

순환여과양식시스템에서 감성돔(*Acanthopagrus schlegelii*) 치어의 성장에 미치는 수온의 영향

최은지 · 김유희¹ · 박정환*

국립부경대학교 수산생물학과, ¹강원도립대학교 스마트해양양식학과

Effects of Water Temperature on the Growth Performance of Juvenile Black Sea Bream *Acanthopagrus schlegelii* in a Recirculating Aquaculture System

Eunji Choi, Youhee Kim¹ and Jeonghwan Park*

Department of Fisheries Biology, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

¹Department of Smart Aquaculture, Gangwon State University, Gangneung 25425, Republic of Korea

This study aimed to identify the optimal rearing temperature for juvenile black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* in a recirculating aquaculture system (RAS). Juvenile fish were reared at 6 water temperatures (20–35°C) for eight weeks, and growth performance, feed conversion ratio (FCR), survival rate, daily feed intake, and thermal growth coefficient (TGC) were evaluated. Power consumption and associated temperature regulation costs were also analyzed. Maximum growth rate and final body weight were recorded at 29°C; however, comparable somatic growth with enhanced survivability was achieved at 26°C. TGC, a temperature-dependent index of relative growth, was highest at 23°C, indicating optimal physiological growth efficiency. In contrast, absolute growth and reduced culture duration was most favorable at 29°C. These findings highlight the complex interaction between water temperature and growth dynamics. Furthermore, energy expenditure per unit biomass gain was lowest at 26°C, indicating optimal energetic cost-efficiency. Collectively, the 26–29°C range was identified as optimal for sustaining growth performance and operational cost-efficiency. In conclusion, 26°C is recommended as the economically optimal rearing temperature for juvenile *A. schlegelii* in RAS, balancing growth stability with minimized energy input.

Keywords: Recirculating aquaculture system (RAS), Black sea bream, Water temperature, Growth performance, Energy efficiency

서론

지구온난화로 인한 해양 환경 변화가 심화됨에 따라 해수면 상승, 해양 산성화, 병하 면적 감소 등 다양한 극한 기상현상이 증가하고 있다. 산업혁명 이후 대기 중 이산화탄소 농도는 약 50% 증가하였으며, 2024년 현재 지구 평균기온은 산업화 이전 대비 약 1.5°C 상승한 것으로 보고되고 있다(IPCC, 2023). 특히 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 제6차 보고서에 따르면, 온실가스 배출이 지속될 경우 2100년까지 3.3–5.7°C의 상승이 예측되고 있다. 우리나라의 경우 1912년

대비 평균기온이 약 2.0°C 상승하였으며, 해수 수온 역시 지난 50년간 평균 약 1.2°C 상승한 것으로 보고되었다(KMA, 2022; NIFS, 2023). 이러한 수온 상승은 어종 분포 및 양식생산 구조 변화에 영향을 미치고 있으며, 일부 품종은 생산량이 감소하고 다른 품종은 증가하는 양상이 나타나고 있다. 국내 양식산업은 자연환경에 의존하는 가두리식 및 유수식 방식이 주류를 이루고 있어 수온 변동, 해양재해 및 질병에 취약한 구조를 지닌다. 이에 따라 외부 환경과의 차단성이 높은 순환여과양식시스템(recirculating aquaculture system, RAS)이 대안으로 주목받고 있다. RAS는 사육수를 반복 재이용하고, 자외선이나 오존 살

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5911 Fax: +82. 51. 629. 5908

E-mail address: parkj@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.2025.0431>

Korean J Fish Aquat Sci 58(4), 431-437, August 2025

Received 27 May 2025; Revised 23 June 2025; Accepted 4 July 2025

저자 직위: 최은지(대학원생), 김유희(겸임교수), 박정환(부교수)

균 처리를 통해 병원체 유입을 차단할 수 있으며, 수온을 일정하게 유지할 수 있어 연중 안정적인 생산이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 수온 유지를 위한 전력 소비량이 크기 때문에, 경제적인 운영을 위해서는 품종별 최적 수온 설정이 필수적이다. 어류는 변온동물로서 주변 수온에 따라 체온과 생리 대사가 직접적으로 영향을 받는다. 수온은 어류의 성장률, 사료 섭취량, 사료 효율, 면역력 등과 밀접한 관련이 있으며, 양성 기간과 생산성에 영향을 미치는 핵심 변수이다(Brett and Groves, 1979; Jobling, 1997). 이에 따라 수온에 따른 성장 반응 및 에너지 효율을 함께 고려한 품종별 적정 사육수온 설정은 고밀도 양식 및 에너지 효율화를 위한 기초 자료가 된다. 감성돔(*Acanthopagrus schlegelii*)은 염분 및 수온에 대한 적응력이 뛰어나고 고밀도 사육이 가능하여 국내 해산양식에서 중요한 품종으로 자리잡고 있다. 특히 단기간 성장성과 질병 저항성 측면에서 RAS 환경에 적합한 유망 품종으로 평가받고 있다. 하지만 RAS 환경에서 감성돔 치어의 최적 사육 수온에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 다양한 수온 조건에서 감성돔 치어의 성장성과 생존율, 에너지 소비 효율을 비교함으로써, 생산성과 경제성을 동시에 고려한 최적 수온을 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

실험어 및 사육 시스템

실험에는 평균 체중 15.5 ± 1.9 g, 평균 전장 10.0 ± 0.5 cm의 감성돔(*A. schlegelii*) 치어를 사용하였다. 모든 개체는 수온 24°C 에서 순치 시작 후, 목표 수온에 도달할 때까지 하루에 1°C 씩 조절하여 총 10일간 순치하였다. 이후 각 수온 조건에 맞춰 6개 처리구($20, 23, 26, 29, 32, 35^{\circ}\text{C}$)를 설정하고, 수조당 40마리씩 3반복으로 입식하였다.

사육은 동일한 구조의 6개 독립 RAS에서 이루어졌으며, 각 시스템은 총 수량 413 L의 유리 사각 사육수조($0.34 \times 0.6 \times 0.4$ m), 유동상 생물여과조($0.5 \times 0.48 \times 0.5$ m, 여재 80L; Taejin engineering, Gijang, Korea), 저수조, 포말분리기(직경 15 cm, 높이 55 cm), 자외선(UV) 살균기(18 W), 순환펌프(200 W, 1,800 L/h)로 구성되었다. 각 시스템의 내부 수류는 시간당 약 5회전 이상이 유지되도록 설정하였다. 실험 수온 유지에는 냉각기(160 W, CW-3000; DAEIL, Gijang, Korea) ($20, 23^{\circ}\text{C}$) 또는 히터(200 W 또는 1 kW; PERIHA, HengLan, China) ($26, 29, 32, 35^{\circ}\text{C}$)를 사용하였다. 대기온도는 실험실에서 평균 $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 유지되었다. $20, 23, 26^{\circ}\text{C}$ 처리구는 23°C 해수로, $29, 32, 35^{\circ}\text{C}$ 처리구는 29°C 해수로 환수해 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이내의 목표 수온이 유지되도록 하였다. 매일 총 수량의 10–15%를 환수하였으며, 광주기는 12시간 명주기:12시간 암주기로 고정하였다.

사료 공급

사료는 상업용 배합사료(조단백질 48%, 조지방 10%, Deluxe

N4; WOOSUNGFEED Co. Ltd., Daejeon, Korea)를 사용하였으며, 매일 3회(10:00, 14:00, 18:00) 반복 공급하였다. 사료 섭취량은 공급량을 기준으로 산출하였으며, 이에 따라 사료계수(feed conversion ratio, FCR)와 일간 사료섭취율(feed intake, FI)는 급이 기준 섭취량을 바탕으로 계산하였다.

수질 측정

수온별 실험 기간 동안 pH, 용존 산소(dissolved oxygen, DO), 염분, 총 암모니아성 질소(total ammonia nitrogen, TAN), 아질산성 질소(NO_2^- -N), 질산성 질소(NO_3^- -N), 부유 고형물(suspended solids, SS), 용존 이산화탄소(CO_2)를 측정했다. pH, DO, 염분은 매일 2번씩 측정하고 TAN, 아질산성 질소, 질산성 질소, SS, 총 유기탄소, 용존 이산화탄소는 주 1회 측정했다. pH와 DO는 다항목 수질 측정기(HQ 40D; Hach, Loveland, CO, USA)를 이용해 측정하였으며, 염분은 굴절식 염분계(ORA 2 SA; KERN, Mannheim, Germany)를 이용하여 측정하였다. TAN과 아질산성 질소는 각각 Indo-phenol 발색법과 Diazotization 발색법을 이용하고 분광광도계(UV-3300; Hmas, Daejeon, Korea)로 흡광도를 측정하였다(APHA, 2005). 질산성 질소는 분광 광도계(DR 900; Hach)를 이용하여 Cadmium 환원 발색법으로 측정하였다. SS는 해양공정시험법에 따라 분석하였다. 용존 이산화탄소는 수산화나트륨 적정법(CA-DT; Hach)으로 측정하였다.

성장 측정

실험 종료 시점(8주차)에 전 개체의 체중(g)과 전장(cm)을 측정하였으며, 이를 바탕으로 총 증중량, 일간 성장률(specific growth rate, SGR), FCR, FI, 생존율을 산출하였다. 비만도(condition factor, CF)는 Froese (2006), 수온 의존 성장계수(thermal growth coefficient, TGC)는 Jobling (2003)에 제시된 공식을 기준으로 계산하였다. 각 개체의 체중, 전장, CF를 활용하여 분산계수(coefficient of variation, CV)를 산출하였다.

일간 성장률(%/day)=

$$[(\ln \text{최종중량} - \ln \text{초기중량}) / \text{사육일수}] \times 100 \quad \dots \text{식 (1)}$$

$$\text{사료계수} = \text{총 급이량} / \text{총 증중량} \quad \dots \text{식 (2)}$$

일간사료섭취율(%/day)=

$$\text{총 급이량} / (\text{평균체중} \times \text{사육일수} \times \text{개체수}) \times 100 \quad \dots \text{식 (3)}$$

$$\text{비만도} = (100 \times \text{개체중량}) / \text{전장}^3 \quad \dots \text{식 (4)}$$

$$\text{분산계수(CV, \%)} = (\text{표준편차} / \text{평균}) \times 100 \quad \dots \text{식 (5)}$$

수온 의존 성장계수(TGC)=

$$[(\text{최종중량}^{1/3} - \text{초기중량}^{1/3}) / (\text{수온} \times \text{사육일수})] \times 1000 \quad \dots \text{식 (6)}$$

수온 유지에 따른 전력량 분석

사육 수온 유지를 위한 전력 소비량 측정은 소비전력측정기 (SJPM-C16; Seojun Electric, Seoul, Korea)를 각 냉각기 및 히터에 연결하여 실시하였다. 20°C와 23°C 실험구에는 냉각기를, 26, 29, 32, 35°C 실험구에는 히터를 각각 연결하여 매일 소비 전력량(kWh/day)을 기록하였으며, 이를 바탕으로 8주간 총 소비 전력량과 비용을 산출하였다. 전기요금은 농업용 전력 기준 단가를 적용하여 계산하였다.

35°C 실험구는 실험 4주차에 전 개체가 폐사하였기 때문에, 해당 처리구의 총 소비 전력량과 비용은 4주간의 실제 측정값을 기준으로 8주 환산하여 추정하였다. 또한, 실험 종료 후 각 처리구의 총 증중량(g)을 기준으로 1 kg 생체량 증가당 소비된 전력량(kWh/kg biomass)과 비용(won/kg biomass)을 계산하였다.

통계 분석

통계 처리는 SPSS 25.0을 사용하였고, One-way ANOVA 후 Levene 검정으로 등분산성을 확인하였다. 등분산성이 확보된 경우 Duncan's 다중범위검정을, 그렇지 않은 경우 Games-Howell 검정을 수행하여 유의성($P<0.05$)을 검증하였다.

결 과

수질 환경

실험 기간 동안 각 수온 처리구의 실제 수온은 설정값과 유사하게 유지되었으며(Table 1), 평균 수온은 각각 $20.1\pm0.1^{\circ}\text{C}$, $23.2\pm0.1^{\circ}\text{C}$, $26.2\pm0.4^{\circ}\text{C}$, $29.0\pm0.3^{\circ}\text{C}$, $32.0\pm0.4^{\circ}\text{C}$, $34.9\pm0.4^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다. 모든 처리구에서 수온 편차는 $\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지되었다.

염분은 30.5–31.9 ppt 범위로 유지되었으며, pH는 7.56–7.82 범위에서 처리구 간 유의적인 차이를 보였다($P<0.05$). DO는 7.25–8.38 mg/L 수준으로, 일부 고수온 처리구(32°C, 35°C)에

서 유의하게 낮은 값을 나타냈다($P<0.05$).

질소계 질소는 TAN 0.64 mg/L 이하, 아질산성 질소($\text{NO}_2^{-}\text{-N}$) 0.35 mg/L 이하, 질산성 질소($\text{NO}_3^{-}\text{-N}$)는 평균 38.8 mg/L 이하 수준에서 관리되었으며, 처리구 간 유의한 차이를 나타냈다($P<0.05$). SS는 전 구간에서 0.05 mg/L 이하로 낮게 유지되었으며, 용존 이산화탄소(CO_2)는 평균 57.5 mg/L 이하로 측정되었으나, 처리구 간 유의한 차이는 없었다($P>0.05$).

생존율 및 성장

8주간의 사육 실험 결과, 생존율은 20°C 및 23°C에서 각각 100%로 유지되었으며, 26°C와 29°C에서는 각각 $98.3\pm2.9\%$, $94.2\pm5.8\%$ 로 소폭 감소하였다. 반면, 32°C에서는 생존율이 $77.5\pm9.0\%$ 로 급격히 저하되었고, 35°C에서는 전 개체가 폐사하였다(Fig. 1). 이는 수온 상승에 따라 생존율이 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타낸 것으로, 32°C 이상의 고수온 환경은 감성돔 치어의 생존에 치명적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

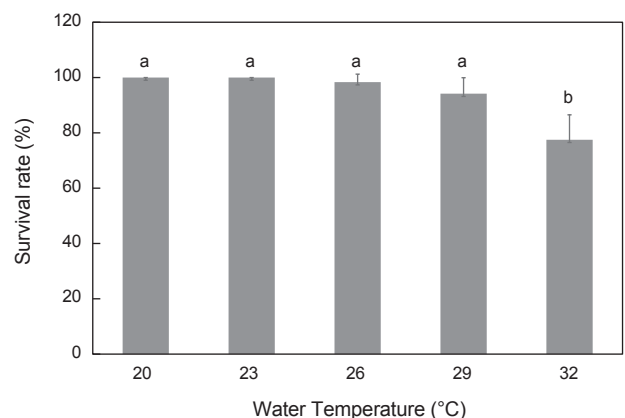


Fig. 1. Survival rate (mean $\pm$ SD) of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* reared in recirculating aquaculture system with different water temperatures after 8 weeks ($P=0.000$).

Table 1. Water quality (mean $\pm$ SD) changes in experimental recirculating aquaculture systems for black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* at six different water temperatures during 8 weeks

Parameter	Target temperature (°C)						P value
	20	23	26	29	32	35	
Water temperature (°C)	20.1 $\pm$ 0.1 ^f	23.2 $\pm$ 0.1 ^e	26.2 $\pm$ 0.4 ^d	29.0 $\pm$ 0.3 ^c	32.0 $\pm$ 0.4 ^b	34.9 $\pm$ 0.4 ^a	0.000
Salinity (ppt)	30.7 $\pm$ 1.4 ^b	30.5 $\pm$ 1.4 ^b	30.6 $\pm$ 1.5 ^b	30.7 $\pm$ 1.7 ^b	31.2 $\pm$ 1.7 ^{ab}	31.9 $\pm$ 2.0 ^a	0.000
pH	7.68 $\pm$ 0.01 ^b	7.61 $\pm$ 0.01 ^c	7.60 $\pm$ 0.03 ^c	7.64 $\pm$ 0.02 ^{bc}	7.56 $\pm$ 0.03 ^d	7.82 $\pm$ 0.01 ^a	0.000
Dissolved oxygen (mg/L)	8.38 $\pm$ 0.04 ^a	7.76 $\pm$ 0.09 ^b	7.37 $\pm$ 0.21 ^c	7.85 $\pm$ 0.38 ^b	7.25 $\pm$ 0.26 ^c	8.00 $\pm$ 0.27 ^b	0.000
TAN (mg/L)	0.35 $\pm$ 0.15 ^c	0.58 $\pm$ 0.44 ^a	0.64 $\pm$ 0.29 ^a	0.50 $\pm$ 0.22 ^{ab}	0.43 $\pm$ 0.17 ^{bc}	0.21 $\pm$ 0.09 ^d	0.000
NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	0.09 $\pm$ 0.01 ^c	0.17 $\pm$ 0.03 ^b	0.25 $\pm$ 0.00 ^{ab}	0.32 $\pm$ 0.01 ^a	0.35 $\pm$ 0.04 ^a	0.15 $\pm$ 0.00 ^{bc}	0.000
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	28.7 $\pm$ 10.6 ^{ab}	31.5 $\pm$ 14.7 ^{ab}	33.8 $\pm$ 16.5 ^{ab}	38.9 $\pm$ 13.4 ^a	38.5 $\pm$ 13.7 ^a	23.0 $\pm$ 5.9 ^b	0.004
SS (mg/L)	0.04 $\pm$ 0.01 ^c	0.04 $\pm$ 0.01 ^{bc}	0.04 $\pm$ 0.01 ^{bc}	0.05 $\pm$ 0.01 ^{abc}	0.05 $\pm$ 0.01 ^{ab}	0.05 $\pm$ 0.01 ^a	0.008
CO ₂ (mg/L)	57.5 $\pm$ 12.8	52.5 $\pm$ 11.6	46.3 $\pm$ 9.2	55.0 $\pm$ 14.1	56.3 $\pm$ 13.0	47.5 $\pm$ 22.2	0.515

최종 총 중량 및 증중량은 26°C와 29°C에서 각각 $2,516 \pm 13$ g 및 $2,675 \pm 131$ g, $1,887 \pm 18$ g 및 $2,038 \pm 138$ g으로 가장 높은 성장 성과를 나타냈으며, 20°C 및 32°C에서는 상대적으로 낮은 수준을 보였다. 특히 23–29°C 구간의 처리구는 통계적으로 유의하게 우수한 성장 결과를 나타내었다. 35°C 처리구는 실험 4주 이내에 전 폐사가 발생하여 생존율 및 성장 관련 데이터 확보가 불가능하였기 때문에, Table 2에서는 해당 수온의 데이터가 제외되었다(Table 2).

총 사료섭취량은 29°C ($2,860 \pm 84$ g)에서 가장 높았으며, 26°C ($2,624 \pm 41$ g)와도 유사한 수준을 보였다. 반면 32°C에서는 사료섭취량이 감소하는 경향을 보여 고수온 조건에서 섭식 저하 현상이 일부 관찰되었다. 일일 FI는 수온 증가에 따라 유의하게 증가하는 경향을 보였으며($P < 0.05$), 32°C에서 $3.81 \pm 0.32\%/day$ 로 가장 높게 나타났다. 다만 32°C 처리구는 실험 후반 폐사율이 높아 생존 개체 수가 급감하였고, 이에 따라 1마리당 상대적 섭취량이 증가하는 보정 효과가 반영되었을 가능성이 있다. 35°C 처리구는 실험 4주 이내에 전 개체가 폐사하여 일일 FI를 산출할 수 없었으며, 고수온 환경에서의 섭취 지속성 및 생존 한계가 명확히 나타난 사례로 해석된다. 23–29°C 구간에서는 평균 FI가 $2.81\text{--}3.36\%/day$ 범위로 유지되었으며, 비

교적 안정적인 섭취 특성이 관찰되었다.

FCR은 26°C (1.41 ± 0.07) 및 29°C (1.48 ± 0.12) 처리구에서 가장 우수하게 나타났으며, 32°C 처리구에서는 2.17 ± 0.31 로 유의하게 악화되어 고수온 환경이 사료 이용 효율에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다(Table 2).

개체 성장

개별 중량, 전장, SGR, CF, CV에 대한 결과는 Table 3에 제시하였다. 최종 개별 중량은 29°C 처리구에서 65.5 ± 3.3 g으로 가장 높았으며, 26°C (62.8 ± 1.8 g) 및 32°C (62.3 ± 1.7 g) 처리구와 유사한 수준을 보였다. SGR 역시 29°C에서 가장 높았으나, 통계적으로는 26°C 및 32°C 처리구와 유의한 차이는 나타나지 않았다($P > 0.05$). 이는 수온 증가에 따라 성장률이 일정 구간까지 증가하였으나, 32°C에서는 생리적 부담 또는 폐사로 인해 최종 체중에는 영향을 주지 않은 것으로 해석된다.

CF는 20°C (2.15 ± 0.05)와 32°C (2.13 ± 0.01) 처리구에서 유의하게 높은 값을 나타냈다($p < 0.05$). CF는 체장에 비해 체중이 높은 정도를 나타내는 지표로, 값이 높을수록 통통한 체형을 의미한다. 20°C에서는 성장 속도가 낮아 체장에 비해 체중이 축적되었을 가능성이 있으며, 32°C에서는 대사 불균형에 따라 체중

Table 2. Growth performance (mean $\pm$ SD) of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* in recirculating aquaculture systems with different water temperatures after 8 weeks

Parameter	Target temperature (°C)					P value
	20	23	26	29	32	
Initial biomass (g)	623 $\pm$ 23 ^a	693 $\pm$ 3 ^a	630 $\pm$ 17 ^a	637 $\pm$ 25 ^a	599 $\pm$ 5 ^a	0.171
Final biomass (g)	1,711 $\pm$ 58 ^c	2,419 $\pm$ 82 ^a	2,516 $\pm$ 13 ^a	2,675 $\pm$ 131 ^a	2,077 $\pm$ 277 ^b	0.000
Weight gain (g)	1,089 $\pm$ 39 ^c	1,780 $\pm$ 82 ^a	1,887 $\pm$ 18 ^a	2,038 $\pm$ 138 ^a	1,478 $\pm$ 279 ^b	0.000
Feed consumption (g)	1,501 $\pm$ 70 ^c	2,345 $\pm$ 17 ^b	2,624 $\pm$ 41 ^a	2,860 $\pm$ 84 ^a	2,568 $\pm$ 152 ^{ab}	0.000
Feed intake (%/day)	2.24 $\pm$ 0.08 ^c	2.81 $\pm$ 0.08 ^b	3.04 $\pm$ 0.20 ^{ab}	3.36 $\pm$ 0.20 ^a	3.81 $\pm$ 0.32 ^a	0.000
Feed conversion ratio	1.38 $\pm$ 0.02 ^b	1.32 $\pm$ 0.06 ^b	1.41 $\pm$ 0.07 ^b	1.48 $\pm$ 0.12 ^b	2.17 $\pm$ 0.31 ^a	0.007

Table 3. Individual growth (mean $\pm$ SD) performance of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* in recirculating aquaculture system with different water temperatures after 8 weeks

Parameter	Target temperature (°C)					P value
	20	23	26	29	32	
Initial individual weight (g)	15.9 $\pm$ 1.8 ^a	15.3 $\pm$ 2.1 ^a	15.7 $\pm$ 2.3 ^a	15.4 $\pm$ 1.7 ^a	15.8 $\pm$ 1.9 ^a	0.639
Initial individual length (cm)	10.2 $\pm$ 0.4 ^{ab}	9.9 $\pm$ 0.5 ^{bc}	9.8 $\pm$ 0.6 ^c	10.1 $\pm$ 0.4 ^{abc}	10.2 $\pm$ 0.5 ^a	0.014
Final individual weight (g)	43.8 $\pm$ 1.0 ^c	59.3 $\pm$ 1.8 ^b	62.8 $\pm$ 1.8 ^{ab}	65.5 $\pm$ 3.3 ^a	62.3 $\pm$ 1.7 ^{ab}	0.000
Final individual length (cm)	12.7 $\pm$ 0.1 ^c	14.5 $\pm$ 0.1 ^{ab}	14.7 $\pm$ 0.1 ^a	14.8 $\pm$ 0.3 ^a	14.1 $\pm$ 0.2 ^b	0.000
Specific growth rate (%/day)	2.41 $\pm$ 0.14 ^c	3.23 $\pm$ 0.04 ^b	3.31 $\pm$ 0.09 ^{ab}	3.44 $\pm$ 0.16 ^a	3.27 $\pm$ 0.05 ^{ab}	0.000
Condition factor	2.15 $\pm$ 0.05 ^a	1.94 $\pm$ 0.03 ^b	1.94 $\pm$ 0.05 ^b	1.99 $\pm$ 0.04 ^b	2.13 $\pm$ 0.01 ^a	0.000
CV-body weight (%)	17.9 $\pm$ 3.1 ^b	21.6 $\pm$ 4.5 ^b	27.2 $\pm$ 7.7 ^{ab}	25.0 $\pm$ 4.0 ^b	34.6 $\pm$ 4.4 ^a	0.021
CV-body length (%)	8.08 $\pm$ 1.28 ^{ab}	6.25 $\pm$ 0.89 ^b	8.54 $\pm$ 1.73 ^{ab}	8.18 $\pm$ 0.88 ^{ab}	10.39 $\pm$ 1.45 ^a	0.039
CV-condition factor (%)	13.98 $\pm$ 3.86	13.47 $\pm$ 2.25	17.10 $\pm$ 3.44	13.17 $\pm$ 3.19	13.42 $\pm$ 1.80	0.505

분포가 불균형하게 나타났을 가능성이 있다.

개별 중량의 CV는 26°C (27.2±7.7%)와 32°C (34.6±4.4%)에서 유의하게 높게 나타나, 해당 수온에서 개체 간 성장 편차가 크게 발생하였음을 보여준다. 이는 개체 간 섭취력, 스트레스 민감도 등 생리적 반응 차이가 수온 변화에 따라 더욱 두드러졌을 가능성을 의미한다. CF에 대한 CV는 처리구 간 유의한 차이를 나타내지 않았다.

수온 의존 성장계수(TGC) 및 성장 예측

사육 실험 결과를 바탕으로 식 (6)을 이용하여 각 수온 처리구의 TGC를 산출한 결과, 20, 23, 26, 29, 32, 35°C에서 각각 0.90 ± 0.05 , 1.09 ± 0.02 , 1.01 ± 0.03 , 0.95 ± 0.05 , 0.81 ± 0.01 , 0.25 ± 0.04 의 값을 나타냈다(Fig. 2).

TGC는 23°C에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 이는 단위 수온과 사육일수 대비 상대적인 체중 증가 효율이 가장 우수했음을 의미한다. 반면, 최종 개체 중량과 총 증중량은 29°C 처리구에서 가장 높게 나타났는데, 이는 절대적인 성장량이 반드시 TGC 값과 비례하지 않음을 보여준다. TGC는 수온이 높아질수록 계산식의 분모가 커지기 때문에, 빠른 성장에도 불구하고 낮은 수치가 도출될 수 있다. 따라서 TGC는 온도에 따른 생리적 성장 효율을 평가하는 상대 지표로 해석되어야 하며, 절대 성장량과는 구분되어야 한다. 32°C 및 35°C 처리구에서는 TGC가 유의하게 낮았으며($P < 0.05$), 특히 35°C는 실험 4주 내 전 개체 폐사로 인해 제한된 생존 기간의 데이터를 기반으로 한 추정값으로, 결과 해석에 주의가 필요하다.

수온(X , °C)과 TGC(Y) 간의 관계는 2차 다항 회귀모형으로 설명되었으며, 결정계수(R^2)는 0.5456으로, 비교적 낮은 적합도를 나타냈다. 회귀식은 다음과 같다(Fig. 2).

$$Y = -0.0071X^2 + 0.3543X - 3.349 \quad (R^2 = 0.5456)$$

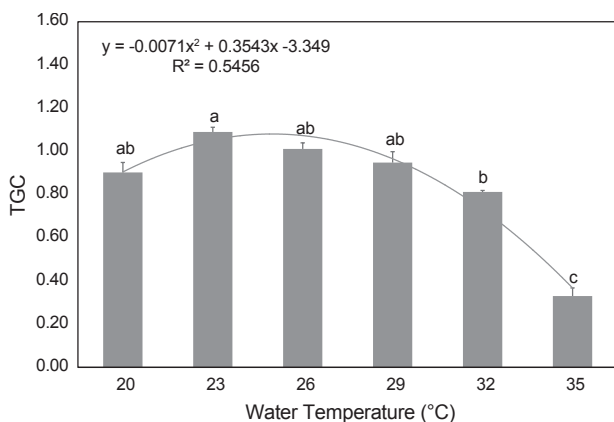


Fig. 2. Thermal unit growth coefficient (TGC) (mean±SD) of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* in recirculating aquaculture system with different water temperatures after 8 weeks ($P=0.000$).

TGC 식(식 6)을 재정렬하면, 목표 최종 체중에 도달하기까지의 사육 기간을 계산할 수 있는 식 7을 유도할 수 있다.

$$t = 1000 \times (W_f^{1/3} - W_i^{1/3}) / TGC \times T \quad \text{식 (7)}$$

이 식에 따르면, 사육일수는 TGC와 수온의 곱에 반비례하며, 초기 및 목표 체중이 주어졌을 때 수온 조건에 따른 예상 사육 기간을 산출할 수 있다. Fig. 3은 각 수온에서 감성돔 치어가 체중 1 kg에 도달하기까지 필요한 사육 기간을 29°C 기준 상대값으로 나타낸 것이다. 계산 결과, 29°C는 상대값 1.00으로 가장 짧은 사육 기간을 보였으며, 23°C (1.10), 26°C (1.05), 32°C (1.06)는 유사한 수준이었다. 반면, 20°C는 1.53으로 상대적으로 긴 사육 기간이 요구되었으며, 35°C는 3.15로 가장 비효율적인 수온 조건으로 예측되었다. 다만, 35°C의 경우 실험 4주 이내 전 개체 폐사로 인해 수집된 제한된 데이터를 기반으로 추정된 값이므로, 해당 수온에서의 사육일수 예측에는 해석상의 주의가 필요하다.

이러한 결과는 TGC가 높아도 수온이 낮으면 실제 사육일수는 오히려 길어질 수 있음을 의미하며, TGC와 수온의 조합이 사육 효율성에 미치는 복합적인 영향을 보여준다.

수온 유지 전력량

각 실험구별 수온 유지를 위한 총 전력 소비량과, 1 kg 생체량(biomass)을 증량시키는 데 소요된 전력량은 Table 4에 제시하였다. 전력 소비량은 냉각기 및 히터에 연결된 소비전력 측정기를 통해 매일 기록하였으며, 증중량은 생존 개체 기준 총 증량 증가분을 바탕으로 산출하였다. 35°C 처리구의 값은 실험 4주 이내 전 개체 폐사로 인해 제한된 기간의 데이터를 기반으로 추정된 수치이며, 결과 해석 시 주의가 필요하다.

총 전력 소비량은 23°C (2.35 ± 0.02 kWh)와 26°C (2.62 ± 0.04

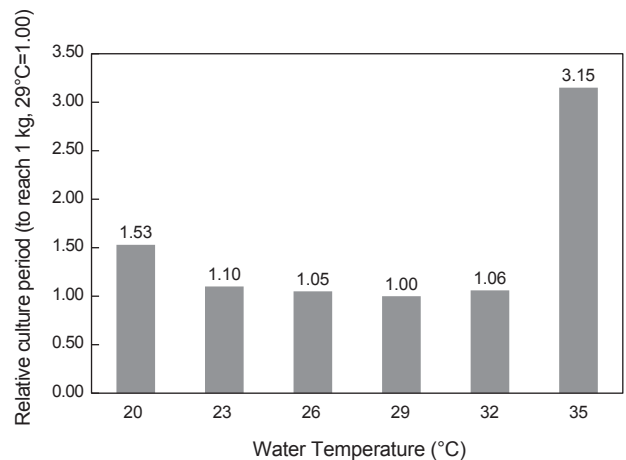


Fig. 3. Relative culture duration (29°C=1.00) required to achieve 1 kg biomass gain per fish under different water temperatures.

Table 4. Power and cost used for water temperature maintenance (mean±SD) of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* in recirculating aquaculture system

Parameter	Target temperature (°C)						P value
	20	23	26	29	32	35 (4weeks)	
Total power consumption during 8 weeks (kwh)	248±47 ^d	106±56 ^e	96±81 ^e	412±114 ^c	598±174 ^b	454±58 ^a	0.000
Power consumption to gain 1kg (kwh/kg biomass)	228	60	51	202	405	2,967	-

kWh)에서 가장 낮았으며, 이후 20°C, 29°C, 32°C, 35°C 순으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 8주간의 어류 증중량과 해당 기간 동안 수온 유지에 소비된 전력량을 바탕으로, 1 kg 생체량 증량당 소요된 전력량을 산출한 결과, 26°C에서 가장 낮은 1.39±0.03 kWh/kg을 보였고, 그 뒤로 23°C, 29°C, 20°C, 32°C, 35°C 순으로 증가하였다. 특히, 35°C는 낮은 증중량 대비 높은 전력 소비량으로 인해 kWh/kg 값이 가장 높게 나타났다.

고 찰

본 연구는 RAS 내에서 수온이 감성돔(*A. schlegelii*) 치어의 생존, 성장, 에너지 소비에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 실험 결과, 수온을 제외한 대부분의 수질 인자는 처리구 간 유의한 차이를 보였으나, 감성돔의 생존 및 성장에 영향을 미치지 않을 만큼 낮은 농도로 유지되었다. TAN, 아질산성 질소(NO_2^- -N), 질산성 질소(NO_3^- -N), SS, 용존 이산화탄소(CO_2) 등은 문헌상 보고된 LC_{50} 또는 NOEC 대비 1–5% 이내로 유지되었으며(Ruyet et al., 1995; Kikkawa et al., 2003; Weirich and Riche, 2006; Yoon and Park, 2011; Li and Shen, 2012; Park et al., 2013; Seo et al., 2019), 수온 외 수질 요소는 실험 결과에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

생존율은 20–29°C 구간에서 높게 유지되었으나, 32°C 이상에서는 유의하게 저하되었고, 35°C에서는 전 개체가 폐사하였다. 특히 32°C 처리구에서는 개체 간 중량 편차를 나타내는 CV가 가장 높게 나타났으며, 이는 고수온 조건에서 개체 간 성장 반응의 이질성이 심화되었음을 의미한다. 32°C에서는 일간 FI와 FCR이 높았음에도 불구하고 증중량은 감소하였는데, 이는 섭취한 에너지가 성장보다는 대사 활성화에 소모되었기 때문으로 해석된다. 이러한 결과는 고수온이 감성돔 치어의 생리적 부담을 가중시켜 성장 효율을 저해하고 생존율을 감소시킨다는 점을 시사한다.

TGC는 23°C에서 가장 높은 값을 나타냈으나, 최종 중량과 총 증중량은 29°C 처리구에서 가장 높았다. 이는 TGC가 절대 성장량을 직접적으로 나타내는 지표가 아니라, 수온과 사육일수를 고려한 상대적인 성장 효율을 평가하는 지표임을 보여준다. 실제로 동일한 체중 증가량이라 하더라도, 수온이 낮은 경우 TGC 값은 더 크게 나타날 수 있다. 반면, 높은 수온에서는 빠른 성장에도 불구하고 계산식의 분모에 해당하는 수온 값이 크기 때문에 TGC는 상대적으로 낮아질 수 있다.

TGC 식을 역산한 사육일수 예측 결과에서도 이와 같은 경향이 확인되었다. 29°C 처리구는 TGC가 23°C보다 낮았음에도 불구하고, 목표 체중 도달까지의 사육 기간은 오히려 더 짧게 나타났다. 이는 고수온에서의 절대 성장속도가 빠름을 반영한다. 이러한 결과는 TGC 수치와 실제 사육일수 간에는 비선형적인 관계가 존재함을 시사하며, 양식 현장에서는 TGC 값 뿐만 아니라 수온 자체의 생리적 효과도 함께 고려해야 함을 의미한다. 한편, 35°C 처리구의 TGC는 실험 4주 이내 전 개체가 폐사하기 전까지의 제한된 데이터를 기반으로 산출된 추정값이며, 전 기간의 정상 성장 데이터를 반영하지 못하므로 해석에 주의가 필요하다.

사육 효율을 29°C 기준 상대 사육일수로 비교한 결과, 23–32°C 처리구는 1.05–1.10 수준으로 유사한 반면, 20°C (1.53)와 35°C (3.15)는 상대적으로 비효율적인 수온 조건으로 나타났다. 특히 29°C는 최종 체중, 사육일수, 일간 FI, FCR 측면에서 전반적으로 가장 우수한 성장 성과를 보였다.

한편, 경제성 측면에서는 26°C에서 전력 소비량이 가장 낮았으며, 1 kg 생체량 생산에 소요된 수온 유지 에너지도 가장 적었다. 이는 26°C가 생산성과 에너지 효율을 모두 고려한 경제적인 수온 조건임을 시사한다. 다만, 본 실험에 사용된 냉각기(CW-3000; Hailea)와 히터(Eheim Jager 및 1 kW)는 작동 원리가 서로 달라 전력 소비 비교에 영향을 미쳤을 수 있다. 냉각기는 열 흡수식 구조로 팬과 열교환기를 이용해 열을 제거하며, 히터는 전기 에너지를 열로 직접 전환하여 이론상 효율이 높다. 그러나 본 연구에서는 모든 처리구의 수온을 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내로 유지하였고, 소비전력측정기를 통해 실제 사용량을 계측하여 비교하였기 때문에 장비 간 구조적 차이는 전력값에 반영되어 있다고 판단된다. 그럼에도 불구하고 해당 결과는 본 실험 조건에서의 상대적 비교에 기반한 것이며, 장비 구성이 다른 시스템에 일반화할 경우에는 주의가 필요하다.

또한 고수온 처리구에서는 폐사율 증가로 인해 사육 밀도가 변동하였고, 이는 일부 성장 지표에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 일반적으로 과밀 사육은 어류의 성장과 생존에 부정적인 영향을 미칠 수 있으나, 본 연구에서의 최종 밀도는 Celio (2019)의 기준인 58 kg/m³를 초과하지 않아 밀도 요인의 영향은 제한적이었던 것으로 판단된다(Table 5).

이상의 결과를 종합하면, 감성돔 치어의 적정 사육 수온은 26–29°C 범위로 판단되며, 29°C는 최적 성장 성과를, 26°C는 높은 에너지 효율을 바탕으로 경제적 운영 가능성을 제시한다.

Table 5. Stocking densities of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* exposed to different water temperatures after 8 weeks

Stocking density (kg/m ³)	Target temperature (°C)					
	20	23	26	29	32	35
Initial	8.9	9.9	9	9.1	8.6	8.9
8 weeks	24.4	34.6	35.9	38.2	29.7	-

본 연구는 RAS 내에서 생산성과 경제성을 동시에 고려한 수온 관리 전략 수립에 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2024학년도 부경대학교 연구년 교원 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- APHA (American Public Health Association). 2005. Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater, 21st ed. American Public Health Association, Washington D.C., U.S.A.
- Brett JR and Groves TDD. 1979. Physiological energetics. Fish Physiol 8, 279-352. [https://doi.org/10.1016/s1546-5098\(08\)60029-1](https://doi.org/10.1016/s1546-5098(08)60029-1).
- Celio AM. 2019. Effect of stock density on growth performance of juvenile black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*) in recirculating aquaculture system. M.S. Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Froese R. 2006. Cube law, condition factor and weight-length relationships: History, meta-analysis and recommendations. J Appl Ichthyol 22, 241-253. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, Lee H and Romero J, eds.). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr> on Apr 13, 2025.
- Jobling M. 1997. Temperature and growth: Modulation of growth rate via temperature change. In: Global Warming: Implications for Freshwater and Marine Fish. Wood CM and McDonald DG, eds. Society for Experimental Biology Seminar Series, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 225-254. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511983375.010>.
- Jobling M. 2003. The thermal growth coefficient (TGC) model of fish growth: A cautionary note. Aquac Res 34, 601-604. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2003.00859.x>.
- Kikkawa T, Ishimatsu A and Kita J. 2003. Acute CO₂ tolerance during the early developmental stages of four marine teleosts. Environ Toxicol 18, 375-382. <http://dx.doi.org/10.1002/tox.10139>.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2022. Korea Climate Change Assessment Report 2020. KMA, Seoul, Korea.
- Li Y and Shen A. 2012. Gill damage and recovery in juvenile black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* stressed by uncontaminated suspended solids. Adv Mater Res 518-523, 5047-5054. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.5047>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2023. Annual Report on Sea Temperature Change in Korean Waters 2023. NIFS, Busan, Korea.
- Park JH, Daniels HV and Cho SH. 2013. Nitrite toxicity and met hemoglobin changes in southern flounder, *Paralichthys lethostigma*, in brackish water. J World Aquac Soc 44, 726-734. <https://doi.org/10.1111/jwas.12064>.
- Ruyet JP, Chartois H and Quemener L. 1995. Comparative acute ammonia toxicity in marine fish and plasma ammonia response. Aquaculture 136, 181-194. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01026-2](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01026-2).
- Sammouth S, d'Orbcastel ER, Gaset E, Lemarie G, Breuil G, Marino G, Coeurdacier J, Fivelstad S and Blancheton JP. 2009. The effect of density on sea bass (*Dicentrarchus labrax*) performance in a tank-based recirculating system. Aquac Eng 40, 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.11.004>.
- Seo S, Choi EJ and Park JH. 2019. Acute nitrate nitrogen toxicity in juvenile blackhead seabream *Acanthopagrus schlegelii*. Korean J Fish Aquat Sci 52, 268-273. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0268>.
- Weirich CR and Riche MA. 2006. Tolerance of juvenile black sea bass *Centropomus striatus* to acute ammonia and nitrite exposure at various salinities. Fish Sci 72, 915-921. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2006.01238.x>.
- Yoon SJ and Park GS. 2011. Ecotoxicological effects of the increased suspended solids on marine benthic organisms. J Environ Sci 20, 1383-1394. <https://doi.org/10.5322/JES.2011.20.11.1383>.