Check for updates

JFMSE, 38(5), pp. 1068~1076, 2026.
수산해양교육연구, 제38권 제5호, 통권143호, 2026.
www.ksfme.or.kr
https://doi.org/10.13000/JFMSE.2026.10.38.5.1068

치어기 스텔렛 철갑상어(*Acipenser ruthenus*)의 사료 탄수화물원 이용성 평가

이 동 훈†
†경기도해양수산자원연구소(연구사)

Evaluation of Dietary Carbohydrate Sources Utilization in Juvenile Sterlet Sturgeon (*Acipenser ruthenus*)

Dong-Hoon LEE†
†Gyeonggi Province Maritime and Fisheries Research Institute(researcher)

Abstract

This study evaluated dietary carbohydrate utilization in juvenile sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*) by testing five diets containing different carbohydrate sources at 22.5%: wheat meal, α-corn starch, dextrin, maltose, and glucose. After an 8-week feeding trial, fish fed maltose and glucose exhibited significantly higher weight gain, specific growth rate, feed efficiency, and protein efficiency ratio compared to the polysaccharide groups ($P<0.05$). The hepatosomatic index and whole-body crude lipid content were also significantly elevated in the simple sugar groups ($P<0.05$), indicating efficient conversion of maltose and glucose into lipids. Conversely, the glucose group showed a remarkably higher accumulation of free β-alanine and β-amino-iso-butyric acid ($P<0.05$). In conclusion, juvenile sterlet sturgeon utilize simple sugars (maltose and glucose) far more efficiently than complex polysaccharides (starch and dextrin), providing essential raw material selection criteria for reducing feed costs in commercial sturgeon aquaculture.

Key words : Sterlet sturgeon, Carbohydrate utilization, Glucose, Maltose, Growth performance

I. 서 론

스텔렛 철갑상어(*Acipenser ruthenus*)는 유럽과 서아시아의 하천 및 내해에 분포하는 소형 철갑상어로 성장속도가 빠르고 질병 및 환경변화에 대한 내성이 우수한 종이다. 또한 약 4년이면 성성숙에 도달하며 캐비아 생산뿐 아니라 식용어로서의 가치가 높은 품종이다.

양어사료에서 탄수화물은 중요한 에너지원으로 이용되며, 상대적으로 가격이 높은 단백질이 에너지원으로 이용되는 것을 감소시키는 protein-sparing effect를 나타내어 사료 제조비 절감에 크게 기여한다(Kaushik and de Oliva-Teles, 1985; Kaushik et al., 1989; Takeuchi et al., 1990; Stone, 2023). 그러나 대부분의 철갑상어는 육식성 어류로서 잡식성 어류에 비해 탄수화물 이용 능력이 낮으며, 탄수화물의 종류와 가공 형태에 따라 이용 효율이 크게 달라지는 것으로 알려져 있다(Hung et al., 1989; Hemre et al., 2002). 따라서 철갑상어용 배합사료에서는 호화전분(gelatinized starch)이나 소화율이 높은 탄수화물원을 이용하여 에너지 이용 효율을 높이는 것이 중요하다

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

(Hung, 2017).

어류에서 탄수화물 이용성은 어종에 따라 큰 차이를 보인다. chinook salmon은 사료 내 탄수화물 첨가 수준이 증가할 경우 성장률이 감소하는 반면, 잉어는 비교적 높은 수준의 탄수화물을 이용할 수 있는 것으로 보고되었다(Buhler and Halver, 1961; Furuichi and Yone, 1980). 또한 참돔에서는 전분과 덱스트린 간 성장 차이가 거의 나타나지 않았으나, 채널메기에서는 덱스트린이 전분보다 높은 이용성을 나타내는 등 탄수화물 이용성은 어종에 따라 상이한 결과를 보였다(Furuichi and Yone, 1982; Wilson and Poe, 1987).

흰철갑상어(*Acipenser transmontanus*)를 대상으로 수행된 연구에서 말토스와 글루코스를 탄수화물원으로 이용한 사료가 전분, 덱스트린, 수크로스 및 셀룰로스를 이용한 사료보다 우수한 성장과 높은 사료효율을 나타내는 것으로 보고되었다(Hung et al., 1989). 또한 철갑상어는 복합 다당류보다 단순당 및 이당류의 이용성이 우수하며, 전분의 가공 여부에 따라 소화율과 에너지 이용 효율이 크게 달라질 수 있다고 보고하였다(Hung, 2017).

그러나 현재까지 스텔렛 철갑상어 치어를 대상으로 다양한 탄수화물원을 직접 비교한 연구는 매우 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 말토스, 글루코스, 밀가루, alpha-옥수수전분 및 덱스트린을 각각 탄수화물원으로 사용한 실험 사료를 제조하여 스텔렛 철갑상어 치어의 성장성, 사료 이용효율 및 체성분 변화를 비교함으로써 스텔렛 철갑상어에 적합한 탄수화물원을 규명하고자 하였다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 실험 사료의 구성 및 제조

본 실험에 사용된 사료의 원료 조성 및 일반성분 분석 결과는 <Table 1>에 제시된 바와 같다. 실험 사료의 주 단백질원으로는 동물성인 북양어분(white fish meal)과 식물성인 탈피대두박(dehulled soybean meal)을 혼합하여 사용하였다. 실험 변수인 탄수화물원(carbohydrate sources)으로는 다당류인 밀가루(wheat meal), alpha-corn starch, 덱스트린(dextrin)과 이당류인 말토스(maltose), 단당류인 글루코스(glucose) 등 총 5가지의 당원을 각각 22.5%씩 동량 첨가하였다. 지질원(lipid sources)으로는 필수지방산인 EPA와 DHA가 풍부한 어유(fish oil)와 리놀레산 및 alpha-리놀렌산을 함유한 식물성 대두유(soybean oil)를 혼합하여 공급하였다. 미량 영양소의 충족을 위해 비타민 및 미네랄 믹스를 각각 첨가하였으며, 사료 내 부형제로 alpha-cellulose를 사용하였다. 모든 실험 사료는 조단백질 45.0%, 조지방 14.0% 내외로 조정하였으며, 총 에너지(gross energy)는 18.3 MJ/kg으로 조성되었다. 혼합된 사료 원료는 익스트루더(extruder)를 통해 압출·성형한 후, 실험 공급 전까지 -20℃ 이하의 냉동고에 밀봉 보관하며 사용하였다.

2. 실험어 사육 및 관리

실험에 사용된 스텔렛 철갑상어 치어는 경상북도민물고기연구센터에서 생산한 개체를 분양받아 활용하였다. 사육 실험 시작 전, 환경 적응을 위해 5톤 원형 수조에서 대조 사료를 공급하며 2주간 예비 사육하였다. 예비 사육 후 평균 체중 15.0±2.0 g 내외의 건장한 치어를 선별하여 100 ℓ PVC 수조(0.5×1.0×0.2 m^3) 15개에 수조당 10마리씩 무작위로 배치하였으며, 실험구당 3반복(triplicate groups)으로 사육 실험을 설계하였다. 사육 시스템은 유수식(flow-through system)으로 운영되었고, 에어스톤을 통해 지속적으로 폭기하여 용존산소(dissolved oxygen, DO) 농도를 6.5±0.2 mg/ℓ로 유지하였으며, 평균 수온은 18.0±2.1℃로 통제하였다. 일일 사료 공급량은 어체 성장에 맞추어 사료 공급률을 보정하는 제한 급이 방식을 채택하였으며, 초기 4주간은 체중의 4%, 후기 4

주간은 체중의 3%를 1일 2회(08:00, 16:00)로 나누어 총 8주간 정량 급이하였다.

3. 성장 측정 및 체성분 분석

어체 측정은 2주 간격으로 실시하였으며, 측정 전 24시간 동안 절식(starvation) 시킨 후 각 수조별 총 중량 및 개체수를 측정하였다. 8주간의 사육 실험 종료 후, 증체율(weight gain, WG), 사료효율(feed efficiency, FE), 일간성장률(specific growth rate, SGR), 단백질효율(protein efficiency ratio, PER), 간중량지수(hepatosomatic index, HSI), 비만도(condition factor, CF) 및 생존율(survival rate)을 산출하였다. HSI 측정을 위해 수조당 3마리씩 무작위로 샘플링하여 어체중 대비 간 중량을 측정하였다. 사료 및 전어체(whole body)의 일반성분(proximate composition) 분석은 AOAC (1997) 표준방법에 준하여 실시하였다. 수분은 125℃ 상압가열건조법, 조단백질은 kjeldahl 질소정량법(N×6.25), 조회분은 직접회화법으로 분석하였으며, 조지방은 시료를 12시간 동결건조한 soxtec system 1046 (Tacator AB, Sweden)을 이용한 지질 추출법으로 정량하였다. 사료 및 전어체의 아미노산 조성은 6N HCl로 산 가수분해 후 희석하여 아미노산 자동분석기 amino acid analyzer S433 (SYKAM, German)를 이용해 ninhydrin 발색법으로 분석하였다.

4. 통계 분석

모든 실험 데이터의 통계 처리는 SPSS Version 10 프로그램을 사용하여 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였다. 각 실험구 평균간의 유의성 검증은 던칸의 다중검정(duncan's multiple range test)을 통해 유의수준 $P<0.05$에서 유의적 차이를 판정하였다.

<Table 1> Experimental diets formulation and proximate composition (% DM base)[1]

Ingredients	Diet1				
	wheat meal	α-corn starch	maltose	glucose	dextrin
White fish meal[2]	45.2	51.0	52.0	52.0	52.0
Dehulled soybean meal[2]	14.7	13.0	12.0	12.0	12.0
Wheat meal[2]	26.3	-	-	-	-
α-corn starch[2]	-	22.5	--	-	-
Maltose[3]	-	-	22.5	-	-
Glucose[3]	-	-	-	22.5	-
Dextrin[3]	-	-	-	-	22.5
Fish oil[2]	5.00	4.50	4.50	4.50	4.50
Soybean oil[2]	4.00	4.50	4.50	4.50	4.50
Vitamin mixture[2]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Mineral mixture[2]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
α-cellulose[3]	2.80	2.50	2.50	2.50	2.50
Proximate analysis					
Crude protein	45.1	45.2	45.2	45.3	45.2
Crude lipid	14.2	14.0	14.1	14.1	14.1
Crude ash	0.56	0.54	0.54	0.54	0.54
Crude fiber	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05
Nitrogen free extract	39.2	39.2	39.1	39.1	39.2
Gross energy(MJ/kg diet)	18.3	18.4	18.4	18.3	18.3

[1]Values of proximate analysis were analyzed at Feed & Food Nutrition Research Center, Pukyong national University.
[2]Suhyup Feed Co., Korea, 3Sigma Aldrich Korea.

Ⅲ. 연구 결과

1. 성장실험

8주간의 사육 실험을 통해 도출된 스텔렛 철갑상어 치어의 성장 결과는 <Table 2>에 제시하였다. 탄수화물원으로 maltose와 glucose를 섭취한 실험구의 최종 체중, 증체율(WG), 일간성장률(SGR), 사료효율(FE) 및 단백질효율(PER)은 wheat meal, alpha-corn starch 및 dextrin 섭취구와 비교하여 유의하게 높은 수치를 나타내었다(P<0.05). 그러나 maltose와 glucose구 상호 간에는 통계적인 유의차가 관찰되지 않았다 (P>0.05).

간 대사 활성 지표인 간중량지수(HSI) 역시 성장 성능과 동일한 경향성을 보이며 maltose 및 glucose구에서 유의하게 높은 값을 유지하였다(P<0.05). 비만도(CF)의 경우, maltose와 glucose구가 alpha-corn starch 및 dextrin구에 비해 유의적으로 높은 값을 기록하였으나 (P<0.05), wheat meal 구와는 통계적 유의차가 없었다 (P>0.05). 실험 기간 전반에 걸친 생존율(survival rate)은 모든 실험구에서 100%를 기록하여 탄수화물원의 종류에 따른 유의적인 차이나 독성 반응은 나타나지 않았다(P>0.05).

2. 전어체 일반성분 조성

실험 종료 후 분석된 전어체의 일반성분 조성 결과는 <Table 3>과 같다. 전어체 수분 함량은 alpha-corn starch구에서 가장 유의하게 높은 수치를 보였으며(P<0.05), maltose구와 dextrin구 간에는 유의적인 차이가 없었다(P>0.05). 전어체 조단백질 및 조지방 함량은 에너지 이용 효율과 성장이 가장 우수했던 maltose구에서 다른 모든 실험구와 비교하여 통계적으로 유의하게 높은 수준을 기록하였다(P<0.05). 반면, 조회분 함량의 경우 alpha-corn starch구에서 유의하게 가장 높은 반면, maltose구에서 가장 낮은 수치를 나타내어 조지방 축적량과 상반된 대사적 경향을 보여주었다 (P<0.05).

<Table 2> Growth performance and feed utilization of juvenile sterlet sturgeon (Acipenser ruthenus) fed different carbohydrate sources for 8 weeks[1]

Parameters	Diet[1]					
	wheat meal	α-corn starch	maltose	glucose	dextrin	Pooled SEM[8]
Initial weightt (g)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	0.52
Final weightt (g)	37.4	27.2	48.2	44.7	34.3	21.2
WG (%)	149.1b	81.4c	222.3a	198.9a	128.9b	14.2
FE (%)	70.9b	43.1c	90.4a	80.8a	62.5b	5.76
SGR (%/day)	1.75b	1.14c	2.24a	2.10a	1.59b	0.11
PER	0.95b	0.52c	1.42a	1.27a	0.82b	0.05
HSI	2.08b	1.72c	2.43a	2.12a	1.34b	0.01
CF	3.42ab	3.06b	3.66a	3.72a	3.29b	0.08
Survival rate (%)	100	100	100	100	100	0

[1]Means of triplicate groups; Values in the same row with different superscript are significantly different (P<0.05).
[2]Weight gain (%) = [(final weight (g) – initial weight (g)) × 100] / initial weight. (g).
[3]Feed efficiency (%) = [(final weight (g) – initial weight (g)) × 100] / dry feed intake (g).
[4]Specific growth rate (%/day) = [(Ln final weight (g) – Ln initial weight (g))] / day.
[5]Protein efficiency ratio = [(final weight (g) – initial weight (g)) × 100] / protein intake (g).
[6]Hepatosomatic index = (liver weight (g) - body weight (g)) × 100.
[7]Condition factor = (fish weight (g) / fish length (cm)^3) × 100.
[8]Pooled SEM = $\sqrt{EMS/n}$, where EMS stands for error mean square and n represents the number of replicates.

<Table 3> Proximate composition (%) of whole-body sterlet sturgeon (Acipenser ruthenus) fed different carbohydrate sources[1]

Parameters	Diet					
	wheat meal	α-corn starch	maltose	glucose	dextrin	Pooled SEM[8]
Moisture (%)	76.5	77.4	75.9	76.3	76.8	0.14
Crude protein (%)	14.8	13.5	16.0	14.9	14.8	0.22
Crude lipid (%)	5.82	4.03	7.13	6.97	5.49	0.35
Crude ash (%)	2.81	3.21	2.33	2.59	2.89	0.08

[1]Means of triplicate groups; Values in the same row with different superscript are significantly different (P<0.05).

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

<Table 4> Whole body amino acid composition of juvenile sterlet sturgeon (Acipenser ruthenus) fed five experimental diets for 8 weeks (% of as is basis)[1]

Amino acid (%)	Diet					
	wheat meal	α-corn starch	maltose	glucose	dextrin	Pooled SEM[8]
Aspartic acid	1..30^{a}	1.32^{a}	1.21^{b}	1.19^{c}	1.28^{ab}	0.02
Serine	0.62^{a}	0.65^{a}	0.58^{b}	0.58^{b}	0.64^{a}	0.01
Glutamic acid	2.02^{a}	2.05^{a}	1.86^{b}	1.84^{b}	2.00^{a}	0.03
Proline	0.74^{a}	0.77^{a}	0.62^{b}	0.66^{b}	0.74^{a}	0.02
Glycine	1.23^{b}	1.42^{a}	1.01^{c}	1.16^{b}	1.26^{b}	0.04
Alanine	0.87^{a}	0.91^{a}	0.77^{b}	0.79^{b}	0.87^{a}	0.02
Nonessential amino acids	6.78^{a}	7.12^{a}	6.03^{b}	6.23^{b}	6.79^{a}	0.12
Threonine	0.61^{a}	0.63^{a}	0.57^{b}	0.56^{b}	0.60^{a}	0.01
Valine	0.69^{a}	0.68^{ab}	0.64^{b}	0.60^{c}	0.66^{ab}	0.01
Isoleucine	0.62^{a}	0.61^{a}	0.58^{ab}	0.55^{b}	0.58^{ab}	0.01
Leucine	1.04^{a}	1.04^{a}	0.97^{bc}	0.93^{ac}	1.02^{ab}	0.01
Lysine	1.07^{a}	1.04^{ab}	0.98^{bc}	0.94^{c}	1.04^{ab}	0.02
Phenyalanine+Tyrosine	0.95^{ab}	0.95^{ab}	0.88^{b}	0.87^{b}	0.97^{a}	0.01
Methionine+Cysteine	0.47^{ab}	0.47^{ab}	0.44^{bc}	0.43^{c}	0.48^{a}	0.01
Arginine	0.88^{a}	0.91^{a}	0.76^{b}	0.78^{b}	0.87^{a}	0.02
Histidine	0.56^{ns}	0.55	0.56	0.52	0.56	0.01
Essential amino acids	6.89^{a}	6.89^{a}	6.38^{bc}	6.18^{c}	6.78^{ab}	0.09
Total amino acids	13.7^{a}	14.0^{a}	12.4^{b}	12.4^{b}	13.6^{a}	0.21

[1]Means of triplicate groups; Values in the same row with different superscript are significantly different (P<0.05).

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

3. 구성 및 유리 아미노산 조성

전어체의 구성 아미노산 분석 결과(<Table 4>), 비필수 아미노산(NEAA) 총량 및 개별 함량 (aspartic acid, serine, glutamic acid, proline, glycine, alanine)은 wheat meal, alpha-corn starch 및 dextrin구가 maltose 및 glucose구에 비해 유의하게 높은 농도를 형성하였다(P<0.05). 필수 아미노산(EAA)의 경우에도 wheat meal와 alpha-corn

starch구가 maltose 및 glucose구보다 유의적으로 높은 수치를 보였다(P<0.05). 총 구성 아미노산 총량 역시 비필수 아미노산 패턴과 동일하게 다당류 섭취구에서 유의하게 높은 축적 양상을 나타내었다(P<0.05). 전어체 유리 아미노산(free amino acids) 조성 결과(<Table 5>)는 일부 대사 기질적 차이를 제외하고는 전반적으로 구성 아미노산 분석 결과와 유사한 경향을 유지하였다. 그러나 당 대사 산물과 연계된 beta-alanine 함량의 경우, glucose구가 다른 모든 실험구보다 통계적으로 유의하게 가장 높은 농도를 나타내었다(P<0.05). 아울러 아미노산 이화대사 산물인 bet-amino-iso-butyric acid 농도 또한 glucose구와 dextrin구에서 다른 비교 실험구들에 비해 유의하게 높은 축적을 보였다(P<0.05). wheat meal를 공급한 실험구는 glucose와 비교 시 beta-alanine, beta-amino-iso-butyric acid 및 arginine 함량에서만 유의하게 낮은 수치를 기록하였다(P<0.05).

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 maltose, glucose, wheat meal, alpha-corn starch 및 dextrin을 각각 탄수화물원으로 이용한 실험사료를 제조하여 8주간 스텔렛 철갑상어(*Acipenser ruthenus*) 치어에 공급한 결과, maltose와 glucose를 급여한 처리구에서 증체율(WG), 일간성장률(SGR), 사료효율(FE) 및 단백질 효율(PER)이 가장 우수한 것으로 나타났다. 반면 alpha-corn starch 과 dextrin을 탄수화물원으로 사용한 처리구에서는 성장과 사료 이용성이 상대적으로 낮게 나타났으며, wheat meal 처리구는 이들 처리구의 중간 수준을 나타내었다.

이러한 결과는 탄수화물의 화학적 구조와 소화 특성이 스텔렛 철갑상어의 성장과 영양소 이용효율에 중요한 영향을 미친다는 것을 보여준다. 어류에서 탄수화물은 주요 에너지원으로 이용되어 단백질이 에너지로 소비되는 것을 감소시키는 protein-sparing effect를 보여주지만(Kaushik and de Oliva-Teles, 1985; Kaushik et al., 1989; Takeuchi et al., 1990), 모든 어종이 동일한 수준으로 탄수화물을 이용하는 것은 아니며, 특히 육식성 어류는 초식성 또는 잡식성 어류보다 탄수화물 이용성이 낮은 것으로 알려져 있다(NRC, 2011). juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*)을 대상으로 glucose, maltose, dextrin, raw corn starch, sucrose 및 cellulose를 각각 탄수화물원으로 이용한 실험을 수행한 결과 maltose와 glucose 처리구에서 가장 높은 증체율과 사료효율을 나타냈으며, raw corn starch과 cellulose구에서는 성장률이 현저히 감소하였다(Hung et al., 1989).

또한 에너지 축적효율 역시 maltose와 glucose에서 가장 높게 나타나 단순당 및 이당류가 철갑상어에서 가장 효율적으로 이용되는 탄수화물원임을 보고하였다. 본 연구에서도 maltose와 glucose 처리구가 가장 우수한 성장 결과를 나타내어 Hung et al.(1989)과 유사한 결과를 보였다.

철갑상어는 포유류에 비해 탄수화물 분해효소의 활성이 높지 않은 것으로 알려져 있으며, 탄수화물 이용성의 차이는 소화 및 흡수 과정과 밀접한 관련이 있다. maltose는 소장에서 maltase에 의해 두 분자의 glucose로 빠르게 분해되며, glucose는 장 상피세포의 수송체를 통해 직접 흡수되어 에너지 대사에 이용되며, 전분과 dextrin은 먼저 alpha-amylase에 의해 올리고당으로 분해된 후 추가적인 효소 작용을 거쳐야 흡수될 수 있으므로, 소화 효율은 효소 활성에 크게 의존한다(Kaushik et al., 1989; Hung, 2017).

<Table 5> Whole body amino acid composition of juvenile sterlet sturgeon (Acipenser ruthenus) fed five experimental diets for 8 weeks (% of as is basis)[1]

Amino acid (%)	Diet					
	wheat meal	α-corn starch	maltose	glucose	dextrin	Pooled SEM[8]
Phosphoserine	0.003[ns]	0.003	0.003	0.003	0.003	0.0001
Taurine	0.074[ab]	0.085[a]	0.058[b]	0.091[a]	0.096[a]	0.0047
Aspartic acid	0.021[a]	0.018[b]	0.014[c]	0.019[ab]	0.019[ab]	0.0006
Threonine	0.031[a]	0.029[ab]	0.026[c]	0.029[ab]	0.027[bc]	0.0006
Serine	0.024[a]	0.023[a]	0.019[b]	0.022[a]	0.021[a]	0.0005
Glutamic acid	0.035[a]	0.030[b]	0.027[c]	0.032[b]	0.031[b]	0.0007
Proline	0.022[a]	0.020[b]	0.020[b]	0.021[ab]	0.021[ab]	0.0003
Glycine	0.022[a]	0.020[b]	0.016[c]	0.022[a]	0.021[ab]	0.0006
Alanine	0.050[a]	0.045[bc]	0.043[b]	0.046[b]	0.044[bc]	0.0007
Citrulline	0.001[b]	0.003[a]	0.001[c]	0.001[b]	0.001[b]	0.0002
Valine	0.029[a]	0.026[b]	0.023[c]	0.026[b]	0.025[b]	0.0005
Isoleucine	0.025[a]	0.022[b]	0.019[b]	0.022[b]	0.021[b]	0.0009
Leucine	0.046[a]	0.042[b]	0.036[c]	0.041[b]	0.040[b]	0.0009
Tyrosine	0.025[a]	0.022[bc]	0.021[c]	0.024[ab]	0.022[bc]	0.0005
Phenylalanine	0.027[a]	0.023[bc]	0.021[c]	0.025[ab]	0.025[b]	0.0006
β-alanine	0.037[b]	0.027[c]	0.039[b]	0.047[a]	0.036[b]	0.0018
β-amino iso-bytyric acid	0.006[c]	0.005[c]	0.009[b]	0.010[a]	0.010[a]	0.0006
ɣ-aba	0.002[a]	0.001[b]	0.001[b]	0.002[a]	0.002[a]	0.0001
Histidine	0.040[a]	0.029[c]	0.025[d]	0.034[b]	0.037[ab]	0.0015
Carnitine	0.007[a]	0.006[c]	0.006[bc]	0.007[ab]	0.007[ab]	0.0002
Ornithine	0.002[ns]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0001
Lysine	0.023[a]	0.020[b]	0.019[b]	0.023[a]	0.020[b]	0.0005
Arginine	0.020[b]	0.018[b]	0.020[b]	0.023[a]	0.019[b]	0.0005
Total	0.571[a]	0.520[b]	0.466[c]	0.568[a]	0.590[ab]	0.0115

[1]Means of triplicate groups; Values in the same row with different superscript are significantly different (P<0.05).

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

이러한 철갑상어의 생리적 특성이 복합 탄수화물보다 단순한 탄수화물의 이용성을 높이는 원인으로 생각된다. 본 연구에서는 dextrin구가 maltose와 glucose보다 낮은 성장률을 나타내었다. 일반적으로 dextrin은 전분보다 분자량이 작아 비교적 이용성이 높은 탄수화물로 알려져 있으나, 철갑상어에서는 반드시 가장 우수한 탄수화물원이 되는 것은 아니다. Herold et al.(1995)은 white sturgeon에서 dextrin의 성장 효과는 glucose와 maltose보다 낮으며 raw corn starch보다는 높은 수준이라고 보고하였다. 본 연구에서도 동일한 경향이 나타나 dextrin은 철갑상어에서 중간 수준의 이용성을 갖는 탄수화물원으로 판단된다.

채널메기(*Ictalurus punctatus*)에서는 탄수화물의 종류에 따라 이용성이 크게 달라지는 것으로 보고되었다. Wilson and Poe(1987)는 glucose, fructose, sucrose 및 maltose와 같은 단순당은 채널메기의 성장에 효과적으로 이용되지 못하는 반면, dextrin과 같은 복합 탄수화물은 상대적으로 이용성이 높다고 보고하였다. 이러한 결과는 본 연구에서 maltose와 glucose의 이용성이 가장 우수하게 나타난 철갑상어의 결과와는 상반된다.

이는 채널메기와 철갑상어가 서로 다른 소화효소 활성 및 포도당 항상성(glucose homeostasis)을 가지고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 동일한 탄수화물이라도 어종에 따라 적합성이 크게 달라질 수 있으며, 사료 배합 시 어종 특이적인 영양 생리 특성을 고려하는 것이 중요하다.

chinook salmon을 포함한 연어과 어류 역시 대표적인 육식성 어류로 탄수화물 이용성이 제한적인 것으로 알려져 있다. Buhler and Halver(1961)는 chinook salmon에서 사료 내 탄수화물 함량이 증가할수록 성장률이 감소하고 간 내 글리코겐 축적이 증가한다고 보고하였는데, 이러한 결과는 현재 연구의 스텔렛 철갑상어 치어에 대한 복합탄수화물의 낮은 이용성에 대한 연구 결과와 유사한 경향으로 볼 수 있다.

한편, 전어체 일반성분 분석에서는 maltose와 glucose 처리구의 조지방 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 성장이 우수한 처리구에서 흡수된 탄수화물이 효율적으로 에너지원으로 이용되고, 잉여 에너지가 체내 지방으로 일부 축적되었기 때문으로 해석된다. 그러나 간중량지수(HSI)는 정상 범위 내에서 유지되었으며, 실험기간 동안 생존율 또한 높게 유지된 점을 고려하면 본 연구에서 사용한 탄수화물 수준은 치어의 생리적 항상성을 크게 저해하지 않은 것으로 판단된다. 다만 혈당 농도, 간 글리코겐 함량 및 탄수화물 대사효소 활성에 대한 분석은 수행하지 않았으므로, 이러한 대사적 변화의 정확한 기전은 향후 추가 연구를 통해 규명할 필요가 있다.

최근 양어사료는 단순히 성장률 향상뿐만 아니라 원료 가격 상승에 대응하기 위한 경제성 확보가 중요한 과제로 인식되고 있다(Gatlin et al., 2007). 어분 가격이 지속적으로 상승하는 상황에서 탄수화물을 적절히 이용하여 단백질의 에너지 소비를 최소화하는 것은 사료 제조비 절감과 지속 가능한 양식산업을 위해 매우 중요하다. 그러나 철갑상어는 다른 담수어류에 비해 이용 가능한 탄수화물의 범위가 제한적이므로, 값이 저렴한 전분만을 사용하기보다는 소화율이 높은 탄수화물을 적정 수준으로 배합하는 것이 성장과 경제성을 동시에 확보하는 데 유리할 것으로 판단된다. 또한 전분의 호화(gelatinization) 및 압출(extrusion) 공정과 같은 사료 가공 기술을 적용할 경우 탄수화물 이용성이 더욱 향상될 가능성이 있으므로, 이에 대한 후속 연구도 필요하다.

종합하면, 본 연구는 약 15~48 g의 스텔렛 철갑상어 치어에서 탄수화물원의 종류에 따라 성장 및 사료 이용성이 크게 달라질 수 있음을 확인하였다. 특히 maltose와 glucose는 wheat meal, alpha-옥수수전분 및 dextrin보다 우수한 성장 성적과 단백질 이용 효율을 나타내어 치어기 스텔렛 철갑상어용 배합사료의 적절한 탄수화물원으로 판단된다. 본 연구 결과는 철갑상어용 배합사료 개발 시 탄수화물의 종류를 선정하기 위한 기초자료를 제공하며, 향후에는 탄수화물 첨가 수준, 전분 가공방법 및 탄수화물 대사 관련 효소 활성과 유전자 발현을 함께 분석함으로써(Hung, 2017; Enes et al., 2011) 철갑상어의 탄수화물 이용 기전을 보다 체계적으로 규명할 필요가 있다.

References

AOAC(1997). Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists International, Arlington, VA, USA.

Buhler DR and Halver JE(1961). Nutrition of salmonid fishes. IX. Carbohydrate requirements of chinook salmon. Journal of Nutrition, 74, 307~318. https://doi.org/10.1093/jn/74.3.307.

Enes P, Panserat S, Kaushik SJ and Oliva-Teles A(2011). Dietary carbohydrate utilization by European seabass (*Dicentrarchus labrax*) and gilthead seabream (*Sparus aurata*). Reviews in Fish Biology and Fisheries, 19(3), 201~215. https://doi.org/10.1080/10641262.2011.579363

Furuichi M and Yone Y(1980). Effect of dietary dextrin levels on the growth and feed efficiency, the chemical composition of liver and dorsal

muscle, and the absorption of dietary protein and dextrin in fishes. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 46, 225~229. https://doi.org/10.2331/suisan.46.225.

Furuichi M and Yone Y(1982). Availability of carbohydrates in nutrition of carp and red sea bream. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 48, 945~948. https://doi.org/10.2331/suisan.48.945.

Gatlin DM III, 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

Hemre GI, Mommsen TP and Krogdahl A(2002). Carbohydrates in fish nutrition: effects on growth, glucose metabolism and hepatic enzymes. Aquaculture Nutrition, 8, 175~194. https://doi.org/10.1046/j.1365-2095.2002.00200.x

Herold MA, Hung SSO and Fynn-Aikins FK(1995). Apparent digestibility of carbohydrate sources in white sturgeon (*Acipenser transmontanus*). Progressive Fish-Culturist, 57, 137~140. https://doi.org/10.1577/1548-8640(1995)057<0137:ADCOCF>2.3.CO;2

Hung SSO, Fynn-Aikins KF, Lutes PB and Xu RP(1989). Ability of juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) to utilize different carbohydrate sources. Journal of Nutrition, 119, 727~733. https://doi.org/10.1093/jn/119.5.727.

Hung SSO(2017). Recent advances in sturgeon nutrition. Animal Nutrition, 3(3), 191~204. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2017.05.005.

Kaushik SJ and de Oliva Teles A(1985). Effect of digestible energy on nitrogen and energy balance in rainbow trout. Aquaculture, 50, 89~101. https://doi.org/10.1016/0044-8486(85)90155-3

Kaushik SJ, Médale F, Fauconneau B and Blanc D(1989). Studies on the nutrition of Siberian sturgeon, Acipenser baerii: I. Utilization of digestible carbohydrates by sturgeon. Aquaculture, 76, 97~107. https://doi.org/10.1016/0044-8486(89)90254-8.

NRC(2011). National Research Council. Nutrient Requirements of Fish and Shrimp. National Academies Press, Washington, D.C., USA. Retrieved from https://ceebluenterprises.com/wp-content/uploads/2022/08/Nutrient-Requirements-of-Fish-and-Shrimp.pdf on May 16, 2026.

Stone DAJ(2003). Dietary carbohydrate utilization by fish. Reviews in Fisheries Science, 11(4), 337~369. https://doi.org/10.1080/10641260390260884

Takeuchi T, Jeong KS and Watanabe T(1990). Availability of extruded carbohydrate ingredients to rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* and carp *Cyprinus carpio*. Nippon Suisan Gakkaishi, 56, 1839~1845. https://doi.org/10.2331/suisan.56.1839

Wilson RP and Poe WE(1987). Apparent inability of channel catfish to utilize dietary mono- and disaccharides as energy sources. Journal of Nutrition, 117, 280~285. https://doi.org/10.1093/jn/117.2.280

• Received : 16 July, 2026
• Revised : 25 August, 2026
• Accepted : 01 September, 2026