

바인더의 첨가가 목재 펠릿의 연료적 특성에 미치는 영향*1

안 병 준*2 · 장 희 선*3 · 조 성 태*2 · 한 규 성*3 · 양 인*3†

Effect of the Addition of Binders on the Fuel Characteristics of Wood Pellets*1

Byoung Jun Ahn*2 · Hee-sun Chang*3 · Seong Taek Cho*2 ·
Gyu-seong Han*3 · In Yang*3†

요 약

본 연구는 낙엽송과 백합나무 톱밥을 이용한 펠릿의 제조 과정에서 바인더로 일정량의 유채박, 커피부산물, 수피, 솔방울, 리그닌 분말을 첨가하여 바인더의 종류 및 첨가량이 내구성을 포함한 펠릿의 품질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행하였다. 바인더와 함께 제조한 펠릿의 품질은 국립산림과학원에서 고시한 목재 펠릿 품질 규격 1등급 기준을 대부분 상회하였으며, 일부 과다한 양의 바인더를 첨가하여 제조한 펠릿에서만 높은 회분 함량으로 2~3등급 기준을 만족하는 것으로 조사되었다. 바인더 종류 및 첨가량에 따른 펠릿의 내구성은 리그닌, 유채박 그리고 커피부산물을 첨가하여 제조한 펠릿에서 우수하였으며, 백합나무 펠릿은 첨가량의 증가와 함께 내구성도 향상되었다. 한편 낙엽송 펠릿의 경우 첨가량의 증가에 따른 내구성 향상 효과는 크지 않았으며, 수피와 솔방울을 바인더로 사용하였을 때 첨가량의 증가와 함께 내구성이 감소하였다. 제조된 펠릿의 광학/전자현미경 관찰을 통하여 바인더의 종류에 따른 차이를 명확하게 확인할 수 없었으나, 첨가량에 따른 차이는 명확하게 관찰할 수 있었다. 결과를 종합하면, 바인더의 첨가는 목재 펠릿의 품질 향상에 대부분의 항목에서 기여하였으며, 특히 커피부산물을 바인더로 사용하여 제조한 펠릿의 경우 모든 품질에서 뚜렷한 향상을 확인할 수 있었다. 향후 저렴한 바인더의 안정적인 확보가 이루어진다면 바인더의 첨가로 인하여 연료적 품질이 향상된 목재 펠릿의 상용화가 가능할 것으로 확신한다.

*1 접수 2012년 8월 23일, 채택 2013년 11월 13일

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

*3 충북대학교 농업생명환경대학 목재종이과학과, 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 work was conducted to investigate the effect of the addition of binders, such as rapeseed flour, coffee waste, bark, pine cone and lignin powder, on the fuel characteristics of the pellets fabricated with larch and tulip tree sawdust. Moisture content, bulk density and higher heating value of most pellets fabricated with the binders exceeded the 1st-grade pellet standard designated by Korea Forest Research Institute, but ash content of the pellets fabricated with rapeseed flour or bark of 10 wt% on the dry weight basis of sawdust was satisfied with just the 2nd- or 3rd-grade standard. The durability of tulip tree-pellets was positively influenced by the addition of rapeseed flour, coffee waste or lignin powder and increased with increasing the amount of the binders. For larch-pellets, the increase of binders did not greatly affect the durability, and even the durability reduced with the increase of bark or pine cone. From the microscopic observation, the obvious feature of pellet surfaces was not identified by the type of binder but by the addition amount of the binder. In summary, the addition of binders contributed to the fuel characteristics of wood pellets, and particularly the characteristics of wood pellets fabricated with coffee waste improved greatly. Therefore, if the binders are secured sufficiently with a reasonable cost, it might be possible to commercialize wood/binder pellets, which have better fuel characteristics than conventional wood pellets.

Keywords: pellet, binder, higher heating value, durability, ash content, microscopic observation

1. 서 론

화석에너지 소비의 급속한 증가, 기후변화 협약의 규제를 위한 대응책의 일환 그리고 자원의 순환적인 이용 측면에서 재생가능자원인 바이오매스가 청정 에너지원으로 새롭게 인식되며, 최근 바이오매스 자원을 활용한 대체에너지의 개발과 보급이 확산되고 있다. 이와 같이 바이오매스를 활용한 대체에너지 가운데 목재를 칩의 형태로 파쇄하여 고품 연료로써 이용하는 것이 가장 일반적인 활용 방안이었으나, 최근 이용 편의성과 연료적 특성을 고려하여 목재 톱밥을 고밀화시킨 펠릿의 이용이 점차 확대되고 있다. 현재 국내에서 생산되고 있는 목재 펠릿은 주로 재제소 등에서 발생하는 목재 부산물과 산림청에서 시행하고 있는 숲가꾸기 사업에서 얻은 일부 부산물 등을 톱밥으로 분쇄한 후 고온 및 고압으로 압축한 제품이 생산되고 있다.

펠릿은 목재 칩과 달리 목재 톱밥을 고밀화 함에 따라 착화성, 연소효율, 운반 및 보관성이 향상되고,

일정한 형상과 함수율을 보유하여 연소기의 자동화가 가능하며, 이 외에 크기가 작아 투입량 조절에 의한 연소기의 온도조절이 가능함으로써 안전을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있는 것으로 보고되었다(Li와 Liu, 2000; Lehtikangas, 2001; 권 등, 2007; 권 등, 2010). 이와 같이 목재 펠릿은 고온 및 고압에서 고밀화 과정을 통하여 목재 톱밥 간의 접착 또는 기계적인 결합이 일어나고, 결과적으로 일정한 강도 및 형상을 유지하나(Kaliyan과 Morey, 2009), 외력이나 고습도 등과 같이 외부 조건에 의하여 목재 성분 간의 결합력이 약화되므로 펠릿의 품질과 상품성이 저하된다. 따라서 펠릿의 내구성 및 강도 향상을 위하여 목재 톱밥 간의 결합과 관련된 여러 인자들에 대한 연구가 현재 목재 펠릿이 상용화된 선진국에서 활발히 진행되고 있다(Li와 Liu, 2000; Lehtikangas, 2001; Obernberger와 Thek, 2004; Stakl 등, 2004; Mani 등, 2006; Bergstrom 등, 2008).

국내에서 목재 펠릿과 관련된 연구 동향을 보면, 2000년대 초반 포플러 및 현사시 톱밥을 이용하여

펠릿을 제조하고, 그 펠릿의 연료적 특성에 대한 결과를 한과 최(2002) 그리고 한과 여(2003) 등이 보고하였으나, 펠릿의 품질에 미치는 영향인자들에 대한 종합적인 연구는 부족한 실정이다. 최근 권 등(2010)과 류 등(2010)이 낙엽송 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성 및 흡습률과 원재료인 톱밥 크기와 관계 등에 대한 연구를 각각 수행하였으며, 이 등(2011)이 낙엽송과 백합나무 톱밥으로 여러 성형 온도 및 시간 그리고 목분 크기 및 함수율에 따라 펠릿을 제조하고, 각 제조 조건에 따른 내구성을 비교하는 연구를 수행하였다.

한편 상기에서 언급한 펠릿의 품질 및 내구성에 미치는 영향 인자 외에 바인더의 종류와 첨가량도 목재 펠릿의 품질 및 내구성 향상에 영향이 있는 것으로 보고되고 있다. 예를 들면, 펠릿 내에서 목재 간의 화학적 반응 또는 기계적 결합을 통하여 내구성을 증가시키는 바인더로 탄수화물, lignosulfonate (Kim et al., 2002)와 단백질(Briggs, et al., 1999) 등이 주로 연구되고 있으며, 이와 같은 바인더는 목재 간의 결합력 향상을 위한 접착제 역할을 수행함으로써 내구성을 증가시키는 것으로 보고되고 있다(Kaliyan과 Morey, 2009). 그러나 국내에서 바인더의 첨가에 의한 펠릿의 품질에 미치는 영향에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 침엽수인 낙엽송과 활엽수인 백합나무 톱밥에 일정량의 탄수화물, 리그닌 또는 단백질을 함유하고 있는 유채박, 커피박, 수피, 솔방울, 리그닌을 각각 바인더로 일정량 첨가하여 목재 펠릿을 제조하고, 제조된 펠릿의 연료적 특성을 조사함으로써 바인더의 종류 및 양이 펠릿의 품질에 미치는 영향을 조사하고, 이 조사 결과를 토대로 목재 펠릿 제조시 바인더의 사용 가능성 여부 및 최적 바인더 종류/첨가량에 대한 자료를 제공하기 위하여 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

산림조합중앙회 목재유통센터(경기, 여주)에서 공급받은 낙엽송(*Larix kaempferi* C.) 톱밥(함수

율: 11.4%)과 충북대학교(충북, 청주)에서 벌목한 백합나무(*Liriodendron tulipifera* L.)에서 수피를 제거한 후 제재 과정을 통해 얻은 톱밥(함수율: 7.0%)을 펠릿 제조용 공시 원재료로 사용하였다. 한편, 산림조합중앙회 목재유통센터(경기, 여주)에서 생산된 낙엽송 펠릿을 대조구 시편으로 사용하였다. 목재 펠릿의 내구성에 미치는 바인더의 효과를 알아보기 위하여 커피부산물 및 유채박과 같은 산업부산물과 수피, 솔방울, 리그닌 분말과 같은 임업부산물을 바인더로 사용하였으며, 바인더의 첨가량은 목분의 전건무게를 기준으로 2, 4, 6, 8, 10 wt%로 조정하여 펠릿을 제조하였다. 각 바인더에 대한 상세한 내용은 다음과 같다.

유채박은 국내에서 유기질 비료용 원료로 사용되고 있는 것으로 인도 수입산물(주) 대영 TMS (평택, 경기)에서 구입하여 사용하였다. 커피부산물은 (주)한국 네슬레(충북, 청주)에서 무상으로 분양받아 사용하였는데, 높은 함수율(약 60%)로 인하여 충분히 건조시킨 후 바인더로 사용하였다. 한편 수피는 러시아산 적송(*Pinus densiflora* S.) 수피를 (주)이라산업에서 무상으로 분양받아 사용하였으며, 솔방울은 강원도 산간지역에서 직접 채집하여 건조한 후 사용하였다. 마지막으로 리그닌은 Alkaline lignin (Toyko Kasei)을 덕진과학(경기, 용인)에서 구입하여 사용하였다. 상기의 바인더 가운데 유채박, 커피부산물, 수피, 솔방울은 충분히 건조시킨 후 가정용 믹서로 분쇄하고 60 mesh (0.42 mm) 표준체를 이용하여 선별된 분말을 사용하였으며, 리그닌은 분쇄 및 선별 과정을 거치지 않고 구입한 미세한 분말을 그대로 펠릿 제조, 이화학적 성질 및 연료적 특성 조사에 사용하였다.

2.2. 바인더의 성분 분석 및 연료적 특성

본 연구에서 바인더로 사용된 유채박, 커피부산물, 수피 및 솔방울의 단백질, 전섬유소, 지방, 회분 함량은 양 등(2010)에 의해 수행된 방법에 따라 측정하였다. 리그닌 함량의 경우 Sluiter 등(2008)에 의해 기술된 Klason lignin 함량 측정방법에 따라 조사하였다. 한편 회분의 정성분석은 바인더 분말을

65%의 질산용액(HNO_3)을 이용하여 회분을 제외한 모든 성분을 제거한 후, 증류수로 희석한 용액을 조사된 각 원소의 검출 파장에 따라 Inductively coupled plasma (ICP) emission spectrometer (Perkin-Elmer Optima 4300 DV)를 이용하여 수행하였다. 예를 들면 구리의 함량은 324.8 nm의 파장에 탐지되는 양을 조사하여 얻었다. 연료적 특성인 함수율, 발열량, 회분 함량은 바인더 분말을 이용하여 국립산림과학원에서 고시한 “목재펠릿품질규격”에 기술된 방법에 의거하여 측정하였다.

2.3. 펠릿 제조 및 품질 평가

바인더의 종류 및 양, 원료인 목재 톱밥의 배합비율 및 함수율에 따른 품질 측정값의 오차를 최소화하기 위하여 1g의 톱밥/바인더를 피스톤 타입의 펠릿 성형기에 넣고 펠릿을 제조하였다. 제조된 펠릿의 직경과 길이는 각각 7.4~7.5 mm와 17.5~18.0 mm인 것으로 측정되었다. 펠릿 제조 조건은 1,500 kgf/cm^2 의 압력과 180°C의 온도에서 3분의 시간으로 조절하여 성형하였으며, 제조된 펠릿은 실험실 내에서 최소 24시간의 자연 건조를 실시한 후, 국립산림과학원에서 고시한 “목재펠릿품질규격”에 기술된 방법에 따라 펠릿의 품질을 조사하였으며, 3회 반복의 평균값으로 표시하였다.

2.4. 광학 및 주사전자 현미경 관찰

제조 조건에 따른 펠릿의 표면 차이를 시각적으로 확인하기 위하여 표준 형광원 장치(FOK-100w, Fiberoptic Korea)와 실제 현미경(Stereoscopic zoom microscope, Nikon SMZ-1500)으로 각 조건에서 제조된 펠릿을 관찰하였으며, 아울러 전계방출 주사전자현미경(Field emission Scanning Electron Microscopy, 이하 FE-SEM)도 이용하여 펠릿을 관찰하였다. 현미경 관찰용 시편은 0.1 g의 공시재료를 이용하여 각 펠릿 제조 조건에서 준비하였으며, FE-SEM 관찰용 펠릿 시편은 양면 탄소 접착테이프를 이용하여 금속 stud에 올려 고정시키고 백금을 이용하여 약 100 nm의 두께로 sputter-coating을 실시한

후, FE-SEM (Hitachi S-4300, Japan)을 이용하여 15 kV의 가속전압에서 관찰하였다.

2.5. 실험설계 및 통계학적 분석

본 연구에서는 바인더의 종류(유채박, 커피부산물, 수피, 솔방울, 리그닌) 및 첨가량(0, 2, 4, 6, 8, 10 wt%)이 펠릿의 품질에 미치는 영향에 대하여 5 × 6의 다원변량분석(factorial design)을 이용하여 조사하였다. 펠릿의 품질에 대한 바인더의 종류 및 양의 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. 바인더의 화학적 조성 및 연료 특성

낙엽송(이하 LAR) 및 백합나무(이하 TUT) 목분 예 유채박(이하 RF), 커피부산물(이하 CW), 수피(이하 BK), 솔방울(이하 PC), 리그닌 분말(이하 LP)을 바인더로 각각 첨가하여 제조한 목재 펠릿에서 바인더의 종류 및 첨가량이 펠릿의 품질에 미치는 영향을 조사하기에 앞서 바인더의 화학적 조성 및 연료적 특성을 조사하였다. 먼저 RF는 41.5%의 전섬유소, 23.2%의 단백질, 11.7%의 지방/오일, 15.6%의 리그닌을 함유하고 있어 본 연구에서 사용된 바인더 가운데 가장 높은 단백질 함량을 보유하고 있었다. 다음으로 CW는 23.5%의 전섬유소, 11.6%의 단백질, 22.7% 지방/오일 그리고 41.7%의 리그닌을 함유하고 있었으며, 지방/오일의 함량이 다른 바인더와 비교하여 매우 높은 것으로 조사되었다. 한편 BK는 39.2%의 전섬유소와 45.7%의 리그닌으로, PC는 78.3%의 전섬유소와 24.5%의 리그닌을 함유하고 있는 것으로 조사되었으며, 마지막으로 LP는 대부분이 리그닌 성분이라는 가정 하에 펠릿의 품질 분석에 이용하였다.

Table 1. Fuel characteristics of binders used for this study

	Moisture Content (%)	Higher heating value (MJ/kg)	Ash content (%)
Rapeseed flour	9.2	17.4	8.0
Coffee waste	25	26.3	0.5
Bark	6.1	23.4	4.0
Pine cone	12.8	19.5	2.5
Lignin powder	5.4	20.7	2.3
1st-grade pellet ¹	≤ 10.0	≥ 18.0	≤ 0.7
2nd-grade pellet ¹	≤ 10.0	≥ 18.0	≤ 1.5
3rd-grade pellet ¹	≤ 15.0	≥ 16.9	≤ 3.0
4th-grade pellet ¹	≤ 15.0	≥ 16.9	≤ 6.0

¹ Standards of wood pellet designated by Korea Forest Research Institute.

Table 2. Contents of metals and heavy metals contained in the binders used in this study

(Unit: mg/kg)	Rapeseed flour	Coffee waste	Bark	Pine cone	Lignin powder	ENplus ¹
Ca	8,679	380	1,774	1,908	66	-
K	12,760	79	131	827	96	-
Na	605	10.4	133	8.2	4,290	-
Mg	4,462	58	88	623	19	-
Si	5.71	0.83	0.88	1.16	10.13	-
Cd	0.15	0.02	0.01	0.15	0.01	≤ 0.50
Cr	0.9	0.1	0.4	0.3	0.1	≤ 10
Zn	48	12	8	36	1	≤ 100
Cu	27	7.9	21.5	4.5	0.8	≤ 10

¹ European wood pellet standards.

Table 1은 각 바인더의 함수율, 발열량, 회분 함량을 측정된 결과로써, 함수율은 PC가 가장 높았으며, 다음으로 RF, BK, LP, CW 순으로 조사되었다. 회분 함량의 경우, RF가 가장 높았으며, BK, LP, PC 순으로 조사되었으며, CW는 1% 미만의 회분을 함유한 것으로 조사되었다. RF의 높은 회분 함량은 채집과정에서 토양을 포함한 여러 물질의 혼입에서 비롯된 것으로 추정된다. LP의 높은 회분 함량은 질산 용액을 이용한 용해과정에서 LP가 완전히 용해되지

않아 연소 과정에서 리그닌 성분 간의 결합으로 인한 것으로 판단되며, 실제로 LP를 회화로에서 연소시킨 후 육안으로 확인한 결과 여러 덩어리가 형성된 것으로 보아 완전치 못한 연소에서 기인한 것으로 생각한다. 발열량은 CW가 가장 높았는데, 이는 CW의 낮은 함수율과 높은 지방/오일 함유량에 의한 것으로 판단된다. 다음으로 BK, LP, PC, RF 순으로 조사되었는데, RF의 경우 약 12%의 지방/오일을 함유하고 있음에도 불구하고 발열량이 낮은 이유는 높

은 함수율과 밀접한 관계가 있을 것으로 또한 PC의 낮은 발열량도 높은 함수율에서 비롯된 것으로 생각한다(오 등, 2010).

한편 본 연구에서 사용된 바인더 내에 함유된 회분의 정성분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 대부분의 바인더에서 칼슘 또는 칼륨의 함량이 가장 높았으며, 특히 RF, BK, PC는 LAR 목분(471 mg/kg)보다 3~20배의 칼슘을 함유하고 있는 것으로 조사되었는데, 칼슘은 연소시 클링커 또는 슬래그를 발생시키는 주원인으로 알려져 있어 바인더의 양은 CW를 제외하고 제한적으로 첨가해야 할 것으로 판단된다. LP의 경우 나트륨의 함량이 가장 높았는데, 이는 LP의 분리 및 정제과정에서 첨가된 것으로 생각한다. BK 내의 구리 함량을 제외하고 모든 바인더의 금속 및 중금속 함량은 유럽의 목재 펠릿 기준을 만족하는 것으로 조사되었다.

3.2. 펠릿 품질에 대한 바인더의 영향

3.2.1. 바인더 첨가의 영향

바인더를 첨가하지 않고 제조한 LAR 펠릿의 품질은 5.1%의 함수율, 641 kg/m³의 겉보기밀도, 19.0 MJ/kg의 발열량, 96.9%의 내구성, 0.22%의 회분량을 나타내었다. 먼저 LAR 펠릿의 함수율의 경우, 첨가되는 바인더의 함수율(평균 7.2%)이 LAR (11.4%)보다 낮았음에도 불구하고 첨가량이 많지 않은 관계로 6 wt%의 바인더 첨가까지는 영향을 받지 않았으나, 8 wt%부터는 감소하였다. 겉보기밀도는 바인더의 첨가와 함께 증가하였는데, 이는 미세한 분말의 바인더가 LAR 목분 사이의 공간을 채움으로써 나타난 결과라 추정되며, 첨가량이 증가함에 따라 점진적으로 증가하였다. 발열량도 바인더의 첨가와 함께 증가하였는데, 이는 LAR과 비교하여 대부분 바인더의 높은 발열량에서 기인한 결과라 생각한다(Table 1). 한편 바인더의 첨가가 LAR 펠릿의 내구성에 평균적으로 영향을 미치지 않는 것으로, LAR/RF, LAR/CW, LAR/LP 펠릿의 내구성은 LAR 펠릿보다 높았으며, LAR/BK와 LAR/PC 펠릿은 반대의 결과를 나타냈다. 이에 대한 고찰은 3.2.2절에서 언급할

예정이다. 마지막으로 회분량은 RF, BK, PC의 높은 회분 함량으로 펠릿의 회분량은 첨가되는 바인더 양이 증가함에 따라 증가하였다.

한편, TUT만으로 제조한 펠릿은 2.6%의 함수율, 645 kg/m³의 겉보기밀도, 18.6 MJ/kg의 발열량, 95.1%의 내구성, 0.39%의 회분량을 가진 것으로 추정되었다. TUT 펠릿의 품질은 바인더의 첨가에 따라 LAR 펠릿과 마찬가지로 겉보기밀도, 발열량 그리고 내구성은 향상되었으나, 함수율과 회분량에는 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 TUT 목분은 바인더보다 낮은 함수율(7.0%)을 보유하고 있어 바인더의 첨가 및 첨가량 증가와 함께 TUT 펠릿의 함수율은 증가하였다. 결과를 종합하면 LAR 및 TUT 펠릿의 품질은 바인더의 첨가에 따라 영향을 받았으며, 바인더의 종류와 첨가량에 따라 각 품질에 차이가 있는 것으로 나타났다.

3.2.2. 바인더 종류의 영향

Table 3은 LAR 또는 TUT 목분에 바인더와 함께 제조한 펠릿의 품질 및 각 품질에 미치는 바인더 종류의 영향을 통계학적으로 분석한 결과이다. 함수율은 LP 또는 CW가 바인더로 사용된 LAR 및 TUT 펠릿에서 가장 낮았으며, BK와 함께 제조된 펠릿의 함수율이 가장 높았다. 이와 같이 일정한 함수율의 LAR 및 TUT 목분으로 펠릿을 제조했음에도 불구하고 제조된 펠릿의 함수율 차이는 바인더의 함수율 차이에서 기인한 것으로 생각한다.

겉보기밀도의 경우 LAR 펠릿에서는 RF를 바인더로 사용한 펠릿에서 가장 높았으며(Table 3), CW, BK, PC, LP를 첨가하여 제조한 펠릿에서는 차이가 없었다. 이와 같이 LAR/RF 펠릿의 높은 겉보기밀도는 미세한 RF 분말(60 mesh 이하)의 사용에 따른 결과라 판단된다. 한편 TUT 펠릿의 겉보기밀도는 바인더의 종류에 따라 차이가 없었는데, 이는 TUT의 낮은 비중으로 펠릿 성형과정에서 LAR보다 용이하게 압밀화됨으로써 바인더의 목분-목분 간의 공간 채움 효과가 어느 정도 상쇄되어 나타난 결과라 추정된다.

LAR 및 TUT 펠릿의 발열량에 대한 바인더의 영

Table 3. Effect of binder types on the fuel characteristics of pellets fabricated with larch or tulip tree sawdust and binders

Feed	Binder type ^a	Moisture Content (%)	Bulk density (kg/m ³)	Higher heating value (MJ/kg)	Durability (%)	Ash content (%)
Larch	RF	5.2 (c)	701 (a)	19.3 (c)	97.8 (a)	0.46 (b)
	CW	4.4 (b)	657 (b)	19.7 (a)	97.4 (a)	0.26 (a)
	BK	6.0 (d)	654 (b)	19.5 (b)	95.0 (c)	0.62 (c)
	PC	5.4 (c)	661 (b)	19.4 (bc)	95.9 (b)	0.47 (b)
	LP	3.5 (a)	668 (b)	19.4 (bc)	97.6 (a)	1.33 (d)
Tulip tree	RF	4.2 (b)	660 (a)	18.8 (c)	96.1 (a)	1.01 (d)
	CW	2.9 (a)	661 (a)	19.2 (a)	95.9 (a)	0.42 (a)
	BK	4.5 (c)	658 (a)	18.9 (b)	95.5 (b)	0.60 (c)
	PC	3.1 (a)	661 (a)	18.9 (b)	95.7 (b)	0.48 (b)
	LP	3.4 (a)	662 (a)	18.5 (d)	96.4 (a)	0.98 (d)

^a RF: rapeseed flour, CW: coffee waste, BK: bark, PC: pine cone and LP: lignin powder.

* Fuel characteristics having the same letter in each Larch or Tulip tree column do not differ significantly at $p = 0.05$ (Student t-test).

향을 보면, CW를 사용한 펠릿의 발열량이 가장 높았는데(Table 3), 이는 3.1절에서 언급한 바와 같이 CW에 함유된 22.7%의 지방/오일 그리고 매우 낮은 함수율(2.5%)에서 기인한 것으로 추정된다. 다음으로 BK와 PC와 함께 제조한 펠릿의 발열량이 높았는데, 이는 두 바인더의 높은 리그닌 함량과 관계가 있는 것으로 판단된다(오 등, 2010). 한편 RF 및 LP와 함께 제조한 펠릿의 발열량이 가장 낮았는데, 이는 RF의 높은 함수율 및 회분량에서 그리고 LP는 대부분 리그닌으로 구성되어 있어 높은 발열량을 보일 것으로 예상했으나 연소 과정에서 리그닌 간의 결합에 따른 불완전 연소로 낮은 발열량을 나타낸 것으로 생각한다.

다음으로 RF, CW, LP와 함께 제조한 펠릿의 내구성은 BK 및 PC를 바인더로 사용한 펠릿보다 높았는데(Table 3), 이는 RF, CW 또는 LP를 구성하고 있는 단백질, 리그닌과 같은 성분들이 목분 간의 결합력 향상을 위한 접착제로서 역할을 수행한 결과라 생각한다(Kaliyan과 Morey, 2009). 반면 BK와 PC도 많은 양의 리그닌 성분을 함유하고 있음에도 불

구하고 RF, CW, LP보다 내구성 향상에 미치는 영향이 적었는데, 이는 BK 및 PC에 함유된 리그닌 성분인 탄닌의 낮은 반응성에서 기인한 것으로 생각한다. 즉, 탄닌 성분이 목분 간의 접착제로서 역할을 수행하기 위하여 높은 온도의 적용이 필요하나, 본 연구에 적용된 펠릿 성형 온도 및 시간이 충분치 않아 활성화되지 않음으로서 접착력 향상에 크게 기여하지 않았던 것으로 생각한다(Pizzi와 Scharletter, 1978, Yaman 등, 2001).

마지막으로 펠릿 내의 회분량에 대한 바인더의 영향을 보면 CW와 함께 제조한 펠릿에서 가장 낮았으며, PC, BK, RF 그리고 LP 순으로 조사되었다(Table 3). 이와 같은 결과는 바인더의 자체의 회분량에서 기인한 결과이며, LP를 바인더로 사용한 펠릿의 높은 회분량은 3.1절에서 언급한 바와 같이 리그닌의 불완전 연소에서 기인한 것으로 생각한다. 그러나 리그닌의 불완전 연소에 대한 추론을 확인하기 위하여 액상의 리그닌(필프페액) 또는 탈리그닌 화시킨 톱밥을 펠릿 제조에 적용하는 등과 같은 추가적인 연구 수행이 필요할 것으로 판단된다.

바인더의 종류에 따른 펠릿 품질에 대한 결과를 종합하면, 바인더로써 CW의 사용은 내구성을 제외한 모든 품질 검사 항목에서 우수한 결과를 얻었으며, 특히 발열량 측면에서 높은 값을 나타내어 펠릿 제조시 바인더로 첨가하기에 가장 적합할 것으로 판단된다.

3.2.3. 바인더별 첨가량의 영향

각 바인더별로 첨가량이 펠릿 품질에 미치는 영향을 확인한 결과는 다음과 같다. 먼저 제조된 펠릿의 함수율은 사용된 바인더의 함수율에 따라 증가하거나 감소하였다. 예를 들면, 2.5% 함수율의 CW를 바인더로 사용하여 제조한 LAR 펠릿의 함수율은 첨가량의 증가와 함께 감소하였으며, 12.8% 함수율의 PC와 9.2% 함수율의 RF로 제조한 LAR 및 TUT 펠릿의 함수율은 증가하였다. 한편, 본 연구에서 제조된 모든 펠릿의 함수율은 2.9~6.0%로 바인더의 종류와 상관없이 국립산림과학원의 목재 펠릿 품질 규격 1등급 기준($\leq 10.0\%$)을 만족하는 것으로 조사되었다.

겉보기밀도의 경우, 모든 바인더의 양이 증가할수록 LAR 및 TUT 펠릿에서 점차 증가하였다. 특히 RF와 LP와 같이 미세 분말의 바인더를 사용한 펠릿에서 겉보기밀도의 증가폭이 다른 바인더와 비교하여 큰 것으로 나타났다. LAR 및 TUT 펠릿의 겉보기밀도를 목재 펠릿 품질 기준과 비교하였을 때, 바인더의 종류와 상관없이 모두 1등급 기준($\geq 640 \text{ kg/m}^3$)을 상회하였다.

대부분의 LAR 및 TUT 펠릿의 발열량은 바인더별로 첨가량이 증가하였을 때 점진적으로 증가하였다. 그러나 CW를 바인더로 사용한 펠릿의 발열량은 다른 바인더로 제조한 펠릿의 발열량과 비교하여 첨가량이 증가함에 따라 크게 증가하였는데, 이는 3.1에서 언급한 바와 같이 CW에 함유된 지방/오일에서 비롯된 결과라 추정된다. 다음으로 LP와 제조한 TUT 펠릿의 발열량은 6 wt%의 첨가량까지 차이가 없었으나, 8 wt% 이상부터는 감소하였다. 이러한 결과는 LP의 불완전 연소에서 기인한 것으로 판단된다. 한편 가장 낮은 발열량의 LAR/RF 및 TUT/

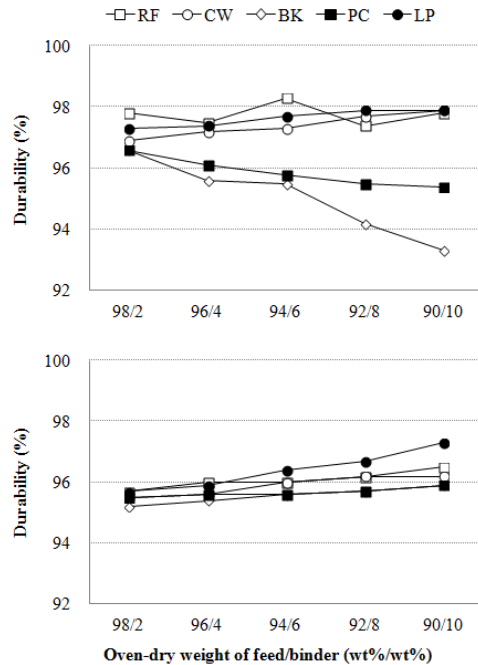


Fig. 1. Interaction effect of the type and adding amount of binder on the durability of larch/binder (top) and tulip tree/binder (bottom) pellets.

LP 펠릿조차도 국립산림과학원 1등급 기준 ($\geq 18.0 \text{ MJ/kg}$)을 만족하였다.

바인더를 사용하여 제조한 LAR 및 TUT 펠릿의 내구성 측정 결과는 Fig. 1과 같다. LAR/RF 펠릿의 내구성은 RF의 첨가량에 크게 영향을 받지 않았으며, 목재 펠릿 품질 기준과의 비교에서 전반적으로 1등급 기준($\geq 97.5\%$)을 만족하거나 차이를 보이지 않았다. LAR/CW 및 LAR/LP 펠릿의 내구성은 CW 및 LP 첨가량의 증가와 함께 점진적으로 증가하였으며, 2~4 wt% 첨가량에서는 3~4등급 기준($\geq 95.0\%$)을 그리고 6~10 wt% 첨가량에서는 1등급 기준을 만족하였다. 반면 LAR/BK의 내구성은 BK의 첨가량이 증가함에 따라 오히려 감소하였으며, 특히 8 wt% 이상의 BK를 바인더로 사용한 펠릿의 내구성은 3~4등급 기준도 충족시키지 못하였다. 따라서 LAR에 BK를 바인더로 사용할 경우 목표등급

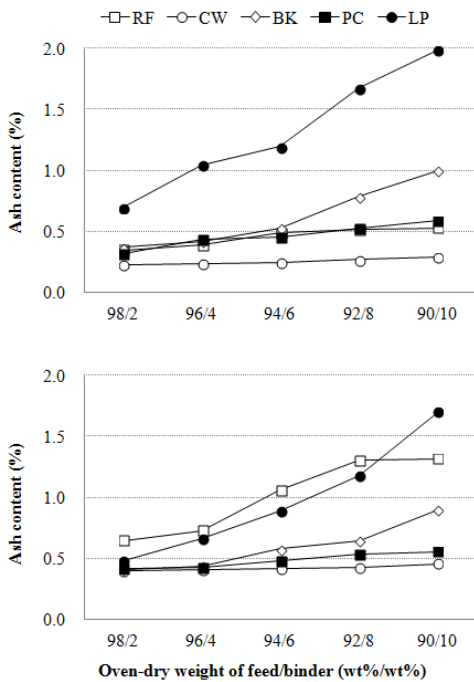


Fig. 2. Interaction effect of the type and adding amount of binder on the ash content of larch/binder (top) and tulip tree/binder (bottom) pellets.

에 맞게 첨가량을 조절해야 할 것으로 생각한다. 또한 LAR/PC 펠릿의 내구성도 모두 3~4등급 기준을 만족하였으나 PC 첨가량의 증가와 함께 감소하였는데, 이는 PC의 높은 함수율로 인하여 펠릿 내부로 열의 전달이 지연되고 결과적으로 PC 내의 바인더적 성질을 가지고 있는 탄닌 성분이 가소화되지 않아 내구성이 감소한 것으로 추정된다. TUT 펠릿의 내구성은 바인더 첨가량이 증가함에 따라 모두 향상되었으나(Fig. 1), 모든 바인더의 첨가 조건에서도 1~2등급 기준을 만족하지 못하였다. 따라서 1~2등급의 내구성을 가진 TUT 펠릿을 제조하기 위하여 다른 바인더를 사용하거나 본 연구에서 사용된 바인더의 첨가량을 늘리는 연구가 추후 수행되어야 할 것으로 생각한다.

Fig. 2는 LAR 및 TUT 펠릿에서 바인더별 첨가량에 따른 회분량을 나타낸 것으로, 바인더 자체의 회

분량과 비례하여 LAR과 TUT 펠릿의 회분량도 증가하였다. 한편 그 결과를 목재 펠릿 기준과 비교하면, LAR/RF, LAR/CW, LAR/PC, TUT/CW, TUT/PC 펠릿의 회분량은 첨가량과 상관없이 1등급 기준 ($\leq 0.70\%$)을 만족하였다. 그러나 8 wt% 이상의 BK와 2 wt% 이상의 LP로 제조한 LAR 펠릿 그리고 2 wt% 이상의 RF로 제조한 TUT 펠릿의 회분량은 1등급 기준을 초과하였으며, 2~3등급을 만족하는 것으로 조사되었다. 특히 LP를 바인더로 사용하여 제조한 펠릿의 높은 회분량은 상기에서 언급한 바와 같이 리그닌의 불완전 연소에서 기인한 것으로 생각한다.

각 바인더별 첨가량에 대한 펠릿의 품질측정 결과를 종합하면, CW는 내구성을 제외한 모든 품질 항목에서 첨가량에 상관없이 1등급 기준을 만족하였으며, 특히 발열량에서 높은 값을 나타내어 LAR을 포함하여 TUT와 같이 발열량이 낮은 원료의 펠릿 제조용 바인더로 사용하기에 적합할 것으로 판단된다. 또한 내구성도 펠릿 제조시 CW의 첨가량을 적절히 조절한다면 1등급 기준을 상회할 것으로 예상되며, 식품폐기물로 국내에서 CW의 원료 확보가 용이할 것으로 판단되어 현재 상황에서 CW를 이용한 파일럿 규모의 펠릿 생산 및 품질 조사가 필요한 상황이다. 이 결과를 토대로 목재 펠릿 제조시 바인더로써 CW의 적용 및 이 펠릿의 상용화 가능성을 확인할 수 있을 것으로 생각한다.

3.3. 펠릿 표면의 현미경 관찰

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 5종류의 바인더를 첨가하여 제조한 LAR 및 TUT 펠릿의 광학현미경 사진을 보여주고 있다. 또한 현재 산림조합(경기, 여주)에서 생산되고 있는 한나모 펠릿의 광학현미경 사진도 Fig. 3에 포함시켰다. 광학 현미경 관찰을 통하여 확인한 펠릿의 특징 및 차이점은 다음과 같다.

첫 번째로 LP를 제외하고 펠릿 제조에 사용된 바인더 종류에 따른 차이를 육안으로 명확하게 확인할 수 없었는데, 이는 유사한 크기의 바인더를 사용하였고 성형과정에서 높은 열에 의해 바인더가 용해되어 나타난 결과라 생각한다. 한편 LP의 경우 다른 4

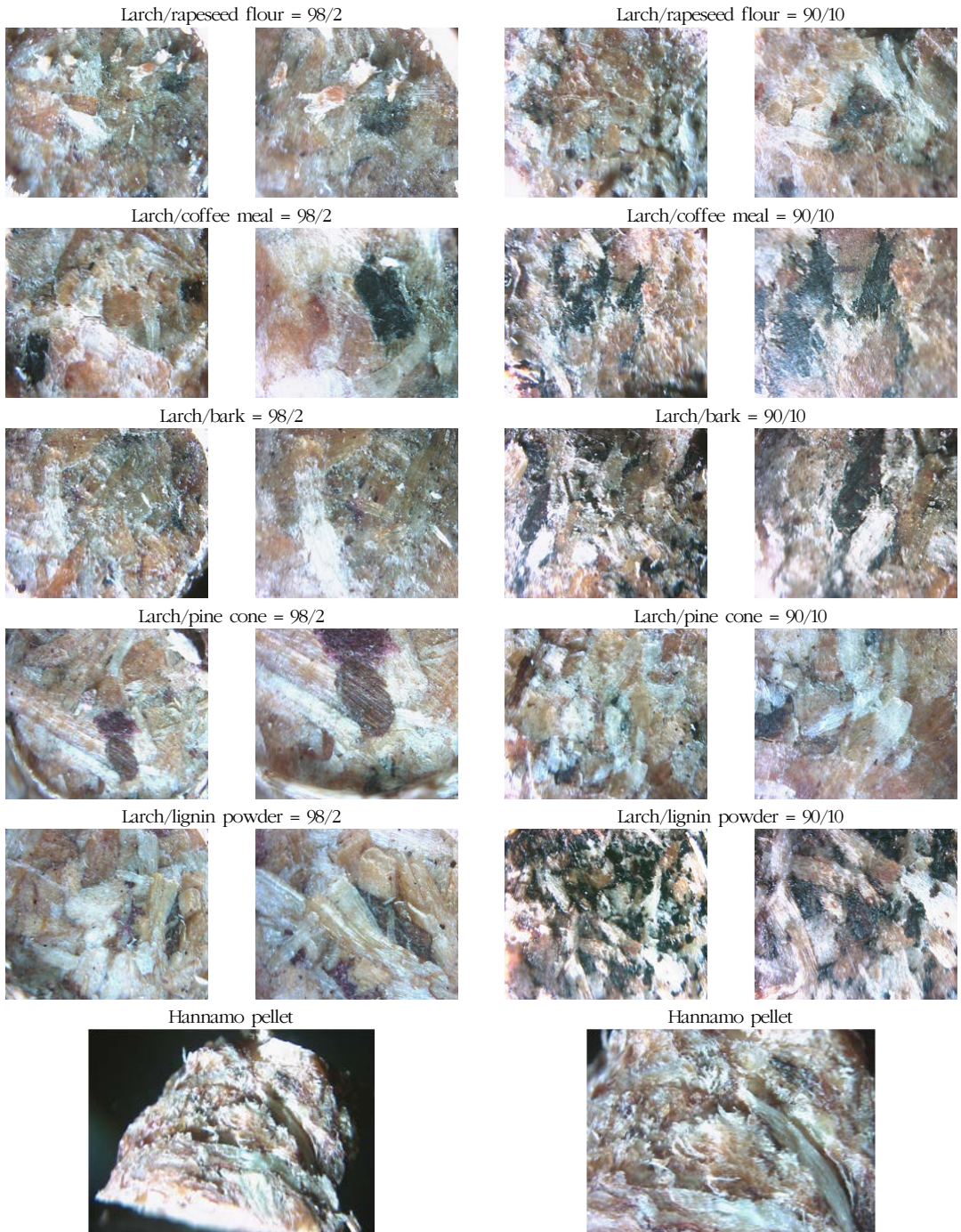


Fig. 3. Light microscopic images of the surface, which was pressured by piston, of larch pellet and commercial larch wood pellet (magnification at 10X and 20X).

바인더의 첨가가 목재 펠릿의 연료적 특성에 미치는 영향

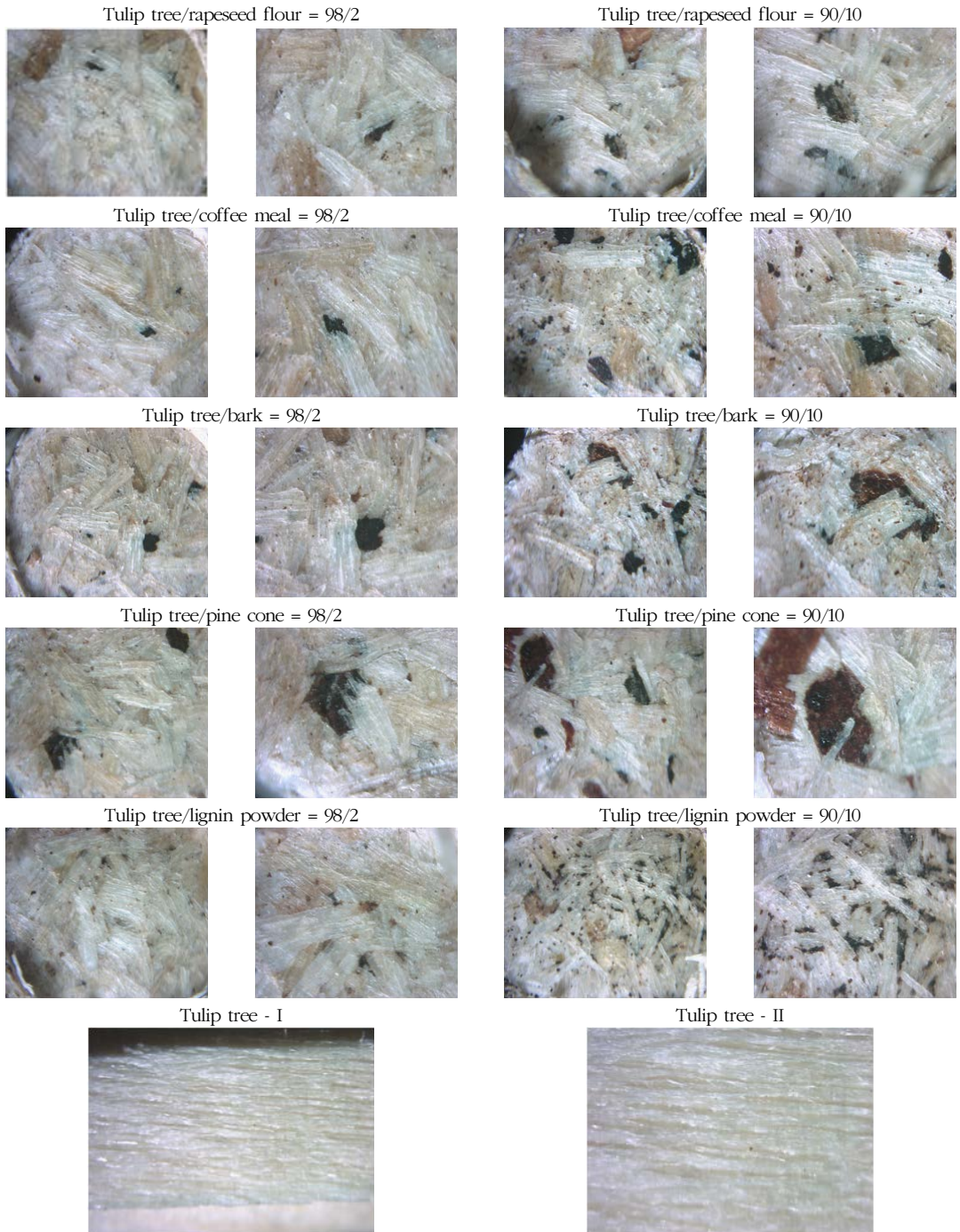


Fig. 4. Light microscopic images of the surface, which was pressured by piston, of tulip tree pellet and particles (magnification at 10X and 20X). cross-sections.

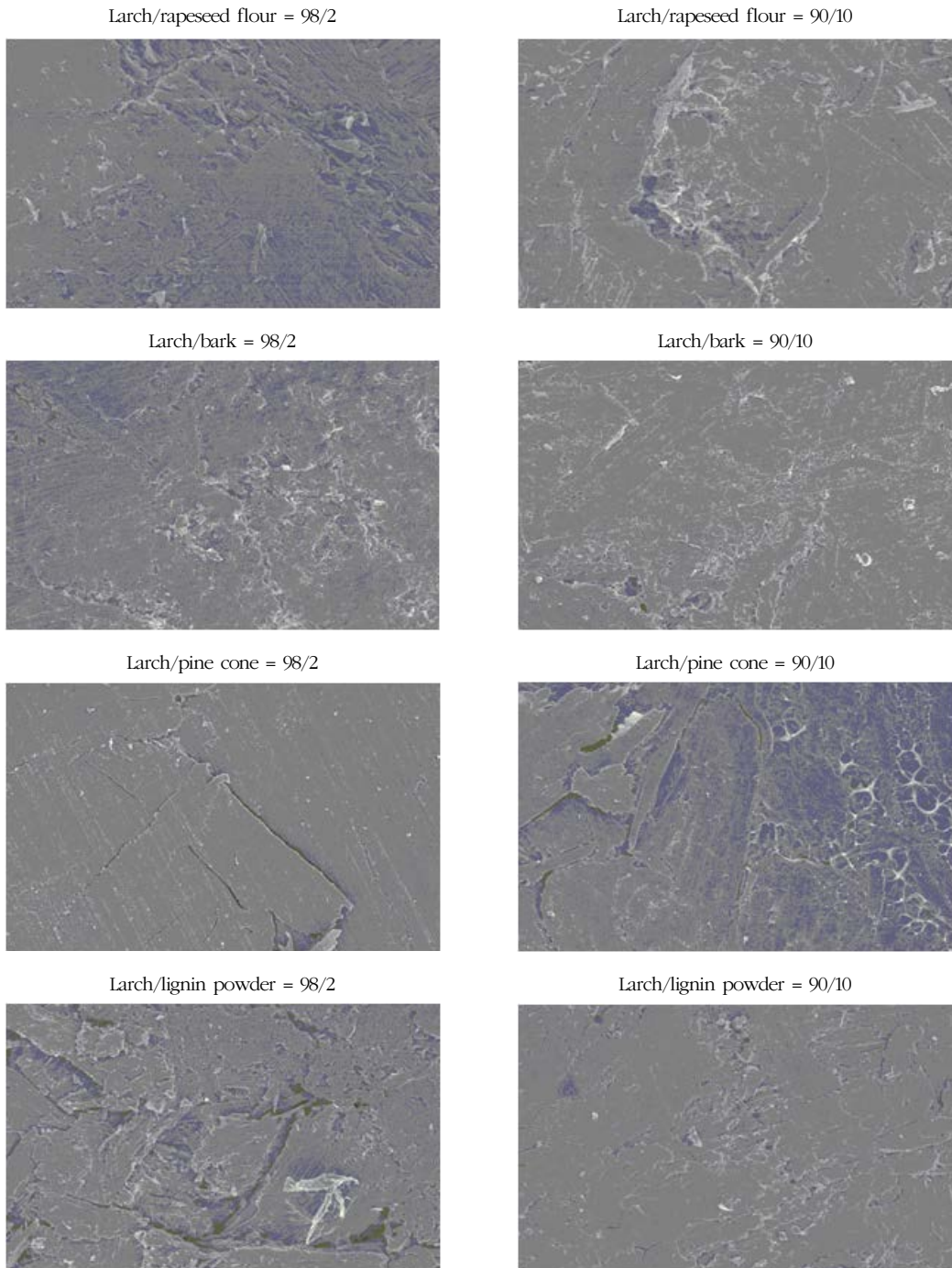


Fig. 5. Scanning electron microscopic images of the surface, which was pressured by piston, of the pellets fabricated with larch and binders (magnification at 100X).

바인더의 첨가가 목재 펠릿의 연료적 특성에 미치는 영향

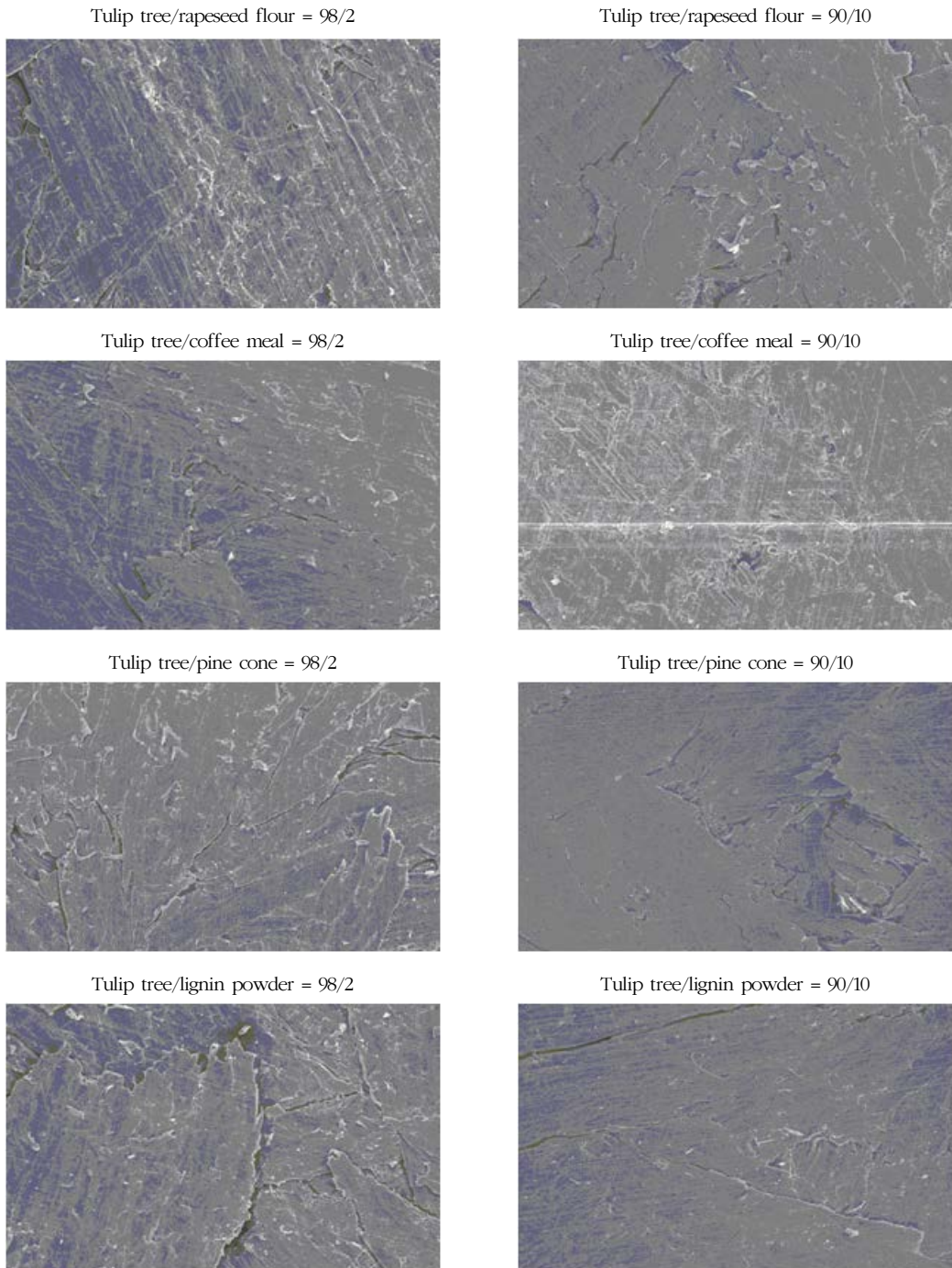


Fig. 6. Scanning electron microscopic images of the surface, which was pressured by piston, of the pellets fabricated with tulip tree and binders (magnification at 100X).

종류의 바인더보다 미세한 분말을 펠릿 제조 시에 사용했기 때문에 용이하게 펠릿 표면에서 확인할 수 있었다. 두 번째는 사용된 바인더의 양에 따른 펠릿 내의 분포 정도의 차이로써 2 wt%의 바인더를 사용한 펠릿보다 10 wt%의 바인더를 첨가하여 조제한 펠릿에서 바인더의 존재를 쉽게 확인할 수 있었으며, 특히 10 wt%의 LP를 첨가하여 제조한 펠릿에서는 LP가 광범위하게 분포하고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 세 번째 특징은 바인더 첨가량에 따라 펠릿 표면의 광택 면적이 차이가 있었다는 것이다. 즉 바인더의 양이 증가함에 따라 펠릿 표면에 광택 면적이 증가하는 경향을 보였는데, 이러한 현상은 펠릿의 제조 과정에서 바인더에 의한 열전도도의 차이에서 기인한 것으로 추측된다. 예를 들면, 본 연구에서 사용된 바인더의 경우 목재보다 크기가 작아 펠릿 내에서 목분 간의 비어 있는 공간을 채워주어 열전달 속도가 증가된 것이 광택 면적을 증가시키는데 어떠한 역할을 했을 것으로 추정된다. 한편 산림조합에서 현재 생산하고 있는 시판용 펠릿의 경우 본 연구에서 제조된 펠릿과 비교하여 전체적으로 광택 면적이 넓었는데 이는 높은 온도와 압력을 사용하여 제조하는 과정에서 기인한 것으로 판단된다(Fig. 3). 상기의 추론을 확인하기 위하여 향후 연구에서 각 바인더, LAR, TUT에 대한 열전도도의 차이 그리고 제조된 펠릿의 겉보기밀도와의 관계를 확인하는 실험을 추가적으로 수행할 예정이다.

전계방출 전자현미경(FE-SEM)을 이용하여 관찰한 LAR 및 TUT 펠릿의 표면은 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. FE-SEM 관찰을 통하여 바인더의 종류에 따른 펠릿 표면의 차이를 확인할 수는 없었으나, 첨가되는 바인더 양에 의하여 펠릿 표면의 평활 정도에 차이가 있는 것은 판단된다. 예를 들면, 2 wt%의 바인더를 첨가하여 조제한 펠릿의 경우 표면의 평활 정도가 10 wt%의 바인더를 사용한 펠릿과 비교하여 떨어졌으며, 심지어 2 wt%의 바인더를 첨가한 일부 펠릿 시편에서는 목재 간 결합이 되지 않은 부분까지 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 바인더에 의해 열전도도에 차이가 발생함으로써 목재 성분의 가소화 정도에도 영향을 끼친 결과에서 기인한 것으로 생각되며, 이와 같은 추론을 확인하기

위하여 향후 SEM-EDX를 이용하여 펠릿 내의 열전도에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각한다.

4. 결 론

본 연구는 LAR 및 TUT 톱밥으로 제조한 펠릿의 품질에 바인더의 종류 및 양이 미치는 영향을 조사하기 위하여 수행하였다. 먼저 바인더로 식품부산물인 RF와 CW 그리고 임산부산물인 BK, PC, LP를 사용하였다. 대부분의 바인더는 목재 펠릿의 첨가제로 사용이 가능한 범위의 함수율, 발열량, 회분함량을 보유하고 있으며, 특히 CW의 경우 가장 낮은 함수율과 회분량 그리고 가장 높은 발열량을 보였다. 바인더와 함께 제조한 대부분의 펠릿은 국립산림과학원에서 고시한 목재펠릿 품질 규격 1등급 기준을 상회하였으며, 일부 바인더에서 첨가량이 많은 경우에만 높은 회분함량으로 2~3등급 기준을 만족하는 것으로 조사되었다. 바인더에 대한 회분의 정성 분석에서도 BK의 높은 구리 함량을 제외하고 모든 바인더의 금속 및 중금속 함량은 유럽의 목재 펠릿 기준을 만족하는 것으로 조사되었다. 바인더 종류 및 첨가량에 따른 펠릿의 내구성은 RF, CW 그리고 LP를 첨가하여 제조한 펠릿이 우수하였으며, TUT 펠릿은 바인더 첨가량의 증가와 함께 내구성도 향상되었다. 한편 LAR 펠릿의 경우 바인더 첨가량의 증가에 따른 내구성 향상 효과는 크지 않았으며, BK와 PC를 바인더로 사용한 펠릿에서 첨가량의 증가가 내구성에 부정적인 영향을 미쳤다. 제조된 펠릿의 광학/전자현미경 관찰을 통하여 바인더의 종류에 따른 차이를 명확하게 확인할 수 없었으나, 첨가량에 따른 차이는 명확하게 관찰할 수 있었다. 상기 결과를 종합하면, 바인더의 첨가는 목재펠릿의 품질 향상에 대부분의 항목에서 기여하였으며, 특히 CW를 바인더로 사용한 펠릿은 모든 품질에서 뚜렷한 향상을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 펠릿의 주원료인 목재와 첨가제인 바인더의 경제성 분석을 통하여 바인더의 종류 및 그에 대한 최적 첨가량이 조사된다면 목재펠릿의 품질 향상, 생산 가격 저하, 그리고 펠릿의 보급을 넓히는 방안이 될 것으로 생각한다.

사 사

바인더의 화학적 성분 분석에 도움을 준 서울대학교 산림과학부 환경재료과학전공 목재화학실의 정한섭 대학원생과 바인더에 함유된 회분의 정성분석과 제조된 펠릿의 전자현미경 관찰에 도움을 준 대구대학교 중앙기기의원의 임순옥박사님 및 조경제박사님께 감사드립니다. 마지막으로 본 과제의 일부는 국립산림과학원 연구과제(FP0900-2010-01) 및 지식경제부 에너지자원 인력양성 사업 "바이오에너지핵심기술연구센터"의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Li, Y. and H. Liu. 2000. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy* 19: 177~86.
- Lehtikangas, P. 2001. Quality properties of pelleted sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy* 20: 351~360.
- 권성민, 조재현, 이성재, 권구중, 황병호, 이귀현, 한규성, 차두송, 김남훈. 2007. 산불피해 소나무재의 목질펠릿으로의 이용가능성 평가. *목재공학* 35(4): 14~20.
- 권구중, 권성민, 차두송, 김남훈. 2010. 목타르와 톱밥을 혼합하여 제조한 펠릿의 특성. *목재공학* 38(1): 36~42.
- Kaliyan, N. and R. B. Morey. 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy* 33: 337~359.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 한규성, 최돈하. 2002. 포플러로부터 고밀화연료의 제조. *임산에너지* 21(3): 59~65.
- 한규성, 여진기. 2003. 고밀화에 의한 현사시 톱밥의 고형 연료화. *임산에너지* 22(2): 54~59.
- 류재윤, 강찬영, 이웅수, 서준원, 이현종, 박현. 2010. 국내산 낙엽송의 톱밥 유형에 따른 펠릿특성에 관한 연구. *목재공학* 38(1): 49~55.
- 이수민, 최돈하, 조성택, 남태현, 한규성, 양인. 2011. 낙엽송 및 백합나무 톱밥으로 제조한 펠릿의 내구성에 미치는 영향인자. *목재공학* 39(3): 258~268.
- Kim, H., G. Lu, T. Li, and M. Sadakata. 2002. Binding and desulfurization characteristics of pulp black liquor in biocoal briquettes. *Environment Science and Technology*. 36: 1607~1612.
- Briggs, J. L., D. E. Maier, B. A. Watkins, and K. C. Behnke. 1999. Effects of ingredients and processing parameters on pellet quality. *Poultry Science* 78: 1464~1471.
- 양인, 정재훈, 전명진, 한규성, 안세희, 최인규, 김용현, 오세창. 2010. 바이오디젤 생산 부산물인 유채박을 이용한 친환경접착제의 개발. *한국폐기물자원순환학회지* 27(3): 234~242.
- Sluiter, A., B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton, and D. Crocker. 2008. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Technical report of National Renewable Energy Laboratory 510-42618, Golden, Colorado, USA.
- 국립산림과학원. 2009. 목재펠릿 품질 규격. 국립산림과학원 고시 제 2009-2호.
- 오진열, 박영주, 이시영, 이해평. 2010. 소나무 슬방울의 수종별 연소특성에 관한 연구. *한국화재소방학회 2010년도 춘계학술논문발표회 논문집*: 429~432.
- Pizzi, A. and H.O. Scharfetter. 1978. The chemistry and development of tannin-based adhesives for exterior plywood. *J. App. Polym. Sci.* 22(6): 1745~1761.
- Yaman, S., M. Sahan, H. Haykiri-Acma, K. Sesen, and S. Kucukayrak. 2001. Fuel briquettes from biomass-lignite blends. *Fuel Proc. Tech.* 72: 1~8.