

# 회귀분석을 이용한 C소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 저위발열량 예측 Estimation of Lower Heating Value (LHV) of Municipal Solid Waste (MSW) Being Brought into C Incinerator Using Multiple Regression Analysis

김은영 · 서정윤<sup>†</sup>

Eun-Young Kim · Jeoung-Yoon Seo<sup>†</sup>

창원대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Changwon National University

(2013년 1월 14일 접수, 2013년 6월 17일 채택)

**Abstract :** The main purpose of the present study was to establish a quicker and cheaper model for predicting the LHV of MSW based on its wet physical composition being brought into C Incinerator. The one regression model was developed to correlate the energy content with variables from physical composition based on a wet matter. The performance of this model for MSW of the C Incinerator was superior to that of equations developed on a dry matter basis by other researchers for estimating energy content. The applicability of this model at the other 4 incinerators showed also an acceptable precision level.

**Key Words :** Lower Heating Value, Municipal Solid Waste, Physical Composition Based on Wet Matter, Incinerator

**요약 :** 이 연구에서는 C소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 저위발열량을 추정할 수 있는 다중회귀직선식을 도시고형폐기물의 습량기준 물리적 조성 성분들로부터 유도하였다. 다중회귀직선식은  $LHV = 1,670 + 39.20 PI + 11.19 Pa - 11.27 Fo$ 이었다. 여기서 LHV: 저위 발열량(kcal/kg), PI: 습량기준 페플라스틱류(wt %), Pa: 습량기준 폐종이류(wt %), Fo: 습량기준 음식물류(wt %)이다. 유도된 식의 수정결정계수( $R^2$ )는 0.7476이었고, 이 식에 의한 추정 저위발열량과 측정 저위발열량의 절대백분율오차 평균은 2.42%로 아주 작았다. 그러므로 이 연구에서 유도된 식의 정확성이 높다는 것을 의미한다. 그리고 유도된 식으로 다른 4개 소각장에 반입되는 도시고형폐기물들에 대하여 추정 저위발열량과 측정 저위발열량의 절대백분율오차 평균은 수용할 수 있는 범위(4.74~20.11%)이었다. 더욱이 이 방법은 습량기준 도시고형폐기물의 물리적 조성 성분별로 분류하여 각 조성 성분들의 습량기준 중량 비율만 분석하면 도시고형폐기물의 저위발열량을 추정할 수 있어 보다 경제적이고 또한 대단히 효율적이다.

**주제어 :** 저위발열량, 도시고형폐기물, 습량기준 물리적 조성, 소각장, 다중회귀직선식

## 1. 서론

도시고형폐기물은 우리들의 생활과 여러 가지 활동들에 의해서 발생된다. 이러한 폐기물의 매립은 물, 토양, 대기 오염 등의 문제들을 발생시키고 매립장 확보도 어렵기 때문에 가급적 무기성 폐기물만 매립되도록 규제가 강화되고 있다.

더욱이 자연 자원의 부존 양은 한계가 있으나 인구 증가와 인간의 욕구를 충족하기 위한 과학의 발달과 더불어 보다 많은 자원이 소비되고 있다. 이러한 자원의 소비는 도시고형 폐기물의 양적 증가와 환경에 미치는 악 영향들로 인하여 다 시금 우리 인간들에게 여러 가지의 피해를 주고 있다.

그러므로 도시고형폐기물로부터 재이용 가능한 자원을 회수하려는 노력들이 활발하게 이루어지고 있고 이것을 도시 광산이라고 한다. 도시고형폐기물로부터 자원을 회수·이용 하는 것은 자연 자원의 소비를 줄일 뿐만 아니라 필요한 자 원을 가공하는 과정에서 오염물질의 발생 방지 및 필요한 에 너지도 절약할 수 있어 환경보호에도 크게 이바지하게 된다.

우리나라의 도시고형폐기물 소각률은 전년 대비('09 20.3%, '10 21.6%) 크게 증가하지 않았으나, 주민반대 등으로 지연

되던 사업들이 점차 추진됨에 따라 증가할 것으로 예상된다.<sup>1)</sup>

도시고형폐기물의 재활용을 극대화하기 위하여 도시고형 폐기물을 최대한 재활용 하고난 후 더 이상 재활용이 불가능 하더라도 가연성 도시고형폐기물은 그 자체가 가지고 있는 에너지까지도 회수·재활용 되어야 한다. 따라서 많은 자치 단체들이 더 이상 재활용이 어려운 가연성 도시고형폐기물 로부터 에너지를 회수하기 위하여 소각장을 운영하고 있다. 소각장의 설계와 운영을 위해서는 도시고형폐기물의 에너지 함량이 중요한 요인이 된다.<sup>2)</sup> 그리고 소각장에 유입되는 가 연분의 에너지 함량은 그 주변지역에서 도시고형폐기물의 재활용 정도에 따라 영향을 받을 수 있다.

도시고형폐기물의 에너지 함량은 실제 보일러를 이용하거 나 실험실용 측정 장치(bomb calorimeter)에서 측정될 수 있 다. 또한 경험식들에 의하여 추정되기도 한다. 도시고형폐기 물의 에너지 함량을 직접 측정하는 것은 비용뿐만 아니라 시 간 그리고 기술적인 면에서 비경제적이다. 그러므로 도시고 형폐기물의 에너지 함량을 추정하기 위한 경험식들을 많이 만들어 사용하고 있다. 이러한 경험식들은 폐기물의 3성분 분석(approximate analysis), 물리적 성분 분석 그리고 원소

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: syseo@changwon.ac.kr Tel: 055-213-3742 Fax: 055-281-3011

**Table 1.** Summary of equations for predicting LHV of municipal solid waste (MSW) based on physical composition analysis

$LHV = [88,2PI + 40,5 (Fo+Pa)] \frac{100-W}{100} - 6W$	(1) <sup>3)</sup>
$LHV = 2229,91+7,91Pa+28,16PI+4,87Ga-37,28W$	(2) <sup>4)</sup>
$LHV = (38,52Pa+92,09PI+49,24Te+38,34Wo+37,55Fo) \frac{100-W}{100} - 6W$	(3) <sup>5)</sup>
$LHV = (37,2(Pa+Fo)+44,6Te+76,5PI+40,7Wo) \frac{100-W}{100} - 6W$	(4) <sup>6)</sup>
$LHV = (35,19Pa+71,17PI+36,24Te+48,06Wo+42,21Fo) \frac{100-W}{100} - 6W$	(5) <sup>2)</sup>
$LHV = (39,04Pa+101,47PI+38,47Fo) \frac{100-W}{100} - 6W$	(6) <sup>2)</sup>

**Remark**

- LHV : Lower heating value (kcal/kg)
- W : Moisture (wt %) on wet basis
- Fo : Food waste (wt%) on dry basis
- Pa : Paper (wt%) on dry basis
- PI : Plastics (wt%) on dry basis
- Te : Textile & Rubber (wt%) on dry basis
- Wo : Wood (wt%) on dry basis
- Nc : Noncombustibles (wt%) on dry basis
- Ga : Fo + Te + Wo (wt%) on dry basis
- Fo + Pa + PI + Te + Wo + Nc = 100 (wt %)

분석(ultimate analysis)을 기초로 만들어졌다. 이들 중 원소 및 3성분 분석보다는 물리적 성분 분석이 비용이나 기술적 그리고 시간적인 면에서 경제적이다.

지금까지 도시고형폐기물의 에너지 함량을 추정하기 위하여 비교적 분석하기 쉬운 물리적 성분들로부터 만들어진 경험식들은 Table 1과 같다. 이들 식들로부터 도시고형폐기물의 에너지 함량을 추정하기 위해서는 도시고형폐기물을 건조해야 하고 건조 후 각 물리적 성분별로 분리 측정되어야 한다. 그러나 도시고형폐기물을 건조한다는 것 또한 쉬운 것이 아니다.

C도시의 도시고형폐기물 중 재활용이 가능한 것들은 분리 수집되어 재활용폐기물 단지로 유입되고 재활용이 불가능한 것 중 소각 가능한 도시고형폐기물은 소각장으로 반입된다. 혼합 균질화된 폐기물이 투입구를 통해 소각로에 투입되면 3단계로 구성된 화격자 위를 이동하면서 건조, 연소, 후 연소 과정 및 연소가스의 2차 연소를 거쳐 완전 연소된다. 연소가스 냉각설비인 폐열회수보일러는 도시고형폐기물 소각 시 발생하는 섭씨 900℃ 이상의 고온 연소가스를 섭씨 220℃ 이하로 냉각시키는 역할을 하며, 냉각된 연소가스에 포함된 다이옥신 및 중금속 등은 반건식반응탑에서 액상소석회를 분사하여 배출가스 내에 있는 산성가스와 반응하고 반응물은 여과집진설비에서 황성탄 및 먼지 등과 함께 포집 제거된다. 도시고형폐기물 소각 후 연소가스 냉각과정에서 발생하는 다량의 증기는 소각장 내 냉·난방과 도시고형폐기물 소각과정에 필요한 공기에열에 사용되고 스팀에너지를 이

용한 증기터빈발전기를 가동하여 생산된 전력은 소각장 내 이용 및 한전에 매전하고 있다.

따라서 이 연구에서는 C도시의 소각장에 유입되는 도시고형폐기물을 건조하지 않고 물리적 성분들을 분리하고 이들의 습량기준 중량 비율과 실제 측정·계산된 저위발열량으로부터 다중회귀직선식을 만들어 이용 가능성을 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료

C시의 소각장으로 반입되는 도시고형폐기물을 대상으로 하였다. 월 1회 시료를 채취하여 2년 동안 총 24개 시료에 대하여 분석하였다.

### 2.2. 시료 채취 및 분석방법

소각장의 저장 pit로 반입된 도시고형폐기물을 크레인을 이용하여 pit에서 잘 혼합하여 200~300 kg을 채취한 후 원추4분법<sup>7)</sup>으로 반복 축분하여 20~30 kg 취하였다. 이 시료를 각 물리적 성분별 수작업으로 분리하여 전체 습량기준 도시고형폐기물의 물리적 조성을 측정하였다. 그 후 각 물리적 조성별로 구분된 시료를 건조기에서 건조하여 습량 기준 시료에 대한 각 물리적 조성 성분별 수분 함량을 측정하였다. 건조된 각 물리적 조성 성분별 시료들로부터 가연분 시료들을 분쇄기로 입자 크기 1 mm 이하로 분쇄한 후 이 시료들을 다시 볼 분쇄기(ball grinder)에서 분쇄하였다. 이 시료로 각 물리적 조성 성분별 고위발열량을 자동열량계(PARR 6400, U.S.A.)에서 측정하고 측정 결과로부터 도시고형폐기물의 저위발열량을 계산하였다.

### 2.3. 저위발열량 추정 다중회귀직선식

소각장에 유입되는 습량기준 도시고형폐기물의 물리적 조성 성분들을 기반으로 한 가능한 저위발열량 추정 다중회귀직선식의 독립변수 조합(총 23개)을 Table 2에 나타내었다. 독립 변수가 2개와 3개인 다중회귀직선식들은 물리적 조성 성분 사이의 상관관계가 높은 성분의 함량을 고려하였고 독립 변수가 4개와 5개인 다중회귀직선식들은 가능한 조합 모두에 대하여 검토하였다. 이 다중회귀직선식들 중 적합성은 결정계수(R<sup>2</sup>), 수정된 결정계수( $\bar{R}^2$ ) 그리고 회귀식에 의한 추정 값의 표준오차(Standard Error of the Estimate)로 평가하였다. 회귀분석은 SPSS ver.20 통계프로그램을 활용하였다.

### 2.4. 저위발열량 추정 다중회귀직선식 평가

이전 연구들에서 발표된 기존의 6개 다중회귀직선식과 이 연구에서 가정 적합한 것으로 선택된 다중회귀직선식으로부터 계산된 추정 저위발열량과 실측 저위발열량의 오차 크

**Table 2.** Model structures based on independent variable number and combinations

Model names and abbreviations	Independent variables					
	Fo	Pa	Pl	Te	Wo	Nc
Two independent variable models						
2M-1	+		+			
Three independent variable models						
3M-1	+	+	+			
Four independent variable models						
4M-1	+	+	+	+		
4M-2	+	+	+			+
4M-3	+	+		+		+
4M-4	+		+	+		+
4M-5		+	+	+		+
4M-6	+	+	+			+
4M-7	+	+		+		+
4M-8	+		+	+		+
4M-9		+	+	+		+
4M-10	+	+			+	+
4M-11	+		+		+	+
4M-12		+	+		+	+
4M-13	+			+	+	+
4M-14		+		+	+	+
4M-15			+	+	+	+
Five independent variable models						
5M-1	+	+	+	+	+	
5M-2	+	+	+	+		+
5M-3	+	+	+		+	+
5M-4	+	+		+	+	+
5M-5	+		+	+	+	+
5M-6		+	+	+	+	+

Fo : Food waste (wt %)      Pa : Paper (wt %)  
 Pl : Plastics (wt %)      Te : Textile & rubber (wt %)  
 Wo : Wood (wt %)      Nc : Noncombustibles (wt %)  
 All contents are based on a wet matter

기를 의미하는 절대백분율오차의 평균(MAPE: Mean absolute percentage error)을 비교 검토하였다. 절대백분율오차의 평균은 추정 저위발열량( $X_e$ )과 실측 저위발열량( $X_m$ )과의 상대 오차를 의미하며 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다. 여기에서  $n$ 은 데이터 수이다.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{ei} - X_{mi}|}{X_{mi}} \times 100 (\%)$$

그 외에 이 연구에서 C소각장에 반입되는 도시고형폐기물 저위발열량을 추정하기 위하여 유도된 다중회귀직선식을 다른 소각장의 도시고형폐기물 저위발열량 추정에 이용 가능 한지에 대하여도 평가하였다.

**Table 3.** Physical composition of mixed MSW based on a dry matter

Items	N	max	min	A.V.	STD	C.V.
Food (wt %)	24	23.66	8.23	15.53	4.15	26.69
Paper (wt %)	24	50.96	30.61	41.60	5.36	12.87
Plastics (wt %)	24	33.78	17.39	25.85	3.95	15.30
Rubber & textile (wt %)	24	13.95	1.99	7.61	2.93	38.49
Wood (wt%)	24	3.14	0.12	1.22	0.76	62.31
Noncombustables (wt %)	24	17.09	1.75	8.20	4.53	55.21
Sum	24	-	-	100	-	-
HHV (kcal/kg)	24	5,037	4,181	4,685	228	4.87
LHV (kcal/kg)	24	3,316	2,354	2,973	200	6.78

N: Number      Max: Maximum  
 Min: Minimum      A.V.: Average  
 STD: Standard deviation      C.V.: Coefficient of variation  
 HHV (kcal/kg): Higher heating value  
 LHV (kcal/kg): Lower heating value

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 도시고형폐기물 특성

Table 3에는 C소각장에 유입되는 도시고형폐기물의 습량 기준 물리적 조성을 나타내었다. 폐종이류의 함량이 평균 41.60%로 가장 높았고 다음이 플라스틱류 25.85%, 음식물류 15.53%, 불연성 8.20%, 폐고무 및 폐섬유류 7.61%, 폐목재류 1.22% 순으로 낮았다. 폐종이류, 폐플라스틱 그리고 음식물류 3성분이 82.98%를 차지하였다. 이것은 습량기준 총 가연분(91.80%)의 76.18%이었다. 각 물리적 조성 성분들의 비율이 낮아수록 변이계수는 커지는 경향을 볼 수 있다.

고위발열량의 최대와 최소값은 각각 5,037 kcal/kg, 4,187 kcal/kg이었다. 표준편차는 228 kcal/kg으로 다소 그 차이가 있었으며, 변동계수는 4.87%이었다. 저위발열량의 경우 최대와 최소값은 각각 3,316 kcal/kg, 2,354 kcal/kg이었으며 평균은 2,973 kcal/kg이었다. 표준편차는 200 kcal/kg, 변동계수가 6.78%로 고위발열량 보다는 다소 변동이 컸다. 이는 수분의 변동에 따른 영향을 받는 것으로 생각된다. 계절별로는 고위발열량 평균값과 표준편차는 각각 봄 4,755 kcal/kg과 217 kcal/kg, 여름 4,774 kcal/kg과 212 kcal/kg, 가을 4,689 kcal/kg과 249 kcal/kg 그리고 겨울 4,523 kcal/kg과 196 kcal/kg이었다. 저위발열량과 표준편차는 봄 2,970 kcal/kg과 231 kcal/kg, 여름 2,999 kcal/kg과 111 kcal/kg, 가을 2,991 kcal/kg과 112 kcal/kg 그리고 겨울은 2,993 kcal/kg과 283 kcal/kg이었다. 고위발열량의 변동계수는 봄 4.56%, 여름 4.44%, 가을 5.32%, 겨울 4.33% 그리고 저위발열량의 변이계수는 봄 7.78%, 여름 7.70%, 가을 3.74%, 겨울 9.65%이었다. 수분의 변동 때문에 계절별 저위발열량의 변동계수도 고위발열량의 변동계수보다 컸다.

**Table 4.** Correlation coefficient of MSW

	LHV	Fo	Pa	PI	Te	Wo	Nc
LHV	1						
Fo	-.640**	1					
Pa	-.091	.004	1				
PI	.786**	-.474*	-.496*	1			
Te	.032	-.190	-.292*	.154	1		
Wo	.156	-.409*	-.184**	.226	-.194	1	
Nc	-.040	-.314	-.533	.009	-.229	.352	1

\*:  $p \leq 0.05$ , \*\*:  $p \leq 0.01$  LHV: Lower heating value (kcal/kg)  
 Fo: Food waste (wt %) Pa: Paper (wt %)  
 PI: Plastics (wt %) Te: Textile & Rubber (wt %)  
 Wo: Wood (wt %) Nc: Noncombustibles (wt %)  
 All percentages are based on a wet matter

**3.2. 상관관계**

C소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 저위발열량과 각 물리적 조성 성분들 사이에는 **Table 4**와 같은 상관계수를 나타내었다. 저위발열량과 상관계수는 폐플라스틱류(PI)가 0.786, 음식물류 -0.640으로 높았으나 그 외 폐목재류 0.156, 폐종이류 -0.091, 불연분 -0.040, 폐섬유류와 폐고무류 0.032로 비교적 낮았다.

**3.3. 저위발열량 추정 다중회귀직선식**

**Table 5**는 23개 도시고형폐기물의 저위발열량 추정 다중회귀직선식들의 통계적 분석 결과이다. 일반적으로 추정 다중회귀직선식들의 적합성은 결정계수( $R^2$ ), 회귀식에 의한 추정 값의 표준오차(Standard Error of the Estimate)로 나타낼 수 있다. 결정계수는 독립변수의 총 분산 중에서 회귀식으로 설명할 수 있는 분산의 비율을 의미한다. 결정계수를 사용할 때 주의할 점은 결정계수의 값이 크다고 해서 반드시 주어진 회귀식이 보다 적합함을 의미하지는 않는다. 결정계수는 종속변수에 대한 독립변수의 설명력 크기를 나타내기 때문에 독립변수들이 추가되면 될수록 설명력의 크기인 결정계수는 커지게 마련이다.<sup>8)</sup> 따라서 독립변수들의 개수가 결정계수에 미치는 영향을 수정해 줄 필요가 있는데 이를 수정결정계수( $\bar{R}^2$ )라 한다. 2M, 3M, 4M, 5M식에 사용된 독립변수의 개수가 다르므로 수정결정계수로 가장 적합한 모형을 선택하였다. 3M-1과 4M-9의 수정결정계수( $\bar{R}^2$ )가 0.7476과 0.7477로 가장 큰 것을 알 수 있다. 그러나 추정 값의 표준오차는 3M-1 94.17 그리고 4M-9 94.16으로 가장 작다. 수정결정계수의 값이 아주 근소한 차이라면 가능한 적은 수의 의미 있는 변수들로 표현해야 한다는 회귀분석 원칙에 의하여 3M-1식을 이 연구에서 가장 적합한 다중회귀직선식으로 선택하였다. 그

**Table 5.** Statistical results of LHV empirical models

Eq.	SSR	MSR	SSE	MSE	$R^2$	Adjusted $\bar{R}^2$	SEE
2M-1	574,381	287,190	233,910	11,139	0.7106	0.6831	105.54
3M-1	630,922	210,307	177,369	8,868	0.7806	0.7476	94.17
4M-1	633,173	158,293	175,118	9,217	0.7833	0.7377	96.00
4M-2	636,485	159,121	171,805	9,042	0.7874	0.7427	95.09
4M-3	381,554	95,388	426,737	22,460	0.4721	0.3609	149.87
4M-4	616,812	154,203	191,478	10,078	0.7631	0.7132	100.39
4M-5	595,592	148,898	212,699	11,195	0.7369	0.6815	105.80
4M-6	635,964	158,991	172,327	9,070	0.7868	0.7419	95.24
4M-7	596,995	149,249	211,295	11,121	0.7386	0.6836	105.46
4M-8	625,814	156,454	182,476	9,604	0.7742	0.7267	98.00
4M-9	639,848	159,962	168,442	8,865	0.7916	0.7477	94.16
4M-10	450,373	112,593	357,917	18,838	0.5572	0.4640	137.25
4M-11	603,942	150,985	204,349	10,755	0.7472	0.6940	103.71
4M-12	634,183	158,546	174,107	9,164	0.7846	0.7393	95.73
4M-13	416,614	104,154	391,676	20,615	0.5154	0.4134	143.58
4M-14	43,147	10,787	765,144	40,271	0.0534	-0.1459	200.68
4M-15	510,935	127,734	297,356	15,650	0.6321	0.5547	125.10
5M-1	643,633	128,727	164,658	9,148	0.7963	0.7397	95.64
5M-2	643,633	128,727	164,658	9,148	0.7963	0.7397	95.64
5M-3	643,633	128,727	164,658	9,148	0.7963	0.7397	95.64
5M-4	643,633	128,727	164,658	9,148	0.7963	0.7397	95.64
5M-5	643,633	128,727	164,658	9,148	0.7963	0.7397	95.64
5M-6	643,633	128,727	164,658	9,148	0.7963	0.7397	95.64

SSR: Regression sum of squares MSR: Mean square due to regression SSE: Residual sum of squares  
 MSE : Mean square due to error SEE: Standard error of estimate

식은 다음과 같다.

$$LHV = 1,670 + 39.20 PI + 11.19 Pa - 11.27 Fo \quad (7)$$

여기서 LHV: 저위발열량(kcal/kg)

PI: 습량기준 폐플라스틱류의 중량 %

Pa: 습량기준 폐종이류 중량 %

Fo: 습량기준 음식물류 중량 %이다.

이 식 (7)은 6개 물리적 조성 성분 중 폐플라스틱류, 폐종이류와 음식물류를 포함하고 있다. 이 3가지 물리적 조성 성분 비율은 전체 폐기물 중 82.98%를 차지한다(Table 3). 그러므로 이들이 소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 저위발열량에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. Chang<sup>2)</sup>은 1,282

개의 시료 수로부터 유도된 식 (5)와 (6)의 수정결정계수( $\bar{R}^2$ )가 0.9831 그리고 0.9753이라고 보고하였다. 이 수정결정계수들과 비교하면 이 연구에서 유도된 다중회귀직선식 (7)의 수정결정계수는 상당히 작다. 이러한 원인은 Chang의 경우는 폐기물이 발생하는 전체 도시를 대상으로 하여 도시고형 폐기물의 성분 차이가 크지 않은 반면에 소각장에 반입되는 도시고형폐기물 성분들은 수거지역 내에서 폐기물 재활용의 정도 따라 큰 차이가 있기 때문으로 생각된다.

### 3.4. 추정 다중회귀직선식 평가

Fig. 1에는 C소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 실제 측정된 저위발열량과 지금까지 발표된 다중회귀직선식들(Table 1)에 의한 추정 저위발열량을 비교한 것을 나타내었다. 추정

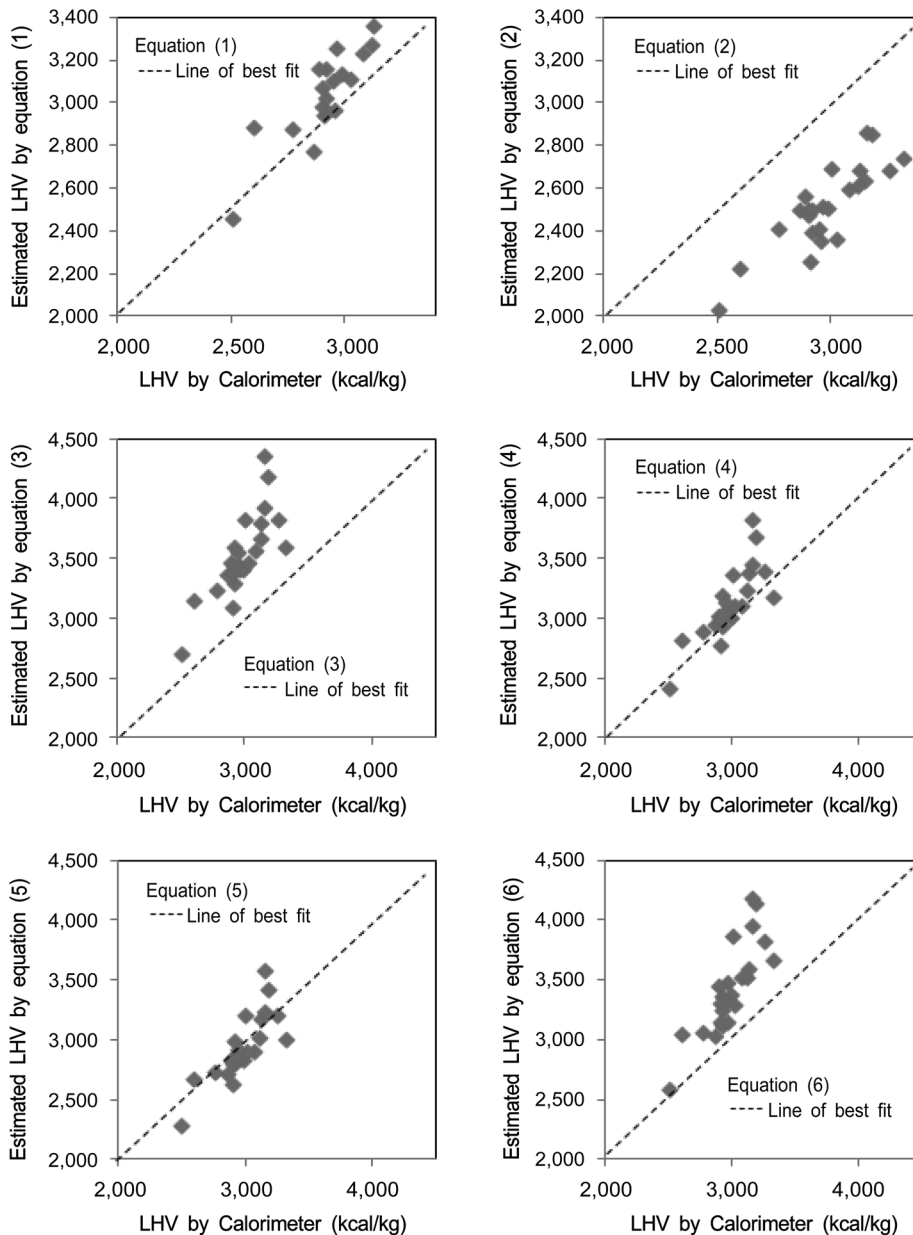


Fig. 1. Comparisons of LHV by calorimeter and predictions for demonstration program.

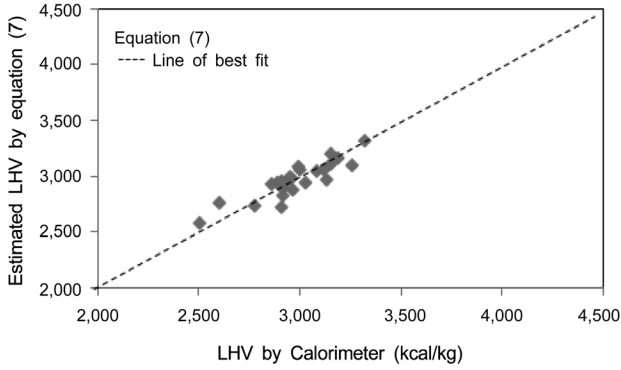


Fig. 2. Comparison of LHV's from calorimeter and prediction model equation (7).

저위발열량은 측정된 저위발열량이 증가할수록 증가하였다. 이들 식들로부터 저위발열량을 추정하기 위해서는 도시고형폐기물의 건량기준 물리적 조성 비율들을 대입하여야 한다. 이렇게 건량기준 물리적 조성 비율들을 대입하여 추정된 저위발열량들에서 식 (1), (3), (4)와 (6)은 추정 값이 실측값보다 높게 평가되었고 식 (2)의 경우에는 추정 값이 낮게 평가되는 경향을 보였다. 6개의 추정식 중에서 식 (5)가 가장 나은 경향을 나타내었다. 그러나 Fig. 2에서 이 연구에서 유도한 다중회귀직선식에 의한 추정 저위발열량은 측정 저위발열량과의 오차가 더욱 개선되었다는 것을 알 수 있다.

Table 6에서는 C소각장의 도시고형폐기물 실측 자료 24개의 각 물리적 성분들의 건량기준 조성 비율을 기존의 식 (1)~(6)에 그리고 이 연구에서 유도한 식 (7)에는 각 물리적 성분들의 습량기준 조성 비율을 대입하여 계산된 절대백분율오차의 평균(MAPE)을 비교하였다. 기존의 다중회귀직선식의 절대백분율오차 평균(4.51~18.59%)보다 이 연구에서 유도한 회귀식의 절대백분율오차 평균이 2.42%로 대단히 작다. 이것은 소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 습량기준 물리적 조성 비율로부터 유도된 저위발열량 추정 다중회귀직선식을 이용하여 소각장에 반입되는 도시고형폐기물 저위발열량을 큰 오차 없이 예측이 가능하다는 것을 의미한다. 도시고형폐기물의 습량기준 물리적 조성 성분 분석은 건량기준 물리적 조성 성분 분석에 비하여 도시고형폐기물의 건조나 그 외 성분 항목들 분석을 위한 인력, 시간, 분석 장비들이 필요 없으므로 보다 경제적이고 편리하다. 따라서 이 연구에서 도시고형폐기물의 습량기준 물리적 조성 비율로부터 저위발열량을 추정하기 위하여 만든 다중회귀직선식(식 (7))은 건량기준 물리적 성분 비율로부터 유도된 기존의 회귀직선식들보다 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

Table 6. MAPE of LHV prediction models from previous researches and this research

	Prediction equations						
	Eq. (1)	Eq. (2)	Eq. (3)	Eq. (4)	Eq. (5)	Eq. (6)	Eq. (7)
MAPE (%)	7.68	15.46	18.59	6.03	4.51	15.02	2.42

Table 7. MAPE of LHV prediction model (equation (7)) for MSW of other incinerators

Incinerator	A	B	D	E
MAPE (%)	20.11	6.11	19.48	4.74

Table 7에는 이 연구에서 소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 저위발열량을 추정하기 위하여 유도된 다중회귀직선식을 다른 4개의 소각장에도 적용하여 추정 저위발열량과 측정 저위발열량의 절대백분율오차 평균을 나타내었다. 절대백분율오차 평균은 B와 E소각장은 6.11과 4.74% 그리고 A와 D소각장은 20.11과 19.48%이었다. 각 소각장별 절대백분율오차 평균의 차이가 큰 것은 도시고형폐기물 반입지역 내의 도시고형폐기물재활용 상태가 서로 달라 반입되는 도시고형폐기물의 조성이 그 영향을 받았을 것이기 때문이다. 그러나 이 값이 10% 이하이면 탁월(excellent), 10~20%의 범위면 양호(good), 그리고 20~50%의 범위는 수용할 수 있는(acceptable) 범위이므로<sup>2)</sup> B와 E소각장은 탁월 그리고 A와 D소각장은 양호한 범위이다. 그러므로 이 연구에서 유도된 도시고형폐기물의 저위발열량을 추정하기 위하여 유도된 다중회귀직선식은 다른 소각장에서도 이용이 가능할 것으로 생각된다. 그러므로 소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 저위발열량은 이 연구에서 도시고형폐기물의 습량기준 물리적 조성 3성분(폐종이류, 폐플라스틱류, 음식물류)으로부터 유도된 다중회귀직선식으로 양호한 정도로 추정할 수 있다는 것을 의미한다. 더욱이 이 방법은 습량기준 도시고형폐기물의 물리적 조성 성분별로 분류하여 각 조성 성분들의 습량기준 중량 비율만 분석하면 도시고형폐기물의 저위발열량을 추정할 수 있어 보다 경제적이고 또한 대단히 효율적이다. 하지만 이 연구에서 유도된 다중회귀직선식을 일반적으로 활용이 가능할 것인가에 대해서는 더 많은 확인이 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 C소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 저위발열량을 빠르고 경제적으로 추정할 수 있는 다중회귀직선식을 도시고형폐기물의 습량기준 물리적 조성 비율로부터 유도하였다. 다중회귀직선식은

$$LHV = 1,670 + 39.20 PI + 11.19 Pa - 11.27 Fo \text{ 이었다.}$$

여기서 LHV: 저위 발열량(kcal/kg wet waste)

PI: 습량기준 폐플라스틱류(wt %)

Pa: 습량기준 폐종이류(wt %)

Fo: 습량기준 음식물류(wt %)이다.

유도된 식의 수정결정계수( $R^2$ )는 0.7476이었고, 이 식에 의한 추정 저위발열량과 측정 저위발열량의 절대백분율오차 평균은 2.42%로 아주 작았다. 이 다중회귀직선식은 다른 4

개 소각장의 도시고형폐기물의 저위발열량을 추정하기 위하여 적용한 경우에도 수용할 수 있는 수준의 정확성을 보였다. 이것으로 소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 주요 습량기준 물리적 조성 항목의 적절한 선택과 다중회귀분석으로부터 유도된 저위발열량 다중회귀직선식으로도 소각장에 반입되는 도시고형폐기물의 저위발열량을 수용할 수 있는 수준으로 추정할 수 있었다.

## 사 사

이 연구는 2013~2014년도 창원대학교 교내 연구지원비의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드린다.

**KSEE**

## 참고문헌

1. Ministry of Environment, Republic of Korea, 2012 White Paper of Environment(2012).
2. Chang, Y. F., Lin, C. J., Chyan, J. M., Chen, L. M. and Chang, J. E., "Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan," *J. Environ. Manage.*, **85**, 891~899(2007).
3. Japan National Municipal Soil Waste Foundation, Design guide for the facility of solid waste disposal, Tokyo(1991).
4. Liu, J. I., Paode, R. D. and Holsen, T. M., "Modeling the energy content of municipal solid waste using multiple regression analysis," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **46**, 650~656(1996).
5. Lin, C. H., Model to evaluate lower heat value of solid waste in Taiwan, Tung Nan Institute of Technology, Teipei, Taiwan, ROC(2000).
6. Yoo, K. Y., Yu, M. J. and Lee, D. H., "Influence of physical composition on heating value of MSW," *J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc.*, **11**(3), 368~376(1994).
7. Donghwa Technology, Korean Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater, pp. 589~793(1999).
8. Mann, P. S., Statistics for Business and Economics, Wiley, New York(1995).