

# 백합나무(*Liriodendron tulipifera*)의 저온 열분해에 의한 고밀도 에너지화 및 연료 특성 개선

이재정<sup>1)</sup> · 이수민<sup>2)</sup> · 김은지<sup>3)</sup> · 안병준<sup>4)\*</sup>

## Energy Densification and Enhancement of Fuel Characteristics of Tulip-tree (*Liriodendron tulipifera*) by Mild Thermal Treatment

Jaejung Lee<sup>1)</sup> · Soo Min Lee<sup>2)</sup> · Eun-Ji Kim<sup>3)</sup> · Byoung Jun Ahn<sup>4)\*</sup>

Received 22 April 2015 Revised 15 June 2015 Accepted 15 June 2015

**ABSTRACT** In this study, energy densification and upgrading of fuel characteristics of wood chip via mild thermal treatment, so-called torrefaction, were conducted using tulip-tree (TUT; *Liriodendron tulipifera*). The calorific value and weight loss of TUT wood chips were significantly increased as the torrefaction temperature and time increased. However, the energy yield of torrefied TUT wood chips was decreased at severe torrefaction condition. During the torrefaction process, hydrophobicity of TUT wood chips was obtained. The higher hydrophobicity could give storage improvement to torrefied TUT wood chips. Furthermore, the grinding energy during the grinding of torrefied TUT wood chips was significantly reduced comparing to untreated TUT wood chips. Considering the grinding process is required for pelletizing of wood chips, it was thought that the torrefaction process could be advantageous for utilizing of lignocellulosic materials for energy source.

**Key words** Torrefaction(반탄화), Tulip-tree(백합나무), Calorific value(발열량), Hydrophobicity(소수성), Grinding energy(분쇄 동력), Fuel characteristics(연료특성)

### subscrip

TUT : tulip tree

W<sub>L</sub> : weight loss

Y<sub>E</sub> : energy yield

- 1) 국립산림과학원 E-mail: jjlee84@korea.kr  
Tel: +82-2-961-2797 Fax: +82-2-961-2769
- 2) 국립산림과학원 E-mail: lesomin@korea.kr  
Tel: +82-2-961-2743 Fax: +82-2-961-2769
- 3) 국립산림과학원 E-mail: bioenergy2@korea.kr  
Tel: +82-2-961-2798 Fax: +82-2-961-2769
- 4) 국립산림과학원 E-mail: bjahn@korea.kr  
Tel: +82-2-961-2744 Fax: +82-2-961-2769

### 1. 서론

최근의 화석연료 고갈과 지구 온난화는 인류의 지속가능한 발전을 위협하고 있다. 이로 인해 화석연료를 대체 할 수 있는 새로운 에너지 자원에 대한 연구와 개발의 필요성이 대두되고 있다.<sup>1,2)</sup> 우리나라도 지난 2008년 발표된 국

가 신·재생에너지 기본 계획에서 신·재생에너지 보급 비율을 국가 1차에너지 공급량의 11%까지 확대한다는 계획을 발표하여 추진 중에 있다. 또한 2012년부터 시행된 신재생에너지공급의무화제도로 인해 국내에서도 대체 에너지에 대한 수요가 급증하고 있다. 이러한 맥락에서, 화석연료를 대체할 신·재생에너지로 목질계 바이오매스에 대한 관심이 높아지고 있다. 목질계 바이오매스는 자연계에 풍부하며 재생 가능하고, 탄소중립적인 특성을 지닌다. 하지만 화석연료에 비해 상대적으로 낮은 에너지 밀도를 지녀 운반과 저장에 많은 비용이 소요되고, 특히 저장 중 발생하는 미생물 열화에 의해 장기간 저장이 힘들다는 단점을 가진다.<sup>3)</sup>

목질계 바이오매스의 연료용 이용 형태는 대표적으로 목재칩(wood chips)과 목재펠릿(wood pellets)이다. 목재칩이란 연료로 사용되는 칩으로서, 연소 및 가스화 등 에너지 생산을 위해 고안된 기계를 이용하여 목재를 작은 크기의 조각으로 분쇄함으로써 제조된 생산물을 말한다.<sup>4)</sup> 목재칩은 단순히 목재를 균일한 크기로 분쇄함으로써 사용하기 편리한 형태로 가공한 것으로, 원료인 목재의 낮은 발열량, 균일하지 못한 품질, 낮은 저장성 등의 단점들을 해소하지 못한다. 또한 목재펠릿은 유해물질에 의해 오염되지 않은 목재를 압축 성형하여 생산하는 작은 원통 모양의 표준화된 목질계 고체바이오연료를 말한다.<sup>5)</sup> 목재펠릿은 목재칩에 비해 높은 에너지 밀도를 지니지만, 대기 중의 수분을 흡수하여 가공된 펠릿 형태를 쉽게 잃고 미생물에 의한 열화에 노출 될 수 있으며, 펠릿 성형을 위한 분쇄·압축가공에 별도의 에너지를 요구한다. 따라서 에너지 생산을 위한 목질계 바이오매스의 이용을 위해 연료적 특성을 개선하기 위한 다양한 연구들이 진행되었다.<sup>6-9)</sup>

반탄화(torrefaction)는 일반적으로 200-300°C 사이의 온도에서 한 시간 이내의 짧은 열처리를 불활성조건에서 가함으로써 에너지 밀도를 향상시키고, 보다 나은 저장성과 분쇄성을 부여하는 열처리 기법이다. 이때, 반탄화 처리 목재의 중량이 감소하지만 목재내의 단위 무게 당 발열량이 향상되는데, 이는 반탄화 처리를 통해 목재 내의 수소와 산소가 풍부한 물과 이산화탄소 등의 휘발성 물질이 감소하면서 O/C 혹은 H/C 비율이 감소하기 때문이다.<sup>10,11)</sup> 반탄화된 목재는 부후균 등에 의한 미생물 열화에도 강한 내구성을 가진다.<sup>12,13)</sup> 반탄화처리되는 목재 내의 친수성 작

용기를 감소시켜 목재 자체의 수분 흡수를 막는 역할을 함으로써 반탄화된 목재의 저장성을 증진시킨다. 뿐만 아니라, 반탄화 중 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 결합을 느슨하게 하고 취성(brittleness)을 증가시켜 분쇄 동력을 감소시키는 효과가 있다.<sup>10)</sup>

본 연구에서는 국내 속성수 중 한 종인 백합나무(*Liriodendron tulipifera*)를 이용하여 목질계 바이오매스의 반탄화 처리를 통해 목재칩의 고밀도 에너지화 과정을 살펴보고자 한다. 또한 반탄화된 백합나무 목재칩의 소수성과 분쇄성을 파악하여 신·재생에너지로써 목질계 바이오매스의 가능성을 탐색하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 공시 재료

본 연구에서는 백합나무의 목재칩을 이용하여 반탄화 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 원목 형태의 백합나무는 국립산림과학원의 디스크 칩퍼(유림기술 제조)를 이용하여 칩 형태로 가공하였다. 생산된 백합나무 목재칩은 10-20mm와 20-25mm의 칩 크기로 나누어 오븐 건조법을 통해 초기 함수율을 측정하였다. 목재칩은 가공이 끝난 후 실외에서 1주일 이상 자연건조 시켰으며, 반탄화 처리 전 다시 함수율을 측정하였다.

### 2.2 반탄화

반탄화 반응기는 (주)건조기술에서 제작하였으며, 1회에 전건중량 기준 총 3kg의 목재칩을 사용하였다. 반탄화 반응기에 목재칩을 투입 한 후, 반응기 내를 질소로 채워 200-300°C 온도범위에서 매 20°C마다 저온열분해를 실시하였다. 열처리는 반응 목적 온도까지 20분간 승온 시키고, 이후 30분간 반응 온도에서 열처리를 실시하였다. 시간에 따른 반탄화 효과를 확인하기 위해 260°C 온도에서 반탄화 처리를 할 때 15, 30, 45, 60분간 반응온도에 차이를 두어 실험을 진행하였다. 반응이 종료된 시료는 반응기 내부 온도가 100°C 이하로 냉각 된 후 회수하였다. 반탄화 처리 시 반응기 내로 투입된 백합나무 목재칩은 교반 스크류에 의해 충분히 교반하였으며, 동일한 조건 하에 3회 반복하여

반탄화 처리를 실시하였다.

### 2.3 반탄화칩 분석

반탄화된 두 가지 크기의 백합나무 목재칩에 대해 중량 감소율과 에너지 수율, 발열량, 원소함량에 대한 분석을 실시하였다.

#### 2.3.1 중량감소율 및 에너지수율 계산

반응 전의 목재칩에 대한 반탄화 처리 시료의 중량 감소율( $W_L$ )과 에너지수율( $Y_E$ )은 각각 아래의 (1)과 (2)의 식에 의해 계산되었다. 아래의 식들은 전건중량을 기준으로 계산한다.

$$W_L = \frac{(W_O - W_T)}{W_O} \times 100(\%) \quad (1)$$

( $W_O$ : 처리 전 목재칩의 무게,  $W_T$ : 처리 후 목재칩의 무게)

$$Y_E = \frac{E_T}{E_O} \times W_L \quad (2)$$

( $E_O$ : 처리 전 목재칩의 발열량,  $E_T$ : 처리 후 목재칩의 발열량)

#### 2.3.2 발열량 측정

반탄화 전, 후의 목재칩들의 발열량을 측정하였다. 목재칩들은 건식분쇄기를 이용하여 3mm 이하로 분쇄되었으며, 다시 볼밀분쇄기를 이용하여 40~60mesh(250~425 $\mu$ m) 목분으로 가공하였다. 준비된 목분은 105 $\pm$ 3 $^{\circ}$ C 오븐건조기에서 48h 이상 건조하여 전건시킨 뒤, 1g의 목분 시료에서 발생하는 열량을 Parr6400 발열량 측정기(Parr, USA)를 이용하여 측정하였다. 발열량은 3회 반복하여 측정 한 뒤 평균값으로 나타내었다.

#### 2.3.3 원소함량 분석

백합나무 목재칩 및 반탄화 목재칩들의 원소함량을 측정하였다. 건식 분쇄기와 볼밀 분쇄기를 통해 준비된 60mesh 이하의 미세 목분을 준비한 뒤, 105 $\pm$ 3 $^{\circ}$ C 오븐건조기에서 48h

이상 전건시켰다. 전건된 목분시료 5mg을 Flash EA1112 원소분석기를 통해 C, H, N, S 원소에 대한 함량을 조사하였다. H, N, S 원소는 2,5-Bis(5-tert-butyl-benzoxazol-2-yl) thiophene(BBOT) 기준시료를, C원소는 Thermo Fisher Scientific Soil Reference Material을 기준시료로 이용하여 측정하였으며, 모든 측정은 3회 반복하여 실시하여 평균값으로 나타내었다.

### 2.4 접촉각 측정

백합나무 목재칩 및 반탄화 목재칩들의 접촉각을 측정하기 위해 건식분쇄기와 볼밀 분쇄기를 이용하여 시료를 분쇄하여 60mesh 이하의 미세 목분을 준비하였다. 준비된 목분을 제조사의 매뉴얼에 따라 41Mpa의 압력으로 압축하여 10mm 직경의 원형 디스크로 제작하였다. 제작된 디스크 중앙에 4 $\mu$ l의 증류수를 낙하시킨 후, 낙하 직후부터 총 10초간 매 1초마다 디스크 측면에서 이미지를 촬영하여 낙하된 증류수와 디스크가 접촉하는 각도를 측정하였다. 접촉각을 위한 이미지는 Phoenix 300 접촉각 측정기(SEO, Korea)를 이용하여 촬영하였으며, 낙하 1초 후에 획득한 이미지에서 반원형태의 물방울과 목분 디스크가 형성하는 각도를 측정하였다. 접촉각 측정은 3회 실시한 후 평균값을 얻었다.

### 2.5 분쇄동력 및 분쇄입자분포

반탄화 전, 후의 목재칩 분쇄를 위해 필요한 분쇄동력을 측정하였다. 실험은 반탄화 목재칩 10g을 1분간 소형 분쇄기(Hanil electronics, Korea)에서 분쇄하는데 사용된 소비전력을 소비전력측정기(KEM2500, Korins, Korea)로 측정하였다. 분쇄된 목재칩들은 60, 40, 18mesh 표준체를 이용하여 네 가지 입자크기로 분류한 뒤, 중량기준 분쇄입자분포를 확인하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 백합나무 목재칩의 반탄화 수율 및 고밀도 에너지화

서로 다른 입자크기의 백합나무 목재칩에 대한 반탄화

실험을 실시하여, 중량감소와 발열량 변화를 측정 하였다. 또한 이를 통해 산출된 에너지 수율은 Fig. 1과 같다. 백합나무 목재칩은 반탄화 처리를 통해 그 발열량이 현저히 증가 하였으며, 이러한 경향은 10mm-20mm 목재칩과 20mm-25mm 목재칩 모두에서 관찰되었다. 가장 높은 발열량은 300℃에서 처리한 반탄화 목재칩에서 측정되었으며, 10-20mm 목재칩의 경우 5,826kcal/kg, 20-25mm 목재칩은 6,321kcal/kg의 발열량을 나타냈다. 하지만 반탄화 처리 온도가 상승할수록 목재칩의 중량감소 역시 점진적으로 증가하는데, 이로 인해 반탄화가 고온에서 진행될수록 에너지수율이 감소하는 결과를 보였다. 반탄화에 의한 에너지 수율의 감소는 20-25mm의 목재칩에서 두드러지게 나타났다.

백합나무 목재칩의 반탄화에 의한 원소 함량의 변화는

Table 1과 같다. 백합나무 목재칩은 목재칩의 크기와 상관 없이 더 높은 온도에서 반탄화 처리를 진행 하였을 때 수소와 산소 함량은 감소하였고, 탄소 함량은 증가하였다. 반탄화 처리 시간이 증가할 때도 유사한 양상을 보였으나, 처리 온도에 의한 원소 함량의 변화가 더 컸다. 점진적인 수소와 산소 함량의 감소는 두 원소의 함량이 높은 물과 이산화탄소가 반탄화 처리 중 기화하여 발생하는 것으로 사료된다<sup>11)</sup>. 같은 처리 온도에서는 더 큰 목재칩이 발열량 증가폭이 컸는데, 목재의 절연효과에 의한 목재칩 내부의 열보존에 의한 결과로 예상된다. 질소 함량의 변화폭은 상대적으로 미비하였고, 모든 반탄화칩의 질소 함량은 목재연료칩의 규격·품질 기준인 1% 이하를, 목재펠릿 규격·품질기준 중 1급인 0.3% 이하를 만족시켰다.

백합나무 목재칩의 반탄화에 따른 탄소 함량 변화는 반

Table 1. Elemental composition of untreated and torrefied wood chips

Chip Size (mm)	Temp. (°C)	Time (min)	Element Contents (%)				
			C	H	N	O	
10-20	Control		49.04 (0.04)*	6.70 (0.05)	0.15 (0.00)	44.12 (0.06)	
	200	30	49.14 (0.02)	6.37 (0.07)	0.26 (0.01)	44.23 (0.08)	
			50.94 (0.05)	6.15 (0.04)	0.23 (0.00)	42.68 (0.09)	
			52.05 (0.07)	6.14 (0.05)	0.19 (0.01)	41.62 (0.04)	
			55.77 (0.06)	6.27 (0.08)	0.24 (0.01)	37.72 (0.12)	
			59.49 (0.14)	5.94 (0.07)	0.26 (0.01)	34.31 (0.21)	
			64.26 (0.15)	5.56 (0.05)	0.26 (0.02)	29.93 (0.19)	
	260	30	55.67 (0.15)	5.99 (0.04)	0.21 (0.00)	38.13 (0.19)	
			55.77 (0.06)	6.27 (0.08)	0.24 (0.01)	37.72 (0.12)	
			56.74 (0.03)	5.95 (0.03)	0.21 (0.01)	37.11 (0.05)	
			60.27 (0.02)	5.68 (0.03)	0.25 (0.01)	33.80 (0.04)	
	20-25	Control		49.04 (0.04)	6.70 (0.05)	0.15 (0.00)	44.12 (0.06)
		200	30	49.43 (0.04)	6.53 (0.02)	0.17 (0.00)	43.87 (0.04)
51.25 (0.03)				6.33 (0.16)	0.15 (0.01)	42.26 (0.19)	
53.00 (0.10)				6.38 (0.05)	0.16 (0.00)	40.46 (0.14)	
55.39 (0.06)				6.01 (0.09)	0.24 (0.01)	38.35 (0.07)	
59.91 (0.12)				5.95 (0.00)	0.22 (0.01)	33.92 (0.12)	
70.22 (0.08)				5.22 (0.01)	0.29 (0.03)	24.27 (0.12)	
260		30	53.32 (0.03)	6.29 (0.02)	0.17 (0.01)	40.22 (0.06)	
			55.39 (0.06)	6.01 (0.09)	0.24 (0.01)	38.35 (0.07)	
			56.00 (0.08)	6.03 (0.05)	0.23 (0.03)	37.73 (0.14)	
			57.48 (0.06)	6.02 (0.06)	0.21 (0.01)	36.29 (0.11)	

\*Numbers in parentheses refer to the standard deviations

탄화칩의 발열량과 매우 밀접한 상관관계를 가지는 것으로 나타났다(Fig. 2). 서로 다른 반탄화 처리온도와 반응시간에 의해 생산된 모든 반탄화 칩의 탄소함량과 발열량은 직선의 상관관계를 보였으며, 또한 매우 높은 결정계수를 보였다( $R^2=0.9494$ ). 이러한 결과는 반탄화 처리를 통해

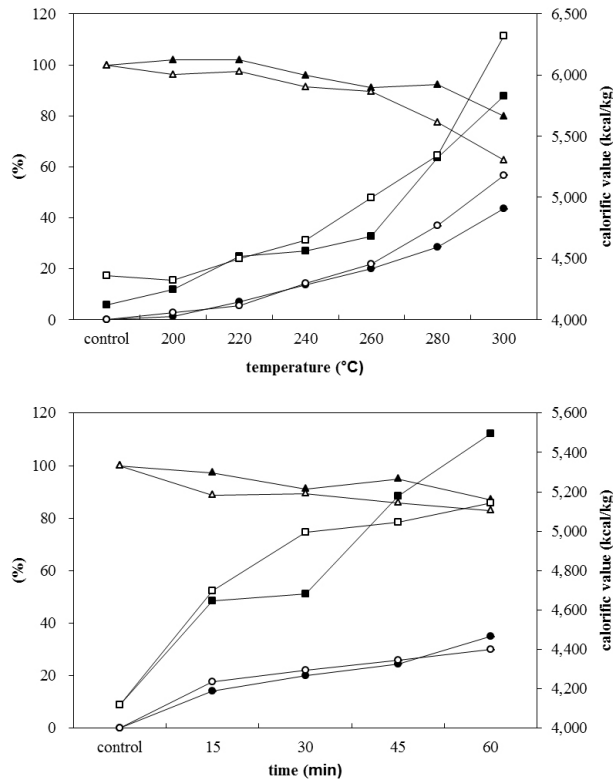


Fig. 1. WL, Y<sub>E</sub> and calorific value of torrefied TUT wood chips under different temperature and time (●, WL (10–20 mm); ○, WL (20–25 mm); ▲, Y<sub>E</sub> (10–20 mm); △, Y<sub>E</sub> (20–25 mm); ■, calorific value (10–20 mm); □, calorific value (20–25 mm))

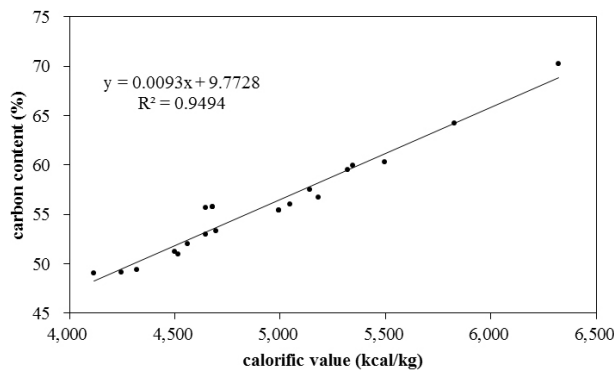


Fig. 2. Relationship between calorific value and carbon content of torrefied TUT wood chips

C-H 혹은 C-O 결합보다 높은 결합 에너지를 가지는 C-C 결합이 반탄화 칩 내에 더 많이 잔존하기 때문인 것으로 판단된다.<sup>10)</sup>

### 3.2 백합나무 목재칩의 접촉각

서로 다른 입자크기의 백합나무 목재칩을 200–300°C의 온도에서 반탄화시켜 만든 바이오매스 연료의 친수성을 접촉각으로 평가하였을 때, 비 처리 백합나무의 목분 디스크에서는 1초 이내로 낙하시킨 물방울이 흡수되어 접촉각이

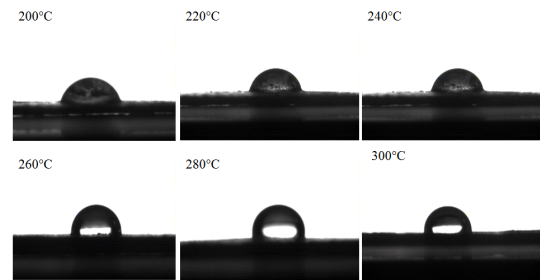


Fig. 3. Water droplet on the torrefied TUT wood chips

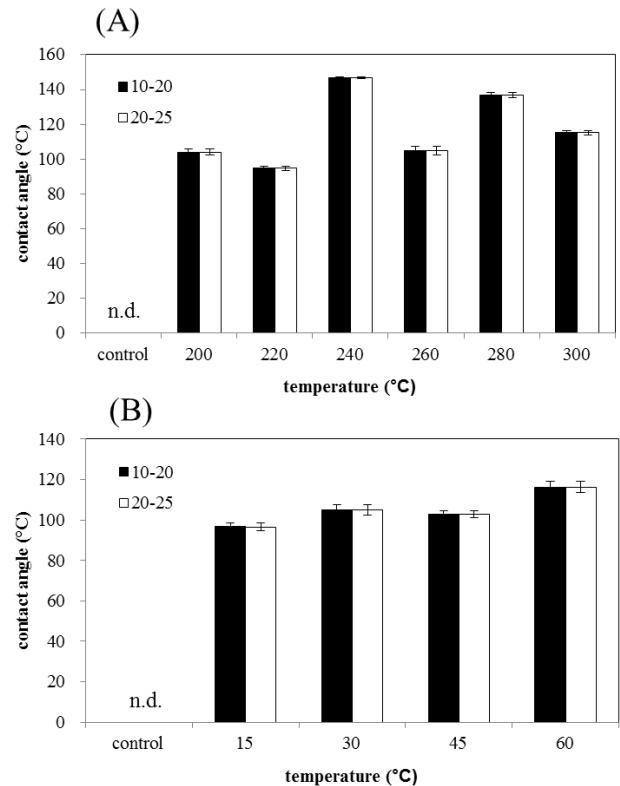


Fig. 4. Change in contact angle of water droplet on the torrefied TUT by temperature (A) and time (B)

측정되지 않았지만, 반탄화된 목재칩을 이용하여 제작된 목분 디스크에서는 낙하한 물방울이 일정한 접촉각을 형성하였다(Fig. 3). 또한 반탄화 처리 온도와 시간이 증가할수록 형성된 물방울이 목재 내로 흡수되는데 필요한 시간이 증가되었다.

반탄화 처리 백합나무 디스크에서는 모든 접촉각이 95°에서 147°까지 다양하게 분포되었다(Fig. 4A). 이를 통해 반탄화된 바이오매스 연료는 소수성이 매우 높아 수분을 잘 흡수하지 않는 것으로 사료된다. 백합나무 목재칩의 반탄화 온도가 증가할수록 접촉각은 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 260°C에서 반탄화 시간을 15분, 45분, 60분으로 증가시켰을 때, 바이오매스 연료의 접촉각은 97°에서 116°의 범위로 분포되었다(Fig. 4B). 백합나무 목재칩을 15분간 반탄화 처리 했을 때에도 높은 접촉각이 측정되어 바이오매스 연료의 친수성을 낮출 수 있음이 관찰 되었다. 시간의 증가에 따른 친수성에 큰 차이가 보이지 않았다. 목재칩의 크기에 따른 반탄화 목재칩의 접촉각 차이는 관찰되지 않았으며, 이를 통해 목재 칩의 크기는 반탄화된 시료의 소수성에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 목재 표면의 소수성 증가는 목재의 장기 보관 시 대기 중의 수분을 흡수하여 발생하는 재 젖음 현상을 감소시키고, 미생물에 의한 열화를 감소시킬 수 있다. 반탄화 처리를 통해 목재의 소수성이 증진됨을 고려할 때, 반탄화 처리는 목재칩의 발열량과 에너지밀도를 증진시킬 뿐만 아니라 목재의 장기간 저장에도 유리한 특성을 부여할 수 있다고 사료된다.

### 3.4 분쇄소요동력과 분쇄입자분포

반탄화된 백합나무 목재칩의 분쇄에 소요되는 동력을 측정하였다(Fig. 5). 반탄화 처리를 하지 않은 목재칩의 경우 분쇄에 소요되는 동력은 10-20mm 크기 목재칩의 경우 6.54±0.67kW/h, 20-25mm 크기 목재칩의 경우 6.28±0.13kW/h로 분쇄소요동력에 차이는 없었다. 반탄화 처리를 실시 한 후 분쇄소요동력은 반탄화 온도와 반응시간이 증가할수록 감소하는 경향을 보였는데, 300°C에서 30분간 처리한 반탄화 목재칩의 경우 10-20mm 크기의 목재칩은 5.28±0.11kW/h, 20-25mm 크기의 목재칩은 5.25±0.19 kW/h의 동력을 요구하여 비 처리구 대비 각각 15.5%, 16.4% 분쇄소요동력 감소 효과를 보였다. 반탄화 반응시

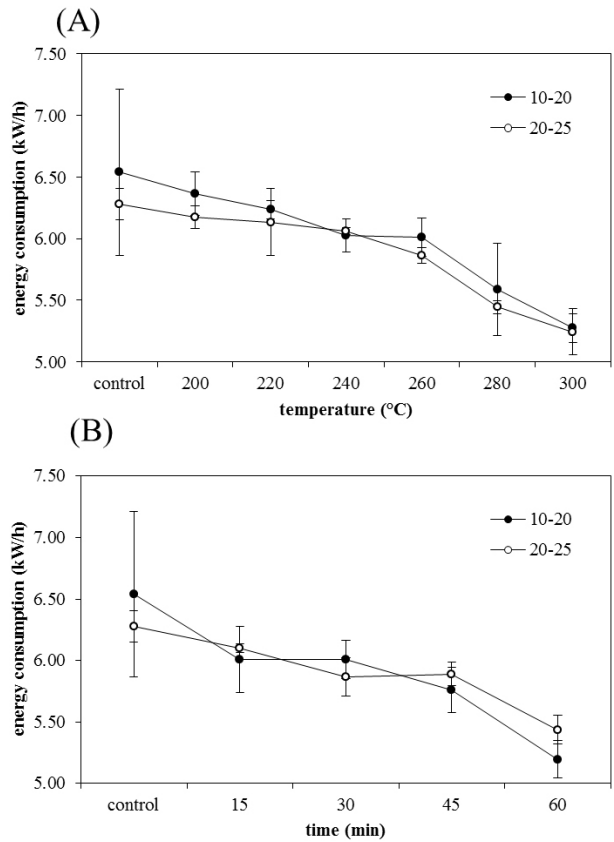


Fig. 5. Energy consumption of grinding of torrefied TUT wood chips under different torrefaction temperature (A) and time (B)

간이 길어질수록 분쇄소요동력의 감소는 두드러지는 경향을 보였다. 260°C에서 60분간 반탄화 처리 된 목재시료는 10-20mm 목재칩의 경우 5.20±0.15kW/h, 20-25mm의 경우 5.44±0.12로 각각 16.9%, 13.5%의 분쇄소요동력이 감소되었다. 이러한 분쇄소요동력의 감소는 반탄화된 목재 칩을 이용하여 펠릿형태로 이용 할 시 분쇄과정에 필요한 에너지를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

반탄화 목재칩의 분쇄 후 목분의 입자 크기 분포는 Fig. 6과 같다. 두 가지 크기의 목재 칩 모두 반탄화 처리온도와 시간이 증가할수록 60mesh 이하의 목분 함유량이 증가하였으며, 반대로 18mesh 이상의 목분 함량은 감소하였다. 60-18mesh의 목분은 200~260°C, 30분 처리 시 혹은 260°C, 15~60분 까지 다소 일정한 함량을 보였다. 이러한 경향은 기존의 연구 결과와 일치한다.<sup>9,14)</sup>

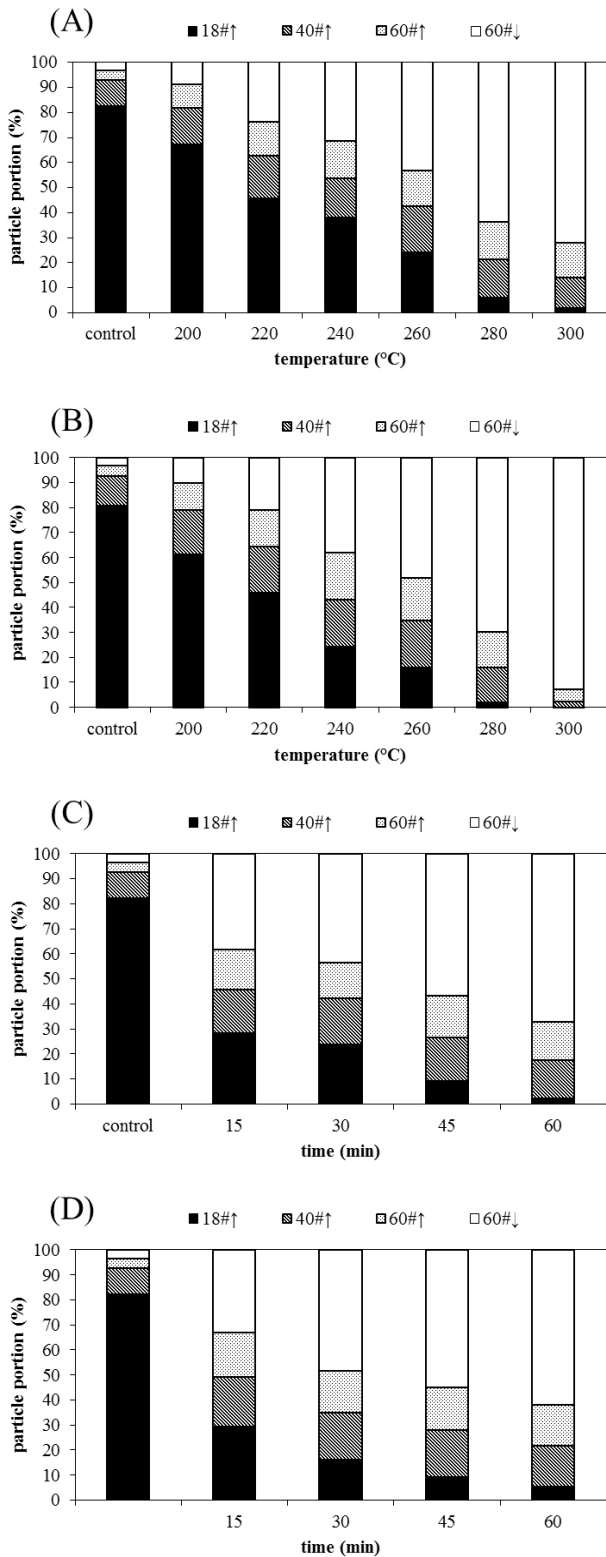


Fig. 6. Distribution of grinded particles of torrefied TUT wood chips under different torrefaction temperatures using 10–20 mm and 20–25 mm wood chips (A and B, respectively) and torrefaction times using 10–20 mm and 20–25 mm wood chips (C and D, respectively)

## 4. 결론

본 연구는 백합나무 목재칩의 연료적 특성을 증진시키기 위한 반탄화 처리 효과를 확인하기 위해 진행되었다. 반탄화 처리온도와 시간이 증가할수록 단위중량당 발열량이 증가하지만, 중량감소율 역시 증가하여 에너지 수율은 감소하는 경향을 보였다. 하지만 단위부피당 발열량이 증가함으로써 에너지 밀도가 상승하고, 목재칩의 소수성, 분쇄성이 증가함을 확인하였다. 반탄화를 통해 향상되는 상기의 특성으로 인해 반탄화 목재칩은 기존 목재칩과 비교하여 운반·저장·이용에 보다 용이한 형태의 연료로 가공됨을 확인하였다. 반탄화 목재칩을 생산하기 위해 투입되는 에너지 비용을 고려한 경제성 고찰 및 보다 나은 연료특성을 부여하기 위한 펠릿 및 브리켓 성형에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 2015년도 국립산림과학원 석·박사연구원십의 지원에 의해 이루어진 것임.

## References

- [1] Ajanovic A., Haas R., 2014, "CO<sub>2</sub>-reduction potentials and costs of biomass-based alternative energy carriers in Austria", *Energy*, 69, 120-131.
- [2] Lee, S. M., Lee, J. W., 2014, "Optimization of biomass torrefaction conditions by the gains and loss method and regression model analysis", *Bioresource Technol.*, 172, 438-443.
- [3] van der Stelt M. J. C., Gerhauser H., Kiel J. H. A., Ptasiński K. J., 2011, "Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a Review", *Biomass Bioenergy*, 35, 3748-3762.
- [4] Korea Forest Research Institute, 2013, "Korean National Standard for Wood Chips - Specifications and Quality Standards", Korea Forest Research Institute, Notification No 2013-4.

- [5] Korea Forest Research Institute, 2013, "Korean National Standard for Wood Pellets - Specifications and Quality Standards", Korea Forest Research Institute, Notification No. 2013-5.
- [6] Ahn, B. J., Chang, H. S., Cho, S. T., Han, G. S., Yang, I., 2013, "Effect of the addition of binders on the fuel characteristics of wood pellet", J. Korean Wood Sci. Technol., 41(6), 475-489.
- [7] Ahn, B. J., Chang, H. S., Lee, S. M., Choi, D. H., Cho, S. T., Han, G. S., Yang, I., 2014, "Effects of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust", Renewable Energy, 62, 18-23.
- [8] Ahn, B. J., Yang, I., Kim, S. T., Park, D., 2013, "Potential of torrefied Tulip-tree for the production of solid bio-fuels", New & Renewable Energy, 9(4), 40-50.
- [9] Lee, J., Ahn, B. J., Kim, E.-J., 2015, "Effects of the torrefaction process on the fuel characteristics *Larix kaempferi* C.", J. Korean Wood Science Technol., 42(2), 196-205.
- [10] Kim Y.-H., Lee S.-M., Lee H.-W., Lee J.-W., 2012, "Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*)", Bioresource Technol., 116, 120-125.
- [11] Na B.-I., Kim Y.-H., Lim W.-S., Lee S.-M., Lee H.-W., Lee J.-W., 2014, "Torrefaction of oil palm mesocarp fiber and their effect on pelletizing", Biomass Bioenergy, 52, 159-165.
- [12] Kamdem D. P., Pizzi A., Jermannaud A., 2002, "Durability of Heat-Treated Wood", Holz Roh Werkst, 60, 1-6.
- [13] Weiland J.J. and Guyonnet R., 2003, "Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy", Holz Roh Werkstoff, 61, 216-220.
- [14] Mei, Y., Liu, R., Yang, Q., Yang, H., Draper, C., Zhang, S., Chen, H., 2015, "Torrefaction of Cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas", Bioresource Technol., 117, 355-360.