

신갈나무 및 리기다소나무 목분으로 제조한 펠릿의 연료적 특성에 목분의 함수율과 크기 및 생산시간이 미치는 영향

양 인^{1)*} · 김성호²⁾ · 한규성^{3)**}

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

In Yang^{1)*} · Seong-ho Kim²⁾ · Gyu-Seong Han^{3)**}

Received 9 July 2015 Revised 16 September 2015 Accepted 16 September 2015

ABSTRACT This study was conducted to investigate the effects of a number of factors (moisture content and particle size of sawdust and operating time of flat-die pelletizer) on the fuel characteristics of wood pellets fabricated from Mongolian oak (MOK) and pitch pine (PCP) sawdust. MOK and PCP pellets were produced from sawdust of varying moisture content (8, 10, 12%) and was screened to mesh sizes of 2 and 4 (0.64 and 1.27 mm). Moisture content (MC), bulk density (BD) and durability (DU) of the produced pellets were also determined based on the operating time of the flat-die pelletizer (10, 20, 30, 40, 50 And 60 min). The MC of both MOK and PCP pellets were not altered based on their duration in the flat-die pelletizer. However, the BD and DU of MOK pellets were higher than those of PCP pellets. Increasing the MC of the sawdust resulted in an increase in pellet MC and BD, reducing their fuel value. The BD of PCP pellets was greatly decreased when sawdust with a MC of 12% was applied. The DU of both MOK and PCP pellets increased when the MC was increased from 8% to 10%. However, no further increase in DU occurred through the use of MOK sawdust with a MC of 12%, and the DU of PCP pellets was reduced through the use of a MC of 12%. Pellet MC, BD and DU were not influenced by the particle size of sawdust, or by the operating time of flat-die pelletizer. On the other hand, BD and DU of MOK and PCP pellets were lower than those of Larch pellets which, having very suitable characteristics, were used as a reference pellet in this study. In conclusion, MOK pellets with suitable fuel characteristics, satisfying the minimum requirement of the 1st-grade pellet standard designated by the Korea Forest Research Institute, were produced. However, the BD and DU of PCP pellets were lower than the standard, and especially, the DU of PCP pellets produced with the sawdust MC of 12% was inferior to the standard for 4th-grade pellets ($\geq 95.0\%$). Based on the results, 10% MC for MOK sawdust might be optimal for the production of MOK pellets, but PCP alone is not suitable as a raw material for the production of wood pellets under the experimental conditions examined in this study.

Key words Wood pellets(목재 펠릿), Mongolian oak(신갈나무), Rigida pine(리기다소나무), Fuel characteristics(연료적 특성), Flat-die pelletizer(평다이 펠릿성형기), Moisture content(함수율), Particle size(목분 크기)

1) 충북대학교 목재·종이과학과 E-mail: dahadad@naver.com
Tel: +82-43-261-2807 Fax: +82-43-273-2241

3) 충북대학교 목재·종이과학과 E-mail: wood@chungbuk.ac.kr
Tel: +82-43-261-2807 Fax: +82-43-273-2241

2) 충북대학교 목재·종이과학과 E-mail: gs_ho@naver.com
Tel: +82-43-261-2807 Fax: +82-43-273-2241

Nomenclature

- MOK : Mongolian oak
- PCP : Rigida pine
- LAR : Larch
- MC : Moisture content
- DU : Durability
- BD : Bulk density

1. 서론

산림청의 재정적 지원으로 2008년 말부터 본격적으로 생산을 시작한 목재펠릿은 소비량의 증가와 함께 시장규모도 크게 확대됨에 따라 최근 임업분야의 블루칩으로 각광 받고 있다. 예를 들면, 2009년 8,470 톤에 불과하던 목재펠릿 소비량은 2012년 51,343 톤으로 크게 성장하였으며, 그 시장규모도 450억 원으로 증가하였다(Table 1). 이와 함께 목재펠릿의 수요 확대를 위하여 산림청과 에너지관리공단에서 목재펠릿용 보일러 보급을 시작하면서 그 수요는 계속 증가할 것으로 예상되고 있다. 이렇게 목재펠릿의 국내 수요량 증가와 함께 국외산 목재펠릿 수입량도 급속히 증가하고 있으며, 2012년 러시아, 말레이시아, 베트남 등에서 약 12만 톤의 목재펠릿이 수입되어 유통되었다.¹⁾ 그러나 수입산 목재펠릿 - 특히 가격이 저렴한 동남아시아산 -의 품질은 국내산 목재펠릿과 비교하여 매우 낮아 목재펠릿에 대한 전체적인 소비자의 부정적인 인식과 불신의 확대가 우려되고 있다. 따라서 목재펠릿에 대한 소비자의 긍정적인 인식 확대 및 신뢰 제고를 위하여 품질면에서 우수

Table 1. Annual Production and consumption of wood pellets

Year	Domestic (x10 ³ ton)		Imported (x10 ³ ton)	
	Prod	Cons	Prod	Cons
09	8.5	6.2	12.0	12.0
10	13.1	12.9	21.0	21.0
11	34.3	33.2	29.7	29.7
12	51.3	51.6	122.4	122.4
Total	107.2	103.9	185.1	185.1

Source: Korea Association of Pellet (2013)

한 국내산 목재펠릿의 보급 확대가 절대적으로 필요한 실정이다.

국내산 목재펠릿의 생산량이 부족한 이유는 사용이 가능한 원료 확보의 어려움이 가장 큰 부분을 차지하고 있으며, 결과적으로 국내산 목재펠릿의 생산원가 상승과 함께 판매가도 상승하고 있다. 이러한 상황이 계속 진행된다면 국내 목재펠릿 생산업체의 경영상태 악화가 우려되고 있다. 예를 들면, 국내산 및 수입산 목재펠릿의 가격은 각각 33만 원/톤과 29만 원/톤으로 국내산 목재펠릿의 높은 판매가가 목재펠릿의 판로확대 및 보급에 장애요인이 되고 있으며, 따라서 국내에서 제조 판매되고 있는 목재펠릿 생산단가를 낮추는 방안이 시급히 필요한 상황이다.²⁾

목재펠릿의 생산단가를 낮추기 위하여 다양한 연구 및 시도가 국내외에서 진행되고 있는데, 국외의 경우 목재펠릿의 원료인 목재 수종, 함수율, 크기, 전처리, 바인더, 조성, 제조조건(압력, 온도, 시간 등), 펠릿성형기의 특성 등이 목재펠릿의 품질 향상에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.³⁻⁷⁾ 국내의 경우도 수종, 펠릿 성형 온도 및 시간 등이 펠릿의 품질에 미치는 영향에 대한 연구가 수행되었으며, 이와 유사한 연구 결과가 계속 발표되고 있다.⁸⁻¹³⁾ 그러나 목재펠릿 시장에 안정적인 원료 공급을 위한 다양한 미이용 산림바이오매스 탐색 및 이들 원료들에 대한 과학적 가치 평가 그리고 이를 이용하여 펠릿을 제조하는 연구는 아직 국내에서 초보단계이며, 특히 성형이 어려운 수종에 대한 성형 기술, 생산성 증대를 통한 생산원가 절감, 그리고 펠릿의 성형에 미치는 인자들의 영향에 대한 연구는 전무한 실정이다.

한편 국내에서 펠릿 제조를 위한 주요 수종으로는 공급량이 충분한 낙엽송(20,000m³)과 참나무류(50,000m³) 등이 주로 사용되고 있으며, 이 외에도 소나무(10,000m³), 리기다소나무(10,000m³) 등도 사용이 가능하다.¹⁴⁾ 그러나 참나무류, 소나무, 리기다소나무는 성형조건이 까다로워 생산성 저하의 주요인으로 추정되고 있으며, 결과적으로 제조원가 상승과 함께 이로 제조한 목재펠릿의 품질이 매우 낮아 목재펠릿의 안정적인 시장 형성에 악영향이 우려되고 있다.¹⁵⁾ 따라서 본 연구는 국내에서 안정적인 원료 확보가 가능하지만, 성형이 어려운 참나무류의 신갈나무, 리기다소나무를 이용하여 다양한 성형 조건에서 펠릿을 제조

하고 이에 대한 품질 분석을 통하여 생산단가 절감과 생산성 향상을 위한 수종별 목재펠릿 제조 기술을 확립하기 위하여 수행하였다. 아울러 이 연구 결과를 통하여 각 수종별 최적 펠릿 성형 조건을 제시할 예정이다.

2. 실험방법

2.1 공시재료

산림조합중앙회 중부목재유통센터(경기, 여주)에서 공급 받은 신갈나무(*Quercus mongolica*), 리기다소나무(*Pinus rigida* M.) 목분을 펠릿 제조용 원료로 사용하였으며, 대조구로 현재 목재펠릿 제조에 가장 많이 사용되고 있는 수종인 낙엽송(*Larix kaempferi* C.) 목분도 공급받아 사용하였다. 각 수종별 목분은 7mm의 초경날 크기로 구성된 초프밀(YM-450BM, (주) 유림기계, 경북 경산시)로 파쇄한 후, 건조된 것으로 수종별 함수율은 9~17%까지 다양하였다.

상기 목분의 함수율이 펠릿 품질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 목분의 함수율을 8, 10, 12%로 건조 및 조습을 통하여 조절하였다. 목분의 건조는 충북대학교 내에 설치되어 있는 연초 건조기를 사용하여 60°C 조건에서 목표함수율까지 시간을 조절하면서 건조를 실시하였다. 조습은 초기함수율이 측정된 목분을 tray에 얇은 층으로 올리고, 이 tray를 저울에 다시 올려 목표함수율까지 수분을 분무기를 분사하여 조절하였다. 이렇게 건조 및 조습된 목분을 지퍼백에 24시간 이상 보관한 후, 펠릿 제조의 원료로 사용하였다(Fig. 1).



Fig. 1. Images of mongolian oak (left), pitch pine (middle) and larch (right) sawdust used for the production of wood pellets

2.2 목분 크기의 분포

산림조합중앙회 중부목재유통센터로부터 공급된 목분의 크기 분포를 조사하기 위하여 각 수종별로 목분을 sieve shaker(CG-211-8, 청계상공사, 경기 군포)에 넣고 10분간 선별한 후, > 18 mesh, 18~40 mesh, 40~60 mesh, < 60 mesh 표준체를 이용하여 목분 크기의 분포를 측정하였다.

2.3 펠릿 제조

공시재료를 이용한 펠릿 제조에 앞서 목분 크기가 펠릿의 품질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 목분을 2 mesh(1.27cm) 이하와 4 mesh(0.64cm) 이하로 분급을 실시하였다. 이렇게 함수율 및 크기가 조절된 목분을 15 kWh 용량의 평다이(flat-die) 펠릿성형기[(주) 해표산업, 전남 담양]에 넣고 펠릿을 제조하였다(Fig. 2).

펠릿 제조에 사용된 성형기에 대하여 자세히 설명하면 다음과 같다. 먼저 선행연구를 통하여 목재 투입부의 screw 회전 속도를 7Hz로 설정하여 목분을 투입하였으며, 성형부에 투입된 목분이 회전하는 두 개의 롤러(직경: 18.5cm)를 통과하면서 다이에 투입되어 펠릿을 제조한다. 이 다이 내의 hole의 수는 1열에 3개씩 총 192개로 구성되어 있으며, 홀 하나의 길이/직경 비는 5.308로 조절하였다. 제조된 펠릿에 대하여 펠릿성형기의 생산시간에 따른 품질 차

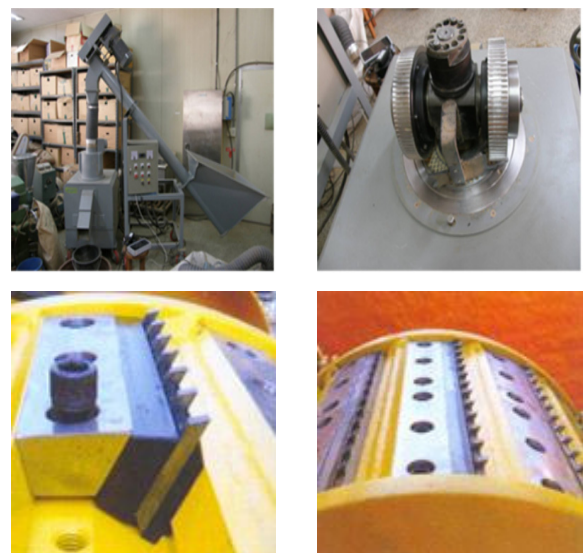


Fig. 2. Images of flat-die pelletizer (Top) and cutting part of chopping mill machine (bottom) used for this study

이를 비교하기 위하여 10분 단위로 60분까지 분리하여 각각을 대형 지퍼백에 보관하였다. 이렇게 제조된 펠릿의 평균 직경 및 길이는 각각 약 5.4mm와 28.5mm로 측정되었으며, 실험실 내에서 최소 24시간 방치한 후 품질분석에 사용하였다.

2.4 펠릿 품질 분석

제조된 펠릿의 품질 측정 항목은 함수율, 겉보기밀도, 내구성, 회분함량, 발열량으로 국립산림과학원 고시 “목재 펠릿 품질규격”에 의거하여 실시하였다.¹⁶⁾

2.5 실험설계 및 통계학적 분석

본 연구에서는 수종(신갈나무, 리기다소나무, 낙엽송), 목분 함수율(8, 10, 12%), 목분 크기(2, 4 mesh)를 실험인자로 하여 펠릿을 제조하였으며, 각 인자들이 펠릿 품질(함수율, 겉보기밀도, 내구성)에 미치는 영향에 대하여 통계학적으로 분석을 실시하였다(3 × 3 × 2 완전요인 배치법). 한편, 펠릿의 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.

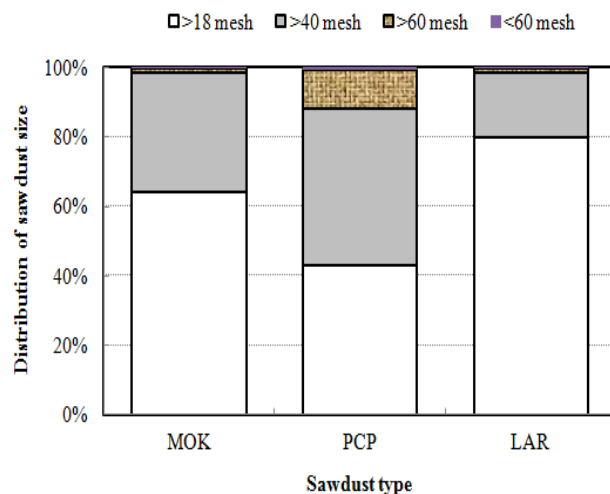


Fig. 3. Size distribution of sawdust used for this study

3. 결과 및 고찰

3.1 입도 분포

Fig. 3은 펠릿을 제조하기에 앞서 산림조합중앙회 중부 목재유통센터로 공급받은 각 공시재료의 입자분포를 측정 한 결과이다.

18 mesh 표준체에 남은 목분의 양은 낙엽송(이하 LAR), 신갈나무(이하 MOK), 리기다소나무(이하 PCP) 순이었으며, 40 mesh 표준체에 남은 목분은 PCP, MOK, LAR 순으로 조사되었다. 한편 40 mesh 표준체를 통과한 미세분의 함량은 PCP, MOK, LAR 순으로 펠릿 제조시 미세분 함량이 많을수록 펠릿 내부의 빈 공간들을 채워 겉보기밀도 증가에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상되나, 반대로 미세분 함량의 증가는 펠릿의 내구성에 부정적인 영향을 끼칠 것으로 생각한다.

3.2 수종별 펠릿의 연료적 특성

본 연구에서 공시재료로 사용된 MOK, PCP 펠릿과 대조구로 사용된 LAR 펠릿의 연료적 특성을 측정한 평균치는 Table 2와 같다. 먼저 펠릿 함수율을 보면, MOK, PCP 펠릿 외에 LAR 펠릿에서도 10% 미만으로 수종 간에 차이가 없는 것으로 측정되었다(MOK/LAR: p = 0.07; PCP/LAR: p = 0.06; MOK/PCP: p = 0.48). 이는 펠릿을 제조하기

Table 2. Fuel characteristics of wood pellets fabricated with mongolian oak, rigida pine and larch sawdust

Wood type	MC ¹ (%)	BD ¹ (kg/m ³)	DUR ¹ (%)	AC ¹ (%)	HHV ¹ (MJ/kg)
MOK ²	7.5 (A)	657 (B)	97.8 (B)	1.9 (B)	19.1 (B)
PCP ²	7.5 (A)	636 (C)	92.2 (C)	0.4 (A)	20.6 (A)
LAR ²	7.8 (A)	690 (A)	98.7 (A)	0.7 (A)	20.2 (A)
KFRI-1st ³	≤ 10	≥ 640	≥ 97.5	≤ 0.7	≥ 18.0
KFRI-2nd ³	≤ 10	≥ 600	≥ 97.5	≤ 1.5	≥ 18.0

¹MC: Moisture content; BD: Bulk density; DUR: Durability; AC: ash content; HHV: Higher heating value.

²MOK: Mongolian oak; PCP: Rigida pine; LAR: Larch.

³KFRI 1st- and 2nd-grade mean the minimum requirement of first and second grade in the wood pellet standard designated by the Korea Forest Research Institute, respectively.

* Same capital letters in the columns of each fuel characteristics are not significantly different from each other at p = 0.05 (Student’s t-test).

에 앞서 모든 목분의 초기 함수율을 8%, 10%, 12%로 조절 함으로서 나타난 결과라 생각한다. 한편 모든 수종의 펠릿에서 함수율은 국립산림과학원 고시 목재펠릿 품질규격 1등급 기준을 모두 만족하였다.¹⁶⁾

겉보기밀도의 경우 LAR 펠릿이 MOK 및 PCP 펠릿보다 높았으며(MOK/LAR: $p < 0.01$; PCP/LAR: $p < 0.01$), MOK 펠릿의 겉보기밀도가 PCP 펠릿보다 높았다($p < 0.01$). 이와 같이 수종별 펠릿의 겉보기밀도 차이는 각 수종의 비중 차이에서 기인한 것으로 사려된다. 예를 들면, MOK는 비중(0.78)이 높은 관계로 펠릿의 성형과정에서 충분한 압밀화가 발생하지 않았고, LAR은 성형과정에서 목분 간의 압밀화가 발생되기 위한 적당한 비중(0.56)을 보유하고 있어 MOK와 LAR 펠릿의 겉보기밀도에 차이가 있었던 것으로 생각한다.¹⁷⁾ 한편 PCP의 낮은 겉보기밀도는 낮은 비중(0.49)에도 불구하고 PCP 내에 함유되어 있는 송진 성분이 펠릿 성형과정에서 수분의 증발을 억제시킴으로서 펠릿 내에 수분이 남아 있어 다이에서 펠릿으로 성형되어 나오는 과정에서 펠릿 내에서 파열현상이 발생되어 나타난 결과라 추정된다. 특히 12%의 초기함수율 PCP 목분으로 제조한 펠릿의 낮은 겉보기밀도로 이 추론을 어느 정도 확인할 수 있었으며, 이에 대한 내용은 3.3.1 절에서 다시 언급할 예정이다. 한편 MOK 펠릿과 대조구로 제조된 LAR 펠릿의 겉보기밀도는 국립산림과학원 목재펠릿 1등급 기준을 상회하였으나, PCP 펠릿은 2등급 기준을 만족하는 것으로 조사되어 고등급 펠릿 제조용 원료로 사용하기 위하여 본 연구에서 사용된 펠릿 제조 조건 외에 다른 조건에서 펠릿을 제조하는 것이 필요하다고 판단된다.¹⁶⁾

펠릿의 내구성을 측정된 결과를 보면, MOK 및 PCP 펠릿에서 LAR 펠릿보다 낮았다(MOK/LAR: $p < 0.01$; PCP/LAR: $p < 0.01$). 또한 PCP 펠릿의 내구성이 MOK 펠릿보다 크게 낮았는데($p < 0.01$), 이는 수종별 화학적 조성 및 목분 크기의 차이에서 기인한 것으로 생각한다. 일반적으로 목재펠릿의 내구성은 원료로 사용된 목분의 리그닌 함량과 비례하는 것으로 여러 연구를 통하여 보고되었으며, MOK와 비교하여 LAR의 높은 리그닌 함량이 높은 내구성을 나타낸 요인으로 추정된다.^{10-12, 18, 19)} 한편 PCP의 리그닌 함량이 MOK보다 높음에도 불구하고 PCP 펠릿의 내구성이 크게 낮은 이유는 PCP 목분을 파쇄하는 과정에

서 발생된 미세분이 크게 증가하여 나타난 결과라 판단된다. 즉 LAR의 60 mesh 이하의 미세분이 차지하는 양은 전체 목분에 대하여 1% 미만인 반면, PCP에서는 5.5% 정도로 측정되었으며, 결과적으로 PCP 펠릿의 내구성 값이 낮았던 것으로 생각한다(Fig. 3). 국립산림과학원 품질규격의 등급별 기준치와의 비교에서 MOK 펠릿은 1등급 기준을 만족하였으나, PCP 펠릿은 4등급 기준에도 미치지 못하여 따라서 PCP를 펠릿의 원료로 사용할 경우 내구성 향상에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각한다.¹⁶⁾

수종별 회분함량 결과를 보면, PCP와 LAR보다 MOK에서 높은 것으로 측정되었는데(PCP/LAR: $p = 0.14$; PCP/MOK: $p < 0.01$; LAR/MOK: $p < 0.01$), 이와 같은 결과는 수종별 회분 함량의 차이에서 비롯된 것으로 생각한다. 한편 MOK의 높은 회분함량은 목분에 포함되어 있는 수피에서 기인한 것으로 생각되며, 목분에서 수피를 제거한 MOK의 회분 함량 측정에서 회분함량이 크게 감소하는 것(0.6%)에서 상기 추론에 대한 이유를 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구에서 수피를 포함한 상태에서 MOK 펠릿을 제조한 관계로 수피를 포함한 회분 측정치를 결과 분석에 사용하였다. 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격과의 비교에서 PCP는 1등급 기준을 만족하였으나, MOK는 2등급 기준에도 미치지 않는 것으로 조사되었다.¹⁶⁾

발열량의 경우, PCP와 LAR 간에는 차이가 없었으나($p=0.06$), 그 값은 MOK보다 높은 것으로 측정되었다(PCP/MOK: $p < 0.01$; LAR/MOK: $p = 0.02$). 이와 같은 결과는 White(1987), Dhamodaran(1989), Codero *et al.*(2001)의 연구 결과에서 지적한 바와 같이 각 수종별 리그닌 함량의 차이에서 기인한 것으로 생각한다.²⁰⁻²²⁾ 즉 침엽수인 PCP와 LAR은 활엽수인 MOK보다 많은 리그닌을 함유하고 있으며, 결과적으로 높은 발열량을 나타낸 것으로 생각한다. 한편 본 연구에서 제조된 모든 펠릿의 발열량은 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 1등급 기준을 상회하였다.¹⁶⁾

3.3 실험 인자별 영향

3.3.1 목분의 초기 함수율

각 수종별 목분의 초기함수율에 따른 펠릿 함수율을 측정된 결과는 Fig. 4와 같다. MOK의 경우, 목분의 초기함수율

이 높아짐에 따라 펠릿의 함수율이 증가하였다(8%/10%: $p = 0.02$; 8%/12%: $p < 0.01$; 10%/12%: $p < 0.01$). PCP 펠릿의 함수율도 목분의 초기 함수율 증가와 함께 증가하였으며, 특히 12%의 초기함수율 PCP 목분으로 제조한 펠릿의 함수율은 10% 이상인 것으로 나타났는데(8%/10%: $p < 0.01$; 8%/12%: $p < 0.01$; 10%/12%: $p < 0.01$), 이는 12% 초기함수율 목분으로 제조한 PCP 펠릿 내에 많은 양의 수분이 아직 남아 있음을 의미하는 것이다. 한편 대조구로 사용된 LAR 펠릿의 함수율은 8%의 목분 초기함수율에서 10% 및 12% 목분 초기함수율보다 낮았으나, 10%와 12% 간에는 차이가 없었다(8%/10%: $p = 0.01$; 8%/12%: $p < 0.01$; 10%/12%: $p < 0.12$). 상기 결과를 토대로 낮은 함수율의 펠릿을 제조하기 위하여 12%보다 낮은 초기함수율을 가진 목분을 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각한다.

겉보기밀도를 측정한 결과를 보면, 모든 수종의 펠릿에서 목분의 초기 함수율 증가와 함께 감소하였으며, 그 감소 폭은 12%의 초기 함수율 목분을 사용하여 제조한 펠릿에서 큰 것으로 나타났다(Fig. 4). 또한 12% 초기 함수율의 PCP 목분으로 제조한 펠릿의 겉보기밀도는 본 연구에서 조사된 모든 수종별 목분 초기 함수율 조건 가운데 가장 낮았다.

이와 같은 결과는 3.2 절에서 언급한 바와 같이 높은 초기 함수율의 목분 사용으로 펠릿 성형과정에서 펠릿 내에 존재하는 수분이 충분히 증발하지 않아 다이에서 나오는 순간 수증기의 압력에 의하여 파열현상이 발생함으로써 펠릿 내의 공간이 부분적으로 증가하여 나타난 것으로 추정된다. 따라서 12% 이상의 초기 함수율 목분을 펠릿 제조에 사용하는 것은 펠릿 생산에 적합하지 않을 것으로 생각한다.

Fig. 4에 각 수종별 목분의 초기함수율이 펠릿의 내구성에 미치는 영향을 나타내었다. MOK 펠릿의 내구성은 목분 초기 함수율이 8%에서 10%로 증가함에 따라 증가하였으나 ($p < 0.01$), 10%와 12% 간에는 차이가 없었다($p = 0.26$). 8%와 10% 초기함수율 목분으로 제조한 PCP 펠릿의 내구성도 MOK 펠릿과 유사한 경향을 보였으며($p < 0.01$), LAR 펠릿의 내구성은 목분의 초기함수율 증가와 함께 점진적으로 증가하는 것으로 조사되었다($p < 0.01$). 목분의 초기함수율 증가에 따른 펠릿의 내구성 증가는 수분이 목분 내에 존재하는 cellulose 및 hemicellulose 성분들 간의 수소결합을 증가시키고 또한 목재 내에서 접착제 역할을 담당하는 것으로 알려진 lignin의 가소화 정도 향상에서 기인한 것으로 추정된다.^{4,11,12)} 한편 12% 초기함수율의 PCP

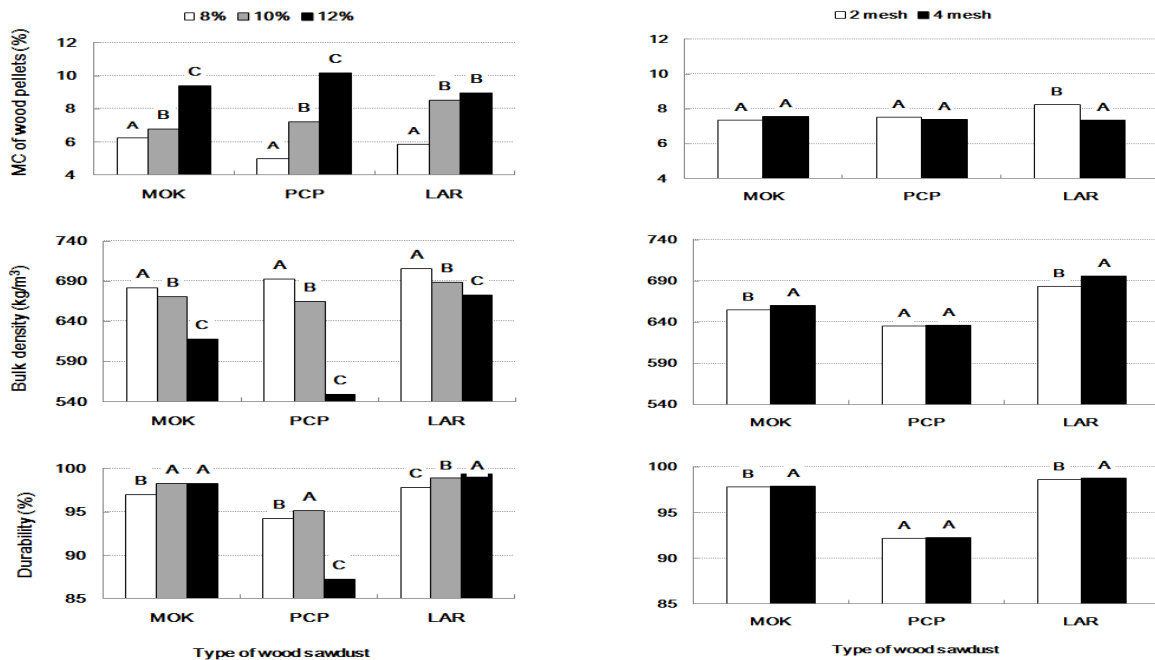


Fig. 4. Effects of moisture content (left) and particle size (right) of sawdust on the moisture content (top), bulk density (middle) and durability(bottom) of wood pellets fabricated with mongolian oak, pitch pine and larch sawdust. Same capital letters on the columns of each species are not significantly different from each other at $p = 0.05$ (Student's t-test)

목분으로 제조한 펠릿의 매우 낮은 내구성은 PCP 목분 제조시에 발생한 많은 미세분과 3.2 절에서 언급한 펠릿 내의 파열현상에서 기인한 결과라 생각한다. 결과를 종합하면 MOK 및 PCP를 펠릿의 원료로 사용할 경우 10%의 초기함수율 목분을 사용하는 것이 펠릿의 내구성 유지를 위하여 가장 적당한 조건이라 생각한다.

3.3.2 목분 크기

Fig. 4은 펠릿 제조에 사용된 목분의 입자 크기가 펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 펠릿 함수율의 경우, MOK와 PCP 펠릿에서는 2 mesh와 4 mesh 간에는 차이가 없었다(MOK: $p = 0.17$; PCP: $p = 0.33$). 그러나 LAR에서는 4 mesh 목분으로 제조한 펠릿의 함수율이 2 mesh 목분으로 제조한 펠릿의 함수율보다 낮았는데($p < 0.01$), 이 결과는 2 mesh의 LAR 목분을 펠릿 제조에 이용하였을 때 목분의 크기가 큰 관계로 펠릿 성형시 목분 내에 함유된 수분이 충분히 증발되지 않아 나타난 결과라 추정된다.

수종별 제조된 펠릿의 겉보기밀도에 대한 목분 크기의 영향을 분석한 결과, MOK 및 LAR 펠릿의 겉보기밀도는 목분 크기가 감소함에 따라 증가하였는데(MOK: $p < 0.01$; LAR: $p < 0.01$), 목분의 크기가 감소함에 따라 겉보기밀도가 증가하는 것은 당연한 결과이다(Fig. 4). 한편 2 mesh와 4 mesh의 PCP 목분으로 제조한 펠릿의 겉보기밀도는 차이가 없었는데($p = 0.19$), 이는 PCP의 낮은 비중으로 목분의 크기와 상관없이 펠릿 성형과정에서 목분 간에 충분한 접촉이 발생되어 나타난 결과라 사료된다.

내구성의 경우, Fig. 4에서 보는 바와 같이 겉보기밀도 결과 동일하게 MOK 및 LAR 펠릿에서는 목분 크기가 감소함에 따라 펠릿 내구성이 증가하였으나(MOK: $p < 0.01$; LAR: $p < 0.01$), PCP에서는 차이가 없었다($p = 0.15$), 목분의 크기가 작아짐에 따라 표면적이 증가되어 목분간 결합정도가 증가되어 결과적으로 펠릿의 내구성은 증가하게 된다.^{6,10)} 따라서 MOK와 LAR 펠릿의 내구성은 목분 크기의 감소와 함께 증가한 것으로 판단된다. 한편 PCP 펠릿에서 목분의 크기가 내구성에 영향을 미치지 않는 이유는 상기에서 언급한 바와 같이 낮은 비중으로 성형과정에서 목분 간에 충분한 접촉이 발생되어 나타난 결과라 생각한다.

3.2.3 목분 초기 함수율과 크기의 상호영향

펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성에 대한 MOK, PCP, LAR의 목분 크기와 함수율의 상호영향을 Fig. 5에 나타내었다. 각 수종별 펠릿 함수율의 경우, MOK 펠릿에서는 목분의 크기와 상관없이 8% 및 10%의 목분 함수율 간에 차이는 없었으나, 12%의 목분 함수율에서 크게 증가하였다. PCP 펠릿의 함수율의 경우, 2 mesh 목분에서는 목분 함수율을 8%에서 10%로 증가시켰을 때 증가하였으나, 그 이상에서는 차이가 없었다. 반면 4 mesh 목분에서는 12% 함수율의 목분으로 제조한 펠릿의 함수율이 높았으며, 8% 및 10% 목분 함수율 간에는 차이가 없었다. LAR 펠릿의 경우, 2 mesh 목분으로 제조한 펠릿의 함수율은 9%에서 11%로 목분 함수율을 증가시켰을 때 그리고 4 mesh 목분에서는 8%에서 12%로 증가시켰을 때 펠릿 함수율이 증가하였다. 결과를 종합하면, 목분 크기와 함수율에 따라 수종별 펠릿 함수율은 유사한 경향을 보였으나, 전반적으로 12% 함수율의 목분으로 제조한 펠릿에서 높았다. 특히 PCP 펠릿에서 12% 함수율의 목분으로 제조한 펠릿에서 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격의 모든 등급 기준($\leq 10\%$)보다 높거나 통계학적으로 차이가 없어 향후 PCP 목분을 펠릿 제조를 위한 원료로 이용할 경우 고함수율 목분의 이용을 피해야 할 것으로 생각한다.

목분 크기별 함수율의 증가가 펠릿의 겉보기밀도에 미치는 영향을 조사한 결과, 모든 수종에서 목분의 크기와 상관없이 목분 함수율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다(Fig. 5). 특히 MOK 및 PCP 펠릿에서는 함수율을 10%에서 12%로 증가시켰을 때, 겉보기밀도가 크게 감소하였으며 PCP 펠릿에서의 감소폭이 큰 것으로 나타났다. 반면 LAR 펠릿의 겉보기밀도도 목분 크기와 상관없이 함수율 증가와 함께 감소하였으나, 그 감소폭은 2 mesh 목분보다 4 mesh 목분에서 그리고 MOK와 PCP 펠릿과 비교하여 적은 것으로 나타났다. 결과를 종합하면, 모든 수종에서 입자 크기와 상관없이 목분 함수율이 증가함에 따라 겉보기밀도는 감소하였으며, 특히 12% 함수율의 목분으로 제조한 펠릿에서 감소폭이 컸다. 따라서 12% 이상의 함수율을 가진 MOK 및 PCP 목분을 펠릿 제조에 이용하는 것은 펠릿의 겉보기밀도 측면에서 바람직하지 않다고 생각한다.

펠릿의 내구성 분석결과를 보면, MOK 및 LAR 펠릿에

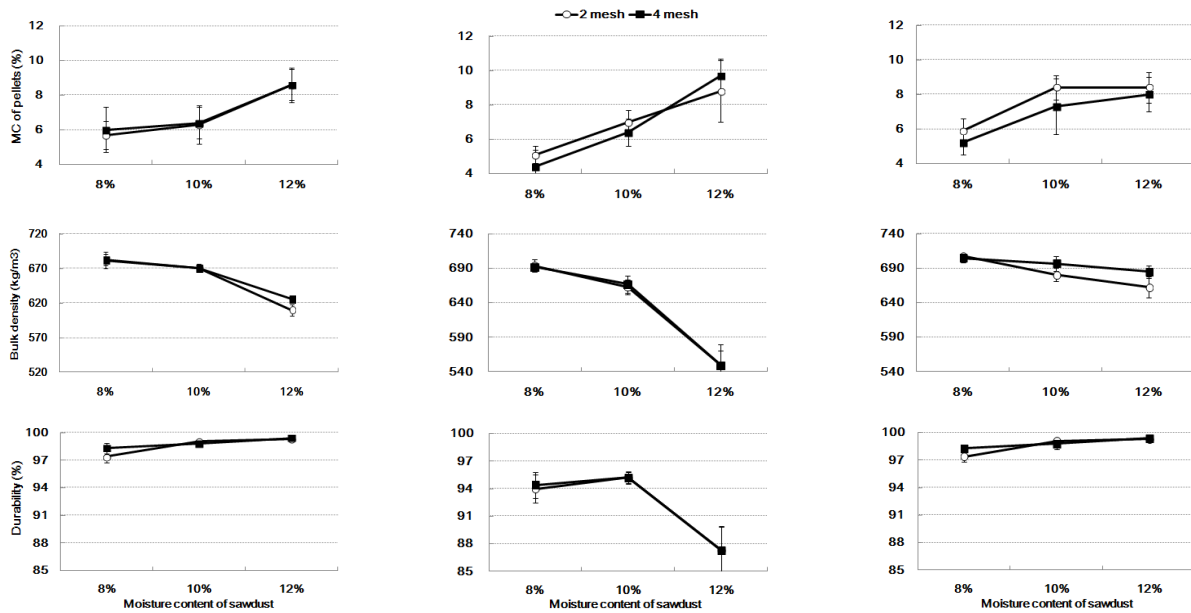


Fig. 5. Interactive effect of moisture content and particle size of sawdust on the moisture content (top), bulk density (middle) and durability (bottom) of wood pellets fabricated with mongolian oak (left), pitch pine (middle) and larch (right) sawdust

서는 목분 크기와 상관없이 10% 함수율의 목분으로 제조한 펠릿에서 증가하는 경향을 보였으며, 그 이상에서는 차이가 없었다(Fig. 5). 반면 PCP 펠릿의 내구성은 두 목분 크기의 조건에서 12% 함수율의 목분으로 제조한 펠릿에서 크게 감소하였다. 결과적으로 MOK 및 PCP 목분을 펠릿 제조에 이용할 시 내구성 측면에서 목분 크기와 상관없이 10% 함수율의 목분을 이용하는 것이 필요할 것으로 생각한다.

3.2.4 생산시간

생산시간별 제조된 MOK, PCP, LAR 펠릿의 함수율 변화를 조사한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. MOK와 LAR 펠릿에서 생산시간의 경과와 함께 점진적으로 감소하는 경향을 보였으나, 통계학적으로 차이는 없었다. PCP 펠릿의 함수율은 생산시간에 따라 함수율 증감 정도가 일정한 것으로 측정되었다. 본 연구의 실험설계시 생산시간의 연장과 함께 성형기 내의 다이 온도가 증가함에 따라 제조된 펠릿의 함수율이 감소할 것으로 예상했으나, 생산 시작 1시간 동안 일정한 함수율을 나타낸 결과를 토대로 일정 시간까지 성형기의 온도 상승에 따른 목분의 초기 함수율 변화는 펠릿의 함수율에 영향을 미치지 않는다는 결론을 얻었다.

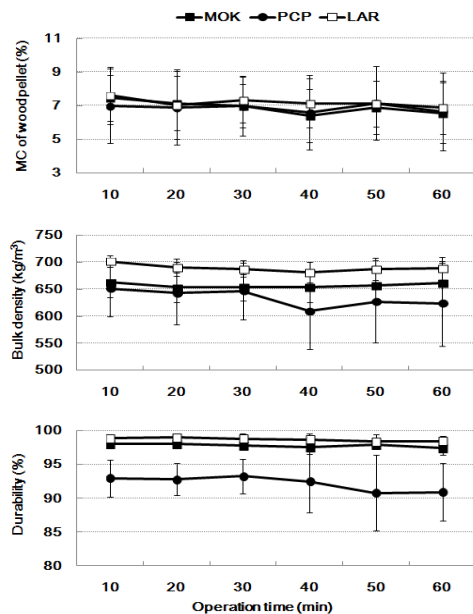


Fig. 6. Effect of flat-die pelletizer operating time on the moisture content (top), bulk density (middle) and durability (bottom) of wood pellets fabricated with mongolian oak, pitch pine and larch sawdust

펠릿 함수율 결과와 유사하게, MOK와 LAR 펠릿의 겉보기밀도는 생산시간이 연장됨에 따라 감소하는 경향을 보였으나 통계학적으로는 차이가 없었다(Fig. 6). PCP 펠릿의 겉보기밀도는 생산시간 30분까지 일정하게 유지

되다 40분부터 감소하였으며 그 값을 계속 유지하였으나, 통계학적으로 생산시간에 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다.

내구성의 경우도 MOK 및 LAR 펠릿은 생산시간에 따른 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다(Fig. 6). PCP 펠릿의 내구성도 40분의 생산시간부터 감소하는 경향을 보였으나, 모두 5%의 실험편차 내에 존재하고 있어 차이가 없는 것으로 분석되었다. 결과를 종합하면, MOK, PCP, LAR 펠릿의 품질은 생산시간에 대하여 영향을 받지 않는다는 결론을 얻었다.

4. 결론

본 연구는 MOK, PCP 및 LAR의 목분 함수율, 입자크기, 생산시간을 달리하여 flat-die pelletizer로 제조한 펠릿의 연료적 특성을 비교 및 분석하였다. 또한 이 결과와 실험 인자 간에 상호관계 분석을 통하여 각 수종별 펠릿 원료화 가능성과 최적 제조조건을 제시하기 위하여 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제조된 펠릿 함수율은 수종별로 차이가 없었으며, 13% 함수율의 PCP 목분으로 제조한 펠릿을 제외하고 타 수종의 펠릿에서 국립산림과학원 고시 목재펠릿 품질규격 1등급 기준을 만족하였다.
- 2) LAR 펠릿의 겉보기밀도는 MOK 및 PCP 펠릿보다 높았으며, MOK 펠릿의 겉보기밀도는 PCP 펠릿보다 낮았다. 한편, MOK 펠릿과 LAR 펠릿의 겉보기밀도는 국립산림과학원 목재펠릿 1등급 기준을 상회하였으나, PCP 펠릿은 2등급 기준을 만족하였다.
- 3) MOK 및 PCP 펠릿의 내구성은 LAR 펠릿보다 낮았으며, PCP 펠릿의 내구성은 MOK 펠릿보다 크게 낮았다. 이 값에 대한 국립산림과학원 품질규격의 등급별 기준치와의 비교에서 MOK 펠릿은 1등급 기준을 만족하였으나, PCP 펠릿은 4등급 기준에도 미치지 못하였다.
- 4) PCP와 LAR보다 MOK에서 각각 많은 회분과 낮은 발열량을 나타냈으며, 회분함량의 경우 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격과의 비교에서 PCP는 1등급 기준을

만족하였다. 한편 MOK의 회분함량은 2등급 기준에도 미치지 않았으나, 원료로부터 수피를 제거했을 경우 1등급 기준을 만족하였다. 발열량의 경우, 제조된 모든 펠릿에서 국립산림과학원 품질규격 1등급 기준을 상회하였다.

- 5) 목분의 함수율이 증가함에 따라 펠릿 함수율은 증가하는 경향을 보였다. 한편 내구성은 대부분의 펠릿에서 목분 함수율의 증가와 함께 증가하거나 차이가 없었다. 겉보기밀도의 경우 목분의 함수율이 증가함에 따라 감소하였으며, 특히 PCP 펠릿의 경우 13% 함수율의 목분에서 크게 감소하였다.
- 6) 대부분의 펠릿에서 목분 크기가 감소함에 따라 펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성은 차이가 없거나 약간 향상되었다.
- 7) 펠릿의 함수율, 겉보기밀도, 내구성에 대한 목분의 크기와 함수율의 상호영향을 분석한 결과, 목분의 크기가 클수록 목분의 함수율 증가와 함께 각 연료적 특성의 증감폭이 큰 것으로 조사되었다.
- 8) 제조된 모든 수종별 펠릿의 함수율, 겉보기밀도, 내구성은 생산시간에 따라 통계학적으로 차이가 없었다.

결과를 종합하면, MOK 펠릿은 목분 크기와 상관없이 13%의 목분 함수율에서 국립산림과학원 품질규격 1등급 기준보다 낮거나 통계학적으로 차이가 없는 펠릿 함수율과 겉보기밀도를 보였으며, 9%의 목분 함수율로 제조한 펠릿의 내구성은 1등급 기준을 만족시키지 못하여 MOK 목분의 함수율을 11%로 조절해야 할 것으로 생각한다. PCP의 경우, 목분의 크기와 상관없이 9% 및 11% 함수율의 목분으로 제조한 펠릿의 함수율, 겉보기밀도, 내구성이 13% 함수율 목분으로 제조한 펠릿보다 우수하였으나, 내구성이 국립산림과학원 품질규격의 4등급 기준에도 미치지 못하여 PCP를 펠릿 제조용 원료로 사용하기 위하여 본 연구에서 사용된 펠릿 제조조건 외에 다른 조건에서 펠릿을 제조하는 연구가 향후 필요할 것으로 생각한다. 한편, MOK 및 PCP 펠릿의 품질은 LAR 펠릿보다 낮은 것으로 조사되었으나, 목분 함수율을 11%로 조절한 MOK는 고등급용 펠릿 원료로 사용이 가능하다는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 산림청의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 한편 원목의 파쇄 및 목분의 선별에 도움을 주신 산림조합 중부목재유통센터 임직원분들에게 감사드립니다.

References

- [1] 한국펠릿협회, 2014, “산림청-목재펠릿 통계자료”, <http://www.koreapellet.org/>.
- [2] 한규성, 2012, “목재펠릿 산업의 동향과 전망”, *공업화학*, 15(6), 54-61.
- [3] Li, Y., Liu, H., 2000, “High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel”, *Biomass and Bioenergy*, 19, 177-186.
- [4] Obernberger, I., Thek, G., 2004, “Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior”, *Biomass and Bioenergy*, 27, 653-669.
- [5] Lehtikangas, P., 2001, “Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark”, *Biomass and Bioenergy*, 20, 351-360.
- [6] Bergstrom, D., Israelsson, S., Ohman, M., Dahlqvist, S., Gref, R., Boman, C., Wasterlund, I., 2008, “Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scot pine sawdust fuel pellets”, *Fuel Processing Technology*, 89, 1324-1329.
- [7] Stakl, M., Granstrom, K., Berghel, J., Renstrom, R., 2004, “Industrial process for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets”, *Biomass and Bioenergy*, 27, 621-628.
- [8] 류재윤, 강찬영, 이응수, 서준원, 이현중, 박현, 2010, “국내산 낙엽송의 톱밥 유형에 따른 펠릿특성에 관한 연구”, *목재공학*, 38(1), 49-55.
- [9] 권구중, 권성민, 차두송, 김남훈, 2010, “목타르와 톱밥을 혼합하여 제조한 펠릿의 특성”, *목재공학*, 38(1), 36-42.
- [10] 이수민, 최돈하, 조성택, 남태현, 한규성, 양인, 2011, “낙엽송 및 백합나무 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성에 미치는 영향인자”, *목재공학*, 39(3), 258-268.
- [11] 안병준, 장희선, 조선택, 한규성, 양인, 2013, “바인더의 첨가가 목재 펠릿의 연료적 특성에 미치는 영향”, *목재공학*, 41(6), 475~489.
- [12] Ahn, B. J. Chang, H. S., Lee, S. M., Choi, D. H., Cho, S. T. Han, G. S., 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.
- [13] 안병준, 양인, 김상태, 박대학, 2013, “백합나무의 반탄화 처리를 이용한 고체연료화 가능성 조사”, *신재생에너지*, 9(4), 40-50.
- [14] 손영모, 김래현, 이선정, 김소원, 황정순, 박현, 2014, “한국의 산림 바이오매스 자원량 및 지도”, *국립산림과학원*, 10-15.
- [15] 차은기, 최석환, 이오규, 안병준, 김용식, 조성택, 이수민, 2010, “펠릿 성형조건에 따른 목재펠릿 품질 변화”, 2010년 한국목재공학 학술발표논문집, 85-86.
- [16] 국립산림과학원, 2013, “목재펠릿 품질규격”, 국립산림과학원 고시 제 2013-5호
- [17] 정성호, 박병수, 2008, “한국산 유용수종의 목재성질”, *국립산림과학원*, 211, 281.
- [18] Lee, S. M., Ahn, B. J., Choi, D. H., Han, G. S., Jeong, H. S., Ahn, S. H., Yang, I., 2013, Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust”, *Biomass and Bioenergy*, 48, 1-9.
- [19] Kaliyan, N., Morey, R. B., 2009, “Factors affecting strength and durability of densified biomass products”, *Biomass and Bioenergy*, 33, 337-359.
- [20] White, R. H., 1987, “Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood”, *Wood and Fiber Science*, 19(4), 446-452.
- [21] Dhamodaran, T. K., Gnanaharan, R., Thulasidas, P. K., 1989, “Calorific value variation in coconut stem wood”, *Wood Sci. Technol.*, 23, 21-26.
- [22] Cordero, T., Marquez, F., Rodriguez-Mirasol, J., Rodriguez, J., 2001, “Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis”, *Fuel*, 80, 1567-1571.