

국내 숲가꾸기산물을 이용한 목재펠릿의 제조와 품질*¹

안 병 준*² · 김 용 식*² · 이 오 규*² · 조 성 택*² · 최 돈 하*³ · 이 수 민*^{2,4†}

Wood Pellet Production using Domestic Forest Thinning Residues and their Quality Characteristics*¹

Byoung-Jun Ahn*² · Yong Sik Kim*² · Oh-Kyu Lee*² · Sung-Taig Cho*² ·
Don Ha Choi*³ · Soo Min Lee*^{2,4†}

요 약

본 연구에서는 국내 숲가꾸기산물을 이용하여 목재펠릿을 제조하고 품질을 분석하였다. 원료는 일본잎갈나무 (*Larix kaempferi* C.)와 활엽수 혼합 수종을 사용하였으며, 말구직경 6 cm를 기준으로 침엽수와 활엽수로 구분하였다. 분쇄 후 건조된 원료를 이용하여 목재펠릿을 제조하였다. 분쇄와 건조공정을 동일 조건에서 수행하였음에도 불구하고, 원료의 물리·화학적 차이에 따라 생산되는 목재펠릿의 품질에 차이가 발생하였다. 활엽수 혼합 수종으로 제조한 목재펠릿은 회분이 1.6% 이상으로 분석되었으며, 일본잎갈나무의 경우에는 직경 6 cm 이하의 소경목에서 회분이 1.0%를 초과하였다. 목재펠릿을 제조하기 이전의 원료 상태에서의 원료 상태와 비교하여 제조 후에 회분 함량이 0.01~0.1% 정도 상승하는 것을 확인하였다. 발열량에서는 일본잎갈나무가 활엽수 혼합 원료에 비해 약 198 kcal/kg 정도 높았으며, 모든 시료에서 4,300 kcal/kg 이상으로 목재펠릿 원료로 적합한 것으로 분석되었다. 또한, 원료 상태보다 목재펠릿 제조 후 발열량이 일부 상승하는 것을 확인하였다. 원료에 포함된 주요 무기물은 수종 및 분류에 관계없이 Ca, K, Mg, Mn, Fe 등이었으며, 장기 연속 운전을 위해서는 연소기 내 클링커 형성을 억제할 수 있는 연소 방법의 개발이 요구된다. 동일한 펠릿 제조 조건에서 원료에 의해 제품 간의 품질 편차가 크게 발생할 수 있으며, 이를 극복하고 생산성 및 품질 향상을 위해서는 원료에 따른 공정 최적화가 중요한 요소임을 확인하였다.

*¹ 접수 2013년 5월 20일, 채택 2013년 7월 16일

*² 국립산림과학원 화학미생물과. Division of Wood Chemistry & Microbiology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

*³ 국립산림과학원 재료공학과. Division of Wood Engineering, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

*⁴ 국제임업연구센터. Center for International Forestry Research, Bogor 16115, Indonesia

† 교신저자(corresponding author) : 이수민(e-mail: l.soomin@cgiar.org)

ABSTRACT

In this study, it was conducted to produce wood pellets using domestic forest thinning residues and examine their quality according to Korean pellet quality standard. Raw materials were composed of larch and mixed broad leaves species. Based on the small-end diameter (6 cm), they were classified into four different types of raw materials such as LM (larch with middle diameter), LS (larch with small diameter), MM (mixed broadleaf with middle diameter), and MS (mixed broadleaf with small diameter). After crushing and drying process, wood pellets were produced by a ring-die type pelletizer using each raw material. Wood pellets made from four different types of raw materials were tested for their quality such as calorific value, moisture content, ash content, inorganic matters and so on. As results of quality analysis, the calorific values of all wood pellets were higher than 198 kcal/kg, and satisfied with the first grade of Korea wood pellet standard. The ash content was slightly increased after pelletizing. Mechanical durability of wood pellets was highly dependent on the types of raw materials. The quality differences among wood pellets were turned out due to different physical and chemical characteristics of raw materials even though the same pelletizing condition was applied.

Keywords: larch, mixed broadleaf, wood pellet, forest thinning residues, quality standard, ring-die pelletizer

1. 서 론

기후변화와 지구온난화에 따른 자연재해의 증가와 생태계 변화 등에 대한 세계 각국의 우려가 증가하고 있으며, 이러한 원인의 중심에는 과도한 화석연료의 사용으로 인한 온실가스 배출이 증가하였기 때문인 것으로 분석되고 있다. 화석연료의 이용을 줄이면서, 인류의 생산활동을 영위하기 위한 에너지 개발이 시급한 과제로 대두되고 있다. 이러한 대안은 국제회의에서 지속적으로 제기되고 있으며, 일부 선진국에서는 적극적으로 실행하기 위한 시스템을 개발하고 있다(EU, 2009).

우리나라에서도 2008년 저탄소 녹색성장을 주요 모티브로 삼아 신·재생에너지 보급을 확대하기 위한 정책이 적극적으로 도입되어 추진 중에 있으며, 현재 2.4% 보급 수준인 국내 신·재생에너지 보급 비율을 2030년까지 11%로 확대하는 것을 목표로 하고 있다(식적경제부, 2008). 또한 2012년부터 시행되고 있는 신·재생에너지 공급의무화제도(Renewable

Portfolio Standard, RPS)는 바이오매스의 에너지 이용 활성화에 촉매 역할을 할 것으로 판단되며, 국내 최대 바이오매스 자원 생산 및 이용 산업인 임업 및 임산업에 새로운 활력을 제공하여 산업의 활성화와 성장을 위한 시발점이 될 것이다. 인류에게 가장 친숙한 에너지 자원이었던 바이오매스의 현대적 이용 기술에서는 목재펠릿이 중요한 위치를 자리 잡고 있다(USDA, 2011).

목재펠릿은 톱밥, 대패밥과 같이 목재를 가공하는 과정에서 발생하는 부산물을 고온에서 압축하여 생산하는 연료 자원이며, 대표적인 탄소중립 바이오매스 자원인 목재를 이용하기 때문에 온실가스 배출을 저감할 수 있다(국립산림과학원, 2009). 또한, 작은 크기로 균일한 형태를 유지하기 때문에 연소시스템의 자동화를 가져올 수 있으며, 목재칩이나 장작에 비해 상대적으로 작은 공간에 연료를 저장할 수 있는 장점이 있다. 목재 부산물의 압축은 운송 등의 물류 시스템에서도 편리성을 제공하기 때문에 장거리 운송에서도 물류비용을 저감하는 장점을 지니고 있

다(Hansen and Jein, 2009). 목재펠릿 시장은 2000년대 초반에 유럽을 중심으로 폭발적으로 성장하기 시작하였으며, FAO에서는 세계 목재펠릿 시장이 연간 30%씩 성장하고 있는 것으로 보고한 바 있다(Peska-Blanchard *et al.*, 2008). 2012년 세계 목재펠릿 생산 설비 용량은 3천 2백만 톤을 넘어서는 것으로 분석되어 향후 열 및 전기 에너지 공급 분야에서 중요한 재생에너지 자원으로서 역할을 수행할 것으로 판단되고 있다.

산림청에서는 국내 소비 시장 확대를 위해 목재펠릿 보급사업을 2009년부터 시행해오고 있으며, 2011년 산업용 목재펠릿 보일러 보급 시범 사업을 성공적으로 마치고 2012년부터 산업용 보일러 보급사업을 진행 중에 있다. 이러한 정부의 적극적인 정책 시행과 유통업 급등 등의 환경적 요인, 소비자들의 재생에너지 이용에 대한 긍정적인 인식 변화 등은 시장이 성장하는데 뒷받침이 되고 있으며, 국내 시장은 2011년 연간 6만 톤 규모의 목재펠릿 시장이 안정적으로 형성되었으며, 2012년 이후에는 크게 확대될 것으로 전망하였다(한규성 등, 2010). 실제로 2012년 RPS제도의 본격적인 시행에 따라 발전사 등 대규모 수요처에서 목재펠릿을 사용하기 시작하면서 국내 시장규모가 170,000톤을 상회하였다. 국립산림과학원에서는 국내 목재펠릿 시장의 안정적인 확대를 도모하기 위해 2009년 목재펠릿 품질기준을 통해 품질 규격을 고시하였다. 품질 기준에서는 목재펠릿을 12가지 항목의 품질 특성에 맞추어 4개 등급으로 구분하였으며, 고품질의 목재펠릿은 가정용으로 사용하고, 회분이 다량 포함된 제품 등 품질이 낮은 경우에는 산업용으로 이용하도록 권고하고 있다. 국내 목재펠릿 시장 형성 초기에는 목재펠릿 품질에 대한 의구심과 연소기 제작 기술의 미흡 등으로 인하여 시장에서 불만이 제기되기도 하였으며, 품질 관리에 대한 지속적인 정책 시행으로 현재는 시장에서 제품의 품질 안정화가 진행되는 과정에 있다.

목재펠릿 시장 확대와 품질에 대한 중요성이 높아가면서, 목재펠릿 제조 원료에 대한 연구와 품질 영향에 대한 연구들이 지속적으로 진행되어오고 있다. 숲가꾸기산물 및 산불 발생 지역 잔존 고사 수목을

이용한 목재펠릿 제조 가능성에 대한 연구와 목재가공 공장에서 생산된 톱밥 등의 부산물을 이용한 목재펠릿의 제조 및 품질 특성 관찰 등의 제조 원료에 대한 연구가 이루어져왔으며, 품질 향상을 위한 친환경 첨가제에 대한 연구도 수행된 바 있다(권 등, 2007 & 2010; 류 등, 2010; 이 등, 2011).

목재펠릿은 임업부산물을 물리적으로 가공하여 생산하는 제품이기 때문에 원료의 특성이 최종 제품의 품질에 미치는 영향이 크다. 특히, 우리나라에서 사용될 수 있는 주요 목재펠릿 제조 원료는 산림작업을 통해 생산하는 바이오매스 중 산업적 가치가 상대적으로 낮은 숲가꾸기 사업의 부산물이나 벌채 부산물 등이 많이 이용될 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 원료를 이용하여 목재펠릿을 제조하고 그 특성을 분석하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 국내 목재펠릿 산업 발전에 기여하고자, 국내 목재펠릿 생산의 주원료인 숲가꾸기 사업을 통해 발생하는 주요 산림 부산물들을 비교적 산업 공정과 유사하게 별도의 선별 공정 없이 이용하여 목재펠릿을 제조하고 품질을 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 연구 수행을 위한 침엽수 공시재료는 춘천국유림관리소의 숲가꾸기 사업(춘천 덕두원 지역)에서 발생한 일본잎갈나무를 이용하였다. 활엽수는 국립산림과학원 산림생산기술연구소에서 2008년 숲가꾸기(포천 음현리)로부터 발생한 활엽수로 참나무류, 자작나무, 벗나무 등을 포함한 여러 수종의 활엽수종이 혼합된 상태로 공급을 받았으며, 국내 산림 여건을 고려하여 수종별로 별도 구분하지 않고 혼합하여 목재펠릿 제조원료로 이용하였다. 국내 숲가꾸기산물은 크기와 직경이 일정하지 않기 때문에, Table 1과 같이 말구 직경을 기준으로 시료를 구분하고 공시재료로 이용하였다.

Table 1. Definition and classification of raw materials

Raw material		Small-end diameter (cm)	Abbreviation
Larch	Medium	Between 6 and 18	LM
	Small	Under 6	LS
Mixed broad leaf	Medium	Between 6 and 18	MM
	Small	Under 6	MS

Table 2. Instrument specification of pelletizer used in this study

Item	Unit	Value
No. of roller	ea	2
Horse power of motor	hp	15 × 2
Voltage of motor	V	380
Rotation per minute of die	rpm	350
Inner diameter of ring die	m	03
No. of pressure hole	ea	270
Length of pressure hole	mm	36

2.2. 목재펠릿 제조 원료 준비

목재펠릿 원료를 제조하기 위해 숲가꾸기산물의 수피를 제거하지 않은 상태에서 톱밥제조기(국립산림과학원 보유)를 이용하여 톱밥을 제조하고, 직경 12 cm 이상의 목재는 톱밥제조기에 직접 투입되지 않아 1차 제재를 통해 직경의 크기를 10 cm 이하로 제제한 후 톱밥을 제조하였다. 제조된 톱밥의 건조는 컨베이어벨트 방식의 톱밥건조기(2톤/시간, ㈜건조기술)를 임차하여 수행하였으며, 건조된 원료는 습기에 노출되지 않도록 내부가 플라스틱 비닐로 코팅된 자루에 투입원료별로 구분하여 포장한 후 운송하였다. 제조된 원료의 크기는 체진동기(Analysette 3 Pro, Fritsch, Germany)를 이용하여 40 mesh, 60 mesh 및 100 mesh의 체를 이용하여 입자 분포를 분석하였다.

2.3. 목재펠릿의 제조

본 연구에 사용된 목재펠릿은 국립산림과학원이



Fig. 1. Image of ring-die type pelletizer used for the pellet production in this study.

보유하고 있는 DEP-500 ((주)건조기술)을 이용하여 제조하였다. DEP-500의 기본적인 구조는 링(Ring) 형태의 다이스로 구성된 목재펠릿 성형기로 15 kW 용량의 모터 두 개가 다이스를 분당 350 rpm의 속도로 회전시켜 목재펠릿을 생산하였다.

성형기의 다이스 크기는 안쪽 지름 300 mm, 폭 180 mm로, 직경 6 mm의 구멍이 1열에 3개씩 배열되어 있으며, 총 다이스 내 홀의 수는 270개다. 펠릿이 성형되는 부분인 pressure hole의 길이는 36 mm

로 펠릿 직경과 pressure hole 길이의 비율은 1:6으로 하였다. 펠릿제조 원료는 성형기 상단의 호퍼에 투입되면 1차 연료공급 장치, 2차 혼합기를 통해 성형기 내부로 공급된다. 생산 공정은 시간 당 30 kg의 원료를 공급하고, 원료의 공급 속도를 0.5~1.0 kg에서 조정하였다. 수분 공급량은 0~0.8 ℓ/min.에서 적당한 수분이 공급될 수 있도록 조정하였으며, 생산되는 펠릿의 육안검사로 품질을 구분하였다. 목재펠릿의 생산 시 발생하는 미세분과 성형된 펠릿을 구분하기 위해 생산 직후에 1 mm 크기의 체를 이용하여 미분을 제거하고 중량을 비교하여 최종 수율을 측정하였다.

2.4. 목재펠릿 품질 분석

제조된 목재펠릿의 품질은 목재펠릿 품질규격(국립산림과학원, 2009)에 따라 직경 및 길이, 겉보기 밀도, 내구성 등의 물리적 특성분석과 함수율, 발열량, 회분 등의 연료 특성분석과 질소, 유황, 염소분석 등을 수행하였다.

2.4.1 직경 및 길이

생산된 목재펠릿의 직경과 길이를 측정하기 위해 시험 생산한 목재펠릿으로부터 100 g을 채취하였으며, 25개의 목재펠릿을 무작위로 채취한 후 버니어 캘리퍼스를 이용하여 직경과 길이를 0.1 mm 단위까지 측정하였다. 목재펠릿 품질 기준의 시험 방법에서는 정확도를 구하기 위해 소수점 둘째 자리까지 측정하여 기록하였다.

2.4.2. 겉보기밀도

겉보기밀도는 1 m³의 부피에 저장할 수 있는 목재펠릿의 무게를 나타내는 값이다.

$$D_{ad}(atM_{ad}) = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (1)$$

D_{ad} : 습량 기준 펠릿의 겉보기밀도

M_{ad} : 습량 기준 펠릿의 함수율

m₁ : 빈 용기의 무게

m₂ : 펠릿을 채운 용기의 무게

V : 용기의 부피

2.4.3. 내구성

내구성 시험은 국립산림과학원 목재펠릿 품질 기준(국립산림과학원, 2009)을 준용하여 수행하였다. 목재펠릿 500 ± 50 g을 0.01 g 수준까지 무게를 측정하고, 내구성 시험기(tumbling tester)를 이용하여 10분간 500회전 시험을 수행하였다. 측정 후 ISO 3310-2에서 규정하고 있는 직경 3.15 mm의 원형 체로 거른 후 무게를 측정하고 다음의 공식을 이용하여 내구성을 분석하였다.

$$DU = \frac{m_a}{m_e} \times 100 \quad (2)$$

DU : 내구성

m_a : 내구성 시험 후, 체로 거른 후의 펠릿 무게

m_e : 내구성 시험 전, 체로 거른 후의 펠릿 무게

2.4.4. 회분

시료 2 g을 도가니에 넣고 적당한 승온 시간을 거쳐서 온도를 575 ± 25°C까지 상승시킨 후, 목재펠릿이 완전히 연소될 때까지 반응시킨 다음 4시간 반응시켜 생성된 회의 무게를 측정하였다. 도가니 내에 잔류물과 같은 불완전 연소를 확인하고 무게를 0.01 mg 단위까지 측정한 후, 건조 중량에 대한 회분 함량을 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$A_{dm} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (3)$$

A_{dm} : 전건펠릿의 회분(건량기준)

m₁ : 도가니의 무게

m₂ : 도가니 + 시료의 무게

m₃ : 도가니 + 회분의 무게

M_{ad} : 펠릿의 함수율(습량기준)

Table 3. Bark content of raw materials

	LM	LS	MM	MS
Average	10.31	23.45	27.69	29.97
SD	± 0.76	± 6.81	± 3.53	± 11.99

(Unit : %)

2.4.5. 발열량

목재펠릿의 발열량은 이중 봄베형 열량계(Parr 1281, USA)를 이용하여 측정하였다. 점화선에 해당하는 열량은 측정치에서 자동으로 삭감되도록 프로그램을 조정하였으며, 약 0.5 g의 시료를 이용하여 산소 분위기에서 실험을 수행하였다. 분석을 수행하기 전에 benzoic acid 펠릿을 이용하여 장비를 검증하였다. 산출된 결과는 함수율을 고려하여 건조된 바이오매스 기준 고위발열량으로 표시하였다. 모든 실험은 3회 이상 반복하여 평균값을 발열량으로 분석하였다.

2.4.6. 원소분석

TCD (Thermal Conductivity Detector) 방식의 원소분석기(EA 1112A, Thermo, USA)를 이용하여 목재펠릿의 질소, 탄소, 수소, 황의 성분을 분석하였다. 유황 함량은 장비의 검출한계로 인하여 결과로 채택하지 않았으며, 무기물 분석 시 총 황 함량을 별도로 측정하였다. 원소분석에서는 BBOT (2,5-(Bis(5-tert-butyl-2-benzo-oxazol-2-yl)thiophene)를 표준물질로 사용하였으며, 측정에 사용된 시료는 1.5 ± 0.25 mg이 되도록 하였다.

2.5. 목재펠릿의 무기물 분석

목재펠릿 내에 포함된 무기물의 함량을 분석하기 위해 입업진홍원이 보유하고 있는 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry)를 이용하여 EN 15290 (EN, 2011)과 EN 15297 (EN, 2011)에서 제시하는 분석방법을 준용하여 분석하고, 건조된 바이오매스 무게 대비 ppm으로 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 목재펠릿 제조 원료의 특성 분석

본 연구에서 사용된 일본잎갈나무와 활엽수 혼합수종의 목재펠릿 원료들은 Table 1에서 제시한 것과 같이 말구직경에 따라 분류하고 분쇄하여 제조하였다.

3.1.1. 원료별 수피율

수피가 목재펠릿 제조에 미치는 영향을 검토하기 위해 수피율을 측정된 결과는 Table 3과 같다. 임지로부터 수집된 숲가꾸기산물의 수피율은 모두 10% 이상으로 분석되었다. LM과 LS에서는 수피율이 각각 10.31%, 23.45%로, 목재펠릿 품질에 많은 차이가 있을 것으로 판단되었다. MM과 MS에서는 상대적으로 말구 직경에서의 편차가 크지 않아 수피율에서 LS와 LM 사이의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 국내 숲가꾸기산물을 이용하여 목재펠릿을 제조하는 경우, 목재펠릿 품질 규격에서 구분하고 있는 수피 함량이 5% 이하인 목부펠릿의 생산은 어려울 것으로 판단되나, 수피의 함량이 50% 이하인 일반펠릿의 제조가 가능한 것으로 분석되었다.

3.1.2. 원료별 입자 크기

분쇄 후 건조된 원료의 입자 크기 분포는 Table 4와 같다. 일본잎갈나무와 활엽수 혼합, 두 종류의 시료 모두에서 40 mesh (0.425 mm) 이상의 입자가 70% 이상 구성하고 있었으며, 상대적으로 활엽수 혼합 원료가 일본잎갈나무에 비해 높은 구성 비율을 차지하고 있다. 최종 100 mesh 이하의 미세분은 두 종류의 원료에서 모두 유사하게 분석되었으나, MS에서는 상대적으로 큰 입자들이 많이 분포하고 있음을

Table 4. Particle size distribution of raw materials after drying

Particle rage (mesh)	(Unit : %)			
	LM	LS	MM	MS
Above 40	76.71	80.25	72.28	87.97
40~60	14.76	12.93	13.40	7.14
60~100	6.09	4.78	7.81	2.95
Under 100	2.44	2.03	6.51	1.93

Table 5. Moisture content, ash and calorific value of raw materials

Item (unit)	LM	LS	MM	MS
Moisture content (wt%)	7.78 ± 0.42	6.76 ± 0.87	5.94 ± 2.52	4.38 ± 1.01
Ash (wt%)	0.39 ± 0.04	1.09 ± 0.12	1.69 ± 0.03	1.63 ± 0.08
Calorific value (kcal/kg, dry basis)	4,775 ± 23	4,834 ± 32	4,570 ± 81	4,613 ± 55



Fig. 2. Classification of wood pellet by visual inspection.

확인하였다.

3.1.3. 원료별 함수율, 회분, 발열량

바이오매스 원료의 기초 자료를 확인하기 위해 함수율, 발열량 및 회분을 분석하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다. 건조된 원료의 함수율은 4.38%에서 최대 7.78% 수준으로 분석되었으며, 활엽수 혼합 원료(MM, MS)가 일본잎갈나무(LM, LS)에 비해 낮은 함수율을 나타내는 것으로 분석되었다. 회분함량은 활엽수와 침엽수 간의 차이가 명확히 나타나는 것을 확인할 수 있었다. LM에서 0.39%였으나, MM에서는 1.69%로 크게 증가하였으며, 이는 침·활엽수의 수종 특성에 따른 회분 차이와 더불어 원료의 운반, 저장 시 토양으로 인한 오염이 발생하여 회분이 증가하는 것으로 사료된다. 발열량은 일본잎갈나

무로 제조한 원료인 LM과 LS의 발열량이 활엽수 혼합 원료에 비해 약 200 kcal/kg가 높은 것으로 분석되었으며, 이 등(2011), 권 등(2007)이 보고한 자료와 유사한 결과를 얻었다.

3.2. 목재펠릿 생산 수율

목재펠릿 제조 시 원료 공급 속도는 시간당 30 kg을 유지하도록 공급 속도를 조절하였다. 생산된 목재펠릿은 육안 상으로 확인하여, 시판되는 상업용 제품과 유사한 수준의 목재펠릿(정상펠릿), 형태는 갖추고 있으나 외관이 불량한 목재펠릿(불량펠릿) 및 펠릿의 형태를 유지하고 있으나 가루형태인 목재펠릿(가루펠릿)으로 구분하였다(Fig. 2).

Table 6. Ratio of normal wood pellet classified by visual inspection

	LMP	LSp	MMp	MSp
Average	36.29	79.70	65.34	67.05
SD	± 10.59	± 4.92	± 9.60	± 17.02

(Unit : %)

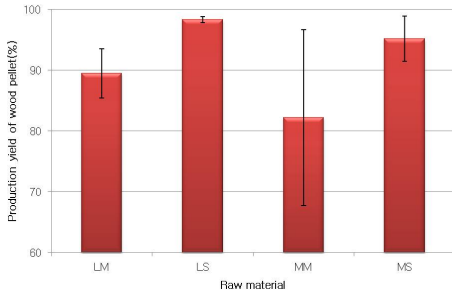


Fig. 3. Difference of production yield of wood pellet by raw material.

정상적인 목재펠릿의 비율은 원료에 따라 차이가 있었는데, LS에서 79.7%로 가장 높았으나, 동일한 생산 조건에서 동일한 수종을 적용한 LM의 경우에는 36.29%로 낮은 비율을 차지하였다. MM과 MS에서는 각각 65.34%와 67.05%를 나타냈다(Table 6).

목재펠릿의 생산 수율은 공급된 톱밥의 무게와 성형된 목재펠릿의 무게를 측정하여 산출하였다. 원료에 따라 목재펠릿의 생산 수율은 차이를 보였다. 가장 높은 생산 수율은 LS로 수율은 98.33%로 분석되었다. MS에서도 95% 이상의 높은 수율을 보이는 반면 MM 경우에는 생산 수율이 매우 낮았다. 활엽수와 침엽수의 생산수율 비교에서는 침엽수인 LM과 LS가 89%에서 98%의 생산수율을 보였으나, 활엽수 혼합 원료인 MM과 MS에서는 82%에서 95%로 나타나 상대적으로 낮은 생산수율을 나타냈다(Fig. 3). 공급되는 원료의 부위에 따라서도 생산수율의 차이가 발생하는 것으로 조사되었다. 활엽수와 침엽수 모두 가지부에서 생산 수율이 증가하는 것으로 확인되었으며, 이러한 차이는 생산 설비에 공급되는 원료의 종류와 특성을 분석하여 공정을 최적화하는 것이 중요하다는 것을 시사한다.

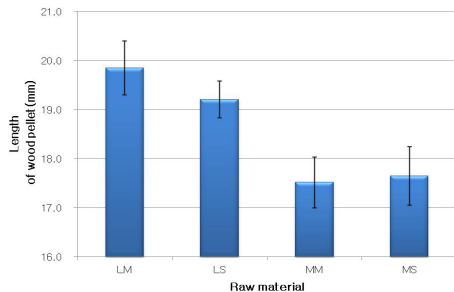


Fig. 4. Length of wood pellet by raw material.

3.3. 목재펠릿 품질 분석 결과

3.3.1. 직경 및 길이

생산된 목재펠릿 중 정상 펠릿의 직경과 길이를 측정하였다. 목재펠릿 품질 규격에서는 직경은 6~8 mm, 길이는 32 mm 이하로 규정하고 있다(국립산림과학원, 2009).

생산된 목재펠릿의 직경과 길이를 측정하기 위해 시험 생산한 목재펠릿으로부터 100 g을 채취하였으며, 25개의 목재펠릿을 무작위로 채취한 후 버니어 캘리퍼스를 이용하여 직경과 길이를 0.1 mm 단위까지 측정하였다. 품질 시험에서는 반올림하여 mm 단위로 기록하나 본 연구에서는 정확도를 구하기 위해 소수점 둘째 자리까지 측정하여 기록하였다. Fig. 4에 제시한 바와 같이, 일본잎갈나무를 원료로 사용한 LM과 LS이 활엽수 혼합원료인 MM과 MS 목재펠릿에 비해 길이가 다소 긴 것으로 확인되었다. Table 5에서 제시된 바와 같이 MM과 MS의 초기 함유수율이 LM과 LS에 비해 상대적으로 낮아 펠릿 성형시에 길이가 짧아지는 효과가 있었을 것으로 추정되지만, 침엽수와 활엽수의 물리·화학적 특성 차이가 펠릿의 길이에 영향을 미치는지에 대한 결과는 보다

심층적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.3.2. 목재펠릿의 함수율, 발열량, 회분, 걸보 기밀도, 내구성 분석

Table 7에서는 제조된 목재펠릿의 주요 품질 특성을 분석한 결과를 제시하였다. 제조된 목재펠릿의 함수율은 LM에서 8.8%, LS에서 12.1%로 분석되었으나, MM과 MS에서는 10% 수준으로 유사하게 평가되었다. 목재펠릿 품질규격(국립산림과학원, 2009)에서는 함수율이 10% 이하일 경우 1등급 또는 2등급 펠릿으로, 15% 이하일 경우 3등급 또는 4등급의 펠릿으로 구분된다. 생산된 숲가꾸기산물을 이용한 목재펠릿의 함수율은 다양하게 평가되었는데 공정 상에서 투입되는 원료 조건의 균일화 및 공급되는 수분량의 최적화를 통해 10% 이하의 함수율을 유지하는 것이 충분히 가능할 것으로 판단되었다.

Table 5에서 언급한 원료의 함수율과 비교하면, 약 1.03%에서 5.36%가 증가한 것으로 분석되었는데, 원료의 전처리과정에서 투입되는 수분의 양과 직접적인 관계가 있는 것으로 사료된다. Clara 등(2011)은 함수율 8% 이하의 원료를 사용하였을 경우, 펠릿 제조에 실패하였다고 보고한 바 있다. 한편, 본 연구에서의 원료 함수율은 일반적으로 제시되는 최적 함수율에 비해 크게 낮았으나, 펠릿 성형에서 별다른 문제는 발생하지 않았다.

LM과 LS를 원료로 사용한 펠릿의 회분은 0.50%와 1.18%로 LM과 LS의 회분 0.39%와 1.09%에 비해 각각 0.11% 포인트, 0.09% 포인트 증가하였다. 이는 성형기 내부에서 원료와 다이스 간의 마찰에 의해 발생하는 것으로 추정되나, 원료의 성형기 내 체류시간과 회분 비율의 변화관계와 같은 원료의 물리적 열처리 부분은 추가적인 연구가 수행되어야 할 부분이다.

목재펠릿이 1급에 이르기 위해서는 목재펠릿의 회분이 0.7% 이하를 유지하여야 한다. 침엽수에서는 목부부분이 많이 존재하는 LM의 회분은 0.7% 이하를 유지하였으나, LS는 2등급으로 낮아졌다. MM과 MS에서는 그 경향을 알기 어려웠으나, 모두 3.0% 이하인 3등급 수준을 유지하여 가정용으로 사

용하는 것에는 한계가 있는 것으로 분석되었다.

LM과 LS를 이용한 펠릿의 발열량은 4,800~4,900 kcal/kg으로 MM과 MS를 이용한 펠릿의 발열량 4,650~4,740 kcal/kg에 비해 약 150~200 kcal/kg 정도 높게 평가되었다(Table 7). 이러한 차이는 1톤의 목재펠릿을 이용할 때에는 150,000~200,000 kcal의 열량 차이를 만들어내는 것으로 목재펠릿의 양으로 변환하면, 약 40 kg의 목재펠릿에 해당한다. 따라서 침엽수를 이용한 목재펠릿의 생산이 에너지량이 높다는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 이용된 국내 숲가꾸기산물들은 모두 4,500 kcal/kg 이상의 발열량을 얻어 숲가꾸기산물이 목재펠릿 제조를 위한 우수한 자원임을 확인하였다. 그러나 목재펠릿 성형기작의 정확한 해석을 위해서는 생산 시 성형기의 온도, 미분의 발생량, 롤러와 다이스 사이의 간격 등 여러 가지 생산 조건과의 연계분석이 요구된다.

앞에서 확인된 바와 같이, 정상펠릿 생산량이 가장 높은 LS를 이용한 펠릿의 걸보기밀도가 675 kg/m³으로 가장 높았으나, 정상펠릿의 비율이 낮은 LM을 이용한 펠릿의 걸보기밀도도 666 kg/m³를 나타냈다. MM과 MS를 이용한 펠릿에서도 665 kg/m³ 수준의 걸보기밀도가 확인되었다(Table 7). 목재펠릿 품질규격에서는 1급 펠릿의 걸보기밀도를 640 kg/m³ 이상으로 규정하고 있어, 본 연구에서 생산된 목재펠릿은 1급 수준의 품질을 확보할 수 있었다.

생산된 목재펠릿의 내구성 시험에서는 LS를 이용한 펠릿이 1등급 기준() 97.5%)을 확보하였으나, MM과 MS를 이용한 펠릿에서는 96.2%와 96.7%를 나타내어 3, 4등급 수준인 것으로 조사되었다. 리그닌이 목재펠릿 성형 시에 결합제로서의 역할을 수행한다는 일반적인 이론과는 달리 Table 6에서 제시된 바와 같이, 정상적인 형태의 목재펠릿 구성 비율이 낮은 LM을 이용한 펠릿의 내구성은 95.0% 미만으로 등급 외 품질인 것으로 분석되었다. 이러한 차이는 생산 공정의 최적화가 요구되는 부분으로 불균일한 원료를 이용한 목재펠릿의 반복 생산 시 조건에 따라 목재펠릿의 내구성에서 편차가 크게 발생하는 것으로 분석되었으며, 투입되는 원료의 상태가 목재펠릿 성형기 내부에서 성형조건 변화로 인해 균일한

Table 7. Comparison of moisture, ash and calorific value of wood pellet

Analysis item (unit)	LMp	LSp	MMp	MSp
Moisture content (%w/w)	8.81 ± 0.76	12.12 ± 0.71	10.16 ± 3.20	10.01 ± 0.85
Ash content (% dry basis)	0.50 ± 0.01	1.18 ± 0.02	1.70 ± 0.02	1.64 ± 0.03
Calorific value (kcal/kg)	4,816 ± 17	4,930 ± 7	4,739 ± 43	4,734 ± 10
Bulk density (kg/m ³)	666 ± 23	675 ± 7	652 ± 11	665 ± 14
Durability (%)	93.66 ± 2.26	98.43 ± 0.69	96.20 ± 2.58	96.66 ± 1.63

Table 8. Elemental analysis of wood pellet

Element	(Unit : % dry basis)			
	LMp	LSp	MMp	MSp
Nitrogen	0.09	0.17	0.16	0.09
Carbon	50.80	51.88	49.66	50.02
Hydrogen	5.97	5.93	5.98	5.95
Sulfur ¹⁾	0.01	0.01	0.01	0.02
Oxygen ²⁾	42.62	40.84	42.48	42.32

1) Sulfur content is determined by ICP-AES.

2) Oxygen calculated by difference.

품질의 목재펠릿을 지속적으로 생산하는데 문제를 유발시킬 수 있다는 것을 예측할 수 있다. 바이오매스의 종류 및 구성 요건 변화가 펠릿의 내구성에 미치는 영향에 관한 연구는 지속적으로 추진되고 있으나, 명확한 결론을 도출하기는 용이하지 않을 것으로 판단된다. Kaliyan과 Morey (2009)는 펠릿의 성형과정에서 물리·화학적 특성이 복합적으로 목재펠릿 결합 및 내구성에 영향을 미친다고 보고한 바 있다.

3.3.3. 원소분석 결과

생산된 목재펠릿의 질소, 탄소, 수소, 황 등의 주요 구성 원소분석 결과를 Table 8에 제시하였다. 목재펠릿의 품질 등급 기준에서는 질소, 황 그리고 염소에 대한 함유량을 제시하고 있는데, 이것은 목재펠릿 연소 시에 발행하는 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx) 등이 주요 대기오염물질이기 때문이며, 염소는 설비의 부식과 연관되기 때문이다.

원료의 질소 함량은 수종 및 부위에 따라 차이가

있었으나, 목재펠릿 품질규격에서 제시하고 있는 상한선인 0.3%에 비해서는 낮은 수치를 보여 목재펠릿의 원료로서는 이상이 없는 것으로 분석되었다. 황 함량은 0.01~0.02%로 목재펠릿 품질규격에서 제시하는 0.05%에 비해 많이 낮은 것으로 분석되어 국내 숲가꾸기산물이 목재펠릿 제조 원료로서 화학적으로 적합한 것으로 분석되었다. 탄소함량은 일본 잎갈나무를 대상으로 한 LM와 LS를 이용한 펠릿의 탄소 함량이 MM와 MS를 이용한 펠릿의 탄소함량보다 높았으며 발열량과 유사한 관계를 보이는 것으로 분석되었다.

3.4. 주요 무기물 함량 분석

본 연구에서는 칼슘, 칼륨, 마그네슘, 망간, 철 등 9개의 주요 무기물 농도를 분석하였다(Table 9). 무기물의 농도는 목재펠릿의 연소 후에 생성되는 회분(재)의 성분 구성에 영향을 미치며, 고온에서 회분

Table 9. Inorganic matters of samples

(Unit : ppm)				
Inorganic matter	LMp	LSp	MMp	MSp
Ca	7,097.33	8,205.88	4,143.14	4,084.9
K	494.73	572.26	864.72	809.95
Mg	163.18	187.31	158.21	246.24
Mn	102.57	110.41	43.89	91.75
P	98.22	72.74	69.75	100.72
Si	33.85	45.02	49.41	46.06
Fe	96.65	41.85	67.75	91.23
Al	31.53	34.04	33.81	47.57
Na	3.93	13.99	10.28	9.71
Cl-	102.8	92.1	36.6	41.8

의 용융 및 응고에 의해 클링커(clinker)와 같은 문제를 발생시킬 수 있다. 클링커 발생 시에는 연소기의 장기적인 연속 사용에 문제를 일으키기 때문에 회분의 용점은 최근 유럽을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다.

모든 원료에서 칼슘(Ca)은 가장 많은 구성물을 차지하고 있었으며, 주요 무기물의 종류는 칼슘(Ca), 칼륨(K), 마그네슘(Mg), 망간(Mn), 철(Fe), 규소(Si), 알루미늄(Al) 등의 순으로 분석되었다. LM와 LS를 이용한 펠릿의 칼 함량이 MM와 MS를 이용하여 제조한 펠릿에 비해 약 2배 정도 높은 것으로 분석되었으나, 칼륨 함량은 MM와 MS를 이용하여 제조한 펠릿에서 높게 분석되어 대조를 이루었다. Filbakk 등(2011)이 연소 후 재의 주요 무기물 형태를 분석한 결과에서는 주요 무기물들의 산화물 형태가 같이 존재하며, Olander와 Steenari 등(1995) 제시한 것과 같이 칼슘, 칼륨, 마그네슘, 철, 규소 등의 복합 고온 화학 반응으로 클링커가 다량 생성될 수 있음을 제시한 바 있다. 향후에 국내 바이오매스의 에너지 분야 활용 확대를 위하여 연소 시 산화 반응에서 생성된 무기물들의 형태를 분석하는 연구와 회분의 용점을 예측하는 연구 등이 국내 목재펠릿 연소기 기술 개발에 중요한 요인이 될 수 있을 것으로 사료된다.

목재펠릿 내의 염소이온은 연소반응 중에 금속성분의 부식과 연관되어 있어 원료 내의 염소 농도가 엄격히 제한되고 있다. 국내 숲가꾸기산물을 이용한 목재펠릿 4종에서는 염소 농도가 목재펠릿 품질 기준에서 제시하고 있는 염소 농도($< 0.05\%$)는 충족하는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 발생한 주요 숲가꾸기산물인 일본잎갈나무와 활엽수 혼합 수종을 말구죽경에 따라 분류한 후 분쇄와 건조를 통해 목재펠릿을 제조하고 원료의 기본적인 특성과 제조한 펠릿의 물리·화학적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 동일 조건에서 분쇄와 건조를 수행하였으나, 원료의 물리·화학적 차이에 의해 생산되는 목재펠릿의 품질에 차이가 발생하였다.

2) 원료의 회분은 활엽수 혼합 원료가 1.6% 이상으로 높게 분석되었으며, 일본잎갈나무의 경우에는 직경 6 cm 이하의 소경목에서 회분이 1.0%를 초과하였다. 목재펠릿 제조 후에 회분은 0.01~0.1% 정도 상승하는 것을 확인하였다.

3) 일본잎갈나무 원료의 발열량은 활엽수 혼합

원료에 비해 약 198 kcal/kg 정도 높은 것으로 분석되었으나, 모든 원료에서 4,300 kcal/kg 이상으로 목재펠릿 원료로 적합한 것으로 분석되었다. 원료상태와 비교하여 목재펠릿으로 제조한 후에 발열량이 일부 상승하는 것으로 조사되었다.

4) 국내 숲가꾸기산물을 이용하여 제조한 목재펠릿에서 질소, 유황, 염소 등의 성분은 목재펠릿 품질 기준에서 제시하는 기준 내에 포함되어 목재펠릿으로 자원 이용이 가능하나, 회분이 상대적으로 높아 가정용 목재펠릿 보일러에 적용하기 위해서는 연소 기술 개발을 위한 심층적인 연구가 필요하다.

5) 본 연구에 이용된 목재펠릿 제조 원료의 주요 무기물은 칼슘, 칼륨, 마그네슘, 망간, 철 등으로 장기간 연속운전 시에 연소기 내에서 클링커를 형성할 수 있는 물질들이며, 클링커 형성을 억제할 수 있는 연소 방법의 개발이 필요하다.

6) 동일한 조건에서 다양한 원료를 이용하여 목재펠릿을 생산할 때에는 제품 간의 품질 편차가 크게 발생할 수 있으며, 생산성 및 품질 향상을 위해서는 원료에 따른 공정 최적화가 중요한 요소임을 확인하였다.

사 사

무기물 분석을 위해 수고하여 주신 임업진흥원의 강승모 팀장께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. European Commission. 2009. Directive 2009/28 EC of the European Parliament and of the Council of 23 April on the promotion of the promotion of the use of energy from renewable sources and amending.
2. 지식경제부. 2008. 제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획. 지식경제부 13~16.
3. Roos, J. A. and A. M. Brackley. 2012. The Asian Wood Pellet Markets. PNW-GTR-861, Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service.
4. 이수민, 안병준, 이오규, 최석환, 조성택. 2009. 저탄소 녹색성장시대 청정에너지 목재펠릿 품질규격. 산림과학속보 09~17.
5. Hansen, M. T. and A. R. Jain. 2009. English handbook for wood pellet combustion. National Energy Foundation, Denmark.
6. 류재운, 강찬영, 이웅수, 서준원, 이현종, 박현. 2010. 국내산 낙엽송의 톱밥 유형에 따른 펠릿특성에 관한 연구. 목재공학. 38(1): 49~55.
7. 권구중, 권성민, 차두송, 김남훈. 2010. 목타르와 톱밥을 혼합하여 제조한 펠릿의 특성. 목재공학. 38(1): 36~42.
8. Peska-Blanchard, M., P. Dolzan, J. Heinimo, M. Junginger, T. Ranta, and A. Walter. 2007. Global wood pellets markets and Industry: Policy drivers, market status and raw material potential. IEA Bioenergy task 40: 17~20.
9. 한규성 등. 2010. 목재펠릿의 이용실태 분석 및 안정적 수급방안. 산림청 53~67.
10. 국립산림과학원. 2009. 목질펠릿 품질 규격. 국립산림과학원 고시 제 2009-2호.
11. European Committee for Standards. 2011. EN 15290. Solid biofuels-Determination of major elements. Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na and Ti.
12. European Committee for Standards. 2011. EN 15297. Solid biofuels-Determination of minor elements. As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V and Zn.
13. Clara, S., M. Esperanza, L. Margin, and P. Henar. 2011. Effect of moisture content, particle size and fine addition on quality parameters of barley pellets. Fuel Processing Technology 92(3): 699~706.
14. 이수민, 최돈하, 조성택, 남태현, 한규성, 양인. 2011. 낙엽송 및 백합나무 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성에 미치는 영향인자. 목재공학 39(3): 258~268.
15. 권성민, 조재현, 이성재, 권구중, 황병호, 이귀현, 한규성, 차두송, 김남훈. 2007. 산불피해 소나무재의 목질펠릿으로의 이용가능성 평가. 목재공학 35(4): 14~20.
16. Kaliyan, N. and R. Morey. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass and Bioenergy 33: 337~359.
17. Olanders, B. and B-M. Steenari. 1995. Characterization of ahses from wood and straw. Biomass and Bioenergy 8(2): 105~113.
18. Filbakk, T., R. Jiris, J. Nurmi, and O. Høibø. 2011. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. Biomass and Bioenergy 35: 3342~3349.