Check for updates

JFMSE, 38(5), pp. 996~1007, 2026.
수산해양교육연구, 제38권 제5호, 통권143호, 2026.
www.ksfme.or.kr
https://doi.org/10.13000/JFMSE.2026.10.38.5.996

탈피대두박의 어분 대체가 스텔렛 철갑상어(*Acipenser ruthenus*) 치어의 성장, 전어체 아미노산 및 지방산 조성에 미치는 영향

김광배 · 김성민 · 이동훈†
†경기도해양수산자원연구소(연구사)

Effects of Dietary Fish Meal Replacement with Dehulled Soybean Meal on Growth Performance, Whole-Body Amino Acid, and Fatty Acid Compositions in Juvenile Sterlet Sturgeon (*Acipenser ruthenus*)

Kwang-Bae-KIM · Seong-Min KIM · Dong-Hoon LEE†
†Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute(researcher)

Abstract

This study evaluated dehulled soybean meal (DSBM) as a fish meal (FM) replacer for juvenile sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*). Growth parameters (WG, FE, PER) showed no significant differences among groups fed up to 75% DSBM (P>0.05), whereas the DSBM100 group exhibited a critical decline (P<0.05). Whole-body crude lipid levels systematically decreased from 11.3% (DSBM0) to 8.1% (DSBM100) as the DSBM replacement level expanded (P<0.05). Total whole-body amino acids, free amino acids, and polyunsaturated fatty acids (including DHA and EPA) did not vary significantly among all dietary treatments (P>0.05). Under the evaluating parameters of growth performance and whole-body biochemical compositions in this study, these results demonstrate that with appropriate amino acid and dicalcium phosphate supplementation, DSBM can successfully replace fish meal protein up to 75% for the stable growth of juvenile sterlet sturgeon.

Key words : Fish meal, Dehulled soybean meal, Sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*), Growth performance, Amino acid, Fatty acid

Ⅰ. 서 론

어류는 인류에게 양질의 동물성 단백질을 공급하는 핵심 영양원이며, 그중 어분(fish meal)은 뛰어난 필수 아미노산 조성과 높은 기호성 덕분에 수산사료 산업의 독보적인 주원료로 자리 잡아 왔다(Zhou et al., 2004). 단백질은 수산 동물의 건강한 생장, 발달, 번식 및 생존을 결정짓는 필수 영양소이며, 생체 내 결합 조직과 근육, 장기 및 체액을 구성하는 일차적 물질이다(Zhou et al., 2004). 그러나 글로벌 기후 변화와 어족 자원의 고갈로 인한 전 세계적 공급 불안정은 어분 가격의 장기적인 폭등을 유발하며, 양식업의 지속 가능성을 심각하게 위협하고 있다. 이에 따라 수산 영양학계는 어분을 대체할 수 있는 고효율 단백질원 확보에 집중해 왔으며, 최근 10년간은 특히 장내 대사 교란을 최소화하는 식물성 소재의 선별적 처방 기술이 핵심 화두로 대두되었다(Cai et

† Corresponding author : 031-8008-8357, leedh27@gg.go.kr/orcid.org/0000-0002-2150-6778

al., 2025; Gatlin et al., 2007). 다양한 식물성 대안 원료 중 탈피대두박(dehulled soybean meal, DSBM)은 높은 단백질 밀도와 전량 수입에 의존하는 어분 대비 뛰어난 공급 안정성을 지니고 있어 가장 이상적인 대체재로 간주된다(Gatlin et al., 2007). 또한 배출수 내 인(P)과 질소 함량을 정밀하게 제어할 수 있어 친환경 저오염 사료 개발에도 매우 유리하다(NRC, 1993). 이미 연어과 어류나 일부 담수어류를 대상으로 대두박을 고농도로 처방하기 위한 연구가 지속되어 왔으나(Booman et al., 2018), 대두박에 내재된 사포닌이나 비전분성 다당류(non-starch polysaccharides, NSP) 등의 항영양인자(antinutritional factors, ANFs)가 어류의 원위 장관에 대두박 유래 장염(soybean meal-induced enteritis, SBMIE)을 유발한다는 병리적 한계가 최근 규명되면서, 단순 원료 배합을 넘어선 생리활성 방어 처방 연구가 강력히 요구되고 있다(Chikwati et al., 2012; Zhang et al., 2021).

고대 어종인 철갑상어목(Acipenseriformes) 어류는 현대 경골어류(teleost)와 구별되는 독특한 소화 생리 및 지질 대사 체계를 지니고 있어, 사료 원료 변화에 따른 생체 반응이 매우 민감하게 나타난다(Gawlicka et al., 2002). 일부 대형 철갑상어 품종에 대한 사료 영양소 요구량 연구는 부분적으로 축적되어 왔으며(Khodadoust et al., 2024), 철갑상어류에서도 식물성 단백질의 활용성을 높이기 위한 연구가 점진적으로 수행되고 있다. 특히 스텔렛 철갑상어(*Acipenser ruthenus*)를 대상으로 한 초기 영양 연구에서는 어린 시기 대두박 노출이 이후 성장 및 영양대사 관련 유전자 발현에 영향을 줄 수 있음이 보고되었으며, 이는 철갑상어류가 일정 수준의 식물성 단백질 적응 능력을 가질 가능성을 시사하였다(Mortezaei et al., 2024). 그러나 식물성 원료의 대체 비율이 높아짐에 따라 사료 내 필수 제한 아미노산인 메티오닌과 라이신의 결손이 발생하고, 식물성 인(phytate-P)의 낮은 이용율로 인한 무기질 불균형이 초래될 수 있으므로 이를 보충하기 위한 정밀 처방이 필요하다(NRC, 1993; Kaushik and Hemre, 2008). 현재까지의 연구는 대부분 제한적 대체율 또는 특정 생리 반응에 초점을 맞추고 있으며, 스텔렛 철갑상어 치어를 대상으로 어분을 단계적으로 대체(0~100%)하면서 전어체 아미노산 및 지방산 변화 양상을 종합적으로 평가한 연구는 매우 제한적이다. 따라서 본 연구는 스텔렛 철갑상어 치어 사료 내 어분 대체원으로서 탈피대두박(DSBM)의 적정 대체 수준을 평가하고, 제한 아미노산 및 필수 무기질 보충에 따른 성장 개선과 전어체 생화학적 조성 변화를 정밀 정량하여 본 사육 실험 조건에서의 적정 대체 한계를 규명하고자 수행되었다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 실험어 및 사육관리

본 사육 실험에 사용된 스텔렛 철갑상어(*A. ruthenus*) 치어는 경기도해양수산자원연구소에서 확보하여 사용하였다. 실험 시작 전 1,000마리의 치어 중 건강하고 크기가 균일한 개체를 선별하였으며, 24시간 동안 절식시킨 후 평균 체중 125.4±0.5 g(7개월령)의 치어 300마리를 총 15개(5개 실험구 3반복)의 실험 수조(2.0×1.0×0.4 m)에 수조당 20마리씩 무작위로 배치하였다. 사육 시스템은 담수 반순환식 시스템(semi-recirculation freshwater system)으로 운영되었으며, 실험이 진행되는 10주 동안 사육 수온은 20±1℃, 용존산소(dissolved oxygen, DO) 농도는 6 ppm 이상을 유지하였다. 각 수조의 주수량은 최소 7 L min-1 이상으로 조절되었다. 사육수의 pH는 7.5±0.3 수준을 유지하였고, 질소화합물인 총암모니아(NH_4^++NH_3) 및 아질산-질소(NO_2-N) 농도는 각각 0.05 mg/L 및 0.01 mg/L 이하로 수질 관리되었다. 광주기는 12시간 명기 및 12시간 암기(12L:12D) 조건으로 제어되었다. 사료 공급은 10주 동안 일

일 3회(08:00, 13:00, 18:00)에 걸쳐 어체중의 3% 에서 4% 비율로 매일 수작업으로 수행되었다.

2. 실험사료 제조

실험사료의 영양소 수준은 스텔렛 철갑상어 치어의 성장 및 영양 요구량 선행 연구를 바탕으로 조단백질 42%, 조지방 11% 수준으로 설정하였다 (Moore etl al., 1988; Mohseni et al., 2007). 어분 단백질에 대한 탈피대두박(DSBM)의 대체 비율을 0%, 25%, 50%, 75%, 100%로 설정하여 각각 DSBM0(대조구), DSBM25, DSBM50, DSBM75, DSBM100 5개 실험구의 사료를 준비하였다. 주요 단백질원으로는 칠레산 백색어분(white fish meal)과 크릴밀(krill meal), 탈피대두박이 사용되었고, 지질원과 탄수화물원으로는 각각 어유(fish oil)와 밀가루(wheat flour)를 사용하였다.

대두박 대체에 따른 제한 아미노산 결손을 방지하기 위해 메티오닌(methionine)과 라이신(lysine)을 각각 사료 성분 비율에 맞춰 보충하였으며, 무기질 보충을 위해 인산칼슘(dicalcium

<Table 1> Composition and proximate analysis of the five experimental diets (%, as-is basis)[1]

Ingredients	Diets1				
	DSBM0	DSBM25	DSBM50	DSBM75	DSBM100
White fish meal(Chille)[2]	30.0	22.5	15.0	7.50	0
Krill meal[2]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Dehulled soybean meal[2]	30.6	42.5	54.3	66.0	77.9
Wheat flour[2]	30.4	24.8	19.2	13.7	8.1
Fish oil[2]	6.38	7.04	7.68	8.32	8.96
MHN(99%)[2]	0	0.04	0.10	0.20	0.26
Lysine[2]	0	0.04	0.10	0.14	0.20
Salt[2]	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Vitamin C (Stay C)[3]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Choline (50% liquid)[2]	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Vita-mix (Fish-AV)[2]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Mineral mix (Fish-M)[2]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Antioxidant(BHA)[2]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Dicalcium phosphate[2]	0	0.50	1.00	1.50	2.00
Proximate analysis (%, as-is basis)					
Moisture (%)	4.17	4.81	5.93	6.39	5.95
Crude protein (%)	42.79	42.39	41.89	41.59	41.90
Crude lipid (%)	11.00	10.78	10.59	10.47	10.60
Crude ash (%)	9.51	9.48	9.43	9.38	9.32
Crude fiber (%)	3.59	3.64	5.42	6.14	6.34
Lysine (%)	2.55	2.54	2.55	2.55	2.56
MHN (%)[4]	0.83	0.83	0.82	0.84	0.83
Gross energy (kj/g diet)	20.7	20.8	20.7	20.6	20.7

[1]DSBM0 (FM100%), DSBM25 (FM25%+DSBM75%), DSBM50 (FM50%+DSBM50%), DSBM75 (FM75%+DSBM25%), DSBM100 (DSBM100%)
[2]All ingredients were provided with Cargill Agri Purina Ltd., Korea except vitamin C. BHA, butyl hydroxyl anisole.
[3]Vitamin C was provided with DongAone Co. Korea.
[4]Methionine hydroxy analogue

phosphate)을 대체율에 따라 0%에서 최대 2.0%까지 점증적으로 첨가하였다. 사료는 싱글 스크류 압출 성형기(single-start worm extruder)를 통해 2.5 mm 크기의 EP (extruded pellet) 사료로 제조하였다.

3. 샘플 수집

10주간의 사육 실험 종료 후, 각 수조별 철갑상어의 총 중량과 개체 수를 측정하여 증체율(weight gain, WG), 사료효율(feed efficiency, FE), 일간성장률(specific growth rate, SGR) 및 단백질효율(protein efficiency rate, PER)을 산출하였다. 실험어는 어류 마취제(AQUI-S, New Zealand Ltd., NZ)로 안전하게 마취시킨 후 성장측정을 수행하였다. 실험구별로 평균 체중을 가진 개체를 수조당 2마리(실험구당 6마리)씩 선별하여 간중량지수(hepatosomatic index, HSI)와 비만도(condtion factor, CF)를 조사하였고, 전어체 일반성분, 아미노산 및 지방산 조성 분석은 수조당 5마리(실험구당 15마리)를 샘플링하여 분석에 사용되었다.

4. 성분분석

일반성분 분석은 AOAC(1995) 표준 절차에 의거하여 수분은 상압가열건조법, 조단백질은 Kjeldahl법, 조회분은 직접회화법으로 측정하였으며, 조지방은 12시간 동결건조 후 Soxtec 시스템 1046 (Tecator AB, Sweden)을 이용하여 추출·정량하였다. 총 아미노산 및 유리아미노산은 닌히드린 반응법을 기반으로 아미노산 자동분석기 S433 (Sykam, Germany)을 통해 분석하였다. 지방산 분석은 메틸 에스테르화(direct transesterification) 과정을 거친 후, flame Ionization detector(FID)와 실리카 모세관 컬럼이 장착된 gas chromatography (Trace GC, Thermo Finigan, USA)를 사용하여 분리 및 조성비를 산출하였다.

5. 통계분석

모든 통계 분석은 SPSS Version 10 프로그램을 이용하여 One-way ANOVA 분석을 수행하였으며, Duncan의 다중검정법으로 5% 유의수준($P<0.05$)에서 실험구 간 유의성을 검정하였다.

Ⅲ. 연구 결과

1. 성장도 측정

10주간 스텔렛 철갑상어 치어를 사육한 결과, 모든 실험구에서 사망 개체가 발생하지 않아 100%의 우수한 생존율을 기록하였다. 탈피대두박 대체율이 75%인 실험구(DSBM75) 이하의 그룹들은 어분 대조구(DSBM0)와 비교하여 증체율(WG), 사료효율(FE), 단백질효율(PER) 측면에서 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다($P>0.05$). 증체율의 경우 DSBM25구가 112.7%로 가장 높은 수치를 보였고, DSBM0(100.5%), DSBM50(101.6%), DSBM75(96.0%) 순으로 대등한 성장을 나타내었다. 사료효율(78.6~81.7%)과 단백질효율(0.92~1.07) 역시 DSBM75 이하 실험구 간에 매우 유사한 생장 경향이 유지되었다.

그러나 어분을 탈피대두박으로 100% 전량 대체한 DSBM100구의 경우, 증체율 68.2%, 사료효율 62.1%, 단백질효율 0.65를 기록하며 타 실험구 대비 성장이 유의적으로 급격히 저하되었다($P<0.05$). 일간성장률(SGR) 분석 결과에서도 DSBM0(1.04), DSBM25(1.06)구가 가장 높은 수치를 보였으며, DSBM100구는 0.63으로 유의하게 가장 낮은 최저 생장 수준을 나타내었다($P<0.05$). 한편, 생체 대사 활성과 에너지 비축도를 나타내는 간중량지수(HSI)와 비만도(CF)는 DSBM25구에서 각각 2.12와 1.10을 기록하여 타 실험구 대비 유의적으로 높은 값을 나타내었다($P<0.05$).

2. 전어체 일반성분 조성

실험 종료 후 스텔렛 철갑상어의 전어체 일반성분을 정밀 분석한 결과는 수분과 조지방 함량

에서 유의미한 통계적 변동이 관찰되었다 (P<0.05). 전어체 수분 함량은 DSBM75구의 71.0%에서 DSBM100구의 75.0% 범위로 관찰되었으며, 탈피대두박 대체율이 극대화된 DSBM100구에서 유의하게 가장 높게 측정되었다(P<0.05).

반면 조지방(crude lipid) 함량은 사료 내 대두박 비율이 높아질수록 점진적으로 감소하는 뚜렷한 음의 상관관계를 나타내었다. 대조구(DSBM0)의 조지방 함량이 11.3%로 가장 높았으며, 어분을 전량 배제한 DSBM100구는 8.1%를 기록하며 유의적인 최저 수준을 나타내었다 (P<0.05). 전어체 조단백질(14.0~16.1%) 및 조회분(1.7~2.3%) 함량은 전 실험구 사이에서 통계적인 유의차가 발견되지 않았다(P>0.05).

<Table 2> Growth performance of juvenile sterlet sturgeon fed five experimental diets for 10 wk[1]

Parameters	Diets				
	DSBM0	DSBM25	DSBM50	DSBM75	DSBM100
Initial wt .(g)	125.4±0.5	125.4±0.3	125.4±0.3	125.4±0.2	125.4±0.4
Final wt .(g)	251.5±5.9	266.7±12.9	252.9±17.5	245.8±17.8	210.9±8.3
WG (%)[2]	100.5±5.4^{a}	112.7±13.3^{a}	101.6±16.9^{a}	96.0±16.8^{a}	68.2±8.1^{b}
FE (%)[3]	79.4±1.0^{a}	81.7±2.7^{a}	79.4±3.6^{a}	78.6±3.5^{a}	62.1±2.1^{b}
SGR (%/day)[4]	1.04±0.13^{a}	1.06±0.10^{a}	0.93±0.13^{ab}	0.85±0.12^{b}	0.63±0.06^{c}
PER[5]	0.95±0.06^{a}	1.07±0.06^{a}	0.97±0.16^{a}	0.92±0.17^{a}	0.65±0.08^{b}
HSI (%)[6]	1.70±0.02^{c}	2.12±0.07^{a}	1.89±0.05^{b}	1.65±0.04^{c}	1.41±0.15^{d}
CF (%)[7]	1.02±0.17^{b}	1.10±0.03^{a}	1.03±0.02^{b}	1.00±0.03^{b}	0.99±0.01^{b}
Survival (%)	100^{ns}	100	100	100	100

[1]Values are means ± SE of three replicates for each of five fish groups. Means with the different superscript in the same row are significantly different (p<0.05) between five groups. ns, non significant (p>0.05).
[2]Percent weight gain (%) = [final weight (g) - initial weight (g)] × 100 / initial weight (g).
[3]Feed efficiency (%) = [wet weight gain (g) / dry feed intake (g)] × 100.
[4]Specific growth rate (%/day) = [Ln final weight (g) - Ln initial weight (g)] / days.
[5]Protein efficiency ratio =wet weight gain (g) / protein intake (g)
[6]Hepatosomatic index (%) = [liver weight (g) / body weight (g)] × 100.
[7]Condition factor (%) = [fish weight (g) / fish length (cm)^{3}] × 100.

<Table 3> Whole body proximate analysis of juvenile sterlet sturgeon fed five experimental diets for 10 wk (% of as-is basis)[1]

Parameters	Diets				
	DSBM0	DSBM25	DSBM50	DSBM75	DSBM100
Moisture (%)	71.8±1.3^{b}	72.4±2.3^{ab}	73.1±1.8^{ab}	71.0±0.8^{b}	75.0±0.7^{a}
Protein (%)	15.4±0.5^{ns}	14.5±1.3	15.4±1.8	16.1±1.9	14.0±0.8
Lipid (%)	11.3±0.7^{a}	10.8±0.1^{a}	9.40±1.1^{ab}	10.5±2.0^{ab}	8.1±1.9^{b}
Ash (%)	1.7±0.3^{ns}	1.8±0.4	1.8±0.2	2.3±0.5	1.9±0.1

[1]Values are means ± SE of three replications with 2 determinations per replication for each final group. Means with different superscripts in the same row are significantly different (p<0.05). ns, non significant (p>0.05).

2. 전어체 아미노산 및 지방산 profile

전어체의 구성 아미노산 분석 결과, 대두박 대체 수준에 따른 생체 내 총 아미노산 축적량의 유의미한 통계적 차이는 발견되지 않았다(P>0.05). 총 아미노산 함량은 DSBM100구의 13.4%에서 DSBM75구의 15.0% 범위를 보였다. 전어체 유리아미노산 총량 또한 DSBM0구(0.155 mg/100mg)에서 DSBM25구(0.171 mg/100mg) 수준의 분포를 나타내어 전체적인 유의차는 없었으나, 개별 유리아미노산 항목 중 L-proline과 L-aspartic acid 두 성분은 실험구 간 유의한 차이를 나타내었다(P<0.05).

지방산 조성 분석 결과에서는 전 실험구 공통적으로 oleic acid(C18:1n9, 33.46~35.82%)와 linoleic acid(C18:2n6, 13.81~16.76%)가 우점 성분으로 확인되었으며, 대두박 급이에 따른 통계적 유의차는 나타나지 않았다(P>0.05). 고도불포화지방산(n-3 PUFA)인 EPA(C20:5n3, 3.46~3.92%)와 DHA(C22:6n3, 2.15~2.52%) 역시 실험구 간 차이 없이 매우 안정적으로 생체 내에 축적된 것으로 관찰되었다(P>0.05). 결과적으로 총 포화지방산(SFA), 단일불포화지방산(MUFA), 고도불포화지방산(PUFA)의 총량적 비율은 대두박 대체에 의해 교란되지 않고 대등하게 유지되었다(P>0.05).

<Table 4> Whole body amino acid composition (% of as-is basis) of juvenile sterlet sturgeon fed five experimental diets for 10 wk[1]

Amino acid (%)	Diets				
	DSBM0	DSBM25	DSBM50	DSBM75	DSBM100
Aspartic acid	1.57±0.12^{ns}	1.35±0.09	1.55±0.09	1.54±0.12	1.33±0.17
Serine	0.71±0.05^{ns}	0.69±0.08	0.71±0.05	0.72±0.05	0.64±0.06
Glutamic acid	2.47±0.21^{ns}	2.34±0.23	2.46±0.19	2.48±0.21	2.24±0.28
Proline	0.59±0.03^{ns}	0.63±0.10	0.63±0.10	0.64±0.04	0.56±0.02
Glycine	1.00±0.06^{ns}	1.05±0.15	1.06±0.18	1.08±0.02	0.94±0.03
Alanine	0.98±0.05^{ns}	0.99±0.10	0.99±0.10	1.03±0.04	0.92±0.05
Threonine	0.73±0.07^{ns}	0.67±0.05	0.71±0.04	0.72±0.06	0.66±0.05
Valine	0.67±0.07^{ns}	0.64±0.06	0.65±0.05	0.68±0.06	0.62±0.06
Isoleucine	0.68±0.07^{ns}	0.64±0.06	0.67±0.05	0.68±0.06	0.62±0.07
Leucine	1.14±0.10^{ns}	1.08±0.11	1.14±0.08	1.16±0.09	1.05±0.18
Lysine	1.25±0.17^{ns}	1.14±0.12	1.22±0.07	1.24±0.12	1.12±0.15
Phenyalanine +Tyrosine	1.06±0.10^{ns}	1.03±0.07	1.04±0.08	1.04±0.08	0.91±0.18
Methionine +cysteine	0.53±0.04^{ns}	0.51±0.03	0.52±0.08	0.52±0.05	0.48±0.08
Arginine	0.96±0.04^{ns}	0.94±0.10	0.97±0.08	0.97±0.04	0.88±0.08
Histidine	0.43±0.03^{ns}	0.40±0.05	0.42±0.03	0.46±0.05	0.40±0.03
Total amino acids	14.8±1.02^{ns}	14.1±1.25	14.7±1.20	15.0±1.02	13.4±1.28

[1]Values are means ± S.E of three replications with 2 determinations per replication for each final group. Means with different superscripts in the same row are significantly different (p<0.05). ns, non significant (p>0.05).

<Table 5> Whole body free amino acid composition (mg/100 mg, as-is basis) of juvenile sterlet sturgeon fed five experimental diets for 10 wk[1]

Free amino acids (%)	Diets				
	DSBM0	DSBM25	DSBM50	DSBM75	DSBM100
Phosphoserine	0.0024±0.0004^{ns}	0.0026±0.0002	0.0026±0.0002	0.0026±0.0002	0.0026±0.0002
Taurine	0.0249±0.0039^{ns}	0.0223±0.0041	0.0240±0.0009	0.0265±0.0010	0.0209±0.0058
L-Aspartic acid	0.0029±0.0015^{ab}	0.0042±0.0013^{a}	0.0032±0.0006^{ab}	0.0028±0.0004^{ab}	0.0023±0.0006^{b}
L-Threonine	0.0161±0.0055^{ns}	0.0198±0.0015	0.0146±0.0022	0.0159±0.00139	0.0151±0.0026
L-Serine	0.0061±0.0022^{ns}	0.0067±0.0067	0.0060±0.0013	0.0058±0.0002	0.0056±0.0008
L-Asparagine	0.0228±0.0097^{ns}	0.0215±0.0067	0.0220±0.0044	0.0210±0.0044	0.0197±0.0027
L-Glutamic Acid	0.0045±0.0018^{ns}	0.0060±0.0006	0.0046±0.0014	0.0056±0.0006	0.0044±0.0011
L-Proline	0.0112±0.0011^{bc}	0.0137±0.0009^{a}	0.0087±0.0004^{d}	0.0123±0.0007^{ab}	0.0103±0.0016^{cd}
L-Glycine	0.0088±0.0037^{ns}	0.0089±0.0021	0.0093±0.0021	0.0089±0.0009	0.0078±0.0010
L-Alanine	0.0081±0.0023^{ns}	0.0096±0.0005	0.0087±0.0014	0.0094±0.0018	0.0087±0.0008
L-Valine	0.0054±0.0019^{ns}	0.0067±0.0005	0.0054±0.0013	0.0068±0.0005	0.0062±0.0005
L-Isoleucine	0.0048±0.0016^{ns}	0.0060±0.0009	0.0047±0.0010	0.0060±0.0002	0.0053±0.0010
L-Leucine	0.0084±0.0032^{ns}	0.0110±0.0010	0.0080±0.0016	0.0100±0.0005	0.0093±0.0016
L-Tyrosine	0.0048±0.0015^{ns}	0.0060±0.0013	0.0049±0.0009	0.0049±0.0004	0.0050±0.0011
L-Phenylalanine	0.0051±0.0021^{ns}	0.0064±0.0006	0.0047±0.0008	0.0058±0.0005	0.0052±0.0010
b-alanine	0.0114±0.0017^{ns}	0.0123±0.0029	0.0106±0.0010	0.0104±0.0013	0.0091±0.0019
L-Lysine	0.0039±0.0026^{ns}	0.0028±0.0016	0.0015±0.0003	0.0021±0.0004	0.0021±0.0002
1-M-Histidine	0.0014±0.0007^{ns}	0.0020±0.0004	0.0013±0.0002	0.0016±0.0001	0.0014±0.0007
L-Histidine	0.0006±0.0003^{ns}	0.0007±0.0001	0.0005±0.0001	0.0006±0.0001	0.0005±0.0004
L-Arginine	0.0012±0.0002^{ns}	0.0013±0.0000	0.0012±0.0000	0.0013±0.0001	0.0011±0.0002
Total	0.155±0.047^{ns}	0.171±0.022	0.146±0.020	0.160±0.023	0.143±0.015

[1]Values are means ± S.E of three replications with 2 determinations per replication for each final group. Means with different superscripts in the same row are significantly different ($p<0.05$). ns, non significant ($p>0.05$).

Ⅳ. 결 론

본 연구 결과는 스텔렛 철갑상어 치어 사료 내에 대두 원료 특유의 영양학적 결손을 상쇄할 수 있는 제한 아미노산(Lys, Met) 및 무기인(P)을 적정 비율로 첨가할 경우, 비싼 어분 단백질을 최대 75%까지 성장 저해나 영양실조 없이 성공적으로 대체할 수 있음을 명확히 입증하고 있다.

식물성 대안 원료인 대두박은 본질적으로 단위동물의 영양소 소화·흡수를 방해하고 장관 점막에 손상을 유발할 수 있는 올리고당, 비전분성 다당류(non-starch polysaccharides, NSP) 및 사포닌과 같은 다양한 항영양인자(antinutritional factors, ANFs)을 다량 함유하고 있다(Chikwati et al., 2012; Kim etl al., 2014; Zhang et al., 2021). 그러나 본 실험의 스텔렛 철갑상어는 75%라는 높은 대체 수준에서도 어분 대조구와 대등한 증체율 및 사료 효율을 발현하였다.

<Table 6> Whole body fatty acid (% of total fatty acids) composition of juvenile sterlet sturgeon fed five experimental diets for 10 wk[1]

Fatty acids	Diets				
	DSBM0	DSBM25	DSBM50	DSBM75	DSBM100
C14:0	2.60±0.16^{ns}	2.73±0.06	2.63±0.09	2.74±0.13	2.93±0.14
C14:1	0.08±0.01^{ns}	0.07±0.00	0.08±0.01	0.08±0.01	0.09±0.01
C15:0	0.27±0.02^{ns}	0.25±0.01	0.27±0.03	0.27±0.02	0.30±0.02
C16:0	18.81±0.51^{ns}	17.13±0.79	18.85±0.69	17.67±1.95	17.57±1.22
C16:1	5.40±0.25^{ns}	5.22±0.31	5.48±0.32	5.08±0.32	5.27±0.28
C17:0	0.13±0.02^{b}	0.13±0.03^{b}	0.15±0.01^{ab}	0.17±0.01^{a}	0.18±0.01^{a}
C17:1	0.27±0.04^{ns}	0.27±0.00	0.29±0.03	0.29±0.02	0.33±0.02
C18:0	2.84±0.26^{ns}	2.43±0.08	2.71±0.14	2.67±0.23	2.62±0.08
C18:1n9	35.60±1.15^{ns}	33.79±0.46	35.82±0.17	34.99±0.01	33.46±0.10
C18:2n6	13.81±0.37^{ns}	16.76±1.95	14.30±1.15	15.27±3.04	15.47±1.63
C18:3n6	1.61±0.03^{ns}	1.87±0.18	1.67±0.06	1.75±0.29	1.76±0.14
C18:3n3	0.40±0.01^{ns}	0.48±0.12	0.40±0.04	0.46±0.11	0.46±0.05
C20:0	1.87±0.09^{ns}	1.89±0.05	1.86±0.08	1.86±0.02	1.96±0.06
C20:1	0.15±0.04^{b}	0.14±0.01^{b}	0.19±0.01^{a}	0.13±0.01^{b}	0.13±0.02^{b}
C20:2	1.10±0.07^{ns}	1.33±0.18	1.10±0.13	1.19±0.23	1.20±0.18
C20:3	0.74±0.06^{ns}	0.81±0.21	0.65±0.03	0.78±0.14	0.77±0.05
C20:4	0.08±0.01^{ns}	0.09±0.02	0.08±0.01	0.08±0.01	0.08±0.01
C20:5n3	3.57±0.17^{ns}	3.76±0.14	3.46±0.06	3.76±0.38	3.92±0.20
C21:0	0.14±0.01^{ns}	0.13±0.01	0.14±0.03	0.13±0.01	0.14±0.00
C22:0	0.25±0.02^{ns}	0.27±0.01	0.24±0.01	0.28±0.03	0.28±0.02
C22:1	0.14±0.02^{ns}	0.16±0.01	0.13±0.01	0.15±0.02	0.16±0.01
C22:2	0.22±0.03^{ns}	0.22±0.09	0.19±0.03	0.23±0.01	0.25±0.01
C23:0	0.43±0.004^{ns}	0.34±0.05	0.40±0.06	0.38±0.03	0.39±0.04
C24:0	7.29±0.66^{ns}	7.22±0.53	6.73±0.34	7.18±0.40	7.71±0.44
C22:6n3	2.18±0.14^{ns}	2.50±0.23	2.15±0.28	2.41±0.34	2.52±0.23
SFA[2]	34.62±1.51^{ns}	32.53±0.84	34.00±0.98	33.34±1.91	34.09±1.17
MUFA[3]	41.65±0.94^{ns}	39.65±0.75	42.00±1.51	40.72±2.67	39.45±1.18
PUFA[4]	23.71±0.76^{ns}	27.83±3.37	24.01±1.47	25.93±4.52	26.46±2.29

[1]Values are means ± S.E of three replications with 2 determinations per replication for each final group. Means with different superscripts in the same row are significantly different ($p<0.05$). ns, non significant ($p>0.05$).
[2]Saturated fatty acids. [3]Monounsaturated fatty acids. [4]Polyunsaturated fatty acids.

이는 사료 제조 시 외피의 섬유질과 ANFs가 1차적으로 고도로 제거된 탈피대두박(DSBM)을 적용함으로써 장관 내 염증 반응 기전을 유의미하게 완화했기 때문으로 판단되며, 대두 원료의 최대 취약점인 필수 아미노산 불균형을 극복하기 위해 가해준 결정형 메티오닌과 라이신의 보충이 완벽한 생리적 방어 기전으로 작용하였을 것으로 사료된다(Aragão et al., 2025). 어류는 정상적인 조직 단백질 합성 및 체내 동화 작용을 유지하기 위해 일정 비율의 필수 아미노산을 지속적으로 공급받아야 한다(Aragão et al., 2025). 최근 영양학계에서는 대두박 기반 사료에 첨가된 결정형 아미노산(crystalline amino acids)이 천연 단백질 결합 아미노산에 비해 장관 내에서 훨씬 빠르게 흡수되어, 아미노산 대사의 비동기화 현상(asynchrony) 및 배설 질소 증가를 유발할 수 있다는 점을 지적하고 있다(Cai et al., 2025; van den Borne et al., 2012; Wu, 2022). 그러나 본 연

구에서 DSBM75 실험구까지 전어체의 총 단백질 함량 및 총 아미노산 조성에 어떠한 유의차도 발생하지 않은 것은, 동기화 유도를 위해 일일 3회로 분할 급이한 사육 관리 기전과 제한 아미노산의 정밀한 사료 구성이 스텔렛 철갑상어의 질소 대사율을 대조구 수준과 유사하게 유도하였기 때문으로 추측된다. 반면, 결정형 아미노산과 무기질을 동일하게 첨가하였음에도 불구하고 어분을 100% 완전히 배제한 DSBM100구에서는 증체율과 일간성장률이 심각하게 저하되었다($P<0.05$). 이와 같은 생장 지연의 일차적 원인은 사료의 '기호성(palatability)' 결여에 따른 극심한 사료 섭취량 감소에서 기인한 것으로 추측되며(Jafari et al., 2008; Kim et al., 2018; Papatryphon and Soares, 2000), 이는 DSBM100구 사료는 철갑상어 치어의 누적 사료 섭취량 저하를 유발하고 최종 성장을 제한했을 가능성이 매우 크다고 볼 수 있다.

본 실험에서 철갑상어 전어체의 조지방 함량은 대조구의 11.3%에서 대두박 완전 대체구인 DSBM100 실험구의 8.1%로 유의하게 급감하는 양상을 나타내었다($P<0.05$). 철갑상어류는 체내 지질 축적 능력이 매우 우수한 어종으로 인지되어 있으며, 공급된 에너지를 주로 근육보다는 간이나 소화관 주변의 지방 조직에 우선적으로 비축하는 생리적 특성을 가진다(Gawlicka et al., 2002). 최신 지질 대사 연구에 따르면, 사료 내 대두 사포닌 성분은 장관 상피세포의 콜레스테롤 및 담즙산과 결합하여 불용성 복합체를 형성함으로써 장내 미셀(Micelle) 형성을 방해하고 지질 소화 효소인 지방분해효소(lipase)의 활성을 억제한다(Terpstra, 2017). 따라서 본 실험에서 충분한 양의 어유(fish oil)를 모든 실험구에 공급(8.96%)했음에도 불구하고, DSBM100 실험구에서 유기체 내 지질 침착이 현저하게 차단된 원인은 이러한 ANFs에 의한 지질 흡수 경로의 생리적 저해로 설명할 수 있으며, 이는 간중량지수(HSI)가 유의적으로 가장 낮게 관찰된 결과와도 부합한다. 전어체 지방산 조성 분석 결과, 인간의 심혈관 질환 예방 및 생리 활성에 탁월한 효능을 지닌 오메가-3 계열 고도불포화지방산(n-3 PUFA)인 EPA와 DHA 함량이 전 실험구에서 통계적인 유의차 없이 높은 수준으로 균일하게 보전되었다($P>0.05$). 수산 영양학적으로 사료 내 식물성 단백질원의 다량 유입은 대두 지질 내 리놀레산(C18:2n6) 성분의 과다 축적을 유도하여 어체 내 n-3/n-6 PUFA 밸런스를 심각하게 교란하는 것으로 보고되어 있다(Berge et al., 2009; Strobel et al., 2012). 그러나 본 연구에서는 대두박 대체 수준에 상관없이 필수 지질원으로서 우수한 품질의 어유를 고정 배합하였기 때문에, 대두박 자체 지질에 의한 어체 내 오메가-3 PUFA 고갈 현상이 감소한 것으로 사료된다.

한편, 사료 내 어분 비율 감소에 따라 동물성 원료에 풍부한 유리아미노산인 타우린(taurine)의 결핍 가능성이 제기될 수 있다. 타우린은 어류의 삼투압 조절, 담즙산 합성 및 성장 촉진에 중요한 영양소이다(Gatlin et al., 2007). 본 연구에서 대두박 대체율이 증가함에도 불구하고 전어체 내 유리아미노산 타우린 함량이 유의차 없이 안정적으로 유지된 것은(<Table 5>), 전 실험구 사료에 1.0% 공통 첨가된 크릴밀(krill meal) 유래 타우린 공급(Xu et al., 2026)과 더불어 스텔렛 철갑상어 체내에서 시스테인(cysteine)으로부터 타우린을 자가 합성하는 대사 경로가 일정 수준 유지되었기 때문으로 해석된다(Nakamura et al., 2021). 또한, 본 연구에서는 사료 자체의 아미노산 및 지방산 실제 분석치를 직접 제시하지 못하고 사료 원료의 영양 성분표 및 계산치를 기반으로 사료를 배합하였다는 한계점이 존재한다. 그럼에도 불구하고, DSBM75 실험구까지 전어체의 총 아미노산 조성 및 EPA, DHA를 포함한 고도불포화지방산 축적량이 대조구와 대등하게 유지된 결과(<Table 4>, <Table 6>)는, 본 실험사료의 아미노산(메티오닌, 라이신 보충) 및 지방산 배합비가 스텔렛 철갑상어 치어의 생리적 요구량을 충족시켰음을 간

접적으로 입증한다. 아울러 담수어류는 해산어류와 달리 C18 계열 불포화지방산(linolenic acid 등)으로부터 체내 불포화 효소(desaturase) 및 연장 효소(elongase) 작용을 통해 EPA 및 DHA를 합성하는 능력이 상대적으로 우수한 것으로 알려져 있다(Kim and Lee, 2019). 본 연구에서는 지방산 요구량 충족을 위해 사료 내 어유 첨가 비율(6.38~8.96%)을 높게 유지하여 전어체 n-3 PUFA를 보전하였으나, 스텔렛 철갑상어의 자체 필수 지방산 합성 능력을 고려할 때 향후 사료 내 어유 첨가 비율을 절감하기 위한 정밀 지방산 요구량 연구가 보완될 필요가 있다.

종합하면, 본 스텔렛 철갑상어 치어에 대한 사료학적 평가 결과, 제한 아미노산 보충과 식물성 단백질 적응 가능성을 제시한 선행 연구들과도 유사한 경향을 나타내며(Mortezaei et al., 2024), 철갑상어 치어의 식물성 단백질 활용성이 적절한 영양학적 보완을 통해 크게 향상될 수 있음을 나타내었다. 본 연구에서 수행된 성장 성능, 사료 효율 및 전어체 생화학적 조성(일반성분, 아미노산, 지방산) 분석 결과에 한정할 때, 스텔렛 철갑상어(*A. ruthenus*) 치어의 생체 대사 활성과 최대 생장 성능을 이끌어내기 위한 이상적인 탈피대두박 대체 비율은 25% 수준이며, 생산 단가 절감 및 사료 경제성을 극대화하면서도 안정적인 생장을 도모할 수 있는 한계 대체 수준은 라이신, 메티오닌 및 인산칼슘 보충을 조건으로 최대 75%까지 처방 가능함이 확인되었다.

다만, 어분을 100% 완전 대체한 DSBM100구에서 관찰된 급격한 성장 저해 및 지질 축적 감소의 정밀 기전을 규명하고, 대두 항영양인자(ANFs)가 소화 생리에 미치는 영향을 종합 평가하기 위해서는 장관 조직학적 변화(장염 발생 여부), 소화효소 활성, 사료 영양소 소화율, 장내 미생물상(microbiota) 및 성장·대사 관련 유전자 발현 분석 등 다각도의 후속 생리·병리적 연구가 수반되어야 할 것이다.

References

Aragão C, Engrola S and Costas B(2025). Amino Acid Supplementation in Fish Nutrition and Welfare. Animals, 15, 1656. https://doi.org/10.3390/ani15111656

Berge GM, Witten PE, Baeverfjord G, Vegusdal A, Wadsworth S and Ruyter B(2009). Diets with different n-6/n-3 fatty acid ratio in diets for juvenile Atlantic salmon, effects on growth, body composition, bone development and eicosanoid production. Aquaculture, 296, 299~308. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.08.029

Booman M, Forster I, Vederas JC, Groman DB and Jones SM(2018). Soybean meal-induced enteritis in Atlantic salmon (*Salmo salar*) and Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) but not in pink salmon (*O. gorbuscha*). Aquaculture, 483, 238~243. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.10.025

Cai Q, Zhang J, Wang L, Yin H, Geng L, Deng Y, Liang C, Zhou Z, Galindo-Villegas J and Wu X(2025). Re-evaluation of methionine and isoleucine requirements in juvenile hybrid grouper fed protein-bound and crystalline amino acids diets. Aquaculture, 608, 742186, 1~13. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.742186

Chikwati EM, Venold FF, Penn MH, Fæste CK, Gu J, Krogdahl Å and Bakke AM(2012). Interaction of soyasaponins with plant ingredients in diets for Atlantic salmon, *Salmo salar* L. British Journal of Nutrition, 107, 1570~1590. https://doi.org/10.1017/S0007114511004892

Gatlin DM, Barrows FT, Brown P, Dabrowski K, Gaylord TG, Hardy RW, Herman E, Hu G, Krogdahl Å, Nelson R, Overturf K, Rust M, Sealey W, Skonberg D, Souza EJ, Stone D, Wilson R and Wurtele E(2007). Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. Aquaculture Research, 38, 551~579. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01704.x

Gawlicka A, Herold MA, Barrows FT and de la Noüe J(2002). Effects of dietary lipids on growth, fatty acid composition, intestinal absorption and hepatic storage in white sturgeon (*Acipenser transmontanus* R.) larvae. Journal of Applied

Ichthyology, 18, 673~681.
https://doi.org/10.1046/j.1439-0426.2002.00371.x

Jafari Shamushaki VA, Abtahi B, Kasumyan AO and Abedian Kenari A(2008). Taste attractiveness of free amino acids for juveniles of persian sturgeon *Acipenser persicus*. Journal of Ichthyology, 48, 124~133.
https://doi.org/10.1134/S0032945208010116

Kaushik S and Hemre GI(2008). 12-Plant proteins as alternative sources for fish feed and farmed fish quality. In Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Improving Farmed Fish Quality and Safety, Woodhead Publishing, 300~327
https://doi.org/10.1533/9781845694920.2.300

Khodadoust A, Khoshkholgh M, Noveirian HA, Mohseni M and Khara H(2024). Effects of fermented soybean meal and supplemental methionine and lysine on growth, digestibility, body composition, and amino acid composition of Beluga (*Huso huso*). Journal of Animal Science, 102, skae275. 1~16.
https://doi.org/10.1093/jas/skae275

Kim SS, Oh DH, Cho SJ, Seo SH, Han HS and Lee KJ(2014). Evaluation of acid-concentrated soybean meal as a fishmeal replacement and its digestibility in diets for juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus*. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 47(6), 824~831.
https://doi.org/10.5657/KFAS.2014.0824

Kim BR, Lim TJ, Park SB, Lee JW, Lee JH and Ahn JC(2018). Effects on growth performance and fatty acids and amino acids composition in marbled eels (*Anguilla marmorata*) fed formula feeds containing alternative sources (fermented soybean meal, squid liver powder and corn gluten meal) of fishmeal. Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 30(1), 156~166.
https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.02.30.1.156

Kim E and Lee SM(2019). Effect of different dietary composition of linoleic Acid, eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic Acid on the growth and fatty acid profile of olive flounder *Paralichthys olivaceus*. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 52(1), 49~58.
https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0049

Mohseni M, Sajjadi M and Pourkazemi M(2007). Growth performance and body composition of sub-yearling persian sturgeon, (*Acipenser persicus*, Borodin, 1897), fed different dietary protein and lipid levels. Journal of Applied Ichthyology, 23(6), 698~704.
https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2007.00866.x

Mortezaei F, Falahatkar B, Sajjadi MM and Safari R.(2024). Early nutritional programming in sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*) with dietary soybean meal: Assessment of growth performance, body composition, and expression of GH, IGF-I, and Ghrelin genes. PLoS One, 19(3):e0299203.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299203.

Moore BJ, Hung SSO and Medrano JF(1988). Protein requirement of hatchery-produced juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*). Aquaculture, 71, 235~245.
https://doi.org/10.1016/0044-8486(88)90262-1

Nakamura K, Plasus MM, Ushigusa-Ito T, Masuda R, Kabeya N, Kondo H, Hirono I, Satoh S and Haga Y(2021). Taurine synthesis via the cysteic acid pathway: effect of dietary cysteic acid on growth, body taurine content, and gene expression of taurine-synthesizing enzymes, growth hormone, and insulin-like growth factor 1 in Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*. Fisheries Science, 87, 353~363.
https://doi.org/10.1007/s12562-021-01500-1

NRC(1993). National Research Council. Nutrient Requirements Fishes. National Academy Press, Washington DC, USA.
https://doi.org/10.17226/2115

Papatryphon E and Soares JH (2000). The effect of dietary feeding stimulants on growth performance of striped bass, *Morone saxatilis*, fed a plant feedstuff-based diet. Aquaculture, 185, 329~338.
https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00348-8

Strobel C, Jahreis G and Kuhnt K(2012). Survey of n-3 and n-6 polyunsaturated fatty acids in fish and fish products. Lipids in Health and Disease, 11, 144.
https://doi.org/10.1186/1476-511X-11-144

Terpstra AHM(2017). The role of bile acids in lipid and energy metabolism in fish: The effects of plant proteins vs animal proteins in the feed and

the effect of bile acid supplementation. Anno Domini MMXVII, Netherlands.
https://doi:10.13140/RG.2.2.18495.16804

Van den Borne JJGC, Alferink SJJ, Heetkamp MJW, Jacobs AAA, Verstegen MWA and Gerrits WJJ(2012). Asynchronous supply of indispensable amino acids reduces protein deposition in milk-fed calves. The Journal of Nutrition, 142(12), 2075~2082.
https://doi.org/10.3945/jn.112.165670

Xu J, Luo Y, Ren T, Zhang R, Yin J, Chen Q, Wang J and Han T(2026). Dietary taurine supplementation enhances growth performance of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) fed low-fishmeal diets by improving antioxidant status, non-specific immunity, and tissue health. Animal Nutrition, 26, 306~321.
https://doi.org/10.1016/j.aninu.2026.02.002

Zhang W, Tan B, Deng J and Zhou H(2021). Multiomics analysis of soybean meal induced marine fish enteritis in juvenile pearl gentian grouper, *Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolata* ♂. Scientific Reports, 11, 23319.
https://doi.org/10.1038/s41598-021-02278-z

• Received : 10 July, 2026
• Revised : 13 August, 2026
• Accepted : 19 August, 2026