



[2019-12-BE-008]

비교연구를 통한 미얀마산 속 찬 대나무의 연료품질 평가

김수빈¹⁾ · 이창수²⁾ · 박준범³⁾*

Evaluation of Fuel Quality for Solid Culm Bamboo from Myanmar by a Comparative Study

Soobin Kim¹⁾ · Changsoo Lee²⁾ · Junboum Park³⁾*

Received 3 July 2019 Revised 1 December 2019 Accepted 9 December 2019

ABSTRACT In recent days, awareness on Biomass-Solid Refuse Fuel (BIO-SRF) has increased significantly as a potential alternative energy source to solve impending issues on the depletion of fossil fuel and greenhouse gas (GHG) emissions. Among BIO-SRF, biomass derived from wood cultivation has advantages of both CO₂ reduction and fuel supplement. Bamboo possesses characteristics suitable for fuel rather than other biomass resources, and trade on bamboo from South East Asia, which has better environmental conditions to produce the bamboo, has increased. Here, a new species of bamboo, 'Dike bamboo', which was developed and harvested from Myanmar, has an almost solid culm and thick wall. A comparative study was performed to estimate the feasibility of raw bamboo to be used as a sustainable biomass fuel. The sample was pulverized, and proximate and ultimate analyses were conducted using standard testing methods. The tests showed that Dike bamboo contained higher ash and chlorine contents than other kinds of bamboos, which have adverse effects on the heating efficiency. Although a few properties did not satisfy the required level, its high productivity and density could be considered advantages in economic aspects. In addition, the calorific values were comparable to previously used fuels despite the high ash content.

Key words BIO-SRF(바이오고형연료), Fuel quality(연료품질), Dike bamboo(디케 대나무), Myanmar(미얀마), Solid culm(속 찬), Comparative study(비교 연구)

Nomenclature

$Q_{v,gr}$: gross calorific value, kcal/kg

$Q_{v,net}$: net calorific value, kcal/g

w : moisture content

h : hydrogen content

Subscript

GHG : greenhouse gas

RPS : renewable portfolio standard

SRF : solid refuse fuel

BIO-SRF : biomass-solid refuse fuel

REC : renewable energy certificates

1) Researcher, Institute of Engineering Research, Seoul National University

2) CEO, Dike Energy Co., Ltd.

3) Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

*Corresponding author: junbpark@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-8356

Fax: +82-2-887-0349

1. 서론

최근 국제사회에 화석연료 고갈과 온실가스 배출에 대한 문제가 제기되고 신재생 에너지에 대한 관심이 급증하고 있다. 신재생에너지 의무할당제도(RPS, Renewable Portfolio Standard)의 도입에 따라 그 중 생활폐기물, 폐합성수지 및 섬유, 폐타이어, 폐목재 등과 같은 가연성 고품질폐기물을 가공하여 연료로 활용하려는 방안을 추진하고 있다. 일반 고품질연료(SRF, Solid Refuse Fuel)와 다르게 바이오 고품질연료(BIO-SRF, Biomass-Solid Refuse Fuel)는 폐목재, 폐지, 농업폐기물과 같은 불에 잘 타고 오염물질 함량이 적은 폐기물을 연료로 활용하는 점에서 다르다.

하지만, 고품질재생연료의 품질 유지와 연소 특성의 일관성을 유지하기 어려워 실제 고품질연료의 활용 시 품질의 안정성을 확보하기 어려웠다. 그러므로 혼합된 폐기물이 아닌 단일 물질로 이루어진 폐목재나 폐플라스틱을 이용한 재생연료 생산과 활용에 집중하고 있다. 기존의 BIO-SRF는 유기성자원을 건조하고 압착하여 펠릿(pellet)으로 제조하거나 물리적인 절단과 같은 성형과정을 통해 활용하였다. 게다가, 미 이용 산림바이오매스의 신재생에너지 공급인증서(REC, Renewable Energy Certificates) 가중치가 2.0으로 증가하면서 이를 이용한 연구 및 사용이 급증하는 추세이다. 이석홍 등도 왕겨를 이용하여 베트남에서 발전 타당성 조사 연구를 수행한 바 있다^[1].

그러나 우드 펠릿의 경우 국내 원료생산량이 부족하여 수요를 충족시키기 위해 해외 시장으로 진출하고 있는 경향을 보이고 환경부의 보고에 따르면 지난 4년간 국내 소비량과 국외 수입량이 지속적으로 증가하였고 가격경쟁력 측면에서 국내생산량에 비하여 수입생산량이 앞질렀다^[2]. 또한, 2010년 “신에너지 및 재생에너지 개발 이용보급 촉진법”이 개정되면서 신재생에너지의 발전분야에서 현재의 발전차액제도를 RPS로 전환하여 2012년부터 화력발전소를 중심으로 석탄과 목재 펠릿의 혼소를 시작하였다. 국내의 목재 펠릿수요전망은 2020년에는 500만 톤 정도 예상하고 있으나, 공급량은 100만 톤 정도로 수요 대비 공급이 턱없이 부족한 실정이다^[3].

대나무는 생장이 빠르고(성장속도: 약 91-122 cm/day) 생산성이 매우 좋으며 용도가 다양하고 수확기간이 짧으며

재생산이 가능한 귀중한 바이오매스 자원이다^[4~7]. 뿐만 아니라 많은 휘발분과 적은 회분함량과 알칼리 함량을 가지며, 다른 바이오매스보다 높은 열량, 낮은 수분함량(보통 8-23%)과 많은 셀룰로오스와 리그닌을 가지고 있다^[8~11]. 그러므로 대나무는 화석연료를 대체할 바이오에너지 자원으로 가치가 있다^[8,12,13].

대나무의 품종은 전 세계에 약 1,500종에 달하며^[14], 우리나라에 주로 존재하는 대나무 종은 왕대, 솜대 및 맹종죽(*Phyllostachys bambosoides*, *Phyllostachys nigra*, *Phyllostachys pubescens*) 등이 있다^[15]. 하지만, 국내에는 대나무 숲이 많이 존재하지 않고 발전소의 연료로서 사용되지 않고 있다. 다만 탄화 대나무(대나무 숯)는 연료로 사용하기 위해 연구된 바 있으며 한국에서 자생하는 담양 대나무는 3207 kcal/kg의 저위발열량을 가지고 있었다^[16].

하지만, 근래에 국내보다 값싼 인건비와 노동력으로 중국 및 동남아 등지에서 많은 대나무 자원이 유입되고 있다. 대나무의 특성은 품종, 생육기간, 생산지, 관리방법에 따라 달라진다^[11,17,18]. 게다가, 이러한 지역은 강우량이 많아 덥고 습한 기후조건^[8]과 모래가 많은 토양으로 인해 국내보다 생산성이 더 좋을 뿐만 아니라 회분과 황 함량이 적어 바이오매스 연료로 보다 적합한 특성을 가지고 있다.

전 세계에서 2%의 대나무 생산을 담당하는 미얀마는 국토 전체에 약 80억 평방미터에 달하는 대나무 숲이 존재한다^[19,20]. 미얀마 정부와 산림부는 현재 대나무 재배에 관심을 갖는 사람들에게 토지를 지원하여 대나무 자원 생산을 장려하는 정책을 마련하고 있다. 미얀마 정부는 불법 벌목을 제한하고 수출시장 진출을 위해 막대한 규모의 대나무 숲 조성 계획을 하고 있다. 미얀마에는 100종이 넘는 대나무가 존재하고 이 중 7종(*Bambusa vulgaris*, *Cephalostachyum pergracile*, *Dendrocalamus*, *Gigantochloa compressa*, *Melocanna baccifera*, *Schistachyostachyum brachycladum*, *Thyrostachys siamensis*) 이 최대 산지에서 주로 생산된다^[21].

미얀마에서는 대나무를 주로 공예품, 가구, 건설 재료, 식용 등으로 사용하고 있으며, 수출시장은 2014년 이전에는 가공품인 대나무 펄프, 판넬이 많았지만 2014년 이후에는 미가공된 천연 대나무의 수출이 많았다^[22]. 가공 및 미가공 대나무는 현재 대부분 미국, 유럽, 호주, 필리핀, 인

도, 일본 등으로 수출되고 있다. 심지어, 최근 일본, 대만, 태국 등지의 바이오매스 발전회사에서는 자국의 원료 부족으로 대나무 수입에 대한 관심이 높아지는 추세이다. 미얀마 대나무의 수출가격은 킬로그램 당 약 US \$0.61 정도로 거래되며 그 가치가 계속해서 증가하고 있다^[21].

보통의 대나무는 3-5년 정도 재배한 후 수확을 한다. 하지만, 본 연구에서는 D사가 태국에서 자체적으로 개발한 속 찬 대나무 ‘Dike bamboo(디케 대나무)’는 완전히 자라는데 1년 정도 소요된다. 게다가 Dike bamboo는 기존에 존재하는 대나무와 높이는 비슷하지만 마디사이의 속이 비어 있지 않고 거의 완전히 차 있다. 그러므로 일반적인 대나무보다 생산성과 연료로서의 가치가 보다 클 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 자체적으로 개발한 속 찬 대나무 품종을 미가공 상태에서 바이오고형연료로서의 가치를 판단하고자 연료특성을 타 대나무 종과 비교하였다. 뿐만 아니라 육중한 대나무를 태국·미얀마 등 동남아 지역에서 재배·가공하여 미래의 바이오고형연료 자원으로 활용하기 위해 성능을 사전 검증하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료

2.1.1 시료 채취

실험에 사용된 대나무 시료는 D사에서 자체적으로 육중

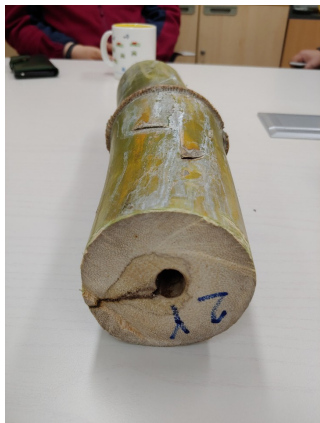


Fig. 1. Specimen of Dike bamboo



Fig. 2. Cross sections of Dike bamboo (Left : Bottom, Right : Top)

한 품종으로서 미얀마에서 2년 동안 생육하여 완전히 자란 Dike bamboo(약 42 kg, 10-15 m)의 뿌리 쪽 마디를 1 m 크기로 절단하여 채취하였다. Dike 대나무의 직경은 약 8 cm 정도이며, 뿌리 쪽으로 갈수록 속이 완전히 차있으며 줄기 쪽은 직경 약 1.5 cm 정도의 빈 공간을 가지고 있다.

2.1.2 시료 분쇄 및 사전건조

채취한 시료를 적당한 길이(5 cm×20등분)로 절단한 후 각 부분별로 30 mm 이하로 분쇄하여 고르게 퍼서 48시간 이상 풍건하였다. 풍건한 시료를 다시 분쇄기를 이용하여 더 작게 분쇄한 후 20번 체(체눈금 : 0.8 mm)를 이용하여 입자크기 1 mm 이하의 시료를 얻었다. 이렇게 얻은 시료를 균질하게 혼합한 후 밀봉 하여 4°C에서 보관하였다.



Fig. 3. Sample pulverization (Left : coarse, Right : fine)

2.2 실험 방법

2.2.1 성분 분석

환경부에서 발표한 「고형연료 제품 품질 시험·분석 방법」에 따라 수분함량, 회분함량, 휘발분 함량, 겉보기 밀도, 바이오매스 함량을 분석하였다. 바이오매스 함량은 시료 중 생분해성 물질을 황산(H₂SO₄) 및 과산화수소(H₂O₂) 혼합물에 용해될 수 있는 특성을 이용하여 바이오매스 함량을 중량 백분율로 측정하였다. 각 항목의 실험은 3회 반복 수

행한 결과 값의 평균치를 계산하여 제시하였다.

2.2.2 원소 분석

기본구성원소 12종(SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, MnO, P₂O₅, SO₃, Cl)은 X선 형광분석기(XRF-1700, Shimadzu, Japan)로 분석을 하였고, 유기원소 4종(C, H, N, S)은 원소분석기(Flash2000, Thermo Fisher Scientific, Germany)로 정량하였다.

2.2.3 열량 분석

건조한 시료를 사용하여 봄베 열량계(LECO KOREA-AC600)로 고위발열량(Q_{v,gr})을 측정하였다. 그리고 시료의 수분(w)과 수소(h) 함량을 이용하여 식 (1)을 통해 저위발열량(Q_{v,net})으로 환산하였다.

$$Q_{v,net} = Q_{v,gr} - 9000 \times \frac{(9h + w)}{100} \quad [\text{kcal/kg}] \quad (1)$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 성분 분석 결과

물질의 회분과 휘발분은 건조시료를 기준으로 중량 백분율로 Table 1과 2와 같이 나타내었다. Dike 대나무의 고유 수분함량은 약 44%로 타 문헌들의 전처리(사전건조) 조건이 상이하여 비교가 불가하였다. 그러나 일반적으로 대나무의 수분함량이 높을수록 발열량은 감소한다^[22]. 실험에 사용된 대나무 시료는 뿌리 부근의 절편이며 일반적으로 대나무의 수분은 상부에 적고 하부에 많이 존재한다^[13]. Dike 대나무의 회분함량은 타 품종에 비해 많았다. 회분함량이 높으면 연소되지 않는 부분이 많아 발열량이 낮아지고 회분이 보일러에 침착(deposition)되어 슬래깅(slagging)

Table 1. Proximate analysis of Dike bamboo

Composition	Ash	Volatile matter	Fixed carbon
Contents (dry wt, %)	12.3	87.7	*ND

*ND : None detected

Table 2. Previous results of proximate analysis by bamboo species^[8,9,11,27]

Species	Ash	Volatile matter	Fixed carbon
<i>Bambusa vulgaris</i>	9.40	80.4	10.2
<i>Phyllostachys nigra</i>	0.47	83.7	15.9
<i>Phyllostachys bambusoides</i>	0.59	83.5	15.9
<i>Phyllostachys bissetii</i>	1.15	83.3	15.5
<i>Dendrocalamus asper</i>	2.87	76.1	21
<i>Dendrocalamus strictus</i>	3.0	79.7	17.6
<i>Dendrocalamus brandisii</i>	2.2	79.7	18.1
<i>Dendrocalamus stocksii</i>	3	79.4	17.6
<i>Dendrocalamus bambos</i>	1.4	80.8	17.8
<i>Dendrocalamus balcoa</i>	1.7	77.2	21.1

현상과 파울링(fouling) 현상을 일으켜 유지비용이 많이 들게 한다^[23,24]. 휘발분의 경우에도 탐 품종에 비해 많이 존재하였다. 휘발분은 400-500℃까지 가열할 때 방출되며^[25] 휘발분이 많을수록 점화온도를 낮추어 빠르게 완전연소가 될 수 있게 한다^[26]. Dike 대나무는 다른 품종의 대나무에 비해 고정탄소를 거의 포함하지 않았는데 고정탄소는 대나무의 밀도와 관련이 있다. 높은 밀도를 가질수록 낮은 고정탄소를 가지는 경향이 있다. 또한 고정탄소는 연료로서 발열량을 판단하는 대략적인 기준으로 사용된다^[27].

Table 3과 4는 Dike 대나무와 타 품종의 겉보기 밀도와 Dike 대나무의 바이오매스 함량을 나타내었다. Table 4와 같이 일반적으로 *Dendrocalamus* 속의 대나무는 내벽이

Table 3. Bulk density and biomass content of Dike bamboo

Bulk density (t/m ³)		Biomass contents (dry wt. %)
Fine particles	Coarse particles (D ≤ 30 mm)	
0.89	0.2	87

Table 4. Bulk density by bamboo species^[11,34]

Species	Bulk density (t/m ³)
<i>Bambusa vulgaris</i>	0.80
<i>Dendrocalamus strictus</i>	0.48
<i>Dendrocalamus brandisii</i>	0.52
<i>Dendrocalamus stocksii</i>	0.78
<i>Dendrocalamus bambos</i>	0.61
<i>Dendrocalamus balcoa</i>	0.63

두꺼워 밀도가 크다. 하지만, Dike 대나무의 단면을 다른 종의 대나무와 육안으로 비교해 봐도 속이 섬유질로 더 많이 차있는 것을 볼 수 있다. 밀도가 큰 대나무는 단위부피당 연소될 수 있는 바이오매스 양이 더 많아 많은 열과 에너지를 발생시킬 수 있다^[11,25]. 바이오매스 함량은 유기 재료 중 생분해성 부분의 비율을 의미하며 Dike 대나무 구성성분 중 87%가 미생물에 의해 분해가 가능하다.

3.2 원소 분석 결과

원소분석 결과는 건조 시료를 기준으로 중량백분율로 나타내었다. Table 5와 6은 대나무의 기본원소구성을 비

Table 5. Ash elemental analysis of Dike bamboo

Elements	Contents (dry wt. %)
SiO ₂	2.42
Al ₂ O	0.085
Fe ₂ O ₃	0.21
TiO ₂	ND
CaO	1.62
MgO	0.071
Na ₂ O	0.049
K ₂ O	5.94
MnO	ND
P ₂ O ₅	0.54
SO ₃	0.71
Cl	0.65

Table 6. Previous results of ash elemental analysis by species^[8,11]

Elements	Contents (dry wt. %)							
	<i>nigra</i>	<i>bambusoides</i>	<i>bissetii</i>	<i>strictus</i>	<i>brandisii</i>	<i>stocksii</i>	<i>bambos</i>	<i>balcooa</i>
SiO ₂	0.077	0.045	0.16	7.63	1.77	10.1	7.07	9.46
Al ₂ O	0.002	0.003	0.011	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	0.002	0.002	0.006	ND	ND	ND	0.17	0.14
TiO ₂	ND	ND	ND	-	-	-	-	-
CaO	0.024	0.037	0.073	0.22	-	0.93	0.90	0.71
MgO	0.031	0.075	0.076	0.93	0.59	1.67	1.27	2.05
Na ₂ O	0.003	0.001	0.002	ND	ND	ND	0.15	0.30
K ₂ O	0.158	0.18	0.382	7.65	14.2	4.96	7.81	4.70
MnO	-	-	-	ND	ND	ND	ND	ND
P ₂ O ₅	0.097	0.123	0.181	1.73	1.56	1.50	0.48	3.49
SO ₃	0.011	0.019	0.033	1.0	0.83	1.03	1.09	1.96
Cl	0.003	0.002	0.007	1.16	1.36	0.27	0.27	0.023

*- : no data

교하기 위해 나타내었다. Dike 대나무의 실리카 함량은 *Phyllostachys* 속보다는 크고 *Dendrocalamus* 속보다는 작다. 연료 내에 실리카 함량이 적으면 부식·마모와 슬래그 문제를 줄일 수 있고 많으면 회분함량이 높고 발열량에 좋지 않은 영향을 준다^[11,27]. 칼륨 함량도 규산염과 비슷한 경향이다. 칼륨함량이 낮으면 파울링 현상과 슬래깅 현상이 줄어든다^[28,29]. Dike 대나무의 칼슘함량은 다른 품종에 비해 높은 편이다. 칼슘이나 마그네슘은 연소 동안 회분의 녹는점을 증가시키고 칼륨과 나트륨을 감소시킨다^[30]. 그러므로 칼륨과 같은 알칼리 금속보다는 칼슘을 더 많이 포함한 바이오매스를 더 선호한다^[11]. 염소 함량은 다소 높은 편이다. 염소함량은 열화학적인 변환에서 매우 중요하며 염소함량이 높으면 염분이 침착되어 부식이 일어나고 염소함량이 낮으면 알칼리금속의 휘발을 줄이고 이로 인한 회분 침착문제가 일어나지 않게 하여 높은 온도로 인한 부식을 방지할 수 있다^[11,13,31].

Table 7과 8은 대나무의 유기원소 조성을 보여준다. 연료의 원소조성은 완전연소를 위한 가스유동속도와 공기요구량을 정하는데 중요하다^[32]. Dike 대나무의 탄소와 수소 함량은 다른 품종의 대나무와 비슷하다. 탄소함량이 높을수록 발열량이 높아진다^[33,34]. 반대로 연료의 수소와 산소 함량이 높아지면 분자구조가 보다 약한 결합인 C-H 나 C-O 결합이 C-C 결합보다 많기 때문에 낮은 에너지를 발생시킨다^[27,33,35]. 질소도 거의 비슷한 함량을 가지며 황은

Table 7. Ultimate analysis of Dike bamboo

Elements	C	H	N	S
Contents (dry wt. %)	46.4	5.68	0.36	ND

Table 8. Results of ultimate analysis by bamboo species^[8,11,27]

Species	C	H	N	S
<i>vulgaris</i>	39.8	5.75	ND	-
<i>nigra</i>	51.4	5.25	0.21	0.03
<i>bambusoides</i>	50.9	5.4	0.38	0.04
<i>bissetii</i>	51.1	4.51	0.32	0.05
<i>strictus</i>	46.7	6.2	0.14	0.02
<i>brandisii</i>	46.9	5.9	0.16	0.18
<i>stocksii</i>	46.2	6	0.32	0.07
<i>bambos</i>	46.7	5.9	0.15	0.03
<i>balcoa</i>	48.7	5.6	0.51	0.13

검출되지 않았다. 질소 함량이 높으면 질소화합물(NO_x, N₂O, NH₃)이나 오존과 같은 대기오염물질이 발생한다^[8,36,37]. 연료의 황 함량이 높으면 회분을 많이 포함하고 대기오염물질을 배출한다^[18,36].

Table 9. Calorific values of Dike bamboo

Calorific values	Calorific values (kcal/kg)
Gross Calorific value	4710.9
Net Calorific value	4139.6

Table 10. Calorific values by bamboo species^[8,9,11,13,34]

Species	Calorific values (kcal/kg)	
	Gross	Net
<i>Bambusa vulgaris</i>	3443.3	-
<i>Bambusa emeiensis</i>	4210.8	-
<i>Phyllostachys nigra</i>	4605.6	4240.4
<i>Phyllostachys bambusoides</i>	4562.6	4213.8
<i>Phyllostachys bissetii</i>	4663	4287.6
<i>Phyllostachys pubescens</i>	4688.3	-
<i>Dendrocalamus asper</i>	4201.7	-
<i>Dendrocalamus strictus</i>	4493.3	3559.1
<i>Dendrocalamus brandisii</i>	4565	3740
<i>Dendrocalamus stocksii</i>	4469.4	3696.6
<i>Dendrocalamus bambos</i>	4588.9	3984.7
<i>Dendrocalamus balcoa</i>	4684.5	4032.3

3.3 열량 분석 결과

Table 11과 12는 Dike 대나무와 타 대나무 품종의 발열량을 나타내었다. 발열량은 바이오매스를 연료로 사용하는 데 가장 중요한 특성이며 연료의 에너지양을 평가하는 기준으로 발열량을 많이 사용한다^[32,34,38]. 고위발열량은 열량과 전기로 변환되는 양을 나타내는 지표이다. 하지만, 고위발열량보다는 저위발열량이 실제 발전가동에서 중요하다^[39]. Dike 대나무의 고위발열량은 다른 모든 품종의 대나무보다 높지만 저위발열량은 *Phyllostachys* 속보다는 낮고 *Dendrocalamus* 속보다는 높다. 이는 Dike 대나무의 높은 회분함량(약 12%) 이 원인이라고 생각된다. 하지만, 회분함량이 훨씬 낮은 *Phyllostachys* 속(0.4-0.9%)에 비해 저위발열량이 많이 차이하지 않는다. 이는 Dike 대나무의 밀도가 타 품종에 비해 크기 때문이다.

3.4 연료품질 비교 결과

Table 11은 환경부에서 발표한 비성형 BIO-SRF의 품질기준과 국립산림과학원에서 발표한 목재연료칩의 품질기준을 나타내었다. 이를 바탕으로 Dike 대나무의 품질을 평가하면, 환경부 품질기준에서는 염소함량은 기준초과이고 바이오매스 함량은 기준미달이다. 국립산림과학원의 품질기준에서는 회분, 염소함량이 기준을 초과한다. 결과적으로 Dike 대나무는 국내의 두 품질기준에 만족하지 못한다. 이는 공통적으로 비교적 높은 회분함량과 염소함량이 주된 원인이다.

Table 12는 국내 임지폐목재의 종류별 저위발열량과 열

Table 11. Domestic standard quality of pluff BIO-SRF (Ministry of Environment) and wood chips for fuel (National Institute of Forest Science)

Properties	Standard Quality	
	BIO-SRF	Wood Chips
Moisture (wt. %)	25 or less	40 or less
Net calorific value (kcal/kg)	3150 or more	1900 or more
Ash (wt. %)	15 or less	6.0 or less
Cl (wt. %)	0.5 or less	0.05 or less
N (wt. %)	-	1.0 or less
S (wt. %)	0.6 or less	0.05 or less
Biomass (wt. %)	95 or more	-

Table 12. Net calorific values of forest products (National Institute of Environmental Research) and wood biomass for cogeneration plant^[40,41]

Biomass	Net calorific values (kcal/kg)
Forest products	4,120
Waste woods	4587
* EFB	4659
** PKS	4822
Coal (bituminous coal)	6970

* EFB : Empty Fruit Bunch

** PKS : Palm Kernel Shell

병합 발전소에서 많이 사용하는 바이오매스와 유연탄의 저위발열량이다. Dike 대나무의 저위발열량도 기존에 사용되는 목질계 바이오매스와 유사한 수준임을 볼 수 있다.

4. 결론

연료는 일반적으로 밀도가 높고 수분함량이 낮고 회분함량이 낮고 고정탄소가 많을수록 발열량이 높다. 또한, 실리카, 칼륨, 염소, 질소, 황 함량이 낮을수록 탄소 함량이 높을수록 연료로 보다 적합하다. 하지만, 본 연구의 Dike 대나무는 타 품종에 비해 회분함량이 다소 높게 나타났다. 또한 원소분석에서는 염소함량이 높은 것으로 보아 연소 시 보일러 표면에 회분이 침착될 수 있다. 하지만, 빠른 생육 속도와 한 그루당 무게를 감안한다면 다른 품종의 대나무보다 공급량이 많기 때문에 경제성에서는 월등하다. 일부 품질기준치를 초과한 항목은 향후 부가적인 공정(예, 알칼리 용매를 이용한 회분 추출, 열분해를 통한 탈염 처리 등)을 통해 충분히 해결될 수 있는 문제이다. 또한 밀도가 높으므로 펠릿 제조공정처럼 압축 공정 없이 파쇄·건조과정만으로 사용이 가능하다. 게다가 발열량으로만 비교했을 때 높은 회분함량을 감안하면 우수한 바이오매스 연료라고 판단할 수 있다. 결론적으로 미얀마에서 재배한 Dike 대나무를 해외 발전사업장이나 국내 발전소의 바이오고형연료로서 활용을 기대해볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공학 개인기초연구지원사업 한국형 SGER 과제(2016R1D1A1A02937267)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Shin, Y.S., Lee, S.H., Lee, K.S., Kim, Y.K., Lee, G.W., and Ahn, J.Y., 2015, "Feasibility study on biomass (rice husk) power plant project in Vietnam", *New. Renew. Energy*, **11**(1), 13-19.
- [2] Sudokwon Landfill Site Management Corporation, 2015, "Final report of feasibility study on increasing application of organic BIO-SRF", pp. 20-21.
- [3] Kang, J.G., Kim, K.H., Lee, D.J., Min, J.S., Jo, S.Y., and Oh, G.J., 2014, "A study on the possibility that income fuel Bio-SRF (solid refuse fuel)", National Institute of Environment Research, pp. 1.
- [4] Kleinhenz, V. and Midmore, D.J., 2001, "Aspects of bamboo agronomy", *Adv. Agron.*, **74**, 99-153.
- [5] Lobovikov, M. and Lou, Y.P., 2009, "The poor man's carbon sink. Bamboo in climate change and poverty alleviation", *Non-Wood Forest Products Working Document (FAO)*, No. 8, FAO, Rome, Italy.
- [6] Singh, S., Adak, A., Saritha, M., Sharma, S., Tiwari, R., Rana, S., Arora, A., and Nain, L., 2017, "Bioethanol production scenario in India: Potential and policy perspective", *Sustainable Biofuels Development in India*; Chandel, A.K., Sukumaran, R.K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, pp. 21-37.
- [7] Brunerova, A., Roubik, H., and Brozek, M., 2018, "Bamboo fiber and sugarcane skin as a bio-requette fuel", *Energies*, **11**(9), 2186-2206.
- [8] Scurlock, J.M.O., Dayton, D.C., and Hames, B., 2000, "Bamboo: an overlooked biomass resource?", *Biomass and Bioenergy*, **19**(4), 229-244.
- [9] Sritong, C., Kunavongkrit, A., and Piumsombun, C., 2012, "Bamboo: an innovative alternative raw material for biomass power plant", *Int. J. Innov. Manag. Technol.*, **3**(6), 759-762.

- [10] Kuttiraja, M., Sindhu, R., Varghese, P.E., Sandhya, S.V., Binod, P., Vani, S., Pandey, A., and Sukumaran, R.K., 2013, "Bioethanol production from bamboo (*Dendrocalamus* sp.) process waste", *Biomass Bioenergy*, **59**, 142-150.
- [11] Kumar, R. and Chandrashekar, N., 2014, "Fuel properties and combustion characteristics of some promising bamboo species in India", *J. For. Res.*, **25**(2), 471-476.
- [12] Chen, E., 2012, "Growmore biotech plants up power with bamboo in India", <http://www.greenprospectsasia.com/>.
- [13] Engler, B., Schoenherr, S., Zhong, Z., and Becker, G., 2012, "Suitability of bamboo as an energy resource: analysis of bamboo combustion values dependent on the culm's age", *Int. J. of Forest Eng.*, **23**(2), 114-121.
- [14] Ohrnberger, D., 1999, "The bamboos of the world: annotated nomenclature and literature of the species and the higher and lower taxa", Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- [15] Seo, S.J., 2005, "All about bamboo", National Institute of Forest Science, pp. 22-26.
- [16] Yang, W., Kim, H.Y., Chae, T.Y., Ibik, K., and Pohan, H.G., 2010, "A study on carbonization characteristics of Indonesian and Korean bamboo for production of bamboo charcoal and vinegar", *Journal of The Korean Society of Combustion*, **15**(1), 30-37.
- [17] Daza Montano, C.M., Pels, J.R., Ftyda, L.E., and Zwart, R.W.R., 2012, "Evaluation of torrefied bamboo for sustainable bioenergy production", *The 9th World Bamboo Congress (WBC)*, pp. 809-818.
- [18] Posom, J. and Sirisomboon, P., 2017, "Evaluation of lower heating value and elemental composition of bamboo using near infrared spectroscopy", *Energy*, **121**, 147-158.
- [19] Lobovikov, M., Paudel, S., Piazza, M., Ren, H., and Wu, J., 2007, "World bamboo resource: A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005", *Food and Agriculture Organization of the United Nation*.
- [20] FAO, 2010, "Country Report Myanmar", *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome*, <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf> (Main Report); <http://www.fao.org/docrep/013/al576E/al576E.pdf>.
- [21] UK aid, 2015, "Myanmar bamboo sector competitiveness study", *Business Innovation Facility*, pp. 16-17; 27-28.
- [22] Kaltschmitt, M., Hartmann, H., and Hofbauer, H., 2009, "Energie aus Biomasse—Grundlagen, Techniken und Verfahren [Energy from Biomass—Basics, Technology and Processes]", Springer, Heidelberg, Berlin.
- [23] Grover, P.D. and Mishra, S.K., 1996, "Biomass briquetting: Technology and practice", *Regional Wood Energy Development Programme in Asia, Field Document*, No. 46.
- [24] Huber, G.W., Iborra, S., and Corma, A., 2006, "Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering", *Chem Rev.*, **106**(9), 4044-4098.
- [25] Mitchual, S.J., Frimpong-Mensah K., and Darkwa N.A., 2014, "Evaluation of fuel properties of six tropical hardwood timber species for briquettes", *J. Sustain. Bioenergy Syst.*, **4**, 1-9.
- [26] Akowuah, J.O., Kemausuor, F., and Mitchual, S. J., 2012, "Physico-chemical characteristics and market potential of sawdust charcoal briquettes" *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, **3**(1), 1-6.
- [27] Sucipta, M., Negara, D.N.K.P., Nindhia, T.G.T., and Surata, I.W., 2017, "Characteristics of Ampel bamboo as a biomass energy source potential in Bali", *2017 IOP Conf. Ser.: Master. Sci. Eng.*, **201**, 012032.
- [28] Miles, T.R., Miles, Jr. T.R., Baxter, L.L., Bryers, R.W., Jenkins, B.M., and Oden, L.L., 1996, "Boiler deposits from ring biomass fuels", *Biomass and Bioenergy*, **10**(2-3), 125-138.
- [29] Baxter, L.L., Miles, T.R., Miles, Jr. T.R., Jenkins, B.M., Milne, T., Dayton, D., Bryers, R.W., and Oden, L.L., 1998, "The behavior of inorganic materials in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences", *Fuel Process. Technol.*, **54**(1-3), 47-78.
- [30] Ohman, M. and Nordin, A., 2000, "The role of kaolin in prevention of bed agglomeration during fluidized bed combustion of biomass fuels", *Energy and Fuels*, **14**(3), 618-624.
- [31] Dayton, D.C. and Milne, T.A., 1996, "Laboratory measurements of alkali metal containing vapors released during biomass combustion", *Application of Advanced Technologies to Ash-Related Problems in Boilers*, New York, pp. 161-185.

- [32] Nhuchhen, D.R., 2016, "Prediction of carbon, hydrogen, and oxygen compositions of raw and torrefied biomass using proximate analysis", *Fuel*, **180**, 348-356.
- [33] Runge, T.M., Zhang, C., Mueller, J., and Wipperfurth, P., 2013, "Economic and environmental impact of biomass types for bioenergy power plants", Environmental and Economic Research and Development Program.
- [34] Sadiku, N.A., Oluyeye, A.O., and Sadiku, B., 2016, "Analysis of the calorific and fuel value index of bamboo as a source of renewable biomass feedstock for energy generation in Nigeria", *Lignocellulose*, **5**(1), 34-49.
- [35] Peter, M.K., 2002, "Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass", *Bioresour. Technol.*, **83**(1), 37-46.
- [36] Busu, P., 2010, "Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory", Academic press is an imprint of Elsevier, USA, p. 23.
- [37] Lynch, D., Henihan, A.M., Bowen, B., Lynch, D., McDonnell, K., and Kwapinski, W., 2013, "Utilisation of poultry litter as an energy feedstock", *Biomass Bioenergy*, **49**, 197-204.
- [38] Hla, S.S. and Roberts, D., 2015, "Characterisation of chemical composition and energy content of green waste and municipal solid waste from Greater Brisbane", *Waste Manag.*, **41**, 12-19.
- [39] Cooper, C.D., Kim, B., and MacDonald, J., 1999, "Estimating the lower heating values of hazardous and solid wastes", *J. Air Waste Manag. Assoc.*, **49**(4), 471-476.
- [40] Ryu, J.S., Kim, K.S., and Park, S.J., 2011, "A study on combustion characteristics of wood biomass for cogeneration plant", *Appl. Chem. Eng.*, **22**(3), 296-300.
- [41] National Institute of Environmental Research, 2008, "A study on characteristics of air pollutant emission for energy recovery of waste woods", pp. 13.