

고수분탄의 건조에 따른 미연분 및 NOx 배출 특성에 관한 연구

안석기* · 김정우* · 김규보** · 이시훈*** · 전충환*[†]

*부산대학교 기계공학부, **화력발전 에너지 분석기술센터, ***한국에너지기술연구원
(2015년 11월 6일 접수, 2016년 10월 17일 수정, 2016년 10월 20일 채택)

Study on the Unburned Carbon and NOx emission of High Moisture Coal

Seok-Gi Ahn*, Jung-Woo Kim*, Gyu-Bo Kim**, Si-Hyun Lee***, Chung-Hwan Jeon*[†]

*Department of Mechanical Engineering, Pusan National University,

Pusan Clean Coal Center, *Korea Institute of Energy Research

(Received 6 November 2015, Revised 17 October 2016, Accepted 20 October 2016)

요 약

본 연구에서는 Drop Tube Furnace(DTF)를 이용하여 고수분탄과 건조석탄의 미연분 및 NOx 배출 특성에 관한 실험과 수치해석 연구를 수행하였다. 1200℃ 온도조건에서 동일한 질량의 고수분탄과 건조석탄의 연소 시, 건조석탄의 경우 고수분탄에 비해 노 내 온도가 더 높고 동일 체류시간 반응 후 미연분 함량도 더 많았으며, NOx 배출은 고수분탄에서 더 낮았다. 석탄 내 수분함량이 40%에서 10%로 감소함에 따라 노 내 수분 농도는 감소하고 가스온도는 증가하는 경향을 보였다. 주위 Wall temperature가 900℃~1500℃까지 높아질수록 미연분은 감소하였으며, NOx 배출은 증가하는 경향을 보였다. 특히 건조석탄의 경우 주위 온도변화에 따른 연소성이 고수분탄보다 크게 나타나, 온도가 증가할수록 고수분탄과 건조석탄의 미연분 차이가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

주요어 : 고수분탄, 미연탄소분, 질소산화물, 석탄 연소, 전산해석

Abstract - Unburned Carbon(UBC) and NOx emissions from High-moisture coal and Dried coal were investigated in Drop Tube Furnace(DTF). When the same amount of the High-moisture coal and Dried coal were oxidized in DTF, the results show that UBC and NOx emissions of Dried coal case is higher than High-moisture coal case. As the moisture in coal decreases from 40% to 10%, the average gas temperature increases but the moisture concentration in DTF decreases. As the wall temperature increases from 900℃ to 1500℃, the UBC decreases and NOx emissions increases. Especially, the difference for UBC between High-moisture coal and Dried coal decreases with increasing wall temperature.

Key words : High Moisture Coal, Unburned Carbon, NOx, Coal Combustion, Drop Tube Furnace, CFD (Computational Fluid Dynamics)

1. 서론

세계 1차 에너지소비 통계에 따르면, 석탄 및 천연가스의 소비량이 지속적으로 증가하고 있으며 특히

아시아태평양지역의 경우 1차 에너지 중 석탄의 비율은 50%를 차지하고 있다.[1] 이러한 배경에는 중국과 인도 경제의 고도성장에 따른 에너지 수요의 급격한 증가가 있으며, 특히 중국은 세계 최대 Steam coal 생산국인 동시에 수입국으로써 2013년도 Steam coal 소비량이 약 33억 톤으로 세계 석탄소비량인 60억 톤의 절반 이상을 차지하고 있다.[2] 이로 인해 중국에

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : 051-510-3051 E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

서는 그동안 사용이 제한되었던 고수분 저급석탄에 대한 수요 역시 증가하고 있으며, 기존 보일러에 안정적인 연료공급 및 연소 안정성을 위해 고수분탄에 대한 효율적인 석탄건조기술을 필요로 하고 있다.

Asay B. W. 등[3]은 석탄 내 수분 함량이 연소 및 배기배출 특성에 영향을 미친다는 것을 확인하였으며, Bosoaga A.[4]는 전산해석을 통해 40% 고수분탄과 건조탄에 대한 보일러 내 전산해석 연구를 통해 수분의 영향을 살펴보았다. S.D Kim[5] 등은 Flash Dryer를 이용하여 가스 유입온도 및 입자크기에 따른 고수분탄의 건조특성을 살펴보았으며, 건조석탄의 경우 발열량이 높아지는 특징을 보였다.

한국에너지기술연구원(KIER)에서는 석탄화력발전소의 미활용 에너지(Steam 또는 Hot flue gas)를 이용하여 고수분 석탄을 발전소 현장에서 건조하고 보일러에 직접 활용할 수 있는 COMBDry(Counter flow Multi-Baffle Dryer) 석탄건조기술을 개발하였으며, 1 ton/day 규모의 COMBDry 건조기를 중국 하얼빈 공대에 설치하여 다양한 중국 고수분 석탄을 대상으로 시운전 및 상용화 규모 Process Design Package 개발에 필요한 실험 및 운전 자료를 확보하기 위해 연구를 진행 중에 있다.

본 연구에서는 향후 상용화 단계에 들어섰을 때, 건조석탄의 화력 보일러 적용 시 연소 및 배기배출 특성 예측을 위한 보일러 시뮬레이터를 개발하기에 앞서 DTF(Drop Tube Furnace) 실험을 통해 고수분탄 및 건조석탄의 연소 및 배기배출 특성을 비교 분석하고, DTF 전산해석을 통해 해석 모델의 검증 및 석탄의 수분함량, 주위 연소 온도 변화에 따른 연소 특성을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 석탄 시료

본 연구에서는 수분 함량이 36%(@as received)인 고수분석탄을 대상으로 선정하였다. 고수분탄의 건조 후 연소특성을 분석하기 위해 45℃ 건조기에서 10시간 가량 건조하여 미분탄 화력 보일러의 설계탄 범위(Max. 10%)내의 수분 조건을 만족하는 건조탄을 준비하였다. 본 연구에 사용된 고수분탄의 공업분석, 원소분석 및 발열량 결과는 Table 1과 같다. 본 연구에 적용된 고수분탄은 갈탄(lignite) 등급의 연료 조성 및 발열량 특성을 보이고 있으며, 건조석탄의 경우 고수

분 원탄에 비해 수분함량은 6.46%로 낮아지고, 고정탄소와 휘발분의 비율은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 건조석탄의 경우 연소성분 비율의 증가로 인해 발열량 역시 4,020kcal/kg에서 5,800kcal/kg으로 높아지는 특성을 보인다.

2-2. 연소 및 배기배출특성 실험 및 장치

본 연구에서 석탄의 연소특성을 알아보기 위해 DTF를 이용하여 실험을 수행하였다. DTF는 화력 발전용 보일러의 연소를 수직 낙하형 전기로의 형태로 모사한 장비로써 균일한 온도 및 압력, 안정적인 반응 영역을 만들 수 있는 장치로써 많은 미분탄 연소 연구 등에 많이 사용되는 장비이다.[6~8] DTF는 크게 주입부, 반응부, 포집부로 세분화 할 수 있으며 주입부에서는 연료와 반응가스가 공급된다. 연료의 일정한 투입을 위하여 일정속도로 상승하는 시린지 펌프를 이용하여 시험관을 상승 시키고, 미분화된 석탄입자가 담긴 시험관은 진동기에 연결되어 시험관 내부에 석탄입자가 부유하게 된다. 부유된 입자는 일정하게 주입되는 질소 가스를 통하여 반응기 내부로 공급된다. 반응부는 Alumina tube로 이루어져 있으며, SiC heater가 주위를 둘러싸고 가열하여 일정한 온도가 유지되는 부분으로, 주입된 연료와 산소가 고온에서 산화반응을 일으키는 부분이다. 포집부는 펌프가 연결되어

Table 1. Coal properties

Coal	Raw coal	Dried coal	
Proximate analysis(wt%)	FC	30.93	47.15
	VM	31	43.87
	Ash	2.1	2.52
	Moi.	35.97	6.46
Ultimate analysis(wt%)	C	37.85	55.63
	H	3.06	4.50
	O	19.85	29.18
	N	0.53	0.78
	S	0.63	0.93
	Ash	2.1	2.52
HHV(kcal/kg)	4019	5871	

*FC=Fixed Carbon, VM=Volatile Matter, DAF=Dry Ash-free basis, HHV=Higher heating value

Table 2. Experiment conditions in DTF

Conditions	Unit	Value
Coal feeding rate	g/min	0.5
Carrier gas(N2) flow rate	L/min	2
Main gas (N2,N2) flow rate	L/min	10
Excess air	-	1.2
Wall temperature	℃	1200

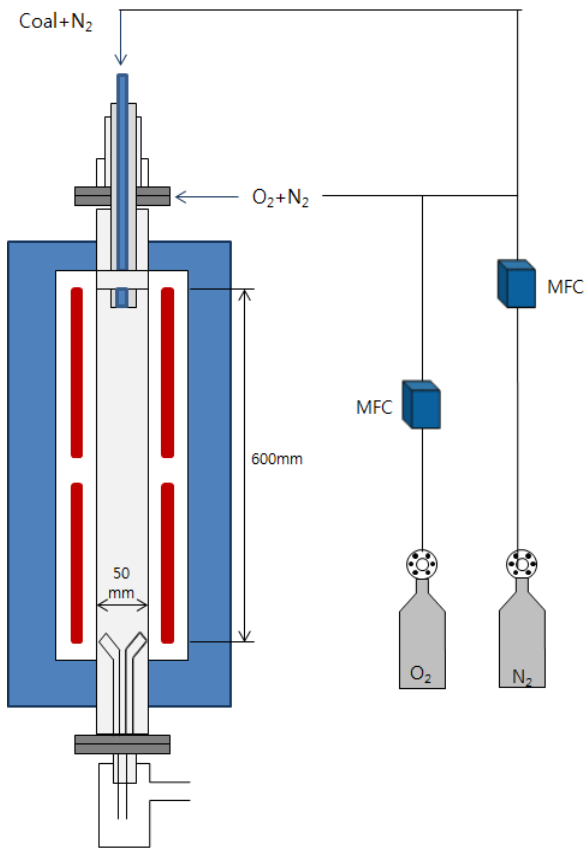


Fig. 1. Schematic diagram of DTF experimental apparatus

투입된 양만큼의 가스를 배출시키고, 연소생성물 및 회분은 Cyclone으로 불리는 포집장치에 담기도록 설계되었다. DTF 반응로의 길이는 600mm, 직경은 50mm이며, 반응로 상부에서는 총 12L/min의 질소 및 산소 가스가 유입된다. 본 연구에서는 Excess air가 1.2인 조건에서 산소 유량을 결정하였다. 고수분탄은 각각 0.5g/min으로 질소 가스와 함께 공급되며, 세부적인 DTF 실험 조건은 Table 2에 나타내었고, 장비의 개략도는 Fig. 1과 같다.

본 실험에서는 DTF의 주반응부에서 연소반응 후 Cyclone에 포집된 시료 중의 회분 양과 공급된 석탄 중 회분의 양이 동일하다는 가정 하에 연소율을 계산하는 회분추적법(Ash trace method)을 이용하여 미연분 함량을 계산하였다.[9] 또한 ecom-rbr MK9000 Gas analyzer를 통해 DTF 후단으로 배출되는 NOx 농도를 측정하였다.

2-3. DTF 모델링 및 해석모델

Fig. 2은 DTF 형상 및 전산해석을 위해 구성된 격자를 보여주고 있다. 3차원 형상으로 Geometry를 모델링하였으며, 전체 DTF 장비 가운데 상부의 Coal injection port와 Main gas가 유입되는 Port에서부터 포집부까지 원형의 알루미늄 튜브에서 Heating part가 위치하고 있는 600mm의 주반응 영역을 해석영역으로 고려하였다. Heating part의 Wall temperature는 DTF 실험 온도조건과 동일하게 설정하였으며, Wall emissivity는 0.9로 고려하였다. 계산격자는 2만개의 육면체격자로 구성하였으며, 본 해석모델에서 공통적으로 사용된 계산조건은 Table 3과 같다.

본 연구에서 사용되는 모델들은 Navier-Stokes 방정식을 기초로 한 식(1)~식(4)와 같은 질량, 모멘텀, 에너지 그리고 화학종 보존 방정식이 적용되었다. 또한 노 내에서 기체상의 유동을 따라 거동하는 석탄 입자를 고려하기 위해 DPM(Discrete Phase Method) 모델을 적용하였으며, DTF 내부 유동 모사를 위해 난류 모델은 Standard k-ε 모델을 적용하였고, 복사모델은 P-1 모델을 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{2}$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left(\sum_j h_j \vec{J}_j \right) + S_h \tag{3}$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_i \tag{4}$$

석탄연소 과정은 크게 수분의 증발, 탈휘발 그리고 화 연소와 같이 세 단계로 나누어진다. 본 연구에서는 수분함량에 따른 영향을 고려하기 위해 Wet combus-

tion 모델을 적용하였으며, 각 탄에 따른 탈휘발 특성을 고려하기 위해 Fletcher에 의해 제안된 Chemical Percolation Devolatilization(CPD) 모델[10]을 적용하였다. 탈휘발 과정에서 빠져나온 휘발분의 연소반응은 Volumetric Reactions으로 고려하여 Finite-Rate/Eddy-Dissipation 모델을 사용하였으며, 식(5), (6)과 같은 Two-step Reaction Mechanism을 적용하였다. 석탄의 탈휘발이 종료되면, 좌 연소 반응이 시작되며 좌 산화속도

는 좌 표면에서 탄소-산소의 화학반응속도와 경계층과 내부에서의 산소 확산속도에 의해 결정된다. 본 연구에서는 좌 연소 모델로 Kinetic/Diffusion limited 모델[11]을 적용하여 좌 연소를 고려하였다.

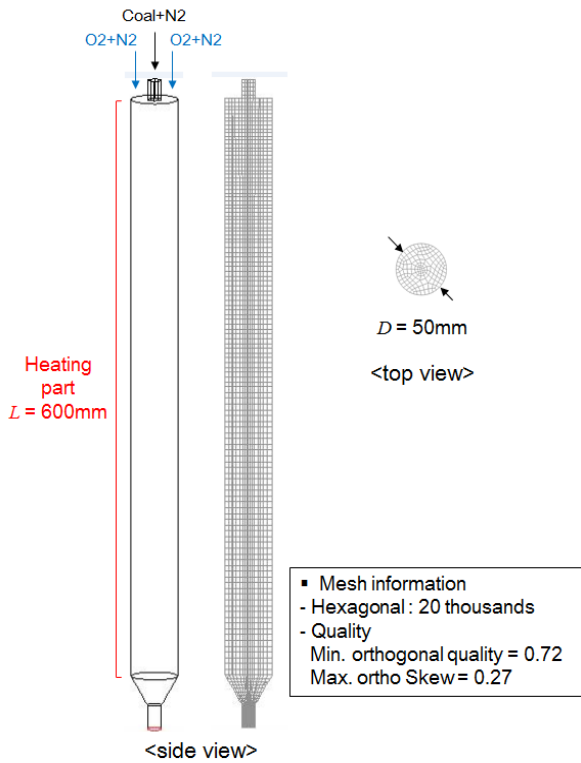
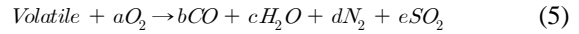


Fig. 2. Geometry and grid information for DTF

석탄은 보통 0.5~3% 정도의 질소를 함유하고 있으며, 이렇게 석탄에 포함된 질소 원자가 산화되어 생성된 NOx를 Fuel NOx 라고 한다. 석탄 연소 시 발생하는 NOx는 주로 Fuel NOx와 Thermal NOx이며 본 연구에서는 NOx 예측을 위해 Fuel NOx와 Thermal NOx 모델을 고려하여 해석을 수행하였다. Fuel NOx에서 Volatile N이 HCN과 NH₃로 나뉘는 비율은 9:1 조건으로 설정하였고[12], Thermal NOx는 O, OH radical에 대해 Partial equilibrium으로 설정하였으며, 연소해석 결과를 바탕으로 Post-processing 과정을 통해 NOx 수치를 예측하고 결과 값은 O₂ 6% 조건으로 나타내었다. 계산은 상용코드인 ANSYS Fluent v16.1에서 수행하였다.

2-4. 해석조건

본 연구에서는 먼저 DTF 실험에 대한 전산해석 결과를 실험결과와 비교, 검증하고 해당 시뮬레이터를 통해 다음과 같이 다양한 변수 조건에 따라 고수분탄 및 건조석탄에 대해 연소 및 배기배출 특성을 분석하였다. (1) 석탄 내 수분 함량, (2) 고수분탄과 건조탄의 Wall temperature 변화에 따른 영향.

Table 3. Computational conditions considered in this study

Conditions	Unit	Value
Coal feeding rate	g/min	0.5
Carrier gas(N ₂) flow rate	L/min	2
Main gas(N ₂ , O ₂) flow rate	L/min	10
Excess air	-	1.2
Carrier gas(N ₂) Temperature	K	300
Main gas(N ₂ ,O ₂) Temperature	K	300
Coal size	μm	10-30-100 (Rosin-Rammler distribution)

3. 연구 결과

3-1. 석탄 연소 및 NOx 배출 특성

고수분탄을 1200℃ 온도조건에서 0.5g/min으로 고수분탄과 건조석탄을 공급하였을 때, 미연분(Unburned Carbon)과 NOx 배출결과를 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 고수분탄에 비해 건조석탄의 미연분 값이 높은 것을 확인할 수 있으며, NOx 배출량 역시 증가한 결과를 보이고 있다. 고수분탄에 비해 건조석탄의 미연분이 높은 이유는 동일한 질량에서 건조석탄의 연소성분(휘발분, 고정탄소분) 함량이 높기 때문에 동일 온도 및 체류시간을 반응조건으로 갖는 DTF 연소

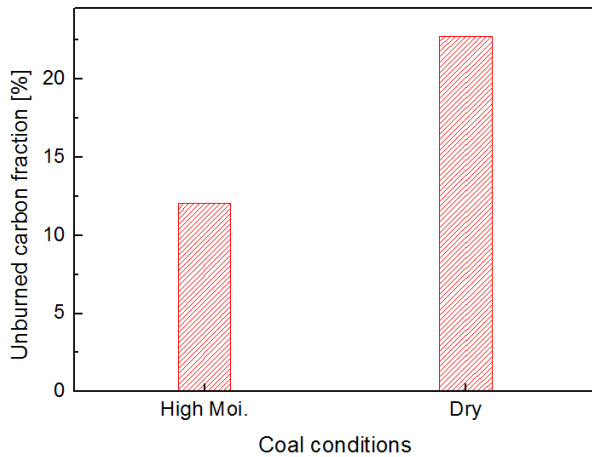


Fig. 3. Unburned carbon fraction corresponding to coal conditions in the DTF experiments

조건에서는 연소 후, 건조석탄의 미연분 결과가 높게 나타난다. NOx 배출의 경우 건조석탄에서 더 높은 수치를 보이고 있으며, 동일 체류 시간동안 더 많은 연소성분이 산화됨에 따라 고정탄소와 휘발분 내에 있는 Fuel-N에 의해 Fuel NOx 생성이 증가한 것으로 보인다.

3-2. DTF 해석 결과

3-2-1. 수치해석 결과와 비교 검증

Fig. 5는 DTF 실험조건으로 수행한 다양한 해석결과를 보여주고 있다. 노내 온도분포는 건조석탄이 고수분탄에 비해 높은 결과를 보이고 있으며, 각각 최대

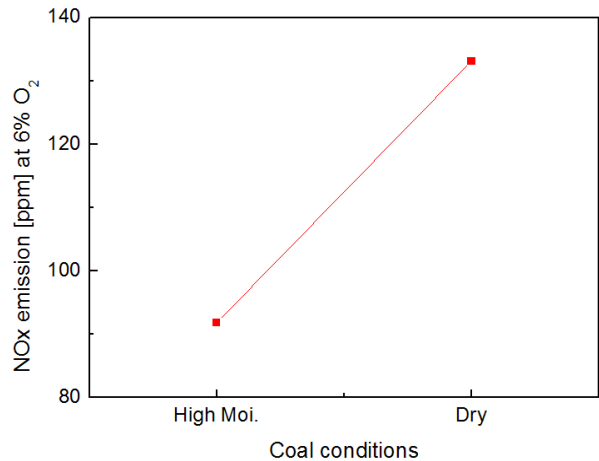


Fig. 4. NOx concentration corresponding to coal conditions in the DTF experiments

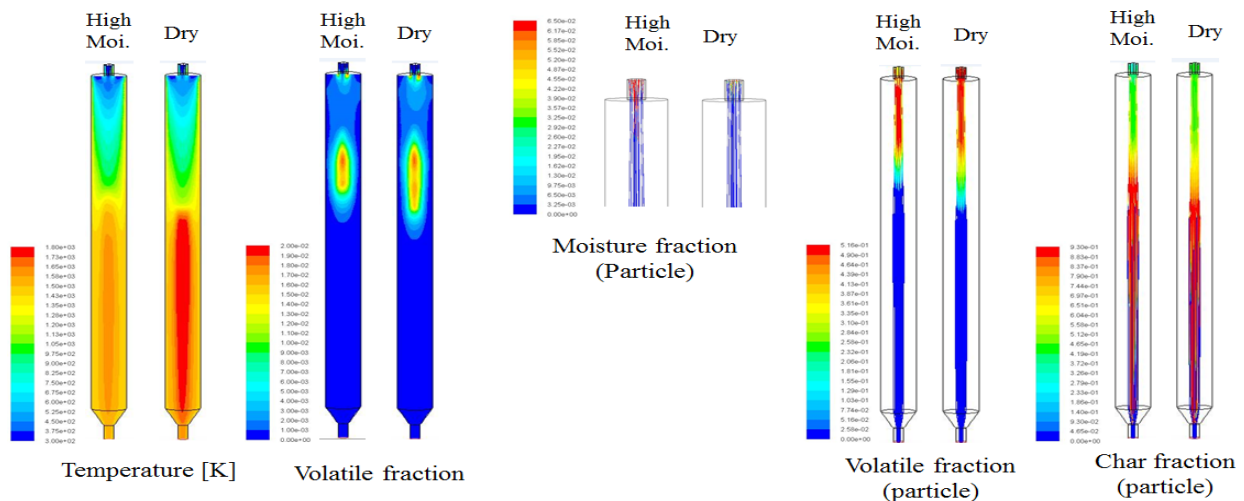


Fig. 5. Simulation results for Coal A case; Gas temperature, Volatile fraction, Moisture fraction in particles, V.M fraction in particles, Char fraction in particles

온도는 1822K, 1607K으로 예측되었다. 입자가 반응기내로 분사된 직후 수분 증발이 나타나며, 고수분탄의 경우 수분 증발이 길고, 건조석탄은 짧은 수분 증발 이후에 탈휘발이 먼저 시작되는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 건조석탄은 동일 체류시간 동안 더 많은 연소물질의 산화가 일어나며, 그 결과 노 내 온도 분포가 높은 특징을 확인할 수 있다. 이렇게 건조석탄이 고수분탄에 비해 탈휘발이 먼저 시작되어 연소성분의 산화가 더 많았음에도 불구하고, 초기 질량당 연소성분의 함량이 많기 때문에 DTF 후단에서의 미연분 수치는 높게 예측된다. Fig. 6과 Fig.7에는 미연분과 NOx에 대한 실험 결과와 해석결과를 함께 나타내어 그 경향성 및 정량적인 수치를 비교하였다. 미연분의 경우 고수분탄에서는 12.29% 수준으로 실험결과

와 비슷한 결과를 보였으며, 건조석탄의 경우 17.9%로 실험결과와는 5% 정도 차이를 보였다. 건조석탄 조건에서 미연분 결과에 대한 약간의 오차가 있지만 미연분 및 NOx 배출특성의 전반적인 경향을 잘 모사하므로 본 해석코드를 바탕으로 다양한 연소조건에서 연소 및 배기배출 특성을 비교해보고자 한다.

3-2-2. 수분함량 변화에 따른 영향

본 절에서는 석탄 내 수분함량이 10, 20, 30, 40wt% 조건에 대해 해석 연구를 수행하였다. Fig. 8은 수분함량 변화에 따른 미연분 및 NOx 배출 특성을 보여주고 있다. 수분함량이 감소함에 따라 비례적으로 반응 후 회(Ash)에 남아 있는 미연분 함량이 높은 것을

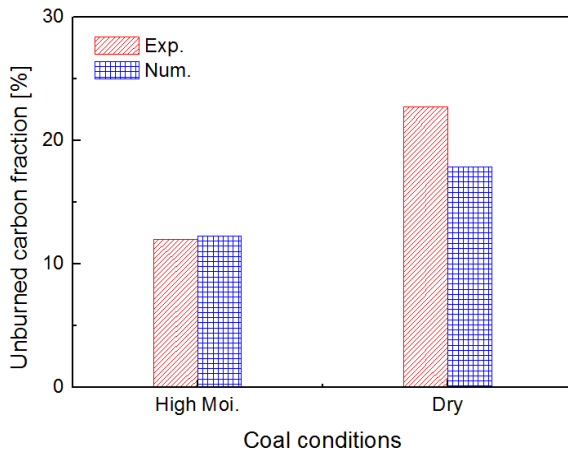


Fig. 6. Unburned carbon fraction corresponding to coal conditions in the DTF

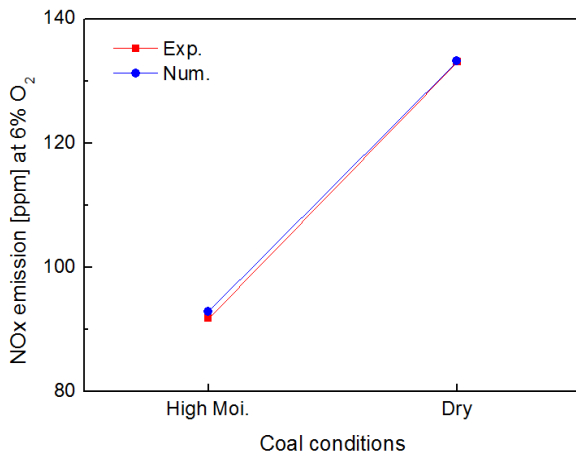


Fig. 7. NOx concentration corresponding to coal conditions in the DTF

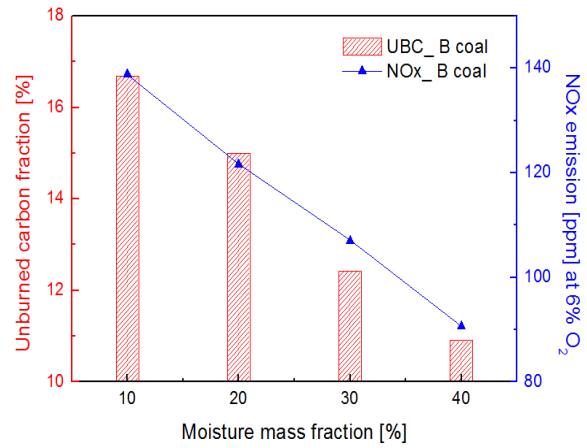


Fig. 8. Effects of moisture on UBC and NOx emission in the DTF simulation conditions

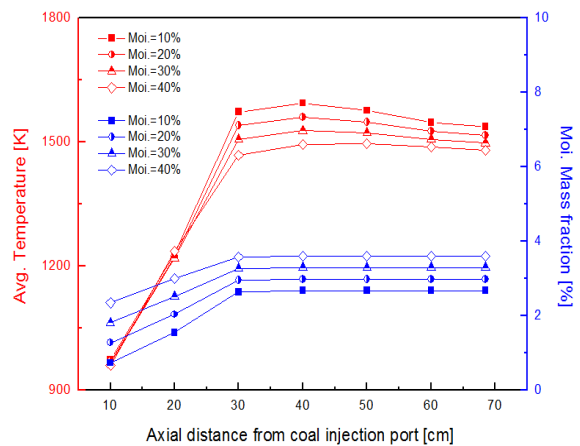


Fig. 9. Effects of moisture on axial distribution of avg. gas temperature and H₂O mole fractions in the DTF simulation conditions

확인할 수 있다. 이렇게 수분함량과 동일 체류시간 연소 후 남아 있는 연소성분 함량간의 선형적인 관계를 통해 상대적으로 용이하게 수분함량 변화에 따른 노내 연소특성 조절이 가능할 것으로 예상된다.

Fig. 9는 수분함량에 따른 노내 평균온도분포 및 수분 농도를 보여주고 있다. 석탄 입자 내 수분함량이 높아질수록 노내 온도는 감소하는 경향을 보이며, 연소 가스중의 수분함량은 초기부터 높은 수준에서 시작해 서서히 더 높아지는 것을 확인할 수 있다. 각 조건별 평균온도 차이는 연소 초기에는 크지 않지만, 탈휘발 후 가스연소가 진행되는 영역과 좌 연소가 시작되는 영역에서 가장 큰 차이를 보이고 서서히 차이가 감소하는 경향을 보인다. 주 연소영역에서 가장 큰 차이를 보이는 이유는 건조석탄의 경우 가스 및 좌 연소에서 발생하는 에너지가 큰 손실 없이 열에너지로 대부분 변환되지만 고수분탄의 경우 석탄에서 증발된 수분이 가지는 높은 비열에 의해 생성 에너지가 주위 가스 온도를 높이지 못하는 것으로 보이며, 수분에 의한 이러한 열손실은 전체 연소 효율을 떨어뜨릴 수 있을 것으로 사료된다. 실제 연소기와 같이 발열량 기준으로 건조석탄과 동일한 열량의 고수분탄을 연소한다고 가정할 경우, 유입되는 열량은 동일하게 맞출 수 있지만 앞서 서술한 바와 같이 비열에 의한 열손실이 증가함에 따라 실제 반응열에서 회수할 수 있는 유효 에너지는 상대적으로 감소한다. 또한 외부에서 연료로 일정한 Heating rate을 유지하는 DTF 장비와 달리 일반적인 연소기에서는 액체상태로 석탄 내에 존재하는 수분을 증발시키는데 필요한 잠열(latent heat)으로의 에너지 손실이 추가적으로 발생하게 되고, 이후의 탈휘발 및 좌 연소 반응에 추가적인 열이 계속 필요한 점을 고려하면 산업용 연소로에서 수분에 의한 연소 효율 저감은 더 클 것으로 예상된다. 본 연구에서는 미량의 석탄이 일정한 외부 Heating rate이 있는 상황에서 발열량 기준이 아닌 정량공급 기준에 의해 연구가 진행되어 석탄 입자가 가지는 연소특성만 확인할 수 있지만, 지금까지 논한 수분의 영향에 의한 추론을 통해 화력보일러와 같은 산업용 로에서 소비탄의 수분함량 증가는 연소효율을 저감시킬 것으로 평가할 수 있다.

NOx 배출의 경우, 수분함량이 높아질수록 감소하는 경향을 보이며 그 이유는 Table. 1에서와 같이 수분함량이 높을수록 석탄 내 고정탄소와 휘발분의 감소로 Fuel NOx로 발달할 수 있는 석탄 내의 Fuel-N이 감소

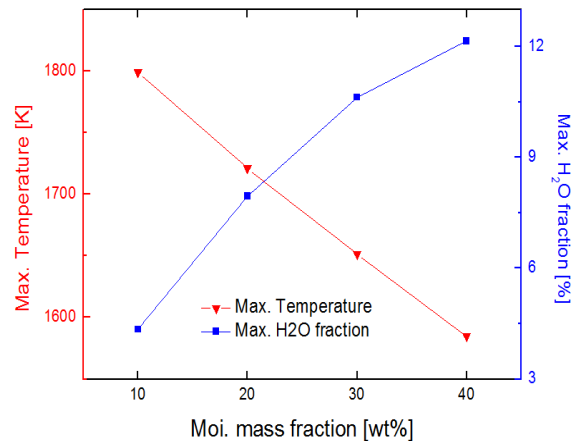


Fig. 10. Effects of moisture on maximum temperature and H₂O mole fraction in the DTF simulation conditions

했기 때문에 사료된다. Fig. 10에서는 석탄 내 수분함량이 높아질수록 노내 수분농도의 최대값도 높아지며 노내 Peak temperature는 감소하는 결과를 확인할 수 있다. R. Kurose[13] 등은 석탄 내 수분함량이 증가함에 따라 화염온도 감소로 인해 Thermal NOx 생성이 급격히 감소한다고 보고 하였으며, Thermal NOx 생성은 주로 1300℃ 이상에서 시작된다는 점을 고려할 때 [14], 본 연구에서 석탄 내 수분함량이 10%에서 40% 증가함에 따른 NOx 배출 감소 요인에는 Peak temperature가 낮아짐에 따른 Thermal NOx 저감도 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

3-2-3. 주위 온도 변화에 따른 영향

주위 온도 변화에 따른 연소특성을 비교해보기 위해 고수분탄과 건조석탄을 Wall temperature 변화에 따라 해석을 수행하였다. Fig. 11은 온도변화에 따른 미연분 결과를 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 미연분은 감소하는 경향을 보이며, 전체 온도 조건에서 고수분탄의 미연분이 건조석탄보다 작은 것을 확인할 수 있고, 온도가 높아짐에 따라 그 차이가 줄어들어 가는 경향을 보인다. 이러한 이유는 주위 온도가 높아짐에 따라 점화 시점이 당겨지고, 연소성분이 많고 수분이 적은 건조석탄의 경우 반응이 진행될수록 상대적으로 고수분탄에 비해 좌 산화반응이 더 활발해 졌기 때문으로 사료된다. Fig. 11의 그래프에서 기울기 차이를 비교해 보면 온도가 높아짐에 따라 건조석탄의 온도에 따른 연소성이 더 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 Wall temperature 변화에 따른 NOx 배출

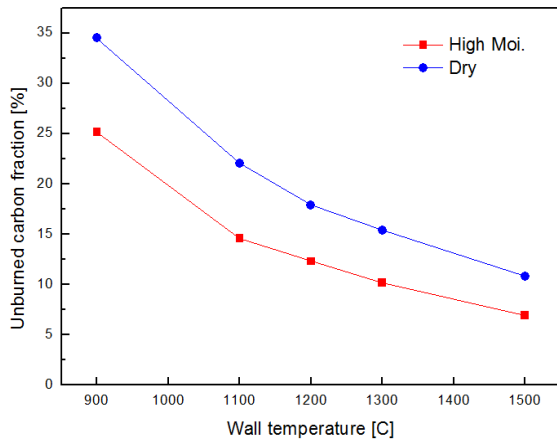


Fig. 11. Unburned carbon fraction corresponding to wall temperature in the DTF

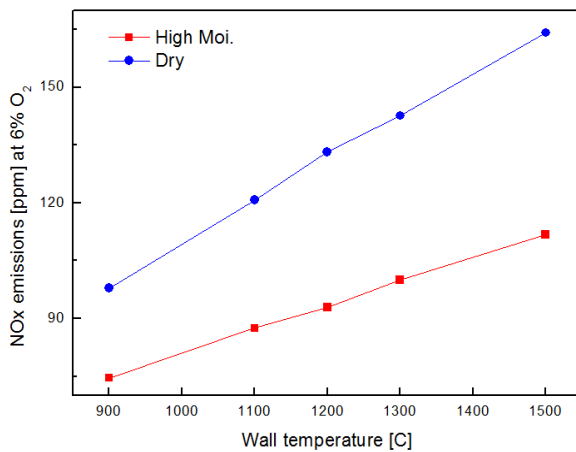


Fig. 12. NOx emissions corresponding to wall temperature in the DTF

특성을 나타내고 있다. 온도가 증가함에 따라 NOx 배출도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 경향은 S.G Kim[15]의 연구결과와도 잘 일치함을 확인할 수 있다. 또한 온도에 따른 NOx 변화율이 건조석탄에서 더 크기 때문에 주위 온도가 높아질수록 고수분탄과 건조석탄의 NOx 농도 차이는 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고수분탄의 건조에 따른 미연분 및 NOx 배출 특성 분석을 위해 고수분탄과 건조석탄에 대한 DTF 실험 및 수치해석 연구를 수행하였으며, 수분 함량 및 주위 온도 변화에 따른 영향을 확인하였

다. 향후 실기 석탄화력 보일러에 대한 전산해석 연구를 통해 고수분탄과 건조석탄이 실기 보일러 연소에 미치는 영향에 대한 연구 수행을 통해 실증 보일러의 운전조건을 평가하고자 한다. 본 연구의 주요 결론은 아래와 같다.

1) 고수분탄의 건조 시 석탄의 단위 질량당 연소 성분(휘발분, 고정탄소분) 증가로 인해 정량공급 조건의 DTF 연소실험에서 건조석탄의 미연분 함량이 높았으며, NOx 배출 역시 증가하였고, DTF 해석을 통해 실험과 해석 결과를 비교, 검증하였다.

2) 석탄 내 수분함량 변화에 따른 DTF에서의 해석 결과, 수분 감소에 따른 미연분 증가 및 NOx 배출 증가가 선형적인 관계를 보였으며, 수분이 감소함에 따라 DTF 반응기 내 평균온도는 증가하고 연소 가스 중의 수분 농도는 감소하였다.

3) 석탄 연소 온도가 높아짐에 따라 고수분탄과 건조석탄의 미연분은 감소하였으며, 건조석탄의 경우 온도 증가에 따른 미연분 감소율이 크게 나타났다. 또한 주위 연소 온도가 증가함에 따라 NOx 배출도 증가하였으며, 건조석탄의 NOx 배출 증가율이 고수분탄에 비해 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 2015년도 KIER 주요사업으로 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

References

- (1) BP, "BP Statistical Review of World Energy June 2015", BP, pp.42, (2015)
- (2) IEA, "Coal information 2014", International Energy Agency, pp.43-57, (2014)
- (3) Blaine W. Asay, L. Dcuglas Lahjaily and Paul O. Hdeman, "Effect of Coal Moisture on Burnout and Nitrogen Oxide Formation", Combustion Science and Technology, Vol. 35, pp. 15-31, (1983)
- (4) Bosoaga A., Panoiu N., Mihaescu L., Backreedy R.I., Ma L., Pourkashanian M., Williams A., "The Combustion of Pulverized Low Grade Lignite",

- Fuel, Vol. 85, pp. 1591~1598.
- (5) Sang-do Kim, Si-hyun Lee, Young-joon Rhim, Ho-kyung Choi, Jeong-hwan Lim, Dong-hyuk Chun and Jo-ho Yoo, "Drying Characteristic of High Moisture Coal using a Flash Dryer", Korean Chem. Eng. Res., Vol 50, No. 1, pp.106~111, (2012)
 - (6) Byoung-hwa Lee, Ju-hun Song, Rang-gyoon Kim, Yong-gyun Kim, Young-june Chang and Chung-hwan Jeon, "Simulation of the Influence of the Coal Volatile Matter Content on Fuel NO Emissions in a Drop-Tube Furnace", Energy & Fuels, Vol.24, pp.4333-4340, (2010)
 - (7) Sang-in Kim, Byoung-hwa Lee, Ke-ju An, Man-cheol Kim, Seung-mo Kim and Chung-hwan Jeon, "Effect of Ash Content on Unburned Carbon and NOx Emission in a Drop Tube Furnace", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 38, No. 12, pp.963-969, (2014)
 - (8) M. Cloke, E. Lester, A.W. Thompson, "Combustion Characteristics of coals using a drop-tube furnace", Vol. 81, pp.727-735, (2002)
 - (9) Byoung-hwa Lee, Ju-hun Song, Ki-tae Kang, Young-june Chang and Chung-hwan Jeon, "Determination of Char Oxidation Rates with Different Analytical Methods", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 33, No. 11, pp.876-885, (2009)
 - (10) Thomas H. Fletcher and Alan R. Kerstein, "A Chemical Percolation Model for Devolatilization: Summary", pp.1-66
 - (11) M.M. Baum and P. J. Street, "Predicting the Combustion Behavior of Coal Particles", Combustion Science and Technology, Vol.3, pp.231-243, (1971)
 - (12) F. Winter, C. Wartha, G. Lo er, and H. Hofbauer, "The NO and N2O Formation Mechanism during Devolatilization and Char Combustion under Fluidized bed conditions", In 26th Symposium(International) on combustion, Vol. 26, No. 2, pp. 3325~3334, (1996)
 - (13) R. Kurose, H. Tsuji, H. Makino, "Effects of moisture in coal on pulverized coal combustion characteristics", Fuel, Vol.80, pp.1457-1465, (2001)
 - (14) H. Spliethoff, "Power Generation from Solid Fuels", Springer, pp. 234~241, (2010)
 - (15) Song-gon Kim, Cheon-seong Lee, Byoung-hwa Lee, Ju-hun Song, Young-june Chang and Chung-hwan Jeon, "Effect of Fuel Ratio and Temperature on NOx emissions from a pulverized coal burning in a Drop Tube Furnace", KSME 2009 Fall annual meeting, pp.2475-2480, (2009)