



식품부산물인 커피박과 폐식용유를 첨가제로 사용하여 파일럿 규모의 평다이 성형기로 제조한 리기다소나무 및 신갈나무 펠릿의 연료적 특성

양 인¹⁾ · Xuanjun Jin²⁾ · 한규성³⁾*

Fuel Characteristics of Pitch Pine and Mongolian Oak Pellets Fabricated with Coffee Waste and Used Frying Oil as an Additive Using a Pilot-scale Flat-die Pellet Mills

In Yang¹⁾ · Xuanjun Jin²⁾ · Gyu-Seong Han³⁾*

Received 1 July 2022 Revised 25 July 2022 Accepted 5 August 2022 Published online 23 August 2022

ABSTRACT This study evaluated the potential of coffee waste (CW) and used frying oil (UFO) as an additive in the production of pitch pine (PIP) and Mongolian oak (MOK) pellets. Ash contents obtained from CW and UFO were 0.5% and <0.1%, respectively. The calorific values of UFO (31.4 MJ/kg) and CW (26.3 MJ/kg) are higher than PIP (20.6 MJ/kg) and MOK (19.1 MJ/kg). For pellets fabricated using a pilot-scale flat-die pellet mill, regardless of fabricating conditions, moisture content (MC) and bulk density of PIP and MOK pellets satisfied the A1 wood pellet standard for residential and small-scale commercial uses, as designated by the National Institute of Forest Science (NIFOS) of the Republic of Korea. When CW was used as an additive, durability of PIP pellets made with 12%-MC sawdust and MOK pellets increased. The optimal conditions for producing PIP and MOK pellets could be by adding 20 mesh CW as an additive and the using of 12%-MC sawdust. However, durability of PIP pellets and ash content MOK pellets did not satisfy the A1 wood pellet standard of NIFOS. Thus, further research is needed to improve the properties of wood pellets with additives.

Key words Wood pellet(목재펠릿), Coffee waste(커피박), Used frying oil(폐식용유), Bio-oil(바이오오일), Flat-die pellet mill (평다이 펠릿성형기)

1) Research Professor, Institute of Green-Bio Science and Technology, Seoul National University

2) Graduate Student, Graduate School of International Agricultural Technology, Seoul National University

3) Professor, Department of Wood and Paper Science, College of Agriculture, Life & Environments Sciences, Chungbuk National University

*Corresponding author: wood@chungbuk.ac.kr

Tel: +82-43-261-2807

Fax: +82-43-273-2241

Subscript

PIP : pitch pine

MOK : Mongolian oak

CW : coffee waste

UFO : used frying oil

1. 서론

목재펠릿은 보관 용이성과 높은 에너지 밀도를 보유하고 있어 유럽연합을 중심으로 연료용 에너지로서 많이 사용되고 있다. 예를 들면, 세계 목재펠릿 시장은 지난 20년간 크게 성장하였으며, 2027년까지 약 168억 달러로 증가할 것으로 전망된다.^[1] 국내 시장규모도 유사하게 큰 폭으로 증가하여 2020년 33만 톤의 국내산과 290만 톤의 수입산 목재펠릿이 유통된 것으로 나타났다.^[2] 그러나 목재펠릿의 구성원료 및 형상으로 인하여 취급 및 운송 시 파쇄현상 및 미세분 발생을 유발할 수 있는 단점을 가지고 있다.^[3~5] 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 옥수수, 카사바, 완두, 고구마, 쌀, 밀, 참마 등에서 분리한 전분과 같은 유기물과 리그닌 등을 목재펠릿 생산에 있어 첨가제로 사용하는 다양한 연구가 국내외에서 성공적으로 수행되었다.^[6~8] 그러나 전분계 첨가제는 식량 자원인 관계로 윤리적 그리고 비용적인 측면에서 사용이 제한적이다. 리그닌계 첨가제의 경우, 국내에서 확보가 용이하지 않은 관계로 목재펠릿의 국내생산에 있어 첨가제로 사용하는 것은 비경제적일 것으로 판단된다. 따라서 저렴하고 국내에서 확보가 용이한 천연물계 첨가제를 탐색하는 연구가 필요한 실정이다.

목재펠릿의 내구성 향상을 목적으로 국내에서 사용가능한 첨가제 원료를 탐색하는 과정에서 식품산업 폐기물인 커피박 및 폐식용유가 도출되었다. 커피박의 경우, 국내 발생량이 2012년 약 9.3만 톤에서 커피소비의 증가와 함께 2019년 약 15만 톤으로 1.6배 증가하였으나, 폐기물관리법에 의한 규제에 인하여 수거 및 처리가 매우 제한적이였다.^[9] 이와 같은 문제점 해결을 위하여 환경부에서 2022년 3월부터 커피박을 생활폐기물에서 순환자원으로 인정함에 따라 앞으로 유용한 자원으로 활용이 가능할 것으로 예상된다. 현재까지 커피박을 원료로 활용한 다양한 제품의 개발과 연구가 진행되고 있으며, 특히 고체 바이오연료 제조용 원료로 이용하는 다수의 연구도 진행되었다.^[10~13]

한편 외력 외에 수분 흡착도 목재펠릿의 생산 원료가 대부분 친수성의 목분을 사용하는 관계로 고습한 조건에서 내구성뿐만 아니라 발열량 저하를 유발한다. 이에 대한 해결방안으로 소수성의 지방산을 첨가제로 사용할 경우, 목재펠릿은 내습성의 향상뿐만 아니라 발열량도 증가하여 이

에 대한 다양한 연구가 수행되었다.^[14~18] 지방산 중에서 폐식용유는 학교 급식실, 패스트푸드점, 치킨집 등에서 대량으로 배출되고 있어 국내에서 다른 지방산과 비교하여 확보가 용이하다. 따라서 폐식용유를 첨가제로 사용하여 목재펠릿을 제조하는 연구가 국내에서 수행되었다.^[19,20] 커피박 또는 지방산을 첨가제로 사용하여 제조한 고체 바이오연료의 상용화를 위하여 파일릿~대량생산 규모의 펠릿성형기로 생산된 고체 바이오연료 특성의 조사가 필요할 것으로 생각한다. 그러나 이에 대한 결과 보고나 연구는 국내외적으로 전무한 실정이다.

바이오오일은 목질계 바이오매스의 급속열분해 공정을 통하여 얻을 수 있는 액상의 물질로서, 목재칩과 비교하여 3배 정도 높은 에너지밀도를 보유하며, 저분자의 유기산부터 페놀류, 무수당류, 올리고당류 등으로 구성되어 있다.^[21] 현재 유럽지역에서는 바이오오일을 열이나 전력생산용 용도인 보일러나 가스터빈 연료로 사용하고 있다.^[22] 그러나 국내에서는 산림에서 발생하는 간벌재, 폐잔목, 일반 폐목질 자원을 이용한 기초연구 단계에 있는 상황이다.

따라서 국내에서 펠릿 제조용 원료로 대부분 사용되고 있는 낙엽송 및 소나무의 공급이 불안정한 상황에서 두 수종과 비교하여 상대적으로 용도가 제한적인 관계로 안정적인 공급이 가능한 리기다소나무와 신갈나무 목분에 국내에서 확보가 용이한 커피박과 폐식용유를 첨가제로 사용하여 실험실 규모의 피스톤 및 파일릿 규모의 평다이 성형기를 이용하여 펠릿으로 제조하였다. 이렇게 제조한 리기다소나무 및 신갈나무 펠릿의 연료적 특성 및 내습성 측정을 통하여 커피박 및 폐식용유를 첨가제로 사용하여 제조한 목재펠릿의 품질 측면에서 상용화 가능성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

산림조합중앙회 중부목재유통센터(경기, 여주)에서 공급받은 리기다소나무 및 신갈나무 목분을 본 연구의 목재펠릿 제조용 주원료로 사용하였다. 공급받은 목분은 각 원목을 7 mm 폭의 초경날이 부착된 초프밀(YM-450BM, ㈜유림기계, 경북 경산)로 파쇄 및 건조한 것으로 리기다소나무

와 신갈나무 목분의 함수율은 각각 6.1%와 13.1%로 측정되었다. 이 목분을 4 mesh(< 4.75 mm) 표준체로 선별하여 펠릿 제조용 원료로 사용하였으며, 펠릿 제조에 앞서 각 목분의 함수율을 조습과 건조를 통하여 10% 및 12%로 조절하였다.^[23]

목재펠릿의 연료적 특성에 미치는 첨가제의 영향을 조사하기 위하여 식품부산물인 커피박, 폐식용유와 폐식용유에 대한 대조구로서 바이오오일을 첨가제로 사용하였다. 첨가제의 사용량은 목분의 전건무게를 기준으로 2 wt%로 조절하여 펠릿을 제조하였다. 커피박은 충북대학교 교내에서 영업 중인 커피판매점에서 무상으로 공급받았으며, 높은 함수율(약 60%)로 인하여 기건 및 오븐 건조를 통하여 6±1%까지 건조하였다. 이를 가정용 믹서로 파쇄한 후, 20 mesh(< 1.27 mm) 및 40 mesh(< 0.635 mm) 표준체로 선별하여 펠릿 제조를 위한 첨가제로 사용하였다. 폐식용유는 맥도날드(충북, 청주)에서 감자튀김을 조리하고 남은 기름으로 무상으로 공급받았으며, 2021년 9월 기준 17,000~20,000 원/20 리터에 판매되고 있는 것으로 조사되었다.^[24] 폐식용유는 40 mesh(< 0.635 mm) 표준체를 사용하여 이 물질을 제거한 후, 사용하였다. 바이오오일은 소나무의 급속열분해를 통하여 제조한 것으로 서울대학교의 바이오매스 및 바이오에너지 연구실(강원, 평창)로부터 공급받아 사용하였다.

2.2 펠릿제조

목재펠릿은 제조조건에 따른 품질 측정값의 오차를 최소화하기 위하여 목분과 첨가제의 총 중량을 1.2 g로 조절하여 피스톤식 펠릿 성형기로 Kim, *et al.*(2022)에 의하여 제조한 방법과 동일하게 제조하였다.^[25] 펠릿 제조에 앞서 목분과 커피박의 혼합은 목분을 넣은 50 리터의 플라스틱 통에 10회에 걸쳐 커피박을 넣고 충분히 흔들어 펠릿 제조용 원료로 사용하였다. 폐식용유와 바이오오일은 약 1 cm의 높이로 분포시킨 일정 중량의 목분을 사각쟁반과 함께 저울에 올려놓고 분무기로 정해진 양만큼 분사하여 적용하였다. 제조된 펠릿의 평균 직경과 길이는 각각 7.4~7.5 mm와 17.5~18.0 mm로 측정되었다. 그러나 폐식용유를 첨가제로 사용하여 제조한 펠릿은 전반적으로 길이가 10.0 mm 이하로 측정되었다.

파일럿 규모의 평다이 펠릿성형기(㈜ 해표산업, 전남 담양군)를 이용한 펠릿 제조는 첨가제의 양을 목분의 전건중량 기준 2 wt%로 조절하여 Kim, *et al.*(2022)에 의하여 수행된 방법과 동일하게 제조하였다.^[25] 펠릿의 품질평가는 Yang, *et al.*(2015)의 연구결과를 토대로 30분간 생산된 펠릿을 10분 단위로 분리하여 모은 후, 무작위로 선정하여 측정하였다.^[23]

2.3 품질평가

각 펠릿성형기에서 제조된 펠릿은 실험실 내에서 최소 24시간의 자연건조를 실시한 후, 국립산림과학원 고시 “목재펠릿 품질규격”에 기술된 방법에 따라 함수율, 발열량, 회분 함량, 내구성, 겉보기밀도를 측정하였다.^[26] 한편 제조된 목재펠릿의 내습성은 중량이 측정된 펠릿을 25°C와 90%의 상대습도가 유지되는 항온항습기에 넣고, 3시간 후에 꺼내어 항온항습 전후의 펠릿 중량을 이용하여 구하였다. 모든 품질 항목의 측정값은 3회 반복의 평균값으로 표시하였다.

2.4 실험설계 및 통계학적 분석

목재펠릿의 각 품질에 대한 개별 인자들의 영향은 분산분석을 통하여 조사하였으며, 통계학적으로 $p < 0.05$ 수준에서 영향을 받았을 경우 Fisher's LSD(least significant different: 최소유의차) 검정을 위하여 다중비교 방법 중에 가장 많이 사용되는 Student t-test에 의해 각 평균값 간의 차이가 유의한지 추가적으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 첨가제의 연료적 특성

Table 1은 첨가제로 사용된 커피박, 폐식용유, 바이오오일의 연료적 특성을 나타낸 것이다. 수거된 커피박의 함수율(61%)은 매우 높았으나, 상온 및 오븐건조를 통하여 함수율을 용이하게 10% 미만으로 낮출 수 있는 것을 확인하였다. 폐식용유는 대부분 지방/오일로 구성되어 있어 수분을 함유하고 있지 않았다. 반면, 바이오오일의 함수율은 높았는데 이는 수분을 이용한 급속열분해 과정에서 기인한 것으로 추정된다.^[22]

회분 함량의 경우, Table 1에서 보는 바와 같이 바이오 오일이 0.9%로 가장 높았는데 이는 반응기 내의 열분해 과정에서 분해되지 않은 무기물 성분과 바이오오일을 구성하는 저분자량 성분 간의 결합에서 기인한 것으로 추정된다.^[22] 커피박은 본 연구에서 공시재료로 사용된 리기다소나무의 회분 함량(0.4%)과 유사한 양의 회분을 함유하고 있었으며, 폐식용유는 회분을 함유하고 있지 않았다.

Table 1. Fuel characteristics of coffee waste, used frying oil and bio-oil used as an additive

	Moisture content (%)	Ash content (%)	Calorific value (MJ/kg)
Coffee waste	2,5	0,5	26,3
Used frying oil	< 0,1	< 0,1	31,4
Bio-oil	22,1	0,9	17,8

발열량의 경우, 폐식용유는 많은 양의 지방/오일의 함유하고 있어 예상대로 매우 높았으나, 바이오오일은 본 연구에서 펠릿 원료로 사용된 목분(리기다소나무: 20.6 MJ/kg; 신갈나무: 19.1 MJ/kg)과 비교하여 낮았는데(Table 1 참조), 이는 바이오오일에 함유된 수분으로 인하여 나타난 결과라 생각한다.^[22] 커피박의 발열량은 리기다소나무보다 높았는데, 이는 커피박에 함유된 일정량의 지방/오일에서 기인한 것으로 생각한다.^[11]

3.2 피스톤식 펠릿성형기로 제조한 펠릿의 연료적 특성

피스톤식 펠릿성형기로 제조된 리기다소나무 및 신갈나무 펠릿의 함수율은 목분 함수율과 첨가제의 종류에 따라 차이는 있었으나(Table 2 참조), 모든 펠릿의 함수율은 국

Table 2. Fuel characteristics of pitch pine and Mongolian oak pellets fabricated with used frying oil, coffee waste and bio-oil as an additive using a piston-type pellet mill

Production conditions			Moisture content (%)	Ash content (%)	Calorific value (MJ/kg)	Durability (%)
Type of sawdust	Moisture content of wood particles	Additive ¹				
Pitch pine	10%	No binder	7,6	0,4	20,6	97,7
	12%		7,0			97,5
	10%	Used frying oil	7,0	0,5	20,2	86,1
	12%		5,9			93,8
	10%	Coffee waste	3,1	0,5	20,0	97,8
	12%		5,9			98,4
	10%	Bio-oil	4,1	0,5	19,9	99,3
	12%		6,3			99,1
Mongolian oak	10%	No binder	6,0	0,9	19,1	97,5
	12%		7,0			95,0
	10%	Used frying oil	6,8	1,0	19,3	88,7
	12%		5,9			91,5
	10%	Coffee waste	3,1	1,0	19,9	96,9
	12%		6,3			97,4
	10%	Bio-oil	4,1	1,3	19,3	96,3
	12%		6,3			97,1
NIFOS A1 standard for residential and small-scale commercial uses ²			≤ 10	≤ 0,7	≥ 16,5	≥ 97,5
NIFOS A2 standard for residential and small-scale commercial uses ²			≤ 10	≤ 1,2	≥ 16,5	≥ 97,5
NIFOS B standard for residential and small-scale commercial uses ²			≤ 10	≤ 2,0	≥ 16,5	≥ 97,5
NIFOS I1 standard for industrial use ²			≤ 10	≤ 1,5	≥ 16,5	≥ 97,5
NIFOS I2 standard for industrial use ²			≤ 10	≤ 3,0	≥ 16,5	≥ 96,5
NIFOS I3 standard for industrial use ²			≤ 10	≤ 5,0	≥ 16,5	≥ 95,0

¹ Weight ratio of wood particles to additive was adjusted to 98 wt% to 2 wt% on a oven-dry weight basis.

² Specification of wood pellets designated by the National Institute of Forest Science at the Republic of Korea.

립산림과학원 목재펠릿 품질규격 A1 기준($\leq 10\%$)을 만족하였다.^[26]

회분 함량은 첨가제없이 목분만으로 제조된 펄릿의 경우 전체적으로 리기다소나무보다 신갈나무 펄릿에서 높게 측정되었는데, 이는 신갈나무 자체의 높은 회분 함량에서 기인한 것이다(Table 2 참조). 첨가제가 회분 함량에 미치는 영향을 보면, 대부분의 펄릿에서 영향은 크지 않았으나, 높은 회분 함량을 가진 바이오오일을 첨가제로 사용하여 제조한 신갈나무 펄릿에서는 회분 함량이 증가하였다. 발열량은 목분 자체의 발열량이 높은 리기다소나무 펄릿이 신갈나무 펄릿보다 전반적으로 높았다. 한편, 첨가제와 함께 제조한 리기다소나무 및 신갈나무 펄릿의 발열량은 각각 감소 및 증가하는 경향을 보였으나, 그 측정치는 통계학적으로 차이가 없는 것으로 분석되었다. 이는 목재펠릿의 전체 전건중량 대비 2 wt%의 첨가제를 사용함에 따라 나타난 결과라 생각한다. 한편 리기다소나무 펄릿의 회분 함량은 첨가제의 사용여부 및 종류와 목분 함수율과 상관없이 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 A1 기준($\geq 0.7\%$)을 만족하였다.^[26] 반면 무첨가제, 폐식용유와 커피박을 첨가제로 사용하여 제조한 신갈나무 펄릿은 A2 기준을 그리고 바이오오일과 함께 제조한 신갈나무 펄릿은 I1 기준을 만족하였다.^[26]

내구성의 경우, 전반적으로 리기다소나무 펄릿에서 신갈나무 펄릿보다 높은 것으로 측정되었으며, 첨가제로 폐식용유의 사용은 펄릿의 내구성을 감소시키는 것으로 측정되었다(Table 2 참조). 이와 같은 결과는 폐식용유가 비수용성인 관계로 목분 간의 접착제로서 작용하지 않았거나, 압밀화 과정에서 폐식용유가 윤회제 역할을 수행함에 따라 다이홀에서 빠르게 출사되어 발생한 결과로 판단된다.^[3] 제조된 펄릿을 육안으로 확인한 결과, 펄릿의 길이가 매우 짧거나 일부에서 압밀화되지 않고 목분의 형태로 출사되는 것으로부터 추정할 것이다. 한편, 10% 함수율의 리기다소나무 목분에 첨가제로 커피박을 사용하여 제조한 펄릿의 내구성은 목분만으로 제조한 펄릿과 차이가 없었으나, 12%의 목분 함수율에서는 증가하였다. 이는 커피박에 함유된 단백질, 리그닌 등과 같은 성분이 높은 함수율에서 접착제 역할을 수행하여 나타난 결과라 판단된다.^[27]

반면, 리기다소나무 목분에 바이오오일의 첨가는 펄릿 내구성을 크게 증가시켰는데, 이는 커피박과 마찬가지로 다양

한 자분자량의 성분으로 구성된 바이오오일이 압밀화 과정에서 목분 간의접착제 역할을 수행하여 나타나 결과라 생각한다.^[22] 신갈나무 펄릿에서 바이오오일이 내구성에 미치는 영향을 분석한 결과, 10%의 목분 함수율에서는 첨가제의 사용과 함께 감소하였으나, 12%의 목분 함수율에서는 증가하였다. 이 결과를 토대로 바이오오일이 첨가제로 사용된 신갈나무 펄릿에서 내구성 향상을 위하여 목분 내에 일정 수준 이상의 수분이 필요할 것으로 생각한다. 이 추론에 대한 검증을 위하여 향후 신갈나무 목분의 함수율을 12% 이상으로 조절하여 펄릿을 제조한 후, 펄릿 내구성을 측정하는 추가 연구가 필요할 것으로 생각한다.

Fig. 1은 리기다소나무와 신갈나무 펄릿의 함수율과 내구성에 분말형태의 첨가제로 사용된 커피박의 입자 크기가 미치는 영향을 나타낸 것이다. 펄릿 함수율은 전반적으로 40 mesh의 커피박과 함께 제조하였을 때 낮았는데, 이는 분말크기의 감소와 함께 커피박의 표면적이 증가하여 수분과 결합할 수 있는 사이트가 증가하여 나타난 결과라 생각한다. 그러나 12% 함수율의 리기다소나무 목분으로 제조한 펄릿의 함수율은 40 mesh 크기의 커피박과 제조한 펄릿에서 높았는데, 이는 목분 자체의 높은 함수율로 인하여 압밀화 과정에서 수분이 충분히 증발되지 않았거나 또는 미세한 크기의 커피박이 압밀화 과정에서 목분 내에서 수증기 이동을 제한하여 나타난 결과라 추정된다.^[25] 그러나 수증, 목분 함수율, 커피박의 크기와 상관없이 모든 펄릿의 함수율은 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격의 A1 기준($\leq 10\%$)을 만족하는 것으로 조사되었다.^[26]

내구성의 경우, 12%의 목분 함수율에서 제조한 리기다소나무 펄릿과 10%의 목분 함수율에서 제조한 신갈나무 펄릿은 커피박의 크기에 따른 차이가 없었다(Fig. 1 참조). 그러나 10% 함수율에서 제조한 리기다소나무 펄릿과 12% 함수율에서 제조한 신갈나무 펄릿의 내구성은 20 mesh 크기의 커피박과 제조하였을 때, 높은 것으로 나타났다. 이 결과는 수증별 목분 함수율과 첨가제인 커피박의 분말크기 간에 상호영향이 있다는 것을 의미한다. 따라서 내구성이 우수한 펄릿을 제조하기 위하여 수증별 목분 함수율과 첨가제로 사용된 커피박 분말 크기의 최적 범위를 결정하는 추가연구가 필요할 것으로 생각한다. 한편 내구성 측정치를 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격과 비교한 결과, 리

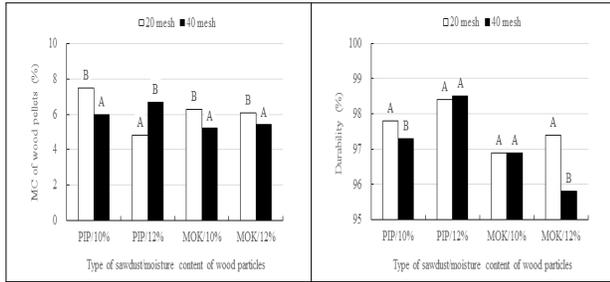


Fig. 1. Effect of particle size of coffee waste on the moisture content (left) and durability (right) of wood pellets fabricated with pitch pine and Mongolian oak sawdust of 10% or 12% moisture content using a piston-type pellet mill

기다소나무 및 신갈나무 펠릿은 12%의 목분 함수율에서 20 mesh 크기의 커피박을 사용하는 것이 최적 제조조건이라 판단된다. 따라서 12%의 목분 함수율에서 20 mesh 크기의 커피박을 첨가제로 적용하는 것이 제조비용의 절감 및 펠릿품질의 향상 측면에서 적합할 것으로 판단된다.

3.3 평다이 펠릿 성형기로 제조한 펠릿의 연료적 특성

피스톤식 펠릿성형기로 제조한 펠릿의 품질측정 결과 및 첨가제의 경제성을 토대로 리기다소나무 및 신갈나무 목분에 제조비용이 고가인 바이오오일을 배제하고 커피박과 폐

식용유를 첨가하여 파일럿 규모의 평다이 펠릿성형기로 펠릿을 제조하였으며, 그에 대한 연료적 특성을 조사한 결과를 Table 3에 나타내었다. 리기다소나무 및 신갈나무 펠릿의 함수율은 목분의 수종과 함수율 및 첨가제의 종류와 상관없이 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 A1 기준(≤ 10%)을 모두 만족하였다.^[26] 그러나 리기다소나무 목분에 첨가제로 커피박의 사용은 펠릿의 내구성을 감소시켰으며, 12% 목분 함수율에서 제조한 펠릿에서만 I3 기준(≥ 95.0%)을 만족하였다. 겉보기밀도의 경우, 10% 목분 함수율에서는 A1 기준(≥ 97.5%)을 그리고 12% 목분 함수율에서는 I3 기준(≥ 95.0%)을 만족하였다. 신갈나무 목분에 커피박의 첨가는 펠릿의 내구성을 향상시켰는데 이는 리기다소나무보다 비중이 높아 압밀화 과정에서 커피박이 접착제 역할을 수행할 수 있을 정도로 목분 간의 간격이 충분히 접근하여 나타난 결과라 생각한다. 반면 신갈나무 펠릿의 겉보기밀도는 10%와 12%의 목분 함수율에서 각각 감소 및 증가하였는데 이는 12% 함수율의 신갈나무 목분이 10% 함수율의 목분보다 압밀화과정에서 용이하게 연화되면서 목분간의 간격이 감소하여 나타난 결과라 추정된다. 한편 커피박과 함께 제조한 신갈나무 펠릿의 내구성과 겉보기밀도는 목분 함수율과 상관없이 국립산림과학원 목재펠릿 품질규

Table 3. Moisture content, bulk density and durability of wood pellets fabricated with pitch pine and Mongolian oak sawdust of 10% or 12% moisture content using a flat-die pellet mill

Production conditions			Moisture content of pellets (%)	Durability (%)	Bulk density (kg/m ³)
Type of sawdust	Moisture content of wood particles	Additive ¹			
Pitch pine	10%	No binder	9.3	97.6	693
	12%		7.6	93.3	617
	10%	Coffee waste	6.0	94.3	731
	12%		8.3	95.2	596
	10%	Used frying oil	5.9	95.8	X
	12%		X	X	X
Mongolian oak	10%	No binder	5.6	94.0	712
	12%		7.7	96.8	645
	10%	Coffee waste	7.1	97.8	662
	12%		6.2	97.6	674
	10%	Used frying oil	7.1	94.8	X
	12%		X	X	X

¹ Weight ratio of wood particles to additive was adjusted to 98 wt% to 2 wt% on a oven-dry weight basis. x means that it was not measured because sawdust was not pelletized.

격 A1 기준(내구성: $\geq 97.5\%$; 겉보기밀도: $\geq 600 \text{ kg/m}^3$)을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

폐식용유를 첨가제로 사용하여 제조한 리기다소나무 및 신갈나무 펠릿의 경우, 10% 목분 함수율에서는 펠릿의 길이가 매우 짧거나 일부 펠릿 형태로 제조되지 않아 겉보기 밀도는 측정할 수 없었다(Table 3 참조). 특히 12%의 목분 함수율에서는 전체적으로 펠릿형태로 성형되지 않았다. 이는 전술한 바와 같이 폐식용유가 비수용성인 관계로 목분 간의 화학적 결합에 이용되지 않았거나, 압밀화 과정에서 폐식용유가 윤활제 역할을 수행함에 따라 다이 홀에서 빠르게 출사되어 발생한 결과로 판단된다.^[3] 따라서 리기다소나무 및 신갈나무 목분을 이용한 펠릿의 대량 생산에서 폐식용유를 첨가제로 사용하는 것이 적합하지 않을 것으로 생각하며, 펠릿 제조 공정에서 목분의 투입속도를 낮추거나 폐식용유의 첨가량을 2 wt% 미만으로 감소시키는 방안 등에 대한 추가연구가 필요할 것으로 생각한다.

평다이 펠릿성형기로 제조한 펠릿의 품질 측정결과를 토대로, 리기다소나무 목분의 함수율을 12%로 조절하고 커피박을 첨가제로 사용하는 것이 본 연구에서 조사된 조건 중에 최적일 것으로 생각한다. 반면 목분 함수율과 상관없이 신갈나무 목분에 커피박을 첨가제로 사용할 경우, 펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성, 발열량은 모두 A1 기준을 만족하였으나, 회분 함량이 A2 기준을 만족하였다. 따라서 고등급의 펠릿 제조를 위하여 신갈나무 목분과 함께 회분 함량이 낮은 수종을 혼합하여 펠릿을 제조하거나, 신갈나무 목분의 펠릿 제조용 원료화 공정에서 수피 함량을 최소화하는 주의가 필요할 것으로 생각한다.

3.4 폐식용유를 첨가제로 사용하여 제조한 펠릿의 내습성

평다이 펠릿성형기를 이용하여 제조한 펠릿의 연료적 특성 분석결과를 토대로 목분의 함수율을 10%로 고정하고, 목분의 전건중량을 기준으로 2, 4, 6, 8, 10 wt%의 폐식용유를 첨가제로 사용하여 펠릿을 제조하였다. 그러나 리기다소나무 및 신갈나무 목분에 폐식용유를 4 wt% 이상 첨가하였을 때, 펠릿 형태로 성형되지 않았다. 따라서 폐식용유의 첨가량을 목분의 전건중량 대비 2 wt%로 조절하여 제조한 펠릿의 내습성(중량증가율)을 조사하였으며, 그 결과는

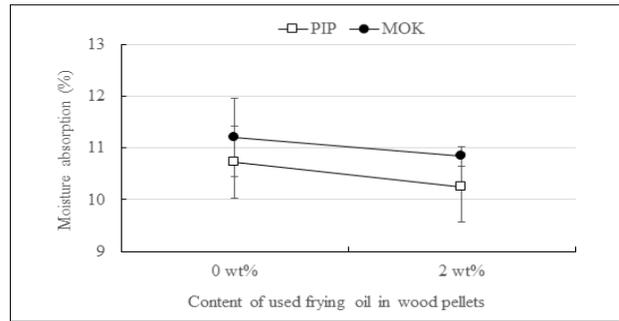


Fig. 2. Moisture absorption of pellets fabricated with pitch pine and Mongolian oak sawdust of 10% moisture content using a flat-die pellet mill under constant condition (temperature at 25°C, relative humidity at 90%) for 3 hours

Fig. 2와 같다.

폐식용유를 첨가하지 않은 리기다소나무와 신갈나무 펠릿은 고습처리(온도 25°C, 상대습 90%, 3시간) 이후 수분 흡수에 따른 중량증가율이 각각 10.72% 및 11.21%로 측정되었다. 그러나 폐식용유를 2 wt% 첨가한 리기다소나무와 신갈나무 펠릿의 중량증가율은 각각 10.24% 및 10.84%로 감소하였다. 이처럼 리기다소나무와 신갈나무 펠릿의 내습성은 폐식용유의 사용과 함께 증가하였으나, 통계학적으로 차이가 없는 것으로 분석되었다(리기다소나무: $p=0.47$; 신갈나무: $p=0.35$). 이는 폐식용유의 첨가량이 2 wt% 제한된 관계로 내습성 향상에 미치는 영향이 크지 않았던 것으로 추정된다. 이 결과와 함께 제조 펠릿의 형태 및 연료적 특성 결과를 토대로, 10% 함수율의 목분에 폐식용유를 첨가제로 사용하여 평다이 펠릿성형기로 펠릿을 제조하는 것은 부적합할 것으로 판단된다. 그러나 이에 대한 해결방안으로 펠릿 제조에 있어 목분의 함수율(10% 미만) 및 형상, 압밀화 공정에서 목분 투입속도, 대량생산 공정에서 주로 사용되는 링다이 펠릿성형기의 적용 등에 대한 추가연구의 진행이 필요할 것으로 생각한다.

4. 결론

본 연구는 리기다소나무와 신갈나무 목분에 식품부산물인 커피박 및 폐식용유를 첨가제로 사용하여 실험실 규모의 피스톤 및 파일럿 규모의 평다이 성형기를 이용하여 펠릿으로 제조하였으며, 이에 대한 연료적 특성 및 내습성 조

사를 통하여 커피박 및 폐식용유를 첨가제로 사용하여 제조한 목재펠릿의 상용화 가능성을 평가하였다.

회분 함량은 폐식용유에 대한 대조구로 사용된 바이오오일에서 가장 높았으며, 커피박은 리기다소나무와 차이가 없는 0.5%로 그리고 폐식용유는 회분을 함유하지 않았다. 발열량은 폐식용유, 커피박, 리기다소나무, 신갈나무, 바이오오일 순으로 나타났다. 첨가제의 사용량이 목분의 전건중량의 2 wt%로 제한된 관계로 제조된 펠릿의 회분 함량과 발열량에 미치는 영향은 유의하지 않아 상용화 공정을 위한 커피박 및 폐식용유의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 피스톤형 성형기로 제조된 리기다소나무 및 신갈나무 펠릿의 내구성은 커피박과 폐식용유의 첨가와 함께 각각 증가 및 감소하였다. 한편 목분 함수율을 12%로 조절하여 커피박과 함께 제조한 리기다소나무 펠릿의 내구성은 증가하였으며, 이 조건에서 커피박의 크기에 대한 영향은 없는 것으로 분석되었다. 평다이 펠릿성형기로 제조한 펠릿의 함수율은 수중, 목분 함수율, 첨가제의 종류와 상관없이 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 A1 기준을 만족하였다. 그러나 폐식용유의 첨가와 함께 10%와 12%의 목분 함수율에서 제조한 펠릿은 길이가 감소하거나, 성형되지 않았다. 따라서 폐식용유는 펠릿의 품질 향상을 위한 첨가제로 부적합한 것으로 나타났다. 커피박의 경우, 12% 목분 함수율로 제조한 리기다소나무 펠릿에서 내구성이 증가하였으며, 신갈나무 펠릿에서는 함수율과 관계없이 모두 증가하였다. 커피박을 첨가제로 사용하여 제조한 펠릿의 겉보기밀도는 목분의 수중 및 함수율에 따라 영향을 받았으나, 대부분에서 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 A1 기준을 만족하였다. 따라서 첨가제로 커피박의 사용과 함께 목분 함수율을 12%로 조절하여 펠릿을 제조하는 것이 최적 조건이라 생각한다. 그러나 커피박과 함께 제조한 리기다소나무 펠릿의 내구성과 신갈나무 펠릿의 회분함량을 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 A1 기준까지 충족시킬 수 있는 방안에 대한 연구와 함께 첨가제 사용유무에 따른 생산성 변화, 원료로부터 최종 생산되는 펠릿의 수율, 첨가제 수급 용이성, 첨가제의 함수율에 목재펠릿 품질에 미치는 영향, 펠릿 성형기의 규모, 운전시간, 장기운전시 물성변화 등에 대한 고려가 상용화 공정의 적용을 위하여 추가적으로 수행되어야 할 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 2016년 한국연구재단 “산학협력 선도대학 육성사업”의 지원과 2017년도 “충북대학교 연구년제”의 지원을 받아 수행한 연구입니다. 한편 연구 진행에 도움을 준 (주) 신영이앤피와 산림조합 중부목재유통센터의 관계자분들에게 감사드립니다.

References

- [1] Mordor Intelligence, 2022, “Wood pellet market - Growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2022 - 2027)”, Accessed 5 June 2022, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/wood-pellet-market>.
- [2] Korea Forest Service, 2022, “Production and importation of wood pellets”, Accessed 18 August 2022, https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_01_11_04_02&cmsId=FC_000811.
- [3] Kaliyan, N., and Morey, R.V., 2009, “Factors affecting strength and durability of densified biomass products”, *Biomass Bioenergy*, **33**(3), 337-359.
- [4] Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., and Portero, H., 2011, “Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets”, *Fuel Processing Technology*, **92**(3), 699-706.
- [5] Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M., and Valaert, J., 2015, “Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in costa rican tropical climates”, *BioRes.*, **10**(1), 482-498.
- [6] Tarasov, D., Shahi, C., and Leitch, M., 2013, “Effect of additives on wood pellet physical and thermal characteristics: A review”, *Int. Sch. Res. Notices*, **2013**, 876939.
- [7] Pradhan, P., Mahajani, S.M., and Arora, A., 2018, “Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review”, *Fuel Processing Technology*, **181**, 215-232.
- [8] Boschetti, W.T.N., Carvalho, A.M.M.L., Carneiro, A.C.O., Santos, L.C., and Poyares, L.B.Q., 2019, “Potential of kraft lignin as an additive in briquette production”, *Nord. Pulp Pap. Res. J.*, **34**(1), 147-152.

- [9] The Women's News, "Recycling way of coffee wastes", 2022.03.23., Accessed 23 June 2022, <https://www.womennews.co.kr/news/articleView.html?idxno=221431>.
- [10] Yang, I., Han, G.S., and Oh, S.W., 2018, "Larch pellets fabricated with coffee waste and the commercializing potential of the pellets", *J. Korean Wood Sci. Technol.*, **46**(1), 48-59.
- [11] Kim, M.J., 2019, "Recycling fuel pellets using coffee waste", Korean Intellectual Property Office No. 10-1954679, issued February 27, 2019.
- [12] Lee, S.K., Lee, K.H., Yang, I., and Han, G.S., 2011, "Solid fuels essentially based on materials of non-mineral origin on vegetable substances", Korean Intellectual Property Office No. 10-1033212, filed May 31, 2013.
- [13] Oh, D.G., Kim, Y.H., and Son, H.S., 2013, "Fuel properties of spent coffee bean by torrefaction", *New. Renew. Energy*, **9**(3), 29-35.
- [14] Wang, Y., Sun, Y., and Wu, K., 2019, "Effects of waste engine oil additive on the pelletizing and pyrolysis properties of wheat straw", *BioRes.*, **14**(1), 537-553.
- [15] Craven, J.M., Swithenbank, J., Sharifi, V.N., Peralta-Solorio, D., Kelsall, G., and Sage, P., 2015, "Hydrophobic coatings for moisture stable wood pellets", *Biomass Bioenergy*, **80**, 278-285.
- [16] Saletnik, A., Saletnik, B., and Puchalski, C., 2021, "Modification of energy parameters in wood pellets with the use of waste cooking oil", *Energies*, **14**(20), 6486.
- [17] Siwale, W., Frodeson, S., Finell, M., Arshadi, M., Jonsson, C., Henriksson, G., and Berghel, J., 2022, "Understanding off-gassing of biofuel wood pellets using pellets produced from pure microcrystalline cellulose with different additive oils", *Energies*, **15**(6), 2281.
- [18] Mišljenovic, N., Mosbye, J., Schüller, R.B., Lekang, O., and Salas-Bringas, C., 2014, "The effect of waste vegetable oil addition on pelletability and physical quality of wood pellets", *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, **22**, 211-218.
- [19] Lee, H.Y., Kim, J.S., and Lee, D.U., 2015, "Manufacturing method of wood pellet for biomass generation using meagre waste wood", Korean Intellectual Property Office No. 10-1579930, issued December 17, 2015.
- [20] Lee, E.S., Kang, C.Y., Seo, J.W., and Park, H., 2011, "A study on productivity and quality characteristics of wood pellets by *Larix kaempferi* Carr sawdust with adding vegetable oil and ozonized vegetable oil", *J. Korean Wood Sci. Technol.*, **39**(4), 359-369.
- [21] Oasmaa, A., and Meier, D., 2002, "Pyrolysis liquid analyses: The results of IEA-EU round robin", in: *Fast pyrolysis of Biomass : A Handbook Vol. 3* Eds. Bridgewater, A.V., CPL press, Bonn, Germany.
- [22] Choi, J.W., Choi, D.H., Cho, T.S., and Meier, D., 2006, "Characterization of bio-oils produced by fluidized bed type fast pyrolysis of woody biomass", *J. Korean Wood Sci. Technol.*, **34**(6), 36-43.
- [23] Yang, I., Kim, S.H., and Han, G.S., 2015, "Effects of moisture content and particle size of sawdust and operating time of flat-die pelletizer on the fuel characteristics of wood pellets fabricated with Mongolian oak and *Rigida pine* sawdust", *New. Renew. Energy*, **11**(3), 11-20.
- [24] Maeil Business Newspaper, "Current price of used frying oil produced from fried-chicken restaurant", 2021.09.23., Accessed 20 July 2022, <https://www.mk.co.kr/news/economy/view/2021/09/910467/>.
- [25] Kim, H.J., Yang, I., and Han, G.S., 2022, "Effect of chestnut-shell tea waste and castor oil as an additive on fuel characteristics of pellets fabricated with Pitch pine and Mongolian oak", *New. Renew. Energy*, **18**(2), 1-8.
- [26] Korea Forest Research Institute, 2020, "Specifications and quality standards of wood products 2020-3".
- [27] Ahn, B.J., Chang, H.S., Lee, S.M., Choi, D.H., Cho, S.T., Han, G.S., and Yang, I., 2014, "Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust", *Renewable Energy*, **62**, 18-23.