

정밀영양분석을 활용한 원료사료 가치평가

구성민¹ · 이에스더¹ · 이재혁¹ · 조세나² · 장재철^{3*}¹경상국립대학교 축산과학부, ²경상국립대학교 동물생명융합학부
³경상국립대학교 농업생명과학연구원

Assessment of feed ingredient value using precision nutrient analysis

Seong-Min Koo¹, Esther Lee¹, Jae-Hyeok Lee¹, Sena Jo²,
Jae-Cheol Jang^{3*}¹Department of Animal Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea²Division of Animal Bioscience and Integrated Biotechnology, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea³Division of Animal Science, and Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, KoreaReceived: Apr 1, 2024
Revised: Apr 20, 2024
Accepted: Apr 22, 2024

*Corresponding author

Jae-Cheol Jang
Division of Animal Science, and
Institute of Agriculture & Life Science,
Gyeongsang National University,
Jinju 52828, Korea
Tel: +82-55-772-3282
E-mail: jaejang1278@gnu.ac.krCopyright © 2024 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

Seong-Min Koo
<https://orcid.org/0009-0009-6168-0971>
Esther Lee
<https://orcid.org/0009-0009-3883-5736>
Jae-Hyeok Lee
<https://orcid.org/0009-0006-4865-104X>
Sena Jo
<https://orcid.org/0009-0001-0143-3110>
Jae-Cheol Jang
<https://orcid.org/0000-0001-9843-3186>

Abstract

The climate crisis significantly impacts the livestock industry, prompting the pursuit of cross-governmental carbon-neutral policies. In response, the livestock sector aims for sustainable pig farming through detailed implementation strategies based on four criteria: specification management, livestock manure management, facility management, and energy-saving technologies. These strategies include the adoption of low-protein feed, low-methane feed, productivity enhancement, and self-mixed feed distribution. Low-protein feed plays a crucial role in improving production efficiency and reducing environmental pollutant emissions, making it the most realistic and effective method for achieving carbon neutrality. Additionally, establishing a database for alternative ingredients to replace the most commonly used corn-soybean meal in pig feed can stabilize feed prices, while exploring options to utilize local food by-products for feed production should also be considered. However, the effectiveness of the aforementioned carbon reduction strategies fundamentally relies on the application of precision nutrition specifications. Ultimately, it is anticipated that the implementation of carbon reduction specifications based on precision nutrition will enhance feed efficiency and reduce environmental pollution in livestock farming, thus contributing to the sustainable development of the livestock industry in the future.

Keywords: Carbon-neutral strategy, Feed ingredient, Pig, Precision nutrition, Sustainability

서론

육류 소비량의 증가는 생활 수준, 식습관, 가축 생산, 소비자 가격 등과 같은 요인에 의해 영향을 받는다. 지난 20년간 개발 도상국에서의 육류 생산 및 소비는 경제성장에 따라 약 3배 증가한 것으로 나타났다[1]. 또한 Food and Agriculture Organization(FAO)의 조사에 따르면,

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: Jang JC.
Data curation: Koo SM, Lee E.
Formal analysis: Lee JH.
Methodology: Jo SN, Jang JC.
Software: Koo SM.
Validation: Jang JC.
Investigation: Koo SM, Lee E.
Writing - original draft: Koo SM, Lee E.
Writing - review & editing: Koo SM, Lee E, Lee JH, Jo SN, Jang JC.

Ethics approval and consent to participate

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

세계의 육류 소비량은 현재 328만 톤이며, 앞으로 2030년까지 평균 대비 14% 이상 증가할 것으로 예상된다[2]. 이러한 육류 소비량의 증가는 가축 사육 두수의 증가와 밀접한 연관이 있으며, 이는 기후 상승 및 환경오염을 촉발시키고 있다.

특히, 가축의 사육량이 증가함에 따라 발생하는 온실가스 및 환경오염 문제는 농업 및 축산업 뿐만 아니라 환경 전반에 막대한 영향을 미치고 있다[3]. 세계 온실가스 배출량 중 약 14.43%가 축산업에서 발생하며[4], 이 중 소비량이 많은 양돈산업의 경우 축산부문 온실가스 배출량의 약 13%를 차지한다[5]. 가축 분뇨는 주로 질소 화합물과 메탄 같은 온실가스를 배출하는데, 이로 인해 대기오염 및 수질오염 문제가 발생한다[6]. 전 세계적으로 축산분야의 온실가스 및 대기 오염물질 배출을 줄이기 위한 정책 및 규제가 시행되고 있으나, 실효성에 대해서는 많은 연구가 필요한 실정이다.

국내 축산분야의 온실가스 배출량 또한 중요한 문제로 대두되고 있다. 2018년 기준 장내 발효 과정과 가축 분뇨로 인한 온실가스 배출량은 모두 국내 전체 온실가스 배출량의 약 1.3%를 차지한다[7]. 이에 대응하여 국내에서는 2050년까지 탄소중립 달성을 위한 온실가스 감축 정책을 시행하고 있다. 이 정책은 크게 4가지 기준(사양관리, 가축분뇨 관리, 시설관리, 에너지 절감기술)을 중심으로 교두보를 마련하고 있는데, 특히 사양관리 측면에서 탄소중립을 위한 세부 방안으로 1) 저단백 사료 사용, 2) 저메탄 사료 사용, 3) 생산성 향상, 4) 자가 배합사료 급여 등이 중요한 대안으로 떠오르고 있다. 저단백 사료는 생산의 효율성 및 환경오염 물질 배출 감소에 중요한 역할을 하며, 이는 탄소중립을 실현하기 위한 가장 현실적이고 효과적인 방법이다[8,9].

국내 양돈 산업은 옥수수과 대두박과 같은 주원료의 높은 수입 의존도를 보이며, 이러한 곡류의 수입단가는 국제 시장의 변동과 같은 외부적 요인에 의해 영향을 받는다. 최근 곡물가의 상승으로 인해 주원료의 가격 또한 상승하였으며, 이는 양돈 산업의 생산비용에 직접적인 영향을 미친다. 생산비용의 증가는 육류의 가격에 영향을 주어 소비자 및 생산자 양측에 경제적 부담을 가중시킨다. 이를 해결하기 위해 옥수수와 대두박을 대체할 수 있는 사료 원료에 대한 포괄적인 영양적 데이터베이스(database, DB)의 구축을 통해 다양한 대체 원료의 영양적 가치를 평가함으로써, 원료의 다양성을 증가시키고 동시에 주원료에 대한 의존도 및 생산비용을 낮출 수 있다. 자가 사료 배합의 경우, 돼지는 한우 사양에 비해 성과를 거두기 어렵다. 과거 음식물 쓰레기 사료화에 대한 연구가 진행되었지만, 돈육품질 저하라는 문제 발생 이후 지역 내에서 발생하는 식품산업 부산물의 활용에 대한 관심이 높아지고 있다[10,11]. 부산물 활용방안으로는 1) 자가사료 및 축산물의 자급률 향상을 위한 식품산업 부산물 활용, 2) 식품산업 부산물 및 폐자원의 재활용을 통한 새로운 산업 육성, 3) 지역 중심의 자원 순환 거버넌스 구축, 4) 식품 자원의 업사이클링 및 순환 이용에 관한 공감대 형성이 있으며, 이러한 활용방안은 지역 사회의 경제적 및 환경적 문제를 해결할 수 있다. 또한 현장에서 실현 가능한 저탄소 양돈 시스템 모델을 구축할 수 있으며, 이는 지속 가능한 양돈 산업 발전에 기여할 것으로 사료된다.

그러나, 과거에 주로 사용되던 wet chemistry 방법만으로는 대체 원료의 영양가 분석에 한계가 있으며, 이를 보완하기 위해 dry & real-time chemistry 분석 기법을 적용한 정밀영양 사양기법이 주목받고 있다. Dry & real-time chemistry 분석은 빠르고 정확한 영양 분석이 가능하며, 이는 원료 선택의 효율성을 향상시킨다. 따라서 본 리뷰논문은 정밀영양을 통한 친환경적 양돈 산업 및 부산물(co-product, & by-product)의 특성을 정리하고 요약함으로써, 향후 지속 가능한 양돈 산업에 기여할 목적으로 수행되었다.

재료 및 방법

정밀영양을 통한 질소의 활용방안

돼지는 성장과 번식을 위해 상당한 양의 질소 및 인이 필요로 한다. 하지만 돼지의 단백질 소화율은 15%-33%이며, 소화과정에서 소화되지 못한 질소 및 인은 대부분 분뇨를 통해 배출된다[12-15]. 분뇨를 통해 배출된 질소와 인은 지하수 및 지표수에 침출되어 질산염의 수치를 높이며, 특히 인의 배출은 지표수의 부영양화를 초래한다[3]. 질소 및 인의 배출은 지역 환경을 넘어 행성 경계에 영향을 미친다.

행성 경계와 축산업의 관계

2009년에 발표된 스웨덴 스톡홀름 회복력센터의 논문을 통해 행성경계 개념이 도입되었다. 행성 경계는 인간이 안전하게 살 수 있는 지구 환경 한계를 정의하며, 1) 기후 변화, 2) 생물 다양성 손실(육상 및 해상), 3) 질소와 인 순환 과정, 4) 성층권 오존층 파괴, 5) 해양 산성화, 6) 담수, 7) 오존지수, 8) 대기오염, 9) 화학적 오염 등 9개의 지표로 평가된다(Fig. 1). 그러나 인류의 산업활동은 환경 변화에 부정적 영향을 미치며, 이는 행성 경계의 임계값을 초과할 수 있다. Richardson et al.은 9개 경계 중 6개 경계가 이미 임계값을 초과하였다고 보고하였다[16]. 이는 인류의 영속성 및 다음세대를 위해 질소 순환 감소의 필요성을 강조한다. 축산업에서의 행성경계는 3번 지표인 질소와 인 순환과정과 밀접한 관련이 있다. 대부분의 질소는 분뇨를 통해 배출되며, 돼지 분뇨에는 질소화합물이 다량으로 함유되어 있다. 특히 질산염과 이산화질소는 기후 변화의 주요 원인으로 작용한다. 이러한 이유로 질소 순환 감소는 양돈업과 관련된 환경 문제 해결을 위해 중요한 과제로 인식되고 있다.

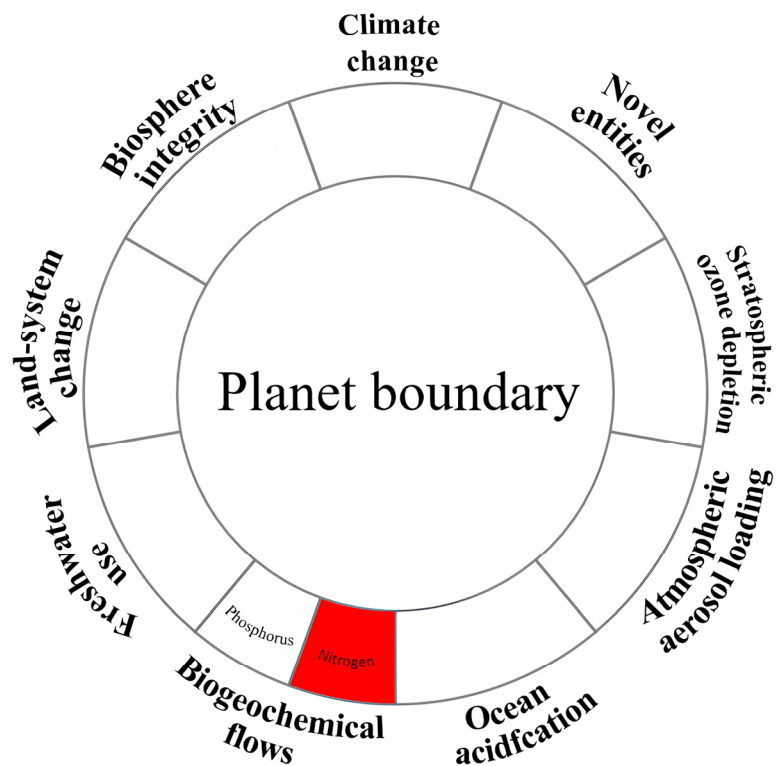


Fig. 1. Planetary boundaries.

사료 내 비효율적 단백질 사용이 미치는 영향

사료 내 비효율적인 단백질 사용은 질소를 배출하는 주요 원인 중 하나이다. 돼지는 소화되지 않은 질소를 분과 뇨로 배출하는 경향이 있다. 이러한 현상은 사료 내 단백질 이용률은 다른 가축에 비해 낮다는 사실로 확인된다[13,15,17]. 사료 내 단백질 함량이 증가할수록 분뇨 내 질소화합물의 함량이 증가한다. 배출된 질소는 여러 형태로 전환될 수 있으며, 이로 인해 환경 오염이 촉진될 수 있다. 게다가 분뇨로 배출된 질소는 환경뿐만 아니라 인간에게도 호흡기 질환, 암, 심장 질환 등과 같은 부정적 영향을 미칠 수 있다[18]. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 질소의 생체 이용성을 높이는 전략을 개발하는 것이 중요하다. 이를 통해 환경 및 인간의 건강을 보호하고, 지속 가능한 축산을 유지하는 데 도움이 될 것이다.

정밀 영양을 통한 질소 활용 효율 개선

양돈업에 있어 생산비용의 대다수는 사료비용이 차지한다[19]. 사료 비용은 이유모돈 및 모돈의 전체 생산비용의 약 15%-17%를 차지하며, 육성-비육돈의 약 2/3를 차지한다[20,21]. 양돈 사료의 주요 원료인 대두박의 경우 단백질 함량이 높아 우수한 단백질 공급원으로 알려져 있으나, 돼지의 경우 체내 단백질 이용률이 낮아 사료를 통해 공급된 질소의 약 54%를 분과 뇨로 배출한다[22].

따라서 사료 내 질소의 함량을 낮추는 동시에, 기존사료와 동등한 영양적 효과를 나타낼 수 있는 전략이 필요하다. 이를 위해서는 섭취된 영양소가 기초 대사과정에서 효과적으로 활용되어야 한다[17]. 그러나 이 과정에서 내인성 손실과 유지 손실이 발생한다. 내인성 손실은 동물의 대사 과정에서 발생하는 비효율적인 손실을 의미하며, 주로 회장에 도달하기 전 소화 및 재흡수가 이루어지지 않아 발생한다[23,24]. 또한 동물의 영양소 요구량에 맞지 않은 사료의 조성과 급여는 비효율적인 손실의 원인으로 작용할 수 있다[25]. 이러한 영양 손실을 최소화하기 위해 정밀 영양 시스템을 적용하는 것이 필요하다. 이를 통해 사료의 효율성을 높이고, 비용을 절감하며, 환경 부하를 줄일 수 있다.

정밀 영양을 통한 사료 급여

정밀 영양을 통한 사료 급여는 동물의 생산 목적에 따라 최적화된 영양소 요구량을 갖춘 최소한의 사료를 배합하여 급여하는 현대적인 접근 방식 중 하나이다[26]. 정밀 영양을 통한 사료 급여는 1) 사료 및 영양의 효과적인 활용, 2) 생산성 최적화, 3) 사료비 절감, 4) 수익성 증가, 5) 환경오염 감소를 목표로 한다. 이러한 정밀사료를 배합하기 위해서는 1) 사양학적 측면에서의 최적의 영양소 요구량 조사, 2) 사료 내 원료의 영양소 분석, 3) 영양 결핍 또는 과잉을 최소화하기 위해 최소 비용으로 균형 잡힌 사료를 정확하게 배합을 고려해야 한다.

가축의 영양소 요구량을 파악하기 위해서는 돼지의 경우 NRC(2012)에 따라 각 단계별 영양소 요구량이 분류된다. 양돈업에서 사료 내 영양소의 과잉 및 결핍은 저가 사료 제조 과정에서 발생하며[27], 특히 고단백 사료는 필수 및 비필수 아미노산이 과하게 포함되어 있어, 분뇨 내 질소화합물의 함량을 증가시킨다. 이는 환경오염에 부정적인 영향을 미치는 원인으로 작용한다. 정밀 영양은 이러한 영양소의 과잉 섭취를 방지하며, Andretta et al.의 연구에서 정밀 영양을 통한 사료 급여 시 질소 배설량은 약 30% 감소하였고[28], Niyazov & Ostrenko의 연구에서는 저단백 사료 급여 시 체내 질소 활용 효율성 높여, 분뇨 내 질소 함량을 감소시켰다고 보고하였다[29].

저단백사료

돼지는 크게 모돈, 자돈, 육성비육돈으로 분류 가능하며, 각 단계별로 요구하는 단백질 함량은 상이하다[30]. 질소는 돼지의 필수 아미노산 및 비 필수 아미노산의 합성에 사용되기 때문에, 사료 내 단백질을 통해 충분히 제공되어야 한다. 기존 양돈 사료는 옥수수-대두박 기반이나, 돼지의 성장에 있어 필수 아미노산인 라이신, 메티오닌, 트레오닌, 트립토판 및 발린의 요구량이 부족하며, 이를 충족시키기 위해 다량의 대두박을 첨가하는데[31], 이는 분뇨 내 질소화합물의 함량 및 질소의 배설량을 증가시킨다.

결정성 아미노산은 기존 옥수수-대두박 기반 사료의 부족한 필수 아미노산을 보충해주며, 이는 사료 내 조단백질 함량을 줄임으로써, 질소의 배출을 감소시킨다. 양돈 사료에 주로 쓰이는 결정성 아미노산은 필수 아미노산인 L-라이신, L-메티오닌, L-트레오닌, L-트립토판 및 L-발린이 있으며, 이들의 가용성은 점차 증가할 것이다.

여러 연구에서 결정성 아미노산을 이용한 저단백 사료 급여 실험을 진행하였으며, Le Bellego and Noblet의 연구에서 결정성 아미노산을 첨가 후 자돈에게 급여한 결과, 성장성적 및 건강에 영향을 주지 않았으며[32], 분뇨 내 질소 함량이 낮았다고 보고되었다. 또한, Powell et al.의 연구에서 아미노산을 적절한 비율을 유지하면서 조단백질 함량을 18.2%에서 13.4%로 감소시킨 결과, 돼지의 성장 성능이 유지되었다고 보고되었다[33]. 그러나 결과가 일관적이지 않으며, Li et al.의 연구에서는 사료 내 조단백질 함량을 18.3%에서 15.1% 감소시키면, 일당증체량 및 사료 효율이 감소한다고 보고되었다[34]. 모든 필수 아미노산이 사료 내 포함되어 있어도, 돼지의 성장 성능에 부정적인 영향을 미치는 최소한의 조단백질 함량이 존재한다. 자돈의 조단백질 함량의 경우 18.4% 또는 18.3%이며, 육성돈은 16.1% 또는 16.3%, 그리고 비육돈은 11.6% 또는 11.4%로 추정된다[30]. 따라서 최소 조단백질 수준을 고려하여 사료를 조합하는 것이 중요하다 (Fig. 2).

부산물(co-product, by-product)의 활용

현대 축산에 있어, 정밀 영양은 가축의 성장성적, 건강 및 생산성을 향상시킬 수 있다. 정밀 영양에 있어, 핵심 요소 중 하나는 원료의 영양소를 정확히 분석하고 이해함으로써, 사료의 효율성을 향상할 수 있다. 에탄올 생산 과정에서 발생하는 부산물은 연간 약 5,200만 톤에 이르며 [11], 기존 사료 원료인 옥수수 또는 대두박을 부분적으로 대체할 수 있는 높은 영양적 가치를 지닌다. 사료에 사용되는 부산물에는 대표적으로 카멜리나박, 옥수수주정박 및 식품 부산물 등이 있다(Table 1). 부산물 기반으로 한 사료는 원료의 다양성과 축산업의 지속 가능성을 향상시키고, 주원료의 의존도를 낮추고 동시에, 자원 효율성을 증가시켜 환경 오염을 최소화할 수 있다. 대표적인 식품 부산물인 과자박(dried bakery meal)은 매년 백만 톤 이상 생산되며[35], 생성된 부산물은 영양소의 함량이 풍부하여 기존 양돈사료의 영양가를 향상시킬 수 있다. 따라서 부산물의 활용은 사료 비용을 절감하고 자원의 순환을 촉진함으로써 경제적이고 환경적으로 지속 가능한 축산업 발전에 기여할 수 있다.

카멜리나박(camelina meal)

카멜리나박은 카멜리나 종자에서 기름을 추출한 후 남은 부산물로, 고단백 및 오메가-3 지방산이 풍부한 것으로 알려져 있다. 카멜리나는 겨울과 여름 품종을 모두 가지고 있어, 옥수수와 대두가 휴식기에 들어가도 안정적인 재배가 가능하다[36]. 카멜리나박의 조단백질은 약 35.15%로 옥수수에 비해 27.15% 많으나, glucosinolate 및 sinapine 등과 같은 항 영양인자를 함유하고

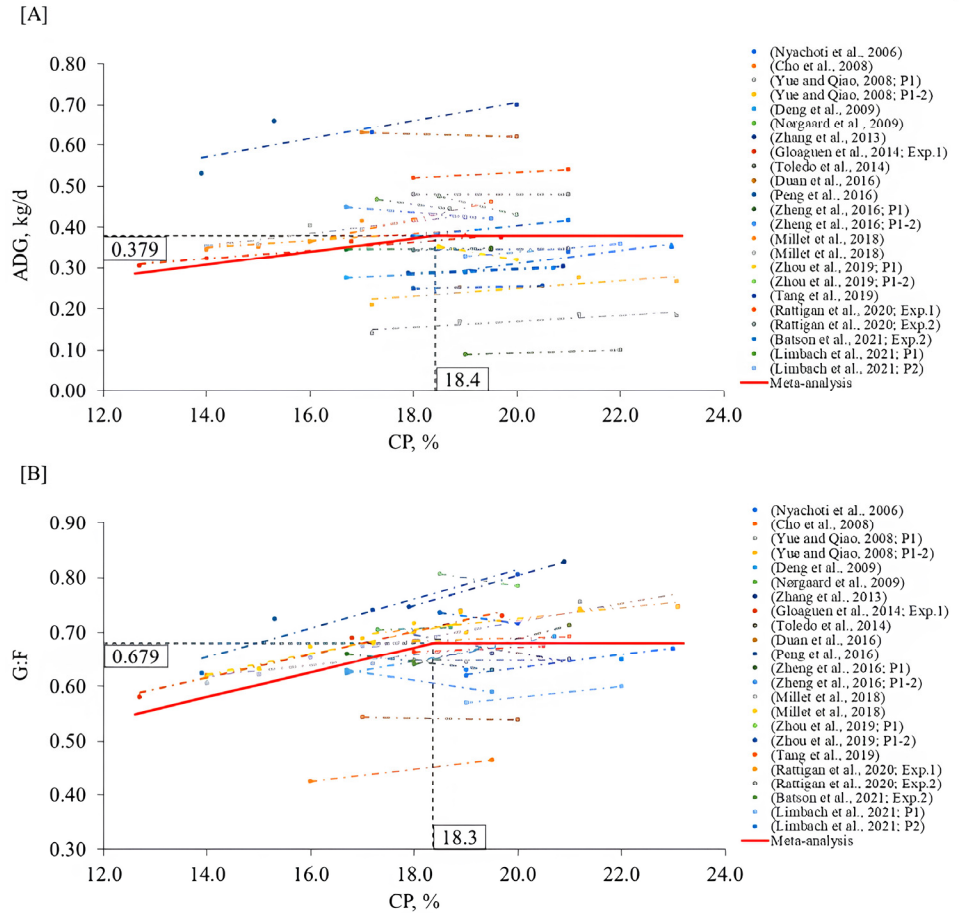


Fig. 2. Changes in average daily gain (ADG) in response to L-lysine supplementation in the finishing phase were analyzed using a broken-line analysis. The L-lysine axis was based on 100% purity, calculated from either L-lysine HCl (78.8% purity) or L-lysine sulfate (60.0% purity). The equation derived from the analysis was $ADG = 0.926 + 0.314 \times z1$, with a coefficient of determination (R^2) of 0.97. The breakpoint occurred at a L-lysine level of 0.24% (95% confidence interval: 0.10-0.37) when ADG was 0.926 kg/d. The p-value for the asymptote was < 0.001 , for the slope it was 0.033, and for the breaking point it was 0.002. Additionally, the variable $z1$ was defined such that if L-lysine is \leq breakpoint, then $z1 = 0$; if L-lysine is $>$ breakpoint, then $z1 = \text{L-lysine} - \text{breakpoint}$. Adapted from Rocha et al. (2022) with CC-BY.

있어, 동물 사료 성분으로 사용이 제한적이다[37]. 그러나 카멜리나박 내 항 영양인자는 열처리 등을 다양한 가공 방법을 통해 감소 가능하다. Cerisuelo et al.은 양돈 사료 내 카멜리나박을 첨가하였을 시 대두박과 소화율이 비슷하다고 하였으나, 카멜리나박이 돼지에게 미치는 영향에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 보고하였다[37]. 카멜리나박은 양돈 사료에 있어 대두박을 대체할 수 있는 주요 부산물 중 하나에 속하나, 향후 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

주정박(distillers dried grains with solubles)

주정박(DDGS)은 주정(에탄올) 또는 바이오 연료 공정 과정에서 발효 및 증류를 통해 얻어진 곡물을 건조함으로써 생성되는 부산물이다. 주로 원료는 옥수수이지만, 밀, 보리 또는 기타 곡물도 사용될 수 있다. DDGS는 상대적으로 높은 에너지 함량과 소화 가능한 인과 아미노산을 포함하고 있으며, 사료의 주 원료인 옥수수 또는 대두박의 일부를 대체할 수 있다. DDGS는 고단백 DDGS와 저단백 DDGS로 분류할 수 있으며, 일반 DDGS의 경우 25%-27%의 단백질을 함유하고 있는데, 27% 이상일 경우 고단백 DDGS, 25% 이하일 경우 저단백 DDGS로 분류

Table 1. Nutritional composition of various co- and by-productis

Nutrient	CEM	CMSE	DDGS-W	DDGS-C	DDGS-CHP	DDGS-S
CP (%)	35.15	37.50	36.61	28.89	45.35	30.80
DM (%)	92.35	91.33	92.59	90.82	91.20	89.84
ME (kcal/kg)	NA	3,013	2,902	3,158	3,732	3,669
Essential AA						
AA (%)						
Lys (%)	1.62	2.07	0.73	0.87	1.22	0.82
Met (%)	0.87	0.71	0.52	0.62	0.93	0.54
Thr (%)	1.30	0.55	1.13	1.13	1.59	1.06
Trp (%)	0.42	0.43	0.37	0.21	0.24	0.25
Val (%)	1.81	1.78	1.60	1.56	2.12	1.65

Nutrition composition of CEM, CMSE, DDGS-W, DDGS-C, DDGS-CHP, and DDGS-S are calculated from chemical composition using equations from NRC (2012). CP, crude protein; DM, dry matter; ME, metabolizable energy; CEM, camelina meal; DDGS-W, distillers dried grains with soluble of wheat; DDGS-C, distillers dried grains with soluble of corn; DDGS-CHP distillers dried grains with soluble of corn high protein; DDGS-S, distillers dried grains with soluble of sorghum; NA, not applicable.

한다[39]. 하지만 DDGS는 건조 온도, 발효 유형 및 기간 등과 같은 요인에 의해 영양소가 변질될 수 있으며, 이로 인해 영양소가 일정하지 않다[40]. 또한 지방과 라이신 함유량도 변질될 수 있기 때문에, 정밀 사료 배합 전 DDGS의 영양성분의 분석을 우선적으로 실시하여야 하며, 그 후 최적의 영양소 요구량에 맞춰 사료를 배합하여야 한다.

식품 공정 과정에서 생성된 부산물

일반적으로 유럽은 음식물류 폐기물을 former food product(FFP)와 former foodstuffs(또는 ex-food), food leftovers, bakery meal(BM), 그리고 food waste로 구분한다[41]. 그 중 유럽과 북미의 주식인 빵류는 매년 백만 톤 이상이 생산되고 과잉 생산으로 인해 약 10%가 낭비되고 있다[35]. Dried BM은 빵, 비스킷, 케이크, 크래커, 반죽, 칩스, 파스타, 과자, 견과류, 시리얼, 밀가루, 베이킹 제품 및 관련 식품 부산물이 포함된 가공물을 말한다[42]. Martins et al.의 연구에서는 bakery product(BP)를 빵과 케이크, 비스킷(크래커, 쿠키)으로 나누어 영양성분을 조사하였다. 빵은 영양 성분면에서 수분이 11%, 탄수화물 74%, 단백질 11%, 지방 2%, 섬유소 3%의 비율이며, 케이크는 수분이 27%, 탄수화물 53%, 지방 12%, 단백질 6%의 비율이다. 비스킷은 수분 5%, 탄수화물 67%, 지방18%, 단백질 8%로 나타났다[43].

Rojas et al.은 옥수수, cornDDGS, bakery meal의 영양성분 및 소화율을 비교 실험을 수행하였다. Dry matter(DM)는 유사하였으며, 칼슘과 인의 함량이 옥수수의 약 2배로 cornDDGS와 유사한 수준이다. Ash와 Phytate는 옥수수와 cornDDGS 대비 2-3배 높은 수준으로 나타났다. 소화율은 옥수수와 비교하여 metabolizable energy(ME)는 약 3% 낮은 수준이나, gross energy (GE), apparent total tract digestibility(ATTD), digestible energy(DE)와 유사한 수준을 보였다. 옥수수주정박에 비하여 ATTD는 약 9% 낮으나 ME는 비슷한 수준으로 보고되었다[44]. Luciano et al.의 이유자돈 BM급이 실험에서 대조구 대비 BM 30% 대체하였을 때 0-42 d 전 구간에서 성장 성적에 유의차가 없었다[45]. 육성돈 28-42 d에서 average daily gain(ADG)가 0% 대비 15% 대체하였을 때 약 23% 증가했으며, 사료효율은 0.45로 16% 증가하는 것으로 나타났다[46].

음식물류 폐기물과 관련된 연구들은 사료 및 영양 분야에서 중요한 정보를 제공하고 있으며,

향후 더 많은 연구와 지속 가능한 방법을 통해 음식물류 폐기물의 활용이 더욱 증가될 것으로 기대된다.

결론

기후 위기는 축산업에 중대한 영향을 미치며, 이에 대비하기 위해 범정부적 탄소중립 정책을 추진 중이다. 축산업의 경우, 식품산업 부산물의 활용과 정밀영양 분석 기법 도입을 통해 지속 가능한 양돈 산업을 목표로 사양관리, 가축분뇨 관리, 시설관리, 에너지 절감기술 등 4가지 기준에 대한 세부 실천 방안으로 저단백 사료 사용, 저메탄 사료 사용, 생산성 향상, 자가 배합사료 급여 등을 설정하였다. 저단백 사료는 생산의 효율성 및 환경오염 물질 배출 감소에 중요한 역할을 하며, 이는 탄소중립을 실현하기 위한 가장 현실적이고 효과적인 방법이다. 양돈 사료 원료로 가장 많이 사용되는 옥수수-대두박을 대체하기 위한 원료의 DB를 구축하는 것도 향후 사료값 안정화를 위한 실질적인 대책이 될 수 있으며, 지역 식품 부산물을 활용하여 사료화하는 방안 또한 검토되어야 할 것이다. 하지만, 앞서 기술된 탄소 저감 방안의 기본 틀은 정밀영양사양 기법을 바탕으로 수행되어야만 뚜렷한 효과를 확인할 수 있다. 궁극적으로 정밀영양이 적용된 탄소저감 사양을 통해 가축의 사료효율 향상 및 환경오염 감소를 실현할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 지속 가능한 축산업 발전에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Halas V. Growth models and their application in precision feeding of monogastric farm animals. *Acta Fytotechn Zootechn*. 2020;23:258-64. <https://doi.org/10.15414/afz.2020.23.mi-fpap.258-264>
2. OECD/FAO. OECD-FAO agricultural outlook. Paris: OECD; 2021.
3. Gu B, Zhang L, Van Dingenen R, Vieno M, Van Grinsven HJ, Zhang X, et al. Abating ammonia is more cost-effective than nitrogen oxides for mitigating PM2.5 air pollution. *Science*. 2021;374:758-62. <https://doi.org/10.1126/science.abf8623>
4. FAOSTAT. Emissions indicators [Internet]. 2024 [cited 2024 Mar 29]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/EM>
5. Philippe FX, Nicks B. Review on greenhouse gas emissions from pig houses: production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agric Ecosyst Environ*. 2015;199:10-25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.015>
6. Uwizeye A, de Boer IJM, Opio CI, Schulte RPO, Falcucci A, Tempio G, et al. Nitrogen emissions along global livestock supply chains. *Nat Food*. 2020;1:437-46. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0113-y>
7. KOSIS. Statistics database [Internet]. 2024 [cited 2024 Mar 29]. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_99_2800020&conn_path=I3
8. Wilkinson JM. Re-defining efficiency of feed use by livestock. *Animal*. 2011;5:1014-22. <https://doi.org/10.1017/S175173111100005X>
9. Wilkinson JM, Lee MRF. Review: use of human-edible animal feeds by ruminant livestock. *Animal*. 2018;12:1735-43. <https://doi.org/10.1017/S175173111700218X>
10. Sun X, Devi ND, Urriola PE, Tiffany DG, Jang JC, Shurson GG, et al. Feeding value improvement of corn-ethanol co-product and soybean hull by fungal fermentation: fiber degradation and digestibility improvement. *Food Bioprod Process*. 2021;130:143-53. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.09.013>

11. Shurson GC. The role of biofuels coproducts in feeding the world sustainably. *Annu Rev Anim Biosci.* 2017;5:229-54. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-022516-022907>
12. Aguiéiras ECG, Greco-Duarte J, de Souza CP, Oliveira RA, Pinto TO, Ramos R, et al. Integrated process for a new sequential valorization of corn ethanol production by-products: production of fermented solid with lipase activity, ethyl esters, and animal feed. *Ind Crops Prod.* 2024;209:118028. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118028>
13. Dourmad JY, Sève B, Latimier P, Boisen S, Fernández J, van der Peet-Schwering C, et al. Nitrogen consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. *Livest Prod Sci.* 1999;58:261-4. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00015-9)
14. Heo JM, Kim JC, Hansen CF, Mullan BP, Hampson DJ, Pluske JR. Effects of feeding low protein diets to piglets on plasma urea nitrogen, faecal ammonia nitrogen, the incidence of diarrhoea and performance after weaning. *Arch Anim Nutr.* 2008;62:343-58. <https://doi.org/10.1080/17450390802327811>
15. Flachowsky G, Kamphues J. Carbon footprints for food of animal origin: what are the most preferable criteria to measure animal yields? *Animals.* 2012;2:108-26. <https://doi.org/10.3390/ani2020108>
16. Richardson K, Steffen W, Lucht W, Bendtsen J, Cornell SE, Donges JF, et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci Adv.* 2023;9:eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
17. Moughan PJ. An overview of energy and protein utilisation during growth in simple-stomached animals. *Anim Prod Sci.* 2018;58:646-54. <https://doi.org/10.1071/AN15791>
18. Erisman JW, Galloway JN, Seitzinger S, Bleeker A, Dise NB, Roxana Petrescu AM, et al. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 2013;368:20130116. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0116>
19. Nguyen TLT, Hermansen JE, Mogensen L. Environmental costs of meat production: the case of typical EU pork production. *J Clean Prod.* 2012;28:168-76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.08.018>
20. Pomar C, Hauschild L, Zhang GH, Pomar J, Lovatto PA. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pig operations. *Rev Bras Zootecn.* 2009;38:226-37. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300023>
21. Solà-Oriol D, Gasa J. Feeding strategies in pig production: sows and their piglets. *Anim Feed Sci Technol.* 2017;233:34-52. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.07.018>
22. Jørgensen H, Prapasongsa T, Thi Khanh Vu V, Damgaard Poulsen H. Models to quantify excretion of dry matter, nitrogen, phosphorus and carbon in growing pigs fed regional diets. *J Anim Sci Biotechnol.* 2013;4:42. <https://doi.org/10.1186/2049-1891-4-42>
23. Liu Z, Lv S, Zhang S, Liu J, Zhang H. Effects of dietary cellulose levels on the estimation of endogenous amino acid losses and amino acid digestibility for growing pigs. *Anim Nutr.* 2016;2:74-8. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.04.001>
24. Tamminga S, Schulze H, Van Bruchem J, Huisman J. The nutritional significance of endogenous N-losses along the gastrointestinal tract of farm animals. *Arch Tierernahrung.* 1995;48:9-22. <https://doi.org/10.1080/17450399509381824>
25. Pomar C, Andretta I, Remus A. Feeding strategies to reduce nutrient losses and improve the sustainability of growing pigs. *Front Vet Sci.* 2021;8:742220. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.742220>
26. Hauschild L, Lovatto PA, Pomar J, Pomar C. Development of sustainable precision farming systems for swine: estimating real-time individual amino acid requirements in growing-

- finishing pigs. *J Anim Sci.* 2012;90:2255-63. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4252>
27. Kornegay ET, Harper AF, Jones RD, Boyd LJ. Environmental nutrition: nutrient management strategies to reduce nutrient excretion of swine. *Appl Anim Sci.* 1997;13:99-111. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)31861-1](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)31861-1)
 28. Andretta I, Pomar C, Rivest J, Pomar J, Radünz J. Precision feeding can significantly reduce lysine intake and nitrogen excretion without compromising the performance of growing pigs. *Animal.* 2016;10:1137-47. <https://doi.org/10.1017/S1751731115003067>
 29. Niyazov NSA, Ostrenko KS. Effect of low-protein diets on the nitrogen balance and productivity of pigs. *J Livest Sci.* 2020;11:106-9. <https://doi.org/10.33259/JLivestSci.2020.106-109>
 30. Wathes CM, Kristensen HH, Aerts JM, Berckmans D. Is precision livestock farming an engineer's daydream or nightmare, an animal's friend or foe, and a farmer's panacea or pitfall. *Comput Electron Agric.* 2008;64:2-10. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.005>
 31. Rocha GC, Duarte ME, Kim SW. Advances, implications, and limitations of low-crude-protein diets in pig production. *Animals.* 2022;12:3478. <https://doi.org/10.3390/ani12243478>
 32. Le Bellego L, Noblet J. Performance and utilization of dietary energy and amino acids in piglets fed low protein diets. *Livest Prod Sci.* 2002;76:45-58. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00008-8)
 33. Powell S, Bidner TD, Payne RL, Southern LL, et al. Growth performance of 20- to 50-kilogram pigs fed low-crude-protein diets supplemented with histidine, cystine, glycine, glutamic acid, or arginine. *J Anim Sci.* 2011;89:3643-50. <https://doi.org/10.2527/jas.2010-3757>
 34. Li Y, Yin J, Han H, Liu G, Deng D, Kim WS, et al. Metabolic and proteomic responses to long-term protein restriction in a pig model. *J Agric Food Chem.* 2018;66:12571-9. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05305>
 35. Kumar V, Brancoli P, Narisetty V, Wallace S, Charalampopoulos D, Dubey BK, et al. Bread waste: a potential feedstock for sustainable circular biorefineries. *Bioresour Technol.* 2023;369:128449. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128449>
 36. Zanetti F, Gesch RW, Walia MK, Johnson JMF, Monti A. Winter camelina root characteristics and yield performance under contrasting environmental conditions. *Field Crops Res.* 2020;252:107794. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107794>
 37. Cerisuelo A, Ferrer P, Ángel Gómez E, Awori Woyengo T, Henrik Stein H, Martínez M, et al. Nutritional value of Spanish Camelina sativa co-products for pigs. *Anim Feed Sci Technol.* 2023;301:115665. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115665>
 38. Tangendjaja B, Wina E. Feeding value of low and high protein dried distillers grains and corn gluten meal for layer. *Media Peternakan.* 2011;34:133-9. <https://doi.org/10.5398/medpet.2011.34.2.133>
 39. Tsai T, Dove CR, Cline PM, Owusu-Asiedu A, Walsh MC, Azain M. The effect of adding xylanase or β -glucanase to diets with corn distillers dried grains with solubles (CDDGS) on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs. *Livest Sci.* 2017;197:46-52. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.01.008>
 40. Giromini C, Ottoboni M, Tretola M, Marchis D, Gottardo D, Caprarulo V, et al. Nutritional evaluation of former food products (ex-food) intended for pig nutrition. *Food Addit Contam A.* 2017;34:1436-45. <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1306884>
 41. Pinotti L, Luciano A, Ottoboni M, Manoni M, Ferrari L, Marchis D, et al. Recycling food leftovers in feed as opportunity to increase the sustainability of livestock production. *J Clean Prod.* 2021;294:126290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126290>
 42. Malamakis A, Patsios SI, Melas L, Dedousi A, Kontogiannopoulos KN, Vamvakas K, et

- al. Demonstration of an integrated methodology for the sustainable valorisation of bakery former food products as a pig feed ingredient: a circular bioeconomy paradigm. *Sustainability*. 2023;15:14385. <https://doi.org/10.3390/su151914385>
43. Martins ZE, Pinho O, Ferreira IMPLVO. Food industry by-products used as functional ingredients of bakery products. *Trends Food Sci Technol*. 2017;67:106-28. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.003>
44. Rojas OJ, Liu Y, Stein HH. Phosphorus digestibility and concentration of digestible and metabolizable energy in corn, corn coproducts, and bakery meal fed to growing pigs. *J Anim Sci*. 2013;91:5326-35. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6324>
45. Luciano A, Tretola M, Mazzoleni S, Rovere N, Fumagalli F, Ferrari L, et al. Sweet vs. salty former food products in post-weaning piglets: effects on growth, apparent total tract digestibility and blood metabolites. *Animals*. 2021;11:3315. <https://doi.org/10.3390/ani11113315>
46. Termatzidou SA, Dedousi A, Kritsa MZ, Baniias GF, Patsios SI, Sossidou EN. Growth performance, welfare and behavior indicators in post-weaning piglets fed diets supplemented with different levels of bakery meal derived from food by-products. *Sustainability*. 2023;15:12827. <https://doi.org/10.3390/su151712827>