



산란계 육성기·산란초기 에너지 수준별 급여가 산란초기 생산성, 간 건강, 혈액 특성 및 계란 품질에 미치는 영향

김희진^{1*}, 김현수^{1†}, 손지선², 이우도³, 홍의철¹, 김윤석¹

¹ 국립축산과학원 가금연구센터

² 국립축산과학원 가축정밀영양과

³ 국립축산과학원 동물복지과

Effects of dietary energy levels during rearing and early laying phases on early-lay performance, liver health, blood characteristics, egg quality in laying hens

Hee-Jin Kim^{1*}, Hyunsoo Kim^{1†}, Jiseon Son², Woo-Do Lee³, Eui-Chul Hong¹, Yunseok Kim¹

¹ Poultry Research Center, National Institute of Animal Science, Pyeongchang 25342, Korea

² Precision Animal Nutrition Division, National Institute of Animal Science, Wanju 55365, Korea

³ Animal Welfare Division, National Institute of Animal Science, Wanju 55365, Korea

*These authors contributed equally to this work.

Received: Mar 11, 2026

Revised: Apr 7, 2026

Accepted: May 1, 2026

†Corresponding author

Hyunsoo Kim

E-mail: kindkims1@korea.kr

Copyright © 2026 Korean Society of Poultry Science.

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

Hee-Jin Kim

<https://orcid.org/0000-0002-6959-9790>

Hyunsoo Kim

<https://orcid.org/0000-0001-8887-1318>

Jiseon Son

<https://orcid.org/0000-0002-5285-8186>

Woo-Do Lee

<https://orcid.org/0000-0003-4861-4637>

This study evaluated the effects of dietary metabolizable energy (ME) levels from rearing to early lay on performance, reproductive traits, liver health, serum biochemistry, and egg quality in Hy-Line Brown hens. Four diets were formulated to the breeder-recommended ME level (normal level diets, Con) or adjusted by +100 (high-level diets, H), -100 (low-level diets, L), or -200 kcal ME/kg (very low-level diets, VL) and fed from the starter phase through 35 weeks of age. During early laying period, body weight was higher in H (2,210 g) and Con (2,154 g) than in L (2,083 g) and VL (2,025 g) ($p < 0.05$). Egg production rate, egg weight, egg mass, feed intake, and feed conversion ratio did not differ among treatments ($p > 0.05$). Follicle distribution was partially affected the numbers of large white follicles (LWF; 3–5 mm) and small yellow follicles (SYF; 5–10 mm) differed among treatments ($p < 0.05$), whereas the numbers of SWF and LYF, hierarchical follicle (F1–F5) size and weight, and ovary weight were unchanged ($p > 0.05$). Abdominal fat deposition was reduced in VL ($p < 0.05$), whereas liver weight, hepatic fat content, liver color, and hepatic malondialdehyde were unchanged ($p > 0.05$). Serum total cholesterol, triglycerides, glucose, total protein, aspartate aminotransferase (AST), and alanine transaminase (ALT) concentrations were also unaffected ($p > 0.05$). Eggshell strength and thickness, and Haugh unit did not differ, but yolk color was higher in H ($p < 0.05$). Overall, dietary ME manipulation within ± 100 or -200 kcal ME/kg relative to the Con level had limited effects on early-lay productivity and metabolic health, but significantly influenced body weight, fat deposition, and specific follicle pools. Further research is required to clarify whether early energy-feeding strategies have long-term effects on performance up to 100 weeks of age.

Keywords: laying hens; metabolizable energy; early lay; egg production; liver health

Eui-Chul Hong
<https://orcid.org/0000-0003-1982-2023>
 Yunseok Kim
<https://orcid.org/0000-0003-4186-7877>

Conflict of interests

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

Funding sources

This work was supported by the "(Project No. PJ01725001)" and Rural Development Administration, and this study was supported by 2026 the RDA Fellowship Program of Rural Development Administration, Korea.

Acknowledgements

Not applicable.

Availability of data and material

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

Author contributions

Conceptualization: Kim HJ, Kim H.
 Data curation: Kim HJ, Kim H.
 Formal analysis: Kim HJ, Kim H.
 Investigation: All authors.
 Methodology: Kim HJ, Kim H.
 Software: Kim HJ, Kim H.
 Validation: Kim HJ, Kim H, Son J, Lee WD, Hong EC.
 Writing - original draft: Kim HJ, Kim H.
 Writing - review & editing: All authors.

Ethics approval

The experimental protocols were reviewed and approved by the Institutional Animal Care and Welfare Committee of the National Institute of Animal Science, Rural Development Administration of the Korea (NIAS2023-0601).

Declaration of generative AI

During the preparation of this manuscript, ChatGPT was used to assist with English language editing and sentence refinement. The authors reviewed and revised the generated content as necessary and take full responsibility for the final content of the publication.

서론

최근 양계 산업에서는 산란계의 산란 지속성 유지와 산란 기간의 연장이 사양관리 측면에서 중요한 과제로 인식되고 있다. 지난 수십 년간 산란계는 산란 생산성과 관련된 다양한 형질을 중심으로 지속적인 육종과 선발이 이루어져 왔으며, 최근에는 산란 기간의 연장(longer laying cycle)이 주요한 개량 목표로 제시되고 있다. 대표적인 상업 육종회사들은 100주령 동안 500개 이상의 계란 생산을 목표로 품종 개량을 진행해 왔으며[1,2], 산란기간이 연장될 경우 산란용 순계 및 종계의 암탉 수 절감, 연간 가축비 절감 등 다양한 경제적 이점이 보고된 바 있다[1].

한편, 국내 산란계 산업에서도 사육 환경 개선을 위한 정책적 변화가 논의되고 있다. 특히, 2027년부터 케이지 사육 시 산란계 1수당 사육 면적을 기존 0.05m²에서 0.075m²로 확대하는 방안이 추진되고 있으며, 제도 시행 시 사육 마릿수 감소에 따른 생산비 증가가 예상된다. 유럽연합(EU)의 경우 기존 배터리 케이지에서 enriched 케이지(사육 면적: 0.075m²)로 전환 시, 사육 마릿수 감소에 따라 시설 및 장비 비용이 증가하면서 마리당 생산비가 약 5% 상승한 것으로 보고된 바 있다[3]. 국내에서도 유사한 제도 변화가 추진되고 있는 점을 고려할 때, 이에 따른 생산비 상승을 완화할 수 있는 사양 기술 개발이 요구된다.

산란계의 산란 기간 동안의 생산성을 유지하기 위해서는 육성기와 산란초기 동안의 에너지 균형 관리가 중요하며, 이 시기의 체중 도달 수준과 근육 및 지방 등 체성분 발달은 이후 산란 성적과 관련이 있는 것으로 보고되어 왔다[4]. 지방 조직은 산란기 에너지 공급원으로 활용되지만, 과도한 체지방 축적은 산란을 및 난중 저하와 관련이 있는 것으로 보고되었다[5]. 이러한 체성분과 에너지 대사 과정의 조절은 단순한 체중 변화뿐 아니라, 산란 생리에 중요한 영향을 미치는 요인으로 작용할 수 있다.

참고문헌 [6]은 15주령부터 산란 5% 도달 시점까지 사료의 에너지 수준을 조절한 결과, 고에너지 급여군에서 산란 개시가 앞당겨졌으며, 43주령까지의 계란 생산량도 증가하였고 보고하였다. 이에 반해, 참고문헌 [7]은 15~20주령 동안의 에너지 수준 차이가 72주령 산란계의 생산성과 계란 품질에 유의한 영향을 미치지 않았다고 하였다. 참고문헌 [8] 역시 6~20주령 동안의 사료 내 에너지 수준 차이가 140일령까지의 체중, 사료섭취량 및 폐사율에 유의한 영향을 미치지 않았으며, 이후 308일간의 산란 성적에도 차이가 없음을 보고하였다. 한편, 참고문헌 [9]은 15~18주령 동안 에너지 수준을 증가시킨 결과, 체중은 유의하게 증가하였으나 산란 초기(19~34주령)의 산란 성적에는 영향을 미치지 않았다고 하였다.

이처럼 대부분의 선행 연구는 육성기, 특히 산란예비기에 초점을 맞추어 사료 에너지 수준의 효과를 분석해 왔으며, 육성기와 산란초기를 연속적으로 고려하고 이후 생산성과 생리적 특성을 함께 평가한 연구는 상대적으로 제한적이다.

따라서 본 연구는 산란계의 육성기 및 산란초기 동안 사료 내 에너지 수준의 차이가 생산성 및 생리적 특성에 미치는 영향을 평가하고자 수행되었다. 이를 위해 산란율을 포함한 생산성 지표와 함께 간 기능, 혈액 생화학 지표, 난포 발달 및 계란 품질 등 주요 생리적 특성에 대한 사료 에너지의 영향을 종합적으로 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 산란계의 산란 기간 연장을 위한 사양관리 기초자료로 활용하고자 한다.

재료 및 방법

공시동물 및 시험설계

본 연구는 산란계의 육성기 및 산란초기 사료 내 에너지 수준이 산란초기 생산성, 간 건

강, 혈액 특성 및 계란 품질에 미치는 영향을 구명하기 위하여 수행하였다. 실험에는 3주령 Hy-Line Brown 병아리 432수를 공시하였으며, 전체 사양 기간을 육성기(3~18주령)와 산란 초기(19~36주령)로 구분하였다. 육성기에는 처리당 6반복으로 각 반복에 18수를 배치하였고, 산란초기에는 처리당 6반복, 반복당 15수(펜당 5수)를 배치하였다. 모든 반복은 4처리구에 완전임의배치법에 따라 배치하였다. 처리구는 사료 내 대사에너지(metabolizable energy, ME) 수준을 기준으로 설정하였으며, 높은 에너지(high-level diets, H; +100kcal of ME/kg), 일반 에너지(normal level diets, Con; 기준 사료), 낮은 에너지(low-level diets, L; -100kcal of ME/kg), 매우 낮은 에너지(very low-level diets, VL; -200kcal of ME/kg)의 4가지 수준으로 구성하였다. Con의 에너지 수준은 참고문헌 [2]에 나오는 매뉴얼의 권장치를 참고하여 단계별로 조정하였다. 어린 병아리 2,960kcal, 중병아리 2,910kcal, 큰 병아리 2,880kcal, 산란예비는 2,890kcal, 산란초기는 3,290kcal로 설정하였으며(Table 1), 각 단계별로 해당 수준의 사료를 급여하였다. 사육 환경은 3주령부터 15주령까지 육성용 케이지(750×600×400mm)를 사용하였고, 16주령 이후에는 산란용 케이지(600×625×450mm)로 옮겨 시험을 실시하였으며, 사육 면적은 모두 0.075m²/수로 설정하였다. 실험 기간 동안 물과 사료는 자유급이(*ad libitum*)하였으며, 계사 내 온도, 점등 및 습도는 Hy-Line Brown 매뉴얼의 기준에 따라 설정하였다.

Table 1. Ingredients and nutrient composition of experimental diets

Ingredient	Starter 2				Grower				Developer				Pre-lay				Peaking			
	H	Con	L	VL	H	Con	L	VL	H	Con	L	VL	H	Con	L	VL	H	Con	L	VL
Corn	64.3	65.3	65.9	59.3	67.6	69.1	64.0	56.8	75.1	68.4	61.9	55.6	63.1	65.3	63.2	59.3	63.0	62.0	64.1	62.2
Wheat gluten	0.00	0.00	0.00	8.56	0.00	0.00	5.48	14.60	0.00	7.72	14.36	18.64	0.00	0.00	4.00	9.76	0.00	0.00	0.00	2.36
Gluten	3.52	2.00	0.00	0.00	3.00	2.00	0.00	0.00	2.92	2.32	1.40	0.00	3.52	3.32	2.96	2.52	3.52	5.00	2.00	0.00
DDGS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.28	3.00	5.00	9.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Soybean meal	24.4	26.4	29.2	27.3	23.2	24.4	26.1	24.2	15.5	14.4	13.2	11.9	21.1	21.0	20.5	19.8	18.4	16.3	20.4	22.8
Limestone	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.08	9.10	9.07	9.04
Maifan stone meal	0.91	0.91	0.90	0.89	0.86	0.86	0.84	0.83	0.87	0.86	0.86	0.86	2.97	2.97	2.96	2.96	0.00	0.00	0.00	0.00
Monocalcium phosphate	1.52	1.52	1.48	1.48	1.48	1.48	1.44	1.44	1.28	1.24	1.20	1.12	1.44	1.44	1.44	1.44	1.36	1.36	1.32	1.32
NaCl	0.27	0.27	0.27	0.26	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.22	0.18	0.30	0.30	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30
NaHCO ₃	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Animal fat	3.32	1.88	0.64	0.52	2.08	0.44	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	3.96	2.00	1.00	0.40	3.32	4.80	1.80	1.00
Choline HCl (50%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.07	0.05	0.04
DL-Methionine (98%)	0.19	0.20	0.22	0.22	0.14	0.15	0.16	0.16	0.02	0.03	0.03	0.03	0.13	0.13	0.13	0.13	0.24	0.23	0.25	0.26
Threonine (98.5%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	0.03	0.03
L-lysine-sulfate (65%)	0.23	0.15	0.05	0.08	0.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.30	0.14	0.03
Vit-premix	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Mineral-premix	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Crude protein (%)	20.0	18.3	18.2	18.2	18.2	17.5	17.5	17.5	17.5	15.0	15.0	15.0	15.0	16.5	16.5	16.5	15.5	15.5	15.5	15.5
Metabolizable energy (kcal/kg)	3,060	2,960	2,861	2,761	3,009	2,909	2,811	2,710	2,979	2,879	2,779	2,679	2,991	2,890	2,790	2,689	2,866	2,965	2,766	2,665
Calcium (%)	1.05	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	0.95	0.95	0.90	0.90	0.90	0.90	2.50	2.50	2.50	3.64	3.64	3.64	3.64
Phosphorus (%)	0.69	0.67	0.67	0.68	0.72	0.65	0.66	0.69	0.74	0.59	0.63	0.66	0.68	0.62	0.63	0.65	0.39	0.39	0.39	0.39
Total lysine (%)	1.11	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.89	0.92	0.90	0.66	0.66	0.66	0.66	0.78	0.78	0.78	0.82	0.82	0.82	0.82
Total methionine (%)	0.53	0.50	0.50	0.50	0.50	0.44	0.44	0.44	0.44	0.30	0.30	0.29	0.29	0.41	0.41	0.41	0.50	0.50	0.50	0.50
Total methionine + cystine	0.86	0.81	0.81	0.81	0.81	0.74	0.74	0.74	0.74	0.57	0.57	0.57	0.57	0.70	0.70	0.70	0.77	0.77	0.77	0.77

H, high-level diets (+100 kcal of ME/kg); Con, normal level diets; L, low-level diets (-100 kcal of ME/kg); VL, very low-level diets (-200 kcal of ME/kg).

DDGS, distillers dried grains with solubles; HCl, hydrochloric acid.

조사항목

생산성 조사

산란계의 육성기 및 산란초기 사료 내 에너지 수준에 따른 산란초기 생산성 평가는 산란율(hen-day laying rate), 난중(egg weight), 산란량(egg mass), 일일 사료섭취량(feed intake), 사료 요구율(feed conversion ratio, FCR)을 기준으로 19주령부터 36주령까지 측정하였다. 산란율은 매일 오후 2시에 집란하여 반복별 산란된 계란 수를 기록하고, 이를 사육 개체 수 대비 비율로 환산하여 평균 산란율을 산출하였다. 난중은 1주 간격으로 수집된 계란의 무게를 전자 저울로 측정하고, 처리구별 평균값으로 산출하였다. 산란량은 산란율(%)에 평균 난중(g/개)을 곱하여 환산하였다. 사료 섭취량은 전체 실험 기간 동안 급여된 총 사료량에서 잔량을 차감하여 실제 섭취량을 계산하고, 사육 마릿수와 기간을 고려해 일일 섭취량으로 환산하였다. FCR은 동일 기간 동안의 총 사료섭취량을 산란량으로 나누어 산출하였다.

혈액 생화학 분석

혈액 생화학적 분석을 위해 산란 초기 종료 시점인 36주령에 처리구별로 평균 체중($\pm 5\%$) 범위에 해당하는 개체 9수를 선별하였다. 선별된 개체로부터 익하정맥을 통해 개체당 3mL의 혈액을 채취하였으며, 채혈된 혈액은 serum separation tube에 담아 4°C에서 1,977×g으로 20분간 원심분리하여 혈청(상층액)을 분리하였다. 분리된 혈청은 자동 혈액 생화학 분석기(AU480 Chemistry Analyzer, Beckman Coulter)를 이용하여 총콜레스테롤(total cholesterol), 중성지방(triglyceride), 포도당(glucose), 총단백(total protein), 아스파르테이트 아미노전이효소(aspartate aminotransferase, AST), 알라닌 아미노전이효소(alanine transaminase, ALT), 알부민(albumin), 인(inorganic phosphorus), 칼슘(Ca) 수준을 분석하였다.

생식기관 무게 및 난포 발달 평가

산란초기 종료 시점인 36주령에 처리구별 평균 체중의 $\pm 5\%$ 범위에 해당하는 개체 9수를 무작위로 선별하였다. 선별된 개체는 이산화탄소(CO₂) 가스를 이용해 안락사한 후, 경동맥 절개를 통해 방혈하였다. 이후 개복하여 복부지방, 간, 난소, 난관을 적출하고, 조직 표면의 수분을 제거한 뒤 전자저울을 사용하여 각각의 무게를 측정하였다. 특히, 난소 내에서 육안으로 구분 가능한 발달 난포는 크기 순으로 F1(가장 큰 난포)부터 F5까지 최대 5개를 선별하여 각각의 무게와 직경(mm)을 측정하였다. 또한 난포는 직경을 기준으로 1~3mm는 SWF(small white follicles), 3~5mm는 LWF(large white follicles), 5~10mm는 SYF(small yellow follicles), 10mm 이상은 LYF(large yellow follicles)로 분류하여 계수하였다.

간 지방 함량 및 지방 산화도 분석

적출한 간의 지방 함량은 이중에너지 X선 흡수계측법(dual-energy X-ray absorptiometry)을 이용하여 측정하였다. 분석은 InAlyzer DEXA System(Medikors)을 사용하여 수행하였다. 장비는 제조사의 표준 교정법을 이용하여 분석 전 교정하였으며, 모든 시료는 동일한 스캔 조건에서 측정하였다. 측정된 데이터는 전용 분석 소프트웨어를 이용하여 간 조직의 지방 함량(%)으로 산출하였다.

간 조직 내 MDA(malondialdehyde) 농도는 TBARS(thiobarbituric acid reactive substances) 방법에 따라 분석하였다. 간 조직에 ice-cold tissue buffer를 첨가하여 균질화한 후, 균질액의 단백질 농도는 BCA(bicinchoninic acid) 방법으로 정량하였다. 정량된 균질액에 30% TCA(trichloroacetic acid), 5M HCl 및 2% TBA(2-thiobarbituric acid)를 첨가하여 95°C에서 30분간 반응시킨 뒤, 실온에서 약 5분간 냉각하였다. 이후 시료를 4°C에서 12,000×g으로

10분간 원심분리하였으며, 상층액을 취하여 532nm에서 흡광도를 측정하였다. MDA 농도는 1,1,3,3-tetraethoxypropane을 표준물질로 사용하여 산출하였으며, 최종 결과는 ug MDA/mg protein으로 나타내었다.

계란 품질

계란 품질 평가는 산란초기 종료 시점인 36주령에 처리구별로 무작위로 수집한 계란 30개를 대상으로 실시하였다. 분석 항목에는 난중, Haugh unit, 난백고, 난각색, 난황색, 난각강도 및 난각 두께가 포함되었다. 난중, 난백고, Haugh unit 및 난황색은 자동 계란 품질 분석기(QCM+, Technical Services & Supplies)를 이용하여 측정하였다. 난각 강도는 난각 강도 측정기(egg shell force gauge model II, Robotmation)를 사용하여 계란 둔단부에 하중을 가한 후, 파손 시의 최대 압력 값을 측정하였다. 난각 두께는 계란의 중간부위를 난각막을 제거한 뒤, 동일 지점을 디지털 마이크로미터(Digimatic micrometer, Series 547-360, Mitutoyo)를 이용해 3회 반복 측정한 평균값으로 산출하였다. 난각색은 둔단부에서 색차계(CR-400, Konica Minolta)를 사용하여 측정하였다.

통계처리

본 연구에서 얻어진 실험 자료는 SAS 프로그램(Statistical Analysis System, version 9.4, SAS Institute)을 활용하여 GLM(General Linear Model) 절차를 통해 일원배치 분산분석(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)을 수행하였다. 각 처리구의 평균값 간의 통계적 차이는 Duncan의 다중 비교법(Duncan's multiple range test)을 적용하여 분석하였으며, 유의성 판정은 유의수준 $p < 0.05$ 에서 수행하였다.

결과 및 고찰

생산성

육성기와 산란초기 사료 에너지 수준이 산란계의 체중 및 계란 생산성에 미치는 영향을 분석한 결과는 다음과 같다(Table 2). 산란초기 체중은 처리구 간 유의한 차이가 나타났으며, H(2,210.00g) 및 Con(2,154.00g) 처리구가 L(2,083.47g) 및 VL(2,024.60g) 처리구보다 유의적으로 높았다($p < 0.05$). 산란율(%)은 H(90.76%), Con(91.66%), L(90.70%), VL(89.61%)로 처리구 간 차이가 없었으며, 난중, 산란량, FCR 또한 유의차가 없었다($p > 0.05$). 사료섭취량

Table 2. Effects of dietary metabolizable energy level during rearing and early laying on egg production performance of Hy-Line Brown hens during the early laying period

Parameter	Treatment				SEM	p-value
	H	Con	L	VL		
Body weight	2,210.00 ^a	2,154.00 ^a	2,083.47 ^b	2,024.47 ^b	21.579	0.001
Egg production (%)	90.76	91.66	90.70	89.61	0.683	0.243
Egg weight (g)	59.06	60.46	59.27	61.03	0.496	0.051
Egg mass ¹⁾	53.95	55.68	54.02	55.05	0.517	0.079
Feed intake (g/bird)	129.36	130.86	132.66	134.43	1.296	0.062
Feed conversion ratio (FCR) ²⁾	2.40	2.35	2.46	2.45	0.037	0.194

H, high-level diets (+100 kcal of ME/kg); Con, normal level diets; L, low-level diets (-100 kcal of ME/kg); VL, very low-level diets (-200 kcal of ME/kg).

¹⁾Egg mass (g/hen/day) = egg production (%) × egg weight (g) / 100.

²⁾FCR = feed intake / egg mass.

^{a,b} Means within the same row with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

은 에너지 수준이 저하에 따라 섭취량이 증가하는 경향을 보였으나, 처리구 간의 유의적인 차이는 없었다.

참고문헌 [10]은 육성후기(14~18주)에 에너지(2,816 vs 3,036kcal ME/kg), 단백질, 지방을 조절하더라도 산란초기 난중 및 생산성 지표가 전반적으로 큰 영향을 받지 않았으며, 성장기 조절의 효과가 제한적일 수 있음을 제시하였다. 참고문헌 [11]의 연구에서는 17주령부터 46주령까지 사료 에너지를 2,650 및 2,750kcal ME/kg로 하여 급여한 결과 산란율에는 유의적인 차이는 보이지 않았다. 그러나 사료 섭취량에서는 각각 114.6g과 111.3g으로 에너지 수준이 낮을수록 사료 섭취량이 더 높은 경향을 보였다[11]. 이러한 결과는 본 연구 결과와 사료 에너지 수준이 낮아질수록 사료 섭취량이 증가하는 경향과 유사하였다. 이는 산란계가 사료 내 에너지 수준에 따라 사료 섭취량을 조절함[12]으로써 일정 수준의 에너지 섭취량을 유지하려는 생리적 보상 반응이 작용한 결과로 판단된다.

참고문헌 [13]은 24~59주령의 Hy-Line Brown에서 사료 에너지 수준(2,650, 2,750, 2,850, 2,950kcal/kg)을 비교한 결과, 2,650kcal/kg 처리구에서 산란율이 88.8%로 가장 낮았고 2,850kcal/kg 처리구에서 92.7%로 유의적으로 높았다고 보고하였다. 반면 사료섭취량은 110~115g 수준에서 에너지 농도가 낮을수록 증가하는 경향을 보였으며, 난중은 에너지 수준에 의해 유의한 영향을 받지 않았다[13]. 참고문헌 [14]는 18~66주령 동안 2,820 및 3,040kcal AME/kg의 에너지로 급여 시 FCR의 유의차가 없음을 보고하였고, 참고문헌 [15]의 결과 또한 hy-Line brown(36~44주)에 2,519, 2,798, 3,078kcal/kg 사료를 급여하였을 때 에너지 수준에 따른 산란율의 유의한 차이를 확인하지 못하였다. 이러한 연구들은 에너지 섭취의 증가가 산란율의 증가로 직접 연결되기보다는 체중의 증가로 전환될 수 있음을 보여준다. 참고문헌 [16]의 연구에서는 23주령 산란계를 2,775, 2,850, 2,925, 3,000kcal/kg으로 하여 40주령까지 사료를 급여하였을 때 난중에는 유의적인 차이를 보이지 않았으나, 산란율과 섭취량 모두 에너지 수준이 낮아질수록 유의적으로 낮아지는 경향을 나타내었다($R^2=0.85$). 또한 난중은 사료 내 에너지 수준보다 단백질 함량에 큰 영향을 미친다는 보고가 있어[17], 난중에도 유의적인 차이를 보이지 않은 것으로 사료된다.

이러한 결과는 본 시험의 에너지 조절 폭(± 100 , -200 kcal ME/kg)이 산란초기 생산성 자체를 변화시킬 만큼 충분히 크지 않았으나, 체중에서는 차이를 가져왔다. 또한, 산란계가 사료 섭취량을 통해 에너지 섭취를 보상함으로써 산란에 필요한 에너지·영양소 공급을 일정 수준으로 맞추었다고 사료된다. 향후 이러한 육성기와 산란초기 에너지 수준이 산란초기뿐만 아니라 초기 이후 중기, 후기 및 말기까지 생산성에 미치는 장기적인 영향에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

혈청 내 생화학 지표

육성기 및 산란초기 사료 에너지 수준에 따른 산란초기 혈청 생화학적 변화는 Table 3에 나타내었다. 혈액 생화학 지표는 유전적 요인(품종, 성별)과 비유전적 요인(연령, 신체활동, 근육량, 사료 등)의 영향을 받는 것으로 보고되어 있다[18]. 본 연구에서 총 콜레스테롤(142.52~172.58mg/dL), 중성지방(1,414.27~1,628.37mg/dL), 포도당(147.75~179.08mg/dL), 총 단백질(5.68~5.99g/dL), AST(207.98~217.07U/L), ALT(1.10~1.45 U/L), 알부민(2.23~2.33 g/dL), 무기인(7.02~8.52mg/dL), Ca(30.34~31.30mg/dL) 등 모든 혈청 지표는 처리구 간 유의한 차이를 보이지 않았다($p>0.05$).

총 단백질은 알부민과 글로불린으로 구성되며, 영양 상태를 반영하는 중요한 지표로 활용된다[19]. 또한 혈액 단백질은 영양소 섭취 수준에 민감하게 반응하고, 섭취가 부족할 경우 체내 저장원(조직 단백질 등)이 동원될 수 있다는 점이 보고된 바 있다[19]. 따라서 본 연

Table 3. Effects of dietary metabolizable energy level during rearing and early laying on serum biochemical parameters of Hy-Line Brown hens during the early laying period

Parameter	Treatment				SEM	p-value
	H	Con	L	VL		
Total cholesterol	149.90	142.02	172.58	167.45	11.772	0.245
Triglycerides	1,628.37	1,564.52	1,561.13	1,414.27	88.137	0.389
Glucose	172.78	147.75	179.08	160.28	10.518	0.190
Total protein	5.68	5.89	5.99	5.84	0.085	0.112
AST	207.98	206.57	217.05	217.07	10.334	0.824
ALT	1.13	1.45	1.37	1.10	0.139	0.229
Albumin	2.23	2.28	2.33	2.23	0.030	0.074
Inorganic phosphorus	7.80	8.52	7.02	7.29	0.420	0.094
Calcium	30.34	31.30	31.01	30.96	0.828	0.867

H, high-level diets (+100 kcal of ME/kg); Con, normal level diets; L, low-level diets (−100 kcal of ME/kg); VL, very low-level diets (−200 kcal of ME/kg).

AST, aspartate aminotransferase; ALT, alanine aminotransferase.

구에서 총 단백질과 알부민이 처리구 간 차이를 보이지 않은 결과는, 에너지 수준이 달랐음에도 산란초기 단백질 대사 균형이 비교적 안정적으로 유지되었을 것이라 사료된다.

중성지방과 총 콜레스테롤은 지질 대사 상태를 반영하는 대표적인 지표로 알려져 있으며 [20], 본 연구에서는 두 지표 모두 에너지 수준에 따른 유의한 변화가 관찰되지 않았다. 이는 참고문헌 [21]이 산란계에서 에너지 수준(2,750, 2,775, 2,800kcal ME/kg)을 달리하여 23주간 급여하였을 때 총 단백질, 총 콜레스테롤 및 중성지방에서 처리구 간 유의차가 없었다고 보고한 결과와 유사한 경향이다. 반면 참고문헌 [22]는 육계에서 에너지 수준을 달리 급여할 경우 혈청 중성지방이 증가할 수 있음을 보고한 바 있어, 혈청 지질 반응은 축종(산란계 및 육계), 사육 단계, 급여 기간 및 에너지 조절 폭에 따라 달라질 수 있다.

ALT와 AST는 간세포 내에 존재하는 주요 아미노전이효소로, 간세포 손상 시 혈액으로 방출될 수 있어 간 기능 평가 지표로 활용된다[23]. 본 연구에서 혈청 ALT와 AST는 에너지 수준에 따른 유의차가 없었으며, 이는 간 지방 함량 및 간 MDA 결과(Table 4)에서 처리구 간 차이가 없었던 결과와 일치하는 경향을 보였다. 즉, 본 시험에서 설정한 에너지 조절 범위 내에서는 산란초기 산란계의 간 기능 및 산화적 손상 수준에 유의적인 차이가 나타나지 않았으며, 이에 따라 혈청 생화학 지표에서도 유의적인 변화가 관찰되지 않은 것으로 판단된다. 또한 참고문헌 [24]는 30주령 산란계에게 대사에너지 수준이 다른 사료(2,700 및 2,800kcal/kg)를 50주령까지 급여한 결과, 총 콜레스테롤, 중성지질, 총 단백질, AST, ALT 및 Ca 농도에서 처리구 간 유의한 차이가 관찰되지 않았다고 보고하여, 본 연구와 유사한 결과

Table 4. Effects of dietary metabolizable energy level on abdominal fat deposition and liver traits of Hy-Line Brown hens during the early laying period

Parameter	Treatment				SEM	p-value
	H	Con	L	VL		
Abdominal fat	126.82 ^a	115.63 ^a	105.21 ^a	81.16 ^b	7.185	0.001
Liver weight (g)	39.12	44.29	43.82	41.27	1.992	0.246
Liver fat (%)	18.26	19.05	20.96	18.08	1.538	0.541
Liver color						
L*	52.95	54.19	53.82	50.31	1.989	0.519
a*	13.86	13.48	12.59	13.86	0.587	0.240
b*	37.96	35.34	30.89	35.48	2.384	0.930
Malondialdehyde (ug/mg protein)	85.20	89.90	84.02	80.97	5.176	0.677

H, high-level diets (+100 kcal of ME/kg); Con, normal level diets; L, low-level diets (−100 kcal of ME/kg); VL, very low-level diets (−200 kcal of ME/kg).

^{a,b} Means within the same row with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

를 나타내었다.

따라서, 본 연구에서 설정한 에너지 수준 범위 내에서는 산란초기 산란계의 혈청 생화학 지표에 있어 단백질 및 지질 대사와 관련된 영양 상태와 생리적 기능에 유의미한 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

난포 및 난관 발달도

육성기와 산란초기 사료 에너지 수준에 따른 산란초기 난포 및 난관 발달 분석 결과는 Table 5 및 Table 6에 나타내었다. 난포 수 분포에서 LWF(3~5mm)와 SYF(5~10mm)는 처리구 간 유의차가 나타났으며($p<0.05$), LWF(3~5mm)는 Con 처리구(11.33)가 VL 처리구(6.78)보다 유의적으로 높았고($p<0.05$), SYF(5~10mm)는 H(8.33) 및 Con(9.33)이 L(5.00)과 VL(3.56)보다 유의적으로 높았다($p<0.05$). 그 외 SWF 및 LYF의 난포 수, 우세난포(F1~F5)의 크기와 무게, 난소 무게는 에너지 수준에 따른 유의한 차이가 없었다($p>0.05$). 따라서, 육성기 및 산란초기 에너지 수준을 달리한 본 연구에서는 산란초기 난포 분포에서 일부 차이가 관찰되었으나, 우세 난포의 성장 지표와 최종 생산성에는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

산란계의 산란율은 원시난포의 활성화 이후 SWF-LWF-SYF로 이어지는 난포 발달 과정과 SYF 단계에서 우세 난포가 선발되어 LYF(F1~F6)로 편입되는 과정에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다[25]. 특히 SYF는 이후 LYF 모집에 직접적으로 연결되는 단계로, 산란 지

Table 5. Effects of dietary metabolizable energy level on ovary weight and hierarchical follicle weights of Hy-Line Brown hens during the early laying period

Parameter	Treatment				SEM	p-value
	H	Con	L	VL		
Ovary weight (g)	67.33	69.11	67.85	68.63	2.051	0.929
Follicle weight (g)						
F1	13.55	14.03	13.74	13.19	0.529	0.720
F2	10.35	11.48	11.05	10.02	0.489	0.157
F3	7.22	8.47	7.81	7.13	0.494	0.216
F4	3.97	5.38	4.89	4.15	0.478	0.151
F5	2.14	2.74	2.49	1.89	0.340	0.322

H, high-level diets (+100 kcal of ME/kg); Con, normal level diets; L, low-level diets (−100 kcal of ME/kg); VL, very low-level diets (−200 kcal of ME/kg); F1–F5, hierarchical follicles (F1 = largest preovulatory follicle).

Table 6. Effects of dietary metabolizable energy level on ovarian follicle number distribution and hierarchical follicle size of Hy-Line Brown hens during the early laying period

Parameter	Treatment				SEM	p-value
	H	Con	L	VL		
Follicle number						
SWF (1–3 mm)	20.11	22.22	24.22	21.33	2.336	0.652
LWF (3–5 mm)	9.56 ^{ab}	11.33 ^a	9.89 ^{ab}	6.78 ^b	1.094	0.044
SYF (5–10 mm)	8.33 ^a	9.33 ^a	5.00 ^b	3.56 ^b	1.080	0.002
LYF (> 10 mm)	5.89	6.22	5.78	6.11	0.294	0.701
Follicle size (mm)						
F1	30.67	32.22	31.00	31.00	0.505	0.160
F2	28.00	29.44	29.00	28.44	0.480	0.181
F3	24.67	26.78	25.50	24.78	0.680	0.128
F4	19.78	22.78	21.00	20.89	0.821	0.098
F5	15.95	17.44	16.63	15.56	0.851	0.430

H, high-level diets (+100 kcal of ME/kg); Con, normal level diets; L, low-level diets (−100 kcal of ME/kg); VL, very low-level diets (−200 kcal of ME/kg); F1–F5, hierarchical follicles (F1 = largest preovulatory follicle).

^{a,b} Means within the same row with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

SWF, small white follicles (1–3 mm); LWF, large white follicles (3–5 mm); SYF, small yellow follicles (5–10 mm); LYF, large yellow follicles (> 10 mm).

속성과 산란율 유지에 중요한 생리적 기반이 된다[26]. 또한, 과도한 에너지 섭취는 난포의 발달과 성장을 과도하게 촉진하거나 체지방 축적을 증가시켜 산란 성적에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되어, 육성기 사료 에너지 수준의 적정 관리는 산란초기 생식기관 발달과 이후 생산성 확보에 중요하다고 제시된 바 있다[27].

본 연구에서 LWF(3~5mm)와 SYF(5~10mm)는 처리구 간 유의차가 관찰되었으며, 이는 에너지 수준 차이로 산란 전 단계 난포군(특히 LWF 및 SYF)의 분포에 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다. 그러나 우세난포군(F1~F5)의 성장 및 성숙과 관련된 지표(우세난포 크기·무게 등)에서는 처리구 간 유의한 차이가 나타나지 않았고, 결과적으로 산란율 등 계란 생산성 지표에서도 유의적인 차이가 확인되지 않았다. 이는 산란초기 단계에서 난포군 분포의 일부 변화가 단기간 내 생산성 차이로 직접 연결되기보다는, 난소 기능의 생리적 보상 또는 대사적 적응을 통해 우세 난포의 성장과 배란 체계가 일정 수준 유지되었을 것으로 사료된다. 참고문헌 [28]의 연구에서는 6~17주령 동안 에너지 섭취를 제한할 경우 20주령에서 난소 기질, SYF 및 난포 무게의 증가가 감소할 수 있다고 보고하였으나, 이러한 차이는 24주령과 28주령에서는 유의하지 않았다고 제시하였다. 즉, 육성기 에너지 수준의 영향은 산란 개시 직전 또는 산란초기에는 일부 반영될 수 있으나, 연령이 증가함에 따라 점차 완화된 가능성이 있으며[28], 본 연구에서 난포 분포의 처리구 차이가 관찰되었음에도 산란 성적이 유지된 결과와 유사하였다.

하지만, 산란초기 난포 분포에서 나타난 처리구 간 차이가 장기적으로 산란 지속성이나 중·후기 산란율에 영향을 미칠 가능성을 배제할 수 없다. 특히 SYF 단계는 이후 LYF 모집과 직접적으로 연결되는 중요한 생리적 기반이라는 점을 고려할 때, 초기 난포군 구성의 변화가 누적될 경우 중·후기 산란 성적에 반영될 가능성이 있다. 따라서 육성기 및 산란초기 에너지 수준이 산란 전 기간의 생산성에 미치는 영향을 보다 명확히 규명하기 위해서 중기 및 후기까지의 산란율 변화를 지속적으로 평가할 필요가 있다.

지방과 간 건강 지표

육성기와 산란초기 산란계 에너지 수준에 따른 복부지방 및 간 건강 지표를 분석한 결과는 Table 4에 나타내었다. 간은 대사의 중심 기관으로서 에너지 항상성 유지와 산란에 필요한 영양소의 동원과 전환을 담당하므로, 초기 발달 상태가 이후 체성장 및 산란 유지 능력에 장기적으로 영향을 미칠 수 있다[29]. 또한 산란초기 단계에서 적정 수준의 체지방 축적은 산란 성적에 긍정적으로 기여할 수 있으나, 과도한 체지방 축적은 산란율과 계란 무게에 부정적인 영향을 미칠 수 있다고 보고되었다[30].

복부지방은 VL 처리구(81.16g)가 H(126.82), Con(115.63), L(105.21) 처리구 대비 유의적으로 낮은 값을 나타내었다($p < 0.05$). 반면, 간 무게, 간 지방함량(%), 간 색도(L*, a*, b*)는 처리구 간 유의차가 관찰되지 않았으며($p > 0.05$), 지질 과산화 지표인 간 MDA 함량 또한 처리구 간 차이가 없었다($p > 0.05$).

참고문헌 [31]은 10~21주령 동안 사료 대사에너지 수준(2,600, 2,750, 2,900kcal/kg)을 달리 급여했을 때 21주령에서 에너지 수준이 높을수록 복부지방이 유의적으로 증가하였고, 그 경향이 35주령까지 유지되었다고 보고하였다. 다만 21주령 이후 모든 처리구에 동일한 에너지 수준의 사료를 급여한 조건에서는 41주령에 처리구 간 차이가 소실되었는데, 이는 초기 에너지 수준 차이에 따른 체지방 축적 효과가 시간이 경과함에 따라 완화된 수 있다고 보고하였다[31]. 반면 본 연구는 육성기부터 산란초기(35주령)까지 처리구별 에너지 수준 차등 급여를 지속하였다는 점에서 다르며, 이러한 차이가 35주령까지 복부지방 차이가 유지된 결과에 기여했을 것으로 판단된다. 또한 참고문헌 [30]은 육성기(1~17주령) 동안 사료

의 영양소 밀도가 증가할수록 복부지방 함량이 선형적 및 이차적으로 증가하는 경향을 보였으며, 영양소 밀도 증가가 체지방 축적을 촉진할 수 있음을 보고하였다.

간은 새로운 지방산 합성이 일어나는 주요 부위이며, 산란계에서는 지질 대사의 대부분이 간에서 수행되고 난황 형성에 필요한 지질 전구체의 합성도 간에서 활발히 진행된다. 따라서 간은 산란 유지에 필수적인 기관이지만, 과도한 지질 축적은 간 기능 저하 및 지질 대사 장애로 이어질 수 있다[32]. 고에너지 또는 고지방 급여는 비만 유발과 함께 간 조직 내 산화 스트레스를 증가시키는 요인으로 보고되어 왔으며[32], MDA는 지질 과산화 과정에서 생성되는 대표적 최종 산물로 조직의 산화적 손상 정도를 간접적으로 반영하는 지표로 널리 활용된다. 참고문헌 [33]은 57주령 산란계에 대사에너지 수준이 서로 다른 사료(2,564, 2,665, 2,765kcal ME/kg)를 급여한 결과 고에너지 처리구에서 간 내 MDA가 증가하여 에너지 섭취 증가가 지질 과산화 반응을 촉진할 수 있다고 보고하였다.

그러나 본 연구에서는 산란초기 에너지 수준 차이에 따라 간 지방함량, 간 색도 및 간 내 MDA 함량에서 처리구 간 유의적인 차이가 관찰되지 않았다. 이는 본 연구의 에너지 조절 폭(Con 대비 ± 100 또는 -200 kcal ME/kg)과 평가 시기(산란초기)가 간 내 지질 축적 및 지질 과산화를 유의하게 변화시키기에 충분하지 않았거나, 산란계가 섭취량 조절 및 대사적 적응을 통해 간의 지질 대사와 산화-항산화 균형을 일정 수준 유지했기 때문일 가능성을 시사한다. 즉, 본 시험의 에너지 범위 내에서는 간 기능 이상 또는 지방간과 같은 뚜렷한 대사성 이상 징후가 관찰되지 않았다는 점에서, 에너지 수준 조절 자체가 곧바로 간 건강 저하로 연결된다고 단정하기는 어렵다고 판단된다. 이와 관련하여 참고문헌 [23]은 자유급여 또는 일일 에너지 섭취량을 제한적으로 조절한 조건에서도 산란계가 정상적인 산란율을 유지하며 비만 또는 간 건강의 유의한 악화가 관찰되지 않았다고 보고하였고, 간 내 지방 축적은 단순한 에너지 수준 변화보다는 급여량까지 고려한 강제적인 고에너지 급여 등 특정 영양학적 조건에서 유의적인 차이를 나타낼 수 있음을 제시하였다. 또한 참고문헌 [34]는 간 지방 축적이 단순한 에너지 섭취량뿐 아니라 에너지 섭취와 대사적 조절 기전의 영향을 받을 수 있음을 보고하였으며, 에너지, 섭취량, 산란율, 난중 등 생산성 지표와 간 지방 함량 간 상관성이 낮게 나타났다고 제시하였다. 이러한 보고는 본 연구에서 에너지 수준 차이가 존재함에도 간 지방 축적과 MDA에서 유의한 차이가 나타나지 않은 결과와도 일치한다.

이러한 결과는 본 시험의 에너지 조절이 복부지방 축적에는 영향을 미쳤으나, 산란초기 시점에서 간의 형태적 지표(무게), 지방 축적, 산화 스트레스 수준에는 유의한 변화를 가져오지 않았음을 보여준다. 또한, 육성기 및 산란초기 에너지 수준 급여가 산란초기 이후 시기에도 간과 복부지방에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

계란 품질

육성기와 산란초기 사료 에너지 수준이 산란초기 계란의 난각 및 계란 품질에 미치는 영향은 Table 7에 제시하였다. 난각 강도는 H 4.47, Con 4.63, L 4.49, VL 4.39kg/cm²로 처리구 간 유의차가 없었으며($p>0.05$), 난각 두께 역시 H 0.41, Con 0.42, L 0.41, VL 0.42mm로 유의적인 차이가 관찰되지 않았다. 난각 색도(L*, a*, b*) 또한 처리구 간 차이가 없었다. 계란의 품질 결과에서는 난황색이 에너지 수준에 따라 유의적인 차이를 나타냈으며($p<0.0001$), H(9.37)와 Con(8.93) 처리구에 비해 L(8.43) 및 VL(7.23) 처리구에서 낮은 값을 보였고, 특히 VL 처리구에서 가장 낮았다. 반면 난백고와 Haugh unit은 에너지 수준에 따른 유의적인 차이는 확인되지 않았다.

참고문헌 [35]는 사료 내 에너지 수준을 2,680 및 2,780kcal/kg로 한 뒤 급여하여 비교하였을 때 난각강도와 Haugh unit에 유의차가 없었다고 보고하였으며, 참고문헌 [36] 또한 2,749,

Table 7. Effects of dietary metabolizable energy level on eggshell and internal egg quality traits of Hy-Line Brown hens during the early laying period

Parameter	Treatment				SEM	p-value
	H	Con	L	VL		
Egg shell strength (kg/cm ²)	4.47	4.63	4.49	4.39	0.141	0.684
Egg shell thickness (mm)	0.41	0.42	0.41	0.42	0.004	0.206
Egg shell color						
L*	55.65	55.99	55.70	55.06	0.450	0.517
a*	21.23	21.00	20.91	21.55	0.242	0.240
b*	32.47	32.59	32.34	32.54	0.277	0.930
Egg yolk color	9.37 ^a	8.93 ^a	8.43 ^b	7.23 ^c	0.169	< 0.0001
Albumen height	7.36	7.48	7.25	6.85	0.318	0.542
Haugh unit	87.53	86.65	85.57	83.71	1.388	0.244

H, high-level diets (+100 kcal of ME/kg); Con, normal level diets; L, low-level diets (-100 kcal of ME/kg); VL, very low-level diets (-200 kcal of ME/kg).

^{a-c} Means within the same row with different letters are significantly different at $p < 0.05$.

3,031, 3,196kcal/kg의 에너지 수준을 60일간 산란계에게 급여한 결과 난각 강도와 난각 두께에서 유의차가 없었다고 보고하였다. 참고문헌 [24] 역시 2,700 및 2,800kcal/kg 급여 조건에서 난각 강도, 난각 두께 및 Haugh unit에 차이가 없음을 보고하여 본 연구 결과와 유사하였다.

반면 일부 연구에서는 에너지 수준 증가에 따라 난백고 또는 Haugh unit가 감소하는 결과가 보고된 바 있다. 참고문헌 [13]은 에너지 수준 증가에 따라 난백고가 감소하였다고 보고하였고, 참고문헌 [37]은 21주령 산란계에 2,719~2,959kcal ME/kg 범위의 사료를 16주간 급여하였을 때 Haugh unit가 에너지 수준 증가에 따라 감소하였다고 보고하였다. 이들 연구는 고에너지 사료 급여 시 섭취량 감소 또는 배합 조정에 의해 일일 아미노산 섭취량이 상대적으로 감소하여 난백 형성이 불리해졌을 가능성을 제시하였다. 그러나 본 연구에서는 난백고 및 Haugh unit에서 유의차가 관찰되지 않았으며, 이는 본 시험의 에너지 조절 폭과 사료 설계(에너지-아미노산 균형 유지 여부), 산란초기 평가 시점 등의 차이에 의해 다른 결과가 나온 것으로 사료된다.

난황색은 본 연구에서 고에너지 처리구에서 유의적으로 높게 나타났다($p < 0.05$). 참고문헌 [13]은 에너지 수준 증가에 따라 난황색이 증가하는 경향을 보고하였으며, 잔토피(루테인, 제아잔틴, 칸타잔틴 등)이 지용성 색소로 사료 내 지방 함량 증가와 함께 위장관 내 흡수가 촉진될 수 있다고 보고하였다[38]. 참고문헌 [24]의 연구에서도 에너지 수준 증가에 따라 난황색 증가가 관찰되었다. 난황의 황색 또는 주황색은 사료 유래 카로티노이드 색소, 특히 루테인과 제아잔틴의 축적에 의해 결정되며[38], 산란계는 카로티노이드를 체내에서 합성하지 못하므로 난황 색도는 사료에서 공급되는 카로티노이드의 종류와 섭취량에 크게 의존한다[39]. 특히 옥수수는 루테인과 제아잔틴을 포함하는 대표적 원료로, 옥수수 기반 원료 급여가 난황 색도 증가와 관련될 수 있음이 보고되었다[39]. 따라서 본 연구 결과는 처리구 간 난황색 차이는 에너지 수준 자체보다는 옥수수(Table 1) 유래 잔토피 섭취량 증가에 따른 결과로 사료된다.

적 요

본 연구에서는 산란계 육성기(어린 병아리, 중병아리, 큰 병아리, 산란예비)와 산란초기 동안 사료 에너지 수준 차이가 산란초기 생산성과 간 및 혈액 생화학 특성, 계란 품질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실시하였다. 처리구는 Hy-Line Brown 매뉴얼 권장 수준(Con)을 기준으로 에너지 수준을 +100kcal ME/kg(H), -100kcal ME/kg(L), -200kcal ME/kg(VL)로 설정하여 육성기부터 산란초기(35주령)까지 급여한 후 분석을 수행하였다.

산란초기 체중은 H 및 Con 처리구가 L 및 VL 처리구보다 유의적으로 높았으나($p<0.05$), 산란율, 난중, 산란량 및 FCR은 처리구 간 유의차가 없었다($p>0.05$). 난포 분포에서는 VL 처리구에서 SYF 수가 감소하는 경향이 관찰되었다. 또한 복부지방 축적은 VL 처리구에서 유의적으로 낮았으나($p<0.05$), 간 무게, 지방함량, 색도 및 MDA 함량은 처리구 간 차이가 없었다($p>0.05$). 혈청 내 총콜레스테롤, 중성지방, 포도당, 총단백질, AST, ALT, 알부민, 무기인 및 Ca 수준은 모두 유의차가 없었다($p>0.05$). 계란 품질에서 난각 강도·두께 및 난백 고, Haugh unit은 유의차가 없었으며($p>0.05$), 난황색은 H 처리구에서 유의적으로 높았다($p<0.05$). 본 연구 결과, 에너지 조절 범위(Con 대비 ± 100 또는 -200 kcal ME/kg)는 산란초기 생산성과 간 건강 및 혈청 생화학 지표에 유의한 변화를 유발하지 않았으나, 체중·복부지방 및 일부 난포군 분포와 난황색에는 선택적으로 영향을 미칠 수 있음을 시사하였다. 향후 산란초기 에너지 수준이 100주령까지의 장기 생산성 및 생리적 변화에 미치는 영향을 평가하기 위한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

1. Bain MM, Nys Y, Dunn IC. Increasing persistency in lay and stabilising egg quality in longer laying cycles. What are the challenges? Br Poult Sci. 2016;57:330-8. <https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1161727>
2. Hy-Line International. Hy-Line Brown commercial layers management guide [Internet]. Hy-Line International; 2025 [cited 2026 May 27]. <https://www.hyline.com/filesimages/Hy-Line-Products/Hy-Line-Product-PDFs/Brown/BRN%20STD%20ENG.pdf>
3. Van Horne PLM, Bondt N. Competitiveness of the EU egg sector, base year 2021: international comparison of production costs of eggs and egg products. Wageningen University & Research; 2023. Report No.: 2023-006.
4. Bouvarel I, Nys Y, Lescoat P. 12 - Hen nutrition for sustained egg quality. In: Nys Y, Bain M, Immerseel FV, editors. Improving the safety and quality of eggs and egg products. Woodhead Publishing; 2011. p. 261-99.
5. Milisits G, Szentirmai E, Donkó T, Budai Z, Ujvári J, Áprily S, et al. Effect of starting body fat content and genotype of laying hens on the changes in their live weight, body fat content, egg production and egg composition during the first egg-laying period. Br Poult Sci. 2015;56:666-72. <https://doi.org/10.1080/00071668.2015.1099612>
6. Sujatha T, Rajini RA, Prabakaran R. Efficacy of pre-lay diet. J Appl Anim Res. 2014;42:57-64. <https://doi.org/10.1080/09712119.2013.822803>
7. Xin Q, Ma N, Jiao H, Wang X, Li H, Zhou Y, et al. Dietary energy and protein levels during the prelay period on production performance, egg quality, expression of genes in hypothalamus-pituitary-ovary axis, and bone parameters in aged laying hens. Front Physiol. 2022;13:887381. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.887381>
8. Doran BH, Krueger WF, Bradley JW. Effect of step-down and step-up protein-energy feeding systems on egg-type pullet growth and laying performance. Poult Sci. 1983;62:255-62. <https://doi.org/10.3382/ps.0620255>
9. Hussein AS, Cantor AH, Pescatore AJ, Johnson TH. Effect of dietary protein and energy levels on pullet development. Poult Sci. 1996;75:973-8. <https://doi.org/10.3382/ps.0750973>
10. Keshavarz K, Nakajima S. The effect of dietary manipulations of energy, protein, and fat during the growing and laying periods on early egg weight and egg components. Poult Sci. 1995;74:50-61. <https://doi.org/10.3382/ps.0740050>
11. Guzmán P, Saldaña B, Bouali O, Cámara L, Mateos GG. Effect of level of fiber of the rear-

- ing phase diets on egg production, digestive tract traits, and body measurements of brown egg-laying hens fed diets differing in energy concentration. *Poult Sci.* 2016;95:1836-47. <https://doi.org/10.3382/ps/pew075>
12. Hill FW, Anderson DL, Dansky LM. Studies of the energy requirements of chickens: 3. the effect of dietary energy level on the rate and gross efficiency of egg production. *Poult Sci.* 1956;35:54-9. <https://doi.org/10.3382/ps.0350054>
 13. Pérez-Bonilla A, Novoa S, García J, Mohiti-Asli M, Frikha M, Mateos GG. Effects of energy concentration of the diet on productive performance and egg quality of brown egg-laying hens differing in initial body weight. *Poult Sci.* 2012;91:3156-66. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02526>
 14. Keshavarz K. Further investigations on the effect of dietary manipulation of protein, phosphorus, and calcium for reducing their daily requirement for laying hens. *Poult Sci.* 1998;77:1333-46. <https://doi.org/10.1093/ps/77.9.1333>
 15. Harms RH, Russell GB, Sloan DR. Performance of four strains of commercial layers with major changes in dietary energy. *J Appl Poult Res.* 2000;9:535-41. <https://doi.org/10.1093/japr/9.4.535>
 16. Ribeiro PAP, Matos Jr. JB, Lara LJC, Araújo LE, Albuquerque R, Baião NC. Effect of dietary energy concentration on performance parameters and egg quality of white leghorn laying hens. *Braz J Poult Sci.* 2014;16:381-8. <https://doi.org/10.1590/1516-635X1604381-388>
 17. Leeson S, Summers JD. Commercial poultry nutrition. 3rd ed. University Books; 2005.
 18. Wyss M, Kaddurah-Daouk R. Creatine and creatinine metabolism. *Physiol Rev.* 2000;80:1107-213. <https://doi.org/10.1152/physrev.2000.80.3.1107>
 19. Poosuwan K, Bunchasak C, Kaewtapee C. Long-term feeding effects of dietary protein levels on egg production, immunocompetence and plasma amino acids of laying hens in subtropical condition. *J Anim Physiol Anim Nutr.* 2010;94:186-95. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2008.00898.x>
 20. Helkin A, Stein JJ, Lin S, Siddiqui S, Maier KG, Gahtan V. Dyslipidemia part 1: review of lipid metabolism and vascular cell physiology. *Vasc Endovasc Surg.* 2016;50:107-18. <https://doi.org/10.1177/1538574416628654>
 21. Hassan MR, Choe HS, Jeong YD, Hwangbo J, Ryu KS. Effect of dietary energy and protein on the performance, egg quality, bone mineral density, blood properties and yolk fatty acid composition of organic laying hens. *Ital J Anim Sci.* 2013;12:e10. <https://doi.org/10.4081/ijas.2013.e10>
 22. Ge XK, Wang AA, Ying ZX, Zhang LG, Su WP, Cheng K, et al. Effects of diets with different energy and bile acids levels on growth performance and lipid metabolism in broilers. *Poult Sci.* 2019;98:887-95. <https://doi.org/10.3382/ps/pey434>
 23. Zhang J, Chen D, Yu B. Effect of different dietary energy sources on induction of fatty liver-hemorrhagic syndrome in laying hens. *Int J Poult Sci.* 2008;7:1232-6. <https://doi.org/10.3923/ijps.2008.1232.1236>
 24. Kim CH, Kang HK. Effects of energy and protein levels on laying performance, egg quality, blood parameters, blood biochemistry, and apparent total tract digestibility on laying hens in an aviary system. *Animals.* 2022;12:3513. <https://doi.org/10.3390/ani12243513>
 25. Johnson AL, Lee J. Granulosa cell responsiveness to follicle stimulating hormone during early growth of hen ovarian follicles. *Poult Sci.* 2016;95:108-14. <https://doi.org/10.3382/ps/pev318>
 26. Du Y, Zi X, Wang K, Ran J, Liu Y. Combined transcriptome and metabolome analysis of chicken follicles in China Tengchong Snow Chicken follicle selection. *Anim Biosci.*

- 2025;38:1316-27. <https://doi.org/10.5713/ab.24.0861>
27. Stephens CS, Hill-Ricciuti A, Francoeur L, Johnson PA. Feeding level is associated with altered liver transcriptome and follicle selection in hen. *Biol Reprod.* 2022;106:943-52. <https://doi.org/10.1093/biolre/ioac013>
 28. Lu J, Wang Q, Wang KH, Ma M, Wang XG, Guo J, et al. Effects of energy restriction during growing phase on the productive performance of Hyline brown laying hens aged 6 to 72 wk. *Poult Sci.* 2023;102:102942. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102942>
 29. Scheele CW. Pathological changes in metabolism of poultry related to increasing production levels. *Vet Q.* 1997;19:127-30. <https://doi.org/10.1080/01652176.1997.9694756>
 30. van Eck L, Schouten A, Powell S, Lamot D, Enting H, Kwakkel R. The effect of diet density on allometry in pullet growth and early egg production. *Poult Sci.* 2024;103:103211. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103211>
 31. Xin Q, Jiao H, Wang X, Zhao J, Liu M, Li H, et al. Effect of energy level of pullet diet and age on laying performance and expression of hypothalamus-pituitary-gonadal related genes in laying hens. *Poult Sci.* 2024;103:103873. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103873>
 32. Chu Y, Zheng Y, Li Y, Gui S, Zhao J, Zhao Y, et al. Dietary supplementation of magnolol alleviates fatty liver hemorrhage syndrome in postpeak Xinhua laying hens via regulation of liver lipid metabolism. *Poult Sci.* 2024;103:103378. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103378>
 33. Mi Q, Deng X, Wang P, Pan H, Huang Y, Hu H, et al. Effect of energy levels on liver oxidative state and gut microbiota of laying hens fed a low-protein diet. *Front Anim Sci.* 2024;5:1465305. <https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1465305>
 34. Ivy CA, Nesheim MC. Factors influencing the liver fat content of laying hens. *Poult Sci.* 1973;52:281-91. <https://doi.org/10.3382/ps.0520281>
 35. Scappaticcio R, García J, Fondevila G, de Juan AF, Cámara L, Mateos GG. Influence of the energy and digestible lysine contents of the diet on performance and egg quality traits of brown-egg laying hens from 19 to 59 weeks of age. *Poult Sci.* 2021;100:101211. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101211>
 36. Jiang S, Cui L, Shi C, Ke X, Luo J, Hou J. Effects of dietary energy and calcium levels on performance, egg shell quality and bone metabolism in hens. *Vet J.* 2013;198:252-8. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.07.017>
 37. Wu G, Bryant MM, Voitle RA, Roland Sr. DA. Effect of dietary energy on performance and egg composition of Bovans white and Dekalb white hens during phase I. *Poult Sci.* 2005;84:1610-5. <https://doi.org/10.1093/ps/84.10.1610>
 38. Lázaro R, García M, Aranibar MJ, Mateos GG. Effect of enzyme addition to wheat-, barley- and rye-based diets on nutrient digestibility and performance of laying hens. *Br Poult Sci.* 2003;44:256-65. <https://doi.org/10.1080/0007166031000085616>
 39. Ortiz D, Lawson T, Jarrett R, Ring A, Scoles KL, Hoverman L, et al. Biofortified orange corn increases xanthophyll density and yolk pigmentation in egg yolks from laying hens. *Poult Sci.* 2021;100:101117. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101117>