

신갈나무, 소나무, 낙엽송 목분의 함수율 및 크기가 목재펠릿의 연료적 특성에 미치는 영향¹

김 성 호² · 양 인² · 한 규 성^{2,†}

Effect of Sawdust Moisture Content and Particle Size on The Fuel Characteristics of Wood Pellet Fabricated with *Quercus mongolica*, *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* Sawdust¹

Seong-ho Kim² · In Yang² · Gyu-Seong Han^{2,†}

요 약

본 연구는 신갈나무, 소나무, 낙엽송 목분을 이용하여 flat-die pelletizer로 제조한 목재펠릿의 연료적 특성에 대한 목분 함수율 및 크기의 영향을 조사하기 위하여 수행하였다. 각 수종별 화학적 조성을 조사한 결과, 회분 함량은 신갈나무에서, 리그닌 함량은 소나무와 낙엽송에서 높은 것으로 조사되었다. 각 목재펠릿의 연료적 특성은 펠릿 함수율의 경우 소나무에서 가장 낮았으며, 겉보기밀도는 낙엽송, 소나무, 신갈나무 순으로, 내구성은 낙엽송, 신갈나무, 소나무 순이었다. 각 수종별 목분 함수율에 따른 목재펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성을 측정된 결과, 목분 함수율이 증가함에 따라 모든 수종의 목재펠릿 함수율과 내구성은 증가하였으며, 신갈나무와 낙엽송 펠릿의 겉보기밀도는 감소하였다. 각 수종별 목분 크기에 따른 목재펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성을 측정된 결과, 목분 크기가 감소함에 따라 낙엽송 펠릿의 함수율과 겉보기밀도 그리고 신갈나무 펠릿의 겉보기밀도는 증가하였다. 한편, 목분 크기의 감소는 신갈나무, 소나무, 낙엽송 펠릿의 내구성 증가에 기여하였다. 각 목분 함수율별 신갈나무, 소나무, 낙엽송 펠릿의 함수율, 겉보기밀도, 내구성에 목분 크기가 미치는 영향을 분석한 결과, 12% 함수율 목분으로 제조한 신갈나무 펠릿의 겉보기밀도와 내구성은 목분 크기가 감소함에 따라 증가하였다. 한편 대조구로 사용된 낙엽송 펠릿의 내구성은 10% 및 12%의 목분 함수율 조건에서 목분 크기에 따른 차이는 없었으나, 8% 목분 함수율 조건에서 목분 크기의 감소와 함께 내구성이 증가하였다. 제조된 목재펠릿의 연료적 특성과 경제적인 측면을 고려한 최적 목분 함수율 및 크기는 신갈나무의 경우 10%와 2 mesh 그리고 소나무의 경우 12%와 2 mesh라는 결론을 얻었으며, 이 조건에서 제조한 목재펠릿의 모든 연료적 특성은 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 1등급 기준을 크게 상회하는 것으로 나타났다.

¹ Date Received April 9, 2015, Date Accepted July 9, 2015

² 충북대학교 농업생명환경대학 목재종이과학과. Department of Wood and Paper Science, College of Agriculture, Life & Environments Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28356, Korea

[†] 교신저자(Corresponding author): 한규성(e-mail: wood@chungbuk.ac.kr)

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effects of moisture content and particle size of sawdust on the fuel characteristics of wood pellets produced with Mongolian oak (*Quercus mongolica*, QUM), red pine (*Pinus densiflora*, PID) and larch (*Larix kaempferi*, LAK) sawdust using a flat-die pelletizer. Prior to produce wood pellets, the sawdust was controlled to the moisture content of 8, 11, 12% and was screened to the particle size of 2 and 4 mesh. In the analysis of its chemical composition, QUM had a high ash content, and PID and LAK contained large amount of lignin. In case of the fuel characteristics, PID pellets had the lowest moisture content of pellets (P-MC), and LAR pellets was found to have the highest bulk density (BD) and durability (DU). With the increase of moisture content of sawdust (S-MC), P-MC and DU of QUM, PID and LAK pellets increased, but BD of QUM and LAK pellets decreased. When size of sawdust used for the production of wood pellets decreased, P-MC and BD of LAK pellets and BD of QUM pellets increased. Decrease of particle size contributed to the increase of DU of QUM, PID and LAK pellets. In addition, BD and DU of QUM pellets produced with 12% S-MC sawdust increased as its particle size reduced. For LAK pellets, DU was not influence by particle size in the S-MCs of 10% and 12%, but increased with the decrease of particle size in the S-MC of 8%. Based on the results and economical aspects, 10% MC and 2 mesh particle size for QUM sawdust and 12% MC and 2 mesh particle size for PID sawdust might be optimal conditions for pellets production, and fuel characteristics of wood pellets produced by the conditions greatly exceeded the minimum requirements for the 1st-grade wood pellets of the standard designated by Korea Forest Research Institute.

Keywords : mongolian oak, red pine, wood pellet, moisture content, particle size, fuel characteristics

1. 서 론

최근 화석연료 사용의 증가에 따른 지구온난화, 화석연료 고갈에 대한 우려 및 2011년 이후 고유가의 지속으로 인하여 청정연료 및 재생에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 그중에서도 목질계 바이오매스로 제조한 고체연료인 목재펠릿이 2000년대 초반부터 전 세계적으로 관심을 받고 있다. 목재펠릿은 목질 바이오매스를 균일한 크기의 입자로 분쇄한 후, 압축하여 일정한 크기로 성형한 목질계 연료로서 이산화탄소 및 분진 배출량이 적고(Ahn *et al.*, 2013a), 재생가능한 원료의 사용으로 자원순환이 가능한 고밀화 목질 연료이며, 목재 칩과 비교하여 에너지 함량이 높은 장점이 있다(Park *et al.*, 2013).

이러한 장점들로 인하여 목재펠릿의 사용량은 선진국을 중심으로 지속적인 증가세를 보이고 있으며, 국내의 경우도 2009년 약 9천 톤의 목재펠릿의 생산을 시작으로, 2010년에는 약 19천 톤, 2011년에는 약 28천 톤, 2012년에는 약 50천 톤으로 생산량이 지속적으로 증가하고 있으며 아울러 수요량도 꾸준히 증

가하고 있는 상황이다(Han, 2012). 한편 같은 기간 해외로부터의 목재펠릿 수입량도 2009년 약 12천 톤, 2010년 약 21천 톤, 2011년 약 28천 톤, 2012년 약 122천 톤으로 크게 증가하였다(Kim *et al.*, 2013).

그러나 폭발적인 수요량 증가에 따른 국내 생산량 증가는 극히 낮은 실정이다. 예를 들면, 국내 목재펠릿 생산시설 용량은 20개소의 20만 5000톤 규모로 추산되고 있지만, 원료 부족으로 인하여 생산량이 생산용량을 채우지 못하고 있는 상황이다. 결과적으로 국내산 목재펠릿보다 가격이 저렴한 수입산 목재펠릿의 유통량이 지속적으로 증가하고 있다(Korea Association of Pellet, 2014). 이렇게 지속적인 목재펠릿의 수요 증가 및 목재펠릿 제조용 원료 확보를 위하여 정부에서는 동남아시아 국가 등을 대상으로 대규모 해외 조림산업 및 국내 비산림지역의 토지를 이용한 단벌기 목재 생산과 유희지 등을 활용한 바이오 순환림 조성사업 등을 연차적으로 확대 실시하고 있을 뿐만 아니라, 지금까지 미이용되고 있는 산림 바이오매스 자원을 효율적으로 활용하기 위한 다각적인 방법을 모색하고 있다(Ahn *et al.*, 2013b).

이와 같이 목재펠릿 원료의 안정적인 공급을 위하여 많은 노력을 기울이고 있으나, 현실적으로 원료공급이 원활하지 못하여 생산량 부족과 생산시설의 가동률이 떨어지고 있는 실정이다. 따라서 목재펠릿 생산시설의 원활한 가동을 위하여 우선적으로 펠릿 원료를 안정적으로 공급할 수 있는 방안을 마련하는 것이 시급히 요구된다(Kim, 2013). 현재까지 목재펠릿용 원료로서 소나무와 비교하여 가격이 저렴하고, 지속적 공급이 가능한 낙엽송이 주로 사용되고 있다. 그러나 향후 목재펠릿 수요량에 대한 전망치를 분석한 결과 낙엽송만으로는 충분한 원료 공급이 불가능할 것으로 판단되며, 따라서 낙엽송과 함께 펠릿제조용 원료로서 사용이 가능한 새로운 목재 원료에 대한 탐색이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 많이 자생하고 있지만 목재펠릿 성형이 낙엽송과 비교하여 상대적으로 어렵다고 알려진 참나무류인 신갈나무와 소나무의 펠릿제조용 원료화 가능성을 확인하기 위하여 이 수종의 화학적 조성을 조사하였으며, 또한 이 수종을 이용하여 목재펠릿을 제조하고 이 펠릿의 연료적 특성을 측정하였다. 이 결과들을 토대로 신갈나무 및 소나무의 목재펠릿 원료화 가능성을 확인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 연구에서 목재펠릿 제조용 원료로 사용된 신갈나무(*Quercus mongolica*), 소나무(*Pinus densiflora*), 낙엽송(*Larix kaempferi*) 목분은 산림조합중앙회 중부목재유통센터(경기, 여주)에서 공급받았다. 이 목분은 7 mm의 초경날 크기로 구성된 초프밀(YM-450BM, (주)유림기계, 경북 경산시)로 파쇄된 것으로 공급받은 즉시 측정된 수종별 함수율은 6.1~13.1%까지 다양하였다.

2.2. 화학적 조성 분석

수종별 화학적 조성은 공급받은 목분을 가정용믹서로 분쇄한 후, 60 mesh (0.42 mm)의 표준체로 선별한 것을 사용하여 측정하였다. 측정된 화학적 조성 항목은 전섬유소, lignin, 추출물, 회분 함량이었으며, Han *et al.* (2012)의 연구에서 사용한 방법으로 측정하였다.

2.3. 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.

2.4. 펠릿 제조

펠릿 제조에 앞서 목분의 크기가 펠릿의 품질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 2 mesh (1.27 cm) 및 4 mesh (0.64 cm) 표준체를 통과하는 목분을 목재펠릿 제조용 원료로 사용하였다[목분 크기(ϕ): 2 mesh < ϕ < 4 mesh와 ϕ < 4 mesh]. 한편 상기 목분의 함수율이 목재펠릿 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, 목재펠릿 제조를 위한 원료로 사용하였다.

함수율 및 크기가 조절된 목분을 15 kWh 용량의 평다이(flat-die) 펠릿성형기[(주) 해표산업, 전남 담양]에 넣고 목재펠릿을 제조하였으며(Fig. 1), 제조

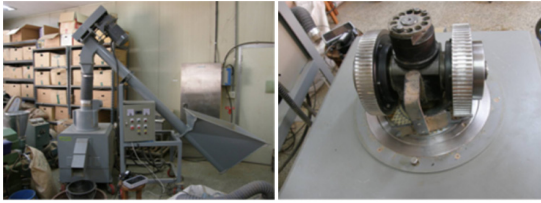


Fig. 1. Images of entire machine (left) and die (right) of flat-die pelletizer used in this study.

공정은 다음과 같다. 먼저 선행연구를 통하여 목재 투입부의 screw 회전 속도를 7 Hz로 설정하여 목분을 투입하였으며, 성형부에 투입된 목분이 회전하는 두 개의 롤러(직경: 18.5 cm)를 통과하면서 다이에 투입되어 목재펠릿을 제조하였다. 이 다이 내의 hole의 수는 1열에 3개씩 총 192개로 구성되어 있으며, 홀 하나의 길이/직경 비는 5.308로 조절하였다. 제조된 목재펠릿 품질에 펠릿성형기의 운전시간이 미치는 영향을 최소화하기 위하여 10분 단위로 30분까지 얻은 목재펠릿 가운데 20~30분 사이에 생산된 목재펠릿을 분리하여 시험인자별로 각각 대형 지퍼백에 보관하였다. 이렇게 제조된 목재펠릿의 평균 직경 및 길이는 각각 약 5.4 mm와 28.5 mm로 측정되었으며, 실험실 내에서 최소 24시간 방치시킨 후 품질분석에 사용하였다.

2.5. 펠릿 품질 분석

제조된 목재펠릿의 품질 항목은 함수율, 겉보기 밀도, 내구성, 회분함량, 발열량으로 국립산림과학원 고시 “목재펠릿 품질규격”에 의거하여 실시하였다 (Korea Forest Research Institute, 2013).

2.6. 실험설계 및 통계학적 분석

본 연구에서는 수종(신갈나무, 소나무, 낙엽송), 목분 함수율(8, 10, 12%), 목분 크기(2, 4 mesh)를 시험인자로 정하여 목재펠릿을 제조하였으며, 각 인자들이 목재펠릿 품질(함수율, 겉보기 밀도, 내구성)에 미치는 영향에 대하여 통계학적으로 분석을 실시하였

다(3 × 3 × 2 완전요인 배치법). 한편, 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. 화학적 조성

본 연구에서 공시재료로 사용된 신갈나무, 소나무 그리고 대조구로 사용된 낙엽송의 화학적 조성을 측정한 결과는 Table 1과 같다. 회분 함량은 목재펠릿 원료로 가장 많이 사용되고 있는 낙엽송과 소나무 간에는 차이가 없었으나($p = 0.27$), 신갈나무에서 낙엽송과 소나무보다 높았다(소나무/신갈나무: $p = 0.04$; 낙엽송/신갈나무: $p = 0.04$). 이 측정 결과는 일반적으로 알려져 있는 각 수종별 회분 함량과 비교하여 높은 값을 나타냈는데(Jeong & Park, 2007), 이는 공시재료 내에 수피가 함유되어 있어 나타난 결과라 판단된다. 그러나 모든 공시재료의 회분 함량은 국립산림과학원 고시 목재펠릿 품질규격(2013)에 명시된 1등급 기준을 만족하였다.

추출물 측정 결과를 보면, 낙엽송에서 가장 많은 추출물이 검출되었으며, 소나무와 신갈나무 간에는 차이가 없었다. 전반적으로 모든 수종에서 추출물의 함량이 높았는데, 낙엽송과 신갈나무에서는 열수 추출과정에서 hemicellulose가 그리고 소나무에서는 acetone 추출과정에서 송진 성분 등이 용출되어 나타난 결과라 추정된다. lignin의 함량은 침엽수종인 낙엽송과 소나무 간에 차이가 없었으며, 참나무류인 신갈나무는 나머지 두 수종과 비교하여 약 6~7% 낮은 것으로 조사되었다. 이는 침엽수종이 활엽수종보다 lignin을 더 많이 포함하므로 활엽수종인 신갈나무에서 소나무와 낙엽송과 비교하여 낮게 측정된 것으로 판단된다. 전섬유소 함량의 경우 lignin 함량과 반대로 신갈나무, 소나무, 낙엽송 순으로 조사되었다.

신갈나무, 소나무, 낙엽송 목분의 함수율 및 크기가 목재펠릿의 연료적 특성에 미치는 영향

Table 1. Chemical composition of wood specimens used in this study

	<i>Quercus mongolica</i>	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Larix kaempferi</i>	
Holocellulose	75.51 (A)	68.50 (B)	66.85 (C)	
Lignin	25.44 (B)	30.28 (A)	30.71 (A)	
Extractives	Total	7.95 (B)	12.28 (A)	
	Hot water	7.02 (B)	2.99 (C)	9.81 (A)
	Acetone	0.93 (C)	5.05 (A)	2.47 (B)
Ash	0.59 (B)	0.43 (A)	0.33 (A)	

Same capital letters in the rows of each component are not significantly different from each other at $p = 0.05$ (Student's t-test).

3.2. 입도 분포

Fig. 2는 펠릿을 제조하기에 앞서 산림조합중앙회 중부목재유통센터로 공급받은 각 공시재료의 입자분포를 측정된 결과이다. 18 mesh 표준체에 남은 목분의 양은 낙엽송, 신갈나무, 소나무 순이었으며, 40 mesh 표준체에 남은 목분은 신갈나무, 소나무, 낙엽송 순으로 조사되었다. 한편 미세분의 함량은 소나무, 낙엽송, 신갈나무 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.

3.3. 연료적 특성

신갈나무, 소나무 펠릿과 대조구로 사용된 낙엽송 펠릿의 연료적 특성을 측정한 평균치는 Table 2와 같다. 먼저 제조된 펠릿 함수율을 보면, 소나무에서 가장 낮았으며(소나무/신갈나무: $p < 0.01$; 소나무/낙엽송: $p < 0.01$), 신갈나무와 낙엽송 간에는 차이가 없었다($p = 0.06$). 그러나 그 값들의 차이는 크지 않았으며, 이는 펠릿을 제조하기에 앞서 모든 목분 함수율을 8%, 10%, 12%로 조절함으로써 나타난 결과라 생각한다. 한편 측정된 모든 펠릿 함수율은 10% 미만으로 국립산림과학원 고시 목재펠릿 품질규격 1등급 기준($\leq 10\%$)을 모두 만족하였다.

겉보기밀도의 경우 낙엽송 펠릿이 신갈나무 및 소나무 펠릿보다 높았으며(신갈나무/낙엽송: $p < 0.01$;

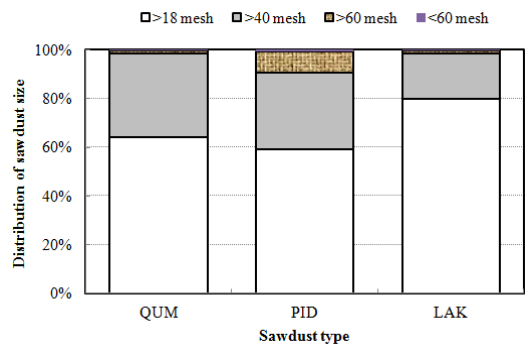


Fig. 2. Size distribution of *Quercus mongolica* (QUM), *Pinus densiflora* (PID) and *Larix kaempferi* (LAK) sawdust used in this study.

소나무/낙엽송: $p < 0.01$), 소나무 펠릿의 겉보기밀도가 신갈나무 펠릿보다 높았다($p < 0.01$). 이와 같이 수종별 펠릿의 겉보기밀도 차이는 각 수종의 비중 차이에서 기인한 것으로 사료된다. 예를 들면, 신갈나무는 비중(0.82)이 높은 관계로 펠릿의 성형과정에서 충분한 압밀화가 일어나지 않았고, 낙엽송은 성형과정에서 목분 간의 압밀화가 발생되기 위한 적당한 비중(0.61)을 보유하고 있어 신갈나무와 낙엽송 펠릿의 겉보기밀도 간에 차이가 있었던 것으로 추정된다 (Jeong & Park, 2007; Ryu & Park, 2014). 또한 낮은 비중(0.47)과 미세분 함량이 많아 가장 높은 겉보기밀도를 보일 것으로 예상했던 소나무 펠릿은 낙엽송 펠릿과 비교하여 낮은 겉보기밀도를 보였는데, 그 이유를 밝히기 위하여 화학적 그리고 해부학적 측면에서 접근할 필요가 있을 것으로 생각하며, 현재 이에 대한 추가 연구를 수행하고 있다. 한편 신갈나무 및

Table 2. Fuel characteristics of wood pellets fabricated with *Quercus mongolica*, *Pinus densiflora* and *Larix kaempferi* sawdust

	Moisture content (%)	Bulk density (kg/m ³)	Durability (%)	Higher heating value (MJ/kg)
<i>Quercus mongolica</i>	7.5 (B)	657 (C)	97.8 (B)	19.1 (C)
<i>Pinus densiflora</i>	6.5 (A)	681 (B)	97.2 (C)	20.9 (A)
<i>Larix kaempferi</i>	7.8 (B)	690 (A)	98.7 (A)	20.2 (B)
KFRI 1 st -grade ¹	≤ 10	≥ 640	≥ 97.5	≥ 18.0
KFRI 2 nd -grade ¹	≤ 10	≥ 600	≥ 97.5	≥ 18.0

¹ KFRI 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).

소나무 펠릿 그리고 대조구로 제조된 낙엽송 펠릿의 겉보기밀도는 국립산림과학원 목재펠릿 1등급 기준 (≥ 640 kg/m³)을 모두 상회하였다.

펠릿의 내구성을 측정한 결과를 보면, 신갈나무 및 소나무 펠릿에서 낙엽송 펠릿보다 낮았다(신갈나무/낙엽송: p < 0.01; 소나무/낙엽송: p < 0.01). 또한 소나무 펠릿의 내구성이 신갈나무 펠릿보다도 낮았는데(p < 0.01), 이는 수종별 화학적 조성 및 입도 분포의 차이에서 기인한 것으로 생각한다. 일반적으로 목재펠릿의 내구성은 원료로 사용된 목분의 lignin 함량과 비례하는 것으로 여러 연구를 통하여 보고되었으며(Lee *et al.*, 2011; Ahn *et al.*, 2013c; Ahn *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2013; Kaliyan and Morey, 2009), 신갈나무와 비교하여 낙엽송의 높은 lignin 함량이 높은 내구성을 나타낸 요인으로 추정된다. 한편 소나무의 lignin 함량이 신갈나무보다 높음에도 불구하고 소나무 펠릿의 내구성이 낮은 이유는 소나무 목분 내에 존재하는 미세분이 펠릿의 내구성 실험과정에서 분리되어 나타난 결과라 판단된다(Fig. 2). 즉 신갈나무의 60 mesh 이하의 미세분이 차지하는 양이 전체 목분에 대하여 1% 미만인 반면, 소나무에서는 10% 정도로 측정되었으며, 결과적으로 이 미세분으로 인하여 소나무 펠릿의 내구성 값이 낮았던 것으로 생각한다. 한편, 국립산림과학원 품질규격의 등급별 기준치와의 비교에서 신갈나무 및 낙엽송 펠릿은 1등급 기준(≥ 97.5%)을 만족하였으나, 소나무 펠릿은 일부 실험 조건에서 1등급 기준에 미치지 못

하였다. 그러나 소나무 펠릿과 관련되어 본 연구에서 조사된 실험인자 가운데 여러 조건에서 1등급 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 이에 대한 내용은 “실험인자별 영향” 절에서 서술할 예정이다.

발열량의 경우, 소나무에서 가장 높았으며, 다음으로 낙엽송 그리고 신갈나무 순으로 측정되었다(소나무/낙엽송: p < 0.01; 소나무/신갈나무: p = 0.01; 낙엽송/신갈나무: p = 0.02). 이는 White (1987), Dhamodaran (1989), Codero *et al.* (2001)의 연구 결과에서 지적인 바와 같이 각 수종별 lignin 함량의 차이에서 기인한 것으로 생각한다. 즉 침엽수인 소나무와 낙엽송은 활엽수인 신갈나무보다 많은 lignin을 함유하고 있으며, 결과적으로 높은 발열량을 나타낸 것으로 생각한다. 또한 소나무의 발열량이 낙엽송보다 높은 이유는 소나무 내에 추출물로서 함유된 송진 성분의 휘발성 유기화합물에서 기인한 결과라 추정된다(Table 1). 한편 본 연구에서 제조된 모든 펠릿의 발열량은 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 1등급 기준(≥ 18 MJ/kg)을 상회하였다.

3.4. 실험 인자별 영향

3.4.1 목분 함수율

각 수종별 펠릿 성형 전의 목분 함수율에 따른 펠릿 함수율을 측정한 결과, 목분 함수율이 증가함에 따라 펠릿 함수율도 증가하는 경향을 나타냈다. 신갈나무의 경우, 8%, 10%, 12% 함수율의 목분으로 제

조한 펠릿 함수율은 각각 6.2%, 6.8%, 9.4%로 목분 함수율이 높아짐에 따라 펠릿 함수율도 점진적으로 증가하였다(8%/10%: $p = 0.02$; 8%/12%: $p < 0.01$; 10%/12%: $p < 0.01$). 소나무 펠릿의 함수율은 8%, 10%, 12% 목분 함수율에서 각각 5.9%, 6.1%, 7.4%로 8%와 10% 목분 함수율 간에는 차이가 없었으나 ($p = 0.29$), 12%의 목분 함수율에서는 크게 증가하였다($p < 0.01$). 한편 대조구로 사용된 낙엽송 펠릿의 함수율은 8%, 10%, 12%의 목분 함수율에서 각각 5.9%, 8.6%, 9.0%로 8% 목분 함수율로 제조한 펠릿에서 가장 낮았으며($p < 0.01$), 10%와 12% 간에는 차이가 없었다($p = 0.12$). 이상과 같이 수종별 펠릿 함수율은 펠릿 성형 전 목분 함수율의 영향을 받는 것으로 조사되었으며, 특히 12% 함수율의 목분으로 제조한 펠릿의 함수율이 모든 수종의 펠릿에서 높은 것으로 나타나 12% 이하의 목분 함수율 조건에서 목재펠릿을 제조하는 것이 적합할 것으로 생각한다.

각 수종별 겉보기밀도에 대한 목분 함수율의 영향을 보면, 신갈나무와 낙엽송 펠릿은 목분 함수율이 증가함에 따라 감소하였다. 즉, 신갈나무 펠릿의 겉보기밀도는 8%, 10%, 12%의 목분 함수율에서 각각 682, 671, 618 kg/m^3 그리고 낙엽송 펠릿의 겉보기밀도는 706, 689, 673 kg/m^3 으로 조사되었다(신갈나무: $p < 0.01$; 낙엽송: $p < 0.01$). 반면, 소나무 펠릿의 겉보기밀도는 8%, 10%, 12%의 목분 함수율에서 각각 659, 693, 691 kg/m^3 으로 목분 함수율이 8%에서 10%로 증가하였을 때 증가하였으나($p < 0.01$), 10%에서 12%로 증가시 차이가 없었다($p = 0.13$). 이와 같은 결과는 3.3절에서 언급한 바와 같이 각 수종별 비중의 차이에서 기인한 것으로 생각한다. 즉, 신갈나무와 낙엽송은 높은 비중으로 펠릿 성형과정에서 목분 내에 존재하는 수분이 충분히 증발하지 않아 펠릿으로 성형된 후, 목분이 다시 펠릿 성형 전의 치수로 복귀되어 낮은 겉보기밀도를 나타낸 것으로 추정되며, 상기 수종별 펠릿 함수율의 측정 결과가 이 추론을 증명한다고 생각한다. 또한 12% 함수율의 신갈나무 목분으로 제조된 펠릿의 경우, 길이가 길고 짧은 것이 동시에 제조되었으며, 길이가 긴 펠릿으로 인하여 겉보기밀도가 저하된 것으로 판단된다. 한편

10%와 12%의 함수율 목분으로 제조한 소나무 펠릿의 높은 겉보기밀도는 신갈나무와 낙엽송과 비교하여 소나무의 펠릿 제조를 위한 적당한 비중으로 성형과정에서 목분 내에 존재하는 수분이 충분히 제거되었고 아울러 소나무 목분 내에 존재하는 미세분과 같이 요인들이 복합적으로 영향을 끼쳐 나타난 것으로 생각한다.

수종별 목분 함수율이 펠릿의 내구성에 미치는 영향을 보면, 목분 함수율이 증가함에 따라 내구성이 증가하는 경향을 보였다. 예를 들면, 신갈나무 펠릿의 내구성은 8%, 10%, 12%의 목분 함수율에서 각각 97.0%, 98.3%, 98.3%로 목분 함수율이 8%에서 10%로 증가함에 따라 증가하였으나($p < 0.01$), 10%와 12% 간에는 차이가 없었다($p = 0.26$). 소나무와 낙엽송 펠릿의 내구성은 8%, 10%, 12%의 목분 함수율에서 각각 96.6%, 97.1%, 97.9% 그리고 97.9%, 99.0%, 99.4%로 목분 함수율의 증가와 함께 계속 점진적으로 증가하는 것으로 조사되었다($p < 0.01$). 목분의 함수율 증가에 따른 펠릿의 내구성 증가는 수분이 목분 내에 존재하는 cellulose 및 hemicellulose 성분들 간의 수소결합을 증가시키고 목재 내에서 접착제 역할을 담당하는 것으로 알려진 lignin의 충분한 가소화에서 기인한 결과라 추정된다(Oberberg and Thek, 2004; Ahn *et al.*, 2013; Ahn *et al.*, 2014).

3.4.2. 목분 크기

목분 크기가 펠릿 함수율에 미치는 영향을 분석한 결과, 2 mesh와 4 mesh 목분으로 제조한 신갈나무 및 소나무 펠릿의 함수율은 각각 7.4%, 7.6% 그리고 6.5%, 6.4%로 목분 크기에 따른 영향은 없었다(신갈나무: $p = 0.17$; 소나무: $p = 0.28$). 그러나 낙엽송에서는 4 mesh 목분으로 제조한 펠릿의 함수율(8.2%)이 2 mesh 목분으로 제조한 펠릿의 함수율(7.4%)보다 높았는데($p < 0.01$), 이 결과는 2 mesh 목분을 펠릿 제조에 이용하였을 때 크기가 큰 목분의 존재로 펠릿 성형시 목분 내에 존재하는 수분이 충분히 증발되지 않아 나타난 결과라 추정된다.

수종별 제조된 펠릿의 겉보기밀도에 대한 목분 크기의 영향을 분석한 결과, 신갈나무 및 낙엽송 펠릿

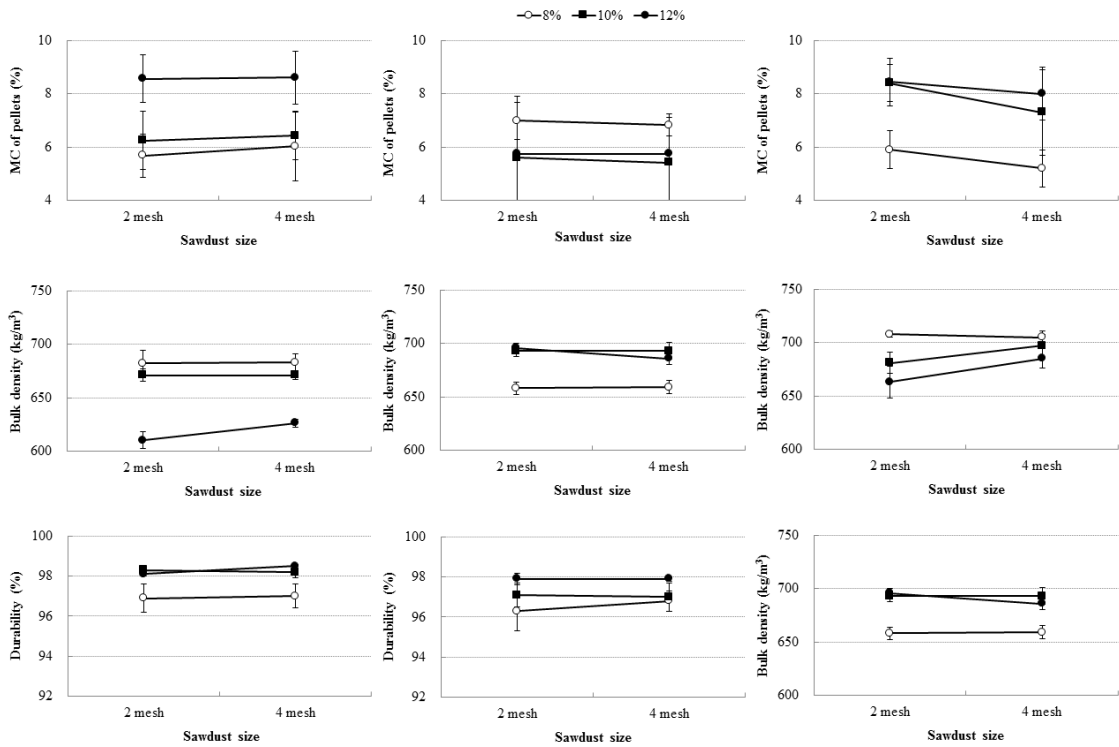


Fig. 3. Interactive effect of moisture content and particle size of sawdust on the moisture content (top), bulk density (middle) and durability (bottom) of wood pellets fabricated with *Quercus mongolica* (left), *Pinus densiflora* (middle) and *Larix kaempferi* (right) sawdust.

의 겉보기밀도는 각각 654, 660 kg/m³ 그리고 684, 696 kg/m³으로 목분 크기가 감소함에 따라 겉보기밀도는 증가하였는데(신갈나무: p < 0.01; 낙엽송: p < 0.01), 목분의 크기가 감소함에 따라 겉보기밀도가 증가하는 것은 당연한 결과이다. 한편 2 mesh와 4 mesh의 소나무 목분으로 제조한 펠릿의 겉보기밀도는 683 및 680 kg/m³로 차이가 없었는데(p = 0.19), 이는 소나무의 낮은 비중으로 목분의 크기와 상관없이 펠릿 성형과정에서 목분들이 충분히 압밀화되어 나타난 결과라 생각한다.

내구성의 경우, 신갈나무(2 mesh: 97.8%; 4 mesh: 97.9%), 소나무(2 mesh: 97.1%; 4 mesh: 97.2%), 낙엽송(2 mesh: 98.6%; 4 mesh: 98.8%) 펠릿에서 목분 크기가 감소함에 따라 내구성이 증가하였다(신갈나

무: p < 0.01; 소나무: p = 0.02; 낙엽송: p < 0.01). 이와 같은 결과는 목분의 크기가 작아짐에 따라 목분의 표면적이 증가되었고, 결과적으로 목분 간의 결합 정도가 증가되어 펠릿의 내구성이 증가한 것으로 판단된다(Oberberg and Thek, 2004; Lee *et al.*, 2011).

3.5. 목분 함수율과 크기의 상호영향

3.5.1. 펠릿 함수율

펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성에 대한 신갈나무, 소나무, 낙엽송의 목분 크기와 함수율의 상호영향을 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 펠릿 함수율의 분석 결과를 보면, 각 목분 함수율별로 신갈나무, 소나무, 낙엽송 펠릿의 함수율은 목분의 크기가 감소함에 따

라 증가 또는 감소하였으나, 그 차이는 통계학적으로 유의하지 않았다. 한편 12% 목분 함수율의 신갈나무 목분으로 제조한 펠릿의 함수율은 두 목분 크기에서 모두 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격의 1등급 기준($\leq 10\%$)보다 낮았으나, 그 값의 범위 내에 1등급 기준이 포함되어 있어 12% 이상 함수율의 신갈나무 목분을 펠릿 제조용 원료로 사용하는 것은 바람직하지 않다고 생각한다. 그러나 소나무와 낙엽송의 펠릿 함수율은 목분 함수율 및 크기와 상관없이 1등급 기준을 모두 만족하였다.

3.5.2. 겉보기밀도

각 목분의 함수율별 목분의 크기가 겉보기밀도에 미치는 영향을 분석한 결과는 Fig. 3과 같다. 8%와 10% 함수율의 목분으로 제조한 모든 펠릿의 겉보기밀도는 목분 크기에 영향을 받지 않았다. 그러나 12% 함수율의 목분으로 제조한 신갈나무와 낙엽송 펠릿의 겉보기밀도는 목분 크기가 감소함에 따라 증가하였는데, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 비중이 높은 신갈나무와 낙엽송의 4 mesh 목분이 12%의 목분 함수율 조건에서 충분히 연화되어 압밀화됨으로써 발생한 결과라 생각한다. 한편 12% 함수율의 목분으로 제조한 소나무 펠릿의 겉보기밀도는 목분의 크기가 감소함에 따라 감소하였으나, 그 차이가 통계학적으로 유의하지 않았다. 각 조건에서 제조된 펠릿의 겉보기밀도를 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격과 비교한 결과, 2등급 기준을 만족한 12% 함수율의 목분으로 제조한 신갈나무 펠릿을 제외하고 모든 조건에서 1등급 기준을 상회하였다.

3.5.3. 내구성

펠릿의 내구성에 대한 목분 함수율 및 크기의 상호영향을 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 신갈나무 펠릿의 내구성은 8% 및 10%의 목분 함수율 조건에서 목분 크기에 영향을 받지 않았으나, 12% 목분 함수율 조건에서 목분 크기의 감소와 함께 내구성이 증가하였다. 반대로 대조구로 사용된 낙엽송 펠릿의 내구성은 10% 및 12% 목분 함수율 조건에서 목분 크기에

따른 차이는 없었으나, 8% 목분 함수율에서 목분 크기의 감소와 함께 내구성이 증가하였다. 이 결과로부터 신갈나무와 낙엽송과 같은 고비중 수종의 목분을 원료로 제조한 펠릿의 내구성은 목분 함수율과 목분 크기에 의하여 상호 영향을 받으므로 펠릿 제조에 앞서 적절한 함수율 및 크기 조건의 목분을 준비하는 것이 필요하다 생각한다. 한편 저비중의 소나무 목분으로 제조한 펠릿의 경우, 모든 목분 함수율 조건에서 목분 크기의 감소가 펠릿의 내구성에 영향을 미치지 않았다. 각 조건에서 제조된 펠릿의 내구성을 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격과 비교한 결과, 목분 크기와 상관없이 8% 함수율의 목분으로 제조한 신갈나무 펠릿과 8%와 10% 함수율의 목분으로 제조한 소나무 펠릿의 내구성은 1등급 기준에 미치지 못하였으나, 10%와 12% 함수율의 목분으로 제조한 신갈나무 펠릿과 12% 함수율의 목분으로 제조한 소나무 펠릿의 내구성은 1등급 기준을 상회하는 것으로 조사되었다. 한편, 대조구로 사용된 낙엽송 펠릿의 내구성은 8% 함수율의 목분과 2 mesh 크기의 목분 조건을 제외하고 모든 조건에서 1등급 기준을 만족하였다.

제조된 펠릿의 연료적 특성과 경제적인 측면을 고려한 최적 목분 함수율 및 크기는 신갈나무의 경우 10%와 2 mesh 그리고 소나무의 경우 12%와 2 mesh 라는 결론을 얻었으며, 이 조건에서 제조한 펠릿의 모든 연료적 특성은 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 1등급 기준을 상회하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 신갈나무, 소나무 및 낙엽송의 화학적 조성 및 목분의 입도 분포를 조사하였으며, 이 목분의 함수율과 크기를 달리하여 flat-die pelletizer 로 제조한 목재펠릿의 연료적 특성을 비교 및 분석하였다. 이 결과의 분석을 통하여 각 수종별 펠릿 원료화 가능성과 최적 제조조건을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 회분은 신갈나무, 추출물은 낙엽송, 리그닌은

소나무와 낙엽송, 전섬유소는 신갈나무에서 많이 함유하고 있었다. 회분함량의 경우, 신갈나무, 소나무, 낙엽송에서 모두 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 1등급 기준을 만족하였다.

- 2) 입도분포를 확인한 결과, 18 mesh 이상 크기의 목분은 낙엽송에서 60 mesh 이하 크기의 미세 목분은 소나무에 많이 포함되어 있었다.
- 3) 각 목재펠릿의 연료적 특성을 조사한 결과, 펠릿 함수율은 소나무에서 가장 낮았으며, 겉보기 밀도는 낙엽송, 소나무, 신갈나무 순으로 측정되었다. 내구성의 경우, 낙엽송, 신갈나무, 소나무 순이었으며, 발열량은 세 수종 모두에서 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 1등급 기준을 상회하였다.
- 4) 각 수종별 목분 함수율에 따른 펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성을 측정한 결과, 목분 함수율이 증가함에 따라 모든 수종의 펠릿 함수율과 내구성은 증가하였으며, 신갈나무와 낙엽송 펠릿의 겉보기밀도는 감소하였다.
- 5) 각 수종별 목분 크기에 따른 펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성을 측정한 결과, 목분의 크기가 감소함에 따라 낙엽송 펠릿의 함수율과 겉보기밀도 그리고 신갈나무 펠릿의 겉보기밀도도 증가하였다. 한편, 목분 크기의 감소는 모든 수종의 목재펠릿에서 내구성 증가에 기여하였다.
- 6) 각 목분 함수율별 펠릿 함수율, 겉보기밀도, 내구성에 목분 크기가 미치는 영향을 분석한 결과, 12% 함수율의 목분으로 제조한 신갈나무 펠릿의 겉보기밀도와 내구성은 목분 크기가 감소함에 따라 증가하였다. 한편 대조구로 사용된 낙엽송 펠릿의 내구성은 10% 및 12%의 목분 함수율 조건에서 목분 크기에 따른 차이는 없었으나, 8% 목분 함수율에서 목분 크기의 감소와 함께 내구성이 증가하였다.

제조된 목재펠릿의 연료적 특성과 경제적인 측면을 고려한 최적 목분 함수율 및 크기는 신갈나무의 경우 10%와 2 mesh 그리고 소나무의 경우 12%와 2 mesh라는 결론을 얻었으며, 이 조건에서 제조한 목

재펠릿의 모든 연료적 특성은 국립산림과학원 목재펠릿 품질규격 1등급 기준을 상회하는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 산림청 “임업기술연구개발사업”의 지원에 의해 수행되고 있습니다. 한편 원목의 파쇄 및 목분의 선별에 도움을 산림조합 중부목재유통센터 임직원분들에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahn, B.J., Chang, H.S., Cho, S.T., Han, G.S., Yang, I. 2013. Effect of the addition of binders on the fuel characteristics of wood pellet. *Journal of The Korean Wood Science and Technology* 41(6): 475-489.
- 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 *Liridendron tulipifera* L. sawdust. *Renewable Energy* 62: 18-23.
- Ahn, B.J., Cho, S.T., Cho, T.S., Chae, K.S., Choi, S.Y. 2013. Analysis of production economic efficiency for domestic industry of wood pellets. 2013 Proceedings of The Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting: 112-113.
- Ahn, B.J., Lee, S.M., Choi, S.H., Cho, S.T., Choi, D.H. 2013. Preparation of standards and quality standard for the implementation of wood fuel labeling. 2013 Proceedings of The Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting: 114-115.
- 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.

- Dhamodaran, T.K., Gnanaharan, R., Thulasidas, P.K. 1989. Calorific value variation in coconut stem wood. *Wood Sci. Technol.* 23: 21-26.
- Han, G.S. 2012. Trend and outlook of wood pellet industry. *Prospective of Industrial Chemistry* 15(6): 54-61.
- Han, G.S., Yang, I., Sagong, M. 2012. Investigation of the basic properties of agriculture residues as a raw material for the production of agropellets and the evaluation of their fuel characteristics. *Journal of Korea Society of Waste Management* 29(2): 169-179.
- Jeong, G.S., Park, B.S. 2007. Wood properties of the useful tree species grown in Korea. Korea Forest Research Institute, Seoul, Republic of Korea.
- Kaliyan, N., Morey, R.B. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy* 33: 337-359.
- Kim, S.H., Jeong, S.K., No, S.G., Kim, M.Y., Han, G.S. 2013. Comparison of wood pellets distributed domestically. 2013 Proceedings of The Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting: 118-119.
- Korea Association of Pellet. 2014. Korea Forest Service-Statistical data of wood pellet. <http://www.koreapellet.org/> [accessed Dec 30, 2014].
- Korea Forest Research Institute. 2013. Standard of Wood Pellets, KFRI No. 2013-5, Seoul, Republic of Korea.
- 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.
- Lee, S.M., Choi, D.H., Cho, S.T., Nam, T.H., Han, G.S., Yang, I. 2011. Effects of various factors on the durability of pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Journal of The Korean Wood Science and Technology* 39(3): 258-268.
- 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.
- Park, H., Kim, S.B., Seo, J.W., Lee, U.S., Kang, C.Y. 2013. Fuel characteristics of pellets produced with food waste and sawdust. 2013 Proceedings of The Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting: 122-123.
- Ryu, J.H., Park J.G. 2014. Effect of specific gravity on the bulk density of wood pellets. Personal communication (Accessed at 4 December 2014).
- 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.