

석탄과 보조제로 바이오매스를 사용한 바이오 고형연료의 혼소 특성

현완수^a, 진용균^a, 조은지^a, 한현구^a, 민선웅^a, 여운호^{b†}

Characteristics of the Co-Combustion of Coal and Bio-Solid Fuel using Biomass as an adjunct

Wan-Su Hyeon^a, Yong-Gyun Jin^a, Eun-Ji Jo^a, Hyun-Goo Han^a, Seon-Ung Min^a, Woon-Ho Yeo^{b†}

(Received: May 19, 2020 / Revised: Jun. 16, 2020 / Accepted: Jun. 17, 2020)

ABSTRACT: Due to the sewage sludge's characteristics of high water content and low calorific value, it is hard to use sewage sludge as an energy source. In this study, we investigated production of bio-solid fuel which is mixed both sewage sludge and woody biomass in order to improve the sewage sludge's characteristics and replace fossil fuels.

A thermogravimetric analysis was used to investigate the co-combustion characteristics of the mixed coal and bio-solid fuel of 5%, 10%, 15%, respectively. The analysis was carried out under non-isothermal conditions by raising the internal temperature of 25°C to 900°C with an increment of 10°C/min.

In the case of comparing single coal sample and mixture sample of coal and bio-solid fuel, the initiation combustion temperature has slightly changed. However, both the maximum combustion temperature and the termination start combustion temperature were hardly noticeable.

The initiation combustion was occurred between 200~315°C and the thermal decomposition causing a significant weight change occurred between 350~700°C.

As a result of the kinetic analysis of the co-combustion, the activation energy was decreased as the mixing rate was higher. Therefore, it is able to co-combust the mixed coal and bio-solid fuel in power plants.

Keywords: Sewage Sludge, Bio-Solid Fuel, Thermogravimetric, Co-combustion, Coal

초록: 하수 슬러지는 수분 함량이 높고, 발열량이 낮아 하수 슬러지를 에너지원으로 사용하는데 어려움이 있다. 이런 하수 슬러지 특성을 개선하고, 화석 연료를 대체하기 위해 하수 슬러지와 목질계 바이오매스를 혼합한 바이오 고형연료를 생산하는 연구를 행하였다.

열중량 분석은 석탄과 5%, 10%, 15%의 바이오 고형연료를 각각 혼합하여 혼소할 경우 발생하는 특징을 연구하는데 활용되었다. 이 분석은 10°C/min씩 25°C에서 900°C까지 내부 온도를 올리는 비등온 조건하에서 수행되었다. 석탄 단일 시료를 석탄과 바이오 고형연료가 혼합된 시료와 비교하였을 경우 연소개시온도는 약간 변화가 일어났다. 하지만, 연소최대온도와 연소종료개시온도는 변화가 거의 없었다. 연소개시는 200 ~ 315 °C에서 이뤄졌으며, 중량변화가 급격히 일어나는 열분해는 350 ~ 700 °C에서 이뤄졌다.

혼소 반응속도 분석 결과 활성화 에너지는 혼합율이 높아질수록 낮아졌다. 그러므로 화력발전소에서 석탄과 바이오 고형연료를 혼소하는 것이 가능할 수 있을 것이다.

주제어: 하수슬러지, 바이오 고형연료, 열중량, 혼소, 석탄

^a 인천대학교 환경에너지공학과 석사(Master, Department of Environmental and Energy Engineering)

^b 인천대학교 환경에너지공학과 교수(Professor, Department of Environmental and Energy Engineering)

† Corresponding author(e-mail: whyeho@inu.ac.kr)

1. 서론

전 세계적으로 에너지 소비량은 증가하고 있는 추세이며, 한국의 경우도 소비되는 최종에너지량은 2000년에서 2016년 사이에 연평균 2.63%씩 증가하였다. 다양한 분야에서 에너지 사용량이 지속적으로 증가되고 있지만 에너지원은 대부분 화석연료이다¹⁾. 그러나 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 보고서에 따르면 화석연료는 지구온난화, 이상기후 등 환경문제를 야기하는 주요 원인으로 간주되고 있어 최근 화석연료를 대체할 에너지원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾.

이와 같이 전 세계적으로 온실가스 감축을 위해 많은 노력을 기울이고 있는 가운데, 과거 37개 선진국만 적용되었던 교토의정서와는 달리 최근 모든 당사국을 대상으로 하는 신기후체제가 체결됨에 따라 각 국가들은 온실가스 감축을 위한 의무를 이행해야만 한다. 한국도 2030년에 온실가스 배출전망치의 37% 감축안을 확정된 INDC(Intended Nationally Determined Contribution)를 제출하였으며, 국내 대형 발전사들을 대상으로 RPS(Renewable Energy Portfolio Standard)를 도입하여 온실가스 감축을 이행하기 시작하였다¹⁾.

온실가스 감축을 목표로 화석연료를 대체하기 위한 연구 가운데 폐기물을 재활용한 연료화 연구가 특히 큰 관심을 받고 있다. 그 중 하수슬러지를 고형연료화 함으로써 처리가 어려운 하수슬러지를 처리함과 동시에 화석연료를 대체하고자 하는 연구가 점차 증가되고 있다³⁾. 하지만, 하수슬러지는 함수율은 높고, 발열량은 낮아 연료로 활용하기에는 아직 어려움이 크다⁴⁾. 조⁵⁾, 현⁶⁾ 등은 하수슬러지에 폐바이오매스를 혼합하여 이런 문제를 해결함과 동시에 신재생에너지원으로 개발하고자 하는 연구를 행하였지만 대부분 성분최적화 등에 중점을 두었다. 그러므로 새로운 시설을 설치하여 연소할 경우 시설 설치 부담이 크기에 기존 시설을 활용하기 위하여 실제 발전소에서 혼소할 경우 나타나는 특성에 대한 연구는 아직 미진한 상태이다. 그래서 실제 발전소에서 혼소 시 연소 효율성은 물론 화염안정성 등의 문제가 발생할 경우 대처가 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 하수슬러지와 보조제인 바이오매스를 혼합하여 생산한 바이오 고형연료를 석탄과 혼소할 경우 나타날 수 있는 특징들을 열중량 분석법⁷⁻¹¹⁾ 및 연소반응 속도론을¹²⁾ 이용해 분석 연구하여 바이오 고형연료와 석탄 혼소 가능성 등을 확인하므로 하수슬러지 처리는 물론 화석연료 대체제를 찾고자 한다³⁾.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 실험에서는 신재생에너지원으로 하수슬러지를 고형연료화 할 경우 문제점으로 제시되는 높은 함수율과 낮은 발열량을 개선하기 위해 수분 함량은 낮고, 발열량은 상대적으로 높은 보조제로 목질계 폐바이오매스(톱밥, 캐슈넛шел)를 선택하였다³⁾. 이를 하수슬러지와 혼합하여 바이오 고형연료(하수슬러지 : 톱밥 : 캐슈넛шел = 55 : 40 : 5)를 생산하여 사용하였고, 화석 연료로는 석탄화력발전소에서 사용하는 설계탄 범위의 호주산 역청탄을 사용하였다. 이들의 물성은 Table 1과 같으며, 공업분석에서 석탄은 고정탄소가 50.0%, 바이오 고형연료는 휘발성분이 64.8%로 주된 요소였다. 원소분석에서 석탄은 70.98%인 탄소가 주성분이었지만 바이오 고형연료는 38.09%인 탄소와 35.06%인 산소가 주성분이었다. 습량기준 저위발열량은 석탄이 5,997kcal/kg, 바이오 고형연료가 3,561kcal/kg으로 나타났다. 혼소를 하기 위해 바이오 고형연료를 200°C에서 건조하여 수분을 제거한 후 5%, 10%, 15%의 중량비로 석탄에 첨가 혼합하여 실험 재료로 활용하였다³⁾.

2.2. 열중량 분석법

ICTAC(International Confederation of Thermal Analysis and Calorimetry)에 의하면 열분석(Thermal Analysis)이란 “온도의 함수로써 재료의 물리화학적 특성을 측정하는데 사용되는 일련의 분석기법”이라 정의하였으며, 열분석의 종류는 크게 시차 주사 열량법(Differential Scanning Calorimetry, DSC), 시차

Table 1. Results of Proximate Analysis, Ultimate Analysis and Calorific Value for Coal and Bio-Solid Fuel

Classifications		Coal	Bio-solid Fuel
Proximate analysis (%, wet basis)	Moisture	4.8	5.2
	Ash	18.0	16.3
	Volatile Matter	28.2	64.8
	Fixed Carbon	50.0	13.7
Ultimate analysis (%, dry basis)	C	70.98	38.09
	H	4.772	5.56
	O	3.129	35.06
	N	1.89	3.61
	S	0.319	0.48
Calorific Value (kcal/kg)	High (dry basis)	6,600	4,101
	High (wet basis)	6,283	3,893
	Low (wet basis)	5,997	3,561

열분석법(Differential Thermal Analysis, DTA) 및 열중량 분석법(Thermogravimetric Analysis, TGA) 등이 있다¹¹⁾. 열중량 분석법은 산화분위기에서 관찰하는 온도변화에 따른 대상 시료의 연속적인 중량변화를 측정하는 방법으로 시료의 1차적인 물리화학적 변화를 확인할 수 있으며, 총괄 반응속도 연구를 위해 많은 곳에 사용되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 1차적인 물리화학적 변화와 총괄 반응속도 분석연구가 필요하기에 열중량 분석법을 사용하였으며, 연소 프로파일은 승온속도 10°C/min으로 25°C에서 900°C까지 내부 온도를 비등온 가열시켜 실험하였다^{13,14)}. 시료는 분쇄후 150 μm 통과 분을 대상으로 약 10mg 이용하였으며, 온도상승에 따른 중량 감소율을 표시한 DTG(Differential Thermogravimetry) 커브는 TGA 곡선을 미분하여 작성하였고, DTG를 활용해 시료별 연소프로파일을 구하여 연소 특성을 비교하였다. DTG커브에서 수분 증발 후 중량감소율이 증가되는 시점의 온도를 연소개시온도, 중량 감소율이 최대일 때의 온도를 연소최대온도, 중량감소율이 감소되는 시점의 온도를 연소종료개시온도라 하였다⁷⁾.

2.3. 연소반응 속도론

연소반응 속도론적 해석에서 속도 변수의 해석은 다음의 반응속도식에 기초를 두고 있다⁷⁾.

$$d\alpha/dt = A(1-\alpha)^n e^{-E/RT} \tag{1}$$

본 연구에서 식(1)을 기반으로 하여 적분법을 활용하여 정리하면, 활성화에너지(Activation Energy, Ea)와 전지수인자(Frequency Factor, A)를 얻을 수 있는 식(2)와 같은 Coats-Redfern 식을 구할 수 있다¹²⁾.

$$\ln\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = \ln\left[\frac{AR}{\beta E_a}\left(1 - \frac{2RT}{E_a}\right)\right] - \frac{E_a}{RT} \tag{2}$$

여기서, α는 전환율, t는 시간(min), A는 전지수인자(1/min), n은 반응차수, E는 에너지(kJ/mol), Ea는 활성화에너지(kJ/mol), R은 기체상수(8.314×10⁻³ kJ/mol·k), T는 절대온도(k), β는 선형가열속도(k/min)를 나타낸다.

식(2)에서 Doyle Approximation으로 2RT/Ea를 0이라 가정하면 식(3)으로 간략하게 표현할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = \ln\left[\frac{AR}{\beta E_a}\right] - \frac{E_a}{RT} \tag{3}$$

식 (3)의 ln(α/T²)과 1/T의 관계는 직선으로 도식화될 수 있고, 직선의 기울기와 절편으로부터 활성화에너지와 전지수인자를 계산할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. TGA/DTG 분석을 통한 혼소 특성

연소 온도는 연소 반응을 확인 할 수 있는 가장 대표적인 지표이다. 단일시료와 혼합시료의 연소 온도를 확인하기 위해 TGA를 사용하여 연소개시온도, 연소최대온도, 연소종료개시온도를 관찰하여 연소 특성을 분석하므로 석탄과 바이오 고형연료의 혼소에 대한 연소반응 특성을 확인할 수 있다^{3,7)}.

Fig. 1은 각각의 단일 시료와 혼합시료에 대하여 10°C/min의 승온 속도로 가열하면서 구한 TGA 곡선을 나타낸 것이다^{13,14)}. 석탄과 바이오 고형연료 각각 단일 시료 연소는 큰 차이를 보인다. 바이오 고형연료가 석탄 보다 연소개시온도, 연소최대온도, 연소종료개시온도 모두 약 200°C 정도 낮은 상태에서 나타났다. 하지만 혼합을 하여 혼소하는 경우 그 차이는 줄어든다. 특히 석탄 단일 시료를 석탄과 바이오 고형연료가 혼합된 시료와 비교하였을 경우 연소개시온도는 약간 변화가 일어나지만, 연소최대온도와 연소종료개시온도는 변화가 거의 없었다. 연소개시는 200 ~ 315 °C에서 이뤄졌으며, 중량변화가 급격히 일어나는 열분해는 350 ~ 700 °C에서 이뤄졌다¹³⁾.

이와 같은 연소초기 및 연소후기 시간대별 변화 특징은 석탄과 바이오 고형연료의 휘발성분 및 고정탄소 성분은 물론 혼소 시 석탄과 바이오 고형연

료 혼합비로 인해 야기된 것으로 보인다. 즉, Table 1에서 제시한 것처럼 공업분석 결과 석탄은 휘발성분이 28.2%로 크지 않았지만 고정탄소는 50.0%로 높은 값을 나타내어 고정탄소가 주된 열원으로 작용함을 알 수 있었다. 바이오 고형연료는 휘발성분이 64.8%로 매우 큰 비중을 나타내고 있으며, 고정탄소는 13.7%로 석탄의 고정탄소와 비교 시 낮은 비중을 나타내고 있으며, 휘발성분이 주된 열원으로 작용함을 알 수 있었다. 따라서 혼소 시 연소초기는 휘발성분이 주로 분해되며, 연소후기에는 고정탄소가 주로 분해되기에 연소초기에는 바이오 고형연료, 연소후기에는 석탄이 주된 열원이 됨을 알 수 있다. 그런데 연소초기 바이오 고형연료 휘발성분은 64.8%, 석탄 휘발성분은 28.2%로 바이오 고형연료 휘발성분의 영향을 받아 연소개시온도가 변화되는 특징을 관찰할 수 있었다. 하지만 연소후기 바이오 고형연료 고정탄소는 13.7%, 석탄의 고정탄소는 50.0%로 석탄의 고정탄소가 바이오 고형연료의 고정탄소 보다 거의 4배 가까이 많고, 5%, 10%, 15%의 바이오 고형연료를 석탄과 혼소하였기에 혼소 연료 중 바이오 고형연료 비중이 크지 않았으며, 혼소 시 주열원인 C성분이 석탄은 70.98%, 바이오 고형연료는 38.09%로 석탄의 탄소 성분비가 2배 가까이 클 뿐만 아니라 습량기준 저위발열량은 석탄 5,997kcal/kg, 바이오 고형연료 3,561kcal/kg이므로 연소후기에 관찰되

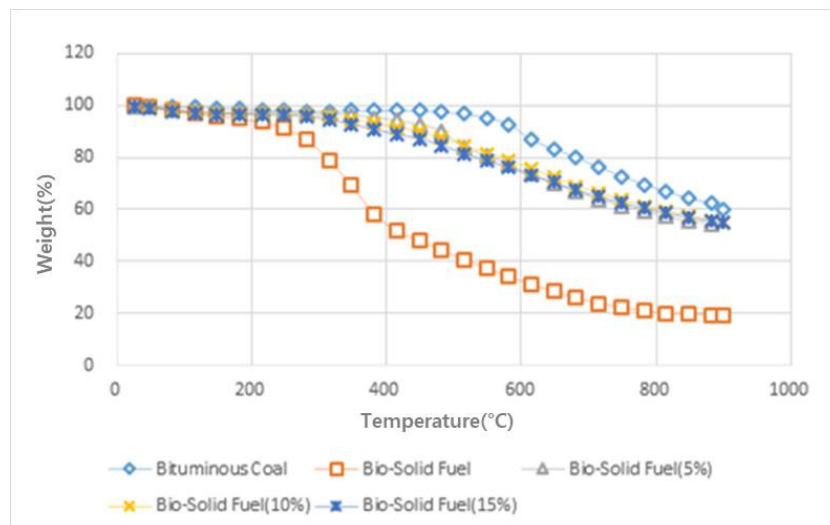


Fig. 1. TGA thermograms for coal, bio-solid fuel and bio-solid fuel/coal mixtures.

는 연소최대온도 및 연소종료개시온도는 석탄의 특
징과 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

DTG 곡선은 연소최대온도를 좀 더 쉽게 구할 수
있으며, 단위시간당 중량변화를 더 쉽게 관찰 할
수 있다. DTG 곡선을 Fig. 2에 나타냈으며, TGA
곡선과 마찬가지로 바이오 고형연료 이외의 시료는
350 ~ 700°C 부근에서 급격한 중량감소가 일어나는
것을 확인하였고, 최대 중량감소를 나타내는 피크점
을 확인할 수 있었다⁷⁾.

여기서, 특별한 점은 바이오 고형연료의 혼합율
이 증가할수록 피크점의 형태가 바뀐다는 것이다.
5%에서는 바이오 고형연료의 특성이 미치는 영향
이 크지 않아 하나의 피크점을 형성하였지만, 바이
오 고형연료의 혼합률이 증가할수록 피크점이 분리

되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 바이오 고형연료
와 석탄이 독립적으로 연소가 이뤄지며, 연소초기에는
휘발성분이 많은 바이오 고형연료의 연소가 주
로 이뤄지고, 연소후기에는 휘발성분이 적고 고정탄
소량이 많은 석탄의 연소가 주로 이뤄지기 때문에
발생되는 것으로 판단된다. 따라서 석탄의 단일 연
소에 비해 혼소를 할 경우 이와 같은 변화를 줄이려
면 바이오 고형연료의 휘발성분 제어를 할 필요가
있는 것으로 판단 된다³⁾.

이와 같이 TGA 및 DTG 분석을 행하여 연소개시
온도, 연소최대온도, 연소종료개시온도를 산출한 결
과 Table 2와 같았다. 앞에서 언급했듯이 바이오 고
형연료 함량이 증가하면서 휘발성분이 많아져 연소
개시온도는 낮아졌지만 바이오 고형연료 함량에 관

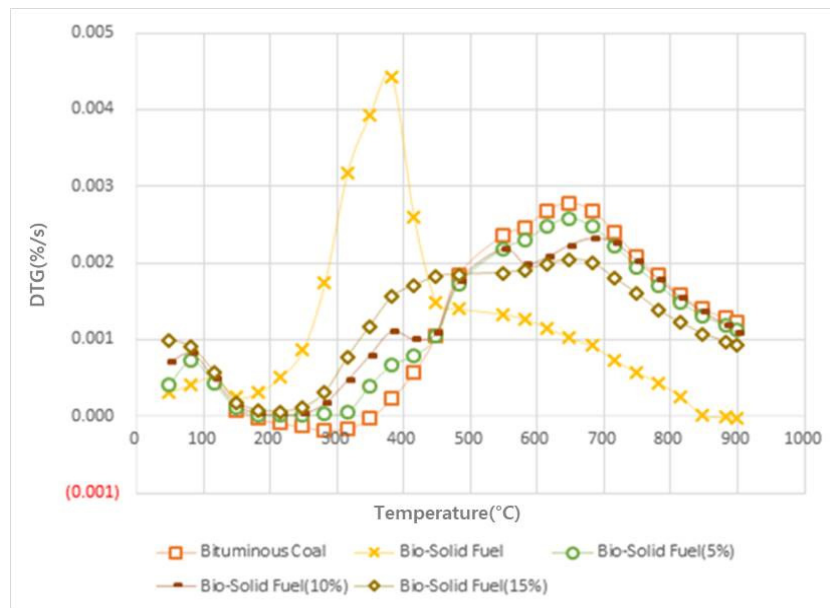


Fig. 2. DTG curves for coal, bio-solid fuel and bio-solid fuel/coal mixtures.

Table 2. Temperatures Obtained from TGA and DTG Combustion Profiles for Coal, Bio-Solid Fuel and Bio-Solid Fuel/Coal Mixtures

Classifications		Initiation Combustion Temperature(°C)	Maximum Combustion Temperature(°C)	Termination Start Combustion Temperature(°C)
Single sample	Coal	385	648	681
	Bio-Solid Fuel	181	381	415
Mixture sample	Bio-Solid Fuel(5%)*	315	648	682
	Bio-Solid Fuel(10%)	248	648	681
	Bio-Solid Fuel(15%)	214	648	681

* Bio-Solid Fuel 5% + Coal 95%

계없이 연소최대온도 및 연소종료개시온도는 석탄과 거의 동일함을 재차 확인하였다. 따라서 하수슬러지를 에너지원으로 활용하는데 대두되는 고수분, 저발열량 문제를 해결하고자 하수슬러지에 폐바이오매스를 혼합하여 제조한 바이오 고형연료를 석탄과 혼소할 경우 연료적 기능은 큰 차이가 생기지 않는 것으로 판단되어 석탄과 혼소를 하므로 기존의 석탄 연료를 사용하던 화력발전소에 큰 부담 없이

연료로 사용할 수 있고, 하수슬러지를 에너지화하여 신재생 에너지원화 할 수 있을 뿐만 아니라 새로운 하수슬러지 처리 방법을 제시할 수 있는 계기가 되었다고 볼 수 있다¹⁵⁾.

3.2. 혼소 특성의 연소반응 속도론적 해석

전술한 최종식의 $\ln(\alpha/T^2)$ 와 $1/T$ 의 관계를 Fig. 3처럼 도식화하여 얻어진 직선그래프의 기울기와 절

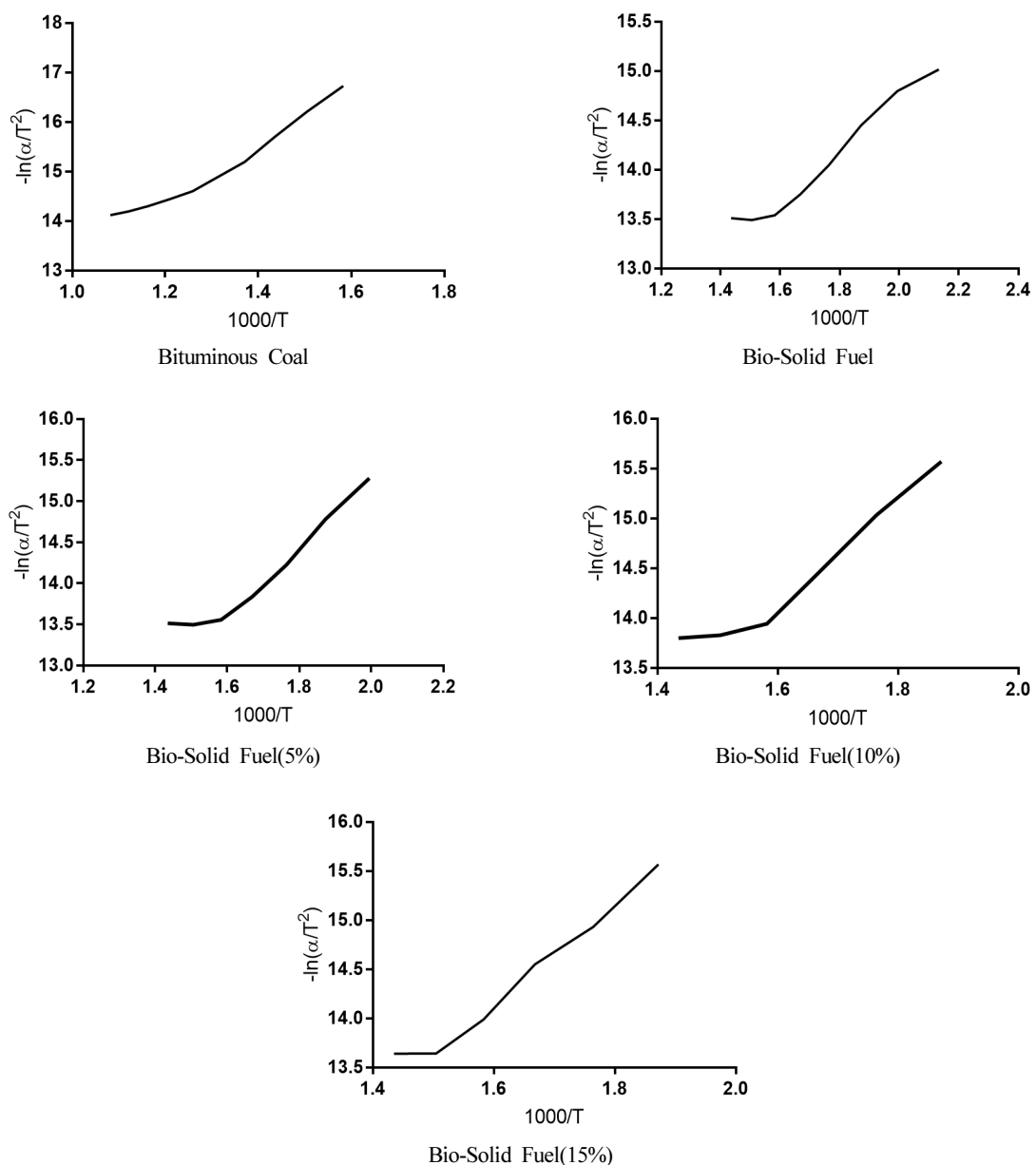


Fig. 3. Kinetic curves for coal, bio-solid fuel and bio-solid fuel/coal mixtures.

편으로부터 활성화에너지와 전지수인자를 도출해 Table 3에 나타내었다.

분석을 진행한 결과, 석탄과 바이오 고형연료를 혼소할 경우 석탄 단일 연소에 비해 활성화 에너지가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 연소 시작에 필요한 에너지양이 줄어든다는 것을 의미한다. 즉, 이 결과는 혼소할 경우 연소개시온도가 낮아지는 것을 의미한다. 그러나 식(4)에서처럼 전지수인자(A)도 낮아짐에 따라 전지수인자와 활성화에너지(Ea)의 도출값인 반응속도상수(k)를 저감시키는 것으로 나타났다. 반응속도상수가 감소함에 따라 전체적인 연소반응이 저하될 것으로 예상된다³⁾. 하지만 연소반응은 낮아지더라도 폐바이오매스를 보조제로 사용하여 하수슬러지와 적절히 혼합할 경우 전반적으로 폐바이오매스가 하수슬러지보다 함수율이 낮고, 열량이 높기 때문에 폐바이오매스 혼합율에 따라 함수율을 낮출 수 있고, 발열량을 높일 수 있어 하수슬러지 처리 시 높은 함수율과 낮은 열량 문제를 해결할 수 있을 것이다. 이렇게 제조된 바이오 고형연료를 연소시간만 충분히 확보할 수 있게 혼소로(co-combustion furnace) 용량을 다소 증대시키면 혼소를 진행하는데 큰 어려움은 없을 것으로 판단되며, 석탄과 혼소하여 화석연료 사용량을 줄일 수 있는 신재생에너지원임을 확인하였다¹²⁾.

$$k = A \exp(-Ea/RT) \tag{4}$$

한편, 활성화 에너지와 전지수인자 관계를 살펴 고자 결정계수(R²)를 도출하였더니 바이오 고형연료가 0.9361로 다소 낮게 나타났지만 나머지는 이 보다

더 높은 값을 나타냈으며, 전반적으로 회귀분석학적 관점에서 상관관계가 낮지 않음을 보이고 있었다¹⁶⁾.

4. 결론

본 연구에서 화석연료 대체에너지원으로 활발히 연구되는 목질계 폐바이오매스를 보조제로 사용하여 제조한 하수슬러지 고형연료인 바이오 고형연료와 석탄을 혼소하였을 경우 나타나는 특성에 관한 연구를 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. DTG를 분석한 결과 바이오 고형연료의 혼합량이 증가할수록 연소개시온도가 낮아짐을 확인하였다. 반면에 연소최대온도와 연소종료개시온도에는 큰 변화가 없이 석탄의 특징과 거의 유사하였다. 이는 바이오 고형연료에는 석탄과 달리 연소초기에 영향을 끼치는 휘발성분의 함량이 높아 연소개시온도를 낮추고 있지만 연소 후기에 주 연소 대상인 석탄의 고정탄소가 바이오 고형연료의 고정탄소 보다 함량이 월등히 높아 석탄의 연소 특징과 거의 유사하게 나타나는 것으로 판단된다.
2. 바이오 고형연료의 혼합량이 증가할수록 피크 점이 분리되는 것을 확인할 수 있는데 이는 바이오 고형연료와 석탄이 독립적으로 연소가 이뤄지며, 연소초기에는 휘발성분이 많은 바이오 고형연료의 연소가 이뤄지고, 연소후기에는 휘발성분이 적고 고정탄소량이 많은 석탄의 연소가 이뤄지기 때문에 발생되는 것으로 판단되므로 이와 같은 변화를 줄이려면 바이오 고형연

Table 3. Activation Energy and Frequency Factor Obtained by Coats and Redfern Function

Classifications		Ea (kJ/mol)	A (1/min)	R ²
Single sample	Coal	44.081	0.015387	0.9695
	Bio-Solid Fuel	28.013	0.007531	0.9361
Mixture sample	Bio-Solid Fuel(5%)	23.070	0.000382	0.991
	Bio-Solid Fuel(10%)	14.358	0.000081	0.98
	Bio-Solid Fuel(15%)	11.083	0.000045	0.9565

* R² : Coefficient of determination

료의 휘발성분 제어가 필요할 것으로 보인다.

3. TGA/DTG 곡선의 속도론적 해석 결과, 바이오 고형연료의 혼합은 활성화에너지를 감소시켜 연소초기 연소 환경조건이 개선될 것으로 보인다. 이는 바이오 고형연료 혼소가 연소를 촉진시키는 것을 의미한다. 그러나 전지수인자 역시 감소함에 따라 전지수인자와 활성화에너지의 복합 인자인 반응속도상수가 감소함에 따라 전체적인 연소반응 속도는 저하될 것으로 판단된다. 하지만 연소시간만 충분히 확보할 수 있게 혼소로(co-combustion furnace) 용량을 다소 증대시키면 화력발전소에 바이오 고형연료와 석탄을 혼소하는데 큰 어려움은 없을 것으로 여겨진다.
4. 하수슬러지를 고형연료화 할 경우 제기되는 높은 함수율과 낮은 발열량 문제점을 개선하기 위해 톱밥이나 캐슈넛셀 등 폐바이오매스를 보조제로 혼합 사용하여 바이오 고형연료를 제조할 경우 하수슬러지 처리 비용을 절감함은 물론 저렴하게 화석연료 대체에너지를 확보할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 연구는 향후 석탄과 보조제로 바이오매스를 사용한 바이오 고형연료의 혼소 시 중요한 기초 자료가 될 것으로 생각된다. 하지만 활성화에너지 등 수치적 해석과 다양한 시료에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

References

1. [한국에너지경제연구원, 월간 에너지 통계] Korea Energy Economics Institute, Monthly Energy Statistics, 33(8), (2017).
2. The Intergovernmental Panel on Climate Change, Fifth Assessment Report, (2014).
3. Choi, H. J. and Lee, S. H., "Estimation on Reaction Kinetics for Carbonization Process using Mixture of Woody Waste and Sewage Sludge", *KSWM*, 33(2), pp. 184~191. (2016).
4. Vaxelaire, J. and Cezac, P., "Moisture Distribution in Activated Sludges:A Review", *Water Research*, 38(9), pp. 2214~2229. (2004).
5. [조진경, "반응표면분석을 이용한 바이오 고형연료의 연료조성 최적화 연구", 인천대학교 대학원 석사학위논문] Jo, J. K., "A Study on Optimization of Various Bio-SRF Composition by Response Surface Methodology", Incheon National University, (2017).
6. Hyeon, W. S., et. al., "A Study on Optimization of Bio-Solid Fuel Composition with Sewage Sludge using Design of Experiment(DOE)", *International Journal of Current Research*, 9(7), pp. 54497~54501. (2017).
7. [박소미, "열중량 분석법을 이용한 하수슬러지 탄화물의 연소 특성 평가", 한밭대학교 산업대학원 석사학위논문] Park, S. M., "Evaluation of Combustion Characteristics of Carbonized Sewage Sludge using Thermogravimetric Analysis", Hanbat National University, (2016).
8. Folgueras, M. B., Diaz, R. M., Xiberta, J. and Prieto I., "Thermogravimetric Analysis of the Co-combustion of Coal and Sewage Sludge", *Fuel*, 82(15), pp. 2051~2055. (2003).
9. Sahu, S. G., Sarkar, P., Chakraborty, N. and Adak, A., "Thermogravimetric assessment of Combustion Characteristics of Blends of a Coal with Different Biomass Chars", *Fuel Processing Technology*, 91(3), pp. 369~378. (2010).
10. Yanfen, L. and Xiaoqian, M., "Thermogravimetric Analysis of the Co-combustion of Coal and Paper Mill Sludge", *Applied Energy*, 88(11), pp. 3526~3532. (2010).
11. [박우식, "초정정 석탄의 제조와 TGA에 의한 연소특성 해석", 한양대학교 대학원 석사학위논문] Park, W. S., "Production of Super Clean Coal and Analysis of Combustion Characteristics using TGA", Hanyang University, (2010).
12. Coats, A. W. and Redfern, J., "Kinetic Parameters from Thermogravimetric Data", *Nature*, 201(4914), pp. 68~69. (1964).

13. Otero, M., Calvo, L., Gil, M., Garcia, A. and Moran, A., "Co-combustion of Different Sewage Sludge and Coal : A Non-isothermal Thermogravimetric Kinetic Analysis", *Bioresource Technology*, 99(14), pp. 6311~6319. (2008).
14. Otero, M., Gomez, X., Garcia, A. and Moran, A., "Non-isothermal Thermogravimetric Analysis of the Combustion of two Different Carbonaceous Materials", *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*, 93(2), pp. 619~626. (2008).
15. Shankar Tumuluru, J., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T. and Boardman, R. D., "A Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties for Energy Applications", *Industrial Biotechnology*, 7(5), pp. 384~401. (2011).
16. [박성현, 회귀분석학, 2판, 민영사] Park, S. H., *Regression Analysis*, 2nd ed., Minyoungsa, (1993).