

바이오매스(호두껍질) 혼소에 대한 연소 특성에 관한 연구

김진호* · 이병화** · 락와더러지* · 김상인* · 전충환**
* 부산대학교 기계공학부, ** 두산중공업 보일러 R&D센터 PLM팀

Combustion Characteristics for Co-firing of Biomass (Walnut Shell)

Jin-Ho Kim*, Byoung-Hwa Lee**, Lkhagvadorj Sh*,
Sang-In Kim* and Chung-Hwan Jeon**†

* Pusan Clean Coal Center, Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,
** PLM team, Boiler R&D center, Doosan Heavy Industries & Construction, LTD.

(Received July 12, 2014 ; Revised October 5, 2014 ; Accepted October 6, 2014)

Key Words: Biomass(바이오매스), Activation Energy(활성화 에너지), Unburned Carbon(미연탄소), Blending Ratio(혼소율)

초록: 본 연구에서는 발전소의 혼합연료로서 바이오매스인 호두껍질(Walnut Shell)에 대한 연소특성을 조사하기 위하여 열중량 분석기(TGA)와 분류층 반응기(DTR)를 이용하여 실험을 수행하였다. 바이오매스 WS는 기존 석탄과 비교하여 낮은 온도 영역에서 활발한 연소반응을 보였고, 활성화 에너지 또한 낮은 값을 가짐으로써 연소반응속도가 더욱 증가함을 확인할 수 있었다. 바이오매스 WS와 역청탄의 혼소에 있어서 고정층 분석에서는 혼소 영향이 선형적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그렇지만 분류층 반응기에서는 바이오매스 혼소율을 5%증가 시에는 UBC가 감소하다가 이후에 다시 UBC가 증가하는 Non-additive 현상을 확인할 수 있었다. 이는 바이오매스의 급격한 연소로 주위에 산소 부족현상이 생겨 석탄의 연소가 지연되는 것을 보여준다. 이 현상을 해결하기 위하여 산소를 증가시켜주었을 때 더 높은 혼소율을 성취할 수 있음을 보여주었다.

Abstract: Combustion characteristics for co-firing of biomass (Walnut Shell) as blending fuel in coal fired boiler have investigated using thermogravimetric analyser (TGA) and drop tube reactor (DTR). The results show that devolatilization and char combustion for WS occurs at lower temperature than those of existing coals and has lower activation energy value, which is resulting in higher reactivity. When the WS is blended with coal, TGA results show linear profiles depending on blending ratio for each fuel. However, DTR results exist the non-additive phenomena for blending of WS. As blending ratio of WS increase, the UBC decrease at BBR 5%, but the UBC rather increase from BBR 10% due to oxygen deficiency formed from rapid combustion of WS. This paper propose that fuel lean condition by oxygen rich lead to higher blending ratio of biomass by solving the oxygen deficiency condition.

1. 서론

세계적으로 바이오매스 연료는 전체 에너지 요구의 약 14%를 제공하고 있다고 보고되고 있으며, 화력발전플랜트에서 바이오매스 혼소

(Co-firing)는 CO₂ 온실가스를 줄일 수 있는 가장 중요한 기술 중의 하나라고 여겨지고 있다.⁽¹⁾

석탄과 함께 바이오매스의 혼소는 더 낮은 투자 가격, 더 높은 전환효율에서 매우 높은 효율성을 가지고 있다. 갈수록 엄격해지는 배기 배출물에 관한 제한기준들을 만족시키기 위하여 기존 보일러의 Retrofit 및 새로운 보일러에 바이오매스 혼소는 매우 필요한 기술이다. 바이오매스의 혼

† Corresponding Author, chjeon@pnu.ac.kr

소울의 목표는 EU 뿐만 아니라 전 세계적으로 증가하고 있는 추세이다.⁽²⁾

그러나 현재 기존의 화력발전플랜트는 다양한 연료를 사용하도록 설계되지 않았다. 바이오매스 혼소의 다양한 이점에도 불구하고 혼소율을 증가하기 위해서 해결되어야 하는 기술적인 문제들은 여전히 존재한다. 일반적으로 바이오매스는 석탄과 비교하여 높은 수분함량, 휘발분 함량, 산소 함량을 가지고 있고, 밀도와 발열량은 더 낮은 값을 가지고 있기 때문에 바이오매스 연소시 새로운 특성일 나타날 수 있다.⁽³⁾

그런 바이오매스와 석탄 사이에 다른 특성은 기술적인 도전과 연소 기술의 새로운 수요를 가져오게 하였다. 화염 안정성과 연소 및 배기 배출물에 관한 바이오매스 혼소의 영향은 항상 예측가능하지 않는다. 화력발전플랜트에 안정적이고 효율적인 바이오매스 혼소를 성취하기 위해서는 다양한 연소조건에서 석탄과 바이오매스 혼소기술의 깊이 있는 고찰 및 연구가 매우 필요하게 되었다.

지난 수십년간 바이오 매스 연구들은 슬래깅, 파울링, 부식, 회사용과 배기 배출물 (SOx and NOx)과 같은 연소 장애 영역^(4,5) 뿐만 아니라 화염 안정성 및 연소 특성에도 많은 연구가 이루어져왔다.^(6,7) 그렇지만 계속적으로 바뀌는 바이오매스 연료의 다양성으로 인하여 혼소 기술에 대한 연구는 많은 영역에 있어서 지속적으로 필요한 실정이다.⁽⁸⁾

따라서, 본 연구에서는 현재 석탄 화력 발전플랜트에 혼소될 바이오매스연료 중의 하나인 Walnut Shell(WS)의 혼소시에 따른 연소특성을 TGA와 DTR을 이용하여 분석을 수행하였다. WS는 현재 미국에서 수입되고 있으며 선행연구의 공정해석에서 Net plant efficiency가 다른 바이오매스들(wood pellet, palm kernel shell, empty fruit bunch)에 비하여 높은 것으로 알려졌다.⁽⁹⁾ 이를 통해 얻은 결과들은 표준화력 발전플랜트에 혼소 연료로써 사용될 때에 기초 자료로써 사용하고자 한다.

2. 실험 부분

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 열중량 분석기 (Thermogravimetric Analyzer)와 분류층 반응기 (Drop tube reactor)에 의하여 이루어졌다. DTR은

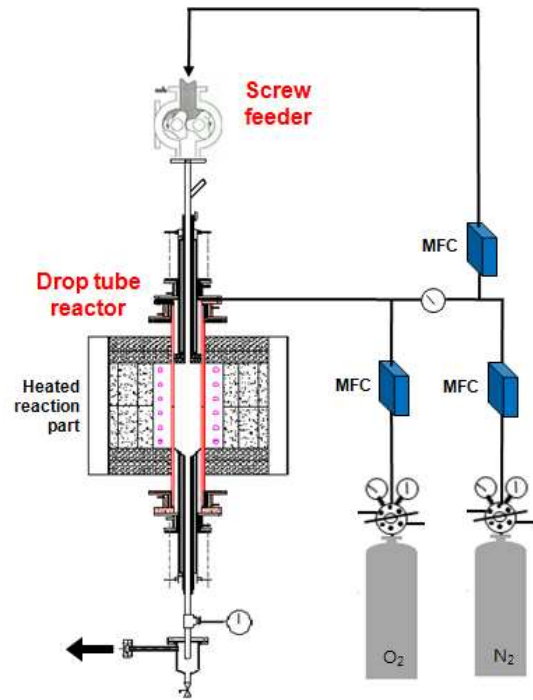


Fig. 1 Schematic diagram of drop tube reactor

균일한 높은 온도, 압력, 다양한 온도영역에서 실험을 할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 이 장치를 통한 많은 석탄 연구들이 이루어져 왔다. 본 실험의 DTR은 실제 연소로에서 생성되는 조건을 잘 만들어주며, 연소가 진행됨에 따라 입자 온도를 상대적으로 일정하게 유지시킬 수 있고, 비교적 안정된 조건에서 연료의 특성을 잘 나타낼 수가 있다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험 장치의 개략도를 보여준다. 본 실험에서 사용된 DTR은 Pusan Clean Coal Center에서 설계되었다. 전체 장치는 Fig. 1과 같이 반응로와 주입부, 포집부로 구성이 되어있다. 실험 장치들은 높은 온도에서 반응을 일으키기 위한 반응부분 (Reaction)과 석탄 및 바이오매스 입자 주입을 위한 공급(Feeding)부분, 샘플분석을 위한 포집부분으로 구성 되어있다. 반응로는 Super-Kantal 히터를 사용하였고, 1500℃ 까지 온도 상승이 가능하다. 반응영역은 하나의 영역으로 이루어져 있으며, 길이는 60cm이고, 내부 직경은 7cm이다. 공급 시스템은 스크류(Screw) 형태로 이루어져 있다.

바이오매스는 기존 석탄 보다 입자크기가 크기 때문에 스크류를 이용한 미세정량 공급 장치가 필요하다. 본 장치는 기존의 석탄/바이오매스 공

급 장치인 스크류 형태 공급기를 보다 간소하게 제작하여 미분탄을 미세정량 단위로 조절하기 위해 상단부에 질소 운송가스를 주입하였다. 기존의 진동 시스템이 없기 때문에 장비의 유지/보수가 보다 우수하며, 스크류 회전수와 수송가스량을 조절하여 미세정량 단위로 연속적인 주입할 수 있게 하였다.

포집부는 반응물을 포집하는 부분이다. 추가적인 촉 연소 반응을 차단하기 위해 포집 프루브에 냉각수를 흘려 튜브 내 온도를 하강시켰다. 하단부 싸이클론을 이용하여 가스와 입자를 분리할 수 있게 하였다. 싸이클론에서 포집된 회분은 Box furnace를 통하여서 UBC를 측정하였다. 본 연구의 열중량 분석은 TGA(모델명: TA Q600 SDT)를 사용하였다.

2.2 실험 조건

Table 1은 실험에서 사용된 석탄들과 바이오매스의 특성들을 보여준다. 본 실험에서 사용된 석탄들은 역청탄인 Trafigura와 아역청탄인 Adaro를 사용하였으며, 바이오매스는 호두껍질 (Walnut shell, WS)을 사용하였다.

TGA 실험에서 Heating rate은 20 °C/min 이고, 주위 분위기는 공기를 주입하여 실험을 수행하였다. DTR의 실험에서 석탄은 바이오매스의 혼소할 때 주로 사용되는 역청탄인 Trafigura를 사용하였고, 공급량은 0.3g/min이고, 석탄 크기는 75~90µm이고, 입자 체류시간은 1.5초이다. 모든 실험에서 DTR의 반응로 온도는 1300°C를 유지하였다. 이에 맞추어 열량을 기준으로 바이오매스 공급을 하였으며 바이오매스 입자 크기는 400~600µm 이다. 석탄의 연소를 위하여 주입되는 주가스(Main gas)인 공기는 5 lpm 으로 주입되었고, 주입 펌프에서 석탄을 수송하는 질소 가스는 1 lpm 으로 사용되었다. 전체적인 반응부의 SR (Stoichiometric ratio)은 공기유량은 고정하고 석탄과 혼소되는 바이오매스와 공급량과 혼합가스의 산소농도를 바꿔감으로 해서 일정하게 유지하였다. Fig. 2는 혼소율에 따라 공급된 석탄과 바이오매스의 공급량을 나타낸 것이다. 혼소시 공급량은 열량 기준으로 주입이 되었으며 바이오매스의 혼소량이 증가함에 따라 점차적으로 석탄의 공급량은 감소하였다. 전체적인 공급량을 보았을 때에는 바이오매스의 열량이 상대적으로 석탄보다 낮기 때문에 혼소량이 증가할수록 더 많은 공

Table 1 The coals and biomass properties used in this study

	Trafigura (Bitu.)	Adaro (Sub-bitu.)	Walnut Shell (Biomass)
Origin	Australia	Indonesia	USA
Heating value (kcal/kg)			
HHV	5948	5045	4371
Proximate analysis (% by weight, as received)			
Moi.	3.08	17.20	9.3
V.M.	31.23	39.19	70.5
F.C.	52.95	40.76	19.2
Ash	12.73	2.85	1.1
Ultimate analysis (% by weight, DAF)			
C	79.87	68.76	51.54
H	5.55	6.59	7.54
O	12.25	24.30	39.53
N	1.64	0.27	1.38
S	0.67	0.05	-
Sum	100	100	100

급량이 주입되었다. 석탄과 바이오매스의 공급량에 따른 산화제의 량은 다음 식에 의하여 계산이 되었다.⁽¹⁰⁾

$$SR = \frac{\text{Actual O}_2/\text{coal ratio}}{\text{Stoichiometric O}_2/\text{fuel ratio}} \quad (1)$$

여기서, 연료 1kg을 완전 연소 시키는데 필요한 이론 산소량은 2.667*C+8(H-O/8)+S (kg/kg) 으로 계산이 되었으며, C, H, O, S, N, Ash, Water 는 질량백분율로 나타내었다.

Fig. 3은 SR=1일 때, 바이오매스를 혼소함에 따라 주입되는 산소량을 비율적으로 나타낸 것이다. 바이오매스를 혼소함에 따라서 점차적으로 산소량은 더 많이 필요하게 된다.

그렇지만 석탄을 같은 공급량으로 주입하였을 때보다는 약 10% 더 적은 산소량이 주입되게 된다. 이는 바이오매스 안에 있는 약 40%의 산소가

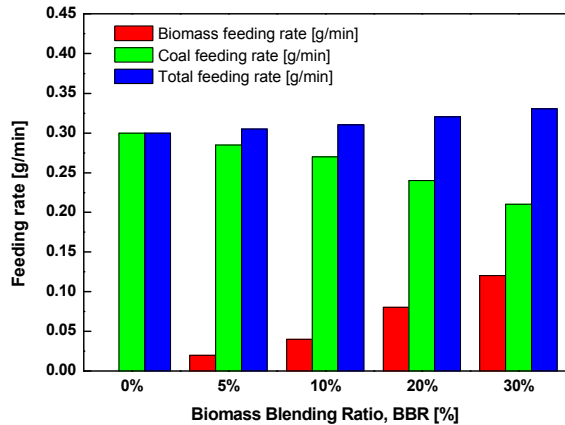


Fig. 2 Feeding rate as a function of BBR in drop tube reactor

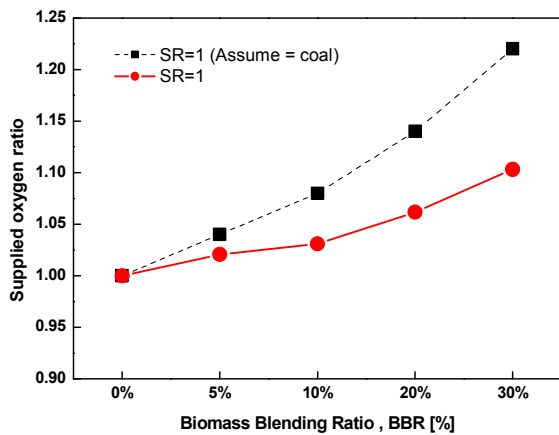


Fig. 3 Supplied oxygen ratio as a function of BBR in drop tube reactor

연소반응에 포함이 되기 때문이다.

DTR을 통한 질량 분석 시에는 5번 이상 측정값의 대표 평균치를 사용하였으며, 오차분석을 통해 얻어진 측정 편차는 평균값의 5% 미만으로 관찰되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 바이오매스 WS의 열중량 분석

Fig. 4은 석탄 및 바이오매스의 온도에 따른 연소 프로파일을 보여준다. Trafigura와 Adaro의 경우에 하나의 Peak를 가지는 연소 프로파일을 보여준다면 WS의 경우에 두 구간으로 이루어진 연소 프로파일을 볼 수 있다. 이는 목질계 바이오매스의 경우 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 그리고 리그닌 등 다양한 휘발분 성분을 함유하고 있기 때문에 하나의 구간이 아닌 명확히 두 구간에서 휘발분 및 착연소의 중량 감소를 보이는 것이다.⁽¹¹⁾

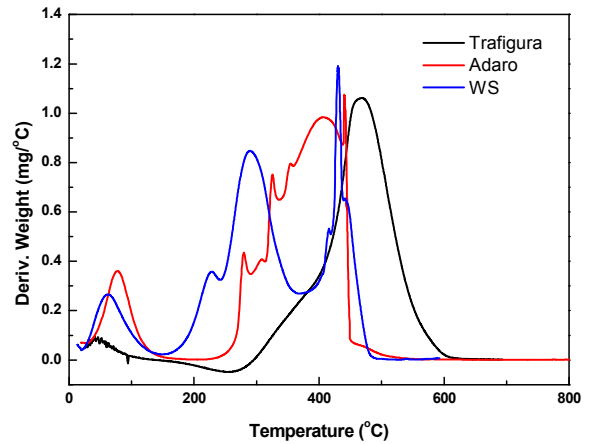


Fig. 4 Combustion profiles for coals and WS using TGA analysis (DTG)

Trafigura는 역청탄으로서 가장 높은 온도인 464°C에서 Peak를 보여주며 Adaro는 446°C에서 가장 높은 Peak를 보여준다. 반면, WS는 288°C에서 첫 번째 Peak와 430°C에서 두 번째 Peak를 보여준다. 그리고 연소반응은 WS, Adaro, Trafigura의 순으로 시작되는 것을 확인할 수 있다. WS의 경우에 낮은 온도에서 휘발성 물질이 탈휘발되지만 연소 종료 시점은 아역청탄인 Adaro의 고정탄소분과 비슷한 특성을 보이고 있다. 이것은 Broido-Shafizadeh model의 결과와 일치한다.⁽¹²⁾ Broido-Shafizadeh model에서 보고된 것과 같이 약 300°C 이하에서 비활성 셀룰로오스는 활성 셀룰로오스 형태로 변하여, 이 단계에서 목질계 바이오매스는 연소 노에서 온도 증가와 함께 질량이 감소하게 되고, 활성 셀룰로오스 단계를 지나 300°C 이상에서 목질계 바이오매스의 연소가 시작되어 열분해 또는 해중합 (Depolymerization) 단계를 거치면서 다양한 2차 휘발분이 방출되며, 최종적으로 탄화물 연소인 고체 연소로 변화되어 최 연소를 하게 된다고 보고하고 있다. 이러한 메커니즘에 의하여 바이오매스는 두 개의 구별된 Peak를 보여주고 있다.

3.2 바이오매스 WS의 반응속도 도출

석탄 및 바이오매스의 연소 거동 및 속도를 검토하기 위하여 Arrhenius parameters의 규명이 필요하며, Fig. 5와 같이 일정한 승온 온도 (20°C/min) 에서 TGA/DTG 값을 이용한 연소전환 속도의 식(Coats-Redfern)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(13,14)

$$\ln\left(\frac{-\ln(1-V)}{T^2}\right) = \ln\left\{\frac{k_0 R}{aE}\left(1 - \frac{2RT}{E}\right)\right\} - E\left(\frac{1}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서, $V = \frac{V_t}{V^*}$ 이고, V_t 는 일정한 시점에서 방출된 탈휘발량이고, V^* 는 전체 방출된 탈휘발량이다. E는 활성화 에너지 (kJ/mol)이고, k_0 는 pre-exponential factor (1/sec)이다. R은 이상기체상수 (kJ/mol-K)이고, a는 승온률 (K/sec)을 나타낸다.

위 식에서 1/T에 대한 $\ln\left(\frac{-\ln(1-V)}{T^2}\right)$ 의 플롯한 기울기를 이용하여 활성화 에너지 (E) 값을 구할 수 있다. 따라서 Fig. 4와 위 식을 이용한 Arrhenius plot 결과는 Fig. 5와 같으며, Fig. 5를 이용한 활성화 에너지 값을 Table 2에 나타내었다.

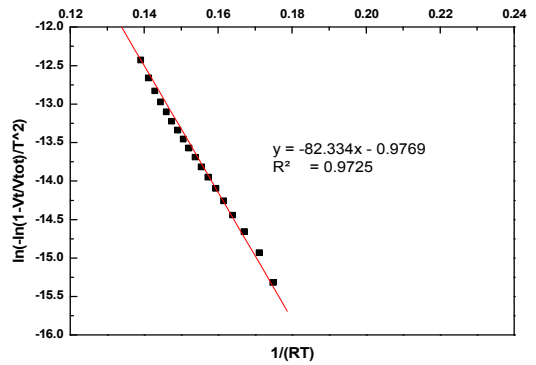
Table 2에서 보는 바와 같이, Trafiguran, Adaro 석탄들의 값은 82.33, 73.12 kJ/mol 인데, WS의 경우는 이보다 낮은 44.9 kJ/mol 값을 보이고 있다. 문헌상의 값들과 비교할 때, 본 실험에서 사용한 각 연료의 활성화 에너지는 받아들일만한 범위에 있으며, 활성화 에너지의 비교를 통하여서 WS의 연소 반응속도가 석탄들에 비하여 매우 빨라질 거라는 것을 판단할 수 있다.^(15,16) 따라서 WS의 경우 기존 석탄에 비하여 연소가 급속하게 일어나고 낮은 온도에서 연소 반응이 시작되는 것을 확인하였다.

3.3 고정층(TGA)에서 바이오매스 WS의 혼소에 따른 영향

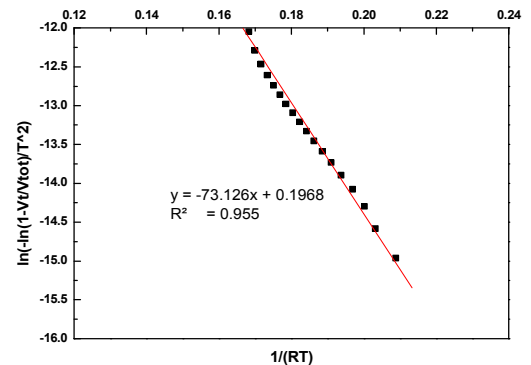
Fig. 6은 고정층(TGA)에서 역청탄인 Trafigura에 바이오매스 WS를 혼소하였을 때에 혼소율에 대한 연소프로파일을 보여준다. 석탄 100%일 때에는 464℃에서 가장 높은 Peak를 보여주고 있고, WS의 주요한 Peak는 290℃에서 보이고 있다. 혼소율을 점차 늘려감에 따라서 석탄의 주요 Peak는 줄어들고 WS의 주요 Peak가 상승함을 보여주고 있다. 혼소율이 증가함에 따라 Peak는 왼쪽으로 이동을 하며 이것은 선형적으로 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 TGA에서는 낮은 승온율을 가지고 있기 때문에 연료 자체의 특성을 독립적으로 볼 수 있다는 것을 보여준다. 이 같은

Table 2 Kinetic parameters derived from coats-ferdfern for coals and biomass

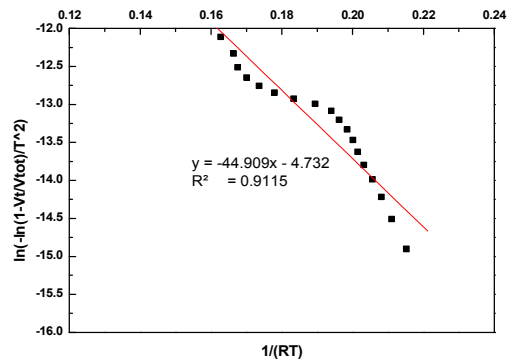
Fuel type	Kinetic parameters	
	E [KJ/mol]	A [1/s]
Trafigura	82.33	0.3764
Adaro	73.12	1.2199
Walnut shell	44.90	0.0088



(a) Trafigura



(b) Adaro



(b) WS

Fig. 5 Arrhenius plots of coals and WS

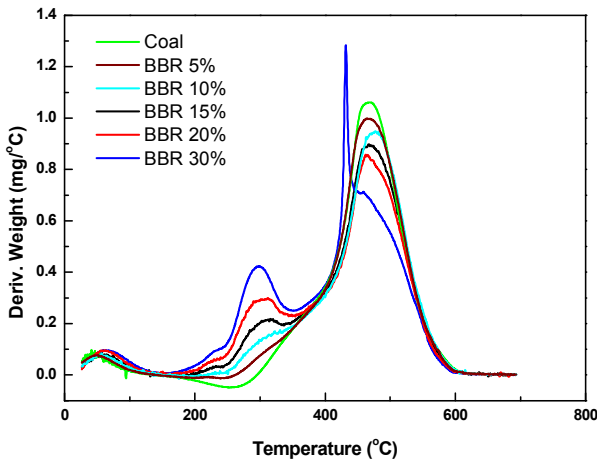


Fig. 6 Combustion profiles of blending ratio for coal and WS using TGA

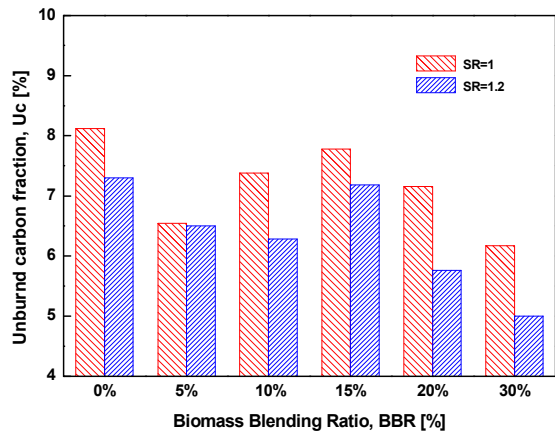


Fig. 7 Unburned carbon fraction (UBC) as a function of blending ratio of biomass in DTR

선형적인 결과는 다른 선행 연구자들의 연구와 일치하는 결과들을 보였다.⁽¹⁷⁾

그렇지만 바이오매스인 WS 혼소율이 30% 이상이 되었을 때에 석탄 부분의 Peak의 폭은 급격하게 줄어들며 Peak 온도 또한 30°C 정도 앞으로 당겨지는 것을 볼 수 있었다. 이는 바이오매스가 증가함에 따라서 석탄의 질량이 감소하게 되어 급격한 연소가 이루어졌기 때문이다.

3.4 유동층(DTR)에서 바이오매스 WS의 혼소에 따른 영향

Fig. 7은 유동층(DTR)에서 바이오매스 WS의 혼소량의 증가에 따른 UBC의 특성을 보여준다. DTR에서는 혼소에 따른 영향들을 더 실제적으로 볼 수 있고 석탄과 바이오매스의 상호영향(Interaction)에 따른 연소 현상들을 명확히 볼 수 있는 특징이 있다.

SR=1 조건에서 바이오매스 WS을 5% 혼소하였을

때, UBC는 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 TGA의 연소 프로파일 결과에서도 볼 수 있듯이 바이오매스의 급속한 연소로 말미암아 주위 온도를 높여 주고 이에 따라 석탄에 Reactive한 영향을 줌으로써 UBC는 감소하였다. 그렇지만 BBR 10% 이후에서는 UBC가 다시 증가하는 것을 보게 된다. 이것은 바이오매스의 급격한 연소는 주위에 산소 부족 현상을 일으키어 오히려 연소를 지연시켜 UBC를 증가하고 있는 것이다. 이같은 현상은 이전 선행연구에서도 볼 수 있듯이 혼소탄의 급격한 연소는 주위 역청탄에 Reactive한 영향과 Non-reactive한 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.⁽¹⁸⁾

이러한 바이오매스의 급격한 연소로 말미암은 산소 부족 현상을 해소하기 위한 방법은 산소를 더 주입함으로써 Fuel lean 조건을 만들어 주는 것이다. Fig. 7에서와 같이 SR=1.2로 주위 조건을 만들어주었을 때에 BBR 10%에서 증가하던 UBC는 다시 감소하는 것을 볼 수 있었고, BBR 15%에서 UBC가 증가하였다. 이것은 바이오매스로 말미암은 Reactive 부분과 Non-reactive 부분의 전환점(Transition point)이 뒤로 옮겨졌음을 보여주고 있고, Fuel lean 조건으로 말미암아 더 높은 혼소량이 성취될 수 있음을 보여준다.

BBR 20% 이후에는 다시 UBC가 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있는데 이것은 Fig. 6의 TGA 결과인 BBR 30%에서 나타나듯이, 바이오매스의 혼소량이 증가함에 따라 석탄 질량의 감소로 말미암아 석탄의 급격한 연소가 일어남으로 인하여 UBC는 감소하는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 바이오매스 WS의 연료 특성과 혼소되었을 때의 연소 특성에 관한 연구를 수행하였고 이에 관한 결론은 다음과 같다.

(1) 연소 프로파일에서 바이오매스 WS는 기존 석탄과 달리 두 개의 Peak가 나타났고 이는 바이오매스 안에 있는 다양한 휘발분 성분들이 존재한다는 것을 보여준다. 그리고 석탄들과 비교하여 낮은 온도에서 탈휘발 및 최 연소가 일어났고, 활성화 에너지는 더 낮은 값을 가졌다.

(2) 바이오매스 WS의 혼소시에 TGA 결과에서는 각 연료들의 혼소량에 따른 선형적인 결과들이 확인되었고, BBR 30% 이상에서는 석탄의 질량감소로 인한 급격한 연소 특성을 보였다.

(3) 바이오매스 WS의 혼소시에 DTR 결과에서 는 BBR 5%에서 바이오매스의 Reactive한 영향으로 UBC가 감소하고 그 이후에는 산소부족현상이 발생하여 오히려 UBC는 증가하였다. 주위에 Fuel lean 조건을 만들어 줌으로써 산소부족현상을 해결하고 바이오매스 혼소율을 안정적으로 더 증가시킬 수 있다는 것을 보여주었다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 제원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 한 연구과제입니다. (NO. 20131010101830)

참고문헌 (References)

- (1) Demirbas, A., 2004, "Combustion Characteristics of Different Biomass Fuels," *Prog Energy Combust Sci*, Vol. 30, pp. 219~230.
- (2) Spliethoff, H., Unterberger, S. and Hein, K.R.G., 2004, "Status of Co-combustion of Coal and Biomass in Europe," *Clean Air: Int J Energy Clean Environ*, Vol. 5, No. 4, pp. 57~82.
- (3) Baxter, L., 2005, "Biomass-coal Co-combustion: Opportunity for Affordable Renewable Energy," *Fuel*, Vol. 84 No. 10, pp. 1295~1302.
- (4) Gani, A., 2005, "Characteristics of Co-combustion of Low-rank Coal with Biomass," *Energy and Fuels*, Vol. 19, No. 4, pp.1652~1659.
- (5) Paulrud, S. and Nilsson, C., 2004, "The Effects of Particle Characteristics on Emissions from Burning Wood Fuel Powder," *Fuel*, Vol. 83, pp. 813~821.
- (6) Lu, G., Yan, Y., Cornwell, S., Whitehouse, M. and Riley, G., 2008, "Impact of Co-firing Coal and Biomass on Flame Characteristics and Stability," *Fuel*, Vol. 87, pp. 1133~1140.
- (7) Peter, M., Gang, L., Thomas, L.B., Yong, Y., Benoît, T. and Sébastien, C., 2009, "Characterization of Biomass and Coal Co-firing on a 3 MWth Combustion Test Facility Using Flame Imaging and Gas/ash Sampling Techniques," *Fuel*, Vol. 88, pp. 2328~2334.
- (8) Sami, M., Annamalai, K. and Wooldridge, M., 2001, "Co-firing of Coal and Biomass Fuel Blends," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, pp. 171~214.
- (9) Mun, T.Y., Lee, U.D., Lee, J.W. and Yang, W., 2014, "The study on Process Simulation of Biomass Co-firing in a Pulverized Coal Power Plant," 48th KOSCO symposium.
- (10) Liu, H. and Shao, Y., 2010, "Predictions of the Impurities in the CO₂ Stream of an Oxy-coal Combustion Plant," *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 3162~3170.
- (11) Jong, W., Nola, G.D., Venneker, B.C.H., Spliethoff, H. and Wołtowicz, M.A., 2007, "TG-FTIR Pyrolysis of Coal and Secondary Biomass Fuels: Determination of Pyrolysis Kinetic Parameters for Main Species and NO_x Precursors," *Fuel*, Vol. 86, pp. 2367~2376.
- (12) Bradbury, A.G.W., Sakai, Y. and Shafizadeh, F., 1979, "A Kinetic Model for Pyrolysis of Cellulose," *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 23, pp. 3271~3280.
- (13) Coats, A.W. and Redfern, J.P., 1964, "Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data," *Nature*, Vol. 201, pp. 68~69.
- (14) Sait, H.H., Hussain, A., Salema, A.A. and Ani, F.N., 2012, "Pyrolysis and Combustion Kinetics of Date Palm Biomass using Thermogravimetric Analysis," *Bioresource Technology*, Vol. 118, pp. 382~389.
- (15) Ryu, J.S., Kim, K.S. and Park, S.J., 2011, "A Study on Combustion Characteristics of Wood Biomass for Cogeneration Plant," *Appl. Chem. Eng.*, Vol. 22, No. 3, pp. 296~300.
- (16) Kim, D.W., Lee, J.M., Kim, J.S. and Seon, P.K., 2010, "Study on the Combustion Characteristics of Wood-pellet and Korean Anthracite using TGA," *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 48, pp. 58~67.
- (17) Sahu, S.G., Sarkar, P., Chakraborty, N. and Adak, A.K., 2010, "Thermogravimetric Assessment of Combustion Characteristics of Blends of a Coal with Different Biomass Chars" *Fuel Processing Technology*, Vol. 91, No. 3, pp. 369~378.
- (18) Lee, B.H., Eddings, E.G. and Jeon, C.H., 2012, "Effect of Coal Blending Methods with Different Excess Oxygen on Unburned Carbon and NO_x Emissions in an Entrained Flow Reactor," *Energy and Fuels*, Vol. 26, pp. 6803~6814.