

산란계 사육면적 확대에 따른 계란 생산지속성 개선 방안

이제석[#] · 유명환[#] · 허정민^{*}

충남대학교 축산학과

Strategies to enhance egg production performance under low stocking density conditions: a comprehensive review

Jeseok Lee[#], Myunghwan Yu[#] and Jung Min Heo^{*}

Department of Animal Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea



Received: Oct 12, 2023
Revised: Oct 30, 2023
Accepted: Nov 29, 2023

[#]These authors contributed equally to this study.

*Corresponding author

Jung Min Heo
Department of Animal Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea
Tel: +82-42-821-5771
E-mail: jmheo@cnu.ac.kr

Copyright © 2023 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

Jeseok Lee
<https://orcid.org/0000-0002-6829-029X>
Myunghwan Yu
<https://orcid.org/0000-0003-4479-4677>
Jung Min Heo
<https://orcid.org/0000-0002-3693-1320>

Abstract

The laying hen industry is rapidly expanding to meet the escalating demand for dietary protein. Management approaches for hens have evolved to enhance both egg production and animal welfare. While improving stocking density could potentially benefit hen behavior and hygiene, it may also reduce overall hen numbers, thus impacting egg production. This review aims to present several practical strategies related to housing and dietary strategies for enhancing egg production performance. Effective housing management is crucial for improving egg production. The temperature in the house should be kept within the hens' thermoneutral zone and the relative humidity should be maintained at about 60%–70%. Adequate ventilation is necessary to maintain physiological homeostasis and eliminate harmful substances. Implementing a suitable lighting program can sustainably enhance egg production while cutting costs. It's imperative to ensure thorough disinfection of drinking water and consider supplementing additives to boost hen performance. Additionally, adopting appropriate feeding strategies is important for enhancing laying hens' productivity. This includes substituting soybean meal with alternative protein sources like cottonseed meal, rapeseed meal, fermented feed, and insect protein to promote egg production and environmental safety. Employing energy-restricted feed during the growing phase and supplementing synthetic amino acids in a low-protein diet can maintain laying performance while reducing nitrogen emissions, particularly in battery cages. Enhancing the digestibility of calcium and phosphorus through phytase supplementation and increasing calcium levels in pre-laying feed can enhance eggshell quality. Feeding hens in the afternoon has been shown to positively impact eggshell quality. Overall, the application of housing management and feeding management practices in laying hens might be helpful to ensure food security by maintaining optimal egg production despite the decreasing total number of hens due to low stocking density.

Keywords: Feeding, Housing, Laying hen, Persistency of laying, Stocking density

Competing interests

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

Funding sources

Not applicable.

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: Yu M, Heo JM.
Data curation: Lee J.
Formal analysis: Lee J, Yu M.
Methodology: Lee J, Yu M.
Validation: Heo JM.
Investigation: Lee J, Yu M.
Writing - original draft: Lee J, Yu M.
Writing - review & editing: Lee J, Yu M, Heo JM.

Ethics approval and consent to participate

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

서론

산란계 산업은 고품질 동물성 단백질 공급원인 계란을 생산하는 중요한 분야로, 전 세계적으로 단백질 식품에 대한 수요가 증가하면서 그 중요성이 커지고 있는 추세이다. 우리나라의 계란 생산량은 과거부터 꾸준히 증가하여 2021년 기준 767,690톤으로 조사되고, 1인당 계란소비량이 1961년 기준 1.37개에서 2020년에 12.03개로 증가하는 등 국내 산란계 산업은 지속적으로 성장해 왔다[1]. 산란업계는 생산성 향상을 주요 목적으로 사양관리법을 꾸준히 발전시켜 왔으나 최근에는 단순한 생산성 향상 목적이 아닌 동물복지 관점에서 지속가능한 생산을 실현하고자 노력하고 있다[2]. 특히 사육밀도의 경우, 산란계의 동물복지 및 산란성적에 큰 영향을 미치는 주요 사육환경 요인으로 꼽힌다. 다양한 산란계 사육밀도 관련 선행연구는 사육밀도에 의해 산란계의 성장능력, 생산성 및 동물복지 수준이 달라질 수 있음을 보고한다[3-5].

한편, 2018년 우리나라 정부의 축산법 시행령 개정에 의해 산란계 최소 사육면적이 마리당 0.05 m²에서 0.075 m²로 1.5배 확대 적용된다. 기존의 산란계 농가는 2025년까지 시행령 기준에 맞는 계사 내 수당 사육밀도를 조정해야 하며, 신규 산란계 농가의 경우 확대된 사육면적 기준을 충족하는 경우에만 허가를 받을 수 있다. 일반적으로 사육밀도가 산란계에 미치는 영향을 조사한 대부분의 선행 연구는 동일한 수의 산란계를 상이한 사육면적에서 생산하였음을 가정하였고, 이에 낮은 사육밀도 조건에서 대부분 긍정적인 결과를 관찰할 수 있었다. 반면, 국내 산란계 농가의 경우 사육면적 확대 지침에 따라 동일한 사육면적 조건 하 산란계 총 사육수수를 최소 25% 이상 감소시킬 수밖에 없어, 총 계란 생산량의 감소가 우려되는 상황이다. 이에 다양한 사양관리법의 적용을 통해 산란성과 난각 품질을 증진시키고, 산란지속성을 개선하여 오랜 기간 동안 산란이 가능하게 된다면 사육수수 감소에도 계란 생산량을 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 산란노계의 경우 일반적인 산란기에 비해 산란 성적이 떨어지는 것을 관찰하였으며, 산란말기 이후 산란지속성을 증진시킬 경우 총 계란 생산량을 늘릴 수 있는 것으로 판단이 된다[6]. 산란지속성 증진의 핵심은 늦은 산란기까지 소화, 번식기관을 비롯한 신체의 강건성을 유지하여 지속적인 산란 및 일정한 난각품질을 유지하는 것으로 보고되었다[7]. 이에 본 논문은 산란계 사육환경 그리고 사료 급여 전략과 관련된 다양한 사양관리법을 소개하여 사육면적 확대 시행에 따른 산란계 총 사육수수의 감소에 대응하고, 산란계의 산란 지속성을 비롯한 산란 성적의 증진을 도와 우리나라의 식량안보 확보에 도움이 되고자 하였다.

사육환경 관리

사육 온도는 산란계 생산 시 최우선으로 갖추어야 하는 환경 요인이다. 산란계의 온도중성영역(thermoneutral zone)은 18℃-22℃로 알려져 있고[8], 해당 온도 범위 내에서는 최소한의 에너지만을 이용하여 적정 신체 온도를 유지할 수 있다. 반면, 사육 온도가 온도중성영역(thermoneutral zone)을 벗어날 경우, 체내 온도 항상성을 유지하기 위해 추가적인 에너지를 사용하게 되고, 결과적으로 생산성이 저하된다. 특히 닭은 땀샘이 없고 체표면이 깃털로 덮여 있어[9], 고온 환경에 노출 시 열의 생산과 손실 간 균형이 쉽게 무너져 열 스트레스가 발생하고[10], 영양소 대사에 의한 열 발생을 줄이기 위해 사료섭취량이 감소하여 결과적으로 산란성이 저하되는 등 다양한 부작용을 나타낼 수 있다[11]. 만약 고온(30℃-35℃)의 사육온도 조건 하 배터리형 케이지에서 산란계 사육 시, 열 스트레스(heat stress)로 인해 산란율, 난백높이 및 계란 신선도(Haugh unit) 등 전반적인 산란 성적이 저하될 수 있다[12]. 고온 스트레스로 인한 사료섭취량의 감소는

이상적인 영양소 요구량을 충족시키지 못하게 하므로 산란율은 자연스럽게 감소한다[13]. 또한, 닭은 고온의 사육온도 속 냉각효과를 유도하기 위하여 신체 내부의 혈액 순환을 체표면으로 이동시키는 데, 이는 난관으로의 영양소 흡수를 저해하고, 결과적으로 충분한 난각 형성이 진행되지 않는다[14]. 따라서 계사 내 적정 사육온도를 유지하는 것은 산란계의 생산성 유지 측면에서 매우 중요하다. 한편, 국내의 산란계 사육 시설은 환기·온도 자동조절 시스템이 구비된 케이지 사육 시스템이 대부분을 차지하고 있어, 사육면적 확대 시행에 따라 산란계 간 거리가 넓어지게 되어 열을 쉽게 방출할 수 있다[15]. 이로 인해 열 스트레스에 의한 피해는 이전보다 개선될 것으로 예상된다. 하지만 저온 환경에 노출될 경우 산란계는 체내 열 항상성 유지를 위해 추가적인 에너지를 이용하게 되면서 산란성적이 저하되는 것으로 알려져 있다[16]. 낮은 기온의 겨울철 계사 내부온도 관리가 어려운 산란계사의 경우, 사육면적 확대 시행에 의해 산란계 간 거리가 멀어져 체온 유지가 어려워지고 전반적인 산란성적이 저하될 우려가 있으므로, 계사 내부온도를 산란계 사육단계별 온도중성영역(thermoneutral zone)과 일치하도록 설정하는 것이 중요하다.

한편, 습도(humidity)는 산란계사 내부의 상대습도(relative humidity)를 기준으로 60%~70%을 유지하는 것이 이상적이다[17]. 높은 기온 및 상대습도 조건 하 산란계의 사료섭취량이 감소하고, 계란 형성에 필수적인 칼슘(calcium), 마그네슘(magnesium), 인(phosphorus) 등 미네랄의 이용성이 낮아지기 때문에 난각, 난황 및 난백의 무게가 감소할 수 있다[18]. 일반적으로 고온 환경 중 높은 상대습도 환경은 산란계의 스트레스를 극대화시켜 사료섭취량을 감소시킨다[19]. 또한, 적절한 환기(ventilation)는 산란계의 생리·대사적 항상성 및 산란성적 유지를 위해 필수적인 사육조건이다. 환기를 통해 산란계사 내부의 수분, 열, 이산화탄소와 먼지를 제거하고 충분한 산소를 공급할 수 있다[20]. 특히 산란계사 내부의 암모니아를 방출하여 공기질을 개선시키고 산란계의 호흡기 건강을 증진시킬 수 있다[20]. 한편, 고온 환경(35℃)에서 환기 유속을 비교적 높은 수준으로 설정할 경우, 난각 품질과 계란 생산성의 저하를 예방할 수 있다[21].

산란계를 비롯한 가금류는 점등 자극을 통해 번식 호르몬(reproductive hormone)의 분비를 조절할 수 있기 때문에[17], 점등관리는 계란의 생산과 관련하여 중요한 역할을 한다. 산란계의 눈과 뇌에 분포하는 광수용체에 빛이 노출될 경우, 시상하부를 활성화시키고 뇌하수체를 자극하여 황체형성 호르몬(LH), 난포자극호르몬(FSH)을 방출시키고 배란을 촉진한다[17]. 이에 계사 내 체계적인 점등 관리를 실시할 경우 번식 호르몬 조절을 통해 산란계의 산란주기 조정, 산란성적과 계란 품질 유지, 그리고 산란지속성을 향상시킬 수 있다(Table 1).

일반적으로 최적의 계란 생산을 목적으로 할 경우, 최소 10 Lux의 조도로 계사 내 점등관리를 실시해야 하고[22], 50 Lux 이상의 조도는 오히려 공격적인 행동을 유발할 수 있다[23]. 참고문헌 [24]는 상이한 조도(0.2, 1, 5, 25 Lux)의 조명 조건 하, 조도의 감소에 따라 산란계의 계란 생산성이 저하되었음을 보고하였다. 또한 참고문헌 [25]는 계사 내 케이지에 점등이 불균등하게 도달할 경우 생산능력 또한 상이하게 조사되었음을 보고한 바 있다. 한편 참고문헌 [26]은 계사 내 일반적인 LED 조명 또는 케이지의 내부 및 모이통 위에 LED 줄조명(LED strip) 설치 후 Hy-line Brown의 계란 생산성 및 품질에 미치는 영향을 구명하였고, 전체 시험기간 동안 LED 줄조명을 이용할 경우 LED 조명에 비해 계란 생산성이 향상되고 품질이 유지되었음을 보고하였다. 일반적인 LED 조명에 비해 일정한 조도 및 균일한 빛의 분산을 실현하는 LED 줄조명은 기존의 조명 시스템의 대체제로서 산란계의 계란생산성을 향상시키는 데 도움을 줄 수 있다.

주기적인 점등과 소등을 반복하는 점등 관리 프로그램을 계사에 적용할 경우, 계란 생산성을 증진시킬 수 있는 것으로 조사된다. Biomittent lighting system의 경우, 총 점등 기간동안 매시간 광주기와 암주기를 임의로 설정하고 적용하여, 전력 소비를 줄임과 동시에 계란 생산성을 유지

Table 1. Summary of studies on the effect of housing and feeding strategies on laying hen egg production performance

Experimental factor	Treatments	Result or conclusion	Reference
Housing management (temperature)	Four different environmental temperatures; normal temperature, acute heat stress, chronic heat stress for two weeks, chronic heat stress for four weeks	Cyclic heat stress negatively impacted the performance of laying hens, reducing feed intake and egg production	[12]
Housing management (temperature)	Three different cages; cages with warmed perches (30°C), regular perches, no perches	Warmed perches during the cold exposure improved feed consumption and egg quality traits by thermoregulation	[16]
Housing management (temperature and humidity)	Chronic heat stress with three different relative humidity; low humidity (25%), moderate humidity (50%), and high humidity (75%) in high temperature (30°C)	High humidity (75%) in high temperature (30°C) reduces the weight of eggshell, yolk, and albumen	[18]
Housing management (ventilation)	Chronic heat stress with four different ventilation flows; 0.5, 1.5, 2.0, and 3.0 m/s	High ventilation rate (3.0 m/s) improved egg production, whereas a low rate (0.5 m/s) negatively affected production and quality	[21]
Housing management (lighting system)	Four different lighting intensities; 0.2, 1, 5, and 25 Lux	Increasing lighting intensity between 0.2, 1, 5, and 25 Lux improved egg production performance	[24]
Housing management (lighting system)	Two lighting systems; light-emitting diode (LED strip) and conventional LED lamp lighting system	LED strip improved egg production performance compared to conventional LED lamp lighting system	[26]
Housing management (lighting program)	Three different lighting systems; conventional lighting system (16L:8D), Biomittent lighting system (40 minutes lighting: 20 minutes of darkness), Biomittent lighting system (20 minutes of lighting: 40 minutes darkness)	Biomittent lighting system (20 minutes of lighting: 40 minutes of darkness) improved laying rate, egg mass, feed conversion ratio, and eggshell thickness	[27]
Housing management (lighting program)	Two lighting program; Cornell lighting program (2L:4D:8L:10D) and conventional lighting system (16L:8D)	Cornell lighting program (2L:4D:8L:10D) improved egg laying performance and decreased feed intake, egg size, and consumption of electricity	[33]
Housing management (drinking water)	Four experimental drinking water; basic drinking water, basic drinking water + 0.05% wild ginseng, basic drinking water + 0.1% wild ginseng, basic drinking water + 0.5% wild ginseng	Drinking water with ginseng supplementation improved laying rate, egg mass, egg weight, and ginsenoside saponin in the yolk	[35]
Housing management (drinking water)	Two experimental drinking water; non-magnetic water and magnetic water	Supplying magnetic water increased egg weight and egg mass	[36]
Housing management (drinking water)	Four experimental drinking water; unsupplemented drinking water, drinking water + 2 mg/L Ca + 250 mg/L Mg, drinking water + 4 mg/L Ca + 510 mg/L Mg, drinking water + 5 mg/L Ca + 760 mg/L Mg	Supplying water supplemented with calcium and magnesium improved eggshell thickness and strength	[37]
Housing management (drinking water)	Waterline cleaning in poultry houses; continuously add slightly acidic electrolyzed water into the waterline and the conventional waterline disinfection method, which includes regular use of high-concentration chemical disinfectant for soaking the waterline and flushing with water	Supplying water supplemented with electrolyzed water increased egg weight and yolk color	[39]
Feeding management (alternative feed ingredients)	Experimental diets include the same energy and crude protein composition but different dietary protein sources; soybean meal, cottonseed, and rapeseed meal	Feeding a diet with cottonseed meal as a dietary protein source decreased egg mass and albumen quality	[43]
Feeding management (alternative feed ingredients)	Experimental diets including dried distillers grains and solubles for 0%, 10%, and 20%	Feeding a diet including 20% of dried distillers grains and solubles decreased the production of ammonia and hydrogen sulfide without deteriorating egg production performance	[47]
Feeding management (alternative feed ingredients)	Three dietary treatments; a basal diet, and two experimental diets comprising the basal diet plus <i>Tenebrio molitor</i> larvae meal at 2.5% or 5% inclusion rate	Feeding diet plus <i>T. molitor</i> larvae meal improved egg production performance and feed conversion ratio	[49]

Table 1. Continued

Experimental factor	Treatments	Result or conclusion	Reference
Feeding management (feeding of growing pullets)	Three dietary treatments including different nitrogen-corrected apparent metabolizable energy; 2,850, 2,565, and 2,280 kcal/kg	Reducing AMEn in feed improved laying rate, egg mass, and settable eggs	[53]
Feeding management (dietary protein level)	Two dietary treatments including different crude protein compositions; basal diet and low protein diet supplemented with synthetic amino acid	Application of low protein diet supplemented with synthetic amino acid reduced nitrogen excretion without deteriorating egg production	[57]
Feeding management (dietary calcium and phosphorus)	Five experimental diets; basal diet with 0.35% available phosphorus and 3.5% calcium, basal diet reduced in available phosphorus and calcium levels by 0.187%, 0.159% of the diet, respectively, or severely reduced by 0.231%, 0.275% of the diet, respectively. Other diets were supplemented with phytase	Egg production, body weight, and bone densitometry in hens fed a calcium-phosphorus deficient diet supplemented with phytase was comparable to hens fed the basal diet	[58]
Feeding management (dietary calcium)	Two dietary treatments including different calcium compositions; 2.5%, and 3.8% of calcium	A feeding diet including 3.8 calcium improved eggshell quality, especially in the late laying period	[62]
Feeding management (feeding strategy)	Three feeding strategies; feeding 3 times a day, or feeding once a day in the morning at 08:00, in the noon at 12:00, or in the afternoon at 16:00	Feeding at 16:00 changed the pattern of feed consumption and exerted a positive influence on eggshell thickness	[66]

하기 위해 고안된 점등 프로그램이다. 참고문헌 [27]은 Rhode Island Red 270수를 총 16시간의 점등기간 동안 연속적인 점등을 실시한 처리구와 매시간마다 20분 점등:40분 소등(20L:40D)을 실시한 처리구, 한 시간마다 40분 점등:20분 소등(40L:20D) 처리구로 각각 나누어 사육하였고, 그 중 20분 점등:40분 소등(20L:40D)을 실시한 처리구의 산란율, 산란량, 사료요구율 및 난각두께가 가장 우수했음을 보고하였다. 또한, 암주기 중 산란계의 신체적 활동 감소 및 휴식 시간 연장에 의해 비위생적인 계란이 비교적 적게 생성되었음을 보고하였다[28, 29]. 일반적으로 점등기간 중 암주기를 의도적으로 설정하는 경우, 닭은 암주기 이전 자연스럽게 사료섭취량을 늘려 소낭(crop)을 충분히 채우려는 습성에 의해 암주기 중 영양소 결핍이 쉽게 나타나지 않는다[30,31]. 따라서 점등 기간 도중 암주기의 설정은 부작용없이 계란 생산성을 유지하고 전력소비를 절감할 수 있는 점등관리법 중 하나로 꼽힌다. Cornell lighting program의 경우 하루를 기준으로 점등과 소등을 일정 시간 간격으로 반복하는 점등관리 프로그램으로 2시간 소등(2L), 4시간 점등(4D), 8시간 점등(8L), 10시간 소등(10D)을 설정하여 점등 관리를 실시한다(2L:4D:8L:10D)[32]. Cornell lighting program에서 사육된 산란계는 4시간의 암주기(4D)를 광주기(4L)로 인지하고 본 점등기간을 14시간 점등, 10시간 소등(14L:10D)으로 간주한다. 참고문헌 [33]은 배터리케이징 산란계사에 Cornell lighting program을 적용한 결과, 전력 소비의 절감, 사료 섭취량의 감소를 통한 비용 절약 및 계란 생산성의 향상을 관찰하였으나 동시에 계란 크기의 감소를 보고하였다. 이러한 점등 관리 프로그램은 전력소비 절약 및 산란성적을 개선하여 산란 지속성을 개선하는 데 도움을 줄 수 있다.

계사 내 음수 관리는 양질의 음수 공급을 통해 산란계의 체내 항상성을 유지하고, 계란의 품질과 생산성에 영향을 미치기 때문에 중요하다. 음수 품질 관리에 실패할 경우 미생물 번식으로 인해 닭의 음수량이 감소하고 생산성이 저해될 수 있기 때문에 음수 소독 및 필터 여과를 자주 실시해야 한다[17]. 양질의 사료가 급여되는 경우에도 음수의 품질이 조악할 경우 생산성은 저하될 수 있다[34]. 또한, 산란계는 계란 생산을 시작한 이후 10시간 동안 난관 내 물을 30 mL에서 70 mL로 증가시키기 때문에, 계란 생산 시 충분한 음수는 필수적이다[17]. 기본적인 산란계 사 시스템인 배터리 케이징 내 음수는 대부분 니플급수기(nipple drinker)를 이용하고, 급수기는

산란계가 서 있을 경우 충분히 닿을 수 있는 높이로 설치하되 성장 추이에 따라 높이를 적절히 조절한다[17].

한편 음수 중 영양소를 보충한 첨가제를 투여하여 공급할 경우, 산란계의 생산성 개선을 기대할 수 있다. 참고문헌 [35]는 24주령의 Hy-line Brown에 인삼추출물을 첨가한 음수를 급여하는 연구를 진행하였고 산란율, 난중, 산란량의 증진 및 난황 내 진세노사이드 사포닌(ginsenoside saponin)의 축적이 늘어났음을 보고하였다. 이는 인삼추출물의 주요 성분인 진세노사이드 사포닌(ginsenoside saponin)이 난소 조직 중 세포자연사를 유도하는 종양괴사인자(tumor necrosis factor)의 활성을 감소시켰고, 이에 계란 생성 시 필수적인 난포 과립 세포(granular cells)의 활성이 증진되어 결과적으로 산란 성적이 향상된 것으로 해석된다. 참고문헌 [36]은 54주령의 산란후기의 산란계에 한 달간 magnetic water 급수 후 난중 및 산란량이 증진되었음을 보고하였다. 저자는 magnetic water의 골격 내 무기질의 구성과 밀도를 개선시키는 효능이 산란계의 계란 생산에 영향을 미친 것으로 해석하였다. 또한, 참고문헌 [37]은 64주령의 Hy-line Brown 산란노계에 칼슘(calcium)과 마그네슘(magnesium)을 첨가한 물을 6주간 급여하였고, 칼슘과 마그네슘 투여량이 증가할수록 난각의 두께와 강도가 개선되고, 달걀의 깨짐(broken eggs)이 감소하였음을 보고하였다. 산란기가 길어질수록 난각 품질의 저하로 인해 산란지속성이 저해되는 일반적인 경향에도 불구하고, 산란노계의 음수 중 칼슘 및 마그네슘의 투여로 인한 난각 품질의 개선은 지속적인 양질의 계란 생성에 도움이 될 것으로 판단된다. 그러나 무기질을 음수 내 과다 투여할 경우 다른 종류의 무기질의 체내 흡수를 방해할 수 있고, 결과적으로 산란계의 건강 및 생산성을 저해할 수도 있다[34]. 산란계에 급여하는 음수 중 마그네슘(magnesium) 함량이 지나치게 높을 경우 칼슘(calcium) 이용성이 낮아져 난각 형성 및 골격의 강건성에 영향을 미칠 수 있다[38]. 한편, 참고문헌 [39]는 매일 약산성의 전해수(electrolyzed water)를 첨가한 물과 고농도 화학성분의 소독제를 활용하여 소독한 물을 산란계에 음수시킨 후 계란 품질을 비교하였다. 실험 결과, 계란의 난각두께, 난각강도 및 계란 신선도(Haugh Unit)는 음수 처리구간 차이가 없었으나, 약산성 전해수를 투여한 물을 급여한 산란계에서 더 높은 난중 및 더 짙은 색의 난황색을 관찰하였고, 이는 음수 중 약산성 전해질을 투여 시 물 속 유해균이 감소하여 산란계의 장 건강이 개선되어 영양소의 소화 및 흡수능력이 향상되었고, 이에 체내 색소 침착이 증진시켰기 때문으로 해석된다[39,40]. 이처럼 다양한 음수 내 사료첨가제의 적용으로 산란계의 건강과 산란 성적을 개선하여 결과적으로 지속적인 산란에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사료급여 전략

산란계 생산 시 옥수수, 대두박 등의 기존 원료에 크게 의존하는 경향이 있는데, 대두박을 비롯한 기존 원료의 가격 상승과 생산 시 환경 문제, 그리고 사육밀도 조정 하 산란계의 생산성을 지속적으로 보장하기 위해 대체원료의 개발이 필요한 실정이다[41]. 높은 영양가와 우수한 아미노산 조성을 보유한 대두박은 산란계의 대표적인 단백질 원료로 꼽힌다[42]. 참고문헌 [43]은 32주령의 Hy-line Brown 산란계를 총 세 처리구로 나누어 대사에너지(2,655 kcal/kg)와 조단백질 수준(16.5%)이 동일하나 단백질 원료가 대두박(soybean meal), 면실박(cottonseed meal), 채종박(rapeseed meal)으로 구성된 사료를 각 처리구에 급여한 후 산란성적 및 장의 형태학적 구조를 조사하였다. 실험 결과, Hy-line Brown에 면실박 위주 사료를 급여 시 공장(jejunum) 내 아미노산의 이용성 및 난관팽대부(magnum) 점막 상피세포의 불안정성에 의해 난백(egg white)의 분비능력이 저하되어 산란량과 난백 품질이 저하되었음을 보고하였다. 해당 연구와 같이 사료 내

단백질 원료에 따라 아미노산 조성 또한 다르고, 급여 시 산란계의 아미노산 수송체(amino acid transporters)가 발현되는 정도는 아미노산 조성에 영향을 받기 때문에[44], 상이한 단백질 원료를 포함한 사료 급여 시 산란계의 아미노산 이용성은 다르게 조사된다. 이처럼 대두박 대체 원료인 면실박과 채종박은 아미노산 조성 차이 때문에 계란 생산성에 영향을 미치고, 항영양인자(antinutritional factor)로 인한 낮은 아미노산 소화율에 의해 이용성이 떨어지는 것으로 조사된다[45]. 다만 기존의 사료 원료값이 급변하는 상황 속 대체 원료 사료는 폭등하는 기존 원료의 가격에 대응하여 사육 밀도 조정 하 안정적으로 산란계를 생산할 수 있으며, 사료비를 절감함과 동시에 기존 사료의 단점을 일부 보완할 수 있는 것으로 평가된다[46]. 한편 참고문헌 [47]은 사료 중 옥수수과 대두박의 비율을 감소시키는 대신, 옥수수 주정박(dried distillers grains and solubles)을 각각 10%, 20% 포함한 사료를 21-26주령의 Hy-Line W-36 산란계에 급여하였고, 20%의 옥수수 주정박을 포함한 사료를 급여함에 따라 생산성에 미치는 영향없이 암모니아(NH_3)와 황화수소(H_2S)의 발생을 저감시켰음을 보고하였다. 연구 결과, 옥수수 주정박 급여에 따라 산란계에 생산성이 증가하지 않았지만, 독성 물질의 생성을 감소시켜 비교적 위생적인 환경 속 산란계의 지속적인 계란 생산에 도움을 줄 수 있는 것으로 조사된다. 옥수수 주정박은 주류 또는 에탄올 산업에서 생성되는 부산물로, 사료에 대체원료로 활용 시 요동치는 기존 사료 원료의 값에 쉽게 대응할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 풍부한 단백질을 함유한 곤충(insects)은 단백질을 비롯한 지방, 무기질 및 비타민이 풍부한 것으로 알려져 있다[48]. 곤충의 생산 시 사육지와 물이 적게 필요하고, 암모니아를 비롯한 온실가스(greenhouse gas)의 배출량이 작으며, 생애주기(life cycle)가 짧은 편이기 때문에 사료의 대체원료로서 높게 평가된다. 참고문헌 [49]은 63주령의 Bovans White 산란계 사료 중 옥수수과 대두박을 일부 제외하고, 노란 밀웬 애벌레박(*Tenebrio molitor larvae meal*)을 대체원료로 첨가하여 급여할 경우 산란율 및 사료요구율에 긍정적인 영향을 미쳤음을 보고하였다. 해당 연구에서 관찰된 생산성의 증진은 노란 밀웬 애벌레박의 급여가 영양소 소화율을 증진시켰고, 이는 우수한 필수 아미노산 조성에서 기인한 것으로 해석된다. 노란 밀웬 애벌레박은 식물성 사료원료에 비해 영양적 가치가 높은 편인데 특히나 가금이 요구하는 필수 아미노산을 많은 양 함유하고 있다[50]. 또한, 식물성 사료원료에 비해 동물성 단백질 급원이 비교적 아미노산 조성의 균형이 우수하여 생체이용성(bioavailability)이 높은 것으로 알려져 있다[51]. 이처럼 노란 밀웬 애벌레박 등의 곤충 단백질을 대체 원료로 사용할 경우 영양소 소화율을 증진시켜 산란계의 지속적인 산란을 도울 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 산란계 사료 내 대체원료를 적극적으로 이용할 경우, 산란계의 지속가능한 계란 생산 및 자연 환경 보호에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

육성기는 골격과 번식 기관과 같은 신체의 성장이 일어나는 시기로 신체적·성적 성숙이 이루어지고, 이는 산란기 중 지속적인 생산성 유지에도 지대한 영향을 미친다[52]. 이에 육성기 중 양질의 사료를 급여하여 최적의 성장성을 유도하는 것이 기본이지만, 최근에는 에너지 제한 사료 급여 시 성성숙(sexual maturity)을 늦추고 산란기 중 생산성을 향상시킨 연구가 보고된 바 있다. 참고문헌 [53]은 Hy-line Brown 산란계 육성기 중 에너지 제한 사료(energy restricted feeding)의 급여가 전체 사육기간(6-72주령) 동안의 Hy-line Brown의 생산성에 미치는 영향을 조사하였다. 각 시험 사료의 영양적 조성은 모두 비슷하지만, 에너지값을 다르게 설정하여 일반적인 에너지값인 2,850 kcal/kg AMEn기준, 90%(2,565 kcal/kg AMEn), 80%(2,280 kcal/kg AMEn) 수준으로 에너지 제한 사료를 배합하였고, 6주령의 육성기 산란계를 사료의 에너지값(100%, 90%, 80%)을 기준으로 세 처리구로 나누어 17주령까지 제한급이를 실시하였다. 실험 결과, 육성기 Hy-line Brown에 에너지 제한 사료의 급여가 성성숙(sexual maturity)과 생식기관

(sexual organ development)의 발달 및 초산일령(first egg laying)을 전반적으로 늦추었으나, 오히려 산란율, 산란량 그리고 이상적인 품질의 계란(settable eggs)에 있어 긍정적인 영향을 미쳤음을 밝혔다. 에너지 제한 사료의 적용은 난포(follicle)와 난관 등 생식기관의 발달 시기를 전반적으로 늦추는 데[54], 이는 성조숙증(premature sexual maturity)을 예방하는 효과를 나타낼 수 있다[55]. 한편, 에너지 제한 사료는 육성기 후반의 혈중 에스트라디올(estradiol)과 프로게스테론(progesterone)의 농도를 증가시켰고 이는 생식기관의 발달을 촉진하여, 전체 산란기 중 생산성이 향상된 것으로 해석된다. 생식기관의 완전한 발달은 난포 발달의 속도를 높이고 연각란(soft-shelled eggs)과 난포 폐쇄증(follicular atresia)의 발생을 감소시켜 계란 생산성을 증진시킨다[56]. 이처럼 육성기 중 에너지 제한 사료 급여 시 성숙을 늦추고 생식기관의 완전한 발달을 촉진하여 산란기 중 계란 생산의 지속성 증진에 기여할 수 있다.

일반적인 사료에 비해 조단백질 수준(crude protein)이 낮은 저단백질 사료(low-protein diet)는 아미노산 요구량을 충족하도록 합성 아미노산(synthetic amino acid)을 추가로 보충하고, 대사에너지(metabolizable energy)를 일반 사료와 동일하게 설정하여 산란계의 성장에 미치는 영향이 없도록 하는 것이 일반적이다. 사료 내 조단백질 수준의 저감에도 불구하고, 높은 소화율을 특성으로 하는 합성 아미노산의 소화로 인해 생산성을 유지하고, 계분 중 배출되는 질소 배출(nitrogen excretion)을 저감하여 계사 내 환경을 개선하는 것이 대표적인 특징이다. 참고문헌 [57]은 Hy-line Brown 산란계에 합성 아미노산(라이신, 메티오닌, 트레오닌)을 보충한 저단백질 사료 급여 시 생산성과 질소 배출량을 조사하였다. 연구 결과, 산란기 중 저단백질 사료 급여 시 난중을 제외한 생산성은 일반 사료 급여 시와 동일하였으나 질소배출량은 감소하였기 때문에, 결과적으로 산란계에 저단백질 사료 급여 시 생산성에 미치는 큰 영향없이 질소 배출을 감소할 수 있음을 구명하였다. 질소의 배출은 미생물 활성으로 인해 결과적으로 암모니아(ammonia)를 계사에 축적시키고, 암모니아 중독(ammonia toxicity)에 의해 섬모가 손실되고 점막 상피세포가 수축되어 결과적으로 산란계의 산란 지속성에 영향을 미칠 수 있다. 이에 합성 아미노산을 보충한 저단백질 사료를 이용할 경우, 생산성 유지 및 질소배출을 저감할 수 있어 지속적인 산란에 도움을 줄 것으로 사료된다.

산란계 사료 중 칼슘(calcium)과 인(phosphorus)은 생리적 항상성 및 뼈와 난각 형성에 있어 가장 중요한 무기질이다. 산란계 사료 중 칼슘과 인의 조성은 요구량을 충족하도록 배합되어야 하며, 만약 결핍될 경우 골격의 강건성을 저하시키고, 원활한 난각 형성을 방해하여 지속적인 산란을 진행할 수 없다. 이러한 경우, 인분해효소(phytase) 또는 칼슘 원료의 보충을 통해 뼈 건강을 개선하고, 난각 형성을 수월하게 하여 산란지속성을 향상시키는 데 도움을 줄 수 있다. 참고문헌 [58]은 68-78주령의 White Leghorn 산란노계에 이용가능한 인(available phosphorus)과 칼슘이 결핍된 사료에 인분해효소를 보충한 후 급여 시의 생산성 및 골격의 강건성을 조사하였다. 인·칼슘 결핍 사료(칼슘: 3.34%, 이용가능한 인: 0.163%) 급여 시 생산성은 유지되었으나, 체중 및 골격의 강건성이 저하되었고, 동일한 사료에 인분해효소 보충 후 급여 시 생산성뿐만 아니라 체중과 뼈의 농도(bone densitometry)가 일반 사료 급여 시와 동일하게 조사되었다. 반면, 인과 칼슘 함량이 매우 결핍된 사료(칼슘: 3.23%, 이용가능한 인: 0.119%) 급여 시에는 인분해효소의 보충에도 불구하고 뼈의 농도가 일부만 보상되었다. 또한, 칼슘 및 이용가능한 인의 심각한 결핍으로 실험 기간 마지막 한 달간 5수 중 1수의 산란계는 산란을 중단하고 환우(molting)를 진행하였다. 환우 중인 산란계는 에스트로겐(estrogen) 호르몬의 분비를 감소시켜 산란을 중단하는 대신 골수(medullary bond)를 생성하여 골격의 강건성을 복원한다[59]. 참고로 골수는 난각 형성 시 무기질을 방출함과 동시에 골절에 저항성을 갖게 한다[60]. 또한 인 분해효소를 보충한

이용가능한 인과 칼슘이 매우 결핍된 사료(칼슘: 3.23%, 이용가능한 인: 0.119%)의 급여에 따라 골격의 강건성과 생산성이 일부분만 보상되었음을 보고하였다. 이에 산란지속성의 향상을 위해 산란기 중 사료 내 칼슘과 인의 비율과 함량을 요구량에 맞게 조성하고, 만약 칼슘과 인이 결핍된 경우, 인 분해효소를 보충하여 골격의 강건성과 생산성을 보상할 수 있도록 한다. 한편, 산란기 이전 칼슘 급여량에 따라 산란계의 생산성이 변화할 수 있다. 산란기 이전 칼슘의 공급이 요구량에 비해 부족한 경우, 산란 과정 중 골격에서부터 칼슘을 방출하여 난각을 형성하고 산란말기의 골격의 강건성 및 난각 품질에 부정적인 영향을 미치며, 이는 총 산란갯수를 저하시키고 산란의 지속성을 저해한다[7]. 반면, 산란 이전의 칼슘 공급이 과다한 경우 사료섭취량과 산란개시 시의 난중을 저하시키는 것으로 조사된다[61]. 참고문헌 [62]는 Hy-line Brown의 산란기 이전(16-19주령) 사료 중 칼슘 조성을 일반적인 함량의 2.5%와 칼슘 함량을 증가시킨 3.8%로 설정하여 급여하였고, 칼슘 조성에 따른 산란기(16-63주령) 중 생산성의 변화를 조사하였다. 산란기 이전 칼슘 급여를 증가시킨 경우 칼슘의 조악한 기호성에 따라 산란 이전 시기의 사료섭취량이 감소하는 것으로 나타났다[63]. 한편, 산란기 이전 사료 중 칼슘 함량의 변화는 산란기 중 산란 성적에 영향을 미치지 못하였으나, 3.8%의 칼슘을 포함한 사료 급여 시 2.5% 사료를 급여했을 경우에 비해 난각 품질이 개선되었고, 특히나 산란말기 중 이는 더욱 뚜렷한 경향을 나타냈다. 이는 산란기 이전 칼슘 급여량의 향상에 따라 골수 중 칼슘의 축적을 극대화하였고, 결과적으로 산란말기 중 골수(medullary bones)로부터 방출되는 칼슘의 양이 증가한 것으로 해석된다[64]. 산란말기 중 난각품질은 지속가능한 산란성적 유지에 매우 중요하므로 풍부한 칼슘 공급을 통해 산란지속성 향상을 기대할 수 있는 것으로 해석된다.

계란은 일반적으로 산란계 주령이 증가할수록 난중이 상승하고, 난각 두께, 난각 강도 등의 난각품질은 저하되는 경향성을 나타낸다[65]. 난각의 품질은 계란 생산 시부터 소비자가 섭취하기 이전까지 계란의 내부를 보호하는 역할을 하기 때문에 매우 중요하다. 한편 난각 생성 시 칼슘은 주로 사료 또는 골격에서부터 유래하고, 난각 형성은 주로 밤 중에 이루어지기 때문에, 오전이 아닌 오후에 사료 급여를 실시할 경우 난각의 형성에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 사료급여 시기에 따른 산란계의 계란 생산성의 변화를 구명하기 위해 참고문헌 [66]은 60주령의 Hy-line Brown 산란노계의 사료급여 시기(08:00, 12:00, 16:00, 일 3회)에 따른 산란 성적 및 난각품질을 조사하였다. 연구 결과, 사료급여 시기에 따른 산란율, 난중, 산란량 및 사료섭취량은 차이가 없었다. 반면, 오후(16:00)에 사료 급여 시 난각 두께와 자궁 중 칼슘 분포가 가장 높았고, 혈중 칼슘과 인은 비교적 낮게 조사되었다. 이는 오후 중의 사료를 급여함으로써 활발한 난각 생성을 유도하여 계란이 생성되는 생식기관인 자궁 내 칼슘이 많고, 혈중 칼슘과 인 함량은 비교적 낮은 것으로 해석된다. 칼슘은 난각 생성을 위해 혈액에서 자궁으로 지속적으로 공급된다[67]. 결과적으로 참고문헌 [66]의 연구는 암주기 중 난각이 주로 생성되는 계란 생성과정의 특성 상, 오전에 비해 오후 중 사료 급여가 산란노계의 난각 품질 개선에 기여함을 구명하였다. 이에 난각품질이 쉽게 저하되는 산란말기에 오후 중 사료 급여를 통해 난각품질을 개선하여 산란지속성을 향상시킬 수 있는 것으로 조사된다.

결론

고품질 단백질 공급원인 계란을 생산하는 산란계 산업은 국내 단백질 식품의 수요 증가에 따라 중요성이 점점 커지고 있다. 이에 산란계 사양관리는 생산성 향상의 관점에서 발전되어 왔으나, 현재는 동물복지를 개선하는 방향으로 관련 규정이 조정되어 가는 실정에 있다. 한편,

축산법 시행령 개정에 의해 산란계 최소 사육면적이 마리 당 0.05 m²에서 0.075 m²로 확대되어 동물복지 및 위생 관점에서의 발전이 기대되나, 산란계 총 사육수수가 최소 25% 이상 감소될 것으로 예상되어 전반적인 계란 생산량의 저하가 우려되는 상황이다. 이에 본 논문은 산란계의 총 사육수수가 감소될 것으로 예상되는 현 상황 속, 국내 산란계 농가의 계란생산성 유지를 목적으로 한 사육 환경 및 사료급여 전략 관련 사양관리법을 소개하고자 하였다. 계사 내 사육온도는 산란계의 온도중성영역을 준수하도록 하고, 습도는 상대습도 기준 60%~70%을 유지한다. 계사 내부 환기는 산란계의 생리적 항상성 유지 및 계사 내 유해물질 방출을 목적으로 주기적으로 시행한다. 점등프로그램은 조도 관리, 빛의 파장 조정 및 적절한 점등프로그램을 적용하여 산란 성적의 유지 및 생산비 절감을 기대할 수 있다. 음수 관리는 음수 내 다양한 첨가제를 투여하거나 주기적으로 철저한 소독을 실시한다. 사료급여 전략으로서 사료 중 단백질을 원료로 대두박 대신 면실박, 채종박 그리고 곤충단백질 이용 시 생산성 유지 및 자연환경 보호를 통해 지속가능한 산란계 생산에 기여한다. 또한, 산란계 육성기 중 에너지 제한 사료 급여를 통해 산란기 중 생산성을 향상시킬 수 있다. 합성아미노산을 보충한 저단백질 사료 공급 시 생산성 유지와 동시에 질소배출을 저감하여 계사 내 환경을 개선할 수 있다. 산란계의 골격 강건성 및 난각 형성에 있어 필수적인 칼슘과 인은 인분해효소의 적용으로 이용성을 높이고, 산란기 이전에 칼슘 급여를 증가할 경우, 산란기 중 난각 품질을 개선할 수 있다. 또한 오후 중 산란계에 사료를 급여하는 경우, 밤 중의 난각 형성 시 칼슘의 이용성을 증진시켜 난각 품질을 개선할 수 있다. 이처럼 계사 내 적절한 사육환경 관리 및 사료 급여전략을 활용할 경우, 확대된 사육면적 하 산란계의 총 사육수수 감소에도 불구하고, 계란생산성을 유지하여 우리나라의 식량안보 확보에 도움이 될 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. FFPI FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations [Internet]. FAO Food Price Index. 2023 [cited 2023 Jan 15]. <https://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/en/>
2. Gautron J, Réhault-Godbert S, Van de Braak TGH, Dunn IC. Review: what are the challenges facing the table egg industry in the next decades and what can be done to address them? *Animal*. 2021;15:100282. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100282>
3. Son JS, Kim CH, Kang HK, Kim HS, Jeon JJ, Hong EC, et al. Effect of stocking density on the feather condition, egg quality, blood parameters and corticosterone concentration of laying hens in conventional cage. *Korean J Poult Sci*. 2020;47:83-93. <https://doi.org/10.5536/KJPS.2020.47.2.83>
4. Weimer SL, Robison CI, Tempelman RJ, Jones DR, Karcher DM. Laying hen production and welfare in enriched colony cages at different stocking densities. *Poult Sci*. 2019;98:3578-86. <https://doi.org/10.3382/ps/pez107>
5. Rios RL, Bertechini AG, Carvalho JCC, Castro SF, Costa VA. Effect of cage density on the performance of 25- to 84-week-old laying hens. *Braz J Poult Sci*. 2009;11:257-62. <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2009000400007>
6. Oliveira JD, Bertechini AG, Fassani EJ, Albino LFT, Freitas RTF, Fialho ET. Níveis de cálcio em dietas para poedeiras leves e semipesadas no segundo ciclo de produção. *Rev Ciênc Agrotecnol*. 2002;26:1060-7.
7. 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

8. Lin H, Jiao HC, Buyse J, Decuyper E. Strategies for preventing heat stress in poultry. *Worlds Poult Sci J.* 2006;62:71-86. <https://doi.org/10.1079/WPS200585>
9. Hu JY, Hester PY, Makagon MM, Vezzoli G, Gates RS, Xiong YJ, et al. Cooled perch effects on performance and well-being traits in caged White Leghorn hens. *Poult Sci.* 2016;95:2737-46. <https://doi.org/10.3382/ps/pew248>
10. Greene ES, Rajaei-Sharifabadi H, Dridi S. Feather HSP70: a novel non-invasive molecular marker for monitoring stress induced by heat exposure in broilers. *Poult Sci.* 2019;98:3400-4. <https://doi.org/10.3382/ps/pez120>
11. Cassuce DC, Tinôco IFF, Baêta FC, Zolnier S, Cecon PR, Vieira MFA. Thermal comfort temperature update for broiler chickens up to 21 days of age. *Eng Agríc.* 2013;33:28-36. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000100004>
12. Barrett NW, Rowland K, Schmidt CJ, Lamont SJ, Rothschild MF, Ashwell CM, et al. Effects of acute and chronic heat stress on the performance, egg quality, body temperature, and blood gas parameters of laying hens. *Poult Sci.* 2019;98:6684-92. <https://doi.org/10.3382/ps/pez541>
13. Mashaly MM, Hendricks GL 3rd, Kalama MA, Gehad AE, Abbas AO, Patterson PH. Effect of heat stress on production parameters and immune responses of commercial laying hens. *Poult Sci.* 2004;83:889-94. <https://doi.org/10.1093/ps/83.6.889>
14. Rostagno MH. Effects of heat stress on the gut health of poultry. *J Anim Sci.* 2020;98:skaa090. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa090>
15. Holik V. Management of laying hens to minimize heat stress. Cuxhaven: Lohman Information; 2009.
16. Hu JY, Cheng HW. Warm perches: a novel approach for reducing cold stress effect on production, plasma hormones, and immunity in laying hens. *Poult Sci.* 2021;100:101294. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101294>
17. Scanes CG, Christensen KD. Poultry science. Long Grove, IL: Waveland Press; 2019.
18. Kim DH, Lee YK, Lee SD, Lee KW. Impact of relative humidity on the laying performance, egg quality, and physiological stress responses of laying hens exposed to high ambient temperature. *J Therm Biol.* 2022;103:103167. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103167>
19. Ying Z, Li X, Zhang M, Feng J. Effect of relative humidity at either acute or chronic moderate temperature on growth performance and droppings' corticosterone metabolites of broilers. *J Integr Agric.* 2019;18:152-9. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62049-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62049-0)
20. David B, Mejdell C, Michel V, Lund V, Oppermann Moe R. Air quality in alternative housing systems may have an impact on laying hen welfare. Part II: ammonia. *Animals.* 2015;5:886-96. <https://doi.org/10.3390/ani5030389>
21. Ruzal M, Shinder D, Malka I, Yahav S. Ventilation plays an important role in hens' egg production at high ambient temperature. *Poult Sci.* 2011;90:856-62. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-00993>
22. Lewis PD, Morris TR. Light intensity and performance of domestic pullets. *World's Poult Sci J.* 1999;55:241-50. <https://doi.org/10.1079/WPS19990018>
23. Mohammed HH, Grashorn MA, Bessei W. The effects of lighting conditions on the behaviour of laying hens. *Arch Geflügelkunde.* 2010;74:197-202.
24. Morris TR. Light intensity for growing and laying pullets. *World's Poult Sci J.* 1966;22:156-7. <https://doi.org/10.1079/WPS19660028>
25. Yildiz A, Laçın E, Hayirli A, Macit M. Effects of cage location and tier level with respect to light intensity in semiconfined housing on egg production and quality during the late

- laying period. *J Appl Poult Res.* 2006;15:355-61. <https://doi.org/10.1093/japr/15.3.355>
26. Barros JSG, Barros TAS, Sartor K, Raimundo JA, Rossi LA. The effect of linear lighting systems on the productive performance and egg quality of laying hens. *Poult Sci.* 2020; 99:1369-78. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.007>
 27. Farghly MFA, Mahrose KM, Rehman ZU, Yu S, Abdelfattah MG, El-Garhy OH. Intermittent lighting regime as a tool to enhance egg production and eggshell thickness in Rhode Island Red laying hens. *Poult Sci.* 2019;98:2459-65. <https://doi.org/10.3382/ps/pez021>
 28. Yuri FM, Souza C, Schneider AF, Gewehr CE. Intermittent lighting programs for layers with different photophases in the beginning of the laying phase. *Ciênc Rural.* 2016; 46:2012-7. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160246>
 29. Farghly MFA, Makled MN. Application of intermittent feeding and flash lighting regimens in broiler chickens management. *Egypt J Nutr Feeds.* 2015;18:261-76. <https://doi.org/10.21608/EJNF.2015.105816>
 30. Bryant SL. A case for dawn and dusk for housed livestock. *Appl Anim Behav Sci.* 1987;18:379-82. [https://doi.org/10.1016/0168-1591\(87\)90232-2](https://doi.org/10.1016/0168-1591(87)90232-2)
 31. Savory CJ. Diurnal feeding patterns in domestic fowls: a review. *Appl Anim Ethol.* 1980; 6:71-82. [https://doi.org/10.1016/0304-3762\(80\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0304-3762(80)90095-4)
 32. van Tlenhoven A, Ostrander CE. Short total photoperiods and egg production of White Leghorns. *Poult Sci.* 1976;55:1361-4. <https://doi.org/10.3382/ps.0551361>
 33. Morris TR, Midgley M, Butler EA. Experiments with the Cornell intermittent lighting system for laying hens. *Br Poult Sci.* 1988;29:325-32. <https://doi.org/10.1080/00071668808417057>
 34. Chung ELT, Nayan N, Kamalludin MH, Alghirani MM, Jesse FFA, Kassim NA, et al. The effects of alkaline water and rainwater on the production and health performance of commercial broilers under tropical conditions. *Thai J Vet Med.* 2020;50:65-73. <https://doi.org/10.56808/2985-1130.3076>
 35. Tajudeen H, Ha SH, Hosseindoust A, Mun JY, Park S, Su CP, et al. The pharmaceutical effect of Korean wild ginseng residue extract on the performance, microbiota quality, cytokine expression, and the ginseng saponin content of laying hen. *Poult Sci.* 2024;103: 103467. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103467>
 36. El Sabry MI, Abdelfattah MH, Abdellatif HA, Aggrey SE, Elnesr SS. Physicochemical properties of magnetic water and its effect on egg production traits in hens at late laying period. *J Anim Plant Sci.* 2021;31. <https://doi.org/10.36899/JAPS.2021.1.0219>
 37. Yi XJ, Rehman A, Akhtar RW, Abbas A, Hussain K, Yasin R, et al. Effects on egg production and quality of supplementing drinking water with calcium and magnesium. *S Afr J Anim Sci.* 2021;51:469-76. <https://doi.org/10.4314/sajas.v51i4.7>
 38. Yenice E, Mızrak C, Gültekin M, Atik Z, Tunca M. Effects of organic and inorganic forms of manganese, zinc, copper, and chromium on bioavailability of these minerals and calcium in late-phase laying hens. *Biol Trace Elem Res.* 2015;167:300-7. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0313-8>
 39. Li J, Wang Y, Zheng W, Xia T, Kong X, Yuan Z, et al. Comprehensive evaluation of treating drinking water for laying hens using slightly acidic electrolyzed water. *Poult Sci.* 2024;103:103176. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103176>
 40. Wang Y, Zhang JF, Li BM. Study on the effects of slightly acidic electrolyzed water on the intestinal microflora of laying hens. *J China Agric Univ.* 2018;23:113.
 41. da Silva VP, van der Werf HMG, Spies A, Soares SR. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. *J Environ Manag.*

- 2010;91:1831-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.001>
42. Martens SD, Tiemann TT, Bindelle J, Peters M, Lascano CE. Alternative plant protein sources for pigs and chickens in the tropics – nutritional value and constraints: a review. *J Agric Rural Dev Trop Subtrop*. 2012;113:101-23.
 43. Wang XC, Zhang HJ, Wang H, Yue HY, Wang J, Wu SG, et al. Effect of different protein ingredients on performance, egg quality, organ health, and jejunum morphology of laying hens. *Poult Sci*. 2017;96:1316-24. <https://doi.org/10.3382/ps/pew396>
 44. Gilbert ER, Li H, Emmerson DA, Webb KE Jr, Wong EA. Dietary protein quality and feed restriction influence abundance of nutrient transporter mRNA in the small intestine of broiler chicks. *J Nutr*. 2008;138:262-71. <https://doi.org/10.1093/jn/138.2.262>
 45. Gheisari A, Ghayor P. Different dietary levels of rapeseed meal effects on egg quality characteristics in indigenous breeding hens. *J Anim Physiol Anim Nutr*. 2014;9:1-8.
 46. Khatun MJ, Khan MKI. Different types of maize silage and unconventional feed resources and their nutritive values. *Forage Res*. 2015;41:1-9.
 47. Wu-Haan W, Powers W, Angel R, Applegate TJ. The use of distillers dried grains plus solubles as a feed ingredient on air emissions and performance from laying hens. *Poult Sci*. 2010;89:1355-9. <https://doi.org/10.3382/ps.2009-00471>
 48. Durst PB, Johnson DV, Leslie RN, Shono K. *Forest insects as food: humans bite back*. Bangkok: RAP Publication; 2010.
 49. Sedgh-Gooya S, Torki M, Darbemamieh M, Khamisabadi H, Abdolmohamadi A. Effect of dietary inclusion of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae meal on productive performance, egg quality indices and blood parameters of laying hens. *Anim Prod Sci*. 2021;61:1365-72. <https://doi.org/10.1071/AN20102>
 50. Nascimento Filho MA, Pereira RT, Oliveira ABS, Suckeveris D, Burin AM Jr, Soares CAP, et al. Nutritional value of *Tenebrio molitor* larvae meal for broiler chickens: metabolizable energy and standardized ileal amino acid digestibility. *J Appl Poult Res*. 2021;30:100102. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2020.10.001>
 51. Cromwell GL. Feeding swine. In: Kellems RO, Church DC, editors. *Livestock feeds and feeding*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall; 1998. p. 354.
 52. Bestman M. *Poultry signals: a practical guide for bird focused poultry farming*. Zutphen: Roodbont Publishers; 2011.
 53. 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 Hy-Line Brown laying hens aged 6 to 72 wk. *Poult Sci*. 2023;102:102942. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102942>
 54. Bruggeman V, Onagbesan O, D'hondt E, Buys N, Safi M, Vanmontfort D, et al. Effects of timing and duration of feed restriction during rearing on reproductive characteristics in broiler breeder females. *Poult Sci*. 1999;78:1424-34. <https://doi.org/10.1093/ps/78.10.1424>
 55. Renema RA, Robinson FE. Defining normal: comparison of feed restriction and full feeding of female broiler breeders. *World's Poult Sci J*. 2004;60:508-22. <https://doi.org/10.1079/WPS200434>
 56. Tyler NC, Gous RM. Photorefractoriness in avian species – could this be eliminated in broiler breeders? *World's Poult Sci J*. 2012;68:645-50. <https://doi.org/10.1017/S0043933912000785>
 57. Heo YJ, Park J, Kim YB, Kwon BY, Kim DH, Song JY, et al. Effects of dietary protein levels on performance, nitrogen excretion, and odor emission of growing pullets and laying hens. *Poult Sci*. 2023;102:102798. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102798>
 58. Bello A, Dersjant-Li Y, Korver DR. Effects of dietary calcium and available phosphorus

- levels and phytase supplementation on performance, bone mineral density, and serum biochemical bone markers in aged white egg-laying hens. *Poult Sci.* 2020;99:5792-801. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.06.082>
59. Dacke CG, Arkle S, Cook DJ, Wormstone IM, Jones S, Zaidi M, et al. Medullary bone and avian calcium regulation. *J Exp Biol.* 1993;184:63-88. <https://doi.org/10.1242/jeb.184.1.63>
 60. Fleming RH, McCormack HA, McTeir L, Whitehead CC. Medullary bone and humeral breaking strength in laying hens. *Res Vet Sci.* 1998;64:63-7. [https://doi.org/10.1016/S0034-5288\(98\)90117-5](https://doi.org/10.1016/S0034-5288(98)90117-5)
 61. Bolden SL, Jensen LS. The effect of marginal levels of calcium, fish meal, torula yeast and alfalfa meal on feed intake, hepatic lipid accumulation, plasma estradiol, and egg shell quality among laying hens. *Poult Sci.* 1985;64:937-46. <https://doi.org/10.3382/ps.0640937>
 62. de Juan AF, Scappaticcio R, Aguirre L, Fondevila G, García J, Cámara L, et al. Influence of the calcium and nutrient content of the prelay diet on egg production, egg quality, and tibiae mineralization of brown egg-laying hens from 16 to 63 wk of age. *Poult Sci.* 2023;102:102491. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102491>
 63. Hughes BO, Wood-Gush DGM. A specific appetite for calcium in domestic chickens. *Anim Behav.* 1971;19:490-9. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(71\)80103-3](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(71)80103-3)
 64. Khanal T, Widowski T, Bédécarrats G, Kiarie E. Effects of pre-lay dietary calcium (2.5 vs. 4.0%) and pullet strain (Lohmann Brown vs. selected Leghorn LSL-Lite) on calcium utilization and femur quality at 1st through to the 50th egg. *Poult Sci.* 2019;98:4919-28. <https://doi.org/10.3382/ps/pez245>
 65. Benavides-Reyes C, Folegatti E, Dominguez-Gasca N, Litta G, Sanchez-Rodriguez E, Rodriguez-Navarro AB, et al. Research note: changes in eggshell quality and microstructure related to hen age during a production cycle. *Poult Sci.* 2021;100:101287. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101287>
 66. Liu Y, Uyanga VA, Jiao H, Wang X, Zhao J, Zhou Y, et al. Effects of feeding strategies on eggshell quality of laying hens during late laying period. *Poult Sci.* 2023;102:102406. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102406>
 67. Gautron J, Hincke MT, Nys Y. Precursor matrix proteins in the uterine fluid change with stages of eggshell formation in hens. *Connect Tissue Res.* 1997;36:195-210. <https://doi.org/10.3109/03008209709160220>