

## 고밀화에 의한 현사시 톱밥의 고형연료화<sup>1</sup>

한규성<sup>2</sup> · 여진기<sup>3</sup>

### High-pressure Compaction of Sawdust of Hyunsasi-poplar (*Populus alba* × *P. glandulosa*) for Densified Fuel<sup>1</sup>

Gyu-Seong Han<sup>2</sup> and Jin Kie Yeo<sup>3</sup>

#### 요 약

최근 들어 북미와 유럽에서는 고밀화한 목질펠릿연료가 재생가능하며 카본뉴트럴한 바이오매스 에너지로서 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 현사시 톱밥의 고밀화를 통한 고형연료화에 관하여 연구하였다. 현사시 품종의 연료적 가치를 평가하기 위하여 열량 및 원소 분석을 수행하였다. 고밀화를 위하여 열압공정을 채택하였으며, 압밀화는 100~180℃, 250~1000 kgf/cm<sup>2</sup>, 2.5~10분의 조건으로 행하였다. 고밀화연료의 특성은 밀도와 미세분 발생량으로 평가하였다. 목표치로서 고밀화연료의 전건밀도는 1.2 g/cm<sup>3</sup> 이상, 5분간 진탕 후의 미세분 발생량은 0.5% 이하로 설정하였다. 목표 밀도와 목표미세분을 만족하기 위해서는 160℃ 이상의 압체온도가 요구되었다. 이 때의 압체 압력은 750 kgf/cm<sup>2</sup> 이상이 효과적이었다. 180℃에서 1000 kgf/cm<sup>2</sup>으로 5분 이상의 압체가 고밀화연료 제조에 가장 적절한 조건으로 밝혀졌다.

#### ABSTRACT

Recently, densified pellet fuel from wood biomass is widely used at North America and Europe as a regenerable and clean carbon neutral bioenergy. High-pressure compaction of sawdust of Hyunsasi-poplar (*Populus alba* × *P. glandulosa*) to form a densified fuel was studied. Calorific and elemental analysis were carried out to assess Hyunsasi-poplar clones as fuels. Hot-press process was adopted for compaction of sawdust and compaction was performed under temperature from 100 to 180℃, at pressure of 250 to 1000 kgf/cm<sup>2</sup>, and for 2.5 to 10 minutes. Densified fuels were evaluated by its oven-dry density and fines after 5-minute

1. 접수 2003년 6월 24일 Received on June 24th, 2003.

본 연구는 임업연구원 일반과제(임산자원을 이용한 Bioenergy화 연구)로 수행되었음.

2. 충북대학교 산림과학부 School of Forest Resources, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

3. 임업연구원 산림유전자원부 Korea Forest Research Institute, Seoul 130-012, Korea

shaking test. The target density and fines of densified fuels were over 1.2 g/cm<sup>3</sup> and below 0.5%, respectively. When the press-temperature is over 160°C, densified fuels with density over 1.2 g/cm<sup>3</sup> and with fines below 0.5% can be produced. And the pressure over 750 kgf/cm<sup>2</sup> was effective for this production. It was found that the optimum press condition for preparation of densified fuel was 180°C-1000 kgf/cm<sup>2</sup>-5 minutes.

**Keywords :** densified pellet fuel, biomass, bioenergy, Hyunsasi-poplar.

## 서 론

최근 들어 석유 등 화석 자원의 소비에 따른 지구 환경오염 등으로 이를 대체할 수 있는 대체에너지의 하나로써 바이오매스가 주목 받고 있다. 바이오매스로부터의 에너지는 “재생가능” 그리고 “카본뉴트럴”이라 하는 두 가지의 큰 특징을 가짐으로써, 이산화탄소 배출 억제와 관계된 지구온난화 방지, 순환형 사회의 구축에 기여함과 동시에 지역에너지로서 지역산업 활성화와 고용 창출 등에도 공헌한다.

고형연료로서의 바이오매스의 이용은 목재의 이용이 가장 일반적인 형태로서 아직도 세계 각지에서 널리 이용되고 있다. 상품화 된 고형연료로는 칩의 형태로의 이용이 일반적이지만, 최근에는 이용편의성 등의 이점 때문에 고밀화 한 펠릿의 이용이 점차 늘고 있다. 오일쇼크가 있었던 1970년대 이후 이들 고밀화 연료가 개발되기 시작한 후 현재 북미와 유럽을 중심으로 가정용 및 산업용으로의 이용량이 꾸준히 증가하고 있으며, 일본에서도 1980년대 초 이후 재차 펠릿연료에 대한 관심이 높아지고 있다. 이들 고밀화연료는 저비용의 청정한 환경친화형 연료라는 장점으로 인해 북미와 스웨덴 외에도 중국, 일본, 러시아, 뉴질랜드, 호주<sup>2)</sup> 등지에서 관심이 집중되고 있으며, 고밀화연료를 이용하여 산업용 또는 가정용의 열 생산 외에도 최근에는 열병합발전

이르기까지 그 규모가 점차 확대되고 있다.

그러나 이러한 고밀화연료에 대한 연구보고는 많지 않은 실정이다. Lehtikangas<sup>3, 4)</sup>는 펠릿연료와 원료의 저장에 따른 함수율, 밀도, 미세분 등의 변화에 대하여 조사 보고하였으며, 종류가 다른 원료로 제조된 펠릿연료의 연료적 특성에 대하여 보고하였다. 또한 Li 등<sup>5,7)</sup>은 고지, 목재 폐재, 도시고형쓰레기로부터 고밀화연료를 제조하기 위한 적정 제조 조건을 구명하였으며, 제조된 고밀화연료의 연료적 특성에 대해서도 보고하였다. 한편 국내에서는 한 등<sup>8)</sup>이 포플러(현사시와 수원포플러) 톱밥을 전분접착제를 이용하여 고밀화연료를 제조하고 연료 특성에 대하여 보고하였다.

이에 따라 본 연구는 전보<sup>8)</sup>에 이어 국내의 대표적 속성수인 현사시 톱밥을 접착제를 사용하지 않고 고밀화하여 고형연료를 제조하는데 초점을 맞춰, 그 제조 가능성을 알아보고자 실시하였다. 현사시의 열량 및 원소분석을 통해 연료적 가치를 알아보았으며, 고압을 적용하여 현사시의 톱밥으로부터 고밀화연료를 제조하여 그 특성을 시판의 외국산 펠릿연료와 비교 분석하였다.

## 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

경기도 용인군 기흥읍 고매리에 소재하는 임업연구원 포플러 시험림에서 채취한 현사시

(은수원사시 *Populus alba* × *P. glandulosa*)로부터 톱밥을 제조하여 고밀화연료 제조에 사용하였다. 열량 및 원소 분석은 현사시 3클론(현사시 3호, 72-30, 72-31)을 대상으로 하였으며, 고밀화연료의 제조에는 현사시 3호를 사용하였다.

외국산 펠릿은 아래와 같은 시료를 직접 외국으로부터 수집하여 비교분석에 이용하였다.

- 미국산 목질 펠릿 : MTI사제품  
(침엽수, 수종 불명)
- 일본산 목질 펠릿 : Suzaki연료 제품  
(일본산 삼나무)
- 일본산 수피 펠릿 : Tsutsui연료 제품  
(침엽수 혼합수종)

## 2.2 열량분석

전건시료 1g을 열량계(Parr Instrument Co.의 1341 Oxygen Bomb Calorimeter)에 넣고 산소를 충전하고 점화하여 연소전후의 온도 변화로부터 전건열량(HHV, higher heating value)을 계산하였으며, 동일 시료에 대하여 3회 반복 실험하였다.

## 2.3 원소 분석

전건시료 1.5 mg을 원소분석기(CE Instruments의 EA1110)를 이용하여 C, H, N, O원소를 정량하였다. O 함량은 100%에서 C, H, N 함량을 제하여 구하였으며, 같은 시료에 대해 3번 측정하여 그 평균으로 나타냈다.

## 2.4 고밀화연료 제조

기건상태의 현사시 3호 톱밥 30 g을 40 mm × 40 mm 틀에 넣어 냉압하여 부피를 줄인 후, 열압기를 사용하여 100℃, 120℃, 140℃, 160℃, 180℃의 온도와 250 kgf/cm<sup>2</sup>, 500 kgf/cm<sup>2</sup>, 750 kgf/cm<sup>2</sup>, 1000 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로, 2.5분, 5분, 7.5분, 10분간 열압하여 고밀화시료를 제조하였다.

## 2.5 고밀화연료의 특성 분석

제조된 고밀화연료로부터 40 mm × 40 mm × 7 mm(두께)의 크기로 제작된 시험편으로부터, 7 mm × 7 mm × 25mm 크기의 시험편을 잘라내고 전건하여 밀도를 구하였다. 고밀화연료의 저장 및 수송 특성을 파악할 목적으로 미세분 발생량을 측정하였다. 7 mm × 7 mm × 25 mm 크기의 시료 10개를 8메쉬 표준망체에 넣고 진탕기를 이용하여 30분 동안 미세분을 발생시켰다. 5분 간격으로 미세분의 발생량을 측정하여, 전체 투입량에 대한 백분율로 나타냈다.

## 결과 및 고찰

### 3.1 현사시 품종의 원소 조성 및 열량

선발 육종된 현사시 품종의 원소 조성 및 열량을 분석한 결과 표 1의 결과를 얻었으며, 전건시료의 열량은 20.18~21.22 MJ/kg으로 수종간의 차이가 인정되지 않았으며, 일반적인 목재의 열량 범위에 포함되는 수준이었다. 또

Table 1. Elemental composition and higher heating value of Hyunsasi-poplar.

Clones		Elemental analysis				HHV** (MJ/kg)	Predicted HHV
		C(%)	H(%)	N(%)	O*(%)		
Hyunsasi-poplar ( <i>P. alba</i> × <i>P. glandulosa</i> )	3	48.86	6.54	0.73	43.87	20.18	20.23
	72-30	47.57	6.33	0.40	45.70	20.83	19.61
	72-31	47.87	6.57	0.55	45.04	21.22	19.77

\* Calculated by difference.

\*\* Higher heating value.

한 원소조성 역시 품종간 차이가 크지 않았다.

Francis와 Lloyd<sup>1)</sup>는 전건시료의 열량을 원소 조성에 따라 다음의 식으로 나타냈다:

$$HHV(kJ/kg) = 357.8C + 1135.6H + 54.9N + 119.5S - 85.4O - 974$$

이 식에서 C, H, N, S, O는 전건의 원소중량 비로서 원소분석의 결과로부터 얻는다. 이러한 Francis와 Lloyd의 식으로 전건열량을 예측한 결과, 표 1에서 보는 바와 같이 실제로 측정하여 얻어진 값과 거의 비슷하였다.

### 3.2 외국산 펠릿의 물성

비교의 대상으로 삼고자 미국과 일본에서 생산된 펠릿(그림 1)을 입수하여 그 물성을 조사한 바, 전건밀도는 1.27 g/cm<sup>3</sup>로 모두 같았으며, 5분간 진탕 후의 미세분 발생량(8메쉬 통

과분)은 모두 0.5% 미만이었다. 진탕 시간이 증가할수록 미세분은 증가하여, 수피펠릿은 15분이 경과하면서 1%를 넘었다. 일본산 목질펠릿은 30분이 경과하여도 0.5% 이하의 좋은 결과를 나타냈다(표 2와 그림 2 참조). 이들 결과에 따라서, 이하의 고밀화연료의 기준으로서 전건밀도는 1.2 g/cm<sup>3</sup> 이상으로 설정하였고, 5분간 진탕 후의 미세분 발생량은 0.5% 이하로 설정하였다.

### 3.3 고압을 적용하여 제조한 고밀화연료의 특성

표 3에 실험적으로 성형된 고밀화연료의 전건밀도를 나타냈으며, 그림 3은 고밀화연료의 모습이다. 그림 4에는 고밀화연료의 5분간 진탕 후의 미세분 발생량을 나타냈다.

제조 온도의 상승에 따라 고밀화연료의 전

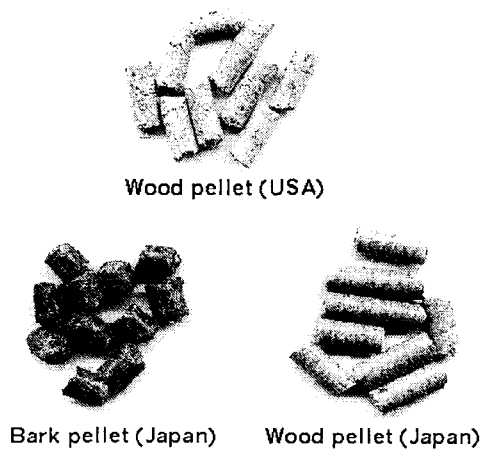


Fig. 1. Foreign biomass pellets.

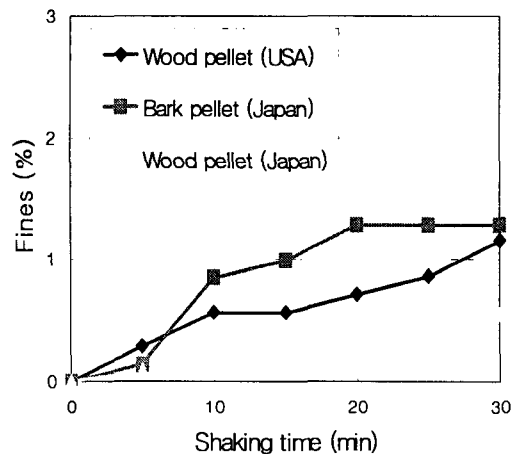


Fig. 2. Fines of foreign biomass pellets by shaking test.

Table 2. Properties of foreign biomass pellets.

Pellet	Oven-dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Fines* (%)
Wood pellet(MTI, USA)	1.27	0.29
Wood pellet(Suzaki, Japan)	1.27	0.09
Bark pellet(Tsutsui, Japan)	1.27	0.14

\* Fines after 5-minute shaking test.

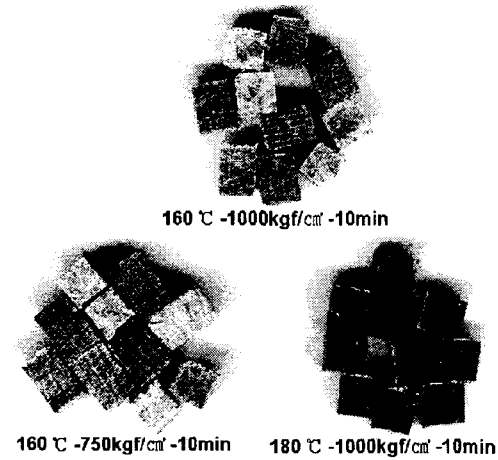


Fig. 3. Densified fuels from Hyunsasi-p opl ar 3.

건밀도는 현저하게 증가하였으며, 압력과 시간의 증가에 의해서도 밀도가 증가하였으나 온도에 따른 변화만큼 현저하지는 않았다. 한편, 미세분 발생량에 있어서는 온도와 시간의 영향이 매우 컸으며, 압력의 영향은 비교적 적은 편이었다. 압력과 시간을 조절하면 140°C 이상의 조건에서 목표치인 전건밀도 1.2 g/cm<sup>3</sup> 이상의 고밀화연료를 얻을 수 있었다.

5분간 진탕 후의 미세분 발생량은 140°C 이하의 조건에서는 매우 높은 값을 나타냈으나, 160°C 이상의 제조 조건에서는 발생량이 현저하게 줄어들기 시작하여 압체시간을 7.5분 이상으로 길게 하면 본 연구에서 목표치로 규정한 0.5% 이하의 값을 나타냈다.

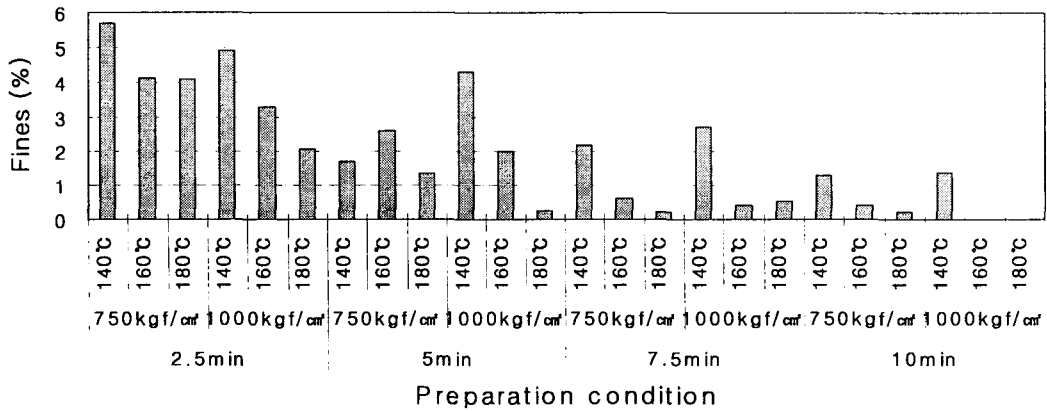


Fig. 4. Fines of densified fuels by 5-minute shaking test.

Table 3. Oven-dry density(g/cm<sup>3</sup>) of densified fuel from Hyunsasi-poplar 3.

Press temperature (°C)	Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> ) and press time (min)							
	750kgf/cm <sup>2</sup>				1000kgf/cm <sup>2</sup>			
	2.5min	5min	7.5min	10min	2.5min	5min	7.5min	10min
100	0.89	0.92	0.87	0.96	0.9	0.84	0.99	0.98
120	1.04	1.05	1.09	1.10	1.00	1.15	1.20	1.15
140	1.07	1.16	1.17	1.19	1.13	1.18	1.21	1.21
160	1.09	1.15	1.18	1.22	1.11	1.17	1.21	1.23
180	1.10	1.20	1.22	1.24	1.16	1.22	1.24	1.22

한편, 본 실험에서는 250~500 kgf/cm<sup>2</sup>의 압체압력도 적용하여 실험을 수행하였으나, 밀도가 매우 적을 뿐만 아니라 고형화도 잘 이루어지지 않아 데이터 수집에서 제외하였다. 적어도 750 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 압체압력이 필수적인 것으로 여겨진다. 본 실험의 결과, 160℃ 이상의 온도 조건에서는 리그닌이 충분히 가소화 하여 고밀화가 가능한 것으로 밝혀졌으며, 특히 180℃에서 1000 kgf/cm<sup>2</sup>으로 5분 이상의 압체로 외국산 펠릿연료의 특성과 동등한 고밀화연료를 제조할 수 있음이 판명되었다.

### 인 용 문 헌

1. Francis, H. E. and W. G. Lloyd, 1983. J. Coal Quality 2(2):21 [Cordero, T., F. Marquez, J. Rodriguez-Mirasol and J. J. Rodriguez, 2001, Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis, Fuel 80:1567-1571].
2. Fung, P. Y. H., M. U. H. Kirschbaum, R. J. Raison and C. Stucley. 2002. The potential for bioenergy production from Australian forests, its contribution to national greenhouse targets and recent developments in conversion processes. Biomass and Bioenergy 22:223-236.
3. Lehtikangas P. 2000. Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy 19:287-293.
4. Lehtikangas P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy 20:351-360.
5. Li, Y. and H. Liu. 2000. High-pressure binderless compaction of waste paper to form useful fuel. Fuel Processing Technology 67:11-21.
6. Li, Y. and H. Liu. 2000. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass and Bioenergy 19:177-186.
7. Li. Y., H. Liu, O. Zhang. 2001. High-pressure compaction of municipal solid waste to form densified fuel. Fuel Processing Technology 74:81-91.
8. 한규성, 최돈하. 2002. 포플러로부터 고밀화 연료의 제조. 임산에너지 21(3):59-65.