



# 바이오매스 연료로서 미활용 농업부산물의 반탄화 특성

## Torrefaction Properties of Unused Agricultural Residues As Biomass Fuel

윤여성\* · 강 구\*\* · 박성직\* · 홍성구\*,†

Yoon, Yeo Seong · Kang, ku · Park, Seong Jik · Hong, Seong Gu

### Abstract

In South Korea, 25 % of annual agricultural residues (11.64 million tons) are unused. The hydrophilicity, low lower heating value (LHV), and low energy density of agricultural residues can be obstacles for efficient usage. Torrefaction, a low temperature pyrolysis process, can be a solution to overcome these disadvantage of agricultural residues. In this study, agricultural residues such as bean stem, pepper stem, perilla stem, sorghum stem, acorn shell, and ginkgo shell are torrefied at 200, 230, and 250 °C and evaluated energy properties, respectively. The torrefaction can increase the LHV and energy density rate of agricultural residues from 3,331~4,444 kcal/kg to 4,166~5,830 kcal/kg and 20~30 %, respectively.

**Keywords:** Biomass, Agricultural residue, Torrefaction, Renewable energy, Fuel

### 1. 서 론

최근 석유, 천연가스 등 화석연료의 가채 매장량 한계 등과 함께 2015년 파리협정 (Paris Climate Change Accord)의 체결로 신기후체제에 대응하기 위하여 바이오매스를 이용한 에너지 생산기술에 많은 관심과 연구를 수행하고 있다(Kang et al., 2017). 국내의 경우에도 2012년 RPS (Renewable Portfolio Standard; 신재생에너지 발전 의무비율할당제)제도를 도입함으로써 설비용량이 500 MW이상인 발전사들은 2014년 기준 3 % 이상을 신재생에너지로 생산하여야 한다(Mun et al., 2014). 이러한 RPS 제도를 의무적으로 행해야 하는 발전사들은 신재생에너지의 도입을 적극 추진하고 있으며, 특히 바이오매스와 석탄을 혼합하여 사용하는 혼소발전이 큰 관심을 보이고 있다(Cho et al., 2014; Jeeban et al., 2014; Kang et al., 2014; Lee et al., 2013).

바이오매스는 태양에너지를 이용하는 식물의 광합성에 의해 생성되는 식물체와 이를 먹이로 이용하여 살아가는 동물체를 포함한 생물 유기체 전체를 일컫으며, 바이오매스 유래

에너지는 탄소 중립성, 지속 가능성, 광범위한 이용 가능성으로 인해 실현가능한 신재생에너지로 간주되고 있다 (Matali et al., 2016; Yu et al., 2013). Park et al. (2011)에 따르면 2009년 기준 국내에서 농업활동 후 발생하는 부산물 바이오매스는 연간 약 1,164 만 톤이며, 그 중 약 75 %를 차지하는 볏짚과 왕겨는 주로 가축 사료나 깔짚으로 재이용되고 있는 반면 25 %의 발작물 부산물과 과수원 전지목 등은 대부분 농지에서 소각되거나 주변에 방치되고 있는 실정이다(Hong, 2015; Yu et al., 2013). 국내에서 발생하는 미활용 농업부산물 바이오매스를 석유환산톤으로 환산할 경우 11.5 만 TOE (Tonne of Oil Equivalent; 1 TOE = 10<sup>7</sup> kcal/ton)로, 우리나라 신재생에너지 공급목표의 5.0 %수준이며, 2009년 기준 석탄화력 발전량의 0.7 %에 달하는 규모이다 (Jeong and Kim, 2010; Yu et al., 2013). 하지만 농업부산물 바이오매스는 일반적으로 에너지 밀도가 낮고, 생산 지역이 광범위하며, 발생 시기도 균일하지 않기 때문에 수집, 수송에 따른 비용이 많이 소요되는 특성이 있다. 또한 일반적으로 수분함량이 높고, 높은 흡습성으로 인해 발열량 저하와 원료의 변질을 유발 (Deng et al., 2009)하기 때문에 연료로서 이용하기에는 어려움이 많다.

이러한 바이오매스의 문제점을 극복하기 위한 방법의 하나로써 반탄화에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있는데, 반탄화는 일반적으로 무산소 환경에서 상대적으로 낮은 온도 (200~300 °C)에서 짧은 시간 (~1시간)동안 열처리하는 공정이다. 반탄화를 통해 바이오매스 내 수분을 제거할 뿐 아니라 주요 구성 성분인 헤미셀룰로오스 (Hemicellulose)와 일부 셀룰로오스 (Cellulose)를 분해하여 낮은 발열량의 원인인 산소

\* Department of Bioresource and Rural Systems Engineering, Hankyong National University

\*\* Research Institute of Agricultural and Environmental Science, Hankyong National University

† Corresponding author

Tel.: +81-31-670-5134 Fax: +82-31-670-5139

E-mail: bb9@hknu.ac.kr

Received: April 21, 2017

Revised: August 2, 2017

Accepted: August 7, 2017

를 CO나 CO<sub>2</sub>의 형태로 제거함으로써 흡습성을 소수성으로 변화시키고, 발열량을 증가시킬 수 있다. 또한 반탄화된 바이오매스의 분쇄도(Grindability)가 양호해져 바이오매스 분쇄 시 에너지 소비가 3~7배 감소하여 저장과 운송 측면에서 비용을 절감할 수 있다 (Prins et al., 2006; Deng et al., 2009; Lee et al., 2013). 국외에서는 벚짚, 거대억새 (*Miscanthus x giganteus*), 왕갈대 (*Arundo donax* L.), 카나리아야자 (*Phoenix canariensis*) 부산물 등 다양한 바이오매스의 반탄화 연구가 진행되고 있는 반면 (Deng et al., 2009; Xue et al., 2014; Correia et al., 2017), 국내에서는 우드칩, Oil palm 등 주로 목질계 바이오매스의 반탄화 연구가 진행중이며 (Cho et al., 2014; Kang et al., 2014; Lee et al., 2013), 농업부산물 바이오매스의 반탄화 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 농가에서 버려지는 미활용 농업부산물 (콩대, 고춧대, 들깨대, 수수대, 도토리껍질, 은행껍질)의 동일한 시간 조건에서 반탄화 온도 조건만을 달리하여 연료로서의 특성을 분석하였다. 열량, 질량 수율, 에너지 수율, 에너지 밀도 등 에너지 특성을 검토하고, 신재생에너지로서의 활용 가능성을 파악하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 농업부산물 수집 및 전처리

본 연구에서 사용한 농업부산물은 경기도 안성시 인근 농가에서 직접 수집한 것으로, 줄기류 농업부산물 (콩대, 고춧대, 들깨대, 수수대)과 껍질류 농업부산물 (도토리껍질, 은행껍질)을 이용하였다. 수집한 농업부산물 중 줄기류 농업부산물은 작두를 이용하여 5~7 cm의 길이로 절단하였고, 껍질류 농업부산물은 열매를 제외한 껍질만을 이용하였다. 모든 농업부산물은 방치되어있는 상태를 재현하기 위해 대기중에서 풍건한 후 실험을 진행하였다.

### 2. 농업부산물 반탄화

반탄화 실험은 질소가스, 밀폐 반응조, muffle furnace (900 °C, 7.5 kW)로 구성되어있으며, Fig. 1과 같이 실험을 진행하였다. 반탄화를 진행하기 전, 반응조 내에 농업부산물 10 g을 넣고, 무산소 상태로 만들기 위해 질소를 분당 1 L의 유량으로 퍼징(Purging)하였다. 무산소 상태의 반응조는 muffle furnace에 투입하여 15 °C/분의 속도로 온도 조건 (200, 230, 250 °C)까지 승온시킨 후 45분간 반탄화를 진행하였다. 일반적으로 반탄화는 200~300 °C에서 진행하지만, 농업부산물의 경우 목질계 바이오매스에 비해 고온 조건의 반탄화 과정에서 에너

지 손실이 많기 때문에 (Deng et al., 2009), 본 연구에서는 250 °C이하의 온도 조건에서 반탄화를 진행하였다.

### 3. 농업부산물의 원소분석 및 에너지 특성 분석

반탄화 전후에 대한 농업부산물의 에너지 특성을 파악하기 위해 원소분석기 (Elemental analyzer 2400 series II, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 탄소(C), 수소(H), 질소(N), 황(S)의 함량을 측정하였고, 식 (1)을 이용하여 산소함량을 산출하였으며 (Matali et al., 2016; Li et al., 2016), 원소분석 결과를 토대로 식 (2)를 이용하여 농업부산물의 저위발열량을 산출하였다 (Kang et al., 2014).

$$O(\%) = 100 - [C(\%) + H(\%) + N(\%) + S(\%)] \quad (1)$$

$$LHV(kcal/kg) = 33,823 \times C + 114,250 \times (H - O/8) + 9,419 \times S \quad (2)$$

농업부산물의 반탄화 전과 후의 질량을 측정된 후 식 (3)을 이용하여 질량 수율 (Mass yield)을 계산하였고, 각 농업부산물의 반탄화 전과 후 저위발열량 값을 이용하여 식 (4)로 에너지 수율 (Energy yield)을 계산하였다. 마지막으로 질량 수율 및 에너지 수율을 이용하여 반탄화 전과 후의 에너지 밀도비 (Energy density rate)를 식 (5)와 같이 계산하였다 (Cho et al., 2014).

$$\text{Mass yield}(\%) = \frac{\text{Mass of after torrefaction}}{\text{Mass of before torrefaction}} \times 100(\%) \quad (3)$$

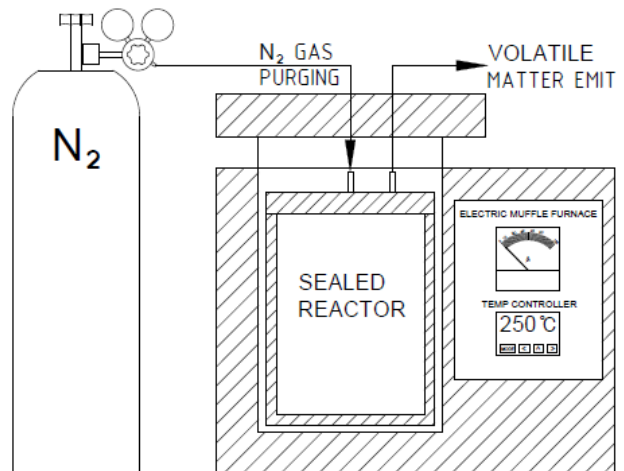


Fig. 1 Schematic diagram of the torrefaction process for agricultural residues

$$\text{Energy yield (\%)} = \frac{\text{LHV after torrefaction}}{\text{LHV before torrefaction}} \times \text{Mass yield (\%)} \quad (4)$$

$$\text{Energy density rate} = \frac{\text{Energy yield (\%)}}{\text{Mass yield (\%)}} \quad (5)$$

모든 실험은 동일한 시료를 이용하여 3반복 실험이 진행되었으며, 각 실험의 결과는 평균값으로 제시하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 반탄화에 따른 원소 및 저위발열량 변화

본 연구에서 사용한 농업부산물의 원소분석 결과를 Table 1에 나타내었으며, 농업부산물과 비교하기 위해 화력발전소에서 주로 사용되는 아역청탄 (Sub-bituminous coal)과 혼소에 사용되는 우드칩 (Woodchip)을 같이 제시하였다. 줄기류 농업부산물의 경우 탄소 42.6~44.8%, 수소 6.0~6.4%, 질소 0.5~1.2%, 산소 47.2~50.6%의 함량으로 나타났으며, 껍질류 농업부산물의 경우 탄소, 수소, 질소, 산소가 각각 48.1~48.9%, 6.2~6.9%, 0.3~1.6%, 43.9~44.1%로 나타났다. 줄기류 농업부산물의 경우 우드칩에 비해 낮은 탄소함량과 높은 산소 함량이 나타났으며, 껍질류 농업부산물은 상대적으로 비슷한 수준의 원소분석 결과가 나타났다. 농업부산물의 탄소함량은 아역청탄의 53.0~61.9% 수준이며, 산소함량의 경우 5배 많이 함유하고 있는데, 농업부산물의 낮은 탄소함량과 높은 산소함량은 연료의 낮은 저위발열량의 요인 [식 (2)]이기 때문에 연료로서의 가치가 떨어지는 것으로 판단된다. 특히 산소함량의 경우 연료의 단위중량당 저위발열량의 저하

요인으로서 감소시킬 필요가 있다.

반탄화 온도 변화에 따른 원소분석 결과를 Table 2에 제시하였다. 반탄화 온도 조건이 상승함에 따라 탄소함량의 경우 콩대 2.0~6.4%p, 고춧대 1.5~7.2%p, 들깨대 4.1~6.0%p, 수수대 1.9~7.0%p, 도토리껍질 4.2~9.9%p, 은행껍질 4.7~10.0%p 증가하였고, 산소함량은 각각 3.5~9.7%p, 2.9~10.2%p, 4.3~7.0%p, 2.6~7.6%p, 3.5~8.7%p, 4.5~11.3%p 감소하였으며, 수소함량과 질소함량은 각각 -0.8~0.7%p, -0.8~3.3%p로 나타나 큰 변화가 없었다. 농업부산물이 반탄화 과정을 통해 탄소함량이 증가하고, 산소함량이 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 반탄화 과정에서 휘발되는 성분이 탄소에 비해 산소가 많기 때문이며, 일반적으로 수산기 (OH) 손실에 의해 산소함량이 감소하는 것으로 보고되었다 (Matali et al., 2016). 반탄화를 통해 발생한 농업부산물의 중량당 탄소함량의 증가와 산소함량의 감소는 연료의 열량을 증가시킬 뿐 아니라 [식 (2)], 농업부산물의 특성을 소수성으로 변화시키기 때문에 (Li et al., 2016) 농업부산물의 연료로서 활용 가능성을 높일 것으로 판단된다.

Table 3은 농업부산물의 원소분석 결과를 토대로 식 (2)를 이용하여 산출한 저위발열량을 제시한 것이다. 반탄화 전 농업부산물의 저위발열량은 콩대 3,735.9 kcal/kg, 고춧대 3,807.1 kcal/kg, 들깨대 3,757.5 kcal/kg, 수수대 3,331.5 kcal/kg, 도토리껍질 4,144.4 kcal/kg, 은행껍질 4,444.2 kcal/kg으로 나타났다. 반탄화 온도 조건 200 °C에서의 저위발열량은 콩대 4,231.3 kcal/kg, 고춧대 4,004.2 kcal/kg, 들깨대 4,293.6 kcal/kg, 수수대 3,724.6 kcal/kg, 도토리껍질 4,639.1 kcal/kg, 은행껍질 4,969.8 kcal/kg로 나타났고, 230 °C에서는 콩대 4,344.9 kcal/kg, 고춧대 4,131.3 kcal/kg, 들깨대 4,473.4 kcal/kg, 수수대 3,975.7 kcal/kg, 도토리껍질 4,812.6 kcal/kg, 은행껍질

Table 1 Results of ultimate analysis on raw agricultural residues and other fuel

Raw materials	Components (%)				
	C	H	N	O	S
Bean stem	44.5±0.6	6.4±0.2	0.9±0.1	48.2±0.6	0.00
Pepper stem	45.2±0.5	6.3±0.3	1.2±0.1	47.2±0.4	0.00
Perilla stem	44.8±0.2	6.4±0.2	0.5±0.1	48.3±0.9	0.00
Sorghum stem	42.6±0.2	6.0±0.2	0.9±0.0	50.6±0.5	0.00
Acorn shell	48.1±0.1	6.2±0.3	1.6±0.2	44.1±0.5	0.00
Ginkgo shell	48.9±0.1	6.9±0.3	0.3±0.0	43.9±0.4	0.00
Woodchip <sup>1)</sup>	47.6	6.5	0.8	45.0	0.0
Sub-bituminous coal <sup>2)</sup>	79.0	5.3	1.5	10.0	0.2

<sup>1)</sup> Kang et al., 2014

<sup>2)</sup> Cho et al., 2014

**Table 2** Change in elemental components of agricultural residues by different torrefaction temperature

Torrefaction temp (°C)	Agricultural residues	Elemental components (%)			
		C	H	N	O
200	Bean stem	46,5±0,2	6,9±0,2	1,8±0,1	44,7±0,3
	Pepper stem	46,8±0,2	6,2±0,5	2,7±0,1	44,4±0,7
	Perilla stem	48,9±0,2	6,5±0,1	0,7±0,0	43,9±0,8
	Sorghum stem	44,5±0,2	6,4±0,2	1,3±0,2	47,9±0,5
	Acorn shell	52,3±0,1	6,3±0,1	0,8±0,1	40,6±0,3
	Ginkgo shell	53,6±0,3	6,8±0,2	0,2±0,2	39,5±0,6
230	Bean stem	50,5±0,3	6,1±0,2	1,1±0,1	42,4±0,7
	Pepper stem	47,0±0,2	6,5±0,1	2,5±0,1	44,1±0,3
	Perilla stem	49,8±0,2	6,6±0,1	1,0±0,0	42,6±0,4
	Sorghum stem	48,7±0,2	5,6±0,1	1,6±0,0	44,1±0,6
	Acorn shell	55,4±0,3	5,6±0,2	1,5±0,2	37,4±0,3
	Ginkgo shell	58,9±0,1	6,4±0,1	0,2±0,1	34,5±0,3
250	Bean stem	50,9±0,2	6,5±0,1	4,1±0,1	38,5±0,4
	Pepper stem	52,4±0,1	6,1±0,1	4,5±0,0	37,0±0,1
	Perilla stem	50,8±0,2	6,5±0,1	1,4±0,1	41,3±0,2
	Sorghum stem	49,6±0,2	5,8±0,1	1,6±0,1	43,0±0,4
	Acorn shell	58,0±0,2	5,2±0,1	1,4±0,1	35,3±0,4
	Ginkgo shell	59,0±0,1	7,2±0,0	1,3±0,0	32,6±0,4

5,474.7 kcal/kg로 나타났으며, 마지막으로 250 °C에서는 콩대 4,690.9 kcal/kg, 고춧대 4,762.5 kcal/kg, 들깨대 4,577.1 kcal/kg, 수수대 4,165.6 kcal/kg, 도토리껍질 4,974.9 kcal/kg, 은행껍질 5,830.3 kcal/kg로 나타나 반탄화 온도가 증가함에 따라 저위발열량도 같이 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 저위발열량의 증가는 탄소함량의 증가와 함께 산소함량의 감소에 기인한 것으로 보고되고 있다(Cho et al., 2014; Kang et al., 2014). 아역청탄의 42.76~57.05 % 수준이었던 농업부산물의 저위발열량이 반탄화를 통해 53.47~74.84 % 수준으로 상승하였으며, 우드칩 (4,168.8 kcal/kg)을 상회하는 결과가 나타나 화력발전소의 혼소연료로서 우드칩을 대체하기 충분할 것으로 판단된다.

**2. 반탄화에 따른 질량 수율, 에너지 수율 및 에너지 밀도 변화**

농업부산물의 반탄화 온도에 따른 질량 및 에너지 수율 변화를 Table 4에 제시하였다. 반탄화 온도가 증가할수록 질량 수율이 감소하였다. 250 °C조건에서 25.0~30.0%의 질량이 감소하였다. 질량 수율의 감소는 반탄화 과정에서 수분이 제거되고(150 °C이하), 헤미셀룰로오스(Hemicellulose; 200~240 °C)와 일부 셀룰로오스(Cellulose; 240~350 °C)가 분해됨에 따라

**Table 3** Changes in lower heating value (LHV) of agricultural residues by different torrefaction temperature

LHV of Agricultural residues (kcal/kg)				
Raw agricultural residues		Torrefied agricultural residues		
		Torrefaction temperature (°C)		
		200	230	250
Bean stem	3735,9	4231,3	4344,9	4690,9
Pepper stem	3807,1	4004,2	4131,3	4762,5
Perilla stem	3757,5	4293,6	4473,4	4577,1
Sorghum stem	3331,5	3724,6	3975,7	4165,6
Acorn shell	4144,4	4639,1	4812,6	4974,9
Ginkgo shell	4444,2	4969,8	5474,7	5830,3
Woodchip <sup>1)</sup>	4168,8			
Sub-bituminous coal <sup>2)</sup>	7790,6			

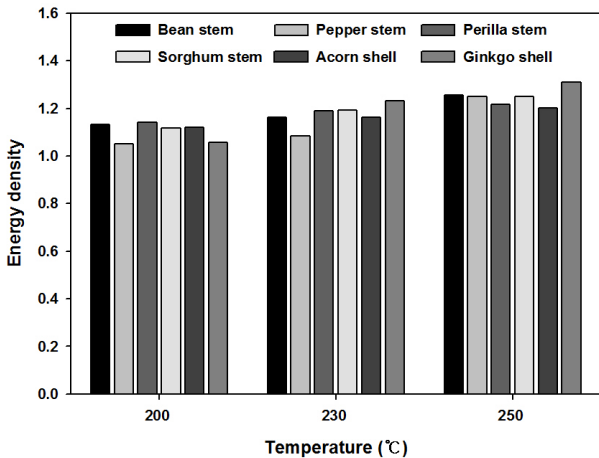
<sup>1)</sup> Kang et al., 2014

<sup>2)</sup> Cho et al., 2014

가스 및 휘발성 물질이 생성되어 제거되었기 때문이다(Deng et al., 2009; Correia et al., 2017; Matali et al., 2016). 에너지 수율의 경우 반탄화 온도가 증가함에 따라 콩대 97.4~91.7 %, 고춧대 93.6~88.8 %, 들깨대 97.1~90.1 %, 수수대 96.2~87.5 %, 도토리껍질 98.5~90.0 %, 은행껍질 97.2~94.5 %로 감소

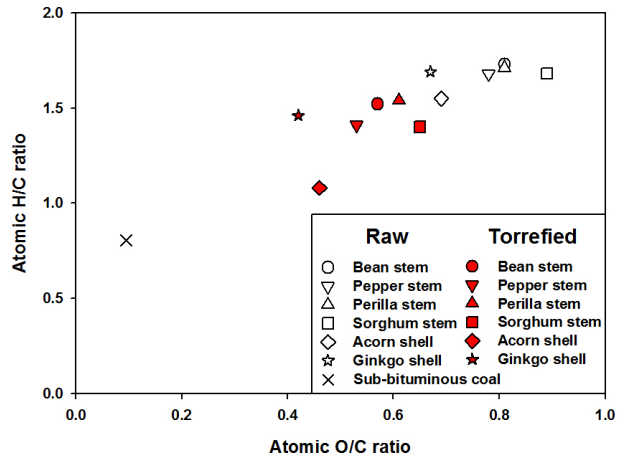
**Table 4** Change in mass and energy yield of agricultural residues by different torrefaction temperature

Torrefaction temp (°C)	Agricultural residues	Energy properties	
		Mass yield (%)	Energy yield (%)
200	Bean stem	86.0	97.4
	Pepper stem	89.0	93.6
	Perilla stem	85.0	97.1
	Sorghum stem	87.0	96.2
	Acorn shell	88.0	98.5
	Ginkgo shell	92.0	97.2
230	Bean stem	81.0	94.2
	Pepper stem	84.0	91.2
	Perilla stem	79.0	94.1
	Sorghum stem	76.0	90.7
	Acorn shell	83.0	96.4
	Ginkgo shell	78.0	96.1
250	Bean stem	73.0	91.7
	Pepper stem	71.0	88.8
	Perilla stem	74.0	90.1
	Sorghum stem	70.0	87.5
	Acorn shell	75.0	90.0
	Ginkgo shell	72.0	94.5



**Fig. 2** Changes in energy density of agricultural residues by different torrefaction temperature

하였는데, 에너지 수율의 감소는 식 (4)와 같이 질량 수율이 에너지 수율과 관계가 있기 때문으로 판단된다. 또한 농업부산물물의 모든 반탄화 조건에서 에너지 수율이 질량 수율보다 크게 나타났고, 온도 조건이 증가할수록 그 차이는 더 커져 오일담 바이오매스를 이용한 선행연구(Cho et al., 2014)와 동일한 경향으로 나타났다. 이는 반응온도가 증가할수록 농업



**Fig. 3** Van Krevelen diagram, comparing sub-bituminous coal with raw and torrefied (250 °C) agricultural residues

부산물에 포함된 수분, 휘발성 물질 및 헤미셀룰로오스가 과량 제거되어 질량 수율이 급감하기 때문으로 판단된다.

에너지 밀도는 투입 연료 단위 중량당 발열량으로 정의되며(Matali et al., 2016), 반탄화 공정을 통해 일반적으로 에너지 밀도비는 1.00 이상으로 향상된다. Cho et al. (2014)은 1.30~1.60의 에너지 밀도비가 나타날 때 효율적인 것으로 보고한 바 있다. 반탄화 온도에 따른 에너지 밀도비의 변화를 Fig. 2에 그래프로 나타내었다. 200 °C 온도 조건에는 1.05~1.14로 나타났고, 230 °C 온도 조건에서는 1.09~1.23으로 나타났다. 250 °C 온도 조건에서의 에너지밀도비는 콩대 1.26, 고춧대 1.25, 들깨대 1.22, 수수대 1.25, 도토리껍질 1.20, 은행껍질 1.31으로 1.30에 가깝게 나타나 반탄화 온도 조건이 증가할수록 에너지밀도비가 증가하는 경향의 결과가 나타났다. 이는 반탄화 온도가 증가할수록 에너지 수율과 질량 수율의 격차가 커지기 때문으로 판단된다[식 (5)]. 250 °C를 초과하는 온도에서 반탄화가 진행된다면 에너지밀도비의 상승이 추가적으로 이뤄질 것으로 판단되지만, 헤미셀룰로오스 및 셀룰로오스의 추가적인 분해로 인해 질량 수율과 에너지 수율의 급격한 감소를 야기한다(Cho et al., 2014; Matali et al., 2016). 질량 및 에너지 수율, 그리고 에너지 밀도비의 특성을 보았을 때, 농업부산물의 적정 반탄화 온도 조건은 250 °C로 판단된다.

### 3. 반탄화 운전에 의한 H/C 및 O/C비 변화

Fig. 3은 반탄화 전 농업부산물과 반탄화 농업부산물, 아역 청탄의 H/C, O/C 원자비를 Van Krevelen diagram (Van K. D. W., 1950) 상에 비교하여 나타낸 것이다. 반탄화 전 농업부산물 H/C, O/C비는 각각 1.55~1.73, 0.69~0.89로 나타났

으며, 250 °C, 45분 반탄화 과정을 통해 1.08~1.54, 0.42~0.65로 감소하여 반탄화를 통해 농업부산물의 화학적 성상이 아역청탄과 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 H/C 비의 감소는 혼소 시 불꽃의 안정성을 의미하고, O/C 비의 감소는 바이오매스의 미생물에 의한 분해 가능성의 감소를 의미한다 (Lee, 2015). 반탄화에 의한 H/C 및 O/C 비의 변화는 수분 방출과, 탈카르복실화 (Decarboxylation), 탈카르보닐화 (Decarbonylation), 탈수 (Dehydration) 반응 뿐 아니라 아세트산 또는 메탄올과 같은 휘발성 산소 화합물의 형태로 인한 산소의 부분적 제거에 기인한다고 보고되고 있다 (Correia et al., 2017). 반탄화를 통한 농업부산물의 열량, 생물학적 안정성, 그리고 혼소 시 연소의 안정성이 증가함에 따라 연료의 수송 및 저장에 용이해지기 때문에 활용 가치도 함께 증가할 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 경기도 안성시 인근 농가에서 수집한 농업 부산물 (콩대, 고춧대, 들깨대, 수수대, 도토리껍질, 은행껍질)을 이용하여 반탄화를 수행하였으며, 반탄화 온도 (200, 230, 250 °C)를 달리하여 에너지 특성 변화를 탐색하였다. 반탄화를 수행한 결과, 탄소함량이 증가하고, 산소함량이 감소하였으며, 3,331~4,444 kcal/kg 수준의 저위발열량이 4,166~5,830 kcal/kg으로 증가하여 혼소 연료로서 주로 이용되는 우드칩을 상회하는 결과가 나타났다. 또한 에너지 밀도가 반탄화 과정 전과 비교해 볼 때 1.20~1.31배 높아졌으므로 석탄 혼소 시 연소의 안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과들을 토대로 농업부산물 (콩대, 고춧대, 들깨대, 수수대, 도토리껍질, 은행껍질)의 최적 반탄화 온도 조건은 250 °C으로 판단되며, 반탄화 농업부산물은 연료로서 우드칩 이상의 가치를 가지므로, 화력발전소 혼소연료로서 이용할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 분야에서 고품연료로 활용이 가능하다.

#### REFERENCES

1. Cho, H. S., Y. J. Sung, C. H. Kim, G. S. Lee, S. J. Yim, H. G. Nam, J. Y. Lee, and S. B. Kim, 2014. Study of Oil Palm Biomass Resources (Part 3) - Torrefaction of Oil Palm Biomass -. *Journal of Korea Technical Association of The Pulp and Paper Industry* 46(1): 18-28 (in Korean).
2. Correia, R., M. Goncalves, C. Norbe, and B. Mendes, 2017. Impact of torrefaction and low-temperature carbonization on the properties of biomass wastes from *Arundo donax* L. and

- Phoenix canariensis. *Bioresource Technology* 223: 210-218.
3. Deng, J., G. J. Wang, J. H. Kuang, Y. L. Zhang, and Y. H. Luo, 2009. Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 86: 331-337.
4. Gong, S. H., B. J. Ahn, S. M. Lee, J. J. Lee, Y. K. Lee, and J. W. Lee, 2016. Thermal Degradation Behavior of Biomass Depending on Torrefaction Temperatures and Heating Rates. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 44(5): 685-694 (in Korean).
5. Hong, S. G., 2004. Evaluation of Agricultural Biomass Resources for Renewable Energy - Biomass from Orchards and Non-paddy Fields -. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 46(3): 85-92 (in Korean).
6. Hong, S. G., 2008. Future Agriculture Considering Combined Use of Biomass Resources. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(2): 42-51 (in Korean).
7. Hong, S. G., 2015. Strategies for Increasing Biomass Energy Utilization in Rural Areas - Focusing on heating for greenhouse cultivation -. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(6): 9-20 (in Korean).
8. Jeeban, P., W. T. Kim, T. I. Ohm, and S. C. Oh, 2014. A Study on Torrefaction Characteristics of Bagasse. *Korean Chemical Engineering Research* 52(5): 672-677 (in Korean).
9. Jeong, N. Y. and L. H. Kim, 2010. The Study of Economic Feasibility of Wood Pellet in Domestic Power Plants Sector. *Journal of Energy Engineering* 19(4): 251-257 (in Korean).
10. Kang, B., Y. W. Lee, C. K. Ryu, and W. Y., 2017. Application of Various Biomasses to Pulverized Coal Power Plants in Terms of their Grindability. *Clean Technology* 23(1): 73-79 (in Korean).
11. Kang, K., L. Wang, and S. G. Hong, 2014. The Characterization of Woodchip Torrefaction and Byproduct Gas. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(6): 55-62 (in Korean).
12. Kim, Y. H., B. I. Na, S. M. Lee, H. W. Lee, and J. W. Lee, 2013. Optimal Condition for Torrefaction of Eucalyptus by Response Surface Methodology. *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 41(6): 497-506 (in Korean).
13. Lee, M. S., G. S. Jeong, S. J. Jung, and K. Y. Lee, 2013. The Fuelization Study on the Oil Palm Frond Through Torrefaction. *Korean Chemical Engineering Research* 51(4): 465-469 (in Korean).
14. Lee, W. J., 2015. Study on Torrefaction Characteristics of Solid Biomass Fuel and Its Combustion Behavior. *Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association* 23(4): 86-94 (in Korean).
15. Li, M. F., L. X. Chen, X. Li, C. Z. Chen, Y. C. Lai, X. Xiao, and Y. Y. Wu, 2016. Evaluation of the structure and fuel properties

- of lignocelluloses through carbon dioxide torrefaction. *Energy Conversion and Management* 119: 463-472.
16. Matali, S., N. A. Rahman, S. S. Idris, N. Yaacob, and A. B. Alias, 2016. Lignocellulosic, Biomass solid Fuel Properties Enhancement via Torrefaction. *Procedia Engineering* 148: 671-678.
  17. Mun, T. Y., Z. T. Tefera, U. D. Lee, J. W. Lee, and W. Yang, 2014. Evaluation of Plant Performance during Biomass Co-firing in Pulverized Coal Power Plant. *Journal of the Korean Society of Combustion* 19(3): 8-17 (in Korean).
  18. Nam, H. S. and S. Capareda, 2015. Experimental investigation of torrefaction of two agricultural wastes of different composition using RSM (response surface methodology). *Energy* 91: 507-516.
  19. Oh, D. G., Y. H. Kim, and H. S. Son, 2013. Fuel Properties of Spent Coffee Bean by Torrefaction. *Journal of the Korean society for New and Renewable Energy* 9(3): 29-35 (in Korean).
  20. Park, D. H., B. J. Ahn, S. T. Kim, J. W. Lee, G. S. Han, and I. Yang, 2015. Microscopic Observation of Pellets Fabricated with Torrefied Larch and Tulip Tree Chips and Effect of Binders on the Durability of the Pellets. *Korean Chemical Engineering Research* 53(2): 224-230 (in Korean).
  21. Park, W. K., N. B. Park, J. D. Shin, S. G. Hong, and S. I. Kwon, 2011. Estimation of Biomass Resource Conversion Factor and Potential Production in Agricultural Sector. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 30(3): 252-262 (in Korean).
  22. Prins, M. J., K. J. Ptasinski, and F. J. J. G. Janssen, 2006. Torrefaction of wood Part 1. Weight loss kinetics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77(2006): 28-34.
  23. Ren, X., R. Sun, X. Meng, N. Vorobiev, M. Schiemann, and Y. A. Levendis, 2017. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. *Fuel* 188: 310-323.
  24. Sh, L., S. I. Kim, H. Lim, B. H. Lee, S. M. Kim, and C. H. Jeon, Experimental Investigation into the Combustion Characteristics on the Co-firing of Biomass with Coal as a Function of Particle Size and Blending Ratio. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B* 40(1): 31-37 (in Korean).
  25. Van K. D. W., 1950. Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal. *Fuel*. 29: 269-284.
  26. Xue, Gang, M. Kwapinska, W. Kwapinska, K. M. Czajka, J. Kennedy, and J. J. Leahy, 2014. Impact of torrefaction on properties of *Miscanthus x giganteus* relevant to gasification. *Fuel* 121: 189-197.
  27. Yu, G. D., H. B. Na, G. H. An, B. C. Koo, J. W. Ahn, Y. H. Moon, Y. L. Cha, Y. M. Yoon, J. W. Yang, and I. H. Choi, 2013. Physicochemical Characteristics for Bale Types and Storage Periods of Agricultural By-products as a Lignocellulosic Biomass. *Korean Journal of Crop Science* 58(3): 324-330 (in Korean).
  28. Zhang, Z., G. Zhang, W. Li, C. Li, and G. Xu, 2016. Enhanced biogas production from sorghum stem by co-digestion with cow manure. *International Journal of Hydrogen* 41: 9153-9158.