

발전용 바이오매스 연료(WP·EFB·PKS)의 열분해 온도 조건에 따른 반탄화 및 염소 방출 특성에 관한 연구

김지훈¹ · 박재훈¹ · 최재현¹ · 전충환^{1,2,†}

¹부산대학교 기계공학부, ²부산대학교 화력발전에너지분석기술센터

A Study on the Characteristics of Torrefaction and Chlorine Release According to the Mild Pyrolysis Temperature Conditions of Biomass Fuels (WP·EFB·PKS) for Power Generation

JI-HUN KIM¹, JAE-HEUN PARK¹, JAE-HYUN CHOI¹, CHUNG-HWAN JEON^{1,2,†}

¹School of mechanical Engineering, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

²Pusan Clean Coal Center, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

†Corresponding author :
chjeon@pusan.ac.kr

Received 19 September, 2017
Revised 27 November, 2017
Accepted 29 December, 2017

Abstract >> Wood pellet (WP), empty fruit bunch (EFB) and palm kernel shell (PKS) which are biomass fuels for power generation are selected to study the characteristics of torrefaction process. These biomass fuels are torrefied at 220 °C, 250 °C, and 280 °C. The heating value of biomass fuels is increased depending on the torrefaction temperature. However, due to energy yield decline, it is not always desirable to torrefy biomass at higher temperature. Considering the mass yield and energy yield after torrefaction, the most proper temperature conditions for torrefaction of WP is 250-280 °C and for EFB, PKS are 220-250 °C. Additionally, to investigate the phenomenons of chlorine release during torrefaction process, Ion Chromatography (IC) method was used. In the case of EFB and PKS torrefied at 300 °C, the chlorine component has been reduced by 97.5% and 95.3% compared to the raw biomass, respectively. In conclusion, torrefied biomass can be used as alternative fuels in replacement of coals for both aspects of heating value and chlorine corrosion problems.

Key words : Biomass fuel(바이오매스 연료), Torrefaction(반탄화), Corrosion(부식), Ion chromatography(이온 크로마토그래피), Chlorine(염소)

1. 서론

온실가스 감축을 위한 전 세계적인 노력이 20세기 후반부터 현재까지 계속되고 있다. 1997년 제3차

유엔기후변화협약 당사국총회(COP 3)에서 선진국의 이산화탄소 배출량을 규제하는 교토의정서(Kyoto Protocol)가 채택되었고, 이를 대체하여 2015년 12월 제21차 유엔기후변화협약 당사국총

회(COP 21)에서 모든 국가가 온실가스 감축 의무를 부담하는 파리협정(Paris Agreement)이 채택되었다¹⁾. 파리협정은 각 국가가 국가별 기여방안(intended nationally determined contributions, INDC)을 스스로 정하여 5년마다 상향된 감축 목표를 유엔기후변화협약 사무국에 제출하고, 목표 달성 경과를 의무적으로 보고하도록 규정한다²⁾. 또한 국제사회는 2014년 페루 리마 당사국총회(COP 20)에서 2020년 이후 온실가스 감축 목표를 각국이 자체적으로 결정하고 이를 2015년 까지 협약 사무국에 제출할 것을 합의하였다³⁾. 이에 우리나라는 2030년 배출량 전망치(BAU) 대비 37%를 감축한다는 INDC를 제출하였다⁴⁾.

그러므로 온실가스 배출의 주요 요인 중 하나인 화력 발전소의 화석 연료 사용량을 줄이는 것이 필요하다. 특히 제7차 전력수급기본계획에 의하면 국내 에너지원별 설비용량 및 구성비 전망에서 2029년 석탄이 26.8%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으므로 이 중 일부를 친환경 에너지로 대체하여 사용한다면 온실가스 배출량 감축에 도움이 될 것이다⁵⁾. 정부는 2012년부터 renewable portfolio standard (RPS) 제도를 시행하여 신재생 에너지 사용을 의무화하였다. RPS 제도는 500 MW 이상의 발전 설비 규모를 가진 사업자에게 2022년까지 총 발전량의 10%를 신재생 에너지로 공급하는 의무를 부과한다⁶⁾.

석탄과 바이오매스 연료를 혼소하면 기존의 석탄 화력 발전소 설비를 그대로 이용하면서 신재생 에너지를 사용할 수 있다. 이때 사용되는 발전용 바이오매스 연료로는 wood pellet (WP), empty fruit bunch (EFB), palm kernel shell (PKS) 등이 있다. 하지만 바이오매스 연료는 몇 가지 고려해야 할 문제점이 있다.

바이오매스는 석탄보다 발열량이 낮고 수분 함량이 높아서 분쇄성이 좋지 않다. 또한, 일부 바이오매스는 염소 성분을 함유하고 있어서 보일러 내부 부식을 촉진시킨다. 장기적인 보관시 발화 및 곰팡이류에 의한 품질 저하 등 취급과 보관이 어렵다. 따라서 이를 해결하기 위해 적절한 전처리

과정이 필요한데, 대표적으로 반탄화(torrefaction)를 활용한다.

반탄화는 무산소 조건, 200-300°C의 온도 범위에서 바이오매스를 전처리하는 과정이다⁷⁾. 반탄화를 하면 바이오매스의 수분과 휘발분이 감소하여 에너지 밀도와 발열량(heating value)이 증가한다⁸⁾. 반탄화된 바이오매스의 기공 구조(pore structure)는 소수성 성질을 가지게 되어 보관 중 수분에 의해 품질 저하가 거의 없다^{8,9)}. 그리고 취성이 커져서 분쇄성이 좋아지므로 더 적은 에너지로 분쇄 가능하다⁹⁾.

연료 적합성 여부에서는 보일러 부식의 원인이 되는 염소 성분의 제거가 중요한 기준이다. 선행 연구 결과에 따르면 250°C, 350°C에서 열분해 한 목질계 바이오매스(spruce chips, spruce bark, waste wood, SRC poplar)에서 염소 성분이 방출되므로 발전용 목질계 바이오매스 연료인 WP, EFB, PKS의 반탄화 공정에서의 염소 방출 가능성을 확인해 볼 필요가 있다¹⁰⁾.

따라서 본 연구에서는 WP, EFB, PKS의 반탄화 온도 조건(220°C, 250°C, 280°C)에 따른 특성을 분석하고, 최적의 반탄화 온도 조건을 결정하였다. 또한 230°C, 300°C의 두 가지 온도 조건에서 EFB, PKS 시료를 반탄화하고, 이온 크로마토그래피(ion chromatography)를 이용하여 원료(raw biomass) 대비 염소 성분 함량 변화를 측정하였다. 그리고 온도별로 비교 분석하였다.

이때, 반탄화 온도에 따른 바이오매스 연료의 발열량 변화, 질량 수율·에너지 수율 변화, 고정탄소량과 휘발분의 변화를 알아보기 위해 온도 조건을 30°C 간격으로 설정하였다. 고온에서 반탄화를 할수록 에너지 밀도가 증가한다는 측면에서 200°C는 반탄화를 하는 의미가 작고, 300°C에서는 질량 수율 측면에서 경제성이 좋지 않기 때문에 실험 조건에서 제외하였다.

그리고 염소 함량 분석을 위한 온도 조건은 반탄화 공정에서 염소 방출 여부를 알아보는 것이 목적이므로 반탄화 특성 분석에서의 온도 조건과

연관성을 두지 않고 설정하였다. 선행 연구 결과에 따르면 고온에서 반탄화한 바이오매스에서 더 많은 염소가 방출되었으므로 반탄화 온도 구간에서 가장 높은 온도인 300°C와 이에 대한 비교를 위하여 230°C 반탄화 조건에 대해 실험하였다^{10,11)}.

2. 실험 방법

2.1 시료

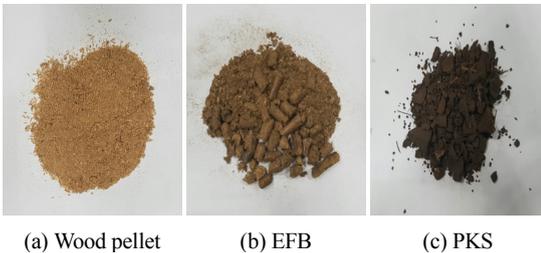
Fig. 1에서 화력발전소 연료용으로 가공된 국내산 우드펠릿(wood pellet)·인도네시아의 팜(palm) 오일 생산과 정제 과정에서 발생하는 부산물(EFB)·팜 열매껍질(PKS)을 볼 수 있다.

반탄화 공정에서 사용되는 WP·EFB·PKS는 HSIANGTAI사의 Grinder로 분쇄하였고 입도는 1-5 mm 사이로 하였다.

2.2 반탄화(torrefaction)

LECO사의 TGA 701모델을 사용하여 반탄화를 진행하였다. 석영 재질의 도가니(crucible)에 준비된 시료를 넣고 질소 분위기를 형성하였다. 1회 실험시 도가니 당 1 g의 시료를 사용하였다.

WP, EFB, PKS를 담은 도가니 속의 승온 속도는 0.16 °C/s이고 목표 반탄화 온도 조건(220°C, 250°C, 280°C)까지 상승시켰다. 그리고 30분간 목표 온도를 유지한 후 -0.053°C/s의 속도로 153°C까지 냉각하였다. 대표적으로 250°C에서의 반탄화 곡선을 Fig. 2에 나타내었다.



(a) Wood pellet (b) EFB (c) PKS

Fig. 1. Wood pellet·EFB·PKS used for torrefaction

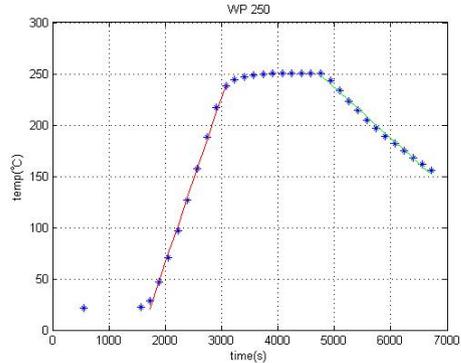


Fig. 2. Heating and cooling curve of WP for torrefaction at 250°C.

2.3 특성 분석

2.3.1 발열량 분석

WP·EFB·PKS의 반탄화 전후의 발열량은 칼로리미터(5E-C5500)로 측정하였다. 시료 1 g을 연소시키는 동안의 온도 상승 및 고위발열량(higher heating value, HHV)을 측정하였다.

2.3.2 질량 수율·에너지 수율

WP·EFB·PKS의 반탄화 전후의 질량을 식 (1)에 대입하여 각 시료의 질량 수율(mass yield)을 계산하였다. 또한 발열량 분석에서 얻은 반탄화 전후의 고위 발열량을 식 (2)에 대입하여 에너지 수율(energy yield)을 계산하였다¹²⁾.

$$Mass\ yield(\%) = \frac{M_{torrefied\ mass}}{M_{raw\ mass}} \times 100 \quad (1)$$

$$Energy\ yield(\%) = \frac{HHV_{torrefied}}{HHV_{raw}} \times Mass\ yield(\%) \quad (2)$$

2.3.3 공업분석

LECO사의 공업분석기(TGA701)를 ASTM D5142에 근거하여 반탄화 전후 WP·EFB·PKS의 수분, 휘발분, 회분 그리고 고정 탄소를 측정하였다. 본 연구는 기건식(air dry basis)에서 진행되므로, 공업분

석의 결과는 수분+휘발분+회분+고정탄소=100으로 간주한다.

2.3.4 염소 방출(Cl release) 특성

Metrohm사의 이온 크로마토그래피(ICFLEX 930)를 이용하여 EFB·PKS의 반탄화 전후의 염소 방출을 관찰하였다.

Na₂CO₃ 3.2 mM과 NaHCO₃ 1 mM을 물에 녹인 용리제(Eluent)는 0.7 mL/min의 속도를 유지한다. 이때 사용된 Column (Metrohm A Supp 5)의 크기는 4.0 mm×250 mm, 5 μm이며, 온도는 35°C로 유지된다. 초음파를 이용하여 잔류 기포를 제거하기 위해 30분간 전처리 과정을 거친 후 시료의 염소 함유량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시료별 반탄화 전후 특성 변화

바이오매스는 주로 셀룰로오스(cellulose), 헤미셀룰로오스(hemicellulose), 리그닌(lignin)으로 구성된다. 셀룰로오스는 250°C 이상, 헤미셀룰로오스는

225°C 이상, 리그닌은 반탄화 온도 구간 전체에서 열분해가 일어난다¹³⁾. 반탄화 공정에서 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌의 열화학적 변화를 통해서 바이오매스 내부의 휘발성 물질이 제거된다. Table 1은 WP, EFB, PKS를 220°C, 250°C, 280°C의 온도에서 반탄화시킨 결과를 보여주고 있다.

Table 1을 보면 원료 바이오매스를 각 온도 조건에서 반탄화하였을 때, 반탄화 온도가 높을수록 연료의 색이 검게 변하는 것을 확인할 수 있다. 이는 반탄화 공정을 거치면서 수분과 휘발분이 감소하고 고정탄소가 증가하였기 때문이다. 또한, 280°C에서 반탄화하였을 때 시료의 양이 급격하게 감소하는데, 그 이유는 반탄화 공정에서 헤미셀룰로오스의 최대 열분해가 280°C 주변 온도에서 발생하고 셀룰로오스와 리그닌의 열분해도 많이 진행되었기 때문이다¹³⁾.

3.2 반탄화 전후 발열량 변화

바이오매스의 반탄화 과정을 통해서 만들어진 연료가 석탄을 대체할 수 있는 발열량을 가지는지 확인하기 위해서 반탄화 전후의 발열량을 측

Table 1. Results of WP, EFB, PKS after torrefaction according to temperature conditions

Temperature (°C) Type	Raw	220°C	250°C	280°C
WP				
EFB				
PKS				

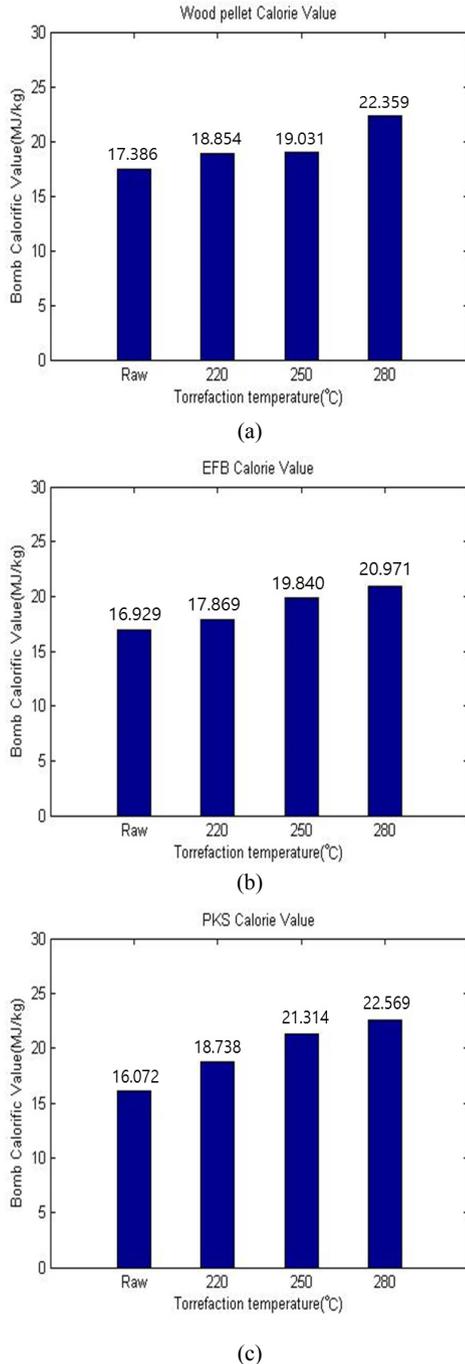


Fig. 3. Bomb calorific value of WP, EFB, PKS before and after torrefaction. (a) WP, (b) EFB, (c) PKS

정하여 Fig. 3에서 비교하였다.

일반적으로 화력발전소에서 사용되는 석탄의

발열량은 18.8-28.5 MJ/kg이고 반탄화 이후의 발열량은 17-23 MJ/kg로 측정되었다. Fig. 3의 결과를 통해서 바이오매스를 석탄과 혼소하여 사용하여도 기존의 에너지 생산량을 충족시킬 수 있음을 알 수 있다.

250°C 이상의 온도에서 반탄화할 때 헤미셀룰로오스의 열분해가 확연하게 발생하므로 250°C에서 반탄화한 WP의 발열량이 220°C에서보다 훨씬 커야 한다¹³⁾. 그러나 Fig. 3의 (a)를 보면 220°C에서 증가한 후로 250°C에서는 발열량에 큰 차이가 없다. 이로부터 WP에 리그닌의 함량이 상대적으로 많은 것을 알 수 있다. 리그닌은 200-300°C 온도 범위에서 큰 변동 없이 열분해하는 특성이 있다(Fig. 3(b))¹³⁾.

EFB의 경우는 250°C에서 반탄화 했을 때 발열량 증가가 가장 두드러지게 나타난다. 그 이유는 헤미셀룰로오스가 250°C에서 유의미한 열분해가 발생하고, 크실란(Xylan)은 최대로 열분해 되어 그에 따라 발열량이 증가하기 때문이다¹³⁾.

PKS는 WP, EFB와 달리 220°C 반탄화에서도 발열량 증가폭이 크고, 반탄화 온도가 올라갈 때 마다 발열량이 크게 증가한다. 이로부터 PKS에는 크실란의 함량이 많음을 알 수 있다¹³⁾. 크실란은 헤미셀룰로오스를 구성하는 반응성이 큰 성분이다(Fig. 3(c))¹³⁾.

3.3 최적의 반탄화 온도

반탄화 공정에서 에너지 감소량보다 질량 감소량이 더 많으므로 에너지 밀도가 증가한다¹⁴⁾. Table 2를 보면 반탄화 온도가 높아질수록 바이오매스 연료의 단위 질량 당 발열량이 증가하고, 질량수율과 에너지수율이 감소함을 알 수 있다. 따라서 발열량 분석과 수율 계산이 타당하다.

질량수율이 작다는 것은 그만큼 에너지가 고밀도화된다는 뜻이므로 품질이 더 우수한 발전용 연료가 될 수 있다. 그러므로 고온에서 반탄화를 하는 것이 질량수율 측면에서는 유리하다. 그러나 반탄화 온도가 고온으로 갈수록 에너지수율이

Table 2. Results of calorific value analysis, mass yield, and energy yield of WP, EFB, PKS after torrefaction

		Bomb calorific value (MJ/kg)	Mass yield (%)	Energy yield (%)
WP	220°C	18.854	88.0	95.4
	250°C	19.031	78.5	85.9
	280°C	22.359	50.5	64.9
EFB	220°C	17.869	87.7	92.6
	250°C	19.840	66.3	77.7
	280°C	20.971	46.8	58.0
PKS	220°C	18.738	84.7	98.7
	250°C	21.314	71.1	94.3
	280°C	22.569	59.1	83.0

Table 3. Reduction rate of mass yield and energy yield of WP, EFB, PKS at each torrefaction temperature interval

		M_R (%)	E_R (%)	E_R/M_R
WP	220-250°C	10.8	10.0	0.93
	250-280°C	35.7	24.4	0.68
EFB	220-250°C	24.4	16.1	0.66
	250-280°C	29.4	25.4	0.86
PKS	220-250°C	16.1	4.46	0.28
	250-280°C	16.9	12.0	0.71

감소하므로 꼭 고온 반탄화가 좋은 것은 아니다. 최적의 반탄화 온도를 결정하기 위해 다음과 같이 질량수율 감소율과 에너지수율 감소율을 정의한다.

$$\begin{aligned}
 (\% \text{reduction of mass yield}) &= M_R & (3) \\
 &= \frac{M_i - M_h}{M_i} \times 100
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\% \text{reduction of energy yield}) &= E_R & (4) \\
 &= \frac{E_i - E_h}{E_i} \times 100
 \end{aligned}$$

여기서, M_i 과 E_i 은 두 개의 비교온도 중에서 각각 저온의 질량수율, 에너지수율이고, M_h 와 E_h 는 각각 고온의 질량수율, 에너지수율이다. 감소율을 계산하면 Table 3의 결과를 얻을 수 있다.

E_R/M_R 값이 작을수록 질량수율 감소 대비 에너지수율 감소가 작다는 것을 의미하므로 좋은 반탄화 조건이다. 따라서 최적의 반탄화 온도 조건을 구하면 우드펠릿은 250-280°C, EFB는 220-250°C, PKS는 220-250°C이다.

3.4 반탄화 전후 공업 분석

반탄화 전후 공업 분석을 통하여 WP·EFB·PKS의 수분, 휘발분, 회분 그리고 고정탄소를 Table 4에 나타내었다. 반탄화 분위기와 공업 분석 분위기에 따라 약간의 차이가 있지만, 반탄화 이후 수분이 5-10% 정도로 크게 줄어드는 것을 확인하였다. 이것은 바이오매스에 포함된 수산기 감소에 의한 결과이며, 수산기의 감소는 반탄화된 바이오매스가 소수성 성질을 가지게 한다¹²⁾.

휘발분은 전체적으로 반탄화 온도가 증가할수록 감소한다. WP, EFB의 경우, 220°C에서 반탄화 하였을 때 잠시 증가하는 것처럼 보이는데, 이는 반탄화를 하면서 수분이 큰 폭으로 감소하여 상대적으로 비율이 커진 것으로 볼 수 있다.

고온에서 열처리한 바이오매스는 헤미셀룰로오스, 리그닌, 약간의 셀룰로오스의 분해로 인하

Table 4. Results of proximate analysis of WP, EFB, PKS before and after torrefaction

Content (%)		Moisture	Volatile	Ash	Fixed Carbon
WP	Raw	8.60	73.04	0.37	18.00
	220°C	3.42	75.66	0.26	20.65
	250°C	1.85	72.84	0.21	25.10
	280°C	1.58	55.21	0.58	42.63
EFB	Raw	9.74	69.47	2.55	18.24
	220°C	2.98	73.27	2.77	20.98
	250°C	2.79	61.20	4.01	32.00
	280°C	3.42	46.19	4.16	46.24
PKS	Raw	12.35	61.81	3.04	22.80
	220°C	2.03	60.57	13.46	23.94
	250°C	1.34	56.52	10.91	31.23
	280°C	1.29	41.12	29.46	28.13

여 회분과 고정탄소 함량이 증가하는 것이 반탄화의 특성이다¹³⁾. 그러나 Table 4에서는 회분과 고정탄소 분율이 감소하는 온도 조건도 있다. 이는 다른 성분들(수분, 휘발분, 고정탄소)의 상대적인 증감에 따라 분율이 줄어드는 것처럼 보이는 것이다.

3.5 반탄화 전후 염소 함량 변화

우드펠릿은 EFB, PKS에 비하여 상대적으로 원료에 염소가 많지 않으므로 염소 함량 분석을 하지 않았다.

염소 함량 분석을 한 결과를 Table 5에 정리하였다. 230°C에서 반탄화한 EFB는 염소 함유량이 원료 대비 88.4% 감소하였고, 300°C에서 반탄화한 EFB는 원료 대비 97.5%의 감소가 발생하였다.

PKS 역시 반탄화를 거치면서 많은 염소가 방출되었다. 230°C에서 반탄화한 PKS는 염소 함량이 원료 대비 80.2% 감소하였고, 300°C에서 반탄화한 PKS는 원료 대비 95.3%만큼 줄었다.

가문비나무(spruce), 폐목(waste wood), 포플러 나무(SRC poplar)를 시료로 하여 진행된 선행 연구에서 KCl을 첨가하지 않은 시료의 경우 250°C에서 반탄화하였을 때 40-60%의 염소가 방출되었고, 350°C에서 반탄화하였을 때 85-98%의 염소가 방출되었다¹⁰⁾. 이에 비해 본 연구 결과는 저온에서 반탄화를 하였음에도 훨씬 높은 염소 방출률을 보이고 있다.

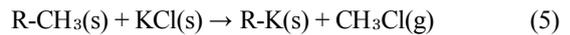
그 이유는 첫째, 본 연구에서는 시료를 1 g 단위로 반탄화한 반면에 선행 연구에서는 20 g을 반탄화하였기 때문에 시료에서 방출된 염소가 차르(Char)에 재흡수되는 효과가 컸을 것으로 예상된다¹⁰⁾.

Table 5. Chlorine contents of raw and torrefied at 230°C, 300°C for EFB, PKS

	Raw (mg/kg)	230°C (mg/kg)	300°C (mg/kg)
EFB	501.614	58.045	12.421
PKS	193.037	38.294	9.090

둘째, 본 연구에서는 20분 안에 목표 온도에 도달하였고 30분간 유지하였으나, 선행 연구에서는 60분 동안 가열하여 목표 온도에 도달하였으며 15분을 유지하였다. 따라서 본 연구에서는 짧은 가열 시간으로 인해 반탄화 공정 중에 방출된 염소가 바이오매스에 재흡수될 수 있는 시간이 상대적으로 적었고, 그에 따라 염소 방출률이 커진 것으로 볼 수 있다.

반탄화 공정에서 바이오매스의 염소는 주로 메틸 클로라이드(CH₃Cl) 형태로 방출된다. 바이오매스에 함유되어 있는 유기 성분이 염화물(KCl)과의 반응에서 메틸기(CH₃)를 제공하기 때문이다¹⁰⁾.



나무에 염화물인 KCl을 첨가하여 200-700°C 온도 조건에서 열분해하였을 때 염소가 염화수소(HCl)의 형태로 방출되었다는 연구 결과도 있다¹⁰⁻¹⁴⁾. 이때의 염소 방출은 다음의 반응식으로 설명할 수 있다¹⁰⁾.



즉, 염화물(KCl)이 열분해하는 과정에서 카르복실기 그룹과 반응하여 기체 상태의 염화수소(HCl)를 만드는 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 반탄화 온도 조건에 따른 발전용 바이오매스(WP, EFB, PKS)의 구성성분과 발열량에 관련된 특성을 분석하여 최적의 반탄화 온도조건을 찾아보았다. 그리고 반탄화 공정에 따른 염소 방출 특성을 알아보기 위해 이온 크로마토그래피 방법을 이용하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고온에서 반탄화를 할수록 바이오매스의 에너지 밀도가 증가한다. 그러나 질량수율과 에너지

지수율을 고려한 최적의 반탄화 온도는 WP의 경우 250-280°C, EFB와 PKS는 220-250°C이다.

2) 반탄화를 하면 바이오매스에 함유된 염소 함량을 감소시킬 수 있다. 고온에서 반탄화를 하면 염소가 더 많이 방출되는데 300°C에서 반탄화한 EFB는 원료 대비 97.5%의 염소가 방출되었고, PKS는 95.3%의 염소가 방출되었다.

후 기

본 논문은 학부과정 졸업연구과제 지원으로 이루어졌으며, 한국에너지기술연구원의 주요사업(B7-2436)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과이다. 실험과 분석에 도움을 준 대학원 정태용, 조홍민, 김종호 연구원에게 감사드립니다.

References

1. I. J. Yoon, "Issues and Prospects of the Paris Agreement", *Han Yang Law Review*, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 113-144.
2. S. W. Park, "Post-2020 Climate Regime and Paris Agreement-Key Issues and Agreed Results of UNFCCC COP 21-", *Environmental Laws and Policies*, Vol. 16, 2016, pp. 285-322.
3. D. G. Lee and S. J. Yun, "A Comparative Analysis of the Formation of INDCs in Korea and New Zealand", *Korean society and public administration*, Vol. 27, No. 2, 2016, pp. 261-294.
4. D. S. Kim and Y. J. Sung, "Searching for the environmental management plans of Korea paper industry coping with the new climate regime", *Journal of Korea TAPPI*, Vol. 48, No. 2, 2016, pp. 75-82.
5. J. R. Byun, "Korea Energy Handbook", Korea e-Work Association for the Disabled Press, Korea, 2015, pp. 373.
6. J. H. Kim, and E. J. Lee, "A Study on the Present State of Duty Performance According to the RPS System and Improvement Plan", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 33, No. 6, 2013, pp. 98-104.
7. B. I. Na, B. J. Ahn, S. T. Cho, and J. W. Lee, "Optimal Condition of Torrefaction for the High-density Solid Fuel of Larch (*Larix kaempferi*)", *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 51, No. 6, 2013, pp. 739-740.
8. B. Arias, C. Pevida, J. Feroso, M. G. Plaza, F. Rubiera, and J. J. Pis, "Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass", *Fuel Processing Technology*, Vol. 89, No. 2, 2008, pp. 169-175.
9. T. G. Bridgeman, J. M. Jones, A. Williams, and D. J. Waldron, "An investigation of the grindability of two torrefied energy crops", *Fuel*, Vol. 89, No. 12, 2010, pp. 3911-3918.
10. S. B. Saleh, J. P. Flensburg, T. K. Shoulaifar, Z. Sarossy, B. B. Hansen, H. Egsgaard, N. DeMartini, P. A. Jensen, P. Glarborg, and K. Dam-Johansen, "Release of Chlorine and Sulfur during Biomass Torrefaction and Pyrolysis", *ENERGY AND FUELS*, Vol. 28, No. 5-6, 2014, pp. 3738-3746.
11. J. T. G. Hamilton, W. C. McRoberts, F. Keppler, R. M. Kalin, and D. B. Harper, "Chloride Methylation by Plant Pectin: An Efficient Environmentally Significant Process", *Science*, Vol. 5630, No. 9, 2003, pp. 206-208.
12. J. J. Lee, S. W. Yoon, and B. H. Lee, "Degradation Properties and Production of fuels in Solvolysis of Lignin", *Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 25, No. 9, 2003, pp. 1152-1158.
13. W. H. Chen, and P. C. Kuo, "Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis", *Energy*, Vol. 36, No. 11, 2011, pp. 6451-6460.
14. B. Stroemberg, and E. Byoerkman, "Release of chlorine from biomass at pyrolysis and gasification conditions", *ENERGY AND FUELS*, Vol. 11, No. 5, 1997, pp. 1026-1032.