

순환여과양식시스템에서 사료 공급 횟수가 연어(*Oncorhynchus keta*) 치어의 성장, 체조성 및 혈액성분에 미치는 영향

조규석 · 장석우 · 이유진 · 이승형^{1*}

충청북도내수면산업연구소, ¹부경대학교

Effect of Different Feeding Frequency on the Growth Performance, Hematological Parameters and Body Nutrient Composition of Juvenile Chum Salmon *Oncorhynchus keta* Reared in a Recirculating Aquaculture System

Kyu-Seok Cho, Seok-Woo Jang, Yu-Jin Lee and Seunghyung Lee^{1*}

Inland Fisheries Industrial Research Institute of Chungcheong Buk-do, Chungju 27432, Republic of Korea

¹Major of Aquaculture and Applied Life Sciences, Division of Fisheries Life Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

The effect of feeding frequency on growth performance, body nutrient composition, and hematological parameters of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* was investigated. The juveniles (10.9±0.3 g) were fed commercial feed for 30 days with feeding frequencies of 1, 2, 3, 4, or 5 meal (s)/day ($n=2$ tanks per treatment) in a recirculating aquaculture system (RAS). Fish were fed to satiation at each of the feeding frequencies. At the end of the feeding trial, final body weight, weight gain, and specific growth rate of fish fed 2 meals/day were significantly higher than those of fish fed 1 meal/day ($P<0.05$); however, no difference was detected among the other feeding frequencies. Daily feed intake significantly increased with increasing feeding frequency, whereas feed and protein utilization efficiencies continuously decreased with increase in the feeding frequency. Among the treatments, fish fed 1 meal/day showed the lowest value in whole-body lipid content and total protein concentration in plasma. Taken together, the optimal feeding frequency for growth performance and feed utilization efficiency in chum salmon juveniles reared in the RAS was determined to be 2 meals/day.

Keywords: *Oncorhynchus keta*, Feeding rate, Feeding frequency, Growth performance, Commercial diet

서론

국내 연어 소비시장은 외식문화의 발달과 식습관의 서구화로 인해 최근 10년간 급격히 증가했다. 해양수산부 수산정보포털(MOMAF, 2016)에 따르면 연간 연어 수입량은 2009년 1만 1천톤이었던 것이 2020년에는 4만 3천톤으로 집계되어 약 4배 이상 증가한 것으로 나타났다. 이러한 연어 수입 물량 증가는 외화 유출을 심화시키고, 국내 양식산업을 잠식시킬 뿐만 아니라(KMI, 2019), 해외의 일부 연어 양식장에서 항생제 과다 사용에 따른 식품 안전성 문제(Miranda et al., 2018) 등이 내재되어

있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법 중 하나는 국내 환경에서 연어를 양식하는 것이다. 앞서, 은연어(*Oncorhynchus kisutch*)를 대상으로 양식 기술 개발 연구가 수행되어져 왔으며(Kim et al., 1990; Park et al., 1996; Hong et al., 2004), 최근에는 대서양연어(*Salmo salar*)를 대상으로 관련 연구가 진행되고 있다. 우리나라로 소상하고 있는 연어(*Oncorhynchus keta*)도 양식 대상종이 될 수 있으며, 생태 특성을 이해하는 연구는 일부 수행되어 졌으나(Kwon et al., 2014), 양식 기술 개발 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서, 연어의 양식 가능성을 판단할 필요가 있어 본 연구는 수행되었다. 북태평양에 서식하고 있는 대

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5916 Fax: +82. 51. 629. 5908

E-mail address: shlee@pknu.ac.kr



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.2023.0734>

Korean J Fish Aquat Sci 56(5), 734-740, October 2023

Received 20 January 2023; Revised 16 March 2023; Accepted 12 September 2023

저자 직위: 조규석(연구지도팀장), 장석우(연구사), 이유진(연구사), 이승형(교수)

표적인 연어과 어류의 종류는 연어(chum salmon; *O. keta*), 은 연어(coho salmon), 왕연어(chinook salmon; *O. tshawytscha*), 홍연어(sockeye salmon; *O. nerka*), 곱사연어(pink salmon; *O. gorbusch*) 및 산천어(cherry salmon; *O. masou*) 등이며, 하천에서 태어나 바다에서 성장한 후 다시 하천으로 돌아와 산란하는 소하성 어종들이다(Jonsson and Josson, 2003; Gende et al., 2004; Flecker et al., 2010). 이 중에서 우리나라에는 주로 연어(*O. keta*)가 10–11월경 강원도 고성 북천, 양양 남대천을 비롯하여 삼척 오십천과 울진 태화강 등의 하천에 소생하고 있다(Kwon et al., 2014). 그러나 지난 10년간 연어(*O. keta*)에 관한 국내 연구는 주로 생태적 특성(Kwon et al., 2014; Hur et al., 2021)과 어획물에 대한 식품 산업적 활용(Lim et al., 2015; Min and Song, 2019; Cha et al., 2020; Kim et al., 2021)에 관한 연구 등에 국한되어 있고, 양식 대상종으로서의 연구는 거의 보고된 바가 없었다.

어류를 양식하기 위해서는 생산성 및 양식 경영 비용 측면에서 가장 중요하게 영향을 미치는 사료에 대한 연구가 필수적이다(Cho et al., 2006). 우리나라의 대표적인 연어과 양식 어류인 무지개송어(*O. mykiss*)에 대한 연구 사례를 검토한 결과, 전체 생산비용 가운데 사료비가 차지하는 비율이 41.1–55.8%로 조사되었다(Paek and Park, 2016). 배합사료의 적정 공급 횟수는 대상 어종마다 다르며, 어류의 성장 단계와 사육환경에 영향을 받는다(Mihelakakis et al., 2002). 각 대상 어종에 대한 배합사료 공급체계가 확립되지 않으면 어류는 영양 과잉 또는 부족 상태에 놓이기 쉽다(Lee et al., 2000). 사료가 과잉으로 공급될 경우, 사료 유실로 인한 경제적 손실과 수질오염이 발생할 수 있으며, 사료가 부족하게 공급될 경우 어류가 필요로 하는 영양소 요구량을 만족시키지 못하게 되어 성장을 저해할 수 있다(Lee et al., 2013).

따라서 양식경영비의 높은 비중을 차지하는 배합사료의 공급 체계 확립은 어류의 양식 경영을 효율적으로 관리할 수 있게 할 것이며, 어류의 성장 및 사료효율(feed efficiency, FE) 증가로 경제적인 이익뿐만 아니라 사료 과잉 공급 시 발생하는 사료 유실을 최소화하여 양식장 배출수로 인한 환경오염을 최소화할 수 있다(Mihelakakis et al., 2001). 현재 국내에서 시도되고 있

는 연어 양식 방법은 주로 육상 순환여과식 방법으로 환경 독립적으로 운영되어 질병 유입을 최소화할 수 있고 사육환경 관리가 용이하며 특히 다양한 수처리 시설을 이용하여 물을 지속적으로 재처리할 수 있어 에너지를 매우 효율적으로 사용할 수 있다(Suh et al., 2001).

따라서, 본 연구는 순환여과양식시스템을 이용한 사육환경에서 연어(*O. keta*) 치어를 30일간 사료 공급 횟수를 달리하여 사육하였을 경우 성장도, 전어체 일반성분 및 혈액성분에 어떠한 영향을 미치는지 확인하여 적정 사료 공급 횟수를 도출하고자 수행되었다.

재료 및 방법

실험어 및 실험환경

연어(*O. keta*)는 2021년 12월 한국수산자원공단 동해생명자원센터에서 수정란을 분양 받아 충북내수면산업연구소에서 2022년 7월까지 8개월간 냉수어종 연구시설의 수조(2.4×0.6×0.2 m³)에서 사육하였다. 실험은 이전 연구에서 도출한 연어(*O. keta*) 치어의 최적 성장 수온인 14±0.5°C에서 실시되었으며(Jang et al., 2022), 실험은 원형 실험수조(Φ0.6 m, 높이 0.6 m), 모래여과기(D-500; SPLASH, Ningbo, China), 생물학적여과시설(1×0.6×2 m³), 자외선 살균장치(KG100; KLISGLOBAL, Seoul, Korea) 및 냉각기(BF-2000G; New Blue Ocean, Busan, Korea)로 구성된 순환 여과 시스템에서 실시하였다(Fig 1). 순환 여과 시스템의 총 수량은 약 4톤이었으며, 일간 사육수 환수율은 시스템 전체 수량의 약 100%로 하였으며, 내부 순환율은 24회전/일이 되도록 설정하였다. 모래여과기를 사용하여 물리적 여과를 실시하였고, 모래여과기 내 고행물은 1일 1회 제거하였다. 생물여과조는 침수식으로 운영하였으며, 여과재료는 플라스틱 재질의 원통형 여과재료(Φ 30 cm, 높이 1 m)를 사용하여 여과조 물량의 10% 정도를 채워 사용하였다. 사육 기간 동안 사육수 수질을 나타내는 인자 중 pH 7.97±0.83, 용존산소 9.28±1.39 mg/L, 생물학적산소 요구량 4.4±1.5 mg/L, 총암모니아 0.55±0.24 mg/L, 아질산염 0.04±0.03 mg/L 및 질산염 1.28±0.21 mg/L로 유지되었다.

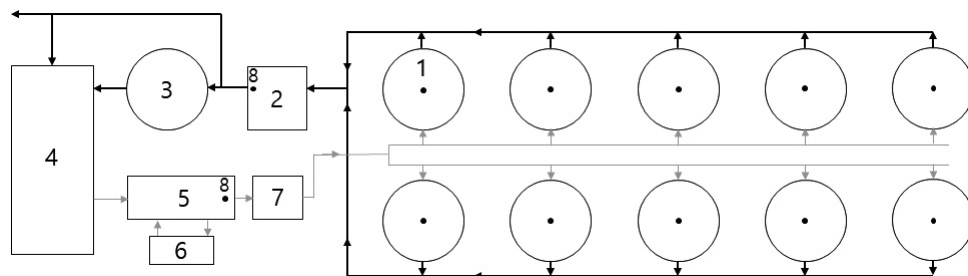


Fig 1. Rearing RAS used in the current study. 1, Circular tank (160 L); 2, Sump; 3, Sand filter; 4, Biofilter tank (1.5 ton); 5, Sump; 6, Cooler; 7, UV lamp; 8, Pump. RAS, Recirculating aquaculture system.

실험어의 평균 체중은 10.9 ± 0.3 g이었으며, 외형적으로 건강한 개체를 선별하여 사용하였다. 각 실험수조에는 치어 20마리씩을 수용하였고, 2 반복구로 하여 30일간 자연 광주기 상태에서 실험하였다.

실험사료 및 설계

실험사료는 송어용 사료(참무지개송어 2호; JeilFeed Corporation, Haman, Korea)를 사용하였고, 사료 내 영양성분은 사료 지대에 표기된 함량으로써, 조단백질 50%, 조지방 7%, 조회분 14.3%, 조섬유 2.1%, 칼슘 2.0%, 인 1.8% 및 수분 12.0%이었으며 사료의 크기는 2.0 mm이었다. 사료 공급 횟수 실험은 1일 1회(09:00), 1일 2회(09:00, 21:00), 1일 3회(09:00, 15:00, 21:00), 1일 4회(09:00, 13:00, 17:00, 21:00) 및 1일 5회(09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00)로 총 5개의 실험구를 설정하여 해당 시간에 만복으로 사료를 공급하였다.

성장도 조사

어체의 중량은 실험시작과 실험종료 시 측정하였고, 측정 전에는 24시간 절식시킨 후 ethyl 3-aminobenzoate methanesulfonate salt (50 ppm)로 마취시켜 무게를 측정하였다. 실험 종료 후 증체율(weight gain, WG), 일간성장률(specific growth rate, SGR), 일간사료섭취율(daily feed intake, DFI), FE, 단백질질 전환효율(protein efficiency ratio, PER) 및 생존율(survival rate, SR)을 측정하였다.

혈장 성분 분석

실험어에서 채취한 혈액은 4°C , 5,000 g로 5분간 원심 분리하여 혈장(plasma)을 분리하였고, 분리한 혈장으로 유기성분과 무기성분 변화를 측정하였다. 혈장 분석은 생화학분석기(Catalyst Dx Chemistry Analyzer, IDEXX, Westbrook, ME, USA)를 이용하여 유기 성분인 alanine aminotransferase (ALT) 및 total Protein (TP)와 무기성분인 Na^+ (sodium), K^+ (potassium) 및 Cl^- (chloride)를 분석하였다.

전어체 일반성분 분석

각 수조에서 5마리씩 무작위로 추출하여 분쇄한 전어체를 사용하였으며, AOAC (2000) 방법에 따라 수분은 상압가열건조법(135°C , 2시간), 조단백질은 Kjeldahl 질소정량법($\text{N} \times 6.25$), 조회분은 직접회화법으로 분석하였다. 조지방 샘플은 12시간 동결 건조한 후, Soxhlet 추출법으로 분석하였다(Soxtex system 1046; Tacator AB, Hilleroed, Sweden).

통계분석

실험 분석 결과에 대한 유의성은 통계 프로그램(SPSS Statistics ver. 20; IBM, Armonk, NY, USA)을 이용하여 ANOVA test를 실시하여 Duncan's multiple range test를 통해 $P < 0.05$ 일 때 유의성이 있는 것으로 간주하였다.

결과 및 고찰

일반적으로 양식장 관리자는 가능한 한 어류 크기를 균일하게 유지하면서 빠르게 성장시키고자 하는데, 이러한 목표를 달성하려면 사료의 정확한 양과 투여 방법에 관한 정보를 가지는 것이 필수적이다(Dwyer et al., 2002). 충분한 사료를 섭취하지 못한 어류는 체내 영양소 요구량 부족으로 조직 내 축적된 에너지를 소모하게 되어 어류의 성장, 체조성 및 SR에도 영향을 줄 수 있다(Weatherley and Gill, 1987). 사료를 너무 과다하게 공급하면 필요 이상의 에너지가 조직 내에 축적되고 과도한 지방 축적으로 인해 어류는 비만 상태가 될 수 있다(West-Eberhard, 2019). 또한, 어류 배설물과 남은 사료 찌꺼기가 사육수조에 축적되면 수질이 악화되어 어류에 독성을 유발시킬 뿐만 아니라, 면역력을 저하시켜 병원균에 대한 감수성이 증가하게 된다(Kim et al., 2010).

특히, 연어과 어류 담수 생활기의 영양상태와 에너지 저장 수준은 해수에 적응하기 위한 삼투압 조절능력에 상당한 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 영양상태가 낮은 대서양연어 smolt의 아가미에서 Na^+ , K^+ -ATPase 활성이 감소되는 것으로 보아 연어과 어류 담수생활기의 영양상태는 미네랄 균형 유지에 중요한 영향을 주는 것으로 볼 수 있다(Imstrand et al., 2010).

사료 공급 횟수는 어류의 성장과 FE에 유의한 영향을 미친다고 보고되었다(Dwyer et al., 2002; Seong and Kim, 2008). 본 연구 결과, Table 1과 같이 WG와 SGR은 1일 2회 공급구가 1일 1회 공급구보다 유의하게 높았고($P < 0.05$), 1일 3회, 1일 4회 및 1일 5회 공급구와도 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$). DFI는 사료 공급 횟수가 증가함에 따라 증가했는데, 1일 2회 공급구는 1일 1회 공급구에 비해서 유의하게 증가하였고, 1일 3회와 1일 4회 공급구는 1일 2회 공급구 보다 유의적으로 높았으나, 1일 5회 공급구보다는 유의하게 낮았다. 이러한 결과를 통해 연어(*O. keta*)는 1일 2회 이상에서는 더 이상 유의성 있는 성장이 일어나지 않음을 알 수 있었다. 동일 어종에서 수행된 선행 연구에서는 치어의 최초 무게(0.54 g), 사료 조성(조단백질 46% 이상, 조지방 4% 이상, 조섬유 7% 이상 및 조회분 16% 이하), 사육수온 ($9.8\text{--}10.1^{\circ}\text{C}$), 사육기간(6주) 및 사육시스템(유수식 환경)이 본 연구에서 사용한 조건과 상이하더라도 1일 2회 사료를 공급하는 것이 적정하다고 보고하였다(Yeo and Choe, 1998). 적정 사료 공급 횟수 이상에서는 성장도가 증가하지 않은 것은 산천어(Seong and Kim, 2008), 조피볼락(Lee et al., 2013), 무지개송어(Imtiaz, 2018) 및 쏘가리(Kim et al., 2020) 연구 결과와 일치하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 사료 공급 횟수의 증가로 인해 사료 공급 간격이 짧은 경우, 섭취한 사료가 체내 소화관을 거치는 시간이 감소되어 효율적인 소화 이루어지지 않기 때문인 것으로 보고되었다(Mizanur and Bai, 2014; Oh and Park, 2016).

FE와 PER은 1일 2회 공급구가 1일 3회 공급구 보다 유의하

게 높았고, 1일 3회 공급구는 1일 1회, 1일 4회 및 1일 5회 공급구에 비해 유의하게 높았다. 무지개송어(5.53±0.25 g)에 사료를 1일 2회와 1일 4회 반복 실험한 결과, 1일 2회 공급받은 어류의 사료전환효율과 PER이 1일 4회 공급받은 어류보다 더 높았다고 보고되었다(Lorena et al., 2011). 산천어 치어(평균 19.1 g)에서도 1일 2회 반복으로 공급받은 어류의 성장도가 가장 높았다는 보고되어(Seong and Kim, 2008), 본 연구 결과와 유사한 결과를 나타냈다. 그러나, 무지개송어(*O. mykiss*) 1년생(초기중량 400–700 g)은 1일 4회 정도 먹어야 최대 성장을 나타낼 수 있다고 보고되었고(Ruohonen et al., 1998), 대서양연어(90±2.5 g)에서는 1일 4회 공급한 그룹이 1일 2회 공급한 그룹보다 성장도가 더 우수하다는 연구 결과(Sun et al., 2014)가 있어 어종이나 성장단계에 따라 적정 사료 공급 횟수는 차이가 있는 것으로 보인다.

사료 공급횟수 차이에 따른 연어(*O. keta*) 전어체 일반성분 분석 결과는 Table 2에 나타냈다. 수분과 조단백질은 실험기간 중

안 전 실험구에서 유의한 변화를 보이지 않았다. 사료 공급 횟수가 늘어날수록 조지방 함량은 유의하게 증가하였고, 조회분 함량은 1일 1회 공급구가 다른 공급구에 비해 유의하게 높았으나, 다른 공급구들은 유의한 차이가 없었다. 사료 공급 횟수가 증가할수록 사료 내 에너지는 어류의 성장에 사용되지 않고 체내 지방으로 축적되는데(Oh and Park, 2016), 넙치 치어(평균중량 11.1±0.4 g)를 대상으로 실험한 결과 사료 공급 횟수가 증가할수록 체내 지방함량이 증가한다고 보고하였고(Lee and Pham, 2010), 조피볼락(116.2±1.0–120.3±5.3 g)의 경우 1일 0.5회에 비해 1일 1회 이상의 공급구의 조지방 함량이 유의하게 증가된 것으로 보고되어(Oh and Park, 2016) 본 연구와 동일한 결과를 나타냈다. Xie et al. (2011)에 따르면 어류 간의 먹이경쟁이 완화되고 공식 위험성이 줄어들어 이에 사용되어야 할 에너지가 체내에 축적되기 때문이라고 보고하였다.

실험 종료 시 사료 공급 횟수 차이에 따른 혈장 유기성분과 무기성분 분석은 Table 3에 나타냈다. 사료 공급 횟수는 어류의 성

Table 1. Growth performance of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* fed the commercial diet with the different feeding frequency for 30 days¹

Item	Feeding frequency (meals/day)				
	1	2	3	4	5
IW ² (g/fish)	11.22±0.02 ^a	11.22±0.04 ^a	10.80±0.00 ^a	10.78±0.25 ^a	10.57±0.18 ^a
FW ³ (g/fish)	19.96±0.17 ^a	36.23±1.39 ^b	36.21±1.05 ^b	34.21±1.70 ^b	33.91±1.10 ^b
WG ⁴ (%)	78.39±1.71 ^a	224.85±9.87 ^b	236.93±7.18 ^b	220.10±8.66 ^b	222.23±6.52 ^b
SGR ⁵ (%/day)	1.91±0.04 ^a	3.90±0.12 ^b	4.01±0.10 ^b	3.82±0.10 ^b	3.88±0.05 ^b
DFI ⁶ (%)	2.30±0.02 ^a	3.07±0.09 ^b	3.56±0.07 ^c	3.87±0.20 ^{cd}	3.95±0.19 ^d
FE ⁷ (%)	82.00±1.79 ^a	115.31±6.19 ^c	102.67±4.23 ^b	90.79±5.62 ^{ab}	89.22±5.32 ^a
PER ⁸	1.58±0.03 ^a	2.22±0.12 ^c	1.97±0.08 ^{bc}	1.75±0.11 ^{ab}	1.72±0.10 ^a
Survival ⁹	100±0.0 ^a	100±0.0 ^a	100±0.0 ^a	100±0.0 ^a	100±0.0 ^a

¹Values (mean±SD) are means from two replicated groups of fish where the values with the different superscripts within the same row are significantly different (P<0.05). ²Initial weight (g/fish). ³Final weight (g/fish). ⁴Weight gain (%)=(final body weight-initial body weight)×100/initial body weight. ⁵Specific growth rate (%/day)=(ln final weight of fish-ln initial weight of fish)×100/days of feeding trial. ⁶Daily feed intake (%)=feed intake×100/[(initial fish weight+final fish weight+dead fish weight)×days reared/2]. ⁷Feed efficiency (%)=(wet weight gain/dry feed intake)×100. ⁸Protein efficiency ratio=wet weight gain/protein intake. ⁹Survival=(Number of fish at end of experiment/Number of fish at initial of experiment)×100.

Table 2. Whole-body proximate composition (% as is) of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* fed the commercial diet with the different feeding frequencies for 30 days¹

Item	Feeding frequency (meals/day)				
	1	2	3	4	5
Moisture (%)	75.3±0.4 ^a	74.7±0.8 ^a	74.1±0.5 ^a	74.6±0.3 ^a	74.0±0.5 ^a
Crud protein (%)	17.1±0.2 ^a	16.9±0.4 ^a	16.2±0.4 ^a	16.5±1.2 ^a	16.9±0.4 ^a
Crud lipid (%)	4.09±0.18 ^a	5.07±0.23 ^b	6.50±0.13 ^d	5.64±0.17 ^c	6.01±0.17 ^{cd}
Crud ash (%)	2.67±0.08 ^b	2.45±0.08 ^a	2.49±0.05 ^{ab}	2.46±0.05 ^a	2.39±0.04 ^a

¹Values (mean±SD) are means from two replicated groups of fish where the values with the different superscripts within the same row are significantly different (P<0.05).

Table 3. Concentrations of serum alanine aminotransferase, total protein, sodium, potassium and chloride in chum salmon *Oncorhynchus keta* fed the commercial diet with the different feeding frequencies for 30 days¹

Item	Feeding frequency (meals/day)				
	1	2	3	4	5
Alanine aminotransferase (U/L)	43.3±10.4 ^a	41.0±7.1 ^a	44.0±4.6 ^a	49.0±7.9 ^a	48.3±6.4 ^a
Total protein (g/dL)	4.4±0.1 ^a	5.0±0.5 ^b	5.3±0.2 ^{bc}	5.8±0.1 ^c	5.8±0.3 ^c
Sodium (mmol/L)	171.0±2.6 ^a	170.0±1.0 ^a	172.0±1.0 ^a	172.0±1.0 ^a	170.7±1.2 ^a
Potassium (mmol/L)	2.5±0.1 ^a	2.7±0.6 ^a	2.7±0.1 ^a	2.7±0.0 ^a	2.7±0.1 ^a
Chloride (mmol/L)	127.0±1.0 ^a	126±3.0 ^a	127.0±1.0 ^a	127.7±1.5 ^a	128.0±1.7 ^a

¹Values (mean±SD) are means from two replicated groups of fish where the values with the different superscripts within the same row are significantly different (P<0.05).

장과 영양상태에 영향을 미치게 되며, 혈장의 대사물질 측정을 통해서 어류의 영양상태를 평가할 수 있다(Peres et al., 2014). TP 항목에서 1일 1회 공급구에 비해서 1일 2회, 1일 3회, 1일 4회 및 1일 5회 공급구에서 높은 유의성을 보인 반면에, 다른 유기 및 무기성분인 ALT와 Na⁺, K⁺ 및 Cl⁻은 모든 공급구에서 유의성이 나타나지 않았다. 1일 1회 공급구에서 유의하게 낮게 관찰된 TP 결과는 다른 공급 횟수에 비해 치어기 연어(*O. keta*)의 영양상태에 부정적인 영향을 미친 것을 의미하며 앞서 확인하였던 성장 및 전어체 조지방 함량이 해당 실험구에서 유의하게 낮게 나타난 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. Park et al. (2022)은 무지개송어(*O. mykiss*)의 ALT는 사료 과다 공급구에서 4주 후에 대조구에 비해 유의하게 증가하였고, TP는 4주와 8주 후에 사료 중간 공급구와 과다 공급구에서 대조구와 비교하여 증가되는 유의적인 차이를 나타냈다. 본 연구에서는 위 연구와 다르게 ALT 활성은 유의적 차이가 나타나지 않았으며, TP는 위 연구와 유사하게 1일 1회 공급구에 비해 1일 2회, 1일 3회, 1일 4회 및 1일 5회 공급구에서 유의적으로 높은 활성을 보였다. 본 연구에서 설정한 사료 공급 횟수 실험에서는 간 손상에 따른 ALT의 변화가 나타나지 않는 것으로 여겨진다. TP는 수분 평형과 영양상태를 판단하는 유용한 지표이며, 환경적 염분농도 등에 따라 민감하게 반응한다(Chang and Hur, 1999). 반복된 어류의 증가된 TP는 과도한 먹이에 의한 스트레스로 기인하여 단백질 대사, 면역 염증과 만성적 염증 장애를 일으킨다고 보고하고 있다(Mohamed et al., 2019).

사료의 공급 횟수는 어류의 영양상태에 영향을 미칠 수 있으며, 어류가 염분 스트레스에 노출되었을 때 영양상태가 삼투 조절에 영향을 미칠 수 있음이 보고되었다(Haller et al., 2015; Lee et al., 2015). 본 연구에서는 공급 횟수가 치어기 연어의 영양상태에 영향을 미친 것으로 나타났으나, 삼투조절 관련 측정 항목 중 전해질(Na⁺, K⁺ 및 Cl⁻)의 농도에는 유의한 영향을 미치지 않은 것으로 확인되었다. 그러나, 염분 스트레스에 노출되지 않은 치어기 연어(*O. keta*)에서 도출된 결과이므로 향후 염분 스트레스 노출을 통해서 공급 횟수와 삼투조절 능력 간 상관 관계가 존재하는지에 대한 연구가 추가적으로 필요하다

고 사료된다.

사료 공급 횟수 외에 어류의 성장에 영향을 미칠 수 있는 요소들은 다양하며 그 중 사육밀도는 연어과 어류를 포함하여 다양한 어종에서 연구가 수행되어져 왔다. 연어과 어류 중 대표적으로 무지개송어에서 관련 연구가 수행되어져 오고 있으며 적정 밀도에서 사육이 이루어지지 않을 경우 사회적 상호 작용과 동물복지에 부정적인 영향을 미치게 되어 최적의 성장 결과를 도출할 수 없다고 보고되어져 있다(Carbonara et al. 2020). 다만, 연어(*O. keta*)를 대상으로 수행한 적정 밀도 연구가 매우 부족하여 본 연구를 통해 도출된 성장 결과와 사육 밀도 간 상관관계를 고찰하는데 한계가 있다고 판단되며, 향후 연구를 통해서 연어의 적정 사육 밀도 설정에 관한 연구 수행이 필요할 것이다.

이상의 결과에서 담수생활기 연어(*O. keta*) 치어의 성장을 향상 위한 사료 공급 횟수는 1일 2회가 적정한 것으로 나타났으며, 향후 순환여과양식시스템에서 연어(*O. keta*) 치어 양식을 위한 사료 공급 체계 구축을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다. 다만, 사육 조건(어류의 무게, 사료 조성, 수온, 사육 기간 등)에 따라 적정 공급 횟수는 달라질 수 있으므로 본 연구에서 사용한 사육 조건에 한하여 도출된 연구 결과임을 고려하여 후속 연구가 수행되어져야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 충청북도내수면산업연구소의 연어 양식 연구과제(2022-103-0099-0287-00CF)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 2000. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 17th Edition. Cunniff P, ed. Association of Official Analytical Chemists, Inc, Arlington, VA, U.S.A.
- Carbonara P, Alfonso S, Gai F, Gasco L, Palmegiano G, Spedicato MT, Zupa W and Lembo G. 2020. Moderate stocking density does not influence the behavioural and physiological responses of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in or-

- ganic aquaculture. *Aquacult Res* 51, 3007-3016. <https://doi.org/10.1111/are.14640>.
- Cha JW, Yoon IS, Park SY, Kang SI, Lee JS, Heu MS and Kim JS. 2020. Development of fish cake using salmon *Oncorhynchus keta* frame muscle. *J Korean Fish Soc* 53, 147-155. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0147>.
- Chang YJ and Hur JW. 1999. Physiological responses of grey mullet (*Mugil cephalus*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) by rapid changes in salinity of rearing water. *J Korean Fish Soc* 32, 310-316.
- Cho SH, Lee SM, Park BH and Lee SM. 2006. Effect of feeding ratio on growth and body composition of juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus* fed extruded pellets during the summer season. *Aquaculture* 251, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.05.041>.
- Dediu L, Victor C, Mocanu M, Dicu D, Docan A and Grecu I. 2011. The effect of feeding frequency on growth performance of rainbow trout fingerlings reared in recirculating system. *Aquac Aquar Conserv Legis Bioflux* 4, 141-145.
- Dwyer KS, Brown JA, Parrish C and Lall SP. 2002. Feeding frequency affects food consumption, feeding pattern and growth of juvenile yellowtail flounder (*Limanda ferruginea*). *Aquaculture* 213, 279-292. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00224-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00224-7).
- Flecker AS, McIntyre PB, Moore JW, Anderson JT, Taylor BW and Hall JR BW. 2010. Migratory fishes as material and process subsidies in riverine ecosystems. *Am Fish Soc Symp* 73, 559-592.
- Gende SM, Quinn TP, Willson MF, Heintz R and Scott TM. 2004. Magnitude and fate of salmon-derived nutrients and energy in a coastal stream ecosystem. *J Freshw Ecol* 19, 149-160. <https://doi.org/10.1080/02705060.2004.9664522>.
- Haller LY, Hung SSO, Lee S, Fadel JG, Lee JH, McEnroe M and Fangué NA. 2015. Effect of nutritional status on the osmoregulation of green sturgeon (*Acipenser medirostris*). *Physiol Biochem Zool* 88, 22-42. <https://doi.org/10.1086/679519>.
- Hong KP, Kim PK, Jeon JK, Kim Y, Park YJ, Myong JG and Kim JM. 2004. Serum stress responses during seawater acclimation in coho salmon, *Oncorhynchus kisutch*. *Ocean Polar Res* 26, 433-438.
- Hur JW, Yoon JW and Lim HK. 2021. Monitoring the growth of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) released to Taehwa River of Korea. *J Mar Life Sci* 6, 106-116. <https://doi.org/10.23005/ksmls.2021.6.2.106>.
- Imsland AK, Våge KA, Handeland SO and Stefansson SO. 2010. Growth and osmoregulation in Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts in response to different feeding frequencies and salinities. *Aquacult Res* 42, 469-479. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02640.x>.
- Imtiaz A. 2018. Effects of feeding levels on growth performance, feed utilization, body composition, energy and protein maintenance requirement of fingerling, rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792). *Iran J Fish Sci* 17, 745-762. <https://doi.org/10.22092/ijfs.2018.119209>.
- Jang SW, Kang HS, Kang DY and Cho KS. 2022. Effect of rearing water temperature on growth and physiological response of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*). *Korean J Environ Biol* 40, 651-659. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2022.40.4.651>.
- Jonsson B and N Jonsson. 2003. Migratory Atlantic salmon as vectors for the transfer of energy and nutrients between freshwater and marine environments. *Freshw Biol* 48, 21-27. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.00964.x>.
- Kim PK, Myong JG, Kim JM, Huh HT and Kim HB. 1990. Rearing experiment of coho salmon, *Oncorhynchus kisutch* in seawater cage. *J Aquacul* 3, 127-133.
- Kim MW, Yoon IS, Kim YY, Lee JS and Heu MS. 2021. Processing optimization of seasoned salmon *Oncorhynchus keta* jerky using response surface methodology. *Korean J Fish Aquat Sci* 54, 261-270. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0261>.
- Kim SS, Song JW, Lim SJ, Jeon JB, Jeon YJ, Yeo IK and Lee KJ. 2010. Effects of dietary supplementation of fermented garlic powder on immune responses, blood components, and disease resistance against principal fish disease of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus* in low temperature season. *J Anim Sci Technol* 52, 337-346. <https://doi.org/10.5187/JAST.2010.52.4.337>.
- Kim YO, Oh SY and Lee SM. 2020. Influence of different feeding frequency on the growth and body composition of juvenile mandarin fish *Siniperca scherzeri* reared in a recirculating aquaculture system (RAS). *Korean J Fish Aquat Sci* 53, 538-543. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0538>.
- KMI (Korea Maritime Institute). 2019. Analysis of KMI Trends. Monthly Report 127, KMI, Busan, Korea, 1-14.
- Kwon ON, Kim JK, Yoon MG, Kim DH and Hong KE. 2014. Marine prey selectivity of released juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) during early marine migration in Korean waters. *J Fish Mar Sci Edu* 26, 421-429. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2014.26.2.421>.
- Lee JH, Kim KW, Lee BJ, Park GH, Lee JH, Yun HH and Bai SC. 2013. Optimum feeding rate and frequency in juvenile Korean rockfish *Sebastes schegeli* fed a commercial diet. *Kor J Fish Aquat Sic* 46, 753-760. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0753>.
- Lee SM and Pham MA. 2010. Effects of feeding frequency and feed type on the growth, feed utilization and body composition of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Aquac Res* 41, 166-171. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02491.x>.
- Lee SM, Cho SH and Kim DJ. 2000. Effects of feeding frequency and dietary energy level on growth and body composition of juvenile flounder, *Paralichthys olivaceus* (Temminck & Schlegel). *Aquaculture* 31, 917-921. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00224-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00224-7).

- org/10.1046/j.1365-2109.2000.00505.x.
- Lee S, Haller LY, Verhille C, Fadel JG, Fangué NA and Hung SSO. 2015. Effect of feed restriction on salinity tolerance in white sturgeon (*Acipenser transmontanus*). *Comp Biochem Physiol Part A Mol Integr Physiol* 188, 156-167.
- Lim HJ, Park SK, Kim MJ, Lee WK, Min WK, Min JK and Cho YJ. 2015. Quality characterization of salmon oil microencapsulated with various wall materials. *J Fish Mar Sci Edu* 27, 1334-1342. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.5.1334>.
- Mihelakakis A, Tsolkas C and Yoshimatsu T. 2002. Optimization of feeding rate of hatchery-produced juvenile gilthead seabream *Sparus aurata*. *J World Aquacult Soc* 33, 169-175. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2002.tb00491.x>.
- Mihelakakis A, Yoshimatsu T and Tsolkas C. 2001. Effects of feeding rate on growth, feed utilization and body composition of red porgy fingerlings: Preliminary results. *Aquac Int* 9, 237-245. <https://doi.org/10.1023/A:1015345224537>.
- Min HO and Song HS. 2019. Antioxidant effect of anserine extracted from salmon (*Oncorhynchus keta*). *J Food Hyg Saf* 34, 396-403. <https://doi.org/10.13103/JFHS.2019.34.4.396>.
- Miranda CD, Godoy FA and Lee MR. 2018. Current status of the use of antibiotics and the antimicrobial resistance in the Chilean salmon farms. *Front Microbiol* 18, 1284. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01284>.
- Mizanur RM and Bai SC. 2014. The optimum feeding frequency in growing Korean rockfish *Sebastes schlegelii* rearing at the temperature of 15°C and 19°C. *Asian-Australas J Anim Sci* 27, 1319-1327. <https://doi.org/10.5713/ajas.2014.14193>.
- Mohmed WA, El-Houseiny W, Ibrahim RE and Abd-Elhakim YM. 2019. Palliative effects of zinc sulfate against the immunosuppressive, hepato- and nephrotoxic impacts of nonylphenol in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture* 504, 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.02.004>.
- MOMAF (Ministry of Marine Affairs and Fisheries). 2016. Statistic Database for Fisheries Production. Retrieved from <https://www.fips.go.kr/p/S020702/> on Jan 3, 2023.
- Oh SY and Park JW. 2016. Feeding frequency influences the growth, food consumption, body composition and hematological response of the Korean rockfish *Sebastes schlegelii*. *J Kor Fish Soc* 49, 600-606. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2016.0600>.
- Paek JY and Park KI. 2016. An economic analysis of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) aquaculture farms. *J Fish Mar Sci Edu* 28, 1280-1289. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.5.1280>.
- Park I-S, Kim PK, Kim JM, Choi GC and Kim DS. 1996. Production of hybrid and allotriploid between rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and coho salmon (*O. kisutch*). *J Aquacult* 9, 133-140.
- Park JY, Roh HJ, Park JW, Jeong DH, Lee MK and Kim DH. 2022. Physiological and histological changes of overfeeding-induced obese rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Korean J Fish Aquat Sci* 55, 688-696. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0688>.
- Peres H, Santos S and Oliva-Teles A. 2014. Blood chemistry profile as indicator of nutritional status in European seabass (*Dicentrarchus labrax*). *Fish Physiol Biochem* 40, 1339-1347. <https://doi.org/10.1007/s10695-014-9928-5>.
- Ruohonen KJ, Vielman J and Grove DJ. 1998. Effects of feeding frequency on growth and food utilization of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed low-fat herring or dry pellets. *Aquaculture* 165, 111-121. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00235-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00235-X).
- Seong KB and Kim DH. 2008. Effects of feeding frequency on the optimum growth of cherry salmon, *Oncorhynchus masou*. *J Kor Fish Soc* 41, 343-345. <https://doi.org/10.5657/kfas.2008.41.5.343>.
- Suh KH, Kim BJ and Jeon IG. 2001. Design and development of integrated recirculating aquaculture system. *J Korean Fish Soc* 34, 70-76.
- Sun G, Liu Y, Qiu D, Yi M, Li X and Li Y. 2014. Effects of feeding rate and frequency on growth performance, digestion and nutrients balances of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in recirculating aquaculture systems (RAS). *Aquac Res* 47, 176-188. <https://doi.org/10.1111/are.12480>.
- Weatherley AH and Gill HS. 1987. 4. Protein, lipid and caloric contents. In: *The Biology of Fish Growth*. Academic Press, London, U.K., 139-146.
- West-Eberhard MJ. 2019. Nutrition, the visceral immune system, and the evolutionary origins of pathogenic obesity. *Proc Natl Acad Sci* 116, 723-731. <https://doi.org/10.1073/pnas.1809046116>.
- Xie F, Ai Q, Mai K and Ma H. 2011. The optimal feeding frequency of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*, Richardson) larvae. *Aquaculture* 311, 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.005>.
- Yeo IK and Choi MK. 1998. Effects of starvation and feeding frequency on growth of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta*. *J Aquac* 11, 363-369.