

치어기 조피볼락(*Sebastes schlegeli*) 사료 내 어분 대체원으로서 동애등에(*Hermetia illucens*) 유충분말의 이용에 따른 성장효과 및 성분분석

이진혁 · 김수환 · 한현섭 · 전지호 · 정성목¹ · 배진호¹ · 김준¹ · 허상우^{1*} · 이승한^{*}

국립군산대학교 해양생명과학과, ¹국립수산과학원 사료연구센터

Effects of Dietary Black Soldier Fly *Hermetia illucens* Larvae Meal as a Fishmeal Replacement on Growth and Body Composition in Juvenile Korean Rockfish *Sebastes schlegeli*

Jin-Hyuk Lee, Soohwan Kim, Hyon-Sob Han, Jiho Jeon, Seong-Mok Jeong¹, Jinho Bae¹, June Kim¹, Sang-Woo Hur^{1*} and Seunghan Lee^{*}

Department of Aquaculture and Aquatic Science, Kunsan National University, Gunsan 54150, Republic of Korea

¹Aquafeed Research Center, National Institute of Fisheries Science, Pohang 37517, Republic of Korea

A 10 week feeding trial was performed to evaluate the effects of dietary black soldier fly *Hermetia illucens* larvae meal (BSFM) on growth, hematology, and nonspecific immune responses in juvenile Korean rockfish *Sebastes schlegeli*. Groups of 20 fish weighing 3.5 ± 0.1 g were fed one of three experimental diets in which fish meal (FM) was partially replaced with BSFM: B₀ (FM 60%+BSFM 0%), B₄ (FM 56%+BSFM 4%), and B₇ (FM 53%+BSFM 7%). All diets were formulated to be isonitrogenous and isolipidic, ensuring that proximate nutrient compositions (crude protein and crude lipid) remained constant across treatments despite the graded substitution of FM with BSFM. Following the feeding trial, no significant differences were observed in weight gain, feed efficiency, or survival of fish fed the experimental diets. Whole-body proximate composition, hematological parameters (serum aspartate amino transferase, alanine amino transferase, glucose, and total protein), and nonspecific immune responses (superoxide dismutase, lysozyme and glutathione peroxidase) were not significantly influenced. Notably, whole-body lauric acid content and blood triglyceride levels in fish increased significantly with increasing dietary BSFM levels. Overall, BSFM can replace FM in the diet of juvenile Korean rockfish at levels up to 7% without negatively affecting growth performance.

Keywords: Black soldier fly, Fishmeal replacement, Korean rockfish

서 론

조피볼락(Korean rockfish *Sebastes schlegeli*)은 2024년 국내 해산어 양식 생산량 14,513톤을 기록하며 해산어 양식 품종 중 2위를 차지한, 경제적 가치가 높은 주요 양식 어종이다(KO-SIS, 2025). 조피볼락 양식에서 사료는 매우 중요한 요소로, 비용적인 측면에서 양식생산원가 중 많은 부분을 차지하기 때문에(Kim et al., 2019a), 효율적인 양식경영을 위해 고효율 배합사료 개발이 필수적이다(Kim et al., 2015; Cho et al., 2023). 또

한 조피볼락은 육식성 어종으로서 사료 내 높은 단백질 함량을 요구하며(Kim et al., 2002; Cho et al., 2015), 주요 단백질 사료 원료로 어분(fishmeal, FM)을 가장 많이 사용하고 있다(Kim et al., 2018, 2021). FM은 조피볼락을 포함한 여러 해산어 사료의 주요 단백질원으로 아미노산 및 지방산 조성과 기호성이 우수하여(Cho and Kim, 2010), 전 세계적으로 수요가 꾸준하게 증가하고 있지만(FAO, 2022), 어획량 감소 및 기후변화로 인한 어장 변화로 수급이 불안정하고 가격이 상승하고 있다(Kim et al., 2013; Eom et al., 2015). 따라서 지속 가능한 양식을 위해

*Corresponding author: Tel: +82. 63. 469. 1836 Fax: +82. 63. 469. 7442

E-mail address: shlee5863@naver.com

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0528>

Korean J Fish Aquat Sci 58(5), 528-539, October 2025

Received 10 June 2025; Revised 7 September 2025; Accepted 11 September 2025

저자 직위: 이진혁(연구원), 김수환(연구원), 한현섭(교수), 전지호(연구원), 정성목(연구사), 배진호(연구사), 김준(연구원), 허상우(연구사), 이승한(교수)

FM을 대체할 수 있는 다양한 동·식물성 단백질원에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며(Lee et al., 2016; Lee et al., 2023; Kim and Cho, 2024; Zaman and Cho, 2025), 최근 FM을 대체할 수 있는 유용한 단백질원으로 곤충이 주목받고 있다.

곤충은 사육면적 대비 생산성이 높고, 자원과 노동력이 다른 동물성 단백질원 생산에 비해 낮다(Kuo et al., 2022). 특히 동애등에(black soldier fly *Hermetia illucens*) 유충은 현재 산업적으로 대량생산이 가능한 표준화된 기술이 존재하고(van Huis et al., 2013; Henry et al., 2015), 음식물쓰레기 등 유기성 폐자원을 고부가가치 원료로 전환할 수 있는 친환경 산업에도 활용되고 있으며(Rana et al., 2015), 국내에서는 단미사료로 사용할 수 있게 등록되어 양어사료 원료로 활용되고 있다(MAFFA, 2025).

동애등에 유충의 영양성분은 사육 환경과 가공방법에 따라 달라지지만, 높은 단백질 함량과 양식어류에 필요한 필수아미노산을 함유하고 있으며, 지질 및 지방산 조성 또한 사육환경과 가공방법에 따라 조절이 가능하다(Barroso et al., 2014; Henry et al., 2015). 이러한 특성으로 동애등에 유충은 다양한 양식어종에서 곤충분을 활용한 FM 대체 연구들이 진행되고 있으며(Magalhães et al., 2017; Zhou et al., 2017; Xiao et al., 2018; Belghit et al., 2019; Kim et al., 2019b), 국내 해수 양식어종인 넙치(*Paralichthys olivaceus*), 강도다리(*Platichthys stellatus*) 및 참돔(*Pagrus major*)에서의 적정 사료 내 동애등에 분말의 적정 함량은 5~7%로 보고되었다(Hur et al., 2022; Jeong et al., 2023; Kim et al., 2024). 또한 동애등에 유충은 외부환경에 대한 질병을 방어하기 위한 강력한 항균 펩타이드를 발현하는 선천성 면역 체계를 갖추고 있으며(Andreu and Rivas, 1998; Bullet et al., 1999), 외골격의 주요 성분인 키틴은 천연 항생제 역할을 하여 기능성 첨가제로 활용 가능하다고 보고되었다(Veldkamp et al., 2022). 특히 동애등에 유충에 다량 함유되어 있는 라우리산은 항균, 항바이러스 및 항진균 활성이 뛰어나 어류의 질병 억제에 큰 도움을 준다고 보고되었다(Suryati et al., 2023). 이와 같이 동애등에 유충은 단순한 단백질 공급원을 넘어, 면역 증진 및 항균 활성 등 기능성 효과를 겸비한 사료 원료로 주목받고 있으며, 조피볼락과 같은 육식성 어종에서 FM 대체는 물론 기능성 첨가제로서의 가능성도 평가되고 있다.

따라서 본 연구는 동애등에 유충을 FM 대체원으로 활용했을 때, 조피볼락 치어의 성장, 사료 이용성, 전어체 성분, 혈액학적 지표 및 비특이적 면역 반응에 미치는 영향을 평가하여, FM 대체 가능성과 기능성 사료 원료로서의 활용 가능성을 검토하고자 수행되었다.

재료 및 방법

실험용 사료제조 및 분석

실험사료는 경북 포항에 위치한 국립수산과학원 사료연구센

터에서 제조하여 사육실험에 사용하였고, 실험에 사용된 주요 단백질원인 FM과 대체 원료인 동애등에 유충 분말(black soldier fly larvae meal, BSFM)의 일반성분, lysine 및 methionine 분석결과를 Table 1에, 실험사료의 조성표 및 분석결과는 Table 2에 나타내었다.

실험사료는 60% FM을 주요 단백질원으로 사용하여 제조한 실험사료(B0), FM 56%와 BSFM 4%로 제조한 실험사료(B4), FM 53%와 BSFM 7%로 제조한 실험사료(B7)을 사용하였고, FM과 BSFM 비율 변화에 따른 단백질 및 지질 함량을 동일하게 맞추기 위해 소맥글루텐, 전분 및 어유의 함량을 조절하였다. 실험사료 제조는 각 원료에 중류수와 어유를 넣고 vertical mixer를 활용하여 혼합하고, 펠렛성형기를 이용해 제조하였다. 이후 25°C에서 건조기를 사용해 건조시킨 후 -10°C의 냉동고에 보관하여 사육실험에 사용하였다.

실험에 사용한 사육관리

사육실험은 경북 포항에 위치한 국립수산과학원 사료연구센터에서 수행하였고, 실험에 사용된 조피볼락 치어는 충남 태안에 있는 순천향대학교 해양수산연구소 종자양식장에서 구입하여 2주간 예비 사육하여 적응시켰다. 모든 실험 방법은 국립수산과학원 동물실험윤리위원회 지침을 준수하였다(승인번호, 2025-NIFS-IACUC-18).

사육실험은 예비 사육하여 적응시킨 조피볼락 치어를 유수식 FRP 원형수조(250 L) 9개에 수조 당 200마리(3.5 ± 0.1 g/마리) 씩 3반복으로 B0, B4 및 B7 사료 실험구에 무작위로 나누어 배치하여 총 10주간 사육 실험을 수행하였다. 실험사료 공급은 조피볼락 양식 표준 매뉴얼(NIFS, 2017)을 참고해 1일 2회 (09:00, 16:00)에 걸쳐서 어체중의 3.5~7.0%를 제한 공급하였다. 사육수는 별도의 수온 유지장치 없이 자연해수를 사용하였고, 충분한 산소 공급을 위해 각 수조에 에어스톤을 설치하였다.

사육환경에 대한 측정은 각 수조별로 다행목 수질측정기(YSI 63-10; YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA)를 활용하여 측정하였고, 실험 기간 중의 사육환경을 측정하였을 때 수온은 19.2~25.8°C, 산소포화도는 6.40~7.18 mg/L, pH는 7.51~8.23, 염분은 30.45~32.30 psu으로 측정되었다.

Table 1. Proximate composition (%) of fish meal (FM) and defatted black soldier fly *Hermetia illucens* larvae meal (BSFM)

Proximate composition (%)	Ingredients	
	FM	BSFM
Moisture	10.05	2.26
Crude protein	71.95	59.82
Crude lipid	9.74	4.52
Crude ash	13.59	14.68
Methionine	1.88	2.10
Lysine	5.21	6.60

실험어 측정 및 샘플 수집

사육실험 종료 후 실험어 성장을 조사하기 위해 24시간 절식 후, 각 수조의 실험어 전체 무게를 측정하여 증체율(weight gain), 일간성장률(specific growth rate), 단백질전환효율(protein efficiency ratio), 사료효율(feed efficiency), 일간사료섭취율(daily feed intake), 간중량지수(hepatosomatic index), 비만도(condition factor), 내장중량지수(viscerosomatic index) 및 생존율(survival rate)을 조사하였다.

각 수조 당 10 마리를 무작위로 포획하여 MS-222 (100 ppm)에 마취 후, 혈액과 전어체 시료를 채취해 분석하였다. 혈액은 미병부에서 채취하였으며, 헤파린이 처리된 주사기를 사용하

Table 2. Feed ingredients and proximate composition (%) of experimental diets

Ingredients (%)	Experimental diets ¹		
	B0	B4	B7
Fish meal (FM; Anchovy)	60.0	56.0	53.0
Black soldier fly meal (BSFM)	0.0	4.0	7.0
Soybean meal	13.0	13.0	13.0
Wheat gluten	1.35	1.75	2.05
Starch	9.95	9.19	8.62
Wheat flour	8.0	8.0	8.0
Fish oil	5.0	5.36	5.63
Vitamin mix ²	1.0	1.0	1.0
Mineral mix ³	1.0	1.0	1.0
Stay-C (35%)	0.2	0.2	0.2
Choline chloride	0.5	0.5	0.5
Total (%)	100	100	100
Proximate composition (% dry matter)			
Moisture	4.96	5.15	5.23
Crude protein	52.49	52.20	52.13
Crude lipid	11.41	11.30	11.53
Crude ash	11.38	11.37	11.41

¹B₀, Contains 60% FM; B₄, Contains 56% FM and 4% BSFM; B₇, Contains 53% FM and 7% BSFM. ²Vitamin premix contained the following amount which were diluted in cellulose (g/kg mix): L-ascorbic acid, 121.2; DL- α -tocopheryl acetate, 18.8; thiamin hydrochloride, 2.7; riboflavin, 9.1; pyridoxine hydrochloride, 1.8; niacin, 36.4; Ca-D-pantothenate, 12.7; myo-inositol, 181.8; D-biotin, 0.27; folic acid, 0.68; p-aminobenzoic acid, 18.2; menadione, 1.8; retinyl acetate, 0.73; cholecalciferol, 0.003; cyanocobalamin, 0.003. ³Mineral premix contained the following ingredients (g/kg mix): MgSO₄·7H₂O, 80.0; NaH₂PO₄·2H₂O, 370.0; KCl, 130.0; ferric citrate, 40.0; ZnSO₄·7H₂O, 20.0; Ca-lactate, 356.5; CuCl, 0.2; AlCl₃·6H₂O, 0.15; KI, 0.15; Na₂Se₂O₃, 0.01; MnSO₄·H₂O, 2.0; CoCl₂·6H₂O, 1.0.

여 채취한 뒤 원심분리(5,000 rpm, 10분)를 통해 혈청을 분리한 후 -80°C에 보관하여 분석하였다. 전어체는 미서기로 분쇄하여 일반성분, 지방산, 아미노산 분석에 활용하였다.

실험자료 및 전어체 분석

실험자료 및 전어체의 일반성분 분석은 AOAC (2005) 방법에 따라 수분은 상압가열건조법(125°C, 3 h), 조회분은 직접화로법(550°C, 4 h), 조단백질은 자동 조단백분석기(Kejlte system 2300; FOSS, Hillerød, Denmark), 조지질은 Folch et al. (1957)의 방법에 따라 분석하였다.

전어체의 아미노산 분석을 위해서는 먼저 시료를 동결건조한 후, 0.02 g을 정확히 취하여 6 N 염산(15 mL)으로 110°C에서 24시간 가수분해를 실시하였다. 가수분해가 완료된 시료는 50 mL 플라스크에서 중류수를 사용하여 농축 증발시킨 뒤, 0.2 N sodium citrate buffer (pH 2.2)를 이용하여 회수하였다. 회수된 시료는 0.2 μm 여과지를 통해 여과한 후 S433 아미노산 분석기 (Sykam, Gilching, Germany)를 이용하여 570 nm 및 440 nm에서 ninhydrin 시약으로 반응시켜 분석하였다. Methionine과 cystine의 경우, 산화 전처리 과정이 필요하므로, 6 N 염산 대신 performic acid를 사용하여 산화 및 가수분해 과정을 거친 후 동일한 방법으로 분석하였다.

전어체 지방산 분석은 Folch et al. (1957)의 방법에 따라 클로로포름과 메탄올(2:1, v/v) 혼합 용매를 사용하여 총 지질을 추출한 후, 14% BF3-MeOH 용액을 사용해 methylation 처리를 하였다. 이후, capillary column (SPTM-2560, 100 m × 0.25 mm i.d., film thickness 0.20 μm; Supelco, Bellefonte, PA, USA)이 장착된 GC를 이용하여 지방산 조성을 분석하였다.

혈액학적 지표 및 비특이적면역 활성

실험어 혈액학적 지표 및 비특이적면역 활성을 측정하기 위해 혈액 성분을 분석하였다. 혈액학적 지표를 분석하기 위해 AST (aspartate aminotransferase activity), ALT (alanine aminotransferase activity), ALP(alkaline phosphatase), Giu (glucose), Chol (total cholesterol) 및 TG (triglyceride) 수치를 측정하였으며, 화학분석기(FujiDRI-CHEM 3500i; FUJIFILM, Tokyo, Japan)를 사용하여 분석하였다.

비특이적면역 활성을 측정하기 위해 효소면역분석법(enzyme-linked immunosorbent assay)을 통해 분석하였고, SOD (super oxidedismutase)는 SOD assay kit (Takara Korea, Seoul, Korea), LZM (lysozyme)은 LZM assay kit (BioVision Inc., Milpitas, CA, USA), GPx (glutathione peroxidase activity)는 GPx assay kit (Takara Korea)를 활용해 microplate reader로 흡광도를 측정해 정량하여 비교 분석하였다.

통계학적 분석

실험구의 배치는 완전확률계획법(completely randomized design)을 실시하고, 성장 및 분석결과는 SPSS Version 26.0 프

로그램(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하여 One-way ANOVA로 통계 분석하였으며, Tukey HSD test ($P \leq 0.05$)로 검정하였다. 모든 데이터는 평균값 \pm 표준편차(mean \pm SD)로 나타내었다.

결과 및 고찰

실험사료를 10주간 공급한 조피볼락 치어의 성장 및 사료 이용성 결과를 Table 3에 나타내었다. 모든 사료 실험구의 생존율은 90% 이상으로 각 실험구 간의 유의적인 차이가 없었고 ($P > 0.05$), 기타 폐사체는 질병으로 인한 증상 및 특이사항은 나타나지 않았다. 사육실험 결과, 증체율, 일간성장률, 사료효율, 단백질 전환효율 및 일간사료섭취율에서는 모든 사료 실험구 간 유의적인 차이를 보이지 않았고, 비만도 및 간중량지수 역시 유의적인 차이가 없었다. 반면, 내장중량지수는 B7 사료 실험구(FM 53%, BSFM)가 B0 사료 실험구(FM 60%) 보다 유

Table 3. Growth performance of Korean rockfish *Sebastes schlegelii* fed the experimental diets for 10 weeks¹

	Experimental diets ²			P-value
	B0	B4	B7	
IW ³	3.59 \pm 0.31	3.49 \pm 0.17	3.54 \pm 0.05	0.818
FW ⁴	22.44 \pm 2.92	22.73 \pm 3.30	22.38 \pm 3.48	0.990
WG ⁵ (%)	531.2 \pm 118.7	578.9 \pm 122.6	531.8 \pm 98.9	0.962
SGR ⁶ (%)	2.82 \pm 0.29	2.93 \pm 0.27	2.82 \pm 0.23	0.942
FE ⁷ (%)	105.5 \pm 20.7	106.4 \pm 20.3	103.3 \pm 18.7	0.988
PER ⁸	1.99 \pm 0.41	2.00 \pm 0.38	1.96 \pm 0.36	0.989
DFI ⁹ (%)	1.98 \pm 0.24	1.96 \pm 0.29	2.01 \pm 0.25	0.989
CF ¹⁰	1.52 \pm 0.16 ^{ab}	1.62 \pm 0.25 ^a	1.45 \pm 0.14 ^b	0.026
HSI ¹¹ (%)	2.22 \pm 0.32	2.08 \pm 0.30	2.21 \pm 0.30	0.271
VSI ¹² (%)	8.20 \pm 1.07 ^a	7.11 \pm 0.93 ^b	7.70 \pm 0.79 ^{ab}	0.020
SUR ¹³ (%)	95.5 \pm 6.5	90.7 \pm 8.1	93.8 \pm 3.0	0.942

¹Values are expressed as mean \pm SD (n=3). The absence of superscript letters indicates no significant difference among treatments ($P > 0.05$). ²B₀, Contains 60% FM; B₄, Contains 56% FM and 4% BSFM; B₇, Contains 53% FM and 7% BSFM. ³Initial body weight (g/fish). ⁴Final body weight (g/fish). ⁵WG (weight gain)=(final body weight - initial body weight) \times 100/initial body weight. ⁶SGR (specific growth rate)=[(ln final fish weight - ln initial fish weight)] \times 100/days reared]. ⁷FE (feed efficiency)=(wet weight gain/feed intake) \times 100. ⁸PER (protein efficiency ratio) = (wet weight gain/protein intake). ⁹DFI (daily feed intake; %)=(feed intake \times 100)/ [(initial body weight+final body weight+dead fish weight) \times days/2]. ¹⁰CF (condition factor; %)=[wet weight of fish/ (length of fish)³] \times 100. ¹¹HSI (hepatosomatic index)=(liver weight/body weight) \times 100. ¹²VSI (viscerosomatic index)=(visceral weight/body weight) \times 100. ¹³SUR (survival)=(final number of fish/initial number of fish) \times 100.

의적으로 낮게 나타났고 ($P < 0.05$), B4 사료 실험구 (FM 56%, BSFM 4%)는 B0 사료 실험구 및 B7 사료 실험구와 유의적인 차이가 없었다 ($P > 0.05$). 본 실험 결과 BSFM으로 FM을 7%까지 대체하였을 때 조피볼락 치어의 성장 및 사료효율에 유의적인 차이가 없었고, 선행 연구 결과 다양한 어종을 대상으로 BSFM으로 FM을 대체하였을 때, 성장 및 사료효율에 부정적인 영향이 없는 것으로 보고되었다. 유럽농어 (*Dicentrarchus labrax*)에서는 BSFM로 사료내 FM 32.4%를 19.5%까지 대체했을 때 성장과 사료효율이 유지되었고 (Magalhães et al., 2017), 대서양 연어 (*Salmo salar*)에서는 사료내 FM 10%를 100%까지 대체할 수 있다고 보고되었으며 (Belghit et al., 2019), yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*에서는 사료내 FM 40%를 22.3%까지 대체가 가능하다고 보고되었다 (Xiao et al., 2018). 그러나 Kroeckel et al. (2012)의 연구에서는 터봇 (*Scophthalmus maximus*)에서 BSFM 대체가 성장 저해를 유발하는 결과를 보고되기도 했다.

일부 어종에서 성장 저해의 주요 원인으로는 곤충 외골격의 주성분인 키틴이 지목되어 왔으며 (Lindsay, 1984; Olsen et al., 2006), 키틴은 poly- β -4-N-acetyl-glucosamine β (1 \rightarrow 4) 결합으로 연결된 고분자 유기물로, 어류가 이를 다량 섭취할 경우 소화 장애를 유발하는 것으로 알려져 있다 (Shiau and Yu, 1999). 이와 관련하여 Magalhães et al. (2017)은 동애등에 유충이 성장함에 따라 키틴 함량이 증가하고, 이로 인해 사료의 소화율이 저하될 수 있음을 보고하였다. 본 연구에서는 이전 연구들과 달리 부정적인 영향이 관찰되지 않았다. 이는 실험 사료의 단백질과 지질 조성이 치어기 조피볼락의 영양 요구를 충족하여 성장을 유지할 수 있었고, BSFM의 FM 대체 수준이 최대 7%로 낮아 키틴 함량이 상대적으로 적었기 때문으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 키틴 함량과 소화율을 직접 측정하지 않았으므로 성장 결과와의 인과 관계 해석에는 한계가 있으며, 향후 연구에서는 키틴 함량 및 소화 생리 지표에 대한 추가 검증이 필요하다.

한편, 본 실험에서는 BSFM 첨가에 따라 내장중량지수가 유의하게 감소하는 경향을 보였으며, 이는 해당 지표가 내장지방 축적의 수준을 반영한다는 기존 연구 결과와 부합한다 (Jobling et al., 1998, 2002). 선행 연구 결과 동애등에 유의 주요 성분인 라우리산이 체내에서 쉽게 산화되어 잉어 (*Cyprinus carpio*) 와 향어 (*Cyprinus carpio nudus*)의 내장지방 축적을 억제한다고 보고하였고 (Li et al., 2016; Xu et al., 2024), 라우리산이 다량 함유된 BSFM로 FM을 대체한 참돔, 무지개송어 (*Oncorhynchus mykiss*) 및 뱀장어 (*Anguilla japonica*)에서도 내장중량지수가 감소한다고 보고되었다 (Melenchón et al., 2020; Kuo et al., 2022; Takakuwa et al., 2022; Kim et al., 2024). 이러한 내장중량지수의 감소는 어류의 소화·대사 부담을 경감시켜 에너지 활용 효율을 높이고, 전반적인 건강 유지에 긍정적으로 작용할 가능성이 있다 (Yang et al., 2024). 또한, 내장중량지수 감소

는 어체 내 가식부 비율을 증가시켜 상업적 가치 향상에 기여 할 수 있으며(Igejiongbo and Olufade, 2022), 이는 어류의 영양적 가치와 상품성 평가를 위한 중요한 지표로 활용될 수 있다고 판단된다.

따라서 본 연구는 조피볼락 치어에서 BSFM을 7% 수준까지 대체하는 것이 성장과 사료 이용성에 부정적 영향을 주지 않음을 보여주었다. 그러나 이는 제한된 실험 조건에서 얻어진 결과이므로, 장기적이고 안정적인 활용 가능성을 확립하기 위해서는 사육기간과 FM대체율 변화에 따른 성장 검증과 라우리산이 조피볼락 내장지방 축적에 미치는 영향을 규명하는 체계적인 연구가 필요하다.

사육실험 종료 후 조피볼락 치어의 전어체 일반성분, 아미노산 및 지방산 분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 전어체 일반성분 분석 결과에서 수분, 조회분, 조지질 및 조단백질 함량이 모든 사료 실험구에서 유의적인 차이가 없었다($P>0.05$). 이러한 결과는 곤충분이 전어체의 일반성분 조성에 유의한 영향을 미치지 않았음을 시사한다. 이는 강도다리, 참돔, 잉어 등 다양한 어종에서 FM을 BSFM로 대체한 사료를 공급하였을 때, 어체 성분에 부정적인 영향이 없었다는 선행 연구 결과들과도 일치한다(Jeong et al., 2023; Kim et al., 2024; Zhou et al., 2017).

전어체 아미노산 조성 역시 모든 사료 실험구 간 유의적인 차이가 없었으며($P>0.05$), 이는 BSFM이 어류의 필수아미노산 요구량을 충분히 충족시켰음을 의미한다. 배합사료를 이용한 양식어류들은 주요 단백질원인 FM을 통해 필수아미노산을 공급받으며(Cho and Kim, 2010; Choi et al., 2004; Jeon et al., 2014; Kim et al., 2018), 동애등에 분말은 methionine과 lysine이 FM과 비교하여 상대적으로 부족하다는 연구결과가 있으나(Henry et al., 2015; Liland et al., 2017), 동시에 어류 성장에 필요한 필수아미노산을 다량 함유하고 있어(Belghit et al., 2019; Fisher et al., 2020), 다양한 어종에서 아미노산 결핍 없이 성장 할 수 있다는 연구결과도 보고되었다(Magalhães et al., 2017; Zhou et al., 2017; Belghit et al., 2019).

전어체 지방산 조성 분석 결과, 대체율이 높을수록 라우리산 함량이 유의적으로 증가하였고($P<0.05$), 그 외 다른 지방산 조성은 모든 사료 실험구 간에 유의적인 차이가 없었다($P>0.05$). 이는 BSFM에 다량 함유된 라우리산이 조피볼락 체내 지방산 조성에 직접적인 영향을 미쳤음을 보여준다(Gatlin et al., 2024; Goda et al., 2024). 선행 연구에서도 meagre *Argyrosomus regius*, 나일틸라피아(*Oreochromis niloticus*), 무지개송어 및 잉어와 같은 다양한 어종에서 BSFM이 첨가된 사료를 공급한 경우 어체 내 라우리산 함량이 증가한다고 보고되었다(Zhou et al., 2017; Guerreiro et al., 2020; Hoc et al., 2021; Goda et al., 2024). 라우리산은 중쇄지방산(medium-chain fatty acids)들 중 대표적인 지방산으로, 항균, 상처 회복, 면역 활성화 등 다양한 생리적 기능을 가지며(Kabara et al., 1972; Martínez-Vallespín et al., 2016; Jiang et al., 2018), 어류의 성장, 사료 이

용성, 면역 지수 및 장 건강 개선에 도움을 줄 수 있음이 다수의 연구에서 보고되었다(Silva do Couto et al., 2021; Ullah et al.,

Table 4. Proximate composition, essential amino acid and fatty acid profiles of Korean rockfish *Sebastes schlegeli* fed the experimental diets for 10 weeks¹

Proximate composition (%; dry matter)	Experimental diets ²			P-value
	B0	B4	B7	
Moisture	70.77±0.67	69.03±1.32	69.10±0.96	0.171
Crude protein	17.80±0.77	18.16±0.82	18.75±0.48	0.302
Crude lipid	7.26±0.48	8.19±0.40	8.47±0.66	0.068
Crude ash	4.19±0.21	4.56±0.27	4.68±0.42	0.219
Essential amino acids (EAA; %)				
Arginine	3.20±0.10	3.19±0.08	3.35±0.27	0.539
Histidine	1.08±0.23	1.07±0.17	1.08±0.16	0.998
Lysine	3.53±0.20	3.61±0.18	3.64±0.19	0.762
Phenylalanine	2.07±0.12	2.04±0.09	2.04±0.10	0.919
Leucine	3.62±0.18	3.64±0.14	3.67±0.13	0.929
Isoleucine	2.04±0.09	2.03±0.04	2.05±0.04	0.912
Valine	2.43±0.10	2.42±0.06	2.45±0.09	0.881
Threonine	2.29±0.13	2.29±0.10	2.33±0.12	0.897
Methionine	1.58±0.06	1.50±0.04	1.57±0.09	0.362
Fatty acid composition (%)				
C12:0	0.00±0.00 ^c	0.36±0.03 ^b	0.61±0.04 ^a	0.000
C14:0	4.23±0.07	4.42±0.14	4.42±0.15	0.211
C15:0	0.21±0.03	0.20±0.02	0.20±0.04	0.989
C16:0	17.18±0.81	17.07±0.65	16.66±0.63	0.658
C16:1	7.33±0.12	7.31±0.14	6.89±0.39	0.163
C17:1	0.22±0.19	0.21±0.19	0.22±0.21	0.926
C18:0	3.79±0.12	3.67±0.14	3.76±0.16	0.560
C18:1n9	23.56±0.31	23.58±0.40	22.89±0.55	0.205
C18:2n6	4.22±0.15	4.15±0.07	4.58±0.43	0.200
C18:3n3	0.69±0.04	0.71±0.05	0.70±0.06	0.884
C20:1n9	8.31±0.47	8.51±0.36	9.03±0.37	0.151
C20:5n3 (EPA)	8.99±0.56	8.76±0.44	8.62±0.47	0.656
C20:3n3	0.39±0.03	0.38±0.05	0.39±0.04	0.913
C22:1n9	0.43±0.04	0.39±0.03	0.40±0.04	0.460
C22:6n3 (DHA)	6.54±0.26	6.32±0.29	6.41±0.17	0.551
C23:0	0.50±0.07	0.50±0.05	0.51±0.07	0.979
C24:1n9	0.47±0.07	0.46±0.05	0.48±0.05	0.955
Others	12.94±0.39	12.86±0.27	12.99±0.18	0.848

¹Values are expressed as mean±SD (n=3). The absence of superscript letters indicates no significant difference among treatments ($P>0.05$). ²B₀, Contains 60% FM; B₄, Contains 56% FM and 4% BSFM; B₇, Contains 53% FM and 7% BSFM.

2022; Goda et al., 2024).

따라서 BSFM은 면역 기능 강화 및 질병 저항성 향상 측면에서 기능성 사료 원료로서의 활용 가능성을 가지며, 본 연구 결과는 BSFM이 조피볼락 치어의 체성분에 부정적인 영향을 미치지 않음을 시사함과 동시에, 지속 가능한 단백질원으로 적용될 수 있음을 보여준다.

사육실험 종료 후, 실험어의 혈액학적 지표 수치 및 비특이적 면역 및 항산화 활성 분석 결과를 Table 5에 나타내었다. 혈액학적 지표 수치를 분석한 결과, AST, ALT, ALP, Glu (혈중 글루코스) 및 Chol (혈중 콜레스테롤) 수치는 모든 사료 실험구 간 유의적인 차이가 나타나지 않았고($P>0.05$), TG (혈중 중성지방) 수치는 B7 사료 실험구에서 B0 사료 실험구보다 유의적으로 높게 나타났다($P<0.05$). 혈액학적 지표는 어류의 생리적 상태, 건강 평가, 질병 유무 및 환경 스트레스 반응을 파악하기 위해 활용되는데(Clauss et al., 2008; Seong et al., 2018), AST, ALT, ALP 수치는 간 손상과 관련이 있어 간 건강 지표로 활용되고(Song et al., 2014; Wang et al., 2014), 혈중 글루코스 수치는 외부 환경요인에 의한 스트레스로 혈중 농도가 증가하여 스트레스 대사 지표로 활용된다(Chang et al., 1999; Do et al., 2016). 본 연구에서는 AST, ALT, ALP 및 혈중 글루코스 수치 모두 사료 실험구 간 유의한 차이가 없었고, 선행 연구결과 동애등에 분말로 FM을 대체한 사료를 공급한 농어(*Lateolabrax japonicus*)와 잉어에서 수치에 차이가 없다고 보고하여(Zhou et al., 2017; Wang et al., 2019), BSFM 첨가가 간 기능이나 스

Table 5. Hematological and non-specific immune parameters of Korean rockfish *Sebastes schlegelii* fed the experimental diets for 10 weeks¹

Hematological parameters	Experimental diets ²			P-value
	B0	B4	B7	
AST ³ (U/L)	61.8±2.9	60.8±6.2	61.4±2.7	0.933
ALT ⁴ (U/L)	18.0±3.2	18.2±2.4	16.6±2.5	0.615
Glu ⁵ (mg/dL)	98.0±5.4	96.6±2.9	98.4±7.4	0.867
TG ⁶ (mg/dL)	96.0±5.8 ^b	100.0±1.9 ^{ab}	105.4±4.9 ^a	0.021
Chol ⁷ (mg/dL)	153.0±11.5	144.6±5.8	150.6±7.1	0.311
ALP ⁸ (U/L)	91.6±4.9	94.8±5.0	93.0±6.3	0.656
Non-specific immune parameters				
SOD ⁹ (U/mL)	38.59±4.28	41.33±3.98	40.56±4.74	0.601
LZM ¹⁰ (U/mL)	10.12±3.62	8.68±1.08	8.62±2.64	0.614
GPx ¹¹ (mU/mL)	225.0±12.0	219.4±12.9	221.0±17.6	0.820

¹Values are expressed as mean±SD (n=3). The absence of superscript letters indicates no significant difference among treatments ($P>0.05$). ²B₀, Contains 60% FM; B₄, Contains 56% FM and 4% BSFM; B₇, Contains 53% FM and 7% BSFM. ³Aspartate aminotransferase activity. ⁴Alanine aminotransferase activity. ⁵Glucose.

⁶Triglyceride. ⁷Total cholesterol. ⁸Alkaline phosphatase. ⁹Superoxidizedismutase. ¹⁰Lysozyme. ¹¹Glutathione peroxidase activity.

트레스 대사에 부정적 영향을 미치지 않았음을 시사한다.

혈중 콜레스테롤 수치는 모든 사료 실험구 간 유의한 차이가 없었으나, 선행 연구에서는 동애등에 분말로 FM을 대체한 사료를 공급한 줄무늬메기(*Pseudobagrus fulvidraco*)와 유럽농어에서 혈중 콜레스테롤 수치가 감소한 결과가 보고되었다(Magalhães et al., 2017; Haider et al., 2024). 이러한 혈중 콜레스테롤 저하 효과는 동애등에 분말의 주성분인 키틴이 지질 미셀(lipid micelles)과 결합하여 콜레스테롤 흡수를 억제한다는 특성 때문이라고 보고되었다(Sugano et al., 1980; Khoushab and Yamabhai, 2010). 그러나 본 연구에서는 BSFM의 대체율이 해당 선행 연구들에 비해 비교적 낮아 이러한 효과가 뚜렷하게 나타나지 않았을 가능성이 있으며, 이에 따라 향후 대체율을 단계적으로 올려서 그 효과를 보다 명확히 규명하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

혈중 중성지방 수치는 사료의 지질 함량과 밀접하게 연관되며(Kikuchi et al., 2000), 선행 연구결과 줄무늬메기, 터봇(*Scophthalmus maximus*), 잉어 및 유럽농어에서 동애등에 분말로 FM을 대체한 사료를 공급하였을 경우, 중성지방 수치가 감소한다고 보고되었고(Li et al., 2017; Magalhães et al., 2017; Khosravi et al., 2018; Haider et al., 2024), 이는 키틴이 담즙산 및 유리지방산과 결합하여 지질 흡수를 저해하는 메카니즘에 기인한다고 보고되었다(Gasco et al., 2018). 그러나 본 연구에서는 BSFM 첨가에 따라 혈중 중성지방 수치가 유의하게 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 BSFM에 다량 함유된 라우리산의 대사적 특성이 어체 내 지질 운반 및 저장 과정에 영향을 미쳤을 가능성을 시사한다. 선행 연구결과 유럽농어 치어에서 라우리산 보충은 사료 섭취량의 유의적인 증가와 함께 혈장 중성지방 농도를 상승시킨 바 있으며(Fontinha et al., 2025), 흑돔(*Acanthopagrus schlegelii*)에서도 0.1% 및 0.8% 수준의 라우리산을 보충한 사료 섭취 그룹에서 혈중 중성 수치가 대조구에 비해 높게 보고되었다(Ullah et al., 2022). 이러한 결과는 라우리산이 일부 어종에서 사료 섭취량을 증가시키고 간 내 지질 운반 경로를 활성화하여 혈중 중성지방 수치가 오히려 상승할 수 있음을 보여주며, 어종에 따른 특이적 대사 차이에 기인할 수 있다.

따라서 조피볼락 치어에 BSFM을 첨가한 사료 공급은 건강상 부작용 없이 혈액학적 지표가 정상 범위를 유지함을 확인하였으며, 향후 BSFM이 조피볼락의 지질 대사 및 에너지 이용에 미치는 영향을 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

조피볼락 치어의 혈청을 이용한 비특이적 면역 및 항산화 기능 분석 결과, SOD, LZM 및 GPx 활성 모두 실험구 간 유의적인 차이가 나타나지 않았다($P>0.05$). 어류의 항산화 능력은 건강 상태를 평가하는 중요한 지표로 활용되며(Iheanacho and Odo, 2020), 체내 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)이 과도하게 생성될 경우 산화 스트레스를 유발하여 다양한 질병 감수성이 증가할 수 있다(Ighodaro and Akinloye, 2018). SOD와

GPx는 이러한 ROS로 인한 세포 손상을 억제하는 항산화 효소로 잘 알려져 있으며(Dawood, 2020; Wang et al., 2022), 본 연구에서도 사료 실험구 간 유의차는 없었으나, BSFM 첨가구에서 SOD 활성 증가 경향이 관찰되었다. 그러나 이러한 경향은 통계적으로 유의하지 않기 때문에 BSFM 첨가가 조피볼락 치어의 항산화 기능이나 면역 반응을 직접적으로 향상시킨다고 단정하기 어렵다. 선행 연구결과 Abd El-Gawad et al. (2025)은 BSFM를 공급한 나일틸라피아에서 감염 실험 후 SOD 및 GPx 활성이 증가함을 보고하였고, Abdel-Latif et al. (2021)의 연구 역시 유럽농어에서 유의적인 증가한다고 보고하였다. 이러한 효과는 BSFM에 함유된 키틴의 항산화 특성 때문으로 판단되며, 키틴이 자유 라디칼을 제거하고 병원성 박테리아 감염에 의한 ROS 생성을 억제할 수 있다고 보고하였다(Ngo et al., 2009; Zhu et al., 2019). 따라서, 조피볼락에서 SOD 및 GPx 활성에 대한 BSFM의 효과를 명확하게 규명하기 위해서는 장기 사육 실험이나 병원체 감염실험 같은 후속 연구들을 통해 그 효과를 보다 명확하게 검증할 필요가 있다.

LZM 활성은 광범위한 항균작용을 통해 어류의 선천성 면역력을 강화하는 중요한 비특이적 면역 인자로(Yono, 1996), LZM 활성 증가는 병원체에 대한 저항성 향상에 기여할 수 있다(Doan et al., 2020). 선행 연구에서는 BSFM을 첨가한 사료를 공급 시 유럽농어와 바라문디(*Lates calcarifer*)에서 LZM 활성이 증가하는 경향이 보고되었으며(Chaklader et al., 2019; Abdel-Latif et al., 2021), 이는 BSFM에 함유된 항균 펩타이드 및 생리활성물질(Ravi et al., 2011)과 장내 미생물 자극을 통한 프리바이오틱 효과가 면역 반응을 촉진했을 가능성을 보고하였다(Bruni et al., 2018; Terova et al., 2019; Hu et al., 2020). 그러나 본 연구에서는 LZM 활성이 유의적인 차이를 나타내지는 않았지만 감소 경향을 보였으며, 이는 BSFM로 FM을 대체한 일본농어와 바라문디를 대상으로 한 선행 연구들에서도 실험구 간 유의한 차이가 없었던 결과와 일치한다(Wang et al., 2019; Hender et al., 2021). 일반적으로 면역 반응은 병원체 감염 후 활성화되는 경향이 있으며(Su et al., 2017), 본 연구에서는 실험어의 생리적 및 면역학적 지표가 정상 범위 내에 있었던 점을 고려할 때, BSFM 첨가가 어류 건강에 부정적인 영향을 미치지 않았다고 판단된다.

본 연구를 종합한 결과, 조피볼락 치어에 BSFM을 최대 7% 까지 FM을 대체하여 공급할 경우, 성장과 사료 이용성에 부정적 영향이 나타나지 않았다. 전어체 지방산 조성 결과, BSFM 을 첨가한 사료 실험구에서 라우릭산 함량이 증가하였으며, 이는 조피볼락 치어의 질병 저항성 향상에 기여할 수 있는 가능성을 시사한다. 또한 혈액학적 지표 및 비특이적 면역 반응에서 유의한 차이는 관찰되지 않았으나, 해당 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다. 결론적으로, 동애등에 유충을 활용한 BSFM은 조피볼락 치어의 FM 대체뿐만 아니라 기능성 사료 첨가제로서도 높은 활용 가능성을 보여주었다. 이는 양식

경영의 효율성 향상과 지속 가능한 사료 자원 확보에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 국립수산과학원 수산시험연구사업(지속가능한 친환경 배합사료 생산기술 및 품질관리 연구, R2025038)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2005. Official Methods of Analysis. AOAC, Arlington, VA, U.S.A. <https://doi.org/10.1002/0471740039.vec0284>.
- Abdel-Latif HMR, Abdel-Tawwab M, Khalil RH, Metwally AA, Shakweer MS, Ghetas HA and Khallaf MA. 2021. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in diets of European seabass: Effects on antioxidative capacity, non-specific immunity, transcriptomic responses, and resistance to the challenge with *Vibrio alginolyticus*. Fish Shellfish Immunol 111, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2021.01.013>.
- Abd El-Gawad EA, Zahran E, Youssuf H, Shehab A and Matter AF. 2025. Defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) diets improved hemato-immunological responses, biochemical parameters, and antioxidant activities in *Streptococcus iniae*-infected Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). BMC Vet Res 21, 104. <https://doi.org/10.1186/s12917-025-04484-7>.
- Andreu D and Rivas L. 1998. Animal antimicrobial peptides: An overview. Biopolymers 47, 415-433. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0282\(1998\)47:6<415::AID-BIP2>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0282(1998)47:6<415::AID-BIP2>3.0.CO;2-D).
- Barros FG, de Haro C, Sánchez-Muros MJ, Venegas E, Martínez-Sánchez A and Pérez-Bañón C. 2014. The potential of various insect species for use as food for fish. Aquaculture 422-423, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.12.024>.
- Belghit I, Liland NS, Gjesdal P, Biancarosa I, Menchetti E, Li Y, Waagbø R, Krogdahl Å and Lock EJ. 2019. Black soldier fly larvae meal can replace fish meal in diets of sea-water phase Atlantic salmon (*Salmo salar*). Aquaculture 503, 609-619. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.032>.
- Bruni L, Pastorelli R, Viti C, Gasco L and Parisi G. 2018. Characterisation of the intestinal microbial communities of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed with *Hermetia illucens* (black soldier fly) partially defatted larva meal as partial dietary protein source. Aquaculture 487, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.01.006>.
- Bulet P, Hetru C, Dimarcq JL and Hoffmann D. 1999. Antimicrobial peptides in insects: structure and function. Dev Comp Immunol 23, 329-344. [https://doi.org/10.1016/S0145-305X\(99\)00015-4](https://doi.org/10.1016/S0145-305X(99)00015-4).

- Chaklader MR, Siddik MAB, Fotedar R and Howieson J. 2019. Insect larvae, *Hermetia illucens* in poultry by-product meal for barramundi, *Lates calcarifer* modulates histomorphology, immunity and resistance to *Vibrio harveyi*. *Sci Rep* 9, 16703. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53018-3>.
- Chang YJ, Park MR, Kang DY and Lee BK. 1999. Physiological responses of cultured olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) on series of towering seawater temperature sharply and continuously. *Korean J Fish Aquat Sci* 32, 601-606.
- Cho JH and Kim IH. 2010. Fish meal - nutritive value. *J Anim Physiol Anim Nutr* 95, 685-692. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2010.01109.x>.
- Cho KH, Park JW, Lee BJ, Kim KW and Hur SW. 2023. Low extrusion pressure and small feed particle size improve the growth performance and digestive physiology of rockfish (*Sebastes schlegeli*). *Aquaculture* 566, 739199. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.739199>.
- Cho SH, Kim HS, Myung SH, Jung WG, Choi J and Lee SM. 2015. Optimum dietary protein and lipid levels for juvenile rockfish (*Sebastes schlegeli*, Hilgendorf 1880). *Aquac Res* 46, 2954-2961. <https://doi.org/10.1111/are.12450>.
- Choi SM, Wang ZJ, Park GJ, Lim SR, Kim KW, Bai SC and Shin IS. 2004. Dietary dehulled soybean meal as a replacement for fish meal in fingerling and growing olive flounder *Paralichthys olivaceus* (Temminck et Schlegel). *Aquac Res* 35, 410-418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01046.x>.
- Clauss TM, Dove AD and Arnold JE. 2008. Hematologic disorders of fish. *Vet Clin North Am Exot Anim Pract* 11, 445-462. <https://doi.org/10.1016/j.cvex.2008.03.007>.
- Dawood MAO. 2020. Nutritional immunity of fish intestines: Important insights for sustainable aquaculture. *Rev Aquac* 13, 642-663. <https://doi.org/10.1111/raq.12492>.
- Do YH, Min BH, Kim YD and Park MS. 2016. Changes on hematological factors and oxygen consumption of Korean rockfish *Sebastes schlegeli* in high water temperature. *J Fish Mar Sci Eng* 28, 738-745. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.3.738>.
- Doan HV, Hoseinifar SH, Hung TQ, Lumsangkul C, Jaturasitha S, El-Haroun E and Paolucci M. 2020. Dietary inclusion of chestnut (*Castanea sativa*) polyphenols to Nile tilapia reared in biofloc technology: Impacts on growth, immunity, and disease resistance against *Streptococcus agalactiae*. *Fish Shellfish Immunol* 105, 319-326. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.07.010>.
- Eom KH, Kim HS, Han IS and Kim DH. 2015. An analysis of changes in catch amount of offshore and coastal fisheries by climate change in Korea. *J Fish Bus Adm* 46, 31-41. <https://doi.org/10.12939/FBA.2015.46.2.031>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture (2022). Towards blue transformation. FAO, Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>.
- Fisher HJ, Collins SA, Hanson C, Mason B, Colombo SM and Anderson DM. 2020. Black soldier fly larvae meal as a protein source in low fish meal diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture* 521, 734978. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734978>.
- Folch J, Lees M and Stanley GS. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *J Biol Chem* 226, 497-509. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)64849-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)64849-5).
- Fontinha F, Martins N, Magalhães R, Peres H and Oliva-Teles A. 2025. Dietary lauric acid supplementation positively affects growth performance, oxidative and immune status of European seabass juveniles. *Fishes* 10, 190. <https://doi.org/10.3390/fishes10050190>.
- Gasco L, Finke M and van Huis A. 2018. Can diets containing insects promote animal health?. *J Insects Food Feed* 4, 1-4. <https://doi.org/10.3920/JIFF2018.x001>.
- Gatlin DMIII, Figueiredo De Carvalho PLP, Flint C, Miranda C and Tomberlin JK. 2024. Evaluation of lauric acid enhancement of black soldier fly larvae from coconut. *J Econ Entomol* 117, 1235-1241. <https://doi.org/10.1093/jee/toae093>.
- Goda AMA, El-Haroun E, Nazmi H, Doan HV, Aboseif AM, Taha MKS and Abou Shabana NM. 2024. Black soldier fly oil-based diets enriched in lauric acid enhance growth, hematological indices, and fatty acid profiles of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* fry. *Aquac Rep* 37, 102269. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102269>.
- Guerreiro I, Castro C, Antunes B, Coutinho F, Rangel F, Couto A, Serra CR, Peres H, Pousão-Ferreira P, Matos E, Gasco L, Gai F, Corraze G, Oliva-Teles A and Enes P. 2020. Catching black soldier fly for meagre: Growth, whole-body fatty acid profile and metabolic responses. *Aquaculture* 516, 734613. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734613>.
- Haider R, Khan N, Aihetasham A, Shakir HA, Fatima M, Tanveer A, Bano S, Ali W, Tahir M, Asghar M, Farooq A, Aftab S, Haq AU and Sarwar M. 2024. Dietary inclusion of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal, with exogenous protease supplementation, in practical diets for striped catfish (*Pangasius hypophthalmus*, Sauvage 1878). *PLoS One* 19, e0313960. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313960>.
- Hender A, Siddik MAB, Howieson J and Fotedar R. 2021. Black soldier fly, *Hermetia illucens* as an alternative to fishmeal protein and fish oil: Impact on growth, immune response, mucosal barrier status, and flesh quality of juvenile barramundi, *Lates calcarifer* (Bloch, 1790). *Biology* 10, 505. <https://doi.org/10.3390/biology10060505>.
- Henry M, Gasco L, Piccolo G and Fountoulaki E. 2015. Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future. *Anim Feed Sci Technol* 203, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001>.

- Hoc B, Tomson T, Malumba P, Blecker C, Jijakli MH, Purcaro G, Francis F and Caparros Megido R. 2021. Production of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) using black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae-based formulations with differentiated fatty acid profiles. *Sci Total Environ* 794, 148647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148647>.
- Hu Y, Huang Y, Tang T, Zhong L, Chu W, Dai Z, Chen K and Hu Y. 2020. Effect of partial black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal replacement of fish meal in practical diets on the growth, digestive enzyme and related gene expression for rice field eel (*Monopterus albus*). *Aquac Rep* 17, 100345. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100345>.
- Hur SW, Lee JH, Lee SH, Jeong SM and Kim KW. 2022. Effects of worm-based extruded pellets on growth performance of olive flounder *Paralichthys olivaceus* in commercial aquafarms. *Korean J Fish Aquat Sci* 55, 533-540. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0533>.
- Hwang HK, Min BH, Cho JK, Kim KD, Won KM and Paek JY. 2017. Reared in net cage culture. In: Standard Manual of Black Rockfish Culture. Myeong JI, Jun JC and Lee JY, National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea, 46-48.
- Igejongo TF and Olufade E. 2022. Gut content and viscerosomatic index analysis of family *Clariidae* in the riverine area of south western Nigeria. *East African Scholars J Agri Life Sci* 5, 53-59. <https://doi.org/10.36349/easjals.2022.v05i03.001>.
- Ighodaro OM and Akinloye OA. 2018. First line defence antioxidants-superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPX): Their fundamental role in the entire antioxidant defence grid. *Alex J Med* 54, 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.ajme.2017.09.001>.
- Iheanacho SC and Odo GE. 2020. Neurotoxicity, oxidative stress biomarkers and haematological responses in African catfish (*Clarias gariepinus*) exposed to polyvinyl chloride microparticles. *Comp Biochem Physiol C Toxicol Pharmacol* 232, 108741. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108741>.
- Jeon GH, Kim HS, Myung SH and Cho SH. 2014. The effect of the dietary substitution of fishmeal with tuna by-product meal on growth, body composition, plasma chemistry and amino acid profiles of juvenile Korean rockfish (*Sebastes schlegeli*). *Aquac Nutr* 20, 753-761. <https://doi.org/10.1111/anu.12153>.
- Jeong SM, Kim NL, Hur SW, Lee SH, Bae JH and Kim KW. 2023. Effect of dietary inclusion of black soldier fly larvae *Hermetia illucens* meal on growth performance of starry flounder *Platichthys stellatus* and feed value. *Korean J Fish Aquat Sci* 56, 373-379. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0373>.
- Jiang L, Liang X, Liu G, Zhou Y, Ye X, Chen X, Miao Q, Gao L, Zhang X and Mei L. 2018. The mechanism of lauric acid-modified protein nanocapsules escape from intercellular trafficking vesicles and its implication for drug delivery. *Drug Deliv* 25, 985-994. <https://doi.org/10.1080/10717544.2018.1461954>.
- Jobling M, Koskela J and Savolainen R. 1998. Influence of dietary fat level and increased adiposity on growth and fat deposition in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Aquac Res* 29, 601-607. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1998.00251.x>.
- Jobling M, Larsen AV, Andreassen B and Olsen RL. 2002. Adiposity and growth of post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar* L. *Aquac Res* 33, 533-541. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2002.00738.x>.
- Kabara JJ, Swieczkowski DM, Conley AJ and Truant JP. 1972. Fatty acids and derivatives as antimicrobial agents. *Antimicrob Agents Chemother* 2, 23-28. <https://doi.org/10.1128/AAC.2.1.23>.
- Khosravi S, Kim E, Lee YS and Lee SM. 2018. Dietary inclusion of mealworm (*Tenebrio molitor*) meal as an alternative protein source in practical diets for juvenile rockfish (*Sebastes schlegeli*). *Entomol Res* 48, 214-221. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.12306>.
- Khoushab F and Yamabhai M. 2010. Chitin research revisited. *Mar Drugs* 8, 1988-2012. <https://doi.org/10.3390/md8071988>.
- Kikuchi K, Sugita H and Watanabe T. 2000. Effect of dietary protein and lipid levels on growth and body composition of Japanese flounder. *Suisanzoshoku* 48, 537-543. <https://doi.org/10.11233/aquaculturesci1953.48.537>.
- Kim DY, Lee JS and Lee HD. 2013. A study on the supply and demand of fishmeal and stable securing strategies. *J Fish Bus Adm* 44, 61-76. <https://doi.org/10.12939/FBA.2013.44.3.061>.
- Kim KD, Jang JW, Kim KW, Lee BJ, Hur SW and Han HS. 2018. Tuna by-product meal as a dietary protein source replacing fishmeal in juvenile Korean rockfish *Sebastes schlegeli*. *Fish Aquat Sci* 21, 29. <https://doi.org/10.1186/s41240-018-0107-y>.
- Kim KD, Seo JS, Hur SW, Kim KW, Lee BJ and Bae KM. 2019a. Effects of dietary supplementation of cactus opuntia ficus-indica on growth, flesh quality, lysozyme activity and histological change of growing Korean rockfish *Sebastes schlegeli*. *Korean J Fish Aquat Sci* 52, 358-365. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0358>.
- Kim KD, Jang JW, Lee KW, Kim KW, Lee BJ, Hur SW and Han HS. 2021. The effect of a long-term dietary replacement of fishmeal with a mixture of alternative protein sources in a formulated diet on growth performance, body composition and economic efficiency of young Korean rockfish (*Sebastes schlegeli*). *Aquac Res* 52, 2004-2013. <https://doi.org/10.1111/are.15048>.
- Kim HJ, Jong SM, Bae JH, Kim KW and Hur SW. 2024. Evaluation of black soldier fly *Hermetia illucens* meal

- as a fish meal replacement for growing red seabream *Pagrus major*. Korean J Fish Aquat Sci 57, 342-348. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0342>.
- Kim J and Cho SH. 2024. Substitution effect of fish meal with various plant protein sources on growth performance and feed utilization in rockfish (*Sebastes schlegeli*) diets including jack mackerel meal used as feed stimulants. Front Mar Sci 11, 1339471. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1339471>.
- Kim KW, Wang XJ and Bai SC. 2002. Reevaluation of the optimum dietary protein level for the maximum growth of juvenile Korean rockfish, *Sebastes schlegeli* (Hilgendorf). Aquac Res 32, 119-125. <https://doi.org/10.1046/j.1355-557x.2001.00010.x>.
- Kim SH, Bae CH, Yun JH and Han HS. 2019b. Evaluation of black soldier fly meal as a dietary animal protein source replacing fish meal in Korean catfish *Silurus asotus*. J Fish Mar Sci Eng 31, 1495-1502. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.12.31.6.1495>.
- Kim SK, Kim KG, Kim KD, Kim KW, Son MH, Rust M and Johnson R. 2015. Effect of dietary taurine levels on the conjugated bile acid composition and growth of juvenile Korean rockfish *Sebastes schlegeli* (Hilgendorf). Aquac Res 46, 2768-2775. <https://doi.org/10.1111/are.12431>.
- KOSIS (Korea Statistical Information Service). 2025. Fishery Production Trend Survey. KOSIS, Daejeon, Korea. Retrieved from <http://kosis.kr> on Mar 14, 2025.
- Kroeckel S, Harjes AG, Roth I, Katz H, Wuertz S, Susenbeth A and Schulz C. 2012. When a turbot catches a fly: Evaluation of a pre-pupae meal of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute - Growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (*Psetta maxima*). Aquaculture 364-365, 345-352. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.08.041>.
- Kuo IP, Liu CS, Yang SD, Liang SH, Hu YF and Nan FH. 2022. Effects of replacing fishmeal with defatted black soldier fly (*Hermetia illucens Linnaeus*) larvae meal in Japanese eel (*Anguilla japonica*) diet on growth performance, fillet texture, serum biochemical parameters, and intestinal histomorphology. Aquac Nutr 14, 1866142. <https://doi.org/10.1155/2022/1866142>.
- Lee MJ, Kim J, Back SI and Cho SH. 2023. Substitution effect of fish meal with meat meal in diet on growth performance, feed consumption, feed utilization, chemical composition, hematology, and innate immune responses of rockfish (*Sebastes schlegeli*). Aquaculture 571, 739467. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739467>.
- Lee SM, Azarm HM and Chang KH. 2016. Effects of dietary inclusion of fermented soybean meal on growth, body composition, antioxidant enzyme activity and disease resistance of rockfish (*Sebastes schlegeli*). Aquaculture 459, 110-116. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.03.036>.
- Li S, Ji H, Zhong B, Tian J, Zhou J and Yu H. 2016. Influence of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae oil on growth performance, body composition, tissue fatty acid composition and lipid deposition in juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian). Aquaculture 465, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.08.020>.
- Li S, Ji H, Zhang B, Zhou J and Yu H. 2017. Defatted black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal in diets for juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian): Growth performance, antioxidant enzyme activities, digestive enzyme activities, intestine and hepatopancreas histological structure. Aquaculture 477, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.04.015>.
- Liland NS, Biancarosa L, Araujo P, Biemans D, Bruckner CG, Waagbø R, Torstensen BE and Lock EJ. 2017. Modulation of nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae by feeding seaweed-enriched media. PLoS One 12, e0183188. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183188>.
- Lindsay GJH. 1984. Adsorption of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) gastric lysozymes and chitinase by cellulose and chitin. Aquaculture 42, 241-246. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(84\)90104-2](https://doi.org/10.1016/0044-8486(84)90104-2).
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2025. Control of Livestock and Fish Feed Act. Retrieved from www.law.go.kr on Mar 18, 2025.
- Magalhães R, Sánchez-López A, Silva Leal R, Martínez-Llorens S, Oliva-Teles A and Peres H. 2017. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) pre-pupae meal as a fish meal replacement in diets for European seabass (*Dicentrarchus labrax*). Aquaculture 476, 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.04.021>.
- Martínez-Vallespín B, Vahjen W and Zentek J. 2016. Effects of medium-chain fatty acids on the structure and immune response of IPEC-J2 cells. Cytotechnology 68, 1925-1936. <https://doi.org/10.1007/s10616-016-0003-1>.
- Melenchón F, Larrán AM, De Mercado E, Hidalgo MC, Hidalgo G, Barroso FG, Fabrikov D, Lourenço HM, Pessoa MF and Tomás-Almenar C. 2020. Potential use of black soldier fly (*Hermetia illucens*) and mealworm (*Tenebrio molitor*) insect meals in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Aquac Nutr 27, 491-505. <https://doi.org/10.1111/anu.13201>.
- Ngo DN, Lee SH, Kim MM and Kim SK. 2009. Production of chitin oligosaccharides with different molecular weights and their antioxidant effect in RAW 264.7 cells. J Funct Foods 1, 188-198. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2009.01.008>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2017. Standard Manual of Rockfish (*Sebastes schlegelii*) Aquaculture. NIFS, Busan, Korea.
- Olsen RE, Suontama J, Langmyhr E, Mundheim H, Ringo E, Melle W, Malde MK and Hemre GI. 2006. The replacement of fish meal with Antarctic krill, *Euphausia superba* in diets for Atlantic salmon, *Salmo salar*. Aquac Nutr 12, 280-290. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2006.00400.x>.

- Rana KS, Salam MA, Hashem S and Islam MA. 2015. Development of black soldier fly larvae production technique as an alternate fish feed. *Int J Res Fish Aquac* 5, 41-47.
- Ravi C, Jeyashree A and Devi KR. 2011. Antimicrobial peptides from insects: An overview. *Res Biotechnol* 2, 1-7.
- Seong MJ, Lee SH, Lee SH, Song YJ, Bae JH, Chang KH and Bai SC. 2018. The effects of different levels of dietary fermented plant-based protein concentrate on growth, hematology and non-specific immune responses in juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Aquaculture* 483, 196-202. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.10.023>.
- Shiau SY and Yu YP. 1999. Dietary supplementation of chitin and chitosan depresses growth in tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*. *Aquaculture* 179, 439-446. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00177-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00177-5).
- Silva do Couto MV, da Costa Sousa N, Guimarães Paixão PE, dos Santos Medeiros E, Andrade Abe H, Oliveira Meneses J, Cunha FS, Marques Nogueira Filho R, Coelho de Sousa R, Nizio Maria A, Falanghe Carneiro PC, Martins Cordeiro CA and Fujimoto RY. 2021. Is there antimicrobial property of coconut oil and lauric acid against fish pathogen?. *Aquaculture* 545, 737234. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737234>.
- Song Z, Li H, Wang J, Li P, Sun Y and Zhang L. 2014. Effects of fishmeal replacement with soy protein hydrolysates on growth performance, blood biochemistry, gastrointestinal digestion and muscle composition of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*). *Aquaculture* 426-427, 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.01.002>.
- Su J, Gong Y, Cao S, Lu F, Han D, Liu H, Jin J, Yang Y, Zhu X and Xie S. 2017. Effects of dietary *Tenebrio molitor* meal on the growth performance, immune response and disease resistance of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). *Fish Shellfish Immunol* 69, 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.08.008>.
- Sugano M, Fujikawa T, Hiratsuji Y, Nakashima K, Fukuda N and Hasegawa Y. 1980. A novel use of chitosan as a hypocholesterolemic agent in rats. *Am J Clin Nutr* 33, 787-793. <https://doi.org/10.1093/ajcn/33.4.787>.
- Suryati T, Julaeha E, Farabi K, Ambarsari H and Hidayat AT. 2023. Lauric acid from the black soldier fly (*Hermetia illucens*) and its potential applications. *Sustainability* 15, 10383. <https://doi.org/10.3390/su151310383>.
- Takakuwa F, Tanabe R, Nomura S, Inui T, Yamada S, Biswas A and Tanaka H. 2022. Availability of black soldier fly meal as an alternative protein source to fish meal in red sea bream (*Pagrus major*, Temminck & Schlegel) fingerling diets. *Aquac Res* 53, 36-49. <https://doi.org/10.1111/are.15550>.
- Terova G, Rimoldi S, Ascione C, Gini E, Ceccotti C and Gasco L. 2019. Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) gut microbiota is modulated by insect meal from *Hermetia illucens* prepupae in the diet. *Rev Fish Biol Fish* 29, 465-486. <https://doi.org/10.1007/s11160-019-09558-y>.
- Ullah S, Zhang J, Xu B, Tegomo AF, Sagada G, Zheng L, Wang L and Shao Q. 2022. Effect of dietary supplementation of lauric acid on growth performance, antioxidative capacity, intestinal development and gut microbiota on black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*). *PLoS One* 17, e0262427. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262427>.
- van Huis A, Van Itterbeeck J, Klunder H, Mertens E, Halloran A, Muir G and Vantomme P. 2013. Edible insects: Future prospects for food and feed security. *FAO Forestry Paper* 171, FAO, Rome, Italy, 187.
- Veldkamp T, Meijer N, Alleweldt F, Deruytter D, Van Campenhout L, Gasco L, Roos N, Smetana S, Fernandes A and van der Fels-Klerx HJ. 2022. Overcoming technical and market barriers to enable sustainable large-scale production and consumption of insect proteins in Europe: A SUSINCHAIN perspective. *Insects* 13, 281. <https://doi.org/10.3390/insects13030281>.
- Wang C, Xie S, Zheng H, Chen F and Fang Y. 2022. Effects of feeding frequency on the growth, body composition and SOD, GPX and HSP70 gene expression in *Schizothorax wangchiachii*. *Aquac Rep* 22, 100942. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100942>.
- Wang G, Peng K, Hu J, Yi C, Chen X, Wu H and Huang Y. 2019. Evaluation of defatted black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal as an alternative protein ingredient for juvenile Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) diets. *Aquaculture* 507, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.04.023>.
- Wang LN, Liu WB, Lu WN, Cai DS, Zhang CN and Yu Q. 2014. Effects of dietary carbohydrate/lipid ratios on non-specific immune responses, oxidative status and liver histology of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). *Aquaculture* 426-427, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.01.022>.
- Xiao X, Jin P, Zheng L, Cai M, Yu Z, Yu J and Zhang J. 2018. Effects of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal protein as a fishmeal replacement on the growth and immune index of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). *Aquac Res* 49, 1569-1577. <https://doi.org/10.1111/are.13611>.
- Xu X, Ji B, Lu R and Ji H. 2024. Black soldier fly oil in different lipid diets could regulate tissue lipid metabolism and fatty acid composition of juvenile mirror carp. *Aquac Nutr* 2024, 8718694. <https://doi.org/10.1155/2024/8718694>.
- Yang Y, Yu W, Duan Y, Lin H, Huang Z, Huang X and Li T. 2024. Effects of starvation and refeeding on the compensatory growth of juvenile *Epinephelus coioides*. *Aquac Res* 2024, 9986750. <https://doi.org/10.1155/2024/9986750>.
- Yono T. 1996. 3-The nonspecific immune system: Humoral defense. *Fish Physiol* 15, 105-157. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(08\)60273-3](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(08)60273-3).
- Zaman MFU and Cho SH. 2025. Impacts of replacing blend-

ed fish meal with diverse animal and plant protein sources and their combinations in the diets on growth, feed availability, biochemical composition, and blood chemistry of rockfish (*Sebastes schlegelii*). *Aquac Nutr* 2025, 5625045. <https://doi.org/10.1155/anu/5625045>.

Zhou JS, Liu SS, Ji H and Yu HB. 2017. Effect of replacing dietary fish meal with black soldier fly larvae meal on growth and fatty acid composition of Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian). *Aquac Nutr* 24, 424-433. <https://doi.org/10.1111/anu.12574>.

Zhu D, Huang X, Tu F, Wang C and Yang F. 2019. Preparation, antioxidant activity evaluation, and identification of antioxidant peptide from black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae. *J Food Biochem* 44, e13186. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13186>.