

식품과학과 산업 Vol. 55, No. 2, pp. 176~187 (2022)

<https://doi.org/10.23093/FSI.2022.55.2.176>

동물사료로서의 곤충의 잠재적 가치

Insect, potential source of animal feed

박관호^{1*} · 김용순¹ · 구본우¹ · 김은선¹ · 박지영¹ · 지상윤²

Kwanho Park^{1*}, Bonwoo Goo¹, Yongsoon Kim¹, Eunseon Kim¹, Ji Yeong Park¹, and Ji Sang Yun²

¹국립농업과학원, ²농촌진흥청

¹National Institute of Agricultural Science, ²Rural Development Administration

Abstract

Because of human population growth, longer lifespans, and climate change, there is growing concern around world to produce enough food and feed. Insects are regarded as an alternative with high potential because the production of insects demands limited amounts of water and land, and they can add value to low-value by-products. Insects have high levels of crude protein, lipids and minerals. The relative amount of protein can vary substantially, with crude protein content ranging from 23% to 76%, depending on insect species. Their amino acid composition is good and protein digestibility is high. Insect to be a significant

sustainable source as a replacement of ingredients such as soya or fishmeal in the feeds of terrestrial livestock or fish. This review provides an overview of nutritional value of insect in animal feed and challenges required to develop a sustainable, safe, and affordable insect farming industry.

Keywords: Insect, Feed, Alternative

서론

세계는 인구의 증가, 수명의 연장, 기후변화에 직면하고 있어 충분한 식량과 사료를 지속가능하게 생산하고 공급할 수 있을지 점점 우려가 커가고 있다.

*Corresponding author: Kwanho Park,
Department of Agricultural Biology, National Institute of Agricultural Sciences, Jeollabuk-do, 55365, Korea
Tel: 063-238-2994
Fax: 063-238-3833
E-mail: nicegano@korea.kr
Received April 14, 2022; revised May 17, 2022; accepted May 30, 2022



전 세계 동물성식품의 생산량은 1963년부터 현재까지 8천만 톤에서 3억 톤 이상으로 증가했으며 인구와 소득증가로 인해 2015년 3억 3,400만 톤에서 2050년 4억 9,800만 톤으로 1.5배 증가할 것이다 (Alexandratos 등, 2006; Wehberg 등, 2017). 이와 같은 변화는 동물성식품의 소비 증가와 생산에 필요한 사료원료에 대한 수요 증가로 이어져서 양어, 가축 등의 먹이에 대한 주요 변화가 전 세계적으로 나타날 것으로 보이며, 대안이 되는 지속 가능한 동물성 단백질 공급원에 대한 탐구는 사료 시장에서 상당한 화제가 될 것으로 예상된다(Willett 등, 2019).

최근 몇 년 동안, 곤충은 식품원료로서 주목을 받고 있으며 전 세계 많은 나라에서 동물 사료로 지속 가능한 미래의 원료공급원으로 확인되었다. 동물 사료에서 곤충의 활용은 곤충이 환경에 미치는 영향이 적고, 가축의 성장에 도움을 줄 수 있는 영양소가 높다는 점에 착안한 것이다. 곤충이 갖고 있는 영양성분과 아미노산 조성은 동물의 먹이요구를 충족시킨다(Speedy, 2003). 어류와 야생 조류, 그리고 가금류를 포함하여 많은 동물들이 곤충들을 자연스럽게 소비하기 때문에, 이 동물들이 진화적으로 그들의 규칙적인 먹이의 일부로 곤충을 먹는 것에 적응했다고 가정할 수 있다(Biasato 등, 2016; Sealey 등, 2011). 따라서, 곤충을 자연스러운 사료 공급원으로 고려하고 산업적으로 확대해나가는 것을 고려할 만하다. 곤충의 사료원료에 대한 관심은 천연자원 고갈과 환경오염을 최소화할 수 있으며, 상대적으로 품질이 낮은 먹이로 성장하고 양질의 단백질과 다양한 필수 영양소를 생산할 수 있는 잠재적인 능력에 관심이 집중되고 있다. 곤충의 대량생산은 온실가스 배출 수준이 낮고 단백질 1 kg를 생산하는데 필요한 토지 면적이 작으며, 다양한 유기물들을 단백질 등 고부가가치의 사료소재로 전환시킬 수 있기 때문에 환경적 관점에서도 유망한 자원이다(Van Huis 등, 2017; Oonincx 등, 2012). 특히, 유기성폐자원을 생물을 이용하여 다른 자원으로 변환시키는 곤충의 사용은 지속 가능한 순환 경제의 새로운 접근법에서 주목할만한 사례로 주목받고 있다(Meneguz 등, 2018).

지금까지 여러 종의 곤충을 동물사료로 사용하기 위한 실험이 이루어졌는데, 그 중 유망한 종으로 아메리카동애등에(*Hermetia illucens*)와 갈색거저리(*Tenebrio molitor*), 집파리(*Musca domestica*)이다(Schiavone 등, 2017; Schiavone, 2018; , Iaconisi, 2017; Secci 등, 2018; Hussein 등, 2017; Allegretti 등, 2018). 대체 사료의 소재로서 곤충의 선택은 곤충의 생태와 사육 프로세스와 관련이 높다. 따라서, 대량 사육뿐만 아니라 가격적 경쟁력, 사료영양학적 관계 등이 고려되어야 할 사항이다. 이전 연구에서는 어류와 가금류, 이유 자돈(Veldkamp 등, 2012; Spranghers 등, 2018; Biasato 등, 2019)의 사료공급원에서 더 이상 지속 가능하다고 여겨지지 않는 기존의 단백질, 지방 공급원(대두박, 어분, 어유)의 일부 또는 전체 대체원으로서 곤충의 단백질과 지방을 이용할 가능성이 높다고 강조했다(Belghit 등, 2018; Lock 등, 2016; Barroso 등, 2014; Pieterse 등, 2019; Veldkamp 등, 2012; Spranghers 등, 2018; Makkar 등, 2018). 곤충을 동물사료 원료로 사용하였을 때 동물의 건강과 장기능 증진과 축산제품의 품질 측면에서 긍정적인 결과가 관측되었다. 동물의 장 건강을 개선하기 위해 새로운 사료 첨가물로서 곤충의 활용은 면역 증진 특성을 가진 라우르산과 항균 펩타이드, 키틴과 같은 생리 활성 성분을 함유하고 있기 때문에 점차 더 많은 관심을 받고 있다(IPIFF, 2019; Gasco 등, 2018).

전 세계적으로 곤충 사업이 빠르게 성장하고 있다. 2000년부터 미국과 캐나다, 중국, 남아프리카, 유럽, 대한민국에서 여러 회사가 설립되었다. 특히, 사료로 사용하기 위한 곤충의 대규모 사육과 제품화 부문의 전반적인 성장은 아메리카동애등에를 생산하는 기업의 성장과 관련이 높다. All About Feed (2019)에 따르면 아메리카동애등에의 세계 생산량은 2014-2015년에 7,000-8,000 톤에서 2016년엔 14,000 톤으로 빠르게 증가했다. 이러한 시장의 확대 추세는 곤충을 사육하는 농가, 생산업체, 사료업체 등에 이익으로 반영될 것이며, 곤충이 사료산업의 한 분야로 소비자에게 인식되고 환경에 미치는 잠재

적 영향이 긍정적으로 확산될 것이다. 더 나가, 또 다른 이점으로는 곤충을 활용하여 유기성폐자원의 처리비용을 절감하고, 이를 통하여 고품질의 사료원료를 생산함으로써 양어, 가금류, 반려동물 등의 사료산업의 물가안정과 건강증진, 건전한 육류 생산에 도움을 줄 것이다.

본 원고에서는 사료원료로서 곤충의 잠재적 가치를 살펴보고 곤충산업의 활성화를 위한 방안을 모색하고자 한다.

본론

1. 동물 사료로서 곤충의 영양학적 가치

곤충을 사료로 이용하는 것에 대한 관심은 곤충

이 물고기와 다른 동물에 비해 상대적으로 저품질의 먹이로 성장하고 양질의 단백질과 다양한 필수 영양소로 바꾸는 능력에 집중되었다. 사료로 이용되는 곤충의 영양학적 가치는 종과 먹이원, 생활사에 따른 차이가 난다. 일반적으로, 곤충은 쉽게 이용할 수 있는 다양한 비타민과 미네랄뿐만 아니라 에너지, 양질의 단백질, 불포화지방산의 좋은 공급원이 된다(Kourimska 등, 2016; Williams 등, 2016). Hawkey 등(2021)은 일반적으로 단백질 공급원으로 이용되는 콩과 사료로 이용할 수 있는 곤충과의 영양소 성분 및 에너지 함량을 비교하였다(표 1). 건조물 기준으로 단백질과 지방이 곤충의 주성분이다. 곤충 중에 따라서 단백질의 상대량은 다양하게 나타나는데 조단백질의 함량이 23%에서 76%에 이르며, 가장 높은 함량을 가진 곤충은 메뚜기이다(표 1). 일반적

Table 1. Nutritional composition (%) and energy content (MJ/kg) of commonly used insects in food and feed on a DM basis (Hawkey 등, 2021)

Order	Common name	Latin name	Crude protein (% DM)	Total fat (% DM)	Fiber (% DM)	Ash (% DM)	Energy (MJ/kg DM)
Coleoptera	Yellow mealworm	<i>Tenebrio molitor</i>	46-54	25-36	2-5	3-4	27
	Superworm	<i>Zophobas morio</i>	47	44	ND	8	ND
Diptera	Black soldier fly	<i>Hermetia illucens</i> (larvae meal)	34-42	25-58	7	4-20	22-24
	Housefly	<i>Musca domestica</i> (maggot meal)	51-60	25-28	6-7	11-20	20-23
	Housefly	<i>Musca domestica</i> (pupae meal)	71-76	14-16	15-16	7-8	20-24
Lepidoptera	Silkworm	<i>Bombyx mori</i> (pupae meal)	23	14	ND	1	10
	Greater wax moth	<i>Galleria mellonella</i>	39	51-59	9	2-3	ND
Orthoptera	House cricket	<i>Acheta domesticus</i>	59-72	10-23	5	5	ND
	Tropical house cricket	<i>Gryllosides sigillatus</i>	70	18	4	5	19
	Desert locust	<i>Schistocerca gregaria</i>	76	13	3	3	18
Soybean meal (for comparison)			55	2	4	7	20

* Abbreviations: DM, dry matter; ND, no data.



Table 2. Low, high, and mean amino acid digestibilities (%) of various insect meals when fed to poultry (Hawkey 등, 2021)

Species and life stage	Low	High	Mean	Study
<i>Gryllus testaceus</i> adults	85 (Cys)	96 (Ala)	93	Wang 등 (2005)
<i>Acrida cinerea</i> adults	85 (Cys)	99 (Thr)	94	Wang 등 (2007)
<i>Musca domestica</i> larvae	92 (Ile)	98 (Lys)	95	Hwangbo 등 (2009)
<i>M. domestica</i> larvae	83 (Gly)	96 (Tyr)	91	Pieterse와 Pretorius (2014)
<i>M. domestica</i> pupae	86 (Ala)	100 (Ser+Asp)	95	Pieterse와 Pretorius (2014)
<i>M. domestica</i> larvae	77 (Gly)	91 (Tyr)	83	Hall 등 (2018)
<i>Tenebrio molitor</i> larvae	80 (Met)	93 (Ala)	86	De Marco 등 (2015)
<i>Hermetia illucens</i> pupae	42 (Met)	89 (Pro)	68	De Marco 등 (2015)
<i>H. illucens</i> larvae	44 (Cys)	92 (Ala+Tyr)	77	Schiavone 등 (2017)
<i>H. illucens</i> larvae	45 (Cys)	99 (Ala)	80	Schiavone 등 (2017)

으로 곤충의 사료영양성분은 대두박이나 어분과 같은 단백질 공급원과 비교된다. 그러나, 곤충과 기존의 단백질 공급원과의 비교에서 곤충의 단백질의 상당 부분은 외골격 내에서 화학적으로 결합 되어 있기 때문에 생물학적으로 이용이 가능하지 않을 수 있다 (Barke 등, 1998). 게다가, 외골격은 질소를 함유한 다당류 키틴질을 함유하고 있는데, 이것은 질소 함량에 기초하여 측정할 경우, 곤충의 총 단백질 함량이 잠재적으로 과대평가 될 수도 있다. 곤충은 일반적으로 필수 아미노산의 좋은 공급원으로 간주 된다. 비록 특정 양의 필수 아미노산은 종과 발달 단계에 따라 다르지만, 일반적으로, 고기와 유제품, 생선과 같이 인간이 소비하는 양질의 단백질 공급원뿐만 아니라 동물의 사료에 사용되는 전통적인 단백질 공급원 과도 자주 비교된다 (Van Huis, 2013). 단백질의 소화율은 모든 곤충 종에 대해 완전히 평가한 것은 아니지만, Ramos-Elorduy 등(1997)은 다양한 곤충목에 걸쳐 78개의 다른 종의 사료 곤충의 소화율이 77%에서 98%에 이른다고 제안했다. 갈색거저리(*Tenebrio molitor*)와 아메리카동애(*Hermetia illucens*) 등의 경우, 겉보기 단백질 소화율은 각각 60%와 51%(De Marco 등, 2015)로 보고되었다. Pretorius 등(2011)에 따르면 50%의 파리 유충이나 번데기 가루로 보충한 옥수수 기반 식단을 구이용 영계에게 먹인 결과 번데기 가루로 조단백질 및 개별 아미노산에 대

한 총 관 소화 흡수율이 높아진 것으로 나타났다. 단백질의 품질은 소화율과 아미노산 가용성에 의해서도 결정이 된다. Oonincx와 Finke (2021)에 따르면 곤충의 아미노산은 대두박이나 어분과 같은 기존의 단백질 공급원과 같거나 더 높은 값으로 가금류의 사료로 공급할 때 쉽게 사용할 수 있다(표 2). 아미노산의 구성은 단백질 공급원의 적합성을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 이는 동물의 아미노산 요구량에 따라 결정되어 진다. Oonincx와 Finke (2021)는 일반적으로 많이 사육되고 있는 4가지 곤충종의 아미노산 구성을 정리하고 병아리, 메기, 송어, 돼지, 성인, 어린이의 아미노산 요구량과 비교하였다(표 3). 또한, Gasco 등(2018)은 새우, 가금류, 오리, 메추라기, 돼지, 토끼 및 다양한 어류의 동물 성능 지표 및 곤충 원료의 소화율이 검토하였다. 표 1에서 나타내는 바와 같이, 곤충과 관련된 지방의 양은 종 내에서 그리고 종마다 상당히 다를 수 있다. 일반적으로, 무척추동물의 지방은 건조 물질 기준으로 유충이 성충보다 함량이 더 높다(Barker 등, 1998). 지방은 다양한 형태로 존재하며, 트리아실글리세롤과 인지질이 각각 전체의 80%와 20%를 차지한다(Dossey 등, 2016). 어분이나 대두박에 비해 곤충의 지방 함량이 높아 동물 사료에 사용하기 전에 최소한의 일부 지방을 제거해야 할 수도 있음을 시사한다(Makkar 등, 2014). 사료로 사용하기 위해 제거한 지방은 사

Table 3. Amino acid patterns (mg/g crude protein) of four commonly raised insects and amino acids scores and first limiting amino acid for various species (Oonincx 등, 2021)

Amino acid	<i>Acheta domesticus</i> adults/nymphs	<i>Tenebrio molitor</i> larvae	<i>Zophobas morio</i> larvae	<i>Hermetia illucens</i> larvae/prepupae
Alanine	87.8	80.2	72.7	62.7
Arginine	65.7	60.0	57.4	52.8
Aspartic acid	79.1	81.0	83.1	88.3
Glutamic acid	109.2	112.1	127.0	103.7
Glycine	52.3	53.1	48.7	55.0
Histidine	22.8	30.2	31.1	32.4
Isoleucine	40.3	46.1	46.9	43.3
Leucine	78.6	84.9	80.4	69.9
Lysine	55.3	55.4	54.6	59.1
Methionine	15.8	13.3	12.2	18.8
Methionine+cystine	24.9	23.3	21.8	24.4
Phenylalanine	31.5	35.2	37.2	41.5
Phenylalanine+tyrosine	87.5	102.6	108.4	112.3
Proline	56.7	68.1	55.9	55.4
Serine	44.1	47.2	44.1	38.3
Threonine	35.7	40.3	39.9	39.0
Tryptophan	7.2	10.5	11.4	15.1
Valine	54.1	62.9	60.5	63.8
Amino acid score/first limiting amino acid:				
Humans				
Children	96/Met+Cys	90/Met+Cys	84/Met+Cys	94/Met+Cys
Adults	113/Met+Cys	106/Met+Cys	99/Met+Cys	111/Met+Cys
Livestock				
Poultry	64/Met+Cys	60/Met+Cys	56/Met+Cys	62/Met+Cys
Catfish	55/Thr+Try	54/Met+Cys	50/Met+Cys	56/Met+Cys
Trout	52/Met+Cys	49/Met+Cys	46/Met+Cys	51/Met+Cys
Swine	59/Try	56/Met+Cys	52/Met+Cys	58/Met+Cys

료 보조 성분으로 사용될 수 있다. 일반적으로, 곤충은 다양한 포화지방산과 단일불포화지방산, 고도불포화지방산을 함유하고 있으며, 이는 다른 동물 종과 비슷하다. 주요한 포화지방산은 팔미트산(C16:0)이며, 다양한 양의 스테아르산(C18:0)을 포함하고 있다. 올레산(C18:1)은 주요 단일 불포화 지방산이지

만, 일부 종은 팔미톨레산(C16:1)을 상당히 축적하는 것으로 보인다. 일반적으로, 곤충은 n-6 고도불포화지방산(n-6 PUFA)인 리놀레산(n-6 C18:2)이 상대적으로 풍부하고, n-3 알파리놀렌산(C18:3)이 더 적다. 사료로 사용할 수 있는 곤충의 특징으로, 다양한 곤충 종의 총 지방량과 지방산 구성물이 곤충의



먹이를 변경함으로써 다양하게 생산할 수 있다. 예를 들어, Fasel 등(2017)에 따르면 갈색거저리의 먹이에 고도불포화지방산이 풍부한 공급원을 포함하면 고도불포화지방산의 함량을 현저하게 증가시킬 수 있다고 했다. 곤충이 갖고 있는 미량원소와 비타민의 조성은 곤충의 종, 먹이, 계절 등에 따라 다르게 나타난다(Dossey 등, 2016). 일반적으로 대부분의 곤충이 동물의 먹이가 요구하는 충분한 수준의 미량원소를 함유하고 있다(Barker 등, 1998). 곤충은 상당한 양의 칼슘, 마그네슘, 망간, 인산, 셀레늄을 동물에게 제공할 수 있으며, 높은 수준의 철과 아연 수치를 갖고 있다(Makka 등, 2014). 특히, 아메리카동애등에의 유충은 다른 곤충종에 비해 칼륨과 칼슘이 풍부한 것으로 알려져 있다(Janssen 등, 2017). 곤충은 섬유질을 최대 10%까지 함유할 수 있으며 가장 흔한 형태는 키틴질이지만 아미노산 표피 단백질도 포함하고 있다(Van Huis 등, 2013; Belluco 등, 2013). 앞서 나타낸 바와 같이, 키틴질은 N-아세틸 글루코사민의 긴 사슬 중합체로서 대부분의 곤충의 외골격에서 발견되는 질소 기반 탄수화물이다. 키틴질 함량은 신선중량 기준으로 2.7-49.8 mg/kg, 건조 물질 기준으로 11.6-137.2 mg/kg이며 7종에 걸쳐 있다(Finke, 2007). Park과 Kim (2010)에 따르면 키틴질이 사료에서의 사용과 관련하여 도움을 주거나 저해를 하는 성분인지에 대해서는 아직까지 불분명하여 더 많은 연구가 요구된다. 일부 결과에서는 키틴질이 항산화, 항염 등의 특성을 시사하기도 한다. 그러나, 키틴질은 다양한 고분자와 결합하여 장에서 소화저해하는 비영양적 효과를 가져올 수도 있다.

2. 곤충의 동물사료 적용 연구

최근 지속가능한 지구환경에 대한 관심과 경각심이 높아짐에 따라 동물사료에 곤충을 이용하는데 관심이 높아지고 있다. 기존의 가축의 사육과 물고기 양식 시스템은 지속 가능성의 저하에 많은 영향을 미치고 있다. 곤충은 가축과 양식 생산 시스템에 사료원료로 사용되기에 적합한 영양 조성물을 가지

고 있는 것으로 강조되었다. 전 세계는 증가하는 단백질 수요를 충족시키기 위한 기존 사료의 미래에 대한 불확실성이 커지고 있다. 앞으로 반추 동물보다 비반추 동물(돼지와 가금류)과 양식어류의 생산량이 더 빠른 속도로 증가할 것으로 예상되어, 적절한 아미노산 조성물과 함께 소화가 잘되고 양질의 단백질이 다량 필요할 것이다. 전통적으로 가금류는 먹이를 구할 때 자연스럽게 곤충을 먹지만, 현재는 상업적인 실내 생산 시스템에서는 사용되지 않고 있다. 현재의 양계 산업에서는 콩이 사료에서 주요 단백질 공급원이므로 사용된다. 콩을 완전히 갈색거저리로 대체한 사료에서 양계에 성장 효과가 나타나지 않았지만, 사료 전환비율(FCR, 체중 증가 kg당 사료 섭취량)에 미치는 영향은 다른 것으로 보고되었다(Bovera 등, 2015). Oluokun (2000)에 따르면 아메리카동애등에 유충도 양계의 체중 증가나 사료 소비에 유의적인 영향을 미치지 않았지만, 결보기 대사에너지와 소화 가능한 아미노산의 좋은 공급원이 될 것으로 보고 있다. 돼지사료에서 콩을 전체 대체하거나 전체 또는 부분적으로 지방을 제거한 아메리카동애등에 유충으로 대체한 결과 체중 증가와 사료 섭취량에 차이가 없는 것으로 나타났다(Spranghers 등, 2018). 이와 더불어, 부분적으로 지방을 제거한 아메리카동애등에 유충박을 먹이에 최대 10%까지 포함해도 젓을 떼 새끼 돼지에서는 부정적 영향이 없었고, 다 자란 돼지 사료에 포함되더라도 육질에는 아무런 영향이 없었다(Biasato 등, 2019; Altmann 등, 2019). 양돈 사료에 있는 건조 혈장을 부분적으로 아메리카동애등에 유충으로 최대 50%까지 교체한 결과, 초기에 젓을 떼 돼지에서 실제로 성장이 향상되었다(Newton 등, 2005). 마찬가지로, 젓을 떼 돼지의 경우, 콩을 부분적으로 갈색거저리로 대체하면 체중 증가와 사료 섭취, 조단백질 소화 흡수율이 증가하는 것으로 나타났다(Jin 등, 2016). 한편, 지방을 제거하지 않은 아메리카동애등에 유충의 회장 단백질 소화 흡수율은 대조군 사료에 비해 감소했고, 아메리카동애등에 유충에 비해 라이신과 히스티딘, 아르기닌의 결보기 회장 소화 흡수율은 갈색거저리로 대체하였을 때

더 높아지고 갈색거저리가 아메리카동애등에 유충보다 소화가 더 잘 되는 것으로 나타났다(Spranghers 등, 2018; Yoo 등, 2019).

인구증가와 소비성향의 변화에 따라 세계 어류 소비량은 가축 소비량과 함께 증가하고 있다. 그러나, 양식 사료는 현재 양식용으로 어획되는 작은 물고기로부터 나오는 어분에 크게 의존하고 있는데, 지구 환경과 야생환경의 지속성에 있어서 위기로 다가오고 있다. 어분은 양질의 단백질 사료 성분으로 양식업에 있어 주요한 영양원으로 사용되고 있다. 이전의 양식업 연구에서 어분의 대체물로 곤충분을 부분적으로 적용하는 것에 부정적인 효과를 거의 보여주지 않았다. Renna 등(2017)에 따르면, 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)에 지방을 제거한 아메리카동애등에 유충을 먹이로 공급하였을 때 생존율, 성장률, 건강에 부정적인 영향 없이 최대 40% 수준으로 적용이 가능하다. 마찬가지로, 유럽농어(*Dicentrarchus labrax*), 대서양연어(*Salmo Salar*)에서 아메리카동애등에 유충을 어분으로 대체해도 성장률이나 사료 활용에 영향을 미치지 않았다(Magalhães 등, 2017; Belghit 등, 2019). 갈색거저리를 도미(*Sparus aurata*)의 먹이에서 최대 25%까지 어분을 대체하거나 역돔(*Oreochromis niloticus*) 먹이에서 10%를 첨가했을 때 성장률이나 시장성 지표에 미치는 영향은 없었다(Piccolo 등, 2017; Tubin 등, 2020).

3. 사료로서의 곤충의 안전성과 제도

생태계에서 곤충은 먹이사슬의 중간 단계에 있어 가축과 물고기에 나쁜 요소를 전달하는 매개체 역할을 할 가능성도 배재할 수 없다. Belluco 등(2013)은 곤충 소비와 관련된 네 가지 주요 위험, 즉 미생물과 기생, 알레르기 유발 및 화학물질을 강조했다. 또한, 생물안전은 곤충의 사용과 관련하여 중요한 관심사인데, 이는 외래종이 잠재적으로 각국에 유입되어 탈출의 위험과 자연 생태계의 먹이사슬에 미치는 영향을 증가시키기 때문이다. Van Huis과 Oonincx (2017)에 따르면 곤충은 질병의 전염성 위험이 낮

다고 주장했지만, 이에 대한 연구는 거의 발표되지 않았다. Varotto Boccazzi 등(2017)은 아메리카동애등에 등 곤충이 갖고 있는 미생물군은 먹이의 영향을 받았기 때문에 먹이도 곤충의 미생물 및 기생 위험을 결정하는 중요한 요소가 될 수 있다고 말한다. 그러한 이유로 곤충을 사료로 사용하기 위해서는 곤충의 장에서 미생물의 오염도를 줄일 수 있는 방법이 필요할 것이다. 앞선 연구에서, 무균 환경에서 기르거나 항생제로 치료한 거저리는 장 오염도에서 세균이나 곰팡이가 없는 것으로 나타났다(Genta 등, 2016). 그러나, 무균 환경에서 곤충을 대량으로 생산하면 생산 비용이 증가할 것으로 예상되며 이는 실질적으로 곤충의 사료소재 이용에 많은 영향을 미칠 것이다. 미생물에 대한 안전성 확보를 위한 방법으로, 세척 후 철저한 가열과 같은 가공공정을 거침으로 미생물로부터 기인되는 질병의 위험을 상당히 줄일 수 있으며 또한 기생충의 위험을 줄일 수 있을 것이다. 곤충 섭취와 관련된 법률은 국가마다 다르며, 아직까지 국제적으로 합의된 사항은 없다. 실제로, 유럽연합(EU, European Union)이 곤충을 '새로운 음식'으로 포함하는 법적 틀을 마련하기 위해 2015년과 2017년에 새로운 법률을 도입했지만 아직 많은 나라들이 곤충을 음식으로 여기지 않고 있다(EU Comm, 2015, 2017). 유럽에서는 가축의 질병 위험성으로 인해 돼지 및 가금류 먹이에서 동물 단백질의 사용이 금지되고 있다(Veldkamp 등, 2012). 따라서, 곤충의 사료원료 이용에 대한 가치가 확산되고 생산량이 증가함에 따라 가축 사료를 위한 곤충의 안전한 사용을 규제하기 위해서는 명확하고 일관된 법률 제정이 필요하다. 유럽연합의 규정(EU 2017/893)은 가공된 비반추 동물 단백질을 양식 동물에게만 먹이도록 허용하고 있다. 지금까지는, 집귀뚜라미(*Acheta domesticus*)와 띠귀뚜라미(*Gryllobates sigillatus*), 초원 귀뚜라미(*Gryllus assimilis*), 갈색거저리(*Tenebrio molitor*), 외미거저리(*Alphitobius diaperinus*), 아메리카동애등애(*Hermetia illucens*), 집파리(*Musca domestica*) 7종만이 사용이 허가되었다. 또한, 규정에서는 곤충



Table 4. Feed legislation on the use of insects as feed (Sogari 등, 2019)

Country	Authority	Regulation	Insects as Feed
European Union (EU)	EFSA	EU Decisions/regulations	PAPs authorized in aquaculture Authorized fat from insects in feed Positive list of rearing insects
USA	FDA	FFDCA	Additive approval list or GRAS needed for insects. HI larvae included as ingredient for animal food
Canada	CFIA	FAFR	Feed raw material needs authorization, HI product authorized for poultry
China	none	Not present	Does not required authorization

* Abbreviations: EFSA: European Food Safety Authority; PAPs: Processed Animal Proteins; FDA: Federal Food and Drug Administration; FFDCA: Federal Food, Drug, and Cosmetic Act; GRAS: Generally Recognized as Safe; HI: *Hermetia illucens*; CFIA: Canadian Food Inspection Agency; FAFR: Food Act and Feeds Regulation.

사육을 위한 먹이로 허용하는 기질을 규정하고 있다. 북미에서 곤충은, 식용 곤충은 미국에서 식품 첨가물로 간주되고, 매년 출판되는 Association of American Feed Control Officers (AAFCO)의 공식 간행물에는 일반적으로 안전한(GRAS, Generally Recognized as Safe Substance) 물질로 인식되는 물질 목록 뿐만 아니라 승인된 식품 첨가물의 목록이 포함되고 있다. 현재는 아메리카동애등에의 건조유충과 건조박 만이 동물 사료용 원료로 이전되었으며, 그 용도는 양식업에 사용하는 것으로 한정된다. 캐나다에서는 곤충은 안전한 새로운 사료원료로 간주된다. 식품법에 따라, 새로운 사료로 사용하기 위하여 곤충의 종과 사육 상태, 곤충이 먹는 먹이기질 등을 상세히 등록서에 기재되어야 한다. 2016년에는 닭 사료에 아메리카동애등에의 유충 사용이 허가됐고, 2017년에는 양식업에도 사용이 허가됐다. 2018년에는 모든 가금류로 허가를 확대되었다. 몇몇 아시아 국가에서 곤충은 역사적으로 음식과 사료로 여겨왔고 단백질의 좋은 공급원으로 사용되었다. 중국에는 이 규제에 대한 구체적인 법이 없다. 곤충은 사료 첨가물로도 사용될 수 있으며, 이 경우 생산자는 사료 및 사료 첨가물에 관한 행정 처분에서 수집한 규칙을 준수해야 한다(Lahteenmaki-Uutela 등, 2017)(표 4). 대한민국에서는 2015년에 정부가 결정한 산업곤충 육성과 지원에 관한 법률의 제정으로 인해 식품과 사료로서 곤충을 이용할 수 있다. 또한, 사료관리

법에 의해 사용가능한 곤충종이 규정되고 사육을 위한 곤충의 먹이의 기질 또한 규정으로 정하고 있다.

4. 사료로서의 곤충의 전망

유럽을 기반으로 한 국제 곤충식품 및 사료 기구(IPIFF, International Platform of Insects for Food and Feed)에 따르면, 곤충 단백질 산업은 그 가능성을 확대하기 위해 주요한 도전에 직면해야 할 것이다(IPIFF, 2019). 그러한 이유로 곤충산업은 앞으로 더 많이 확장되어야 한다. 실제로, 현재 사료원료로 사용되고 있는 곤충의 거래 가격은 아직 경쟁력이 많이 약하다. 또한, 생산량에 있어서 사료로 이용하기 위한 주요 단백질원인 대두, 어분 등의 생산량과 비교하여 미미한 수준이다. 그러므로, 곤충 농가는 생산 규모를 늘려서 다른 단백질 공급원에 비해 제품의 가격 경쟁력과 안정성을 높여야 한다. 특히, 노동집약적인 곤충의 생산시스템에서 자동화된 생산시스템으로의 전환은 곤충 생산의 노동력 절감과 생산량 확대로 사료원료 시장에서의 목표를 달성하는데 상당히 도움이 될 것이다. 그리고, 곤충 생산자들은 이러한 새로운 수요에 대응하기 위해 영양가 있는 고품질의 제품을 생산해야 할 것이다(IPIFF, 2018). 축산 농가와 양어 어가들은 소비자들의 기대를 충족시키기 위하여 고품질의 제품을 생산하기를 원한다. 특히, 가축과 물고기를 생산하기 위한 항생제 내성

문제에 직면해 있기 때문에 항생제 사용을 줄이는 것과 같은 사회적 과제를 해결할 수단으로 곤충을 고려하는 것에 기대를 가져본다. 동물 사료에 곤충이 도입이 더 확산되어 경제적인 영향을 미치기 위해서는 곤충의 생산 비용과 영양적 가치가 심도있게 고려되고 연구되어야 한다. 지금까지 수행된 소수의 곤충의 사료이용 연구에서 보여주는 결과는 동물사료로서 곤충의 가치가 많이 남아 있음을 시사한다.

결론

곤충은 동물의 사료원료 산업에서 아직까지는 충분히 활용되고 있지는 않지만, 곤충산업이 급속하게 발전하고 있으며 그 잠재적 사용은 증가할 것이다. 기후변화 문제와 자원고갈 문제에 기인하여 곤충은 인간이 사육하고 소비하는 가축과 수생자원에 필요한 대안적인 원료공급원으로 많은 가치를 가지고 있다. 다양한 연구들에 따르면 곤충이 기존에 사용하고 있는 가축의 사료원료 보다 더 지속 가능한 대안이 될 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 곤충의 동물사료 활용에 확대를 가져오기 위해서 풀어야 할 과제가 남아 있다. 곤충을 대량생산하기 위한 효율적인 생산 및 처리 시스템, 명확한 안전 정책 그리고 소비자들의 인식의 문제가 해결되어야 한다. 특히, 기존의 사료영양학적 가치 연구, 다양한 동물적용 연구와 더불어 사료원료 공급원으로서 곤충의 소비자에 대한 우려와 수용에 관한 연구도 같이 진행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호: PJ0150922022)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

Alexandratos N, Bruinsma J, Bödeker G, Schmidhuber J, Broca S, Shetty P, Ottaviani MG. World agriculture: towards 2030/2050. Interim report. Rome: Global Perspective Studies Unit, FAO.

(2006)
 All About Feed. Available online: <https://www.allaboutfeed.net/New-Proteins/Articles/2016/12/Insectmeal-allowance-expected-in-2020-68992E/> (accessed on 17 February 2019).
 Allegretti G, Talamini E, Schmidt V, Bogorni PC, Ortega E. Insect as feed: An emergy assessment of insect meal as a sustainable protein source for the Brazilian poultry industry. *J. Clean. Prod.* 171: 403-412 (2018)
 Altmann BA, Neumann C, Rothstein S, Liebert F, Mörlin D. Do dietary soy alternatives lead to pork quality improvements or drawbacks? A look into micro-alga and insect protein in swine diets. *Meat Sci.* 153: 26-34 (2019)
 Barker D, Fitzpatrick MP, Dierenfeld ES. Nutrient composition of selected whole invertebrates. *Zoo Biol.* Published in affiliation with the American Zoo and Aquarium Association, 17(2): 123-134 (1998)
 Barroso FG, de Haro C, Sánchez-Muros MJ, Venegas E, Martínez-Sánchez A, Pérez-Bañón C. The potential of various insect species for use as food for fish. *Aquaculture*, 422: 193-201 (2014)
 Belghit I, Liland NS, Gjesdal P, Biancarosa I, Menchetti E, Li Y, Waagbø R, Krogdahl Å, Lock EJ. Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 503: 609-619 (2019)
 Belghit I, Liland NS, Waagbø R, Biancarosa I, Pelusio N, Li Y, Krogdahl Å, Lock EJ. Potential of insect-based diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 491: 72-81 (2018)
 Belluco S, Losasso C, Maggioletti M, Alonzi CC, Paoletti MG, Ricci A. Edible insects in a food safety and nutritional perspective: a critical review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 12(3): 296-313 (2013)
 Biasato I, De Marco M, Rotolo L, Renna M, Lussiana C, Dabbou S, Capucchio MT, Biasibetti E, Costa P, Gai F, Pozzo L, Dezzutto D, Bergagna S, Martínez S, Tarantola M, Gasco L, Schiavone A. Effects of dietary *Tenebrio molitor* meal inclusion in free-range chickens. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutri.* 100(6): 1104-1112 (2016).
 Biasato I, Gasco L, De Marco M, Renna M, Rotolo L, Dabbou S, Capucchio MT, Biasibetti E, Tarantola M, Sterpone L, Cavallarin L, Gai F, Pozzo L, Bergagna S, Dezzutto D, Zoccarato I, Schiavone A. Yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) inclusion in diets for male broiler chickens: effects on growth performance, gut morphology, and histological findings. *Poult. Sci.* 97(2): 540-548 (2018)
 Biasato I, Renna M, Gai F, Dabbou S, Meneguz M, Perona G, Martinez S, Lajusticia ACB, Bergagna S, Sardi L, Capucchio MT, Bressan E, Dama A, Schiavone A, Gasco L. Partially defatted black soldier fly larva meal inclusion in piglet diets: effects on the growth performance, nutrient digestibility, blood profile, gut



- morphology and histological features. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 10(1): 1–11 (2019)
- Bovera F, Piccolo G, Gasco L, Marono S, Loponte R, Vassalotti G, Mastellone V, Lombardi P, Attia YA, Nizza A. Yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*; L.) as a possible alternative to soybean meal in broiler diets. *Br. Poult. Sci.* 56(5): 569–575 (2015)
- De Marco M, Martínez S, Hernandez F, Madrid J, Gai F, Rotolo L, Belforti M, Bergero D, Katz H, Dabbou S, Kovitvadhi A, Zoccarato I, Gasco L, Schiavone A. Nutritional value of two insect larval meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy. *Anim. Feed Sci. Technol.* 209: 211–218 (2015)
- Dossey AT, Tatum JT, McGill WL. Modern insect-based food industry: current status, insect processing technology, and recommendations moving forward. In *Insects as sustainable food ingredients*. Academic Press. pp.113–152 (2016)
- EU Comm. Regul. 2015/2283. 2015. On novel foods, amending Regulation (EU) No. 1169/2011 of the European Parliament and of the Council and Repealing Regulation (EC) No. 258/97 of the European Parliament and of the Council and Commission Regulation (EC) No. 1852/2001, Dec. 11. 2015 O.J. (L327) 1–22
- EU Comm. Regul. 2017/2469. 2017. Laying down administrative and scientific requirements for applications referred to in Article 10 of Regulation (EU) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council on novel foods, Dec. 30. 2017 O.J. (L351/64) 64–71
- Fasel NJ, Mène-Safran L, Ruczyński I, Komar E, Christe P. Diet induced modifications of fatty-acid composition in mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *J. Food Res.* 6(5):22–31 (2017)
- Finke MD. Estimate of chitin in raw whole insects. *Zoo Biol.* 26(2): 105–115 (2007)
- Gasco L, Finke M, Van Huis A. Can diets containing insects promote animal health? *J. Insects Food Feed*, 4(1): 1–4 (2018)
- Genta FA, Dillon RJ, Terra WR, Ferreira C. Potential role for gut microbiota in cell wall digestion and glucoside detoxification in *Tenebrio molitor* larvae. *J. Insect Physiol.* 52(6): 593–601 (2006)
- Hall HN, O'Neill HM, Scholey D, Burton E, Dickinson M, Fitches EC. Amino acid digestibility of larval meal (*Musca domestica*) for broiler chickens. *Poult. Sci.* 97(4): 1290–1297 (2018)
- Hawkey KJ, Lopez-Viso C, Brameld JM, Parr T, Salter AM. Insects: A Potential source of protein and other nutrients for feed and food. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 9: 333–354 (2021)
- Hussein M, Pillai VV, Goddard JM, Park HG, Kothapalli KS, Ross DA, Ketterings QM, Brenna JT, Milstein MB, Marquis H, Johnson PA, Nyrop JP, Selvaraj V. Sustainable production of housefly (*Musca domestica*) larvae as a protein-rich feed ingredient by utilizing cattle manure. *PLoS One*, 12(2), e0171708 (2017)
- Hwangbo J, Hong EC, Jang A, Kang HK, Oh JS, Kim BW, Park BS. Utilization of house fly-maggots, a feed supplement in the production of broiler chickens. *J. Environ. Biol.* 30(4): 609–614 (2009)
- Iaconisi V, Marono S, Parisi G, Gasco L, Genovese L, Maricchiolo G, Bovera F, Piccolo G. Dietary inclusion of *Tenebrio molitor* larvae meal: Effects on growth performance and final quality traits of blackspot sea bream (*Pagellus bogaraveo*). *Aquaculture*, 476: 49–58 (2017)
- IPIFF. The European Insect Sector Today: Challenges, Opportunities and Regulatory Landscape. IPIFF Vision Paper on the Future of the Insect Sector Towards 2030 (2018, 2019)
- Janssen RH, Vincken JP, van den Broek LA, Fogliano V, Lakemond CM. Nitrogen-to-protein conversion factors for three edible insects: *Tenebrio molitor*, *Alphitobius diaperinus*, and *Hermetia illucens*. *J. Agric. Food Chem.* 65(11): 2275–2278. (2017)
- Jin XH, Heo PS, Hong JS, Kim NJ, Kim YY. Supplementation of dried mealworm (*Tenebrio molitor* larva) on growth performance, nutrient digestibility and blood profiles in weaning pigs. *Asian-Australas J. Anim. Sci.* 29(7): 979–986 (2016)
- Kouřimská L, Adámková A. Nutritional and sensory quality of edible insects. *NFSJ*. 4: 22–26 (2016)
- Lahteenmaki-Uutela A, Grmelová N, Hénault-Ethier L, Deschamps MH, Vandenberg GW, Zhao A, Zhang Y, Yang B, Nemané V. Insects as food and feed: laws of the European Union, United States, Canada, Mexico, Australia, and China. *Eur. Food Feed Law Rev.* 12, 22. (2017)
- Lock ER, Arsiwalla T, Waagbø R. Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolt. *Aquac. Nutr.* 22(6): 1202–1213 (2016)
- Magalhães R, Sánchez-López A, Leal RS, Martínez-Llorens S, Oliva-Teles A, Peres H. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a fish meal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquaculture*, 476: 79–85 (2017)
- Makkar HPS, Tran G, Heuzé V, Ankers P. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Anim. Feed Sci. Technol.* 197: 1–33 (2014)
- McLeod A. World livestock 2011–livestock in food security. FAO (2011)
- Meneguz M, Schiavone A, Gai F, Dama A, Lussiana C, Renna M, Gasco L. Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *J. Sci. Food. Agric.* 98(15): 5776–5784 (2018)
- Newton L, Sheppard C, Watson DW, Burtle G, Dove R. Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure. *Animal and Poultry Waste Management Center, North Carolina State University, Raleigh, NC*, 17(2005), 18

- Oluokun JA. Upgrading the nutritive value of full-fat soybeans meal for broiler production with either fishmeal or black soldier fly larvae meal (*Hermetia illucens*). *Niger. J. Anim. Sci.* 3(2) (2000)
- Ooninx DG, De Boer IJ. Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans—a life cycle assessment. *PLoS One*, 7(12), e51145. (2012)
- Ooninx DGAB, Finke MD. Nutritional value of insects and ways to manipulate their composition. *J. Insects Food Feed*, 7(5):639–659 (2021)
- Park BK, Kim MM. Applications of chitin and its derivatives in biological medicine. *Int. J. Mol. Sci.* 11(12): 5152–5164 (2010)
- Piccolo G, Iaconisi V, Marono S, Gasco L, Loponte R, Nizza S, Bovera F, Parisi G. Effect of *Tenebrio molitor* larvae meal on growth performance, in vivo nutrients digestibility, somatic and marketable indexes of gilthead sea bream (*Sparus aurata*). *Anim. Feed Sci. Technol.* 226: 12–20 (2017)
- Pieterse E, Erasmus SW, Uushona T, Hoffman LC. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a dietary protein source for broiler production ensures a tasty chicken with standard meat quality for every pot. *J. Sci. Food. Agric.* 99(2): 893–903 (2019)
- Pieterse E, Pretorius Q. Nutritional evaluation of dried larvae and pupae meal of the housefly (*Musca domestica*) using chemical and broiler-based biological assays. *Anim. Prod. Sci.* 54(3): 347–355 (2014)
- Pretorius Q. The evaluation of larvae of *Musca domestica* (common house fly) as protein source for broiler production (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University) (2011)
- Ramos-Elorduy J, Moreno JMP, Prado EE, Perez MA, Otero JL, De Guevara OL. Nutritional value of edible insects from the state of Oaxaca, Mexico. *J. Food Compos. Anal.* 10(2): 142–157 (1997)
- Renna M, Schiavone A, Gai F, Dabbou S, Lussiana C, Malfatto V, Prearo M, Capucchio MT, Biasato I, Biasibetti E, De Marco M, Brugiapaglia A, Zoccarato I, Gasco L. Evaluation of the suitability of a partially defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal as ingredient for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) diets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 8(1): 1–13 (2017)
- Schiavone A, Dabbou S, De Marco M, Cullere M, Biasato I, Biasibetti E, Capucchio MT, Bergagna S, Dezzutto D, Meneguz M, Gai F, Dalle Zotte D, Gasco L. Black soldier fly larva fat inclusion in finisher broiler chicken diet as an alternative fat source. *Animal*, 12(10): 2032–2039 (2018)
- Schiavone A, De Marco M, Martínez S, Dabbou S, Renna M, Madrid J, Hernandez F, Rotolo L, Costa P, Gai F, Gasco L. Nutritional value of a partially defatted and a highly defatted black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.) meal for broiler chickens: apparent nutrient digestibility, apparent metabolizable energy and apparent ileal amino acid digestibility. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 8(1): 1–9 (2017)
- Sealey WM, Gaylord TG, Barrows FT, Tomberlin JK, McGuire MA, Ross C, St-Hilaire S. Sensory analysis of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, fed enriched black soldier fly prepupae, *Hermetia illucens*. *J. World Aquacult. Soc.* 42(1) : 34–45 (2011)
- Secci G, Moniello G, Gasco L, Bovera F, Parisi G. Barbary partridge meat quality as affected by *Hermetia illucens* and *Tenebrio molitor* larva meals in feeds. *Food Res. Int.* 112: 291–298 (2018)
- Sogari G, Amato M, Biasato I, Chiesa S, Gasco L. The potential role of insects as feed: A multi-perspective review. *Animals*, 9(4): 119 (2019)
- Speedy AW. Global production and consumption of animal source foods. *J. Nutr.* 133(11): 4048S–4053S (2003)
- Spranghers T, Michiels J, Vrancx J, Obyn A, Eeckhout M, De Clercq P, De Smet S. Gut antimicrobial effects and nutritional value of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) prepupae for weaned piglets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235: 33–42 (2018)
- Tubin JSB, Paiano D, de Oliveira Hashimoto GS, Furtado WE, Martins ML, Durigon E, Emerenciano MGC. *Tenebrio molitor* meal in diets for Nile tilapia juveniles reared in biofloc system. *Aquaculture*, 519: 734763 (2020)
- Van Huis A, Ooninx DG. The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37(5): 1–14 (2017)
- Van Huis A, Van Itterbeeck J, Klunder H, Mertens E, Halloran A, Muir G, Vantomme P. Edible insects: future prospects for food and feed security (No. 171). FAO (2013)
- Varotto Boccazzi I, Ottoboni M, Martin E, Comandatore F, Vallone L, Spranghers T, Eeckhout M, Mereghetti V, Pinotti L, Epis S. A survey of the mycobiota associated with larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared for feed production. *PLoS One*, 12(8), e0182533 (2017)
- Veldkamp T, Van Duinkerken G, Van Huis A, Lakemond CMM, Ottevanger E, Bosch G, Van Boekel T. Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets: a feasibility study= Insecten als duurzame diervoedergrondstof in varkens en pluimveevoeders: een haalbaarheidsstudie (No. 638). Wageningen UR Livestock Research (2012)
- Wang D, Zhai SW, Zhang CX, Bai YY, An SH, Xu YN. Evaluation on nutritional value of field crickets as a poultry feedstuff. *Asian-australas. J. Anim. Sci.* 18(5): 667–670 (2005)
- Wang D, Zhai SW, Zhang CX, Zhang Q, Chen H. Nutrition value of the Chinese grasshopper *Acrida cinerea* (Thunberg) for broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 135(1–2): 66–74 (2007)
- Wehberg G, Vaessen W, Nijland F, Berger T. Smart livestock farming: potential of digitalization for global meat supply (No. 11). Discussion Paper, Deloitte (2017)
- Williams JP, Williams JR, Kirabo A, Chester D, Peterson M. Nutrient content and health benefits of insects. In *Insects as sustainable food*



- ingredients. pp. 61–84. Academic Press (2016)
- Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett T, Tilman D, DeClerck F, Wood A, Jonell M, Clark M, Gordon LJ, Fanzo J, Hawkes C, Zurayk R, Rivera JA, De Vries W, Majele Sibanda L, Afshin A, Chaudhary A, Herrero M, Agustina R, Branca F, Lartey A, Fan S, Crona B, Fox E, Bignet V, Troell M, Lindahl T, Singh S, Cornell SE, Srinath Reddy K, Narain S, Nishtar S, Murray CJL. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*, 393(10170): 447–492 (2019)
- Yoo JS, Cho KH, Hong JS, Jang HS, Chung YH, Kwon GT, Shin DG, Kim YY. Nutrient ileal digestibility evaluation of dried mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae compared to three animal protein by-products in growing pigs. *Asian–Australas J. Anim. Sci.* 32(3): 387–394 (2019)