)이 오차범위 내에서 크게 증가하거나 감소하지 않고 일정한 경향을 나타내는 것은 해당 온도에서 해리될 수 있는 fuel-N의 한계에 의한 결과라 판단된다.

3.3. Char-N, volatile-N의 fuel NO로의 전화

Fuel NOx는 Figure 1의 (A) 경로로 휘발분과 함께 배출되는 volatile-N[7]과 (B) 경로로 char의 연소에 의해 방출되는 char-N[20]으로 나뉜다. 또한 volatile-N은 fuel NOx의 약 50～70%이고, char-N에 기원하는 NOx는 20～30% 정도이다. 하지만 이는 석탄의 성상이나 종류에 따라 달라질 수 있다. 따라서 SM탄의 fuel NOx 발생시 volatile-N과 char-N에 의한 NOx 발생을 구분하고자 하였다. 실험은 시료를 inert한 Ar으로 건조하여 온도에 따라 volatile-N 성분을 배제하고자 하였다. 온도별로 volatile-N 성분이 배제된 char들과 원탄의 B1 연소를 통하여 char-N의 NO 해리와 원탄 total fuel-N의 NO 해리를 확인하였다. Figure 15에 원탄과 온도별로 제조된 char들의 연소시 배출 NO를 나타내었다. 그리고 Figure 16에 발생 NO의 명확한 구분을 위하여 질량으로 환산한 그림을 나타내었다. Figure 16에 나타난 것과 같이 600 ℃ 이상에서 제조된 char들의 경우 모두 일정한 NO 발생을 나타내고 있는데 이는 volatile-N이 모두 배제되어 char에서 발생되는 NO만이 관찰되는 것으로 판단된다. 따라서 원탄의 NO 발생량과 char-N에 의한 NO 발생량을 제외한 부분이 volatile-N에 의한 NO의 발생이라 할 수 있으며 SM탄의 경우 발생되는 fuel NOx의 대부분이 volatile-N에 의존한다고 할 수 있다.

3.4. 석탄 입경의 영향

석탄 입자 크기가 발생 대기오염물질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 입경에 따른 연소실험을 수행하였다. 일반적으로 화격자연소는 수십 mm의 괴탄을 사용하고, 유동층연소가 1～3 mm의 분탄을 사용하며 미분탄연소는 평균 100 μm 이하의 미분탄을 사용한다[13]. 따라서 본 연구에서는 유동층연소에 사용되는 석탄크기(1000～2000 μm, 10～18 mesh)와 미분탄크기(106 μm 이하, 100 mesh 이하), 그리고 중간 크기(약 359 μm, 40～50 mesh)의 석탄입자에 대하여 B1 연소실험을

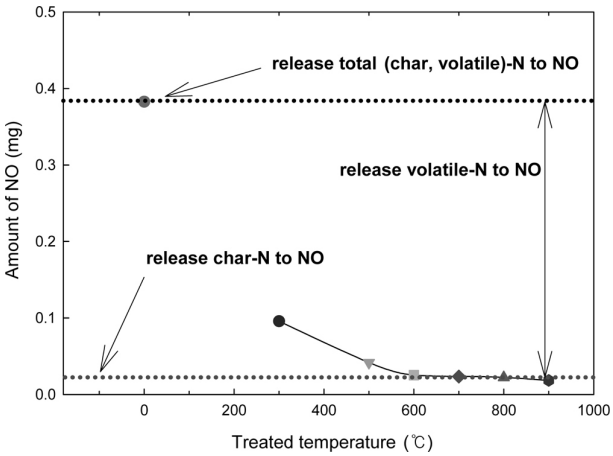

Figure 16. Outlet NO mass on coal & char B1 combustion according to treated temperatures (coal : 0.2 g of SM coal, flow : 0.75 L/min. 21% O_2/Ar).

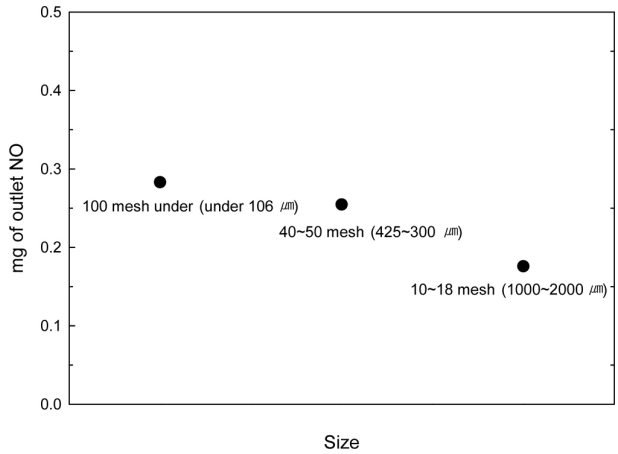

Figure 17. Outlet NO concentration on coal B1 combustion according to coal sizes (coal : 0.2 g of SM coal, flow : 0.75 L/min. 21% O_2/Ar).

수행하였다. Figure 17에서 나타난 결과와 같이 입경이 작아질수록 발생되는 NO는 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 입자 size 감소에 의한 연소성 증가에 의한 것이라 판단되며 연소온도, 주입 가스량 등의 연소성에 영향을 미치는 인자와 NO 발생 특성과의 관계와 잘 부합한다.

4. 결 론

연소온도, 주입 가스량, 석탄 size에 따른 SM탄 연소시 발생하는 NOx의 배출 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) SM탄 연소 시 연소온도 및 주입 가스량이 증가할수록 발생되는 NOx가 증가하는 경향을 나타내지만 고온, 산소 희박 분위기(환원분위기)에서는 fuel-N이 상당 부분 N_2로 환원되는 것에 의해 전체 NOx 발생량이 감소한다.

2) 제조조건에 따른 char 연소 실험결과에 의하여 SM탄의 연소시 발생하는 NOx 발생의 기원 N 성분은 char-N의 NO로의 전화보다는 volatile-N 성분의 전화에 의해 결정되므로 SM탄의 연소시 발생 NOx는 volatile N 성분에 의한 것이라 할 수 있다.

3) 탄 입경이 감소할수록 NO 발생이 증가하고 입경이 증가하면 NO 발생이 감소하는 경향을 나타내는데 이는 입자 size 감소에 의한 연소성 증감에 의한 것이라 판단되고, 상기의 연소성에 영향을 미치는 인자 즉, 연소온도, 주입 가스량과 NO 발생 특성과의 관계와 잘 일치한다.

감 사

본 논문은 지식경제부의 전력산업연구개발사업으로 수행된 과제의 결과로서 지원기관에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 국가에너지위원회, 제 1차 국가에너지기본계획 (2008).
2. Korea power exchange, 2008년도 발전설비현황, Korea power exchange Planning & Administration division, Power planning department, Seoul (2008).
3. J. Biener, M. Baumer, J. Wang, and R. J. Madix, *Surf. sci.*, **450**, 12 (2000).
4. R. P. Vander Lans, P. Glarborg, and K. Dam-Johansen, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **349**, 23 (1997).
5. H. Bosch and F. Janssen, *Catal. Today*, **2**, 369 (1988).
6. J. N. Armor, *Catal. Today*, **26**, 99 (1995).
7. P. Zelenka, W. Cartellieri, and P. Herzog, *Appl. Catal.*, **10**, 3 (1996).
8. Y. B. Zel'dovich, *Acta Phys. Chim.*, *URSS*, **61**, 654 (1946)
9. C. P. Fenimore, 13th Symp. on combustion, The combustion institute, p. 373 (1971)
10. C. P. Fenimore and G. W. Jones, *J. Phys. Chem.*, **61**, 654 (1957).
11. J. P. Smart and D. J. Morgan, *Fuel*, **73**, 1437 (1994).
12. R. R. Raine, C. R. Stone, and J. Gould, *Combust. Flame*, **241**, 102 (1995).
13. K. Y. Kim, S. Y. No, and Y. J. Kim, 최신 연소공학, Donghwa technology publishing, Seoul (2003).
14. S. Niksa, *Energy Fuels*, **9**, 467 (1995).
15. W. Han, C. S. Park, S. I. Choi, I. H. Lee, and H. S. Yang, *The Korean Society of Combustion*, **4**, 85 (1999).
16. S. L. Chen, M. P. Heap, D. W. Pershing, and G. B. Matin, 19th Symp. on combustion, The Combustion Institute, 1271 (1982).
17. J. E. Johnsson, *Fuel*, **73**, 1398 (1994).
18. K. H. Han, D. J. Oh, J. I. Ryu, and G. T. Jin, *Trans. of the KSME(B)*, **24**, 677 (2000).
19. G. H. Jang, I. G. Chang, C. Y. Sun, M. H. Chon, and G. M. Yang, 19th KOSKO Symp., 149 (1999).
20. W. Li, I. M. Lazar, Y. J. Wan, S. J. Butala, Y. Shen, A. Malik, and M. L. Lee, *Energy Fuels*, **11**, 945 (1997).