

감성돔(*Acanthopagrus schlegelii*) 산소 소비율에 미치는 수온과 염분의 영향

송미해 · 이근수 · 강필준 · 박혜미 · 오승용*

한국해양과학기술원 해양생명자원연구부

Water Temperature and Salinity Affect Oxygen Consumption in the Black Sea Bream *Acanthopagrus schlegelii*

Song Mihae, Geun Su Lee, Pil Jun Kang, Hye Mi Park and Sung-Yong Oh*

Marine Biotechnology & Bioresource Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Busan 49111, Republic of Korea

The influence of water temperature (15, 20, and 25°C) and salinity (0, 15, and 30 psu) on the oxygen consumption rate (OCR) of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* (mean body weight = 203.1 g) was determined using a closed flow-through respirometer. The OCR was significantly affected by water temperature ($P < 0.001$), salinity ($P < 0.001$), and their interaction ($P < 0.05$). With increasing water temperature (15–25°C), OCR exhibited a linearly increasing relationship expressed as $OCR = -124.6890 + 13.1903T$ ($r^2 = 0.92$, $P < 0.0001$), $OCR = -85.8624 + 12.2555T$ ($r^2 = 0.79$, $P < 0.001$), and $OCR = -150.6132 + 20.3146T$ ($r^2 = 0.79$, $P < 0.001$) at 0, 15, and 30 psu, respectively. The OCR values significantly decreased with decreasing salinity at all experimental water temperatures. The range of Q_{10} values was 2.87–4.78, 1.32–2.15, and 2.48–2.89 between 15 and 20°C, 20 and 25°C, and 15 and 25°C, respectively. Metabolic energy expenditure was higher in response to increased water temperature (increase of 148.2–189.0%) increase than in response to increased salinity (increase of 70.5–98.7%). These results contribute to a quantitative understanding of the effects of water temperature and salinity on the metabolic costs to black sea bream and provide basic data for the bioenergetic analysis of adaptation to environmental changes under our experimental conditions.

Keywords: Metabolic cost, Thermal change, Low salinity, Euryhaline, Teleost

서론

양식 활동이 주로 이루어지며 높은 생산성을 보이는 연안 지역 해수의 수온과 염분은 양식 어류 및 서식 생물의 체내 에너지 밸런스에 영향을 미치는 중요한 인자로 간주된다(Turker, 2011). 수온은 어류의 신진대사 기능을 조절하며 대부분의 생화학 반응과 생리적 과정에 영향을 미치는 대사 조절인자로서 (Islam et al., 2021), 양식 어류의 번식, 성장 및 생존에 직접적인 영향을 미친다. 하지만 우리나라 여름철 연안지역에 빈번하게 발생하고 있는 고수온 현상은 양식 어류의 대량 폐사를 유발하는 비생물학적 스트레스로 작용하는 주요 외부 환경요인이다 (Nakano et al., 2014). 즉, 자연 생태계에 일반적으로 서식하고

있는 어류에 비해 한정된 공간에서 고밀도로 사육하고 있는 양식 어류는 서식 수온 범위를 넘어서는 경우 식욕 감소, 성장 저하, 질병 및 폐사 발생 원인으로 작용한다(Kovach et al., 2012; Horton et al., 2014). 염분 역시 양식 어류의 삼투압 조절 등 체내 생리적 반응에 영향을 미치는 주요 인자로서, 여름철 폭우 등으로 인한 담수 유입은 연안 지역의 염분 감소를 유발하고(Oh et al., 2014; Marium et al., 2023) 양식 어류의 체내 에너지 소비 변화, 성장 감소, 면역체계 교란 및 질병 발생 등 다양한 형태의 스트레스를 유발한다(Bœuf and Payan, 2001; Oh et al., 2006b, 2014, 2020; Árnason et al., 2013; Kueltz, 2015). 광염성 어종은 뛰어난 체내 삼투 조절 능력으로 염분 변화가 큰 환경에서 잘 적응하며 항상성을 유지하지만(Bœuf and Payan, 2001; Oh

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 664. 3310 Fax: +82. 51. 955. 3981

E-mail address: syoh@kiost.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.2024.0547>

Korean J Fish Aquat Sci 57(5), 547-553, October 2024

Received 20 September 2024; Revised 9 October 2024; Accepted 21 October 2024

저자 직위: 송미해(기능원), 이근수(기술원), 강필준(기술원), 박혜미(기능원), 오승용(연구원)

et al., 2006b), 서식 수온 및 염분 범위를 벗어난 변화는 에너지 대사, 성장 및 생존에 큰 영향을 미친다(Davis et al., 2002; Partridge and Jenkins, 2002; Oh et al., 2006b; Glover et al., 2012). 어류는 일반적으로 혈중 삼투압(280–360 mosM/kg)을 유지하기 위해 총 에너지의 10–50%를 소비하며, 약 10–12 psu의 체내 염분을 유지한다(Bœuf and Payan, 2001). 어류는 등투압 보다 높은 염분에 노출될 경우 저삼투압 조절, 즉 물을 흡수하고 염분을 배설하며, 등투압 보다 낮은 염분에서는 고삼투압 조절, 즉 염분을 흡수하고 물을 배설하기 위해 에너지를 소비한다(Bœuf and Payan, 2001). 이와 같은 염분 변화로 인한 삼투압의 조절은 체내 대사활동과 연계된 에너지 소비를 유발함으로써 산소 소비율(oxygen consumption rate, OCR)로 대상 어류의 생리적 영향을 간접적으로 알 수 있다(Altinok and Grizzle, 2003; Oh et al., 2014). OCR은 어류의 생명 유지 및 에너지 소비와 관련한 물리화학적 생체 반응에 대해 중요한 자료를 얻을 수 있는 신진대사율을 측정하는 표준 방법으로서(Clark et al., 2013), 수온과 염분 변화로 유발된 체내 생리 반응 변화 및 삼투압 조절과 연계된 에너지 소비를 조사하기 위해 널리 사용되는 대사율 지표로(Oh et al., 2014, 2015), 다양한 어종의 생리적 변화 연구에 활용된 바 있다(Aristizabad-abud, 1992; Oh et al., 2006b, 2014, 2015; Shi et al., 2011). 감성돔(*Acanthopagrus schlegelii*)은 빠른 성장, 높은 환경 적응력 및 질병 저항성이 강해 중국, 일본, 한국 및 동남아시아 일부 국가에서 양식되는 중요한 해양 어류이다(Deane et al., 2002; Shao et al., 2008; Jin et al., 2019). 감성돔은 광염성 해산 경골어류로서 높은 염분 내성으로(Sasano et al., 2022; Zhang et al., 2022), 담수에서도 양식할 수 있는 장점이 있다(Min, 2003). 따라서 감성돔은 해산어의 삼투압 조절 연구를 위한 좋은 모델로 이용되고 있지만(Chang et al., 2007; Choi and An, 2008; Park et al., 2012), 수온과 염분 복합 변화에 따른 생리 반응 연구는 제한적이다(Jeong et al., 2007; Song et al., 2024). 따라서 본 연구에서는 감성돔의 안정적이고 최적의 성장을 위한 사육환경 파악을 위해 수온과 염분 변화에 따른 OCR, Q_{10} 값 및 대사 에너지 소비율을 조사하였다.

재료 및 방법

실험어 및 순치

실험어는 한국해양과학기술원 생물실험동 내 순환여과식 시스템 내 수조에서 사육 중인 평균 체장 23.4 ± 0.8 cm와 평균 무게 203.1 ± 18.5 g인 개체를 사용하였다(Table 1). 실험 전 모든 실험어는 15°C 수온 조건에서 어체중의 1.0–1.5% 비율로 배합사료(단백질 함량 52.0%; Daehanfeed Co., Ltd, Incheon, Korea)를 공급하며 순치하였다.

실험장치

감성돔의 수온 및 염분에 따른 OCR은 폐쇄 순환형 호흡 측

정 시스템(Oh et al., 2020)을 이용하여 측정하였다. 감성돔이 수용된 호흡실을 거쳐가는 유량은 용존산소 농도 차이가 최소 0.2 mg/L 이상(Oh et al., 2020)으로 조절하였고, 히터(용량 2 kW)와 냉각기(DA-2000B; Daeil Co., Busan, Korea)를 이용하여 실험 수온을 일정하게 유지하였다. 각 실험 수온과 염분은 YSI pro 2030 (YSI-ProPlus; Yellow Springs Instruments Inc., Yellow Springs, OH, USA)을 이용하여 매일 측정하였다.

실험방법

OCR 측정은 실험 시작 전 48시간 절식을 통해 사료 섭취에 따른 소화 및 배설 등의 영향을 최소화한 다음 2-phenoxyethanol (150 mg/L)로 마취시켜 전장과 무게를 측정 후 시스템 내 호흡실에 각 5마리씩, 3반복 수용하였다. 실험 수온과 염분은 각각 15 , 20 , 25°C 및 0 , 15 , 30 psu로 설정하였다(Table 1). 실험 수온(즉, 15°C)과 염분(0 , 15 , 30 psu)의 순치는 실험 시작 전 각 조건으로 설정된 독립된 순환여과식 시스템에서 최소 5일 이상 순치한 후 실험에 사용하였다.

초기 실험 수온 15°C 와 각 실험 염분 조건으로 조절된 호흡 시스템 내 실험어를 수용한 뒤 핸들링에 의한 영향을 최소화하기 위해 최소 24시간 동안 순치한 뒤, 매 24시간 간격으로 다음 단계의 수온(즉, $15 \rightarrow 20 \rightarrow 25^\circ\text{C}$)으로 시간당 1°C 상승시켜 조절하였다. 각 수온 및 염분 조건별 감성돔의 OCR은 수온 변경 직전 6시간 동안 측정하였다. 즉, 각 수온 및 염분별 영향을 충분히 받도록 하기 위해 OCR 측정 전 13시간 동안 유지시킨 다음 마지막 6시간 동안 OCR을 10초 간격으로 측정한 후 다음 단계의 수온으로 조절하였다.

감성돔의 수온과 염분별 OCR은 아래의 식을 이용하여 구하였다(Jobling, 1982).

$$\text{OCR (mg O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}) = (\text{Ci} - \text{Co}) \times \text{Q/W}$$

Ci=어류 호흡실 유입수의 용존산소 농도(mg/L)

Co=어류 호흡실 배출수의 용존산소 농도(mg/L)

Q=어류 호흡실을 지나가는 시간당 유량(L/h)

W=호흡실 수용 어체중(kg)

반복구별 OCR은 pooling하여 data unit으로 사용하였으며, 수온에 따른 대사율의 변화를 알아보기 위해 다음 식(Wuen-

Table 1. The experimental design used in this study for measuring the oxygen consumption of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii*

Treatment	Water temperature ($^\circ\text{C}$)	Salinity (psu)	Total length (cm)	Body weight (g)
1	$15 \rightarrow 20 \rightarrow 25^\circ\text{C}$	30	23.1 ± 0.9	203.4 ± 20.6
2	$15 \rightarrow 20 \rightarrow 25^\circ\text{C}$	15	23.3 ± 1.0	203.2 ± 20.6
3	$15 \rightarrow 20 \rightarrow 25^\circ\text{C}$	0	23.6 ± 0.8	203.6 ± 19.2

Table 2. Effects of water temperature (T) and salinity (S) on oxygen consumption rate (OCR) of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii*

Salinity (psu)	Oxygen consumption rate (mg O ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹)		
	0	15	30
Temperature (°C)			
15	68.6±8.4 ^{a(c)**}	96.2±4.1 ^{a(b)}	134.7±19.6 ^{a(a)}
20	148.3±2.4 ^{b(c)}	162.8±10.6 ^{b(b)}	294.5±19.8 ^{b(a)}
25	198.2±18.2 ^{c(c)}	238.8±26.2 ^{c(b)}	337.9±20.3 ^{c(a)}
Regression	OCR=-124.6890+13.1903T (r ² =0.92, P<0.0001)	OCR=-85.8624+12.2555T (r ² =0.79, P<0.001)	OCR=-150.6132+20.3146T (r ² =0.79, P<0.001)
Two-way ANOVA			
T		df=2, F=73.783, P<0.001	
S		df=2, F=48.276, P<0.001	
T×S		df=4, F=3.133, P<0.05	

*Values (mean±SE) with different superscripts in the same column are significantly different (P<0.01). **Values (mean±SE) with different superscripts in parenthesis in the same row are significantly different (P<0.01).

schel et al., 2005)과 같이 Q₁₀ 값을 구하였다.

$$Q_{10} = (R_2/R_1)^{10/(T_2-T_1)}$$

여기서, R₁와 R₂는 수온 T1과 T2일 때의 평균 OCR이다.

각 조건별 감성돔 OCR에 따른 에너지 소비를 알아보기 위해 Brett and Groves (1979)이 보고한 산소 소모에 따른 에너지 전환 계수(1 mg O₂=13.598 J=3.25 cal)를 이용하여 에너지 소비율을 구하였다.

통계 분석

각 조건별 OCR과 에너지 소비율의 통계처리는 SPSS 29.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 분산분석(ANOVA)을 통해 Tukey's multiple range test로 평균간 유의성을 95% 신뢰수준에서 검정하였다. 각 수온과 염분에 대한 시간당 평균 OCR과 에너지 소비율의 복합 영향은 two-way ANOVA를 통해 검정하였다.

결 과

수온과 염분에 따른 감성돔의 평균 OCR은 Table 2에 나타내었다. 염분 0 psu의 경우 15–25°C의 범위에서 68.6–198.2 mg O₂ kg⁻¹ h⁻¹의 OCR을 보였고, 15 psu에서는 96.2–238.8 mg O₂ kg⁻¹ h⁻¹ 범위였으며, 30 psu의 경우 134.7–337.9 mg O₂ kg⁻¹ h⁻¹의 범위를 보여 동일 염분에서 감성돔의 평균 OCR은 수온이 상승함에 따라 유의하게 증가하였다(P<0.001). 이에 따른 수온(T)에 따른 감성돔의 평균 OCR은 0, 15, 그리고 30 psu에서 각각 OCR=-124.6890+13.1903T (r²=0.92, P<0.0001), OCR=-85.8624+12.2555T (r²=0.79, P<0.001), 그리고 OCR=-150.6132+20.3146T (r²=0.79, P<0.001)의 회귀식을 보였다.

동일 수온에서 염분에 따른 평균 OCR은 수온과 마찬가지로 염분이 증가할수록 유의하게 증가하였다(P<0.05). 이상의 결과에서 수온(P<0.001), 염분(P<0.001) 및 수온과 염분의 상호작용(P<0.05) 모두 감성돔의 OCR에 유의한 영향을 미쳤다(Table 2). 수온과 염분에 따른 감성돔의 Q₁₀ 값은 Table 3과 같다. Q₁₀ 값은 염분에 상관없이 15–20°C 구간에서 가장 높았으며, 염분 15 psu 조건의 Q₁₀ 값이 0 psu 및 30 psu의 값보다 변화 폭이 크지 않았다.

수온과 염분에 따라 감성돔의 대사작용에 사용된 에너지 소비율은 Fig. 1에 나타내었다. 감성돔의 대사에너지 소비율은 수온과 염분 상승에 따라 유의하게 증가하였다(P<0.05). 염분 0 psu의 조건에서 수온 20°C의 평균 에너지 소비율은 15°C에 비해 116.2% 증가하였고, 수온 25°C 평균 에너지 소비율은 20°C와 15°C에 비해 각각 33.7%와 189.0% 증가하였다. 염분 15 psu의 경우 20°C는 15°C에 비해 69.2%, 25°C는 20°C와 15°C에 비해 각각 46.7%와 148.2% 증가하였다. 염분 30 psu의 경우 20°C는 15°C에 비해 118.6%, 25°C는 20°C와 15°C에 비해 각각 14.7%와 150.8% 증가하였다. 수온 15°C의 조건에서 염분 15 psu의 평균 에너지 소비율은 0 psu에 비해 40.3% 증가하였고, 염분 30 psu 평균 에너지 소비율은 15 psu와 0 psu에 비해 각각 40.0%와 96.4% 증가하였다. 수온 20°C의 경우 15 psu는 0 psu에 비

Table 3. Q₁₀ value of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* for different water temperature and salinity ranges

Salinity (psu)	Temperature interval (°C)		
	15–20	20–25	15–25
0	4.67	1.79	2.89
15	2.87	2.15	2.48
30	4.78	1.32	2.51

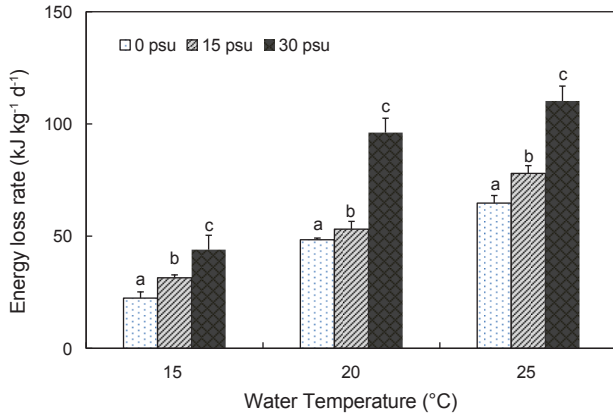


Fig. 1. Metabolic energy loss rate ($\text{kJ kg}^{-1} \text{d}^{-1}$) of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* exposed to three different water temperatures (15, 20, and 25°C) and three different salinities (0, 15, and 30 psu). Values (mean \pm SE, n=3) with different letter in same water temperature are significantly different ($P < 0.001$).

해 9.8%, 30 psu는 15 psu와 0 psu에 비해 각각 80.9%와 98.6% 증가하였다. 수온 25°C의 경우 15 psu는 10 psu에 비해 20.5%, 30 psu는 15 psu와 0 psu에 비해 각각 41.5%와 70.5% 증가하였다. 이상의 결과에서 감성돔의 대사 에너지 소비율의 증가 비율은 염분에 상관없이 15°C에서 20°C 상승 구간이 20°C에서 25°C 상승 구간 보다 높았고, 수온에 상관없이(단, 15°C 제외) 염분 15 psu에서 30 psu 상승 구간이 0 psu에서 15 psu 상승 구간보다 높은 에너지 소비율을 보였다.

고 찰

본 실험 결과 수온, 염분 및 수온과 염분의 상호작용은 감성돔의 대사에 유의한 영향을 미쳤으며, 이것은 이들 인자들이 체내 항상성 유지에 필요한 대사 반응을 유발한다는 것을 알 수 있었다(Spanopoulos-Hernández et al., 2005; Oh et al., 2006b). 수온 상승은 어류의 체내 효소 활성도 증가와 세포막의 유동성 변화 등 다양한 생리학적 메커니즘의 변화로 인해 대사를 증가가 나타난다(Wuenschel et al., 2005). 일반적으로 어류와 같은 변온동물의 OCR은 서식 수온 범위 내에서 온도 상승에 따라 직선적으로 증가하며(Kim et al., 1995; Oh et al., 2006a, 2007, 2020), 본 실험 결과도 일치하였다. 수온은 어류의 먹이 섭취, 호흡, 번식과 같은 생물학적 과정에 영향을 미치는 주요 인자로서, 이전 많은 연구에서 수온 상승이 어류의 대사를 증가시키는 주요인으로 밝혀져 있다(Claireaux and Lagardère, 1999; Wuenschel et al., 2005; Jeong et al., 2007; Oh et al., 2006a, 2020). Jeong et al. (2007)은 평균 36.7 g의 감성돔을 대상으로 수온 15°C→20°C→25°C로 상승시킨 결과 15°C에 비해 20°C와 25°C의 OCR은 약 1.2–2.3배 증가하는 결과를 보여,

본 실험의 1.2–2.9배 증가와 유사하였다. 광염성 어종인 점농어 (*Lateolabrax maculatus*; Oh et al., 2006b)와 넙치(*Paralichthys olivaceus*; Oh et al., 2012) 역시 수온 15°C에서 25°C로 상승할 경우 OCR은 각각 1.3–2.0배와 1.3–1.9배 증가를 보고한 바 있다. 이 밖에 다양한 어종에서 서식 수온 범위 내에서 수온 상승이 OCR의 선형적 상승 회귀식을 보고하였다(Oh et al., 2006a, 2007, 2010).

본 연구 결과 염분 증가에 따라 감성돔의 OCR이 증가하였으며, 동일 어종의 이전 결과와도 일치하였다(Jeong et al., 2007). Jeong et al. (2007)은 담수(0 psu) 조건보다 해수 조건에서 수온에 따라 OCR이 1.3–1.9배 증가하여 본 실험의 1.1–2.0배 증가와 유사하였고, 15°C에서 염분 상승 시 가장 높은 OCR 증가 비율을 보이는 동일한 결과가 나타났다. 이 밖에 sheepshead minnow *Cyprinodon variegatus* (Nordlie et al., 1991), spot *Leiostomus xanthurus* (Mosser and Hettler, 1989), turbot *Scophthalmus maximus* (Gaumet et al., 1995), 그리고 common snook *Centropomus undecimalis* (Gracia-Lopez et al., 2006)의 연구 결과와 일치하였다. 하지만 croaker *Micropogonias furnieri* (Aristizabal-Abud, 1992), European sea bass *Dicentrarchus labrax* (Claireaux and Lagardère, 1999) 그리고 hybrid grouper (♀ *Epinephelus fuscoguttatus* × ♂ *E. lanceolatus*; Xing et al., 2019)의 경우 염분이 감소할수록 OCR이 증가하거나, zebrafish *Danio rerio* (Uliano et al., 2010) 및 점농어 (Oh et al., 2006b)의 경우 염분 영향이 없는 것으로 볼 때 염분 변화에 반응 정도는 어종에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다. 경골어류는 해수에서 주변 환경으로 수분을 잃지 않기 위해 지속적으로 삼투압을 조절해야 하며, 이 과정에서 많은 에너지가 소비된다(Bœuf and Payan, 2001). 반면 담수에서는 주변 물로 확산된 염분을 대체하고 흡수된 과도한 물을 제거하는 방식으로 안정적인 수분-무기질 균형을 유지한다. 광염성 경골어류의 경우, 해수에서 저염분 환경으로 이동하면 혈장의 삼투압이 변화하고, 그 결과 원래의 수치를 회복하기 위해 삼투조절 시스템이 활성화된다(Mancera et al., 2002). 본 실험에서 나타난 저염분에서의 OCR 감소는 삼투압을 통해 조직으로 물이 빠르게 유입되어 생리적 활동이 일시적으로 느려진 결과로서, 이러한 대사를 저하(metabolic rate depression)는 생물 활동 및 에너지 소비를 줄였기 때문이다(Sokolova et al., 2012). 일반적으로 어류는 염분 변화에 따른 항상성 유지를 위해 대사가 증가하게 되며, 원래의 서식환경 또는 등삼투압 조건에서 가장 낮은 OCR을 보이게 된다(Gaumet et al., 1995; Kidder et al., 2006; Ern et al., 2014; Xing et al., 2019; Zhang et al., 2022). 이와 같은 현상은 넙치(Oh et al., 2020), 조피볼락(*Sebastes schlegelii*; Oh et al., 2014), European sea bass *Dicentrarchus labrax* (Claireaux and Lagardère, 1999) 및 쥐노래미(*Hexagrammos otakii*; Oh et al., 2015) 등에서 보고된 바 있다.

Q_{10} 값은 수온 변화에 따른 생물의 민감도 및 에너지 요구량

를 나타내는 지표로서(Spanopoulos-Hernández et al., 2005; Jiang et al., 2008; Pörtner and Farrell, 2008), 본 연구 결과 15–20°C 구간에서 2.86–4.78로 가장 높게 나타났으며 30 psu, 20–25°C 구간에서 가장 낮은 Q_{10} 값(즉, 1.32)을 보였다. Jeong et al. (2007) 역시 동일 어종을 대상으로 15–20°C 구간에서 가장 높은 Q_{10} 값(즉, 1.80–2.92)과 해수 및 20–25°C 구간에서 가장 낮은 Q_{10} 값(즉, 1.47)을 보여 본 실험과 동일한 결과를 나타내었다. 반면, 광염성 어종인 점농어(Oh et al., 2006b)의 경우 수온 20–25°C 구간에서 가장 높은 Q_{10} 값과 30 psu 및 15–20°C 구간에서 가장 낮은 높은 Q_{10} 값을 보여 같은 광염성 어종이라 하더라도 수온 및 염분 변화에 따른 생리적 민감성은 다르다는 것을 알 수 있다. 본 실험 결과 감성돔의 경우 수온 상승과 먹이 섭취가 증가하기 시작하는 겨울철에서 봄철 기간에 높은 대사를 증가가 예상되며, 이에 따른 먹이 공급 및 용존산소 조절 등 적절한 사육관리가 필요한 것으로 생각된다.

OCR은 체내 대사반응으로 인한 에너지 소비율을 정량화 할 수 있는 주요 지표로서(Oh et al., 2020), 본 실험 결과 수온과 염분은 감성돔의 대사 에너지 소비율에 영향을 미쳤으며, 염분 상승(즉, 0 psu에서 30 psu 상승시 70.5–98.7% 증가)보다는 수온 상승(즉, 15°C에서 25°C 상승시 148.2–189.0% 증가)에 따라 더 많은 에너지 소비를 하는 것으로 나타났으며, 이전의 연구 결과와 유사하였다(Jeong et al., 2007). Zhang et al. (2022)은 35.2 g의 감성돔을 대상으로 5, 10, 15 및 25 psu 조건에서 사육 시 15 psu와 25 psu 실험구 간에 성장률에 차이가 없으며 15 psu 조건에서 높은 사료효율을 보이지만, 0 psu와 10 psu 실험구는 낮은 사료 섭취율 및 사료효율로 성장률 감소의 결과를 보고한 것으로 볼 때, 성장률 향상을 위한 에너지 관리 측면에서 최적의 염분 조건은 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 본 실험의 경우 담수(즉, 0 psu) 및 저염분(15 psu) 조건이 고염분(30 psu) 조건보다 에너지 소비를 측면에서 유리하였지만, 이전의 사육 실험(Zhang et al., 2022)의 결과로 볼 때 감성돔은 완전 담수 조건보다는 기수 조건에서 사육하는 것이 양식 효율 측면에서 이점이 있을 수 있어 향후 보다 더 장기적인 연구를 통해 최적의 사육 조건 구명이 요구된다. 이와 아울러 염분 변화에 따른 에너지 소비율은 아가미의 Na^+/K^+ -ATPase 활성을 통한 이온 조절 시스템(Tang and Lee, 2007) 및 catecholamine와 corticosteroid(Lee and Kim, 2005)와 같은 스트레스 호르몬 작용에 의한 대사 비용이 영향을 미치기 때문에 감성돔을 대상으로 이에 대한 향후 연구가 필요하다.

결론적으로 수온, 염분 및 수온과 염분의 상호작용은 감성돔의 OCR에 유의한 영향을 미쳤다. 저염분 조건에서 대사 비용이 감소하는 것으로 볼 때 담수 및 기수 환경에서 에너지 관리 관점에서 장점이 있다는 것을 알 수 있지만, 장기적으로 저염분 환경에서의 크기별 적응 정도, 성장률 및 먹이 섭취율 등에 대한 연구가 향후 필요하다. 또한 봄철 및 정상 해수 염분 조건(즉, 30 psu)에서 나타난 높은 대사율은 해당 시기 및 염분 조건에서의

적절한 사육관리가 필요하다는 것을 알 수 있으며, 각 조건별 나타난 에너지 소비율을 통해 감성돔의 성장 및 생존 등에 필요한 bioenergetics 모델 구축에 활용할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 연구비(과제번호: PG51201) 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Altinok I and Grizzle JM. 2003. Effect of low salinities on oxygen consumption of selected euryhaline and stenohaline freshwater fish. *J World Aquacult Soc* 34, 113-117. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2003.tb00046.x>.
- Aristizabal Abud EO. 1992. Effects of salinity and weight on routine metabolism in the juvenile croaker, *Micropogonias furnieri* (Desmarest 1823). *J Fish Biol* 40, 471-472. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1992.tb02593.x>.
- Árnason T, Magnadóttir B, Björnsson B, Steinarsson A and Björnsson BT. 2013. Effects of salinity and temperature on growth, plasma ions, cortisol and immune parameters of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Aquaculture* 380-383, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.11.036>.
- Bœuf G and Payan P. 2001. How should salinity influence fish growth?. *Comp Biochem Physiol Part C Toxicol Pharmacol* 130, 411-423. [https://doi.org/10.1016/S1532-0456\(01\)00268-X](https://doi.org/10.1016/S1532-0456(01)00268-X).
- Brett JR and Groves TDD. 1979. Bioenergetics and growth. In: *Fish Physiology*. Vol. 8. Hoar WH, Randall DJ and Brett JR, eds. Academic Press, New York, NY, U.S.A., 279-352.
- Chang YJ, Min BH and Choi CY. 2007. Black porgy (*Acanthopagrus schlegeli*) prolactin cDNA sequence: mRNA expression and blood physiological responses during freshwater acclimation. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol* 147, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2007.01.006>.
- Choi CY and An KW. 2008. Cloning and expression of Na^+/K^+ -ATPase and osmotic stress transcription factor 1 mRNA in black porgy, *Acanthopagrus schlegeli* during osmotic stress. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol* 149, 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2007.08.009>.
- Claireaux G and Lagardère JP. 1999. Influence of temperature, oxygen and salinity on the metabolism of the European sea bass. *J Sea Res* 42, 157-168. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(99\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(99)00019-2).
- Clark TD, Sandblom E and Jutfelt F. 2013. Aerobic scope measurements of fishes in an era of climate change: Respirometry, relevance and recommendations. *J Exp Biol* 216, 2771-2782. <https://doi.org/10.1242/jeb.084251>.
- Davis DA, Saoud IP, McGraw WJ and Rouse DB. 2002. Considerations for *Litopenaeus vannamei* reared in inland low

- salinity waters. In: Avances en Nutrición Acuicola VI. Cruz-Suárez LE, Ricque-Marie D, Tapia-Salazar M, Gaxiola-Cortés MG, Simoes N, eds. 73-94. Proceedings of the Memorias del VI Simposium Internacional de Nutrición Acuicola. Cancún, Quintana Roo, México.
- Deane EE, Kelly SP, Luk J and Woo NY. 2002. Chronic salinity adaptation modulates hepatic heat shock protein and insulin-like growth factor I expression in black sea bream. *Mar Biotechnol* 4, 193-205. <https://doi.org/10.1007/PL00021690>.
- Ern R, Huong DTT, Cong NV, Bayley M and Wang T. 2014. Effect of salinity on oxygen consumption in fishes: A review. *J Fish Biol* 84, 1210-1220. <https://doi.org/10.1111/jfb.12330>.
- Gaumet F, Boeuf G, Severe A, Leroux A and Mayergonstan N. 1995. Effects of salinity on the ionic balance and growth of juvenile turbot. *J Fish Biol* 47, 865-876. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1995.tb06008.x>.
- Glover DC, DeVries DR and Wright RA. 2012. Effects of temperature, salinity and body size on routine metabolism of coastal largemouth bass *Micropterus salmoides*. *J Fish Biol* 81, 1463-1478. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03385.x>.
- Gracia-Lopez V, Rosas-Vazquez C and Brito-Perez R. 2006. Effects of salinity on physiological conditions in juvenile common snook *Centropomus undecimalis*. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 145, 340-345. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.07.008>.
- Horton BP, Rahmstorf S, Engelhart SE and Kemp AC. 2014. Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300. *Quat Sci Rev* 84, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.11.002>.
- Islam MJ, Slater MJ, Thiele R and Kunzmann A. 2021. Influence of extreme ambient cold stress on growth, hematological, antioxidants, and immune responses in European seabass, *Dicentrarchus labrax* acclimatized at different salinities. *Ecol Indic* 122, 107280. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107280>.
- Jiang AL, Guo JL, Cai WG and Wang CH. 2008. Oxygen consumption of the ascidian *Styela clava* in relation to body mass, temperature and salinity. *Aquac Res* 39, 1562-1568. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.02040.x>.
- Jin M, Pan T, Cheng X, Zhu TT, Sun P, Zhou F, Ding X and Zhou Q. 2019. Effects of supplemental dietary l-carnitine and bile acids on growth performance, anti-oxidant and immune ability, histopathological changes and inflammatory response in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*) fed high-fat diet. *Aquaculture* 504, 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.01.063>.
- Jeong MH, Kim YS, Min BH and Chang YJ. 2007. Effect of fish number in respiratory chamber on routine oxygen consumption of black porgy *Acanthopagrus schlegelii* reared in seawater or freshwater. *J Aquac* 20, 121-126. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:89485082>.
- Jobling M. 1982. A study of some factors affecting rates of oxygen consumption of plaice, *Pleuronectes platessa* L. *J Fish Biol* 20, 501-516. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1982.tb03951.x>.
- Kidder GW, Petersen CW and Preston RL. 2006. Energetics of osmoregulation: I. Oxygen consumption by *Fundulus heteroclitus*. *J Exp Zool A Comp Exp Biol* 305, 309-317. <https://doi.org/10.1002/jez.a.251>.
- Kim IN, Chang YJ and Kwon JY. 1995. The patterns of oxygen consumption in six species of marine fish. *J Kor Fish Soc* 28, 373-381.
- Kovach RP, Gharrett AJ and Tallmon DA. 2012. Genetic change for earlier migration timing in a pink salmon population. *Proc R Soc B Biol Sci* 279, 3870-3878. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1158>.
- Kueltz D. 2015. Physiological mechanisms used by fish to cope with salinity stress. *J Exp Biol* 218, 1907-1914. <https://doi.org/10.1242/jeb.118695>.
- Lee JY and Kim DB. 2005. The optimum salinity and the effects of the rapid salinity change on oxygen consumption and nitrogen excretion in river puffer, *Takifugu obscurus*. *J Aquac* 18, 45-51.
- Mancera JM, Carrión RL and María PMR. 2002. Osmoregulatory action of PRL, GH, and cortisol in the gilthead seabream (*Sparus aurata* L.). *Gen Comp Endocrinol* 129, 95-103. [https://doi.org/10.1016/S0016-6480\(02\)00522-1](https://doi.org/10.1016/S0016-6480(02)00522-1).
- Mariam A, Chatha AMM, Naz S, Khan MF, Safdar W and Ashraf S. 2023. Effect of temperature, pH, salinity and dissolved oxygen on fishes. *J Zool Syst* 1, 1-12. <http://doi.org/10.56946/jzs.v1i2.198>.
- Mosser ML and Hettler WF. 1989. Routine metabolism of juvenile spot, *Leiostomus xanthurus*. *J Fish Biol* 35, 703-707. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1989.tb03021.x>.
- Min BH. 2003. Physiological responses of black seabream, *Acanthopagrus schlegelii* to freshwater acclimation. Ph.D. Dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Nakano T, Kameda M, Shoji Y, Hayashi S, Yamaguchi T and Sato M. 2014. Effect of severe environmental thermal stress on redox state in salmon. *Redox Biol* 2, 772-776. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2014.05.007>.
- Nordlie FG, Walsh SJ, Haney DC and Nordlie TF. 1991. The influence of ambient salinity on routine metabolism in the teleost *Cyprinodon variegatus* Lacepède. *J Fish Biol* 38, 115-122. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1991.tb03097.x>.
- Oh SY, Jang YS, Park HS, Choi YU and Kim CW. 2012. The influence of water temperature and body weight on metabolic rate of olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Ocean Pol Res* 34, 93-99. <https://doi.org/10.4217/OPR.2012.34.1.093>.
- Oh SY, Jeong YK, Lee GS, Kang PJ and Park HM. 2020. Oxygen consumption and blood physiology of olive flounder *Paralichthys olivaceus* subjected to salinity changes. *Korean J Fish Aqua Sci* 53, 620-627. <http://doi.org/10.5657/>

- KFAS.2020.0620.
- Oh SY, Kim CK, Jang YS, Choi HJ and Myoung JG. 2014. Effect of salinity on survival, oxygen consumption and blood physiology of Korean rockfish *Sebastes schlegelii*. *Ocean Pol Res* 36, 135-143. <https://doi.org/10.4217/OPR.2014.36.2.135>.
- Oh SY, Myoung JG and Park JW. 2015. Effects of salinity on survival, oxygen consumption, and hematological response of greenling *Hexagrammos otakii*. *Korean J Fish Aqua Sci* 48, 712-718. <http://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0712>.
- Oh SY, Park HS and Kim CK. 2010. Effect of water temperature and photoperiod on the oxygen consumption rate of juvenile Pacific cod *Gadus microcephalus*. *Ocean Pol Res* 32, 229-236. <https://doi.org/10.4217/OPR.2010.32.3.229>.
- Oh SY, Noh CH, Myoung JG and Jo JY. 2007. Effects of water temperature and body weight on oxygen consumption rate of black rockfish, *Sebastes schlegelii*. *Korean J Ichthyol* 19, 1-7.
- Oh SY, Noh CH, Kang RS and Myoung JG. 2006a. Effects of water temperature and photoperiod on the oxygen consumption rate of fasted juvenile parrot fish, *Oplegnathus fasciatus*. *Ocean Pol Res* 28, 407-413. <http://doi.org/10.4217/OPR.2006.28.4.407>.
- Oh SY, Shin CH, Jo JY, Noh CH, Myoung JG and Kim JM. 2006b. Effects of water temperature and salinity on the oxygen consumption rate of juvenile spotted sea bass, *Lateolabrax maculatus*. *Korean J Ichthyol* 18, 202-208.
- Park MS, Min BH, Moon TS, Lim HK, Choi CY, Chang YJ and Kho KH. 2012. Osmoregulatory ability and stress responses during freshwater adaptation of black porgy (*Acanthopagrus schlegelii*) treated with exogenous prolactin. *Aquac Res* 43, 1891-1899. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.03050.x>.
- Partridge GJ and Jenkins GI. 2002. The effect of salinity on growth and survival of juvenile black bream (*Acanthopagrus butcheri*). *Aquaculture* 210, 219-230. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00817-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00817-1).
- Pörtner HO and Farrell AP. 2008. Physiology and climate change. *Science* 322, 690-692. <https://doi.org/10.1126/science.1163156>.
- Sasano S, Murakami H, Suzuki KW, Minamoto T, Yamashita Y and Masuda R. 2022. Seasonal changes in the distribution of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* estimated by environmental DNA. *Fish Sci* 88, 91-107. <http://doi.org/10.1007/s12562-021-01572-z>.
- Shao Q, Ma J, Xu Z, Hu W, Xu J and Xie S. 2008. Dietary phosphorus requirement of juvenile black seabream, *Sparus macrocephalus*. *Aquaculture* 277, 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.01.029>.
- Shi Y, Zhang G, Liu J and Zang W. 2011. Effects of temperature and salinity on oxygen consumption of tawny puffer *Takifugu flavidus* juvenile. *Aquac Res* 42, 301-307. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02638.x>.
- Sokolova IM, Sukhotin AA and Lannig G. 2012. Marine animal stress response and biomonitoring and energy budgets in mollusks. In: *Oxidative Stress in Aquatic Ecosystems*. Wiley-Blackwell, Chichester, U.K., 261-280.
- Song MH, Lee GS, Kang PJ, Park HM and Oh SY. 2024. Effects of water temperature and salinity on oxygen consumption of black sea bream *Acanthopagrus schlegelii*. In: *Proceeding of 10th Anniversary Conference and Annual Meeting of KMALS*. Gangneung, Korea, 157.
- Spanopoulos-Hernández M, Martínez-Palacios CA, Vanegas-Pérez RC, Rosas C and Ross LG. 2005. The combined effects of salinity and temperature on the oxygen consumption of juvenile shrimps *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874). *Aquaculture* 244, 341-348. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.11.023>.
- Tang CH and Lee TH. 2007. The effect of environmental salinity on the protein expression of Na⁺/K⁺-ATPase, Na⁺/K⁺/2Cl⁻ cotransporter, cystic fibrosis transmembrane conductance regulator, anion, exchanger 1, and chloride channel 3 in gills of a euryhaline teleost, *Tetraodon nigroviridis*. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 147, 521-528. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2007.01.679>.
- Turker H. 2011. The effect of water temperature on standard and routine metabolic rate in two different sizes of Nile tilapia. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi* 17, 575-580.
- Uliano E, Cataldi M, Carella F, Migliaccio O, Iaccarino D and Agnisola C. 2010. Effects of acute changes in salinity and temperature on routine metabolism and nitrogen excretion in gambusia (*Gambusia affinis*) and zebrafish (*Danio rerio*). *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 157, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2010.07.019>.
- Wuenschel MJ, Jugovich AR and Hare JA. 2005. Metabolic response of juvenile gray snapper (*Lutjanus griseus*) to temperature and salinity: Physiological cost of different environments. *J Exp Mar Biol Ecol* 321, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2005.01.009>.
- Xing D, Song X, Peng L, Cheng Y and Zhai J. 2019. Effects of temperature and salinity on oxygen consumption and ammonia excretion rate of ♀ *Epinephelus fuscoguttatus* × ♂ *E.lanceolatus* Juveniles. *J Ocean Univ China* 18, 177-184. <https://doi.org/10.1007/s11802-019-3566-6>.
- Zhang Y, Zhang S, Xu S and Wang D. 2022. Effects of acute low-salinity stress on osmoregulation, antioxidant capacity, and growth of the black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*). *Fish Physiol Biochem* 48, 1599-1617. <https://doi.org/10.1007/s10695-022-01144-7>.