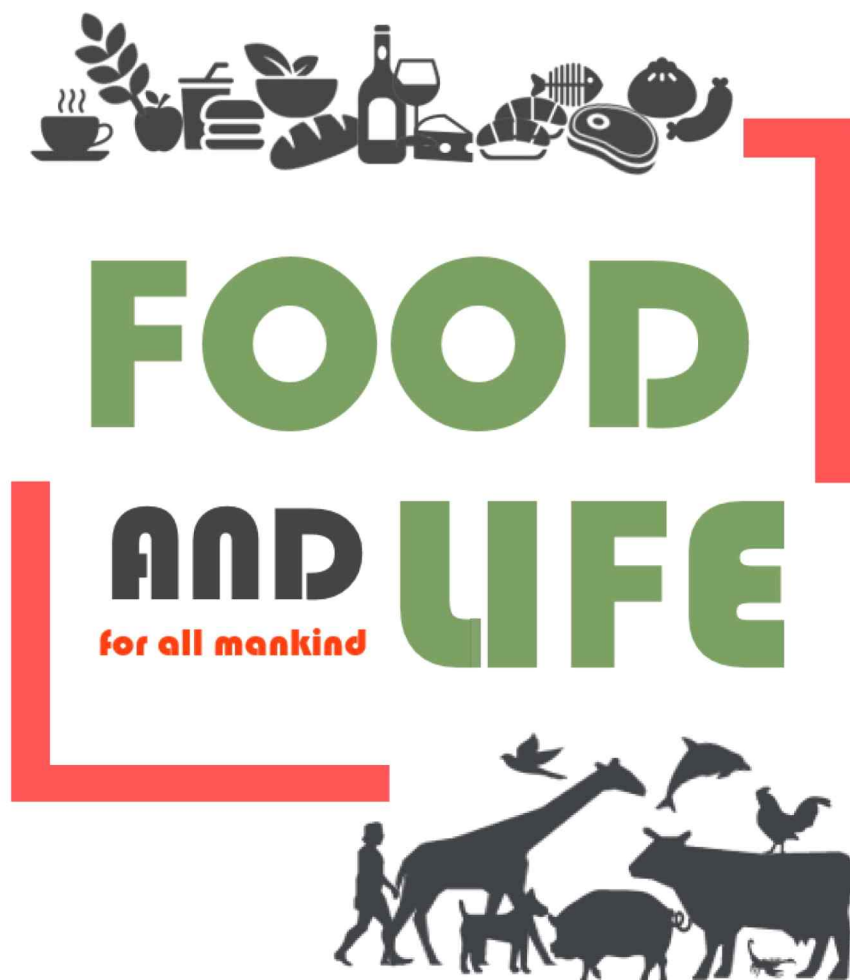




The Food and Life has published all type articles such as research articles, review articles, survey articles, research note, short communication or editorial since 2020. It covers the all scientific and technological aspects of food and life science.

<https://www.foodnlife.org>



식용곤충의 미생물학적 안전성과 위생관리: 현황 및 규제 동향

여소은^{1,†}, 남채민^{1,†}, 유리나¹, 조현욱¹, 전서현¹, 김주민², 이민영², 곽민석², 홍성준², 용해인^{1,2,*}

¹충남대학교 축산학과

²충남대학교 동물자원과학부

Microbiological safety and hygiene management of edible insects: current status and regulatory perspectives

So Eun Yeo^{1,†}, Chemin Nam^{1,†}, Rina Yu¹, Hyun Uk Cho¹, Seohyeon Jeon¹, Jumin Kim², Minyoung Lee², Minseok Kwak², Seong Jun Hong², Hae In Yong^{1,2,*}

¹Department of Animal Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Division of Animal and Dairy Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Abstract

Edible insects are recognized as sustainable alternative proteins to address global food security challenges. However, ensuring microbiological safety is needed for industrial expansion. This review highlights microbial contamination, hygiene management, and regulatory frameworks of edible insects. Edible insects have a diverse microbiota influenced by species, rearing environments, and feed substrates. They contain the human foodborne pathogens and entomopathogenic microorganisms, presenting dual risks to consumer health and insect productivity. Although conventional processing methods, such as drying and roasting, can reduce microbial loads, certain bacteria survive, posing a critical risk of post-processing secondary contamination. To mitigate these risks, implementing an integrated "farm-to-table" hygiene management system is essential. Furthermore, an analysis of global regulatory frameworks reveals significant inconsistencies; whereas the European Union has strict "novel food" regulations, many countries still do not have specific rules for insects. The sustainable growth of the edible insect industry requires specific risk assessments, worldwide standards, and the adoption of advanced processing technologies to ensure food safety without compromising nutritional quality.

Keywords: edible insect, microbiological safety, hygiene, regulatory status

서론

전 세계 인구는 2050년까지 약 99억 명으로 증가할 것으로 예상되며, 2050년까지 동물성 식품의 수요는 약 5억 5천만 톤에 이를 것으로 전망된다(Oh and Kim, 2025). 그러나, 기후변화의 심화와 자원 고갈 문제로 인해 전통적인 축산만으로는 증가하는 미래 인구의 동물성 단백질 수요를 충족하기 어려울 것으로 보고되고 있다(Jang et al., 2025; Oh and Kim, 2025). 이러한 배경 속에서 단백질이 풍부한 대체 자원의 필요성이 커지고 있으며, 식용곤충은 유망한 단백질 대체원으로 주목받고 있다.

식용곤충은 인간이 섭취할 수 있는 곤충을 의미하며, 단백질뿐만 아니라 불포화지방산, 비타민, 무기질 등 다양한 영양소를 풍부하게 함유하고 있다(Murefu et al., 2019). 이러한 영양적 우수성과 함께, 사료전환효율이 높고 온실가스 배출이 적어 환경친화적인 식품 자원으로 평가된다(Aguilar-Toalá et al., 2022). 또한 사육 면적이 적고, 짧은 생육 주기와 높은 번식력을 지녀 생산성이 뛰어나 차세대 단백질 공급원으로 주목받고 있다(Aguilar-Toalá et al., 2022). 이러한 특성과 성장 가능성을 바탕으로, 우리나라에서도 식용곤충이 제도적으로 인정되었다. 2019년 7월 「축산법 시행규칙」 개정을 통해 식용곤충이

[†] These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author : Hae In Yong, Department of Animal Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea. Tel: +82-42-821-5775, E-mail: yonghaein@cnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

‘가축으로 정하는 기타 동물’의 범주에 포함되었으며, 현재 총 10종의 곤충이 식용으로 허용되어 있다(Kim et al., 2025a). 허용된 식용곤충에는 벼메뚜기(*Oxya sinuosa*), 누에(*Bombyx mori*) 번데기, 백강잠, 갈색거저리(*Tenebrio molitor*) 유충, 흰점박이꽃무지(*Protaetia brevitarsis*) 유충, 장수풍뎅이(*Allomyrina dichotoma*) 유충, 쌍별귀뚜라미(*Gryllus bimaculatus*), 아메리카 왕거저리(*Zophobas atratus*) 유충, 수벌(*Apis mellifera*) 번데기, 풀무치(*Locusta migratoria*) 등이 포함된다(Kim et al., 2025b). 이와 함께 다양한 형태의 섭취와 제품화가 이루어지면서, 식용 곤충의 소비와 활용이 점차 확대되고 있다.

최근 식용곤충은 단순히 건조하거나 분말 형태로 소비되는 수준을 넘어, 쿠키, 스낵, 단백질바 등과 같은 가공식품의 형태로도 활용되고 있다(Fraqueza and da Silva Coutinho Patarata, 2017). 이처럼 식품 원료로서의 활용이 확대됨에 따라, 최근에는 그 범위가 식품을 넘어 다양한 산업 소재로까지 확장되고 있다. 특히, 식용곤충에는 단백질, 지질, 키틴 등 여러 생리활성 성분이 함유되어 있으며, 이러한 성분들은 각각 고유한 기능적 특성과 산업적 가치를 지니고 있다(Cha et al., 2025). 예를 들어, 귀뚜라미와 밀웬 등에서 유래한 단백질은 항산화·항염증 등 생리활성을 지닌 펩타이드로 전환될 수 있어 기능성 식품이나 의약·화장품 소재로 활용되고 있다(Cha et al., 2025). 또한, 식용곤충 유래 지질과 키틴·키토산은 불포화지방산과 생분해성, 항균성 등의 특성을 바탕으로 기능성 식품, 사료, 친환경 산업 소재 등 다양한 분야에서 응용되고 있다(Cha et al., 2025).

하지만 식용곤충은 여러 장점에도 불구하고, 다른 동식물성 식품과 마찬가지로 섭취 과정에서의 안전성 문제가 여전히 중요한 과제로 지적되고 있다(Lange and Nakamura, 2021). 식용 곤충의 안전성은 주로 알레르기 유발 물질뿐만 아니라 화학적 및 생물학적 위험 요소를 포함한 다양한 인체 건강 위험 요소와 관련이 있다. 이 가운데서도 미생물학적 위해 요소는 가공 전 과정에 교차오염을 일으킬 수 있기에 가장 핵심적인 문제로 꼽힌다(Lange and Nakamura, 2021). 여러 연구에 따르면 식용 곤충의 미생물 수는 비교적 높은 수준으로 보고되고 있으며, 일부 병원성 미생물은 열처리나 건조 공정 이후에도 잔존할 가능성이 제기되고 있다. 또한, 유럽식품안전청(European Food Safety Authority, EFSA)은 곤충을 식용으로 활용할 때 발생할 수 있는 위험성을 평가한 결과, 인간의 건강에 미치는 영향이 곤충의 사육 환경과 가공 방식에 따라 달라진다고 밝혔다. Schabel(2010)의 연구에서도 이와 유사한 결과가 확인되었으며, 식용곤충의 안전성이 곤충의 종, 섭취하는 먹이, 서식 환경, 그리고 생산 및 가공 방법 등에 의해 크게 좌우되는 것으로 나타났다. 이처럼 다양한 요인이 복합적으로 작용하며, 소비자들은 식용곤충의 안전성 확보와 이에 대한 신뢰성을 보장할 수 있는 관리 체계의 필요성을 지속적으로 제기하고 있다(Murefu

et al., 2019).

전 세계적으로 식용곤충의 섭취와 활용이 빠르게 확대되면서, 관련 산업 또한 새로운 식품 자원으로 자리 잡아가고 있다. 그러나 산업의 성장과 함께 위생 및 안전 관리의 중요성이 더욱 부각되고 있으며, 특히 미생물 오염을 비롯한 식품 안전 문제는 소비자 신뢰와 시장 확대에 직접적인 영향을 미치고 있다. 따라서 이러한 미생물 오염 현황과 위생 관리 실태를 함께 살펴보고, 더 나아가 식용곤충 산업이 활발히 전개되고 있는 주요 국가들의 위생관리 체계와 법·제도적 대응 현황을 검토함으로써, 향후 식용곤충 산업의 안전성 확보 및 지속가능한 발전 방향을 모색하고자 한다.

식용곤충의 미생물학적 안전성

식용곤충 미생물 오염 현황

식용곤충은 높은 단백질 함량과 환경친화적 생산성으로 주목받고 있으나, 미생물 오염에 따른 안전성 확보가 중요한 과제로 지적되고 있다. 곤충은 사육 환경과 사료, 종(species)에 따라 다양한 미생물 생태계를 형성하고 있으며, 생체 내·외부에서 중온성 호기성균, 포자형성균, 장내세균과(*enterobacteriaceae*), 유산균(*lactic acid bacteria*), 효모(*yeast*), 곰팡이(*fungi*) 등이 다량 검출되는 것으로 보고된다(Yan et al., 2023).

실제로 Stoops 등(2016)은 *T. molitor* 유충에서 총 호기성 생균수가 약 8 Log CFU/g에 달하며, 유산균과 장내세균과는 각각 약 7 Log CFU/g 수준으로 검출되었다고 보고하였다. 또한 효모와 곰팡이는 약 5 log CFU/g, 포자형성균은 3 Log CFU/g 이하로 확인되었다. 한편, *L. migratoria*에서는 총 호기성 생균수 7.8-8.6 Log CFU/g, 유산균 7.6-8.5 Log CFU/g, 장내세균과 7.1-7.6 Log CFU/g, 박테리아 내생포자 3.3-3.8 Log CFU/g, 효모와 곰팡이 5.0-5.4 Log CFU/g 수준이 보고되었다(Stoops et al., 2016). 또한 Klunder 등(2012)은 미국과 영국에서 식용으로 소비되는 집귀뚜라미(*Acheta domesticus*)에서 총생균수 7.2 Log CFU/g, 장내세균과 4.2 Log CFU/g, 박테리아 내생포자 3.6 Log CFU/g를 확인하였다. 그 외에도 식용곤충의 미생물 부하와 오염 수준에 대한 다양한 연구가 보고된 바 있다(Table 1). 이러한 결과는 식용곤충이 일반 육류나 어패류보다 훨씬 높은 수준의 미생물 부하를 가진다는 점을 보여준다. 특히 이들 중 일부는 *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* 등과 같이 인체에 위해를 줄 수 있는 식중독균이며, *Bacillus thuringiensis*나 *Serratia marcescens*와 같은 곤충병원성균도 존재한다.

미생물 오염은 사육 환경 및 조건(기질과 사료의 위생 상태), 비위생적인 취급 및 저장 과정 등 다양한 요인으로부터 유발될 수 있다(Yan et al., 2023). 예를 들어 *T. molitor* 유충은 체질

Table 1. Microbial contamination status by edible insect species

Insect species	Microbial count (Log CFU/g)					References
	Total viable count	Enterobacteriaceae	Lactic acid bacteria	bacterial endospore	Yeast and fungi	
<i>Tenebrio molitor</i>	7.7-8.3	6.8-7.6	7.0-7.6	<1.0-3.5	5.2-5.7	Stoops et al. (2016)
<i>Ruspolia differens</i>	8.4-9.4	6.9-7.8	8.0-9.1	3.8-4.9	5.8-7.1	Ssepuuya et al. (2019)
<i>Bombyx mori</i>	8.0-8.3	4.3-5.1	ND	–	5.6-6.1	Kurdi et al. (2021)
<i>Gryllus bimaculatus</i>	7.9-8.0	6.1-6.3	ND	–	5.2-6.0	Kurdi et al. (2021)
<i>Gryllobates sigillatus</i>	8.2-8.5	7.2-7.5	6.7-7.8	3.5-3.8	5.6-6.0	Vandeweyer et al. (2018)
<i>Acheta domesticus</i>	8.1-8.8	7.4-8.0	7.4-8.1	2.8-4.2	5.9-7.1	Vandeweyer et al. (2017)
<i>Locusta migratoria</i>	7.8-8.6	7.1-7.6	7.6-8.5	3.3-3.8	5.0-5.4	Stoops et al. (2016)

ND, not detected.

(cleaning) 과정 이전에 배설물과 밀접하게 접촉하기 때문에, 관리가 부적절할 경우 교차오염이 발생할 수 있다(Yan et al., 2023). 또한 곤충 사육 시 사용되는 사료나 기질이 충분히 건조되지 않거나 미생물에 오염되어 있을 경우, 병원성균이 증식하기 쉬운 환경이 형성된다(Yan et al., 2023). 특히 식용곤충은 공간 활용 효율을 높이기 위해 밀폐되고 밀집된 공간에서 대량으로 사육되는 경우가 많아, 곤충 간 접촉이나 공기 중 미생물 입자(aerosol)를 통한 교차 오염이 발생하기 쉽다(Kim et al., 2020). 이 과정에서 곤충병원성균이 확산되면 사육 효율 저하나 대량 폐사로 이어질 수 있으며, 동시에 *Salmonella* spp. 또는 *Escherichia coli*와 같은 인체병원균이 공기, 사료, 작업자 등을 통해 전이될 경우 관리자 노출 위험 및 식품 안전 문제로 확대될 가능성이 있다(Kim et al., 2020). 이러한 특성으로 인해 식용곤충은 사육 단계에서 지속적으로 높은 미생물 오염 부담에 노출될 수 있으며, 생산 및 가공 전반에 걸친 체계적인 위생관리의 중요성이 지속적으로 강조되고 있다(Kim et al., 2020; Lange and Nakamura, 2021; Murefu et al., 2019; Yan et al., 2023).

이처럼 식용곤충은 종에 따라 생리적 특성, 장내 환경, 사료 섭취 방식, 군집 행동 및 사육 환경이 상이하기 때문에 서로 다른 미생물 군집 구조를 형성한다(Gałęcki et al., 2023). 그러나 현재까지 식용곤충의 사육 환경은 종 간 차이뿐만 아니라 동일 종 내에서도 국가별·지역별 사육 환경, 사육 방식, 사육 사료 및 사육업체에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, 이에 대한 체계적

인 표준화가 충분히 이루어지지 않은 실정이다. 이러한 이유로 사육 환경과 식용곤충에서 검출되는 미생물 간의 상관관계 및 오염 기전을 명확히 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 식용곤충별 우점 미생물군의 특성과 환경적 영향 요인을 체계적으로 분석하고, 이를 기반으로 사육 시스템 및 위생관리 전략을 과학적으로 확립하는 것은 산업화 과정에서 매우 중요하다. 특히 이러한 접근은 대량생산 공정에서의 병원성 미생물 제어, 저장 안정성 확보, Hazard Analysis and Critical Control Points(HACCP) 기반 위생관리 체계 구축 및 국가 차원의 식용곤충 안전관리 기준 마련에 필수적인 요소로 판단된다.

이러한 미생물학적 위험을 저감하고 제품의 저장 안정성을 확보하기 위해, 대부분의 식용곤충은 섭취 전 다양한 조리 및 가공 공정을 거쳐 소비된다. 대표적인 조리 방법으로는 삶기(steaming), 구이(roasting), 훈제(smoking), 튀김(frying), 조림(stewing) 등이 있으며, 이러한 공정은 식용곤충의 기호성과 풍미를 개선하기 위한 목적으로 활용된다(Aguilar-Toalá et al., 2022). 또한, 식용곤충은 분말(powder), 압출 성형 제품(extruded form), 또는 전충체 건조(dried whole insect) 등 다양한 형태로 가공되어 식품 원료로 이용되고 있다(Aguilar-Toalá et al., 2022). 이러한 가공 공정은 대부분 열처리나 건조(수분 제거) 단계를 포함하므로, 미생물 부하 저감과 저장 안정성 향상에도 직접적인 영향을 미친다. 그러나 여러 연구에서 보고된 바와 같이, 조리나 건조 후에도 일부 세균, 특히 내열성 포자형성균

이 잔존하는 사례가 확인되고 있다. 실제로, Osimani 등(2017)은 건조된 *T. molitor* 유충에서 총 생균수 4.1–4.4 Log CFU/g, 젖산균 1.7–2.8 Log CFU/g 수준으로 검출되었다고 보고하였다. 또한 건조된 *L. migratoria* 시료에서는 총 생균수 약 4.1 Log CFU/g, 젖산균 2.4 Log CFU/g, 효모 및 곰팡이 2.0 Log CFU/g 이 검출되었으며, *B. cereus* 역시 약 2.1 Log CFU/g 수준으로 확인되었다. Garofalo 등(2017) 또한 건조된 *A. domesticus* 시료에서 총 생균수 4.0–4.5 Log CFU/g, 젖산균 4.1–4.5 Log CFU/g, 효모 및 곰팡이 4.5–5.1 Log CFU/g 수준을 보고하였으며, 건조된 *L. migratoria*의 경우 총 생균수 2.0–2.4 Log CFU/g, 젖산균 2.0–2.1 Log CFU/g 수준으로 나타났다. 그 외에도 가공 후 식용곤충의 미생물 부하를 평가한 다양한 연구 결과가 보고된 바 있다(Table 2).

이처럼 식용곤충의 미생물 오염은 사육 단계에서부터 가공 및 저장에 이르기까지 다양한 요인에 의해 영향을 받으며, 적절한 위생 관리가 이루어지지 않을 경우 병원성 미생물의 잔존 및 재오염으로 이어질 수 있다. 특히 일부 세균은 건조나 열처리와 같은 일반적인 가공 공정을 거친 이후에도 완전히 제거되지 않아, 제품의 위생적 안전성 확보를 위해 잠재적 병원균에 대한 지속적인 감시가 필요하다.

식용곤충 내 병원성 미생물

곤충에는 다양한 미생물이 존재하며, 이 중 일부는 인체에 병원성을 가진 미생물의 매개체로 작용할 수 있음이 보고되고 있다(Fraqueza and da Silva Coutinho Patarata, 2017). 식용곤충의 주요 미생물 군집에는 장내세균과 제열(*Proteus*, *Escherichia*)을 비롯하여 *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Lactobacillus*, *Acinetobacter* 등이 포함되는 것으로 알려져 있다(Fraqueza and da Silva Coutinho Patarata, 2017). 이 중 일부 속(genus)은 인체 병원체와 직접적으로 연관되어 있으며, 대표적인 병원균으로는 *Campylobacter*, verotoxigenic *E. coli*(VTEC), *Salmonella*, *Listeria monocytogenes* 등이 보고된다(Fraqueza and da Silva Coutinho Patarata, 2017). 이러한 병원균은 가공되지 않은 상태의 곤충에서 존재할 가능성이 있으므로, 지속적인 모니터링과 위생관리가 필수적이다.

한편, 곤충 역시 다양한 병원성 미생물에 의해 발생하는 전염병으로부터 완전히 자유롭지 않다. 곤충에 질병을 일으키는 미생물은 일반적으로 곤충병원성 미생물이라 하며, 곤충에서 감염을 일으키거나, 질병에 걸린 곤충 개체에서 흔히 발견되는 병원체로는 바이러스(viral), 곰팡이(fungal), 세균(bacterial), 미

Table 2. Microbial contamination status of processed edible insect species

Insect species	Processing method	Microbial count (Log CFU/g)				References
		Total viable count	Enterobacteriaceae	Lactic acid bacteria	bacterial endospore	
<i>Tenebrio molitor</i>	Drying	4.1–4.4	<1.0	1.7–2.8	<1.0	Osimani et al. (2017)
	Frying	2.1–2.4	<1.0	<1.0	2.0–2.1	Ng'ang'a et al. (2019)
<i>Ruspolia differens</i>	Roasting	2.0–2.2	<1.0	<1.0	2.0–2.1	Ng'ang'a et al. (2019)
	Smoking	2.2–2.4	<1.0	<1.0	2.6–2.8	Ng'ang'a et al. (2019)
<i>Gryllodes sigillatus</i>	Drying	3.9–4.3	<1.0	<2.0	–	Vandeweyer et al. (2018)
	Smoking + Drying	7.0–7.9	<1.0	<2.0	–	Vandeweyer et al. (2018)
<i>Acheta domesticus</i>	Drying	4.0–4.5	<2.0	4.1–4.5	4.5–5.1	Garofalo et al. (2017)
	Powdering	3.9–4.8	<2.0	<2.0	<2.0	Garofalo et al. (2017)
<i>Locusta migratoria</i>	Drying	2.0–2.4	<2.0	2.0–2.1	<2.0	Garofalo et al. (2017)
		4.0–4.2	<1.0	2.38–2.42	2.0–2.2	Osimani et al. (2017)

포자충(microsporidian) 등이 있다(Table 3). 이들 중 세균과 바이러스는 주로 섭식 과정을 통해 감염이 이루어지며, 곤충병원

성 곰팡이는 표피를 직접 침투하여 병을 유발한다(Han et al., 2013). 또한, 곰팡이-세균, 곰팡이-바이러스, 혹은 곰팡이-세균

Table 3. Pathogens directly or indirectly associated with diseases in edible insects

Insect species	Microbial group	Microbial species
<i>Tenebrio molitor</i>	Fungi	◦ <i>Beauveria bassiana</i> ◦ <i>Isaria fumosoroseus</i> ◦ <i>Metarhizium anisopliae</i>
	Virus	◦ <i>Densovirus</i>
	Bacteria	◦ <i>Bacillus subtilis</i> ◦ <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ◦ <i>Rickettsiella popilliae</i> ◦ <i>Serratia marcescens</i>
	Protozoa	◦ <i>Nosema whitei</i>
	Fungi	◦ <i>Beauveria bassiana</i>
<i>Bombyx mori</i>	Virus	◦ <i>Densovirus</i> ◦ <i>Baculovirus</i> ◦ <i>Reovirus</i> ◦ <i>Bidnavirus</i> ◦ <i>Iflavirus</i>
	Bacteria	◦ <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ◦ <i>Serratia marcescens</i> ◦ <i>Bacillus cereus</i> ◦ <i>Bacillus thuringiensis</i> ◦ <i>Klebsiella granulomatis</i> ◦ <i>Streptococcus pneumoniae</i>
	Protozoa	◦ <i>Nosema whitei</i> ◦ <i>Nosema bombycis</i>
	Fungi	◦ <i>Metarhizium anisopliae</i> ◦ <i>Metarhizium flavoviridae</i>
	Virus	◦ <i>Densovirus</i>
<i>Zoophobas morio</i>	Bacteria	◦ <i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	Virus	◦ <i>Densovirus</i> ◦ <i>Iridovirus</i> ◦ <i>Nudivirus</i>
	Bacteria	◦ <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ◦ <i>Rickettsiella grylli</i>
	Bacteria	◦ <i>Paranosema grylli</i>
	Fungi	◦ <i>Beauveria bassiana</i> ◦ <i>Metarhizium anisopliae</i> ◦ <i>Metarhizium acridum</i> ◦ <i>Isaria fumosoroseus</i>
<i>Locusta migratoria</i>	Virus	◦ <i>Iridovirus</i> ◦ <i>Entomopox-virus</i>
	Bacteria	◦ <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ◦ <i>Serratia marcescens</i> ◦ <i>Rickettsiella grylli</i>
	Protozoa	◦ <i>Paranosema locusta</i> ◦ <i>Johennaea locusta</i>

Data in table adapted from the following sources (Maciel-Vergara et al., 2021).

바이러스와 같은 복합 감염 형태로 나타나는 경우도 흔히 보고되고 있다(Kwak et al., 2015). 대표적인 곤충병원성 미생물로는 *B. thuringiensis*, *S. marcescens*, *Beauveria bassiana* 등이 있으며, 이들은 식용곤충 산업에서 자주 보고되는 병원체로, 곤충의 폐사, 성장 지연, 생산성 저하를 초래한다. 특히 *S. marcescens*는 *B. mori*와 *P. brevitarsis* 유충 등에서 치명적인 병원성을 나타내며, 동시에 기회감염성 병원체로서 면역 저하 환자에게 감염을 유발할 수 있는 인체 병원성도 가진 것으로 알려져 있다. 또한, *B. thuringiensis* 역시 *P. brevitarsis* 유충과 *A. dichotoma* 등에서 감염사례가 보고된 바 있으며, 일반적으로는 인체에 병원성이 없는 것으로 알려져 있으나, 식중독균인 *B. cereus*와 유사한 장독소 유전자를 보유하고 있어 식중독 발생과의 연관 가능성이 제기되고 있다(Schwenk et al., 2020). *B. thuringiensis*는 *B. cereus*와 설사형 식중독과 관련된 주요 장독소 유전자인 hemolysin A, non-hemolytic enterotoxin A, cytotoxin K, 및 enterotoxin FM 등을 공통적으로 보유하며, hemolysin BL, non-hemolytic enterotoxin, cytotoxin K와 같은 포유류 세포에 대한 세포독성 및 장관 독성을 유도할 수 있다(Kim et al., 2015). 이러한 *Bacillus* spp. 내생포자는 일반적인 조리조건을 포함한 물리적 및 화학적 처리 등에 높은 저항성을 나타내어 가공 이후에도 생존할 수 있으며, 이에 따라 독소 생성 능력을 유지한 채 잔존할 가능성을 배제하기 어렵다(Cho and Chung, 2020). 따라서 식용곤충 유래 *B. thuringiensis*의 식품안전성 평가 시에는 단순 균 수 기준에 그치지 않고, 장독소 활성을 종합적으로 고려한 위해성 평가 체계의 구축이 요구된다.

이와 같이, 식용곤충에는 인체 식중독을 유발하는 병원성 세균뿐만 아니라, 곤충 자체에 감염을 일으키는 곤충병원성균도 존재한다(Fig. 1). 또한, 곤충병원성균 중 일부는 인체에서도 병원성을 나타낼 가능성이 보고된다. 이러한 미생물은 곤충의 생육 안정성과 생산성은 물론, 소비자의 건강에도 잠재적 위험을 미칠 수 있으므로, 사육에서 가공·유통에 이르는 전 과정에서

의 철저한 위생관리와 병원균 감시 체계 운영이 요구된다.

다만, 앞서 언급한 바와 같이 식용곤충은 균종뿐만 아니라 국가별·지역별 사육 환경, 사육 방식, 사육 사료 및 사육업체에 따라서도 미생물 분포 양상에 큰 차이를 나타내며, 가공 공정에 따른 미생물 저감 효과 또한 서로 상이하게 보고되고 있다. 따라서 이러한 다양한 요인과 미생물 오염 특성 간의 연관성을 체계적으로 규명하기 위한 추가적인 조사와 연구가 필요하며, 이는 향후 식용곤충의 미생물학적 안전성 확보와 효과적인 위생관리 체계 구축을 위한 중요한 방향성이 될 것으로 판단된다.

식용곤충의 식품안전 관리 및 법·제도적 체계

식용곤충 산업은 식량 안보 확보를 위한 대체 단백질 자원으로 주목받고 있지만, 그 활용 확대는 식품 안전성과의 균형 속에서 논의되어야 한다. 특히 곤충 및 곤충 기반 식품의 미생물학적 안전성은 최근 식품산업에서 핵심 연구 주제로 부각되고 있다(Fraqueza and da Silva Coutinho Patarata, 2017). 곤충은 다양한 미생물을 보유할 수 있으며, 일부는 새로운 숙주로의 적응 가능성이 완전히 배제되지 않는다. 또한 곤충이 매개할 수 있는 식중독균은 면역저하자나 과민성 체질의 소비자에게 잠재적 위험 요인으로 작용할 수 있다(Gałęcki et al., 2023).

이러한 위험은 사육 단계부터 가공·유통에 이르는 전 과정에서 체계적인 관리에 의해 상당 부분 통제될 수 있다. 실제로 생물보안 강화, 국제표준(International Organization for Standardization, ISO) 준수, HACCP 기반 위생관리 체계 구축은 식용곤충 산업에서 핵심적인 위험 저감 전략으로 제시되고 있으며, 곤충 사육 역시 기존 축산업과 유사한 수준의 위생 및 수의학적 관리 체계를 적용할 필요가 있다(Gałęcki et al., 2023).

그러나 현재까지 식용곤충에 특화된 법적 규제와 HACCP 적용 체계는 국가별로 편차가 크며, 전반적으로는 아직 정착 단계에 머물러 있다. 이는 곤충이 여전히 ‘신규식품(novel food)’으로 분류되는 특성과 관련이 있다. 그럼에도 불구하고,

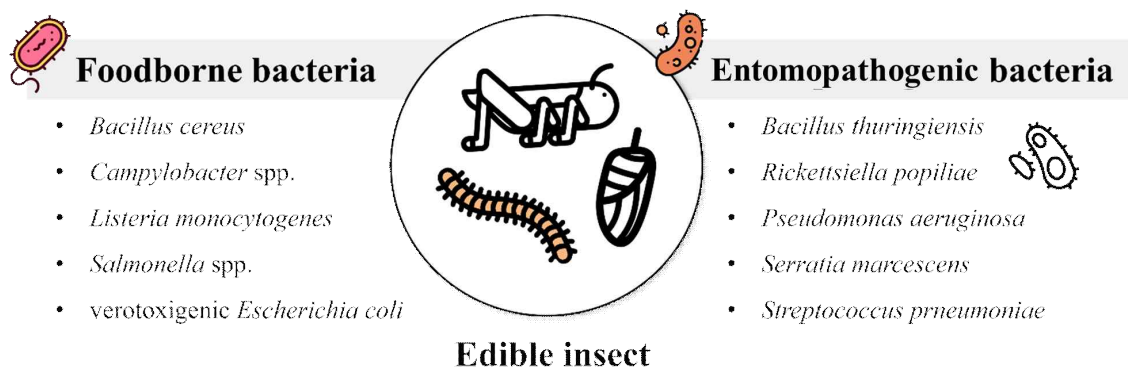


Fig. 1. Foodborne pathogens and entomopathogenic bacteria present in edible insects.

유럽연합을 포함한 일부 국가에서는 제도적 기반을 구축하여 식용곤충의 위생관리와 안전성 확보를 체계적으로 추진하고 있다.

유럽연합의 식용곤충 위생관리 및 규제 체계

유럽연합에서는 식용곤충을 기존 식품 체계 내에서 관리하기 위해 「신규식품규정[Regulation(EU) No. 2015/2283]」과 관련 시행규정을 도입하였으며, 이를 통해 곤충 및 그 유래 성분을 ‘신규식품(novel food)’으로 명확히 규정하였다(Baiano, 2020). 이러한 규제 체계는 식용곤충을 기존 동물성 식품과 유사한 수준에서 관리하도록 설계되었으며, 생산부터 가공에 이르는 전 과정에서 안전성을 확보하는 데 중점을 두고 있다.

특히 식용곤충은 사육동물(farmed animals)의 범주에 포함되기 때문에, 사료 원료 역시 엄격한 제한을 받으며 승인된 식물성 및 동물성 원료만 사용이 가능하다. 또한 사료 및 생산 환경에서의 오염을 최소화하기 위해, 유럽사료법(European Feed Law)과 HACCP 요건을 충족하는 공급체계를 통해 사료를 확보하도록 규정하고 있다(Gałęcki et al., 2023). 이러한 기준은 곤충 사육 단계에서부터 식중독균 유입을 차단하고, 전반적인 위생 수준을 유지하기 위한 핵심 관리 요소로 작용한다.

한편, 유럽연합의 식용곤충 안전관리 체계는 1차 생산 단계와 가공 단계로 구분된 위험 기반 접근을 따른다. 사육 단계에서는 위생적인 생산 환경과 원료 관리가 강조되며, 이후 가공 단계에서는 HACCP 원칙에 따라 공정 전반의 위해요소를 체계적으로 관리하도록 요구된다(Fraqueza and da Silva Coutinho Patarata, 2017; Meijer et al., 2025). 이에 따라 조리, 건조, 분쇄, 포장 등 후처리 공정 역시 동일한 위생관리 기준 하에서 운영되어야 하며, 식용곤충 제품은 일반 식품과 동일한 식품안전 규정의 적용을 받는다.

태국의 식용곤충 법적 및 규제 체계

태국은 식용곤충 산업이 가장 활발한 국가 중 하나로, 약 2만 2천 개 이상의 사육 농장이 운영되고 있으며 이 중 상당수가 귀뚜라미 생산에 집중되어 있다(Reverberi, 2020). 이러한 산업적 특성을 반영하여, 태국 농산물식품표준청(National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, ACFS)은 2017년 귀뚜라미 사육에 특화된 우수농산물관리기준(Good Agricultural Practice, GAP)을 제정하였으며, 이는 사육 단계의 위생 및 품질 관리를 표준화하고 수출 경쟁력 확보를 위한 기반으로 작용하고 있다(Tiwasing et al., 2025).

최근에는 전통적인 조리 형태에서 벗어나 건조 및 분말 형태의 가공 제품이 확대되면서, 식용곤충이 다양한 식품 소재로 활용되고 있다(Reverberi, 2020). 특히 태국은 유럽이나 미국과 달리 사육과 가공 공정이 분리된 구조를 가지며, 이에 따라 가

공 단계에서의 위생 관리가 중요하게 작용한다. 실제로 주요 곤충 분말 제조업체들은 HACCP 인증을 기반으로 운영되며, 태국 식품의약품청(Thai Food and Drug Administration, TFDA)에 등록된 시설에서 생산이 이루어지고 있다(Reverberi, 2020; Siddiqui et al., 2023).

태국의 식용곤충 관련 규제는 보건부(Ministry of Public Health, MOPH)의 감독 하에 운영되며, 곤충을 원료로 한 식품은 사전 승인과 함께 생산 시설 및 제품에 대한 위생 검사를 요구한다(Siddiqui et al., 2023). 그러나 현재까지 사육·가공 전반을 포괄하는 세부 규정은 완전히 정립되지 않은 상태로, 향후 표준화 및 제도적 보완이 필요한 것으로 평가된다(Pinheiro et al., 2025).

기타 해외 국가의 식용곤충 법적 및 규제 체계

미국에서는 식용곤충이 「식품·의약품·화장품법(Food, Drug, and Cosmetic Act)」에 따라 미국 식품의약품국(U.S. Food and Drug Administration, FDA)의 관리 대상에 포함된다(Pinheiro et al., 2025). 일반 식품과 마찬가지로, 식용곤충은 과학적 근거를 통해 안전성이 입증될 경우 일반적으로 안전하다고 인정된 식품(generally recognized as safe, GRAS)으로 분류될 수 있다(Pinheiro et al., 2025). GRAS로 인정되지 않은 경우 별도의 식품첨가물 승인을 받아야 하며, 식품의 구성성분에 영향을 줄 수 있는 경우 FDA의 사전심사와 승인이 필요하다(Larouche et al., 2023). 비록 곤충을 식품으로 규정하는 명시적인 법령은 아직 없지만, FDA는 “식용 의도로 사용되며 다른 식품과 동일한 위생·표시 기준을 준수한다면 곤충을 식품으로 간주할 수 있다”는 공식 입장을 밝힌 바 있다(Larouche et al., 2023). 이에 따라 모든 식용곤충 제품은 위생, 안전, 표시 기준을 충족해야 하며, 우수제조관리기준(Good Manufacturing Practice, GMP)에 따라 생산되어야 한다(Pinheiro et al., 2025). 특히, 야생에서 채집되었거나 동물 사료용으로 사육된 곤충은 식용 원료로 사용하는 것이 금지되어 있다(Pinheiro et al., 2025).

캐나다의 식품 규제 체계에 따르면, 다른 국가에서 전통적으로 안전한 섭취되어 온 이력이 문서로 확인된 식품은 별도의 추가 규제 없이 판매가 가능하다(Larouche et al., 2023). 다만, 이를 위해서는 먼저 신규성 판정 절차를 거쳐야 한다. 이러한 기준에 따라, *T. molitor*와 열대집귀뚜라미(*G. sigillatus*) 등은 이미 비신규식품(nonnovel food)의 범주에 포함되어 있으나, 메뚜기나 아메리카동애등애(*Hermetia illucens*)와 같은 종은 별도의 안전성 평가가 필요하다(Pinheiro et al., 2025). 식품 안전과 위생 관리는 캐나다식품검사청(Canadian Food Inspection Agency, CFIA)이 담당하며, 이러한 연방 규정 외에도 각 주 정부는 생산 및 가공 관련 관리·감독을 독립적으로 수행한다(Pinheiro et al., 2025).

반면, 대부분의 아프리카 국가에는 식용곤충에 대한 명확한 법규가 마련되어 있지 않다(Pinheiro et al., 2025). 예를 들어, 남아프리카공화국은 여러 정부 기관이 식품 및 사료 안전을 개별적으로 관리하고 있으나, 곤충 사육이나 곤충 기반 식품에 관한 전용 법령은 존재하지 않는다(Pinheiro et al., 2025). 이 지역에서는 곤충이 신규식품(novel food)으로 분류되지 않는다는 점도 특징적이다(Pinheiro et al., 2025).

국내 식용곤충 법적 및 규제 체계

한국의 식용곤충 산업은 「곤충산업의 육성 및 지원에 관한 법률」을 기반으로 제도적 지원을 받고 있으며, 식용이 허용된 곤충 종의 범위도 점차 확대되고 있다. 또한 일부 곤충종에 대해서는 중금속과 같은 안전성 지표에 대한 기준이 마련되거나 보완되면서, 관리 체계가 점진적으로 구체화되는 추세이다(Han et al., 2017). 그러나 현재까지 사육, 가공, 유통 전 과정을 통합적으로 관리할 수 있는 전용 위생·안전 기준은 충분히 확립되지 않은 상태이다. 이로 인해 현장에서는 기존 식품 또는 축산물 관련 기준을 준용하는 방식으로 위생관리가 이루어지고 있으며, 그 결과 생산 공정 간 편차와 품질의 불균형이 발생할 가능성이 존재한다. 이러한 한계를 고려할 때, 표준화된 관리 체계와 함께 실질적인 현장 적용을 위한 교육 및 훈련 프로그램의 구축이 필요하다는 지적이 지속적으로 제기되고 있다(Han et al., 2017).

이러한 상황은 한국 식용곤충 산업이 높은 성장 잠재력을 보유하고 있음에도 불구하고, 제도적 측면에서는 아직 개선이 필요한 단계에 있음을 보여준다. 특히 HACCP 적용의 비의무성, 위생관리 수준의 일관성 부족, 표준화된 안전 기준의 부재 등은 향후 해결해야 할 주요 과제로 제시된다(Kim et al., 2019). 곤충의 생물학적 특성을 반영한 위생·안전 기준의 정립과 함께 HACCP 적용 확대 및 현장 중심의 교육 강화가 이루어진다면, 산업의 안정성과 소비자 신뢰 확보에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다(Kim et al., 2019). 더 나아가 식용곤충산업 선진화 국가들의 통합 안전망과 중심적 위생 표준화 등 장점을 융합한다면, 식용 곤충의 안전성을 확보함과 동시에 경쟁력을 제고하는 한국형 규제 체계를 확립할 수 있을 것으로 판단된다.

식용곤충 규제 체계의 국가별 비교

앞서 언급한 바와 같이, 식용곤충 산업에 대한 규제 체계는 국가별로 상이하며 각 제도는 서로 다른 장점과 한계를 지닌다. 유럽연합(European Union, EU)은 엄격한 신규식품(novel Food) 규정과 사료법을 연계하여 생산부터 가공에 이르는 전 과정에 대한 통합적인 안전관리 체계를 구축하고 있으며, 이를 통해 높은 수준의 소비자 신뢰 확보가 가능하다는 장점이 있지만, 복잡하고 까다로운 승인 절차는 산업 진입 장벽으로 작용할 수

있다는 한계도 존재한다(Baiano, 2020; Gałęcki et al., 2023). 태국의 경우 사육 단계는 GAP, 가공 단계는 HACCP 기반으로 운영되는 분리·분업화된 관리 구조를 갖추고 있어 가공 공정에서의 위생관리를 강조하는 특징을 가진다(Reverberi, 2020; Siddiqui et al., 2023). 그러나 공급망 전반을 포괄하는 통합적 이력추적 시스템과 교차오염 방지 체계는 상대적으로 미흡하다는 한계가 지적되고 있다(Pinheiro et al., 2025). 미국과 캐나다의 식용곤충에 대한 별도의 전용 법령을 마련하기보다는 기존 식품 규제 체계(GRAS, 비신규식품 인정 등)를 유연하게 적용하고 있으나, 기존 인정 범위에 포함되지 않는 식용곤충의 경우에는 별도의 안전성 평가가 요구된다는 제한점이 있다(Larouche et al., 2023; Pinheiro et al., 2025). 아프리카 국가들은 아직까지 곤충을 신규식품(novel food)으로 분류하지 않고 있으며, 이에 대한 명확한 법규가 아직 마련되어 있지 않다(Pinheiro et al., 2025). 한국은 법률 제정을 통한 국가 주도의 산업 육성 체계를 구축하고 있으나, 식용곤충의 생물학적 특성을 반영한 세부 위생 기준이 아직 부족하고 HACCP 적용 또한 의무화되어 있지 않아 현장 단위에서 품질 편차가 발생할 가능성이 존재한다(Han et al., 2017; Kim et al., 2019).

이처럼 식용곤충 규제 수준은 국가별로 큰 차이를 보이며, 일부 국가는 생산부터 유통까지 체계적인 관리 체계를 구축한 반면, 일부 지역에서는 관련 법령의 부재 또는 산업 기반의 제한으로 인해 안전관리 체계가 충분히 정립되지 못한 상황이다(Lee et al., 2024). 이러한 국가 간 규제 격차는 식품 안전 확보 뿐만 아니라 기술 발전과 국제 교역 확대에도 제약 요인으로 작용할 수 있다(Siddiqui et al., 2023). 따라서 식용곤충 산업의 지속적인 성장과 글로벌 시장 확대를 위해서는 국가 간 규제 조화를 기반으로 한 국제적 기준 마련이 필요하며, 이를 통해 산업 경쟁력과 소비자 수용성을 동시에 확보할 수 있을 것으로 판단된다(Lee et al., 2024).

결론

식용곤충 산업은 빠르게 성장하고 있으나, 미생물학적 안전성 확보는 여전히 해결해야 할 핵심 과제로 남아 있다. 곤충은 다양한 미생물의 잠재적 매개체로 작용할 수 있으며, 사육·가공·유통 전 과정에서의 관리가 미흡할 경우 식중독 위험과 품질 저하로 이어질 수 있다. 특히 가공 형태의 다양화는 2차 오염 가능성을 증가시키며, 일부 병원성 미생물과 곤충병원성균은 생산성과 소비자 안전 모두에 영향을 미칠 수 있다.

이러한 위험을 효과적으로 관리하기 위해서는 ‘farm to table’ 개념에 기반한 통합적 위생관리 체계와 지속적인 병원균 모니터링이 필수적이다. 그러나 현재 식용곤충에 특화된 규제 및 관리 기준은 국가별로 상이하며, 국제적으로 통일된 기준 역시 충분히 확립되지 않은 상황이다. 따라서 과학적 근거에

기반한 위험 평가와 함께, 생물보안, HACCP 적용, 국제 표준 준수를 포함한 체계적인 관리 전략이 요구된다. 아울러 산업적 측면에서는 플라즈마, 초음파, 초고압과 같은 비가열 기술과 오믹히팅, 마이크로웨이브 등 다양한 가열 기술의 적용을 통해 안전성과 품질을 동시에 확보할 수 있는 공정 개발이 필요하다.

종합하면, 식용곤충 산업의 지속 가능한 성장을 위해서는 위험 기반 관리체계의 정립, 국제적 규제 조화, 그리고 기술적 혁신이 유기적으로 결합되어야 한다.

Conflicts of Interest

The authors declare no potential conflict of interest.

Acknowledgments

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Ministry of Science and ICT (MSIT) (Project No. RS-2025-24523920).

Ethics Approval

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

Author Contributions

Conceptualization: Yong HI.

Data curation: Yu R.

Formal analysis: Cho HU.

Methodology: Jeon S.

Software: Yu R, Cho HU.

Validation: Jeon S, Kim J.

Investigation: Lee MY, Kwak M, Hong SJ.

Writing - original draft: Yeo SE, Nam C.

Writing - review & editing: Yeo SE, Nam C, Yu R, Cho HU, Jeon S, Kim J, Lee M, Kwak M, Hong SJ, Yong HI.

Author Information

So Eun Yeo (Graduate Student, Chungnam National University)
<https://orcid.org/0009-0008-1843-425X>

Chemin Nam

(Graduate Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0007-4090-090X>

Rina Yu (Graduate Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0005-7233-483X>

Hyun Uk Cho

(Graduate Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0005-8481-0418>

Seohyeon Jeon

(Graduate Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0004-8105-1850>

Jumin Kim

(Undergraduate Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0007-5429-7099>

Minyoung Lee

(Undergraduate Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0008-4108-6126>

Minseok Kwak

(Undergraduate Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0008-7616-2870>

Seong Jun Hong

(Undergraduate Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0008-8221-5887>

Hae In Yong (Professor, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0000-0003-0970-4496>

References

- Aguilar-Toalá JE, Cruz-Monterrosa RG, Liceaga AM. 2022. Beyond human nutrition of edible insects: health benefits and safety aspects. *Insects* 13:1007.
- Baiano A. 2020. Edible insects: an overview on nutritional characteristics, safety, farming, production technologies, regulatory framework, and socio-economic and ethical implications. *Trends Food Sci Technol* 100:35-50.
- Cha JY, Kim YJ, Kim JH, Keum DH, Kim TK, Jung S, Yong HI, Choi YS. 2025. The future of small livestock for food security: food tech of edible insects. *J Anim Food Sci Ind* 14:65-73.
- Cho WI, Chung MS. 2020. Bacillus spores: a review of their properties and inactivation processing technologies. *Food Sci Biotechnol* 29:1447-1461.
- Fraqueza MJR, da Silva Coutinho Patarata LA. 2017. Constraints of HACCP application on edible insect for food and feed. In *Future foods*. Mikkola H (ed). IntechOpen, London, UK.
- Gałęcki R, Bakula T, Gołaszewski J. 2023. Foodborne diseases in the edible insect industry in Europe—new challenges and old problems. *Foods* 12:770.
- Garofalo C, Osimani A, Milanović V, Taccari M, Cardinali F, Aquilanti L, Riolo P, Ruschioni S, Isidoro N, Clementi F. 2017. The microbiota of marketed processed edible insects

- as revealed by high-throughput sequencing. *Food Microbiol* 62:15–22.
- Han JH, Kim H, Leem HT, Kim JJ, Lee S. 2013. Characteristics and virulence assay of entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* for the microbial control of *Spodoptera exigua*. *Korean J Pestic Sci* 17:454–459.
- Han R, Shin JT, Kim J, Choi YS, Kim YW. 2017. An overview of the South Korean edible insect food industry: challenges and future pricing/promotion strategies. *Entomol Res* 47:141–151.
- Jang JM, Hong S, Chang JB. 2025. Household meat demand with consumer expenditure survey data. *Korean J Agric Sci* 52:685–694.
- Jeong KS, Go SH, Jo WK, Park JH. 2025. Simplified image analysis for early detection of missing and low-vigor cabbage plants using UAV RGB imagery and deep learning. *Korean J Agric Sci* 52:51–65.
- Kim MJ, Han J, Park JS, Lee JS, Lee SH, Cho JJ, Kim KS. 2015. Various enterotoxin and other virulence factor genes widespread among *Bacillus cereus* and *Bacillus thuringiensis* strains. *J Microbiol Biotechnol* 25:872–879.
- Kim NH, Song MH, Kim E, Kim Y, Park KH, Kim S. 2020. The antifungal effect of *Rhus verniciflua* stokes against *Metarhizium anisopliae* on the edible insect, *Protaetia brevitarsis* (Coleoptera). *Korean J Ecol Environ* 53:374–379.
- Kim S, Oh G, Jeon SG. 2025a. Evaluation of the economic value of providing service of poultry price information. *Korean J Agric Sci* 52:19–30.
- Kim TK, Cha JY, Kim YJ, Kim JH, Keum DH, Choi YS. 2025b. Current and future research trends for the edible insect food industry. *Food Preserv Process Ind* 24:50–57.
- Kim TK, Yong HI, Kim YB, Kim HW, Choi YS. 2019. Edible insects as a protein source: a review of public perception, processing technology, and research trends. *Food Sci Anim Resour* 39:521–540.
- Klunder HC, Wolkers-Rooijackers J, Korpela JM, Nout MJR. 2012. Microbiological aspects of processing and storage of edible insects. *Food Control* 26:628–631.
- Kurdi P, Chaowiwat P, Weston J, Hansawasdi C. 2021. Studies on microbial quality, protein yield, and antioxidant properties of some frozen edible insects. *Int J Food Sci* 2021:5580976.
- Kwak KW, Han MS, Nam SH, Choi JY, Lee SH, Kim HG, Park KH. 2015. Comparing the mortality of *Protaetia brevitarsis seulensis* (Coleoptera: Cetoniidae) caused by entomopathogenic bacteria and *Serratia marcescens* (Enterobacteriales: Enterobacteriaceae). *Int J Ind Entomol* 30:40–44.
- Lange KW, Nakamura Y. 2021. Edible insects as future food: chances and challenges. *J Future Foods* 1:38–46.
- Larouche J, Campbell B, Hénault-Éthier L, Banks IJ, Tomberlin JK, Preyer C, Deschamps MH, Vandenberg GW. 2023. The edible insect sector in Canada and the United States. *Anim Front* 13:16–25.
- Lee JA, Lee CY. 2025. Effect of solvent concentration on antioxidant activities in *Tenebrio molitor* larvae extracts. *Resour Sci Res* 7:134–142.
- Lee YJ, Kweon H, Jo YY, Kim SG. 2024. Insect-originated functional food: nutritional benefits and applications. *Int J Ind Entomol Biomater* 48:99.
- Maciel-Vergara G, Jensen AB, Lecocq A, Eilenberg J. 2021. Diseases in edible insect rearing systems. *J Insects Food Feed* 7:621–638.
- Meijer N, Safitri RA, Tao W, Hoek-Van den Hil EF. 2025. Review: European Union legislation and regulatory framework for edible insect production – safety issues. *Animal* 19:101468.
- Murefu TR, Macheka L, Musundire R, Manditsera FA. 2019. Safety of wild harvested and reared edible insects: a review. *Food Control* 101:209–224.
- Ng'ang'a J, Imathiu S, Fombong F, Ayieko M, Vanden Broeck J, Kinyuru J. 2019. Microbial quality of edible grasshoppers *Ruspolia differens* (Orthoptera: Tettigoniidae): from wild harvesting to fork in the Kagera Region, Tanzania. *J Food Saf* 39:e12549.
- Oh YN, Kim HY. 2025. Exploring sustainable future protein sources. *Food Sci Anim Resour* 45:81–108.
- Osmani A, Garofalo C, Milanović V, Taccari M, Cardinali F, Aquilanti L, Pasquini M, Mozzon M, Raffaelli N, Ruschioni S, Riolo P, Isidoro N, Clementi F. 2017. Insight into the proximate composition and microbial diversity of edible insects marketed in the European Union. *Eur Food Res Technol* 243:1157–1171.
- Pinheiro NA, Silva LJG, Pena A, Pereira AMPT. 2025. Entomophagy: nutritional value, benefits, regulation and food safety. *Foods* 14:2380.
- Reverberi M. 2020. Edible insects: cricket farming and proce-

- ssing as an emerging market. *J Insects Food Feed* 6: 211-220.
- Schabel HG. 2010. Forest insects as food: a global review. *Proceedings of a Workshop on Asia-Pacific Resources and their Potential for Development*, Bangkok, Thailand. pp 37-64.
- Schwenk V, Riegg J, Lacroix M, Märtlbauer E, Jessberger N. 2020. Enteropathogenic potential of *Bacillus thuringiensis* isolates from soil, animals, food and biopesticides. *Foods* 9:1484.
- Shim SH, Ji SY, Jeong JY, Kim MJ, Kim JS, Kang HK. 2025. Evaluation of growth performance and nitrogen excretion in manure according to lysine levels in growing pig feed. *Korean J Agric Sci* 52:171-181.
- Siddiqui SA, Tetey E, Yunusa BM, Ngah N, Debrah SK, Yang X, Fernando I, Povetkin SN, Shah MA. 2023. Legal situation and consumer acceptance of insects being eaten as human food in different nations across the world—a comprehensive review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 22:4786-4830.
- Stoops J, Crauwels S, Waud M, Claes J, Lievens B, Van Campenhout L. 2016. Microbial community assessment of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) and grasshoppers (*Locusta migratoria migratorioides*) sold for human consumption. *Food Microbiol* 53:122-127.
- Ssepuuya G, Wynants E, Verreth C, Crauwels S, Lievens B, Claes J, Nakimbugwe D, Van Campenhout L. 2019. Microbial characterisation of the edible grasshopper *Ruspolia differens* in raw condition after wild-harvesting in Uganda. *Food Microbiol* 77:106-117.
- Tiwasing P, Bek D, Siriamornpun S, Ferreira J, Weerapreeyakul N, Tanomtong A, Nakkote P. 2025. Edible insects and export challenges: insights from Thailand's cricket industry. *J Insects Food Feed* 12:525-541.
- Vandeweyer D, Crauwels S, Lievens B, Van Campenhout L. 2017. Microbial counts of mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) and crickets (*Acheta domesticus* and *Gryllobates sigillatus*) from different rearing companies and different production batches. *Int J Food Microbiol* 242:13-18.
- Vandeweyer D, Wynants E, Crauwels S, Verreth C, Viaene N, Claes J, Lievens B, Van Campenhout L. 2018. Microbial dynamics during industrial rearing, processing, and storage of tropical house crickets (*Gryllobates sigillatus*) for human consumption. *Appl Environ Microbiol* 84:e00255-18.
- Yan X, Laurent S, Hue I, Cabon S, Grua-Priol J, Jury V, Federighi M, Boué G. 2023. Quality of *Tenebrio molitor* powders: effects of four processes on microbiological quality and physicochemical factors. *Foods* 12:572.
- Yoon SH, Soon BM. 2025. Analysis of radish supply and demand impact due to climate change policy implementation: based on the SSP scenario. *Korean J Agric Sci* 52:1-18.