<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.12.963 ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

DTF 를 이용한 석탄 회분 함량에 따른 미연분 및 NOx 배출 특성 연구

김상인* · 이병화** · 안기주* · 김만철*** · 김승모** · 전충환*†
* 부산대학교 기계공학부, ** 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터, *** ㈜한국남부발전

Effect of Ash Content on Unburned Carbon and NOx Emission in a Drop Tube Furnace

Sang-In Kim*, Byoung-Hwa Lee**, Ke-Ju An*, Man-Cheol Kim***, Seung-Mo Kim**
and Chung-Hwan Jeon*†
* Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.
** Pusan Clean Coal Center
*** The Korea Southern Power Company

(Received February 25, 2014 ; Revised August 20, 2014 ; Accepted August 24, 2014)

Key Words: High-ash Coal(고회분탄), Unburned Carbon(미연탄소분), NOx(질소산화물), Particle Size(입자크기), Air-staged Combustion(공기다단연소)

초록: 본 연구는 고회분탄의 최적화된 연소 조건을 알아보기 위해 회분 함량이 각기 다른 네 종류 석탄의 연소 시 배출되는 NOx및 미연분 특성을 알아보았다. 실험은 DTF(Drop Tube Furnace)를 통해서 다양한 입자크기조건 및 공기다단방식을 도입하여 수행하였다. 결과로 회분의 함량이 증가할수록 미연분이 증가하며, 입자크기가 증대될수록 미연분에 대한 회분의 영향이 명확해짐을 확인하였다. 또한, 회분의 함량이 증가할수록 Char-NOx가 감소하며, 입자크기가 감소할수록 NOx의 배출이 감소하는 것을 확인하였다. 본 연구는 고회분탄의 NOx를 저감하는 방법으로 공기다단방식의 적용을 제안하며 전단 연소 영역의 공기과잉률 변화를 통한 최적화된 연소조건을 제시하였다.

Abstract: Four coal sources that had different ash contents were evaluated in a drop tube furnace (DTF). Combustion experiments were conducted by using several sources with different particle sizes and excess air ratios under air-staging conditions to determine the optimized combustion conditions of high-ash coal, with an emphasis on the combustion efficiency and NOx emissions. The results show that the higher ash content results in a large amount of carbon remaining unburned, and that this effect is dominant when the largest particle size is used. Furthermore, the ash content of coal does affect the Char-NOx concentration, which decreases with the particle size. The results of this study suggest that an air-staged system can be useful to reduce the NOx emissions of high-ash coal and that control of the air stoichiometric ratio of the primary combustion zone (SR1) is effective for reducing NOx emissions, especially by considering unburned carbon contents.

1. 서 론

대한민국은 전력의 50%를 석탄 연소를 통해 생산하는 주요 석탄 소비국이다. 석탄은 기타 화석연료에 비해 매장량이 풍부하고 가격이 저렴하여 늘어만 가는 전력 수요를 충족시켜줄 미래의 핵심 발전자원 중 하나이다.

고회분탄은 일반적으로 회분의 함량이 20wt%를 초과하는 석탄을 총칭한다. 고회분탄은 보일러 내 연소 시 높은 회분함량으로 인해 석탄 자체의 연소성을 의미하는 연소 속도 및 연소 효율의 저하와 연소 후 연소로 내부에 발생하는 회분으로 인한 슬래깅(Slagging), 파울링(Fouling) 등의 문제가

† Corresponding Author, chjeon@pusan.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

심각할 가능성이 높다는 단점을 가지고 있다. 국내 화력 발전소들은 비교적 양질의 기준을 만족하는 석탄들을 선정하여 주 연료로 사용해왔다. 그러나 국제 석탄 시장의 변화와 빠른 전력수요 증가에 따른 에너지자원의 가격 폭등은 발전연료로써 양질의 연료만을 선택적으로 사용할 수 있는 환경을 제공하지 않고 있다. 따라서 기존에 사용하지 않았던 고회분탄을 비롯한 저등급의 석탄을 이제는 현실적인 연료로써 받아들여 효율적으로 사용할 수 있는 방안을 마련해야만 하는 상황이 되었다. 또한 저등급 석탄을 사용하는 국내 발전소의 운영기술은 향후 귀중한 자산이 될 것이다.

Biswas 등[1]은 TGA를 이용한 실험으로 회분 함량이 다른 두 종류의 석탄을 혼소하여 회분 함량에 따른 연소 효율이 선형적인 결과를 보이지 않는다는 사실을 제시하였다. Ikeda 등[2]은 아역청탄과 고수분탄의 연소 특성을 연구하고 석탄 내 수분의 함량이 연소 효율과 NOx배출에 영향이 있음을 확인하였다. Kurose 등[3]은 고회분탄의 연소 거동을 조사하여 회분의 함량이 증가할수록 연소 효율이 감소한다는 것을 제시했으며, Yan 등[4]은 고회분탄 내부의 Fe, Al, Na 및 Ca성분이 연소성을 저감시키는 결과를 확인하였다. 또한, Pusan Clean Coal Center(부산대학교 화력발전에너지분석기술센터, PCCC)에서는 연소 Kinetics해석을 수행하여, 여러 고회분 탄종의 활성화 에너지 및 빈도인자를 도출하였다.[5]

본 연구에서는 석탄이 함유하고 있는 회분의 함량이 연소 특성에 끼치는 영향을 조사하여, 고회분탄이 사용되기에 최적화된 연소 조건을 제시하는 것을 목표로 한다. 또한, 공기 다단 연소 방식의 적용과 석탄 입자 크기의 변화가 미연분 및 NOx의 배출에 주는 영향을 평가하는 것에 중점을 두어 수행되었다.

2. NOx제어 방법

2.1 NOx생성 및 저감

일반적으로 연소 중 배출되는 NOx는 크게 Thermal, Prompt, Fuel NOx의 세 가지로 분류된다. Thermal NOx는 대부분의 연소 과정 중 가장 큰 부분을 차지하는 경우로, 공기 중의 산소 및 질소가 고온에서 서로 반응하여 NOx를 생성한다. 그러나 석탄 연소의 경우 배출되는 NOx의 대부분은 Fuel NOx로써, 석탄 속에 함유되어 있는 질소가 공기 중의 산소와 결합하여 NOx를 생성한다. Prompt NOx는 상대적으로 그 양이 매우 적어 본 연구에서는 고려되지 않았다.

Fuel NOx의 형성은 선행연구자들에 의해 제안된 전체 반응식 모델로 예측되며 Volatile N과 Char N의 반응을 모두 포함한다. 모델에 따르면 Volatile N은 연소 과정 중 중간생성물 HCN(90%) 및 NH_3(10%)로 변환되는 과정을 거쳐, N_2혹은 NOx를 생성한다. 또한, Char N이 산화되어 생성되는 NOx는 Char가 함유하고 있는 C와 N의 상대적인 분포도에 따른 인자로 인해 석탄의 연소 정도에 비례하여 증가한다. 즉, 탈휘발과정 후 생성된 Char속의 N이 불균일하게 산화되어 NOx를 생성한다.[6]

이러한 Fuel N과 Fuel N에 의해 생성되는 NOx의 저감은 De Soete[7]에 의해 제안된 식 (1), (2)로 인해 제어된다. 또한 이 식들은 공기 다단 연소 방식의 적용을 통한 NOx저감 시스템 설계의 근간이 된다.

$$HCN + O_2 \rightarrow NO + \ldots \quad (1)$$

$$NO + HCN \rightarrow N_2 + \ldots \quad (2)$$

2.2 연소 제어 기술

대기 오염 물질의 배출은 석탄 화력 발전과 관련된 주요 문제 중 하나이다. 특히 NOx에 관한 규제가 엄격해 짐에 따라 NOx의 배출을 제어하는 것이 석탄 보일러를 설계하고 수정 하는 데에 중요한 고려 사항으로 여겨지고 있다.

NOx배출의 저감은 일반적으로 연소 중 제어와 연소 후 제어의 두 가지 접근을 통해 실현된다. 연소 중 제어는 연소 조건의 수정을 통해 직접적인 연소 과정 중 NOx의 배출을 줄이는 방법이며, 연소 후 제어는 배출되는 배기 가스에 촉매제를 투입하여 선택적으로 NOx를 반응 시키는 방법이다. 석탄 보일러에서의 이러한 연소 시스템의 수정은 비용을 절약하고 독립적으로 NOx를 저감하여 규제조건을 만족시키는 결과를 보인다. 또한 NOx에 관한 엄격한 규제가 계속될 때, 두 연소 제어 기술의 혼합을 통한 통합적인 방안은 하나의 기술을 적용했을 경우보다 비용 절감이 확실하다. 연소 중 제어기술의 하나로써 많은 연구자들은 공기 다단 연소를 통한 NOx저감 기술을 발표하였다.[8~13] 노내 공기 다단 연소 기술은 연소 공기를 1차 공기와 Over-fire air(OFA)로 나누어 주입하는 것이다. 전체 연소 공기 중 70~90%는 1차 공기로써 연료와 혼합되어 연소되며, 공기과잉률 1이하의 과잉 연료 분위기를 형성하여 상대적으로 낮은 온도 및 산소 농도 조건을 통해 Thermal NOx및 Fuel NOx의 형성을 저감한다. OFA역시 상대적으로

낮은 온도 영역을 형성하여 Thermal NOx를 저감한다.[14]

3. 실험적 연구

3.1 시료 선정

석탄 내 회분의 함량이 연소 특성에 끼치는 영향을 확인하기 위해 현재 국내 화력 발전소에서 사용하고 있는 네 종류의 역청탄을 선정하여 실험이 진행되었다. 석탄은 6, 11, 17, 23 wt%의 각기 다른 회분 함량을 지닌 Gunvor, Glencore, Noble 및 ECM이 시료로써 선정되었으며, 연소 시 NOx의 배출과 미연분의 함량을 분석하였다. 이들 네 탄종은 회분 함량을 제외한 나머지 공업분석 인자의 수치가 매우 비슷하며, 각각의 공업분석 및 원소분석 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Properties of coals used in this study

	Parameter	Gunvor	Glencore	Noble	ECM
Proximate analysis (wt%, as received)	Moisture	9.9	9.3	2.5	2.5
	Volatile	35.8	33.0	33.2	29.1
	F. Carbon	48.0	47.1	47.3	45.8
	Ash	6.3	10.6	17.0	22.6
	Fuel ratio	1.34	1.43	1.42	1.57
	HHV (kcal/kg)	5,764	6,049	6,215	5,843
Ultimate analysis (wt%, DAF)	C	77.80	79.57	72.60	81.58
	H	5.66	5.11	5.73	5.30
	O	14.43	12.20	18.90	9.74
	N	1.72	2.42	1.41	2.13
	S	0.40	0.74	1.35	1.23

Table 2 Input parameters considered in this study

Parameters		
Coal feeding rate (g/min)	0.15	
Total flow rate (lpm)	5	
Setting temperature (°C)	1300	
Coal size (μm)	180-150, 150-90, 90-75, 75-45	
Residence time (sec)	1.5	
Stoichiomeric ratio (by air staged)	1^{st}-zone	2^{nd}-zone
	1.16	1.16
	1	1.16
	0.85	1.16
	0.7	1.16

3.2 실험장치 및 조건

본 연구에서는 선정된 석탄들의 연소특성을 알아보기 위하여 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터(PCCC)에서 설계된 DTF를 사용하여 실험을 수행하였다. DTF는 균일한 온도를 유지하며 다양한 온도 영역에서 실험을 할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 또한 물리적, 화학적으로 복잡한 석탄 연소 반응을 장소에 크게 구애 받지 않고 안정적으로 수행할 수 있다는 점에서 많은 연구자들에 의해 사용되고 있다. DTF를 통한 실험은 연소과정 속의 이론적 이해를 위한 접근에 용이하며, 손쉽게 실험 조건을 수정할 수 있어 보다 실제적인 연소 상황을 모사할 수 있게 한다.

본 연구에서 사용된 DTF는 주입부와 반응부, 그리고 포집부의 세 부분으로 이루어져 있으며 주입부에는 진동기와 시린지 펌프, STS tube 및 실린더로 이루어진 시료 공급 시스템이 별도로 설계되어 있다. 진동기를 통해 진동하고 있는 입자를 수송 가스가 STS tube를 통해 반응로 안으로 이동시킨다. 또한, 시린지 펌프를 이용하여 실린더를 일정한 속도로 상승시킴으로써 실린더 내의 시료와 튜브의 간격을 유지시켜 안정적인 공급률로 시료를 공급한다.

반응부는 연료와 반응 가스가 만나 화학반응이 일어나는 곳이다. SiC heater를 사용하여 일정한 온도를 유지하게 되며, 최대 1500°C까지 온도 상승이 가능하다.

포집부는 포집용 probe와 싸이클론 및 필터로 이루어져 있다. 연소 후의 시료를 포집하는 부분으로 냉각수가 흐르면서 입자가 더 이상의 추가적인 반응을 일으키지 않도록 차단한다.[13]

본 연구는 두 가지의 실험과정으로 진행되었다.

먼저, 석탄 입자 크기의 변화가 미연분과 NOx의 배출에 미치는 영향을 연구하였으며, 각각의 시료는 180, 150, 90, 75 및 45μm의 Sieve를 사용하여 분류되었다. 또한, 실제 연소로에서 사용되는 공기 다단 연소 방식을 적용하여 미연분 및 NOx의 배출을 조사하였다.

공기 다단 연소 방식의 적용을 위해 DTF시스템이 수정되었다. STS tube를 통해 별도의 산소를 주입시킴으로 DTF의 반응 영역을 두 부분으로 나누어 각각의 공기 비를 다르게 설정하여 공기 다단 방식을 모사하였다.

공기과잉률은 석탄이 함유하고 있는 연소성 성분들을 고려하여 1kg의 석탄이 연소되기 위해 필요한 이론적인 O_2분율을 결정하는 무차원수이며, 이론적인 O_2분율은 $F_{O2,\,stoi} = 18.6667C + 56H + 16N + 7(S-O)$로써 정의된다. 여기서의 C, H, N, S 및 O는 석탄이 함유하고 있는 각 연소성 성분들의 분

율이 된다.[15]

전체적인 O_2농도를 6%로 설정하여 공기과잉률 1.16의 실제 발전소에서 사용하는 연소 조건을 동일하게 적용하였으며, 공기 다단 연소 방식의 적용을 위해 전단 연소 영역의 공기과잉률을 1, 0.85, 0.7의 별도의 연소조건으로 설정하여 실험을 수행하였다. 전체적인 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

각 시료 연소 후의 미연분 계측을 위한 장비로써 Thermo-gravimetric analysis(TGA, TA Q600-SDT)를 사용하였고, 미연분은 Ash trace method를 이용하 여 계산되었다. Ash trace method는 연소 후 DTF 포집용 probe에서 포집된 시료의 양이 실제의 양에 미치지 못한다는 사실을 고려한 것으로, 연소 전 후 시료 중 회분의 절대적인 함량은 동일하다는 원리를 기본으로 하여 실제 미연분의 함량을 계산하는 방법이다.[16]

배출되는 NOx의 농도는 Eurotron Gas analyzer를 통해 측정되었으며, 전체적인 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 석탄 입자 크기의 영향

Fig. 2는 회분 함량이 각기 다른 네 종류 석탄들의 DTF연소 후 배출된 미연분 함량을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 이러한 NOx배출을 고려한 고회분탄의 최적화된 연소 조건을 보다 공학적으로 제시하기 위해, 석탄 내부의 Fuel N이 NOx로 전환되는 양을 전환 비 CR을 통하여 수 치적으로 나타내었다. 미분탄의 연소 과정 중 생성되는 NOx의 대부분은 석탄 내부의 N에 의해 생성되기 때문에, 이러한 매커니즘에 따라 제안된 CR분석법은 미분탄 질소산화물 연구에 빈번하게 사용되어 왔으며 Fuel ratio(FR), Fuel-bound nitrogen(FN)을 고려한 식 (3)과 같이 표현된다.[17]

$$CR = \frac{\text{연소 후 배출되는 NOx의 농도 [ppm]}}{\text{Fuel N이 모두 전환되었을 때의 NOx 농도 [ppm]}} = \frac{C_{NOx}}{\left(\frac{2.24\times10^{-2} \times \frac{FN}{1.4\times10^{-2}}}{V_{dry}} \right)} \times 10^2 \quad (3)$$

식 중의 C_{NOx}는 연소로 출구에서의 NOx농도를 뜻하며, V_{dry}는 주입되는 석탄 량에 대비한 건조 공기의 유입속도를 나타낸다 [Nm^3/kg].

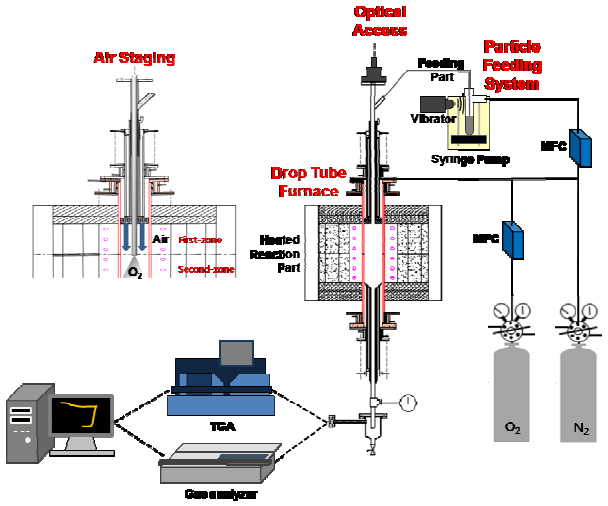

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

그래프에서 알 수 있듯이, 전체적으로 회분 함량의 증가에 따른 미연분 함량의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인하였다. 하지만 석탄의 입자 크기가 작아질수록 회분 함량에 따른 미연분 함량의 차이가 점점 미미해짐을 확인할 수 있다. 즉, 회분 함량이 높은 석탄들이 그렇지 않은 석탄들에 비해 연소 시 효율이 저하됨을 의미한다. 고회분탄의 연소성 저하는 회분의 함량이 증가함에 따라 회분 자체가 가지고 있는 전체적인 열용량이 증가하고, 상대적으로 많은 회분이 석탄 내부의 가연소영역을 둘러싸 촤의 산화반응을 직접적으로 방해하는 두 가지의 원인으로 해석된다.[3,5] 또한, 이러한 효율 차이는 석탄 입자의 크기를 줄임으로써 산화되는 입자 반응 표면적을 늘리고 연소성을 증가시키는 방안으로 개선될 수 있음을 나타낸다.

본 연구에서는 또한 석탄 회분 함량에 따른 NOx의 배출을 확인하였으며, 이를 Fig. 3에 표시하였다. 결과로는 비선형적인 CR결과값을 통해 회분 함량의 변화가 NOx배출에 미치는 어떠한 영향도 확인 할 수 없었다. 앞서 기술한 것과 같이 석탄 연소 과정 중 생성되는 NOx의 대부분은 Fuel NOx이며, Fuel NOx는 일반적으로 식 (1)에서와 같이 중간생성물(HCN 또는 NH_3)과 O_2의 반응으로 인해 형성된다. 이러한 과정의 반응속도를 지배하는 대표적인 인자는 반응 가스의 온도 및 주위 O_2의 분율이 된다. 미분탄의 연소 시 연소로 출구에서의 반응 가스 온도 및 O_2농도는 시료의 회분 함량과는 독립적인 값을 취하며,[3] 이는 회분함량의 변화가 중간생성물의 형성에 아무런 영향을 끼치지 않음을 나타낸다. Hirofumi 등은[18] 고회분탄 연소에 따른 NOx전환율, CR값을 역청탄의 결과와

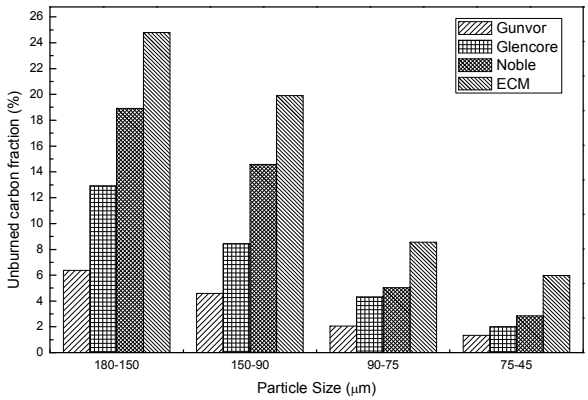

Fig. 2 Unburned carbon fraction corresponding to various particle sizes

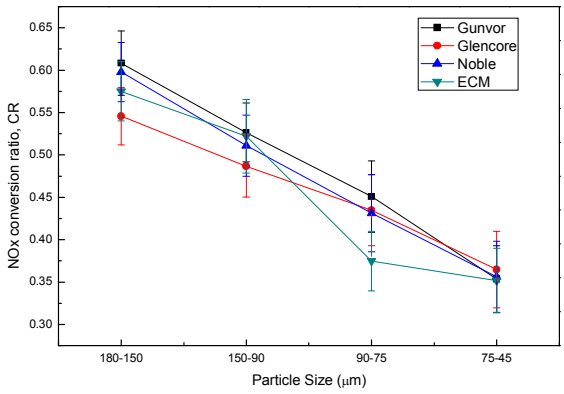

Fig. 3 NOx conversion ratio corresponding to various particle sizes

비교하여 NOx의 형성은 단지 석탄의 종류에 따른 고유한 반응에 지배된다는 결과를 발표하였다.

또한, 석탄 입자의 크기가 감소할수록 이러한 NOx의 배출량이 선형적으로 감소하는 결과를 Fig. 3에서 확인 할 수 있었다. 이는 앞서 기술한 것과 같이 석탄의 입자 크기가 감소하여 상대적인 반응 표면적 및 연소성이 증가하고, 연소 환경을 Fuel rich조건으로 조성하여 과잉 중간생성물 형성에 의한 Fuel NOx의 감소 반응이 진행된 것이라 사료된다.

4.2 공기 다단 방식 적용에 따른 영향

NOx 및 미연분 배출에 대한 공기 다단 방식 적용의 영향을 확인하기 위해 DTF를 통한 실험을 진행하였다. Table 2에서 제시한 것과 같이 공기 다단 조건은 1st-Stage의 공기과잉률이 각각 1.16, 1.0, 0.85 및 0.7로 형성되는 산소 분율 0%, 15%, 31%, 42% 의 연소 환경을 조성하였으며, 석탄 시료는 75~90μm의 일정한 입자 크기로 주입되었다. 다음의 Fig. 4는 이러한 공기 다단 연소 조건에서의 NOx전환율을 나타낸 것이다. 1st-Stage의 공기과잉

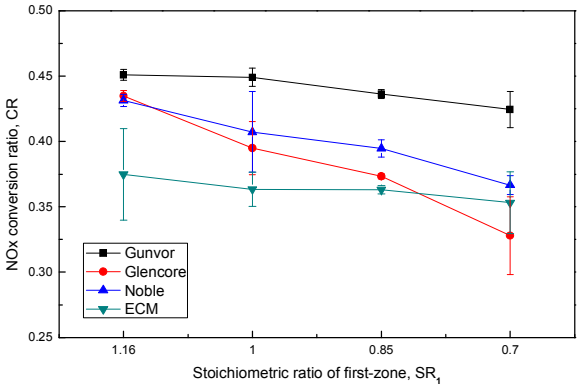

Fig. 4 NOx conversion ratio at air staging conditions

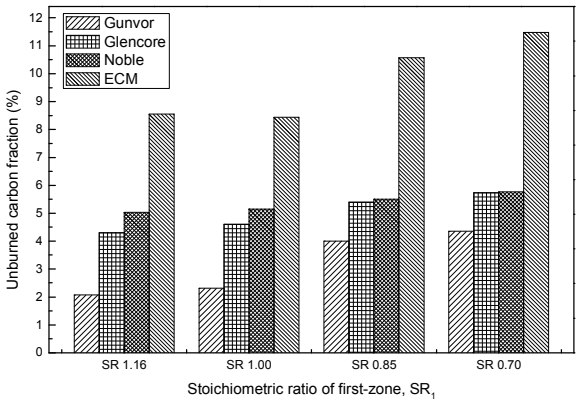

Fig. 5 Unburned carbon fraction in air staging condition

률이 감소될수록 전체적인 NOx배출량 또한 저감되는 결과를 확인할 수 있다. 공기과잉률 0.7의 조건에서의 경우, 탄종에 따라 공기과잉률 1.16 조건의 기존 NOx배출량 대비 10~25%가 저감되는 것을 확인하였다. 또한 이러한 NOx의 저감은 석탄 본연의 회분 함량과는 무관함을 보여준다. Spilethoff 등[19] 에 따르면, 가용 산소(O_2 availability)의 저감은 NOx의 형성을 억제하며, 이는 공기 다단에 의한 1st-Stage의 산소 분율이 기존 연소 조건에 비해 확연히 감소하면서 출구 NOx분율 역시 감소하는 현상을 보인 본 연구의 결과와 일치함을 보인다.

그러나 Fig. 5와 같이 이러한 가용 산소의 저감은 필연적으로 미연분의 증가 현상을 수반하게 되며, 공기과잉률 1.16 및 1.0 조건에서는 미연분의 함량에 큰 차이를 보이지 않았으나, 공기과잉률 0.85, 0.7 조건에서의 경우 NOx의 저감과 함께 배출되는 미연분 역시 눈에 띄게 증가함을 확인할 수 있다. 동시에 본 논문의 대상 운전 조건에 따른 미연분과 NOx의 상관관계는 각 탄종마다 독립적인 결과를 보였다. Glencore와 Noble의 경우, 공기과잉률이 감소함에 따라 NOx의 배출 또한 감소하는 반면 미연분의 발생 변화는 거의 없음을 확

인할 수 있었으며, 이는 이들 두 탄종의 경우 공기과잉률 0.7의 조건이 최적 다단 연소 조건이 됨을 보여준다. 반면, Gunvor와 ECM의 경우 공기과잉률이 감소함에도 불구하고 NOx배출량의 변화는 크지 않으며 미연분이 크게 증가하는 결과를 확인하였다. 즉, 이들 두 탄종의 경우 공기과잉률 1.16의 조건이 최적 다단 연소 조건이 됨을 보였다. 따라서 이러한 결과는 공기 다단 연소를 적용하는 데에 있어 NOx를 줄이는 동시에 미연분의 증가를 최소화하는 최적화된 연소조건을 찾는 것이 매우 중요함을 나타낸다.

4.3 석탄 연소 과정에 따른 NOx 배출의 비교

본 연구는 실험적인 결과들을 통해 석탄 내부 Fuel-N이 산화하여 생성되는 NOx의 배출에 시료 각각의 회분 함량의 변화는 큰 영향을 주지 못함을 확인하였다. 그러나 4.1절에서 회분 함량의 증가가 미연분 발생을 증가시키는 하나의 원인으로 촤 산화 반응 중 회분에 의한 석탄 내부의 가연소 영역 감소를 언급한 바 있다. 이는 회분 함량이 증가할수록 석탄 내부의 Char-N과 반응하는 NOx 확산 속도가 감소할 수 있음을 나타낸다.

따라서 회분 함량이 NOx생성에 미치는 내부적인 영향을 확인하기 위해 Volatile-N과 Char-N의 산화에 의한 NOx생성을 구분하여 계측하였다.

실험은 DTF를 사용하여 수행되었으며, 각각의 석탄 시료를 1300°C의 질소분위기에서 1차적으로 반응시킨 후, 포집된 시료를 공기과잉률 1.16의 조건에서 산화시킴으로 탈휘발 과정과 촤 산화 과정 중의 NOx배출량을 구분하여 측정하였다. Volatile-N과 Char-N의 산화에 의해 생성된 NOx를 각각 Volatile-NOx와 Char-NOx로 표기하였으며, 그 결과값을 Fig. 6에 나타내었다.

탈휘발 과정 중 생성되는 Volatile-NOx가 선정된 탄종들 각각의 전체 NOx배출량 중 60-70%이상을 차지하였으며, 이러한 Volatile-NOx의 경우 회분에 따른 특성 변화를 확인할 수 없었다. 그러나 Char-NOx의 경우 전체적인 NOx생성에서 비교적 적은 부분을 차지하고 있지만 석탄 회분의 함량이 증가할수록 NOx배출량이 줄어드는 명확한 경향성을 확인할 수 있었다. 이는 고유의 탈휘발 과정 이후 진행되는 촤 산화 과정 중 석탄 회분의 양적 증가가 연소 속도와 NOx의 배출을 동시에 저하시키는 요인으로 작용할 수 있음을 나타낸다.

또한, Gunvor와 ECM의 경우 Volatile-NOx가 Glencore 및 Noble에 비해 월등히 높음을 확인할 수 있다. 미연분과 직접적으로 관계되는 Char-NOx의

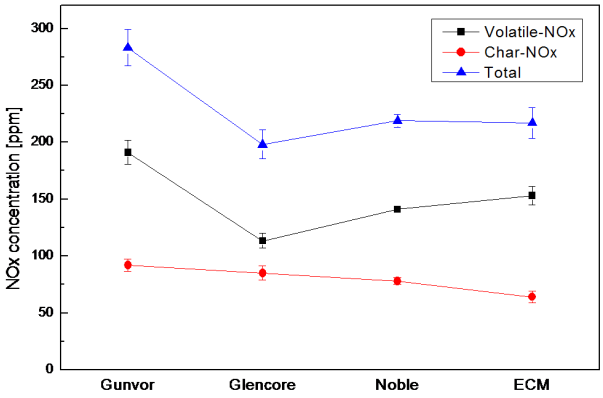

Fig. 6 NOx content formed by volatile N and char N

생성 분율이 커질수록 NOx배출 특성이 미연분의 변화와 민감하다는 점으로 미루어 볼 때, 3.2절의 결과 중 Gunvor와 ECM탄의 경우 공기과잉률 감소에 따른 미연분의 급격한 증가에도 전체적인 NOx배출의 변화가 미미한 결과를 보이는 것은 상대적으로 많은 Volatile-NOx에 기인한 것이라 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 Lab-scale DTF실험을 통하여 여러가지 탄종의 연소 시 미연분 및 NOx배출량에 대한 회분 함량의 영향을 분석하였다.

(1) 석탄 내 회분의 함량이 높아질 수록 연소 후 배출되는 미연분의 분율은 증가하였다. 이는 회분 함량의 증가가 석탄 고유 연소 반응을 지연시키기 때문이며, 입자 크기가 작아질 수록 이러한 미연분 배출에 대한 회분의 영향이 감소함을 확인하였다.

(2) 석탄 입자 크기의 변화는 생성되는 NOx의 분율에 큰 영향을 끼침을 확인하였고, 입자 크기가 감소할수록 반응 표면적 증가에 따른 연소성 증대로 인해 배출되는 NOx역시 감소하였다.

(3) 고회분탄의 NOx저감 및 연소성 유지를 위해 공기 다단 방식이 적용되었다. 전단연소영역(1st-Stage)의 공기과잉률이 감소할 수록 NOx의 배출이 감소하는 동시에 미연분의 함량 또한 증가하는 결과를 확인하였다.

(4) 미연분 증가를 통한 연소성의 손실을 최소화 하고 NOx의 배출을 저감하는 최적화된 공기 다단 연소 조건으로 Gunvor와 ECM의 경우 공기과잉률 1.16, Glencore와 Noble의 경우 0.7의 조건을 제시하였다.

(5) 석탄 내 회분 함량이 증가함에 따라 촤 산화 과정 중 생성되는 Char-NOx의 배출이 감소함을 확인하였다. 그러나 이러한 변화가 전체적인

NOx생성에 끼치는 영향은 크지 않았다.

후 기

This work was supported by primary project of the Korea Institute of Energy Research (KIER).

참고문헌
(References)

(1) Biswas, S., Choudhury, N., Sarkar, P., Mukherjee, A., Sahu, S. G. and Boral, P., 2006, "Studies on the Combustion Behavior of Blends of Indian Coals by TGA and Drop Tube Furnace," *Fuel Processing Technology*, Vol. 87, pp. 191~199.

(2) Ikeda, M., Makino, H., Morinaga, K., Higashiyama, K. and Kozai, Y., 2003, "Emission Characteristics of NOx and Unburned Carbon in Fly Ash During Combustion of Blends of Bituminous/Sub-bituminous Coals," *Fuel*, Vol. 82, pp. 1851~1857.

(3) Kurose, R., Ikeda, M. and Makino, H., 2001, " Combustion Characteristics of High Ash Coal in a Pulverized Coal Combustion," *Fuel*, Vol. 80, pp. 1447~1455.

(4) Yan, R., Zheng, C., Wang, Y. and Zeng, Y., 2003, " Evaluation of Combustion Characteristics of Chinese High-ash Coals," *Energy Fuels*, Vol. 17, pp. 1522~1527.

(5) An, K. J., Lee, B. H., Kim, S. I., Kim, M. C., Kim, S. M. and Jeon, C. H., 2013, "Char Oxidation Characteristics of High Ash Coal in Drop Tube Furnace," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No.4, pp. 405~413.

(6) Lee, B. H., Kim, S. G., Song, J. H., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., 2011, "Influence of Coal Blending Methods on Unburned Carbon and NO Emissions in a Drop-tube Furnace," *Energy&Fuels*, Vol. 25, pp. 5055~5062.

(7) De Soete GG., 1975, Fifteenth Symposium (international) on Combution, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, p.1093.

(8) EPA., 2004, "Summary of NOx Control Technologies and Their Availability and Extent of Application," *US Environmental Protection Agency*, EPA-450/3-92-004, pp. 8~12.

(9) Spliethoff, H., Greul, U., Rüdiger, H., Klaus, R. S., 1995, "Basic Effects on NOx Emissions in Air Staging and Reburning at a Bench-scale Test Facility," *Fuel*, Vol. 75, pp. 560~564.

(10) Ma, W. J., Fan, W. J., Hou, M. Y. and Yang, M. L., 2004, "Influences of Air Staged Proportion on Combustion and Exhaust Emissions," *J. Combust. Sci. Technol.*, Vol. 10, pp. 345~349 (in Chinese).

(11) Coda, B., Kluger, F., Förtsch, D. and Spliethoff., H., 1998, "Coal–Nitrogen Release and NOx Evolution in Air-Saged Cmbustion," *Energy Fuels*, Vol. 12, pp. 1322~1327.

(12) Mana, C. K., Gibbins, J. R., Witkampb, J. G. and Zhang, J., 2005, "Coal Caracterisation for NOx Prediction in Air-Staged Combustion of Pulverised Coals," *Fuel*, Vol. 84, pp. 2190~2195.

(13) Backreedy, R.I., Jones, J.M., Ma, L., Pourkashanian, M., Williams, A. and Arenillas, A., 2005, "Prediction of Unburned Carbon and NOx in a Tangentially Fired Power Station Using Single Coals and Blends," *Fuel*, Vol. 84, pp. 2196~2203.

(14) Li, S., Xu, T., Hui, S., Zhou, Q. and Tan, H., 2009, "Optimization of Air Staging in a 1 MW Tangentially Fired Pulverized Coal Furnace," *Fuel Processing Technology*, Vol. 90, pp. 99~106.

(15) Wang, J., Fan, W., Li, Y., Xiao, M., Wang, K. and Ren, P., 2012, "The Effect of Air Staged Combustion on NOx Emissions in Dried Lignite Combustion," *Energy*, Vol. 37, pp. 725~736.

(16) Lee, B. H., Song, J. H., Kang, G. T., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., 2009, "Determine of Char Oxidation Rates with Different Analytical Methods," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 33, pp. 876.

(17) Makino, H. and Kimoto, M., 1994, "Low NOx Combustion Technology in Pulverized Coal Combustion," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, Vol. 4, No. 20, pp. 747~757.

(18) Tsuji, H., Shirai, H., Matsuda, H. and Rajoo, P. 2011, "Emission Characteristics of NOx and Unburned Carbon in Fly Ash on High-ash Coal Combustion," *Fuel*, Vol. 90, pp. 850~853.

(19) Spliethoff, H., Greul, U., Rudiger, H. and Hein, KRG., 1996, "Basic Effects on NOx Emissions in Air Staging and Reburning at a Bench-scale Test Facility," *Fuel*, Vol. 75, pp. 560~564.