

## 미분탄과 목재 바이오매스 혼합 연료의 연소 및 열분해 특성에 관한 연구

안재우\* · 안성율\* · 문철언\* · 성연모\* · 서상일\*\* · 김태형\*\* · 최경민\*\*\*\* † · 김덕줄\*\*\*\*

### A Study on Characteristics of Combustion and Thermo Pyrolysis in Co-firing with Pulverized Coal and Wood Biomass

Jae Woo An, Seong Yool Ahn, Cheor Eon Moon, Yon Mo Sung, Sang Il Seo, Tae Hyung Kim, Gyung Min Choi and Duck Jool Kim

#### ABSTRACT

The effect of co-firing with pulverized coal and wood biomass on ignition and burn-out temperature was investigated at air and oxy-fuel conditions by thermo gravimetric analyzer(TGA). Three kinds of coal(shenhua, adaro, wira) were selected and mixing ratios of coal and wood biomass was set to 1, 0.5, and 0.8. The ignition temperature depended on the amount of volatile matter of blended fuel, while the burn-out temperature was dominated by the oxidant ingredients. The oxy-fuel condition with an oxygen ratio(Ofr,o) of 0.3 showed similar tendency with air condition in the heat flow measurement. Volatile matter reaction, however, became dominant when oxygen ratio exceeded 0.8 for co-firing combustion of wood biomass and pulverized coal.

Key Words : Co-firing, Wood biomass, Pulverized coal, Ignition, Burn-out, Oxy-firing

#### 기 호 설 명

##### Alphabets

$T_{ign}$  : Ignition temperature(K)

$T_{e,c}$  : Burn-out temperature(K)

$C_{fr}$  : Weight rate of coal in mixed fuel  
(coal/mixed fuel mg/mg)

$O_{fr,n}$  : Volume rate of oxygen in oxidant of  $N_2$  and  $O_2$ (oxygen/mixture mL/mL)

$O_{fr,o}$  : Volume rate of oxygen in oxidant of oxy-fuel( $CO_2$  and  $O_2$ ) (oxygen/mixture mL/mL)

## 1. 서론

현재 전 세계에서 급격한 경제 발전과 함께 화석 연료 소비량과 가격은 지속적으로 증가하는 추세이다. 현재 대부분의 연료를 수입 역청탄으로 사용하고 있는 국내 화력발전소는 가격 상승이 민감한 문제로 대두되고 있으며 이에 대한 대안 중 하나로서 목재 바이오매스를 꼽을 수 있다. 바이오매스는 역청탄에 비해서도 경제적 경쟁력이 있으며, 세계적인 관심사인 온실가스(이산화탄소) 규제 문제에도 큰 장점을 가지고 있다. 목재 바이오매스는 황 함량이

적기 때문에  $SO_2$  발생을 저감할 수 있는 친환경적인 연료이다. 특히 고 유황 석탄과 혼합 연소하는 경우 바이오매스에 함유되어 있는 알칼리 물질이  $SO_2$ 를 제거하는 효과를 기대할 수 있으며, 바이오매스가 갖고 있는 질소성분은 연소과정에서 NH 라디칼로 전이되기 때문에 NO를 환원시켜 제거하는데 사용되어 NOx 제거 효과도 있는 것으로 보고되고 있다[1-3]. 이러한 목재 바이오매스 사용의 한 방법으로서 기존의 화력발전소에 쉽게 응용할 수 있는 것이 석탄과 목재 바이오매스의 혼합연소이다. 그렇지만 석탄과 바이오매스를 혼합 연소 시 바이오매스가 포함하고 있는 많은 휘발성분으로 인해 화염 불안정성이 일어날 수 있고, 회분의 낮은 융착온도에 의해 slagging, fouling 현상이 일어나는 단점이 있기 때문에, 기존의 발전소에서는 제한된 양만을 혼합하여 사용하고 있

\* 부산대학교 기계공학과 대학원

\*\* 전력연구원

\*\*\* 부산대학교 기계공학부

† 연락처, choigm@pusan.ac.kr

는 실정이다[1-4].

Lester[5] 등은 열 중량 분석기(TGA : Thermo Gravimetric Analyzer)를 이용하여 석탄과 목재 바이오매스의 혼합연소 시 혼합비율에 따라 연소거동에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았으며, Qingzhao Li[6] 등은 석탄 연소시 순산소 조건을 고려하여 산소 농도에 따른 착화 온도의 변화를 조사하였다.

이러한 석탄과 바이오매스의 혼합연소에 있어서 역청탄 및 아역청탄 등의 석탄등급이 혼합연소 특성에 미치는 영향에 대해 충분한 이해가 이루어져 있지 않으며, 최근 주목을 받고 있는 순산소 연소조건의 적용가능성에 대해서는 아직 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 석탄과 목재 바이오매스의 혼합 연소에서 석탄등급 및 산화제가 연소 및 열분해과정에 미치는 영향을 조사하기 위해 열 중량 분석기를 이용하여 현재 국내 발전소에서 사용되고 있는 3종의 석탄(shenhua, adaro, wira)과 목재 바이오매스(국내 소나무 톱밥)의 연료 혼합비율 및 산화제 변화에 따른 연소 착화 온도, 연소 종료온도 및 열유량(Heat flow)계측을 수행하였다.

## 2. 실험 조건

본 논문에서는 열 반응에 대한 중량 측정과 열 유동을 측정할 수 있는 DS-TGA(SDT Q600, TA instrument)를 이용하여 현재 국내 발전소에서 수입하고 있는 석탄 3(shenhua, adaro, wira)종과 국내 소나무 톱밥 목재 바이오매스의 혼합연소 특성에 대하여 연구하였다. Shenhua 탄은 역청탄으로서 아역청탄에 비하여 휘발 분은 낮고, 고정탄소 함량은 상대적으로 높아 양질의 연소 반응성을 보여준다. 한편, 아역청탄으로 구분되어 있는 adaro와 wira 탄의 고정탄소 함량은 유사하지만, 수분 함량의 차이로 인한 발열량 차이가 존재한다. 이러한 3가지 탄종과 바이오매스 연료의 혼합 비율에 따른 연소특성을 조사하기 위하여 혼합물 내의 석탄질량비( $C_{fr}$ )를 0, 0.5, 0.8, 1로 설정하였으며, 또한 산화제 변화의 영향을 알아보기 위하여 산화제 내의 산소 비율( $O_{fr}$ )을 0.21, 0.3, 0.5, 0.8로 변화시키면서 실험을 하였다. 질소 대신 이산화탄소를 사용하는 순산소 조건에서도 산소 농도를 같은 조건으로 변화시켜 실험을 수행하였다.

본 연구에 사용된 석탄과 바이오매스의 공업분석 및 원소분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 목재 바이오매스의 경우 석탄에 비해 많은 양의 수분, 휘발분과 산소를 함유하고 있으며 적은 회 함유량을 가지고 있기 때문에 기존의 역청탄 연소와는 다른 경향을 보여줄 것이다.

**Table 1.** Proximate and ultimate analysis of feedstock

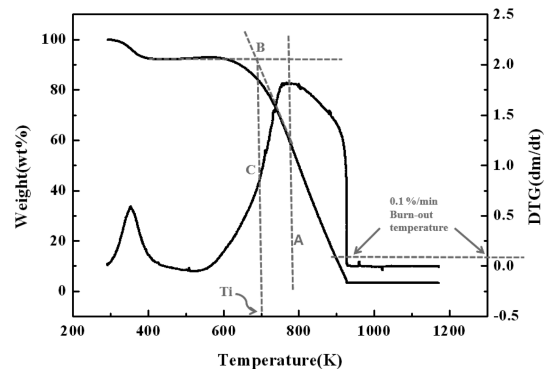
| 종 류           | Adaro | Shenhua | Wira  | 바이오매스 |
|---------------|-------|---------|-------|-------|
| 공업 분석 (wt%)   |       |         |       |       |
| 휘발분           | 40.95 | 32.17   | 41.44 | 71.49 |
| 고정탄소          | 42.01 | 54.21   | 41.20 | 15.31 |
| Ash           | 2.82  | 7.24    | 13.78 | 0.3   |
| 수분            | 14.23 | 6.39    | 3.58  | 12.9  |
| 원소 분석 (wt%)   |       |         |       |       |
| C             | 71.20 | 75.90   | 67.10 | 41.89 |
| H             | 5.27  | 4.81    | 5.25  | 4.5   |
| N             | 1.28  | 1.40    | 1.40  | 0.22  |
| S             | 0.03  | 0.00    | 0.67  | 0     |
| O             | 18.93 | 10.15   | 11.29 | 40.19 |
| Ash           | 3.29  | 7.73    | 14.29 | 13.2  |
| 발열량 (kcal/kg) |       |         |       |       |
|               | 4901  | 5913    | 5690  | 3376  |

본 연구에 사용된 샘플의 질량은 1회당 15 mg로 하였으며 석탄과 바이오매스 입자 크기는 체(Sieve)를 이용하여 실제 발전소 공급조건에 가까운 200 mesh 이하로 분류하였다. 산화제는 100 mL/min의 유량으로 공급하였으며, 승온 속도는 30 K/min으로 고정하여 로 내의 온도를 최대 1300 K까지 상승시켜 실험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1. 석탄과 목재 바이오매스 혼합비율에 따른 영향

석탄의 착화온도를 결정하는 방법에는 Pulse 착화기법, TG 착화측정, 열전대를 이용하여 입자 온도를 직접적으로 측정하는 방법 등 여러 가지가 있다[7]. 본 연구에서는 DTG(Derivation of Thermo Gravime-



**Fig. 1.**  $T_{ign}$  and  $T_{ec}$  in TG and DTG curve.

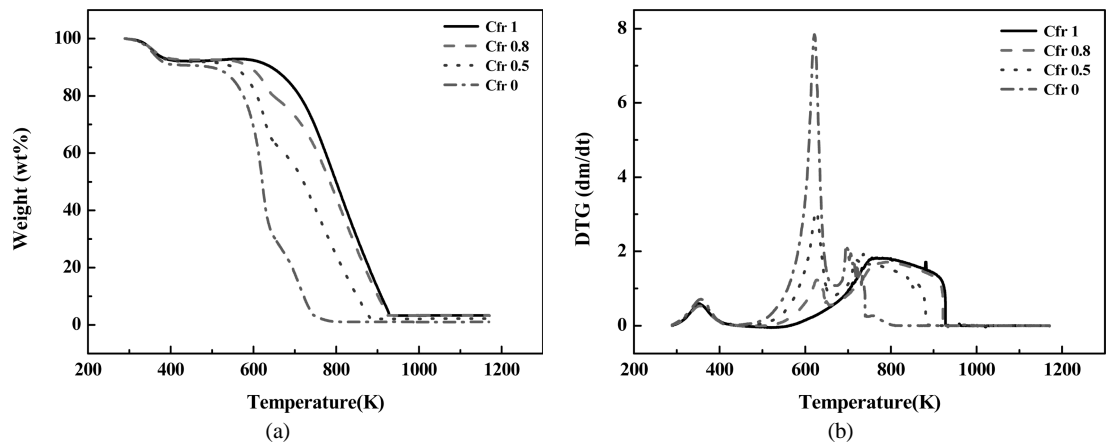


Fig. 2. Weight(%) histories(a) and DTG curves(b) as a function of mixing rate in the air condition.

tric curve) 곡선의 변곡점에서 수직으로 선(A)을 그어 TG 그래프와 만나는 지점에서 접선 방향으로 선분(B)을 그리고, 수분을 제거한 지점에서 수평선을 그어서 접선과 만나는 지점에서 다시 수직으로 선분(C)을 내린 지점의 온도를 착화 온도( $T_{ign}$ )로 정의하였다. TG 그래프의 변화폭을 나타낸 Derivation of TG curve(DTG)에서 질량 변화율이 0.1 mg/min 이하가 되는 지점의 온도를 연소 종료온도( $T_{ce}$ )로 정하였다[7-12]. 이에 관한 설명과 예를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 2에 shenhua 탄을 바이오매스와  $C_{fr} = 0, 0.5, 0.8, 1$ 의 질량비율로 혼합하여 공기 분위기에서 열분해 실험을 수행한 TG 및 DTG 그래프를 나타내었다. 400 K 이하의 온도에서 초기 질량 감소는 시료에 포함되어 있는 수분의 증발로 인하여 발생한 것이며, Table 1에서 확인할 수 있듯이 바이오매스의 수분 함유량이 shenhua 탄에 비해 6.51 wt% 정도 많기 때문에 질량 감소폭 또한 커지게 된다. 비교적 낮은 온도에서의 수분 증발이 발생한 후, 500~700

K 부근에서 탈 휘발화가 진행되기 시작한다. 일반적으로 석탄에 비해 휘발분의 양이 많은 바이오매스는 shenhua 탄에 비해서도 39.32 wt% 많은 양의 휘발분을 포함하고 있다. TG 곡선에서 바이오매스 경우 석탄에 비해 낮은 온도에서 휘발분의 방출이 시작되며, 감소하는 곡선의 기울기의 각도가 큰 것은 이와 같은 많은 휘발분의 함유로 기인한다. 이러한 다량의 휘발분이 전체 열 반응 거동에 지배적인 영향을 미치게 된다. 바이오매스의 경우 572 K 부근에서 휘발분의 방출과 함께 착화가 진행되어 연소 현상 자체가 상대적으로 낮은 온도인 780 K 부근에서 종료되는 반응성이 매우 민감한 연료로 구분할 수 있으며, 휘발분의 함유량이 상대적으로 적은 shenhua 탄의 경우 675 K 부근에서 휘발분의 방출과 함께 착화가 진행되며 휘발분 연소 후에도 탄소 연소가 고온부에서 지속된다. shenhua 탄에 바이오매스를 혼합하였을 경우, 바이오매스 혼합 비율이 높아짐에 따라 착화 온도는 점점 낮아지는 경향을 보인다.

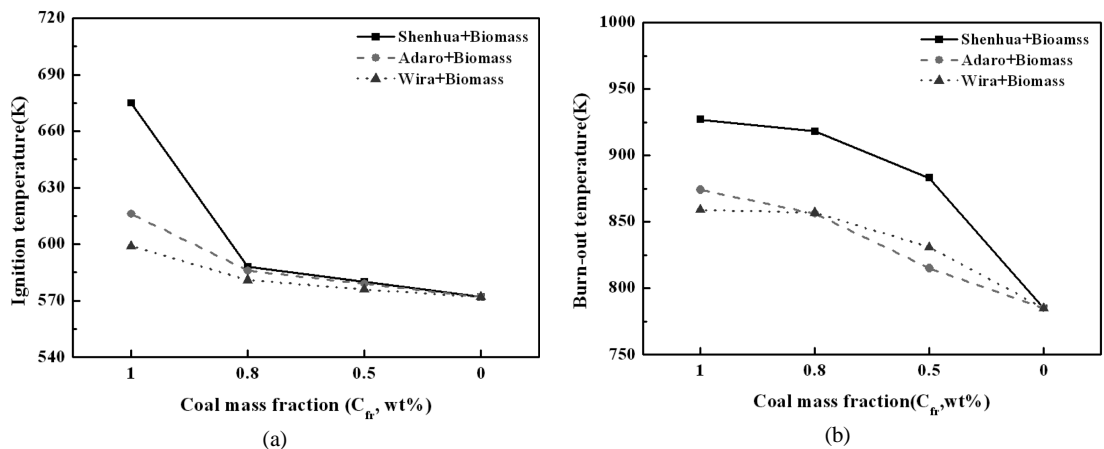


Fig. 3. Ignition(a) and burn-out temperature(b) of mixed fuels in air condition.

Fig. 3(a)에서는 shenhua 탄 이외의 두 가지 탄 종을 추가하여 각 탄과의 단일 시료의 경우와 바이오매스를 혼합하였을 때의 착화 온도 변화를 살펴본다. 3종의 석탄 착화온도는 shenhua 탄이 675 K로 가장 높으며, adaro, wira는 각각 616, 599 K에서 착화를 시작한다. 휘발분의 양과 착화온도는 반비례하는 경향을 보이고 있으며, 혼탄의 경우 역시 바이오매스의 비중이 높아질수록 착화온도는 일정한 비율로 낮아지는 경향을 보여준다.

Fig. 3(b)는 3가지 탄 종과 바이오매스를  $C_{fr} = 0, 0.5, 0.8, 1$ 의 비율로 혼합하여 비율에 따른 연소 종료온도를 나타낸 것이다. 단일 시료의 경우 Shenhua, Wira, Adora 탄은 각각 927, 860, 874 K에서 연소가 종료되고, 바이오매스의 경우 785 K에서 연소가 종료된다. 이는 초기 수분과 고정탄소 함유량의 차이로 인한 것이며, 시료의 수분 함유량이 많고 고정탄소 비가 적을 때 연소 종료온도는 낮아지게 된다.  $C_{fr} = 0.8$  이상의 조건에서는 3가지 탄 종 모두 유사한 착화온도를 가지고 있지만, 연소 종료온도에서는 차이가 나게 된다. 이는 바이오매스 비율이 높아질수록 연소종료 온도보다는 착화온도에 더 많은 영향을 미치게 되는데, 결론적으로 바이오매스의 휘발분이 착화 온도를 지배하고, 석탄의 고정 탄소 성분의 양이 연소 종료 온도를 결정한다고 할 수 있다.

### 3.2. 혼합연소에서 산화제의 영향(Air/Oxy-fuel)

Fig. 4(a)에는 3가지 탄 종을  $O_{fr,n} = 0.21$ 인 공기 조건과  $O_{fr,o} = 0.21, 0.3, 0.5, 0.8$  조건에서 실험을 수행한 착화 온도분포를 나타내었다. 연료의 착화가 시작되는 온도는  $O_{fr} = 0.21, 0.3, 0.5, 0.8$  순으로 낮게 나타난다. Shenhua, Adaro, Wira 탄의 경우 공기 분위기에서 단일 시료의 착화 온도는 각각 675, 616, 599 K로 나타나지만, 산소의 비율이 높은  $O_{fr,o} = 0.8$

조건에서는 70~80 K 정도가 낮은 631, 530, 520 K에서 착화가 빠르게 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 산화제에 포함되어 있는 산소 농도가 높아짐 따라 화학 반응이 촉진되었기 때문이다. 반면  $O_{fr,n} = 0.21$  조건에서는 연료의 착화 온도가 동일한 산소농도의 순수 조건에 비교하여 10 K 정도 낮게 나타나 있다. 이와 같은 결과는 질소와 이산화탄소의 열용량차이에 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)와 동일한 조건의 연소 종료 온도분포를 나타내었다. 착화 온도와 마찬가지로 연소종료 온도 또한 산화제 중에 산소농도가 클수록 반응이 촉진되어 연소종료 온도가 낮아지게 된다. 착화 온도의 경우, 공기 조건과  $O_{fr,o} = 0.21$  조건에서 약 10 K 정도의 차이를 나타내었지만, 연소 종료 온도의 경우, 착화온도에 비교하여 상대적으로 큰 온도차를 나타내고 있다. 이는 산화제로 사용된 이산화탄소와 질소의 열 특성 차이로 인한 현상으로 설명할 수 있다. 이산화탄소의 경우 연료가 착화되어 연소가 진행되는 동안 질소에 비해 낮은 열 전달율과 높은 열용량으로 인해 연소속도가 낮아져 연소 종료온도가 더 높아지게 된다[13-16].

Fig. 5에는 산화제 내의 질소 성분과 이산화탄소가 연소반응에 미치는 영향을 상세히 조사하기 위하여 각각의 조건에서 산소 농도의 변화에 따른 shenhua 탄의 착화 온도와 연소 종료온도를 나타내었다. 연소 종료온도는 산화제의 종류와 산소 농도에 따라 다소 차이를 보이나, 착화 온도는 뚜렷한 차이가 관찰되지 않아 산화제의 변화가 착화 온도보다는 연소 종료 온도에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 연소 종료온도의 경우, 산화제의 산소 농도가 높아짐에 따라서 질소와 이산화탄소 차이의 영향이 줄어들고 있으며, 모든 구간에서 순수 산소 분위기가 높은 연소 종료 온도를 보여준다. 이러한 현상은 이산화

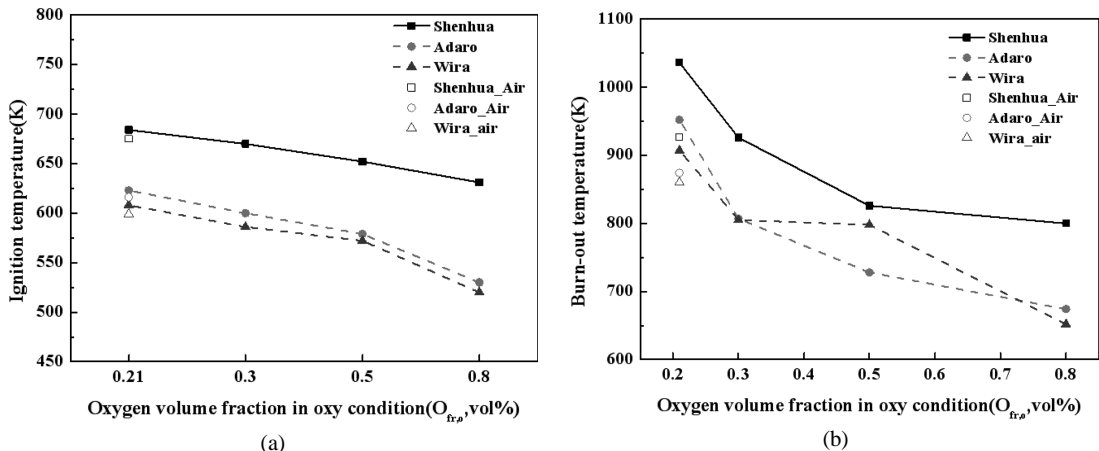


Fig. 4. Ignition(a) and burn-out temperature(b) of three types of coal.

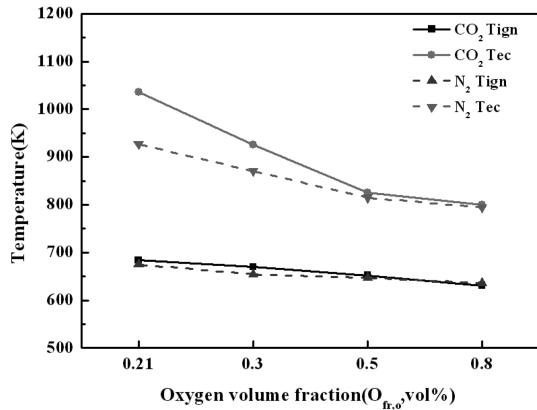


Fig. 5. Ignition and burn-out temperature of shenhua coal in various oxygen concentration of air and oxygen conditions.

탄소의 높은 열용량과 낮은 열 전달률, 고정 탄소와 이산화탄소 연소간의 현상으로 설명할 수 있다. 순 산소 조건에서는 이산화탄소의 낮은 열 전달률로 인해서 연료에 열이 전달되는 시간이 더 소요되어 고정탄소 연소에 필요한 열량 전달이 지연되고, 높은 열용량은 연료 주변을 고온 상태로 유지하게 된다. 결론적으로, 착화 온도의 경우, 산화제의 영향보다는 연료의 성분이 지배적인 영향을 미치는 반면, 연소 종료 온도의 경우 산화제의 영향을 크게 받게 된다.

Shenhua 탄과 바이오매스 혼합비율  $C_{fr} = 0.5, 0.8, 1$  조건을 공기조건과 순산소조건  $O_{fr,o} = 0.21, 0.3, 0.5, 0.8$  분위기에서 실험을 수행한 착화온도의 결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다.  $O_{fr,o} = 0.21$ 에서  $C_{fr} = 1$ 의 착화온도 684 K과  $C_{fr} = 0.5$ 의 착화온도 583 K 차이는 101 K로 나타나지만,  $O_{fr,o} = 0.8$  조건에서는 84 K로 상대적으로 변화폭이 작다. 이와 같은 결과로부터 바이오매스 혼합에 의한 효과는 고산소농도 순산소

분위기에서 매우 작음을 알 수 있다. Shenhua 단일 시료의 경우( $C_{fr} = 1.0$ ),  $O_{fr,o} = 0.21$  조건에서 684 K, 0.8의 조건에서 631 K에서 착화가 시작되어 산화제의 조성에 따른 착화 온도변화가 53 K 정도로 비교적 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.  $C_{fr} = 0.8$  조건에서는 산화제 조성에 따른 착화 온도변화가 33 K 정도로 작아 졌으며,  $C_{fr} = 0.5$  조건에서는 22 K의 차이가 나타났다.

착화온도에서는  $O_{fr,o} = 0.21$ 을 기준으로  $C_{fr} = 1$ 과 0.5 사이의 변화율은 14.76%가 되지만, 산소 농도의 변화에 따른( $O_{fr,o} = 0.21$ 과 0.8) 차이는 6.51% 정도로 연료의 변화가 미치는 영향이 크며, 착화온도는 산화제의 조성보다는 연료 내부의 휘발분 함유량에 크게 의존하고,  $C_{fr} = 0.5$  이상의 조건에서는 석탄보다는 바이오매스의 휘발분에 의해 착화 온도가 지배된다.

Fig. 6(b)는 동일한 조건에서의 연소 종료온도분포를 나타낸 것이다. 연소 종료 온도의 경우,  $O_{fr,o} = 0.21$  조건에서  $C_{fr} = 1.0$ 과 0.5의 착화온도는 136 K 차이가 나며,  $O_{fr,o} = 0.8$  조건에서는 21 K로 상대적으로 작다.  $C_{fr}$  기준으로는, 석탄 단일 시료의 경우  $O_{fr,o} = 0.21$ 과 0.8 조건의 차이가 236 K,  $C_{fr} = 0.5$ 에서는 121 K의 차이가 났다. 두 조건의 차이를 비교하여보면, 연소종료 온도에서 연료 변화에 따른 최대 변화폭은 13.12%, 산화제 변화에 따른 최대 변화폭은 22.78%로 착화온도와는 상반되는 현상을 보여준다. 이는  $O_{fr,o} = 0.5$  이상에서는 휘발분의 급격한 연소 반응과 고정탄소 반응의 속도가 가속되어 대부분의 탄소 반응이 단시간 내에 종료되기 때문에, 연료의 고정탄소 비율이 연소 종료 온도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 이러한 현상은, Fig. 6에서 공기 조건과  $O_{fr,o} = 0.21, 0.3$  조건에서는 바이오매스의 혼합비가 높아질수록 연소종료 온

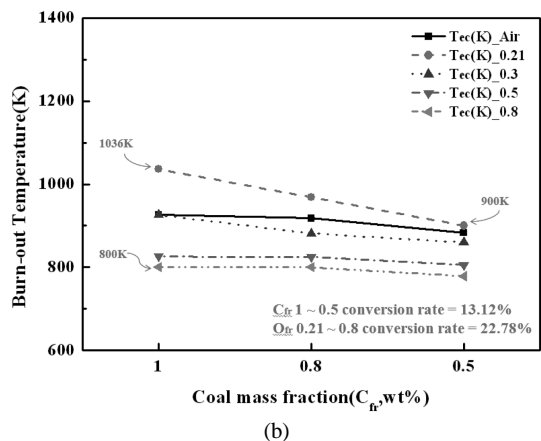
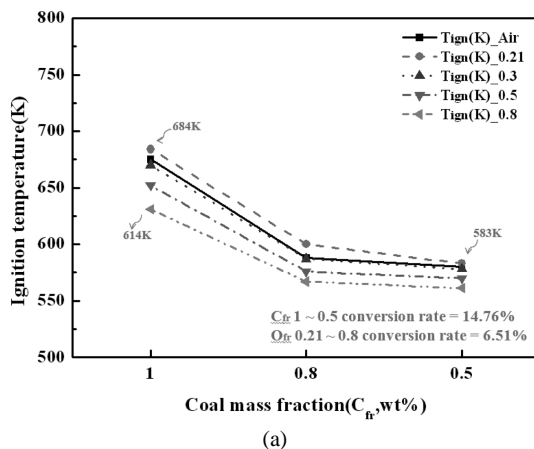


Fig. 6. Ignition(a) and burn-out temperature(b) of shenhua coal as functions of mixing ratios of oxidizer and mixed fuel.

도가 낮아지는 경향을 보였으나,  $O_{fr,o} = 0.5, 0.8$  분위기에서는 바이오매스 혼합비의 변화에도 불구하고 연소 종료온도가 일정하게 유지되는 것으로 확인할 수 있다.

### 3.3. 산화조건 변화에 따른 Heat flow 변화

Shenhua 탄을 대상으로 공기 조건과  $O_{fr,o} = 0.21, 0.3, 0.5, 0.8$  분위기의 5가지 조건에서 동일 실험을 수행하여 연소 과정에서 나타나는 heat flow를 Fig. 7에 나타내었다. 산화제 조성을 공기에서 순산소 조건으로 즉, 질소를 이산화탄소로 대체하였을 때, heat flow의 피크 값은 줄어드는 반면 반응 영역의 온도는 높아지게 된다. 이는 이산화탄소의 열용량이 질소보다 크기 때문에 연료의 열전달 량에 민감하게 반응하지 못하기 때문이다. 순산소 분위기에서 산소 농도를 증가시킬수록 heat flow 그래프에서 두 개의 피크가 확연히 나타나게 되는데, 이는 휘발분과 고정 탄소 반응이 좁은 영역에서 발생하기 때문에 피

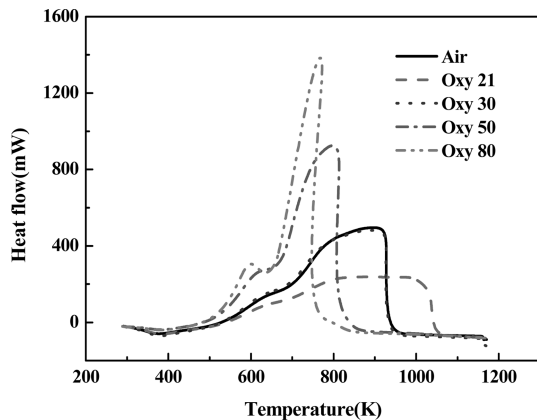


Fig. 7. Heat flow of Shenhua coal in various atmospheric conditions.

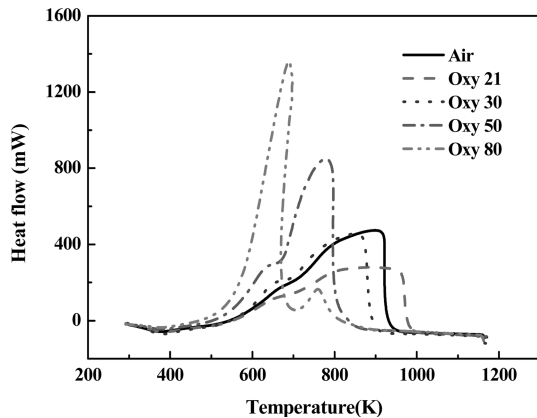


Fig. 8. Heat flow of mixed fuel( $C_{fr} = 0.8$ ) in various atmospheric conditions.

크 값은 커지게 되며,  $O_{fr,o} = 0.8$  조건에서는 1,383 mW로 최대값을 나타내었다. 특히,  $O_{fr,o} = 0.3$  조건에서는 heat flow 형태가 공기 조건과 거의 일치하는 것을 볼 수 있는데, 이는 기존의 발전 설비에서도 큰 수정 없이 순산소 연소의 적용 가능성을 보여준다.

Fig. 8은 Shenhua 탄  $C_{fr} = 0.8$  조건에서 동일한 5가지 산화조건에 대한 heat flow 결과를 나타내고 있다. Shenhua 단일 탄 중의 경우와 비교하였을 때, 착화온도와 연소 종료온도가 약간 빨라진 것 이외에 큰 차이는 없다. 하지만,  $O_{fr,o} = 0.8$  조건에서는 600 K 부근의 휘발분 연소가 탄소 연소를 지배하는 구조를 보이면서 단일 석탄 시료의 연소와는 다른 거동이 관찰되었다.

## 4. 결론

현재 국내 발전소에서 사용되고 있는 3개의 석탄(shenhua, adaro, wira)과 목재 바이오매스를 열 중량 분석기를 이용하여 두 연료의 혼합비율과 산화 조건에 따른 착화 및 연소종료 온도, heat flow 특성에 대하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 석탄과 바이오매스 혼합연소에서 착화온도는 바이오매스 휘발분의 지배를 받고, 연소 종료온도는 석탄의 고정탄소의 영향을 더 많이 받게 된다.
- 2) 산화제의 변화는 착화온도보다, 연소종료온도에 더 큰 영향을 미친다.
- 3) 순수 Shenhua 탄의 경우  $O_{fr,o} = 0.3$  조건에서 공기연소조건의 heat flow 피크 값 및 반응 폭이 매우 유사하게 나타난다.
- 4) Shenhua 탄과 바이오매스 혼합조건은 피크 값에 있어서는 석탄단일조건과 유사한 값을 나타내지만,  $O_{fr,o} = 0.8$  조건에서는 연소 시 휘발분이 고정탄소 연소 부분을 지배하면서 탄소 연소 부분의 반응이 매우 작게 나타나는 특이한 현상이 관찰되었다.

## 후기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] Lee si hyun, Hyun ju young, Rhim young jun, Park young ok, Kim sung chul, "Coal/Biomass Cofiring in utility boilers", Journal of Energy Engineering, 2003, pp. 197-200
- [2] M. Sami, K. Annamalai, M. Wooldridge, "Cofiring of coal and biomass fuel blends", Progress

- in Energy and Combustion Science, 2001, pp. 171-214
- [3] A. Willians, M. Pourkashaniam, j.M. jones, "Combustion of pulverised coal and biomass", Progress in Energy and Combustion Science, 2001, pp. 587-610
- [5] Edward Lester, Mei Gong, Alan Thompson, "A method for source apportionment in biomass/coal blends using thermogravimetric analysis", J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2007, pp. 111-117
- [6] Qingzhao Li, Changsui Zhao, Xiaoping Chen, Weifang Wu, Yingjie Li, "Comparison of pulverized coal combustion in air and in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures by thermo-gravimetric analysis", J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2009, pp. 521-528
- [7] Yong Chen, Shigekatsu Mori, Wei-Ping Pan, "Studying the mechanisms of ignition of coal particles by TG-DTA", Thermochimica Acta, 1996, pp. 149-158
- [8] A.G. BorregoL, Garavaglia, W.D. Kalkreuth, "Characteristics of high heating rate biomass chars prepared under N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> atmospheres", International Journal of Coal Geology, 2009, pp. 409-415
- [9] S. P. Marinov, L. Gonsalvesh, M. Stefanova, J. Yperman, R. Carleer, G. Reggers, Y. Yurum, V. Groudeva, P. Gadjanov, "Combustion behaviour of some biodesulphurized coals assessed by TGA/DTA", Thermochimica Acta, 2010, pp. 46-51
- [10] Qingzhao Li, Changsui Zhao, Xiaoping Chen, Weifang Wu, Yingjie Li, "Comparison of pulverized coal combustion in air and in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures by thermo-gravimetric analysis", J. Anal. Appl. Pyrolysis xxx, 2008
- [11] Nandita Choudhury, S. Biswas, P. Sarkar, Manish Kumar, Sujit Ghosal, Tandra Mitra A. Mukherjee, A. Choudhury, "Influence of rank and macerals on the burnout behaviour of pulverized Indian coal", International Journal of Coal Geology, 2008, pp. 145-153
- [12] S.G. Sahu, P. Sarkar, N. Chakraborty, A.K. Adak, "Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars", Fuel Processing Technology, 2010, pp. 369-378
- [13] Terry Wall, Yinghui Liu, Chris Spero, Liza Elliott, Sameer Khare, Renu Rathnam, Farida Zee-nathal, Behdad Moghtaderi, Bart Buhre, Chang-dong Sheng, Raj Gupta, Toshihiko Yamada, Keiji Makino, Jianglong Yu, "An overview on oxyfuel coal combustion—State of the art research and technology development", chemical engineering research and design, 2009, pp. 1003-1016
- [14] Alejandro Molina, Peter Arendt Jensen, Anker Degn Jensen, "Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/carbon dioxide coal combustion", Proceedings of the Combustion Institute, 2007, pp. 1905-1912
- [15] Jacob Brix, Liza K. Elliott, Terry F. Wall, Yinghui Liu, Behdad Moghtaderi, "Coal devolatilization and char conversion under suspension fired conditions in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmospheres", Fuel, 2010
- [16] Renu Kumar Rathnam, Christopher R. Shaddix, "Differences in reactivity of pulverised coal in air (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) and oxy-fuel (O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) conditions", Fuel Processing Technology, 2009, pp. 797-802