

낙엽송 및 백합나무 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성에 미치는 영향인자*1

이수민*2 · 최돈하*2 · 조성택*2 · 남태현*3 · 한규성*3 · 양인*3†

Effects of Various Factors on the Durability of Pellets Fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust*1

Soo Min Lee*2 · Don Ha Choi*2 · Seong Taek Cho*2 · Tae Hyun Nam*3 · Gyu-seong Han*3 · In Yang*3†

요약

본 연구는 낙엽송과 백합나무 톱밥을 이용한 펠릿의 제조 과정에서 톱밥의 크기 및 함수율, 펠릿제조 온도 및 성형시간이 펠릿의 내구성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행하였다. 수종별 내구성의 비교에서 낙엽송 펠릿의 내구성이 백합나무 펠릿보다 높았으며, 낙엽송 펠릿의 경우 18 mesh (1.00 mm) 이상 크기의 톱밥으로 제조한 펠릿이 8~18 mesh (1.00~2.38 mm)의 톱밥으로 제조한 펠릿보다 내구성이 높았다. 펠릿제조 온도를 높이고 펠릿 성형시간을 연장함에 따라 펠릿의 내구성은 증가하였으며, 톱밥의 함수율이 올라감에 따라 펠릿의 내구성은 향상되는 것으로 나타났다. 한편, 본 연구에서 제조된 낙엽송 및 백합나무 펠릿은 대조구로 사용된 산림조합 및 일도에서 제조한 목재 펠릿보다 내구성은 낮았으나, 대부분의 낙엽송 펠릿은 국립산림과학원에서 고시한 목재펠릿의 내구성 1등급 기준(97.5%)을 만족하였으며, 백합나무 펠릿은 3등급 기준(95%)을 모두 상회하였다. 전자현미경을 이용한 펠릿의 관찰에서 펠릿제조 온도를 높이고 펠릿 성형시간을 연장함에 따라 펠릿 내에서 톱밥 간의 거리가 감소하고, 특히 180°C의 온도에서 3분의 성형시간으로 제조한 펠릿의 경우 대조구 시편과 크게 차이가 없는 것을 육안으로 확인할 수 있었다.

*1 접수 2011년 3월 11일, 채택 2011년 5월 18일

*2 국립산림과학원 녹색자원이용부 바이오에너지연구과, Division of Bioenergy, Department of Forest Resources Utilization, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

*3 충북대학교 농업생명환경대학 목재종이학과, Department of Wood and Paper Science, College of Agriculture, Life & Environments Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 양인(e-mail: dahadad@naver.com)

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effects of sawdust size and moisture content, pelletizing temperature and time on the durability of the pellets fabricated with larch and tulip tree sawdust. The durability of larch-pellet was significantly higher than that of tulip tree-pellet. For the larch-pellets, the durability of the pellets fabricated with > 18 mesh sawdust was higher than that of 8~18 mesh sawdust. With the increases of pelletizing temperature and time, the durabilities of larch- and tulip tree-pellets steadily improved. The durabilities of larch- and tulip tree-pellets also increased as the moisture content of sawdust increased. In the comparison of durabilities between commercial pellets and larch- or tulip tree-pellets, the pellets fabricated with larch and tulip tree sawdusts in our study were less denser than commercial pellets, but the durability of most larch-pellets was satisfied with the 1st-grade pellet standard designated by Korea Forest Research Institute. In addition, the durability of tulip tree-pellets were higher than that of the 3rd-grade pellet standard. From the scanning electron microscopic observation of larch- and tulip tree-pellets, the gap between the sawdusts of each pellet was reduced with the increases of pelletizing temperature and time. In particular, it was visually confirmed that the surface of the pellets made with the pelletizing temperature of 180°C for 3 min did not differ from that of commercial pellets.

Keywords: larch, tulip tree, pellet, durability, scanning electron microscope

1. 서 론

급속한 산업화에 의한 화석에너지 소비의 증가와 이에 따른 환경 오염에 대한 우려, 그리고 기후변화 협약의 규제를 위한 대응책의 일환으로 태양열, 풍력, 조력, 바이오매스 등과 같은 신재생에너지에 대한 사용과 관심이 커지고 있는 상황에서, 자원의 순환적인 이용 및 재생산이 가능한 바이오매스가 청정 에너지원으로 새롭게 인식되며 이것을 활용한 대체 에너지의 개발과 보급이 확산되고 있다. 대체에너지로써 바이오매스의 활용은 목재를 칩의 형태로 파쇄하여 고히연료로써 이용하는 것이 가장 일반적이었으나, 최근 이용편의성과 연료적 특성을 고려하여 고밀도화시킨 목재펠릿의 이용이 점차 확대되고 있다. 예를 들면, 2007년도 말 세계적으로 442개소의 목재펠릿 공장에서 약 1,400만 톤의 펠릿이 생산되었으며, 펠릿의 생산량은 계속 폭발적으로 증가할 것으로 예상되고 있다. 한편 국내에서는 2009년 1월 산림조

합중앙회 목재유통센터에서 본격적으로 펠릿의 생산 및 공급이 시작되었으며, 2010년까지 추가로 8개소의 펠릿 제조 공장이 증설될 예정이며, 2020년까지 추가로 20개소의 펠릿 공장이 설립될 예정이다(류 등, 2010).

일반적으로 목재 펠릿은 재제조 등에서 발생하는 부산물을 톱밥으로 분쇄한 후 고온, 고압으로 압축 및 성형을 통해 제조되는 바이오 연료로써, 여러 측면에서 기존에 사용되었던 목재 칩에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 예를 들면, 목재 칩은 고함수율 상태로 오랜 기간 저장할 경우 열량 손실이 매우 크며, 연료 공급 측면에 있어서 별채 시기와 밀접한 관련성으로 계절적 제한과 저장 및 운송의 문제점을 가지고 있으나, 펠릿은 원료의 고밀도화에 의해 착화성, 연소효율, 운반 및 보관성이 우수하고, 일정한 형상과 함수율로 연소기의 자동화가 가능하며, 이 외에 크기가 작아 투입량 조절에 의한 연소기의 온도조절이 가능함으로써 안전을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있

는 것으로 조사되었다(Li와 Liu, 2000; Lehtikangas, 2001; 권 등, 2007; 권 등, 2010).

상기와 같은 펠릿의 장점은 고밀도화를 통해 목재 톱밥간의 접촉 또는 기계적인 결합이 일어나고, 결과적으로 일정한 강도를 보유함과 동시에 그 형상을 계속 유지함으로써 얻어지는 것이다(Kaliyan와 Morey, 2009). 따라서 외력이나 고습도 등과 같이 외부 조건에 대해 펠릿의 강도와 형상을 유지하는 정도는 목재 톱밥간의 결합력에 의해 영향을 받으며, 이 결합력에 따라 펠릿의 품질 및 상품성이 결정된다. 이러한 이유로 최근까지 펠릿의 원료인 목재 톱밥과 관련된 여러 인자들이 목재 펠릿의 강도 및 내구성에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들면, Lehtikangas (2001), Obernberger와 Thek (2004), Mani 등(2006) 및 Bergstrom 등(2008)은 펠릿 원료의 조성, 목재 파티클 크기 및 분포가 펠릿 강도에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였으며, Li와 Liu (2000), Stakl 등(2004)은 톱밥의 크기 및 종류 외에 목재 톱밥의 함수율이 펠릿의 내구성 및 강도에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 보고하였다. 이 외에 펠릿 원료에 대한 예열 정도, 내구성 향상을 위한 바인더의 종류 및 양, 펠릿 제조 시 성형기에 적용되는 압력, 다이(die)의 크기 및 생산 속도, 그리고 펠릿 제조 후 내구성 측정 방법, 보관 기간 및 방법 등에 따라 펠릿의 강도 및 내구성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 여러 연구 결과들이 보고되었다(Kaliyan와 Morey, 2009).

한편, 국내에서도 한과 최(2002) 그리고 한과 여(2003)가 포플러 및 현사시 톱밥을 이용하여 펠릿을 제조하여 그 펠릿의 물리적 특성에 대해 최초로 보고한 이후, 최근까지 권 등(2010)과 류 등(2010)이 낙엽송 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성 및 흡습율과 원재료인 톱밥 크기와의 관계 등에 대한 연구를 각각 수행하였다. 이와 같이 우리나라에서 목재펠릿에 대한 제조 및 연구는 약 10년 전부터 수행되었으나, 펠릿의 내구성에 미치는 영향인자들에 대한 종합적인 연구는 이루어지지 않았으며, 각 연구에서 사용하였던 내구성 및 강도 측정 방법이 상이한 관계로 펠릿의 내구성 결과를 비교하거나 품질을 판단하는데 한

계가 있는 것으로 생각한다. 따라서 본 연구는 국내 대표적인 수종인 낙엽송과 속성수로 최근 많은 연구가 진행되고 있는 백합나무의 톱밥을 이용하여 펠릿을 제조하고 펠릿 제조 과정에서 톱밥의 크기 및 함수율, 펠릿제조 온도 및 성형시간이 펠릿의 내구성에 미치는 영향을 알아보고, 그 결과를 토대로 최적의 펠릿 제조 조건을 탐색하기 위해 수행하였다. 마지막으로 펠릿의 최적 제조 조건을 종합하여 품질 및 상품성이 향상된 펠릿 생산을 위한 기초 자료를 제공하는데 본 연구 수행의 궁극적인 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

펠릿 제조용 공시 원재료로써, 침엽수는 낙엽송(*Larix kaempferi* C.) 제재 톱밥을 산림조합중앙회 목재유통센터(경기, 여주)에서 공급받아 사용하였으며, 활엽수는 충북대학교(충북, 청주)에서 벌목한 백합나무(*Liriodendron tulipifera* L.)에서 수피를 제거한 후 제재 과정을 통해 얻은 톱밥을 사용하였다. 톱밥의 크기에 따라 펠릿의 내구성에 차이가 있는지 조사하기 위하여 8~18 mesh와 18 mesh 이상의 톱밥으로 분리하여 펠릿을 제조하였으며, 톱밥의 함수율이 펠릿의 내구성에 미치는 영향을 규명하기 위해 각 톱밥의 함수율을 7, 9, 11, 13%로 조절하여 펠릿 제조에 사용하였다.

한편, 산림조합중앙회 목재유통센터(경기, 여주)에서 제조한 낙엽송 펠릿과 일도(충북, 청주)에서 70%의 침엽수와 30%의 활엽수 제재 톱밥으로 제조한 펠릿을 대조구 펠릿으로 사용하였으며, 이 대조구 펠릿의 원소 및 발열량 분석은 먼저 가정용 믹서로 펠릿을 분쇄한 후 60 mesh 이상의 분말을 사용하여 수행하였다.

2.2. 원소 및 열량 분석

각 공시재료의 원소 분석(Elementary Analysis)은 CE Instruments Inc.(Rodano, Italy)의 EA 1110 원

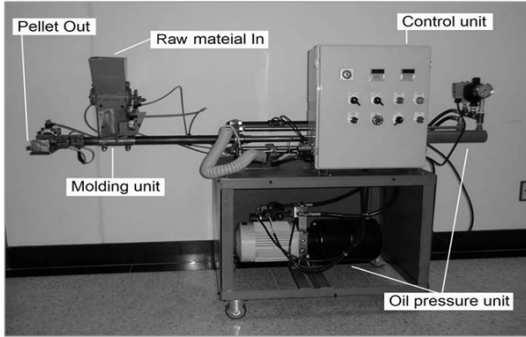


Fig. 1. Image of piston-type pelletizer used for the fabrication of pellets in our study.

소분석기를 사용하여 수행하였다. 분석방법을 자세히 설명하면, 1.5 mg의 전건시료를 1,014°C 온도의 회화로에서 연소시킨 후 석영관 내의 구리층을 통과시키면서 조성 원소별로 CO₂, N₂, H₂O, SO₂ 기체로 전환하였으며, 이 혼합 기체들을 gas chromatography column에 통과시키면서 분리한 후, 열전도검출기(Thermal Conductivity Detector)에 의하여 전기신호로 정량적으로 변환하였다. 마지막으로 표준시료를 이용하여 검량곡선을 작성한 후, 각 시료별로 탄소, 수소, 질소의 함유량을 측정하였으며, 산소는 100%에서 탄소, 수소, 질소 함유량을 감하여 구하였다. 한편 발열량은 시료 0.5 g을 열량계(6400 Automatic Isoperibol calorimeter, Parr Instrument Inc., Moline, Illinois)에 넣고 국립산림과학원에서 고시한 “목재펠릿품질규격”에 기술된 방법에 의거하여 측정하였으며, 각 시료의 원소 분석 및 발열량 값은 3회 반복의 평균값으로 표시하였다.

2.3. 펠릿의 제조 및 내구성 측정

펠릿의 내구성 측정 시 펠릿 크기의 차이에 따른 오차를 최소화하기 위해 1 g의 톱밥을 사용하여 펠릿을 제조하였으며, 피스톤 타입의 펠릿 성형기(Fig. 1, 자체 제작)를 이용하여 평균 7 mm의 지름과 20 mm의 길이를 가진 펠릿을 제조하였다. 펠릿은 먼저 크기가 다른 두 종류의 톱밥(8~18 mesh, 18 mesh 이상)을 각각 사용하여 일정 압력(1,500 kgf/cm²) 하

에서 펠릿제조 온도(120, 150, 180°C) 및 성형시간(1 및 3분)을 조절하여 제조하였으며, 제조된 펠릿은 실험실 내에서 최소 24시간의 자연 건조를 실시한 후 내구성 실험을 수행하였다. 한편 톱밥의 함수율에 따른 펠릿의 내구성 차이를 확인하기 위하여 가장 높은 내구성 값을 나타낸 성형 조건에서 톱밥의 함수율을 7, 9, 11, 13%로 조절하여 펠릿을 제조하였다. 펠릿의 내구성은 각 조건에서 제조된 펠릿 50개를 표준체 위에 올려놓고 50 rpm의 속도로 10분 동안 미세분을 발생시킨 후, 미세분 발생량의 무게를 측정하여 구하였으며, 그 값은 전체 투입량에 대한 백분율로 표시하였다(ASABE, 2003). 각 조건에서 제조한 펠릿의 내구성 측정치는 3회 반복의 평균값으로 표시하였다.

3.4. 주사전자현미경 관찰

펠릿의 제조 조건에 따른 내구성 차이를 시각적으로 확인하기 위해 전계방출 주사전자현미경(Field emission Scanning Electron Microscopy, 이하 FE-SEM)을 이용하여 각 조건에서 제조된 펠릿을 관찰하였다. 먼저 펠릿을 날카로운 면도칼로 절삭하여 FE-SEM 관찰용 시편을 준비하였으며, 이 시편들을 양면 탄소 접착테이프를 이용하여 금속 stud에 올려 고정시키고 백금을 이용하여 약 20 nm의 두께로 sputter-coating을 실시한 후, FE-SEM (Supra 55VP: Carl Zeiss, Oberkochen, Germany)을 이용하여 3 kV의 가속전압에서 관찰을 수행하였다.

3.5. 실험설계 및 통계학적 분석

본 연구에서는 낙엽송과 백합나무의 톱밥 크기(8~18, 18 mesh 이상), 펠릿제조 온도(120, 150, 180°C) 및 성형시간(1, 3분)이 펠릿의 내구성에 미치는 영향 인자로서 통계학적 분석에 사용되었으며, 결과적으로 실험설계는 2 × 2 × 3 × 2의 다원변량분석(factorial design) 방법이 적용되었다. 한편, 최상의 내구성 값을 나타낸 압축성형 조건에서 톱밥의 함수율(7, 9, 11, 13%)을 조절한 후 펠릿을 제조하고 톱밥의 함수율에 의한 내구성 차이를 비교하였다. 이렇

Table 1. Elemental compositions and heating value of larch and tulip tree sawdusts

	Elemental composition (%)				Higher heating value (kcal/kg) ⁵
	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	
Larch ¹	46.87	5.99	47.06	0.08	4,447
Tulip tree ²	44.94	5.77	49.19	0.10	3,765
Ildo pellet	47.58	5.92	46.37	0.13	4,434
NFCF pellet ³	46.91	6.05	46.95	0.09	4,423
1st-grade pellet ⁴	-	-	-	< 0.30	≥ 4,300
2nd-grade pellet ⁴	-	-	-	< 0.30	≥ 4,300
3rd-grade pellet ⁴	-	-	-	< 0.30	≥ 4,040
4th-grade pellet ⁴	-	-	-	< 0.30	≥ 4,040

¹Larix kaempferi C.²Liriodendron tulipifera L.³National Forestry Cooperative Federation.⁴Standards of wood pellet designated by Korea Forest Research Institute.⁵Higher heating value of air-dried wood pellet.

계 각 조건에서 측정된 내구성 값은 SAS (Statistical Analysis System) 프로그램에 의해 통계학적 분석이 수행되었으며, 그 분석은 95%의 신뢰범위에서 실시하였다(SAS, 2002). 펠릿의 내구성에 대한 각 인자들의 영향은 분산분석을 통해 조사되었으며, 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 의해 각 평균값 간의 차이가 유의한지 추가적으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원소 및 열량 분석

본 연구의 펠릿 제조 원료로 사용된 낙엽송 및 백합나무 톱밥 그리고 대조구로 사용된 두 종류의 펠릿에 대한 원소분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 낙엽송과 백합나무의 탄소 함량은 46.87%와 44.94%, 그리고 산소 함량은 47.06%와 49.19%로 탄소 및 산소 함량이 전체 원소 함량의 90% 이상을 차지하는 것으로 조사되었으며, 수소는 약 6%를 함유하고 있는 것으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 대조구인

두 종류의 펠릿에서 얻은 원소 분석 결과, 그리고 한과 김(2006) 및 권 등(2010)의 연구 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 한편 질소 함량의 경우, 낙엽송 및 백합나무에서 각각 0.08%와 0.10%로, 국립산림과학원에서 고시한 목재펠릿품질기준(2009)과 비교한 결과 모두 1등급 펠릿 기준인 0.3% 이하로 조사되어 펠릿 제조를 위한 원료로 사용되는 것에는 문제가 없을 것으로 생각한다.

각 공시재료 및 대조구에 대한 습량기준 발열량을 측정한 결과는 Table 1과 같다. 낙엽송 톱밥의 발열량(톱밥 함수율 : 9.12%)은 4,447 kcal/kg으로 백합나무의 발열량(톱밥 함수율 : 12.08%)인 3,765 kcal/kg과 비교하여 높았는데, 이와 같은 결과는 White (1987)와 Dhamodaran 등(1989)의 연구 결과에서 지적인 바와 같이 낙엽송과 백합나무의 리그닌 함량의 차이로 기인한 것으로 생각된다. 또한 Cordero 등(2001)의 원소 조성에 따른 발열량 연구에서 발열량은 일반적으로 탄소함량에 비례한다고 하였는데, 본 연구에서 낙엽송과 백합나무의 발열량 차이는 Table 1에서 보는 바와 같이 탄소함량의 차이에 의한 것으로 사료된다. 한편, 낙엽송 톱밥으로 제조된 펠릿 제품과 대조구 시편인 산림조합 및 일도 펠릿과의 발열량 비교에서 차이가 없는 것으로 조사되었으며, 그

Table 2. Effects of sawdust size, pelletizing temperature and time on the durability of pellets fabricated with larch and tulip tree sawdust

Factors	Durability (%)				
	Larch		Tulip tree		
Sawdust size (mesh)	8~18	98.33 B	p = 0.02	95.34 A	p = 0.36
	18~	98.74 A		95.30 A	
Pelletizing time (min)	1	98.44 B	p = 0.01	95.08 B	p = 0.01
	3	98.63 A		95.52 A	
Pelletizing temp. (°C)	120	97.98 C	* 120~150 : p = 0.02	95.09 B	* 120~150 : p = 0.12
	150	98.62 B	* 150~180 : p = 0.03	95.23 AB	* 150~180 : p = 0.11
	180	99.00 A	* 120~180 : p = 0.01	95.63 A	* 120~180 : p = 0.02
Control	NFCF pellet ¹	99.50			
	Ildo pellet	98.93			

¹ National Forestry Cooperative Federation.

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

값은 목재 펠릿의 품질기준인 1등급(4,300 kcal/kg)을 상회하는 것으로 나타났으나, 백합나무 톱밥으로 제조한 펠릿의 경우 4등급(4,040 kcal/kg) 기준에도 미치지 못하는 것으로 나타났는데, 그 이유는 낙엽송의 리그닌 함량이 백합나무에 비해 상대적으로 많으며, 발열량 측정 시 사용한 백합나무 시편의 높은 함수율에서 기인한 것으로 판단된다.

본 연구에서 제조한 낙엽송과 백합나무 목재펠릿의 발열량이 알려져 있는 목재펠릿의 발열량에 비해 상대적으로 낮게 측정되었다. 국립산림과학원 고시 2009-2호의 목재펠릿 품질 규격에 따르면, 목재펠릿 품질 기준에서 발열량 항목은 건조된 목재펠릿의 고위발열량을 표시하도록 하고 있으며, 본 연구에서는 발열량 측정 전 목재펠릿을 건조하지 않아 함수율 상대적으로 낮게 측정되었다. 목재펠릿의 순발열량은 보일러 등 연소기에서 얻을 수 있는 실질적인 열량으로서 함수율과 탄소, 수소 함량을 별도의 계산식에 적용하여 추정하는 것이 필요하나, 본 연구에서는 목재펠릿의 내구성 영향인자를 논하는 것으로 순발열량은 논의에서 제외하였다.

3.2. 내구성에 미치는 영향 인자

펠릿의 내구성은 펠릿 제조에 사용된 원재료간의 결합 정도를 나타내는 연료적 특성으로써, 펠릿의 수송 및 저장 시 미세분의 발생으로 인한 품질 및 상품성 저하를 방지할 수 있는 기초적인 자료를 제시할 수 있는 매우 중요한 특성 가운데 하나이다. 따라서 본 연구에서는 톱밥의 수종, 크기 및 함수율, 펠릿제조 온도 및 성형시간이 내구성에 미치는 영향에 대하여 알아보았다.

먼저 펠릿의 내구성에 대한 톱밥의 수종 간 비교에서 낙엽송 및 백합나무 펠릿의 내구성은 각각 98.54%와 95.32%로 조사되었으며, 통계학적으로 낙엽송 펠릿이 백합나무 펠릿의 내구성보다 높은 것으로 나타났다(p = 0.01). 이와 같은 결과는 펠릿 제조 과정에 있어 두 수종에서 톱밥간의 바인더 역할을 하는 리그닌의 함량 차이로 기인한 것으로 생각한다(Back, 1987).

톱밥 크기, 펠릿제조 조건(펠릿제조 온도 및 성형시간)에 따른 내구성 측정 결과는 Table 2와 같다. 먼저 펠릿 제조를 위해 사용된 톱밥의 크기에 따른 펠릿의 내구도 차이를 비교한 결과를 보면, 낙엽송에서 18 mesh 이상의 톱밥을 사용하여 제조한 펠릿이

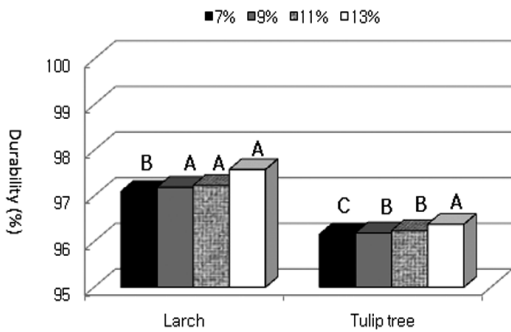


Fig. 2. Effect of the moisture contents of raw materials on the durability of the pellets fabricated with larch and tulip tree sawdust. Same letters above a column bar do not differ significantly at the 5% level(Student's t-test).

8~18 mesh의 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성보다 높았다. 이러한 결과는 톱밥의 크기가 작을수록 톱밥의 표면적이 증가하여 톱밥 간의 접촉 정도가 향상됨으로써 내구성이 증가한 것으로 생각한다. 그러나 백합나무 펠릿에서는 톱밥 크기에 따른 내구성은 차이가 없었는데, 이는 원재료인 백합나무의 비중이 낮아 낙엽송에 비해 용이하게 연화됨으로써 톱밥 크기에 의해 내구성은 크게 차이가 없었던 것으로 판단된다. 펠릿제조 온도 및 성형시간이 펠릿의 내구성에 미치는 영향을 분석한 결과를 보면, 낙엽송 및 백합나무 펠릿 모두에서 성형시간을 1분에서 3분으로 연장하거나 펠릿제조 온도가 증가하였을 때 내구성이 향상되었다(Table 2). 펠릿제조 온도의 증가와 성형시간의 연장에 따른 내구성의 향상은 목재 펠릿의 바인더 역할을 하는 것으로 생각되는 리그닌의 가소화를 증가시켜 톱밥 간의 결합을 향상시키고 결과적으로 내구성의 증가를 수반하는 것으로 생각한다. 이러한 추론을 확인하기 위하여 리그닌이 어떻게 톱밥 간의 결합체 역할을 하는지 조사하는 것이 필요할 것으로 생각한다.

Fig. 2는 펠릿 제조를 위해 사용된 낙엽송 및 백합나무 톱밥의 함수율에 따른 내구성의 분석 결과이다. 낙엽송 펠릿의 경우, 7% 함수율의 톱밥으로 제조한

펠릿의 내구성(97.10%)이 9%, 11%, 13% 함수율의 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성에 비해 낮았으며(7~9% : $p = 0.03$; 7~11% : $p = 0.01$; 7~13% : $p = 0.04$), 9% 이상의 톱밥 함수율에서는 내구성의 차이가 없는 것으로 조사되었다. 예를 들면, 9, 11, 13% 함수율의 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성은 97.19, 97.23, 97.58%로 통계학적으로 차이가 없는 것으로 조사되었다(9~11% : $p = 0.12$; 9~13% : $p = 0.19$; 11~13% : $p = 0.22$). 백합나무 펠릿의 내구성은 낙엽송 펠릿과 마찬가지로 7% 함수율의 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성이 가장 낮았으며(96.16%), 톱밥의 함수율 증가와 함께 내구성이 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 9% 및 11% 함수율의 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성은 96.19%와 96.24%로, 7% 함수율의 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성보다 통계학적으로 높았으며(7~9% : $p = 0.04$; 7~11% : $p = 0.04$), 9%와 11%의 함수율 간에는 내구성에 차이가 없었다($p = 0.06$). 그러나 13% 함수율 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성은 96.38%로 통계학적으로 가장 높은 것으로 조사되었다(7~13% : $p = 0.04$; 9~13% : $p = 0.04$; 11~13% : $p = 0.02$). 펠릿의 내구성과 함수율과의 관계를 보여준 여러 연구에서 펠릿 제조에 사용된 원료의 함수율 증가와 함께 내구성이 증가한다고 보고하였는데(Kaliyan과 Morey, 2009), 본 연구의 결과도 펠릿 제조를 위해 사용된 톱밥의 함수율이 증가할수록 내구성이 향상되는 경향을 보여주고 있다. 이는 톱밥의 함수율이 높을수록 펠릿제조 과정에서 톱밥 간의 수소결합 정도가 증가하여 내구성의 향상을 가져온 것으로 사료되며, 향후 연구에서 넓은 범위의 톱밥 함수율과 내구성과의 관계에 관한 연구가 필요할 것으로 생각한다. 한편, 본 연구에서 낙엽송 및 백합나무 펠릿은 대조구로 사용된 산림조합 및 일도 목재 펠릿보다 내구성이 낮았으나, 대부분의 낙엽송 펠릿은 국립산림과학원에서 고시한 목재펠릿의 내구성 1등급 기준(97.5%)을 만족하였으며, 백합나무 펠릿은 3등급 기준(95.0%)을 모두 상회하는 것으로 조사되었다(Table 2).

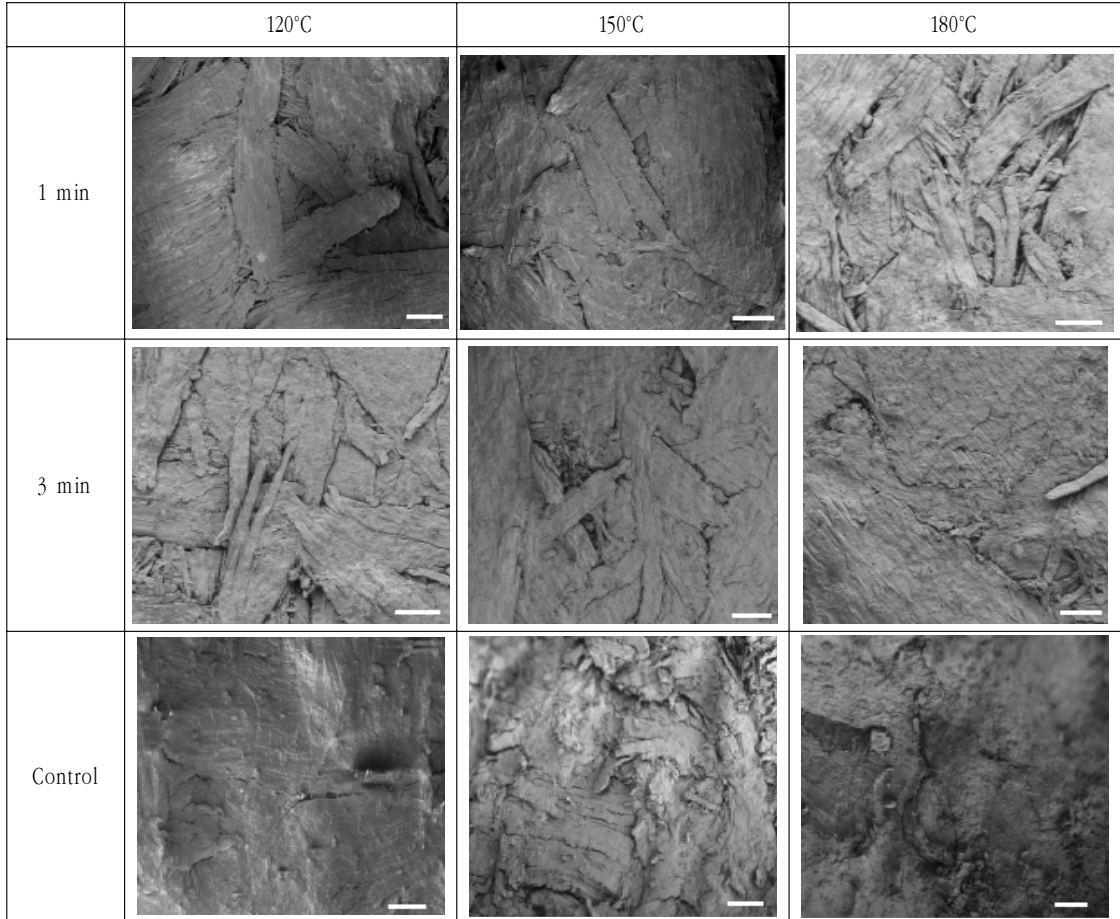


Fig 3. Scanning electron microscopic Images of larch-pellets and control pellet made with different densification times and temperatures. Bars = 100 μ m.

3.3. 전자현미경을 이용한 관찰

Fig. 3은 낙엽송 톱밥으로 제조한 펠릿과 대조구로 사용된 펠릿을 전계방출 주사전자현미경으로 관찰한 것으로, 펠릿제조 온도를 증가시키고 펠릿 성형시간을 연장함에 따라 펠릿 내에서 톱밥 간의 거리가 감소하는 것으로 관찰되었다. 특히 180°C의 온도에서 3분의 성형시간으로 제조한 펠릿의 경우 대조구 시편과 크게 차이가 없는 것을 육안으로 쉽게 확인할 수 있었다.

백합나무 톱밥으로 제조한 펠릿의 제조 조건별 전계방출 주사전자현미경 사진은 Fig. 4에 나타내었다.

낙엽송 펠릿과 마찬가지로 180°C의 온도에서 3분의 성형시간으로 제조한 펠릿에서 톱밥간의 거리가 낮은 펠릿제조 온도와 짧은 성형시간에서 제조한 펠릿보다 감소하였으며, 결과적으로 강하게 응집되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 펠릿제조 온도를 높이고 성형시간을 연장함에 따라 대조구 시편의 표면과 크게 차이가 없음을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 결과는 성형시간의 연장이 본 연구에서 펠릿 제조를 위해 사용된 피스톤식 성형기에서 톱밥 간의 간격을 줄일 수 있는 연속적인 충분한 압력을 제공하고, 펠릿제조 온도의 증가와 함께 목재 톱밥 간의 바인더 역할을 하는 것으로 추측되는 리그닌이 가소화되어

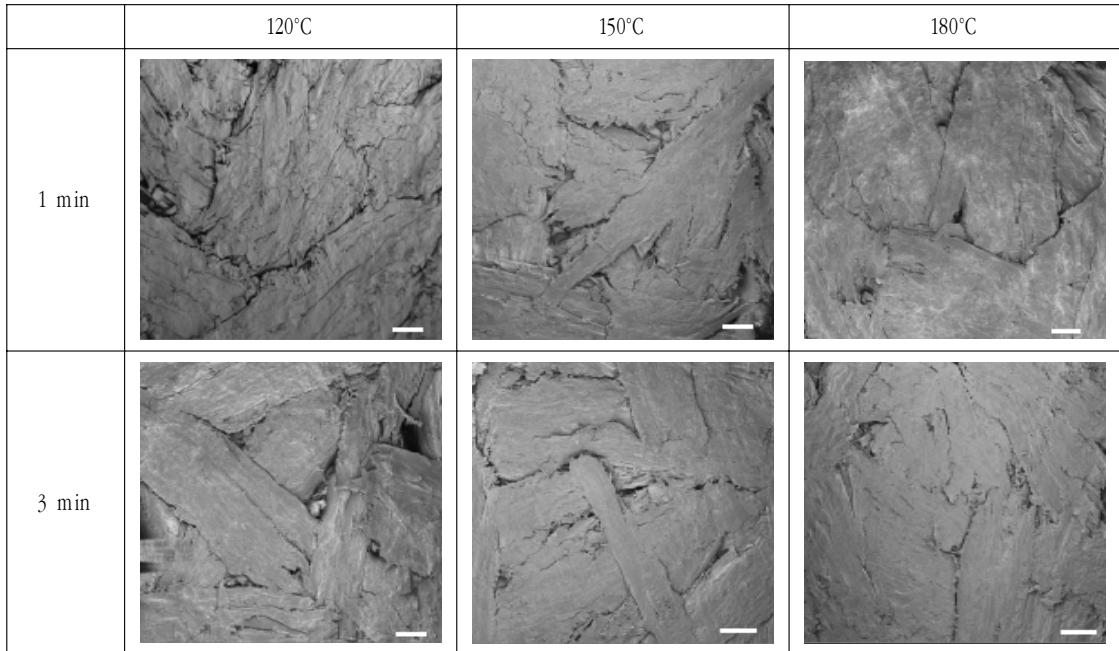


Fig 4. Scanning electron microscopic Images of tulip tree-pellets made with different densification times and temperatures. Bars = 100 μ m.

팽윤됨으로써 톱밥 간의 거리를 감소하여 나타난 것으로 판단된다.

상기 결과들을 종합하면, 목재펠릿 제조에 있어 톱밥 간의 초반 결합은 톱밥 내의 수분에 의한 수소결합에 의해 지배되는 것으로 판단되며, 톱밥 내의 수분이 완전히 증발된 후에는 목재 내 리그닌의 가소화에 의한 목재 톱밥의 팽윤으로 톱밥 간의 거리가 가까워지며 톱밥 간에 서로 잡아당기는 힘(van der Waals, electrostatic, magnetic forces)과 기계적 결합(solid bridge, mechanical interlocking) 등에 의해 내구성이 향상되는 것으로 판단되며(Kaliyan and Morey, 2009), 이와 같은 추론을 확인하기 위하여 폭넓은 범위의 톱밥 함수율과 내구성의 관계를 밝히는 연구와 다양한 펠릿제조 온도에서 리그닌이 톱밥 간의 결합에 어떠한 역할을 하는지 확인할 수 있는 현미경적 관찰이 필요할 것으로 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서 공시재료로 사용된 낙엽송과 백합나무는 전체 원소 함량 가운데 탄소와 산소가 90% 이상을 차지하고 있었으며, 질소 함량은 국립산림과학원에서 고시한 목재펠릿 품질기준의 1급 기준인 0.3% 이하로 조사되었다. 발열량의 경우 낙엽송은 4,447 kcal/kg으로 목재 펠릿의 품질기준인 1등급(4,300 kcal/kg)을 상회하는 것으로 나타났으나, 백합나무는 3,765 kcal/kg으로 목재펠릿기준의 4등급(4,040 kcal/kg)에도 미치지 못하였는데, 그 이유는 낙엽송과 백합나무의 리그닌 함량 차이와 발열량 측정 시 사용한 백합나무 톱밥의 높은 함수율(12%)에서 기인한 것으로 판단된다. 내구성 결과를 종합하면, 낙엽송 펠릿의 내구성이 백합나무 펠릿보다 높았으며, 작은 크기의 톱밥으로 제조한 펠릿이 큰 톱밥을 사용한 펠릿보다 일반적으로 높았다. 펠릿 제조공정의 차이에 따른 내구성의 변화는 펠릿제조 온도가 높을수록 펠릿 성형시간이 연장될수록 향상되었다.

한편 톱밥의 함수율이 올라감에 따라 낙엽송 및 백합나무 펠릿의 내구성이 향상되었는데, 이는 톱밥 간의 수소결합 정도가 증가한 결과에서 기인한 것으로 판단된다. 제조된 펠릿의 전자현미경 관찰을 통하여 펠릿제조 온도를 높이고 펠릿 성형시간을 연장함에 따라 펠릿 내에서 톱밥 간의 거리가 감소하고, 특히 180°C의 온도에서 3분 동안 성형한 펠릿의 경우 대조구 시편과 비교하여 육안으로 크게 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. 상기 결과들을 토대로 목재 펠릿의 내구성 향상을 위한 향후 연구는 톱밥의 폭 넓은 함수율과 내구성의 관계에 대한 연구와 현미경을 이용한 다양한 방법(전자현미경을 이용한 분광분석, 광학현미경, 형광현미경 등)을 통하여 리그닌이 톱밥 간의 결합에 어떠한 역할을 하는지 밝히는 연구를 동시에 수행해야 할 것으로 생각한다. 또한 내구성의 향상 외에 발열량의 향상을 위한 첨가제에 대한 연구도 목재 펠릿의 보급을 넓히는 방안이 될 것으로 예상되어 이에 대한 연구도 필요할 것으로 생각한다.

사 사

본 연구에서 목재시편의 화학적 성분 및 원소 분석에 도움을 준 서울대학교 산림과학부 환경재료과학 전공 목재화학실의 정한섭 대학원생과 펠릿의 제조 및 내구성 측정에 큰 도움을 준 충북대학교 목재종이과학과의 정재훈, 전명진, 이아름 학생에게 감사드립니다.

본 과제의 일부는 국립산림과학원 연구과제(FP0900-2010-01) 및 지식경제부 에너지자원 인력양성 사업 "바이오에너지핵심기술연구센터"의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 류재윤, 강찬영, 이응수, 서준원, 이현종, 박현. 2010. 국내산 낙엽송의 톱밥 유형에 따른 펠릿특성에 관한 연구. 목재공학 38(1): 49~55.
2. Li, Y. and H. Liu. 2000. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass and Bioenergy 19: 177~186.

3. Obernberger I. and G. Thek. 2004. Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. Biomass and Bioenergy 27: 653~669.
4. Lehtikangas, P. 2001. Quality properties of pelleted sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy 20: 351~360.
5. 권성민, 조재현, 이성재, 권구중, 황병호, 이귀현, 한규성, 차두송, 김남훈. 2007. 산불피해 소나무재의 목질펠릿으로의 이용가능성 평가. 목재공학 35(4): 14~20.
6. 권구중, 권성민, 차두송, 김남훈. 2010. 목타르와 톱밥을 혼합하여 제조한 펠릿의 특성. 목재공학 38(1): 36~42.
7. Kaliyan, N. and R. B. Morey. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass and Bioenergy 33: 337~359.
8. Mani, S., L. G. Tabil, and S. Sokhansanj. 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. Biomass and Bioenergy 20: 648~654.
9. Bergstrom, D., S. Israelsson, M. Ohman, S. Dahlqvist, R. Gref, C. Boman, and I. Wasterlund. 2008. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. Fuel processing Technology 89: 1324~1329.
10. Stakl, M., K. Granstrom, J. Berghel, and R. Renstorm. 2004. Industrial process for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. Biomass and Bioenergy 27: 621~628.
11. 한규성, 최돈하. 2002. 포틀러로부터 고밀화연료의 제조. 임산에너지 21(3): 59~65.
12. 한규성, 여진기. 2003. 고밀화에 의한 현사시 톱밥의 고형 연료화. 임산에너지 22(2): 54~59.
13. 국립산림과학원. 2009. 목질펠릿 품질 규격. 국립산림과학원 고시 제 2009-2호.
14. ASABE. 2003. Cubes, pellets and crumbles - definitions and methods for determining density, durability and moisture content. ASABE Standards, St. Joseph, MI: 269.
15. Statistical Analysis System Institute. 2002. SAS/STAT, User's guide. Cary, NC: 55~80.
16. 한규성, 김병로. 2006. 목질펠릿으로 제조한 탄화물의 특성. 목재공학 34(3): 15~21.

17. 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.
18. Dhamodaran, T. K., R. Gnanaharan, and P. K. Thulasidas. 1989. Calorific value variation in coconut stem wood. *Wood Sci. Technol.* 23: 21~26.
19. Cordero, T., F. Marquez, J. Rodriguez-Mirasol, and J. Rodriguez. 2001. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel* 80: 1567~1571.
20. Back, E. L. 1987. The bonding mechanism in hardboard manufacture. *Holzforschung* 41(4): 247~258.