Check for updates

Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 40, No. 6, December 2024, pp. 680-688
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.6.680
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

회귀분석을 이용한 목재펠릿의 총 발열량 예측

Estimation of Gross Calorific Value of Wood Pellet Using Multiple Regression Analysis

김진형, 오무혁, 이상섭[1),*]

대덕분석기술연구원, [1)]충북대학교 환경공학과

Jinhyeong Kim, Muhyeok Oh, Sangsup Lee[1),*]

Deadeok Analysis Research Institute, Daejeon, Republic of Korea
[1)]Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Republic of Korea

접수일 2024년 9월 13일
수정일 2024년 11월 29일
채택일 2024년 11월 29일

Received 13 September 2024
Revised 29 November 2024
Accepted 29 November 2024

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)43-261-2468
E-mail : slee@chungbuk.ac.kr

Abstract Dulong, Steuer and Scheurer-Kestner equations have been widely used to predict the gross calorific value of a solid fuel. However, these equations require the additional analysis for the contents of sulfur and oxygen. The objective of this study is to develop the model predicting the gross calorific value from the contents of carbon, hydrogen, nitrogen and ash within a wood pellet sample. Wood pellet samples obtained from five countries (Korea, Vietnam, Malaysia, Indonesia, and Russia) were analyzed for the contents of carbon, hydrogen, nitrogen and ash in 2023. A regression model predicting the gross calorific value was then developed. The regression model was evaluated using wood pellet samples obtained from six countries (Korea, Vietnam, Malaysia, Indonesia, Russia, and Thailand) in 2024. It was found that the regression model appropriately predicts the gross calorific value of wood pellet samples, as 57 out of 60 wood samples analyzed in 2024 fell within the 95% prediction interval of the model. It was also found that all Korean wood pellet samples analyzed in 2024 fell within the 95% prediction interval of the regression model.

Key words: Gross calorific value, Wood pellet, Biomass, Multiple regression

1. 서 론

에너지원으로서 화석연료의 연소로 배출된 온실가스로 인하여 지구의 기후체계는 급격히 변하고 있다. 지구온난화 문제를 해결하기 위하여 선진국을 대상으로 온실가스 배출량을 의무적으로 감축하도록 규정하는 교토의정서가 2005년 발효되었다. 최근 기후위기 대응을 위한 탄소배출 규제가 날로 심해지고 전 세계적으로 탄소중립을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 국내에서는 정부, 기업, 발전소 등에서 탄소중립을 실현하기 위한 해결책을 마련하고, 연료로 바이오매스를 대표 청정연료로서 널리 이용하고 있다(Xiao *et al.*, 2020). 바이오매스 중 목재펠릿은 온실가스 배출량을 줄이며 지구온난화의 가속을 늦추는 효과적인 전략으로 꼽히며, 국내에서 목재펠릿의 소비는 증가하고 연료로서의 영향력도 증가하고 있다(Antar *et al.*, 2021; Hochman and Tabakis, 2020). 목재펠릿은 원재료의 원가가 저렴한 장점이 있다(Hoang *et al.*, 2021; Sarkodie *et al.*, 2019). 그리고 목재펠릿은 산림청에서 2013년 '목재의 지속가능한 이용에 관한 법률'에 따라 '목재제품의 규격과 품질기준'이라는 규격을 만들어 국내에서 이용되는 목재펠릿의 품질을 관리해왔다. 목재펠릿의 평균 총 발열량은 18.8 MJ/kg 수준이며 2022년 목재펠릿의 에너지생산량은 18만 toe인데, 이는 신재생에너지 총 생산량의 약 10%를 차지한다. 국내 목재펠릿의 경우 해외 수입에 많이 의존하고 있으

며 수입량은 2023년 기준 300만 톤에 이른다. 목재펠릿의 측정방법으로는 KS M ISO 18125에 따른 자동발열량계의 측정을 통하여 목재펠릿이 열원으로 작용하여 물의 비열과 연소 전후의 온도 차이로 총 발열량을 평가한다. 목재펠릿의 총 발열량은 연료로 사용되기 위한 중요한 변수이다. 발열량 평가 시 불완전연소로 발생되는 검댕과 발열량의 반복성, 재현성, 인증표준물질을 통한 검증을 통하여 소급성을 확보하지만 실제 30 bar의 압력에서 연소되는 목재펠릿의 불확도 요인을 설명하기에 어려운 점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 총 발열량의 예측연구는 공업분석(수분, 회분, 휘발분, 고정탄소)을 중심으로 진행되었으며, 이외에도 Dulong, Steuer, Scheurer Kestner 시험식은 현재도 활용되고 있다(Gillespie *et al.*, 2013; Yin 2011; Erol *et al.*, 2010; Friedl *et al.*, 2005; Parikh *et al.*, 2007). 그러나 기존의 시험식들은 광물자원인 석탄과 도시에서 발생하는 고형폐기물에 대한 모델로 도출되었으며, 목재의 경우 셀룰로스, 리그닌과 같은 복합 화합물로 구성되어 있으며 목재는 생성하는 환경에서의 다양한 영향을 받는다. 그렇기에 기존의 시험식들을 목재펠릿에 적용하기에는 한계가 있고, 황과 산소 함량에 대한 분석도 요구하고 있어 불편함이 따른다. 따라서 본 연구에서는 목재펠릿의 회분, 탄소, 수소, 질소 함량만으로 총 발열량을 예측하는 다중회귀모델을 개발하였고 예측모델의 실용성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 시료

목재펠릿 시료로는 2023년에 발열량을 분석한 5개국(말레이시아, 대한민국, 베트남, 인도네시아, 러시아) 시료 각 60개 총 300개와 2024년에 발열량을 분석한 6개국(말레이시아, 대한민국, 베트남, 인도네시아, 러시아, 태국) 시료 각 10개 총 60개이다. 시료들은 목재제품의 규격과 품질기준 부속서 11 목재펠릿의 부합화된 KS M ISO 14780에 따라 분쇄기(FRITSCH, PULVERISETTE 19) 샘플을 준비하였으며, KS M ISO 18125에 따라 펠릿프레스를 이용하여 총 발열량 측정 시료를 준비하였다. 부합화된 KS M ISO 18125에 따라 총 발열량 측정은 벤조산(1 g Tablet, AR208C, Alpha resources, US)의 인증표준물질을 교정을 위해 사용하였으며, 자동발열량계(CKIC, 5E-C5508)를 이용하여 수행하였다. 회분측정은 부합화 표준 KS M ISO 18122에 따라, 전기로(CKIC, 5E-MF6400), 전자저울(VIBRA, HT224RCEN)을 이용하여 수행하였다. 원소분석의 경우, 원소분석(5E-CHN2200, CKIC) 교정을 위해 사용된 인증표준물질로 EDTA CRM (AR2092, Alpha resources, US), Tomato Leaves (1573a, NIST, US), Wood Fuel BioMass CRM (AR1946, Alpha resources, US)에 따라 원소분석 시험을 수행하였다. 본 분석 결과는 전건기준으로 산출하였다.

2.2 통계적 모델링

2023년 시료에 대하여 회분, 탄소, 수소, 질소의 각 항목과 총 발열량 간의 상관관계를 확인하였다. 그리고 회분, 탄소, 수소, 질소를 독립변수로 하여 발열량을 예측하는 다중회귀모델을 도출하였다. 4개의 독립변수에 대하여 전진선택법, 후진소거법, 단계적선택법을 적용하여 다중회귀모델을 산출하였다. 그리고 p-value와 f 비를 통해 독립변수를 삭제하는 작업을 통하여 최적모델을 선정하고, 이후 다중공선성에 대한 평가를 진행하였다. 본 평가에서 질소 과대치(I3 기준치 0.7 초과)로 판명된 시료는 5개였고, 이 시료들은 통계적 분석에서 제외하였다.

회귀모델의 다중공선성(VIF)은 10 이하로 나타나면 각 독립변수는 다중공선성을 발생하지 않는 것으로 보고, 회귀모델의 독립변수로 사용할 수 있다. 이렇게 도출된 다중회귀모델의 적정성은 2024년 시료를 적용하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 총 발열량과의 상관관계 평가

목재펠릿의 회분, 탄소, 수소, 질소의 함량과 총 발

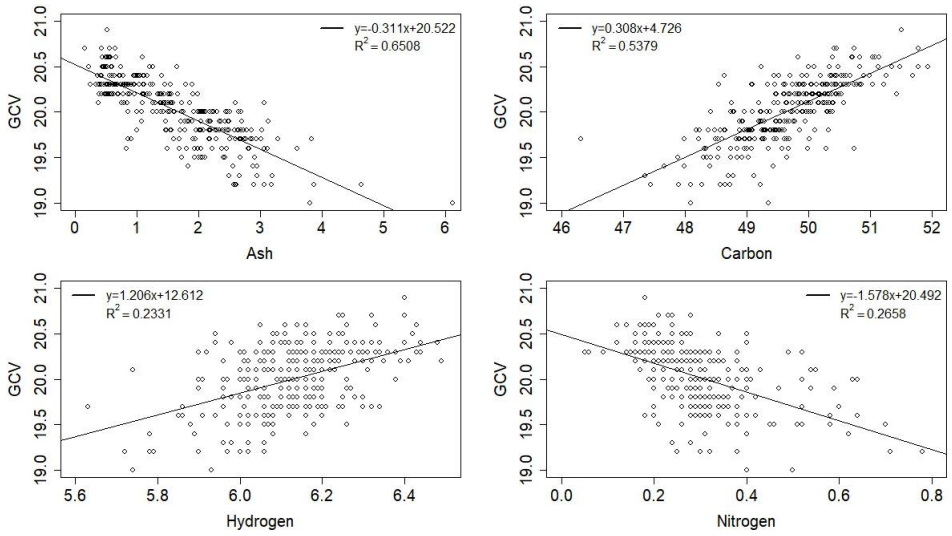

Fig. 1. Gross calorific values and linear regression analysis for the total wood pellet samples.

열량 간의 상관관계를 그림 1에 각각 나타내었으며, 표 1은 그림 1~6의 각 측정항목에 대한 R^2을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 회분과 질소는 총 발열량과 음의 상관관계를 보이는 반면에, 탄소와 수소는 총 발열량과 양의 상관관계를 보였다. R^2 값은 회분과 탄소가 질소와 수소보다 높은 값을 나타내었다. 가장 값이 높았던 것은 회분으로 0.6508을 나타내었다.

다음은 목재펠릿의 제조국가별로 분류하여 살펴보았다. 말레이시아, 대한민국, 베트남, 인도네시아, 러시아에서 제조된 목재펠릿을 각각 분류하여 회분, 탄소, 수소, 질소의 함량과 총 발열량 간의 상관관계를 분석하였고, 그림 2~6에 나타내었다.

그림 2는 말레이시아에서 생산된 목재펠릿에 대하여 상관관계를 분석한 결과이다. 전체 시료에 대한 상관관계를 보여주는 그림 1과 비교할 때, 회분과 탄소는 R^2 값이 조금 감소하면서 비슷한 경향을 보였다. 회분의 R^2 값은 0.5935이다. 질소의 R^2 값은 0.3934로 전체 시료와 비교할 때 높았다. 그리고 수소의 경우는 양의 상관관계인지 음의 상관관계인지도 확실하지 않을 정도로 R^2 값이 매우 낮았다.

Table 1. Summary of linear regression analysis results.

Country	Component	R^2	Fomula
Total	Ash	0.6508	y = −0.311x + 20.522
	Carbon	0.5379	y = 0.308x + 4.726
	Hydrogen	0.2331	y = 1.206x + 12.612
	Nitrogen	0.2658	y = −1.578x + 20.492
Malaysia	Ash	0.5935	y = −0.264x + 20.539
	Carbon	0.4008	y = 0.211x + 9.6
	Hydrogen	0.0467	y = 0.452x + 17.373
	Nitrogen	0.3934	y = −1.395x + 20.553
Korea	Ash	0.7604	y = −0.302x + 20.57
	Carbon	0.54	y = 0.258x + 7.151
	Hydrogen	0.1184	y = 0.799x + 14.973
	Nitrogen	0.3965	y = −2.5x + 20.585
Vietnam	Ash	0.6149	y = −0.366x + 20.411
	Carbon	0.5083	y = 0.352x + 2.395
	Hydrogen	0.3719	y = 1.791x + 8.825
	Nitrogen	0.3444	y = −1.033x + 20.139
Indonesia	Ash	0.7042	y = −0.323x + 20.583
	Carbon	0.5150	y = 0.276x + 6.224
	Hydrogen	0.3319	y = 1.4x + 11.445
	Nitrogen	0.0667	y = −0.809x + 20.247
Russia	Ash	0.2224	y = −0.305x + 20.53
	Carbon	0.3371	y = 0.153x + 12.665
	Hydrogen	0.0001	y = 0.02x + 20.219
	Nitrogen	0.0036	y = −0.2419x + 20.3913

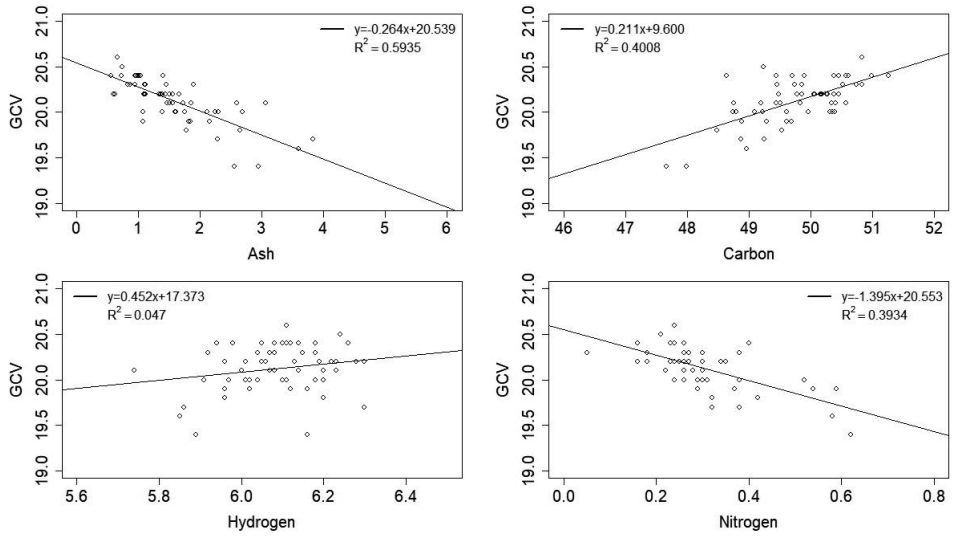

Fig. 2. Gross calorific values and linear regression analysis for the wood pellet samples made in Malaysia.

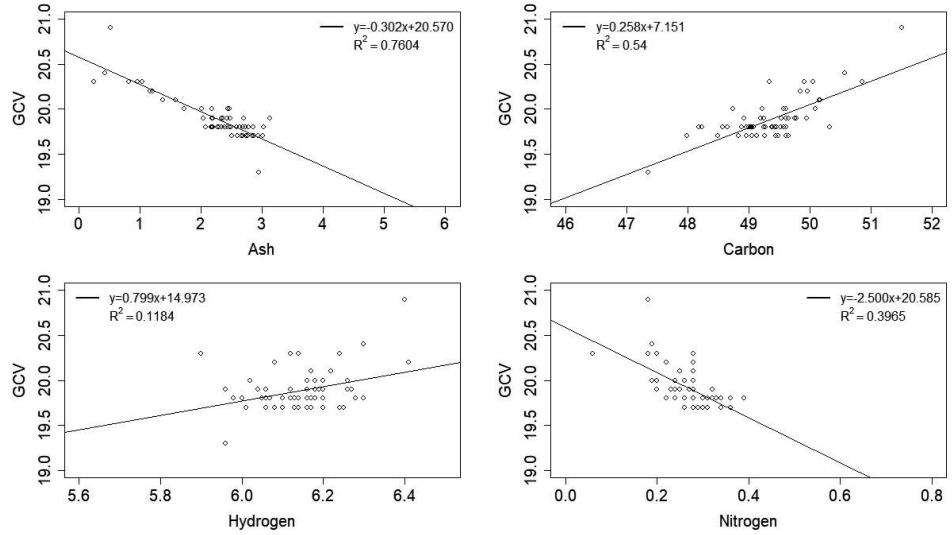

Fig. 3. Gross calorific values and linear regression analysis for the wood pellet samples made in Korea.

그림 3은 대한민국에서 생산된 목재펠릿에 대하여 상관관계를 분석한 결과이다. 전체 시료에 대한 상관관계와 비교할 때 회분의 R^2 값이 0.7604로 더 높았다. 따라서 대한민국에서 생산된 목재펠릿의 총 발열량은 회분과 높은 상관관계를 보여주었다. 그리고 탄소의 R^2 값은 전체 시료와 비슷하였고, 질소의 R^2 값은 전체 시료보다 더 증가한 반면에, 수소의 R^2 값은 감소하였다.

그림 4는 베트남에서 생산된 목재펠릿에 대하여 상관관계를 분석한 결과이다. 베트남 시료는 회분과 탄소의 총 발열량과의 상관관계가 전체 시료에 대하여 나타나는 것과 비슷한 경향을 보였다. 회분의 R^2 값은

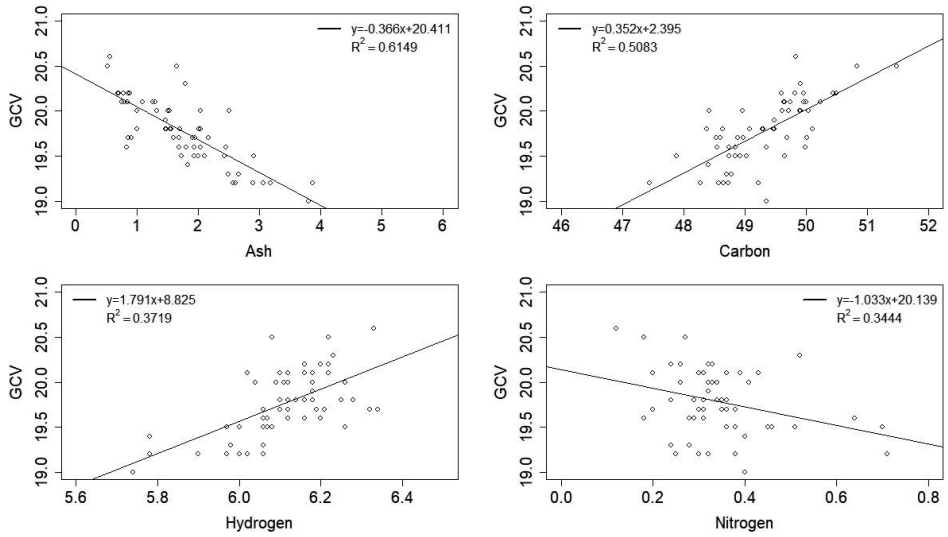

Fig. 4. Gross calorific values and linear regression analysis for the wood pellet samples made in Vietnam.

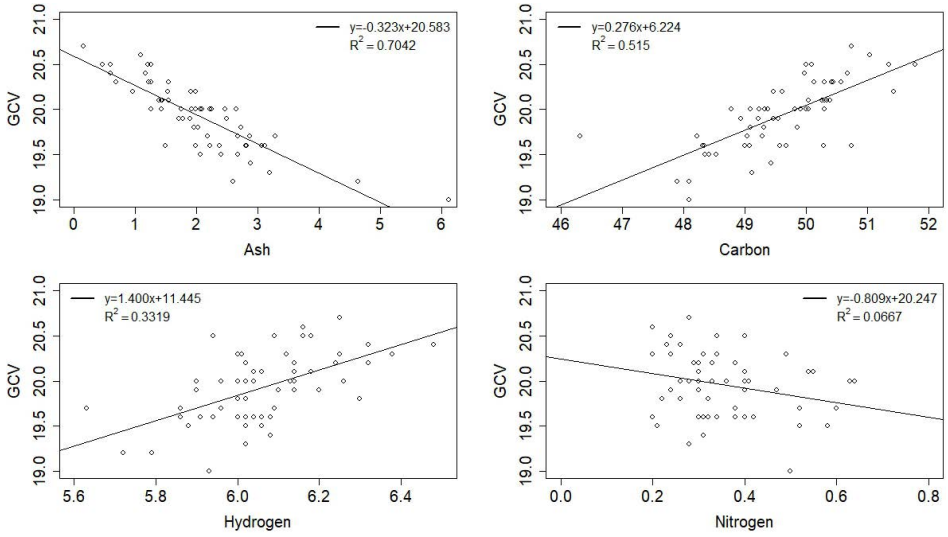

Fig. 5. Gross calorific values and linear regression analysis for the wood pellet samples made in Indonesia.

0.6149이다. 반면에 탄소의 R^2 값은 전체 시료보다 감소하였고, 수소의 R^2 값은 증가하였다. 특히 앞서 살펴본 말레이시아산과 대한민국산 목재펠릿과 다르게 수소와 총 발열량 간에 뚜렷한 양의 상관관계를 보였다.

그림 5는 인도네시아에서 생산된 목재펠릿에 대하여 상관관계를 분석한 결과이다. 인도네시아 시료는 그림 4에서 살펴본 베트남 시료와 매우 유사한 결과를 보였다. 회분의 R^2 값은 0.7042로 높았으나, 탄소의 R^2 값은 베트남 시료와 비슷하였다. 특히 베트남 시료에서 확인한 것처럼 수소와 총 발열량 간에 뚜렷한 양의 상관관계를 보였고, 질소의 R^2 값은 매우 낮았다.

그림 6은 러시아에서 생산된 목재펠릿에 대하여 상

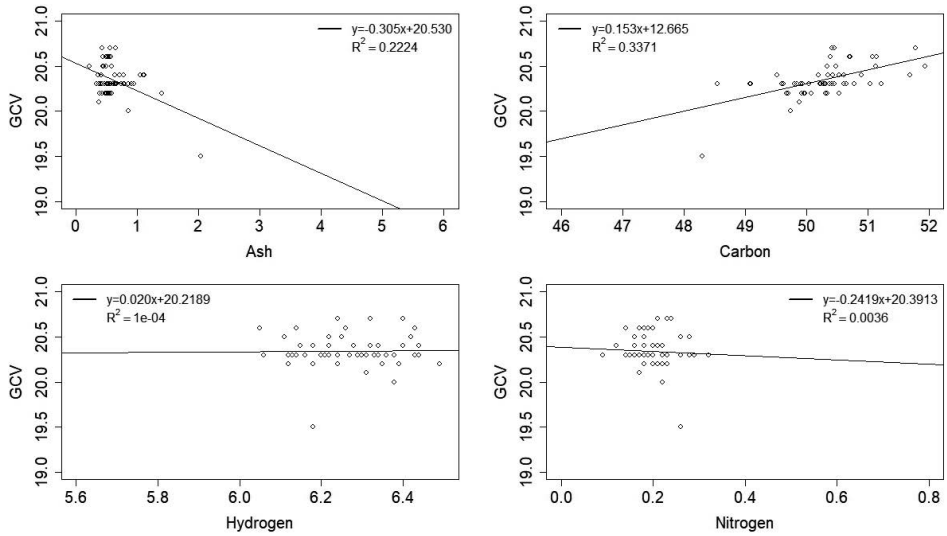

Fig. 6. Gross calorific values and linear regression analysis for the wood pellet samples made in Russia.

관관계를 분석한 결과이다. 러시아 시료는 앞서 살펴본 모든 시료들과 다른 경향을 나타내었다. 러시아 시료에서는 회분, 탄소, 수소, 질소의 함량 모두가 총 발열량과의 상관관계가 매우 낮은 것으로 나타났다. 회분의 R^2 값이 0.2224이고, 탄소의 R^2 값이 이 중에서 가장 높았으나 0.3371이다. 그리고 수소와 질소 모두 총 발열량과 양의 상관관계인지 음의 상관관계인지 확인이 되지 않을 정도로 낮은 R^2 값을 나타내었다.

이와 같이 목재펠릿의 제조국가별로 분류하여 회분, 탄소, 수소, 질소함량과 총 발열량 간의 상관관계를 분석한 결과 제조국가별로 서로 다른 경향을 나타내었다.

3. 2 다중회귀모델을 이용한 발열량 예측

전진선택법, 후진소거법, 단계적선택법을 통하여 산출된 최적의 다중회귀모델 식의 인자는 표 2와 같다. 즉 전체 목재펠릿 시료에 대하여 총 발열량을 예측하는 식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$GCV = -0.209A + 0.155C - 0.266N + 12.716$$

여기서, GCV = 예측 총 발열량(MJ/kg)

Table 2. Multiple regression model for the prediction of the gross calorific value for total wood pellet samples.

Model	Estimate	Std. error	t value	Pr(>|t|)
Intercept	12.716	0.791	16.066	<2e-16
Ash	−0.209	0.015	−14.309	<2e-16
Carbon	0.155	0.016	9.984	<2e-16
Nitrogen	−0.266	0.106	−2.518	0.012

A = 회분 측정값(wt%)
C = 탄소 측정값(wt%)
N = 질소 측정값(wt%)

목재펠릿의 총 발열량을 회분, 탄소, 질소 함량으로부터 예측하는 식이 도출되었다. 앞서 상관관계 분석에서 살펴본 바와 같이 다중회귀모델에서도 총 발열량은 회분 함량과는 음의 관계, 탄소 함량과는 양의 관계, 질소 함량과는 음의 관계를 나타내었다. 그리고 각 독립변수의 다중공선성을 구하였을 때, 회분은 1.691, 탄소는 1.561, 질소는 1.381로서 10 이하로 나타났으므로 독립변수의 기능을 할 수 있음을 확인하였다. 그리고 다중회귀모델의 R^2은 0.748, adjusted R^2은 0.745로 나타났다.

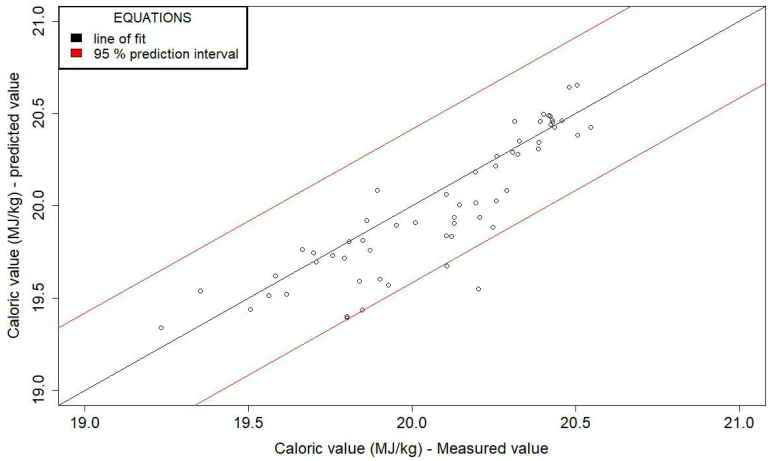

Fig. 7. Regression model for the measured and predicted gross calorific values with 95% prediction section for the total wood pellet samples.

산출된 다중회귀모델의 총 발열량 예측 능력을 평가하기 위하여 실측값, 예측값, 예측구간(95%)을 적용하여 평가를 수행하였다. 그림 7과 같이 2024년에 분석한 60개 시료의 측정값(Y축)과 다중회귀모델로 예측한 값(X축)을 표시하고, 95% 예측구간을 그래프에 나타내었다. 이때 전체 60개 시료 중에서 57개의 시료가 회귀모델의 95% 예측구간에 들어가는 것을 확인할 수 있었다.

예측구간(95%)을 벗어난 데이터의 측정 발열량과 비슷한 수준의 16.5~16.6 MJ/kg의 결과를 가진 데이터에 대하여 회분, 탄소, 질소를 각각 평가한 결과 평균 대비 높은 회분 함량과 탄소, 질소는 평균 대비 낮은 값을 나타내어 측정값 대비 낮은 수준의 열량을 보이는 것을 확인하였다. 상관관계 분석에서 가장 높은 R^2 값을 보였던 대한민국 시료에 대하여 다중회귀모델을 도출하였다. 대한민국에서 제조된 목재펠릿의 총 발열량을 예측하는 회귀모델의 식의 인자는 표 3과 같고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$GCV = -0.233A + 0.116C + 14.679$$

여기서, GCV = 예측 총 발열량(MJ/kg)

A = 회분 측정값(wt%)

C = 탄소 측정값(wt%)

Table 3. Multiple regression model for the prediction of gross calorific value of the wood pellet samples made in Korea.

Model	Estimate	Std. error	t value	Pr(>|t|)
Intercept	14.679	1.214	12.089	<2e-16
Ash	−0.233	0.024	−9.883	5.79e-14
Carbon	0.116	0.024	4.855	9.74e-06

따라서 대한민국에서 제조된 목재펠릿에 대해서만 제한하여 회귀모델을 도출하였을 때는 회분과 탄소의 함량만으로 예측하는 식이 도출되었다. 그리고 상관관계는 여전히 총 발열량과 회분 함량과는 음의 관계, 총 발열량과 탄소 함량과는 양의 관계를 나타내었다.

각 독립변수의 다중공선성을 구하였을 때, 회분은 1.562, 탄소는 1.562로서 10 이하로 나타났으므로 독립변수의 기능을 할 수 있음을 확인하였다. 그리고 다중회귀모델의 R^2은 0.831, adjusted R^2은 0.825를 나타내어, 전체 목재펠릿 시료에 대하여 분석한 회귀모델보다 높은 R^2 값을 나타내었다.

산출된 다중회귀모델의 총 발열량 예측능력을 평가하기 위하여, 2024년에 분석한 대한민국 10개 시료들의 실측값, 예측값, 예측구간(95%)을 적용하였다. 그림 8은 2023년에 분석한 전체 제조국의 목재펠릿에 대한 다중회귀모델(표 2)을 적용한 것이고, 그림 9는

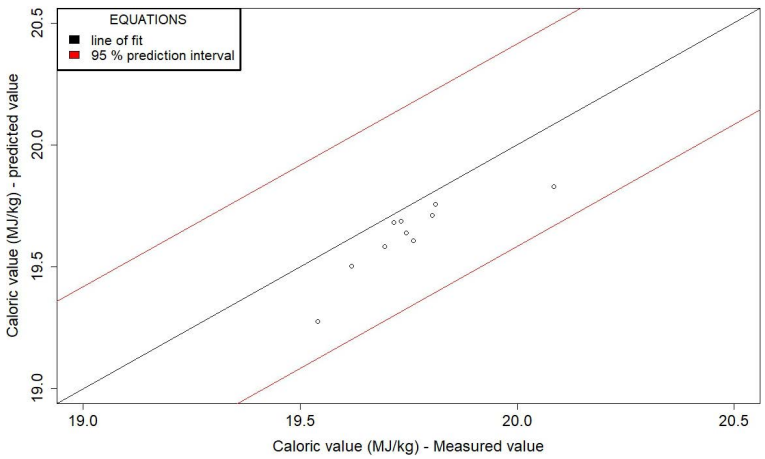

Fig. 8. Regression model based on total wood pellet samples plotted using 2024 Korean wood pellet samples.

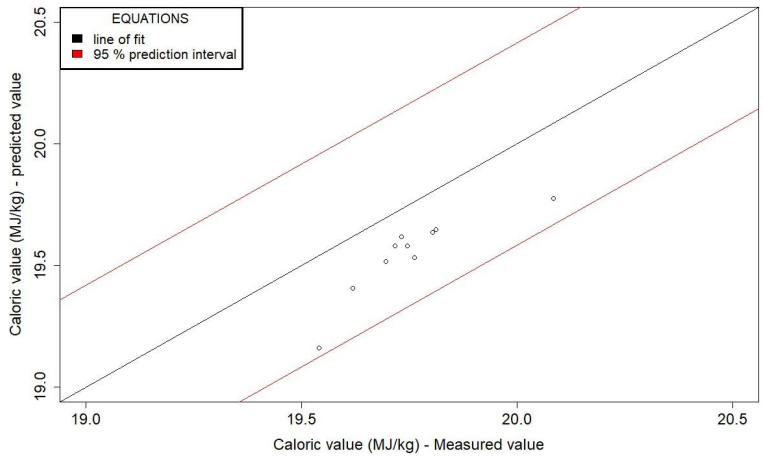

Fig. 9. Regression model based on 2023 Korean wood pellet samples plotted using 2024 Korean wood pellet samples.

2023년에 분석한 대한민국의 목재펠릿에 대한 다중회귀모델(표 3)을 적용한 것이다. 두 그림에서 보는 바와 같이 2024년에 분석한 대한민국 10개 시료는 모두 회귀모델의 95% 예측구간에 들어가는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 목재펠릿에 대한 총 발열량의 측정값과 예측값의 비교를 통하여 총 발열량을 추정할 수 있는 다중회귀모델을 산출하였다. 목재펠릿의 회분, 탄소, 수소, 질소의 함량과 총 발열량 간의 상관관계를 분석한 결과, 대체로 회분과 질소는 총 발열량과 음의 상관관계를 보이지만, 탄소와 수소는 총 발열량과 양의 상관관계를 보였다. 그리고 목재펠릿의 회분 함량이 총 발열량과 가장 높은 상관관계를 보였다. 그러나 이러한 상관관계는 목재펠릿의 제조국가별로 분류하여 분석하였을 때 조금씩 차이를 보였다. 전체 목재펠릿 시료에 대하여 분석한 결과와 비교하였을 때, 말레

이시아 시료는 질소와의 상관관계가 높았으나, 수소와의 상관관계가 매우 낮았다. 대한민국 시료는 회분과 총 발열량의 선형회귀식에서 R^2 값이 0.7604로 가장 높은 값을 보였다. 베트남 시료는 말레이시아와 대한민국 시료와 다르게 수소와 총 발열량 간에 뚜렷한 양의 상관관계를 보였다. 인도네시아 시료는 베트남 시료와 매우 유사한 결과를 보였고, 러시아 시료는 회분, 탄소, 수소, 질소의 함량 모두가 총 발열량과의 상관관계가 매우 낮았다.

2023년에 분석한 전체 목재펠릿 시료에 대하여 총 발열량을 예측하는 다중회귀모델을 도출한 결과, 회분, 탄소, 질소 함량을 독립변수로 하여 예측하는 식을 얻었다. 산출된 회귀모델의 총 발열량 예측능력을 평가한 결과, 2024년에 분석한 목재펠릿 60개 중에서 57개의 시료가 다중회귀모델의 95% 예측구간에 들어가는 것을 확인하여, 다중회귀모델이 목재펠릿 시료의 총 발열량을 적절히 예측함을 확인하였다. 벗어난 3개의 데이터에 대하여 측정 결과에서의 비슷한 수준의 열량값 대비 회분이 낮고, 탄소, 질소가 평균보다 높은 것을 확인하였다. 그리고 상관관계 분석에서 가장 높은 R^2 값을 보였던 대한민국 시료에 대하여 다중회귀모델을 도출한 결과, 회분과 탄소의 함량만을 독립변수로 하여 총 발열량을 예측하는 식을 얻었다. 그리고 2024년에 분석한 대한민국 10개 시료 모두가 다중회귀모델의 95% 예측구간에 들어가는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 환경부 폐자원에너지·재활용 전문인력 양성사업의 지원을 받았으며 김진형 저자 석사논문의 일부임.

References

Antar, M., Lyu, D., Nazari, M., Shah, A., Zhou, X., Smith, D.L. (2021) Biomass for a sustainable bioeconomy: An overview of world biomass production and utilization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 139, 110691. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110691

Erol, M., Haykiri-Acma, H., Küçükbayrak, S. (2010) Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data, Renewable Energy, 35(1), 170-173. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.008

Friedl, A., Padouvas, E., Rotter, H., Varmuza, K. (2005) Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition, Analytica Chimica Acta, 544(1-2), 191-198. https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.01.041

Gillespie, G.D., Everard, C.D., Fagan, C.C., McDonnell, K.P. (2013) Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis, Fuel, 111, 771-777. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.002

Hoang, A.T., Ong, H.C., Fattah, I.M.R., Chong, C.T., Cheng, C.K., Sakthivel, R., Ok, Y.S. (2021) Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability, Fuel Processing Technology, 223, 106997. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106997

Hochman, G., Tabakis, C. (2020) Biofuels and Their Potential in South Korea, Sustainability, 12(17), 7215. https://doi.org/10.3390/su12177215

Parikh, J., Channiwala, S.A., Ghosal, G.K. (2007) A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials, Fuel, 86(12-13), 1710-1719. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.029

Sarkodie, S.A., Strezov, V., Weldekidan, H., Asamoah, E.F., Owusu, P.A., Doyi, I.N.Y. (2019) Environmental sustainability assessment using dynamic Autoregressive-Distributed Lag simulations - Nexus between greenhouse gas emissions, biomass energy, food and economic growth, Science of The Total Environment, 668, 318-332. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.432

Xiao, R., Yang, W., Cong, X., Dong, K., Xu, J., Wang, D., Yang, X. (2020) Thermogravimetric analysis and reaction kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis, Energy, 201, 117537. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117537

Yin, C.-Y. (2011) Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses, Fuel, 90(3), 1128-1132. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.031

Authors Information

김진형 (대덕분석기술연구원 대리) (jhkim@dari.re.kr)
오무혁 (대덕분석기술연구원 부장) (mhoh@dari.re.kr)
이상섭 (충북대학교 환경공학과 교수) (slee@chungbuk.ac.kr)