

치어기 스텔렛 철갑상어 (*Acipenser ruthenus*) 필수지방산 요구량 연구

이 동 훈*

*경기도해양수산물자원연구소(연구사)

Dietary Essential Fatty Acid Requirements of Juvenile Sterlet Sturgeon (*Acipenser ruthenus*)

Dong-Hoon LEE*

*Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute(researcher)

Abstract

An 8-week feeding trial evaluated the dietary essential fatty acid (EFA) requirements of juvenile sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*, 37.1 g). Nine diets (45% protein, 10% lipid) were formulated with varying levels of linoleic acid (LA) and α -linolenic acid (LNA). The 0.5% LNA diet (LNA0.50) resulted in the highest weight gain, feed efficiency, and whole-body crude protein content ($P<0.05$). Increasing LNA to 1.0% did not improve growth but significantly elevated body lipid deposition ($P<0.05$). Whole-body fatty acid profiles directly reflected dietary compositions, showing dose-dependent accumulations. In conclusion, the optimal dietary LNA requirement for juvenile sterlet sturgeon is approximately 0.5% to maximize growth and nutrient retention, providing baseline data for customized sturgeon feed formulation.

Key words : Sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*), Essential fatty acid, Linoleic acid, α -Linolenic acid, Growth performance

I. 서 론

철갑상어(Acipenseridae)는 약 2억 년 전부터 현재까지 계통이 유지되어 온 대표적인 고대어류로, 성장속도가 빠르고 육질이 우수하여 식용뿐 아니라 캐비아 생산을 위한 고부가가치 양식어종으로 이용되고 있다(Tavakoli et al., 2021). 최근에는 자연 자원의 감소와 캐비아 수요 증가로 인해 세계적으로 양식 생산이 지속적으로 확대되고 있으며, 국내에서도 시베리아 철갑상어 등 다양한 철갑상어를 중심으로 내수면 양식이 이루어져 오왔다(Jin et al., 2008). 그러나 국내 철갑상어 양식은 대부분 해외에서 개발된 사료 또는 타 육식성 담수어용 사료를 사용하고 있어 철갑상어의 영양

적 특성을 고려한 전용사료 개발이 필요한 실정이다.

배합사료의 영양소 조성은 성장, 사료효율 및 생산성에 직접적인 영향을 미치며, 특히 지질은 단순한 에너지원뿐 아니라 세포막 구성, 지용성 비타민의 흡수, 호르몬 합성 및 다양한 생리활성 물질의 전구체로서 중요한 역할을 한다(Li et al., 2023). 또한 지질을 구성하는 지방산의 종류와 함량은 성장뿐 아니라 면역기능, 스트레스 저항성 및 체성분 변화에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lim et al., 2013).

어류는 일부 지방산을 체내에서 충분히 합성하지 못하므로 필수지방산(essential fatty acids, EFA)을 반드시 사료를 통해 공급받아야 한다. 일반적

* Corresponding author : 031-8008-8357, leedh27@gg.go.kr

으로 담수어는 linoleic acid(18:2n-6)와 alpha-linolenic acid(18:3n-3)를 이용하여 고도불포화지방산을 합성할 수 있는 반면, 해산어는 EPA 및 DHA에 대한 요구성이 상대적으로 높은 것으로 알려져 있으나 필수지방산 요구량은 어종과 성장단계에 따라 차이가 있으며, 동일한 담수어라도 지방산 이용능에는 상당한 중간 차이가 존재한다(Kim and Lee, 2019).

지금까지의 연구에 따르면 흰철갑상어(white sturgeon)는 linoleic acid와 alpha-linolenic acid를 모두 요구하는 것으로 보고되었으며(Hung, 2017), 잉어, 무지개송어 및 채널메기 등에서도 필수지방산의 요구량과 이용성이 서로 다른 것으로 알려져 있다(Satoh et al., 1989; Takeuchi, 1996; Barry KJ and Trushenski, 2019). 그러나 스텔렛철갑상어(*Acipenser ruthenus*)의 필수지방산 요구량에 관한 연구는 매우 제한적이며, 특히 치어기의 적정 linoleic acid 및 alpha-linolenic acid 요구수준에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 치어기 스텔렛 철갑상어를 대상으로 사료 내 linoleic acid와 alpha-linolenic acid의 첨가 수준에 따른 성장, 사료효율 및 어체 지방산 조성의 변화를 조사하여 필수지방산의 적정 요구수준을 규명하고, 향후 철갑상어 전용 배합사료 개발을 위한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

II. 연구 방법

1. 실험사료 및 설계

실험에 사용된 사료의 일반성분 조성은 <Table 1>에 나타내었다, 실험사료의 지방산 조성은 <Table 2>에 나타내었다. 실험사료의 단백질원으로 탈지한 북양어분을 사용하였고 탄수화물원으로는 알파-전분과 밀가루를 이용하였다. 지질원으로는 올레산(oleic acid), 리놀레산(linoleic acid) 및 alpha-리놀렌산(alpha-linolenic acid)의 지방산을 이

용하였다. 어분에 함유되어 있는 지질성분은 용기에 용매(ethanol)를 넣고 가온하여 75~80℃까지 가온한 다음, 어분을 첨가(어분과 에탄올의 비율은 1:2(W/V))하여 지질 성분을 0.5%이하가 될 때까지 추출하였다 (3~4회 반복). 이후 공기 순환이 원활한 공간에서 유기용매가 완전히 기화할 때까지 48시간 이상 건조하여 실험사료의 원료로 이용하였다. 실험사료는 리놀레산(linoleic acid) 및 alpha-리놀렌산(alpha-linolenic acid)의 첨가수준에 따라 다음과 같이 총 9가지[control(oleic 100%), LA0.25(oleic 9.75%+linoleic 0.25%), LA0.50(oleic 9.50%+linoleic 0.50%), LA1.00(oleic 9.00%+linoleic 1.00%), LNA0.25(oleic 9.75%+alpha-linolenic 0.25%), LNA0.50(oleic 9.50%+alpha-linolenic 0.50%), LNA1.00(oleic 9.00%+alpha-linolenic 1.00%), LA0.25+LNA0.25(oleic 9.50%+linoleic 0.25% +alpha-linolenic 0.25%), LA0.50+LNA0.50(oleic 9.00%+linoleic 0.50%+alpha-linolenic 0.50%)]의 사료를 제조하였다. 실험사료의 조단백질 함량은 45%, 조지방 함량은 10%로 총 에너지는 20.7 kJ/g으로 동일하게 맞추어 제조하였고, 실험사료는 원료를 혼합하여 펠렛 제조기로 압출·성형하고 밀봉하여 -20℃에 냉동 보관하여 사용하였다.

2. 실험어 사육관리

실험어는 경기도해양수산자원연구소에서 생산한 약 25 g의 스텔렛 철갑상어 치어 640마리를 약 5톤 원형수조 3개에 실험 환경에 적을 할 수 있도록 대조 사료를 공급하여 2주간 예비 사육하였다. 예비사육 후, 실험어는 각각 평균무게 37.1±0.1 g (mean±SD)인 치어기 스텔렛 철갑상어를 100 ℓ PVC수조(1.0×2.0×0.5) 27개에 각 수조당 20마리씩 3반복으로 배치하였다. 실험수조는 순환여과식으로 에어스톤으로 충분하게 산소를 공급하여 사육기간 동안 용존산소(dissolved oxygen, DO)는 6.5±0.2 mg/ℓ를 유지하였고, 수온은 20±2.0℃로 관리되었다. 일일 사료 공급량은 첫 2

주간은 5%, 2~4주간은 4%, 4~8주간은 3%로 성장함에 따라 사료의 공급율을 보정하여 주었으며 1일 3회 (오전 8시, 오후 1시, 오후 5시) 공급하였다. 어체의 측정은 매 2주마다 실시하였고 주 사육 실험은 8주간 실시하였다.

3. 어체측정

어체 측정은 2주 간격으로 실시하였으며 성장률을 측정하기 위하여 24시간 절식시킨 후 각 수

조당 전체 무게 및 마리수를 측정하였다. 실험종료 후 증체율 (weight gain, WG %), 사료효율 (feed efficiency, FE %), 일간성장률 (specific growth rate, SGR %/day), 간 중량지수 (hepatosomatic index, HSI), 비만도 (condition factor, CF) 및 생존율 (survival rate, %)을 조사하였다. 간중량지수를 측정하기 위해 각 수조별로 5마리씩 간의 무게를 측정하였다.

<Table 1> Composition and proximate analysis of the nine experimental diets (% of dry matter basis)¹

Ingredients	Diets								
	control	LA 0.25	LA 0.50	LA 1.00	LNA 0.25	LNA 0.50	LNA 1.00	LA0.25+ LNA0.25	LA0.50+ LNA0.50
De-fatted white fish meal ²	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0
Wheat meal ²	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
α -potato starch ²	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
Oleic acid ³	10.0	9.75	9.5	9.0	9.75	9.5	9.0	9.5	9.0
Linoleic acid ⁴	-	0.25	0.50	1.00	-	-	-	0.25	0.50
α -linolenic acid ⁴	-	-	-	-	0.25	0.50	1.00	0.25	0.50
Vitamin premix ⁵	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Mineral premix ⁶	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Cellulose ⁷	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Proximate analysis									
Moisture	10.6	10.7	10.8	10.6	11.8	10.8	8.8	9.7	9.2
Crude protein	45.3	44.3	45.2	44.4	44.7	44.8	45.7	45.0	45.9
Crude lipid	7.47	7.28	7.24	7.31	6.95	7.13	7.30	7.50	7.59
Crude ash	10.4	10.2	10.1	10.2	10.2	10.2	10.5	10.6	9.9
Crude fiber	3.09	2.63	2.92	3.47	2.94	2.82	2.16	2.47	2.21
Gross energy (kJ/g diet)	21.2	21.2	21.5	21.3	21.4	21.5	21.2	21.7	21.2

¹Values of proximate analysis were analyzed at feeds & foods nutrition research center, pukyong national university.

²Suhyup feed Co., Korea

³Daejungwhagum Co., Korea

⁴Sigma aldrich Korea

⁵Contains (as mg/kg in diets) : Ascorbic acid, 300; dl-Calcium pantothenate, 150 ; Choline bitartrate, 3000; Inositol, 150; Menadione, 6; Niacin, 150; Pyridoxine-HCl, 15; Riboflavin, 30; Thiamine mononitrate, 15; dl- α -Tocopherol acetate, 201; Retinyl acetate, 6; Biotin, 1.5; Folic acid, 5.4; B₁₂, 0.06

⁶Contains (as mg/kg in diets) : NaCl, 437.4; MgSO₄·7H₂O, 1379.8; NaH₂P₄O₇·2H₂O, 877.8; Ca(H₂PO₄)₂·2H₂O, 1366.7; KH₂PO₄, 2414; ZnSO₄·7H₂O, 226.4; Fe-Citrate, 299; Ca-lactate, 3004; MnSO₄, 0.016; FeSO₄, 0.0378; CuSO₄, 0.00033; Calcium iodate, 0.0006; MgO, 0.00135; NaSeO₃, 0.00025

⁷United States Biochemical, Cleveland, Ohio 44122

<Table 2> Fatty acid composition of the nine experimental diets (% of dry matter basis)¹

Fatty acid (%)	Diets2								
	control	LA 0.25	LA 0.50	LA 1.00	LNA 0.25	LNA 0.50	LNA 1.00	LA0.25+ LNA0.25	LA0.50+ LNA0.50
C10:0	nd*	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C11:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C12:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C13:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C14:0	3.785	3.801	3.512	3.410	3.447	3.502	3.164	3.358	3.424
C15:0	0.493	0.423	0.399	0.384	0.399	0.400	0.364	0.387	0.390
C16:0	7.136	7.199	6.884	6.574	7.010	6.858	6.541	6.653	6.796
C17:0	0.600	0.563	0.542	0.516	0.553	0.542	0.518	0.542	0.541
C18:0	2.362	2.361	2.269	2.143	2.363	2.261	2.130	2.120	2.188
C20:0	0.464	0.412	0.383	0.359	0.532	0.376	0.353	0.367	0.416
C21:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C22:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C23:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C24:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
SFA	14.84	14.76	13.99	13.39	14.30	13.94	13.07	13.43	13.76
C14:1	0.709	0.709	0.684	0.642	0.680	0.689	0.617	0.663	0.630
C15:1	0.549	0.570	0.536	0.523	0.538	0.538	0.492	0.522	0.528
C16:1	4.552	4.170	4.301	4.126	4.341	4.273	3.959	4.376	4.146
C17:1	1.585	1.552	1.478	1.403	1.496	1.462	1.376	1.478	1.432
C18:1	71.75	70.25	68.14	64.25	69.32	67.36	64.52	68.57	67.30
C20:1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C22:1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
MFA	79.15	77.25	75.14	70.94	76.38	74.32	70.96	75.61	74.04
C18:2n6	4.673	6.503	9.337	14.55	5.957	5.813	5.967	7.365	7.907
C18:2n9t	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C18:3n6, 9, 12c	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C18:3n9, 12, 15c	0.374	0.389	0.512	0.533	2.723	5.301	9.413	2.819	3.177
C20:2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C20:3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C20:4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C20:5	0.806	0.888	0.847	0.432	0.499	0.448	0.445	0.633	0.978
C22:2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C22:6	0.161	0.206	0.174	0.157	0.142	0.178	0.143	0.148	0.144
PUFA	0.967	1.094	1.021	0.589	0.641	0.626	0.588	0.781	1.122
PUFA/SFA	0.065	0.074	0.073	0.044	0.045	0.045	0.045	0.058	0.042
DHA/EPA	0.20	0.23	0.21	0.23	0.36	0.28	0.40	0.32	0.23

¹Values of proximate analysis were analyzed at feeds & foods nutrition research center, pukyong national university. * not detected. SFA, saturated fatty acids; MFA, monounsaturated fatty acids; PUFA, polyunsaturated fatty acids.

²Fatty acids were methylated according to Metcalfe et al. (1966) and analyzed by gas chromatography (trace GC, FID detector) using a quadrex bonded carbowax capillary column 30 m × 0.25 mm I.D × 0.25 μ m film). Carrier gas was helium (65 psi, split ratio 1:50) with nitrogen. Injector and detector temperatures were set at 250°C.

4. 일반성분 분석

일반성분은 실험사료와 각 수조별로 5마리씩을 무작위로 추출하여 분쇄한 전어체를 분석하였으며, AOAC (1995)방법에 따라 수분은 상압가열건조법(125℃, 3시간), 조단백질은 kjeldahl 질소정량법(N×6.25), 조회분은 직접회화법으로 분석하였다. 조지방은 샘플을 12시간 동결건조한 후 Soxtec system 1046 (Tacator AB, Sweden)을 사용하여 soxhlet 추출법으로 분석하였다.

5. 지방산 분석

실험사료 및 실험구별 5마리씩을 무작위로 샘플한 전어체 지방의 methylation은 Metcalfe et al.(1996)의 방법에 의해 분석하였다. 지방산 methylation은 feris silica capillary column을 장착한 gas chromatography(Trace GC)에 의해 분석하였다. 캐리어 기체는 질소를 사용하였고, detection은 FiD 모드를 사용하였으며 분석조건은 다음과 같으며(Instrument : trace GC gas chromatograph, column : quadrex, 30M, bonded carbowax 0.25mm I.D×0.25mm film, cat. No.: 007-CW-30-0.25F, injector temperature: 250℃, Detector temperature: 250℃, flow (gas press): 65 psi. helium, splite: 1:50), 도출된 크로마토그램은 분석 프로그램인 peak sample에 의해 분석하였다.

6. 통계분석

모든 결과의 통계처리는 SPSS version 10.1 (USA)을 사용하여 one-way ANOVA test를 실시하였으며, 각 실험구 평균 간의 유의성을 검증하기 위해 최소 유의차 검정(least significant difference test, LSD)을 수행하였다. 통계적 유의성은 P<0.05 수준에서 판정하였다.

1. 성장 조사

8주간의 성장실험 결과는 <Table 3>에 나타내었다. 최종체중은 모든 필수지방산 첨가구에서 대조구보다 증가하는 경향을 보였으며, LNA0.50 처리구에서 가장 높은 값을 나타냈다. 증체율(weight gain, WG)은 LNA0.50 처리구가 대조구, LA0.25, LA0.50, LNA0.25, LNA1.00 및 LA0.25+LNA0.25 처리구보다 유의적으로 높았으며(P<0.05), LA1.00 및 LA0.50+LNA0.50 처리구와는 유의한 차이를 나타내지 않았다. 사료효율(feed efficiency, FE)은 LNA0.50 처리구에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 다른 모든 처리구보다 유의적으로 우수하였다(P<0.05). 일간성장률(specific growth rate, SGR) 역시 증체율과 유사한 경향을 나타내어 LNA0.50 처리구에서 가장 높은 값을 보였다. 반면 간증량지수(HSI), 비만도(CF) 및 생존율은 모든 처리구 간 유의한 차이가 나타나지 않았다(P>0.05).

2. 전어체 일반성분

실험 종료 후 전어체 일반성분 분석 결과는 <Table 4>에 나타내었다. 수분 함량은 대조구, LA0.25 및 LNA0.25 처리구에서 상대적으로 높았으며, LA0.50, LA1.00, LNA0.50 및 LA0.50+LNA0.50 처리구에서는 유의적으로 낮은 값을 나타냈다(P<0.05). 조단백질 함량은 LNA0.50 처리구에서 가장 높게 나타났으며, 대조구와 대부분의 처리구보다 유의적으로 높은 값을 보였다(P<0.05). 다만 LA1.00 처리구와는 유의한 차이가 없었다. 조지질 함량은 LNA1.00 처리구에서 가장 높았으며, 다른 모든 처리구보다 유의적으로 증가하였다(P<0.05). 반면 조회분 함량은 모든 처리구 간 유의적인 차이가 나타나지 않았다(P>0.05).

3. 전어체 지방산 조성

8주간의 사육 실험 종료 후 분석된 치어기 스

Ⅲ. 연구 결과

텔렛 철갑상어의 전어체 지방산 조성 결과는 <Table 5>에 제시된 바와 같다. 전어체의 지방산 프로파일은 사료 내 첨가된 필수지방산 종류 및 수준에 따라 직접적인 영향을 받는 경향을 보였

다. 사료 내 C18:2n-6(리놀레산, LA)의 첨가 수준이 증가함에 따라 전어체 내 C18:2n-6의 축적량이 대조구의 5.301%에서 LA1.00구의 6.137%로 점진적으로 증가하였다. 이와 유사하게 사료 내

<Table 3> Effects of feeding experimental diets on growth performance of juvenile sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*) fed nine experimental diets for 8weeks¹

Parameters	Diets									
	control	LA 0.25	LA 0.50	LA 1.00	LNA 0.25	LNA 0.50	LNA 1.00	LA0.25+ LNA0.25	LA0.50+ LNA0.50	Pooled SEM7
Initial wt.(g)	37.1ns	37.3	37.1	37.2	37.2	37.1	37.1	37.2	37.1	0.24
Final wt.(g)	56.4ns	59.6	61.2	62.7	57.2	63.3	59.2	55.8	62.4	0.63
WG ²	52.1e	59.3cd	65.2bc	68.7ab	54.1de	72.0a	59.8cd	53.4de	68.8ab	1.49
FE ³	60.7e	65.1d	73.2c	79.2b	62.6de	83.0a	65.2d	61.2e	79.3b	1.66
SGR ⁴	0.82c	0.86c	0.96b	1.00ab	0.84c	1.05a	0.86c	0.82c	1.01ab	0.02
HSI ⁵	1.22ns	1.27	1.32	1.36	1.25	1.42	1.27	1.23	1.36	0.66
CF ⁶	0.28ns	0.28	0.29	0.29	0.29	0.30	0.28	0.28	0.29	0.33
Survival	95.7ns	91.3	92.7	95.0	95.0	95.0	96.7	91.0	94.7	1.10

¹Means of triplicate 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).

²Weight gain (%) = [(final weight (g) - initial weight (g)) × 100] / initial weight (g).

³Feed efficiency (%) = wet weight gain (g) / dry feed intake (g).

⁴Specific growth rate (%/day) = (Ln final weight (g) - Ln initial weight (g)) / days.

⁵Hepatosomatic index = (liver weight (g) / body weight (g)) × 100.

⁶Condition factor = (fish weight (g) / fish length (cm)³) × 100.

⁷Pooled SEM = $\sqrt{EMS/n}$, where EMS stands for error mean square and n represents the number of replicates.

<Table 4> Whole body proximate analysis of juvenile sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*) fed nine experimental diets for 8weeks¹

Parameters	Diets									
	control	LA 0.25	LA 0.50	LA 1.00	LNA 0.25	LNA 0.50	LNA 1.00	LA0.25+ LNA0.25	LA0.50+ LNA0.50	Pooled SEM2
Moisture (%)	80.0a	79.7a	77.9c	77.8c	79.6a	76.5d	78.7b	78.7b	77.7c	0.15
Crude protein (%)	13.4d	13.8c	14.1b	14.4ab	13.5d	14.6a	13.4d	13.9c	14.2b	0.33
Crude lipid (%)	3.06f	3.82d	4.25bc	4.48b	3.76d	4.25bc	5.01a	3.47e	4.59b	0.05
Crude ash (%)	2.99ns	2.95	2.93	2.87	2.95	2.84	2.88	2.96	2.85	0.03

¹Means of triplicate 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).

²Pooled SEM = $\sqrt{EMS/n}$, where EMS stands for error mean square and n represents the number of replicates.

<Table 5> Whole body fatty acid composition of juvenile sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*) fed nine experimental diets for 8weeks¹

Fatty acid (%)	Diets								
	control	LA0.25	LA0.50	LA1.00	LNA0.25	LNA0.50	LNA1.00	LA0.25+ LNA0.25	LA0.50+ LNA0.50
C10:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C11:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C12:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C13:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C14:0	5.043	7.634	5.465	6.564	4.870	4.337	5.198	5.502	5.148
C15:0	0.422	0.550	0.477	0.525	0.429	0.406	0.452	0.469	0.455
C16:0	19.52	23.26	22.75	22.73	18.52	18.03	19.06	20.42	19.83
C17:0	0.407	0.351	0.378	0.410	0.388	0.336	0.349	0.388	0.317
C18:0	3.258	2.501	3.055	3.058	2.717	2.173	2.443	3.096	2.367
C20:0	0.564	0.551	0.532	0.510	0.521	1.083	1.069	0.685	0.870
C21:0	0.990	0.792	0.911	0.869	1.334	1.113	0.949	1.101	1.090
C22:0	0.444	0.130	0.165	0.687	0.153	0.147	0.417	0.175	0.120
C23:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C24:0	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
SFA	30.65	35.77	33.73	35.35	28.93	27.63	29.93	31.83	30.20
C14:1	0.239	0.214	0.238	0.259	0.149	0.144	0.228	0.244	0.173
C15:1	0.131	0.131	0.120	0.141	0.107	0.117	0.124	0.134	0.113
C16:1	7.542	9.775	8.973	8.611	7.489	7.081	8.149	8.160	8.420
C17:1	0.395	0.531	0.546	0.609	0.534	0.665	0.698	0.620	0.616
C18:1	43.71	37.28	40.68	39.68	38.33	39.50	41.32	42.04	39.99
C20:1	2.596	1.660	2.144	2.202	2.265	2.173	2.094	2.277	1.917
C22:1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
MFA	54.61	49.60	52.70	51.50	48.87	49.68	52.61	53.47	51.23
C18:2n6	5.301	5.695	5.901	6.137	6.553	6.235	5.676	5.714	6.217
C18:2n9t	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C18:3n6, 9, 12c	0.307	0.443	0.407	0.611	0.466	0.479	0.417	0.459	0.620
C18:3n9, 12, 15c	0.516	0.512	0.446	0.454	0.758	1.107	1.124	0.665	0.723
C20:2	0.854	0.476	0.561	0.536	0.527	0.371	0.490	0.339	0.559
C20:3	0.235	0.175	0.209	0.241	0.273	0.250	0.212	0.272	0.261
C20:4	0.328	0.301	0.256	0.243	0.296	0.555	0.442	0.314	0.400
C20:5	2.795	2.858	2.469	2.194	4.753	5.227	3.609	2.853	3.772
C22:2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
C22:6	4.399	4.182	3.319	2.741	8.576	8.471	5.487	4.079	6.023
PUFA	14.74	14.64	13.57	13.16	22.20	22.69	17.46	14.70	18.57
PUFA/SFA	2.08	2.44	2.49	2.69	1.30	1.22	1.71	2.17	1.63
DHA/EPA	1.57	1.46	1.34	1.25	1.80	1.62	1.52	1.43	1.60

¹Values of proximate analysis were analyzed at feeds & foods nutrition research center, pukyong national university.

* Not detected. SFA, saturated fatty acids; MFA, monounsaturated fatty acids; PUFA, polyunsaturated fatty acids.

²Fatty acids were methylated according to Metcalfe et al. (1966) and analyzed by gas chromatography (trace GC, FID detector) using a quadrex bonded carbowax capillary column 30 m × 0.25 mm I.D × 0.25 μm film). Carrier gas was helium (65 psi, split ratio 1:50) with nitrogen. Injector and detector temperatures were set at 250°C.

C18:3n-3(alpha-리놀렌산, LNA)의 공급량이 늘어날수록 전어체 조직 내 C18:3n-3 함량 역시 대조구 (0.516%) 대비 LNA0.25구 0.758%, LNA0.50구 1.107%, LNA1.00구 1.124%로 뚜렷하게 상승하는 축적 양상을 나타내었다. 고도불포화지방산 (PUFA) 총량의 경우 LNA 첨가구(LNA0.25, LNA0.50, LNA1.00)에서 17.46~22.69% 범위를 기록하며, LA첨가구(13.16~14.64%) 및 대조구 (14.74%)에 비해 상대적으로 높은 경향을 보여주었다. 반면, 단일불포화지방산(MFA) 함량은 사료 내 oleic acid 대체율이 높았던 대조구(54.61%)에서 가장 높게 유지되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 치어기 스텔렛철갑상어를 대상으로 사료 내 linoleic acid (LA)와 alpha-linolenic acid(LNA)의 첨가 수준에 따른 성장, 사료효율 및 어체 지방산 조성을 비교하였다. 그 결과, LNA 0.5% 첨가구에서 증체율, 사료효율 및 일간성장률이 가장 우수하게 나타났으며, LA 1.0% 첨가구와 LA 0.5%+LNA 0.5% 혼합 첨가구에서도 유사한 성장 성능을 나타내었다. 이러한 결과는 스텔렛 철갑상어가 필수지방산을 효율적으로 이용하여 성장에 활용할 수 있으며, 특히 alpha-linolenic acid의 적정 공급이 성장 향상에 중요한 역할을 함을 시사한다(Yao et al., 2024).

지질은 어류에서 에너지 공급뿐 아니라 세포막 구성, 지용성 비타민의 흡수 및 다양한 생리활성 물질의 합성에 관여하는 중요한 영양소이다 (Halver, 2000; Moraes and Almeida, 2020).

사료 내 필수지방산이 부족할 경우 성장 저하와 사료효율 감소가 나타날 수 있으며, 반대로 적정 수준으로 공급될 경우 성장과 영양소 이용효율이 향상되는 것으로 알려져 있다(Jang et al., 2019). 본 연구에서 LNA 0.5% 첨가구가 가장 우수한 성장과 사료효율을 나타낸 것은 스텔렛철갑상어가 alpha-linolenic acid를 효과적으로 이용하

여 체내 대사에 활용하였기 때문으로 판단된다.

담수어는 일반적으로 linoleic acid와 alpha-linolenic acid를 이용하여 고도불포화지방산을 합성할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 종에 따라 그 이용 효율에는 차이가 존재한다(Senadheera et al., 2011). 철갑상어를 포함하여 많은 담수어류의 경우 linoleic acid와 alpha-linolenic acid가 모두 필수적인 지방산이라고 보고하였으며, 두 지방산이 성장과 체내 지방산 조성에 중요한 영향을 미친다고 보고하였다(Hairui et al., 2022; Hung, 2017; Pelic et al., 2019). 본 연구에서도 LA와 LNA를 모두 첨가한 처리구에서 양호한 성장 결과를 나타내어 이러한 연구와 유사한 경향을 보였다. 그러나 LNA를 1.0%까지 증가시켰을 때에는 성장이 더 이상 향상되지 않았으며, 이는 필수지방산은 일정 수준 이상 공급되더라도 성장 향상 효과가 제한적일 수 있음을 의미한다.

어체 일반성분 분석에서는 LNA 0.5% 첨가구의 조단백질 함량이 가장 높게 나타났으며, LNA 1.0% 첨가구에서는 조지방 함량이 증가하는 경향을 나타냈다. 일반적으로 적절한 필수지방산 공급은 단백질 이용효율을 향상시키지만, 과도한 지질 공급은 성장보다는 체내 지방 축적으로 이용될 수 있다. 본 연구에서도 LNA 첨가 수준이 증가함에 따라 체내 지질 함량이 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 공급된 지방산이 에너지 원뿐 아니라 체조직에 축적된 결과로 판단된다. 따라서 성장을 고려할 경우에는 과도한 지방산 공급보다 적정 수준의 공급이 더욱 중요할 것으로 생각된다.

어체 지방산 조성은 사료 내 지방산 조성을 반영하는 경향을 나타내었다. 특히 사료 내 linoleic acid와 alpha-linolenic acid의 함량이 증가할수록 어체 내 해당 지방산의 함량도 증가하였다. 이러한 결과는 담수어에서 일반적으로 보고되는 지방산 축적 양상과 유사하며(Senadheera et al., 2011), 사료 중 지방산 조성이 체내 지방산 조성에 직접적인 영향을 미친다는 기존 연구 결과와도 일치

한다(Hung, 2017). 또한 LNA 0.5% 이상 첨가구에 서는 체내 n-3 계열 지방산의 축적이 증가하였으며, 이는 스텔렛 철갑상어가 alpha-linolenic acid를 효과적으로 이용하는 특성을 가지고 있음을 보여 준다. 그러나 본 실험 데이터에서 통계적 검증의 부재로 인해 스텔렛 철갑상어 치어의 생체 내 지방산 전환 효율을 정량적으로 명확히 규명하지 못하였다. 따라서 추후 수행될 철갑상어 필수 지방산 연구에서는 이러한 분석적 한계를 보완하기 위해, 사육 수조(replicate tanks)별 독립적인 반복 샘플링과 다회 분석을 기반으로 한 엄밀한 통계학적 검증이 반드시 수반되어야 할 것으로 사료 된다.

종합하면, 본 연구는 치어기 스텔렛철갑상어의 성장과 사료효율을 향상시키기 위한 적정 필수 지방산 수준을 제시하였으며, 철갑상어 전용 배합 사료 개발을 위한 기초자료를 제공하였다는 점에서 의의가 있다. 다만 본 연구에서는 linoleic acid와 alpha-linolenic acid를 중심으로 평가하였으므로, 향후에는 EPA와 DHA를 포함한 n-3 및 n-6 계열 지방산의 상호작용, 성장 단계별 요구량, 조직별 지방산 대사 및 면역기능과의 관계를 함께 규명하는 연구가 이루어진다면 철갑상어의 영양 생리를 보다 체계적으로 이해하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- AOAC(1997). Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists International, Arlington, VA, USA.
- Barry KJ and Trushenski J(2019). Reevaluating Polyunsaturated Fatty Acid Essentiality in Rainbow Trout. North American Journal of Aquaculture 82(3), 235~247.
<https://doi.org/10.1002/naaq.10133>
- Halver JE(2000). Lipids and Fatty Acids. In: Fish Nutrition (Chapter 4). Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy. Retrieved from <https://www.fao.org/4/x5738e/x5738e05.htm> on June 16, 2026.
- Hung SSO(2017). Recent advances in sturgeon nutrition. Animal Nutrition 3(3), 191~204.
<https://doi.org/10.1016/j.aninu.2017.05.005>
- Jang JW, Kim YC, Kim KD, Kim KW, Lim SG and Bai SC(2019). The optimum dietary eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid levels for growth of juvenile flounder, *Paralichthys olivaceus*. JFMSE 31(1), 35~42.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.2.31.1.35>
- Jin SI, Kim YC, Kang SW, Jeong CH, Choi SJ, Kim JK, Choi SG and Heo JH(2008). Analysis of nutritional components and development of an intermediate moisture food from sturgeon. Food Science and Preservation 15(5), 719~724.
<https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART001291232> on May 16, 2026.
- 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>
- Li Y, Li W, Luo L, Ren Y, Xing W, Xu G, Li T, Xue M, Yu H and Wu Z(2023). Dietary lipid levels affect growth performance, lipid metabolism, antioxidant and immune status of Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii*. Aquaculture Reports 33, 101796.
<https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101796>
- Lim SG, Han HK, Bang IC, Choi J and Lee SM(2013). Effect of dietary protein and lipid levels on the growth and body composition of juvenile long snout bullhead *Leiocassis longirostris* Gunther. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 46(4), 377~383.
<https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0377>
- Metcalf LD, Schmitz AA and Pelka JR(1966). Rapid preparation of fatty acid esters from lipids for gas chromatographic analysis. Analytical Chemistry 38(3), 514~515.
<https://doi.org/10.1021/ac60235a044>
- Moraes G and Almeida LC(2020). Nutrition and

- functional aspects of digestion in fish. In: Biology and Physiology of Freshwater Neotropical Fish (Chapter 11). Academic Press, Cambridge, MA, USA, 251~271.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815872-2.00011-7>
- Pelić M, Knezevic SV, Baloš MŽ and Popov N(2019). Fatty acid composition of Acipenseridae -sturgeon fish. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 333(1), 012092.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/333/1/012092>
- Satoh S, Poe WE and Wilson RP(1989). Studies on the essential fatty acid requirement of channel catfish, *Ictalurus punctatus*. Aquaculture 79(1-4), 121~128.
[https://doi.org/10.1016/0044-8486\(89\)90452-3](https://doi.org/10.1016/0044-8486(89)90452-3)
- Senadheera SD, Turchini GM, Thanuthong T and Francis DS(2011). Effects of dietary α -linolenic acid (18:3n-3) ILinoleic acid (18:2n-6) ratio on fatty acid metabolism in murray cod (*Maccullochella peelii peelii*). Journal of Agricultural and Food Chemistry 59(3), 1020~1030.
<https://doi.org/10.1021/jf104242y>
- Takeuchi T(1996). Essential fatty acid requirements in carp. Arch Tierernahr 49(1), 23~32.
<https://doi.org/10.1080/17450399609381860>
- Tavakoli S, Luo Y, Regenstein JM, Daneshvar E, Bhatnagar A, Tan Y and Hong H(2021). Sturgeon, caviar, and caviar substitutes: From production, gastronomy, nutrition, and quality change to trade and commercial mimicry. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture 29(4), 753~768.
<https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1873244>
- Yao CB, Feng L, Wu P, Liu Y, Zhang L, Mi HF, Zhou XQ and Jiang WD(2024). Alpha-linolenic acid/linoleic acid ratio can effectively promote muscle growth and protein deposition in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). Food Bioscience 61, 104968.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104968>
- Yu H, Li L, Yu L, Xu C, Zhang J, Qiu X, Zhang Y and Shan L(2022). Effect of dietary linoleic acid (18:2n-6) supplementation on the growth performance, fatty acid profile, and lipid metabolism enzyme activities of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) alevins. Animals 12(19), 2631.
<https://doi.org/10.3390/ani12192631>

-
- Received : 16 July, 2026
 - Revised : 06 August, 2026
 - Accepted : 13 August, 2026