

반탄화 및 혼합비율 조건별 폐바이오매스 연료 특성 연구

조은지, 진용균, 현완수, 한현구, 민선웅, 여운호[†]

인천대학교 환경에너지공학과

A Study on the Characteristics of Waste Biomass Fuel by the Conditions of Torrefaction and Biomass Mixing Ratio

Eun-Ji Jo, Yong-Gyun Jin, Wan-Su Hyeon, Hyun-Goo Han, Seon-Ung Min, Woon-Ho Yeo[†]

Department of Environmental and Energy Engineering, Incheon National University(INU)

(Received: Mar. 9, 2018 / Revised: Jun. 12, 2018 / Accepted: Jun. 13, 2018)

ABSTRACT: In this study, the analysis of torrefaction products was carried out for fueling of sewage sludge. The mixed samples were composed as follows : 50% of sewage sludge and 50% of rice husk and CR(Coffee Residue). In this experiment, the reaction time(30min, 60min) and temperature(200°C, 250°C, 300°C) were expressed as a single variable using SF(Severity Factor).

As a result, it was confirmed that as the SF increased, the heating value and fuel ratio increased, but the CI(Combustibility Index) decreased. The heating value was similarly increased as CR(Coffee Residue) and SF increased. The fuel ratio range of mixed samples was equal to that of lignite(0.5~1.0) in case of SF lower than 6.19 and that of bituminous coal(1.0~1.8) in case of SF higher than 7.36 or above. The CI showed a stable range(3,000~5,500kcal/kg) in low SF as the content of mixed samples contained more rice husk than CR.

Keywords: Torrefaction, Sewage sludge, CR(Coffee Residue), SF(Severity Factor)

초 록: 본 연구에서는 하수슬러지의 연료화를 위하여 반탄화 생성물을 분석하였다. 혼합시료는 하수슬러지 함량을 50%로 고정하고, 왕겨와 커피박의 함량을 50%로 조절하여 제조하였다. 반탄화 실험에서 반응 시간(30min, 60min)과 온도(200°C, 250°C, 300°C)를 SF(Severity Factor)를 이용하여 단일변수로 나타내었다.

연구 결과 반탄화 조건인 SF가 증가할수록 발열량과 연료비가 증가하였으며, 연소성지수는 감소하는 것을 확인하였다. 혼합시료의 발열량은 커피박(CR)과 반탄화 조건(SF) 모두의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 연료비 범위는 SF가 6.19보다 낮은 경우 갈탄의 연료비 범위(0.5~1.0)와 유사하나 SF가 7.36보다 큰 경우 저도역청탄의 연료비 범위(1.0~1.8)와 유사한 것을 확인하였다. 연소성지수는 커피박보다는 왕겨가 더 함유될수록 낮은 조건의 SF에서 안정 범위(3,000~5,500kcal/kg)의 값을 나타내는 것으로 확인되었다.

주제어: 반탄화, 하수슬러지, 커피박, 반탄화 조건

[†] Corresponding author(e-mail : whyeo@inu.ac.kr)

1. 서론

기후변화대응, 에너지안보와 미래성장동력 확보, 탈원전정책 추진 등의 이유로 신재생에너지원 개발에 대한 중요성은 날로 커지고 있다. 이에 따라 폐바이오매스를 신재생에너지원으로 개발하는 것이 활발히 진행되고 있으며, 특히 해양투기 전면금지로 육상처리 해야하는 하수슬러지가 큰 관심사로 되고 있다.

하수슬러지 연료화는 슬러지 열량을 기존 화석연료인 석탄과 비슷하게 만들어 석탄 대체연료로 활용하는 것으로 화석연료 사용을 줄이는 장점이 있지만 높은 함수율로 인한 품질저하, 수요처 부족, O/C ratio 부적합 등의 문제들이 지속적으로 제기되고 있다.^{1,2)}

연료의 품질 개선을 위해 이용되는 방법 중 하나인 탄화는 이용되는 원료의 폭이 넓고, 제품간 질적 차이가 낮으며, 취급이 쉽다는 장점이 있다.³⁾ 또한 환경친화적 기술 확보, 효율적 에너지회수를 통한 온실가스 저감 달성이라는 긍정적인 효과를 가지고 있지만⁴⁾, 탄화과정 중 50~70%의 큰 연료손실이 발생하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 반탄화에 대한 연구가 진행되고 있다. 반탄화는 낮은 온도범위(200~300°C)와 무산소 조건에서 일어나는 바이오매스의 열화학적 처리공정으로 원래 바이오매스 대비 에너지밀도가 약 1.3배 정도 증가하는 등의 장점^{5,6)}을 가지고 있어 반탄화 연구가 진행되고 있으나 국내 연구는 주로 유기성 및 목질계 폐기물에 속하는 단일 바이오매스가 주된 대상으로 진행되어 왔고 혼합 바이오매스에 관한 연구는 미

흡한 실정이다.

하수슬러지 연료화의 가장 큰 문제점은 슬러지의 높은 함수율로 인해 상대적으로 유기물 함량이 낮아 연료로 이용하기 어렵다는 점이다. 슬러지의 연소열을 이용하기 위해 함수율을 낮춰 자연연소가 가능한 발열량을 갖도록 하는 것이 중요하게 여겨지고 있다.⁷⁾

따라서 본 연구에서는 폐기물계 바이오매스를 하수슬러지와 혼합하여 혼합 바이오매스를 제조한 후 반탄화를 실시하여 혼합바이오매스의 발열량, 연료비, 연소성지수의 연료적특성을 분석하여 연료로서의 적용가능성에 대해 연구하고자 한다. 또한 반탄화조건과 혼합비율의 변수가 연료적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 표현하고자 회귀식을 도출하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 실험재료 구성

본 연구에서는 하수슬러지의 높은 함수율을 저감하기 위한 수분조절제로 왕겨를 이용하였으며 낮은 발열량을 보완하기 위한 열량보강제로 커피박을 혼합하여 혼합바이오매스를 제조 하였다. 혼합바이오매스는 중량별 단순 혼합으로 시료를 제조하였으며 혼합바이오매스와의 비교를 위해 단일바이오매스 분석도 함께 실시하였다.

하수슬러지 연료탄 GR 기준에 의하면 하수슬러지 연료탄은 40%이상의 하수슬러지를 사용해야한다고 명시되어 있다. 따라서 본 연구에서는 하수슬러지의

Table 1. Raw material content

Sample		Sewage Sludge	Rice Husk	Coffee Residue	Sample name
Single sample	1	100	-	-	-
	2	-	100	-	-
	3	-	-	100	-
Mixed sample	1	50.00	50.00	0	Mixture 1
	2	50.00	37.50	12.50	Mixture 2
	3	50.00	25.00	25.00	Mixture 3
	4	50.00	12.50	37.50	Mixture 4
	5	50.00	0	50.00	Mixture 5

(unit : %)

처리량을 증가시키기 위해 이보다 높은 50%로 설정하고, 혼합시료 제조시 하수슬러지 함량을 50%로 고정하여 왕겨와 커피박 함량을 조절하였으며, 구성비는 Table 1과 같다.

2.2. 실험장치 구성

실험에 사용된 반탄화장치는 실험실규모의 Batch 식 반탄화 장치로, 독일의 Nabertherm Muffle furnace LT 5/12이며, N₂를 주입할 수 있도록 개조하였다. 반응기는 크게 질소공급부와 반응부로 구성되고, Regulator와 Flow meter를 설치하여 N₂를 일정한 유량으로 주입 및 제어하였다.

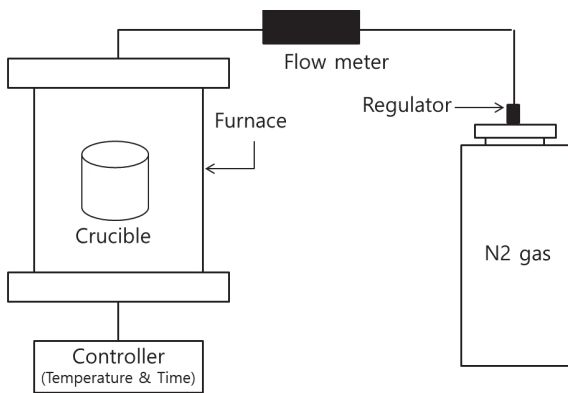


Fig. 1. Torrefaction device and schematic diagram.

2.3. 반탄화조건 설정

반탄화 장치는 질소가스를 이용하여 내부를 치환하였으며 시료의 공기접촉을 최소화 하기 위하여 뚜껑도가니를 사용하여 저산소분위기를 유지하였다. 각 시료에 대한 반탄화는 각각 30분과 1시간, 200도,

250도, 300도로 시간과 온도를 변화시키면서 진행하였으며 시간과 온도는 다음 식을 이용하여 단일변수 조건(Severity Factor, SF)으로 나타내었다.⁸⁾

$$\text{Severity Factor} = \log \{ t \cdot e^{[(t_h - t_r)/14.75]} \}$$

t = reaction time(min)

t_h = reaction temperature(°C)

t_r = reference temperature(100°C)

2.4. 연료적 특성 항목 선정

본 연구에서 하수슬러지 연료의 특성으로 평가하기 위해 연료적 특성 항목으로 발열량, 연료비(Fuel Ratio), 연소성지수(Combustibility Index, CI)를 선정하였다. 발열량은 연료의 품질을 결정하는 중요한 인자로 단위열량계를 이용하여 측정하였다. 연료비는 고정탄소와 휘발분을 이용하여 산정하며, 탄화도가 높을수록 휘발분은 감소하고 고정탄소함량이 높아져 연료비가 높을수록 고품질의 연료라 할 수 있다.⁹⁾ 연소성지수는 연료의 연소 상태를 나타내는 지표로 발열량과 회분, 연료비의 함수로 나타내어 안정적인 연소의 지표로서 활용되고 있다.

$$\text{Fuel Ratio} = \frac{\text{Fixed Carbon}}{\text{Volatile Matter}}$$

Fixed Carbon = 연료의 고정탄소함량(%)

Volatile Matter = 연료의 휘발분함량(%)

$$\text{CI} = \frac{\text{HHV}}{\text{Fuel Ratio}} \times (115 - \text{Ash}) \times \frac{1}{105}$$

HHV = 반탄화물의 건기준 고위발열량(kcal/kg)

Fuel Ratio = 반탄화물의 연료비

Ash = 반탄화물의 회분함량(%)

3. 결과 및 고찰

3.1. 반탄화 조건별 단일 폐바이오매스 물성변화

3.1.1 반탄화 조건별 단일 폐바이오매스 발열량 변화

Table 2에 반탄화조건별 반탄화 생성물의 발열량

Table 2. Heating value of Torrefaction product (Single sample)

Experimental condition (°C-min)	(unit : kcal/kg)			
	SF	Sewage Sludge HHV(LHV)	Rice Husk HHV(LHV)	Coffee Residue HHV(LHV)
raw	-	3,586.27(3,057.80)	3,981.33(3,653.48)	5,379.76(4,898.64)
200-30	4.42	3,660.47(3,403.71)	4,051.52(3,775.39)	5,395.74(5,031.32)
200-60	4.72	3,713.92(3,473.72)	4,078.32(3,788.23)	5,464.80(5,100.25)
250-30	5.89	3,711.36(3,470.72)	4,292.83(4,020.95)	5,735.97(5,372.16)
250-60	6.19	3,802.42(3,576.54)	4,383.62(4,122.64)	6,323.13(5,959.68)
300-30	7.36	3,688.13(3,482.61)	4,894.77(4,675.26)	6,742.38(6,388.37)
300-60	7.66	3,532.57(3,347.66)	4,913.01(4,704.88)	7,274.75(6,932.83)

*HHV : High Heating Value, LHV : Low Heating Value

변화를 나타내었다. 왕겨와 커피박의 경우 반탄화 조건값(SF)이 증가할수록 고위 및 저위발열량이 증가하였으나 하수슬러지의 경우 고위 발열량은 일부 조건에서 감소하는 것으로 나타났다. 또한 하수슬러지의 경우 반탄화를 진행하여도 하수슬러지 연료탄 저위발열량 기준(석탄, 코크스:4,000kcal/kg, 바이오 에너지:3,500kcal/kg)을 만족하지 못하는 것으로 확인되었다. 하수슬러지는 생물학적 처리에 의해 가연성 성분이 대부분 사용되고 열분해가 쉽게 일어나는 유기성 성분으로 구성되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 하수슬러지만을 단독 반탄화할 경우에는 SF 6.19의 조건에서 진행하는 것이 바람직 한 것으로 판단된다. 하지만 왕겨와 커피박은 하수슬러지와 달리 열분해가 어려운 목질계/초본계 바이오매스로 원시료 자체가 높은 발열량을 갖고 있으며, 이를 혼합하여 반탄화할 경우 하수슬러지의 발열량 감소를 방지할 뿐만 아니라 연료탄의 발열량 기준을 충족할 수 있을 것으로 보인다.

3.1.2 반탄화 조건별 단일 폐바이오매스 연료비 및 연소성지수 변화

Table 3과 Table 4에 반탄화조건별 연료비와 연소성지수의 변화를 나타내었다. 일반적으로 연료비 범위는 흑갈탄 및 갈탄=0.5~1.0, 저도역청탄=1.0~1.8, 고도역청탄=1.8~4.0, 반역청탄=4.0~7.0, 반무연탄=7.0~12.0, 무연탄=12.0이상을 나타낸다. 단일 하수슬러지 자체의 낮은 고정탄소 함량으로 인해 SF=5.89 이상부터 갈탄에 해당하는 연료비를 나타냈다. SF 증가에 따른 연료비의 증가폭은 커피박이 가장 컸으며, 하수슬러지가 가장 낮은 것으로 나타났다.

석탄의 연소성지수는 석탄의 연소상태를 나타내는 지표로 일반적으로 3,000kcal/kg 이상이 되어야 보조연료 없이 단독연소가 가능하며, 보통 혼탄은 3,000~5,500kcal/kg의 값일 경우 단독연소가 가능한 안정 범위로 판단하고 있다. 이 범위를 벗어날 경우 연소가 불량한 것으로 판단되며, 발전소에서는 혼소율에 제한을 두고 있다.¹⁰⁾ 단일시료의 경우 하수슬

Table 3. Fuel ratio of Torrefaction product (Single sample)

Experimental condition (°C-min)	SF	Sewage Sludge	Rice Husk	Coffee Residue
raw	-	0.2748	0.6460	0.4981
200-30	4.42	0.3109	0.6826	0.5162
200-60	4.72	0.3555	0.8649	0.5430
250-30	5.89	0.6426	0.9478	0.7574
250-60	6.19	0.6861	0.9972	1.0189
300-30	7.36	0.7282	1.1480	1.3386
300-60	7.66	0.8686	1.5073	1.7321

Table 4. CI of Torrefaction product (Single sample)

(unit : kcal/kg)				
Experimental condition (°C-min)	SF	Sewage Sludge	Rice Husk	Coffee Residue
raw	-	14,246.21	6,743.09	11,825.11
200-30	4.42	12,852.05	6,493.58	11,443.88
200-60	4.72	11,401.12	5,157.47	11,018.11
250-30	5.89	6,303.60	4,954.11	8,290.28
250-60	6.19	6,047.71	4,807.45	6,793.26
300-30	7.36	5,526.19	4,662.74	5,513.13
300-60	7.66	4,435.71	3,564.31	4,596.63

러지와 커피박은 대부분의 SF조건에서 이 범위 이상인 것으로 확인되었으나 왕겨는 SF 4.72이상에서 처리하였을 경우 연소성지수가 혼탄의 범위에 모두 포함되어 다른 시료보다 혼탄에 속하는 경우가 더 많았다.

3.2. 반탄화 조건별 혼합 폐바이오매스 물성변화

3.2.1 반탄화 조건별 혼합 폐바이오매스 발열량 변화

혼합시료의 반탄화 생성물에 대한 발열량 변화를 Table 5 및 Fig. 2에 나타내었다. 발열량은 모든 혼합시료가 단일 하수슬러지 보다 높았으며, 단일 하수슬

러지에서 보인 SF 증가에 따른 발열량 감소 현상은 나타나지 않았다. 혼합시료 내에서는 왕겨보다 커피박의 함량이 증가할수록 발열량이 높았으며, 반탄화 처리를 하지 않은 원시료의 경우 저위발열량이 최소 3,400kcal/kg에서부터 최대 4,150kcal/kg으로 증가하였다. SF 증가에 따른 영향으로는 혼합비율별로 저위 발열량 값이 최소 720kcal/kg에서 최대 1,250kcal/kg의 증가폭을 보였다. 왕겨와 커피박(Coffee Residue, CR) 함량 합이 50% 이므로 커피박(CR) 함량을 변수화하면 왕겨 함량도 알 수 있으므로 SF, CR과 저위발열량(LHV) 관계를 Fig. 2처럼 도시할 수 있으며, 이 그림을 통해서 알 수 있듯이 발열량은 어느 한 조건에 크게 반응성을 보이는 것이 아니라 반탄화조건(SF)과 커피박(CR) 함량의 두 조건 모두에 크게 반응하는 것

Table 5. Heating value of Torrefaction product (Mixed sample)

(unit : kcal/kg)						
Experimental condition (°C-min)	SF	Mixture1 HHV (LHV)	Mixture2 HHV (LHV)	Mixture3 HHV (LHV)	Mixture4 HHV (LHV)	Mixture5 HHV (LHV)
raw	-	3,843.28 (3,431.36)	3,997.00 (3,552.80)	4,112.91 (3,662.18)	4,286.58 (3,805.75)	4,646.97 (4,144.55)
200-30	4.42	3,904.45 (3,618.08)	4,075.20 (3,779.81)	4,192.44 (3,901.30)	4,324.26 (4,008.14)	4,700.15 (4,372.62)
200-60	4.72	3,968.36 (3,693.15)	4,093.17 (3,801.99)	4,218.36 (3,927.46)	4,400.16 (4,091.38)	4,746.43 (4,420.72)
250-30	5.89	3,975.27 (3,707.38)	4,240.59 (3,960.62)	4,381.06 (4,090.37)	4,531.55 (4,223.01)	4,817.73 (4,495.05)
250-60	6.19	4,124.26 (3,874.49)	4,341.91 (4,079.88)	4,553.39 (4,290.37)	4,808.54 (4,513.88)	5,165.56 (4,856.56)
300-30	7.36	4,368.70 (4,153.88)	4,594.39 (4,371.18)	4,709.24 (4,446.17)	4,833.69 (4,539.95)	5,232.12 (4,923.77)
300-60	7.66	4,355.28 (4,159.83)	4,716.64 (4,510.28)	4,875.38 (4,664.11)	5,189.19 (4,948.17)	5,661.41 (5,385.60)

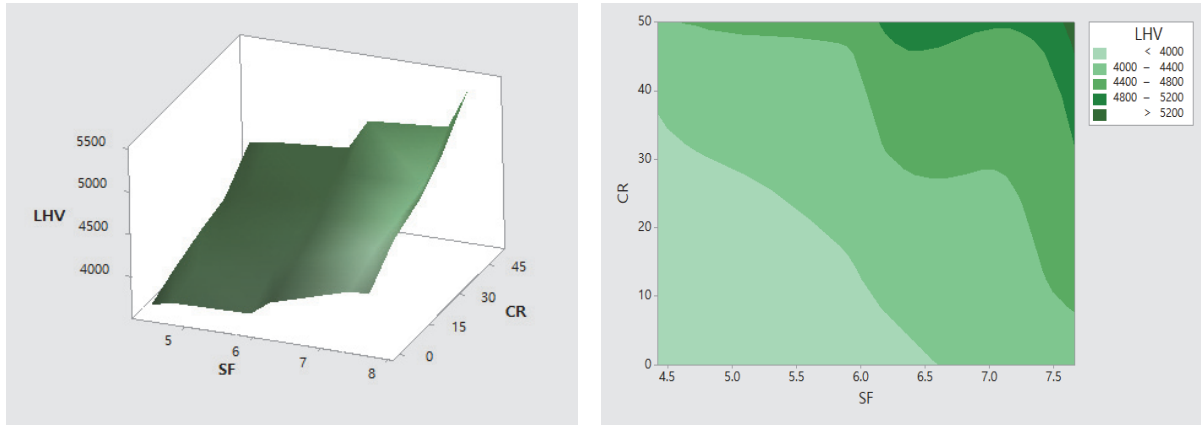


Fig. 2. Three dimensional surface graph and contour diagram about LHV(kcal/kg) versus SF, CR(%).

으로 나타났다.

3.2.2 반탄화 조건별 혼합 폐바이오매스 연료비 및 연소성지수 변화

혼합시료의 연료비와 연소성지수의 변화를 Table 6, Table 7 및 Fig. 3에 나타냈다. 모든 혼합시료에서 SF가 같은 단일 하수슬러지보다 연료비가 증가되었다.

SF가 5.89 이하 및 7.66인 경우에는 커피박보다는 왕겨가 함유될수록 연료비가 증가되는 것으로 나타났으며, SF가 6.19 및 7.36인 경우에는 왕겨와 커피박이 비슷한 영향을 보이는 것으로 나타났다. 반탄화된 혼합 시료들은 SF가 6.19 이하에서 대부분 갈탄의 연료비 범위(0.5~1.0)를 나타내었으며, SF가 7.36 이상에서는 저도역청탄(1.0~1.8)에 해당하는 연료비를

Table 6. Fuel ratio of Torrefaction product (Mixed sample)

Experimental condition (°C-min)	SF	Mixture1	Mixture2	Mixture3	Mixture4	Mixture5
raw	-	0.4830	0.4518	0.4428	0.4248	0.4023
200-30	4.42	0.5821	0.5048	0.4737	0.4480	0.4426
200-60	4.72	0.6623	0.6352	0.6222	0.5550	0.4361
250-30	5.89	0.7947	0.7881	0.6272	0.6193	0.5824
250-60	6.19	0.8756	0.8724	0.8674	0.8555	0.8893
300-30	7.36	1.0498	1.0383	1.0305	1.0299	1.0628
300-60	7.66	1.3765	1.3719	1.3017	1.2629	1.2383

Table 7. CI of Torrefaction product (Mixed sample)

Experimental condition (°C-min)	SF	Mixture1	Mixture2	Mixture3	Mixture4	Mixture5
raw	-	8,697.18	9,671.37	10,155.02	11,031.89	12,630.87
200-30	4.42	7,331.83	8,824.54	9,675.42	10,554.15	11,611.23
200-60	4.72	6,548.62	7,043.56	7,410.56	8,666.89	11,900.20
250-30	5.89	5,467.15	5,880.46	7,635.11	7,998.74	9,044.35
250-60	6.19	5,146.37	5,438.00	5,737.21	6,143.36	6,348.79
300-30	7.36	4,545.93	4,833.69	4,992.36	5,129.12	5,380.65
300-60	7.66	3,455.43	3,754.81	4,090.99	4,488.86	4,997.22

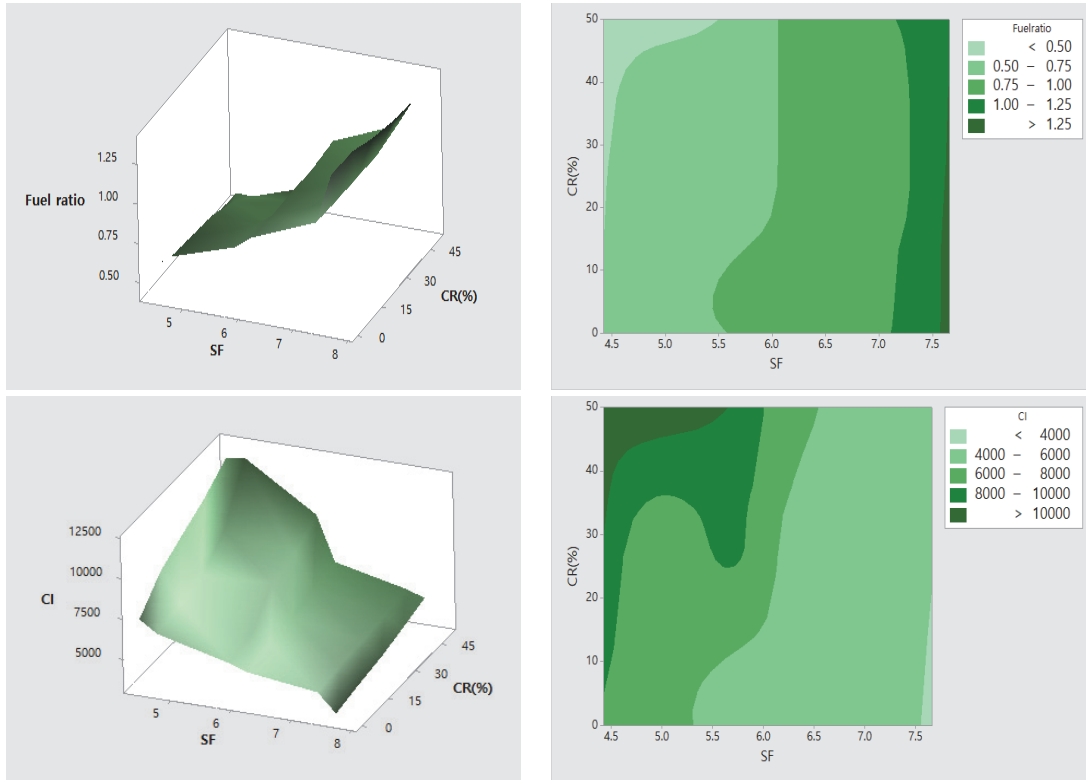


Fig. 3. Three dimensional surface graph and contour diagram about Fuel ratio and CI versus SF, CR(%).

얻을 수 있었다.

반탄화 처리를 하지 않은 혼합시료는 8,600~12,000 kcal/kg의 연소성지수를 보여 단독 연소가 불가능한 것으로 확인되었다. 하지만 반탄화를 진행하여 SF가 증가할수록 연소성지수가 감소하여 안정범위(3,000~5,500kcal/kg)에 포함되어 단독 연소가 가능한 것을 확인할 수 있었으며, SF가 6.19의 조건부터는 절반 가까이 연소성지수가 감소하였다. SF가 5.89 이하에서는 비교적 왕겨와 커피박의 혼합비율에 의한 영향이 큰 것으로 나타났으나 SF가 높은 경우에는 비교적 혼합에 의한 차이가 작은 것으로 나타났다. 혼합비율만을 고려할 경우 커피박보다는 왕겨가 하수 슬러지의 연소성지수 감소에 도움이 되는 것으로 보이며, 반탄화조건의 경우 높은 SF가 요구됨을 확인하였다.

3.3. 폐바이오매스 물성변화 다중회귀분석 결과

반탄화 및 혼합비율별 조건이 연료적 특성 항목인 발열량, 연료비, 연소성지수에 미치는 영향을 파

악하기 위해 회귀분석 실시하였다. 왕겨함량이 증가할수록 커피박함량이 감소하는 상대적인 영향으로 혼합비율은 커피박(Coffee Residuum, CR)의 함량으로 나타내어 CR과 SF를 독립변수로 설정하였으며, 종속변수는 저위발열량(LHV), 연료비, 연소성지수(CI)로 설정하였다.

독립변수에 의한 각각의 종속변수 항목의 영향에 대해 분석한 결과는 Fig. 4 및 Table 8과 같고, 모든 회귀모형은 p-value<0.001로 모형이 적합한 것으로 나타났으며, 도출된 회귀모형은 다음과 같다.

$$Y_{LHV} = 2,483.095 + 226.272SF + 16.421CR$$

$$Y_{Fuel\ ratio} = -0.461 + 0.224SF - 0.002CR$$

$$Y_{CI} = 14,555.690 - 1,530.769XSF + 54.374CR$$

윗 식에 의하면 반탄화 조건(SF)과 커피박(CR) 함량이 증가할수록 발열량은 증가하는 것으로 나타났으며 커피박 함량보다는 반탄화 조건에 의한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 하지만 연료비의 경우,

Table 8. Multiple regression analysis of fuel characteristics

Model		B	β	t-value	p-value
Heating Value	constant	2,483.095		21.021	<0.001
	SF	226.272	0.659	12.246	<0.001
	CR(%)	16.421	0.699	12.988	<0.001
	R=0.960, R ² =0.922, Adjusted R ² =0.916, F=159.331, P<0.001, Durbin-watson=1.896				
Fuel ratio	constant	-0.461		-5.155	<0.001
	SF	0.224	0.941	15.998	<0.001
	CR(%)	-0.002	-0.149	-2.534	0.017
	R=0.952, R ² =0.907, Adjusted R ² =0.900, F=131.180, P<0.001, Durbin-watson=2.547				
CI	constant	14,555.690		18.293	<0.001
	SF	-1530.769	-0.831	-12.299	<0.001
	CR(%)	54.374	0.431	6.385	<0.001
	R=0.936, R ² =0.877, Adjusted R ² =0.868, F=96.013, P<0.001, Durbin-watson=1.817				

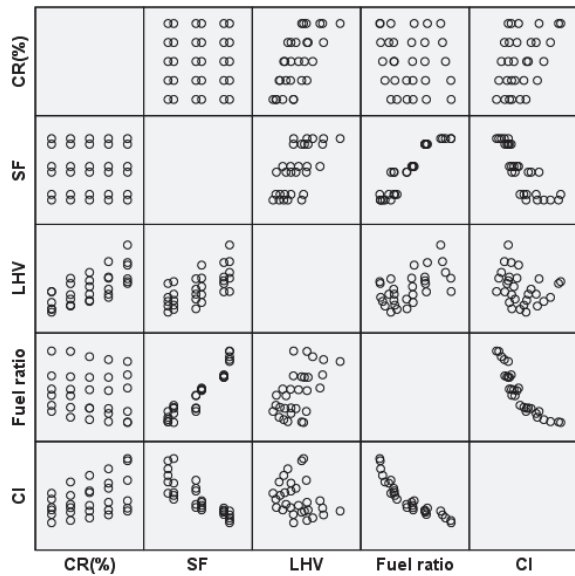


Fig. 4. Matrix scatter plot of independent variables (SF, CR) and dependent variables (LHV, Fuel ratio, CI).

반탄화 조건이 강해질수록 연료비가 증가하였지만 커피박 함량에는 반비례 관계를 보이는 것으로 확인되었다. 또한 반탄화 조건이 강해질수록 연소성지수는 감소하였으며 커피박 함량에는 비례하는 것으로 확인되었다.^{11),12)}

4. 결론

하수슬러지를 효율적으로 자원화하고자 폐바이오매스를 혼합하여 반탄화를 행하였으며, 반탄화 및 혼합비율 조건에 따른 생성물의 연료 특성을 분석 연구하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 발열량은 반탄화 조건(SF)이 증가할수록 높아졌으며, 왕겨보다는 커피박의 함량(CR)이 증가할수록 증가폭이 컸다. 단일 하수슬러지는 유기물특성으로 인해 SF가 증가할수록 일부 조건에서 발열량이 감소하는 경향을 보였으나 혼합시료의 경우 발열량의 감소를 관찰할 수 없었으며, 단일 하수슬러지에 비해 증가된 열량을 얻었다. 또한 회귀분석 결과 반탄화 및 커피박 함량 조건 모두 발열량 증가에 영향을 주는 것으로 나타났다.
2. 연료비의 경우 단일 하수슬러지에 비해 혼합시료는 개선되었으며, 단일 하수슬러지 자체의 낮은 고정탄소 함량으로 인해 SF 5.89이상부터 갈탄에 해당하는 연료비를 나타냈으나 혼합시료 반탄화의 경우 SF가 6.19 이하에서는 대부분 갈탄, SF 7.36 이상에서는 저도역청탄에 해당하는 연료비를 나타냈다. 회귀분석 결과 커피

- 피박 함량보다는 SF에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.
3. 연소성지수는 SF가 증가할수록 감소하였으며, 커피박보다는 왕겨의 함량이 증가할수록 낮은 SF에서도 안정범위(3,000~5,500kcal/kg)에 포함 되어 단독 연소가 가능한 것을 확인하였고, SF가 낮을 경우 비교적 혼합에 의한 영향이 큰 것으로 나타났으나 SF가 높을 경우 비교적 혼합에 의한 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 회귀분석 결과 SF는 감소하는 경향을, CR은 증가하는 경향을 보여 단일 시료보다는 혼합시료가 연료로 가치를 증대할 수 있음을 알 수 있었다.
 4. 적정범위의 연료적 특성을 고려할 경우 7이상의 반탄화조건으로 탄화시켜 단일하수슬러지의 높은 연소성지수를 감소시키는 것이 필요하며 본 연구의 적정혼합비는 하수슬러지:툽밥:커피박=2:1:1인 것으로 생각된다. 하수슬러지는 높은 함수율, 낮은 발열량 및 유기물의 분해로 인한 열량 저감, 높은 회분함량 등의 단점을 지니고 있어 연료화에 있어 어려움을 겪고 있으나 본 연구에서 사용된 왕겨와 커피박 등의 폐바이오매스를 첨가하여 온도 및 시간이 최적으로 조절된 상태로 반탄화시킨다면 이런 문제가 해결이 될 것으로 사료된다. 차후 좀 더 다양한 혼합 바이오매스와 반탄화조건을 설정하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

1. [이윤경, 김재형, 강설송, 김경아, 박대원, “반탄화를 이용한 하수슬러지 연료화에 관한 연구”] Lee, Y. K., Kim, J. H., Kang, S. S., Kim, G. A. and Park, D. W., “A study on the fuel of sewage sludge by torrefaction process”, *Journal of Energy Engineering*, 22(4), pp. 355~361. (2013).
2. [이윤경, “반탄화 반응을 이용한 하수슬러지 고형 연료화”] Lee, Y. K., “The Solid Fuel Production for Sewage Sludge by Torrefaction”, M.S Thesis, Seoul National University of Science and Technology, (2014).
3. [김용태, “반탄화에 의한 폐바이오매스의 생분해도 특성에 관한 연구”] Kim Y. T., “A study on characteristics of biodegradation of waste biomass by Torrefaction”, M.S Thesis, Incheon National University, (2015).
4. [박헌수, “폐목재 탄화물 제조에서의 음식폐기물 함량 효과”] Park, H. S., “An Effect of Food Waste Content in the Manufacture of Carbonization Residue Produced from woody waste”, M.S Thesis, Kyonggi University, (2011).
5. [김현숙, 박대원, “음식물류폐기물과 하수슬러지 혼합비율에 따른 반탄화 생성물의 연료적 특성비교”] Kim, H. S. and Park, D. W., “The Characteristics of properties torrefied product according to Food waste and sewage sludge mixing ratio”, *Korean Oil Chemists' Society*, 33(2), pp. 264~270. (2016).
6. [김현숙, 유재민, 박대원, “반탄화를 통한 음식물 쓰레기의 연료화에서 온도에 대한 영향 비교”] Kim, H. S., Yoo, J. M, and Park, D. W., “Effect of temperature on torrefaction of food waste to produce solid fuel”, *Journal of Energy Engineering*, 23(3), pp. 245~250. (2014).
7. [한국환경산업기술원, “하수슬러지 처리 및 연료화 기술동향”] Korea Environmental Industry Technology Institute, “Trend of Sewage Sludge Treatment and Fuelization Technology”, (2014).
8. [김영훈, 나병일, 이수민, 이형우, 이재원, “반응 표면분석법을 이용한 유칼립투스의 반탄화 최적 조건 탐색”] Kim, Y. H., Na, B. I., Lee, S. M., Lee, H. W. and Lee, J. W., “Optimal Condition for Torrefaction of Eucalyptus by Response Surface Methodology”, *J. Korean Wood Sci.&Tech*, 41(6), pp. 497~506. (2013).
9. [강정희, 강종윤, 이시형, 김병태, 이남훈, “건조 하수슬러지의 석탄 혼소를 위한 연료특성 및 경제성 평가에 관한 연구”] Kang, J. H, Kang, J. Y., Lee, S. H., Kim, B. T. and Lee, N. H., “ A Study

- on the Evaluation of Fuel Characteristic and Economic Benefit for Co-combustion of Dried Sewage Sludge with Coal”, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 22(1), pp. 11~19. (2014).
10. [박상우, 장철현, “기계적으로 선별한 가연성폐기물의 탄화: 생성물의 연료특성 조사”] Park, S. W. and Jang, C. H., “Carbonization of Mechanically Pre-treated Waste: Investigation of Fuel Characteristics of The Products”, *J. of Korea Society of Waste Management*, 30(4), pp. 383~389. (2013).
11. [노형진, “SPSS를 활용한 회귀분석”, 지필미디어] Noh, H. J., “Regression analysis using SPSS”, Jiphil Media, (2016).
12. [이훈영, “이훈영교수의 SPSS를 이용한 데이터 분석”, 2판, 도서출판 청람] Lee, H. Y., “Statistical package for the social sciences”, 2nd Ed., CRbooks, (2013).