



# 원료사료의 화학조성을 활용한 총에너지 및 질소보정 대사 에너지 추정식 개발 및 검증

안수현<sup>1</sup> · 공창수<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 미래동물자원연구원 연구원, <sup>2</sup>경북대학교 축산학과 교수, <sup>3</sup>경북대학교 축산BT학과 교수

## Development and Validation of Prediction Equations for Gross and Nitrogen-Corrected Apparent Metabolizable Energy Based on the Chemical Composition of Feed Ingredients for Broiler Chickens

Su Hyun An<sup>1</sup> and Changsu Kong<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Research Institute for Innovative Animal Science, Kyungpook National University, Sangju 37224, Republic of Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Animal Science, Kyungpook National University, Sangju 37224, Republic of Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Animal Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Sangju 37224, Republic of Korea

**ABSTRACT** The objectives of this study were to develop equations for predicting gross energy (GE) and nitrogen-corrected apparent metabolizable energy (AMEn) based on the chemical compositions of feed ingredients, as well as to evaluate the accuracy of these prediction equations. For the GE prediction, a total of 2,084 ingredient samples were utilized, comprising 592 cereal by-products, 428 cereal grains, and 1,064 oilseed meals. Additionally, data for AMEn prediction included 74 samples, consisting of 22 cereal grains, 44 cereal by-products, and 8 oilseed meals. Furthermore, to validate the equations, five equations obtained from the literature were compared with the AMEn values derived from INRA (2004) using regression analysis. Three developed equations for GE concentrations in feed ingredients exhibited similar coefficients of determination ( $R^2$ ) of 0.379, 0.385, and 0.388, respectively. However, the slopes and Y-intercepts of the developed prediction equations for GE in feed ingredients displayed significant differences from the line of  $y = x$ . Conversely, the equations developed for estimating AMEn in feed ingredients for broiler chickens demonstrated relatively higher  $R^2$  values of 0.712, 0.767, and 0.786 for Equations 1, 2, and 3, respectively. A validation test of the developed equations for AMEn indicated intercepts of  $-62.2$  ( $P = 0.354$ ),  $-78.6$  ( $P = 0.162$ ), and  $-93.7$  ( $P = 0.085$ ), along with slopes of  $-0.18$  ( $P = 0.094$ ),  $0.05$  ( $P = 0.648$ ), and  $0.07$  ( $P = 0.465$ ).

(Key words: feed ingredient, chemical composition, energy value, prediction equation, broiler)

## 서 론

에너지 측면에서 효율적인 사료배합비를 작성하기 위해서는 배합사료에 사용되는 원료사료들의 에너지가에 대한 정보가 필수적이다. 원료사료별 총에너지(GE)에 관한 정보는 국가별 영양소 정보를 제시한 문헌자료 또는 이전 연구들에서 평가된 값을 참고할 수 있다(NRC(1994, 2012)). 식물성 원료의 화학조성은 품종, 재배환경, 및 재배 후 공정 그리고 보관상태에 따라 변이가 있을 수 있다(Fabà et al., 2019; An and Kong, 2022). 더욱이 이를 실제 섭취하는 동물의 대사능력에 따라 실제 동물이 이용가능한 에너지 함량이 달라질 수 있으므로 사료배합비 작성 시 원료사료를 사용하

기 위해서는 육계에서의 대사 에너지(ME)에 대한 정보가 필요하다. 이는 육계에서의 사료 배합비가 주로 ME 또는 질소보정 대사에너지(AMEn)를 기준으로 배합비가 작성되기 때문이다.

원료사료의 GE는 에너지 분석기를 통해 직접 측정하거나 NIR(Near-Infrared Reflectance)을 통해 간접적으로 추정할 수 있다. 두 방법 모두 비교적 단시간에 다수의 샘플을 분석할 수 있다는 장점을 지니지만, 높은 비용과 장비 사용에 따른 접근성 제한이라는 단점도 존재한다. 이러한 이유로 원료사료 내 화학적 조성과의 GE 간의 상관관계를 분석하여 추정 방정식을 개발하려는 연구들이 다수 수행되었다(Urriola et al., 2014; Son and Kim, 2018).

\* To whom correspondence should be addressed : changsukong@gmail.com

가금류에서 원료사료별 ME는 원료사료의 GE와 닭의 분뇨에너지 간의 차이를 통해 직접 측정할 수 있다. 동물 실험은 실험 간 변이가 발생할 가능성이 있으나, 가금류의 에너지 이용성을 평가하는 가장 정확한 방법으로 여겨진다. 그러나 이러한 *in vivo* 실험은 많은 시간과 노동력, 비용이 소요되므로 이를 대체하기 위해 원료사료의 화학적 조성과 동물 실험을 통해 측정된 AMEn을 바탕으로 추정식을 개발하려는 연구도 다수 진행되었다(Campbell et al., 1986; Silva et al., 2010; Meloche et al., 2013; Alvarenga et al., 2015; Latifi et al., 2023).

본 연구에서는 다양한 곡류, 곡류 부산물, 및 유박류의 화학적 조성과 에너지 수준 정보를 바탕으로 GE 및 AMEn을 추정하기 위한 방정식을 개발하고 이를 검증하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 데이터 및 예측모델 개발

#### 1) 총에너지

본 연구에서는 NRC(2012)와 국내로 수입된 곡류의 총에너지(GE), 조단백질(CP), 조지방(EE), 조섬유(CF), 회분(Ash), 및 건물(DM) 수준에 대한 데이터를 수집하였다. 총 2,084개의 샘플에 대한 정보를 확보했으며, 이 중 곡류 부산물은 592개, 곡류는 428개, 유박류는 1,064개로 구성되었다. 다중회귀분석을 통해 원료사료 내 화학 성분을 활용하여 GE 농도(kcal/kg, DM 기준)를 예측하기 위한 추정식을 개발하였고, 이때 사용된 원료사료의 GE, CP, EE, CF, 및 Ash는 모두 건물(DM) 기준으로 환산하여 분석하였다. 또한, NRC(2012)와 INRA(2004)에서 제시한 GE(kcal/kg, DM 기준) 추정식과 본 연구에서 개발한 추정식을 비교하였다. 추정식의 정확성은 결정계수( $R^2$ ), 평균 제곱근 오차(RMSE), 및 평균 편향 오차를 통해 평가하였다.

#### 2) 대사에너지

동물 실험을 통해 측정된 원료사료별 질소 보정 외관상 대사에너지(AMEn) 데이터를 활용하여 추정식을 개발하였다. 이를 위해 총 74점의 데이터를 수집하였으며, 구성은 곡류 부산물 44점, 곡류 22점, 유박류 8점이다. 추정식 개발에 사용된 원료사료의 GE, AMEn, CP, EE, CF, 및 Ash는 모두 건물 기준으로 계산되었다.

이어서 다중회귀분석을 통해 NRC(2012)와 국내로 수입된 곡류의 화학 성분(CP, EE, CF, 중성세척섬유소(NDF), 산

성세척섬유소(ADF))과 GE(kcal/kg, DM 기준)를 활용하여 AMEn(kcal/kg, DM 기준)를 예측하기 위한 추정식을 도출하였다. 또한, INRA(2004)에 보고된 원료사료 38점의 화학 성분 및 에너지 수준 데이터를 활용하여 본 연구에서 개발한 AMEn 방정식을 검증하였으며, 동시에 이전 문헌에서 개발된 5가지 AMEn 추정식도 동일한 방식으로 평가하였다. 본 연구에서 사용된 추정식은 다음과 같다:

$$\text{AMEn} = 3,840 - 32.1 \times \text{NDF} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$\text{AMEn} = 3,810 - 36.5 \times \text{NDF} - 28.2 \times \text{EE} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\begin{aligned} \text{AMEn} = & 3,697 - 11.7 \times \text{NDF} + 57.1 \times \text{EE} \\ & - 177.0 \times \text{Ash} \end{aligned} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\begin{aligned} \text{AMEn} = & 4,164 + 51.0 \times \text{EE} - 197.6 \times \text{Ash} \\ & - 35.7 \times \text{CF} - 0.6 \times \text{NDF} \end{aligned} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\begin{aligned} \text{AMEn} = & 4,144 + 3.1 \times \text{EE} - 4.6 \times \text{Ash} \\ & - 26.2 \times \text{CF} - 20.3 \times \text{NDF} \end{aligned} \quad \text{Eq. (5)}$$

추정식의 정확성은 동물 실험으로 측정된 AMEn 값과 추정식을 통해 계산된 AMEn 값의 차이(Y축)와 추정치와 평균 추정치 간의 차이(X축)를 비교한 회귀 분석으로 평가하였다. 정확성 평가는 결정계수( $R^2$ ), 평균 제곱근 오차(RMSE), 및 평균 편향 오차를 사용하여 수행되었다.

### 2. 통계분석

원료사료 샘플들의 화학 조성 간 상관관계를 분석하고, 다중 회귀 방정식 개발을 위해 SAS의 Corr 및 Reg 프로시저를 사용하였다. GE 추정식을 개발하기 위해 각 원료사료별로 측정된 GE를 종속 변수(dependent variable)로 설정하고, 독립 변수(independent variable)로는 CP, EE, CF, 및 Ash의 네 가지 화학 조성을 포함하였다.

AMEn 추정식의 경우, AMEn을 종속 변수로 설정하였고, 독립 변수로는 CP, EE, CF, Ash, ADF, NDF, 및 GE를 포함하였다. 개발된 추정식의 정확도는 결정계수( $R^2$ ), 평균 제곱근 오차(RMSE), 평균 편향 오차(MBE), 그리고  $y = x$ 에 대한 기울기와 Y-절편의 유의성을 통해 평가하였다. 결과의 유의성은  $P$  값이 0.05 이하일 때 통계적으로 유의한 것으로 판단하였다.

## 결 과

원료사료들의 GE를 추정하기 위해 NRC(2012)와 2005년부터 2015년까지 국내로 수입된 원료 사료들의 화학 성분

및 GE 정보를 활용하였다. 이들 데이터를 바탕으로 GE 추정식을 개발하였고, 각 원료사료에 대한 변이값은 Table 1에 요약되어 있다. 유박류 원료 사료의 화학 조성 변이(SD: CP = 10.9, EE = 3.4, CF = 3.9, Ash = 2.5)가 상대적으로 컸으며, 곡류 부산물에서는 GE 변이(SD = 281.6)가 가장 높았다.

육계에서의 AMEn 추정을 위해, *in vivo* 실험으로 측정된 AMEn 값과 해당 실험에 사용된 원료사료의 화학 성분 정보를 활용하였다(Losada et al., 2009; Olukosi and Adeola, 2010; Alvarenga et al., 2011; Lasek et al., 2011; Muangkeow and Chinajariyawong, 2011; Rochell et al., 2011; Meloche et al., 2014; Julio et al., 2017). 각 샘플의 변이는 Table 2에 제시되어 있으며, AMEn 추정식 개발 시에는 원료사료의 종류를 구분하지 않고 곡류 부산물, 곡류, 유박류를 포함한 총 74점의 데이터를 사용하였다. 이 데이터는 GE 추정을 위해 사용된 원료 사료들의 화학 성분 및 에너지 수준에서 확인된 변이보다 더 큰 변화를 보였다.

### 1. 총에너지 추정

Multiple regression procedure에 의해 원료사료 내 화학성분을 최소 1개부터 최대 5개까지 포함하는 총 5개의 식이 도출되었고, 그 결과는 다음과 같았다.

$$4,641.9 + 3.2 \times \text{CP} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$4,280.9 + 8.0 \times \text{CP} + 53.8 \times \text{EE} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$4,310.5 + 10.2 \times \text{CP} + 54.1 \times \text{EE} - 14.3 \times \text{Ash} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$4,296.8 + 10.3 \times \text{CP} + 49.8 \times \text{EE} + 5.3 \times \text{CF} - 19.0 \times \text{Ash} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$5,017.2 + 10.5 \times \text{CP} + 51.3 \times \text{EE} + 7.0 \times \text{CF} - 18.0 \times \text{Ash} - 8.5 \times \text{DM} \quad \text{Eq. (5)}$$

**Table 1.** Energy concentrations and chemical compositions in feed ingredients, based on a literature review, for the development of gross energy

Item	Chemical compositions				GE (kcal/kg)
	CP	EE	CF	Ash	
Cereal by product (n = 428)					
Maximum	84.8	43.6	35.8	12.6	6,371
Mean	20.0	3.6	10.2	6.0	4,219
Minimum	2.9	0.9	0.2	1.5	2,938
Max.-Min.	81.9	42.7	35.6	11.2	3,433
SD	5.0	2.3	2.7	1.6	281.6
Cereal (n = 592)					
Maximum	37.6	33.8	16.7	4.9	6,117
Mean	8.8	3.2	2.7	1.3	3,946
Minimum	6.2	0.8	0.5	0.6	3,378
Max.-Min.	31.3	33.0	16.3	4.3	2,739
SD	3.7	2.0	2.0	0.5	190.7
Oilseed meal (n = 1,064)					
Maximum	55.6	20.0	24.4	74.4	6,143
Mean	24.1	5.1	12.2	5.8	4,322
Minimum	13.1	0.3	3.3	1.4	3,553
Max.-Min.	42.6	19.8	21.2	73.0	2,590
SD	10.9	3.4	3.9	2.5	270.1

CP = crude protein; EE = ether extract; CF = crude fiber; GE = gross energy; Max.-Min. = Maximum - Minimum; SD = standard deviation.

이 중 CP만(또는 CP와 EE만) 독립 변수로 활용한 Eq. (1) 과 Eq. (2)는 R<sup>2</sup> 값이 각각 0.018과 0.362로 낮게 나타나 추정식 검증에서 제외하였다. 한편, Eq. (3), Eq. (4), Eq. (5)의 R<sup>2</sup>

**Table 2.** Energy concentrations and chemical compositions in feed ingredients, based on a literature review, for the development of nitrogen-corrected metabolizable energy prediction equations

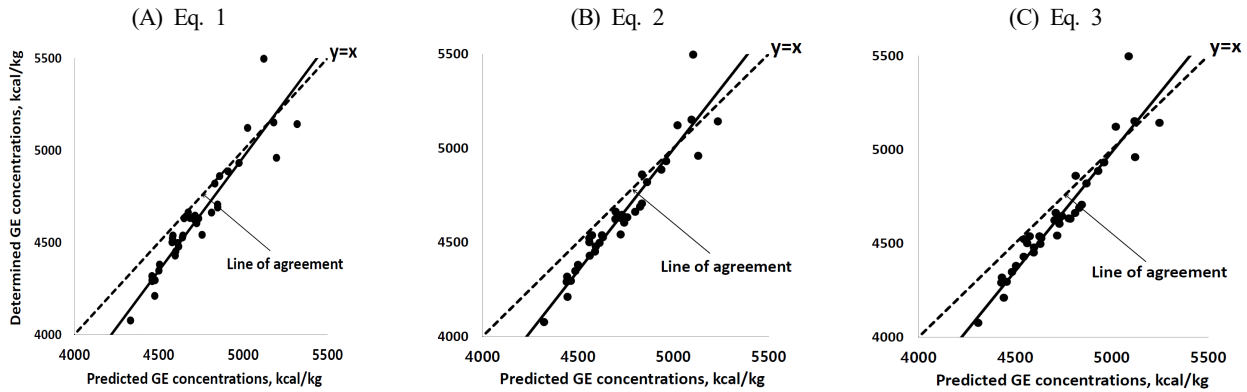
Item	Chemical compositions					ADF	NDF	GE (kcal/kg)	AMEn (kcal/kg)
	CP	EE	CF	Ash					
Feed ingredients									
Maximum	68.7	25.9	21.8	13.3	47.1	77.6	5,811	3,936	
Mean	25.4	6.3	6.1	4.1	9.6	25.7	4,780	2,936	
Minimum	7.5	0.2	0.4	0.5	0.5	3.5	3,925	1,746	
Max.-Min.	61.2	25.7	21.4	12.8	46.7	74.0	1,886	2,190	
SD	14.2	5.7	3.8	2.4	8.2	15.3	439.3	495.6	

CP = crude protein; EE = ether extract; CF = crude fiber; ADF = acid detergent fiber; NDF = neutral detergent fiber; GE = gross energy; AMEn = nitrogen corrected-apparent metabolizable energy; Max.-Min. = Maximum - Minimum; SD = standard deviation.

**Table 3.** Developed prediction equations for the gross energy concentrations (kcal/kg, DM basis) of feed ingredients based on chemical composition

	Equations	R <sup>2</sup>	RMSE	MBE
1)	$4,310.5 + 54.1 \times \text{EE} (\%) + 10.2 \times \text{CP} (\%) - 14.3 \times \text{ash} (\%)$	0.379	218.93	-104.83
2)	$4,296.8 + 49.8 \times \text{EE} (\%) + 10.3 \times \text{CP} (\%) + 5.3 \times \text{CF} (\%) - 19.0 \times \text{ash} (\%)$	0.385	217.87	-93.80
3)	$5,017.2 + 51.3 \times \text{EE} (\%) + 10.5 \times \text{CP} (\%) + 7.0 \times \text{CF} (\%) - 18.0 \times \text{ash} (\%) - 8.45 \times \text{DM} (\%)$	0.388	217.36	-94.77

RMSE = root mean square error; MBE = mean bias error; determined GE - predicted GE / number of observations.



**Fig. 1.** Comparison of prediction equations for gross energy (kcal/kg, DM). Three equations were developed based on the chemical compositions of feed ingredients sourced from previous studies ( $n = 2,084$ ) and were validated utilizing 38 samples from INRA (2004). The equations (A), (B), and (C) exhibited intercepts of  $-104.83$  ( $P < 0.001$ ),  $-93.8$  ( $P < 0.001$ ), and  $-94.8$  ( $P < 0.001$ ), respectively, along with slopes of  $0.23$  ( $P = 0.003$ ),  $0.29$  ( $P < 0.001$ ), and  $0.27$  ( $P = 0.0004$ ).

는 각각 0.379, 0.385, 0.388이었으며, RMSE는 각각 218.93, 217.87, 217.36, 그리고 MBE는  $-104.83$ ,  $-93.80$ ,  $-94.77$ 로 계산되었다(Table 3). 그러나 Eq. (3), Eq. (4), Eq. (5) 모두에서  $y = x$ 에 대한 기울기(slope)와  $y$  절편(intercept)이 통계적으로 유의한 차이를 보였으며( $P < 0.001$ ), 이는 Fig. 1에 제시하였다.

또한, 개발된 Eq. (2)와 NRC(2012)  $4,143 + 15 \times \text{CP} + 56 \times \text{EE} - 44 \times \text{Ash}$ ; kcal/kg)와 INRA(2004)  $17.3 + 0.0617 \times \text{CP} + 0.2193 \times \text{EE} + 0.0387 \times \text{CF} - 0.1867 \times \text{Ash}$ ; MJ/kg)에서 제시한 추정식을 검증한 결과를 Table 4에 제시하였다. 추정식들은 원료사료에 따라 차이를 보였고, 곡류와 곡류부산물의 GE를 추정 결과는 서로 유사한 R<sup>2</sup>를 보였지만, RMSE와 MBE값은 곡류의 GE 추정식들이 더 낮은 값을 보였다. 반면, 유박류의 경우 상대적으로 낮은 R<sup>2</sup> 그리고 높은 RMSE와 MBE 값을 보였다.

## 2. 대사에너지 추정

육계에서의 AMEn을 추정하기 위해 개발된 원료사료별 방정식은 최소 최소 4개에서 최대 7개의 변수를 포함하며, 본고에서는 그중 3개의 추정식을 제시하였다(Table 5). 이후, INRA(2004)에서 제시한 38점의 원료사료에 대한 GE 및 화학 성분 조성을 바탕으로 x축을 “추정 AMEn - 평균 추정

**Table 4.** Validation of prediction equations developed on the chemical compositions (%) in feed ingredients using a total of 2,048 samples from NRC (2012) and present study

Item	R <sup>2</sup>	RMSE	MBE
Cereal grains (n = 428)			
Present study	0.420	95.7	16.3
NRC (2012)	0.401	105.6	-126.0
INRA (2004)	0.397	106.5	-126.4
Cereal by products (n = 592)			
Present study	0.358	122.2	-34.0
NRC (2012)	0.419	152.4	-281.4
INRA (2004)	0.416	139.2	-213.3
Oilseed meal (n = 1,064)			
Present study	0.289	126.3	12.3
NRC (2012)	0.218	176.8	-214.8
INRA (2004)	0.239	176.0	-133.4

The equations 1), 2), and 3) were obtained from the present study, NRC (2012), and INRA (2004), respectively.

Eq. (1)  $5,017.2 + 51.3 \times \text{EE} (\%) + 10.5 \times \text{CP} (\%) + 7.0 \times \text{CF} (\%) - 18.0 \times \text{ash} (\%) - 8.45 \times \text{DM} (\%)$ .

Eq. (2)  $4,143 + 56 \times \text{EE} (\%) + 15 \times \text{CP} (\%) - 44 \times \text{Ash} (\%)$ .

Eq. (3)  $17.3 + 0.0617 \times \text{CP} (\%) + 0.2193 \times \text{EE} (\%) + 0.0387 \times \text{CF} (\%) - 0.1867 \times \text{Ash} (\%)$ .

**Table 5.** Developed prediction equations for nitrogen corrected-metabolizable energy (kcal/kg) of feed ingredients based on chemical composition, DM basis

Equations	R <sup>2</sup>	RMSE	MBE
1) $3,743.5 + 42.1 \times EE - 105.5 \times CF - 119.7 \times \text{Ash} + 27.5 \times \text{ADF}$	0.712	300.9	203.5
2) $3,259.5 + 34.8 \times EE - 80.1 \times CF - 110.7 \times \text{Ash} + 36.1 \times \text{ADF} - 12.8 \times \text{NDF} + 0.1 \times \text{GE}$	0.767	274.9	143.4
3) $3,152.8 - 5.6 \times \text{CP} + 31.7 \times EE - 75.9 \times \text{CF} - 97.4 \times \text{Ash} + 36.9 \times \text{ADF} - 14.5 \times \text{NDF} + 0.2 \times \text{GE}$	0.786	265.5	134.3

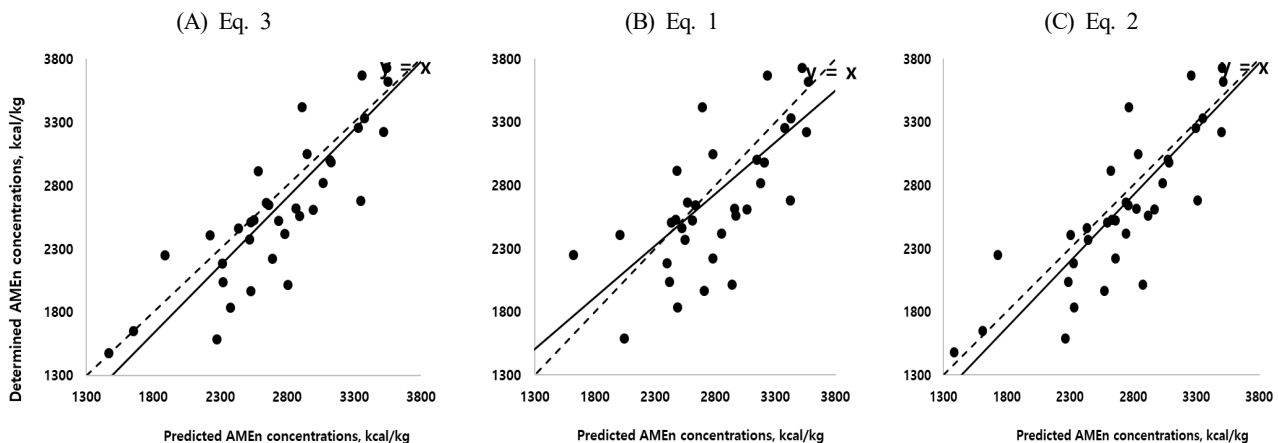
RMSE = root mean square error; MBE = mean bias error; determined AMEn - predicted AMEn / number of observations.

AMEn”, y축을 “추정 AMEn - 실제 측정된 AMEn”으로 설정하고, 기울기와 Y-절편의 유의 수준을 기준으로 추정식의 정확성을 평가하였다. 그 결과,  $y = x$ 에 대한 Eq. (2)의 기울기 유의수준이  $P = 0.648$ 로 가장 높았으며, Eq. (1)과 (3)의 P-value는 각각 0.094와 0.465로 나타났다. 또한, Eq. (1), (2), 및 (3)에서의 Y-절편 P-value는 각각 0.354, 0.162, 및 0.085로 모두 0.05 이상의 값을 보였다(Fig. 2).

## 고찰

본 실험에서 개발한 3가지 GE 추정식의 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.379에서 0.388 사이를 보였으며, 추정식에 사용된 변수(variable) 수가 증가할수록 RMSE 값이 감소하는 경향을 나타냈다. Alvarenga et al.(2015)은 이전 연구에서 추정식의 정확성과 정밀도가 추정식 개발에 사용된 변수 수에 따라 달라진다고 보고한 바 있다. 한편, 본 실험에서의 MBE 값이 모두 음수로 나타난 것은, 추정된 GE 값이 실제 GE 값보다 낮게 평가되었음을 의미한다.

가능한 적은 수의 변수를 사용하면서도 높은 R<sup>2</sup>와 낮은 RMSE 및 MBE를 보인 추정식은 Eq. (2)로 판단되었다. 이후 Eq. (2)를 NRC(2012)와 INRA(2004)에서 제시한 GE 추정식과 비교한 결과, 유사한 R<sup>2</sup> 값을 나타냈다. 특히 곡류와 유박류의 경우, Eq. (2)가 NRC(2012) 및 INRA(2004)의 추정식보다 더 높은 R<sup>2</sup>와 낮은 RMSE 및 MBE 값을 보였다. 추가적으로, Eq. (2)를 곡류와 유박류의 GE를 추정했을 때는 실제 측정값보다 다소 높게 예측되는 경향이 확인되었다. 한편, GE 추정식은 특정 축종이 아닌 다양한 축종에서 사용하는 원료사료도 포함되었기 때문에, 본 실험에서는 육계 사료뿐만 아니라 여러 축종에서 사용하는 다양한 원료사료 데이터를 포함하였다. 그럼에도 동일한 추정식을 유박류에 적용했을 때는, 다른 원료사료에 비해 낮은 R<sup>2</sup> 값을 보였는데, 이는 유박류의 화학성분 변이가 상대적으로 컸기 때문일 가능성이 있다. 또한, 본 실험에서 개발된 GE 추정식의 R<sup>2</sup> 값(0.38과 0.39)은 이전 연구 결과와 유사한 수준이었다. 예를 들어, Son and Kim(2018)의 연구에서도 R<sup>2</sup> 값이 0.342에서 0.372 범위에 있음을 보고한 바 있다.



**Fig. 2.** Comparison of prediction equations for nitrogen-corrected apparent metabolizable energy (kcal/kg, DM). Three equations were developed based on the chemical compositions of feed ingredients sourced from previous studies ( $n = 74$ ) and were validated utilizing 38 samples from INRA (2004). The equations (A), (B), and (C) exhibited intercepts of  $-62.2$  ( $P = 0.354$ ),  $-78.6$  ( $P = 0.162$ ), and  $-93.7$  ( $P = 0.085$ ), respectively, along with slopes of  $-0.18$  ( $P = 0.094$ ),  $0.05$  ( $P = 0.648$ ), and  $0.07$  ( $P = 0.465$ ).

본 연구에서 개발된 추정식들은  $y = x$ 에 대한 기울기와 Y-절편의 유의성을 기준으로 검증하였으며, 여기서 x축은 ‘측정된 GE - 예측된 GE’, y축은 ‘예측된 GE - 예측값의 평균’으로 설정하였다. 유의수준이 0.05 이상인 경우, 예측값과 실측값 간 차이가 0과 통계적으로 유의하게 다르지 않다고 해석하였는데, 본 실험에서는 개발된 모든 GE 추정식들의 기울기와 Y-절편의 유의수준이 0.05 이하로 나타났다. 이는 실제 사용 시 원료사료의 GE 예측에 한계가 존재할 수 있음을 시사한다. 반면, 유사한  $R^2$  값을 보인 Son and Kim (2018)의 추정식은 기울기와 Y-절편이 0과 유의하게 다르지 않은 것으로 분석되었음을 확인하였다.

AMEn 추정을 위해 사용된 74점의 데이터는 GE 추정식에 활용된 2,084점에 비해 적었음에도, AMEn 추정식의  $R^2$  값이 더 높았다. 이는 아마도 AMEn 추정식 개발 과정에서 보다 다양한 변수를 사용했기 때문일 것으로 추정된다. 이전 연구에 따르면, 실제 동물(*in vivo*) 실험 결과를 활용하면 원료사료의 추정 정확도를 높일 수 있다고 보고된 바 있다 (Yegani et al., 2013). Alvarenga et al.(2013)은 이전에 보고된 원료사료의 화학 성분 정보나 추정식을 활용하여 AMEn 값을 계산한 뒤, 이를 기반으로 배합비를 작성하고 실제 *in vivo* 실험에서 사양 성적을 확인하였다. 그 결과, 추정식을 활용해 배합된 사료를 급여받은 육계에서 사양 성적과 도체 성적이 모두 향상된 것으로 보고하였다. 그러나 이들은 여전히 *in vivo* 실험을 통해 실제 원료사료의 AMEn을 측정하는 것이 가장 정확하다는 결론을 내렸다(Alvarenga et al., 2013). 그럼에도, 육계의 주요 원료사료에 대한 AMEn을 보다 정밀하게 추정할 수 있다면 *in vivo* 실험 없이도 간편하고 정확한 배합비 작성이 가능할 것으로 보인다. 본 실험에서 AMEn 추정에 사용된 실제 측정값은 기존 동물실험 데이터를 기반으로 수집된 것이므로, 원료사료의 화학성분만을 활용한 GE 추정식보다 높은 상관관계를 보인 것으로 판단된다.

한편, AMEn 추정식의 정확성을 평가한 결과, Eq. (2)와 Eq. (3)의 기울기와 Y-절편은  $y = x$  그래프에서 유의성을 나타내지 않았는데, 이는 GE 추정식에 비해 AMEn 추정식의 추정력이 상대적으로 높다는 의미다. 특히 Eq. (3)은 Eq. (2)에 CP 변수를 추가했을 때  $R^2$ 가 상승하고 RMSE와 MBE가 낮아져 가장 높은 추정력을 보였다. 그러나 기울기와 Y-절편을 기준으로 한 검증에서는 Eq. (2)가 더 높은 유의 수준을 보여,  $R^2$ , RMSE, MBE 외에도 보완적인 검증 방법이 필요함을 시사한다.

본 실험에서는 육계의 원료사료의 범위에 따른 AMEn을 추정하기 위해 다양한 원료사료의 정보를 활용하였지만, 사

료 배합비 작성을 간편화하려면 대표적인 원료사료에 한정된 데이터를 기반으로 원료사료별 AMEn 추정식을 개발하는 노력이 필요할 것으로 보인다. 한편, 본 연구에서 개발한 GE 추정식의 추정력을 더욱 높이려면 다양한 조건의 원료사료 샘플을 추가 확보해야 할 것이다. 또한, 개발된 세 가지 AMEn 추정식 중에서는 다음 식  $3,259.5 + 34.8 \times EE - 80.1 \times CF - 110.7 \times Ash + 36.1 \times ADF - 12.8 \times NDF + 0.1 \times GE$  ( $R^2 = 0.767$ )이 가장 높은 추정력을 보였다.

(색인어 : 원료사료, 화학조성, 에너지가, 추정방정식, 육계)

## 사 사

이 논문은 2024학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

## ORCID

Su Hyun An <https://orcid.org/0000-0001-6236-6815>

Changsu Kong <https://orcid.org/0000-0002-3876-6488>

## REFERENCES

- Alvarenga RR, Rodrigues PB, Zangeronimo MG, Oliveira EC, Mariano FCMQ, Lima EMC, Garcia Jr AAP, Naves LP, Nardelli NBS 2015 Validation of prediction equations of energy values of a single ingredient or their combinations in male broilers. *Asian-Australas J Anim Sci* 28(9):1335-1344.
- An SH, Kong C 2022 Variation of crude protein and amino acids concentrations in corn, wheat, and barley from different countries. *Korean J Poult Sci* 49(2):78-87.
- Campbell LG, Salmon RE, Classen H 1986 Prediction of metabolizable energy of broiler diets from chemical analysis. *Poult Sci* 65(11):2126-2134.
- Fabà L, Solà-Oriol D, Balfagon A, Coma J, Gasa J 2019 Assessing the effect of ingredients variability on the composition of the final complete feed for swine. *Can J Anim Sci* 99(1):7-14.
- INRA 2004 Tables of Composition and Nutritional Value of Feed Materials. 2nd ed. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands and France.
- Latifi M, Moravej H, Ghaziani F, Kim WK 2023 Deter-

- mination of prediction equations for apparent metabolizable energy corrected for nitrogen of corn gluten meal and canola meal in broilers. *Poult Sci* 102(5):102587.
- Meloche KJ, Kerr BJ, Shurson GC, Dozier WA 2013 Apparent metabolizable energy and prediction equations for reduced-oil corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks from 10 to 18 days of age. *Poult Sci* 92(12):3176-3183.
- NRC 1994 Nutrient Requirements of Poultry. 9th ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- NRC 2012 Nutrient Requirements of Swine. 10th ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Silva EP, Rabello CB, Albino LFT, Ludke JV, Lima MB, Dutra Jr WM 2010 Prediction of metabolizable energy values in poultry offal meal for broiler chickens. *R Bras Zootec* 39(10):2237-2245.
- Son AR, Kim BG 2018 Prediction equations for gross energy in feed ingredients. *FASEB J* 31(S1): 1b403.
- Urriola PE, Li M, Kerr BJ, Shurson GC 2014 Evaluation of prediction equations to estimate gross, digestible, and metabolizable energy content of maize dried distillers grains with solubles (DDGS) for swine based on chemical composition. *Anim Feed Sci Technol* 198(11):196-202.
- Yegani M, Swift ML, Zijlstra RT, Korver DR 2013 Prediction of energetic value of wheat and triticale in broiler chicks: a chick bioassay and an *in vitro* digestibility technique. *Anim Feed Sci Technol* 183(1-2):40-50.
- 
- Received Dec. 11, 2024, Revised Jan. 7, 2025, Accepted Jan. 14, 2025