

육계에서의 칼슘 및 인 영양의 최신 연구 동향

이채원¹ · 공창수^{1,2,3*}¹경북대학교 축산BT학과, ²경북대학교 축산학과, ³경북대학교 미래동물자원연구원

Recent trends in calcium and phosphorus nutrition in broilers

Chae Won Lee¹ and Changsu Kong^{1,2,3*}¹Department of Animal Science and Biotechnology, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea²Department of Animal Science, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea³Research Institute for Innovative Animal Science, Kyungpook National University, Sangju 37224, KoreaReceived: Jul 18, 2023
Revised: Aug 6, 2023
Accepted: Aug 14, 2023

*Corresponding author

Changsu Kong
Department of Animal Science and
Biotechnology, Kyungpook National
University, Sangju 37224, Korea
Tel: +82-54-530-1225
E-mail: changsukong@knu.ac.krCopyright © 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

Chae Won Lee
<https://orcid.org/0000-0002-8281-5478>
Changsu Kong
<https://orcid.org/0000-0002-3876-6488>

Abstract

Calcium (Ca) and phosphorus (P) are essential for skeletal integrity and bird growth. In plant-based broiler diets, Ca and P are supplied by adding inorganic sources. Precision feed formulation involves accurately meeting the broiler requirements, and to achieve this, evaluating the availability of Ca and P in feed ingredients is necessary. Since Ca and P are deeply related to intestinal absorption and utilization, evaluating the Ca or P availability in feed ingredients requires an understanding of the metabolism of these two nutrients. Moreover, the concentrations and ratios of Ca and P in diets must be considered. Currently, broiler diets are formulated based on total Ca and available P contents, and generally, phytate P is used as available P. When formulating feed based on total nutrients content, there is a risk of oversupplying Ca or P, which is beyond the requirement. Therefore, it is imperative to accurately provide the available amounts of Ca and P to meet the requirements of broilers. Recent studies evaluating the digestibility of Ca or P in feed ingredients have led to the proposal of using digestible Ca and P as terms for available Ca and P. Digestibility can be measured by using total tract retention and ileal digestibility. However, specific standardized protocols have not been established, resulting in inconsistent digestibility values across experiments. Furthermore, with the constant genetic evolution of breeder companies, recommended requirements must be adjusted to enhance nutrient utilization and improve growth performance. This study discusses recent trends in Ca and P research in broilers, focusing on evaluating the digestibility of Ca and P in feed ingredients and measuring Ca and P requirements in poultry.

Keywords: Broiler, Calcium, Phosphorus, Digestibility, Requirement

서론

칼슘(Ca, Calcium)과 인(P, phosphorus)은 대부분 뼈에 존재하여 뼈 발달 및 유지에 중요한

Competing interests

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

Funding sources

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2022-RD010370)” 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.

Authors' contributions

Conceptualization: Kong C.
Data curation: Lee CW, Kong C.
Formal analysis: Lee CW, Kong C.
Methodology: Kong C.
Software: Lee CW, Kong C.
Validation: Lee CW, Kong C.
Investigation: Lee CW.
Writing - original draft: Lee CW.
Writing - review & editing: Lee CW, Kong C.

Ethics approval and consent to participate

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

역할을 수행하고 다양한 생리학적 기능에 필수적인 무기물이다. 칼슘은 체내 가장 풍부하게 존재하는 다량광물질이며, 효소활성, 혈액응고, 근수축, 단백질 합성, 산-염기 균형 조절 및 신경 자극 전달을 비롯한 체내 생리적 기능에 중요한 역할을 한다[1]. 인은 닭에서 칼슘 다음으로 많이 요구되는 다량광물질로 ATP(adenosine triphosphate)의 구성요소로서 에너지 대사에 관여하고, 효소활성 조절, 인지질 생성의 기능과 함께 핵산의 구성성분으로 쓰인다[2]. 대부분의 칼슘과 인은 뼈에 hydroxyapatite($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) 형태로 저장되어 있으며, 결핍 시 동물의 뼈 발달이 저하되어 생산성에 영향을 미치고, 그 결과 동물복지에도 영향을 줄 수 있다.

식물성 원료사료들을 기준으로 배합되는 가금 사료에서 부족한 칼슘과 인 요구량을 충족시키기 위해 무기원료인 석회석과 인산칼슘(calcium phosphates; 제1인산칼슘($\text{Ca}[\text{H}_2\text{PO}_4]_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 및 제2인산칼슘(CaHPO_4) 등), 또는 유기원료인 육골분 또는 도계부산물 등이 주요 공급 원료로 사용된다. 현재 대부분의 육계 사료 내 칼슘과 인 함량은 총 칼슘과 유효인(available phosphorus) 수준을 기준으로 배합되고 있다[3,4]. 유효인은 사료 내 전체 인 함량 중 동물에 의해 흡수 및 이용될 수 있는 인의 함량을 뜻하며, 일반적으로 가금 사료 배합비 설계 시 인 요구량 충족을 위해 원료 내 비피틴태인(non-phytate phosphorus, NPP) 함량을 사용한다[5,6]. 비피틴태인은 총 인 함량 중에 피틴태인(phytate phosphorus) 부분을 제외한 인 함량을 의미한다. 비피틴태인은 동물에 의해 전부 이용될 수 없고 일부만이 이용 가능하며, 육계에서 피틴태인은 51%~60%의 소화율을 갖기 때문에[7], 비피틴태인 함량을 기준으로 배합비를 작성하더라도 동물의 이용성 고려가 필요하다는 것을 알 수 있다[8,9]. 따라서 정밀한 배합비 작성을 위해서는 유효인과 비피틴태인은 구분하여 사용할 필요가 있다.

원료사료별 사료 내 칼슘 및 인의 함량과 동물에서의 이용가능한 부분은 변이가 있기 때문에 총 함량(total basis)을 기준으로 배합비를 작성할 경우, 사료 내 칼슘 및 인의 이용성에 따라 요구량을 충족시키지 못하거나 요구량 이상으로 과잉 공급될 수 있다[10,11]. 가금 사료 내 인이 과잉 공급될 시 분뇨로 배출되는 인의 양과 환경으로 배출되는 인의 양이 증가하여 자연 생태에서 부영양화를 일으키는 원인이 될 수 있다[12-14]. 따라서 양계 생산 시 성장에 부정적인 영향을 주지 않으면서 환경으로 배출되는 인을 줄이기 위해서는 원료사료별 육계의 광물질 이용성을 고려하여 동물이 실제 필요로 하는 요구량을 충족시킨 배합비를 작성하는 것이 필요하다. 또한, 사료 내 칼슘과 인의 비율에 따라 이용성에 차이를 보이기 때문에 정밀한 인 공급을 위해 칼슘의 이용성을 고려한 요구량 측정 연구도 함께 수행되고 있다[15-17]. 최근 육계에서의 다양한 원료 사료 내 칼슘 및 인의 소화율 평가가 지속됨에 따라 소화가능한(digestible) 칼슘 및 인을 이용가능한(available) 칼슘 및 인으로 대체하자고 제안되고 있다[8,18,19]. 따라서 본 원고에서는 원료 사료 내 칼슘 및 인의 소화율 평가와 칼슘 및 인의 요구량 측정방법에 대한 내용을 언급하고, 이를 통해서 최근 육계에서의 칼슘 및 인 관련 연구동향에 대하여 논의하고자 한다.

칼슘 및 인의 대사

육계 사료에 사용되는 대부분의 식물성 원료사료들은 소량의 칼슘과 인을 함유하고 있기 때문에 육계의 정상적인 성장에 필요로 하는 칼슘과 인의 양을 충족하기 어렵다. 따라서 칼슘과 인이 풍부한 석회석이나 인광석과 같은 원료사료들을 첨가하여 부족한 요구량을 충족시킨다. 또한 인은 피트산(phytic acid)에 결합한 피틴태인(phytate phosphorus)과 비피틴태인(NPP)으로 구분할 수 있으며, 식물성 원료사료 내 인의 60%~70%는 피틴태인의 형태로 존재한다[13,20]. 그러나 육계는 피틴태인을 분해하는 phytases 효소 분비가 적기 때문에 피틴태인 이용에 한계가

있다[21,22]. 따라서 식물성 원료사료를 주요 원료사료로 사용하는 육계 사료에서는 육계가 필요로 하는 인의 요구량을 충족하기 위하여 사료에 무기태 인 원료사료를 사용한다.

체 내 칼슘의 99%는 뼈에 저장되어 있으며, 1%는 혈액 또는 세포에 자유 이온 혹은 단백질과 결합된 상태이거나, 유기산이나 무기산과 복합체를 형성하여 존재한다[2]. 이온화 칼슘은 생리적 활성 형태이며, 혈장 내 칼슘 또는 인의 수준에 따라 항상성 유지를 위해 조절된다[23]. 칼슘의 장내 흡수는 능동수송(active transport)과 수동수송(passive transport)으로 구분할 수 있다[11]. 칼슘 섭취량이 적을 때는 부갑상샘호르몬(parathyroid hormone)과 vitamin D에 의해 능동수송이 이루어지며, 칼슘 섭취량이 높을 때는 장내세포막의 전기화학적 기울기(electrochemical gradient)에 따른 전위 차에 의해 수동수송을 통해 밀착연접(tight junction)을 통과하여 흡수된다[21,24-26].

칼시토닌(calcitonin), 부갑상샘호르몬, vitamin D₃ 활성형(1,25 dihydroxycholecalciferol; calcitriol)은 칼슘과 인의 체 내 항상성에 관여하는 대사물질로서 칼슘 및 인의 흡수 및 재흡수에 관여하고, 결과적으로 이용성 측정치에 영향을 미친다. 칼시토닌은 갑상샘에서 분비되는 호르몬으로, 칼슘 섭취량이나 혈중 칼슘 농도가 높을 때 뼈와 신장으로부터 재흡수를 억제하여 혈중 칼슘 농도를 감소시킨다[11,27]. 이에 따라 뇨를 통한 칼슘의 배출이 증가하게 된다. 반대로 부갑상샘 호르몬은 감각 이상(paresthesia), 근육약화(muscle weakness) 및 식욕부진을 비롯한 질병들을 예방하기 위해 칼슘 흡수를 조절하는 호르몬이다[28]. 혈중 칼슘 농도가 낮아지면 부갑상샘에서 부갑상샘호르몬이 분비되어 뼈로부터 칼슘 방출과 신장의 재흡수를 촉진하는 기능을 하고[29], 칼슘 배출이 감소하는 동시에 신장을 통한 인 배출이 증가된다[13]. 결과적으로 혈중 칼슘 농도와 뇨를 통한 인 배출 증가로 인해 혈중 인 농도는 감소하게 된다. 또한, vitamin D₃는 간에서 생성되어 신장에서 최종적으로 활성형인 1,25-dihydroxyvitamin D(1, 25(OH)₂D₃)로 전환되고, 부갑상샘호르몬이 이 과정을 촉진시킨다[2]. Vitamin D₃ 활성형(1, 25-(OH)₂D₃)은 장관 내 칼슘 수송체인 칼빈딘(calbindin)을 자극해서 장관의 칼슘 흡수를 돕고, 신장과 뼈에서 칼슘 재흡수를 유도하여 칼슘 방출을 촉진시켜 혈중 칼슘 농도를 높인다[2,28].

칼슘 및 인의 이용성 측정

칼슘의 공급원으로 사용되는 석회석은 비타민제 보조사료나 혼합광물질 사료제작 시 부형제로 활용될 수 있기 때문에, 배합사료 내 정확한 칼슘 함량 측정이 어려울 수 있다[30]. 또한, 칼슘 및 인 공급 원료사료는 주요 원료사료인 식물성 원료사료에 비해 상대적으로 가격이 저렴하고, 결핍 시 육계의 성장 및 발달에 부정적인 영향을 줄 수 있다는 인식으로 인해 사료 내 요구량 이상 첨가될 가능성이 높다[30,31]. 하지만, 석회석과 인산칼슘과 같은 암석 또는 광석들은 채굴 가능한 매장량 고갈 시 가축사료에 활용하는 것이 제한될 수도 있다. 정밀한 배합비 작성을 위해서는 육계의 칼슘 또는 인 요구량의 고려가 필요하고, 이는 육계에서의 원료사료의 이용효율을 증진시킬 수 있다. 더욱이 다량광물질 요구량을 고려한 배합비는 체내 칼슘 또는 인의 결핍과 같은 문제점을 개선하여 사양성적에 긍정적인 효과와 정상적인 골격 형성을 통해 동물 생산과정 중 동물복지 측면에서도 도움이 될 수 있고, 분뇨를 통해 배출되는 칼슘과 인의 양을 감소시켜 환경오염 방지에 기여할 수 있다[21]. 이러한 정밀 사료 배합을 위해서는 사전에 원료사료 내 동물이 이용가능한 칼슘 및 인 함량 측정이 선행되어야 한다. 이용가능한 영양소는 사료 내 영양소 중 실제 동물에 의해 소화, 흡수되는 영양소 함량을 의미하고, 일반적으로 육계에서의 원료사료 내 영양소의 이용성을 평가할 때 소화율 측정을 이용한다. 가산성을 기본 가정으로 하는 사료 배합비 작성 시 사료 내 칼슘 및 인의 적정 요구량 충족을 위해서는 각각의

원료사료들의 이용성 평가가 필요하다.

상대적 이용성 평가(relative bioavailability)

칼슘 또는 인의 이용성은 측정된 이용성의 기울기 비율을 비교하는 방식(slope ratio assay)을 사용하여 상대적인 값으로 측정되어 왔다[32,33]. 이 측정 방법은 비교 시 기준이 되는 원료사료(reference ingredient)와 비교 대상인 원료사료(test ingredient)의 사료 내 첨가수준을 요구량 이하로 급이하여 사료 내 첨가 수준(x-axis)에 따른 조사항목(y-axis)이 직선의 기울기(linear slope)를 가질 수 있도록 하고, 측정된 기준 원료사료의 기울기에 대한 비교 원료사료의 상대적인 기울기를 평가하여 상대적 이용성(relative bioavailability)을 평가한다[34]. 칼슘과 인의 상대적 이용성을 평가하는 방법에는 주로 사양성적과 골 강도(bone breaking strength), 골 회분 및 골 내 칼슘 및 인 함량을 포함하는 골특성들을 조사항목으로 한다. 이 방법은 원료사료별 2가지 이상의 수준별 실험사료가 필요하기 때문에 실험수행을 위한 비용과 노동력 부담이 있고, 측정된 광물질의 이용성은 원료사료의 절대적 값이 아닌 기준 원료사료에 대한 상대적인 값이기 때문에 배합비 작성 시 실제 이용 가능한 칼슘 또는 인의 함량을 정량화 하기에 어려움이 있어 배합비 작성에 사용되기보다는 기존에 사용되는 원료사료 대비 새로운 원료사료의 이용성을 평가하고자 할 때 사용되고 있다.

소화율 측정

소화율 측정을 통해 원료사료의 칼슘 및 인의 소화율을 측정하여 가소화(digestible) 함량을 측정할 수 있다. 무기물의 소화율 측정은 상대적 이용성 평가에 비해 원료사료 당 필요로 하는 실험사료의 개수가 적고, 측정된 소화율 값은 원료사료 혹은 배합사료 내 칼슘 또는 인 함량에 대한 육계의 실제 이용성을 반영한 값이면서 원료사료 내 이용가능한 칼슘 및 인의 함량을 정량화 할 수 있어서 배합비 작성에 적용이 가능하다. 소화율은 측정 소화기관 또는 샘플의 차이(분뇨 vs. 회장내용물)의 위치에 따라 전장축적률(total tract retention)과 회장소화율(ileal digestibility)로 구분할 수 있다.

육계에서 칼슘과 인의 대부분은 공장과 회장에서 소화되고[18,35], 소화되지 않은 칼슘과 인은 분으로 배출된다. 육계의 경우, 총배설강이 있어서 분과 뇨가 분리되지 않은 분뇨(excreta)로 배출되고, 뇨를 통해 배출되는 칼슘과 인은 소화 과정 이후 체내 흡수되어 대사과정을 거쳐 배출되는 부분이다[35,36]. 따라서 닭의 분뇨를 채취하여 무기물 이용성을 평가할 때 전장소화율이 아닌 전장축적률이라 표현한다. 전장축적률을 이용하여 이용성을 측정할 경우, 분과 뇨의 분리가 어려운 닭의 신체적인 조건 때문에 대사과정 후 뇨를 통해 배출되는 칼슘 및 인을 제거하기 어렵다[36]. 최근 육계 연구에서는 전장축적률과 무기물의 회장소화율을 측정하기 위한 연구들이 다수 진행되고 있다[37,38]. 칼슘 및 인의 회장소화율은 육계의 회장 말단으로부터 회장소화물(ileal digesta)을 채취하여 섭취한 사료와 회장소화물 간의 칼슘 및 인 함량 차이를 이용하여 소화율을 측정되며, 이 값은 육계에서의 소화가능한 칼슘 및 인 함량으로 제안되고 있다[8,35].

World's Poultry Science Association(WPSA)는 원료사료 내 인의 회장소화율을 측정하기 위한 기준 방법으로 회귀법(regression)을 제안했다[8]. 회귀법은 평가하고자 하는 영양소를 최소 3가지 수준 이상 첨가한 다수의 실험사료가 필요하다[14,39]. 다른 방법 중 하나인 차이법(difference method)은 기준사료(basal diet)와 기준사료의 일부를 평가 원료사료(test ingredient)로 대체한 평가사료가 필요하다[40]. 직접법(direct method)은 사료 내 평가 원료사료가 유일한 영양소원이 되도록 배합된 실험사료를 사용한다. 주요 칼슘 및 인 원료들(석회석, 인산칼슘 또는

유기태 인)의 일반적인 식물성 또는 동물성 원료와는 다른 특수한 영양소 조성 때문에 반정제사료(semi-purified)를 사용하는데, 이로 인해 일반적인 가금 사료과는 달리 영양소의 불균형이 있을 수 있어 장기간 동물이 섭취 시 정상적인 대사과정을 저해한다는 단점을 가지고 있다. 그러나 회귀법 및 차이법과 비교하여 필요로 하는 실험사료의 개수가 적다는 장점이 있다. Anwar et al.[15]은 회귀법, 차이법 및 직접법에 따라 측정된 제2인산칼슘(CaHPO_4)의 회장 칼슘소화율들 간 변이가 있음이 보고됐다[15]. 이전 연구들에서 측정된 육계에서의 원료사료 내 칼슘 및 인의 회장 소화율은 Tables 1, 2에 나타내었으며, 소화율 측정값은 동일한 종류의 원료사료 간에도 실험에 따라 변이를 보였다. 이러한 이유는 소화율 측정에 사용된 방법의 차이가 원인 중 하나일 것으로 사료된다. 한편, 칼슘과 피틴태인은 체내에서 킬레이트 화합물(chelate compounds)을 형성할 수 있어 각각의 소화율에 영향을 미칠 수 있으며[29,41], 사료 내 칼슘 함량이 높을수록 장내 pH가 상승하여 인의 소화율이 감소한다는 보고가 있었다[19]. 사료 내 칼슘 및 인의 수준과 비율에 따른 소화율의 차이는 여러 논문에서 보고된 바 있으나[33,42-44], 정확한 소화율 평가를 위한 사료 내 적정 칼슘 및 인의 함량은 아직까지 정해지지 않았으며, 표준화된 소화율 평가 방법의 수립이 필요한 실정이다. Rodehutsord et al.[45]은 17곳의 실험실을 선정하여 WPSA에서 제안하는 실험 절차를 기반으로 대두박의 인 소화율을 측정하는 실험을 진행했다[45]. 동일한 원료사료를 사용했음에도 불구하고, 측정된 소화율에서 변이를 보였다. 저자는 실험개시 전 사양방법의 차이를 실험의 결과에 차이를 주게 된 요인으로 제시했다. 또한, 육계의 일령, 실험사료 급이 기간 및 원료사료의 입자 크기 또한 소화율에 영향을 미치는 요인이 될 수 있다[33,46,47]. 따라서 표준화된 실험 방법을 수립하기 위해서는 사료 내 칼슘 및 인 수준 외에도 앞서 언급한 요인들을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

칼슘 및 인의 요구량 측정

NRC[48]에서 제안하는 칼슘 및 인의 요구량은 30여 년 전 실험을 토대로 작성되었지만[48] 1960년대 이후 지속적인 육종개량을 통해 육계의 성장속도와 사료효율이 크게 향상되었기 때문

Table 1. Ileal digestibility coefficients of calcium (Ca) for inorganic sources in broiler chickens

Ingredient	Total Ca	Ca:NPP ratio	Digestibility	Method	Reference
Dicalcium phosphate	9.0	1.1	0.32	Direct	[58]
	9.0	1.1	0.28, 0.34	Direct	[15]
	8.6	1.2, 2.0	0.21, 0.25	Difference	[15]
	2.9-8.6	1.1-1.2	0.13	Regression	[15]
	3.3-5.3	0.9-1.0	0.67	Regression	[59]
Monocalcium phosphate	9.0	0.6-0.7	0.43	Direct	[58]
	9.0	0.8	0.33	Direct	[15]
Limestone	9.0	1.1	0.51	Direct	[58]
	9.0	2.0	0.27-0.53	Direct	[44]
	8.0	2.0	0.46	Direct	[60]
	9.0	2.0	0.57-0.62	Direct	[61]
	9.0	2.0	0.50	Direct	[62]
	3.3-5.3	0.9, 1.0	0.64	Regression	[59]

NPP, non-phytate phosphorus.

Table 2. Ileal digestibility coefficients of phosphorus (P) for inorganic sources in broiler chickens

Ingredient	Total Ca	Total P	Digestibility	Method	Reference
Dicalcium phosphate	10.0	4.5	0.80	Direct	[38]
	4.4	3.3	0.59	Direct	[63]
	4.2-5.5	3.0-4.0	0.65	Regression	[64]
	7.0	4.9	0.29	Direct	[5]
	4.4-6.4	3.2-4.7	0.40	Regression	[65]
Monocalcium phosphate	10.0	4.5	0.90	Direct	[38]
	4.4	3.4	0.78	Direct	[63]
	4.2-5.4	3.0-4.0	0.69	Regression	[64]
	6.8	4.9	0.68	Direct	[5]
Monodicalcium phosphate	10.0	4.5	0.89	Direct	[38]
	4.1-5.4	3.0-4.0	0.60	Regression	[64]

Ca, calcium.

에 현대 육계의 성장에 알맞은 요구량 재평가가 필요하다. 또한 NRC[48]뿐만 아니라, 육종회사인 Aviagen 등의 영양소 요구량 지침에서는 총칼슘과 비피타민 함량을 기준으로 제시하고 있다[3,48]. 원료사료의 소화율 평가 자료가 축적되면서 최근 육계에서 소화가능한 칼슘 및 인을 사용한 요구량 평가 연구가 수행되고 있다[4,49-53].

육계는 사료 내 칼슘 수준에 적응할 수 있지만, 높은 사료 내 칼슘 수준은 에너지 및 다른 영양소의 이용성을 저하시킨다[17,29]. 따라서 사료 내 칼슘 수준을 낮출수록 에너지 및 영양소 이용성 향상을 통해 사양성적을 향상시킬 수 있을 것으로 추측할 수 있으나, 과도한 칼슘 수준 조정은 뼈 이상을 일으켜 다리에 문제를 일으킬 가능성이 있다[17]. 한편, Faridi et al.[54]은 사료 내 칼슘의 수준이 높아질수록 인의 요구량이 증가한다고 보고했다[54]. 이렇듯 칼슘과 인은 상호작용을 통해 이용성에 영향을 미치기 때문에, 칼슘과 인의 수준을 동시에 고려하여 요구량 평가를 하는 방법이 수행되고 있다[55]. 사료 내 최적의 칼슘과 인의 수준 측정을 위해 주로 사용되는 분석항목은 사료 내 칼슘 및 인의 수준별 급이를 통한 사양성적과 골 특성 변화이고 [55], 최근에는 체 내 칼슘 및 인 이용과 관련된 유전자 또는 단백질 발현을 평가항목으로 활용한 연구들도 수행되었다[17,55,56]. 분석 항목별 칼슘과 인 요구량 평가결과에 대한 내용은 Table 3에 나타내었다.

최근, 육계연구에서 사료 내 칼슘 및 인 수준에 따라 이용성에 차이를 보인다는 연구결과들에 따라 사료 내 두 무기물 수준을 동시에 고려한 요구량 측정 연구가 필요해 보인다. 이전 육계에서의 칼슘 및 인의 요구량 실험에서는 대부분 회귀법을 사용하여 최적의 사료 내 칼슘 또는 인의 수준을 측정했다[55]. 그러나 회귀법의 경우, 사료 내 칼슘 또는 인 수준만을 독립변수(x-axis)로 사용할 수 있고, 칼슘과 인 수준을 동시에 독립변수로 고려할 수 없어 사료 내 두 무기물 첨가수준에 따른 상호작용을 제대로 고려하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 사료 내 칼슘과 인의 상관관계 고려를 위한 방법으로는 사료 내 칼슘과 인의 수준을 동시에 고려하여 반응곡선을 확인하거나[55], 반응표면법(response surface methodology)을 사용할 수 있다. 반응표면법은 적은 처리구로 두 개 이상의 독립변수(x-axis) 간 상관관계를 고려하여 요구량을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 두 가지 이상의 분석항목(y-axis)에 대한 최적의 요구량을 동시에 측정할 수 있다. Fallah et al.[57]은 중심합성설계(central composite design)를 사용하여 실험

Table 3. Calcium (Ca) or non-phytate phosphorus (NPP) requirement in broiler chickens

Response	Age	NPP	Total Ca	SID Ca	Reference
Weight gain	10	NA	NA	3.32	[49]
	21	4.30	6.23	NA	[57]
	21	3.4	NA	NA	[56]
	24	NA	6.11	3.05	[4]
Tibia ash	10	NA	NA	5.30	[51]
	21	NA	9.3	NA	[17]
	21	4.75	6.44	NA	[57]
	21	3.7	NA	NA	[56]
	24	NA	NA	5.15	[52]
	24	NA	7.28	3.69	[4]
	42	NA	NA	3.70	[53]
Tibia breaking strength	21	NA	8.8	NA	[17]
	21	3.9	NA	NA	[56]
Bone mineralization	10	NA	8.9–9.8	4.36–4.78	[49]
	21	4.0	NA	NA	[56]
Bone mineral density	21	NA	9.2	NA	[17]
	21	3.8	NA	NA	[56]
Tibia ALP protein expression	21	NA	9.0	NA	[17]

ALP, alkaline phosphatase; NA, not applicable.

사료 내 총 칼슘 및 비피틴태인의 수준을 설정하고 반응표면법을 기준으로 요구량을 측정하였고, 제시한 요구량은 NRC[48] 값보다 낮았다[57]. 현재까지 사료 내 칼슘과 인의 상관관계를 고려하여 측정한 요구량 결과는 부족한 실정이며, 향후 동물의 영양 및 환경적 관점에서 지속가능한 육계 생산을 위해서는 소화가능한 칼슘과 인 함량을 기준으로 한 사료 내 적정 요구량 측정을 위한 기준 실험법 설정 및 이와 관련된 다수의 연구들이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

결론

최근, 환경오염 문제로 인해 가금생산 시 발생하는 분뇨를 통한 인 배출량을 최소화하기 위한 노력으로 원료사료의 정확한 인의 생체이용률 측정 연구가 수행되어 왔다. 체내의 칼슘과 인 수준은 각 무기물의 흡수 과정에 영향을 줄 수 있으며, 불균형적인 칼슘과 인 공급은 각 무기물의 이용 및 흡수를 저해할 수 있어 주요 인 공급원료의 효율적 이용을 위해 칼슘의 이용성도 함께 평가되기 시작했다. 그러나 현재까지 대부분의 가금 사료에서는 주 공급원료들의 저렴한 가격을 이유로 동물의 이용성을 고려하지 않은 총칼슘과 비피틴태인을 기준으로 설계되고 있다. 최근, 정밀 사료 배합비 작성을 위해 육계에서의 원료사료별 이용가능한 칼슘 및 인 함량을 정량화할 수 있는 방법으로 소화율 측정을 사용하기 시작했다. 소화가능한 칼슘 및 인은 유효칼슘 및 인을 측정하는 기준으로 제안되고 있다. 하지만, 이전에 수행된 연구들에서 실험 방법 차이에 따라 실험 간 칼슘 및 인 소화율에 큰 변이가 확인됐고, 이러한 변이를 줄이기 위한 표준화된 실험 방법 수립을 위한 연구가 필요해 보인다. 또한, 대체로 육계에서의 칼슘 및 인 요구량 평가

는 각 무기물이 개별적으로 평가되었으나, 보다 정밀한 요구량 평가를 위해서는 칼슘과 인을 동시에 고려한 실험 설계가 필요해 보인다. 더욱이, 현재까지 육계에서의 소화가능한 칼슘 및 인을 기준으로 한 요구량 측정 연구결과는 부족하기 때문에 효율적인 양계 생산을 위한 정밀 배합비 생산을 위해서는 현대 육계의 성장 잠재력과 다양한 원료사료에서의 소화가능한 칼슘 및 인의 수준을 동시에 고려한 요구량 측정에 대한 추가적인 연구가 지속될 필요가 있다.

REFERENCES

1. NRC. Nutrient requirements of swine. Washington, DC: The National Academies Press; 2012.
2. Pond WG, Church DC, Pond KR, Schoknecht PA. Basic animal nutrition and feeding. 5th ed. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.; 2005.
3. Aviagen. Ross broiler: nutrition specifications. Huntsville, AL: Aviagen; 2022.
4. David LS, Abdollahi MR, Bedford MR, Ravindran V. Requirement of digestible calcium at different dietary concentrations of digestible phosphorus for broiler chickens. 2. Broiler growers (d 11 to 24 post-hatch). *Poult Sci.* 2022;101:102135. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102135>
5. Lamp AE, Mereu A, Ruiz-Ascacibar I, Moritz JS. Inorganic feed phosphate type determines mineral digestibility, broiler performance, and bone mineralization. *J Appl Poult Res.* 2020;29:559-72. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2020.03.003>
6. Dilelis F, de Freitas LW, Quaresma DV, Machado NJB, Reis TL, Souza CS, et al. Standardized ileal phosphorus digestibility of meat and bone meal and poultry byproduct meal for broilers. *Rev Bras Zootec.* 2021;50:e20200086. <https://doi.org/10.37496/rbz5020200086>
7. Ingelmann CJ, Witzig M, Möhring J, Schollenberger M, Kühn I, Rodehutsord M. Phytate degradation and phosphorus digestibility in broilers and turkeys fed different corn sources with or without added phytase. *Poult Sci.* 2019;98:912-22. <https://doi.org/10.3382/ps/pey438>
8. WPSA. Determination of phosphorus availability in poultry: working group no 2: nutrition of the European Federation of Branches of WPSA. *World's Poult Sci J.* 2013;69:687-98. <https://doi.org/10.1017/S0043933913000688>
9. Babatunde OO, Osho SO, Park CS, Adeola O. Additivity of apparent and standardized ileal digestibility of phosphorus in mixed diets containing corn and soybean meal fed to broiler chickens. *Poult Sci.* 2020;99:6907-13. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.09.022>
10. Misiura MM, Filipe JAN, Walk CL, Kyriazakis I. Do not neglect calcium: a systematic review and meta-analysis (meta-regression) of its digestibility and utilisation in growing and finishing pigs. *Br J Nutr.* 2018;119:1207-19. <https://doi.org/10.1017/S0007114518000612>
11. Proszkowiec-Weglarz M, Angel R. Calcium and phosphorus metabolism in broilers: effect of homeostatic mechanism on calcium and phosphorus digestibility. *J Appl Poult Res.* 2013;22:609-27. <https://doi.org/10.3382/japr.2012-00743>
12. Selle PH, Ravindran V. Microbial phytase in poultry nutrition. *Anim Feed Sci Technol.* 2007;135:1-41. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.010>
13. Li X, Zhang D, Yang TY, Bryden WL. Phosphorus bioavailability: a key aspect for conserving this critical animal feed resource with reference to broiler nutrition. *Agriculture.* 2016;6:25. <https://doi.org/10.3390/agriculture6020025>
14. Haetinger VS, Adeola O. Comparison of different protein sources on the phosphorus digestibility of soybean meal for broiler chickens determined using the regression method. *Poult Sci.* 2024;103:103327. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.103327>

15. Anwar MN, Ravindran V, Morel PCH, Ravindran G, Cowieson AJ. Measurement of the true ileal calcium digestibility of some feed ingredients for broiler chickens. *Anim Feed Sci Technol.* 2018;237:118-28. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.01.010>
16. David LS, Abdollahi MR, Bedford MR, Ravindran V. Requirement of digestible calcium at different dietary concentrations of digestible phosphorus for broiler chickens. 1. Broiler starters (d 1 to 10 post-hatch). *Poult Sci.* 2021;100:101439. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101439>
17. Bai S, Yang Y, Ma X, Liao X, Wang R, Zhang L, et al. Dietary calcium requirements of broilers fed a conventional corn-soybean meal diet from 1 to 21 days of age. *J Anim Sci Biotechnol.* 2022;13:11. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00652-5>
18. Xue PC, Ajuwon KM, Adeola O. Phosphorus and nitrogen utilization responses of broiler chickens to dietary crude protein and phosphorus levels. *Poult Sci.* 2016;95:2615-23. <https://doi.org/10.3382/ps/pew156>
19. Walk CL, Romero LF, Cowieson AJ. Towards a digestible calcium system for broiler chicken nutrition: a review and recommendations for the future. *Anim Feed Sci Technol.* 2021;276:114930. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114930>
20. Broch J, dos Santos EC, Damasceno JL, de O Nesello P, de Souza C, Eyng C, et al. Phytase and phytate interactions on broilers' diet at 21 days of age. *J Appl Poult Res.* 2020;29:240-50. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2019.10.010>
21. Adedokun SA, Adeola O. Calcium and phosphorus digestibility: metabolic limits. *J Appl Poult Res.* 2013;22:600-8. <https://doi.org/10.3382/japr.2013-00740>
22. Humer E, Schwarz C, Schedle K. Phytate in pig and poultry nutrition. *J Anim Physiol Anim Nutr.* 2015;99:605-25. <https://doi.org/10.1111/jpn.12258>
23. Akter MM, Graham H, Iji PA. Influence of different levels of calcium, non-phytate phosphorus and phytase on apparent metabolizable energy, nutrient utilization, plasma mineral concentration and digestive enzyme activities of broiler chickens. *J Appl Anim Res.* 2018;46:278-86. <https://doi.org/10.1080/09712119.2017.1295972>
24. González-Vega JC, Walk CL, Liu Y, Stein HH. Endogenous intestinal losses of calcium and true total tract digestibility of calcium in canola meal fed to growing pigs. *J Anim Sci.* 2013;91:4807-16. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6410>
25. Sommerfeld V, Omotoso AO, Oster M, Reyer H, Camarinha-Silva A, Hasselmann M, et al. Phytate degradation, transcellular mineral transporters, and mineral utilization by two strains of laying hens as affected by dietary phosphorus and calcium. *Animals.* 2020;10:1736. <https://doi.org/10.3390/ani10101736>
26. Han JC, Wang XN, Wu LH, Lv XL, He L, Qu HX, et al. Dietary calcium levels regulate calcium transporter gene expression levels in the small intestine of broiler chickens. *Br Poult Sci.* 2022;63:202-10. <https://doi.org/10.1080/00071668.2021.1949697>
27. Lim CI, Ryu KS. Interactive effect of dietary levels of calcium and 25-hydroxy vitamin D3 on the performance, serum biochemical concentration and digestibility of laying hens from 61 to 70 weeks of age. *Anim Biosci.* 2022;35:1426-33. <https://doi.org/10.5713/ab.22.0003>
28. Chiba LI. Sustainable swine nutrition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2012.
29. Gautier AE, Walk CL, Dilger RN. Influence of dietary calcium concentrations and the calcium-to-non-phytate phosphorus ratio on growth performance, bone characteristics, and digestibility in broilers. *Poult Sci.* 2017;96:2795-803. <https://doi.org/10.3382/ps/pex096>
30. Abdollahi MR, Duangnumsaeng Y, Kwakkel RP, Steinfeldt S, Bootwalla SM, Ravindran V. Investigation of the interaction between separate calcium feeding and phytase supplementation on growth performance, calcium intake, nutrient digestibility and energy utilisation in broiler

- starters. *Anim Feed Sci Technol.* 2016;219:48-58. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.05.017>
31. Kiani A, Taheri HR. Effect of constant 2:1 calcium to non-phytate phosphorus ratio over a range of concentrations during starter-grower and finisher phases on performance of broiler chicken. *Anim Feed Sci Technol.* 2020;264:114473. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114473>
 32. Veum TL. Phosphorus and calcium nutrition and metabolism. In: Vitti DMSS, Kebreab E, editors. *Phosphorus and calcium utilization and requirements in farm animals.* 1st ed. Cambridge, MA: CABI Publisher; 2010.
 33. Anwar MN, Ravindran V, Morel PCH, Ravindran G, Cowieson AJ. Effect of limestone particle size and calcium to non-phytate phosphorus ratio on true ileal calcium digestibility of limestone for broiler chickens. *Br Poult Sci.* 2016;57:707-13. <https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1196341>
 34. Coon CN, Seo S, Manangi MK. The determination of retainable phosphorus, relative biological availability, and relative biological value of phosphorus sources for broilers. *Poult Sci.* 2007;86:857-68. <https://doi.org/10.1093/ps/86.5.857>
 35. David LS, Naveed Anwar M, Reza Abdollahi M, Bedford MR, Ravindran V. Calcium nutrition of broilers: current perspectives and challenges. *Animals.* 2023;13:1590. <https://doi.org/10.3390/ani13101590>
 36. Mutucumarana RK, Ravindran V, Ravindran G, Cowieson AJ. Measurement of true ileal digestibility and total tract retention of phosphorus in corn and canola meal for broiler chickens. *Poult Sci.* 2014;93:412-9. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03419>
 37. Shastak Y, Witzig M, Hartung K, Rodehutschord M. Comparison of retention and prececal digestibility measurements in evaluating mineral phosphorus sources in broilers. *Poult Sci.* 2012;91:2201-9. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-02063>
 38. An SH, Sung JY, Kong C. Ileal digestibility and total tract retention of phosphorus in inorganic phosphates fed to broiler chickens using the direct method. *Animals.* 2020;10:2167. <https://doi.org/10.3390/ani10112167>
 39. Dilelis F, Freitas LW, Quaresma DV, Reis TL, Souza CS, Lima CAR. Determination of true ileal digestibility of phosphorus of fish meal in broiler diets. *Anim Feed Sci Technol.* 2021;272:114742. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114742>
 40. Fan MZ, Sauer WC. Determination of apparent ileal amino acid digestibility in peas for pigs with the direct, difference and regression methods. *Livest Prod Sci.* 1995;44:61-72. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(95\)00057-R](https://doi.org/10.1016/0301-6226(95)00057-R)
 41. Bradbury EJ, Wilkinson SJ, Cronin GM, Thomson PC, Bedford MR, Cowieson AJ. Nutritional geometry of calcium and phosphorus nutrition in broiler chicks. Growth performance, skeletal health and intake arrays. *animal.* 2014;8:1071-9. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001037>
 42. Liu JB, Chen DW, Adeola O. Phosphorus digestibility response of broiler chickens to dietary calcium-to-phosphorus ratios. *Poult Sci.* 2013;92:1572-8. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02758>
 43. Wilkinson SJ, Bradbury EJ, Thomson PC, Bedford MR, Cowieson AJ. Nutritional geometry of calcium and phosphorus nutrition in broiler chicks. The effect of different dietary calcium and phosphorus concentrations and ratios on nutrient digestibility. *Animal.* 2014;8:1080-8. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001049>
 44. Mutucumarana RK, Ravindran V, Ravindran G, Cowieson AJ. Influence of dietary calcium concentration on the digestion of nutrients along the intestinal tract of broiler chickens. *J*

- Poult Sci. 2014;51:392-401. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0140022>
45. Rodehutsord M, Adeola O, Angel R, Bikker P, Delezie E, Dozier WA 3rd, et al. Results of an international phosphorus digestibility ring test with broiler chickens. *Poult Sci.* 2017;96:1679-87. <https://doi.org/10.3382/ps/pew426>
 46. David LS, Abdollahi MR, Bedford MR, Ravindran V. Effect of age and dietary crude protein content on the apparent ileal calcium digestibility of limestone in broiler chickens. *Anim Feed Sci Technol.* 2020;263:114468. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114468>
 47. Perryman KR, Cattley RC, Masey O'Neill HV, Bedford MR, Dozier WA 3rd. Interactive effects of dietary adaptation period length and titration diet type on apparent ileal phosphorus digestibility and phosphorus retention in growing broilers. *Poult Sci.* 2016;95:2332-41. <https://doi.org/10.3382/ps/pew117>
 48. NRC. Nutrient requirements of poultry. 9th ed. Washington, DC: National Academies Press; 1994.
 49. David LS, Abdollahi MR, Bedford MR, Ravindran V. Requirement of digestible calcium at different dietary concentrations of digestible phosphorus for broiler chickens. 1. Broiler starters (d 1 to 10 post-hatch). *Poult Sci.* 2021;100:101439. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101439>
 50. David LS, Abdollahi MR, Bedford MR, Ravindran V. Requirement of digestible calcium at different dietary concentrations of digestible phosphorus for broiler chickens 3. Broiler finishers (d 25 to 35 post-hatch). *Poult Sci.* 2023;102:102492. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102492>
 51. Walk CL, Wang Z, Wang S, Wu J, Sorbara JOB, Zhang J. Determination of the standardized ileal digestible calcium requirement of male Arbor Acres Plus broilers from hatch to day 10 post-hatch. *Poult Sci.* 2021;100:101364. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101364>
 52. Walk CL, Wang Z, Wang S, Sorbara JOB, Zhang J. Determination of the standardized ileal digestible calcium requirement of male Arbor Acres Plus broilers from day 11 to 24 post-hatch. *Poult Sci.* 2022;101:101836. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101836>
 53. Walk CL, Wang Z, Wang S, Sorbara JOB, Zhang J. Determination of the standardized ileal digestible calcium requirement of male Arbor Acres Plus broilers from day 25 to 42 post-hatch. *Poult Sci.* 2022;101:102146. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102146>
 54. Faridi A, Gitoee A, France J. A meta-analysis of the effects of nonphytate phosphorus on broiler performance and tibia ash concentration. *Poult Sci.* 2015;94:2753-62. <https://doi.org/10.3382/ps/pev280>
 55. Wu J, Ma X, Liao X, Song C, Li S, Zhang L, et al. Dietary calcium and nonphosphate phosphorus interaction influences tibiotarsus development and related gene expression of broilers from 1 to 21 days of age. *Poult Sci.* 2023;102:102851. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102851>
 56. Liu SB, Liao XD, Lu L, Li SF, Wang L, Zhang LY, et al. Dietary non-phytate phosphorus requirement of broilers fed a conventional corn-soybean meal diet from 1 to 21 d of age. *Poult Sci.* 2017;96:151-9. <https://doi.org/10.3382/ps/pew212>
 57. Fallah H, Karimi A, Sadeghi A, Behroozi-Khazaei N. Modelling and optimizing of calcium and non-phytate phosphorus requirements of male broiler chickens from 1 to 21 days of age using response surface methodology. *Animal.* 2020;14:1598-609. <https://doi.org/10.1017/S1751731120000452>
 58. David LS, Abdollahi MR, Ravindran G, Walk CL, Ravindran V. Studies on the measurement of ileal calcium digestibility of calcium sources in broiler chickens. *Poult Sci.* 2019;98:5582-9. <https://doi.org/10.3382/ps/pez314>
 59. Zhang F, Adeola O. True ileal digestibility of calcium in limestone and dicalcium phosphate

- are additive in diets of broiler chickens. *Poult Sci.* 2018;97:4290-6. <https://doi.org/10.3382/ps/pey300>
60. David LS, Abdollahi MR, Bedford MR, Ravindran V. Comparison of the apparent ileal calcium digestibility of limestone in broilers and layers. *Br Poult Sci.* 2021;62:852-7. <https://doi.org/10.1080/00071668.2021.1943313>
 61. Anwar MN, Ravindran V, Morel PCH, Ravindran G, Cowieson AJ. Apparent ileal digestibility of calcium in limestone for broiler chickens. *Anim Feed Sci Technol.* 2016;213:142-7. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.01.014>
 62. Anwar MN, Ravindran V, Morel PCH, Ravindran G, Cowieson AJ. Effect of calcium source and particle size on the true ileal digestibility and total tract retention of calcium in broiler chickens. *Anim Feed Sci Technol.* 2017;224:39-45. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.12.002>
 63. Bikker P, Spek JW, Van Emous RA, Van Krimpen MM. Precaecal phosphorus digestibility of inorganic phosphate sources in male broilers. *Br Poult Sci.* 2016;57:810-7. <https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1222604>
 64. Trairatapiwan T, Ruangpanit Y, Songserm O, Attamangkune S. True ileal phosphorus digestibility of monocalcium phosphate, monodicalcium phosphate and dicalcium phosphate for broiler chickens. *Anim Feed Sci Technol.* 2018;241:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.04.005>
 65. Costa GL, Dilelis F, Vasconcellos TFD, Reis TL, Souza CS, Lima CAR. True ileal digestibility of phosphorus from dicalcium phosphate in diets for broilers. *Anim Feed Sci Technol.* 2023;298:115601. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115601>