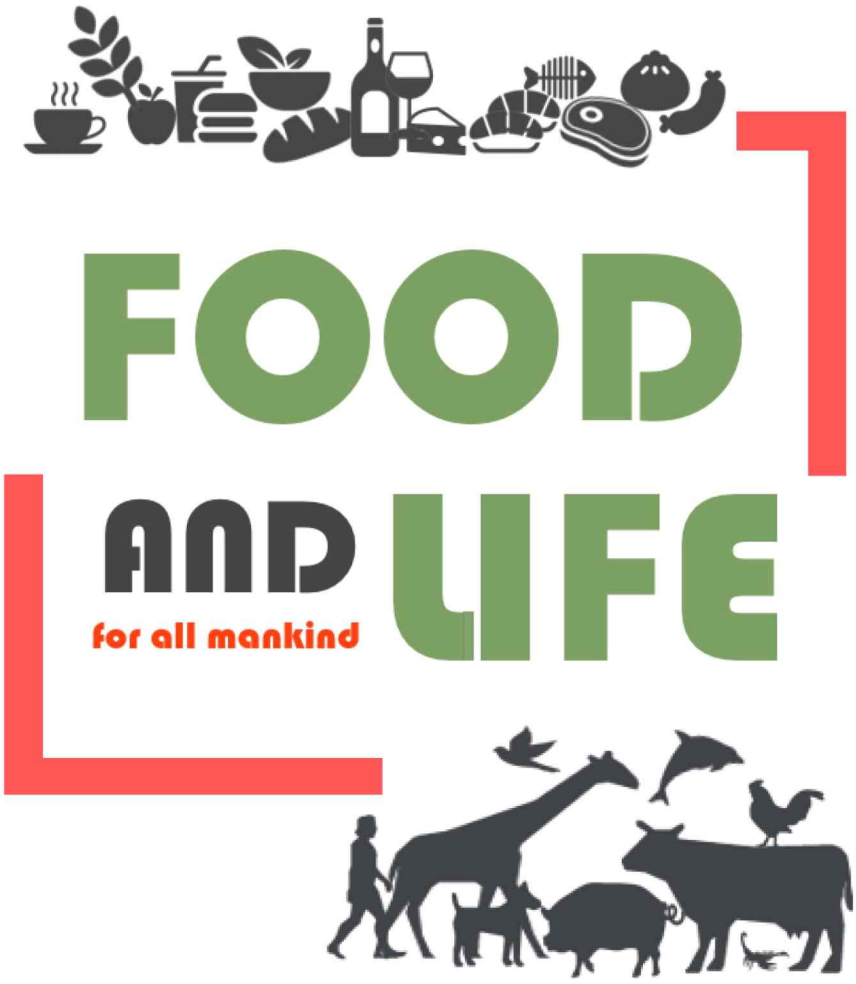


The Food and Life has published all type articles such as research articles, review articles, survey articles, research note, short communication or editorial since 2020. It covers the all scientific and technological aspects of food and life science.

https://www.foodnlife.org

Food and Life (2026) 2026(3):127-135
https://doi.org/10.5851/fl.2600001

Research Article Open Access

흰점박이꽃무지 유충의 항산화 활성 규명

신주이[1], 김형상[1,2,*]

[1]한경국립대학교 동물생명융합학부
[2]한경국립대학교 휴머니멀응용과학연구소

Characterization of antioxidant activity of *Protaetia brevitarsis seulensis* Larvae

Ju Yi Shin[1], Hyeong Sang Kim[1,2,*]

[1]*School of Animal Life Convergence Science, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea*
[2]*Institute of Applied Humanimal Science, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea*

Abstract

This study investigated the effects of four different processing methods, namely oven-drying (POD), roasting (PRD), pan-frying (PPD), and freeze-drying (PFD), on the total phenolic content (TPC) and antioxidant activities of *Protaetia brevitarsis seulensis* larvae (PBL). While PFD exhibited the highest TPC (5.10 g/100 g), it showed the lowest antioxidant activities in terms of DPPH radical scavenging activity, reducing power, and iron chelating ability. Conversely, thermal processing methods, particularly PRD and PPD, demonstrated significantly superior antioxidant potential despite lower TPC values. Pearson's correlation analysis using the treatment × concentration dataset (n=16) indicated a strong negative correlation (r=-0.97) between TPC and DPPH radical scavenging activity; this pattern suggests that non-phenolic, heat-derived constituents (e.g., Maillard reaction-related products) and/or other reducing components may contribute to the enhanced antioxidant responses of heat-treated PBL. Principal component analysis (PCA) clearly distinguished the physicochemical characteristics of the heat-treated groups from the freeze-dried group, confirming that thermal stress induces a positive shift in antioxidant functionality. Furthermore, the antioxidant composite index (ACI) was calculated to comprehensively evaluate the efficacy of each method; the PRD treatment achieved the highest score of 99.43, followed by PPD (96.29), POD (92.99), and PFD (78.48). These findings indicate that roasting is the optimal processing method for maximizing the antioxidant bioactivity of PBL, offering a more effective strategy for the development of functional food ingredients than conventional freeze-drying.

Keywords: *Protaetia brevitarsis seulensis* larvae, thermal processing, antioxidant activity, Maillard reaction, principal component analysis

서 론

최근 세계적인 인구 증가와 축산업으로 인한 온실가스 배출 문제가 심화됨에 따라, 식용 곤충은 기존 육류를 대체할 수 있는 지속 가능한 단백질원이자 친환경 미래 식량 자원으로 각광받고 있다(Rumpold and Schlüter, 2013). 식용 곤충은 수분 함량이 높아 가공 및 저장 과정에서의 미생물 증식을 억제하고 저장 안정성을 확보하기 위해 건조 및 살균 공정이 필수적으로 요구된다(Mishyna et al., 2019). 일반적인 건조 방법으로는 열풍 건조, 동결 건조, 로스팅, 팬프라잉 등이 이용되고 있으며, 이러한 가공 공정은 곤충의 물리적 특성뿐만 아니라 영양 성분 및 생리활성 물질의 화학적 변화를 초래한다. 일반적으로 동결건조는 열에 의한 영양소 파괴를 최소화하여 원물의 특성을 가장 잘 보존하는 방법으로 알려져 있으나, 긴 공정 시간과 높은 비용으로 인해 산업적 활용에는 한계가 존재한다(Lenaerts et al., 2018). 반면, 고온을 수반하는 열처리는 비타민 C나 열에 민감한 페놀성 화합물의 변성을 초래할 가능성이 있다. 그러나 최근 연구 결과들은 열처리가 식품 내 환원당과 아미노산 간의 비효소적 갈변 반응인 마이야르 반응을 촉진하여, 강력한 항산화 활성을 갖는 멜라노이딘과 같은 2차 대사산물을 생성한다고 보고하였다(Bolchini et al., 2025). 이는 단순히 원물의 성분을

*Corresponding author : Hyeong Sang Kim. School of Animal Life Convergence Science, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea. Tel: +82-31-670-5123, Fax: +82-31-670-5129, E-mail: dock-0307@hknu.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/).

보존하는 것을 넘어, 적절한 가공 공정이 생리활성을 증진시킬 수 있음을 시사한다. 귀뚜라미(*Gryllodes sigillatus*)와 메뚜기(*Schistocerca gregaria*)를 대상으로 한 연구에서는 삶기, 굽기, 생시료와 같이 열처리 방식에 따라 DPPH 및 ABTS 라디칼 소거능, 철이온 흡착력 및 환원력이 상이하게 나타나는 것으로 보고되었다(Zielińska et al., 2017). 또한 갈색거저리 유충(*Tenebrio molitor*)을 대상으로 다양한 가공 방법(동결건조, 열풍건조, 오븐구이, 로스팅, 팬프라잉, 튀김, 삶기, 찜 및 전자레인지 처리)을 적용한 연구에서도 공정에 따라 DPPH 및 ABTS 라디칼 소거능이 서로 다른 수준으로 나타나며, 이러한 경향은 총 페놀 화합물 함량과 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었다(Baek et al., 2019). 더불어 흰점박이꽃무지 유충(*Protaetia brevitarsis seulensis*)을 대상으로 한 연구에서도 데치기, 탈지 및 저장 온도와 같은 전처리 조건에 따라 총 페놀 화합물 함량 및 DPPH 라디칼 소거능이 유의적으로 변화하는 것으로 보고되어, 가공 조건이 항산화 활성에 영향을 미치는 주요 요인임이 확인되었다(Kim et al., 2022).

흰점박이꽃무지 유충은 동아시아 지역에서 전통적으로 혈행 개선 및 간 기능 보호 효능이 보고된 약용 소재로 이용되어 왔으며, 최근 식품 원료로 정식 등록됨에 따라 산업적 활용 범위가 확대되고 있다(Choi et al., 2025; Chon et al., 2012; Kwon et al., 2023). 특히 단백질과 불포화지방산이 많을 뿐만 아니라 폴리페놀, 플라보노이드 등 유용 생리활성 물질을 함유하고 있어, 천연 항산화 기능성 소재로서의 잠재력이 높은 것으로 평가받고 있다(Kim et al., 2022; Yoon et al., 2020). 이들 성분은 총 페놀성 화합물 함량(total phenolic content, TPC) 및 DPPH 라디칼 소거능과 같은 항산화 활성과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되었으며, 이러한 항산화 특성은 체내 산화적 스트레스 억제와 같은 생리적 기능과 직결되어 차세대 기능성 식품 소재로서의 광범위한 활용 가능성이 제시되고 있다(Choi et al., 2021). 또한, 흰점박이꽃무지 유충은 국내 식용 곤충 산업 내에서 비교적 널리 사육되는 대표적인 종 중 하나로(MAFRA, 2025), 대량 생산이 이루어지고 있어 실제 제품 개발 시 원료 수급 측면에서 활용 가능성이 높은 것으로 판단된다. 그러나 현재까지 진행된 연구는 주로 영양 성분 분석이나 단순 효능 평가에 국한되어 있으며, 가공 공정 변수에 따른 항산화 활성의 변화 양상 및 그 작용 기작을 체계적으로 비교 분석한 연구는 부족한 실정이다. 특히 다양한 열처리 조건이 유충 내 페놀성 화합물을 비롯한 생리활성 물질의 변동에 미치는 영향과, 이로 인한 DPPH 라디칼 소거능 및 환원력 등의 항산화 기작 변화를 규명한 기초 자료가 미흡한 상황이다. 이에 따라 실제 식품 가공 공정에서 항산화 기능성을 극대화할 수 있는 최적의 전처리 조건을 제시할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 흰점박이꽃무지 유충을 대상으로 열풍 건조, 로스팅, 팬프라잉, 동결 건조의 4가지 전처리 방법을 적용하여, 가공 공정이 유충의 총 페놀 화합물 함량과 항산화 활성(DPPH 라디칼 소거능, 철이온 흡착력, 환원력)에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 또한, 각 항산화 지표 간의 상관관계 분석을 통해 흰점박이꽃무지 유충의 항산화 효능을 극대화할 수 있는 최적의 가공 조건을 제시함으로써, 향후 고부가가치 기능성 식품 소재로서의 활용 가능성을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

흰점박이꽃무지 유충 분말 제조

실험 재료로 사용된 흰점박이꽃무지 유충은 버그드림(Daejeon, Korea)에서 구입하였으며, 부화 후 약 90일이 경과하여 체내 영양 축적이 극대화되고 몸 색이 노란색으로 변한 약 2.5-3.0 g의 3령 말기 개체를 선별하여 사용하였다. 시료는 3일간 절식시킨 후, 100℃의 끓는 물에서 유충이 수면으로 떠오르는 시점까지 짧게 데침(blanching) 처리하여 실험 재료로 사용하였다. 건조는 흰점박이꽃무지 유충(*Protaetia brevitarsis seulensis*)을 대상으로 열풍건조(oven-drying, POD), 로스팅(rosting, PRD), 팬프라잉(pan-frying, PPD) 및 동결건조(freeze-drying, PFD)의 4가지 방법으로 수행하였다. POD는 60℃ 건조기(LO-FS100, LKLAB KOREA, Namyangju, Korea)에서 24 h 처리하였다. PRD는 에어프라이어(SY-921, DONO KOREA, Bucheon, Korea) 180℃에서 10 min 가열한 후, 60℃에서 24 h 추가 건조하였다. PPD는 180℃ 팬에서 3 min 볶은 다음 60℃에서 24 h 건조하였다. PFD는 -45℃ 동결건조기(KN-HFD1, Zhengzhou Known Imp, Zhengzhou, China)에서 7 d 건조하였다. 처리 후 시료는 분쇄기(DA-10000G, DAESUNG ARTLON, Paju, Korea)로 분쇄하고 -30℃에서 보관하였다.

수용성 추출물 제조

전처리 분말을 증류수로 0.1, 0.25, 0.5, 1%(w/v) 농도로 조제한 뒤 4℃에서 24 h 추출하였다. 추출액은 원심분리기(Cef-D50.6, DAIHAN-Scientific, Wonju, Korea)로 1,500×g, 10 min 원심분리하여 상등액을 회수하였고, 이를 분석에 사용하였다.

총 페놀성 화합물

TPC는 Folin-Ciocalteu법(Lin and Tang, 2007)으로 정량하였다. 시료 0.1 mL에 증류수 2.8 mL와 Na_2CO_3 2.0 mL를 혼합한 뒤, 50% Folin-Ciocalteu 시약 0.1 mL를 가하였다. 실온에서 30 min 반응 후 750 nm에서 흡광도를 측정했으며, gallic acid (r^2=0.99) 표준곡선으로 환산하였다.

DPPH 라디칼 소거능

DPPH 라디칼 소거능(DPPH radical scavenging activity)은 Huang 등(2006)의 절차를 기반으로 평가하였다. 시료 2.0 mL에 0.2 mM의 DPPH 용액(0.5 mL)을 첨가한 뒤, 암조건에서 실온 30 min 반응시키고 517 nm에서 흡광도를 측정하였다. 양성대조는 ascorbic acid(AA)로 설정하였다.

$$\text{DPPH scavenging (\%)} = [1 - (\text{Abs_sample} / \text{Abs_control})] \times 100 \quad (1)$$

철(II) 이온 흡착력

철이온 흡착력(iron chelating ability)은 Le 등(2007)의 방법으로 분석하였다. 시료 0.5 mL에 0.6 mM $FeCl_2$ 용액(0.1 mL)과 메탄올(0.9 mL)을 혼합해 5 min 반응시킨 다음, ferrozine (0.5 mM, 0.1 mL)을 더해 암조건에서 30 min 추가 반응시켰다. 562 nm에서 흡광도를 측정하였고, ethylenediaminetetraacetic acid(EDTA)를 대조구로 사용하였다. 시료의 고유 색 또는 탁도에 의한 흡광도 간섭을 보정하기 위해, ferrozine을 첨가하지 않은 sample blank(시료 + $FeCl_2$ + 용매)를 별도로 측정하였고, 분석 흡광도에서 blank값을 차감한 후 철이온 흡착력(%)을 계산하였다:

$$\text{Iron chelation (\%)} = [1 - (\text{Abs_sample} / \text{Abs_control})] \times 100 \quad (2)$$

환원력

환원력(reducing power)은 Huang 등(2006)의 방법을 응용하였다. 시료 1 mL에 sodium phosphate buffer(200 mM, pH 6.6, 1 mL)와 potassium ferricyanide 용액(10 mg/mL, 1 mL)을 혼합하여 50℃ 배양기(C-INA3, Changshin, Hwaseong, Korea)에서 20 min 반응시켰다. 이후 trichloroacetic acid(100 mg/mL, 1 mL)를 넣어 반응을 정지시키고, 상등액 2 mL를 취한 뒤 ferric chloride(1 mg/mL, 0.4 mL)와 증류수(2 mL)를 순서대로 가하여 700 nm에서 흡광도를 측정하였다. 열처리 시료의 색 간섭을 최소화하기 위해 ferric chloride를 첨가하지 않은 sample blank를 별도로 측정하였으며, 최종 흡광도 계산 시 blank 값을 차감하여 환원력 값을 산출하였다. 양성대조는 AA로 하였다.

다변량 통계 분석 및 항산화 종합 지수 산출

본 연구에서 획득한 항산화 실험 데이터 간의 유기적인 관계를 규명하고, 전처리 방법에 따른 종합적인 효능을 평가하기 위해 상관관계 분석(correlation analysis), 주성분 분석(principal component analysis, PCA), 그리고 항산화 종합 지수(antioxidant composite index, ACI) 산출을 수행하였다.

첫째, 각 실험 지표(TPC, DPPH 라디칼 소거능, 철이온 흡착력, 환원력) 간의 상호 연관성을 파악하기 위해 Pearson의 상관계수(Pearson's correlation coefficient, r)를 산출하였다. 상관분석은 처리구(4수준)×농도(0.1, 0.25, 0.5, 1%; 4수준)의 조합으로 구성된 총 16개 데이터(n=16)를 사용하여 수행하였다. 다만 본 분석은 농도 의존적 변화의 영향을 함께 반영할 수 있으므로, 상관관계 결과는 기작을 단정하기 위한 근거가 아니라 전처리 조건과 농도 변화에 따른 지표 간 연관 경향을 탐색적으로 제시하는 수준에서 해석하였다. 도출된 상관계수는 -1에서 1 사이의 값을 가지며, 각 변수 간의 선형적 관계 강도와 방향성을 시각적으로 나타내기 위해 상관 행렬 히트맵(correlation matrix heatmap)으로 도식화하였다.

둘째, 전처리 방법에 따른 항산화 특성의 다변량 패턴을 시각화하고 처리구 간의 유사성을 그룹화하기 위해 PCA를 실시하였다. 각 실험 데이터는 단위와 범위가 다르므로 통계적 오류를 최소화하기 위해 표준화(standardization, Z-score normalization) 과정을 거친 후 분석에 사용하였다. 분석 결과는 제1주성분(principal component 1, PC1)과 제2주성분(principal component 2, PC2)을 축으로 하는 Biplot으로 나타내어, 각 처리구(score)와 실험 변수(loading) 간의 관계를 2차원 평면상에 동시에 투영하여 해석하였다.

셋째, 서로 다른 척도를 가진 항산화 실험 결과들을 통합하여 각 전처리 방법의 효능을 정량적으로 비교하기 위해 ACI를 산출하였다. ACI 산출을 위해 각 실험 항목(DPPH 라디칼 소거능, 철이온 흡착력, 환원력)의 1% 농도 데이터를 해당 실험의 최대값을 기준으로 백분율(%)로 환산하여 정규화하였다. 이후 정규화된 각 지표의 점수를 산술 평균하여 최종 ACI 점수를 도출하였으며, 이를 통해 단일 지표 평가의 한계를 보완하고 종합적인 항산화 활성을 평가하였다. ACI는 서로 다른 단위의 항산화 활성 지표를 통합하여 전처리 방법 간 종합적인 경향을 비교하기 위한 보조 지표로 설정하였다. 본 연구 범위에서는 각 지표의 상대적 중요도를 객관적으로 규정할 수 있는 사전 근거가 제한적이므로, 임의의 차등 가중치 적용에 따른 편향을 피하기 위해 동일 가중치(산술평균)를 적용하였다. 또한 ACI는 이원배치 분산분석(two-way ANOVA) 및 개별 항산화 지표 결과에 대한 해석을 보완하기 위한 탐색적 지표로 활용하였다. TPC는 항산화 활성 지표라기보다 phenolic equivalents 기반의 성분(환원성 물질) 지표로서 분석법 특성상 비페놀성 환원성 물질의 영향을 받을 수 있다. 이에 본 연구에서는 ACI는 기능적 항산화 활성 지표(DPPH 라디칼 소거능, 철이온 흡착력, 환원력)를 중심으로 통합하고, TPC는 활성 지표와의 관계를 해석하기 위한 설명 변수로 분리하여 상관분석 및 PCA 해석에 활용하였다. ACI 계산식은 다음과 같다.

ACI = [DPPH (%) + Iron Chelating ability (%) + Reducing power (OD)] / 3 (3)

여기서 각 항목의 정규화 값은 (measured value / maximum value) × 100으로 계산하였다. PCA와 ACI는 처리구 간 다중 지표 패턴을 보조적으로 요약하기 위한 탐색적 분석이며, 본 연구의 주요 결론은 two-way ANOVA 및 개별 지표 결과에 기반하여 도출하였다.

통계처리

모든 분석은 3회 반복하였다. 유의성 검정은 SPSS 소프트웨어(IBM SPSS Statistics, ver. 20; IBM, New York, NY, USA)를 이용하였다. 전처리 방법과 농도를 요인으로 한 two-way ANOVA를 수행하고, 사후검정은 Duncan 다중범위검정으로 $p<0.05$에서 처리구 간 차이를 판정하였다.

결과 및 고찰

총 페놀성 화합물

페놀성 화합물(phenolic compounds)은 항산화 활성과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있으며(Tungmunnithum et al., 2018), 곤충에서도 표피 및 지질 관련 대사로부터 유래한 페놀/폴리페놀 성분이 보고되어 항산화 기능과의 연관성이 제시된 바 있다(Choi et al., 2019). 본 연구에서 전처리별 TPC는 Table 1에 제시하였으며, PFD 처리구에서 5.10 g/100 g으로 가장 높았고, PPD 처리구에서 3.07 g/100 g으로 가장 낮았다($p<0.05$). 이러한 차이는 건조 온도와 가열 방식이 페놀성 성분의 안정성에 영향을 준 결과로 해석된다. 고온 처리 시 폴리페놀의 분해 또는 다른 성분과의 결합이 발생해 측정치가 감소할 수 있다는 보고가 있으며(Kang et al., 2003), 구조 변형에 따른 반응성 변화가 동반될 수 있다(Martín-Cabrejas et al., 2009). 반대로 PFD는 저온에서 수분을 제거하므로 열 민감 성분의 손실을 상대적으로 줄일 수 있고, 동애등에를 대상으로 한 연구에서도 PFD 처리구에서 TPC가 가장 높게 나타난 바 있다(Hyun et al., 2023). 다만 본 연구에서는 TPC가 높다고 해서 모든 항산화 지표가 동일하게 증가하지 않았는데, 이는 펩타이드 등 비페놀성 항산화 성분의 기여 가능성을 시사한다.

종합하면, 흰점박이꽃무지 유충에서 페놀성 화합물 보존 측면에서는 PFD가 유리한 공정으로 확인되었다. 그러나 항산화 기능은 단일 성분(예: TPC)만으로 설명되기 어려우므로, 추가 지표와 성분 변화(가열 생성물, 단백질 유래 성분 등)를 함께 고려한 공정 최적화가 필요하다.

DPPH 라디칼 소거능

본 연구에서는 전처리 및 농도 증가에 따라 DPPH 라디칼 소거능이 증가하는 경향을 보였으며(Table 2), 특히 PRD와 PPD 처리구는 0.25% 이상에서 50%를 상회하는 높은 활성을 나타낸 반면, PFD는 전 농도에서 상대적으로 낮았다($p<0.05$). 또한, DPPH 라디칼을 50% 저해하는 데 필요한 농도(IC_{50})는 값이 낮을수록 높은 항산화 활성을 의미하는데, PRD 및 PPD 처리구는 낮은 IC_{50} 값을 나타낸 반면 PFD 처리구는 가장 높은 값을 보여 열처리 공정에 따른 항산화 활성 차이를 나타냈다(Table 3).

이는 180℃ 수준의 가열(PRD/PPD)이 열 민감 성분의 변화와 함께 항산화 활성에 기여하는 신규 생성물의 형성을 촉진했을 가능성을 시사한다. 일반적으로 열처리 과정에서는 마이야르 반응이 진행되며, 이로 인해 다양한 반응 생성물이 형성될 수 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 마이야르 반응 생성물은 라디칼 소거능 및 철 이온 흡착력과 같은 항산화 활성에 기여할 수 있음이 보고되어 있으며, 특히 반응 후반에 형성되는 멜라노이딘과 같은 물질은 자유 라디칼을 소거하는 능력을 갖는 것으로 알려져 있다 (Bolchini et al., 2025). 이와 같은 결과는 가열 과정에서 마이야르 반응 생성물의 형성과 함께 항산화 활성이 증가한다는 기존 연구와도 일치한다. Huang 등(2023)은 대두박 단백질 가수분해물을 이용한 마이야르 반응을 통해 생성된 반응물에서 약 69.8%의 DPPH 라디칼 소거능을 확인하여, 열처리 과정에서 생성된 마이야르 반응 생성물이 자유 라디칼 소거능에 효과적으로 기여할 수 있음을 시사한다. 또한, 식용곤충인 귀뚜라미(*Gryllus assimilis*) 단백질을 이용한 연구에서도 마이야르 반응 후 DPPH 라디칼 소거능이 약 48.03% 증가한 것으로 나타나, 마이야르 반응 생성물이 전자 공여 기반 항산화 활성에 기여할 수 있음이 뒷받침된다(de Matos et

Table 1. Total phenolic contents (g/100 g) of *Protaetia brevitarsis seulensis* larvae (PBL)

Parameters	Treatments			
	POD	PRD	PPD	PFD
Total phenolic contents (g/100 g)	3.34^{B}±0.13	3.30^{BC}±0.17	3.07^{C}±0.13	5.10^{A}±0.04

Data are expressed as the mean ± SD.
$^{A-C}$ Means with different letters in the same row are different ($p<0.05$).
POD, oven-dried PBL; PRD, roasted PBL; PPD, pan-fried PBL; PFD, freeze-dried PBL.

Table 2. DPPH radical scavenging activity (%), iron chelating ability (%) and reducing power (O.D.) of *Protaetia brevitarsis seulensis* larvae (PBL)

Parameters	Treatments	Concentration (%)				
		0	0.1	0.25	0.5	1
DPPH radical scavenging activity (%)	AA	$0.00^{bA}\pm0.01$	$96.0^{aA}\pm0.24$	$96.1^{aA}\pm0.37$	$96.1^{aA}\pm0.14$	$96.1^{aA}\pm0.38$
	POD	$0.00^{eA}\pm0.01$	$36.1^{dBC}\pm3.00$	$44.1^{cC}\pm3.51$	$57.4^{bC}\pm2.65$	$66.5^{aC}\pm1.59$
	PRD	$0.00^{eA}\pm0.01$	$36.3^{dBC}\pm5.86$	$53.2^{cB}\pm1.94$	$59.5^{bBC}\pm3.67$	$73.5^{aB}\pm1.49$
	PPD	$0.00^{dA}\pm0.01$	$40.7^{cB}\pm6.22$	$50.4^{bB}\pm4.26$	$63.0^{aB}\pm2.13$	$68.2^{aBC}\pm6.25$
	PFD	$0.00^{eA}\pm0.01$	$31.4^{dC}\pm0.40$	$32.5^{cD}\pm0.59$	$33.8^{bD}\pm1.11$	$35.9^{aD}\pm0.50$
Iron chelating ability (%)	EDTA	$0.00^{bA}\pm0.01$	$99.9^{aA}\pm0.26$	$99.9^{aA}\pm0.13$	$99.5^{aA}\pm0.49$	$99.9^{aA}\pm0.14$
	POD	$0.00^{eA}\pm0.01$	$68.5^{dE}\pm0.34$	$84.8^{cD}\pm0.14$	$94.2^{bC}\pm0.61$	$96.8^{aD}\pm0.63$
	PRD	$0.00^{eA}\pm0.01$	$73.4^{dC}\pm0.40$	$87.7^{cB}\pm0.12$	$96.2^{bB}\pm0.05$	$98.1^{aB}\pm0.17$
	PPD	$0.00^{eA}\pm0.01$	$74.3^{dB}\pm0.34$	$86.1^{cC}\pm0.49$	$89.6^{bE}\pm0.47$	$99.8^{aA}\pm0.27$
	PFD	$0.00^{eA}\pm0.01$	$71.2^{dD}\pm0.87$	$84.2^{cD}\pm0.65$	$92.8^{bD}\pm0.23$	$97.5^{aC}\pm0.39$
Reducing power (O.D.)	AA	$0.01^{dA}\pm0.01$	$1.03^{cA}\pm0.22$	$1.17^{bcA}\pm0.34$	$1.52^{abA}\pm0.02$	$1.48^{aB}\pm0.01$
	POD	$0.03^{eB}\pm0.01$	$0.24^{dB}\pm0.01$	$0.55^{cB}\pm0.01$	$1.02^{bC}\pm0.01$	$1.40^{aC}\pm0.01$
	PRD	$0.03^{eB}\pm0.01$	$0.26^{dB}\pm0.01$	$0.55^{cB}\pm0.01$	$1.08^{bB}\pm0.01$	$1.53^{aA}\pm0.01$
	PPD	$0.03^{eB}\pm0.01$	$0.25^{dB}\pm0.01$	$0.55^{cB}\pm0.01$	$0.99^{bD}\pm0.01$	$1.47^{aB}\pm0.01$
	PFD	$0.03^{eB}\pm0.01$	$0.17^{dB}\pm0.01$	$0.41^{cB}\pm0.01$	$0.75^{bE}\pm0.01$	$1.36^{aD}\pm0.01$

Data are expressed as the mean ± SD.
$^{a-e}$ Means with different letters in the same row are different ($p<0.05$).
$^{A-E}$ Means with different letters in the same column are different ($p<0.05$).
O.D., optical density; AA, ascorbic acid; EDTA, ethylenediaminetetraacetic acid; POD, oven-dried PBL; PRD, roasted PBL; PPD, pan-fried PBL; PFD, freeze-dried PBL.

Table 3. IC_{50} values for DPPH radical scavenging activity (%) of *Protaetia brevitarsis seulensis* larvae (PBL)

Parameters	Treatments			
	POD	PRD	PPD	PFD
IC_{50} value of DPPH radical scavenging activity (%)	$0.42^{B}\pm0.03$	$0.30^{B}\pm0.03$	$0.22^{B}\pm0.15$	$3.91^{A}\pm0.30$

Data are expressed as the mean ± SD.
^{A,B} Means with different letters in the same row are different ($p<0.05$).
POD, oven-dried PBL; PRD, roasted PBL; PPD, pan-fried PBL; PFD, freeze-dried PBL.

al., 2025). 다만 본 연구에서는 Maillard reaction 생성물에 대한 직접 지표(갈변지수, MRP 정량 등)를 측정하지 않았으므로, 해당 해석은 가능성 수준으로 제한되며, 향후 관련 지표 분석 및 성분 동정을 통한 추가 검증이 필요하다.

따라서 흰점박이꽃무지 유충의 DPPH 기반 항산화 기능은 단순히 TPC 수준만으로 예측하기 어려우며, 가열 과정에서 단백질의 변성 및 분해에 의해 생성되는 저분자 펩타이드와 아미노산, 그리고 마이야르 반응을 통해 형성되는 반응 생성물과 같은 비페놀성 성분들의 영향을 함께 고려하여 해석할 필요가 있다. 이러한 결과는 항산화 활성이 특정 성분에 의해 단일하게 결정되기보다는 다양한 화합물 간의 상호작용과 복합적인 반응 기작에 의해 나타날 수 있음을 시사한다.

철(II) 이온 흡착력

철 이온 흡착력 측정 결과, PRD와 PPD 처리구에서 높은 흡착력이 관찰되었고, PFD 처리구는 상대적으로 낮았다($p<0.05$; Table 2). 특히 PPD 처리구의 1% 농도 결과는 EDTA와 유사한 수준을 보여 금속이온 억제 측면에서 유의미한 잠재력을 시사

한다.

이러한 활성 차이는 전처리 과정에서 유도된 구조적 변화와 성분 조성의 변화와 관련이 있는 것으로 보인다. 열처리 과정 중 단백질의 부분적 분해 및 구조 변화가 일어나면서 금속이온과 결합 가능한 아미노산 잔기 및 작용기가 보다 효과적으로 노출되었을 가능성이 있다. 또한 전처리 과정에서 생성되는 저분자 펩타이드와 같은 생리활성 성분은 금속이온과 상호작용하거나 결합할 수 있어, 이러한 성분 조성의 변화가 철이온 흡착력 차이에 기여했을 것으로 사료된다. 이는 식용곤충을 대상으로 한 연구에서 열처리 이후 단백질 가수분해물 및 펩타이드 분획의 Fe^{2+} 킬레이션 활성이 증가하며, 펩타이드 구조 및 아미노산 측쇄가 금속이온 결합에 중요한 역할을 한다고 보고한 결과와도 일치한다(Zielińska et al., 2017).

따라서 본 연구에서 관찰된 철이온 흡착력의 차이는 전처리 과정에서 유도되는 구조적 변화와 생리활성 성분의 변화가 복합적으로 작용한 결과로 판단되며, 흰점박이꽃무지 유충의 금속이온 흡착 특성은 가공 조건에 따라 유의적으로 달라질 수 있음을 시사한다. 향후에는 금속이온 결합에 관여하는 주요 성분과 반응 기작을 규명하는 추가 연구가 요구된다.

환원력

환원력 측정 결과, PRD 처리구가 전 농도에서 가장 높은 값을 보였고, PFD 처리구가 가장 낮았다($p<0.05$; Table 2). 특히 1%에서 PRD 처리구의 흡광도가 양성대조(AA)보다 높게 나타나, 환원 반응에 기여하는 성분의 활성 증가와 관련될 가능성을 시사한다.

이러한 결과는 열처리 과정에서 단백질의 구조 변화 및 분해에 의해 생성되는 저분자 펩타이드와 아미노산과 같은 성분들이 전자 공여 능력을 나타내어 환원력 증가에 기여할 수 있기 때문으로 판단된다. 실제로 갈색거저리(*Tenebrio molitor*) 및 귀뚜라미(*Gryllodes sigillatus*)와 같은 식용곤충 단백질을 열처리 또는 가수분해 처리하여 얻은 펩타이드의 항산화 활성을 분석한 연구에 따르면, 저분자 펩타이드와 특정 아미노산 잔기는 전자 공여 능력을 통해 환원력에 기여하는 것으로 보고된 바 있다(Zielińska et al., 2017). 또한, 가열 과정에서 형성되는 마이야르 반응 생성물 역시 전자 전달 능력을 가지는 것으로 알려져 있으며, 귀뚜라미 단백질을 이용한 연구에서도 마이야르 반응 후 환원력이 유의적으로 증가한 것으로 보고되어 이러한 경향을 뒷받침한다(de Matos et al., 2025).

항산화 성분과 활성 간의 상관관계 분석

흰점박이꽃무지 유충의 전처리 방법에 따른 항산화 성분(총 페놀성 화합물)과 활성(DPPH 라디칼 소거능, 철이온 흡착력, 환원력) 간의 유기적인 관계를 파악하기 위해 Pearson의 상관계수(r)를 분석하고 이를 히트맵으로 시각화하였다(Fig. 1). 분석 결과, DPPH 라디칼 소거능과 환원력은 r=0.81의 높은 양의 상관관계를 나타내어($p<0.01$), 유충 내 항산화 물질들이 라디칼 소거와 전자 공여 메커니즘에 동시에 관여함을 확인하였다.

주목할 점은 TPC 함량과 DPPH 라디칼 소거능 간의 상관계수가 r=-0.97로 매우 강한 음의 상관관계를 보였다는 것이다. 이는 일반적으로 식물성 소재에서 페놀 함량이 높을수록 항산화 활성이 증가한다는 기존 보고(Piljac-Žegarac et al., 2009)와

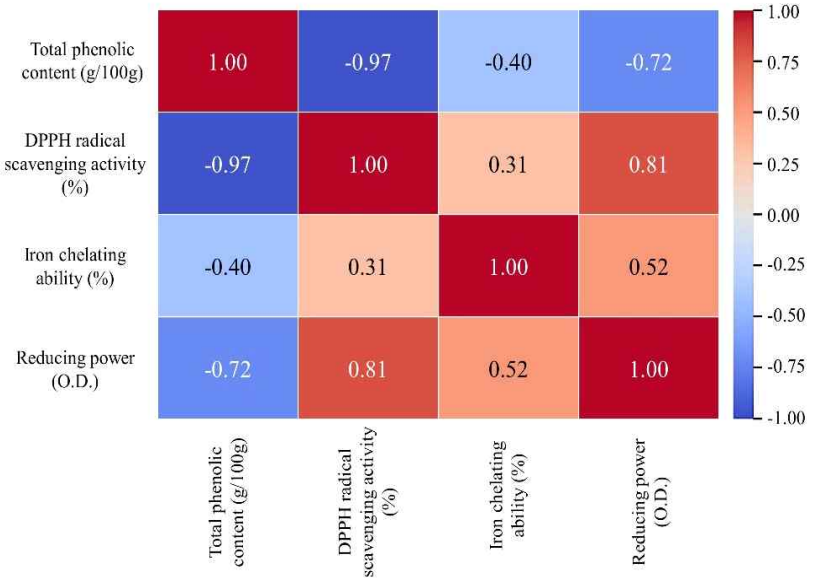


Fig. 1. Correlation heatmap of antioxidant indices in *Protaetia brevitarsis seulensis* larvae (PBL). O.D., optical density.

대치되는 결과이다. 본 연구에서 TPC가 가장 높았던 PFD 처리구는 오히려 가장 낮은 라디칼 소거능을 보인 반면, 열처리를 가한 PRD와 PPD 처리구는 낮은 TPC에도 불구하고 우수한 활성을 나타냈다. 이는 고온 가열 과정에서 생성된 멜라노이딘과 같은 마이야르 반응 생성물(Maillard reaction products, MRPs)이 Folin-Ciocalteu 시약과는 반응하지 않거나 낮게 측정되지만, 실제 항산화 활성에는 지배적인 기여를 했기 때문으로 사료된다(Manzocco et al., 2000). 따라서 흰점박이꽃무지 유충의 항산화 효능은 단순 페놀성 화합물보다는 가공 중 생성된 2차 대사산물이나 펩타이드 등의 복합적인 작용에 기인하는 것으로 판단된다.

주성분 분석

전처리 방법에 따른 흰점박이꽃무지 유충의 종합적인 항산화 특성을 비교하고 처리구 간의 유사성을 규명하기 위해 PCA를 실시하였다(Fig. 2). PC1과 PC2는 전체 데이터 변동의 각각 73.31%와 19.92%를 설명하였으며, 총 93.23%의 설명력을 보여 데이터의 패턴을 신뢰성 있게 나타내었다.

Biplot 분석 결과, PC1을 기준으로 우측에는 PFD 처리구가 위치하였고, 좌측에는 PRD, PPD, POD 처리구가 위치하여 명확한 그룹화 양상을 보였다. PFD 처리구는 TPC 벡터 방향과 밀접하게 연관되어 있어 열에 민감한 페놀성 화합물의 보존에는 유리함을 시사하였다. 반면, PRD와 PPD 처리구는 DPPH 라디칼 소거능 및 환원력 벡터 방향으로 강하게 편향되어 위치하였다. 이는 열처리가 유충의 화학적 구조 변형을 유도하여 실질적인 전자 공여 능력과 라디칼 소거능을 증진시키는 주요 인자임을 시각적으로 입증한다. 특히 PRD 처리구는 활성 벡터의 방향성과 가장 일치하여 항산화 활성 측면에서 가장 효율적인 가공법임을 다변량 통계적으로 확인하였다.

항산화 종합 지수

각 실험별 측정 단위가 상이하여 발생하는 단일 지표 평가의 한계를 극복하고, 전처리 방법에 따른 종합적인 항산화 효능을 정량적으로 평가하기 위해 ACI를 산출하였다(Fig. 3). ACI는 각 실험 지표를 100점 만점으로 환산하여 평균한 값으로, 점수가 높을수록 종합적인 항산화 기능성이 우수함을 의미한다. 분석 결과, PRD 처리구가 99.43점으로 가장 높은 ACI를 나타내었으며, 그 뒤를 이어 PPD(96.29), POD(92.99), PFD(78.48) 순으로 나타났다. PRD는 DPPH 라디칼 소거능과 환원력 항목에서 최고점(100점 환산치)을 기록하여 종합적인 활성이 가장 뛰어난 것으로 평가되었다. 반면, PFD는 영양 성분 보존 측면에서는 우수할 수 있으나, 항산화 활성 관점에서는 열처리 공정에 비해 상대적으로 낮은 효능을 보였다. 이는 곤충 식품 가공 시 단순히 원물을 건조하는 것보다 PRD와 같은 적절한 열처리를 병행하는 것이 기능성 물질의 활성화를 유도하여 산업적 활용 가치를 높일 수 있음을 시사한다. 결론적으로, 흰점박이꽃무지 유충의 항산화 소재화를 위한 최적의 전처리 방법은 PRD인 것으로 도출되었다.

결 론

본 연구는 미래 대체 단백질원이자 기능성 소재로서 주목받고 있는 흰점박이꽃무지 유충의 산업적 활용 가치를 제고하기

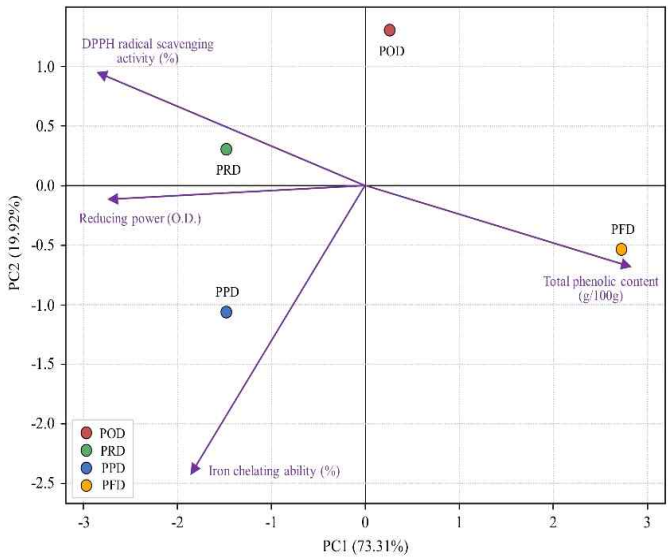


Fig. 2. Principal component analysis (PCA) biplot of antioxidant activities in *Protaetia brevitarsis seulensis* larvae (PBL). POD, oven-dried PBL; PRD, roasted PBL; PPD, pan-fried PBL; PFD, freeze-dried PBL.

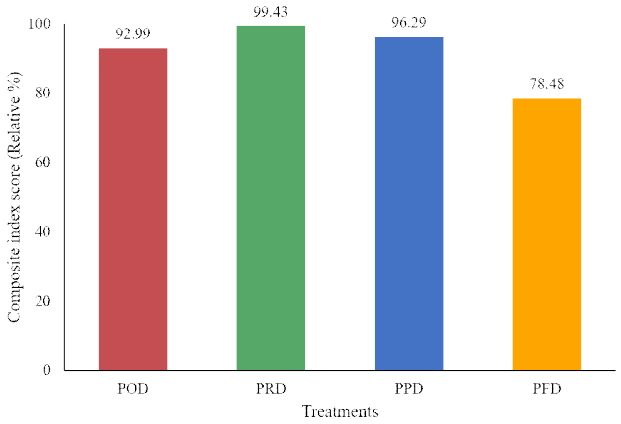


Fig. 3. Antioxidant composite index (ACI) in *Protaetia brevitarsis seulensis* larvae (PBL). POD, oven-dried PBL; PRD, roasted PBL; PPD, pan-fried PBL; PFD, freeze-dried PBL.

위해, POD, PRD, PPD, PFD의 4가지 전처리 공정이 유충의 항산화 특성에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 실험 결과, TPC는 열에 의한 손실이 적은 PFD 처리구에서 5.10 g/100 g으로 가장 높게 나타났다. 그러나 실제 항산화 효능을 대변하는 DPPH 라디칼 소거능, 환원력, 철이온 흡착력은 고온 열처리를 수반한 PRD 및 PPD 처리구에서 유의적으로 높은 활성을 보였다. 상관관계 분석 결과, TPC와 DPPH 라디칼 소거능 간에는 강한 음의 상관관계(r=-0.97)가 확인되었는데, 이는 흰점박이꽃무지 유충의 항산화 활성이 단순 페놀성 화합물뿐만 아니라, 가열 공정 중 마이야르 반응을 통해 생성된 멜라노이딘과 같은 비페놀성 화합물에 의해 기인했을 가능성을 시사한다. 또한, 다변량 통계 분석인 PCA를 통해 열처리 공정이 항산화 활성 벡터와 강한 양의 상관성을 가지며 PFD와 명확히 구분되는 특성을 가짐을 확인하였다. 특히, 각 실험 지표를 통합하여 산출한 ACI 평가에서 PRD 처리구는 99.43점으로 가장 우수한 기능성을 나타내어, PPD(96.29), POD(92.99), PFD(78.48) 대비 탁월한 항산화 효능을 입증하였다. 종합하면, 흰점박이꽃무지 유충을 고부가가치 항산화 소재로 활용하기 위해서는 영양 성분의 단순 보존에 초점을 맞춘 PFD 방식보다는, PRD 과 같은 적절한 열처리 공정을 적용하여 기능성 성분의 구조적 변환 및 활성화를 유도하는 것이 효과적임을 확인하였다. 따라서, 본 연구의 결과는 곤충 식품 가공 공정의 최적화 및 기능성 증진 기술 개발을 위한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 보인다. 다만, 본 연구에서는 항산화 활성에 기여하는 것으로 추정되는 마이야르 반응 생성물 및 펩타이드에 대한 직접적인 지표 분석은 포함하지 않았으므로, 이들의 구체적인 작용 기전에 대해서는 추가적인 검증이 필요하다. 향후 관련 물질에 대한 정밀 분석을 통해 항산화 활성 기작을 보다 명확히 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

Conflicts of Interest

The authors declare no potential conflict of interest.

Acknowledgments

Not applicable.

Ethics Approval

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

Author Contributions

Conceptualization: Kim HS.
Data curation: Shin JY.
Formal analysis: Shin JY.
Methodology: Shin JY, Kim HS.
Software: Shin JY.
Validation: Kim HS.
Investigation: Shin JY.
Writing - original draft: Shin JY, Kim HS.
Writing - review & editing: Shin JY, Kim HS.

Author Information

Ju Yi Shin (Ph. D. Candidate, Hankyong National University)
https://orcid.org/0009-0008-1532-7045
Hyeong Sang Kim
(Associate Professor, Hankyong National University)
https://orcid.org/0000-0001-7054-2989

References

Baek M, Kim MA, Kwon YS, Hwang JS, Goo TW, Jun M, Yun EY. 2019. Effects of processing methods on nutritional composition and antioxidant activity of mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae. Entomol Res 49:284-293.

Bolchini S, Morozova K, Ferrentino G, Scampicchio M. 2025. Assessing antioxidant properties of Maillard reaction products: methods and potential applications as food preservatives. Eur Food Res Technol 251:2039-2059.

Choi IH, Choi SU, Son JS, Jang WW, Chung TH. 2021. Antioxidant and cytoprotective effects of enzyme-extracted constituents of *Protaetia brevitarsis* seulensis

powder. Entomol Res 51:90-94.

Choi IH, Yu R, Lim YJ, Choi GS, Choi SU, Hwang JI, Son JS, Chung TH. 2019. Antithrombotic efficacy of *Protaetia brevitarsis* extract. J Environ Sci Int 28:639-643.

Choi Y, Lee DY, Mariano E Jr, Park J, Han D, Kim JS, Park JW, Namkung S, Hur SJ. 2025. A review on the current research and industrialization status of edible insect protein. Food Sci Anim Resour 45:981-997.

Chon JW, Kweon HY, Jo YY, Yeo JH, Lee HS. 2012. Protective effects of extracts of *Protaetia brevitarsis* on carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity in the mice. J Seric Entomol Sci 50:93-100.

de Matos FM, de Albuquerque Sales AC, Tavares GM, de Castro RJS. 2025. Effects of the Maillard reaction on the antioxidant and antihypertensive properties of black cricket (*Gryllus assimilis*) protein hydrolysates. ACS Food Sci Technol 5:1365-1373.

Huang SJ, Tsai SY, Mau JL. 2006. Antioxidant properties of methanolic extracts from *Agrocybe cylindracea*. LWT-Food Sci Technol 39:379-387.

Huang X, Wang P, Xue W, Cheng J, Yang F, Yu D, Shi Y. 2023. Preparation of meaty flavor additive from soybean meal through the Maillard reaction. Food Chem X 19: 100780.

Hyun JY, Nam JH, Chun JY. 2023. Quality characteristics of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) powder with various drying method. Food Eng Prog 27:120-128.

Kang HK, Yoo YK, Lee SK. 2003. Effects of prestorage heat treatment on changes of phenolic compound contents and incidence of skin blackening in 'Niitaka' pear fruits during cold storage. J Korean Soc Hortic Sci 44:197-200.

Kim HY, Kim D, Chun JY. 2022. Quality evaluation of hot air-dried edible insect '*Protaetia brevitarsis* larvae' including sacrificing method, storage temperature, and defatting condition. Food Eng Prog 26:69-77.

Kwon HW, Rhee MH, Shin JH. 2023. The inhibitory effects of *Protaetia brevitarsis seulensis* larvae extract on human platelet aggregation and Glycoprotein IIb/IIIa expression. Prev Nutr Food Sci 28:328-334.

Le K, Chiu F, Ng K. 2007. Identification and quantification of antioxidants in *Fructus lycii*. Food Chem 105:353-363.

Lenaerts S, Van Der Borght M, Callens A, Van Campenhout L. 2018. Suitability of microwave drying for mealworms (*Tenebrio molitor*) as alternative to freeze drying: impact on nutritional quality and colour. Food Chem 254:129-136.

Lin JY, Tang CY. 2007. Determination of total phenolic and flavonoid contents in selected fruits and vegetables, as well as their stimulatory effects on mouse splenocyte proliferation. Food Chem 101:140-147.

MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2025. Results of the 2024 insect industry survey. Available from: https://link24.kr/31UyeA0. Accessed at Mar 30, 2026.

Manzocco L, Calligaris S, Mastrocola D, Nicoli MC, Lerici CR. 2000. Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. Trends Food Sci Technol 11:340-346.

Martín-Cabrejas MA, Aguilera Y, Pedrosa MM, Cuadrado C, Hernández T, Díaz S, Esteban RM. 2009. The impact of dehydration process on antinutrients and protein digestibility of some legume flours. Food Chem 114:1063-1068.

Mishyna M, Martinez JJI, Chen J, Benjamin O. 2019. Extraction, characterization and functional properties of soluble proteins from edible grasshopper (*Schistocerca gregaria*) and honey bee (*Apis mellifera*). Food Res Int 116:697-706.

Piljac-Žegarac J, Valek L, Martinez S, Belščak A. 2009. Fluctuations in the phenolic content and antioxidant capacity of dark fruit juices in refrigerated storage. Food Chem 113:394-400.

Rumpold BA, Schlüter OK. 2013. Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production. Innov Food Sci Emerg Technol 17:1-11.

Tungmunnithum D, Thongboonyou A, Pholboon A, Yangsabai A. 2018. Flavonoids and other phenolic compounds from medicinal plants for pharmaceutical and medical aspects: an overview. Medicines 5:93.

Yoon CH, Jeon SH, Ha YJ, Kim SW, Bang WY, Bang KH, Gal SW, Kim IS, Cho YS. 2020. Functional chemical components in *Protaetia brevitarsis* larvae: impact of supplementary feeds. Food Sci Anim Resour 40:461-473.

Zielińska E, Baraniak B, Karaś M. 2017. Antioxidant and anti-inflammatory activities of hydrolysates and peptide fractions obtained by enzymatic hydrolysis of selected heat-treated edible insects. Nutrients 9:970.

ⓒ Copyright. Korean Society for Food Science of Animal Resources.

Date Received Feb. 5, 2026
Date Revised Apr. 6, 2026
Date Accepted Apr. 22, 2026