

급속열분해 공정에서 바이오매스의 입자크기와 수분 함량이 열분해 산물의 특성에 미치는 영향*1

황혜원*2 · 오신영*2 · 김재영*2 · 이수민*2 · 조태수*2 · 최준원*2†

Effect of Particle Size and Moisture Content of Woody Biomass on the Feature of Pyrolytic Products*1

Hyewon Hwang*2 · Shinyoung Oh*2 · Jae-Young Kim*2 · Soomin Lee*3
Taesu Cho*3 · Joon Weon Choi*2†

요약

본 연구에서는 백합나무의 급속 열분해 공정에서 시료의 입자크기 및 함수율 조건이 열분해 산물(가스, 바이오오일, 바이오차)의 수율과 물리·화학적 특성에 미치는 영향을 구명하였다. 시료의 함수율이 낮을수록 바이오오일의 수율은 증가하였으며 시료의 입자 크기는 수율 변화에 큰 영향을 미치지 않았다. 각 조건별로 생성된 바이오오일은 20~30%의 수분 함량과 pH 2.2~2.4, 발열량 16.6~18.5 MJ/kg의 수준을 나타내었으며 바이오오일 내 수분 함량은 높은 함수율 시료 조건에서 증가하는 것을 확인하였다. 바이오차의 경우 80% 이상이 탄소로 이루어져있으며 발열량은 26.2~30.1 MJ/kg 수준으로 측정되었다.

ABSTRACT

In this study the effects of particle size and water content on the yields and physical/chemical properties of pyrolytic products were investigated through fast-pyrolysis of yellow poplar. Water content was critical parameters influencing the properties of bio-oil. The yields of bio-oil were increased with decreasing water content. However, the yield of pyrolytic product was not clearly influenced by feedstock's particle size. The water content, pH and HHV (Higher Heating Value) of bio-oil were measured to 20~30%, 2.2~2.4 and 16.6~18.5MJ/kg, respectively. The water content

*1 접수 2012년 10월 4일, 채택 2012년 11월 24일

*2 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부, Dept. Forest Sciences, CALS, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea.

*3 국립산림과학원 화학미생물과, Div. wood chemistry and microbiology, Korea Forest Research Institute.

† 교신저자(corresponding author) : 최준원(e-mail: cjw@snu.ac.kr)

of feedstock was clearly influenced to water content of bio-oil. In terms of bio-char, HHV of them were measured to 26.2~30.1 MJ/kg with high content of carbon over 80%.

Keywords: yellow poplar, fast pyrolysis, bio-oil, bio-char, higher heating value, water content, GC/MS

1. 서 론

현재 세계 각국은 G8, APEC 정상회담 등을 통해 신재생 에너지 발전을 통한 온실가스 감축 정책을 내세우며 친환경 성장을 실현하기 위하여 노력하고 있다. 이에 대한 배경으로는 화석 연료 사용으로 인한 탄소배출의 증가와 기후변화, 화석 연료의 고갈 및 인구와 소득의 증가로 인한 에너지 수요 증대를 꼽을 수 있다[1,2].

국제기구 IEA (International Energy Agency)에 따르면 향후 20여 년간 전 세계의 에너지 수요는 연평균 1.6%씩 꾸준히 증가할 것이며 신재생 에너지가 수요증가분의 67%를 공급할 것으로 전망하고 있다. 더불어 신재생 에너지 발전량의 90%를 풍력, 바이오매스, 태양광이 차지할 것으로 예측하고 있다[3]. 이중 바이오매스는 농·임업 부산물, 작물 및 목재 등으로부터 얻어지는 생물 유기체로, 에너지원으로 활용 시 경제적이고 탄소중립적이며 황과 질소 함량이 낮은 장점 덕분에 많은 주목을 받고 있다[4-6]. 바이오매스는 효소 당화 및 발효, 증기폭쇄, 열분해와 같은 생화학적, 물리적, 열화학적 공정을 거쳐서 유용한 에너지의 형태로 변환이 가능하다.

급속열분해 공정은 바이오매스를 산소가 없는 고온의 조건에서 2초 이내로 열분해시킴으로써 액상의 바이오오일 및 가스, 바이오촉의 생성물을 얻게 되는 열화학적 변환 과정이다. 이 공정은 모든 종류에 해당하는 바이오매스의 직접적 사용이 가능하며 생화학적 변환 방법에 비해 공정이 간단하고 안정적인 장점이 있다[7]. 또한 급속 열분해를 통해 생성된 바이오연료는 원료인 바이오매스보다 훨씬 더 큰 고부가가치를 지니며 화석연료에 비해 온실가스 배출이 월등히 적기 때문에 환경 친화적이고 석유 기반 수송 원료 및 소재를 대체할 수 있는 충분한 잠재력을 지

니고 있다[8].

급속 열분해의 주요 산물인 바이오오일은 15~30%의 수분과 카르보닐기, 당, 유기산, 페놀, 올리고머 등 수백 가지의 산소화합물로 이루어져 있으며 바이오오일의 조성 및 특성은 차후 바이오오일이 활용될 분야와 밀접한 관련이 있다[9-11]. 한편, 이러한 열분해 생성물의 화학 조성, 물리·화학적 특성 및 수율은 시료의 종류 및 입자크기, 반응 온도, 승온 속도, 반응기 내 체류 시간 등에 영향을 받는다고 알려져 있다[7,12]. 따라서 열분해 생성물의 효율적 활용을 위해 각 생성물의 물리·화학적 특성 분석 및 영향인자에 관한 연구가 심도있게 진행될 필요가 있으며 이를 통해 다양한 산업적 수요를 충족시킬 수 있는 특성별 바이오연료의 선택적 생산 및 활용 가능성이 증대될 것이다.

본 연구에서는 백합나무 목부의 급속열분해 과정에서 원료에 대한 조건변이(시료의 입자크기, 함수율)에 따라 생성되는 열분해 생성물의 수율(Mass balance) 및 특성 변화를 관찰하였다. 세부적으로 각 조건별로 생산된 액상 연료인 바이오오일과 고형분 바이오촉에 대하여 각각 물리·화학적 특성 분석을 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 실험에서는 16년생 백합나무(*Liriodendron tulipifera*) 목부를 공시재료로 사용하였다. 공시재료의 입자 크기는 0.75 mm, 함수율은 약 10% 정도를 유지하였으며 홀로셀룰로오스와 리그닌함량은 각각 Wise 법(1946)과 72% 황산가수분해법(TAPPI method (T222 om-88))에 의거하여 정량하였다. 주요 단

Table 1. Elemental and Components Analysis of Yellow Poplar Sample

Elemental analysis (% wet basis)	Value
Carbon	48.8
Hydrogen	6.5
Nitrogen	0.2
Oxygen ^a	44.5
Components analysis (% dry basis)	Value
Holocellulose ^b	78.3
Arabinose	6.7
Galactose	1.1
Glucose	40.4
Xylose	18.1
Mannose	5.3
Lignin ^b	21.3
Extractives	4.4
Ash (% dry basis)	0.58

^a by difference

^b based on the weight of wax free sample

당류 성분과 함량은 리그닌 정량 과정에서 제조한 황산가수분해액을 60배 희석한 후에 서울대학교 농업생명공동기기센터의 Carbo Pac PA100 column (4 × 250 nm)과 ED50 pulsed amperometric detector가 장착된 고성능이온교환크로마토그래피(HPAEC, Aionex system)로 정량하였다. 주요 결과는 밑의 Table 1에 나타냈다.

2.2. 열중량 분석(Thermogravimetric Analysis, TGA)

공시재료인 백합나무 목부의 급속열분해 공정을 실시하기에 앞서 시료의 온도에 따른 열분해 거동을 살펴보기 위해 열중량 분석(TGA)을 실시하였다. 기건 상태의 시료 30 mg을 10 °C/min 조건 하에 40~800°C 측정 범위 내에서 Q-5000 IR (TA Instruments, USA) 기기를 이용하여 분석하였다.

Table 2. Experimental Design for Influence Factors on Fast Pyrolysis

Factors	Experiments No. operated at 500°C and 193s					
	A	B	C	D	E	F
particelle size (mm)	0.75	0.5	0.1	0.75	0.75	0.75
water content (%)	10	10	10	5	10	25

2.3. 실험 설계

열분해 공정에서 바이오매스 입자크기와 수분 조건이 열분해 생성물(바이오오일, 바이오차, 가스)의 수율 및 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 반응 온도를 500°C, 체류시간을 1.93초로 고정된 후에 시료의 입자크기 및 함수율을 다르게 설정하였다. 입자 크기의 경우 분쇄기를 이용하여 시료를 각각 0.5 mm 이하, 0.75 mm 이하, 1.0 mm 이하 크기로 분류한 후 사용하였다. 시료의 함수율 변화는 기건상태 건조, 105°C 건조, 수분 공급을 통해 제어하였으며 각각 5% 미만, 10%, 25%의 함수율을 나타내었다(Table 2).

2.4. 급속 열분해 운전 및 바이오오일, 바이오차 생산

백합나무 목부의 급속열분해 공정은 유동형 반응기를 이용하였다. 시료는 스크류형 공급기를 통해 시간당 150 g의 속도로 반응기 내부에 투입되었다. 반응기 내 균일한 열전달을 위해 140 g의 모래를 정량하여 사전에 투입하였고 모래의 효율적인 분산과 반응기 내부의 비활성 상태를 유지하기 위해 질소가스(N₂)를 공급하였다. 체류 시간은 반응기 내 모래를 제외한 전체 부피를 단위 시간 당 반응기 내부로 유입되는 질소의 부피로 나누어 구하였다. 열분해 반응 후 사이클론(Cyclone)을 통해 바이오차를 분리하였고 휘발성 기체는 냉각장치(-2°C)와 전기집진장치를 거쳐 액상의 바이오오일로 회수하였다. 반응이 끝난 후 열분해 생성물(바이오오일, 바이오차, 가스)에 대

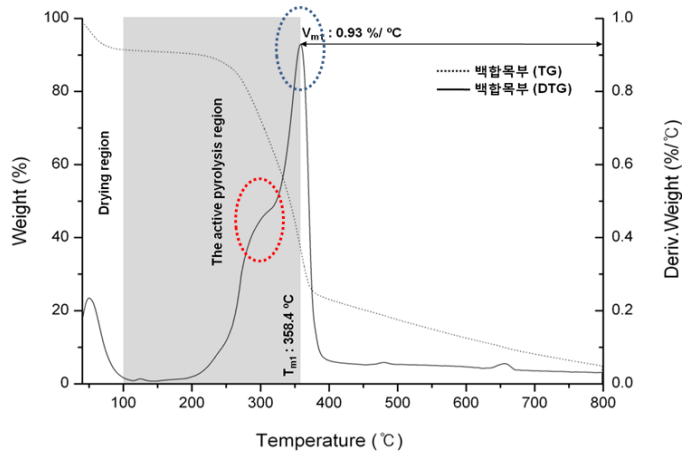


Fig. 1. Thermogravimetric analysis of yellow polar sample.

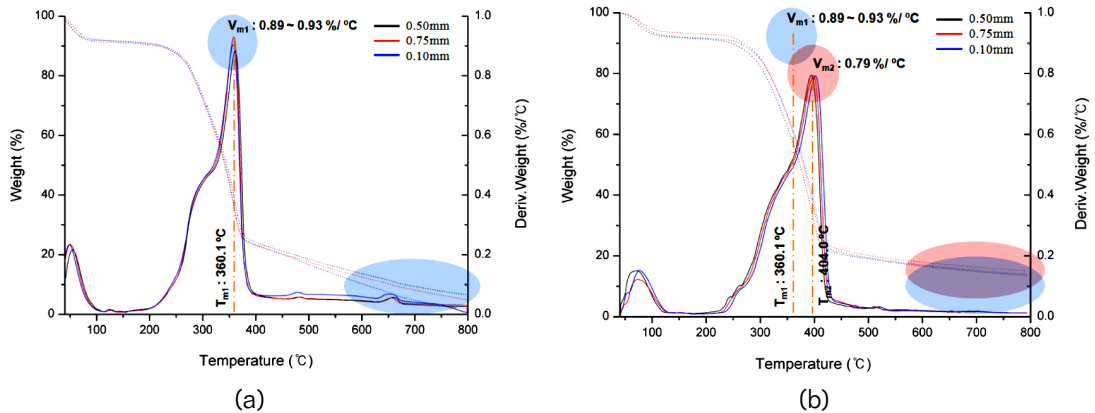


Fig. 2. Thermogravimetric analysis of yellow polar sample according to particle size with slow temperature rising (10°C/min, (a)) and fast temperature rising (100°C/min, (b)).

해 수율(wet basis)을 측정하였으며 각 생성물의 수율 계산 방법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{바이오촉의 수율(wt\%)} \\ & = \frac{\text{생성된 탄의 무게}}{\text{시료의 무게}} \times 100 \\ & \text{바이오오일의 수율(wt\%)} \\ & = \frac{\text{생성된 오일의 무게}}{\text{시료의 무게}} \times 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{가스의 수율(wt\%)} \\ & = 100 - (\text{바이오촉의 수율} + \text{오일의 수율}) \end{aligned}$$

2.5. 바이오오일 및 바이오촉의 물리·화학적 특성 분석

각 조건별로 생성된 바이오오일 및 바이오촉의 물리·화학적 특성을 살펴보기 위해 다양한 분석을 실시하였다. 바이오오일의 수분함량과 pH는 각각 Automatic Karl-Fischer titrator (DAIHAN Scientific,

Korea)와 pH meter (Thermo Fisher Scientific Inc., USA)를 이용하여 측정하였고 발열량은 Parr 6400 (Parr instrument, USA)을 이용하여 측정하였다. 또한 바이오오일 내 탄소, 수소, 질소 함량은 US/CHNS-932 (LECO Corp, USA)를 이용하여 측정하였으며 산소 함량은 전체 100%에서 탄소, 수소, 질소의 함량을 뺀 값으로 나타내었다. 바이오촉매의 발열량과 원소 조성 또한 바이오오일의 특성 분석에 적용한 방법과 같은 방법으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열중량 분석

본 연구에서는 백합나무 목부를 사용하여 급속열 분해 산물에 영향을 미치는 공정적 요인과 원료적 요인으로 각각 반응 온도와 체류 시간, 시료의 입자 크기와 함수율에 따른 변이를 주면서 실험을 진행하였다. TGA를 이용하여 시료의 열분해 거동을 살펴보는 것은 이후 실제 열분해 공정에서 시료의 열분해 메커니즘을 추측하고 열분해 산물의 특성을 파악하는데 도움을 줄 뿐만 아니라 바이오소재로써의 잠재적 이용 가능성을 평가함에 있어 중요한 역할을 한다 [13]. 따라서 급속 열분해 공정을 실시하기에 앞서 시료에 대한 열중량 분석을 하였으며 결과는 Fig. 1에 나타내었다.

백합나무 시료는 측정 범위 내 최종 온도인 800°C 까지 꾸준히 분해되는 경향을 보였으며 먼저, 초기 100°C에서 소량의 중량감소가 일어나는 것은 시료 내에 존재하던 수분의 손실에 의한 것으로 분석된다 [14]. 그 후 200~300°C 사이에서 헤미셀룰로오스가 분해되고 셀룰로오스 내 글리코시드 결합이 끊기며 서서히 중량 감소가 일어나는 것을 확인할 수 있다 [15]. 이어서 시료가 최대 속도로 분해되는 T_{m1} 부분은 셀룰로오스 올리고머가 저분자량 화합물로 분해되며 나타나는 피크로 알려져 있다 [16]. T_{m1} 지점 이후에도 꾸준히 시료의 중량이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 주로 리그닌의 분해에 의한 것으로 분석된다. 리그닌의 경우 열분해 초기 온도부터 중료

온도까지 광범위한 온도 조건에서 지속적으로 분해되는 특성이 있으며 높은 온도 조건일수록 더 많은 양의 리그닌 고분자가 분해된다 [17]. 최종 온도인 800°C에서 잔존하는 약 10% 이하의 중량은 탄으로 분석된다.

한편 입자크기에 따른 시료의 열분해 거동 변화를 살펴보기 위하여 시료의 입자크기를 각각 0.50, 0.75, 1.00 mm로 다르게 한 후 열중량 분석을 실시하였다 (Fig. 2). Fig. 2(a)에서 관찰할 수 있듯이 모든 입자크기 범위에서 시료가 최대 분해되는 온도는 360°C 부근이었으며 최대 분해 속도 또한 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

하지만 열분해 최종 온도 부근에서 잔존하는 탄의 비율은 입자크기 별로 차이를 보였으며 가장 작은 입자크기인 0.50 mm의 탄 생성 비율이 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과에 대하여 Valenzuela-Calahorro는 바이오매스 입자크기가 작을수록 비표면적이 증가하여 바이오매스 내부로의 열전달량이 증가하고, 이에 따라 바이오매스 내 수분과 휘발성 물질 등이 외부로 배출하는 양 또한 증가하는 데에 기인한다고 보고한 바 있다 [18]. 한편, 바이오매스의 열분해 특성은 승온속도에 영향을 받는다고 알려져 있으며 실제 급속열분해 공정은 500°C 조건에서 1~2초 간 반응하고 이 때 바이오매스에 대한 승온속도를 계산해보면 250~500°C/s으로 약 15,000~30,000°C/min 수준으로 상당히 높다 [19]. 따라서 승온속도를 100°C/min으로 높인 후 열중량 분석을 재 실시하였다. Fig. 2(b)에서 확인할 수 있듯이 승온속도가 높은 조건에서는 입자크기에 상관없이 시료가 최대 분해되는 정도는 모두 비슷하였으나 그 온도 범위는 각각 차이를 보였다. 이 때 Fig. 2(a)의 경우와는 다르게 최종 온도에서 각 조건별 생성된 휘발성 물질과 탄의 양이 비슷하였으며 따라서 실제 높은 승온속도에서 진행되는 급속열분해 공정 시 입자크기별 열분해 산물간의 큰 차이가 없을 것이라 사료된다.

3.2. 열분해 생성물의 수율

목질계 바이오매스의 급속열분해 과정에서 생성되

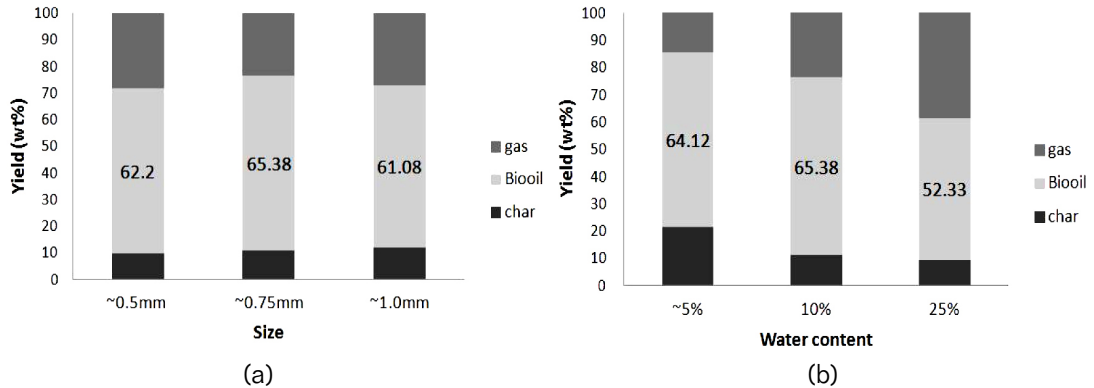


Fig. 3. Mass balance of fast pyrolysis products according to sample conditions; (a) particle size, (b) water content.

는 산물은 크게 바이오차, 바이오오일, 비응축성 가스로 구분되며 바이오매스 입자크기와 수분함량에 따른 생성물의 수율은 Fig. 3에 나타내었다.

실험 결과, Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯이 바이오오일은 61.1~65.4%, 바이오차는 9.5~11.7%로 모든 입자크기 범위 내에서 서로 비슷한 조성비를 보였다. 일반적으로 입자 크기가 특정 크기 이상으로 커지면 단위 부피당 비표면적은 감소하며 열전달이 효과적으로 일어나지 않고 열분해 또한 효율적으로 진행되기 어렵다. 반면 입자크기가 과도하게 작을 경우 과한 열전달로 인해 휘발성 유기 화합물의 이차 반응이 촉진되어 바이오오일의 수율이 감소할 수 있다 [18,20]. 하지만 본 실험에서 사용된 입자크기 범위 내에선 열분해 산물의 조성비가 뚜렷하게 큰 차이를 보이지 않았으며 이는 Fig. 2(b)에서 나타난 TGA 분석과도 상응되는 결과이다.

Fig. 3(b)에서 보이는 바와 같이 시료 내 함수율의 변화는 열분해 산물의 조성비에 큰 영향을 미쳤으며 함수율이 5%에서 25%로 증가할수록 가스의 수율은 14.6%에서 38.6%로 증가하였으나 바이오차의 수율은 21.3%에서 9.1%로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 바이오매스 내 수분 함량이 많은 경우 바이오차가 수분과 반응하여 CO, H₂ 등 비응축성 가스로의 전환이 진행되기 때문으로 분석된다[20]. 바이오오일의 경우 25% 함수율 시료에서 52.3%의 낮은 수율을 나

타냈으며 이는 시료 내 높은 함수율 비증으로 인해 바이오오일로 전환될 수 있는 시료 내 탄소 기반 유기물의 양 자체가 감소하였기 때문인 것으로 사료된다.

3.3. 바이오오일의 물리 화학적 특성

바이오오일의 물리적 · 화학적 특성을 분석하기 위하여 각 조건별 산물의 원소 조성, 수분함량, pH, 발열량을 측정하였으며 그 결과를 Table 3과 Fig. 4에 제시하였다. 원소분석 결과에 의하면 탄소함량은 40.2~46.9%, 산소함량은 45.4~52.9% 수준을 나타냈으며 바이오오일 내 탄소함량의 경우 시료의 입자 크기가 작고 함수율이 감소할수록 점점 증가하는 경향을 나타내었다. 수분 함량의 경우 전반적으로 바이오오일 질량 대비 약 20~30% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 이 때 투입된 시료의 함수율을 고려해보았을 때 바이오오일 내 수분은 대부분 시료 내 존재하던 자유수 및 결합수로부터 유래하는 것 외에 열분해 도중 셀룰로오스와 리그닌의 탈수 반응에 의해서도 일부 생성된다는 사실을 확인할 수 있었다[7]. 일반적으로 바이오오일 내 포함된 수분은 바이오오일의 점도를 낮춰 유동성을 향상시키기도 하지만 오일의 발열량 및 연소율을 감소시키는 등 연소에 부정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[12].

바이오오일의 pH는 2.2~2.4를 나타내었고 이는

Table 3. Elemental Analysis of Bio-oils

Factors	Experiments No. operated at 500°C and 193s					
	A	B	C	D	E	F
particle size (mm)	0.75	0.5	0.1	0.75	0.75	0.75
water content (%)	10	10	10	5	10	25
Elemental analysis (%)						
carbon	40.2	40.3	40.2	46.9	40.2	-
hydrogen	6.8	6.7	6.6	7.2	6.8	-
oxygen	52.8	52.6	52.9	45.4	52.8	-
nitrogen	0.3	0.2	0.3	0.5	0.3	-

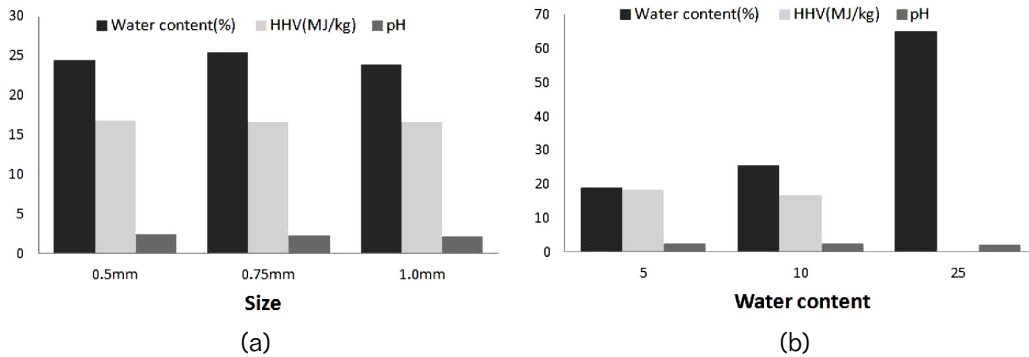


Fig. 4. Chemical and physical properties of bio-oils operated under various conditions; (a) particle size, (b) water content.

바이오오일 내에 존재하는 아세트산이나 프로피온산 등의 유기산에서 유래하는 것으로 알려져 있다[17]. 바이오오일의 이러한 산성적 특성은 사용 기기의 부식을 초래하여 연료로의 상용화에 어려움을 겪게 하므로 개질 방법을 통하여 이를 보완해야 할 필요가 있다[21]. 한편 바이오오일의 발열량은 16.6~18.5 MJ/kg으로 측정되어 다른 에너지원(중유 40 MJ/kg, 바이오디젤 34~45.3 MJ/kg, 바이오에탄올 26.7 MJ/kg)과 비교했을 때 연료로서의 가치가 다소 떨어지며 이는 바이오오일 내 높은 수분함량과 산소함량에 기인하는 것으로 판단된다[22]. 바이오오일의 이러한 특성들은 수침탈산소 반응, 에스테르화 반응, 크래킹 등의 다양한 개질 방법을 통해 보완 및 향상 가능하

며 이에 관한 연구들 또한 다수 진행되고 있다[21].

더 나아가, 조건 변이에 대한 구체적 분석을 위해 각 조건별로 생성된 바이오오일의 물리·화학적 특성을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 시료의 입자크기에 따른 바이오오일의 물리·화학적 특성 변화를 분석한 결과 Fig. 4(a)에서 보이는 바와 같이 큰 변화를 보이지 않았다.

반면 시료 내 함수율 차이는 바이오오일의 물리·화학적 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 4(b)). 시료 내 함수율이 5%에서 25%로 증가함에 따라 바이오오일 내 수분 함량은 18.9%에서 65.1%로 크게 증가하였으며 전반적으로 바이오오일 내 수분함량이 높을수록 바이오오일의 발열량은 감

Factors	Experiments No. operated at 500°C and 1.93s					
	A	B	C	D	E	F
particle size (mm)	0.75	0.5	0.1	0.75	0.75	0.75
water content (%)	10	10	10	5	10	25
Elemental analysis (%)						
carbon	82.7	83.0	82.4	84.2	82.7	79.2
hydrogen	1.3	1.1	1.0	1.7	1.3	0.9
oxygen	15.9	15.7	16.5	13.8	15.9	19.6
nitrogen	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.3
HHV (MJ/kg)	29.0	28.6	27.6	30.1	29.0	26.2

소하는 경향을 관찰할 수 있었다. 25% 함수율 조건에서 생성된 바이오오일은 다량의 수분함량으로 인해 층분리 현상이 관찰되었으며 이 때문에 정확한 발열량 측정 및 원소분석이 불가능하였다.

3.4. 바이오촉매의 물리·화학적 특성

일반적으로 바이오촉매는 바이오매스의 열분해 과정에서 생성되는 고품질로 높은 탄소 함량과 발열량 때문에 연료적 특성이 우수하며 표면적 공극 특성으로 인해 흡착제 및 활성 탄소 등으로 활용이 가능하다[20]. 본 실험에서 생성된 바이오촉매의 원소 조성 및 발열량을 측정된 결과를 Table 4에 나타내었다. 실험 결과에 의하면, 시료 내 함수율이 낮고 입자크기가 작은 원료적 조건에서 생성된 바이오촉매의 경우 탄소 함량이 높고 이에 따른 발열량 또한 증가하는 것을 확인하였다. 바이오촉매의 발열량은 26.2~30.1 MJ/kg이며 이는 기존 석탄 연료의 발열량 28~30 MJ/kg과 비슷한 수준으로 고품질연료로써 바이오촉매의 활용이 가능할 것이라 판단된다.

4. 결 론

백합나무 목부를 이용한 급속 열분해 공정 시 시료의 입자 크기 및 함수율을 변화시키며 얻은 각 조건별 열분해 산물의 수율을 측정하고 이 때 생성된 바이오오일과 바이오촉매의 물리·화학적 특성 분석을

실시하였다. 급속 열분해 공정은 500°C, 1.9초의 체류 시간 조건하에 이루어졌으며 시료의 입자 크기의 경우 열분해 산물의 수율에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 반면 시료 내 높은 함수율은 오일 내 다량의 물 생성과 함께 바이오오일의 수율 감소를 초래하였다. 생성된 바이오오일은 20~30%의 수분 함량과 pH 2.2~2.4, 16.6~18.5 MJ/kg의 발열량을 나타내었다. 본 연구에서는 바이오오일의 높은 수율과 우수한 물리·화학적 특성을 고려하였을 때 10% 이하의 함수율을 지닌 0.75 mm크기의 시료를 사용하는 것이 최적의 조건임을 확인하였다. 바이오촉매의 경우 80% 이상이 탄소로 이루어져있으며 발열량은 26.2~30.1 MJ/kg 수준으로 측정되어 고품질연료로 활용이 가능할 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Nemoto, T., G. Konishi, Y. Tojo, C. A. Youn, and M. Funaoka, *Journal of Applied Polymer Science*, 123(5): 2636~2642 (2012).
2. Pattiya, A. and S. Suttibak, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95: 227~235 (2012).
3. International, G., *Energy [R]evolution vs. IEA World Energy Outlook scenario 2011*, (2011).
4. Patwardhan, P. R., J. A. Satrio, R. C. Brown, and B. H. Shanks, *Bioresource Technology* 101 (12), 4646~4655 (2010).
5. Demirbas, A., *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(1): 1~18 (2007).

6. Wang, G., B. Q. Li, and H. K. Chen, *Fuel*, 87(4-5): 552~558(2008).
7. Mohan, D., C. U. Pittman Jr, and P. H. Steele, *Energy & Fuels*, 20(3), 848~889 (2006).
8. Reijnders, L., *Energy Policy*, 34(7) 863~876. (2006).
9. Sipila, K., Kuoppala, E., Fagernas, L., and A. Oasmaa, *Biomass and Bioenergy*, 14(2): 103~113 (1998).
10. Lian, J., S. Chen, S. Zhou, Z. Wang, J. O'Fallon, C. Z. Li, and Garcia-Perez, M., *Bioresource Technology*, 101(24), 9688~9699 (2010).
11. Amen-Chen, C., B. Riedl, X-M. Wang, and C. Roy, *Holzforschung*, 56(2), 167~175 (2002).
12. Bridgewater, A. V., *Thermal Science*, 8(2), 21~50 (2004).
13. Alemdar, A. and M. Sain, *Composites Science and Technology*, 68(2): 557~565 (2008).
14. d'Almeida, A. L. F. S., D. W. Barreto, V. Calado, and J. R. M. d'Almeida, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91(2), 405~408 (2008).
15. Arseneau, D. F., *Canadian Journal of Chemistry*, 49(4), 632~638 (1971).
16. Nair, K. C. M., R. P. Kumar, S. C. Schit, K. Ram-murthy, and S. Thomas, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(11): 1231~1240 (2000).
17. Kim, K. H., I. Y. Eom, S. M. Lee, D. Choi, Y. H., I-G. Choi, and J. W. Choi, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(1): 2~9 (2011).
18. Valenzuela-Calahorra, C., A. Bernalte-Garcia, V. Gómez-Serrano, Ma. J. Bernalte-García, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 12(1): 61~70 (1987).
19. Williams, P. T. and S. Besler, *Renewable Energy*, 7 (3): 233~250 (1996).
20. Demirbas, A., *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(2), 243~248 (2004).
21. Zhang, Q., J. Chang, T. Wang, and Y. Xu, *Energy & Fuels*, 20(6), 2717~2720 (2006).
22. Demirbas, A., *Fuel*, 76(5), 431~434 (1997).