



사료 내 단백질 및 Phytase가 육계 초생추의 생산성 및 분변 내 질소, 인 함량에 미치는 영향

이우도¹ · 손지선² · 김현수² · 김희진¹ · 윤연서³ · 강환구² · 박원철⁴ · 채한화⁴ · 홍의철^{2*}

¹국립축산과학원 가금연구소 박사후 연구원, ²국립축산과학원 가금연구소 농업연구사,
³국립축산과학원 가금연구소 연구원, ⁴국립축산과학원 동물유전체과 농업연구사

Effects of Crude Protein and Phytase in the Diet on Growth Performance and Excretion Contents of Nitrogen and Phosphorus in Broiler Chicks

Woo-Do Lee¹, Jiseon Son², Hyun-Soo Kim², Hee-Jin Kim¹, Yeon-Seo Yun³,
 Hwan Ku Kang², Woncheoul Park⁴, Han Ha Chai⁴ and Eui-Chul Hong^{2*}

¹Post-Master Researcher, Poultry Research Institute, National Institute of Animal Science, Pyeongchang 25342, Republic of Korea

²Researcher, Poultry Research Institute, National Institute of Animal Science, Pyeongchang 25342, Republic of Korea

³Field Researcher, Poultry Research Institute, National Institute of Animal Science, Pyeongchang 25342, Republic of Korea

⁴Researcher, Animal Genomics and Bioinformatics Division, National Institute of Animal Science, Wanju 55365, Republic of Korea

ABSTRACT This study was conducted to investigate the appropriate levels of crude protein (CP) and phytase in the diet of broiler chicks in order to reduce nitrogen and phosphorus contents in feces while maintaining performance of broilers. Six hundred forty-eight 1-day-old male broilers (41.9±0.91 g) had a total of 3 × 3 complex factor of 3 levels of CP (22%, 21%, 20%) and 3 levels of phytase (1,000, 800, 500 FTU/kg) in the diet. Divided into 9 treatments, 4 replications per treatment, 18 birds per replication, were completely randomly assigned and reared in a metabolic cage for 7 days. Seven-day-old body weight (BW) and body weight gain (BWG) of broilers were significantly lower at CP 20% treatment ($P<0.05$), and feed conversion ratio (FCR) was significantly lower at CP 21% and phytase 800 FTU/kg treatment ($P<0.05$). Nitrogen and phosphorus contents in chicken excreta were significantly lower in CP 20% and phytase 500 FTU/kg treatment, respectively ($P<0.05$). Interactions between CP and phytase in the feed were shown for nitrogen and phosphorus in feces ($P<0.05$). In conclusion, considering the broiler performance and excretion contents of nitrogen and phosphorus, it is thought that CP and phytase levels of broiler chicks diet can be reduced by 21% and 800 FTU/kg, respectively.

(Key words: broiler, crude protein, phytase, nitrogen, phosphorus)

서 론

양계 산업이 집약화되면서 발생하는 축산 폐기물은 전 세계적으로 많은 환경 문제를 야기시켰다(Powell et al., 2008). 특히, 계분은 축산 폐기물의 상당 부분을 차지하고 있으며, 이로 인한 피해도 적지 않다.

계분은 질소(N, 3~5%), 인(P, 0.9~3.5%) 및 칼륨(K, 1.5~3%) 등의 함량이 높아 비료로서 사용되지만(Jędrzak et al., 2014), 계분 내 성분들은 작물이 필요한 양을 초과하므로, 과잉 성분은 지하수를 오염시키게 된다. 이러한 과잉 요소는 토양

을 통해 침출될 수 있으며, 지하수를 오염시키게 된다.

보통 사료 내 단백질을 통해 질소가 공급되며, 과잉 섭취된 질소는 간으로 전달되어 배설을 위해 요산으로 전환된다(Malomo et al., 2018). 육계의 분변 내 질소는 요산(약 50%) (Silva et al., 2006)과 소화되지 않은 단백질로 배설되며, 육계 분변에 있는 요산을 미생물이 분해하는 과정에서 NH₃가 형성된다. 한편, 분변에서 발생되어 지표수에 유입되는 인은 조류 및 기타 수생 식물을 성장시킴으로써(Sharpley and Smith, 1994), 용존 산소를 식물에 유리한 수준으로 감소시킨다(Nahm, 2007). 특정 남조류의 과증식은 인간과 동물의

* To whom correspondence should be addressed : drhong@korea.kr

건강에 잠재적인 위험이 될 수 있는 독소를 생성한다.

가금 산업에서 질소의 배설량을 낮추는 효과적인 방법은 사료 내 조단백질(crude protein: CP) 혹은 아미노산 수준을 낮추는 것이다(Bregendahl et al., 2002; Hernandez et al., 2012; Lemme et al., 2019; Attia et al., 2021). 그러나, 저단백질 사료를 사용하면 증체량 및 사료요구율이 저하되고, 지방 축적이 증가한다(Attia et al., 2001; Hofmann et al., 2019; Hilliar et al., 2020; Hofmann et al., 2020). 이를 위한 해결책으로 저단백질 사료에 필수 아미노산을 첨가하지만(Macelline et al., 2020), 저단백질 사료에 필수 아미노산의 첨가는 전분-단백질 비율을 증가시켜 육계의 전분-단백질 소화 역학에 영향을 미친다(Liu and Selle, 2017; Selle and Liu, 2019; Liu et al., 2021). Attia et al.(2021)은 이런 문제들은 phytase와 같은 효소제를 보충하는 것으로 해결할 수 있다고 하였다. 또한, phytase를 보충하면 육계의 아미노산 소화율을 1~6% 증가시킬 수 있다(Sommerfeld et al., 2018; Siegert et al., 2019; Krieger et al., 2020).

식물에 있는 인의 약 60~80%는 phytate의 형태로 저장되어 있으며, 옥수수-대두박 사료에는 일반적으로 사료 1 kg당 8.0~9.0 g의 phytate(InsP₆)을 포함하고 있다(Cabahug et al., 1999). 가금 사료에 phytase를 첨가하여 사료의 phytate를 분해함으로써 인의 소화율을 높일 수 있으며(Wu et al., 2003; Selle and Ravindran, 2007; Adeola and Cowieson, 2011), 결과적으로 분변 내 인의 함량이 감소하게 된다. 또한, 저단백질 사료에 합성 아미노산 및 phytase의 첨가로 생산성이 개선된다(Selle et al., 2007; Walk and Rao, 2019; Wang et al., 2021). 본 연구는 육계 초생추의 생산성을 유지하면서 분내 질소와 인 함량을 감소시키기 위한 사료 내 CP 및 phytase의 수준을 구명하고자 수행되었다.

재료 및 방법

본 시험은 농촌진흥청 국립축산과학원의 동물실험 계획서에 의거 동물보호법 및 국립축산과학원의 동물시험윤리위원회에서 승인된 동물실험방법(승인번호: 2022-548)에 따라 수행되었다.

1. Phytase

본 시험에 사용된 phytase는 미생물 유래 phytase로서 1,000 phytase 단위(FTU/kg)의 phytase 활성을 함유하고 있다.

2. 공시동물 및 시험설계

본 시험에 사용된 공시동물은 1일령 육계(Ross 308, 41.9±0.91 g) 수컷 648수를 가금연구소 육계 평사에서 7일

동안 사육하였다. 시험설계는 육계 초기 단백질 수준을 기준으로 하여 사료 내 CP 3수준(22%, 21%, 20%)과 phytase 3수준(1,000, 800, 500 FTU/kg)의 3 × 3 복합요인으로 총 9처리구, 처리당 4반복, 반복당 18수씩을 완전임의 배치하였다. Phytase 수준은 현재 사료 회사에서 사용하는 최고 및 최저수준, 그리고 중간 수준으로 결정하였다. 본 시험에 사용된 시험 사료는 KPFS(2017)를 기준으로 자체 제작한 옥수수-대두박 위주의 가루사료로서 배합비와 성분은 Table 1에 나타내었다.

3. 사양관리

육계는 12월 3단 케이지에서 칸당(75 cm × 60 cm × 40 cm) 18수씩 총 648수를 사육하였다. 사료는 자유로이 섭취하도록 하였으며, 물은 니플을 통하여 자유롭게 음수토록 하였다. 계사 내 습도는 60~70%를 유지시켰으며, 온도는 32~34℃를 유지하였다. 점등 관리는 조도 30 lx 이상, 점등 시간은 23L:1D(23시간 명기, 1시간 암기)로 설정하였다. 기타 사양관리는 가금연구소 사양 관행에 따라 수행되었다.

4. 시료채취

질소와 인을 분석하기 위한 분뇨는 7일령에 200 g을 수집하여 70℃ dry oven에서 48시간 동안 건조시킨 후, 건조된 분 50 g을 일반 성분과 아미노산 분석에 이용하였다.

5. 조사항목

1) 체중, 증체량, 사료섭취량 및 사료요구율

시험 개시(생시) 체중과 종료(7일령) 체중을 측정하였으며, 종료 체중에서 개시 체중을 제한 값으로 증체량을 나타내었다. 사료섭취량은 7일령에 사료 잔량을 조사하고 급여량에서 제한 값으로 나타내었으며, 사료요구율은 사료섭취량에서 증체량을 나누어 산출하였다.

2) 사료와 분내 질소 및 인의 함량

사료의 일반성분(수분, 지방, 단백질, 회분)은 AOAC 방법(2019)에 따라 분석되었으며, 사료와 분내 질소 및 인의 함량은 ICP 방출 분광 분석기(ICP-OES Spectrometer, Optima 8300, PerkinElmer Inc., USA)를 이용하여 분석되었다.

3) 통계처리

본 시험에서 얻어진 모든 결과들은 SAS(2019)의 GLM Program(two-way ANOVA procedure)을 이용하여 분석되었으며, 각 처리구 간의 평균값은 Duncan의 다중 검정을 이용하여 각 처리구 간의 평균값을 95% 신뢰수준에서 검정되었다.

Table 1. Ingredient composition and nutrient content of the experimental diets

Ingredients (%)	Phytase (ppm)	1,000			800			500		
	CP (%)	22	21	20	22	21	20	22	21	20
Corn		38.75	40.64	42.64	38.81	40.70	42.70	38.80	40.63	42.68
Wheat		5.60	5.60	5.60	5.60	5.60	5.60	5.60	5.60	5.60
Wheat bran		12.99	13.60	14.23	12.99	13.60	14.23	12.99	13.67	14.23
Soybean meal		27.05	25.07	22.90	27.05	25.07	22.90	27.05	25.07	22.90
Corn gluten meal		6.15	5.47	4.97	6.15	5.47	4.97	6.15	5.47	4.97
Soybean oil		5.13	5.17	5.12	5.13	5.17	5.12	5.13	5.16	5.12
Limestone		1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.16
Dicalcium phosphate		1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70
Lysine		0.42	0.47	0.52	0.42	0.47	0.52	0.42	0.47	0.52
Methionine		0.23	0.25	0.25	0.23	0.25	0.25	0.23	0.25	0.25
Vit.-Min. Premix ¹		0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Salt		0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Threonine		0.18	0.23	0.27	0.18	0.23	0.27	0.18	0.23	0.27
Phytase (ppm)		1,000	1,000	1,000	800	800	800	500	500	500
Calculated analysis										
ME (kcal/kg)		3,026	3,027	3,026	3,026	3,027	3,026	3,026	3,027	3,027
CP (%)		22.02	21.01	20.01	22.02	21.01	20.02	22.02	21.02	20.02
Lysine (%)		1.45	1.45	1.44	1.45	1.45	1.44	1.45	1.45	1.44
Calcium (%)		0.98	0.97	0.96	0.98	0.97	0.97	0.98	0.97	0.97
Available phosphorus (%)		0.48	0.47	0.47	0.48	0.47	0.47	0.48	0.48	0.47

¹ Supplied per kilogram of diet: vitamin A, 1,600,000 IU; vitamin D₃, 300,000 IU; vitamin E, 800 IU; vitamin B₁, 97 mg; vitamin B₂, 500 mg; vitamin B₆, 200 mg; vitamin B₁₂, 1.2 mg; vitamin K₃, 132 mg; choline chloride, 35,000 mg; nicotinic acid, 2,000 mg; pantothenic acid, 800 mg; folic acid, 60 mg; manganese, 12,000 mg; zinc, 9,000 mg; iron, 4,000 mg; copper, 500 mg; iodine, 250 mg; cobalt, 100 mg; selenium, 50 mg.

결 과

1. 사료 내 CP 및 Phytase 수준에 따른 생산성

본 연구에서 사료 내 조단백질 및 phytase 수준에 따른 생산성(체중, 증체량, 사료섭취량 및 사료요구율)은 Table 2에 나타내었다. CP 수준에 따른 육계의 7일령 체중은 22%와 21% 처리구에서 각각 166.0 g과 166.2 g으로 유의차가 없었으나, 20% 처리구에서는 158.1 g으로 유의적으로 낮게 나타났다($P<0.05$). 0~7일령 사이의 증체량은 체중과 마찬가지로 22%와 21% 처리구 사이에서 유의적인 차이를 보이지 않았

으며, 20% 처리구에서는 다른 처리구에 비해 유의적으로 낮게 나타났다($P<0.05$). Phytase 첨가 수준에 따른 체중 및 증체량은 800 FTU/kg 처리구에서 가장 높은 경향을 보였으나, 처리구간 유의적인 차이를 보이지 않았다. 조단백질 및 Phytase 수준에 따른 사료섭취량은 처리구 사이에서 유의차가 나타나지 않았으며, 사료요구율은 CP 21% 및 Phytase 800 FTU/kg 처리구에서 유의적으로 낮게 나타났다($P<0.05$).

체중, 증체량, 사료요구율은 phytase와 CP의 상호작용이 나타났다.

Table 2. Body weight, body weight gain, feed intake and feed conversion ratio according to dietary crude protein and additional phytase levels

Phytase (ppm)	CP (%)	IBW (g)	FBW (g)	BWG (g)	FI (g)	FCR
1,000	22	42.1	166.1 ^{ab}	124.1 ^{abc}	139.4	1.12 ^{abc}
	21	42.0	167.2 ^{ab}	125.2 ^{ab}	133.6	1.07 ^{bc}
	20	40.8	155.9 ^c	115.1 ^{cd}	137.9	1.20 ^a
800	22	42.6	173.8 ^a	131.3 ^a	136.8	1.04 ^c
	21	42.1	164.2 ^{abc}	122.1 ^{abcd}	126.7	1.04 ^c
	20	42.2	163.7 ^{bc}	121.6 ^{abcd}	130.2	1.07 ^{bc}
500	22	41.7	157.9 ^{bc}	116.2 ^{bcd}	132.7	1.15 ^{ab}
	21	42.2	167.3 ^{ab}	125.1 ^{ab}	130.3	1.04 ^c
	20	41.9	154.8 ^c	112.9 ^d	124.0	1.10 ^{bc}
SEM ¹	-	-	6.10	5.98	9.14	0.052
Phytase (ppm)						
1,000	-	41.6	163.1	121.5	137.0	1.13 ^a
800	-	42.3	167.3	125.0	131.2	1.05 ^b
500	-	42.0	160.0	118.0	129.0	1.10 ^{ab}
SEM ²	-	-	7.61	7.32	9.05	0.063
Crude protein						
22	-	42.1	166.0 ^a	123.8 ^a	136.3	1.10 ^a
21	-	42.1	166.2 ^a	124.1 ^a	130.2	1.05 ^b
20	-	41.6	158.1 ^b	116.5 ^b	130.7	1.12 ^a
SEM ³	-	-	7.23	6.98	9.26	0.064
P-value						
Phytase	-	-	0.08	0.08	0.09	<0.05
CP	-	-	<0.05	<0.05	0.22	<0.05
Phytase × CP	-	-	<0.01	<0.01	0.29	<0.01

¹ SEM, standard error of means (n=36).

² SEM, standard error of means (n=12).

³ SEM, standard error of means (n=12).

^{a-d} Means in same rows with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

IBW, initial body weight; FBW, final body weight; BWG, body weight gain; FI, feed intake; FCR, feed conversion ratio.

2. 사료 내 조단백질 및 Phytase 수준에 따른 분 내 질소와 인의 함량

본 시험에서 사료 내 조단백질 및 phytase 수준에 따른 분 내 질소와 인의 함량은 Table 3에 나타내었다. 육계 분변 내 질소 함량은 사료 내 CP 수준을 22% 에서 20%로 감소시켰을 때 3.72%에서 3.40%로 감소하였다($P<0.05$). CP 수준에

따른 분내 인 함량은 유의적인 차이가 나타나지 않았다. Phytase 수준에 따른 분변 내 질소 함량은 phytase 수준에 따른 유의차가 없었으나, 분변 내 인 함량은 1,000 FTU/kg 처리구에 비해 500 FTU/kg 처리구에서 14.2%(1.20% vs. 1.03%) 감소하였다.

Table 3. Fecal nitrogen and phosphorus contents according to dietary crude protein and additional phytase levels

Phytase (ppm)	CP (%)	Nitrogen (%)	Phosphorus (%)
1,000	22	3.66 ^{ab}	1.18 ^a
	21	3.42 ^{cd}	1.20 ^a
	20	3.45 ^{bcd}	1.22 ^a
800	22	3.74 ^a	1.17 ^a
	21	3.57 ^{abcd}	1.17 ^a
	20	3.38 ^{cd}	1.09 ^b
500	22	3.77 ^a	0.99 ^c
	21	3.59 ^{abc}	1.00 ^c
	20	3.36 ^d	1.10 ^b
SEM ¹		0.132	0.044
Phytase (ppm)			
1,000		3.51	1.20 ^a
800		3.56	1.14 ^a
500		3.57	1.03 ^b
SEM ²		0.191	0.089
CP (%)			
	22	3.72 ^a	1.11
	21	3.52 ^b	1.12
	20	3.40 ^c	1.14
	SEM ³	0.133	0.092
<i>P</i> -value			
	Phytase	0.70	<0.01
	CP	<0.01	0.85
	Phytase × CP	<0.01	<0.01

¹ SEM, standard error of means (n=36).

² SEM, standard error of means (n=12).

³ SEM, standard error of means (n=12).

^{a-d} Means in same rows with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

고찰

가금 사료 내 CP 수준을 감소시키는 것은 사료 비용의 절감 및 질소의 배출 저감에 대한 해결책으로 사용되고 있다 (Corzo et al., 2009; Attia et al., 2021). 특히, CP를 구성하고 있는 아미노산은 NH₃의 주성분인 질소 공급원으로서 사료 내 CP 수준을 감소시키면 분 내 질소의 함량을 감소시킬 수 있다(Alfonso-Avila et al., 2022). Yang et al.(2021)은 양돈

사료 내 CP 수준이 낮아지면 분 내 총 질소 함량이 7.76% 감소된다고 하였으며, Attia et al.(2021)은 가금 사료 내 CP 수준이 낮을 때, 분변 내 질소 함량이 6.66% 감소된다고 하였다. 본 연구에서도 사료 내 CP 수준을 낮추었을 때, 분변 내 질소 함량이 낮게 나타났다.

이와 같이, CP 수준인 낮은 사료를 사용하면 육계의 분 내 질소 함량을 낮추게 되지만, 한편으로는 증체량이 감소하고, 사료요구율이 증가한다(Attia et al., 2020; Macelline et al.,

2020). 본 연구에서는 사료 내 CP 수준을 -2%까지 낮추었을 때, 증체량 감소 및 사료요구율 증가가 나타났다. 이는 초생추 시기에 병아리의 성장에 영향을 주는 단백질의 저감으로 증체가 감소되며, 이에 따라 사료요구율이 높아지기 때문이라고 사료된다.

가금 사료 내 phytase의 첨가는 닭의 인 이용성을 증가시키며(Hofmann et al., 2022), 닭의 인 이용성이 증가하면 분변 내 인의 함량도 감소하게 된다. 그러나, phytase 연구의 대부분이 7일령 이후의 육계를 대상으로 하며, 사료 내 인의 수준을 낮추어 수행한다(Walters et al., 2019). 본 연구는 0~7일령 육계 병아리를 대상으로 수행되었으며, 사료 내 인의 수준도 정상 수준이었다. 사료 내 인의 수준이 정상일 때 phytase 수준이 낮아지면, 분해되는 phytate 함량도 감소하므로 분변 내 인의 함량도 낮아지는 것이라 사료된다. 따라서, 사료 내 인의 함량을 낮추면서 phytase 급여 시에 생산성 및 분 내 인의 저감에 미치는 영향을 구명하는 연구가 추후 수행되어야 할 것이다.

Phytase는 질소나 인의 배설량을 줄이는 효과뿐만 아니라 육계의 생산성을 개선시키는 효과도 가지고 있다(Broch et al., 2018). Walters et al.(2019)은 phytase 500 FTU/kg 처리구에 비해 1,000 FTU/kg 및 750 FTU/kg 처리구에서 체중 및 증체량이 개선되었다고 하였다. 본 연구에서 체중과 증체량은 CP 수준이 감소함에 감소되었으나, 체중, 증체량 및 사료섭취량은 phytase 수준에 따른 유의차를 보이지 않았으며, 사료요구율은 CP 21%와 phytase 800 FTU/kg 처리구에서 낮게 나타났다.

본 연구에서 사료 내 단백질이나 phytase 수준의 상호작용으로 인하여 생산성과 분 내 질소 및 인의 함량에 대한 결과가 나타나고 있다. 즉, 분변 내 질소 함량을 낮추기 위해 사료 내 CP 함량을 저감시키면 생산성이 저하되지만 phytase 첨가로 생산성이 개선될 수 있다. 또한, phytase 수준이 낮아도 CP 수준이 낮지 않으면 낮은 수준으로 생산성이 유지되고 분변 내 질소 및 인의 함량이 저감될 수 있다.

결론적으로, 육계 초생추 사료 내 CP 수준은 1%까지 낮출 수 있으며, phytase 수준은 800 FTU/kg 첨가가 가능하다.

적 요

본 연구는 육계 초생추의 생산성을 유지하면서 분 내 질소와 인 함량을 감소시키기 위한 사료 내 CP 및 phytase의 수준을 구명하고자 수행되었다. 1일령 수컷 육계(41.9±0.91 g) 648수는 사료 내 조단백질 3수준(22%, 21%, 20%)과 phytase 3수준(1,000, 800, 500 FTU/kg)의 3 × 3 복합요인으로 총 9

처리구로 나누어져, 처리당 4반복, 반복당 18수씩 완전임의 배치되어 대사케이지에서 7일 동안 사육되었다. 육계 초생추의 종료 체중 및 증체량은 CP 20% 처리구에서 유의적으로 낮게 나타났으며($P<0.05$), 사료요구율은 CP 21% 및 Phytase 800 FTU/kg 처리구에서 유의적으로 낮게 나타났다($P<0.05$). 체중, 증체량 및 사료요구율은 CP와 phytase의 상호작용이 나타났다($P<0.05$). 육계 분변 내 질소 및 인 함량은 각각 CP 20%, Phytase 500 FTU/kg 처리구에서 유의적으로 낮게 나타났으며($P<0.05$), 사료 내 CP와 phytase의 상호작용이 나타났다($P<0.05$). 결론적으로, 육계의 생산성과 분내 질소 및 인 함량을 고려할 때, 육계 초기 수준을 CP 21%, phytase 800 ppm까지 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.
(색인어 : 육계, 조단백질, phytase, 질소, 인)

사 사

본 연구는 2021년 농촌진흥청 국립축산과학원의 기관고유사업(과제번호: PJ01678201)에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

ORCID

Woo-Do Lee	https://orcid.org/0000-0003-4861-4637
Jiseon Son	https://orcid.org/0000-0002-5285-8186
Hyun-Soo Kim	https://orcid.org/0000-0001-8887-1318
Hee-Jin Kim	https://orcid.org/0000-0002-6959-9790
Yeon-Seo Yun	https://orcid.org/0000-0001-6950-0415
Hwan Ku Kang	https://orcid.org/0000-0002-4286-3141
Woncheoul Park	https://orcid.org/0000-0003-3140-5628
Han Ha Chai	https://orcid.org/0000-0001-7752-3967
Eui-Chul Hong	https://orcid.org/0000-0003-1982-2023

REFERENCES

- Adeola O, Cowieson AJ 2011 Board-invited review: opportunities and challenges in using exogenous enzymes to improve nonruminant animal production. *J Anim Sci* 89(10):3189-3218.
- Alfonso-Avila AR, Cirot O, Lambert W, Létourneau-Montminy MP 2022 Effect of low-protein corn and soybean meal-based diets on nitrogen utilization, litter quality, and water consumption in broiler chicken production:

- insight from meta-analysis. *Animal* 16(3):100458.
- AOAC. 2016. Official Method of Analysis. 20th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.
- Attia YA, Abd El-Rahman SA, Qota EMA 2001 Effects of microbial phytase with or without cell-wall splitting enzymes on the performance of broilers fed suboptimum levels of dietary protein and metabolizable energy. *Egypt Poult Sci J* 21:521-547.
- Attia YA, Bovera F, Al-Harathi MA, El-Din AEET, Selim W 2021 Supplementation of microbial and fungal phytases to low protein and energy diets: effects on productive performance, nutrient digestibility, and blood profiles of broilers. *Agriculture* 11(414):1-12.
- Attia YA, Bovera F, Al-Harathi MA, Wang J, Kim WK 2020 Multiple amino acid supplementations to low dietary protein diets: effect on performance, carcass yield, meat quality and nitrogen excretion of finishing broilers under hot climate conditions. *Animals* 10(6):973.
- Bregendahl K, Selle JL, Zimmerman DR 2002 Effect of low-protein diets on growth performance and body composition of broiler chicks. *Poult Sci* 81(8):1156-1167.
- Cabahug S, Ravindran V, Selle PH, Bryden 1999 Response of broiler chickens to microbial phytase supplementation as influenced by dietary phytic acid and non-phytate phosphorus contents. I. Effects on bird performance and toe ash. *Br Poult Sci* 40:660-666.
- Corzo A, Kidd MT, Dozier III WA, Kerr BJ 2009 Dietary glycine and threonine interactive effects in broilers. *J Appl Poult Res* 18(1):79-84.
- Hernandez F, Lopez M, Martinez S, Megias MD, Catala P, Madrid J 2012 Effect of low-protein diets and single sex on production performance, plasma metabolites, digestibility, and nitrogen excretion in 1- to 48-day-old broilers. *Poult Sci* 91(3):683-692.
- Hilliari M, Hargreave G, Girish CK, Barekatin R, Wu SB, Swick RA 2020 Using crystalline amino acids to supplement broiler chicken requirements in reduced protein diets. *Poult Sci* 99(3):1551-1563.
- Hofmann P, Krieg J, Francesch M, Feuerstein D, Rodehutschord M 2022 Effects of added phytase on growth performance, carcass traits, and tibia ash of broiler chickens fed diets with reduced amino acid, crude protein, and phosphorus concentration. *J Appl Poult Res* 31(3):100258.
- Hofmann P, Siegert W, Naranjo VD, Rodehutschord M 2019 Effects of supplemented nonessential amino acids and nonprotein nitrogen on growth and nitrogen excretion characteristics of broiler chickens fed diets with very low crude protein concentrations. *Poult Sci* 99(12):6848-6858.
- Jędrzak A, Królik D, Sadecka Z, Myszograj S, Suchowska-Kisielewicz M, Bojarski J 2014 Testing of co-fermentation of poultry manure and corn silage. *Civ Environ Eng Rep* 13(2):31-47.
- KPFS 2017 Korea Poultry Feeding Standard. National Institute of Animal Science.
- Krieg J, Siegert W, Berghaus D, Bock J, Feuerstein D, Rodehutschord M 2020 Phytase supplementation effects on amino acid digestibility depend on the protein source in the diet but are not related to InsP6 degradation in broiler chickens. *Poult Sci* 99(6):3251-3265.
- Lemme A, Hiller P, Klahsen M, Taube V, Stegemann J, Simon I 2019 Reduction of dietary protein in broiler diets not only reduces n-emissions but is also accompanied by several further benefits. *J Appl Poult Res* 28(4):867-880.
- Liu SY, Selle PH 2017 Starch and protein digestive dynamics in low-protein diets supplemented with crystalline amino acids. *Anim Prod Sci* 57(11):2250-2256.
- Macelline SP, Wickramasuriya SS, Cho HM, Kim E, Shin TK, Hong JS, Kim JC, Pluske JR, Choi HJ, Hong YG, Heo JM 2020 Broilers fed a low protein diet supplemented with synthetic amino acids maintained growth performance and retained intestinal integrity while reducing nitrogen excretion when raised under poor sanitary conditions. *Poult Sci* 99(2):949-958.
- Malomo GA, Bolu SA, Madugu AS, Usman ZS 2018 Nitrogen emissions and mitigation strategies in chicken production. Pages 43-61 In: *Animal Husbandry and Nutrition*. B. Yücel, and T. Ta Kin, editors, Intech Open.
- Nahm KH 2007 Feed formulations to reduce N excretion and ammonia emission from poultry manure. *Bioresour Technol* 98(12):2282-2300.
- Powell S, Johnston S, Gaston L, Southern LL 2008 The effect of dietary phosphorus level and phytase supplementation on growth performance, bone-breaking strength, and litter phosphorus concentration in broilers. *Poult Sci*

- 87(5):949-957.
- SAS 2019 SAS/STAT Software for PC. Release 9.4. SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Selle PH, Liu SY 2019 The relevance of starch and protein digestive dynamics in poultry. *J Appl Poultry Res* 28(3): 531-545.
- Selle PH, Ravindran V 2007 Microbial phytase in poultry nutrition. *Anim Feed Sci Technol* 135(1-2):1-41.
- Selle PH, Ravindran V, Ravindran G, Bryden WL 2007 Effects of dietary lysine and microbial phytase on growth performance and nutrient utilization of broiler chickens. *Asian-Australas J Anim Sci* 20(7):1100-1107.
- Sharpley AN, Smith SJ 1994 Wheat tillage and water quality in the Southern Plains. *Soil Tillage Res* 30(1):33-48.
- Siegert W, Zuber T, Sommerfeld V, Krieg J, Feuerstein D, Kurrle U, Rodehutsord M 2019 Prececal amino acid digestibility and phytate degradation in broiler chickens when using different oilseed meals, phytase and protease supplements in the feed. *Poult Sci* 98(11):5700-5713.
- Silva YL, Rodrigues PB, Freitas RTF, Bertechini AG, Fialho ET, Fassani EJ, Pereira CR 2006 Decreasing dietary levels of protein and phosphorus supplemented with phytase for broilers from 1 to 21 old: performance and mineral levels in the litter. *Revista Brasileira de Zootecnia* 35(3):840-848.
- Sommerfeld V, Künzel S, Schollenberger M, Kühn I, Rodehutsord M 2018 Influence of phytase myo-inositol supplements on performance and phytate degradation products in the crop, ileum, and blood of broiler chickens. *Poult Sci* 97(3):920-929.
- Walk CL, Rao SVR 2019 High doses of phytase on growth performance and apparent ileal amino acid digestibility of broilers fed diets with graded concentrations of digestible lysine. *J Anim Sci* 97(2):698-713.
- Walters HG, Coelho M, Coufal CD, Lee JT 2019 Effects of increasing phytase inclusion levels on broiler performance, nutrient digestibility, and bone mineralization in low-phosphorus diets. *J Appl Poult Res* 28(4):1210-1225.
- Wang J, Patterson R, Kim WK 2021 Effects of phytase and multicarbohydase on growth performance, bone mineralization, and nutrient digestibility in broilers fed a nutritionally reduced diet. *J Appl Poult Res* 30(2):100146.
- Wu YB, Ravindran V, Hendriks WH 2003 Effects of microbial phytase, produced by solid-state fermentation, on the performance and nutrient utilization of broilers fed maize- and wheat-based diets. *Br Poult Sci* 44(5):710-718.
- Yang Z, Deng H, He T, Sun Z, Gifty ZB, Hu P, Rao Z 2021 Effects of dietary protein levels on fecal amino acids excretion and apparent digestibility, and fecal and ileal microbial amino acids composition in weaned piglets. *Front Nutr* 16(8):738707.

Received Apr. 15, 2023, Revised May. 24, 2023, Accepted May. 27, 2023