

육계 사료 내 항생제 대체제로서 장내 미생물 조절제 연구동향

양유성^{1*} · 양진모^{1*} · 송동철¹ · 전경호¹ · 김혁¹ · 유효현¹ · 조진호^{2†}

¹충북대학교 축산학과 학위과정 재학생, ²충북대학교 축산학과 교수

Gut Microbiota Modulators as Antibiotic Alternatives in Broiler Nutrition: A Review

Yoo-soung Yang^{1*}, Jinmo Yang^{1*}, Dongcheol Song¹, Kyeongho Jeon¹, Hyuck Kim¹, Hyohyun Yu¹ and Jinho Cho^{2†}

¹Students in Degree Programs, Department of Animal Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Republic of Korea

²Professor, Department of Animal Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Republic of Korea

ABSTRACT Antibiotics have been widely used in broiler diets to improve growth performance and prevent enteric diseases; however, restrictions on their use have increased interest in alternative nutritional strategies. Among these, modulation of gut microbiota has emerged as a promising approach for replacing antibiotic growth promoters. The gut microbiota plays an essential role in nutrient digestion and absorption, immune development, pathogen resistance, and maintenance of intestinal barrier function in broilers. A balanced microbial community is closely associated with improved feed efficiency and growth performance, whereas microbial imbalance can impair intestinal function and increase disease susceptibility. Consequently, dietary interventions targeting gut microbial composition and activity have been extensively studied. This review summarizes recent research on gut microbiota modulators used as antibiotic alternatives in broiler diets, including probiotics, prebiotics, synbiotics, stimbiotics, postbiotics, and parabiotics. These additives generally increase beneficial bacteria such as *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* while suppressing potential pathogens including *Escherichia coli* and *Clostridium perfringens*, thereby improving the intestinal environment and gut health. Although gut microbiota modulators show strong potential as antibiotic alternatives, further studies are required to clarify optimal application strategies and functional links between microbial changes and productive performance.

(Key words: broiler, gut microbiota, antibiotic alternatives, gut health, biotics)

서 론

육계 산업에서 항생제는 오랜 기간 동안 사료에 첨가되어 성장 촉진과 질병 예방의 수단으로 사용되어 왔다(Castanon, 2007). 그러나 항생제 사용은 축산물 안전성과 지속가능성 측면에서 한계가 제기되면서, 유럽연합은 2006년부터, 국내는 2011년 7월부터 사료용 항생제 사용을 전면 금지하였다(Castanon, 2007; Do et al., 2020). 이에 따라 항생제를 대체할 수 있는 안전하고 지속가능한 성장촉진제의 개발이 요구되고 있다(Wadoum et al., 2019).

이러한 대체 전략을 위해 장내 미생물 균총을 조절하는 접근이 주목받고 있다(Valdes et al., 2018). 장내 미생물은 육계의 소화·흡수, 면역 형성, 병원체 저항성 등 다양한 생

리적 기능에 관여하며, 미생물 균형은 사료 효율과 생산성 향상에 기여한다(Shang et al., 2018). 반면, 장내 미생물 불균형은 영양소 소화 저하, 장 점막 손상, 질병 감수성 증가 등 부정적인 영향을 미친다(Brown et al., 2012).

이를 위한 방안으로 다양한 사료 첨가제가 개발되고 있으며, 프로바이오틱스, 프리바이오틱스, 신바이오틱스, 스템바이오틱스, 파라바이오틱스, 포스트바이오틱스 등이 보고되었다(Roto et al., 2015; Ghany et al., 2020). 프로바이오틱스는 적절한 양을 투여했을 때 숙주의 장 건강 및 면역 기능을 향상시키는 살아있는 유익균으로(Jonkers and Stockbrügger, 2007), 장내 유해균의 정착을 억제하고 소화 효소 활성 및 장 상피 기능을 개선하는 데 기여한다(Mazziotta et al., 2023). 프리바이오틱스는 위와 소장에서 소화되지 않고 장

* These authors contributed equally to this work.

† To whom correspondence should be addressed : jinhcho@chungbuk.ac.kr

내에 도달하여 유익균에 의해 선택적으로 이용되는 비소화성 기질로 주로 올리고당이나 식이섬유로 구성되며, 장내 유익균의 성장과 활성을 촉진한다(Gibson and Roberfroid, 1995). 신바이오틱스는 프로바이오틱스와 프리바이오틱스를 함께 포함한 복합 제제로, 두 성분 간의 상호작용을 통해 장내 균형을 보다 효과적으로 조절할 수 있는 장점이 있다(Saulnier et al., 2008). 스팀바이오틱스는 소량으로도 장내 섬유소 분해 미생물을 자극하여 발효 능력을 향상시키는 새로운 개념의 첨가제로, 특히 비가용성 식이섬유의 발효율 개선을 통해 에너지 이용률을 높이는 효과가 보고되었다(Morgan et al., 2021; Ren et al., 2023). 파라바이오틱스는 열처리 등으로 비활성화된 사균체를 의미하며, 포스트바이오틱스는 사멸균체, 세포벽 및 대사산물을 포함하는 제제로, 저장 및 가공 안정성이 높고 장내 항상성 유지에 기여할 수 있어 생균 제제의 대안으로 주목받고 있다(Mosca et al., 2022; Sabahi et al., 2022).

이러한 다양한 미생물 조절제는 장내 유익균의 증식을 촉진하고 병원성 균주의 활성을 억제함으로써 장내 환경 개선에 기여하는 것으로 보고되고 있다(Zhang et al., 2020; Liu et al., 2021). 특히 단쇄지방산 생성과 같은 대사 활성을 통해 장내 환경을 조절할 가능성이 제시되고 있다(Fleming et al., 1991).

이에 본 논문에서는 육계 사료 내 항생제 대체 성장촉진제로 활용되는 장내 미생물 조절제의 정의와 작용 기작을 정리하고, 이들이 육계 장내 미생물 군총에 미치는 영향을 종합적으로 고찰하고자 한다.

본 론

1. 장내 미생물 군총의 역할

육계의 소화관에는 Firmicutes, Bacteroidetes, Proteobacteria, Actinobacteria 등 여러 미생물 군이 공존하며 육계의 성장, 면역, 소화 및 병원균 억제에 필수적이다(Latorre et al., 2016). 건강한 닭의 장내미생물총은 영양소 흡수 효율을 높이고 장벽을 강화하여 병원균의 정착을 억제하는 경쟁적 배제 효과를 낸다(Wei et al., 2013). 또한 단쇄지방산, 유기산 및 비타민 등 대사산물을 생산하여 장점막 세포의 면역 조절 기능을 수행한다(Venegas and Fuente, 2019).

1) 미생물 군집 구성

육계의 장내미생물총은 주로 네 개의 문(門)으로 구성된다(Wei et al., 2013). Firmicutes는 가장 대표적인 미생물 문으로, *Lactobacillus*, *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Bacillus*, *Enterococcus* 등 다양한 속(genus)을 포함한다. *Proteobacteria*는 *E. coli*, *Salmonella*, *Helicobacter*, *Campylobacter* 등을 포함하며, 주로 장내 점착력이 약한 기회병원균이 많아 건강한 개체에서는 비율이 낮지만, 증식 시 질병을 유발할 수 있다(Gouveia et al., 2014). 또한, *Actinobacteria*는 *Bifidobacterium*, *Olsenella*, *Collinsella* 등 유익균이 속하며, 수는 적지만 대사에 중요한 역할을 한다(Rychlik, 2020). 이 외에도 *Lactobacillaceae*, *Lachnospiraceae*, *Ruminococcaceae* 등 여러 세균 군집이 존재한다(Torok et al., 2011).

(1) Firmicutes

Firmicutes는 육계 소화관에서 가장 우점하는 문으로, 다양한 유산균과 부티르산 생성균을 포함한다(Fu et al., 2019). 대표적으로 *Lactobacillus* 속은 탄수화물을 효율적으로 발효하여 젖산을 생성하고 장내 pH를 낮춤으로써 병원성 세균의 성장을 억제한다(Bwownlie et al., 2022). 젖산 생성뿐 아니라 *Lactobacilli*는 장 상피에 잘 부착하여 물리적 장벽을 형성하고 면역을 자극하여 대장균 및 살모넬라 등의 부착을 억제한다(Walsham et al., 2016). 또한 *Lactobacillus reuteri*는 숙주의 사이토카인 분비를 조절해 장 점막 면역을 강화한다(Walsham et al., 2016).

또한, *Enterococcus* 속은 장내 무해균으로서 박테리오파지 같은 항균물질을 분비해 병원균을 억제한다(Khodaei et al., 2018). *Bacillus* 속의 일부 종은 포자 형성균으로서 사료 내 효소분비를 통해 영양소 이용도를 높이고 면역을 강화시키며, 장내 유해세균 증식 억제에 도움이 된다(Latorre et al., 2016).

이들은 모두 단쇄지방산을 생산하여 장 상피세포의 주요 에너지원으로 작용하며, 상피 증식을 촉진해 흡수 면적을 증가시킨다(Feng et al., 2018). 부티르산은 특히 장벽을 강화하고 항염증 반응을 유도하며, 숙주의 면역 항상성에 기여한다(Recharia et al., 2023).

반면 일부 Firmicutes 균주인 *Clostridium perfringens* 등은 독성 효소를 생산하여 장염과 괴사성 장염을 일으킬 수 있다(Gohari et al., 2021).

따라서 Firmicutes는 숙주 영양 및 면역에 필수적인 공생 균들이 많지만, 균총 불균형 시 병원성 균주에 의한 질병도 유발될 수 있음을 의미한다(Kho and Lai, 2018).

(2) Bacteroidetes

Bacteroidetes 문에 속하는 대표균으로는 *Bacteroides*와 *Prevotella* 속이 있으며, 이들은 주로 닭의 맹장에서 풍부하다(Oakley et al., 2014). *Bacteroides* 속 균들은 복합 다당류

분해 효소를 발달시켜 사료의 섬유질과 다당류를 분해하여 단쇄지방산을 생성한다(Fan et al., 2023). 이때 생긴 아세트산, 프로피온산 및 부티르산 등은 장내 pH를 조절하여 병원균 성장을 억제하고 에너지를 공급한다(Liu et al., 2021). 특히 *Bacteroides fragilis*는 다당류 성분이 면역 관용을 유도하는 다당체를 생산하여 점막 면역계를 조절한다(Mazmanian et al., 2005). 이 외에도 *Bacteroides*는 비타민 합성과 담즙산 대사에 관여하여 영양분 흡수와 대사 조절에 기여한다(Mcmillan et al., 2023).

Prevotella 및 *Paraprevotella* 속은 식이 섬유 분해에 특화된 균으로 알려져 있다(Moniachi, 2017). 이들은 셀룰로오스나 베타글루칸 등을 분해하여 주요 단쇄지방산을 생성하고, 난소화성 탄수화물 소화를 돕는다(Bai et al., 2021).

결국 Bacteroidetes는 닭의 장내에서 복합 사료 성분을 분해하는 역할을 수행하며, 생성된 단쇄지방산은 장 상피 건강과 에너지 대사에 중추적 기능을 한다(Xia et al., 2021).

(3) Proteobacteria

Proteobacteria 문에는 그람음성의 비포자형성 균주가 많으며, 육계 장내에서는 주로 기회병원균이 속한다(Avyare et al., 2018).

*Escherichia coli*는 병원성 균주로 장염이나 패혈증을 유발할 수 있다(Johnson et al., 2003). 또한, *Salmonella*와 *Campylobacter*는 대표적 식중독균으로 장 점막을 침범하여 염증과 감염을 일으킨다(Drumo et al., 2016). Proteobacteria는 내독소를 함유하여 과도증식 시 염증을 촉진할 수 있으며, 질병 시 균총 불균형을 초래한다(Shin et al., 2015).

따라서, 건강한 육계의 장내에서는 Proteobacteria의 비율이 비교적 낮으며, 다른 군집의 경쟁적 배제에 의해 병원성 증식이 억제된다(Vlasatikova et al., 2024). 그러나 항생제 사용이나 스트레스 등으로 균총 불균형이 일어나면 Proteobacteria가 급증하여 면역 과민반응이나 장질환이 유발될 수 있다(Yoo et al., 2020).

(4) Actinobacteria

Actinobacteria 문은 그람양성균으로, *Bifidobacterium*, *Olsenella*, *Collinsella* 등이 포함된다. 일반적으로 수는 적지만 유익균으로 분류된다(Barka et al., 2015). *Bifidobacterium* 속은 주로 탄수화물을 발효하여 아세트산과 젖산을 생성하며, 장벽을 강화하고 장내 병원균 부착을 억제한다(Collado et al., 2005). 또한 일부 *Bifidobacterium*은 이눌린 같은 올리고당을 분해하여 단쇄지방산을 생산하고, 면역계를 자극하

여 면역글로불린 A 생산을 촉진한다(Yasui et al., 1995). Coriobacteriaceae과에 속한 *Olsenella* 및 *Collinsella*도 유기물을 분해하고 대사산물을 생산한다(Yue et al., 2024).

결론적으로, Actinobacteria는 상대적으로 소수이지만 비타민 합성·영양소 분해 등에서 역할하며, Firmicutes나 Bacteroidetes와 함께 작용하여 숙주의 대사와 면역을 보조한다.

2. 장내 미생물 조절제 종류 및 기능

1) 프로바이오틱스

프로바이오틱스는 장내 미생물 군집의 구성을 조절함으로써 유익균의 증식을 촉진하고 병원성 미생물의 과도한 증식을 억제하여 장내 항상성과 면역 기능을 개선하는 역할을 한다(Hardy et al., 2013; Fata et al., 2018; Raheem et al., 2021). 특히 육계 사료에 적용되는 프로바이오틱스는 *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae*, *Lactobacillaceae*, *Bifidobacteriaceae* 등 단쇄지방산 생성과 장 건강에 긍정적인 영향을 주는 미생물 군집을 증가시키는 것으로 보고되고 있다(Bilal et al., 2021; Wang et al., 2021).

이전 연구에 따르면 *B. subtilis*, *B. licheniformis*, *B. coagulans*, *B. pumilus* 등 *Bacillus* 속 균주와 *L. plantarum*, *L. casei* 등의 *Lactobacillus* 속 균주는 장내에서 *Faecalibacterium*, *Ruminococcus*, *Subdoligranulum*, *Butyricicoccus*와 같은 유익 속의 풍부도를 증가시키는 반면, *Enterobacteriaceae*, *Coprococcus*, *Blautia*, *Sutterella*, *Enterococcus* 등 잠재적 병원성 또는 불균형 관련 균주의 비율을 감소시키는 경향을 보였다(Table. 1). 이러한 장내 미생물 조성의 변화는 프로바이오틱스가 육계의 생리적 기능을 반영하는 지표로 해석된다(Mountzouris et al., 2010; Rubio et al., 2015).

실제로 이러한 미생물 균총 변화는 장내 환경의 개선뿐만 아니라, 장점막의 구조적 안정성과 면역 기능 향상 등 숙주의 전반적인 생리 기능에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Brugaleta et al., 2020). 일부 프로바이오틱스는 장점막에 부착하여 병원성 세균의 부착을 경쟁적으로 저해하고, 대사산물인 단쇄지방산을 통해 장내 산도 조절 및 항염증 반응 유도에 기여한다(Yan et al., 2020; Kaur et al., 2022). 이러한 작용은 미생물 군집 조성의 변화를 통해 장 장벽 기능을 강화하고 면역 항상성을 유지하는 데 긍정적인 생리학적으로 이어진다.

그러나 프로바이오틱스는 효과는 균주의 생존력, 장내 정착성, 적용 조건 및 환경에 따라 차이를 보일 수 있다

Table 1. Effects of dietary probiotic supplementation on gut microbiota composition in broiler

Probiotic content	Supplementation level	Results		References
<i>Bacillus subtilis</i> 1-85		↑ <i>Bacillus</i> spp. ↑ <i>Veillonellaceae</i> ↑ <i>Lactobacillus</i> spp. ↑ <i>Bifidobacteria</i> spp.	↓ <i>Enterobacteriaceae</i> ↓ <i>Actinomycetes</i> ↓ <i>Pasteurella</i> spp. ↓ <i>Campylobacter</i> spp.	Khomayezi et al. (2022)
<i>Lactobacillus casei</i> <i>Lactobacillus acidophilus</i> <i>Bifidobacterium</i>	10 g/kg	↑ <i>Bacteroidales</i> ↑ <i>Rikenellaceae</i> ↑ <i>g_Alistipe</i>	↓ <i>Proteobacteria</i>	Liu et al. (2023)
<i>Bacillus coagulans</i>	5 × 10 ⁹ CFU/kg	↑ <i>Lachnospirillum</i> ↑ <i>Ruminococcaceae</i> ↑ <i>Desulfovibrio</i>	-	Yu et al. (2022)
<i>Lactobacillus plantarum</i>	5 × 10 ⁸ CFU/kg	↑ <i>Ruminococcaceae</i> ↑ <i>Desulfovibrio</i>	-	
<i>Bacillus licheniformis</i> H2	1.0 × 10 ⁶ CFU/g	↑ <i>Bacteroides</i> ↑ <i>Lactobacillus</i> ↑ <i>Tyzzera</i> ↑ <i>Ruminococcaceae</i>	↓ <i>Alistipes</i> ↓ <i>Megamonas</i> ↓ <i>Negativibacillus</i> , ↓ <i>Phascolarctobacterium</i>	Zhao et al. (2022)
<i>Bacillus pumilus</i>	1 × 10 ⁹ CFU/kg	↑ <i>Faecalibacterium</i> ↑ <i>Ruminococcus</i>	↓ <i>Blautia</i> ↓ <i>Coproccoccus</i>	
<i>Bacillus subtilis</i>	1 × 10 ⁹ CFU/kg	↑ <i>Subdoligranulum</i> ↑ <i>Blautia</i> ↑ <i>Ruminococcus</i>	↓ <i>Sutterella</i> ↓ <i>Coproccoccus</i> ↓ <i>Enterococcus</i>	Bilal et al. (2021)

Abbreviation; ↑, increased relative abundance; ↓, decreased relative abundance; CFU, colony-forming units; spp., multiple species within the same genus.

(Duboux et al., 2021). 또한, 사료 제조 공정 중 고온이나 압력에 의해 생균 수가 감소할 수 있으며, 저장 기간 동안 균주의 활성이 저하되는 문제도 발생할 수 있다(Lathinen et al., 2008; Hutsol et al., 2023). 이외에도 균주의 유래 및 조합에 따라 안전성과 효능에 대한 검증이 충분하지 않은 사례도 존재하여, 상업적 적용을 위해서는 균주 특이적 특성에 대한 체계적인 분석이 요구된다(Liang et al., 2024).

따라서 육계 사료 내 프로바이오틱스의 장내 미생물 조절 효과에 대한 해석에는 이러한 변동성을 함께 고려해야 한다.

2) 프리바이오틱스

프리바이오틱스는 소화되지 않고 대장에 도달하여 유익균의 프로바이오틱스의 기질이 되어 장내 유익균 증식을 유도하는 난소화성 성분이다(Gibson et al., 2017). 프락토올리고당(fructo-oligosaccharide, FOS), 만난올리고당(MOS), 자일로올리고당(XOS) 등이 주요 기질로 사용되며, *Lactobacillus*와 *Bifidobacterium*의 성장을 촉진하여 단쇄지방산 생성을 증가

시키고 병원균을 억제한다(Roberfroid et al., 2010; Achary and Prapulla, 2011; Jang et al., 2020).

육계 실험에서 다양한 프리바이오틱스를 투여한 결과, 장내 미생물 군집에서 유익균이 증가하고 병원성 세균이 억제되는 경향이 보고되었다(Table 2). Baadani et al.(2025)은 사료에 1 g/kg의 *Saccharomyces cerevisiae* 첨가 시 맹장 내 *Lactobacillus*가 유의하게 증가하고 *Clostridium perfringens* 및 *Escherichia coli* 수는 감소함을 보고하였다. 또한, Ruangpanit et al.(2025)도 0.5% FOS 급여 시 맹장 내 *Lactobacillus* 수가 증가함을 보고하였다. 자일로올리고당 투여 시에도 유사한 효과가 나타났다. Yadav et al.(2024)은 21일령 육계 사료 내 0.05~0.20% XOS 첨가 시 *Bifidobacterium*가 선형적으로 증가하고 *C. perfringens* 수준이 유의하게 감소하였다. 난소화성 섬유질인 이눌린 0.5~2.0 g/kg 연구에서는 맹장 내 *Lactobacillus*, *Bacteroides*, *Akkermansia* 등의 유익균이 증가하고 *Alistipes*, *Parabacteroides* 등은 감소했다. 이러한 결과들은 프리바이오틱스가 맹장 내 미생물 군집의 발효 기능을 조절함으로써 단쇄지방산 생성 환경을 형성하

Table 2. Effects of dietary prebiotic supplementation on gut microbiota composition in broiler

Prebiotic content	Supplementation level	Results		References
Arabinogalactan	1 g/kg	↑ <i>Lactobacillus</i> spp.	↓ <i>Clostridium perfringens</i> ↓ <i>Escherichia coli</i>	Baadani et al. (2025)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	1 g/kg	↑ <i>Lactobacillus</i> spp.	↓ <i>Clostridium perfringens</i> ↓ <i>Escherichia coli</i>	
Fructo-oligosaccharide	0.5%	↑ <i>Lactobacillus</i> spp.	-	Ruangpanit et al. (2025)
Fructo-oligosaccharide	0.2–0.5%	↑ <i>Lactobacillus</i> spp.	↓ <i>Escherichia coli</i>	Phungkeha et al. (2025)
Xylo-oligosaccharide	0.5–2.0%	↑ <i>Bifidobacterium</i>	↓ <i>Clostridium perfringens</i> ↓ <i>Lactobacillus</i> ↓ <i>Escherichia coli</i>	Yadav et al. (2024)
Inulin	0.5–2.0 g/kg	↑ <i>Lactobacillus</i> ↑ <i>Bacteroides</i> ↑ <i>Akkermansia</i>	↓ <i>Alistipes</i> ↓ <i>Parabacteroides</i> ↓ <i>Odoribacter</i> ↓ <i>Rikenella</i> ↓ <i>Erysipelatoclostridium</i>	Liet al. (2025)
Galacto-oligosaccharide	0.9–3.6%	↑ <i>Actinobacteria</i> ↑ <i>Ruminococcus</i> ↑ <i>Bifidobacterium</i>	↓ <i>Lachnospiraceae</i>	Teague et al. (2023)

Abbreviation; ↑, increased relative abundance; ↓, decreased relative abundance; spp., multiple species within the same genus.

고, 장내 미생물 균형 유지에 기여함을 보여준다(Sanchez et al., 2008; Yang et al., 2016; Zhou et al., 2020).

그러나 이러한 효과는 프리바이오틱스의 종류, 급여 수준 및 육계의 장내 미생물 상태에 따라 다르게 나타날 수 있다(Cheng et al., 2017). 일부 연구에서는 유익균 증가 효과가 미미하거나 특정 병원균에 대한 억제 효과가 나타나지 않는 사례도 보고되었다(Euler et al., 2005; Sharma and Kanwar, 2018). 또한, 과량 급여 시 장내 가스 생성, 소화불량 등의 부작용 가능성이 제기되고 있으며, 프리바이오틱스의 체내 작용 경로 및 장기적인 영향에 대한 안정성과 효능은 보다 면밀한 검토가 필요하다(Habsi et al., 2024).

종합하면, 프리바이오틱스는 장내 유익균의 증식과 병원균 억제를 통해 장 건강에 긍정적인 영향을 미칠 수 있지만 다양한 요인에 의해 달라질 수 있으며, 실용적 적용을 위해서는 보다 정밀한 조건 설정과 안전성 평가가 요구된다.

3) 신바이오틱스

신바이오틱스는 프로바이오틱스와 프리바이오틱스를 병용하여 시너지 효과를 통해 장내 미생물 군집을 유익균의 정착과 활성을 촉진한다(Saulnier et al., 2008; Li et al., 2020).

육계 사료 내 *Lactobacillus*, *Enterococcus*, *Bacillus* 속 프로바이오틱스와 이눌린, 프락토올리고당, 갈락토올리고당

(galacto-oligosaccharide, GOS) 등의 프리바이오틱스를 조합한 신바이오틱스 제형이 주로 사용되고 있으며(Rehman et al., 2007; Jung et al., 2008; Shang et al., 2018), 이러한 조합은 장내 미생물 군집 구조를 안정화하고 유익균 중심의 균총 조성을 유도하는 데 목적이 있다(Mookiah et al., 2014; Tarabees et al., 2023).

선행 연구들에 따르면, 신바이오틱스 급여는 *Lactobacillus* spp. 및 *Bifidobacterium* spp.와 같은 유익균의 풍부도를 증가시키는 반면, *Escherichia coli* 및 *Salmonella* spp. 등 잠재적 병원성 미생물의 개체 수를 감소시키는 경향을 보이는 것으로 보고되었다(Dibaji et al., 2014; Śliżewska et al., 2020). 이러한 미생물 군집 변화는 단쇄지방산 생성 증가, 장내 pH 조절 및 장 상피 장벽 기능 강화와 연관되어 장내 환경의 안정성 유지에 기여하는 것으로 해석된다(Mora et al., 2019).

Guo et al.(2025)은 28일령 육계 사료 내 미세캡슐 *Lactobacillus plantarum*과 렌티난 신바이오틱스 첨가 시 맹장에서 *Lactobacillus plantarum*과 총 *Lactobacillus* 수가 유의하게 증가하고 *E. coli* 수는 유의하게 감소함을 보고하였다. 마찬가지로 Mojarla et al.(2025)은 *Bacillus subtilis*, *B. coagulans*, *B. licheniformis*와 MOS 및 β-글루칸을 조합한 신바이오틱스 첨가 시 맹장 내 *Lactobacillus* 비율을 높이고 *E. coli*가 감소하였다고 보고하였다. 반면 *Enterococcus faecium*

과 GOS을 병용한 신바이오틱스에서는 *E. coli*만 유의하게 감소했으며 *Lactobacillus*에는 유의적인 차이를 보이지 않았다(Table 3).

이처럼 이전 연구에서 보고된 주요 미생물 변화는 대체로 *Lactobacillus* spp. 우점도 상승과 병원균 억제 효과가 있는 것으로 확인된다(Hughes et al., 2017). 이러한 경향은 다양한 신바이오틱스 처리가 육계 장내 유익균 우점도를 증가시키며 병원균을 억제하는 작용을 함을 시사한다.

그러나, 신바이오틱스의 효과는 사용된 프로바이오틱스 및 프리바이오틱스의 조합, 제형, 급여 방식에 따라 달라질 수 있으며(Corcoran et al., 2004), 장기적인 급여에 따른 내성 유발 가능성이나 장내 미생물 생태계의 균형 변화와 같은 잠재적 영향에 대해서는 추가적인 과학적 검토가 필요하다(Mcfarlane et al., 2021).

종합하면, 신바이오틱스는 장내 유익균의 증식과 병원균 억제를 통해 육계의 장 건강 개선에 기여할 수 있는 전략으로 평가되나, 조합된 성분과 적용 조건에 따라 달라질 수 있으며 장기적 영향에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

4) 스템바이오틱스

스템바이오틱스는 소화되지 않지만 장내 발효가 가능한 소재로, 섬유질 분해 미생물을 특이적으로 자극하여식이섬유의 이용 효율을 극대화하는 데 초점을 맞춘다(Chang et al., 2024). 이는 단순히 미생물의 기질로 사용되는 것에 그치지 않고, 미생물의 대사 활성을 활성화하여 전체적인 섬유질 분해 능력을 향상시키는 기전으로 이해된다(Chang et al., 2024).

현재 스템바이오틱스의 가장 대표적인 형태로는 자일나아제의 작용으로 생성된 자일로 올리고당(Xylo-oligosaccharides, XOS)이 있다. 선행 연구들에 따르면 XOS는 적은 양으로도 장내 섬유질 분해 미생물의 대사 시스템을 활성화시키는 역할로 XOS가 단순한 발효 기질로 소비되는 것을 넘어, 미생물 간의 상호작용을 촉진하고 발효 활성을 유도함으로써 장내 환경을 간접적으로 제어하는 핵심 기전으로 작용함을 시사한다(Table 4).

이러한 미생물 조성 변화는 XOS가 *Bacteroidetes* 계열 미생물에서 섬유질 분해와 관련된 Sus-like system의 발현을 증가시켜, 장내 섬유질 대사 경로의 효율적 가동을 유도하

Table 3. Effects of dietary synbiotic supplementation on gut microbiota composition in broiler

Synbiotic content		Results		References
Probiotic	Prebiotic			
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Lentinan	↑ <i>Lactobacillus plantarum</i> ↑ <i>Lactobacillus</i> spp.	↓ <i>Escherichia coli</i>	Guo et al. (2025)
<i>Enterococcus faecium</i>	Galacto-oligosaccharide	-	↓ <i>Escherichia coli</i>	Khosravi et al. (2025)
<i>Bacillus subtilis</i> + <i>Bacillus coagulans</i> + <i>Bacillus licheniformis</i>	Mannan-oligosaccharide β-glucan	↑ <i>Lactobacillus</i>	↓ <i>Escherichia coli</i>	Mojarlar et al. (2025)
<i>Bacillus subtilis</i> DSM17299 + <i>Saccharomyces cerevisiae</i> boulardii	Inulin	↑ <i>Lactobacillaceae</i> ↑ <i>Peptostreptococcaceae</i> ↑ <i>Erysipelotrichaceae</i> ↑ <i>Rikenellaceae</i> ↑ <i>Bacteroidaceae</i>	↓ <i>Clostridiaceae_1</i> ↓ <i>Enterobacteriaceae</i> ↓ <i>Ruminococcaceae</i> ↓ <i>Anaeroplasmataceae</i>	Such et al. (2021)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	inactivated yeast components	↑ <i>Lactobacillus</i> spp.	↓ <i>Escherichia coli</i> ↓ <i>Salmonella</i> ↓ <i>Clostridium</i>	Khalid et al. (2021)
<i>Enterococcus faecium</i> + <i>Bifidobacterium animalis</i> + <i>Lactobacillus salivarius</i>	Inulin	↑ <i>Lactobacillus</i> ↑ <i>Bacillus</i> ↑ <i>Anaerobutyricum</i>	↓ <i>Enterococcus cecorum</i> ↓ <i>Enterococcus hirae</i> ↓ <i>Enterococcus gallinarum</i>	Temmerman et al. (2022)
<i>Lactobacillus plantarum</i> + <i>Lactobacillus pentosus</i>	Inulin	↑ <i>Lactobacillus</i>	-	Ferrocino et al. (2023)

Abbreviation; ↑, increased relative abundance; ↓, decreased relative abundance; spp., multiple species within the same genus.

Table 4. Effects of dietary stimbiotic supplementation on gut microbiota composition in broiler

Stimbiotic content	Supplementation level	Results		References
Xylanase + Xylo oligosaccharides	0.05%	↑ <i>Lachnospiraceae</i>	↓ <i>Bacteroidota</i> ↓ <i>Proteobacteria</i> ↓ <i>Enterobacterales</i>	Chang et al. (2024)
Xylanase + Xylo oligosaccharides	0.01%	↑ <i>Akkermansia</i> ↑ <i>Bifidobacterium</i> ↑ <i>Oscillospirales</i>	-	Ren et al. (2023)
Xylanase + Xylo oligosaccharides	100 g/ton	↑ <i>Lachnospiraceae ruminococcus</i> ↑ <i>Lachnospiraceae anaerostipes</i>	↓ <i>Lachnospiraceae</i>	Jonchère et al. (2025)
Carbohydrase + Mannanase	100 g/ton	↑ <i>Bifidobacterium</i> ↑ <i>Lachnospiraceae</i>	↓ <i>Clostridium</i>	Rojas et al. (2025)
Xylanase + Xylo oligosaccharides	100 mg/kg	-	↓ <i>Escherichia coli</i> ↓ <i>Clostridium perfringens</i>	Lee et al. (2022)
Xylanase + Xylo oligosaccharides	0.05%	-	↓ <i>Muribaculaceae</i>	Chang et al. (2025)
Short chain xylo-oligosaccharides ¹	-	↑ <i>Lactobacillus</i> spp.	↓ <i>Enterococcus</i> spp.	Davies et al. (2024)

Abbreviation; ↑, increased relative abundance; ↓, decreased relative abundance; spp., multiple species within the same genus.

¹ Short-chain xylo-oligosaccharides mainly consisted of xylobiose (X2) and xylotriose (X3).

는 기전과 연관된다(Ren et al., 2023). 이와 함께 장내 발효 과정에서는 단쇄지방산 생성이 증가하고 단백질 부패와 관련된 분지지방산의 상대적 비율은 감소하여, 발효 특성은 탄수화물 발효 중심으로 조절된다(Davies et al., 2024).

그러나 Bhadora and Mahapatra(2011)에 따르면, 스팀바이오틱스의 효과는 사용되는 기질의 특성 및 육계의 장내 미생물 구성에 따라 달라질 수 있으며, 처리 조건에 따라 효과가 일정하게 나타나지 않는 것으로 보고되었다.

종합하면, 스팀바이오틱스는 섬유질 분해 미생물의 활성을 조절함으로써 장내 발효 특성을 개선하고 미생물 군집 구조를 유익균 중심으로 전환시킬 수 있는 가능성을 보여주지만, 향후에는 다양한 반응 요인을 통합적으로 고려한 분석이 요구된다.

5) 포스트바이오틱스 및 파라바이오틱스

포스트바이오틱스는 살아있는 미생물이 아닌, 이들이 생성하는 단쇄지방산, 박테리옌, 펩타이드 등의 대사산물과 세포벽 성분을 활용하여 장내 미생물 환경을 조절한다(Chen et al., 2025). 살아있지 않기 때문에 사료 제조 과정에서의 열처리 및 건조 공정에도 안정적으로 유지되며, 미생물 전이에 따른 감염 위험이 없어 면역 기능이 저하된 가축에서도 적용 가능성이 높은 것으로 보고되고 있다(Guan et al., 2025).

육계 사료 내 *Lactobacillus plantarum* 유래 포스트바이오틱스 급여한 연구에서는 맹장 내 *Lactobacillus* 및 *Bifidobacterium*과 같은 유익균의 상대적 풍부도가 유의적으로 증가한 반면, *Escherichia coli*와 *Salmonella* spp.와 같은 잠재적 병원균의 비율은 감소하였다(Table 5). 이와 유사하게 *Bifidobacterium bifidum* 유래 포스트바이오틱스 첨가 시에는 단쇄지방산 생성과 관련된 *Ruminococcus*의 증식이 촉진되었다. 이러한 결과는 포스트바이오틱스가 특정 유익균의 선택적 증식을 유도함으로써 맹장 미생물 군총의 구조를 재편할 수 있음을 시사한다(Table 5).

파라바이오틱스는 열처리 또는 고압 처리 등을 통해 불활성화된 사균체로, 장내 환경 조절 효과를 나타내는 소재이다(Olson et al., 2025). 포스트바이오틱스가 미생물 유래 대사산물을 중심으로 기능을 나타내는 것과 달리, 파라바이오틱스는 세포벽 및 세포 내 구성 성분 자체를 나타낸다(Cui et al., 2025). 이러한 파라바이오틱스의 구성 성분은 장관 내 수용체와의 상호작용을 통해 장내 미생물 군총의 조성 변화와 연관되는 것으로 보고되었다(Cui et al., 2025).

육계 사료 내 열처리된 *Lactobacillus acidophilus* 급여 시 맹장 내 *Clostridium perfringens* 및 *E. coli*의 상대적 비율이 감소하였으며 장내 미생물 조성이 보다 안정화되는 경향이 관찰되었다(Table 5). 또한 열처리된 *Bacillus subtilis*를 급여

한 연구에서도 맹장 내 *Blautia* 및 *Coprococcus*와 같은 발효 관련 유익균의 풍부도가 증가한 반면, 병원성 세균군은 억제되는 결과가 보고되었다(Table 5).

그러나 포스트바이오틱스 및 파라바이오틱스의 효과는 적용된 균주와 처리 방식에 따라 상이하게 나타나며, 장내 미생물과의 상호작용에 대한 작용 기전은 아직 명확히 밝혀지지 않았다(Sionek and Gantner, 2025). 또한, 성분 구성과 적정 급여 수준의 표준화 역시 미비한 상황이다(Arranz et al., 2016).

결론적으로, 포스트바이오틱스와 파라바이오틱스는 살아 있는 균주의 한계를 보완할 수 있는 대안적 장내 미생물 조절 수단으로 평가되며, 유익균 중심의 균총 재편과 병원균 억제를 통해 장내 환경 안정화에 기여할 가능성을 보여준다. 그러나 이러한 효과는 균주, 조성 및 처리 조건 등에 따라 달라질 수 있어, 향후 작용 기전의 명확화와 성분 표준화에 대한 연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다.

결론

본 논문에서는 육계 사료 내 항생제 사용이 제한되는 환경에서 항생제 대체 성장촉진제로서 장내 미생물 조절제가 가지는 역할과 적용 가능성을 중심으로 최근 연구 동향을 종합적으로 고찰하였다.

본론에서 정리한 바와 같이, 프로바이오틱스, 프리바이오틱스, 신바이오틱스, 스템바이오틱스, 포스트바이오틱스 및 파라바이오틱스는 각기 다른 기전을 통해 장내 미생물 군집의 조성 및 대사 활성을 조절하는 것으로 보고되었다. 이들 조절제는 공통적으로 *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae* 등 유익균의 상대적 풍부도를 증가시키고, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Salmonella* spp.와 같은 잠재적 병원성 미생물을 억제하는 경향을 보였다. 이러한 미생물 조성 변화는 단쇄지방산 생성 증가, 장내 pH 조절, 장 상피 장벽 강화 및 면역 항상성 유지와 연관되어 육계의 장 건강 개선에 기여하는 것으로 해석된다.

다만, 장내 미생물 반응은 사료 조성, 사육 환경, 개체 연령 및 실험 조건에 따라 상이하게 나타날 수 있으며, 미생물 조성 변화가 항상 생산성 향상으로 직결되는 것은 아니라는 점도 함께 고려되어야 한다.

종합적으로, 장내 미생물 조절제는 육계 사료 내 항생제 대체 성장촉진제로서 높은 잠재력을 지니고 있으나, 조절제 유형별 최적 조합과 장기 급여에 따른 효과, 그리고 기능적 미생물 변화와 생산성 간의 인과관계를 명확히 규명하기 위한 추가 연구가 필요하다.

(색인어 : 육계, 장내 미생물균총, 항생제 대체, 장 건강, 장내 미생물 조절제)

Table 5. Effects of dietary postbiotic and parabiotic supplementation on gut microbiota composition in broiler

Postbiotic	Parabiotic	Results		References
<i>Lactiplantibacillus plantarum</i> RI11	-	↑ <i>Lactobacillus</i> ↑ <i>Bifidobacterium</i>	↓ <i>Enterobacteriaceae</i> ↓ <i>Proteobacteria</i> ↓ <i>Escherichia coli</i> ↓ <i>Salmonella</i>	Human et al. (2019)
<i>Bifidobacterium bifidum</i>	-	↑ <i>Lactobacillus</i> ↑ <i>Ruminococcus</i>	↓ <i>Escherichia -Shigella</i>	Chen et al. (2025)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	-	↑ <i>Lachnospiraceae</i> _CHKCI001	↓ <i>Enterobacteriaceae</i> ↓ <i>Proteobacteria</i>	Olson et al. (2025)
<i>Lactiplantibacillus plantarum</i>	-	↑ <i>Ligilactobacillus</i>	↓ <i>Alistipes</i> ↓ <i>Barnesiella</i>	Guan et al. (2024)
<i>Lactiplantibacillus plantarum</i>	-	↑ <i>Bacteroides</i> ↑ <i>Lactobacillus</i> ↑ <i>Faecalibacterium</i>	↓ <i>Proteobacteria</i> ↓ <i>Escherichia -Shigella</i>	Danladi et al. (2022)
-	<i>Lactiplantibacillus plantarum</i>	↑ <i>Proteobacteria</i>	↓ <i>Ruminococcus torques</i> group ↓ <i>Ruminococcaceae</i> UCG-14 ↓ <i>Escherichia -Shigella</i>	
-	<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Blautia</i> ↑ <i>Coprococcus</i> ↑ <i>Lachnospiraceae</i> ↑	<i>Bifidobacterium</i> ↓ <i>Bacillus</i> ↓	Cui et al. (2025)

Abbreviation; ↑, increased relative abundance; ↓, decreased relative abundance; spp., multiple species within the same genus.

ORCID

Yusung Yang	https://orcid.org/0009-0003-5196-2074
Jinmo Yang	https://orcid.org/0009-0007-4272-3441
Dongcheol Song	https://orcid.org/0000-0002-5704-603X
Kyeongho Jeon	https://orcid.org/0000-0003-2321-3319
Hyuck Kim	https://orcid.org/0000-0002-5280-0734
Hyohyeon Yu	https://orcid.org/0009-0004-7633-8013
Jinho Cho	https://orcid.org/0000-0001-7151-0778

REFERENCES

- Aachary A, Prapulla S 2011 Xylooligosaccharides (XOS) as an emerging prebiotic: microbial synthesis, utilization, structural characterization, bioactive properties and applications. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 10(1):2-16.
- Agyare C, Boamah V, Zumbi C 2018 Antibiotic use in poultry production and its effects on bacterial resistance. In: *Antimicrobial Resistance: A Global Threat*. IntechOpen, London, UK.
- Al Baadani H, Alharthi A, Abbas N 2025 Inactivated *Saccharomyces cerevisiae* as an alternative to antibiotic growth promoter on performance and health of broilers infected with *Clostridium perfringens*. 24(1):43-52.
- Al-Habsi N, Al-Khalili M, Haque SA, Elias M, Olqi NA, Uraimi TA 2024 Health benefits of prebiotics, probiotics, synbiotics, and postbiotics. *Nutrients* 16(22):3955.
- Arranz E, Corredig M, Guri A 2016 Designing food delivery systems: challenges related to the *in vitro* methods employed to determine the fate of bioactives in the gut. *Food Funct* 7(8):3319-3336.
- Bai Y, Zhou X, Li N, Zhao J, Ye H, Zhang S, Yang H, Pi Y, Tao S, Han D, Zhang S, Wang J 2021 *In vitro* fermentation characteristics and fiber-degrading enzyme kinetics of cellulose, arabinoxylan, β -glucan, and glucomannan by pig fecal microbiota. *Microorganisms* 9(5):1071.
- Barka EA, Vatsa P, Sanchez L, Gaveau-Vaillant N, Jacquard C, Klenk HP, Clément C, Ouhdouch Y, van Wezel GV 2015 Taxonomy, physiology and natural products of Actinobacteria. *Microbiol Mol Biol Rev* 80(1):1-43.
- Bhadoria P, Mahapatra SC 2011 Prospects, technological aspects and limitations of probiotics: a worldwide review. Bilal M, Achard C, Barbé F, Chevaux E, Ronholm J, Zhao X 2021 *Bacillus pumilus* and *Bacillus subtilis* promote early maturation of cecal microbiota in broiler chickens. *Microorganisms* 9(9):1899.
- Brown K, DeCoffe D, Molcan E, Gibson D 2012 Diet-induced dysbiosis of the intestinal microbiota and the effects on immunity and disease. *Nutrients* 4(8):1095-1119.
- Brownlie E, Chaharlangi D, Wong E, Kim D, Navarre W 2022 Acids produced by lactobacilli inhibit the growth of commensal Lachnospiraceae and S24-7 bacteria. *Gut Microbes* 14(1):2046452.
- Brugaletta G, Del Cesare A, Zampiga M, Laghi L, Oliveri C, Zhu C, Manfreda G, Syed B, Valenzuela L, Sirri F 2020 Effects of alternative administration programs of a synbiotic supplement on broiler performance, foot pad dermatitis, caecal microbiota and blood metabolites. *Animals* 10(3):522.
- Castanon J 2007 History of the use of antibiotic as growth promoters in European poultry feeds. *Poultry Sci* 86(11):2466-2471.
- Chang S, Kwak W, Lee J, Kim S, Song D, An J, Cho J 2024 Effect of stimbiotic on growth performance, nutrient digestibility, oocyst shedding, blood profiles and intestinal microbiota in necrotic enteritis-challenged broilers. *Anim Biotechnol* 35(1):2390936.
- Chen Y, Zhu F, Yu G, Peng N, Li X, Ge M, Dong W 2025 *Bifidobacterium bifidum* postbiotics prevent *Salmonella Pullorum* infection in chickens by modulating pyroptosis and enhancing gut health. *Poultry Sci* 104(4):104968.
- Cheng W, Lu J, Li B, Lin W, Zhang Z, Wei X, Sun C, Chi M, Bi W, Yang B, Jiang A, Yuan J 2017 Effect of functional oligosaccharides and ordinary dietary fiber on intestinal microbiota diversity. *Front Microbiol* 8:1750.
- Collado MC, Gueimonde M, Hernández M, Sanz Y, Salminen S 2005 Adhesion of selected *Bifidobacterium* strains to human intestinal mucus and the role of adhesion in enteropathogen exclusion. *J Food Prot* 68(12):2672-2678.
- Corcoran BM, Ross RP, Fitzgerald GF, Stanton C 2004 Comparative survival of probiotic lactobacilli spray-dried in the presence of prebiotic substances. *J Appl Microbiol* 96(5):1024-1039.
- Cui Y, Meng W, He F, Chen Z, Liu H, Li D 2025 Heat-killed *Bacillus subtilis* affects broiler performance, cecal archi-

- ture and microbiota. *Front Microbiol* 16:1606352.
- Danladi Y, Loh TC, Foo HL, Akit H, Md Tamrin NA, Mohammad Naeem A 2022 Impact of feeding postbiotics and paraprobiotics produced from *Lactiplantibacillus plantarum* on colon mucosa microbiota in broiler chickens. *Front Vet Sci* 9:859284.
- Davies C, González-Ortiz G, Rinttilä T, Apajalahti J, Alyassin M, Bedford MR 2024 Stimbiotic supplementation and xylose-rich carbohydrates modulate broilers' capacity to ferment fibre. *Front Microbiol* 14:1301727.
- Dibaji SM, Seidavi A, Asadpour L, Silva FD 2014 Effect of a synbiotic on the intestinal microflora of chickens. *J Appl Poult Res* 23(1):1-6.
- Do KH, Byun JW, Lee WK 2020 Antimicrobial resistance profiles of *Escherichia coli* from diarrheic weaned piglets after the ban on antibiotic growth promoters in feed. *Antibiotics* 9(11):755.
- Drumo R, Pesciaroli M, Ruggeri J, Tarantino M, Chirullo B, Pistoia C, Petrucci P, Martinelli N, Moscati L, Manuali E, Pavone S, Picciolini M, Ammendola S, Gabai G, Battistoni A, Pezzotti G, Alborali GL, Napolioni V, Pasquali P, Magistrali CF 2016 *Salmonella enterica* serovar Typhimurium exploits inflammation to modify swine intestinal microbiota. *Front Cell Infect Microbiol* 5:106.
- Duboux S, van Wijchen M, Kleerebezem M 2021 The possible link between manufacturing and probiotic efficacy: a molecular point of view on Bifidobacterium. *Front Microbiol* 12:812536.
- El-Ghany WA 2020 Paraprobiotics and postbiotics: contemporary and promising natural antibiotics alternatives and their applications in the poultry field. *Open Vet J* 10(3):315-322.
- Euler AR, Mitchell DK, Kline R, Pickering LK 2005 Prebiotic effect of fructo-oligosaccharide-supplemented term infant formula at two concentrations compared with unsupplemented formula and human milk. *J Pediatr Gastroenterol Nutr* 40(2):157-164.
- Fan YH, Ju T, Bhardwaj T, Korver D, Willing B 2023 Week-old chicks with high Bacteroides abundance have increased short-chain fatty acids and reduced markers of gut inflammation. *Microbiol Spectr* 11(2):e03616-22.
- Feng Y, Wang Y, Wang P, Huang Y, Wang F 2018 Short-chain fatty acids manifest stimulative and protective effects on intestinal barrier function through inhibition of NLRP3 inflammasome and autophagy. *Cell Physiol Biochem* 49(1):190-205.
- Ferrocino I, Biasato I, Dabbou S, Colombino E, Rantsiou K, Squara S, Cocolin L 2023 *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lactiplantibacillus pentosus* and inulin meal inclusion boost the metagenomic function of broiler chickens. *Anim Microbiome* 5(1):36.
- Fleming SE, Fitch MD, deVries S, Liu ML, Kight C 1991 Nutrient utilization by cells isolated from rat jejunum, cecum and colon. *J Nutr* 121(6):869-878.
- Fu X, Liu Z, Zhu C, Mou H, Kong Q 2019 Nondigestible carbohydrates, butyrate, and butyrate-producing bacteria. *Crit Rev Food Sci Nutr* 59(Suppl 1):S130-S152.
- Gibson GR, Hutkins R, Sanders ME, Prescott SL 2017 ISAPP consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol* 14(8):491-502.
- Gohari IM, Navarro MA, Li J, Shrestha A, Uzal FA, McClane BA 2021 Pathogenicity and virulence of *Clostridium perfringens*. *Virulence* 12(1):723-753.
- Gouveia MIM, Bernalier-Donadille A, Jubelin G 2024 Enterobacteriaceae in the human gut: Dynamics and ecological roles in health and disease. *Biology* 13(3):142.
- Guan L, Hu A, Ma S, Liu J, Yao X, Ye T, Wu Y 2024 *Lactiplantibacillus plantarum* postbiotic protects against Salmonella infection in broilers via modulating NLRP3 inflammasome and gut microbiota. *Poultry Sci* 103(4):103483.
- Guo L, Yang L, Wang K, Liu W, Wang S, Zhang Y, Chen C 2025 Synbiotic Microencapsulation of *Lactiplantibacillus plantarum* and Lentinan for Enhanced Growth in Broilers. *AMB Express*.
- Hardy H, Harris J, Lyon E, Beal J, Foey AD 2013 Probiotics, prebiotics and immunomodulation of gut mucosal defences: homeostasis and immunopathology. *Nutrients* 5(6):1869-1912.
- Humam AM, Loh TC, Foo HL, Samsudin AA, Mustapha NM, Zulkifli I, Izuddin WI 2019 Effects of feeding different postbiotics produced by *Lactobacillus plantarum* on growth performance, carcass yield, intestinal morphology, gut microbiota composition, immune status and growth gene expression in broilers under heat stress. *Animals* 9(9):644.
- Hutsol A, Dmytruk I, Dmytruk L 2023 Thermal stability of probiotic preparations in granulated combined feeds.

- Feeds Feed Prod (95):207-214.
- Johnson JR, Gajewski A, Lesse AJ, Russo TA 2003 Extraintestinal pathogenic *Escherichia coli* as a cause of invasive nonurinary infections. J Clin Microbiol 41(12):5798-5802.
- Jung SJ, Houde R, Baurhoo B, Zhao X, Lee BH 2008 Effects of galacto-oligosaccharides and a *Bifidobacterium lactis* based probiotic strain on growth performance and fecal microflora of broiler chickens. Poultry Sci 87(9):1694-1699.
- Kaur H, Ali SA 2022 Probiotics and gut microbiota: mechanistic insights into gut immune homeostasis through TLR pathway regulation. Food Funct 13(14):7423-7447.
- Kho ZY, Lal SK 2018 The human gut microbiome: a potential controller of wellness and disease. Front Microbiol 9:1835.
- Khomayzei R, Adewole DI 2022 Probiotics, prebiotics and synbiotics: an overview of delivery routes and effects on growth and health of broiler chickens. Worlds Poult Sci J 78(1):57-81.
- Khosravi A, Boldaji F, Dastar B, Torshizi MAK, Alemi M, Hoseinifar SH 2025 A synbiotic improves performance and gut health in broiler chickens. Sci Rep 15(1):19164.
- La Fata G, Weber P, Mohajeri MH 2018 Probiotics and the gut immune system: indirect regulation. Probiotics Antimicrob Proteins 10(1):11-21.
- Lahtinen SJ, Ahokoski H, Reinikainen JP, Gueimonde M, Nurmi J, Ouwehand AC, Salminen SJ 2008 Degradation of 16S rRNA and attributes of viability of viable but nonculturable probiotic bacteria. Lett Appl Microbiol 46(6):693-698.
- Latorre JD, Hernández-Velasco X, Wolfenden RE, Vicente JL, Wolfenden AD, Menconi A, Bielke LR, Hargis BM, Tellez G 2016 Evaluation and selection of *Bacillus* species based on enzyme production, antimicrobial activity and biofilm synthesis as direct-fed microbial candidates for poultry. Front Vet Sci 3:95.
- Lee JH, Lee B, Rousseau X, Gomes GA, Oh HJ, Kim YJ, Cho JH 2022 Stimbiotic supplementation modulated intestinal inflammatory response and improved broiler performance in an experimentally induced necrotic enteritis model. J Anim Sci Biotechnol 13(1):100.
- Li C, Niu Z, Zou M, Liu S, Wang M, Gu X, Lu H, Tian H, Jha R 2020 Probiotics, prebiotics and synbiotics regulate the intestinal microbiota differentially and restore relative abundance of specific gut microorganisms. J Dairy Sci 103(7):5816-5829.
- Liu L, Li Q, Yang Y, Guo A 2021 Biological function of short-chain fatty acids and their regulation of intestinal health in poultry. Front Vet Sci 8:736739.
- Liu X, Ma Z, Wang Y, Li L, Jia H, Zhang L 2023 Compound probiotics improve intestinal health by affecting gut microbiota of broilers. J Anim Sci 101:skad388.
- Lukić J, Chen V, Strahinić I, et al. 2017 Probiotics or pro-healers: the role of beneficial bacteria in tissue repair. Wound Repair Regen 25(6):912-922.
- Mazmanian SK, Liu CH, Tzianabos AO, Kasper DL 2005 An immunomodulatory molecule of symbiotic bacteria directs maturation of the host immune system. Cell 122(1):107-118.
- Mazziotta C, Tognon M, Martini F, Torreggiani E 2023 Probiotics: mechanisms of action on immune cells and beneficial effects on human health. Cells 12(3):311.
- McFarlane C, Krishnasamy R, Stanton T, Savill E, Snelson M, Mihala G, Kelly JT, Morrison M, Johnson DW, Campbell KL 2021 Synbiotics easing renal failure by improving gut microbiology II (SYNERGY II): a feasibility randomized controlled trial. Nutrients 13(12):4481.
- McMillan AS, Foley MH, Perkins CE, Theriot CM 2023 Loss of Bacteroides thetaiotaomicron bile acid-altering enzymes impacts bacterial fitness and global metabolic transcriptome. Microbiol Spectr 12(1):e03576-23.
- Mojarla R, Rao H, Gurram S, Kumari N, Thota S 2025 Effect of supplementation of synbiotic β -glucans, MOS and multi-species probiotic on growth performance, carcass characteristics and gut health in broilers. J Adv Biol Biotechnol 28(5):533-541.
- Morgan NK, Gomes GA, Kim JC 2021 Comparing the efficacy of stimbiotic and a combination of xylanase and β -glucanase in broilers fed wheat-barley-based diets with high or low AME. Poultry Sci 100(10):101383.
- Mosca A, Abreu A, Gwee KA, Ianaro G, Tack J, Nguyen TV, Hill C 2022 The clinical evidence for postbiotics as microbial therapeutics. Gut Microbes 14(1):2117508.
- Mountzouris KC, Tsitsikos P, Palamidi I, Arvaniti A, Mohnl M, Schatzmayr G, Fegeros K 2010 Effects of probiotic inclusion levels in broiler nutrition on growth performance,

- nutrient digestibility, plasma immunoglobulins and cecal microflora composition. *Poultry Sci* 89(1):58-67.
- Oakley BB, Lillehoj HS, Kogut MH, Kim WK, Maurer JJ, Pedrosa AA, Lee MD, Collett SR, Johnson TJ, Cox NA 2014 The chicken gastrointestinal microbiome. *FEMS Microbiol Lett* 360(2):100-112.
- Olson EG, Dittoe DK, Chaney WE, Binnebose AM, Ricke SC 2025 Potential of *Saccharomyces cerevisiae* fermentation-derived postbiotic technology in mitigating multidrug-resistant *Salmonella enterica* serovars in an in vitro broiler cecal model. *PLOS ONE* 20(4):e0320977.
- Raheem A, Liang L, Zhang G, Cui S 2021 Modulatory effects of probiotics during pathogenic infections with emphasis on immune regulation. *Front Immunol* 12:616713.
- Rebolé A, Ortiz LT, Rodríguez ML, Alzueta C, Treviño J, Velasco S 2010 Effects of inulin and enzyme complex individually or in combination on growth performance, intestinal microflora, cecal fermentation characteristics and jejunal histomorphology in broilers fed a wheat- and barley-based diet. *Poultry Sci* 89(2):276-286.
- Rechlarla N, Geesala R, Shi XZ 2023 Gut microbial metabolite butyrate and its therapeutic role in inflammatory bowel disease: a literature review. *Nutrients* 15(10):2275.
- Ren Y, Tian Y, Hou M, Zhao Y, Li J, Aftab U 2023 Evaluation of stimbiotic on growth performance and intestinal development of broilers fed corn- or wheat-based diets. *Poultry Sci* 102(12):103094.
- Roberfroid M, Gibson GR, Hoyle L 2010 Prebiotic effects: metabolic and health benefits. 104(S2):S1-S63.
- Roto SM, Rubinelli PM, Ricke SC 2015 An introduction to the avian gut microbiota and the effects of yeast-based prebiotic-type compounds as potential feed additives. *Front Vet Sci* 2:232.
- Ruangpanit Y, Rassmidatta K, Philatha A, Saonthong P 2025 Effects of fructooligosaccharide administration routes on growth performance, gut integrity, microbiota and meat quality in broiler chickens exposed to reused. *Poultry Sci* 105899.
- Rychlik I 2020 Composition and function of chicken gut microbiota. *Animals* 10(1):103.
- Sabahi S, Homayouni RA, Aghebati ML, Sangtarash N, Ozma MA, Karimi A, Hosseini H, Abbasi A 2022 Postbiotics as the new frontier in food and pharmaceutical research. *Crit Rev Food Sci Nutr* 63(26):8375-8402.
- Sanchez JI, Marzorati M, Grootaert C, Baran M, Van Craeyveld V, Courtin CM, Broekaert WF, Delcour JA, Verstraete W, Van de Wiele T 2008 Arabinoxylan-oligosaccharides (AXOS) affect the protein/carbohydrate fermentation balance and microbial population dynamics of the simulator of the human intestinal microbial ecosystem. *Microb Biotechnol* 2(1):101-113.
- Shang Y, Kumar S, Oakley B, Kim WK 2018 Chicken gut microbiota: importance and detection technology. *Front Vet Sci* 5:254.
- Sharma S, Kanwar SS 2018 Effect of prebiotics on growth behavior of *Lactobacillus plantarum* and their impact on adherence of strict anaerobic pathogens to intestinal cell lines. *J Food Saf* 38(1):e12384.
- Shin NR, Whon TW, Bae JW 2015 Proteobacteria: microbial signature of dysbiosis in gut microbiota. *Trends Biotechnol* 33(9):496-503.
- Śliżewska K, Markowiak-Kopeć P, Żbikowski A, Szeleszczuk P 2020 The effect of synbiotic preparations on the intestinal microbiota and her metabolism in broiler chickens. *Sci Rep* 10(1):4281.
- Such N, Farkas V, Csitári G, Pál L, Márton A, Menyhárt L, Dublec K 2021 Relative effects of dietary administration of a competitive exclusion culture and a synbiotic product: age and sampling site on intestinal microbiota maturation in broiler chickens. *Vet Sci* 8(9):187.
- Tarabees R, Shehata AA, Allam TS, Dawood A, Gaber M 2023 Effects of probiotics and prebiotics and their combinations on growth performance and intestinal microbiota of broilers infected with mixed *Salmonella* spp. *Alex J Vet Sci* 77(1):12-20.
- Teague KD, Tellez-Isaias G, Chai J, Petrone GV, Vuong CN, Blanch A, Rochell SJ 2023 Dietary soy galactooligosaccharides affect performance, intestinal function and gut microbiota composition of growing chicks. *Poultry Sci* 102(4):102440.
- Temmerman R, Ghanbari M, Antonissen G, Schatzmayr G, Duchateau L, Haesebrouck F, Devreese M 2022 Dose-dependent impact of enrofloxacin on broiler chicken gut resistome is mitigated by synbiotic application. *Front*

- Microbiol 13:869538.
- Torok VA, Hughes RJ, Mikkelsen LL, Perez-Maldonado RA, Balding K, Macalpine R, Percy NJ, Ophel-Keller K 2011 Identification and characterization of potential performance-related gut microbiotas in broiler chickens across various feeding trials. *Appl Environ Microbiol* 77(17):5868-5878.
- Valdes AM, Walter J, Segal E, Spector TD 2018 Role of the gut microbiota in nutrition and health. *BMJ* 361:k2179.
- Vlasatikova L, Zeman M, Crhanova M, Matiasovicova J 2024 Colonization of chickens with competitive exclusion products results in extensive differences in metabolite composition in cecal digesta. *Poultry Sci* 103(1):103217.
- Wadoun R, Florence F, Marie K, Hervé M, Fotsouba T, Colizzi V, François Z 2019 *In vivo* assessment of protein quality and safety of meat derived from broilers fed diet supplemented with probiotics used as substitute to antibiotics. *Integr Food Nutr Metab* 6:264.
- Walsham ADS, Mackenzie D, Cook V, Wemyss HS, Hews CL, Juge N, Schüller S 2016 *Lactobacillus reuteri* inhibition of enteropathogenic *Escherichia coli* adherence to human intestinal epithelium. *Front Microbiol* 7:244.
- Wang X, Zhang P, Zhang X 2021 Probiotics regulate gut microbiota: an effective method to improve immunity. *Molecules* 26(19):6076.
- Wei S, Morrison M, Yu Z 2013 Bacterial census of poultry intestinal microbiome. *Poultry Sci* 92(3):671-683.
- Xia Y, Miao J, Zhang Y, Zhang H, Kong L, Seviour R, Kong Y 2021 Dietary inulin supplementation modulates the composition and activities of carbohydrate-metabolizing organisms in the cecal microbiota of broiler chickens. *PLOS ONE* 16(10):e0258663.
- Yadav S, Singh AK, Selvaraj RK, Applegate TJ 2024 Research note: effect of dietary xylo-oligosaccharide on growth performance, intestinal histomorphology and specific cecal bacteria in broiler chickens. *Poultry Sci* 103(1):103189.
- Yang G, Yin Y, Liu H, Liu G 2016 Effects of dietary oligosaccharide supplementation on growth performance, concentrations of major odor-causing compounds in excreta and the cecal microflora of broilers. *Poultry Science*. 2(1):101-113.
- Yasui H, Kiyoshima J, Ushijima H 1995 Passive protection against rotavirus-induced diarrhea of mouse pups born to and nursed by dams fed *Bifidobacterium breve* YIT4064. *J Infect Dis* 172(2):403-409.
- Yoo JY, Groer M, Dutra S, Sarkar A, McSkimming D 2020 Gut microbiota and immune system interactions. *Microorganisms* 8(10):1587.
- Zhang S, Dogan B, Guo C, Herlekar D, Stewart K 2020 Short-chain fatty acids modulate the growth and virulence of pathosymbiont *Escherichia coli* and host response. *Antibiotics* 9(8):462.
- Zhou H, Yu B, He J, Mao X, Zheng P, Yu J, Luo J, Luo Y, Yan H, Chen D 2020 Optimal combination of dietary starch, non-starch polysaccharides and mannan-oligosaccharide increases growth performance and improves butyrate-producing bacteria of weaned pigs. *Animals* 10(10):1745.

Received Dec. 15, 2025, Revised Dec. 18, 2025, Accepted Dec. 19, 2025