

파일럿 규모의 평다이 성형기로 제조한 유채대 펠릿의 연료적 특성 및 상용화 가능성 평가

오세창* · 양 인**†

*대구대학교 산림자원학과
38453 경상북도 경산시 진량읍 대구대로 201
**서울대학교 그린바이오과학기술연구원
25354 강원특별자치도 평창군 대화면 평창대로 1447
(2023년 9월 29일 접수, 2023년 12월 26일 수정본 접수, 2024년 1월 17일 채택)

Evaluating the Properties and Commercializing Potential Of Rape Stalk-based Pellets
Produced with a Pilot-scaled Flat-die Pellet Mill

Sei Chang Oh* and In Yang**†

*Department of Forest Resources Science, Daegu University, 201, Daegudae-ro, Jillyang-eup,
Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, 38453, Korea
**Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, 1447, Pyeongchang-daero,
Daehwa-myeon, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, 25354, Korea
(Received 29 September 2023; Received in revised from 26 December 2023; Accepted 17 January 2024)

요 약

본 연구는 고체 바이오연료 생산용 원료로서 유채대의 상용화 가능성을 평가하기 위하여 수행하였다. 대형 플라스틱 통에 넣은 유채대를 1% 농도의 초산 수용액에 침지하여 단리된 환원당의 함량을 분석한 결과, glucose의 함량이 가장 높았으며, 다음으로 xylose, galactose, arabinose, mannose 순으로 조사되었다. 파일럿 규모의 평다이 펠릿성형기를 이용하여 무침지 및 침지 유채대로 연료용 펠릿으로 제조하였다. 펠릿의 겉보기밀도와 발열량은 침지처리 및 목분의 혼합과 함께 증가하였으며, 이 측정치는 International Organization for Standardization(ISO)의 비목재펠릿 A 등급 기준을 크게 상회하였다. 회분 함량도 침지처리와 함께 감소하여 ISO의 A등급 기준을 만족하였다. 펠릿 내구성의 경우, 유채대의 침지처리로 증가하였으며, 펠릿 제조에 목분의 첨가와 함께 향상되었다. 그러나 그 측정치는 ISO의 B등급 기준($\geq 96.0\%$)에 미치지 못하였다. 따라서 초산 수용액 침지 유채대로 생산할 비목재 펠릿의 상용화를 위하여 내구성 향상을 위한 바인더의 사용이 필요하다는 결론을 얻었다.

Abstract – This study was conducted to evaluate the potential of rape stalk (RAS) as a raw material for the production of solid bio-fuels. RAS was immersed in an aqueous solution with acetic acid concentration of 1 percent. The content of reducing sugars separated from the RAS was analyzed. Glucose showed the highest content followed by xylose, galactose, arabinose and mannose. The immersed and non-immersed RAS were used for producing pellets with a pilot-scaled flat-die pellet mill. Bulk density and calorific values of the pellets improved with the use of the immersed RAS and the addition of wood particles. The values exceeded the minimum requirements for the A-grade of non-woody pellets ($\geq 600 \text{ kg/m}^3$ & $\geq 14.5 \text{ MJ/kg}$) designated by the ISO. Ash content of the pellets reduced with the immersion of RAS and the value satisfied the A-grade level ($\leq 6.0\%$) of the ISO standard. The durability of the immersed RAS-based pellets was much higher than that of non-immersed IRS-based pellets, and the values were increased with the addition of wood particles. However, the durability did not meet the acceptance level for the B-grade of non-woody pellets ($\geq 96.0\%$) designated by the ISO. These results suggested that the addition of binders in the production of non-woody pellets using an RAS immersed in acetic acid-based aqueous solution is required for the commercialization of the pellets.

Key words: Non-woody pellet, Pilot-scaled pellet mill, Acetic acid, Immersion, Fuel characteristics

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: dahadad@snu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

목질계 바이오에너지는 목질계 바이오매스의 고밀화 과정을 통하여 고체 상태로 제조하여 직접 연소하거나, 액체 또는 기체 상태로

변환시켜 생성된 연료로부터 생산된 에너지를 의미한다. 이 가운데 고체 바이오연료로서 톱밥 또는 대꺾밥 등의 목질계 바이오매스를 높은 압력과 열로 고밀화하여 제조하는 펠릿은 1970년대 후반에 개발되어 현재 북미와 유럽에서 자동화된 가정용 난로 및 보일러 연료로 사용되고 있으며, 북유럽에서는 열병합발전소 연료로 많이 이용되고 있다[1]. 우리나라의 경우 2008년 말부터 상업적인 목재 펠릿의 생산이 시작되어 현재 주택용 펠릿 보일러와 난로, 농업용 펠릿 온풍기와 펠릿 보일러, 산업용 펠릿 보일러용 연료로 사용되고 있으며, 발전소의 연료로 사용이 확대되었다[2].

국내 목재펠릿 시장규모를 보면, 2020년에 33만 톤의 국내산과 290만 톤의 수입산 목재펠릿이 유통되었으며, 2026년까지 최대 600만 톤으로 성장할 것으로 전망되고 있다[3,4]. 목재펠릿의 국내 시장 규모가 계속 성장할 경우, 국내 생산을 위하여 공급이 가능한 목질계 바이오매스의 부족 현상이 예상되며, 결과적으로 생산원가 상승을 초래하여 수입산 목재펠릿과 비교하여 시장 경쟁력이 크게 저하될 것으로 예상된다. 따라서 펠릿 생산용 원료로서 목질계 바이오매스와 함께 활용이 가능한 새로운 바이오매스를 확보하는 것이 필요한 실정이다. 이와 관련한 국내외 연구 동향을 살펴보면, 억새, 대마 또는 단별기 관목류와 같은 에너지 생산용 작물과 짚, 유채대와 같은 농업부산물을 연료용 펠릿의 원료로 사용하는 방안이 수행되었다[5-9]. 심지어 목재펠릿 시장이 안정기에 도달한 유럽연합에서도 농업부산물을 이용하여 제조하는 비목재펠릿(non-woody pellet)에 대한 관심과 함께 우크라이나, 폴란드, 체코 등에서 약 160만 톤의 비목재펠릿을 생산하고 있으며, 이는 유럽연합의 전체 펠릿 생산량의 10%를 차지하는 양이다[10].

본 연구에서 비목재펠릿 제조용 원료로 사용된 유채대는 유채의 종실에서 식용유 또는 바이오디젤을 생산한 후 발생하는 부산물이다. 국내 유채 재배면적을 보면, 2021년 600 ha에서 2022년 800 ha로 소폭 증가하였으나, 국내에서 생산되는 유채유는 약 300 톤으로 연간 국내 식용유 소비량 114만 톤 중에 차지하는 비중은 미미한 수준이다[11]. 2010년 전후 유채씨가 바이오디젤 생산용 원료로 적합한 것으로 밝혀지면서 새만금 간척지에 대규모로 재배되었으나, 수송용 바이오연료 생산에 대한 관심 부족 및 낮은 경제성으로 현재 관상용으로만 재배되고 있다. 유채의 경제성 확보를 위하여 유채유, 식용 유채 잎 및 일부 토양 개량, 사료용으로 사용되고 있는 유채박 외에 미이용되고 있는 유채대의 활용을 통한 bio-refinery 공정의 기술 개발이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구는 유채로부터 유채유 및 바이오디젤을 생산하는 과정에서 발생하는 농업부산물인 유채대를 비목재펠릿 생산용 원료로 활용하는 방안을 모색하고자 수행하였다.

유채대와 같은 짚류는 낮은 밀도로 운송, 취급 및 보관의 어려움과 함께 단위부피당 순에너지량이 낮아 에너지용 작물로서 부적합한 것으로 알려져 있으나, 이는 압밀화를 통하여 해결이 가능하다. 대부분의 농업부산물을 펠릿 원료로 사용할 경우 높은 질소, 황, 염소 그리고 회분 함량으로 연소 후에 많은 양의 대기오염 물질이 발생되어 가정용 보일러 원료로 사용이 불가하며, 회분의 용해온도가 낮아 연소 시에 보일러 내에 클링커(clinker) 현상 및 부식을 초래할 수 있다[12]. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 목재와 같이 회분 함량이 낮은 원료와 혼합하여 펠릿을 제조하거나, 야지 폭로를 통하여 유채대 내에 함유되어 있는 일정량의 회분을 근본적으로 감소시켜 펠릿 원료로 사용하거나, 회분 제거를 위하여 적절한 장치를

보유한 보일러를 사용하는 등의 연구 결과가 발표되었다[13-15]. 한편 Yang 등(2014)은 냉수, 산 및 알칼리 용액에 일정 시간 침지시킨 유채대를 실험실-규모의 피스톤형 펠릿성형기로 비목재펠릿을 제조한 후, 이에 대한 품질을 측정된 결과 대부분의 연료적 특성이 향상된 것으로 보고하였다[9]. 특히 1% 농도의 초산 용액에 72시간 침지시킨 유채대로 제조한 비목재펠릿의 경우 내구성을 제외한 모든 항목에서 ISO의 A 등급 기준을 만족함과 동시에 침지액으로부터 바이오에탄올 생산 원료인 glucose 함량이 높다고 보고하였다[15].

따라서 본 연구는 선행연구 결과를 토대로 1% 농도의 초산 수용액에 72시간 침지시킨 유채대를 원료로 과일릿 규모의 평다이 펠릿 성형기로 비목재펠릿을 제조하고, 이렇게 생산된 펠릿의 연료적 특성을 평가하였다. 선행연구에서 유채대를 피스톤형 성형기의 온도 및 시간 조절한 상태에서 1개씩 제조된 펠릿의 연료적 특성을 평가하여 최적 제조조건을 탐색하였다. 반면 본 연구에서는 10분당 6-7 kg의 펠릿 제조가 가능한 과일릿 규모의 평다이(flat-die) 성형기로 펠릿을 제조한 후, 임의적으로 수거한 펠릿의 연료적 특성 평가를 수행하였다[16]. 이 결과를 토대로 유채대의 비목재펠릿 생산용 원료화 방안 및 상용화 가능성을 확인할 수 있었다. 또한 침지액 내에 존재하는 당의 정량/정성 분석을 통하여 유채대의 바이오리파이너리 측면에서 활용 가능성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2-1. 공시재료

경상북도 경산시에서 2009년 7월 말에 수거한 유채대를 햇빛에 6-8시간 건조시킨 후, 화쇄용 전정가위를 이용하여 주대와 잔가지를 분리하였다. 분리한 각 부분을 8 마력 목재용 파쇄기(성창기계, 경기, 남양주)로 일차적으로 분쇄하여 10~20 mm 크기의 입자를 얻었다(Fig. 1). 이렇게 파쇄된 유채대는 단당의 추출 및 비목재펠릿 제조를 위한 원료로 사용하기 전까지 창고에 보관하였다. 유채대와 함께 혼합 펠릿 제조용 원재료로 사용된 목분은 낙엽송(*Larix kaempferi* C.) 제재 톱밥으로 산림조합중앙회 목재유통센터(경기, 여주)에서 공급받아 사용하였으며, 사용하기에 앞서 목분 함수율을 관련 연구를 통하여 확인된 11%로 조절하였다[17].



Fig. 1. Images of milling machine (top-left), screen used in the machine (top-right), grounded rape stalk (bottom-left), and the rape stalk completed immersion treatment (bottom-right).

한편 파쇄된 유채대의 침지 처리를 위하여 사용된 초산은 (주) OCI(전북, 군산)에서 화학실험용 시약을 구입하여 사용하였으며, 침지 처리가 완료된 유채대를 냉수로 5회 이상 세척하였다. 침지/세척한 유채대와 무침지 유채대를 $12\pm 1\%$ 까지 건조한 후, 펠릿 제조용 원료로 사용하였다.

2-2. 침지액의 조제 및 침지 처리

유채대 침지를 위하여 1% 농도의 초산 수용액 50 L를 플라스틱 통(110 L 용량)에 10 kg의 유채대와 함께 넣고 목재 각재를 이용하여 충분히 교반한 후, 야외에서 72시간에 걸쳐 침지하였다(Fig. 1). 침지가 완료된 유채대를 충분히 세척한 후, 함수율 $12\pm 1\%$ 까지 건조하였다. 이렇게 준비된 유채대를 펠릿 제조에 앞서 plastic bag에 밀봉 보관하였다. 한편 침지액은 filter paper(No. 2, Adventec, Kyoto, Japan)로 여과하였으며, 유리당 분석을 위하여 10 mL 용량의 vial에 넣어 냉장 보관하였다.

2-3. 유채대의 가수분해 및 구성당 분석

보관된 vial에서 1 mL 침지액을 0.45 μ m membrane filter로 여과한 후, High Performance Liquid Chromatograph (HPLC; HP1100, Hewlett Packard, Palo Alto, CA, USA)을 사용하여 유리당을 분석하였다. 이동상으로 acetonitrile과 증류수를 75:25의 비율로 혼합한 용액을 사용하였고, column은 Sugarpak column (300 mm \times 6.5 mm)을 사용하여 1 mL/min의 유속으로 분석하였다. 각 피크 검출에는 Refractive Index detector (HP1100, Hewlett Packard, Palo Alto, USA)를 사용하였다. 당류 정량을 위한 표준물질로서 표준 glucose, arabinose, galactose, xylose, mannose를 이용하여 검량선을 작성하고, 이를 기준으로 유리당의 양을 계산하였다.

2-4. 탄소함량 분석

무침지 및 침지 유채대 시료와 대조구로 사용된 낙엽송 목분을 가정용 믹서로 분쇄한 후 60 mesh 이상의 분말을 각각 1,014 $^{\circ}$ C의 온도에서 연소시켜 석영관의 구리층을 통과시키면서 탄소 분석에 용이한 CO₂로 전환하였다. 이 CO₂를 gas chromatography column에 통과시키면서 분리한 후, 열전도검출기에 의하여 전기신호로 정량적으로 변환하였다. 다음으로 표준시료를 이용하여 검량곡선을 작성한 후, 각 시료별 탄소 함량을 측정하였다. 탄소 함량의 분석 결과는 3회 반복의 평균값으로 표시하였다.

2-5. 펠릿의 제조 및 연료적 특성 분석

침지 및 세척/건조가 완료된 유채대를 목재용 파쇄기로 이차적으로 분쇄하였으며, 이 과정에서 2 mesh 표준망체 위에 남은 유채대는 재차 파쇄하여 일정한 크기의 유채대를 펠릿 제조에 사용하였다(Fig. 2). 펠릿 제조는 먼저 무침지 및 침지 유채대만을 사용하여 제조하였으며, 제조된 펠릿의 연료적 특성 향상을 위하여 전건무게 기준 90 wt%의 낙엽송 목분과 10 wt%의 무침지 유채대 그리고 10 wt% 및 20 wt%의 낙엽송 목분과 90 wt% 및 80 wt%의 침지 유채대를 혼합하여 펠릿을 제조하였다(Fig. 3). 펠릿의 제조는 파일럿 규모의 평다이(flat-die) 펠릿 성형기(15 KWh)로 제조하였으며, 42 kg/h의 생산량, 링의 길이를 29.05 mm, 링의 길이/직경(L/D) 비를 4.843으로 조절하였다. 이렇게 제조된 펠릿은 연료적 특성의 평가에 앞서 실험실 내에서 최소 24시간 동안 자연 건조하였으며, 제조

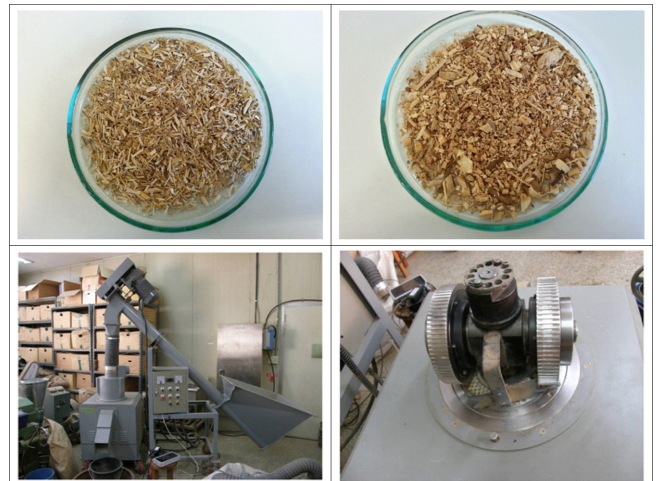


Fig. 2. Images of milled rape stalk (top-left), larch sawdust (top-right), pilot-scaled flat-type pelletizing mill (bottom-left) and its rollers and die (bottom-right) used for the production of non-woody pellets.



Fig. 3. Images of non-woody pellets produced with 100 wt% non-immersed rape stalk (top-left), 90 wt% larch sawdust/10 wt% non-immersed rape stalk (top-right), 10 wt% larch sawdust/90 wt% immersed rape stalk (bottom-left) and 20 wt% larch sawdust/80 wt% immersed rape stalk (bottom-right).

된 펠릿의 지름과 길이는 평균 5.9 mm와 27.4 mm로 조사되었다(Fig. 3). 제조된 펠릿의 함수율, 겉보기밀도, 발열량, 내구성, 회분량은 국립산림과학원에서 규정한 “목재펠릿 품질규격”에 기술된 방법에 따라 측정하였다[18].

2-6. 실험설계 및 통계학적 분석

제조된 펠릿의 연료적 특성 측정을 통하여 유채대의 침지 및 무침지 처리 간의 차이와 각 유채대에 목분의 혼합이 펠릿의 연료적 특성에 미치는 영향에 대하여 각각 통계학적으로 분석을 수행하였다. 펠릿 연료적 특성에 대한 상기 인자들의 영향은 분산분석을 통하여 Minitab 프로그램(Minitab LLC, Anyang Gyeonggi-do)의 ANOVA 명령어를 이용하여 95% 신뢰 범위에서 통계학적 분석을 수행하였다. 통계학적으로 $p < 0.05$ 수준에서 영향을 받았을 경우, Fisher's LSD (least significant different: 최소유의차) 검정을 위한

다중비교 방법 중에 가장 많이 사용되는 Student t-test에 의하여 각 평균값 간의 차이에 대한 유의성을 추가로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 유채대 침지액의 유리당 분석

Table 1은 1% 농도의 초산 수용액에 72시간 동안 침치시킨 유채대에서 분리된 유리당의 종류 및 양을 측정한 결과이다. 유리당의 함량은 glucose가 가장 높았으며, 다음으로 xylose, galactose, arabinose, mannose 순으로 조사되었다. Yang 등(2013)에 의하여 수행된 실험실 규모 연구 결과에 따르면 glucose와 arabinose만이 검출되었으나, 동일한 침지 조건에서 수행한 본 연구에서는 glucose, arabinose 외에 일정량의 xylose, galactose와 함께 소량의 mannose까지 검출되었다[9]. 이는 침지한 유채대 양의 증가로 소량 침지보다 분리된 유리당의 양이 증가함에 따라 유채대에 기본적으로 함유된 유리당이 검출 한계치를 초과하여 나타난 결과라 판단된다[19]. 이렇게 측정된 glucose의 양은 224 ppm으로 실험실 규모의 검출량(849 ppm)보다 크게 낮아졌는데, 이는 침지과정에서 유채대가 부유하였으며, 결과적으로 침지된 유채대 양이 실험실 규모 연구보다 상대적으로 적어 나타난 결과라 생각한다. 따라서 침지 과정에서 중량추를 이용하여 유채대의 부유를 방지하고, 유채대에 대한 적절한 침지 조건을 적용한다면 유채대의 1% 농도의 초산 침지액에서 유리되는 glucose 양은 증가할 것으로 예상된다. 한편 유채대는 35.5~36.6%의 cellulose, 22.9%~24.1%의 hemicellulose, 15.6%~16.8%의 lignin으로 구성되어 있어 국내외에서 대량 발생하는 옥수수대(corn stalk)와 비교하여 cellulose와 lignin 함량은 높은 반면 hemicellulose 함량은 낮다[20]. 따라서 glucose를 제외하고 유채대로부터 얻을 수 있는 유리당의 함량은 낮을 것으로 사료된다.

3-2. 펠릿의 연료적 특성

초산 수용액(1% 농도)에 침지한 유채대(immersed rape stalk, 이하 IRS) 및 무침지 유채대(non-immersed rape stalk, 이하 NIRS)

만으로 제조한 펠릿 그리고 IRS와 NIRS에 낙엽송 목분(larch sawdust, 이하 LAS)을 혼합하여 제조한 펠릿의 연료적 특성을 측정 한 결과는 Table 2와 같다.

3-2-1. 함수율

IRS 및 NIRS만으로 제조한 펠릿의 함수율은 11.5%로 차이가 없었다($p=0.49$). 한편 NIRS의 높은 회분 함량(8.1%)을 고려하여 전건중량 기준으로 10 wt%의 NIRS에 90 wt%의 LAS를 혼합하여 제조한 펠릿(이하 NIRS-10%/LAS-90%)의 함수율은 NIRS만으로 제조한 펠릿의 함수율보다 낮았다($p=0.02$). 이는 LAS의 낮은 함수율(11)에서 비롯된 결과라 판단된다(Fig. 4). 침지 처리에 의한 IRS의 낮은 회분 함량을 고려하여 90 wt%의 IRS와 10 wt%의 LAS(이하 IRS-90%/LAS-10%) 그리고 80 wt%의 IRS와 20 wt% LAS로 제조한 펠릿(이하 IRS-80%/LAS-20%)의 함수율 간에는 차이가 없었다($p=0.01$). 한편 본 연구에서 제조한 모든 종류의 펠릿 함수율은 ISO의 비목재펠릿 A 등급 기준을 만족하였다[21].

3-2-2. 회분

NIRS 펠릿의 회분 함량(8.1%)은 예상대로 IRS 펠릿보다 크게 높았으며($p=0.01$), 그 값은 ISO의 비목재펠릿 A 등급 기준(7.6%)을 크게 상회하였다(Fig. 4). 따라서 그 기준치를 만족시키기 위하여 제조한 IRS-90%/LAS-10% 펠릿의 회분 함량은 크게 감소하였는데($p=0.01$) 이는 LAS의 낮은 회분 함량(0.6%)에서 기인한 결과라 생각한다.

초산 수용액을 이용한 유채대의 침지처리를 통하여 얻은 IRS의 회분 함량은 3.2%로 크게 감소하였으며, 이는 ISO의 비목재펠릿 A 등급 기준을 만족시켰다[21]. Table 3은 NIRS와 IRS에 함유된 무기성분의 정성분석 결과이다. NIRS 및 IRS에서 칼륨의 함량이 가장 높았으며, 다음으로 칼슘, 나트륨, 마그네슘 순으로 함유된 것으로 조사되었다. 이 외에 망간, 아연, 구리, 크롬, 납, 카드뮴, 실리콘 등도 소량에 함유된 것으로 나타났다. 유채대에 함유된 모든 무기 성분 함량은 초산 수용액 침지를 통하여 감소하였으며, 유채대에

Table 1. Sugar contents of rape stalk immersed in 1% acetic acid solution for 72 hr

Immersed conditions	Arabinose (ppm)	Galactose (ppm)	Glucose (ppm)	Xylose (ppm)	Mannose (ppm)
1% acetic acid	42.7±2.4	53.1±0.9	224.4±6.6	78.1±1.3	13.0±1.0

Table 2. Fuel characteristics of non-woody pellets fabricated with no-immersed, immersed rape stalk or/and larch sawdust

Pellet type	Moisture content (%)	Ash content (%)	Calorific value (MJ/kg)	Bulk density (kg/m ³)	Durability (%)
NIRS ^a /LAS ^b =100/0	11.5±0.7	8.1±0.2	18.6±0.5	685±19	82.8±0.5
NIRS ^a /LAS ^b =10/90	10.0±1.1	1.6±0.1	19.5±0.1	840±25	96.2±0.8
LAS ^b	7.9±1.9	0.6±0.3	20.2±0.0	697±10	98.8±0.6
IRS ^c /LAS ^b =100/0	11.5±0.9	3.2±0.1	19.2±0.1	747±8	86.6±0.8
IRS ^c /LAS ^b =90/10	11.7±1.2	3.1±0.0	19.1±0	832±16	93.6±0.9
IRS ^c /LAS ^b =80/20	11.7±0.8	2.2±0.2	19.2±0.1	846±5	94.5±0.6
ISO 17225-6 A-grade pellet ^d	≤12.0	≤6.0	≥14.5	≥600	≥97.5
ISO 17225-6 B-grade pellet ^d	≤15.0	≤10.0	≥14.5	≥600	≥96.0

^aNIRS: No-immersed rape stalk

^bLAS: larch sawdust

^cIRS: Immersed rape stalk

^dSpecification of non-woody pellets produced from herbaceous biomass, fruit biomass and mixture.

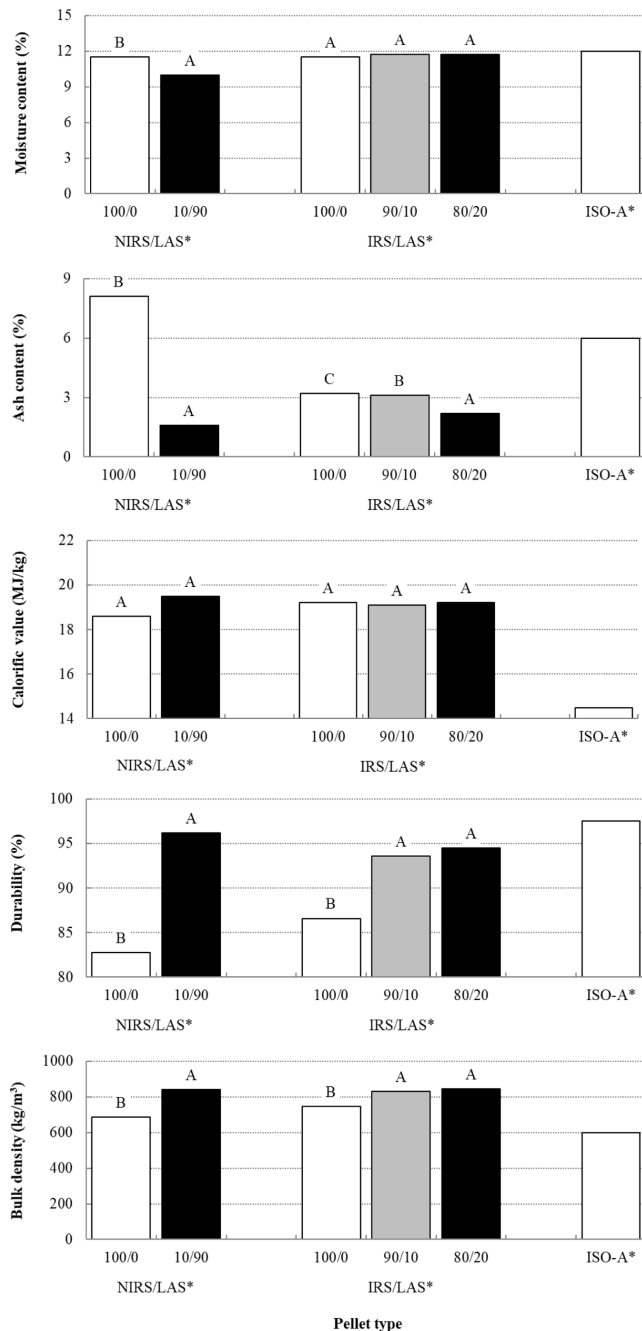


Fig. 4. Effect of pellet type on the fuel characteristics of rape stalk-based pellets. *NIRS: non-immersed rape stalk; IRS: immersed rape stalk; LAS: larch sawdust; and ISO-A: 17225-6 (Fuel specifications and classes for A grade non-woody pellet).

대한 분쇄 처리도 무기성분을 일정 수준까지 감소하는 것으로 보고되었다[7]. 따라서 저농도의 산용액에 적절한 조건으로 침지한 후, 세척/건조한 것을 과쇄할 경우 유체대를 포함하여 벼, 대마, 고추, 담배와 같은 농업폐기물인 짚류에 함유된 무기성분을 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 예상된다.

한편 IRS 펠릿의 연소에 의한 클링커 현상의 발생을 최소화하기 위하여 IRS에 LAS의 첨가는 회분 함량을 감소시켰으며, LAS 첨가량의 증가와 함께 감소하였다(Fig. 4), 이는 상기에서 언급한 바와 같이 LAS의 낮은 회분 함량에 의하여 나타난 결과이다. 따라서

Table 3. Ashes content of rape stalks which were non-immersed and immersed in the acetic acid-based aqueous solution of 1% concentration (unit: mg/kg)

	Non-immersed rape stalk	Immersed rape stalk
Potassium	41,515.6	19,658.6
Calcium	25,495.5	12,072.7
Sodium	5,359.4	2,537.8
Magnesium	2,876.7	1,362.2
Iron	299.3	141.7
Manganese	81.6	38.6
Zinc	31.0	14.7
Copper	6.3	3.0
Chromium	3.5	1.7
Lead	1.7	0.8
Cadmium	0.5	0.2
Silicone	0.1	-

IRS를 이용한 비목재펠릿 제조에 있어 LAS의 첨가는 용이하게 회분 함량을 저하시키는 방법으로 확인되었으며, 결과적으로 IRS 펠릿의 최종 용도에 따라 LAS 첨가량의 조절이 필요할 것으로 생각한다.

3-2-3. 발열량

NIRS와 IRS의 발열량은 각각 18.6 MJ/kg 및 19.2 MJ/kg로 차이가 없었으나($p=0.07$), LAS의 발열량(20.2 MJ/kg)보다 낮았다. 이는 LAS(45.94%)와 비교하여 NIRS(41.21%)와 IRS(43.92%)의 낮은 탄소 함량에서 기인한 결과라 생각한다. 이 외에 LAS(30.7%)보다 IRS의 낮은 리그닌 함량(20.1%)도 IRS의 낮은 발열량에 원인인 것으로 판단된다[17]. 한편 Fig. 4에서 보는 바와 같이 발열량이 높은 LAS의 첨가로 NIRS-10%/LAS-90%의 발열량이 증가할 것으로 예상하였으나, NIRS에 90 wt%의 LAS 사용은 발열량에 영향을 미치지 않았다($p=0.06$). 이는 NIRS 발열량의 큰 편차 또는 실험적 오류에서 기인한 결과라 생각한다. 한편 IRS에 10 wt% 및 20 wt%의 LAS를 추가하여 제조한 펠릿의 발열량 간에도 차이가 없었는데 (IRS & IRS-10%/LAS-90%: $p=0.20$; IRS-10%/LAS-90% & IRS-20%/LAS-80%: $p=0.12$) 이는 LAS 첨가량이 소량인 관계로 발열량에 미치는 영향이 크지 않아 나타난 결과라 생각한다. 본 연구에서 제조된 모든 NIRS 및 IRS 펠릿의 발열량은 ISO의 비목재펠릿 A 등급 기준(14.5 MJ/kg)을 상회하여 모든 용도에서 사용이 가능할 것으로 사려된다[21].

3-2-4. 내구성

Fig. 4에서 보는 바와 같이 NIRS 및 IRS를 이용하여 제조한 펠릿의 내구성은 ISO의 비목재펠릿 A 및 B 등급 기준($\geq 97.5\%$, $\geq 96.0\%$)과 비교하여 낮았다[21]. NIRS의 경우, 표층에 존재하는 다량의 무기성분이 NIRS 간의 결합에 부정적인 영향을 미쳐 나타난 결과라 판단된다[22]. 반면 IRS의 경우 무기성분은 침지 과정을 통하여 저감되었으나, 펠릿 내에서 바인더 역할을 하는 헤미셀룰로오스 및 리그닌이 분해 및 유리됨에 따라 결합력이 저하되어 나타난 결과라 추정된다[9,23]. NIRS와 IRS만으로 제조한 펠릿의 내구성 간에도 차이가 없었는데($p=0.08$) 이는 침지 처리를 통하여 저감되는 분해/유리되는 성분 간의 상쇄현상에서 기인한 결과라 생각한다.

NIRS 및 IRS 펠릿의 높은 회분량과 낮은 내구성 문제를 해결하기 위하여 제조한 10%-NIRS/90%-LS 펠릿의 내구성은 크게 증가하였다($p=0.02$). 이는 펠릿 전체 중량에서 90 wt%를 차지하는 LAS의 리그닌과 헤미셀룰로오스가 바인더 역할을 담당하여 나타난 결과라 생각한다. 또한 IRS에 10 wt% 및 20 wt%의 LAS를 첨가하여 제조한 펠릿의 내구성도 IRS 펠릿보다 높았다(IRS & IRS-10%/LS-90%: $p=0.01$; IRS-10%/LS-90% & IRS-20%/LS-80%: $p=0.04$), 이는 상기에서 언급한 바와 같이 침지 처리를 통하여 유채대 표층에 존재하는 무기성분이 제거됨에 따라 소량의 LAS를 첨가했음에도 불구하고 IRS와 LAS 간에 결합 정도가 향상되어 나타난 결과로 추정된다. 그러나 IRS에 10 wt% 및 20 wt% LAS를 사용하여 제조한 펠릿의 내구성 간에는 차이가 없었는데($p=0.12$) 이는 첨가하는 LAS 양이 제한되어 나타난 결과라 생각한다. 따라서 유채대 펠릿의 낮은 내구성 문제를 해결하기 위하여 IRS에 전건 중량을 기준으로 최소 30 wt% 이상의 LAS를 첨가하여 펠릿을 제조하는 방안이 농업폐기물의 고체 바이오연료 원료화라는 관점에서 가장 적합할 것으로 판단된다.

3-2-5. 겔보기밀도

본 연구를 위하여 제조한 모든 NIRS- 및 IRS-기반 펠릿의 겔보기밀도는 ISO의 비목재펠릿 A 등급 기준(600 kg/m^3)을 상회하였다(Fig. 4). 겔보기밀도에 대한 유채대의 침지 여부의 영향을 보면 IRS가 NIRS보다 높았는데($p=0.01$), 이는 침지 처리에 의하여 유채대가 연화됨으로써 성형 과정에서 압밀화 정도가 향상되어 나타난 결과라 생각한다. 한편 NIRS 또는 IRS에 LAS를 첨가하여 제조한 펠릿의 겔보기밀도도 증가하였는데($p=0.01$), 이는 목분 또는 NIRS/IRS 간의 공간에 조직이 연화된 NIRS/IRS 또는 LAS가 위치한 결과에서 기인한 것으로 생각한다[23]. 그러나 IRS/LAS 펠릿에서 LAS 첨가량을 10 wt%에서 20 wt%로 증가시켰을 때 겔보기밀도는 차이가 없었는데($p=0.13$) 이는 IRS 펠릿의 겔보기밀도는 LAS보다 IRS에 영향을 받는다는 것을 의미한다.

4. 결 론

무침지 유채대(NIRS), 1% 농도의 초산 수용액에 72시간 동안 침지시킨 유채대(IRS) 그리고 낙엽송 목분(LAS)을 단독 또는 혼합한 후, 과일릿 규모의 평다이 성형기를 이용하여 펠릿을 제조하였다. 이 과정에서 발생하는 침지액의 유리당 분석과 제조된 펠릿의 연료적 특성을 측정하여 유채대를 원료로 이용한 비목재펠릿의 상용화 가능성을 확인하였다. 침지액을 분석한 결과 glucose 함량이 가장 높았으며, 다음으로 xylose, galactose, arabinose, mannose 순으로 조사되었다. 유채대의 초산 수용액 침지 처리를 통하여 다양한 단당류가 단리되는 것으로 조사되어 바이오리파이너리 측면에서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

다음으로 NIRS 및 IRS를 원료로 제조한 펠릿의 연료적 특성을 평가한 결과, NIRS 펠릿은 함수율, 겔보기밀도, 발열량은 ISO의 비목재펠릿 A 등급 기준을 크게 상회하였으나, 회분 함량에서 그 기준을 만족시키지 못하였다. 이의 해결 방안으로 10 wt%의 NIRS와 90 wt%의 LAS를 이용하여 제조한 펠릿의 회분량은 ISO의 A 등급 기준을 만족하였으나, 내구성 기준을 충족시키지 못하였다. 한편 IRS만으로 제조한 펠릿의 연료적 특성은 내구성을 제외하고 나머

지 연료적 특성 항목에서 ISO의 A 등급 기준을 상회하였으며, LAS와 혼합하여 제조한 펠릿은 IRS 펠릿보다 낮은 회분량 및 높은 겔보기밀도와 내구성을 보유하고 있는 것으로 조사되었다. 특히 IRS/LAS 펠릿에서 LAS 양의 증가는 회분량 감소 및 내구성 향상에 기여하여 적절한 혼합 조건만 찾는다면 다양한 용도의 비목재펠릿 원료로 사용이 활용이 가능할 것으로 생각한다. 그러나 IRS로 제조한 펠릿의 낮은 내구성 문제를 해결하기 위하여 바인더의 첨가, LAS 첨가량의 증가 및 세분화된 범위의 침지 조건 등에 대한 탐색과 같은 추가 연구가 수행되어야 할 것으로 생각한다. 본 연구는 국내외에서 대량으로 발생하는 농업폐기물을 원료로 과일릿 규모의 펠릿 성형기를 이용하여 제조한 비목재펠릿에 대한 국내 최초 연구로서 향후 고체 바이오연료 제조용 원료로서 다양한 종류의 활용 가능성을 확인했다는 측면에서 큰 의미를 제공했다고 생각한다.

감 사

본 논문은 2019년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행하였다. 한편 유리당 분석에 도움을 준 서울대학교 산림과학부 환경재료과학전공 대학원생들과 유채대 수거를 위하여 긴 시간 수고한 대구대학교 산림자원학과 학생들에게도 감사드립니다.

References

- Lee, S. M., Lee, O. G., Ahn, B. J., Choi, S. H., Cho, S. T. and Kim, O. J., "Wood Pellets as a Clean Energy for the Green Growth of Low-carbon Emission," *Bulletin of Forest Science* 09-02(2009).
- Han, G. S., "Trend and Outlook of Wood Pellet Industry," *Korea Ind. Chem. News*, **15**(6), 54-61(2012).
- Korea Forest Service, "Production and Importation of Wood Pellets," (2022) https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/cms/cms-View.do?mn=NKFS_02_01_11_04_02&cmsId=FC_000811 [Accessed 18 September 2023].
- Mordor Intelligence, 2022, "Wood Pellet Market – Growth, Trends, COVID-19 impact, and forecasts (2022 – 2027)," (2022) <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/wood-pellet-market> [Accessed 5 June 2023].
- Han, G. S., Lee, S. M. and Shin, S. J., "Densified Pellet Fuel Using Woody Core of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) as An Agricultural Waste," *Korean J. Plant Res.* **22**(4), 293-298(2009).
- McLaughlin, S. B. and Walsh, M. E., "Evaluating Environmental Consequences of Producing Herbaceous Crops for Bioenergy," *Biomass Bioenergy*, **14**(4), 317-324(1998).
- Yang, I., Oh, S. C., Ahn, S. H., Choi, I. G., Kim, Y. H., Lee, S. M. and Han, G. S., "Pellets Made with Rapeseed Flour and Rape Stalk Obtained from the Production of Bio-diesel and the Evaluation of Its Characteristics," *J. Korea Soc. Waste Manag.* **28**(1), 89-96(2011).
- Yang, I., Jang, H. S., Oh, S. C., Ahn, S. H., Choi, I. G., Kim, Y. H., "Effects of Binder Addition and Immersion Treatment on the Qualities of Rape Stalk-based Agropellets," *J. Korea Soc. Waste Manag.* **30**(4), 1-11(2013).
- Yang, I., Ahn, B. J., Kim, M. Y., OH, S. C., Ahn, S. H., Choi, I. G., Kim, Y. H. and Han, G. S., "Separation of Reducing Sugars from Rape Stalk by Acid Hydrolysis and Fabrication of Fuel Pellets from Its Residues," *Korean J. Plant Res.* **27**(1), 60-71(2014).

10. European Biomass Association. "Pellet Market Overview," (2017) <https://epc.bioenergyeurope.org/wp-content/uploads/2017/10/FINAL-PELLET-MARKET-OVERVIEW-2017.pdf> [Accessed 18 August 2023].
11. Choi, E. J., "Can Domestic-produced Rapeseed Oil Be Replaced with Imported Cooking Oil?," (2022) <https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=5490161&ref=A> [Accessed 08 August 2023].
12. Boman, C., Öhman, M. and Nordin, A., "Trace Element Enrichment and Behavior in Wood Pellet Production and Combustion Processes," *Energy Fuels* **20**, 993-1000(2006).
13. Obernberger, I. and Thek, G., "Physical Characterization and Chemical Composition of Densified Biomass Fuels with Regard to Their Combustion Behaviour," *Biomass Bioenergy* **27**, 653-669(2004).
14. Oh, J. H. and Kim, J. W., "Devise for Cleaning Smoke Tube of Wood Pellet Boiler," Korea Patent 101346231B1(2011).
15. Park, S., Kim, S. J., Oh, K. C., Cho, L., Kim, M. J., Jeong, I. S., Lee, C. G. and Kim, D. H., "Investigation of Agro-byproduct Pellet Properties and Improvement in Pellet Quality Through Mixing," *Energy* **190**, 116380(2019).
16. Yang, I., Kim, S. and Han, G., "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* **9**(11), 1-10(2015).
17. Kim, S., Yang, I. and Han, G., "Effect of Sawdust Moisture Content and Particle Size on the Fuel Characteristics of Wood Pellet Fabricated with *Quercus mongolica*, *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* Sawdust," *J. Korean Wood Sci. Technol.* **43**(6), 757-767(2015).
18. National Institute of Forest Science. "Specifications and Quality Standards of Wood Products 2020-3," Seoul, Republic of Korea (2020).
19. Castro, E., Díaz, M. J., Cara, C., Ruiz, E., Romero, I. and Moya, M., "Dilute Acid Pretreatment of Rapeseed Straw for Fermentable Sugar Generation," *Bioresource Technol.* **102**, 1270-1276(2011).
20. Tan, J., Li, Y., Tan, X., Wu, H. and Yang, S., "Advances in Pretreatment of Straw Biomass for Sugar Production," *Front. Chem.* **9**, 696030(2021).
21. International Organization for Standardization. "Solid Biofuels Fuel Specifications and Classes. Part 6: Graded non-woody pellets," ISO 17225-6(2014).
22. Bergström, D., Israelsson, S., Öhman, M., Dahlqvist, S., Gref, R., Boman, C. and Wästerlund, I., "Effects of Raw Material Particle Size Distribution on the Characteristics of Scots Pine Sawdust Fuel Pellets," *Fuel Process. Technol.* **89**, 1324-1329(2008).
23. Lee, S. M., Ahn, B. J., Park, D. H., Choi, I. G., Han, G. S., Jeong, H. S., Ahn, S. H. and Yang, I., "Effects of Densification Variables on the Durability of Wood Pellets Fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust," *Biomass Bioenergy* **48**, 1-9(2013).

Authors

Sei Chang Oh: Professor, Department of Forest Resources Science, Daegu University, Gyeongsan, Gyeongsangbuk-do, 38453, Korea; osc@daegu.ac.kr

In Yang: Research Professor, Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Gangwon-do, 25354, Korea; dahadad@snu.ac.kr