

Oil Palm Frond의 반탄화를 통한 연료화 연구

이명석* · 정광식* · 정상진*** · 이관영***†

*고려대학교 화공생명공학과
136-713 서울시 성북구 안암동 5-1
**고려대학교 에너지환경정책기술대학원
136-713 서울시 성북구 안암동 5-1
***한국해양대학교 LINC사업단
606-791 부산광역시 영도구 태종로 727
(2013년 5월 16일 접수, 2013년 6월 20일 채택)

The Fuelization Study on the Oil Palm Frond Through Torrefaction

Myung Suk Lee*, Gwangsik Jeong*, Sang-Jin Jung*** and Kwan-Young Lee***†

*Department of Chemical & Biological Engineering, Korea University, 5-1 Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea

**GREEN SCHOOL, Korea University, 5-1 Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea

***LINC, Korea Maritime University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-791, Korea

(Received 16 May 2013; accepted 20 June 2013)

요 약

본 연구는 반탄화된 OPF(oil palm fronds)의 연료로써 이용가능성을 알아보았다. OPF는 200, 250, 300, 350 °C에서 각각 1시간과 2시간 동안 반탄화를 진행하였다. 반탄화된 OPF는 온도가 높아짐에 따라 그리고 반탄화 시간이 증가됨에 따라 발열량이 증가하였다. 또한, 반탄화 시간보다는 반탄화 온도가 더 중요한 요소였다. 하지만 반탄화 온도가 높아질수록 반탄의 수득률이 감소함으로 적절한 반탄화 온도가 요구되었다. 250 °C에서의 반탄화로는 헤미셀룰로오스의 분해가 상당히 진행되고 300 °C에서는 셀룰로오스의 분해까지도 거의 진행됨을 OPF의 열분해 거동으로부터 알 수 있었다. 또한, 반탄화된 OPF는 바이오매스의 grindability를 향상시킴으로 분쇄에 소모되는 에너지를 감소시킴을 예측할 수 있었다.

Abstract – In this study, we investigated the feasibility of torrefied OPF (oil palm fronds) as the fuel. The torrefaction was performed at 200, 250, 300 and 350 °C during 1 and 2 hours, respectively. As raising the torrefaction temperature and increasing the processing time, the GHV (gross heating value) of torrefied OPFs was increased. Moreover, we found that the torrefaction temperature is more important factor than the processing time. However, the proper torrefaction temperature was asked because the higher torrefaction temperature led to the lower torrefied OPF yield. TGA (thermo-gravimetric analysis) data released that the torrefaction at 250 °C could significantly decompose the hemicellulose and the almost cellulose was decomposed at 300 °C. In addition, the grindability of biomass was improved after torrefaction, so that it can reduce energy consumption in comminution.

Key words: Torrefaction, Oil Palm Frond, Gross Heating Value

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈과 환경오염 문제 등으로 인해 기존 에너지 사용의 절약과 새로운 에너지 개발의 필요성이 증가하고 있다. 바이오매스를 이용한 신재생에너지연구가 활발히 진행되고 있으며, 얻어지는 에너지원의 형태로는 액체, 기체, 고체로 나눌 수 있다. 바이오매스로부터 얻는 액상 에너지원은 바이오디젤과 바이오에탄올이 대

표적이다[1-3]. 기상 에너지원으로는 바이오매스의 가스화로부터 얻는 합성가스를 예로 들 수 있다 [4-6]. 고상 에너지원은 목질계 바이오매스로부터 얻어지는 우드칩과 펠릿 등이 있다. 목질계 바이오매스는 광합성에 의한 이산화탄소의 순환효과로 기후변화를 가속하지 않는 탄소 중립적 에너지로, 연소 시 이산화탄소와 이산화황의 발생량이 적어 교토 의정서에 의해 규제되는 이산화탄소 배출 문제를 해결할 수 있는 한 가지 방안으로 제시되고 있다[7,8].

최근 우리 정부는 RPS 제도(Renewable Portfolio Standards; 신재생에너지 발전 의무비율할당제)를 2012년부터 도입함으로써 신재생에너지의 사용을 촉구하고 있다. 따라서 RPS 제도를 의무적으로 시

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kylee@korea.ac.kr

‡이 논문은 경희대학교 정성진 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

행해야 하는 발전사들은 신재생에너지의 도입을 적극 추진하고 있으며, 목질계 바이오매스와 석탄을 혼합하여 사용하는 혼소발전이 큰 관심을 보이고 있다. 일본의 발전사의 경우 이미 혼소발전연구와 시험을 마치고 가동에 들어간 회사도 있으며, 유럽의 경우 바이오매스 혼소나 신재생에너지사용 발전소를 건설 중인 것으로 알려져 있다 [8,9].

혼소발전에는 주로 우드칩과 목재펠릿이 사용되고 있다. 하지만 우드칩과 목재펠릿의 경우 에너지밀도가 석탄에 비해 1/2 정도로 낮아 공급되는 양적 차이가 문제시 되고 있다. 또한 높은 수송비용 그리고 흡습성으로 인한 저장 문제 등이 제시되고 있는 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 목질계 바이오매스 반탄화에 관한 연구가 진행되고 있다. 반탄화된 바이오매스를 고온의 무산소 조건에서 처리하는 것으로, 목재의 수분을 제거할 뿐 아니라 목재의 주요 구성 성분인 헤미셀룰로오스(hemicellulose)와 셀룰로오스(cellulose)의 분해로부터 낮은 발열량의 원인인 산소를 CO나 CO₂의 형태로 제거함으로써 목재의 흡습성을 소수성으로 변화시키고 발열량 또한 증가시키는 기술이다. 이와 더불어 목재의 grindability의 증가로 분쇄 시 에너지소모가 감소하고, 펠릿성형 시 저장과 운송 측면에서 비용을 절감할 수 있다는 장점을 가지고 있다[8]. 또한, 반탄화된 바이오매스는 연기의 생성이 적고 연소속도가 빨라 가정용으로도 더 적합한 연료이다[10].

반탄화 연구는 1930년대에 프랑스에서 시작하였으나 그 후로는 거의 진행되지 않았다[8]. 반탄화에 관한 보고가 나오기 시작한 것은 1990년대부터이다. 하지만 이 당시의 연구는 바이오매스 연소 시 연기의 생성과 연소속도에 관련된 연구가 진행되었다[10]. 다양한 원료를 사용한 반탄화 연구는 2000년대 들어와서 진행된다. Luo 등은 벚짚과 포도씨껍질 등을 반탄화하여 연료로 사용하는 연구를 수행하였으며, Yusup 등은 oil palm 씨껍질 등을 원료로 사용하였다[11-13]. 그밖에 최근에는 커피 찌꺼기와 해조류 등을 원료로 사용하는 등 다양한 바이오매스를 반탄화 하여 연료화하는 연구가 진행되고 있다 [14,15]. 효율적인 반탄화를 위한 연구로 Worasuwannarak[16] 등은 반탄화 시간과 온도가 제조된 반탄에 어떠한 영향을 미치는가에 관한 보고를 한바 있으며, Uemura[17] 등은 반탄화 시 대기의 조성에 따른 영향을 연구한 바 있다.

본 연구에서는 실험에 사용할 바이오매스로는 말레이시아산의 OPF(oil palm fronds)를 사용하였다. Oil palm 찌꺼기는 trunk, fronds, EFB(empty fruit bunches), mesocarp fiber, kernel shell 등으로 이루어져 있다. Oil palm tree의 경우 말레이시아에서 연간 약 56 million tonnes이 생산된다는 보고가 있으며, 1톤의 palm oil을 생산하는데 22톤의 OPF가 부산물로 생성될 만큼 풍부한 양을 가지고 있다[18,19]. 하지만 풍부한 양에 비해 아직 OPF의 연료화에 관한 연구는 거의 진행되고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 OPF를 반탄화 온도와 시간에 따라 반탄화를 진행하여 물리, 화학적 특성을 살펴보고, 이로부터 연료로써 이용 가능성을 논의하고자 한다.

2. 실험방법

2-1. 재료 및 반탄 제조

본 실험에서의 OPF 반탄화는 관형로에서 이루어졌다. 관형로에 약 10 g의 OPF를 넣고 관형로 내부의 잔존산소를 제거하기 위해 질소가스를 60 ml/min으로 상온에서 1시간 동안 흘려주었다. 그 후 승온속도를 10 °C/min으로 하여 200, 250, 300, 350 °C에서 1, 2시간

Table 1. Yield of torrefied OPF prepared with different heat-treatment temperatures and time

Sample	Time (h)	Temperature (°C)	Yield (%)
OPF-1-200	1	200	90.2
OPF-1-250		250	81.5
OPF-1-300		300	59.6
OPF-1-350		350	38.4
OPF-2-200	2	200	88.3
OPF-2-250		250	74.3
OPF-2-300		300	44.3
OPF-2-350		350	36.6

동안 질소분위기 하에서 열처리를 하였다. 제조된 온도와 반탄화 시간에 따른 수득률을 Table 1에 나타내었다. 또한, 반탄화 처리를 하지 않은 OPF는 OPF-Raw로 명명하였다.

2-2. 분석

제조된 반탄은 KS 규격(KS E 3705)에 따라 공업분석(수분, 회분, 휘발분, 고정탄소)을 실시하였다. 반탄화 정도에 따른 성분분석을 위해 한국기초과학지원연구원(KBSI; Korea Basic Science Institute)에 원소분석을(Elemental Analyser, Flash EA 1112series, CE Instruments) 의뢰하여 측정하였다. 또한, 반탄표면의 형태변화를 확인하기 위해 한국기초과학지원연구원(KBSI)의 HITACHI S-4700 장비를 사용하여 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)을 측정하였다. 반탄의 열분해거동은 열중량 분석기(Thermogravimetric analysis, Q50 apparatus, TA Instruments)를 이용하여 승온 속도 10 °C/min으로 질소 분위기하에서 측정하였다. 반탄의 발열량 측정은 석회석신소재연구센터에 의뢰하였고, Isoperibol Bomb Calorimeter (PARR Instruments)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

제조된 OPF 반탄과 OPF-Raw에 대한 공업분석결과를 Table 2에 나타내었다. 반탄화 전의 OPF의 수분은 10% 미만으로 측정되었다. 하지만 다른 문헌에서는 oil palm biomass 부산물의 함수량을 50~70%로 보고되고 있다[12,17,19]. 이는 본 실험에 사용된 OPF가 말레이시아에서 장시간 자연 건조된 시료이기 때문이다. 반탄 후 OPF의 함수량은 약 1~3% 정도로 떨어지는 것을 알 수 있었다. 반탄화 전 OPF의 회분은 약 2% 정도로 측정되었으며, 이는 oil palm biomass의 다른 부분이나 rice husk, rice straw보다 적은 양이다[12,20]. 회분은 발열량을 높이는 요소가 아니며 적을수록 높은 발열량을 얻는데 유리하므로 OPF가 연료로써 사용하기에 적합함을 보여준다. 휘발분의 경우 200 °C에서는 그 비율이 상승하였다가 반탄화 온도가 높아짐에 따라 점점 낮아짐을 볼 수 있었다. 이는 200 °C 이전에는 휘발성분 보다는 OPF의 수분이 제거됨으로써 상대적으로 휘발성분의 비율이 높아진 것으로 생각된다. 반탄화 온도가 250 °C 이상으로 올라가면서 휘발성분의 비율이 계속 떨어졌다. 반탄의 발열량과 관련이 깊은 고정탄소의 경우 반탄화 온도가 높아짐에 따라 계속 높아졌다.

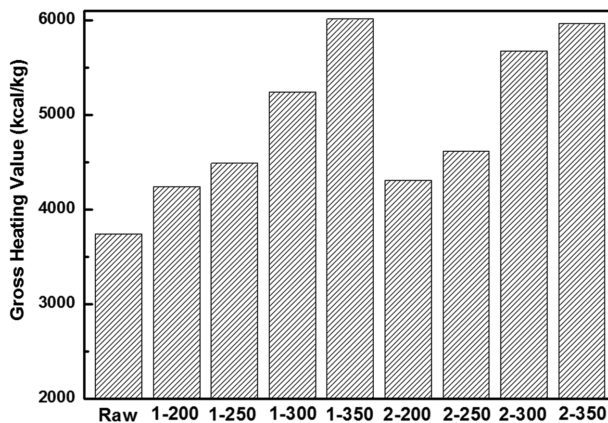
Table 3에 성분분석 결과를 나타내었다. 황 성분은 검출되지 않았으며 질소의 함량 또한 매우 낮음으로 친환경연료로써 적합함을 알 수 있었다. 탄소는 반탄화의 온도가 높아짐에 따라 그 비율이 올라

Table 2. Ultimate analyses of the OPF-Raw and torrefied OPFs

Sample	Moisture (%)	Ash (%)	Volatile (%)	Fixed Carbon (%)
OPF-Raw	8.9	2.1	70.9	18.8
OPF-1-200	1.7	2.3	75.4	20.6
OPF-1-250	2.4	2.2	73.2	22.1
OPF-1-300	3.2	3.9	52.6	40.4
OPF-1-350	1.5	6.6	33.3	58.6
OPF-2-200	0.7	0.9	78.9	19.4
OPF-2-250	2.4	2.6	67.8	27.3
OPF-2-300	1.9	4.9	42.1	51.2
OPF-2-350	1.3	6.8	29.5	62.4

Table 3. Elemental composition of the OPF-Raw and torrefied OPFs

Sample	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	H/C	O/C
OPF-Raw	44.43	5.49	41.37	1.39	-	0.12	0.93
OPF-1-200	46.40	5.51	42.39	0.76	-	0.12	0.91
OPF-1-250	48.72	5.53	40.30	0.59	-	0.11	0.82
OPF-1-300	55.74	5.11	31.47	0.73	-	0.09	0.56
OPF-1-350	67.37	4.10	17.47	0.87	-	0.06	0.26
OPF-2-200	47.09	5.70	41.43	0.68	-	0.12	0.88
OPF-2-250	50.55	5.48	38.61	0.53	-	0.11	0.76
OPF-2-300	64.51	4.48	23.10	0.59	-	0.07	0.36
OPF-2-350	68.47	3.94	17.15	0.78	-	0.06	0.25

Fig. 1. The Gross Heating Value of the OPF-Raw and torrefied OPFs; a heating rate of 10 °C/min; a N₂ gas flow rate of 60 ml/min.

가며 수소와 산소원자의 비율은 낮아진다. 반탄화 온도가 증가함에 따라 O/C의 비율은 급격히 변하는 반면 H/C의 비율의 변화는 상대적으로 낮았다. 그 이유는 반탄화가 진행됨에 따라 OPF를 이루고 있는 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스가 CO와 CO₂의 형태로 분해되어 산소원자가 배출되기 때문이다[21,22]. 수소원자의 경우 H₂O와 가벼운 탄화수소(CH₄, C₂H₄, C₂H₆ 등)로 배출되긴 하지만, 탄화수소의 경우 CO와 CO₂로의 배출보다 더 고온이 필요하기 때문에 반탄화 단계에서는 크게 줄어들지 않는 것으로 알려져 있다[15,23].

제조된 반탄과 OPF-Raw의 발열량을 Fig. 1에 나타내었다. 반탄화 전의 OPF의 발열량은 약 3,700 kcal/kg으로 측정되었다. 본 연구에서 사용된 OPF는 앞에서도 언급했듯이 자연 건조 후의 시료를 사용하였기 때문에 실제 OPF의 발열량은 이보다 더 낮을 것으로 예상된다. 200 °C에서 반탄화한 OPF의 발열량은 1시간과 2시간 동안 한 것 모두 발열량이 4,200 kcal/kg 이상으로 측정되었으며 이는 반탄화 전보

다 매우 높은 수치이다. 낮은 온도에서의 열처리로도 발열량이 크게 증가하는 이유는 OPF에 함유된 수분의 증발이 큰 비중을 차지하기 때문인 것으로 생각된다. 200 °C 이상에서의 반탄화된 OPF의 발열량에 가장 영향을 많이 주는 것은 헤미셀룰로오스의 분해이다. 일반적으로 헤미셀룰로오스의 열에 의한 분해는 200 °C 이상에서 시작되며, 셀룰로오스는 240~400 °C, 리그닌은 280~550 °C에 분해되는 것으로 알려져 있기 때문이다[7,9]. 실제로 250 °C와 300 °C에서 반탄화된 OPF의 발열량은 큰 차이를 보인다. 250 °C 이하에서는 헤미셀룰로오스의 분해만이 발열량 증가에 영향을 주었지만 250 °C 이상부터는 셀룰로오스의 분해가 같이 진행되면서 더 많은 CO, CO₂가 배출되고 발열량이 급격히 증가된 것이다. 300~350 °C 구간에서 발열량이 계속 증가하는 이유는 미분해된 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스의 분해가 계속 진행되며 동시에 리그닌의 분해도 진행되기 때문이다. 같은 온도에서 각각 1시간과 2시간 반탄화를 진행한 OPF의 발열량을 비교해 보면 그 차이가 미미함을 알 수 있었다. 오히려 1시간 동안 350 °C에서 반탄화를 진행한 것이 같은 온도에서 2시간 동안 반탄화를 진행한 것보다 더 높은 발열량을 나타내었다. 이로부터 반탄화 시간보다는 반탄화 온도가 더 크게 영향을 미침을 알 수 있었다.

반탄화 온도가 높을수록 발열량 또한 증가하지만 Table 1에서 보듯이 반탄의 수득률은 줄어들게 된다. 발열량이 가장 많이 증가하는 250~300 °C 구간에서 반탄의 수득률 또한 가장 많이 줄어들게 된다. 또한, 반탄화 시간에 따른 반탄의 수득률에도 차이를 보이지만 온도에 대한 의존성이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 즉, 반탄화의 가장 중요한 요소는 반탄화 온도이며 반탄화의 온도는 반탄의 수득률을 고려하면서 선정해야 함을 알 수 있었다.

반탄화된 OPF와 OPF-Raw의 열분해 거동을 Fig. 2에 나타내었다. 또한, Fig. 3에는 열분해 거동의 미분값을 나타내었다. Fig. 3의 OPF-Raw에서 250 °C와 350 °C 사이에서 두 개의 피크가 발견되는데 이는 각각 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스의 분해로부터 생성됨을 알 수

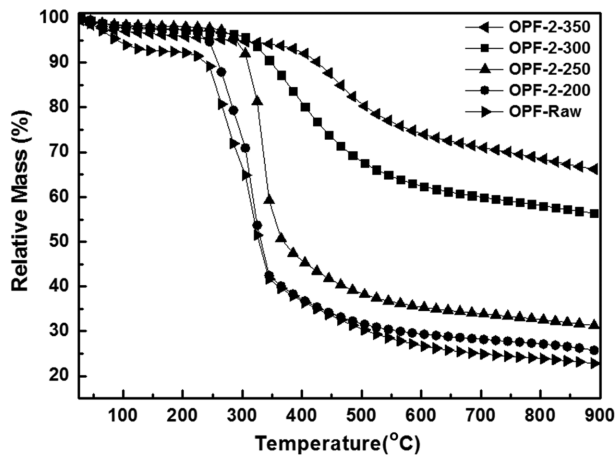


Fig. 2. The pyrolysis behaviors of the OPF-Raw and torrefied OPFs during 2 hours; a heating rate of 10 °C/min; a N₂ gas flow rate of 60 ml/min.

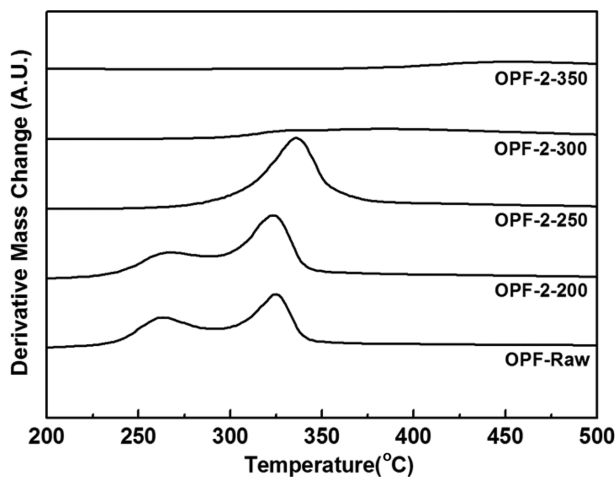


Fig. 3. The derivative weight loss of the OPF-Raw and torrefied OPFs during 2 hours.

있었다. OPF-Raw의 열분해 거동에서 약 150 °C까지 질량의 감소는 반탄화된 OPF에 비해 확연히 차이가 난다. 이 부분은 수분이 제거되면서 나타나는 질량의 감소이다. OPF-Raw, OPF-2-200, OPF-2-250 시료의 경우 200~350 °C 부분에서 급격한 질량의 감소가 확인되었다. 이 부분은 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스의 분해로부터 생기는 질량 감소이다. 200 °C에서의 반탄화에서는 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스의 분해가 거의 이루어지지 않지만, 250 °C에서는 헤미셀룰로오스의 분해가 진행되었고 셀룰로오스의 분해는 거의 이루어지지 않음 Fig. 3로부터 확인하였다. 이 결과는 앞의 발열량 증가의 패턴과 유사함을 알 수 있었다. OPF-2-300과 OPF-2-350 시료는 앞의 시료보다 질량의 감소폭이 매우 작음을 확인할 수 있었다. 이는 헤미셀룰로오스의 분해가 이미 진행됐으며, 셀룰로오스의 분해도 상당히 진척되었음을 의미한다. 이는 Fig. 3의 OPF-2-300에서 두 개의 피크가 거의 사라진 것으로부터 확인할 수 있었다. 또한, OPF-2-300과 OPF-2-350 시료의 질량감소 차이는 미량이지만, 덜 분해된 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스의 분해와 뒤늦게 시작된 리그닌의 분해로부터 나타났다. 따라서 300 °C 이상의 반탄화에서의 발열량 증가는 리그닌의 분해로부터 기인한다는 것을 알 수 있었다. 500 °C 이

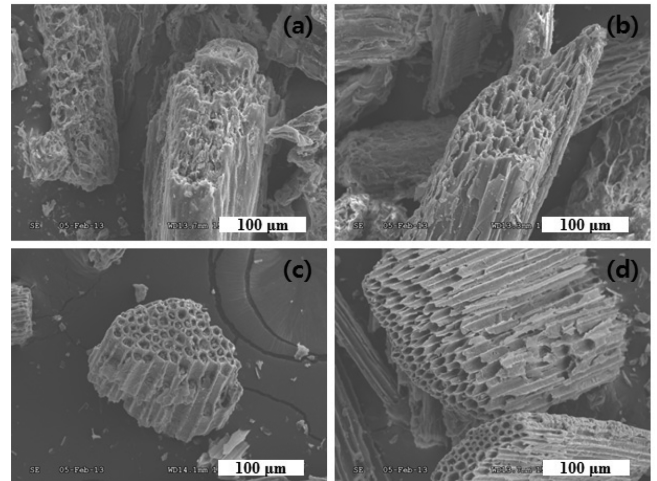


Fig. 4. SEM images of torrefied OPFs: (a) OPF-2-200; (b) OPF-2-250; (c) OPF-2-300; (d) OPF-2-350.

상에서의 계속되는 질량의 감소는 리그닌의 분해가 느리지만 계속 진행되고 있는 것으로 해석할 수 있었다.

Fig. 4에는 2시간 동안 반탄화된 OPF의 SEM 이미지를 나타내었다. 200 °C에서 반탄화된 OPF는 다른 것들에 비해 기공형성이 거의 없었다. Fig. 4에 나타내진 않았지만 OPF-Raw와 OPF-2-200의 SEM 이미지는 거의 차이가 없었다. 또한, 열중량 분석도 수분의 증발로부터 나타나는 차이 이외에는 다른 점은 보이지 않았다. 이로부터 200 °C에서의 열처리만 반탄화 보다 건조의 개념에 더 가깝다고 생각된다. 하지만 Fig. 4의 (b)에서 보듯이 250 °C에서부터는 OPF의 표면에 기공이 형성되고 있었다. 이것은 헤미셀룰로오스가 분해되면서 생성되는 기공으로써 반탄화가 진행되고 있음을 알려준다. 또한, OPF-2-300과 OPF-2-350의 SEM 이미지에서 보듯이 기공형성이 열처리 온도가 높을수록 더 뚜렷해졌다. 높은 온도에서 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스의 분해는 OPF의 세포벽을 약하게 하며, 고온 처리로 인해 리그닌구조가 부드러워진다. 이러한 현상은 바이오매스의 grindability를 향상시킴으로 적은 에너지로도 쉽게 분쇄할 수 있다는 장점이 있지만 너무 높은 grindability는 오히려 펠릿성형을 어렵게 만든다. 바이오매스의 리그닌은 천연 접착제로 알려져 있으며 Chew 등은 34% 정도의 리그닌은 펠릿의 내구성을 향상시킨다고 보고하였다. 리그닌의 분해온도는 약 300 °C 임으로 반탄화 온도가 300 °C 이상 일시 필요 이상의 리그닌이 분해되지 않도록 주의해야 한다[24,25].

4. 결 론

본 연구는 oil plam tree의 부산물인 OPF를 원료로 사용하여 반탄화를 진행하였고 이로부터 물리, 화학적 특성을 측정하여 연료로써의 활용가능성을 알아보고자 했다. OPF는 다른 바이오매스에 비해 회분의 함량이 적어 반탄화나 가스화에 유리했다. 또한 반탄화 온도와 시간이 증가함에 따라 휘발성분이 제거되고 결과적으로 발열량에 영향을 주는 고정탄소의 함량이 증가했다. 반탄화 시 반탄화 시간보다는 반탄화 온도가 더 중요한 요인이며 높은 온도는 고발열량의 반탄을 생성하지만, 250~300 °C의 반탄화 온도에서는 반탄의 수득률이 급격히 떨어짐으로 주의를 요할 필요가 있었다. 열중량 분석 결

과 헤미셀룰로오스의 분해는 250 °C의 반탄화에서 많이 진행되며 셀룰로오스의 분해는 300 °C에서 상당히 진행되었다. 반탄의 수득율을 고려한다면 헤미셀룰로오스의 분해가 많이 진행된 250 °C에서의 반탄화가 유리할 것으로 생각되고, 높은 품질의 반탄이 요구된다면 셀룰로오스의 분해가 상당히 진행되는 300 °C 이상의 고온에서 반탄화를 하는 것이 적당하다고 생각된다. 반탄화 온도가 높을수록 반탄의 grindability가 증가하여 분쇄 시 에너지의 소모가 줄어들지만, 너무 높은 grindability는 펠릿성형을 방해함으로 300 °C 이상에서 반탄화할 시 리그닌의 함량을 확인해야 함을 알 수 있었다.

References

- Prasetyo, J. and Park, E. Y., "Waste Paper Sludge as A Potential Biomass for Bio-ethanol Production," *Korean J. Chem. Eng.*, **30**, 253-261(2013).
- Malilas, W., Kang, S. W., Kim, S. B., Yoo, H. Y., Chulalaksan-anukel, W. and Kim, S. W., "Lipase from *Penicillium Camembertii* KCCM 11268: Optimication of Solid State Fermentation and Application to Biodiesel Production," *Korean J. Chem. Eng.*, **30**, 405-412(2013).
- Buasri, A., Ksapabutr, B., Panapoy, M. and Chaikut, N., "Biodiesel Production from Waste Cooking Palm Oil Using Calcium Oxide Supported on Activated Carbon as Catalyst in a Fixed Bed Reactor," *Korean J. Chem. Eng.*, **29**, 1708-1712(2012).
- Chaiprasert, P. and Vitidsant, T., "Effects of Promoters on Biomass Gasification Using Nickel/Dolomite Catalyst," *Korean J. Chem. Eng.*, **26**, 1545-1549(2009).
- Miccio, F., Svoboda, K., Schosger, J. P. and Baxter, D., "Biomass Gasification in Internal Circulating Fluidized Beds: a Thermodynamic Predictive Tool," *Korean J. Chem. Eng.*, **25**, 721-726(2008).
- Sun, H., Song, B. H., Jang, Y. W., Kim, S. D., Li, H. and Chang, J., "The Characteristics of Steam Gasification of Biomass and Waste Filter Carbon," *Korean J. Chem. Eng.*, **24**, 341-346(2007).
- Kim, K.-S., Choi, E.-A., Ryu, J.-S., Lee, Y. P., Park, J.-Y., Choi, S.-H. and Park, S.-J., "A Study on Pyrolysis Characterization and Heating Value of Semi-carbonized Wood Chip," *Appl. Chem. Eng.*, **23**, 440-444(2012).
- Stelt, M. J. C. v. d., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A. and Ptasiński, K. J., "Biomass Upgrading by Torrefaction for the Production of Biofuels: A Review," *Biomass Bioenerg.*, **35**, 3748-3762(2011).
- Lee, J.-W., Kim, Y.-H., Lee, S.-M. and Lee, H.-W., "Torrefaction Characteristics of Wood Chip for the Production of High Energy Density Wood Pellet," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONG-HAK)*, **50**, 385-389(2012).
- Pentananunt, R., Rahman, A. N. M. M. and Bhattacharya, S. C., "Upgrading of Biomass by Means of Torrefaction," *Energy*, **15**, 1175-1179(1990).
- Deng, J., Wang, G.-J., Kuang, J.-H., Zhang, Y.-L., Luo, Y.-H., "Pretreatment of Agricultural Residue for co-gasification Via Torrefaction," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **86**, 331-337(2009).
- Uemura, Y., Omar, W. N., Tsutsui, T. and Yusup, S. B., "Torrefaction of Oil Palm Wastes," *Fuel*, **90**, 2585-2591(2011).
- Chang, S., Zhao, Z., Zheng, A., He, F., Huang, Z. and Li, H., "Characterization of Products from Torrefaction of Sprucewood and Bagasse in an Auger Reactor," *Energy Fuels*, **26**, 7009-7017(2012).
- Wu, K.-T., Tsai, C.-J., Chen, C.-S. and Chen, H.-W., "The Characteristics of Torrefied Microalgae," *Appl. Energy*, **100**, 52-57(2012).
- Strezov, V., Popovic, E., Filkoski, R. V., Shah, P. and Evans, T., "Assessment of the Thermal Processing Behavior of Tobacco Waste," *Energy Fuels*, **26**, 5930-5935(2012).
- Wannapeera, J., Fungtammasan, B., Worasuwannarak, N., "Effect of Temperature and Holding Time During Torrefaction on the Pyrolysis Behaviors of Woody Biomass," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **92**, 99-105(2011).
- Uemura, Y., Omar, W. N., Othman, N. A. B., Yusup, S. B. and Tsutsui, T., "Effect of Atmosphere on Torrefaction of Oil Palm Wastes," *World Renewable Energy Congress* **2011**, 516-523(2011).
- Lim, X. Y. and Andresen, J. M., "Pyro-catalytic Deoxygenated Bio-oil from Palm Oil Empty Fruit Bunch and fronds With Boric Oxide in a Fixed-bed Reactor," *Fuel Process. Technol.*, **92**, 1796-1804(2011).
- Mohideen, M. F., Faiz, M., Salleh, H., Zakaria, H. and Raghavan, V. R., "Drying of Oil Palm Frond via Swirling Fluidization Technique," *Proceedings of the World Congress on Engineering* **2011**, **3**(2011).
- Khor, K. H., Lim, K. O. and Alimuddin, Z. A. Z., "Laboratory-scale Pyrolysis of Oil Palm Trunks," *Energy Sources Part A*, **32**, 518-531(2010).
- Strezov, V., Patterson, M., Zyma, V., Fisher, K., Evans, T. J. and Nelson, P. F., "Fundamental Aspects of Biomass Carbonisation," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **79**, 91-100(2007).
- Cao, X., Pignatello, J. J., Li, Y., Lattao, C., Chappell, M. A., Chen, N., Miller, L. F. and Mao, J., "Characterization of Wood Chars Produced at Different Temperatures Using Advanced Solid-State ¹³C NMR Spectroscopic Techniques," *Energy Fuels*, **26**, 5983-5991(2012).
- Aziz, M. A., Sabil, K. M., Uemura, Y. and Ismail, L., "A Study on Torrefaction of Oil Palm Biomass," *J. Applied Sci.*, 1-6 (2012).
- Tapasvi, D., Khalil, R., Skreiberg, Q., Tran, K.-Q. and Gronli, M., "Torrefaction of Norwegian Birch and Spruce: An Experimental Study Using Macro-TGA," *Energy Fuels*, **26**, 5232-5240(2012).
- Chew, J. J. and Doshi, V., "Recent Advances in Biomass Pretreatment - Torrefaction Fundamentals and Technology," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **15**, 4212-4222(2011).