

원소분석을 통한 바이오매스에 도시형 유기성 폐기물을 혼합한 신연료의 고위발열량 예측

오송열* · 김래현† · 한희준 · 문장수** · 김희준

서울산업대학교 에너지환경대학원, *서울산업대학교 에너지환경연구소, **한국환경기술진흥원
(2007년 7월 16일 접수, 2007년 11월 26일 채택)

Estimating the Higher Heating Value of Eco-fuel mixed Biomass with Municipal Organic Wastes from Ultimate Analysis Data

Song-Yul Oh*, Lae-Hyun Kim†, Hee-Joon Han, Jang-Soo Moon** and Hee-Joon Kim

Graduate School of Energy and Environment, Seoul National Univ. of Technology,
172, Gongneung-2dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

*Institute of Energy and Environment, Seoul National Univ. of Technology,
172, Gongneung-2dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

**Korea Institute of Environment Science and Technology,
613-2, Bulgwang-dong, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea

(Received 16 July 2007, Accepted 26 November 2007)

요 약

바이오매스계 연료의 고위발열량(HHV) 예측을 성분원소분석 데이터와 제안된 대표적인 상관관계식을 이용하여 수행하였고, 각 상관식에 대한 그 타당성을 실험 HHV와 비교하여 검토하였다. 실험에 사용된 샘플들은 산림계 바이오매스인 노송나무의 톱밥과, 농업계 바이오매스인 왕겨, 그리고 여기에 유기성 폐기물인 polystyrene, waste paper, polypropylene을 각각 10, 30, 50 wt%로 혼합하여 제작하였다. 성분원소의 측정과 HHV의 측정은 각각 KS 표준방법에 따랐으며, 예측된 HHV값의 평균 오차는 약 880 kJ/kg 으 로 이는 측정된 HHV의 약 3.8%에 해당하였다. 실험을 통한 값과 예측된 HHV 값 사이의 대응 상관계 수의 곱(R^2)은 0.957~0.996의 값을 나타내었다.

주요어 : 원소분석, 고위발열량, 예측, 바이오매스

Abstract — HHV (Higher Heating Value) of biomass fuel is calculated by using ultimate analysis data and has been proposed by using correlation equation, and compared with the experiment the adequacy about each correlation equation with measured HHV and examined. Samples used for experiment are prepared by mixing biomass (i.e. rice husk and sawdust) with organic waste (i.e. polystyrene polypropylene and waste paper) of 10, 30, 50 wt% of composition. Ultimate analysis and measurement of HHV are respectively measured by using KS standard method. The average error value of estimated HHV results is about 880 kJ/kg (about 3.8% of measured HHV). The corresponding correlation coefficients (R^2) of experimental result and estimated HHV result are 0.957~0.996.

Key words : Ultimate analysis, HHV (Higher Heating Value), Estimate, Biomass

†To whom correspondence should be addressed.
Graduate School of Energy and Environment, Seoul National
Univ. of Technology, 172, Gongneung-2dong, Nowon-gu,
Seoul 139-743, Korea
Tel: 02-970-6620
E-mail: lhkim@snut.ac.kr

1. 서 론

화석연료에 의존하는 산업구조에서는 지구온난화 가스인 CO₂의 방출과 화석연료의 수급 불안정으로 인한 영향이 환경적인 측면뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 심각하다. 유럽 등 선진국에서는 이를 극복하기 위한 대안으로서 신재생에너지가 재인식되고 있으며, 사용량도 증가하고 있다^{[7]-[9]}. 특히 바이오매스의 경우 재생 가능한 에너지로서, 총괄 CO₂수지면에서 대기 중으로 CO₂의 배출증가에는 영향이 없다. 이러한 바이오매스를 발전 등 산업자원으로 이용하기 위해서는 물리화학적 기초 데이터의 확보가 필요 불가피하다. 예를 들면 기초적인 원소분석을 통해 고위발열량의 예측을 할 수 있다^[10].

바이오매스의 발열량은 바이오매스 연료를 이용한 발전설비의 설계와 운용에 있어 매우 중요한 공정변수이다^{[7]-[9]}. 발열량의 종류에는 총 열량가치로서 사용되는 고위발열량(Higher Heating Value, HHV)과 순 발열량이라고 불리는 저위발열량(Lower Heating Value, LHV)이 있다. 고위발열량은 표준 조건에서 연료가 연소할 때 발생하는 열량과 연소반응에 의해 생성된 수증기가 콘덴서부분에서 응축되어 방출되는 열량을 포함한 것으로, 전엔탈피의 변화로 단일 소비열량계(Bomb calorimeter)를 이용하여 실험적으로 측정할 수 있다. 저위발열량은 수증기의 응축 열량을 포함하지 않는 엔탈피의 변화를 의미한다^{[10]-[13]}.

CO₂, H₂O 등의 생성열만으로는 연료의 발열량이 완벽하게 계산될 수 없기 때문에, 연료의 기초적인 원소분석을 통해 연료의 구성성분과 발열량의 상관관계를 밝히는 상관관계식들이 많이 제안되어 왔으며, 특히 원소분석을 통한 고위발열량의 예측 상관관계식의 경우 그 정확도가 우수하다^{[11][14]}. 그러나 대부분의 모델들은 석탄에 대해서 제안되었으며, 일부 도시형 고품폐기물에 확대 적용하는 것이 시도 되었다. 바이오매스 연료에 시도된 모델들은 극소수에 불과하다^[12].

발열량은 공업분석(휘발분, 회분, 고정탄소의 함량 분석)을 통해서도 그 예측이 가능하나^{[10]-[12]}, 실험식이기 때문에 대상 물질에 따른 그 오차범위가 커 아직까지 공업분석을 통한 HHV의 예측은 신뢰성이 떨어진다^{[2][12]}.

바이오매스의 HHV 예측법으로 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌, 기타 추출물(진액)으로 구분하고, 그들의 성분 함량을 통해 바이오매스의 HHV를 예측하는 상관식이 존재하나^{[10][16]-[18]}, 원소분석이나 공업분석을 토대로 하는 상관식에 비해 신뢰성이 떨어진다. 이는 바이오매스의 화학 성분의 구성비가 여러 요인으로 다양하게 존재하기 때문이다^[2].

이에 본 연구에서는 목질계 바이오매스인 노송나무 톱

밥과 농업계 바이오매스인 왕겨에 대표적인 도시형 유기성 폐기물인 polystyrene과 polypropylene, 폐 종이를 혼합한 신연료에 대해, 원소분석을 통한 고위발열량의 예측 모델에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실 험

2-1. 바이오매스와 유기성 폐기물을 혼합한 샘플의 준비

모든 실험에서 사용한 시료는 농업계 바이오매스 자원인 왕겨와 산림계 바이오매스 자원인 노송나무 톱밥, 그리고 여기에 도시형 유기성 폐기물인 polystyrene, polypropylene, 폐 종이를 10, 30, 50 wt%로 각각 혼합하였다. 이때 준비된 샘플들은 표준 방식(상압가열감량 분석방법이용 : dry oven 속에서 105°C(±5°C)로 1시간 가열 후 데시케이터에서 안정화, 다시 120°C(±5°C)에서 1시간 가열 후 데시케이터에서 안정화)으로 처리한 후 충분히 건조된 상태로 보관하였다. 고위 발열량의 실험적인 측정에서는 0.5~0.8 g의 무게의 범위에서 샘플들을 정확히 칭량하여 사용하였다.

2-2. 성분원소분석

원소분석은 표준방식을 이용하여 사용된 각 샘플들(왕겨, 톱밥, polystyrene, polypropylene, 폐 종이 및 혼합형태의 샘플)의 C, H, O, N, S 5개 항목을 dry base 하에서 실시하였다. C, H, N, S는 원소분석기(Elementary Analyzer, CHNS-932, LECO Instruments)를 이용하여 측정하였고, O는 전체 성분 중 C, H, N, S의 함량을 제외한 나머지로 계산하였다. 이때 회분에 포함된 함량은 제외하였다.

2-3. 고위 발열량(Higher Heating Value, HHV) 측정

바이오매스의 고위발열량(HHV)은 분배식 단일소비 열량계(자동 열량측정계(Auto Calorimeter, AC-350, LECO Instruments))로 구하였다. 0.5~0.8 g의 샘플을 채취하여 셀에 담은 뒤 분배에 넣고 밀봉한 뒤, 산소(순도 99.99%)를 압력이 3.45×10⁶ Pa에 도달할 때까지 충전시킨 후, 전기적으로 샘플에 점화를 시켜 상승된 수온을 측정하여 구하였다. 오차범위는 ±60 kJ/kg 이었다.

3. HHV 예측 모델

3-1. 모델의 선택

문헌에 보고된 HHV 예측 모델 중에서, 본 연구에서 사용한 모델은 다음과 같은 기준을 통해 선택하였다.

- (1) 석탄, 도시형 고품폐기물, 바이오매스의 HHV를 예

측하는 모델

(2) 원소분석을 통해 예측하는 모델

원소분석을 통해 HHV를 예측하는 모델의 정확성이 다른 분석방법(proximate 분석, 생물학적 구성성분의 분석)에 비해 우수하다고 알려져 있고, 또한 최근에 발표되고 있는 바이오매스의 HHV를 예측하는 모델의 경우 석탄, 또는 도시형 고형폐기물의 HHV를 예측하는 모델을 변형하여 사용하였기에 위와 같은 기준을 통해 모델을 선택하였다.

3-2. 모델의 평가

예측 모델은 다음과 같이 정의된 통계학적 오차 및 상관계수를 이용하여 평가하였다.

절대 평균 오차(Average absolute error, AAE),

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^* - y_i}{y_i} \right| \times 100(\%) \quad (1)$$

편중 평균 오차(Average bias error, ABE),

$$ABE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^* - y_i}{y_i} \right| \times 100(\%) \quad (2)$$

상관계수(Correlation coefficient, R²)

$$R^2 = \frac{\sum (y_i \cdot y_i^*)}{[\sum (y_i^*)^2 \sum (y_i)^2]^{0.5}} \quad (3)$$

여기서, y_i는 HHV의 실험치, y_i^{*}는 예측치를 나타낸다. 상관관계식의 평균 오차를 나타내는 AAE, ABE의 경우, 그 수치가 낮은 경우에는 상관관계의 오차범위가 적은 것을 의미한다. 또한 이들이 양의 값을 갖는 상관관계식은 HHV가 다소 높게 평가 된다는 것을 의미하고, 반대로 음의 값을 갖는 경우 다소 낮게 평가된다는 것을 나타낸다. y_i와 y_i^{*} 사이의 상관관계를 나타내는 R²의 경

우 폭넓게 사용되고 있는 통계학적 회귀분석 방법의 계수로서, 이는 구하고자 하는 상관관계의 정확도를 나타낸다. 이 값이 높다는 것은 그 상관식이 바람직한 추산법이라 할 수 있다(완벽한 상관관계식에서 R²는 1을 갖는다).

4. 결과 및 고찰

4-1. 원소분석 결과 및 수분함량분석 결과

원료 바이오매스인 왕겨와 톱밥, polystyrene, polypropylene, 폐 종이의 각각의 샘플에 대한 기초분석 결과를 Table 1에 요약하였다. 또한 왕겨와 톱밥에 polystyrene, polypropylene, 폐 종이 등을 10, 30, 50 wt% 첨가하여 제작된 각 혼합샘플의 원소분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 화학적인 혼합이 아닌 물리적인 혼합이기 때문에 혼합 샘플에 대한 원소분석 결과는 개별 샘플의 원소분석 결과에 혼합비율을 고려하여 얻은 계산 값과 일치하였다.

실험을 통해 얻은 산림계 및 농업계 바이오매스자원인 왕겨, 톱밥, 폐 종이의 결과를 세계적으로 널리 사용되고 있는 Vienna University of Technology(Austria)의 Bio-fuel DB의 데이터와 비교한 결과 유사한 값이 나타났다^[4].

바이오매스가 기원인 세 가지 시료는 모두 탄소, 수소, 산소성분이 주 원소로서 구성성분의 대부분(93% 이상)을 차지하고 있었다. 대부분 휘발성분에 포함되어 있는 수소 성분은 왕겨가 4.264 wt%, 톱밥이 6.086 wt%, 폐 종이가 5.24 wt%를 각각 차지하였다. 질소는 절대값으로는 매우 적은 양으로만 존재하였으나, 왕겨와 톱밥을 비교하였을 때, 왕겨의 경우 일반적으로 농산물의 경우 재배 시 질소질 비료를 시비하는 경우가 있기 때문에 목질계 바이오매스에 비해 질소 성분이 많이 함유되어 있다고 생각할 수 있다. 황의 경우는 모든 시료에 있어서 검출한계치(10 ppm) 이하의 극미량이었다.

Table 1. Ultimate analysis of biomass materials and organic wastes (wt% on dry basis).

Sample No.	Materials	C			H			N			S			O		
		experiment	ref. ^a	ref. ^b	experiment	ref. ^a	ref. ^b	experiment	ref. ^a	ref. ^b	experiment	ref. ^a	ref. ^b	experiment	ref. ^a	ref. ^b
1	rice husk	36.07	39.65	-	4.26	4.88	-	0.35	0.92	-	-	0.12	-	59.32	54.43	-
2	sawmill	48.24	49.00	51.3	6.09	6.00	6.13	-	-	0.12	-	0.10	0.02	45.67	44.90	42.43
3	waste paper	39.95	43.40	49.3	5.24	5.80	7.07	1.99	0.30	0.7	0.02	0.20	0.15	52.80	50.30	42.78
4	polystyrene	84.45	-	92.3	15.38	-	7.70	0.13	-	-	0.04	-	-	-	-	-
5	polypropylene	85.00	-	85.60	14.23	-	14.40	0.71	-	-	0.06	-	-	-	-	-

note : ^a is a biobib D/B, database for biofuels, www.vt.tuwien.ac.at/biobib/info.html^[4]

^b is ECN Phyllis D/B, the composition of biomass and waste. http://www.ecn.nl/phyllis/^[5]

Table 2. Ultimate analysis of mixed biomass with organic wastes (wt% on dry basis).

Sample No.	Materials	C	H	N	S	O
9	rice husk+waste paper (10 wt%)	36.458	4.358	0.514	0.002	58.668
10	rice husk+waste paper (30 wt%)	37.234	4.554	0.842	0.006	57.364
11	rice husk+waste paper (50 wt%)	38.010	4.750	1.170	0.010	56.060
6	rice husk+polystyrene (10 wt%)	40.908	5.372	0.328	0.004	53.388
7	rice husk+polystyrene (30 wt%)	50.584	7.596	0.285	0.011	41.524
8	rice husk+polystyrene (50 wt%)	60.260	9.820	0.241	0.019	29.660
12	rice husk+polypropylene (10 wt%)	40.964	5.407	0.386	0.006	53.388
13	rice husk+polypropylene (30 wt%)	50.752	7.701	0.458	0.018	41.524
14	rice husk+polypropylene (50 wt%)	60.540	9.995	0.531	0.031	29.660
18	sawmill+waste paper (10 wt%)	47.411	6.001	0.199	0.002	46.387
19	sawmill+waste paper (30 wt%)	45.753	5.832	0.597	0.006	47.812
20	sawmill+waste paper (50 wt%)	44.095	5.663	0.995	0.010	49.237
15	sawmill+polystyrene (10 wt%)	51.861	7.015	0.013	0.004	41.107
16	sawmill+polystyrene (30 wt%)	59.103	8.874	0.040	0.011	31.972
17	sawmill+polystyrene (50 wt%)	66.345	10.733	0.066	0.019	22.837
21	sawmill+polypropylene (10 wt%)	51.917	7.050	0.071	0.006	41.107
22	sawmill+polypropylene (30 wt%)	59.271	8.979	0.213	0.018	31.972
23	sawmill+polypropylene (50 wt%)	66.625	10.908	0.356	0.031	22.837

Polystyrene과 polypropylene에서 나타난 결과(Table 1 참조)는 ECN Phyllis, IEA의 Bioenergy Task 32의 데이터와 비교한 결과^{[5]e}, polystyrene의 경우 다소 차이가 나타났으나, polypropylene의 경우 거의 일치하는 양상을 나타냈다. 각 바이오매스 성분에서 첨가물의 첨가량에 따른 HHV 변화를 보기위해 다음의 실험을 하였다.

4-2. 고위 발열량(HHV)의 분석

개별 시료에 대해서 봄베 식 자동 열량측정계(Auto Calorimeter, AC-350, LECO Instruments)를 이용하여 고위 발열량을 측정된 결과를 Table 3에 나타내었다. 결과로서 고분자 물질인 polystyrene(47.613 MJ/kg)의 HHV가 가장 높은 것으로 나타났으며, Polypropylene (42.640 MJ/kg), 톱밥(19.463 MJ/kg), 종이(15.577 MJ/

Table 3. Experimental higher heating value of biomass materials and organic wastes (dry basis).

Sample No.	Materials	HHV (MJ/kg)		
		experiment	ref. ^a	ref. ^b
1	rice husk	15.46	15.35	-
2	sawmill	19.46	20.51	20.48
3	waste paper	15.58	21.23	21.39
4	polystyrene	47.60	-	42.40
5	polypropylene	42.64	-	47.30

note : ^a is a biobib D/B, database for biofuels, www.tu.wien.ac.at/biobib/info.html^[4]
^b is ECN Phyllis D/B, the composition of biomass and waste. http://www.ecn.nl/phyllis/^[5]

kg), 왕겨(15.464 MJ/kg)의 순으로 측정되었다.

바이오매스 물질에 유기성 폐기물을 혼합한 시료의 측정된 HHV를 Table 4에 나타내었으며, 유기성 폐기물인 polystyrene, waste paper, polypropylene의 혼합비율에 따른 HHV의 변화를 Fig. 1, 2, 3에 각각 나타내었다. 그림에서 보여주듯이, 간섭에 의한 변화 등 다른 2차 반응의 양상은 보이지 않았고, 유기성 폐기물의 첨가에 의해 선형적으로 증가, 또는 감소하는 것으로 나타났다.

4-3. HHV의 예측과 평가

문헌에 소개된 HHV 예측 모델 중 본 실험과 유사한 조건의 10개 모델을 선택하여 본 연구에 적용시켰다. 10개의 상관관계식은 연료 샘플의 성분원소로부터 발열량을 용이하게 예측할 수 있으며, 석탄에 관한 상관관계식인 Boie^[14]의 식을 변형 혹은 그대로 자주 사용되고 있다. 많은 예측 모델이 엔지니어링적인 측면에서 많이 응용되고는 있으나, 다음과 같은 단점이 존재한다.^{[18][20]}

- 1) 원소분석치의 데이터 부족
- 2) 조정오차와 예측오차에 대한 고려부족
- 3) 미 분석원소에 대한 고려 부족

HHV 예측 모델을 일반화시키면 다음의 식(1)과 같이 나타낼수있다.

$$HHV = b_C C + b_H H + b_N N + b_O O + b_S S + b_0 \tag{1}$$

여기서 b_n 는 각각의 모델들에서 구해진 계수를 나타내고,

Table 4. Experimental higher heating value of mixed biomass with organic wastes (dry basis).

Sample No.	Materials	Higher heating value (MJ/kg)
9	rice husk+waste paper (10 wt%)	15.48
10	rice husk+waste paper (30 wt%)	15.49
11	rice husk+waste paper (50 wt%)	15.61
6	rice husk+polystyrene (10 wt%)	17.54
7	rice husk+polystyrene (30 wt%)	24.63
8	rice husk+polystyrene (50 wt%)	30.95
12	rice husk+polypropylene (10 wt%)	17.94
13	rice husk+polypropylene (30 wt%)	22.96
14	rice husk+polypropylene (50 wt%)	29.35
18	sawmill+waste paper (10 wt%)	18.65
19	sawmill+waste paper (30 wt%)	17.69
20	sawmill+waste paper (50 wt%)	16.48
15	sawmill+polystyrene (10 wt%)	23.16
16	sawmill+polystyrene (30 wt%)	29.18
17	sawmill+polystyrene (50 wt%)	35.68
21	sawmill+polypropylene (10 wt%)	20.43
22	sawmill+polypropylene (30 wt%)	24.64
23	sawmill+polypropylene (50 wt%)	30.13

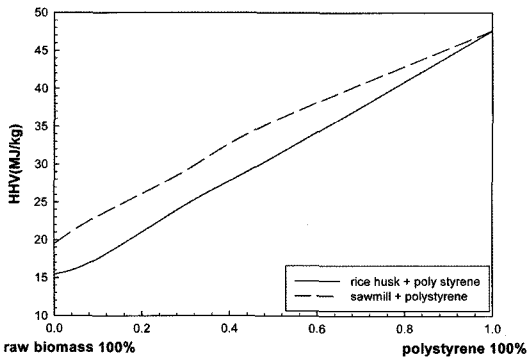


Fig. 1. Effect of HHV according to additive amount of biomass and polystyrene.

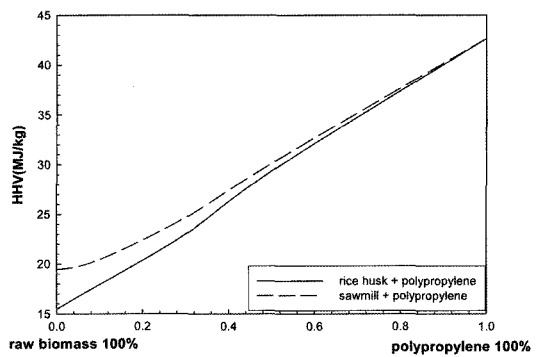


Fig. 3. Effect of HHV according to additive amount of biomass and polypropylene.

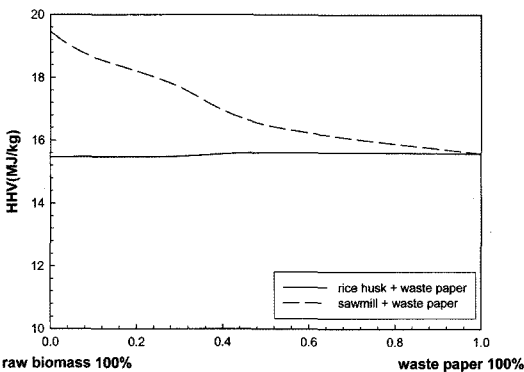


Fig. 2. Effect of HHV according to additive amount of biomass and wasted paper.

b_0 는 보정값을 나타낸다.

본연구에 사용한 10개의 HHV 예측 모델을 Table 5에 나타내었다. 이들 모델에 본 연구에서 구한 실험값을 사용하여 계수를 구하고, 10개의 모델에 적용하여 HHV 예측을 수행하였다.

상관관계식을 이용하여 발열량을 예측한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 여기서 보는 바와 같이 상관관계식을 이용하여 HHV를 예측한 결과 Boic와 Lloyd-Davenport 상관관계식의 경우 오차범위가 $\pm 5\%$ 범위로 좋은 예측 결과를 나타내었다. Tillman의 상관관계식(Fig. 4의 (c))의 경우 C 성분 하나만을 변수로 사용하는 상관관계식임에도 불구하고 오차범위가 $\pm 10\%$ 로 상당히 좋은 예측 결과를 나타내었다.

Table 5. HHV correlations and their evaluations.^a

No.	Name of author	Correlation (HHV, MJ/kg)	AAE (%)	ABE (%)	Coefficient, R ²
(1)	Boie ^{[18][20]}	0.3516C+1.16225H+0.0628N+0.10465S-0.1109O	11.257	-3.732	0.994
(2)	Lloyd-Davenport ^[19]	0.35777C+0.97757H-0.005938N+0.11187S-0.08451O	10.115	-2.874	0.996
(3)	Wilson ^{[20][22]}	0.32787C+1.40056(H-O/8)+0.207686(H-O/8)/2-0.02419N +0.09262S+0.099412(O/2)	13.208	-4.134	0.992
(4)	Tillman ^[15]	0.4373C-1.6701	11.540	-6.340	0.992
(5)	Cnangdong Sheng and J.L.T. Azevedo ^[2]	0.3259C+3.4597	13.463	-7.574	0.985
(6)	Demirbas ^[12]	0.335C+1.423H-0.145N-0.154O	14.971	-8.794	0.989
(7)	Jenkins ^[23]	0.301C+0.525H+0.064O-0.763	13.054	-2.810	0.986
(8)	Ruyter ^[24]	0.4912C-0.9119H+0.1177O	25.654	9.533	0.957
(9)	Mott and Spooner ^[20]	0.4925C-0.926H+0.0193S+0.1176O	25.639	9.353	0.957
(10)	Francis ^[11]	0.4302C-0.1867H-0.1274N+0.1786S+0.1842O-2.3799	31.453	21.543	0.959

^aBiomass composition, C, H, N, S, O are weight percent on dry biomass basis.

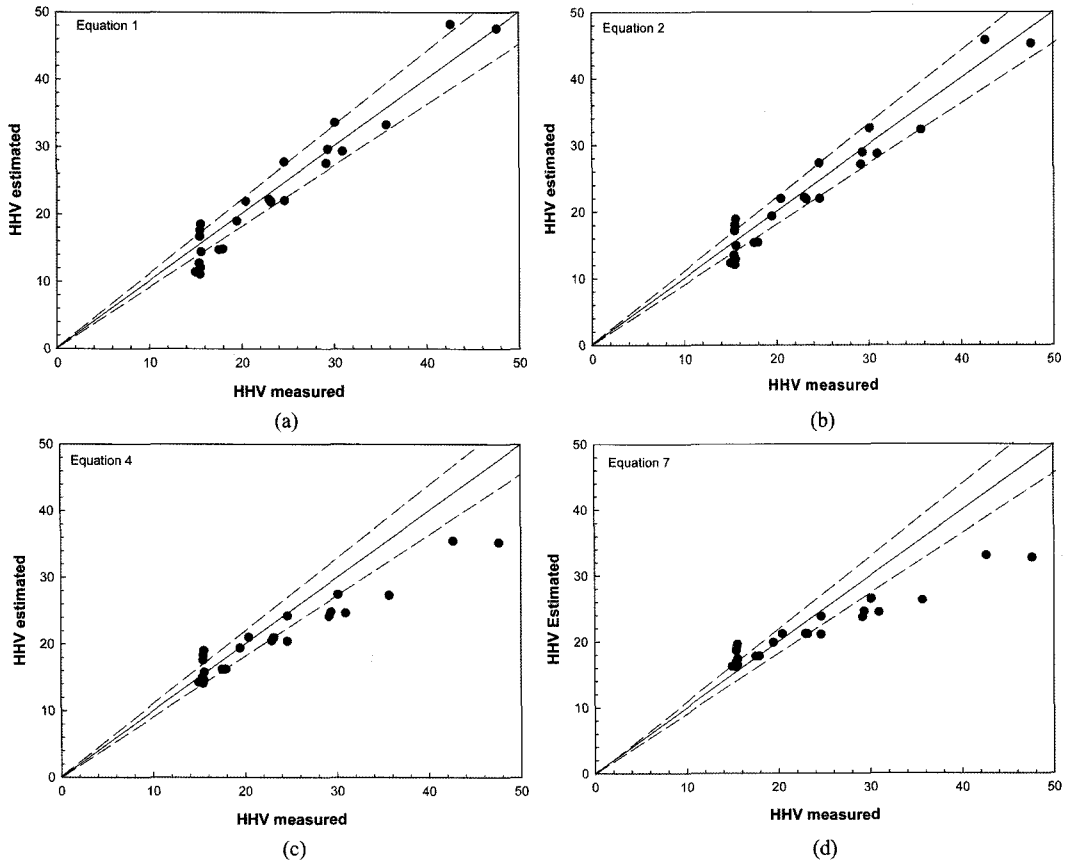


Fig. 4. Comparison of measured and estimated HHVs. (a) Eq. (1), (b) Eq. (2), (c) Eq. (4), (d) Eq. (7). The Solid lines indicate the estimation equals to the measured value, while the dashed lines denote ±5% relative errors.

주요 구성성분원소와 HHV와의 관계를 Fig. 5에 나타냈다. 그림을 통해 C 성분(Fig. 5a)과 H 성분(Fig. 5b)

이 증가함에 따라 HHV가 선형적으로 증가하는 양상을 볼 수 있고, O 성분(Fig. 5c)의 증가에 따라 HHV가 반

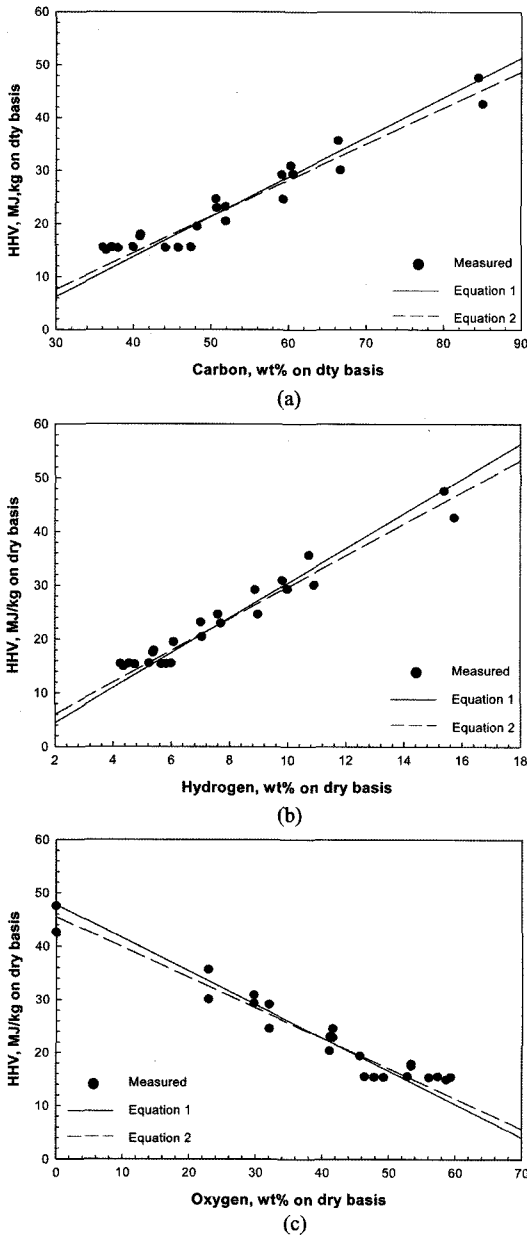


Fig. 5. The change of HHV following to the contain ratio of main elements in fuels (a) carbon, (b) hydrogen, (c) oxygen.

대로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

또한 이들 상관관계식을 통해 예측된 HHV의 평가 결과를 Table 5에 나타내었다. 몇몇 모델에서 예측에 대한 평균 오차가 다소 높게 나오기도 하였다. 절대 평균 오차(AAE)의 결과를 살펴보면, 7개의 모델에서 15% 미

만(10.115~14.971%)의 평균오차를 가지고는 있었으며, 3개의 모델에서는 25% 이상의 큰 오차를 나타냈다. 편중 평균 오차(ABE)의 경우 Francis 상관관계식을 제외하고는 ±10% 미만으로 나타났으며, 4개의 상관관계식에서는 5% 미만의 오차를 나타냈다. 상관계수(R²)를 구한 결과 오차가 어느 정도 있음에도 최소 0.957에서 최대 0.996까지 나타냈다. 본 실험에서 이용된 모델 중에서 가장 좋은 값을 나타낸 상관관계식은 5가지의 원소를 모두 사용하는 Boic와 Lloyd-Davenport의 상관관계식으로 나타났다.

지금까지 보고된 대부분의 상관관계식들은 석탄, 도시형 고형 폐기물, 바이오매스 단일 물질만을 대상으로 하기 때문에, 본 실험과 같이 바이오매스와 유기성 폐기물을 혼합한 샘플에 대해서는 바이오매스의 종류뿐만 아니라, 지역적인 독특한 특색을 고려하여 엔지니어링적인 관점에서 상황에 맞는 상관관계식을 이용하는 것이 보다 바람직하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 바이오매스와 유기성 폐기물을 혼합한 시료에 대하여, 봄베 식 단열소비 열량계를 이용하여 실험적으로 발열량을 측정하였고, 기존에 제시된 10개의 HHV 예측 모델로부터 구한값과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실험적으로 측정된 고위 발열량에 있어서 고분자 화합물인 polystyrene이 가장 높은 값을 나타내었으며, 톱밥, 왕겨, 종이의 순으로 나타났다. 왕겨와 톱밥에 polystyrene과 폐 종이, polypropylene을 혼합한 샘플의 고위 발열량 측정에서, 간섭에 의한 발열량의 변화 등 2차 반응은 확인되지 않았으며, 단순히 선형적으로 증가, 또는 감소하는 경향을 나타내었다.

2. 원소분석을 통해 고위발열량을 예측하는 상관관계식들이 상대적으로 proximate분석이나 생물화학적 분석을 토대로 하는 상관관계식에 비해 정확도가 높았다.

3. 바이오매스에 유기성 폐기물을 혼합한 샘플들의 고위발열량 예측에 사용된 10개의 상관관계식의 상관계수들은 0.957 이상이었으며, 석탄에 적용된 모델, 도시형 고형폐기물에 적용된 모델 등 각기 다른 다양한 분야에 적용된 상관관계식임에도 불구하고 본 실험과 같은 바이오매스와 유기성 폐기물의 혼합물에 대해서도 유용한 관계식임을 보여주었다.

감 사

본 연구는 서울특별시의 “서울시 전략산업 혁신 클러

스터 육성 지원사업(과제명 : 고밀도 지역의 주거 및 상업용 신재생에너지 기술, the Seoul R & BD Program)의 일환으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Friedl, A.; Padouvas, E.; Rotter, H.; Varmuza, K. Prediction of heating value of biomass fuel from element composition, *Analytica Chimica Acta*, 2005, 544, 191-198.
- Chanhdong Sheng, J.L.T. Azevedo, Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data, *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28, 499-507.
- Ministry of Environment, Korea, Report No. 20011-1480083-000247-104, 2004.
- Hofbauer, H. BIOBIB - A Database For Biofuels, Institute of Chemical Engineering, Vienna University of Technology, Austria, Vienna, 2004, www.vt.tuwien.ac.at/biobib/info.html.
- ECN Phyllis: the composition of biomass and waste. <http://www.ecn.nl/phyllis/>.
- IEA Bioenergy Task 32, Biomass combustion and cofiring. <http://www.ieabcc.nl/>.
- Werther, J.; Saenger, M.; Hartge, E.U.; Ogada, T.; Siagi, Z. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, 26(1), 1-27.
- Williams, A.; Pourkashanian, M.; Jones, J.M. Combustion of pulverized coal and biomass. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27(6), 587-610.
- Sami, M.; Annamalai, K.; Wooldridge, M. Co-firing of coal and biomass fuel blends, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27(2), 171-214.
- Jimenez, L.; Gonzales, F. Study of the physical and chemical properties of lignocellulosic residues with a view to the production of fuels, *Fuel*, 1991, 70(8), 947-950.
- Cordedo, T.; Marquez, F.; Rodriguez-Mirasol, J.; Rodriguez, J.J. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis, *Fuel*, 2001, 80(11), 1567-1571.
- Demirbas, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels, *Fuel*, 1997, 76(5), 431-434.
- Corbitt, R.A. *Standard Handbook of Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1989.
- Gumz, W.; Hardt, L. *Kurzes Handbuch der Brennstoff.und Feuerungstechnik*, Springer-Verlag, Berlin, 1962.
- Tillman, D.A. *Wood as an energy resource*. New York: Academic Press, 1978.
- Demirbas, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy Conversion & Management*, 2001, 42(2), 183-188.
- Shajizadeh, F.; Degroot, W.G. *Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins*. New York, Academic Press, 1976.
- Annamalai, K.; Sweeten, J.M.; Ramalingam, S.C. Estimation of gross heating values of biomass fuels. *Transactions of ASAE*, 1987, 30, 1205-1208.
- Lloyd, W.G.; Davenport, D.A. *J. Chem. Educ.*, 1980, 57, 56-60.
- Kathiravale, S.; Yunus, M.N.M.; Sopian, K.; Samsuddin, A.H.; Rahman, R.A. Modeling the heating value of Municipal Solid Waste, *Fuel*, 2003, 82, 1119-1125.
- Meraz, L.; Oropeza, M.; Dominguez, A. *Chem. Educator*, 2002, 7, 66-70.
- Wilson, D.L. *Environ. Sci. Technol.*, 1972, 6, 1119-1121.
- Jenkins, B.M.; Ebeling, J.M. Correlations of physical and chemical properties of terrestrial biomass with conversion, *Symposium energy from biomass and waste IX IGT*, 1985, 371.
- Zanzi, R. Sjöström K, Björnborn E. Rapid pyrolysis of agricultural residues at high temperature, *Biomass Bioenergy*, 2002, 23(5), 357.