

안전한 식용곤충 이용을 위한 알레르기 저감화 기술

Allergy Reduction Technology for Using Safe Edible Insect

여소은¹, 남채민¹, 유리나¹, 성현¹, 김예진¹, 최윤상², 용해인^{1*}

(So Eun Yeo¹, Che Min Nam¹, Ri Na Yu¹, Hyeon Seong¹, Yejin Kim¹, Yun-Sang Choi², Hae In Yong^{1*})

¹충남대학교 동물자원학부, ²한국식품연구원 가공공정연구단

¹Division of Animal and Dairy Science, Chungnam National University

²Research Group of Food Processing, Korea Food Research Institute

I. 서론

국제연합식량농업기구(FAO)의 보고에 따르면 2050년까지 세계 인구가 약 90억 명에 도달할 것이며, 이로 인한 식육의 소비량 역시 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 하지만, 인구 증가 외에도 지구온난화, 토지 부족 등의 문제로 인해 전통적인 축산업만으로는 동물성 단백질의 공급에 한계가 있는 실정이다(그림 1). 이러한 상황 속에서 환경 부담을 줄이면서 지속 가능한 대체 단백질 자원을 찾기 위한 노력이 진행 중이며, 최근 식용곤충이 큰 주목을 받고 있다(류, 2017).

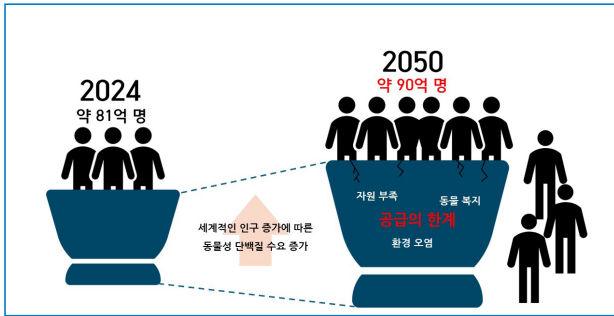
식용곤충(edible insect)이란 식용이 가능한 곤충을 의미한다. 우리나라에서는 2019년 축산법 시행규칙 위임 고시인 '가축으로 정하는 기타 동물'을 개정해 식용곤충이 축산법에 따른 가축으로 인정받은 바 있다(농림축산식품부, 2021). 식용곤충은 단백질, 지방, 무기질 및 비타민과 같은 영양가가 풍부하고, 소, 돼지, 닭 등의 기존 가축과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 탄소 배출과 물 사용량이 필요하므로 환경 친화적이다. 또한, 생명력이 높고, 번식 및 성장이 빠르기 때문에 작은 공간에서 많은 양의 단백질을 생산할 수 있는 높은 생산 효율성을 가진다. 식용곤충은 농촌 지역부터 가축을 사육할 수 없는 도시까지 다양한 지역에서 사육이 가능하며, 이에 대한 복잡한 훈련 과정이 필요하지 않다는 측면에서 많은 경제적 가치를 제공한다(Aguilar-Toalá 등, 2022).

이렇게 식용곤충은 기후 변화와 급속한 인구 증가에 대한 식량 부족 문제를 해결하는 자원으로써 중요한 역할을 할 수 있지만, 섭취에 있어서 안전성 문제를 검증할 필요성이 있다. 식용곤충 섭취 시 미생물 오염 및 잔류 화학물질로 인한 안전성 문제가 발생할 수 있을 뿐만 아니라, 인체 알레르기를 유발할 수 있기 때문이다(Pali-Schöll 등, 2019).

알레르기란 외부 자극, 즉 특히 항원에 과민하게 반응하는 상태를 말한다. 기침, 콧물, 재채기, 두드러기 등의 증상을

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

그림 1. 인구 증가에 따른 동물성 단백질 수요의 증가



출처: 국제연합식량농업기구(FAO)

일으키며, 심하면 아나필락시스(Anaphylaxis) 쇼크로 사망에 이를 수 있다. 이러한 반응을 일으키는 알레르겐(allergen, 항원)은 유전적 요인과 환경적 요인 등이 복합적으로 작용하면서 발생하는 것으로 추정된다(한국소비자원, 2012). 환경적 요인에는 흡인 알레르겐, 식품 알레르겐 또는 다양한 화학물질이 포함되며, 온도와 습도 또한 알레르기 발생에 영향을 미칠 수 있다(한국소비자원, 2012).

식용곤충이 지속 가능한 단백질 공급원으로 떠오르고 있는 가운데 전 세계적으로 섭취 빈도가 높아지고 있으며 이에 따라 곤충 식품 알레르기 발병률 또한 높아질 것으로 예상된다. 따라서, 본문에서는 식용곤충산업의 현황과 전망을 살펴보고 식용곤충 알레르기 연구 동향 및 안전한 식용곤충 섭취를 위한 알레르기 제어 기술에 대해 다루고자 한다.

II. 본론

1. 식용곤충산업 현황과 전망

현재 한국, 일본, 중국과 동남아시아, 유럽 등 80개국 이상에서 2,000종 이상의 식용곤충이 소비되고 있다(Żuk-Golaszewska 등, 2022). 곤충은 식량 자원으로 새롭게 발견된 것이 아니며, 기독교의 성경, 이슬람의 코란이나 유대교의 율법에도 등장할 만큼 인류의 오랜 역사에서 식품으로 사용되어 왔다(황 등, 2022). 이처럼 예전

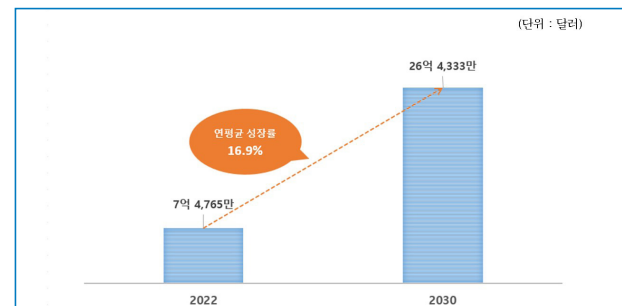
에는 곤충을 식량이나 자연의 일부로 평범하게 받아들였지만, 과학 기술의 발전으로 우리의 삶이 크게 변화되면서 곤충에 대한 사람들의 인식 또한 다소 혐오감을 유발하는 병·해충으로 자리 잡은 것이다. 그러나 최근 급격한 인구 증가와 기후 변화에 의해 식량 보안이 중요시되면서 식품으로써 다시 주목받는 상황이다(류, 2017).

2008년 국제연합식량농업기구(FAO)와 네덜란드 Wageningen 대학(Wageningen University)의 연구팀이 협력하여 곤충산업에 대한 연구를 진행한 바 있다. 이 연구는 곤충의 생태부터 인공 사육, 식품 및 사료로 가공하는 과정, 곤충 소재 식품 및 사료 제품의 표시 방법 및 마케팅 등의 주제로 분석하여 식용곤충산업의 발전에 중요한 역할을 하였다(류, 2017). 또한, 2012년 1월 로마 FAO 본부에서 열린 식품과 사료로서 곤충의 잠재성에 대한 국제 자문가 자문회의의의를 통해 식용곤충의 잠재적 장점이 널리 퍼지게 되면서 전 세계적으로 식용곤충에 대한 연구가 활성화되기 시작하였다(김, 2017). 현재는 전 세계적으로 식용곤충산업이 활성화되면서 많은 지역에서 사람들의 식단 일부가 되고 있다. Verified Market Research(VMR)에 따르면 세계 식용곤충 시장 규모는 2022년 7억 4,765만 달러로 평가되었으며, 2030년에는 26억 4,333만 달러에 이르러 연평균 16.9% 성장할 것으로 추정한다(그림 2).

1) 해외 식용곤충산업

최근 유럽과 미국의 식용곤충산업 성장 속도가 빠르게

그림 2. 세계 식용곤충 시장 전망



출처: Verified Market Research(VMR)

가속화되고 있으며 산업화가 빠르게 이루어지고 있다. 미국은 식용곤충을 원료로 하는 에너지바, 단백질 바, 귀뚜라미 스낵 및 쿠키 등을 제조하는 차풀(Chapul), 엑소(Exo), 비티푸드(Bitty Foods) 등 다양한 기업이 있으며, 푸드트럭, 레스토랑 등으로도 공급되고 있어 식용곤충 시장이 하나의 식품 소비재 시장으로 성장하고 있다(류, 2017). 또한, 식용곤충의 가치를 널리 알려 소비자의 인식 개선을 위해 노력하고 있다. 캐나다의 식용곤충 제조 스타트업 ‘아스파이어 푸드 그룹(Aspire Food Group)’과 북미 곤충 농업 연합이 실시한 설문조사에 따르면, 약 50%의 소비자들이 곤충을 식단으로 시도해 볼 의향이 있는 것으로 나타나 식용곤충에 대한 소비자의 인식이 긍정적으로 변하고 있다는 것을 알 수 있다(식품음료신문, 2022.03.11.).

유럽의 곤충 식품 사업자는 영국, 독일, 벨기에가 주축하고 네덜란드, 프랑스, 핀란드, 덴마크가 그 뒤를 이으며 북유럽 국가에 집중되어 있다(Mancini 등, 2022). 2019년 500톤의 곤충 기반 식품(곤충 전체, 곤충 성분 및 식용곤충이 첨가된 제품)이 제조되었으며, 2030년까지 약 100만 톤의 식용곤충이 생산되고 260,000톤의 곤충 기반 식품으로 가공될 예정이다(Żuk-Golaszewska 등, 2022). 유럽의 식용곤충산업이 점점 성장하게 되면서 시장의 가치는 2030년까지 약 20억 유로에 이를 것으로 예상된다(Żuk-Golaszewska 등, 2022).

태국은 2030년 곤충 식품 수출 금액이 세계 시장 점유율 약 10%인 110억 바트(한화 약 4,118억 4,000만 원)를 차지하고 있는 식용곤충 생산 및 섭식을 가장 많이 하는 국가이다(농식품수출정보, 2022). 미얀마, 라오스, 캄보디아 등 인근 국가에서 수집되거나 양식된 종을 포함한 7,500톤의 곤충이 태국에서 연간 소비되는 것으로 추정된다(Krongdang 등, 2023). 태국의 국가 전략(2018~2037년)에 따르면, 식용곤충은 국내외 시장에서 증가하고 있는 건강하고 영양가 있는 식품에 대한 수요를 충족시키기 위해 지속 가능한 대안으로 판매되고 있고, 태국 공중보건부는 농촌 지역사회의 영양 수요를 충족시키기 위해 곤충 소비를 권장하고 있다(Krongdang 등,

2023). 그뿐만 아니라, 도시에서도 곤충을 주요리와 간식으로 섭취하여 귀뚜라미 파스타, 치즈나 바비큐 맛과 같은 친숙한 맛을 접목한 양념 귀뚜라미 스낵 등 소비의 다양성을 보여주고 있다.

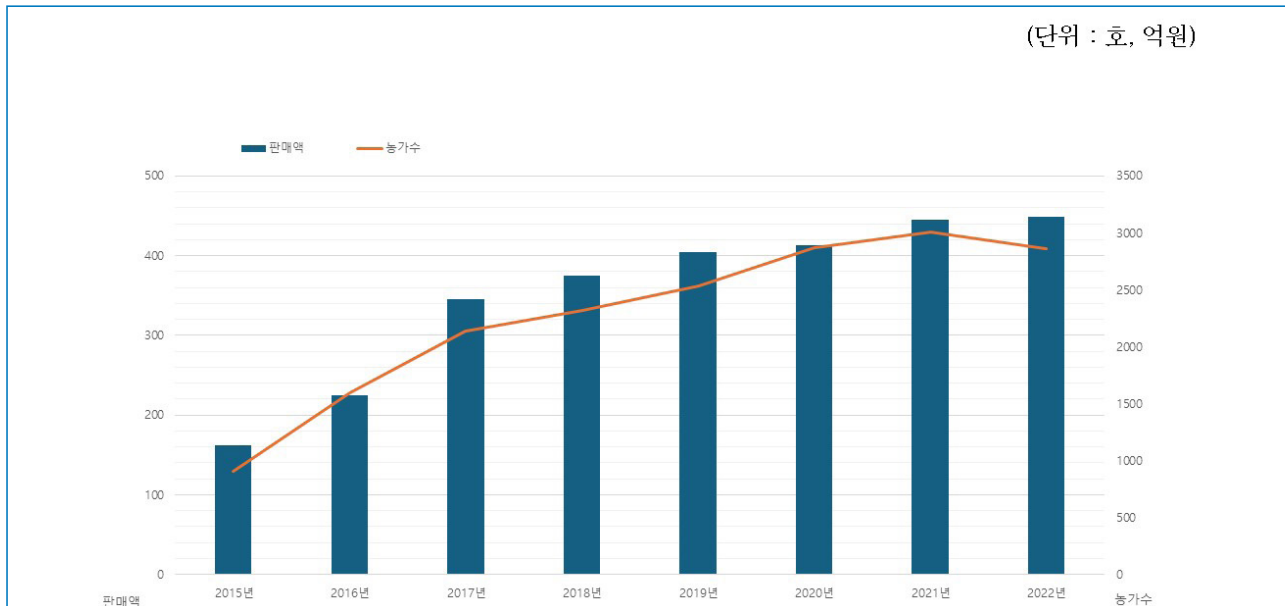
현재 세계 여러 나라에서 식용곤충산업이 활성화되고 있다. 전 세계적으로 식용곤충에 대한 수요가 증가함에 따라, 우리나라도 이러한 세계적 추세에 발맞출 필요성이 있다(그림 3).

2) 국내 식용곤충산업

전 세계적으로 곤충 연구가 활발해지면서 우리나라 역시 곤충의 이용과 산업 성장의 중요성을 깨닫고, 2011년 ‘곤충산업 육성 5개년 계획’이 1차 시행(2011~2015년)되었다. 2016년 제2차 곤충산업 육성 5개년 계획(2016~2020년)이 시작되었고, 식용곤충산업의 형성과 성장을 돕기 위해 법령 및 규정 제·개정 등 규제 완화를 추진하고 식품공전에 식품 원료로 추가하였다(농림축산식품부, 2021). 농촌진흥청과 식품의약품안전처는 당초에 메뚜기, 백강잠(누에), 누에 번데기만 식용곤충으로 허용하였으나, 제2차 곤충산업 육성 계획을 통해 2016년에는 갈색거저리 유충·쌍별귀뚜라미·흰점박이꽃무지 유충·장수풍뎅이 유충이 추가되었으며 2020년과 2021년에 각각 수벌 번데기·아메리카 왕거저리와 풀무치가 한시인정원료로 추가 허용되었다. 이렇게 현재 국내에서 식품 원료로 사용이 허용된 식용곤충 10종이 존재한다(농림축산식품부, 2021).

우리나라 곤충업 신고 및 생산액 증가 추이는 그림 3과 같다. 곤충업은 2015년 908개소에서 2016년 1,579개소로 75.9%의 가장 높은 증가율을 보였고, 2019년 말을 기준으로 국내 곤충업 신고 농가·법인 2,535개소를 기록하였다(농림축산식품부, 2021). 정부는 곤충산업의 체계적인 성장을 유도하기 위하여 2021년에 제1~2차 종합계획 후속으로 제3차 곤충산업 육성 종합계획(2021~2025년)을 발표했다. 기능성 소재 개발, 대량화·자동화 생산 체계, 전문 유통 체계 구축 및 신규 소비

그림 3. 국내 곤충업 신고 및 생산액 변화 추이



출처: 농림축산식품부

시장 창출 등을 통한 산업 활성화를 추진할 것이라 밝혔으며, 이에 따라 2021년 국내 곤충산업 규모는 20년 대비 7.7% 증가하여 446억 원에 이르렀다(농림축산식품부, 2021). 그중 식용곤충 부문은 9% 증가한 231억 원으로 전체의 51.8%를 차지하였으며, 2022년에 농가 수는 줄어들었지만, 산업 규모는 0.7% 증가한 모습을 보였다(농림축산식품부, 2023). 현재 곤충업 신고 및 생산액 증가와 함께 식용곤충을 이용한 다양한 제품이 개발되고 있다. 기존에는 번데기 통조림뿐이었지만, 최근 분말, 환, 알약, 숙취해소제 등 다양한 제품이 판매되고 있다(황 등, 2022). 이러한 결과로 국내에서도 식용곤충산업은 상당한 성장세를 보이는 것을 확인할 수 있다.

2. 식용곤충과 알레르기

1) 알레르기 현황

식용곤충산업이 성장함에 따라 섭취량 또한 늘고 있는 상황에서 가장 중요한 것은 안정성이다. 미생물 오염 및 화학물질(중금속 축적 등)로 인한 문제도 있지만, 알레르기 반응에도 주의를 기울여야 한다. 곤충에 의한 물림, 쏘

임 또는 흡입이나 피부 접촉에 대한 알레르기 반응은 많이 알려져 있지만, 섭취로 인한 알레르기 반응은 생소할 수 있다. 곤충 식품 알레르기 반응은 경미한 국소 반응부터 아나필락시스 쇼크까지 다양하게 나타나며, 피부(두드러기, 가려움증, 발진, 홍조, 혈관부종), 위장(복통, 메스꺼움, 구토, 설사) 및 호흡기(천식, 호흡곤란)로 세분되어 있다(de Gier 등 2018).

한국소비자원에 따르면 대표적인 식용곤충인 누에 번데기 관련 위해 건수가 2013년에서 2016년 사이 총 156건으로, 연평균 30~40건이 발생한 것으로 나타났다. 위해 증상은 ‘알레르기’(피부발진 등) 120건, ‘소화기 계통 손상·통증’(복통 등 식중독) 14건으로 알레르기가 가장 큰 비중(76.9%)을 차지하였으며, 메뚜기, 쌍별귀뚜라미, 백강잠, 갈색거저리 유충에 관해서도 알레르기 반응 사례가 보고되었다(한국소비자원, 2017). 태국에서 수행된 연구(Taylor & Wang, 2018)에서 곤충 섭취 후 알레르기 여부에 대한 설문조사를 시행하였고, 응답자 중 77%가 곤충을 섭취한 적이 있다 밝혔다. 이 중 약 21%가 알레르기 반응을 보였다고 보고했다. 알레르기 증상으로는 설사와 구토가 가장 흔했으며 메스꺼움과 어지러움이 그 뒤를

이었다. Ribeiro 등(2021)은 아시아 국가에서 곤충이 식품 알레르기 사례의 4.2~19.4%를 차지한다고 보고하였고 뿐만 아니라, 전 세계적으로 곤충 섭취에 의한 알레르기 반응을 유발한 많은 사례가 기록되어 있다(표 1). 이러한 사례들은 우리가 식용곤충을 섭취함으로써 알레르기가 유발될 수 있음을 보여주며, 이에 대한 인식과 주의가 필요하다는 것을 의미한다.

2) 알레르기 발생 원인 및 기작

알레르기성 식품 반응은 면역 방어 반응으로 항체인 Immunoglobulin E (IgE)의 생성을 유도하는 식품 물질에 면역계가 과민 반응할 때 발생한다(Aguilar-Toalá 등, 2022). 이러한 알레르기의 생성은 두 단계로 진행된다(그림 4). 먼저, 일반적으로 알레르기 항원에 노출되어 해당 알레르기 항원에 대한 특정 IgE 항체를 생성한다

(Ribeiro 등, 2021). 그 후, 동일한 알레르기 항원에 반복적으로 노출되면 비만세포 표면의 IgE 항체가 특정 알레르기 항원을 인식하고 결합하여 면역 반응을 활성화하는 것이다(Ribeiro 등, 2021). 곤충 섭취 후 알레르기 반응에는 특정 알레르기 항원에 반응하는 일차적 알레르기(primary allergy)와 서로 다른 유사한 구조로 인해 여러 알레르기 항원에서 반응하는 교차 반응성 알레르기(cross-reactivity in allergic reaction)로 나눌 수 있다(de Gier 등, 2018).

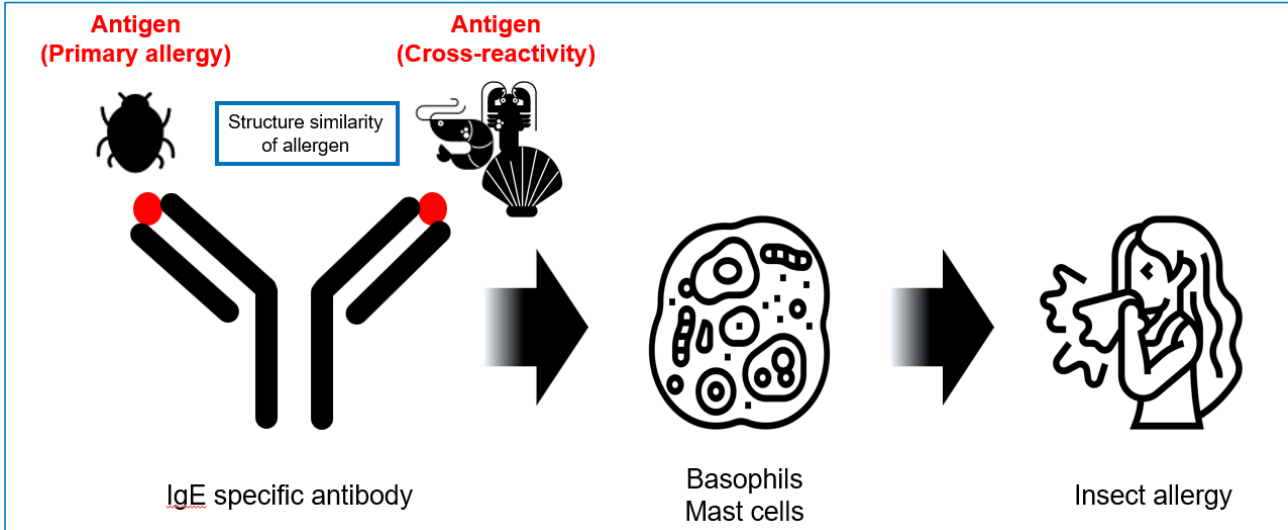
(1) 교차 반응성 알레르기(Cross-Reactivity in Allergic Reaction)

식용곤충 섭취에 따른 알레르기 반응은 곤충의 특정 알레르겐에 반응하는 것보다 교차 반응이 훨씬 더 빈번할 것이라 알려져 있다(Guillet 등, 2022). 교차 반응이

표 1. 곤충 섭취에 따른 알레르기 반응 사례

곤충	나라	증상	알레르기 병력	참고문헌
갈색거저리 유충 (<i>Tenebrio molitor</i>)	이탈리아	가려움증(구강), 압박감(목구멍)	<i>T. molitor</i> 에 접촉시 결막염, 가려움증 및 접촉성 홍반	Nebbia 등(2019)
	프랑스	두드러기, 혈관 부종(얼굴, 사지)	없음	Beaumont 등(2019)
귀뚜라미 (<i>Ornithachris turbida cavroisi</i>)	라틴 아메리카	두드러기, 기침 등	알레르기 비염, 천식	Félix 등(2022)
쌍별 귀뚜라미 (<i>Gryllus bimaculatus</i>)	일본	재채기, 콧물, 기침, 눈꺼풀 부종	없음	Minoshima 등(2023)
누에 번데기 (<i>Bombyx mori</i>)	미국	홍조, 안면부종, 호흡곤란 등	없음	Gautreau 등(2017)
	중국	가려움증, 두드러기, 저혈압, 의식불명 등	없음	Ji 등(2008)
	중국	두드러기, 두통, 복통, 구토, 호흡곤란 등	없음	Ji 등(2008)
말벌 유충 (<i>Polistes olivaceus</i>)	프랑스	얼굴 부종, 메스꺼움, 구토 등	천식	Maillot 등(2023)
매미 (Brood X)	미국	홍반, 발진, 가려움	새우 알레르기	Piatt (2005)
모파니 애벌레 (<i>Imbrasia belina</i>)	아프리카 짐바브웨	두통, 호흡곤란, 기침, 두드러기 등	음식 알레르기, 알레르기 비염	Kung 등(2011)
모파니 애벌레 (<i>Gonimbrasia belina</i>)	보츠와나	피부 발진, 저혈압, 안면부종 등	없음	Okezie 등(2010)
사과 웜 (<i>Rhynchophorus ferrugineus</i>)	중국	가려움증(얼굴, 팔, 몸), 호흡곤란, 타코초브 심근병증	없음	Yew (2012)
콩박각시 (<i>Clanis bilineata</i>)	중국	아나필락시스	알 수 없음	Ji 등(2009)

그림 4. 식용곤충 알레르기 발생 과정



란 원래 하나의 알레르겐에 대해 생성된 IgE 항체가 구조적으로 관련된 다른 알레르겐에 결합하는 경우를 말한다(Ribeiro 등, 2021). 교차 반응은 여러 종류의 식물 또는 동물에 걸쳐서 발견되는 일반적인 알레르겐(pan-allergen)의 존재로 발생하며, 분류학적으로 관련된 종끼리 유사한 알레르겐을 보유하고 있다(Ribeiro 등, 2021). 일반적으로 식용곤충은 연체동물이나 갑각류에서 발견되는 것과 비슷한 단백질을 함유하고 있다. 교차 반응의 원인이 되는 주요 알레르겐에는 절지동물의 pan-allergen인 tropomyosin과 arginine kinase가 주를 이루며, 그 외에도 glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase, myosin light chain, fructose-biphosphate aldolase, actin, tubulin or hexamerin 등도 존재한다(Ribeiro 등, 2021).

실제로 밀웜의 단백질이 게나 새우의 단백질과 유사한 구조를 가지고 있는 것으로 보고됨에 따라 새우 알레르기가 있는 사람은 곤충 알레르기에 대한 위험성이 있을 수 있다(Broekman 등, 2016). 이것은 갑각류와 곤충이 모두 같은 문(Arthropoda)에 속하기 때문이며, 계통 발생학적인 측면에서 새우 단백질과 다른 곤충 사이의 상동성을 예상할 수 있다(Broekman 등, 2017). Aguilar-Toalá 등(2022)은 집귀뚜라미(*Acheta domestus*), 누에(*Bombyx mori*), 메뚜기 및 갑각류, 절지동물 등에서 발

견되는 상동 단백질 사이 높은 수준의 교차 반응이 발견된다고 보고하였다. 또한, Hall & Liceage (2021)의 연구는 귀뚜라미의 tropomyosin과 다양한 종의 조개, 곤충 및 선충의 알레르겐에 대한 공유 서열 상동성(>60% 동일성)을 입증하였다. 그 외에도 곤충 단백질과 교차 반응을 일으키는 다양한 연구들이 보고된 바 있다(표 2).

(2) 일차적 알레르기(Primary Allergy)

식용곤충에 대한 알레르기 감작 확인 시험에서 arginine kinase, tropomyosin, myosin heavy and light chain, larval cuticle protein (A1A, A2B, A3A), Actin-87E, cuticular protein, chitin-binding protein, troponin T에 대한 IgE가 발견되었다(de Gier 등, 2018). 이는 곤충 단백질에 대한 감작이 가능하다는 것을 나타낸다. 곤충 섭취 후 알레르기 반응은 교차 반응이 훨씬 빈번할 것이라고 하지만, Broekman 등(2017)에서 밀웜에 민감한 피실험자가 새우에 알레르기가 없다는 것을 보여주었다. 이 연구는 주요 밀웜 알레르기 피험자가 pan-allergen인 tropomyosin과 arginine kinase를 거의 인식하지 못하며 모든 곤충 종에 교차 반응하지 않으므로 밀웜에 대한 주요 감작이 유충 큐티클 단백질과 같은 다른 단백질이 역할을 하였을 것이라 보고하

표 2. 곤충 cross-reactivity (co-sensitization) 주요 알레르겐

보유 알레르기	곤충 종류	주요 알레르겐	참고문헌
갑각류 알레르기	갈색거저리 유충 (<i>Tenebrio molitor</i>)	Tropomyosin	Van Broekhoven 등(2016)
갑각류/집먼지 진드기(HDM) 알레르기	갈색거저리 유충 (<i>Tenebrio molitor</i>)	α -Tubulin, β -tubulin, arginine kinase, actin, light chain myosin-like protein, tropomyosin 등	Verhoeckx 등(2014)
새우 알레르기 (Shrimp)	갈색거저리 유충 (<i>Tenebrio molitor</i>)	Tropomyosin, arginine kinase 등	Broekman 등(2016)
새우 알레르기 (Prawn)	봄베이 메뚜기 (<i>Patanga succincta</i>)	Arginine kinase, enolase, hexamerin	Phiriyangkul 등(2015)
	쌍별 귀뚜라미 (<i>Gryllus bimaculatus</i>)	Arginine kinase, hexamerin 1B	Srinroch 등(2015)
집먼지 진드기 알레르기 (HDM)	갈색거저리 유충 (<i>Tenebrio molitor</i>)	α -Amylase, hexamerin 1B precursor, muscle myosin	Van Broekhoven 등(2016)

였다(Broekman 등, 2017). 추가 연구에서도 곤충에 대한 민감성이 종 특이적일 수 있다는 가능성을 제시하였고, 이는 다른 곤충에 대한 알레르기가 특정 단백질에 의해 유발될 수 있으므로 갈색거저리에 민감한 사람이 모든 곤충에 반응하는 것은 아니라고 말한다(De Marchi 등, 2021).

하지만, 현재까지 식용곤충에서 확인된 많은 알레르겐은 tropomyosin과 arginine kinase와 같은 교차 반응성이 높은 알레르기 항원이다. 따라서 tropomyosin과 arginine kinase에 대한 IgE 반응 중 일부는 실제 주요 감작이 아닌 교차 반응이라고 추측할 수도 있다(Jeong 등, 2020).

3. 식용곤충 알레르기 제어 기술

식용곤충이 인간 및 동물의 식량 자원으로서의 관심이 높아지고 있는 가운데, 보다 안전한 섭취를 위해 알레르기 유발 가능성에 대한 안전성을 확보하는 것이 중요하다(Pali-Schöll 등, 2019). 곤충을 식품 제형으로 활용할 경우, 미생물학적 안전성을 보장하기 위해 반드시 채집 후 처리(데치기, 저온 살균 및 멸균)를 거친다(De Marchi 등, 2021). 이와 같은 식품 가공 기술은 단백질 구조에 방해를 일으켜 알레르기 유발 가능성을 변화시킬 수 있다. 일반적으로 열처리와 효소 가수분해 등이 알레르기 유발

성을 감소시킬 수 있다고 보고된다(Jeong 등, 2020). 이러한 점에서 식용곤충 가공 기술은 알레르기 안전성을 확보하기 위한 중요한 수단으로 간주된다.

1) 열처리 기술

다양한 열처리 기술(끓이기, 굽기 및 튀기기 등)은 식용곤충의 맛과 기호성을 향상시킬 뿐만 아니라 식품 안전성을 보장하기 위해 사용된다. 다양한 열처리가 식용 곤충 알레르겐에 미치는 영향에 대한 연구들을 표 3에 나타내었다. Broekman 등(2015)은 갈색거저리(*Tenebrio molitor*) 유충을 대상으로 데치기(blanching, 100℃, 1분), 끓이기(boiling, 100℃, 10분), 굽기(baking, 1000W, 3-5분), 튀기기(frying, 180℃, 30초) 등의 열처리가 곤충 단백질 알레르기에 미치는 영향을 평가했다. 결과적으로 알레르기 저감에는 영향을 주지 않았지만, IgE 결합 단백질의 용해도에 영향을 미쳤다고 보고하였다. Van Broekhoven 등(2016)은 갈색거저리, 외미거저리(*Alphitobius diaperinu*) 그리고 아메리카왕거저리(*Zophobas atratus*) 유충에 대해 끓임(5분)과 튀김(180℃, 5분)의 열처리를 진행하였을 때, 튀긴 거저리 유충에서는 HDM (집먼지진드기) 및 tropomyosin IgE 교차 반응성이 감소하는 것을 확인했다. 또한, 봄베이메뚜기(*Patanga succta*)를 튀겼을 때 glyceraldehyde-3-

phosphate dehydrogenase와 pyruvate kinase는 더 높은 반응성을 나타냈지만, arginine kinase, enolase, hexamerin의 면역 반응성은 감소시켰다(Phiriyangkul 등, 2015). 이를 통해서 열처리가 식용곤충 알레르기 저감에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

2) 화학적/효소적 기술

식용곤충 알레르겐성을 감소시키기 위하여 효소 가수분해 가공 방법을 이용할 수 있다(표 3). 풀무치(*Locusta migratoria*)의 면역반응성은 효소 가수분해에 의해 소실되었다(Pali-Schöll 등, 2019). 또한, Hall 등(2018)의 연구에서 희시무르귀뚜라미(*Gryllodes sigillatus*)에

alcalase를 사용한 효소 처리는 60-85%의 가수분해 정도에서 tropomyosin에 대한 IgE 반응성을 제거하였으며, He 등(2021)은 누에 번데기에서 알레르겐성을 감소시키기 위해 pepsin과 trypsin을 이용하였다.

그 외에도 효소 단독 처리 뿐만 아니라 He 등(2021)은 acetic acid와 NaHCO₃를 이용한 산-염기 처리로 누에 번데기의 알레르기성 저감 효과를 확인하였다. Boukil 등(2020)은 기존 가수분해에 대한 대안 전략으로 거저리 유충을 높은 정수압으로 전처리 후 alcalase로 가수분해를 진행하였고, 그 결과 단백질의 가수분해 정도가 향상하였으며, Hall 등(2020)은 희시무르귀뚜라미 단백질에 마이크로파 전처리 후 alcalase 가수분해의 적용으로 tropomyosin의 항원 결정부 양 감소와 알레르기 유발성

표 3. 식용곤충 알레르기 제어 기술

	기술	곤충 종류	결과	참고문헌
열처리 방법	Boiling	갈색거저리 유충 (<i>Tenebrio molitor</i>)	IgE 결합 단백질 용해도 영향	Broekman 등(2015)
	Frying	갈색거저리 유충 (<i>Tenebrio molitor</i>)	IgE 결합 단백질 용해도 영향	Broekman 등(2015)
		거저리 유충 3종 (<i>Tenebrio molitor</i> , <i>Zophobas atratus</i> <i>Alphitobius diaperinus</i>)	Tropomyosin과 IgE 교차 반응성 감소	Van Broekhoven 등(2016)
		봄베이메뚜기 (<i>Patanga succincta</i>)	Arginine kinase, enolase, hexamerin의 면역 반응성 감소	Phiriyangkul 등(2015)
	Heating	누에 번데기 (<i>Bombyx mori</i>)	알레르기 반응성 감소 (80, 100, 120°C)	He 등(2021)
		풀무치 (<i>Locusta migratoria</i>)	IgE 결합 능력 감소	Pali-Schöll 등(2019)
	Drying (트레이 건조, microwave 진공 건조)	쌍별귀뚜라미 (<i>Gryllus bimaculatus</i>)	열에 민감한 알레르기원(hexamerin 유사 단백질)과의 IgE 반응에 영향을 미침 (특히 트레이 건조)	Khammeethong 등(2024)
화학적 방법	Alcalase	희시무르귀뚜라미 (<i>Gryllodes sigillatus</i>)	60-85%의 가수분해정도에서 tropomyosin과의 IgE 반응성을 제거	Hall 등(2018)
	Alkalase, neutrase, flavouzyme, papain	풀무치 (<i>Locusta migratoria</i>)	IgE 결합 능력 감소	Pali-Schöll 등(2019)
	Pepsin, trypsin	누에 번데기 (<i>Bombyx mori</i>)	알레르기 반응성 감소	He 등(2021)
	산-염기 처리 (Acetic acid, NaHCO ₃)	누에 번데기 (<i>Bombyx mori</i>)	알레르기 반응성 감소 (pH 1.0, 2.3, 3.0, 5.0)	He 등(2021)
병용처리	High hydrostatic pressure +Alcalase, pepsin	갈색거저리 유충 (<i>Tenebrio molitor</i>)	Alcalase: 알레르겐성 단백질의 가수분해 정도 향상 Pepsin: 시험관 내 소화 향상	Boukil (2020)
	Microwave +Alcalase	희시무르귀뚜라미 (<i>Gryllodes sigillatus</i>)	Tropomyosin의 항원결정부 양 감소, 알레르기 유발성 감소	Hall 등(2020)

감소를 확인하였다. Hall 등(2017)에 따르면 상업용 효소 (alcalase)로 희시무르귀뚜라미를 가수분해하면 식품 성분 응용에서 기능성 대체 단백질의 공급원으로 이용 가능성을 가진 단백질 가수분해물이 생성된다. 따라서 적절한 식품 가공을 이용한다면 식용곤충의 알레르기성 반응을 제어할 수 있을 뿐만 아니라 우수한 기능적 특징을 가진 단백질 식품을 만들 수 있을 것이다.

III. 결론

최근, 전 세계적으로 식용곤충 시장이 성장함에 따라, 식용곤충 섭취에 따른 안전 문제(미생물, 화학적 잔류물질, 알레르기 등)에 대한 주의가 요구된다. 이 중 알레르기는 중요한 이슈 중 하나이다. 식용곤충 섭취는 피부, 위장 및 호흡기에 알레르기 증상을 유발할 수 있으며, 이는 tropomyosin과 arginine kinase에 의한 교차 반응성이 주요 원인이다. 이러한 교차 반응 때문에 갑각류나 절지동물 등에 알레르기를 가지고 있는 사람들은 식용곤충을 섭취하는 데 있어 주의를 기울여야 한다. 이와 같은 알레르기 반응을 줄여 식용곤충을 보다 안전하게 섭취하기 위하여 식용곤충의 가공은 필수적으로 요구된다. 알레르기를 제어하는 가공 방법으로는 열처리(끓임, 튀김, 건조

등) 및 효소 가수분해 외에도 다양한 연구가 진행된 바 있다. 하지만, 곤충산업이 성장하는 만큼 더욱 다양한 식용곤충 알레르기 발병 사례와 알레르기 제어 기술들을 연구하고 조사할 필요성이 있다. 특히, 식용곤충의 품질 변화를 최소화하면서도 알레르기 안전성을 확보할 수 있는 가공 기술을 탐색하여 미래 단백질 공급원에 대한 식량안보를 확보해야 할 것이다.

참고문헌

1. 김수희. 2017. 식용곤충산업의 현황과 전망. 한국농촌경제연구원, 세계농업, 207: 43-66.
2. 농림축산식품부. 2021. 제3차 곤충·양잠산업 육성 종합계획. 1-29.
3. 농림축산식품부. 2023. 2022년 곤충산업 현황 실태조사 결과. 1-3.
4. 농식품수출정보. 2022.11.25. 태국, 미래의 먹거리 사업으로 각광받는 곤충 식품 현황과 수출 대응 방안. https://www.kati.net/board/exportNewsView.do?board_seq=96491&menu_dept2=35&menu_dept3=71
5. 류정표. 2017. 세계 식용곤충 시장 및 가공기술 동향. 세계농업, 207: 25-42.
6. 식품음료신문. 2022.03.11. 미국, 곤충 식품 수용도 향상...관련 브랜드 06% 사업 확장. <https://www.thinkfood.co.kr/news/articleView.html?idxno=93801>
7. 한국소비자원. 2012. 알레르기 관련 위해정보 분석. 1-22.
8. 한국소비자원. 2017.12.08. 식용곤충식품 위해사고 경험 10명 중 1명꼴로 나타나. <https://www.kca.go.kr/home/sub>.

do?menukey=4002&mode=view&no=1002581256

9. 황두선, 임채환, 이승훈, & 윤은영. 2022. 인식개선을 통한 식용곤충 산업의 활성화 방안. 식품과학과 산업, 55(2), 128-139.
10. Aguilar-Toalá JE, Cruz-Monterrosa RG, Liceaga AM. 2022. Beyond human nutrition of edible insects: Health benefits and safety aspects. *Insects*, 13(11): 1007.
11. Beaumont P, Courtois J, Van der Brempt X, Tollenaere S. 2019. Food-induced anaphylaxis to *Tenebrio molitor* and allergens implicated. *Revue Française D'allergologie*, 59(5): 389-393.
12. Boukil A, Perreault V, Chamberland J, Mezdour S, Pouliot Y, Doyen A. 2020. High hydrostatic pressure-assisted enzymatic hydrolysis affect mealworm allergenic proteins. *Molecules*, 25(11): 2685.
13. Broekman HC, Knulst AC, de Jong G, Gaspari M, den Hartog Jager CF, Houben GF, Verhoeckx KC. 2017. Is mealworm or shrimp allergy indicative for food allergy to insects?. *Molecular Nutrition & Food Research*, 61(9): 1601061.
14. Broekman H, Knulst A, den Hartog Jager S, Monteleone F, Gaspari M, De Jong G, ... & Verhoeckx K. 2015. Effect of thermal processing on mealworm allergenicity. *Molecular Nutrition & Food Research*, 59(9): 1855-1864.
15. Broekman H, Verhoeckx KC, den Hartog Jager CF, Kruizinga AG, Pronk-Kleinjan M, Remington BC, ... & Knulst AC. 2016. Majority of shrimp-allergic patients are allergic to mealworm. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 137(4): 1261-1263.
16. de Gier S, Verhoeckx K. 2018. Insect (food) allergy and allergens. *Molecular Immunology*, 100: 82-106.
17. De Marchi L, Wangorsch A, Zoccatelli G. 2021. Allergens from edible insects: Cross-reactivity and effects of processing. *Current Allergy and Asthma Reports*, 21: 1-12.
18. Félix DV, Gonzalez-Díaz S, Macouzet-Sanchez C, Guzman-Avilan R, Henriquez RL, De Lira-Quezada C. 2022. Anaphylaxis to crickets, cross reactivity to house dust mite and associated cofactors. Case report. *Annals of allergy, Asthma & Immunology*, 129(5): S92.
19. Gautreau M, Restuccia M, Senser K, Weisberg SN. 2017. Familial anaphylaxis after silkworm ingestion. *Prehospital Emergency Care*, 21(1): 83-85.
20. Guillet C, Martin OY, Meincke C, Joerg L, Schmid-Grendelmeier P. 2022. Part II: Insect allergies-Inhalation and ingestion: A survey of the literature and our own cases. *Allergo Journal International*, 31(7): 257-265.
21. Hall FG, Liceaga AM. 2021. Isolation and proteomic characterization of tropomyosin extracted from edible insect protein. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 3: 100049.
22. Hall FG, Jones OG, O'Haire ME, Liceaga AM. 2017. Functional properties of tropical banded cricket (*Gryllobates sigillatus*) protein hydrolysates. *Food Chemistry*, 224: 414-422.
23. Hall F, Liceaga A. 2020. Effect of microwave-assisted enzymatic hydrolysis of cricket (*Gryllobates sigillatus*) protein on ACE and DPP-IV inhibition and tropomyosin-IgG binding. *Journal of Functional Foods*, 64: 103634.
24. Hall F, Johnson PE, Liceaga A. 2018. Effect of enzymatic hydrolysis on bioactive properties and allergenicity of cricket (*Gryllobates sigillatus*) protein. *Food Chemistry*, 262: 39-47.
25. He W, He K, Sun F, Mu L, Liao S, Li Q, ... & Wu X. 2021. Effect of heat, enzymatic hydrolysis and acid-alkali

- treatment on the allergenicity of silkworm pupa protein extract. *Food Chemistry*, 343: 128461.
26. Jeong KY, Park JW. 2020. Insect allergens on the dining table. *Current Protein and Peptide Science*, 21(2): 159–169.
 27. Ji KM, Zhan ZK, Chen JJ, Liu ZG. 2008. Anaphylactic shock caused by silkworm pupa consumption in China.
 28. Ji K, Chen J, Li M, Liu Z, Wang C, Zhan Z, ... & Xia Q. 2009. Anaphylactic shock and lethal anaphylaxis caused by food consumption in China. *Trends in Food Science & Technology*, 20(5): 227–231.
 29. Khammeethong T, Phiriyangkul P, Inson C, Sinthuvanich C. 2024. Effect of microwave vacuum drying and tray drying on the allergenicity of protein allergens in edible cricket, *Gryllus bimaculatus*. *Food Control*, 160: 110328.
 30. Krongdang S, Phokasem P, Venkatachalam K, Charoenphun N. 2023. Edible insects in Thailand: An overview of status, properties, processing, and utilization in the food industry. *Foods*, 12(11): 2162.
 31. Kung SJ, Fenemore B, Potter PC. 2011. Anaphylaxis to mopane worms (*Imbrasia belina*). *Annals of allergy, Asthma & Immunology*, 106(6): 538–540.
 32. Maillot A, Mathelin C, Cazanove G, Marteau A. 2023. Anaphylaxis after consumption of wasp larvae in Reunion island: A case report. *Frontiers in Allergy*, 4: 1213879.
 33. Mancini S, Sogari G, Espinosa Diaz S, Menozzi D, Paci G, Moruzzo R. 2022. Exploring the future of edible insects in Europe. *Foods*, 11(3): 455.
 34. Minoshima M, Tokunaga M, Koike Y, Ito Y. 2023. A young child and with allergic symptoms due to ingestion of edible cricket. *Arerugi=[Allergy]*, 72(10): 1258–1262.
 35. Nebbia S, Lamberti C, Giorgis V, Giuffrida MG, Manfredi M, Marengo E, ... & Rolla G. 2019. The cockroach allergen-like protein is involved in primary respiratory and food allergy to yellow mealworm (*Tenebrio molitor*). *Clinical and experimental allergy: Journal of the British Society for Allergy and Clinical Immunology*, 49(10): 1379–1382.
 36. Okezie OA, Kgomotso KK, Letswiti MM. 2010. Mopane worm allergy in a 36-year-old woman: A case report. *Journal of Medical Case Reports*, 4: 1–4.
 37. Pali-Schöll I, Meinschmidt P, Larenas-Linnemann D, Purschke B, Hofstetter G, Rodríguez-Monroy FA, ... & Jäger H. 2019. Edible insects: Cross-recognition of IgE from crustacean-and house dust mite allergic patients, and reduction of allergenicity by food processing. *World Allergy Organization Journal*, 12(1): 100006.
 38. Phiriyangkul P, Srinroch C, Srisomsap C, Chokchaichamnankit D, Punyarit P. 2015. Effect of food thermal processing on allergenicity proteins in Bombay locust (*Patanga succincta*). *International Journal of Food Engineeri*, 1(1): 23–28.
 39. Piatt JD. 2005. Case report: Urticaria following intentional ingestion of cicadas. *American Family Physician*, 71(11): 2048.
 40. Ribeiro JC, Sousa-Pinto B, Fonseca J, Fonseca SC, Cunha LM 2021. Edible insects and food safety: Allergy. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5): 833–847.
 41. Srinroch C, Srisomsap C, Chokchaichamnankit D, Punyarit P, Phiriyangkul P. 2015. Identification of novel allergen in edible insect, *Gryllus bimaculatus* and its cross-reactivity with *Macrobrachium* spp. *Allergens. Food*

Chemistry, 184: 160–166.

42. Taylor G, Wang N. 2018. Entomophagy and allergies: A study of the prevalence of entomophagy and related allergies in a population living in north-eastern Thailand. Bioscience Horizons: The International Journal of Student Research, 11, hzy003.
43. Van Broekhoven S, Bastiaan-Net S, de Jong NW, Wichers HJ. 2016. Influence of processing and *in vitro* digestion on the allergic cross-reactivity of three mealworm species. Food Chemistry, 196: 1075–1083.
44. Verhoeckx KC, van Broekhoven S, den Hartog-Jager CF, Gaspari M, de Jong GA, Wichers HJ, ... & Knulst AC. (2014). House dust mite (Der p 10) and crustacean allergic patients may react to food containing yellow mealworm proteins. Food and Chemical Toxicology, 65: 364–373.
45. Yew KL, Kok VSL. 2012. Exotic food anaphylaxis and the broken heart: Sago worm and takotsubo cardiomyopathy. Med J Malaysia, 67(5): 540–541.
46. Żuk-Gołaszewska K, Gałęcki R, Obremski K, Smetana S, Figiel S, Gołaszewski J. 2022. Edible insect farming in the context of the EU regulations and marketing—An overview. Insects, 13(5): 446.