

낙엽송 반탄화 바이오매스를 이용한 고밀도 고품연료 생산¹

송 대 연² · 안 병 준³ · 공 성 호² · 이 재 정³ · 이 형 우² · 이 재 원^{2,†}

Production of High-density Solid Fuel Using Torrefied Biomass of Larch Wood ¹

Dae-Yeon Song² · Byoung-Jun Ahn³ · Sung-Ho Gong² · Jae-Jung Lee³ ·
Hyung-Woo Lee² · Jae-Won Lee^{2,†}

요 약

본 연구에서는 반탄화된 낙엽송 칩을 분쇄한 후 그 입자를 이용한 펠릿성형에서 함수율과 입자크기의 영향을 반탄화 조건(220℃-50분, 250℃-50분, 250℃-120분)에 따라 조사하였다. 반탄화 후 함수율은 0.69~1.75%로 반탄화 처리전의 5.26%보다 낮았으나, 회분이나 발열량은 증가하였다. 또한 반탄화에 의한 중량감소율은 크게 증가하였는데 이는 헤미셀룰로오스의 분해가 활발하게 일어났기 때문으로 생각된다. 반탄화 낙엽송 칩에 포함된 탄소함량은 반탄화 처리 전 낙엽송 칩과 비교하여 증가하였으며 수소와 산소함량은 감소하였다. 반탄화 낙엽송 칩에 포함된 리그닌과 글루칸 함량은 반탄화 정도가 증가할수록 증가하였으며 헤미셀룰로오스는 감소하였다. 반탄화 칩을 분쇄하여 입자크기분포를 비교한 결과 높은 반탄화 조건은 낮은 반탄화 조건에서보다 1 mm 이하의 미세분 함량이 높았고 500 Å 이상의 macropore가 생성되었다. 반탄화 분쇄 입자를 이용한 펠릿성형 과정에서 입자크기와 관계없이 반탄화 분쇄 입자의 함수율이 증가할수록 투입된 반탄화 분쇄 입자가 받는 압력은 감소하였으며 펠릿길이는 증가하였다.

ABSTRACT

In this study, the effects of moisture content and particles size of ground particles of torrefied larch chips on the pelletizing process were investigated depending on torrefaction conditions (220℃-50 min, 250℃-50 min, 250℃-120 min). The moisture content in the torrefied chip decreased to 0.69~1.75%, while ash content and calorific value increased compared to untreated chip. In addition, weight loss significantly increased during torrefaction due to hemicellulose degradation. The carbon content in torrefied larch chip increased compare to untreated larch chip, while the hydrogen and oxygen contents decreased. The lignin and glucan contents in torrefied larch chip increased with

¹ Date Received October 31, 2014, Date Accepted January 20, 2015

² 전남대학교 농업생명과학대학 산림자원학부. Department of Forest Products and Technology, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Republic of Korea

³ 국립산림과학원 임산공학부 화학미생물과. Division of Wood Chemistry & Microbiology, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

[†] 교신저자(Corresponding author) : 이재원(e-mail: ljw43376@chonnam.ac.kr)

increasing severity of the torrefaction condition, while hemicellulose decreased. In the particle size distribution of ground particles of torrefied larch chip, larch torrefied at severe conditions was found to produce smaller particles (~1 mm) than that of the larch torrefied at mild conditions. Macropore (over 500 Å) in the torrefied particle was produced during torrefaction. During the pelletizing using ground particles of torrefied larch chip, the pressure needed in pelletizing decreased and pellet length increased with increasing moisture content, regardless of the particle size.

Keywords : torrefaction, torrefied larch, pelletizing

1. 서 론

세계적으로 화석연료의 고갈이 예측되고 있으나 급속한 산업화 및 인구증가는 화석연료 소비를 증가시키고 이에 따른 환경오염 문제가 제시되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 태양열, 조력, 풍력, 바이오매스를 이용한 다양한 신재생에너지 사용에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 바이오매스는 자원 순환적인 측면에서 재생가능하고 탄소중립이라는 특징의 친환경적인 소재로 알려져 있다.

목질계 바이오매스를 에너지원으로 사용하는 방법은 다양하다. 바이오에탄올, 바이오오일과 같은 액체 상태의 연료에서 목재펠릿과 같은 고체연료가 있다. 고체연료 중 대표적인 형태는 목재펠릿이다. 목재펠릿은 바이오매스를 균일한 크기로 분쇄한 후 높은 온도와 압력으로 압축하여 일정한 크기로 성형한 고체상 연료를 말한다. 일반적으로 지름 6~8 mm, 길이 32 mm 이하로 균일하게 제조되기 때문에 보일러에 사용할 경우 쉽게 시료를 공급할 수 있는 장점이 있다. 목재펠릿은 처리하지 않은 바이오매스에 비해 높은 에너지밀도와 균일한 형태를 가지게 되어 저장 및 수송이 용이하며, 운송비용 또한 절감할 수 있다 (Simes *et al.* 1998).

하지만 목재펠릿은 화석연료에 비하여 상대적으로 낮은 에너지밀도와 높은 함수율을 가지고 있으며, 흡습으로 인한 저장문제, 수종과 형상에 따른 성형문제 등의 문제점을 가지고 있다. 특히 타 연료 대비 경제성이 낮고, 부족한 목재자원에 따른 다양한 종류의 바이오매스 활용에 대한 문제가 풀어야 할 숙제로 남아있다. 이러한 단점들을 극복하기 위한 방법으로 최근 반탄화에 대한 연구가 진행되고 있다(Chen and

Kuo 2011; Kim *et al.* 2012).

반탄화는 열처리 방법 중 하나로 원료의 연소를 방지하기 위해 무산소 또는 질소 환경에서 상대적으로 낮은 온도(200~300℃), 1시간 이내로 처리하는 것이 일반적이다. 이러한 열처리 과정 중 바이오매스에 존재하는 수산기가 제거되어 바이오매스는 소수성의 성질을 가지며 수분 및 휘발성 물질 제거에 의해 상대적으로 발열량이 향상된다(Prins *et al.* 2006). 소수성에 의해 장기간 보관이나 수송에 적합하게 되며, 상대적인 발열량 향상은 에너지밀도를 증가시킨다. 뿐만 아니라 열처리에 의해 일부의 헤미셀룰로오스가 제거되면서 원료를 분쇄할 때 요구되는 소요 에너지를 절감할 수 있다(Shang *et al.* 2012). 반탄화 과정을 거쳐 수분 및 휘발성 물질을 제거하고 압축 성형한다면 에너지밀도가 향상되어 수송비용을 최대 30% 이상 절감할 수 있을 것이다(Bergman *et al.* 2005; Peduzzi *et al.* 2014). 현재 목재펠릿 소비자가 가격의 10% 이상을 수송비용이 차지하고 있는 실정이다. 이를 고려할 때 반탄화 재료로 펠릿을 제조하면 에너지밀도를 향상시켜 연료적 특성을 향상시킬 수 있고, 운송비 절감 등 경제성을 개선할 수 있다.

하지만 반탄화 바이오매스를 이용하여 펠릿을 성형할 경우 몇 가지 고려해야 할 점들이 있다. 첫째, 반탄화 과정에서 친수성과 관련된 수산기를 잃어버렸기 때문에 펠릿성형 과정에서 첨가한 수분과 바이오매스의 상호작용이다. 둘째, 바이오매스 입자크기와 펠릿성형의 상관관계이다. 반탄화 바이오매스는 반탄화 과정에서 물리적인 분쇄가 일부 이루어지며 헤미셀룰로오스 제거로 쉽게 분쇄할 수 있어 분쇄과정에서 에너지를 절감할 수 있다. 하지만 이러한 결과로 상대적으로 많은 미세분이 발생하여 펠릿성형

에서 높은 압력이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 낙엽송 반탄화 바이오매스의 입자크기 및 수분을 바탕으로 반탄화 바이오매스 펠릿성형에 관여하는 인자 및 성형조건을 탐색하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 연구에서 사용된 낙엽송 칩(*Larix kaempferi* C.)은 국립산림과학원 임산공학부로부터 제공받았으며, 표준체(9.5, 31.5 mm)를 이용하여 약 10~30 mm의 크기로 분리한 후 상온에서 보관하였다.

2.2. 반탄화 공정

반탄화에 사용된 낙엽송 칩은 105 ± 3℃의 건조기에서 48시간 이상 건조하여 수분을 제거한 후 전건 상태를 유지하였다. 반탄화는 반응기의 가열 및 내부의 시료를 순환시킬 수 있도록 제작된 반탄화 반응기((주)건조기술)로 수행하였다(Lee *et al.* 2012). 반탄화 조건은 반탄화 정도에 따라 220℃에서 50분, 250℃에서 50분, 250℃에서 120분으로 하였다. 반응기에 500 g의 낙엽송 칩을 투입하여 반응온도와 시간을 설정하고 반응온도에 도달한 후 반응시간을 유지하여 반탄화를 수행하였다. 반응이 종료된 후 반응기 온도를 100℃ 이하로 냉각시키고 반탄화된 칩을 회수하였다.

2.3. 반탄화 낙엽송 칩의 물리, 화학적 특성

반탄화 낙엽송 칩의 함수율, 회분, 발열량은 국립산림과학원의 “목재펠릿 규격·품질기준(제2013-5호)”에 기술된 방법에 의해 측정하였다. 원소분석은 EA 1110 원소분석기(CE Instruments Inc., Rodano, Italy)를 사용하였다. 반탄화 낙엽송 칩의 구성성분 분석은 NREL 방법(Laboratory Analytical Procedure-Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass)에 의해 실시하였다(Sluiser *et al.* 2008).

반탄화 낙엽송 칩은 분쇄기(TF-F-6, Yyosung Co., Korea)를 이용하여 분쇄한 후 입자크기분포를 측정하기 위해 약 30 g의 시료를 채취하였다. 표준체(1~4 mm, 1 mm 이하)를 이용하여 입자크기에 따라 분리한 후 분리된 반탄화 분쇄 입자의 중량을 측정하여 입자크기분포를 계산하였다.

반탄화 전후의 수분흡수능력을 측정하기 위해 1 mm 이하의 반탄화 처리전 낙엽송 및 반탄화 입자를 선별한 후 30분 동안 증류수에 침지시켰다(Pimchuai *et al.* 2010). 침지되었던 반탄화 입자를 일정 시간 동안 여과한 후 함수율을 측정하여 반탄화 조건별 수분흡수능력을 조사하였다.

반탄화 전후의 비표면적 변화는 Surface Area and Porosimetry Analyzer (ASAP 2020 Micromeritics Instruments, USA)로 분석하였다.

2.4. 반탄화 펠릿성형

펠릿성형을 위해 single pelletizer를 사용하였으며 본 연구에서 사용된 장치는 Fig. 1과 같다. 펠릿성형 다이 크기는 직경 8 mm, 길이 40 mm로 선행연구에 의해 펠릿성형에 적합한 조건을 선택하여 사용하였다. 펠릿성형 다이 온도는 120℃로 유지하여 분쇄된 반탄화물(1~4 mm와 1 mm 이하) 약 0.25 g을 투입하였다. 시료 투입 후 피스톤을 이용하여 5초 동안 압축한 후 피스톤을 제거하였다. Load cell speed는 127 mm/min으로 고정하였으며 이와 같은 과정을 100회 이상 반복하여 펠릿을 성형하였다. 반탄화 조건에 따라 함수율(15~35%)을 조절하였으며 입자크기(1~4 mm, 1 mm 이하)에 따라 같은 방법으로 펠릿을 성형하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 반탄화 낙엽송 칩의 연료적 특성 변화

반탄화 전후 낙엽송 칩에 대한 함수율, 회분, 발열량은 Table 1에 나타났다. 함수율의 경우 처리 전 시료는 5.26%였으며, 반탄화 처리 후에는 0.69~1.75%

Table 1. Physical properties of untreated and torrefied larch chip at various torrefaction conditions

Torrefaction condition	Moisture content (%)	Ash (%)	Calorific value (MJ/kg)	Weight loss (%)	Energy yield** (%)
Raw material	5.26*	0.26*	18.52*	-	-
220°C, 50 min	1.75	0.39	19.30	4.85	99.16
250°C, 50 min	1.65*	0.42*	20.85*	12.71*	98.25*
250°C, 120 min	0.69	0.34	21.38	16.38	96.53

* Published data (Na *et al.* 2013)

** Energy yield (%) = $(m_{\text{torrefied}}/m_{\text{initial}}) \times (E_{\text{torrefied}}/E_{\text{initial}})$

($m_{\text{torrefied}}$: dry mass of torrefied biomass, m_{initial} : dry mass of untreated biomass, $E_{\text{torrefied}}$: specific energy content of biomass after torrefaction, E_{initial} : specific energy content of biomass before torrefaction)

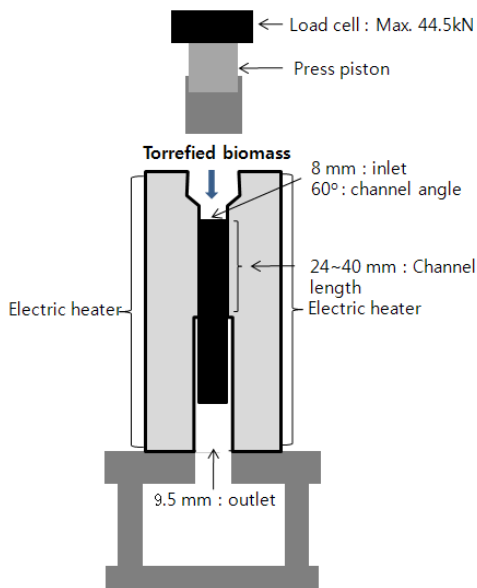


Fig. 1. Design of single pelletizer used in this study.

로 낮은 함수율을 나타냈다. 회분 함량은 0.34~0.42%로 처리 전 시료와 비교하였을 때 약간 상승하였으며 이는 반탄화 과정 중에 낙엽송 칩의 중량감소에 따른 상대적인 증가이다. 이와 같이 반탄화에 의한 수분 감소 및 회분 증가의 경향은 기존 연구결과와 일치하였다(Lee *et al.* 2012; Uemura *et al.* 2011). 반탄화의 정도가 증가할수록 중량감소율과 발열량은 상대적으로 증가하였다. 중량감소는 250°C, 50분 조건에서 급격하게 일어났으며 250°C, 120분에

서는 최대 16.38%의 중량감소율을 나타냈다. 열분해에 의한 바이오매스의 분해에서 헤미셀룰로오스는 250°C 정도에서 분해가 시작되어 이와 같은 조건에서 중량감소가 급격하게 일어난 것으로 사료된다(Di Blasi and Lanzetta 1997; Phanphanich and Mani 2010).

중량감소율과 비례하여 발열량은 증가하였으며 최대 15.44% 증가를 나타냈다. 반탄화 과정에서 발열량 향상에 부정적인 영향을 주는 인자인 수분, 휘발성물질 등이 제거되고 헤미셀룰로오스 일부가 분해되었다. 따라서 바이오매스에는 상대적으로 높은 함량의 셀룰로오스와 리그닌을 포함하고 있어 발열량 향상에 영향을 주었다(Lehtikangas 2001). 그러나 반탄화 과정에서 발생하는 중량감소는 원료가 가지는 에너지의 손실을 의미하기 때문에 반탄화 효율을 비교하기 위해서는 중량감소를 고려한 에너지수율로 비교할 수 있다. 에너지수율을 비교한 결과 반탄화 정도가 증가할수록 에너지수율은 감소하였다. 이것은 발열량 증가보다 중량감소가 급격하게 일어났음을 의미한다. 낮은 반탄화 정도에서 높은 에너지수율을 나타냈다. 따라서 목적에 적합한 최적의 반탄화 조건을 탐색하는 것이 중요하다.

반탄화 전후의 낙엽송 칩에 대한 원소분석 결과는 Table 2와 같다. 반탄화 처리 전 낙엽송의 탄소함량은 49.36%였으며 반탄화에 의해 3.26~14.77% 증가하였다. 반면 수소와 산소함량은 감소하는 경향을 나타냈다. 이것은 반탄화 과정에서 수산기가 감소되면

Table 2. Elemental analysis of untreated and torrefied larch chip at various torrefaction conditions

Torrefaction condition	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Raw material	49.36*	5.96*	37.63*	0.22*
220℃, 50 min	50.97	5.85	36.75	0.20
250℃, 50 min	53.43*	5.76*	34.80*	0.26*
250℃, 120 min	56.65	5.48	31.67	0.24

* Published data (Na *et al.* 2013)

Table 3. Chemical composition of torrefied larch chip at different conditions

Torrefaction condition	Glucan (%)	Xylan + Galactan (%)	Arabinan (%)	Total lignin (%)
Raw material	35.46	23.35	4.65	29.69
220℃, 50 min	37.79	21.38	4.57	34.68
250℃, 50 min	39.44	13.42	3.46	41.99
250℃, 120 min	41.93	2.41	2.34	56.95

서 수소와 산소의 함량이 감소되고 상대적으로 탄소의 함량이 증가되었음을 의미한다. 따라서 탄소의 증가는 발열량 증가와 밀접한 관계를 가지며 반탄화 정도가 증가할수록 발열량이 증가하는데 크게 작용하였음을 나타내는 것으로 생각된다. 이와 같은 원소 분석 경향은 기존의 연구결과와 유사하게 나타났다 (Kim *et al.* 2012; Prins *et al.* 2006).

3.2. 반탄화에 의한 낙엽송 구성성분 함량 변화

반탄화 과정에서 바이오매스의 주요 구성성분 중 헤미셀룰로오스의 분해가 가장 먼저 일어나며 반탄화 조건에 따라 셀룰로오스, 리그닌의 일부가 분해된다. 헤미셀룰로오스의 분해산물로 다양한 단당류 및 유기산이 발생하는 것으로 알려져 있다 (Na *et al.* 2013). 본 연구에서 수행된 반탄화 조건에서 낙엽송 칩의 구성성분 변화를 Table 3에 나타내었다. 헤미셀룰로오스 구성성분인 갈락탄, 자이란, 아라비난은 반탄화 정도가 증가할수록 감소하였다. 반면 글루칸 및 리그닌은 상대적인 증가를 나타냈다. Table 1에서 나타난 중량감소가 250℃, 50분에서 급격한 변화를 나타내었던 결과와 헤미셀룰로오스 중 자이란과 갈락탄 함량 감소 결과와 일치하였다. 일반적으로 280℃

이상에서 셀룰로오스, 300℃ 이상에서 리그닌의 분해가 이루어지며, 250℃에서 이루어진 본 연구의 반탄화에서는 셀룰로오스와 리그닌의 분해는 거의 진행되지 않았던 것으로 생각되며, 이와 같은 결과는 기존의 연구결과와 일치하였다 (Chen and Kuo 2011; Kim *et al.* 2012). 리그닌 함량의 상대적인 증가는 발열량 향상에 직접적인 영향을 주는 인자로 Table 1에서 확인한 것과 같이 반탄화 낙엽송 칩의 발열량을 향상시켰다 (Lehtikangas 2001).

반탄화에 의한 낙엽송 칩의 분쇄특성은 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 펠릿성형에 적합한 입자크기로 알려진 1~4 mm와 미세분으로 구분되는 1 mm 이하로 구분하여 분쇄특성을 확인하였다 (Lee *et al.* 2013). 반탄화 처리 전 낙엽송 칩을 분쇄한 결과 1~4 mm 입자는 전체 53.49%로 나타났으며 반탄화 정도가 증가할수록 40.5~43.5%로 감소하였다. 반면 미세분인 1 mm 이하의 입자분포는 46.51%에서 56.5~59.5%로 증가하였다. 이와 같은 현상은 반탄화 과정에서 발생하는 물리적인 파쇄와 바이오매스로부터 수분 감소 및 헤미셀룰로오스 분해로 입자 수축에 의한 것으로 생각된다 (Kim *et al.* 2012). 반탄화 과정에서 발생하는 미세분의 증가는 이후 펠릿성형에 부정적인 영향을 줄 수 있기 때문에 펠릿성형을 고려한 반탄화 조건이 제시되어야 한다.

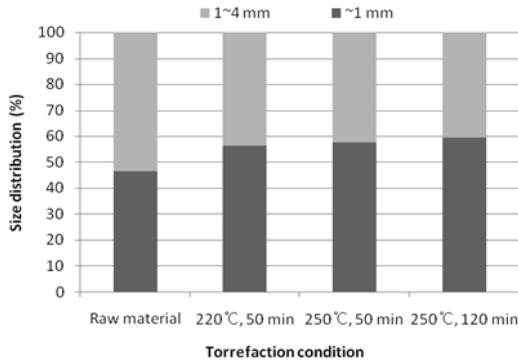


Fig. 2. Particle size distribution after grinding of torrefied larch chip at different conditions.

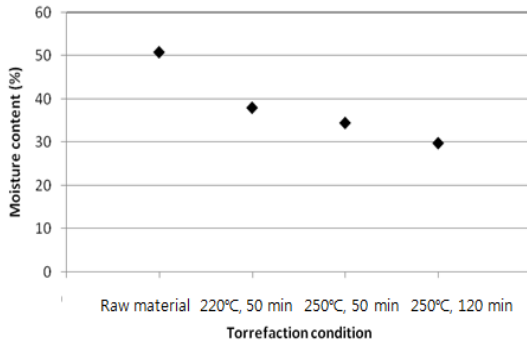


Fig. 3. Changes of moisture content in torrefied larch after soaking in water for 30 min.

3.3. 반탄화에 의한 바이오매스 흡습성

목재펠릿 원료의 수분흡수능력은 목재펠릿의 저장 및 펠릿성형에 중요한 요인으로 작용한다. 목재펠릿은 저장 중에 수분을 흡수할 경우 목재펠릿 내구성 및 미생물 오염에 대한 문제를 야기하여 목재펠릿으로서의 기능을 못하게 된다. 따라서 반탄화는 이와 같은 단점을 극복하기 위한 효과적인 방법으로 생각된다.

반탄화 처리 온도 및 시간이 증가할수록 반탄화 시료의 수분흡수능력이 감소하였는데, 수분흡수능력이 처리 전 50.79%에서 250°C, 120분에서 반탄화하면 29.81%까지 감소하였다(Fig. 3). 이러한 결과는

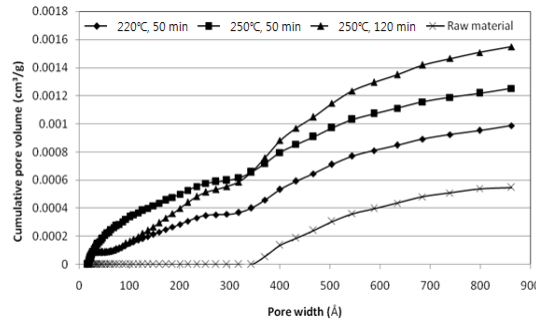


Fig. 4. Changes of pore size distribution based on N₂ adsorption for untreated and torrefied larch.

반탄화 과정에서 친수성의 수산기가 감소함에 의한 것으로 생각되며, 그 결과 반탄화 시료가 소수화되어 가는 것을 의미한다(Satpathy *et al.* 2014; Chen *et al.* 2014).

3.4. 반탄화에 의한 공극의 크기 및 분포 변화

반탄화 칩을 분쇄한 후 분쇄 입자의 공극 크기 및 분포는 Fig. 4와 같다. International Union of Pure and Applied Chemistry 기준에 의하면 공극의 크기가 20 Å 이하는 micropore, 20~500 Å은 mesopore, 500 Å 이상은 macropore로 구분하고 있다. 반탄화 정도가 증가할수록 모든 크기의 공극에서 공극의 면적은 증가하였다. 특히 macropore 영역에서 큰 차이를 나타냈으며 이와 같은 공극의 형성은 휘발성 물질과 헤미셀룰로오스 제거에 의한 것이다(Chen *et al.* 2014). 그러나 290°C에서 30분 이상의 반탄화 조건에서는 macropore는 감소하고 micropore가 증가한다. 이것은 바이오매스의 주요구성성분이 분해되면서 생산되는 다양한 분해산물들이 공극을 막기 때문에 macropore는 감소하고 미세공극인 micropore가 증가한 것이다(Chen *et al.* 2014; Melkior *et al.* 2012). 하지만 본 연구에서 수행한 반탄화 조건에서는 셀룰로오스, 리그닌의 분해가 거의 일어나지 않았기 때문에 macropore의 증가만을 나타낸 것으로 판단된다.

낙엽송 반탄화 바이오매스를 이용한 고밀도 고품질 연료 생산

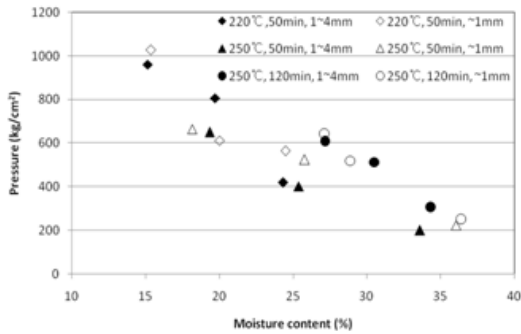


Fig. 5. Effect of moisture content of torrefied larch on pelletizing pressure.

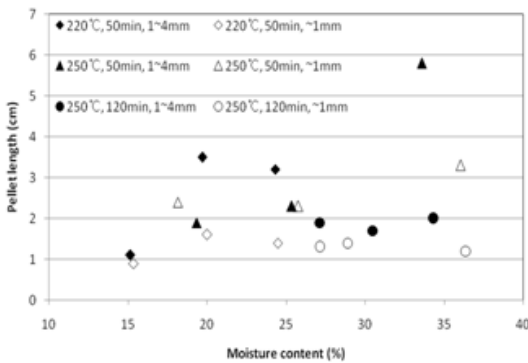


Fig. 6. Effect of moisture content of torrefied larch on pellet length.

3.5. 입자크기 및 함수율이 반탄화 펠릿성형에 미치는 영향

반탄화 낙엽송 칩의 분쇄 입자 크기 및 함수율에 따른 펠릿의 특성은 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다. 분쇄된 반탄화 입자는 반탄화 처리전 낙엽송 분쇄 입자와 비교하여 상대적으로 많은 미세분을 포함하고 소수성을 띠고 있어 일반 목재펠릿 성형에 요구되는 함수율을 기준으로 상향 조절하여 반탄화 정도에 따라 15~37%로 하였다. 선행연구에 따라 반탄화 정도가 낮은 조건(220°C, 50분)에서는 15~25%, 중간 조건(250°C, 50분)에서는 19~36%, 높은 조건(250°C, 120분)에서는 27~37%로 펠릿성형에 요구되는 바이오매스 초기 함수율을 구분하였다. 이와 같은 구분은



Photo 1. Pellet prepared with torrefied larch on different condition at 120°C of die temperature.

반탄화 정도에 따라 미세분 함량, 소수성의 정도가 다르기 때문인 것으로 판단된다. 각각의 반탄화 조건에서 함수율이 증가할수록 펠릿성형 과정에서 최대 압력은 감소하였다. 일반적으로 펠릿성형 과정에서 시료의 낮은 함수율은 내구성이 높은 펠릿을 생산하지만 높은 압력을 필요로 한다. 반면 높은 함수율은 압력을 감소시킬 수 있지만 펠릿의 내구성에는 부정적인 영향을 준다(Lee *et al.* 2013). 따라서 압력과 내구성을 고려한 시료의 함수율이 요구된다. 본 연구에서 수행한 함수율 범위에서는 요구되는 압력의 차이는 있었지만 모든 조건에서 내구성을 유지한 펠릿을 성형하였다. 성형된 펠릿의 길이는 가장 높은 반탄화 조건을 제외하고 증가하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 결과는 기존의 연구결과와 일치하였다(Lee *et al.* 2013, Peng *et al.* 2012). 펠릿성형에 측정된 최대압력은 반탄화 정도가 증가할수록 감소하였으며 반탄화 정도 및 함수율에 따라 최대압력의 변화는 200~1000 kg/cm²로 나타났다. 하지만 바이오매스 입자크기에 따른 차이는 뚜렷하지 않았다. 본 연구에서 성형된 대부분의 펠릿은 육안으로 확인하였을 때 비교적 단단하고 매끄러운 표면을 나타내고 있다 (Photo. 1). 특히 높은 반탄화 조건(250°C, 120분), 1 mm 이하의 입자크기에서는 다른 조건에서 성형한 것에 비하여 펠릿의 길이가 짧고 밀도가 높았다. 시료의 입자크기가 작을수록 밀도가 높아 펠릿의 길이가 짧아진다. 따라서 펠릿성형을 위해 본 연구에서 사용된 반탄화 분쇄 입자는 반탄화 처리 전 분쇄 입

자와 비교하여 많은 미세분을 포함하고 있기 때문에 펠릿의 밀도가 높아지고 길이가 짧아진 것으로 사료된다(Lee *et al.* 2013).

본 연구에서 실시한 모든 반탄화 조건에서 펠릿성형은 성공적으로 이루어졌다. 반탄화 조건이 증가할수록 펠릿성형에 요구되는 함수율은 증가하였다. 하지만 반탄화 분쇄 입자크기에 따라서 큰 차이를 나타내지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 반탄화 낙엽송 칩의 물리적 특성 및 구성성분 변화를 조사하고, 반탄화 칩을 분쇄한 후 입자크기 및 함수율이 펠릿성형에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 반탄화에 의해 발열량 향상(15.44%), 함수율 감소(86.39%)와 같은 연료특성은 향상하였으며 본 연구에서 수행한 모든 조건에서 펠릿성형이 성공적으로 이루어졌다. 반탄화 분쇄 입자를 이용하여 펠릿으로 성형하기 위해서 반탄화 정도에 따라 요구되는 적정 함수율에 차이를 나타냈다. 반탄화 정도가 증가할수록 높은 함수율이 요구되었으며, 또한 함수율이 증가할수록 펠릿성형에서 반탄화 분쇄 입자가 받는 압력은 감소하였고 펠릿길이는 증가하는 경향을 나타냈다. 본 연구를 통해 흡습성 및 낮은 에너지밀도로 인식되고 있는 목재펠릿의 취약점을 개선할 수 있는 적정 반탄화 및 펠릿성형 조건을 구명하여, 그 조건에 따른 반탄화 펠릿 제조 및 활용으로 고품목질바이오에너지 연료의 경제성 향상에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R., Kiel, J.H.A. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. ECN Biomass.

Chen, W.H., Kuo, P.C. 2011. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicelluloses, cellulose and lignin as well as torrefaction of

some basic constituents in biomass. Energy 36: 803-811.

Chen, Y., Liu, B., Yang, H., Yang, Q., Chen, H. 2014. Evolution of functional groups and pore structure during cotton and corn stalks torrefaction and its correlation with hydrophobicity. Fuel 137: 41-49.

Di Blasi, C., Lanzetta, M. 1997. Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 40: 287-303.

Kim, Y., Lee, S., Lee, H., Lee, J. 2012. Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*). Bioresource Technology 116: 120-126.

Lee, J.W., Kim, Y.H., Lee, S.M. and Lee, H.W. 2012. Torrefaction characteristics of wood chip for the production of high energy density wood pellet. Korean Chemical Engineering Research 50: 385-389.

Lee, S., Ahn, B., Choi, D., Han, G., Jeong, H., Ahn, S., Yang, I. 2013. Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* G. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. Biomass and Bioenergy 48: 1-9.

Lehtikangas, P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass Bioenergy 20: 351-360.

Melkior, T., Jacob, S., Gerbaud, G., Hediger, S., Le Pape, L., Bonnefois, I. 2012. NMR analysis of the transformation of wood constituents by torrefaction. Fuel 92: 271-280.

Na, B., Ahn, B., Cho, S., Lee, J. 2013. Optimal condition of torrefaction for the high-density solid fuel of Larch (*Larix kaempferi*). Korean Chemical Engineering Research 51(6): 739-744.

Peduzzi, E., Boissonnet, G., Haarlemmer, G., Dupont, C., Maréchal, F. 2014. Torrefaction modelling for lignocellulosic biomass conversion

- processes. *Energy* 70: 58-67.
- Peng, J.H., Bi, H.T., Sokhansanj, S., Lim, J.C. 2012. A study of particle size effect on biomass torrefaction and densification. *Energy and Fuels* 26: 3826-3839.
- Phanphanich, M., Mani, S. 2010. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology* 102: 1246-1253.
- Pimchuai, A., Dutta, A., Basu, P. 2010. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. *Energy and Fuels* 24: 4638-4645.
- Prins, M.J., Ptasiński, K.J., Janssen, F.J.J.G. 2006. Torrefaction of wood. Part 2. Analysis of products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77: 35-40.
- Satpathy, S.K., Tabil, L.G., Meda, V., Naik, S.N., Prasad, R. 2014. Torrefaction of wheat and barley straw after microwave heating. *Fuel* 124: 269-278.
- Shang, L., Ahrenfeldt, J., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Barsberg, S. and Thomsen, T. 2012. Changes of chemical and mechanical behavior of torrefied wheat straw. *Biomass and Bioenergy* 40: 63-70.
- Simes, H.C., Hassler, C.C. and Bean, T.H. 1998. Wood densification, 833, West Virginia University Extension Service, Morgantown, West Virginia.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., Crocker, D. 2008. In: Laboratory Analytical Procedure No. TP-510-42618. NREL, Golden, CO.
- Uemura, Y., Omar, W.N., Tsutsui, T., Yusup, S.B. 2011. Torrefaction of oil palm wastes. *Fuel* 90: 2585-2591.