

포플러로부터 고밀화연료의 제조¹

한규성² · 최돈하³

Densified Fuels from Poplars¹

Gyu Seong Han² and Don Ha Choi³

요 약

최근 들어, 북미와 유럽에서는 바이오매스로부터 제조한 고밀화연료가 재생가능하며 청정한 바이오에너지로서 널리 사용되고 있다. 고밀화연료를 얻기 위한 현사시(*Populus tomentiglandulosa*)와 수원포플러(*Populus davidiana*) 톱밥의 압밀화에 대하여 연구하였다. 이들 수종의 연료적 가치를 평가하기 위하여 열량 및 원소분석을 하였다. 고밀화를 위해 전분접착제를 첨가한 열압공정을 채택하였으며, 압밀화는 120-160℃에서 50kgf/cm²의 압력으로 소정시간(정확한 시간?) 시행하였다. 고밀화연료의 특성은 비중, 압축강도 및 미세분 발생량으로 평가하였다. 유접착제 공정에서는 160℃에서 7.5분 이상의 열압에 의해 미세분 발생량이 5% 미만인 고밀화연료를 얻을 수 있었다. 한편, 열압조건과 톱밥의 함수율을 조절함으로써, 무접착제 조건에서도 미세분 발생량이 5% 미만의 고밀화연료를 얻을 수 있음이 밝혀졌다.

ABSTRACT

Recently, densified fuels from biomass are widely used North America and Europe as a regenerable and clean bioenergy. Compaction of sawdust of poplars(*Populus tomentiglandulosa* and *Populus davidiana*) with starch glue for densified fuel were studied. Calorific and elemental analysis were carried out to assess these species as fuel. Hot-press process was used and compaction was performed under temperatures from 120 to 160℃ and at pressure of 50kgf/cm² for prescribed time. Densified fuels were evaluated by its specific gravities, compressive strengths and fines. In the case of with-glue system, when the press temperature is 160℃ and press time is above 7.5 minutes, densified fuels with fines less than 5% can be produced.

1. 접수 2002년 11월 30일 Received on November 30, 2002

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 Korea Forest Research Institute, Seoul 130-012, Korea

On the contrary, in the case of without-glue system, densified fuels with fines less than 5% can be produced by controlling the press conditions and the moisture content of sawdust.

Keywords : biomass, bioenergy, poplar, densified fuel, heating value

서론

최근 들어 석유등 화석 자원의 소비에 따른 지구 환경오염 등으로 이를 대체할 수 있는 새로운 에너지 개발의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 대체 에너지의 하나로써 임산 폐기물 즉, 임산 바이오매스가 주목받고 있다.

바이오매스자원은 태양에너지의 양호한 변환·저장시스템을 가지며, 적정한 이용이 시도되는 한 재생이 가능한 영속적인 자원이다. 석유·석탄 등에 비해 환경면에서도 영향이 적은 깨끗한 자원으로, 에너지·식량·사료·유용물질 등으로서의 다목적으로 이용이 가능하며 지역별 자급이 가능한 자원으로 고도의 기술을 사용하지 않아도 되는 장점을 가지고 있다. 반면에 바이오매스는 부피가 크고 넓고 희박한 분포를 가지며, 회수·운송하려면 큰 에너지가 필요하다는 단점이 있다. 또한 에너지의 발생량이 꼭 큰 것만은 아니며 기후에 따라 생산량이 변동한다. 종류가 많고 변화·이용기술도 각각에 적합한 것이어야만 한다는 단점도 가지고 있다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 석유대체 에너지 이용이라는 점과 자연환경을 파괴하지 않는 범위에서의 종합이용이라는 점에서 바이오매스자원은 매력을 지니는 자원이 되고 있다.

오일쇼크 이후 대체에너지로서의 바이오매스의 중요성이 널리 알려졌으나 유가의 안정과 함께 연구 열기도 많이 퇴보하였다. 그러나 북미와 유럽에서는 기존의 바이오매스로부터 알코올 생산 외에도, 1990년대부터 목재를 급속열분해 하여 액화연료 또는 가스연료를 생산하고자 많은 노력을 기울여 성과를 올리

고 있을 뿐만 아니라, 산업적인 규모로까지 성장하고 있는 형편이다¹⁻³⁾. 이들 바이오에너지를 이용하여 산업용 또는 가정용의 열 생산 외에도 최근에는 열병합발전에 이르기까지 그 규모가 점차 확대되고 있다. 최근에는 일본 및 오스트레일리아 등지에서도 관심이 고조되고 있다⁴⁾.

한편, 이러한 바이오매스의 열화학적 변환에 의한 바이오에너지화와 함께 기존의 고형연료로서의 목재의 이용도 꾸준히 증가하고 있는 형편이다. 고형 연료로서는 기존의 숯과 함께 고밀화목재연료(브리켓, 펠릿)의 형태로 이용되고 있다⁵⁾. 오일쇼크가 있었던 1970년대 이후 이들 고밀화연료가 개발되기 시작한 후 현재 북미와 유럽을 중심으로 가정용 및 산업용으로 이용량이 꾸준히 증가하고 있다고 한다. 펠릿연료의 경우 현재 북미지역과 스웨덴에서 각각 연간 70만톤 정도 소비되고 있는 것으로 알려지고 있다. 그러나 이러한 고밀화연료에 대한 사례 보고는 많지 않은 실정이다⁶⁾. 또한 이들 고밀화연료는 저비용의 청정한 환경친화형 연료라는 장점으로 인해 북미와 스웨덴 외에도 중국, 일본, 러시아, 뉴질랜드, 호주 등지에서 관심이 집중되고 있다. 그러나 국내에서는 아직 활발한 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다.

고밀화연료는 목재 폐기물 또는 산림잔재를 원료로 사용할 수 있고, 국내에서 생산·소비를 할 수 있다는 점에서 눈길을 끌며, 자원 재활용의 차원에서도 재생가능하며 환경친화적이라는 점에서 유용한 이용법이 될 수 있다. 이에 따라 본 연구는 국내의 대표적 속성수인 포플러 수종의 고밀화를 통한 연료화에

초점을 맞춰, 그 제조 가능성을 알아보고자 실시하였다. 현사시와 수원포플러의 열량 및 원소분석을 통해 연료적 가치를 알아보았으며, 두 수종의 톱밥으로부터 고밀화연료를 제조하여 그 특성을 분석하였다.

재료 및 방법

2.1 공시재료

시료는 속성수인 현사시(은사시나무 *Populus tomentiglandulosa*)와 수원포플러(사시나무 *Populus davidiana*)의 수피를 포함한 톱밥을 이용하였다.

톱밥을 크기별로 분급한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Particle size of sawdust

Particle size	<i>P. tomentiglandulosa</i>	<i>P. davidiana</i>
20mesh +	49.03%	49.94%
20~40mesh	31.33%	28.60%
40~60mesh	12.37%	9.84%
60mesh pass	5.75%	3.40%

2.2 고밀화연료 제조

전건한 톱밥에 20% 농도의 전분접착제를 10-30% 투입하여 교반하고, 120-160℃, 50kgf/cm²의 조건으로 5-10분 열압하여 목표비중 0.65의 고밀화연료를 제조하였다.

접착제를 사용하지 않는 경우, 전건상태의 톱밥에 수분만을 투입하여 톱밥의 함수율을 15-60%로 맞추고, 160℃에서 열압기를 사용하여 50-100kgf/cm²의 압력으로 5-15분간 열압하여 고밀화시료를 제조하였다.

2.3 고밀화연료의 특성 분석

제조된 고밀화연료로부터, 비중, 압축강도, 미세분, 회분, 열량을 측정하였으며, 원소분석을 실시하였다.

2.3.1 비중

7cm×7cm×0.7cm의 크기로 제작된 시험편으로부터, 6cm×6cm×0.7cm 크기의 시험편을 잘라내고 전건하여 비중을 구하였다.

2.3.2 압축강도

고밀화연료의 내구성을 가늠할 목적으로 압축강도를 측정하였다. 7mm×7mm×25mm 크기로 잘라낸 압축강도 시험편을 전동식 디지털 압축강도 시험기(Jeil Precision, Universal Testing Machine)를 사용하여, 열압한 방향과 수직 방향으로 10.2mm/min의 크로스헤드 스피드로 3반복하여 압축강도를 측정하였다.

2.3.3 미세분 측정

고밀화연료의 저장 및 수송 특성을 파악할 목적으로 미세분 발생량을 측정하였다. 7mm×7mm×25mm 크기의 시료 10개를 8메쉬 표준망체에 넣고 진탕기를 이용하여 30분 동안 미세분을 발생시켰다. 5분 간격으로 미세분의 발생량을 측정하여, 전체 투입량에 대한 백분율로 나타냈다.

2.3.4 회분정량

Tappi Standard T211 om-93에 따라 고밀화시료 약 2g을 525℃의 회화로에서 4시간(탄소입자가 없어질 때까지) 회화를 실시한 후, 데시케이터에서 냉각하여 회분량을 구하였다.

2.3.5 열량 분석

전건시료 1g을 열량계(Parr Instrument Co.의 1341 Oxygen Bomb Calorimeter)에 넣고 산소를 충전하고 점화하여 연소전후의 온도 변화로부터 열량을 계산하였으며, 동일 시료

에 대하여 3회 반복 실험하였다.

2.3.6 원소분석

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

결과 및 고찰

3.1 포플러 수종의 열량, 회분량 및 원소 조성

본 연구에 이용된 현사시와 수원포플러 톱밥의 열량, 회분량 및 원소조성은 Table 2와 같다. 두 수종의 전건시 열량은 현사시가 20.18MJ/kg, 수원포플러가 19.38MJ/kg으로서 일반적인 목재의 열량과 다름없었으며, 두 수종 모두 수피가 포함되어 있음에도 불구하고 회분량은 0.36%로서 매우 낮은 수준이었다. 원소분석 결과에서도 두 수종간에 큰 차이가 없었다.

3.2 고밀화연료의 비중

Table 3은 현사시로부터 제조한 고밀화연료의 전건비중을 나타낸 것이며, Table 4는 수원포플러로부터 제조한 고밀화연료의 전건비중을 나타낸 것이다.

목표 비중이 0.65인데 현사시는 최대값이 0.62, 수원포플러는 0.66로서 목표비중에 근접한 고밀화연료를 얻을 수 있었다. 두 수종 모두 시간이 짧고 온도가 낮은 조건에서는 비중값이 현저히 떨어졌다. 접착제의 양이 많아지고 온도와 시간이 증가함에 따라 접착제가 시료를 충분히 고정해 주어서 원래 목표 비중에 가깝게 나타났다. 그러나 충분한 접착이 이루어지지 못할 경우 해압시 발생하는 스프링백 현상에 의해 비중이 낮아질 가능성이 있는 것으로 나타났다.

한편 접착제의 양을 30% 하였을 경우, 낮은 온도와 짧은 시간을 적용하였을 때 시편의 중앙부가 갈라지는 현상이 발생하였는데, 이 현상은 열압시간을 길게 하거나 열압온도가 높아지면 없어지는 것으로 보아 접착제에 함유된 수분이 열압시 충분히 증발하지 못했기 때문에 발생하는 것으로 여겨진다.

3.3 고밀화연료의 압축강도

Table 5와 Table 6은 현사시와 수원포플러로부터 제조한 고밀화연료의 압축강도를 나타낸 것이다. 고밀화연료의 압축강도는 수송 및 저장시의 내구성을 가늠할 수 있는 비교척도로서 사용될 수 있는 특성으로서 측정하였다.

현사시의 경우, 접착제를 10% 첨가했을 때의 강도 값은 아주 작았으나, 30% 첨가하면 압축강도는 다른 것보다 현저히 높게 나왔다. 그리고 접착제 첨가 10%, 20% 에서는 압체시간을 늘릴수록 압축강도가 증가하였고, 접착제 첨가 30%에서는 7.5분까지는 증가하였으나 10분에서는 오히려 강도가 감소하는 현상을 보였다. 또한 온도별로는 160℃에서 가장 높은 압축강도를 나타냈다.

수원포플러의 경우에도 현사시와 거의 비슷한 경향을 나타냈다. 이상의 결과로 미루어 볼 때, 30%-160℃-7.5min 이상의 조건에서 제조된 고밀화연료가 사용하기에 적당한 강도를 지니는 것으로 판단되었다.

한편, Table 7에 30%-160℃-7.5min에서 분급된 톱밥으로 제조한 고밀화연료의 압축강도를 나타냈다. 현사시가 수원포플러에 비해 다소 높은 압축강도를 나타냈으나, 두 수종 모두 톱밥 크기에 따른 압축강도의 차이는 거의 없었다.

3.4 미세분 발생량

Table 8과 Table 9는 현사시와 수원포플러로부터 제조한 고밀화연료를 8메쉬 표준망체에서 강제 진탕했을 때 발생한 미세분의 양을

Table 2. Higher heating value, ash content, and elemental composition of poplars

Species	HHV* (MJ/kg)	Ash content (%)	Elemental analysis			
			C(%)	H(%)	N(%)	O**(%)
<i>P. tomentiglandulosa</i>	20.18	0.36	48.86	6.54	0.73	43.87
<i>P. davidiana</i>	19.38	0.36	50.50	6.58	1.15	41.77

* Higher heating value.

** Difference value from 100%.

Table 3. Oven-dry specific gravity of densified fuel from *P. tomentiglandulosa*

Resin (%)	Press temperature(°C) and time(min)								
	120°C			140°C			160°C		
	5min	7.5min	10min	5min	7.5min	10min	5min	7.5min	10min
10	0.57	0.59	0.58	0.58	0.58	0.60	0.59	0.58	0.60
20	0.53*	0.61	0.61	0.61	0.62	0.61	0.60	0.60	0.60
30	0.35*	0.48*	0.62	0.50*	0.63	0.62	0.61	0.62	0.61

* The sample was separated at center.

Table 4. Oven-dry specific gravity of densified fuel from *P. davidiana*

Resin (%)	Press temperature(°C) and time(min)								
	120°C			140°C			160°C		
	5min	7.5min	10min	5min	7.5min	10min	5min	7.5min	10min
10	0.54	0.57	0.63	0.62	0.63	0.63	0.63	0.62	0.62
20	0.59	0.63	0.64	0.63	0.64	0.64	0.63	0.64	0.65
30	0.45*	0.61*	0.65	0.61*	0.64	0.65	0.66	0.65	0.65

* The sample was separated at center.

Table 5. Compressive strength(kgf/cm²) of densified fuel from *P. tomentiglandulosa*

Resin (%)	Press temperature(°C) and time(min.)								
	120°C			140°C			160°C		
	5min	7.5min	10min	5min	7.5min	10min	5min	7.5min	10min
10	0.11	1.21	1.00	0.66	0.49	1.80	2.76	5.29	2.44
20	.	19.28	20.87	13.92	19.01	19.22	20.87	24.21	25.59
30	.	.	40.15	.	44.92	40.47	35.81	50.31	48.09

Table 6. Compressive strength(kgf/cm²) of densified fuel from *P. davidiana*

Resin (%)	Press temperature(°C) and time(min.)								
	120°C			140°C			160°C		
	5min	7.5min	10min	5min	7.5min	10min	5min	7.5min	10min
10	0.77	3.63	3.30	3.73	5.64	7.96	10.59	7.60	4.81
20	10.18	17.39	20.14	19.79	20.07	18.16	25.36	23.16	23.31
30	8.06	21.61	47.25	26.32	44.08	42.91	50.39	48.76	50.56

Table 7. Compressive strength of densified fuel from classified sawdust

Sieve size	<i>P. tomentiglandulosa</i>	<i>P. davidiana</i>
20mesh +	56.38	49.49
20~40mesh	56.41	44.43
not classified	50.31	48.76

Note : Condition, 30%-160°C-7.5min.

Table 8. Fines(%) of densified fuel from *P. tomentiglandulosa*

Condition	Shaking time	5min	10min	15min	30min
	20%-160°C-10min		2.56	2.91	3.93
30%-160°C-7.5min		1.62	1.62	1.62	3.03
30%-160°C-10min		1.46	1.78	2.19	2.61

Table 9. Fines(%) of densified fuel from *P. davidiana*

Condition	Shaking time	5min	10min	15min	30min
	20%-160°C-10min		1.83	2.80	3.01
30%-160°C-7.5min		1.52	1.92	2.22	2.53
30%-160°C-10min		1.33	1.69	1.93	2.65

시간경과에 따라 나타낸 것으로, 압축강도에 서처럼 운반 및 저장에 관련된 특성으로서 측정하였다. 압축강도가 비교적 우수한 제조조건에 대해서 측정을 실시하였다.

진탕시간의 경과에 따라 미세분의 양이 증가함을 알 수 있었다. 현사시는 20%-160°C-10min의 미세분이 30분에서 5%를 넘었다. 그러나 30%-160°C-7.5min과 30%-160°C-10min

의 조건에서는 진탕시간이 30분을 경과하여도 미세분의 발생량이 5%를 넘지 않는 것으로 나타났다. 수원포플러의 미세분 발생 경향은 현사시와 유사하였다. 따라서, 고밀화연료 제조를 위해서는 30%-160℃-7.5min 이상의 조건이 가장 안정적인 것으로 나타났다.

3.5 무접착제 고밀화연료의 제조

현사시 톱밥의 함수율을 15%, 30%, 45%, 60%로 조정 한 후, 160℃의 열압기를 사용하여 50, 75, 100kgf/cm² 의 압력으로 소정시간(5, 7.5, 10, 15분) 열압하여 고밀화연료를 제조하였다. Table 10은 고밀화연료의 30분 진탕 후의 미세분 발생량을 나타낸 것이다.

미세분 발생량을 고려한다면, 함수율 60%의 톱밥을 열압온도 160℃에서 75kgf/cm² 이상의 압력과 7.5분 이상의 가압시간을 적용하여 별도의 접착제 없이 고밀화연료를 제조할 수 있었다. 한편, 함수율이 15% 일 때와 압력을 50kgf/cm²으로 하였을 때에는 고밀화연료가 얻어지지 않았다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 제조조건을 조절함으로써 접착제 없이 고밀화연료를 제조할 수 있음이 밝혀졌다.

2. Bain, R. L., R. P. Overend, and K. R. Craig. 1998. Biomass-fired power generation. Fuel Processing Technology 54:1-16.
3. Chum, H. L. and R. P. Overend. 2001. Biomass and renewable fuels. Fuel Processing Technology 71:187-195.
4. 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.
5. Lehtikangas, P. 2000. Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy 19:287-293.
6. Lehtikangas, P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. Biomass and Bioenergy 20:351-360.
7. Li, Y. and H. Liu. 2000. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass and Bioenergy 19:177-186.
8. 황병호 외 12인. 1998. 목질바이오매스. 선진문화사. p. 71-78

Table 10. Fines(%) of densified fuel from *P. tomentiglandulosa*

M.C (%)	Pressure (kgf/cm ²) and Time (min.)					
	75kgf/cm ²			100kgf/cm ²		
	7.5min	10min	15min	7.5min	10min	15min
30	19.12	16.08	7.90	10.21	10.67	9.03
45	6.29	5.68	6.19	6.85	7.48	5.67
60	4.48	4.57	3.68	4.04	3.83	5.59

인용문헌

1. Bridgwater, A. V. and G. V. C. Peacocke. 2000. Fast pyrolysis processes for biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews 4:1-73.