

# Excel 해 찾기 모듈을 이용한 사료배합 프로그램과 산란계의 성장모델시스템에 관한 연구

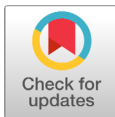
김선호 · 이승환 · 이상석\*

순천대학교 동물자원과학과

## Study on feed mix program using Excel solver modul (Add-in) and growth modelling system of laying hens

Seon Ho Kim, Seoung Hwan Lee and Sang Suk Lee\*

Ruminant Nutrition and Anaerobic Laboratory, Department of Animal Science and Technology, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea



Received: Apr 19, 2021  
Revised: May 25, 2021  
Accepted: May 25, 2021

### \*Corresponding author

Sang Suk Lee  
Ruminant Nutrition and Anaerobic  
Laboratory, Department of Animal  
Science and Technology, Suncheon  
National University, Suncheon  
57922, Korea  
Tel: +82-61-750-3237  
E-mail: rumen@scnu.ac.kr

Copyright © 2021 Korean Society of  
Animal Science and Technology.  
This is an Open Access article  
distributed under the terms of the  
Creative Commons Attribution  
Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)  
which permits unrestricted  
non-commercial use, distribution,  
and reproduction in any medium,  
provided the original work is properly  
cited.

### ORCID

Seon Ho Kim  
<https://orcid.org/0000-0002-9350-1853>  
Seoung Hwan Lee  
<https://orcid.org/0000-0002-7112-1761>  
Sang Suk Lee  
<https://orcid.org/0000-0003-1540-7041>

### Abstract

An assorted feed technology maximized productivity and margin of profit by allowing to the domestic animals making supply and economical food that have balance as nutrition applying domestic animals science of nutrition and food learning. Least cost formula creation that product design that use Feed Mix Program for these purpose can satisfy nutrient requirement was available. Non-linear optimum code Generalized Reduced Gradient (GRG2) that Texas College and Cleveland State University develop as a tool that to find Microsoft Excel is indispensable solving linear programming problem that handle in spreadsheet modelling is used. Divergence and border law that simple method and Frontline Systems that fan shape and proper move problem use the variable border develops are used. Need data for raw material, product basically because tell feed mixing problem on unpack, and name of raw material, raw material unit cost, raw material ingredient by growth step that get into standard of design. Growth Modelling System was studied IPGM (International Pig Growth Modelling Group). Important purpose of this project is so that on-the-spot survey presents available growth model. Is displaying definitely dialogue current connected with alimentation but mean fundamental, and biologic alimentation principle is thing which do simulation. Ultimate purpose of layer industry is producing egg of high quality efficiently. Is influenced to several factors such as production potential energy of layer, environment condition, food intake, food, disturbed family. These leading persons do on summer period so that might can operate specification system that is correct to each farm because influence in productivity and studied growth model technique application of layer.

**Keywords:** Feed mix program, Growth modelling system, Excel

**Competing interests**

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

**Funding sources**

This work was supported by a Research Promotion Program 495 of Suncheon National University (SCNU), Suncheon 57922, Korea.

**Acknowledgements**

Not applicable.

**Availability of data and material**

Upon reasonable request, the datasets of this study can be available from the corresponding author.

**Authors' contributions**

Conceptualization: Kim SH, Lee SS.  
Data curation: Lee SH.  
Formal analysis: Lee SH.  
Methodology: Kim SH, Lee SH.  
Validation: Kim SH, Lee SH.  
Investigation: Lee SH.  
Writing - original draft: Lee SH.  
Writing - review & editing: Kim SH, Lee SH, Lee SS.

**Ethics approval and consent to participate**

This article does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

# 서론

축산업은 고도화 기술 및 산업화로 발전하여 왔다. 독일의 의사 출신인 Thaer[1]에 의해 Hay Equivalent System이라는 최초의 사양 표준 모델이 제정되었다. 수많은 학자들에 의해 발전을 거듭해 ARC, NRC 등 사양표준 모델이 발전되어 왔다. 또한, 현재까지 분석기술 및 사양관리 기술 발전으로 지속적으로 개정되고 있다. 이러한 사양 표준의 발전과 각 축종별 성장 단계별 사양관리 영양소 요구량과 원료 성분치, 가격 등을 가지고 균형된 사료를 배합하는 기술로 발전하게 되었다. 특히, 배합사료 기술은 가축영양학과 사료학을 응용하여 영양적으로 균형 있는 공급과 경제적인 사료를 제조하여 가축에게 급여함으로써 생산성과 이윤을 극대화하였다. 이러한 목적을 위해 사료배합 프로그램(feed mix program)을 이용한 제품설계는 영양소요구량을 최소가적으로 충족시킬 수 있는 최소가격배합표(least cost formula)의 작성이 가능하다.

전자계산기(computer)의 발달은 선형계획(linear programming)을 이용한 최소비용사료(least cost ration)을 배합할 수 있게 됐다. 사료배합에 대한 선형계획의 응용은 Waugh[2]에 의하여 제시되었으나, 실제로 Hutton[3], Potter[4]의 연구에 의하여 비롯하였다. 그 후 Combs[5]에 의하여 영양소 요구량이나 경제성에 대하여 보다 정밀한 제한조건이 제시된 바 있다. 현재 국내외에서 사용되고 있는 사료배합 software는 FEMIS(한국과학기술원 부설시스템공학센터), Format(영국의 Format사), Brill(Brill사), Mixit(미국의 Agricultural Software Consultants사), FSMIX(금성컴퓨터기술주식회사와 한국정보개발주식회사), FMOS(쌍용컴퓨터) 등이며, single-mix, multi-mix, parametrics, seneitivity, opportunity price 등의 기능들을 전부 및 일부가 가능하다.

Microsoft Office Excel 모듈(add-in) 해 찾기(solver)는 최초의 컴퓨터 소프트웨어의 일종인 Lotus 1-2-3, Excel과 같은 전자종이(spreadsheet)의 기원은 1979년 Dan Briklin에 의해서 아이디어 및 기본 설계가 구축되었고, Bob Frankston에 의해 다듬어지고 나서 Apple II용으로 출시된 Visicalc(wikipedia link)부터였다. Frontline System(Stockholms, Sweden)사는 spreadsheet의 지평선을 한차원 높게 확장시킨 공로자인 해 찾기의 모듈을 개발하여 Excel, Lotus 1-2-3에 공급하고 있는 software 회사이다. 해 찾기는 spreadsheet modelling에서 취급하는 선형계획법 문제를 푸는데 없어서는 안 될 도구로서 Frontline System에서는 Excel에서 처리하기 힘들 정도의 복잡한 선형계획 문제를 풀 수 있는 Premium solver를 별도로 Microsoft Excel 해 찾기 도구에는 Leon Lasdon(Austin의 Texas 대학, Austin, TX, USA)과 Allan Waren(Cleveland 주립 대학, Cleveland, OH, USA)이 개발한 비선형 최적 코드 Generalized Reduced Gradient(GRG2)가 사용된다. 선형과 정수 문제는 변수 경계를 사용하는 간단한 방법과 John Watson과 Dan Fylstra(Frontline Systems)가 개발한 분기와 경계법이 사용된다.

돼지성장모델링기법은 IPGM(International Pig Growth Modelling Group)이 연구되었으며, 뉴질랜드의 Guelph 대학, Massey 대학과 네덜란드의 Wageningen 농업대학 간의 협력적인 연구노력을 하고 있다. 1994년부터 2001년까지 산업계 Agribarands Purina Canada(Cargill International)로부터 지원을 받아왔다. 이 프로젝트의 주요한 목적은 실제 사용이 가능한 돼지 성장 모델을 제시하기 위해서다. 영양공급에 관련된 대사 흐름을 명확하게 나타내는데 근간을 두고 있으며, 생물학적인 영양공급 원리를 시뮬레이션하는 것이다. 양돈산업의 궁극적인 목적은 고품질의 돈육을 효율적으로 생산하는 데 있다. 돼지의 생산 잠재력, 환경조건, 돈사의 구조, 사료섭취량, 사료, 돈가 등의 여러 가지 요인에 영향을 받는다. 이러한 요인들은 생산성에 영향을 미치므로 각 농장에 맞는 사양체계를 운영할 수 있도록 하기 위해 돼지의 성장모델기법이 개발되었다[6,7].

사료산업에 종사하면서 제품설계에 한해서는 정해진 공간에서 개발자 위주의 사료배합 프로

그램을 가지고 주어진 환경에서의 작업밖에 할 수 없다는 한계로 이러한 문제를 해결하기 위해 선형 계획프로그램 excel solver 모듈을 이용하였다.

국내 사료 산업에서 사료배합 프로그램이 제품설계의 핵심이 되고 있는 시장원료 평가 및 시장의 요구사항에 따른 제품설계의 변화에 대해 능동적인 대처를 못하고 있다는 점이다. 시장 원료 평가 및 요구에 능동적인 대처를 위해 원료자원(raw material resource), 영양소요구량(nutrient requirement), 제품설계(formula), 사양(feed & feeding), 농장기록(farm record), 시장(market share) 이 순환(feedback)하는 이른바 맞춤형 가축성장모델링기법(Animal Growth Modelling System)을 연구하기 위한 기초를 구축하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 가축성장모델링기법의 핵심이 되는 사료배합 프로그램과 산란계에 있어서 생산성에 영향을 주는 요인별(factors) 변화에 따른 제품설계의 적용을 연구하였다(Fig. 1).

## 재료 및 방법

### 프로그램 및 방법

MS Office 2007 Excel Solver 모듈을 이용하여 Table 1의 양계 한국사양표준[8] 산란초기 (1-32주)를 참조하였다.

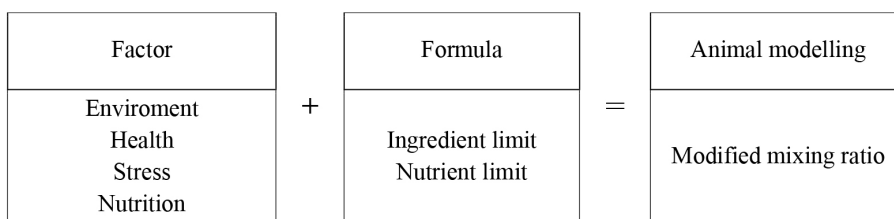


Fig. 1. Layer growth modelling system.

Table 1. Korean feeding standard for poultry

Item	0-5 wk	6-12 wk	13-16 wk	1-17 wk	1-32 wk	33-45 wk	46-55 wk	After 55 wk
Metabolizable energy (kcal/kg)	2,900	2,800	2,750	2,800	2,750	2,700	2,650	2,600
Crude protein (%)	19.00	17.00	15.00	16.00	17.00	16.00	15.00	14.00
Amino acids								
Arginine (%)	1.05	0.86	0.67	0.72	0.82	0.76	0.70	0.64
Glycine + serine (%)	0.74	0.60	0.47	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
Histidine (%)	0.28	0.23	0.17	0.18	0.19	0.18	0.17	0.16
Isoleucine (%)	0.63	0.53	0.39	0.42	0.75	0.70	0.65	0.60
Leucine (%)	1.05	0.88	0.70	0.75	0.98	0.90	0.82	0.75
Lysine (%)	0.90	0.65	0.46	0.49	0.83	0.76	0.69	0.63
Methionine (%)	0.32	0.26	0.20	0.21	0.34	0.32	0.30	0.28
Methionine + cystine (%)	0.65	0.55	0.42	0.44	0.70	0.66	0.62	0.58
Phenylalanine (%)	0.58	0.47	0.37	0.38	0.53	0.50	0.47	0.44
Phenylalanine + tyrosine (%)	1.05	0.86	0.68	0.70	0.97	0.90	0.83	0.76
Threonine (%)	0.71	0.59	0.37	0.44	0.53	0.50	0.47	0.44

Table 1. Continued

Item	0-5 wk	6-12 wk	13-16 wk	1-17 wk	1-32 wk	33-45 wk	46-55 wk	After 55 wk
Tryptophan (%)	0.18	0.15	0.11	0.11	0.20	0.18	0.16	0.15
Valine (%)	0.65	0.55	0.41	0.43	0.82	0.76	0.70	0.65
Essential fatty acids								
Linoleic acid (%)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.15	1.10	1.05	1.00
Macro minerals								
Calcium (%)	0.90	0.80	0.80	2.00	3.70	3.80	3.90	4.00
Nonphytate phosphorus (%)	0.40	0.35	0.30	0.32	0.32	0.31	0.30	0.28
Potassium (%)	0.30	0.28	0.27	0.27	0.18	0.17	0.16	0.15
Sodium (%)	0.17	0.16	0.16	0.16	0.18	0.17	0.16	0.15
Shlorine (%)	0.15	0.14	0.14	0.14	0.16	0.15	0.14	0.13
Magnesium (mg)	600.00	500.00	400.00	400.00	580.00	550.00	520.00	500.00
Trace minerals								
Manganese (mg)	50.00	40.00	30.00	30.00	24.00	23.00	22.00	21.00
Zinc (mg)	50.00	40.00	35.00	35.00	40.00	37.00	35.00	33.00
Iron (mg)	80.00	58.00	56.00	58.00	50.00	47.00	45.00	43.00
Copper (mg)	5.00	4.50	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Iodine (mg)	0.50	0.45	0.40	0.40	0.045	0.04	0.035	0.03
Selenium (mg)	0.15	0.14	0.13	0.13	0.10	0.09	0.08	0.07
Fat soluble vitamins								
A (IU)	3,000.00	2,700.00	2,700.00	2,700.00	4,500.00	4,300.00	4,100.00	4,000.00
D <sub>3</sub> (IU)	220.00	200.00	200.00	300.00	500.00	470.0	450.00	430.0
E (IU)	12.00	8.00	8.00	8.00	7.00	6.50	6.00	5.50
K (mg)	0.60	0.50	0.50	0.50	0.70	0.60	0.50	0.50
Water soluble vitamins								
Riboflavin (mg)	6.00	4.00	3.00	4.50	3.00	2.80	2.60	2.50
Pantothenic acid (mg)	12.00	10.00	10.00	10.00	2.50	2.40	2.30	2.20
Niacin (mg)	30.00	26.00	25.00	25.00	12.00	11.00	10.50	10.00
Cyanocobalamin (mg)	0.009	0.006	0.005	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003
Choline (mg)	1,500.00	1,000.00	600.00	600.00	1,300.00	1,200.00	1,100.00	1,000.00
Biotin (mg)	0.20	0.15	0.12	0.12	0.14	0.12	0.11	0.10
Folic acid (mg)	0.60	0.50	0.40	0.40	0.30	0.28	0.26	0.24
Thiamin (mg)	2.00	1.80	1.50	1.50	0.90	0.80	0.80	0.70
Pyridoxine (mg)	4.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.80	2.60	2.50

선형계획법(linear programming, LP)은 여러 가지 선택할 수 있는 원료들이 있을 때 특정목표에 가장 경제적으로 도달할 수 있도록 원료들의 최적조합을 제시해 주는 수학적 기법이다. LP에 의한 배합표의 작성은 3가지 단계적 작업으로 구성되어 있다. 첫째는 문제를 수식화하는 것, 둘째는 수식화된 문제를 풀어 가능한 답을 구하는 것, 셋째는 가능한 답 중에서 최소가격에

모든 제약조건을 충족시킬 수 있도록 조정하여 최적배합표를 작성에 이용하였다(Fig. 2).

### 원료사료

양계용 배합사료에 공통적으로 사용되는 옥수수, 소맥피, 미강, 대두박, 채종박, 옥수수글루텐, 석회석, 제2인산칼슘(DCP), 메티오닌(99%), 염화콜린(50%), 인분해효소, 양계비타민, 양계미네랄, 소금, 동물성 유지를 사용하였다(Table 2), 또한 Table 3의 단가 및 Table 1의 양계사양관리와 제약조건을 이용하였다(Table 4-6).

## 결과 및 결론

### 선형계획법(linear programming)

#### 설정조건(constraints)

Table 2에 있는 여러 가지 제약조건을 충족시키면서 목적 함수인 가격을 최소화하도록 각

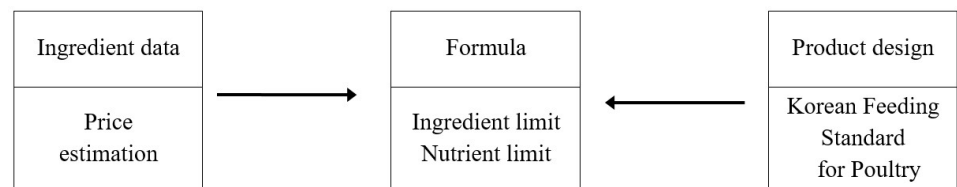


Fig. 2. Work flow of feed mix program.

Table 2. Use main raw material ingredient

Raw material	Moi (%)	C. protein (%)	C. fat (%)	C. fiber (%)	C. ash (%)	Ca (%)	P (%)	Ava. P (%)	Me (Mcal)	Met + Cys (%)	Choline (ppm)
Corn	12.8	8.3	3.2	2.0	1.9	0.03	0.27	0.08	3.42	0.11	591
Wheat bran	11.3	15.7	4.4	8.6	5.9	0.14	1.16	0.18	2.32	0.4	1,077
Rice bran	9.3	13.0	14.4	11.2	12.1	0.07	1.59		1.63	0.3	1,221
Soybean meal	10.4	44.0	0.5	7.0	6.0	0.25	0.6	0.23	2.24	1.32	2,743
Rapeseed meal	8.8	35.3	2.8	12.8	7.2	0.68	1.17	0.27	1.9	1.24	6,700
Corn gluten	10.0	60.0	2.0	2.5	1.8	0.02	0.7	0.13	3.9	3.0	2,200
Limestone	0.1					34.0					
D.C.P.	1.0					25.9	17.6	11.6			
Methionine (99%)	7.0	32.0	1.5	8.0	1.6	0.05	0.46			99.0	3.5
Choline chloride (50%)											460,000
Phytase											
Vitamin complex <sup>1)</sup>											
Mineral complex <sup>2)</sup>											
Salt											
Animal fat									6.86		

<sup>1)</sup>Contains per kg: vit A, 12,000,000 IU; vit D<sub>3</sub>, 2,500,000 IU; vit E, 20,000 IU; vit K, 1,800 mg; vit B<sub>1</sub>, 2,000 mg; vit B<sub>2</sub>, 6,000 mg; vit B<sub>6</sub>, 3,000 mg; vit B<sub>12</sub>, 20,000 mg; Niacin, 25,000 mg; Biotin, 50 mg.

<sup>2)</sup>Contains per: I, 1,000 mg; Fe, 50,000 mg; Mn, 65,000 mg; Zn, 65,000 mg; Cu, 5,000 mg; Se, 150 mg.

Table 3. Ingredient price and composition of constraints in formula

Raw material	Price (₩)	Minimum (%)	Maximum (%)
Corn	229.16	0.0	60.0
Wheat bran	203.10	0.0	5.0
Rice bran	199.00	0.0	3.0
Soybean meal	298.04	0.0	30.0
Rapeseed meal	184.00	0.0	2.0
Corn gultein	478.00	0.0	5.0
Limestone	25.00	0.0	10.0
D.C.P	340.00	0.0	2.0
Methione (99%)	2,900.00	0.0	0.5
Choline chloride (50%)	1,110.00	0.0	0.5
Phytase	1,900.00	0.02	0.02
Vitamin complex	2,000.00	0.1	∞
Mineral complex	700.00	0.1	∞
Salt	60.00	0.25	0.26
Animal fat	700.00	0.0	5.0
Nutrient (%)			
Moisture		0.0	∞
CP		17.0	∞
EE		2.0	∞
CF		0.0	6.0
Ash		0.0	15.0
Ca		3.7	∞
P		0.32	∞
Available P		0.2	∞
Methionine (kcal/kg)		2,750	∞
Met + Cys		0.70	∞
Choline (ppm)		1,300	∞

Table 4. Formula that calculate lysine content of soybean meal and corn from crude protein content

Ingredient	Linear regression equation Lysine/% CP content <sup>1)</sup>	Standard error	Correlation coefficient
Dehulled soybean meal (N = 175)	$Y = 0.264 + 0.60(X)$	0.175	0.57
Corn (N = 95)	$Y = 0.049 + 0.026(X)$	0.018	0.66

<sup>1)</sup>Y = A + BX: where Y = % amino acid, A = intercept, B = slope, X = % CP content.

**Table 5.** Digestible energy (DE) conclusion formula of raw material in growing pig

	Regression coefficients						RSD	R <sup>2</sup>
	Constant	GE (MJ/kg)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	CF (g/kg)	ADF (g/kg)	NDF (g/kg)		
Barley	5.04	0.32	0.004				0.12	0.73
Wheat	-4.35	1.17		-0.052			0.13	0.94
Weather-damaged wheat	9.67		0.007				0.37	0.79
	-3.92	1.10		-0.024			0.09	0.99
	-1.24	0.95			-0.019		0.08	0.99
Wheat by-products	27.76		-0.016		-0.085		0.45	0.89
All samples	-2.93	1.07		-0.039			0.38	0.88
	-7.52	1.36				-0.012	0.36	0.89

GE, gross energy; CF, crude fiber; ADF, acid detergent fiber; NDF, neutral detergent fiber.

**Table 6.** Composition and nutritional value of feed materials

Ingredient	CORN	CGLUEN	WBRAN	RSM	SBM	AFAT	LMS	DCP	SALT	CHOLINE	MET	VITC	MINC
Moisture (%)	2.80	10.00	11.30	8.00	10.40	0.30	0.10	1.00	2.00	-	1.00	-	-
Protein (%)	8.30	60.00	15.70	35.00	44.00	-	-	-	-	-	99.00	-	-
Fat (%)	3.20	2.00	4.40	2.00	0.50	9.40	-	-	-	-	-	-	-
Fiber (%)	2.00	2.500	8.60	12.00	7.00	-	-	-	-	-	-	-	-
Ash (%)	1.90	1.80	5.90	7.00	6.00	-	100.00	100.00	98.00	-	-	-	-
Calcium (%)	0.03	0.02	0.14	0.60	0.20	-	36.00	32.00				2.58	
Phosphorus (%)	0.27	0.70	1.16	1.10	0.60	-		18.00					
Avail phos (%)	0.07	0.18	0.41	0.31	0.10	-		18.00					
Ca-phos (%)	0.24	-0.68	-1.02	-0.40	-0.30	-	36.00	14.00	-	-	-	2.58	-
T Me (Mcal)	3.87	3.98	2.30	2.10	2.45	7.81							
Choline (ppm)	434.00	330.00	1,302.00	2,100.00	2,092.00	-				460,000.00			
Sodium (%)	-	0.02	0.20	0.00	0.00	-			38.00				
Chloride (%)	0.07	0.05	0.06	-	0.00	-			60.00				
NFE (%)	71.80	23.70	54.10	33.00	32.00	0.30	0.10	1.00	-	-	-		
Starch (%)	62.00	13.000	21.00	4.000	4.00	-							
Total amino acids													
Arginine	0.39	2.01	0.98	2.12	3.19	-							
Glycine	-	-	-	-	2.16	-							
Histidine	-	-	-	-	1.19	-							
Leucine	1.01	9.00	0.96	2.47	3.43	-							
Lysine	0.27	1.00	0.63	2.01	2.82	-							
Methionine	0.19	1.50	0.25	0.73	0.64	-					98.50		
Cystine	0.19	1.00	0.33	0.90	0.68	-							
Tot sulfur AA	0.38	2.50	0.58	1.63	1.32	-					98.50		

Table 6. Continued

Ingredient	CORN	CGLUEN	WBRAN	RSM	SBM	AFAT	LMS	DCP	SALT	CHOLINE	MET	VITC	MINC
Phenylalanine	-	-	-	-	2.20	-							
Tyrosine	-	-	-	-	1.50	-							
Valine	0.41	2.70	0.72	1.80	2.16	-							
Magnesium (%)	0.11	0.00	0.40	0.51	0.26	-							
Potassium (%)	0.32	0.04	0.90	1.04	2.04	-							
Sulfur (%)	0.13	0.50	0.22	0.01	0.40	-					10.00		
Cobalt (ppm)	0.10	0.10	0.10	-	0.10	-							
Finish(ppm)													
Cobalt	0.10	0.10	0.10	-	0.10	-							
Copper	3.50	29.00	11.00	6.60	17.00	-						20,00	
Iron	30.00	400.00	60.00	180.00	99.00	-						88,00	
Fluoride	-	-	-	-	-	-							
Iodine	0.05	-	0.11	-	-	-						3.00	
Manganese	5.00	7.30	100.00	43.00	27.00	-						75,00	
Selenium	0.08	-	0.40	0.98	-	-						300	
Zinc	10.00	42.00	150.00	65.00	72.00	-						80,00	
Vitamins													
Vit A (IU/kg)	-	-	-	-	-	-							6,600,00
Vit D (units/kg)	-	-	-	-	-	-							2,200,00
Vit E (IU/kg)	22.00	-	10.00	-	3.00	-							38,00
Vit K (ppm)	-	-	-	-	-	-							6,00
Thiamin (ppm)	1.10	0.20	12.00	-	2.00	-							-
Riboflavin (ppm)	0.70	0.10	3.50	3.70	3.10	-							10,00
Niacin (ppm)	4.00	17.00	50.00	160.00	24.00	-							60,00
Pantothenic (ppm)	2.50	3.00	16.00	9.50	10.40	-							30,00
Pyridoxine (ppm)	3.70	6.00	10.00	0.07	5.00	-							2,00
Vit. B <sub>12</sub> (ppb)	-	-	-	-	-	-							40,00
Biotin (ppm)	0.07	0.20	0.20	-	0.30	-							100
Folic acid (ppm)	0.20	0.20	1.50	2.20	2.00	-							-
Carophyll red													
Xanthophyl	14.00	200.00											

원료의 배합율을 산출하는 일련의 계산방식은 다음과 같다. 목적 함수인 가격에 대해서는 다음과 같은 수식이 성립된다.

#### ① COST

$$229.16 \times \text{CORN} + 203.1 \times \text{WBRAN} + 199 \times \text{RBRAN} + 298.8 \times \text{SBM} + 184 \times \text{RSM} + 478 \times \text{CGLUEN} + 25 \times \text{LMS} + 340 \times \text{DCP} + 2900 \times \text{MET} + 1110 \times \text{CHOLINE} + 1900 \times$$



$$\text{PHYTASE} + 2000 \times \text{VITC} + 700 \times \text{MINC} + 60 \times \text{SALT} + 700 \times \text{AFAT}$$

### 성분별 설정조건식

#### ① 수분

$$12.8 \times \text{CORN} + 11.3 \times \text{WBRAN} + 9.3 \times \text{RBRAN} + 10.4 \times \text{SBM} + 8.8 \times \text{RSM} + 10 \times \text{CGLUEN} + 0.1 \times \text{LMS} + \text{DCP} + 7 \times \text{MET} + \text{CHOLINE} + \text{PHYTASE} + \text{VITC} + \text{MINC} + \text{SALT} + \text{AFAT} \geq 13$$

#### ② 조단백질

$$8.3 \times \text{CORN} + 15.7 \times \text{WBRAN} + 13 \times \text{RBRAN} + 44 \times \text{SBM} + 35.3 \times \text{RSM} + 60 \times \text{CGLUEN} + \text{LMS} + \text{DCP} + 32 \times \text{MET} + \text{CHOLINE} + \text{PHYTASE} + \text{VITC} + \text{MINC} + \text{SALT} + \text{AFAT} \geq 17$$

#### ③ 조지방

$$3.2 \times \text{CORN} + 4.4 \times \text{WBRAN} + 14.4 \times \text{RBRAN} + 0.5 \times \text{SBM} + 2.8 \times \text{RSM} + 2 \times \text{CGLUEN} + \text{LMS} + \text{DCP} + 1.5 \times \text{MET} + \text{CHOLINE} + \text{PHYTASE} + \text{VITC} + \text{MINC} + \text{SALT} + \text{AFAT} \geq 2$$

#### ④ 조섬유

$$2 \times \text{CORN} + 8.6 \times \text{WBRAN} + 11.2 \times \text{RBRAN} + 7 \times \text{SBM} + 12.8 \times \text{RSM} + 2.5 \times \text{CGLUEN} + \text{LMS} + \text{DCP} + 8 \times \text{MET} + \text{CHOLINE} + \text{PHYTASE} + \text{VITC} + \text{MINC} + \text{SALT} + \text{AFAT} \leq 6$$

#### ⑤ 조회분

$$1.9 \times \text{CORN} + 5.9 \times \text{WBRAN} + 12.1 \times \text{RBRAN} + 6 \times \text{SBM} + 7.2 \times \text{RSM} + 1.8 \times \text{CGLUEN} + \text{LMS} + \text{DCP} + 1.6 \times \text{MET} + \text{CHOLINE} + \text{PHYTASE} + \text{VITC} + \text{MINC} + \text{SALT} + \text{AFAT} \leq 15$$

#### ⑥ 칼슘

$$0.03 \times \text{CORN} + 0.14 \times \text{WBRAN} + 0.07 \times \text{RBRAN} + 0.25 \times \text{SBM} + 0.68 \times \text{RSM} + 0.02 \times \text{CGLUEN} + 34 \times \text{LMS} + 25.9 \times \text{DCP} + 0.05 \times \text{MET} + \text{CHOLINE} + \text{PHYTASE} + \text{VITC} + \text{MINC} + \text{SALT} + \text{AFAT} \leq 3.7$$

#### ⑦ 총인

$$0.27 \times \text{CORN} + 1.16 \times \text{WBRAN} + 1.59 \times \text{RBRAN} + 0.6 \times \text{SBM} + 1.17 \times \text{RSM} + 0.7 \times \text{CGLUEN} + \text{LMS} + 17.6 \times \text{DCP} + 0.46 \times \text{MET} + \text{CHOLINE} + \text{PHYTASE} + \text{VITC} + \text{MINC} + \text{SALT} + \text{AFAT} \geq 0.32$$

#### ⑧ 대사에너지

$$3420 \times \text{CORN} + 2320 \times \text{WBRAN} + 1630 \times \text{RBRAN} + 2240 \times \text{SBM} + 1900 \times \text{RSM} +$$

$$3900 \times \text{CGLUEN} + \text{LMS} + \text{DCP} + \text{MET} + \text{CHOLINE} + \text{PHYTASE} + \text{VITC} + \text{MINC} + \text{SALT} + 6860 \times \text{AFAT} \leq 2750$$

⑨ 콜린

$$591 \times \text{CORN} + 1077 \times \text{WBRAN} + 1221 \times \text{RBRAN} + 2743 \times \text{SBM} + 6700 \times \text{RSM} + 2200 \times \text{CGLUEN} + \text{LMS} + \text{DCP} + 3.5 \times \text{MET} + 460000 \times \text{CHOLINE} + \text{PHYTASE} + \text{VITC} + \text{MINC} + \text{SALT} + \text{AFAT} \geq 1300$$

**제품설계 원료사용량 설정식**

- $0 \leq \text{CORN} \leq 100$
- $0 \leq \text{WBRAN} \leq 5$
- $0 \leq \text{RBRAN} \leq 3$
- $0 \leq \text{SBM} \leq 50$
- $0 \leq \text{RSM} \leq 3$
- $0 \leq \text{CGLUEN} \leq 10$
- $0 \leq \text{LMS} \leq 10$
- $0 \leq \text{DCP} \leq 2$
- $0 \leq \text{MET} \leq 0.5$
- $0 \leq \text{CHOLINE} \leq 0.5$
- $0.02 \leq \text{PHYTASE} \leq 0.02$
- $0.1 \leq \text{VITC} \leq 0.1$
- $0.1 \leq \text{MINC} \leq 0.1$
- $0.25 \leq \text{SALT} \leq 0.26$
- $0 \leq \text{AFAT} \leq 5$

CORN, WBRAN, AFAT 등은 각각 옥수수를 비롯한 각종 원료의 배합비율이며, 수식, 등식 또는 부등식 하단에 있는 수치를 제약조건이라고 부른다. 수식은 각종 원료의 사용량에 관한 제약조건인데, 이들은 흔히 최소치, 최대치라고 부른다. 위에 열거한 모든 수식을 충족시킬 수 있는 가격을 최소화하는 배합비를 찾아내는 일련의 계산법이다.

**MS Excel Solver 모듈**

사료배합비문제를 풀기 위해서는 원료, 제품에 대한 자료가 기본적으로 필요하다(Table 6). 각 원료에는 원료명, 원료단가, 원료성분(실측지, 평가치)와 제품에는 제품설계의 기준이 되는 성장 단계별 양계 한국사양표준[8]를 참조하였다(Fig. 3).

① 이름정의

Excel에서 셀, 셀 범위, 수식 및 상수 값을 나타내는 단어 또는 문자열로 사용하면 수식을 보다 쉽게 이해하고 관리할 수 있다. 이름은 셀 범위, 함수, 상수 또는 테이블에 대해 정의할 수 있으며, 통합 문서에서 이름을 사용하여 작업한 다음에는 이러한 이름을 쉽게 업데이트할 수 있다.

옥수수, 콘글루텐, 소맥피, 채종박, 대두박, 우지, 석회석, 인산칼슘, 소금, 염화콜린, 메티오닌,

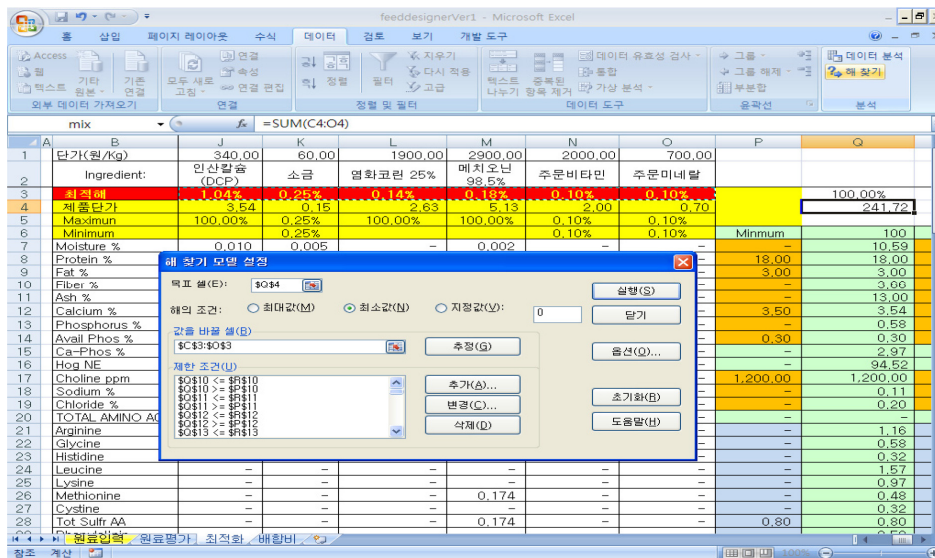


Fig. 3. Click on the set target cell box and type \$Q\$4. To enter the minimum and maximum requirement constraints.

비타민제제, 미네랄제제의 초기값을 “1”로 부여하면 Excel 전자시트에서 변수와 같은 역할을 하여 제약조건 연립방정식을 풀 수 있다(Fig. 4).

② 원료기본자료 입력 구성

원료평가를 위한 원료기본자료 입력수성은 가격, 수분, 조단백질, 조지방, 조섬유, 조회분, 칼슘, 인 등 분석이 가능한 요소들을 입력하여 사용된다. 가축이 필요로 하는 영양분을 정확한 양만큼 공급하고, 가축의 생산 성적을 예측하기 위해서는 사료원료의 정확한 평가가 필요하다. 배합사료의 의존도가 높은 국내 가축사육에는 사료원료의 정확한 평가는 생산성을 결정하는 중요한 요인이다. 에너지나 아미노산과 같은 영양소의 평가는 생체실험을 통해서 얻기보다는 회귀방정식을 사용하여 영양성분을 추정해서 사용한다. 이러한 회귀공식에는 실험실에서 간단히 분



Fig. 4. Select tools and then solver.

석해낼 수 있는 건물량, 단백질 용해도 그리고 조성분, 즉 조단백질, 조섬유, 조지방, 조회분 등이 되며, 회귀공식에 의해 계산되는 에너지, 아미노산, 아미노산이용율 등의 영양성분이 된다. Bish[9]의 산란계사료 배합시 사용하는 식물성 박류의 대사에너지는 공식은 다음과 같다.

$$ME(MJ/kgDM) = 0.0197\text{조단백} + 0.0194\text{조지방} - 0.015\text{조섬유} + 0.0158(NFE)$$

이 공식을 사용할 경우 C.V = 7.1% 그리고 R<sup>2</sup> = 0.83으로서 계산치가 실제 측정치와 매우 높은 상관관계를 보여주고 있다. 단미사료 각각의 에너지 추정 회귀 공식은 Batherham[10]에 의한 Table 5의 공식을 사용한다.

사료원료내의 아미노산 함량은 단백질 함량을 측정 후, 원료에 따른 아미노산 회귀 방정식을 써서 각 아미노산의 함량을 계산한다[11].

### ③ 원료별 평가 공식이용 분석

부인 해 찾기는 what-if 분석이며, 이것은 셀 값의 변경으로 워크시트의 수식 결과에 어떤 영향을 줄지 확인하기 위한 과정이다. 해 찾기를 사용하면 워크시트에서 목표 셀이라고 하는 한 셀의 수식에 대한 최적 값을 찾을 수 있다. 해 찾기는 목표 셀의 수식과 직접 또는 간접적으로 관련된 셀 그룹에 대해 작업한다. 해 찾기는 지정한 변경 셀의 값을 조정하여 목표 셀 수식에서 지정한 결과를 구한다.

Fig. 4는 모델에서 해 찾기에 사용할 값을 제한하기 위해 제한 조건을 적용할 수 있으며, 제한 조건은 목표 셀 수식에 영향을 주는 다른 셀을 참조할 수 있다. Fig. 4에 Microsoft Excel 해 찾기 도구에는 Leon Lasdon(Austin의 Texas 대학)과 Allan Waren(Cleveland 주립 대학)이 개발한 비선형 최적 코드 GRG2가 사용된다. 선형과 정수 문제는 변수 경계를 사용하는 간단한 방법과 John Watson과 Dan Fylstra(Frontline Systems)가 개발한 분기와 경계법이 사용된다.

변경할 셀(C3:O3)은 해 찾기를 실행하면 배합비율을 생성해 준다. 배합비율에 따른 원재료 단가(least cost)를 계산해 준다.

### ④ Excel Solver 실행 결과

Fig. 5는 Excel Solver 모듈을 이용한 사료 배합프로그램은 4개의 시트로 구성되어 있다. a) 원료 입력: 원료단가와 분석실에서 가능한 기본성분 자료를 입력한다. b) 원료평가: 원료의 기본성분이 입력되면 곡류 및 박류 등에 대해 회귀공식을 이용 원료를 평가한 테이블. c) 최적화: 엑셀 해 찾기(Excel Solver add-in)를 이용 사료배합 계산을 편리하게 할 수 있도록 제약조건을 나열한 시트이며, 실제 제약조건에 따른 계산 결과가 나오는 중요한 시트이다. d) 배합비: 사용자가 이용하기 편리하도록 최적화시트를 링크하였다. Table 7은 배합비계산 단추에 매크로를 작성하여 일반 배합비 프로그램과 같은 서식을 만들었다.

## 산란계 성장모델링 기법

Table 6는 산란계 성장모델링 기법은 크게 제품설계에 보정되어야 하는 요인들과 이를 반영한 제품설계를 통해 보정된 배합설계를 통해 동물모델링 기법을 구현하였다.

## 영양소 요구량에 영향을 미치는 요인

최적의 환경 조건에서 설정된 최소요구량은 닭이 일반적인 환경에 있을 때나 여러 가지 스트

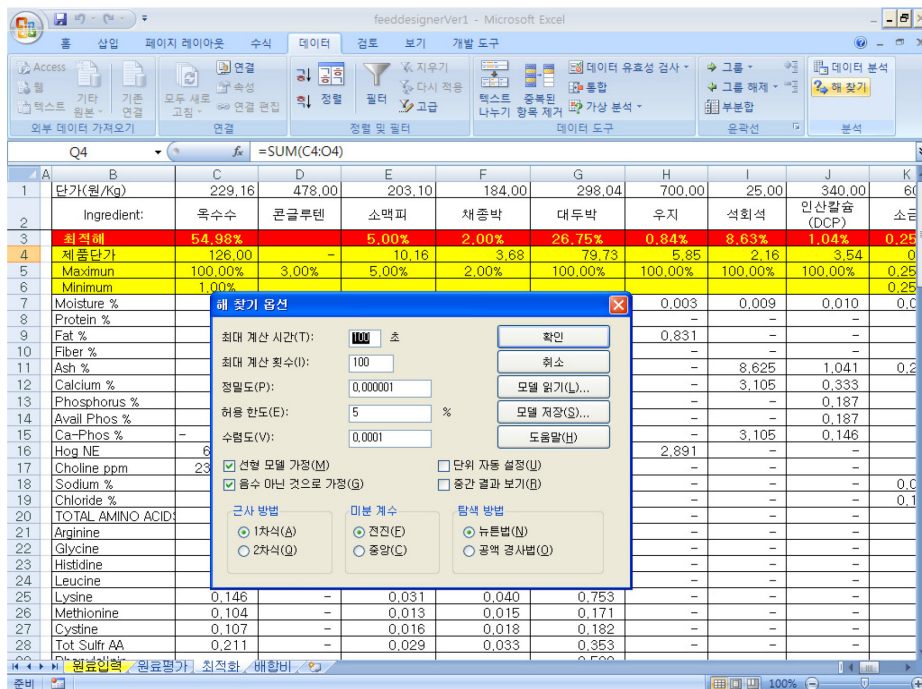


Fig. 5. Finally select options, assume non-negativity and assume linear model.

Table 7. Revision of maintenance energy(ME) by feather state

Feather grade	Maintenance energy correction value	Feather state
1	0.94	Feather state of chicken
2	1.00	Feather state of new layer
3	1.08	Head and nect region somewhat depilation
4	1.20	Heavy depilation on head and nect region
5	1.40	Head, neck, and so on, chest region depilation

레스 요인에 노출되어 있을 때는 보다 높게 요구되며, 영양소 요구량에 영향을 미치는 요인들은 단백질과 에너지, 영양과 질병, 스트레스, 계란의 질에 영향을 주는 인자들이 연계한다.

영양적 면에는 a) 에너지 대 단백질의 비율, b) 칼슘, 인 및 비타민 D<sub>3</sub>, c) 나이아신과 트립토판, d) 메틸 그룹의 대사나 트랜스 메틸레이션(transmethylation)에 있어서 콜린, 메티오닌, 엽산 및 비타민 B<sub>12</sub>의 관계, e) 닭의 근육위축증이나 삼출성 소질 예방에 있어서의 비타민 E, 셀레늄 및 시스틴의 관여, f) 특정 영양소 체내 수송과 관련한 아미노산과 광물질의 킬레이팅 효과, g) 구리와 아연, 아연과 카드뮴, 구리와 몰리브덴, 셀레늄과 비소 등과 같이 미량원소들 사이의 상호작용, h) 알지닌, 라이신, 류신, 이소류신과 발린 및 기타 아미노산의 불균형 및 길항작용 등이 있다. 난질(egg quality)는 고품질의 계란을 생산하는 것과 상호 관련이 되어 있다. 1) 난각의 질, 2) 난백의 품질, 3) 영양적 조성, 4) 혈반이나 얼룩 반점 등의 결점이 없는 것, 5) 난황의 착색도, 6) 계란의 크기 등이 포함된다.

### 산란기간의 급이

Table 8은 산란기간 동안 사료 급여를 통한 적절한 영양소 공급을 해야 하는데, 그중 고려되어

Table 8. Factor influencing in feed intake of layer

Factor	Difference	Equality	Intake change (%)
Environment temperature	± 1℃	=	1
Weight	20 gm difference	≐	1
Laying eggs rate	± 2%	≐	1
Egg weight	± 1.25g	≐	1
Feather (depilation)	Neck and chest region	≐	10
Feed energy	± 1%	≐	± 1

야 할 것은 식 (1)의 에너지 요구량과 Table 8과 식 (2)의 단백질 요구량, 광물질 및 성장별 요구량이다. 닭들은 사료의 에너지 함량에 따라 사료섭취량을 잘 조절하는데, 사료의 에너지 함량이 증가할 때 섭취량은 상승하는 경향이 있으며, 에너지 함량이 2,600-2,900 kcal/kg 사이일 때 20℃-24℃에서 평균 100 kcal/kg의 에너지 함량이 변하면 1일 1수당 4 kcal의 에너지 섭취량 변화를 가져온다.

$$ME = W \times ( a + bT ) + 2 \times E + 5 \times \Delta W \quad (1)$$

Metabolizable energy (ME) intake per day conclusion formula

ME: 일일대사에너지 섭취량(kcal/수/일).

W: 체중(kg).

T: 계사내 평균온도(℃).

E: 일일 산란중(g/수/일).

= 평균난중 × % 산란율 / 100.

ΔW: 일일 증체량(g/수/일).

a: 갈색계의 경우 140, 백색계의 경우 170.

b: 갈색계의 경우 -2.1, 백색계의 경우 -2.2.

$$CP = BW \times 1.3 + \Delta W \times 0.18 + E \times 0.12 / 0.83 \times 0.68 \quad (2)$$

Crude protein and amino acid requiremenet

CP: 조단백질(g/day/bird).

1.3: 체중 1 kg당 유지량(g).

0.18: 체내 CP 함량 (18%).

0.12: 계란(난각 포함) 내 CP 함량(12%).

0.83: 사료 내 CP의 평균 소화율(83%).

0.68: 사료 내 CP의 평균 생물가(68%).

Table 9는 산란계의 생산성은 단백질과 아미노산 섭취량의 1일 섭취량에 따라 좌우된다. 닭에 의하여 소화된 아미노산의 약 75%-80%는 계란의 생산에 직접 사용된다. 어떤 아미노산의 결핍도 생산성(산란율, 난중)의 감소를 초래하며, 사료요구율을 증가시킨다.

난각질은 닭의 칼슘 이용과 저장 능력에 따라 좌우되는데, 난각의 석회화는 소등 후 잠시 후

**Table 9.** Amino acid requirement (% of feed) of white leghorn which have 95% laying eggs

Amino acid level	Feed intake (gm/day/bird)					
	120	110	100	90	80	70
Metabolizable energy (kcal/kg)	2,700	2,700	2,800	2,850	2,850	2,900
Crude protein (%)	14.0	15.5	17.0	19.0	20.5	22.1
Arginine (%)	0.60	0.68	0.75	0.82	0.90	0.98
Histidine (%)	0.14	0.15	0.17	0.19	0.22	0.25
Isoleucine (%)	0.50	0.57	0.63	0.69	0.73	0.82
Leucine (%)	0.73	0.82	0.91	1.00	1.09	1.18
Lysine (%)	0.56	0.63	0.70	0.77	0.84	0.91
Methionine (%)	0.31	0.34	0.37	0.41	0.47	0.56
Methionine + cystine (%)	0.53	0.58	0.64	0.71	0.80	0.91
Phenylalanine (%)	0.38	0.42	0.47	0.52	0.57	0.61
Phenylalanine + tyrosine (%)	0.65	0.75	0.83	0.91	0.99	1.08
Threonine (%)	0.50	0.57	0.63	0.69	0.73	0.82
Tryptophan (%)	0.12	0.14	0.15	0.17	0.18	0.20
Valine (%)	0.56	0.63	0.70	0.77	0.82	0.91

에 시작되어 점등 바로 후에 종료된다. 석회화는 10-12시간 동안 지속된다. 난각질은 난각형성 동안 이용되는 칼슘의 양에 따라 좌우된다. 인이 충분히 공급되지 않으면 닭의 골격에서 탈광물 질화를 초래한다.

### 사료배합 프로그램 실례

#### ① 아미노산 요구량에 따른 원재료비 분석

Table 10에 보면, 95% 산란을 하는 백색 레그혼의 아미노산 요구량을 원재료비를 분석하였다. 사료배합 프로그램에 사용원료의 사용제한은 소금, 주문비타민, 주문미네랄에 최소, 최대치로 두었으며, 모든 원료를 제한 없이 최적화를 실시하였다. 사료섭취량 100 gm/일/수 기준으로 볼 때, 120 gm, 110 gm은 각각 -13.0원, -0.5원이었고, 90 gm, 80 gm, 70 gm은 각각 +12.9원, +19원, +35.4원으로 에너지와 아미노산 요구량이 늘어날수록 원재료비는 상승하는 것을 알 수 있다.

**Table 10.** Analysis raw materials cost of amino acid requirement (% of feed) of white leghorn that do 95% laying eggs that use feed mix program

Amino acid level	Feed intake (gm/day/bird)					
	120	110	100	90	80	70
Metabolizable energy (kcal/kg)	2,700	2,700	2,800	2,850	2,850	2,900
Crude protein (%)	14.0	15.5	17.0	19.0	20.5	22.1
Lysine (%)	0.56	0.63	0.70	0.77	0.84	0.91
Methionine (%)	0.31	0.34	0.37	0.41	0.47	0.56
Methionine + cystine (%)	0.53	0.58	0.64	0.71	0.80	0.91
Cost (₩)	229.9	242.7	243.2	255.9	262.2	278.6

하지만, 동일섭취량으로 보았을 때 아미노산 요구량은 동일하나, 원재료비에서는 섭취량이 적고 단백질과 아미노산 그리고 에너지가 높을수록 섭취량 대비 원재료비가 낮아지는 것으로 나타났다.

② 산란계 사료섭취량에 영향을 주는 요인의 원재료비 분석

산란계는 생명에 필요한 에너지는 사료에 들어있는 탄수화물, 지방 및 단백질에서 이용한다. 최대한 영양소를 이용하기 위해서는 성장, 산란 및 체조성을 할 수 있도록 맞춰줘야 한다. 또한, Table 11은 사료섭취에 영향을 여러 요인들이 있는데, 사료섭취량 100 gm/일/수일 때, 최적 환경 온도인 25℃-30℃ 넘는 온도는 ±1℃ 변화에 따라 1%의 사료섭취를 늘려주어야 하는데, 원재료비로 보면 2.43원/kg, 대사에너지로 보면 28 kcal에 해당된다. 권장표준대비 체중, 산란율, 우모상태, 사료에너지에 따라 사료섭취량을 추가로 급여해 주어야 한다. 사료배합 프로그램으로 대사에너지(ME)를 28 kcal 보정해서 최적화해 본 결과, 243.2원/kg에서 245.78원/kg으로 +2.58원/kg 원재료비가 상승하였다(Fig. 6).

③ 우모상태에 따른 유지에너지(ME) 보정에 대한 원재료비 분석

사료배합 프로그램의 원재료비 분석을 해본 결과, 우모등급 2를 기준으로 하여 보정한 에너지는 1, 3, 4, 5등급 각각 -170 kcal, +220 kcal, +560 kcal, +1,120 kcal였으며, 원재료비는 각각 -19원/kg, +23.4원/kg, +60.4원/kg, +125.1원/kg으로 나타났다. 우모상태가 4, 5등급의 탈모가 심

Table 11. Analysis raw materials cost of factor influencing in feed intake of layer (feed intake 100 gm/day/bird CP 17%, ME 2,800 kcal/kg, cost ₩243.2)

Factor	Difference	Intake change	Cost (₩)	ME (kcal)
Environment temperature	± 1℃	1%	2.43	28
Weight	20 gm difference	1%	2.43	28
Laying eggs rate	± 2%	1%	2.43	28
Egg weight	± 1.25 g	1%	2.43	28
Feather (depilation)	Neck and chest region	10%	24.32	280
Feed energy	± 1%	± 1%	± 2.43	28

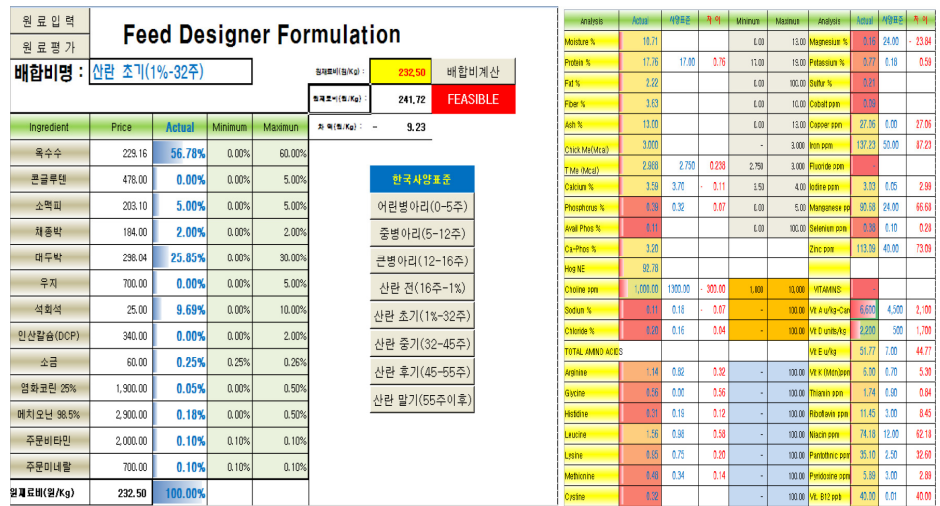


Fig. 6. Least cost result of feed mix program that use user interface.



하게 일어난 등급에서 사료급여를 통한 원재료비 상승은 매우 높게 나타났다[12].

사료섭취량과 관련된 요인들에 추가적으로 필요한 대사에너지 보정은 원재료비 상승을 초래하지만, 생산성과 관련한 산란기 동안의 농장사양체계에 대한 종합적인 연구가 필요하며, 농장별 최적의 생산성을 유도해낼 수 있는 추가적인 사료섭취량 변화요인의 추출이 필요하다.

## REFERENCES

1. Thaer AD. *Principes raisinnés d'agriculture*. Paris: Ballimore; 1896.
2. Waugh FV. The minimum-cost dairy feed. *Am J Agric Econ*. 1951;33:299-310.
3. Hutton RG, Nye PH. The rapid determination of the major nutrient elements in plants. *J Sci Food Agric*. 1958;9:7-14. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740090102>
4. Potter LM, Matterson LD. Metabolizable energy of feed ingredients for the growing chick. *Poult Sci*. 1960;39:781-2. <https://doi.org/10.3382/ps.0390781>
5. Combs GF, Milligan JL, Martin JL. Specifications for linear programming of experimental broiler rations. *Feedstuffs*. 1963;35:44-8.
6. Moughan P, Smith WC. The effect of the dietary  $\text{Na}^+\text{K}^+\text{Cl}^-$  balance on the short-term energy and nitrogen metabolism of growing pig. *J Sci Food Agric*. 1984;35:1183-5. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740351107>
7. Moughan P, Smith WC, Cornwell JK. Determination of the biological value of a protein source with a supposedly ideal amino acid balance (ARC 1981) for the young pig (10 to 20 kg liveweight). *J Sci Food Agric*. 1987;38:91-6. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740380202>
8. National Institute of Animal Science. *Korean feeding standard for poultry*. Seoul: Rural Development Administration; 2007.
9. Bish CL, Beane WL, Ruzsler PL, Cherry JA. Body weight influence on egg production. *Poult Sci*. 1985;64:2259-62. <https://doi.org/10.3382/ps.0642259>
10. Batherham ES, Anderson LM. Utilization of ileal digestible amino acids by growing pigs: isoleucine. *Br J Nutr*. 1993;71:531-41. <https://doi.org/10.1079/bjn19940160>
11. Pinchasov Y, Mendonc CX, Jensen LS. Broiler chick response to low protein diets supplemented with synthetic amino acids. *Poult Sci*. 1990;69:1950-5. <https://doi.org/10.3382/ps.0691950>
12. Leeson S, Summers JD. *Scott's nutrition of the chicken*. 4th ed. Guelph: University Books; 2001.