

DTF를 이용한 무회분 석탄과 잔탄의 연소 및 회 점착 특성에 관한 연구

문병호 · 김진호 · 락워더러지 · 김규보* · 전충환**†

부산대학교 기계공학부 대학원, *부산대학교 화력발전에너지분석기술센터, **부산대학교 기계공학부
(2015년 7월 20일 접수, 2015년 9월 6일 수정, 2015년 9월 8일 채택)

The Study on the Combustion and Ash Deposition Characteristics of Ash Free Coal and Residue Coal in a Drop Tube Furnace

Byeung Ho Moon, Jin Ho Kim, Lkhagvadorj Sh, Gyu Bo Kim*, Chung Hwan Jeon**†

Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

*Pusan Clean Coal Center, Pusan Nat'l Univ.

**School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received 20 July 2015, Revised 6 September 2015, Accepted 8 September 2015)

요 약

최근 화력발전 보일러의 운전에서 저등급 석탄의 성분 중 ash의 영향으로 보일러 후단부에서 생성되는 slagging/fouling 문제가 많이 보고 되고 원인 규명 및 해결책을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 환경적 측면에서도 NOx 등 환경적인 문제를 발생시키는 부분에 대해 규제를 가하고 있는 상황이다. 이런 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나인 석탄의 ash를 제거한 AFC(Ash Free Coal)을 활용한 연구가 진행되고 있다. AFC는 저등급탄의 발열량을 높여 기존의 고등급탄을 보완하고 slagging/fouling 문제 및 배출가스의 오염성분을 줄일 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는, DTF를 이용하여 KCH 원탄과 원탄에서 추출된 무회분탄1, 무회분탄2, 잔탄, Glencore, Glencore과 잔탄을 85:15 비율로 한 혼탄을 이용하여 미연분, NOx 배출특성의 변화와 회 점착 특성을 확인하였다. 그 결과 무회분탄은 원탄과 잔탄에 비해 NOx 배출량이 현저히 낮고, 잔탄은 원탄에 비해 고등급화 되면서 반응성이 훨씬 좋아짐을 확인 하였다. 잔탄과 혼탄의 경우 일반적인 저열량탄 수준보다 낮은 점착성을 나타내는 것을 확인 하였다.

주요어 : 무회분 석탄, 미연탄소분, 질소산화물, 회 점착 ,DTF(Drop Tube Furnace)

Abstract - Recently, much research has been put into finding the causes and solutions of slagging/fouling problems that occur at the end of the boiler. This slagging/fouling, caused by low-rank coal's ash, disturbs the thermal power and greatly reduces efficiency. In environmental aspects, such as NOx pollution, governments have been implementing restrictions on the quantity of emission gases that can be released into the atmosphere. To solve these problems, research on Ash Free Coal (AFC), which eliminates ash from low-rank coal, is in progress. AFC has advantages over similar high-rank coals because it increases the heating value of the low grade coal, reduces the contaminants that are emitted, and decreases slagging/fouling problems. In this study, using a DTF, the changes of NOx emissions, unburned carbon, and the characteristics of ash deposition were identified. KCH raw coal, AFC extracted from KCH, residue coal, Glencore, and Mixed Coal (Glencore 85wt% and residue coal 15wt%) were studied. Results showed

†To whom corresponding should be addressed.
Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro,
Basan 49112, Korea
Tel : 051-410-4682 E-mail : jslim@kmou.ac.kr

that AFC had a significantly lower emission of NOx compared to that of the raw coal and residue coal. Also, the residue coal showed a higher reactivity compared to raw coal. And finally, In the case of the residue coal and mixed coal, they showed a lower ash deposition than that of low-rank coal.

Key words : Ash Free Coal, Unburned carbon, NOx, Ash Deposition ,DTF

1. 서론

석탄은 대한민국 에너지 공급에 있어서 매우 중요한 자원이다. 현재 석탄은 전체 에너지 공급의 29%를 차지하며 전체 전력생산 중 45%를 석탄을 이용하여 생산하고 있다. 2015년 3월 기준 대한민국은 총 53기의 석탄 화력발전소가 운행되고 있고, 2021년까지 24기의 석탄 화력발전소를 추가로 건설할 예정이다. 석탄은 화력발전소에서 주로 이용되며 국내 화력발전에서 쓰이는 석탄의 양은 전체 화력발전에서 사용되는 연료의 80% 이상을 차지하고 있다.

최근 석탄 가격이 낮아지면서 저등급석탄의 사용량이 감소하고 있지만 석탄가격은 변동이 심하여 가격적 측면에서 안정성을 확보해야만 한다. 따라서 고등급 석탄의 가격 변동에 의한 영향을 최소화 하기 위해서는 기존의 고등급 석탄보다 가격이 낮으며 일정한 저등급 석탄으로의 보완/대체 하려는 연구가 계속 진행되어야한다. 저등급석탄들은 일반적으로 높은 회분 함량을 가지고 있으며 이로 인해 연소 효율의 저하 및 회분으로 인한 보일러 후단부에서 생성되는 slagging/fouling^(1,2) 문제가 많이 보고되고 있다. 보일러 내의 slagging/fouling은 열효율을 떨어뜨리고 석탄 화력 보일러의 유지비용을 증가시키기 때문에 slagging/fouling의 원인 규명 및 해결책을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 선행 연구에 따르면 석탄의 회분함량이 높을수록 점화 온도가 높아져 점화시점이 지연되고⁽³⁾, 연소 효율의 감소^(4,5)로 인해 미연분 분율이 증가⁽⁶⁾하는 경향을 나타낸다는 연구 결과가 있다. 이를 해결하기위해 많은 연구들이 진행되고 있으며 그 중 하나가 AFC이다. 저등급석탄을 용매와 반응시켜 회분의 함량을 200ppm 이하로 낮추고 발열량을 높임과 동시에 보일러 내부의 slagging/fouling 현상을 해결할 수 있을 것으로 예측되고 있다. 하지만 아직까지 AFC에 대한 많은 연구가 진행되고 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 AFC의 연소특성을 확인하기 위하여 아역청탄인 KCH 를 이용하여 각각 다른 방

법으로 제조된 무회분탄1, 무회분탄2와 잔탄, 보일러 설계기준탄과 비슷한 Glencore, Glencore와 잔탄의 혼소 등 총 6종의 석탄을 1,300℃, 과잉공기량 1.16 조건에서 DTF 실험을 진행하였다. 저등급 석탄을 개선한 무회분탄과 잔탄의 고등급 석탄 보완/대체성, 배출가스 특성을 파악하고 보일러 후단부에서 문제가 되고 있는 slagging/fouling 문제의 해결 가능성을 확인하였다.

2. 이론

2-1 NOx 제어

연소를 통해 배출되는 NOx는 일반적으로 Prompt, Thermal, Fuel NOx로 크게 3가지로 나눌 수 있다. 이 중에서 Prompt NOx는 다른 두 가지와 비교하면 상대적으로 영향이 매우 미미하여 본 연구에서는 고려하지 않았다. Thermal NOx는 연소되는 공기 중에 함유된 질소가 고온에서 산화되어 발생하는 질소산화물이고, Fuel NOx는 석탄에 함유되어 있는 유기적으로 결합된 질소를 함유하고 있을 때 이 질소 성분이 연소과정에서 산화되어 발생하는 NOx이다. 대부분의 연소 과정에서는 Thermal NOx가 발생하는 NOx의 가장 큰 부분을 차지하지만 석탄 연소의 경우에는 Fuel NOx의 영향이 Thermal NOx 보다 크다.

Fuel NOx는 Volatile N과 Char N의 반응을 모두 고려한 전체 반응식 모델로 예측된다. 모델에 따르면 Volatile N은 연소 시에 중간생성물인 NH₃(10%)와 HCN(90%)로 변하게 되고, 그 후 NOx 또는 N₂를 생성하게 된다. Char N에 의한 NOx는 Char에 함유되어 있는 C와 N의 상대적 분포와 관련된 인자에 의해 영향을 받아 석탄의 연소율에 비례하게 산화되어 생성된다.⁽⁷⁾ 즉, 탈휘발 과정 후에 남아있는 Char N의 불균질 산화에 의해 NOx가 생성된다. De soete⁽⁸⁾가 제안한 식 (1), (2)에 의해 Fuel N에 의해 생성되는 NOx를 제어한다.





2-2 Ash Deposition

Deposition에 대한 경향은 DTF 실험을 통해서 얻어진 점착된 질량으로부터 측정되고, 실험 결과는 다음의 두가지 다른 deposition indices에 분석된다.

1) CE (Capture efficiency)

CE는 실험 동안에 프로브의 투영된 표면 면적을 따라 흐르는 회 입자들의 질량에서 점착된 질량을 나눔으로써 계산한다. CE는 특정한 석탄에 포함되어 있는 회의 양을 고려하지 않고 실험에 의해 얻어진 회 질량의 분율을 측정하여 점착하려는 입자의 경향을 나타낸다.

$$CE = \frac{m_{Dep}}{m_{Ash} \frac{A^P}{A_{reactor}}} \times 100 [\% kg_{Dep}/kg_{Ash}] \quad (3)$$

이것은 실험에서 측정된 인자들로서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$CE = \frac{m_{Dep}}{m_{Fuel} \left(\frac{A^P}{100} \right) \left(\frac{A_{coupon}}{A_{reactor}} \right)} \times 100 [\% kg_{Dep}/kg_{Ash}] \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 m_{Dep} , m_{Ash} 과 m_{Fuel} 은 쿠폰위에 축적된 회점착의 질량(kg), 반응로안에 지나가는 전체 회의 질량, 실험동안 공급된 석탄의 질량을 나타낸다. A_{coupon} 과 $A_{reactor}$ 은 각각 쿠폰(Coupon)의 투영된 면적과 DTF의 cross section 된 면적이다. A^P 는 석탄 안에 있는 회의 양이다.

2) GRE (Energy based growth rate)

$$GRE = \frac{m_{Dep}}{LHV \times m_{Fuel}} [g_{Dep}/MJ \text{ or } (g_{Dep}/s)/MW] \quad (5)$$

GRE는 CE index에서 간과된 부분을 고려한다. Mineral matter의 양은 회가 점착하면서 성장하는 비율에 관해 매우 중요한 영향을 미치고, 정확한 열량을 얻기 위하여 공급된 석탄의 양은 그것의 발열량에 의존하는 점이 추가적으로 고려된다. GRE는 석탄의 연소로부터 생산되는 열량 당 회 점착의 성장률로 표현

이 되고, CE와 GRE는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$GRE = \frac{CE \times 10^3}{100} \left(\frac{A^P}{100} \right) \left(\frac{1}{LHV} \right) \left(\frac{A_{coupon}}{A_{reactor}} \right) [g_{Dep}/MJ] \quad (6)$$

Hatt⁽⁹⁾는 회의 특성들보다 에너지에 기초하여 물질의 양에 관련된 지수를 얻는 것이 더 나은 슬래깅 예측을 할 수 있다고 보고하고 있다. 이것은 GRE가 실제적인 목적으로 쓰이는 실험적인 결과들을 표현하기 위하여 유용한 인자로서 사용될 수 있다는 것을 의미한다.

3. 실험장치 및 조건

3-1 실험 장치

본 연구에서는 KCH 원탄, 무회분탄1, 무회분탄2, 잔탄, Glencore 및 Glencore와 잔탄의 혼소탄의 미연분, 배출가스 및 회 점착 특성을 알아보기 위하여 DTF (Drop Tube Furnace)를 사용하였으며 Fig 1에 실험 장치에 관한 개략도를 나타내었다. DTF는 실험 간에 온도를 균일하게 유지 할 수 있고, 다양한 온도에서 실험이 가능하다는 장점을 갖고 있다. DTF는 연료 공급부, 반응부 그리고 포집부로 크게 세 부분으로 이루어져 있다. 연료 공급부는 syringe pump, 진동기, 실린더, STS tube로 구성되어 있다. 진동에 의해 시험관 안의 석탄 입자를 부유시키고, carrier gas에 의해 부유 입자들이 STS tube를 통하여 반응부로 들어가게 된다. 이때 투입량을 균일하게 하기 위하여 syringe pump를 사용한다. 조건에 맞게 일정한 속도를 설정하여 석탄 시료와 STS tube의 간격을 일정하게 유지시켜 준다. 반응부는 시료와 반응 가스가 만나 화학반응이 일어나는 영역이다. SiC heater를 사용하여 일정한 온도를 유지하게 되고, 저온에서부터 최대 1500°C 범위에서 균일한 온도로 실험이 가능하다. 포집부는 반응부에서 연소된 후의 시료를 포집하여 미연분을 측정할 수 있는 부분과 회분을 포집하여 점착을 평가할 수 있는 부분으로 구성된다. 포집부 주변으로 냉각수를 흐르게 하여 입자가 포집부에서 추가적인 반응이 일어나지 않도록 한다. 미연분 포집의 경우, 하단부 포집용 장치를 장착하여 미연분이 더 이상 아래로 나가지 못하게 하여 채취한다. Fig 1 오른쪽 부분을 보면 회 점착 포집부의 개략도를 나타냈다. 회 점착 특성을 알아보기 위해서 DTF 하단의 쿠폰이 장착된 프

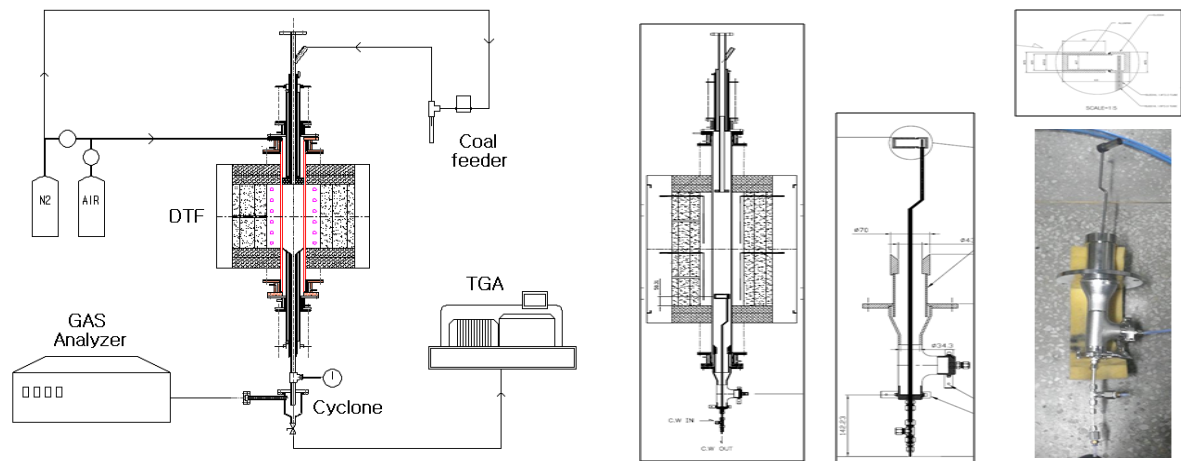


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1. Properties of coals used in this study

	KCH	AFC1	AFC2	Residue Coal	Glen_RC (85:15)	Glencore
Proximate analysis(%)						
Moisture	30.66	0.32	0.43	0.86	8.03	9.30
Volatile	32.73	91.61	77.16	40.44	34.97	34.00
Ash	5.72	0.04	0.11	8.30	9.15	9.30
Fixed carbon	30.90	8.04	22.3	50.41	43.38	47.10
Ultimate analysis(%)						
C	49.28	82.05	78.47	67.67	53.55	51.06
H	4.39	9.10	8.37	4.39	3.45	3.28
O	36.88	8.41	12.44	18.10	9.37	7.83
N	0.54	0.24	0.34	0.84	1.44	1.55
S	0.66	0.16	0.27	0.63	0.50	0.47

로브(probe)를 이용하여 프로브 윗부분에 포집이 가능하게 하였다.

반응부에서 시료가 연소 되면 미연분이 발생하게 되는데 이것을 분석하는 장비로 TGA(Q600-SDT)를 사용하였다. 온도를 107°C까지 승온시켜 질소 분위기에서 수분을 제거하고 950°C까지 승온하여 질소 분위기에서 휘발분을 제거한다. 그리고 750°C로 온도를 유지시키면서 공기 분위기로 전환하여 질량 감소를 측정한다. 측정한 데이터를 반응 전후의 ash의 함량은 동일하다는 원리를 바탕으로 한 Ash trace method를 사용하였다. 배출가스는 Eurotron Gas Analyzer를 사

용하여 측정하였다.

3-2 실험 조건

3-2-1 시료 준비

본 연구에서는 시료의 공업분석을 수행하기 위해 Leco, TGA-701을 사용하였다. Table 1에 각 시료의 공업분석(수분, 휘발분, 회분, 고정탄소) 및 원소분석(C, H, O, N, S)값을 나타내었다. 무회분탄의 경우 ash가 확연히 줄어들고, 휘발분 함유량이 높아짐을 알 수 있다. 잔탄의 경우 원탄에 비해 고정탄소분의 양이 높아졌다.

3-2-2 DTF 실험 조건

석탄 연소 실험을 위해 Table 2와 같은 조건으로 실험을 진행하였다. 1300°C의 균일한 온도에서 실험을 진행 하였다. 입자사이즈는 75-90 μ m, Feeding rate을 0.2g/min으로 설정하였다. 공기과잉률(Stoichiometric ratio)는 석탄내의 연소성 성분을 고려하여 석탄 1kg 이 연소 될 때 필요한 O₂ 분율을 나타낸다. FO₂, stoi = 18.6667C + 56H + 16N + 7(S-O)로 정의되고, 각 원소에 석탄 내의 연소성 성분 분율을 대입한다. 실험에서는 O₂ 농도를 6%로 설정하여 각 시료 별로 Excess O₂량을 달리 하였고 실제 발전소의 공기과잉률 1.16을 적용하여 연소조건을 동일하게 하였다.⁽¹⁰⁾

Table 2에 회 점착을 위한 실험 조건을 나타내었다. 프로브(probe)의 위치는 주위 온도의 영향을 받기 적합한 부분인 반응구간의 하단에서 5cm 정도 윗부분으로 하였다. 배출가스 및 UBC 분석과 마찬가지로 공기과잉률을 1.16으로 맞춰 실제 보일러와 비슷한 조건을 갖도록 하였고, 석탄 공급량은 10g 정도이다. 시료의 투입은 0.2g/min으로 1시간 가량 공급하게 된다. 본 실험에서 사용한 시료는 KCH, AFC1,2, Residue Coal, Glencore 이고, Residue Coal과 Glencore의 혼탄을 추가적으로 실험하였다. 시료의 투입은 0.2g/min으로 1시간 가량 공급하게 된다. 점착되기 전의 쿠폰의 무게를 측정하고 점착 후의 쿠폰 무게에서 점착 전의 무게를 차감하여 점착된 회의 무게를 알 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4-1 배출가스 및 미연분 분석

실험 시 원탄, 잔탄, 무회분 석탄의 전소 특성실험과 표준탄(85%)+잔탄(15%) 혼소 특성실험을 수행하

여 아래 Fig 2, Fig 3과 같이 배기배출물 중 질소산화

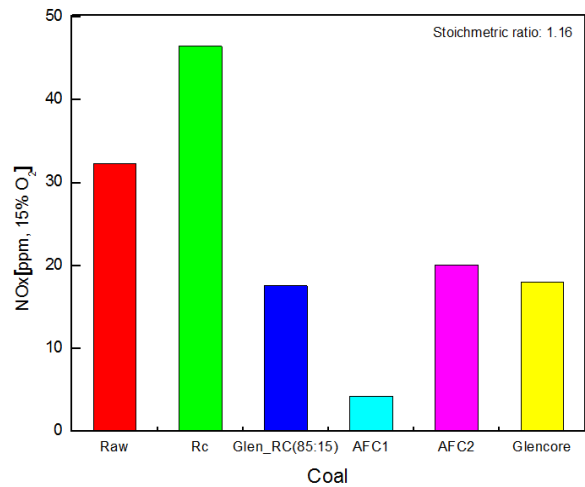


Fig. 2. NOx emissions corresponding to various coals

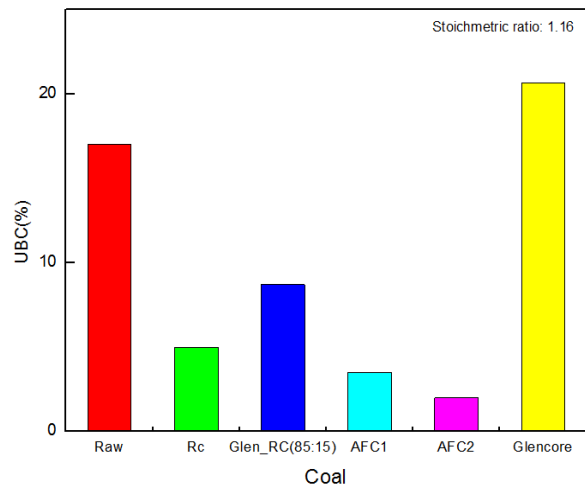


Fig. 3. UBC fraction corresponding to various coals

Table 2. Input parameters considered in this study

Parameters	Conditions(Combustion)	Conditions(Ash Deposition)
Setting temperature(°C)	1300	1300
Coal size(μ m)	75-90	75-90
Total flow rate(lpm)	5	5
Pressure(atm)	1	1
Residence time(sec)	0.74	0.74
stoichiometric ratio	1.16	1.16
Coal Feeding rate	0.2g/min	10g/hr

물(NOx)과 미연탄소분(UBC ; Unburned Carbon) 결과를 획득하여 각각 나타내었다. 질소산화물(NOx)은 O₂ 15%로 맞춰 측정하였다.

$$NOx_{ppm(@15\%)} = \left(\frac{21 - O_2(\%)}{21 - O_2(actual)(\%)} \right) NOx(ppm) \quad (7)$$

결과를 살펴보면 잔탄의 경우 원소분석에서 N 함유량을 보면 알 수 있듯이 가장 높은 배출특성을 나타내고 있으며, 무회분탄1,2는 원탄과 잔탄에 비해 현저히 낮은 양의 질소산화물이 배출됨을 알 수 있다. Glencore 85 wt%와 잔탄의 15 wt% 혼소 조건에서는 잔탄에 비해 현저히 낮은 배출량을 확인 할 수 있으며 Glencore 100wt%와 비교해서도 유사한 수치의 배출량이 나타남을 확인 할 수 있다. 미연분(UBC)의 경우 원탄에 비해 무회분탄(AFC) 및 잔탄이 더 낮은 값을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 무회분탄은 수분이 적고, 휘발분 함유량이 매우 높아 연소시 초기부터 반응이 진행되기 때문이라 해석 할 수 있고, 잔탄의 경우에도 원탄에 비해 고등급화 되면서 반응성이 훨씬 좋아지는 것을 확인 할 수 있다. Glencore 85 wt%와 잔탄의 15 wt% 혼소 조건에서는 미연분의 경우 Glencore 보다는 낮게, 잔탄보다 높게 나타난다. 이러한 점으로 봤을 때 잔탄 15wt% 혼소의 경우는 화력발전에서 우수한 적용성을 가질 수 있다고 판단된다.

4-2 회 점착(Ash Deposition) 특성

회 점착 실험은 보일러 후단의 슬래깅/ 파울링성(Slagging/ Fouling)을 예측 할 수 있다. 반응부 내부에 설치된 Deposit Probe에 점착 되어진 석탄 회의 중량을 분석하여, 앞서 언급했던 CE(Capture Efficiency)와 열량당 부착성인 GRE(Energy based Growth Rate)로 나타내었다.

최 점착 특성을 분석하기 위해 무회분 탄과 잔탄을 전소 시키고, Glencore 85wt% + 잔탄 15wt% 혼소시켰다. Fig 4는 실험을 통해 Deposit probe에 부착된 각 샘플의 석탄 회 이미지를 나타낸 것으로 윗부분부터 무회분 석탄, 잔탄, Glencore 85wt% + 잔탄 15wt% 혼탄, Glencore의 회 이미지이다. 잔탄의 경우, 저 열량 석탄으로부터 생성되었다. 그 과정에서 회 함량이 5.72%에서 8.30%로 증가함으로서 부착성이 매우 곱고 많이 부착되는 것을 확인 할 수 있고, 혼탄의 연소 시엔 Glencore와의 상호작용에 의해 점착성이

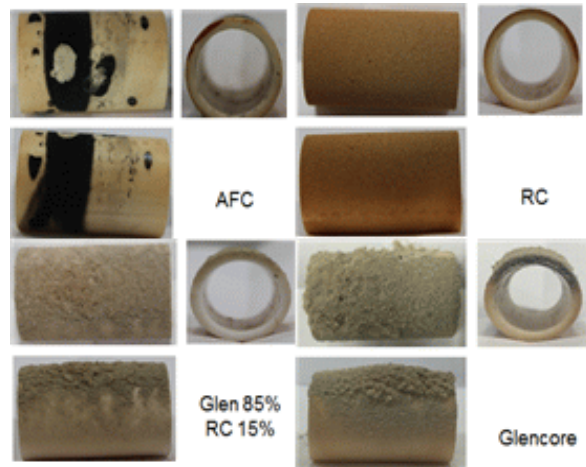


Fig. 4. Ash deposition image

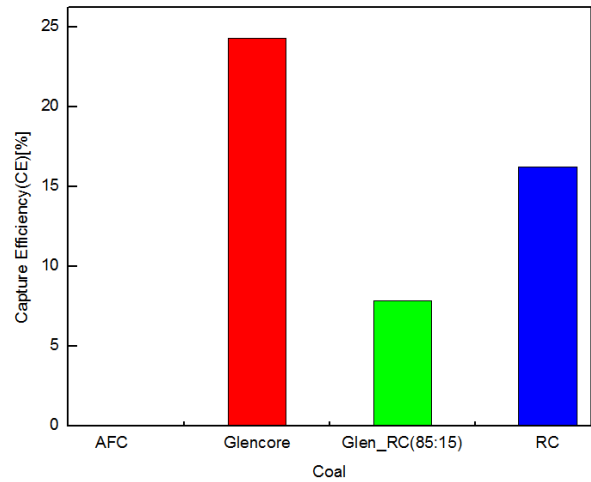


Fig. 5. Capture Efficiency corresponding various coals

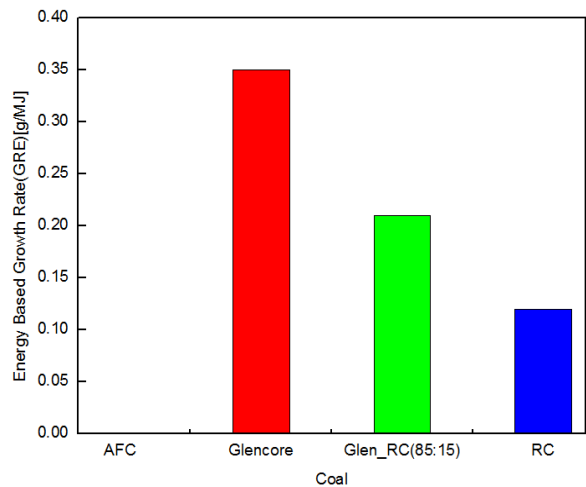


Fig. 6. Energy Based Growth rate corresponding various coals

다소 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 무회분 석탄의 경우는 연소가 되지 못하고 노 내에서의 열원에 의해 가열 후 액화되면서 급속히 낙하되는 것으로 판단된다. 휘발분이 많은 무회분 석탄으로 char 생성 시 부푸는 현상이 발생하는 것에서 그 근거를 찾을 수 있다. 그리하여 Depositite 프로브 쿠폰에 회 점착이 아닌 반응을 다하지 못한 무회분 석탄이 부착되는 현상을 보여 점착성 결과를 살펴 볼 수 없었으나 회가 거의 없기 때문에 회 점착의 의미는 없는 것으로 사료된다. Fig 5, Fig 6에는 프로브 쿠폰에 부착된 석탄 회의 중량을 분석하여 부착 빈도인 CE와 공급 열량에 대한 부착성인 GRE로 구분하여 나타내었다. 무회분 석탄의 경우 부착성을 분석 할 수 없어 표기하지 않았으며, 잔탄 및 잔탄 15wt% 혼탄의 경우는 부착성을 분석하여 나타내었다. 잔탄과 혼탄의 경우 일반적인 저열량탄 수준보다 다소 낮은 부착성을 나타내고 있으며, 혼소 하였을 경우에는 혼탄의 영향으로 그 부착성이 다소 저감 된 것을 확인 할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 Lab-scale DTF 실험을 통하여 여러 탄종의 연소 시 미연분 및 배출가스, 회 점착 특성에 대해 분석 하였다.

- (1) 무회분탄1,2는 원탄과 잔탄에 비해 현저히 낮은 양의 질소산화물이 배출 되고 혼탄의 경우 잔탄에 비해 현저히 낮은 배출량을 확인 할 수 있다.
- (2) 잔탄은 원탄에 비해 고등급화 되면서 반응성이 훨씬 좋아지는 것을 확인 할 수 있다. 혼탄의 경우, 미연분이 Glencore보다는 낮게, 잔탄 보다 높게 나타나는 것으로 보아 화력발전에서 우수한 적용성을 가짐을 확인 하였다.
- (3) 무회분탄은 노 내에서의 열원에 의해 가열된 후 액화되면서 급속히 낙하하기 때문에 프로브 쿠폰에 회점착이 일어나지 않고 반응하지 못한 부분이 부착되는 것을 확인하였다.
- (4) 잔탄과 혼탄의 경우 일반적인 저 열량탄 수준보다 다소 낮은 부착성을 나타내고 있으며, 혼소 하였을 경우에는 혼탄의 영향으로 그 부착성이 다소 저감 된 것을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20131010101810)

References

1. I. Panagiotidis., K. Vafiadis., A.tourlidakis., and A. Tomboulides., "Study of slagging and fouling mechanisms in a lignite-fired power plant," Applied Thermal Engineering, Vol. 74, pp. 156-164, (2014)
2. Zhanhua Maa., Felicia Imana., Pisi Lua., Rod Searsa., Lingbu Kongb., A.S. Rokanuzzamanb., Donald P. McCollorb., Steven A. Bensonb., "A comprehensive slagging and fouling prediction tool for coal-fired boilers and its validation/application," Fuel Processing Technology, Vol. 88, 11-12, pp. 1035-1043, (2007)
3. Hirofumi, T., Hiromi, S., Hiromitsu M., and Priven, R., "Emission Characteristics NOx and Unburned Carbon in Fly Ash on High-Ash Coal Combustion," Fuel, Vol. 90, No. 2, pp. 850-853, (2011)
4. Kurose, R., Ikeda, M. and Makino, H., " Combustion Characteristics of High Ash Coal in a Pulverized Coal Combustion," Fuel, Vol. 80, pp. 1447~1455, (2001)
5. Timothy, L. D., Sarofim, A.F., and Beer, M., "Characteristics of Single Particle Coal Combustion," Nineteenth Symposium on Combustion, Vol.23, No.2, pp.1123-1130, (1982)
6. Kim, S.I., Lee, B.H. and An K.J., Kim M.C., Kim S.M., Jeon, C.H., "Effect of Ash Content on Unburned Carbon and NOx Emission in a Drop Tube Furnace," , Applied Energy, Vol. 38, No. 11 pp. 963~969, (2014)
7. Lee, B. H., Kim, S. G., Song, J. H., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., "Influence of Coal Blending Methods on Unburned Carbon and NO Emissions in a Drop-tube Furnace," Energy&Fuels, Vol. 25, pp. 5055~5062, (2011)
8. De Soete GG., Fifteenth Symposium (international) on Combution, The Combustion Institute, Pitts-

- burgh, PA, p.1093, (1975)
9. Roderick M. Hatt., "Fireside deposits in coal-fired utility boilers," *Energy & combustion*, vol 16, pp. 235~241, (1990)
 10. Wang, J., Fan, W., Li, Y., Xiao, M., Wang, K. and Ren, P., "The Effect of Air Staged Combustion on NOx Emissions in Dried Lignite Combustion," *Energy*, Vol. 37, pp. 725~736, (2012)