

조피볼락(*Sebastes schlegelii*) 산소 소비율에 미치는 수온과 바이오로거 체외 부착의 영향

이근수 · 강필준 · 오승용*

한국해양과학기술원 해양생명자원연구부

Effects of Water Temperature and Bio-logger External Attachment on Oxygen Consumption of Korean Rockfish *Sebastes schlegelii*

Geun Su Lee, Pil Jun Kang and Sung-Yong Oh*

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

The oxygen consumption rate (OCR) of Korean rockfish *Sebastes schlegelii* (mean weight 573.9 g) was measured using a closed flow-through respirometer under two external tagging conditions [non-tagged control (C) and bio-logger external bio-logger attachment (BEA)] and three water temperatures (15, 20, and 25°C). Water temperature significantly affected OCR ($P < 0.001$), while BEA had no significant effect ($P > 0.05$). OCR showed a linear relationship with temperature (T) between 15 to 25°C: $OCR = -57.0229 + 7.8729T$ ($r^2 = 0.95$, $P < 0.0001$) in control and $OCR = -79.1333 + 8.7433T$ ($r^2 = 0.97$, $P < 0.0001$) in BEA. The highest Q_{10} was observed from 15 to 20°C in the control and from 20 to 25°C in the BEA group. BEA consistently showed higher Q_{10} values than the control across all temperature ranges. Water temperature significantly influenced metabolic energy loss (MEL) rate ($P < 0.001$); however, MEL increased more rapidly with temperature in BEA than in the control. These findings offer quantitative insights into the metabolic response of Korean rockfish to bio-logger attachment under controlled thermal conditions.

Keywords: Bio-logger, Tagging, Thermal effect, Marine fish

서론

생물원격측정(biotelemetry)은 자연 생태계와 가두리 양식장과 같은 인위적인 환경 내에서 어류의 행동과 생태에 관한 많은 정보를 직접적인 관찰 없이 장거리 및 장기간 모니터링 할 수 있는 유용한 연구 방법으로서(Smirnich and Kelly, 2014; Macaulay et al., 2021), 다양한 센서와 데이터 저장장치 및 배터리 등으로 구성된 바이오로거(bio-logger)를 활용한 모니터링이 이루어진다(Macaulay et al., 2021; Park and Oh, 2023; Kang et al., 2024). 바이오로거는 대상 어류의 계절적 서식수심 및 서식수온뿐만 아니라 다양한 서식환경 조건 변화에 따른 행동 특성 및 생존율 변동 등과 같은 생리·생태학적 정보를 수집한다(Cooke et al., 2013; Macaulay et al., 2021; Park et al., 2024). 하지만 이와 같은 정보는 바이오로거 부착 개체들이 바이오로

거에 의해 행동이나 체내 생리적 영향이 미치지 않는다는 가정이 전제되어야만 신뢰할 수 있다(Perry et al., 2001; Jepsen et al., 2015). 즉, 바이오로거 부착 개체의 정보는 바이오로거를 부착하지 않은 개체 모두를 대표하는 것으로 인식될 수 있기 때문이다(Perry et al., 2001). 따라서 바이오로거를 활용한 생물원격 측정 전 바이오로거 부착이 미치는 영향 유무에 대한 선행 연구가 필수적으로 요구된다(Macaulay et al., 2021).

생물원격측정에 사용되는 바이오로거는 목적과 용도에 따라 radio telemetry, acoustic tag 그리고 satellite tag 등이 있으며(Hussey et al., 2015), 대상 어류에 적용하기 위한 적합한 방법을 구명하기 위해 부착방법, 부착위치 및 바이오로거 무게 비율 등에 대한 생리적 영향, 그리고 바이오로거 부착효율 등에 대한 연구가 이루어졌다(Mellas and Haynes, 1985; Kang et al., 2024; Oh et al., 2024). 이 중 satellite tag 인 pop-up satellite

*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.2025.0438>

Korean J Fish Aquat Sci 58(4), 438-444, August 2025

Received 12 June 2025; Revised 26 June 2025; Accepted 1 July 2025

저자 직위: 이근수(기술원), 강필준(기술원), 오승용(연구원)

archival tag (PSAT)는 장시간 부착을 통해 이동 경로, 서식수심 및 서식수온 등 많은 생태학적 정보 수집이 가능해 다양한 해양 생물에 활용될 수 있지만, 체외 부착이라는 특성으로 인해 피부 손상, 유영력 저하 및 스트레스 유발 등 대상 어류에 직간접적으로 부정적 영향을 미칠 수 있는 단점이 있다(Thorstad et al., 2000; Steinhausen et al., 2006; Methling et al., 2011; Thorstad et al., 2013; Kang et al., 2024; Oh et al., 2024). 즉, 대상생물의 생물원격측정 연구의 신뢰성을 확보하기 위해서는 바이오로거 부착에 따른 생리적 영향에 대한 사전 영향 조사는 매우 중요하다(Thorstad et al., 2013; Lee et al., 2023; Oh et al., 2024).

산소 소비율(oxygen consumption rate, OCR)은 수서생물의 항상성 조절에 필요한 체내 대사에너지를 정량화하는 가장 대표적인 방법으로서(Pérez-Robles et al., 2012; Lynch et al., 2017), 바이오로거 부착에 기인한 생리적 영향을 파악하는데 유용한 방법으로 활용되고 있다(McGuigan et al., 2021; Lee et al., 2023; Oh, 2023, 2024). 바이오로거 부착과 같은 인위적 영향과 더불어 수온은 어류의 체내 대사반응에 가장 직접적으로 영향을 미치는 주요 환경인자로서(Pirozzi and Booth, 2009), 바이오로거 체외 부착과 수온에 따른 복합 영향의 파악은 향후 생물원격측정 연구를 위해 필수적으로 요구되는 고려 사항이다(Lee et al., 2023; Oh, 2024). 조피볼락(*Sebastes schlegelii*)은 Scorpaeniformes목 Scorpaenidae과에 속하는 난태성 어류로서 태평양 북서부, 중국, 일본 및 우리나라 전 해역의 연안 암반 지역에 주로 서식하며(Yamada et al., 1995), 성장이 빨라 주요 양식 어종이자 연안 지역 자원조성을 위한 바다목장사업의 주 대상종으로 우리나라(Park et al., 2007)뿐만 아니라 중국(Song et al., 2023)에서도 지속적인 방류가 이루어지고 있다. 하지만 조피볼락의 연안 지역 이동 및 분포 특성에 대한 생태적 정보는 제한적이며, 체외 부착 바이오로거를 활용한 생물원격측정 연구는 이루어진 바가 없다. 조피볼락의 경우 바이오로거 체외 부착에 따른 체내 혈액의 화학적 성분 변화와 같은 생리적 반응(Park and Oh, 2018) 연구 보고가 있었지만, 체외 부착에 따른 OCR 변화에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 바이오로거 체외 부착과 수온의 차이에 따른 조피볼락의 OCR과 에너지 소비율 등의 생리적 변화를 정량화하여 조피볼락에 미치는 영향을 알아보았다.

재료 및 방법

실험어 및 사육 관리

실험어는 실제 순환여과식 시스템에서 사육 중인 평균 무게와 평균 전장이 각각 573.9 ± 21.6 g (mean \pm SD)와 33.2 ± 0.7 cm 인 조피볼락 18마리를 사용하였다. 실험 전 단백질 함량 51.0% 인 상품사료(Aller Aqua Co., Christiansfeld, Denmark)를 일간 어체중의 1.0–1.5%의 비율로 실험어에게 공급하였으며, 수온, 염분, 용존산소 및 pH는 각각 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$, 33.9 ± 0.1 psu, 7.5 ± 0.3 mg/L 그리고 7.9 ± 0.2 로 유지하였다.

실험 장치

수온 및 바이오로거 체외 부착에 따른 조피볼락의 OCR 측정은 실험어가 수용된 호흡실, 유량계 및 용존산소 측정실로 이루어진 Lee et al. (2023)의 호흡 측정시스템을 사용하였다. 실험 수온은 호흡 측정시스템 내 설치된 용량 2 kW의 히터와 냉각기(DA-3000B; Daeil, Busan, Korea)를 사용하여 조절 및 유지하였으며, 각 실험 조건별 호흡실 유출 및 유입수의 용존산소 농도의 차이가 최소 0.2 mg/L 이상(Lee et al., 2023)이 되도록 유량을 조절하였다.

실험 방법

실험 수온 15°C , 20°C , 그리고 25°C 는 Lee et al. (2023)의 방법에 따라 조절하였다. 즉, 수온 20°C 에 순치된 실험어를 20°C 조건의 소형 순환여과식 시스템 3 set 내에 6마리씩 무작위로 수용하여 하루에 1°C 씩 내리거나 높여 15°C 와 25°C 로(단, 20°C 조건은 제외) 조절한 다음 최소 10일 이상 각 실험 수온에 재순치하였다. 각 실험 수온 조건의 실험어는 OCR 측정 전 사료 섭취에 따른 생리적 영향을 배제하기 위해 2일간 절식한 다음 실험을 진행하였다(Lee et al., 2023).

바이오로거 체외 부착은 Lee et al. (2023)와 Kang et al. (2024)의 방법에 따라 조피볼락 등지느러미 아래 근육 부위에 silicon tube (외경 4.24 mm 및 내경 2.64 mm)를 wilton applicator pin (Wildlife Computers Inc., WA, USA)을 사용하여 삽입한 후 tube 내로 monofilament (두께 0.64 mm)를 넣어 dummy mark report pop-up archival tag (mrPAT; 중량 40 g, 길이 127 mm)(Wildlife Computers Inc.)와 연결하였다(Fig. 1). 바이오로거 부착 시 핸들링에 따른 스트레스 등 생리적 영향을 최소화하기 위해 2-phenoxyethanol (Junsei Chemical Co., Ltd., Koshigaya, Japan) 150 mg/L의 농도로 마취시킨 후 바이오로거를 부착하였으며, 부착 후 iodine solution으로 부착 부위를 소독한 다음 200 mg/L의 oxytetracycline 농도에서 1분간 약욕하고(Oh and Jeong, 2021; Lee et al., 2023) 호흡실에 수용하였다. 조피볼락의 OCR은 바이오로거 체외 부착구(bio-logger external attachment, BEA)와 미부착구인 대조구(control) 개체 각 1마리씩 각 실험 수온으로 조절된 호흡실 내에 수용하여 핸들링에 의한 스트레스 감소, 호흡실 내 적응 및 실험 수온에 반응시키기 위해 12시간 이상 안정시킨 다음 30초 간격으로 6시간 동안 측정하였다. 각 수온 조건에서 3회 반복 실험을 실시하였으며, OCR은 아래 Jobling (1982)의 식에 따라 구하였다.

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

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)



Fig. 1. The process of the external attachment of bio-logger mrPAT to dorsal muscle of Korean rockfish *Sebastes schlegelii*.

조피볼락 BEA와 대조구의 수온에 따른 OCR의 data unit은 반복구별로 pooling하여 각 평균값을 사용하였으며, 수온 민감도(Q_{10})는 아래 Wuenschel et al. (2005)을 식을 사용하여 구하였다.

$$Q_{10} = \left[\frac{R_2}{R_1} \right]^{\frac{10}{T_2 - T_1}}$$

여기서, R_1 과 R_2 는 수온 T_1 과 T_2 일 때의 평균 OCR

수온과 바이오로거 부착에 따른 조피볼락의 대사반응, 즉 OCR 변화로 인한 에너지 소비율은 에너지전환계수($1 \text{ mg O}_2 = 13.598 \text{ J} = 3.25 \text{ cal}$)를 이용하여 산정하였다(Brett and Groves, 1979).

통계 분석

모든 실험 결과는 통계 프로그램 SPSS 11.5 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 바이오로거 체외 부착 영향은 T-test로 검증하였고, 수온 영향은 one-way ANOVA 그리고 수온과 바이오로거 체외 부착 복합 영향은 two-way ANOVA를 통해 유의한 차이가 나타날 경우 Tukey's multiple range test로 95% 신뢰수준에서 평균간 유의성을 조사하였다.

결 과

수온과 바이오로거 체외 부착에 따른 조피볼락의 평균 OCR은 Table 1에 나타내었다. 조피볼락의 평균 OCR은 BEA와 상관없이 수온에 따라 유의하게 증가하였다($P < 0.001$). 수온에 따른 대조구와 BEA간 조피볼락의 평균 OCR 증가 비율은 수온 15°C 에서 20°C 로 상승 시 각각 평균 57.2%와 57.9%이었고, 20°C 에서 25°C 로 상승시 각각 44.0%와 62.6%, 그리고 15°C 에서 25°C 로 상승시 각각 126.4%와 156.7%로 나타나, 수온에 따른 BEA의 OCR 증가 비율이 대조구보다 높았다. 하지만 각 수온 조건에서 대조구와 BEA간 조피볼락의 평균 OCR은 유의한 차이가 없었다($P > 0.05$). 수온(T)에 따른 조피볼락의 평균 OCR은 바이오로거 미부착구(즉, 대조구)의 경우 $\text{OCR} = -57.0229 + 7.8729T$ ($r^2 = 0.95$, $P < 0.0001$)이었고, BEA의 경우

$\text{OCR} = -79.1333 + 8.7433T$ ($r^2 = 0.97$, $P < 0.0001$)의 회귀식을 보였다. 이상의 결과에서 수온($P < 0.001$), 바이오로거 체외 부착($P > 0.05$) 그리고 두 인자의 상호작용($P > 0.05$) 중 수온만이 조피볼락의 평균 OCR에 유의한 영향을 미쳤다.

수온 및 바이오로거 체외 부착에 따른 조피볼락의 수온 민감도 Q_{10} 값은 Table 2에 나타내었다. 수온 $15\text{--}20^\circ\text{C}$, $20\text{--}25^\circ\text{C}$ 그리고 $15\text{--}25^\circ\text{C}$ 구간의 Q_{10} 값은 대조구의 경우 각각 2.47, 2.07 그리고 2.26이었고 BEA의 경우 각각 2.49, 2.64 그리고 2.57로 나타나 전 구간에서 BEA의 Q_{10} 값이 높았으며, 대조구와 BEA는 각각 $15\text{--}20^\circ\text{C}$ 와 $20\text{--}25^\circ\text{C}$ 구간에서 가장 높게 나타났다.

바이오로거 체외 부착 및 수온 변화에 따른 조피볼락의 대사 에너지 소비율은 Fig. 2에 나타내었다. 조피볼락의 일간 평균 에너지 소비율은 실험 수온 조건에서 대조구와 BEA는 각각

Table 1. Oxygen consumption rate (OCR) of Korean rockfish *Sebastes schlegelii* exposed to three different water temperature (T) and two different tagging methods (TM)

T ($^\circ\text{C}$)	TM				
	Control ($\text{mg O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	BEA ($\text{mg O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)			
15	62.3±1.92 ^{c(a)**}	55.8±0.38 ^{c(a)}			
20	98.0±1.15 ^{b(a)}	88.1±0.87 ^{b(a)}			
25	141.0±8.08 ^{a(a)}	143.3±2.41 ^{a(a)}			
Regression	$\text{OCR} = -57.0229 + 7.8729T$ ($r^2 = 0.95$, $P < 0.0001$)	$\text{OCR} = -79.1333 + 8.7433T$ ($r^2 = 0.97$, $P < 0.0001$)			
Two-way ANOVA					
	d.f.	SS	MS	F	P
T	2	20,943.320	10,471.660	271.844	<0.001
TM	1	99.831	99.831	2.592	0.133
T×TM	2	116.582	58.291	1.513	0.259
Error	12	462.251	38.521		

Control, Non-attached of bio-logger; BEA, Bio-logger external attachment. *Values (mean±SE) with different superscripts within the same column are significantly different ($n=3$, $P < 0.001$). **Values (mean±SE) with same superscripts in parenthesis within the same row are not significantly different ($n=3$, $P > 0.05$).

Table 2. Q_{10} values of the Korean rockfish *Sebastes schlegelii* exposed to two different tagging methods for different water temperature ranges

Group	Temperature interval (°C)		
	15–20	20–25	15–25
Control	2.47	2.07	2.26
BEA	2.49	2.64	2.57

Control, Non-attached of bio-logger; BEA, Bio-logger external attachment.

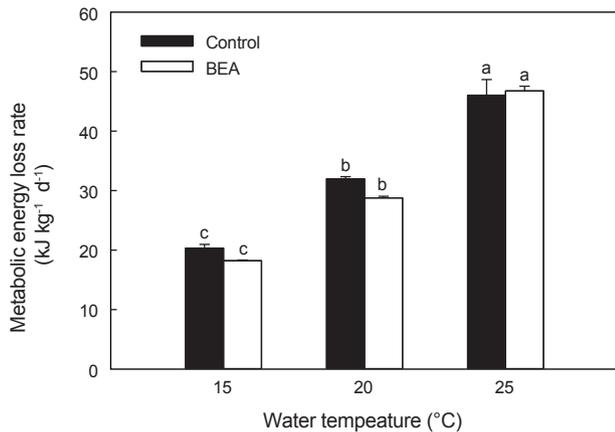


Fig. 2. Metabolic energy loss rate of Korean rockfish *Sebastes schlegelii* according to two different tagging methods (Control, BEA) and three water temperatures (15, 20, and 25°C). Control, Non-tagging; BEA, Bio-logger external attachment. Values (mean±SE) with different letter are significantly different ($P < 0.05$).

20.3–46.0 kJ kg⁻¹ d⁻¹와 18.2–46.8 kJ kg⁻¹ d⁻¹ 범위로 나타났다. 수온 15°C와 20°C에서는 대조구가 BEA에 비해 약 1.11–1.12 배 높은 대사 에너지 소비율을, 25°C에서는 BEA가 대조구에 비해 약 1.02배 높은 경향을 보였지만 유의한 차이는 없었다 ($P > 0.05$). 즉, 바이오로거 체외 부착에 따른 일간 대사 에너지 소비율의 영향은 없었으며 ($P > 0.05$), 수온 상승만이 대사 에너지 소비율에 유의한 영향을 미쳤다 ($P < 0.001$).

고 찰

본 실험 결과 바이오로거 체외 부착과 상관없이 수온만이 조피볼락의 OCR에 유의한 영향을 미쳐, 이전의 연구 결과와 다른 결과를 보였다 (Lee et al., 2023; Oh, 2024). Lee et al. (2023)은 평균 무게 2,281.7 g의 넙치를 대상으로 본 연구에서 사용한 silicon tube 내 monofilament를 이용하여 바이오로거를 체외 부착 후 수온 15, 20, 그리고 25°C 조건에서 OCR을 측정할 결과 수온과 바이오로거 체외 부착, 그리고 두 인자의 상호 작용 모두가 넙치 (*Paralichthys olivaceus*)의 OCR에 영향을 미친다

고 보고하였다. 또한 Oh (2024)은 평균 무게 2,175.0 g의 점농어 (*Lateolabrax maculatus*)를 대상으로 silicon tube, anchor 및 monofilament를 활용한 바이오로거 체외 부착 시 수온과 바이오로거 체외 부착 및 두 인자의 상호작용 모두가 점농어의 OCR에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타나, 본 실험에서 나타난 수온만이 유의한 영향을 미친다는 결과와는 다른 양상을 보였다. 이와 같이 바이오로거의 체외 부착에 따른 어종별 OCR 영향은 넙치 (Lee et al., 2023)와 만새기 (*Coryphaena hippurus*; McGuigan et al., 2021)의 경우 감소하는 반면, 대서양대구 (*Gadus morhua*; Steinhäuser et al., 2006) 그리고 뱀장어 (*Anguilla anguilla*; Methling et al., 2011)의 경우 증가하는 결과를 보여 본 실험과 상이하였지만, 흉상어 (*Carcharhinus plumbeus*; Lynch et al., 2017)은 바이오로거 체외 부착이 대사에 영향을 미치지 않는다고 보고하고 있어 본 실험 결과와 유사하였다.

Oh (2024)는 수온과 체외 부착방법에 따라 OCR에 미치는 영향은 다르다고 보고하였다. Oh (2024)는 점농어의 경우 수온 15°C에서 바이오로거 체외 부착이 영향을 미치지 않아 본 실험 결과와 유사하였지만, 20°C에서는 anchor, monofilament 및 silicon tube를 활용한 체외 부착방법 모두가, 그리고 25°C에서는 anchor 방식이 OCR을 증가시킨다고 보고하였다. 이와 같은 OCR 증가 또는 감소는 바이오로거 체외 부착에 따른 항력 (drag force) 증가 (Methling et al., 2011; Tudorache et al., 2014) 또는 대상 어류 아가미의 용존산소 섭취 (ram ventilation) 효율의 감소 (McGuigan et al., 2021)가 원인일 수 있어 향후 다양한 생리적 인자에 대한 영향 연구가 필요하다. 또한 바이오로거 체외 부착은 부착 부위의 상처 유발 및 감염 등 2차적 문제 유발에 따른 스트레스 반응으로 체내 다양한 생리적 영향이 나타날 수 있으며 (Oh, 2023; Oh et al., 2024), 이로 인한 체내 항상성 유지를 위한 에너지 비용 변화에 따른 OCR 증감의 변화로 나타날 수 있다 (Oh, 2024). Park and Oh (2018)은 dummy PSAT 체외 부착에 따른 조피볼락 (평균 896.7 g)의 체내 혈액색상 변화를 21일간 관찰한 결과 어체의 건강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 볼 때, 본 실험의 바이오로거 부착 개체와 미부착 개체 (즉, 대조구)간의 OCR 차이가 나타나지 않은 하나의 요인으로 생각된다. 이상의 결과에서 어종에 따라 바이오로거 체외 부착의 영향이 다르게 나타난다는 것을 알 수 있으며 (Jepsen et al., 2015; Lee et al., 2023; Oh, 2024), 각 어종별 연구를 통해 근육층이 아닌 피부 부착 방법 (Tudorache et al., 2014) 등 바이오로거 부착에 따른 스트레스 저감 및 영양 능력 효율 유지 방안 뿐만 아니라 어체 크기 및 바이오로거 무게 비율 (Thorstad et al., 2013; Smircich and Kelly, 2014; Oh et al., 2024)과 같은 다양한 인자들에 대한 대상어류의 생리적 영향 파악과 바이오로거 부착 효율 향상 등 안정적인 부착 방법에 대한 고려가 향후 있어야 할 것이다 (Lee et al., 2023).

수온은 가장 대표적인 어류의 대사 조절인자로서, 본 실험의 조피볼락 OCR은 수온에 따라 유의한 증가를 보였으며 앞

선 연구 보고와 일치하였다(Oh et al., 2007; Lee et al., 2023). 즉, 수온 상승에 따라 선형적 OCR 증가(즉, $OCR = a + bT$, $T = \text{수온}$)을 보였으며(Oh et al., 2007), 본 실험도 동일하였다. Oh et al. (2007)은 치어(평균 12.9 g)와 미성어(351.1 g)의 조피볼락 을 대상으로 수온 15에서 25°C로 상승할 경우 치어의 OCR은 $414.2 - 843.8 \text{ mg O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 과 $OCR = -209.34 + 42.95T$ ($r^2 = 0.96$, $P < 0.001$)의 회귀식을 보였고, 미성어의 경우 $182.0 - 328.2 \text{ mg O}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 과 $OCR = -38.80 + 14.62T$ ($r^2 = 0.98$, $P < 0.001$)의 회귀식을 보여 본 실험과 유사하였다. 하지만, OCR 상승 기울기(즉, b)는 Oh et al. (2007)의 14.62–42.95에 비해 본 실험에서 낮게(즉, 7.87–8.74, Table 1 참조) 나타났다. 이것은 실험에 사용한 개체 크기에 기인한 것으로, 일반적으로 단위 체중당 OCR은 체중 증가에 따라 감소하며(Oh et al., 2007) 이에 따라 보다 더 큰 개체를 사용한 본 실험의 각 수온별 평균 OCR과 수온 상승에 따른 상승 기울기 역시 감소한 것으로 생각된다. 하지만 본 실험의 수온 상승(즉, 15°C–25°C)에 따른 조피볼락의 평균 OCR 상승 비율은 126.4–156.7%로 나타나, 보다 작은 개체로 실험이 이루어진 Oh et al. (2007)의 80.3–103.7%보다 높았다. 이것은 실험에 이용한 조피볼락의 순치기간, 실험 밀도 및 실험방법의 차이에 의한 것으로 생각된다. 하지만 수온 상승에 따른 BEA의 OCR 상승 비율이 대조구에 비해 높았으며, 이전의 연구 보고(Lee et al., 2023; Oh, 2024)와 유사하였다. 본 실험의 경우 바이오로거 체외 부착이 조피볼락의 OCR에 유의한 영향을 미치지 않았지만, 수온 상승과 더불어 바이오로거 부착에 따른 부력 및 항력 증가, 유영능력 감소 그리고 체외 손상 등이 OCR에 영향을 미칠 수 있으므로 향후 보다 더 장기적인 실험을 통한 다양한 생리 지표의 분석이 요구된다.

본 실험에서 나타난 Q_{10} 값은 2.07–2.64 범위로서, 일반적으로 서식수온 범위 내 수온 상승에 따른 Q_{10} 값인 2–3 범위(Fry, 1971)와 일치하였다. 본 실험 결과 실험 수온 구간 모두에서 BEA가 대조구 보다 높은 Q_{10} 값을 보였으며, 이전의 연구 보고와 일치하였다(Lee et al., 2023; Oh, 2024). 하지만 바이오로거 체외 부착에 따른 최대 민감성은 넙치(Lee et al., 2023)와 점농어(Oh, 2024) 경우 15–20°C 구간에서 나타나 본 실험의 20–25°C 구간과는 차이를 보였다. 이것은 어종별 서식 수온, 서식 형태(즉, 저서성 또는 유영성/정착성 또는 회유성) 그리고 체내 생리반응 정도 등에 의한 차이에 의한 것으로 생각된다. 특히 본 실험의 경우 높은 수온 민감도는 대조구(즉, 15–20°C)와 BEA(즉, 20–25°C)간에 수온 구간의 차이를 보였으며 Oh (2024)와 유사한 결과를 보였다. 이것은 바이오로거 체외 부착에 따른 생리적 적응 정도는 어종별에 따라 그 수온 구간은 달라질 수 있어 향후 바이오로거 부착에 따른 장단기 분석에 따른 생리적 영향 파악이 필요하다.

본 실험 결과 수온은 조피볼락의 대사 에너지 소비율에 직접적인 영향을 미쳤으며, 이전의 연구 결과(Oh et al., 2007)와 유사하였다. Oh et al. (2007)은 수온 15°C에서 25°C로 상승 시 조

피볼락 치어와 미성어의 일간 평균 대사 에너지 소비율은 각각 282.9–576.3 kJ kg⁻¹ d⁻¹와 124.3–224.1 kJ kg⁻¹ d⁻¹를 보고하여 약 1.8–2.0배 증가하였고, 본 실험에서 나타난 대사 에너지 소비율(즉, 18.2–46.8 kJ kg⁻¹ d⁻¹) 범위 및 증가 비율(즉, 2.3–2.6배)로 볼 때 수온 상승이 에너지 비용 증가의 주 원인임을 알 수 있다. 하지만 절대 값의 차이는 앞서 언급한 바와 같이 개체 크기 차이에 기인한 것으로 사료된다. 이와 같은 에너지 소비율에 대한 정보는 양식장 등에서 생물원격측정 시 대상 생물의 에너지 수지(Adams and Breck, 1990) 및 생체역학 모델 구축(Bartell et al., 1986) 등에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 바이오로거 부착에 따른 조피볼락의 대사 에너지 소비율은 차이를 보이지 않아 앞선 넙치(Lee et al., 2023)와 점농어(Oh, 2024)와는 차이를 보였지만, 어종별 생태·생리적 차이에 의한 것으로 생각되며, 조피볼락의 경우 넙치와 점농어에 비해 유의한 생리적 영향이 없는 것을 감안하면 생물원격측정에 보다 유리한 것으로 사료된다. 많은 생물원격측정 연구가 1 m 이상의 대형 개체(Brown et al., 2013; Chittenden et al., 2013; Schabetsberger et al., 2015)를 대상으로 이루어진 반면, 본 실험 결과 조피볼락과 같이 소형 개체이면서 상업적으로 중요한 어종을 대상으로 바이오로거 활용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과에서 본 실험 조건에서 바이오로거 체외 부착은 조피볼락의 OCR 및 대사 에너지 소비율에 영향을 미치지 않았으며, 향후 바이오로거를 활용한 조피볼락의 생물원격측정 연구를 위한 사전 생리 영향 파악을 위한 대사 반응의 정량적 정보를 제공한다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No. 20203030020080, 해상풍력 단지 해양공간 환경 영향 분석 및 데이터베이스 구축, PN91870)으로 이루어진 연구입니다. 실험 진행을 도와주신 정유경, 박혜미 선생님께 감사드립니다.

References

- Adams SM and Breck JE. 1990. Bioenergetics. In: Methods for Fish Biology. Schreck CB and Moyle PB, eds. American Fisheries Society, Bethesda, MA, U.S.A. 389-415. <https://doi.org/10.47886/9780913235584>.
- Bartell SM, Breck JE, Gardner RH and Brenket AL. 1986. Individual parameter perturbation and error analysis of fish bioenergetics models. *Can J Fish Aquat Sci* 43, 160-168. <https://doi.org/10.1139/f86-018>.
- Brett JR and Groves TDD. 1979. Physiological energetics. In: Fish Physiology. Vol 8. Bioenergetics and Growth. Hoar WS, Randall DJ and Brett JR, eds. Academic Press, New York, U.S.A., 279-352.
- Brown J, Brickle P and Scott BE. 2013. Investigating move-

- ments and behavior of Patagonian toothfish (*Dissostichus eleginoides* Smitt 1898) around the Falkland Islands using archival tags satellite linked. *J Exp Mar Biol Ecol* 443, 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.02.029>.
- Chittenden CM, Ådlandsvik B, Pedersen OP, Righton D and Rikardsen AH. 2013. Testing a model to track fish migrations in polar regions using pop-up satellite archival tags. *Fish Oceanogr* 22, 1-13. <https://doi.org/10.1111/fog.12000>.
- Cooke SJ, Midwood JD, Thiem JD, Klimley P, Lucas MC, Thorstad EB, Eiler J, Holbrook C and Ebner BC. 2013. Tracking animals in freshwater with electronic tags: Past, present and future. *Anim Biotelemetry* 1, 5. <https://doi.org/10.1186/2050-3385-1-5>.
- Fry FEJ. 1971. The effect of environmental factors on the physiology of fish. In: *Fish Physiology*. Hoar WS and Randall DJ, eds. Academic Press, New York, U.S.A., 1-98. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(08\)60146-6](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(08)60146-6).
- Hussey NE, Kessel ST, Aarestrup K, Cooke SJ, Cowley PD, Fisk AT, Harcourt RG, Holland KN, Iverson SJ, Kocik JF, Mills Flemming JE and Whoriskey FG. 2015. Aquatic animal telemetry: A panoramic window into the underwater world. *Science* 348, 1255642. <https://doi.org/10.1126/science.1255642>.
- Jepsen N, Thorstad EB, Havn T and Lucas MC. 2015. The use of external electronic tags on fish: An evaluation of tag retention and tagging effects. *Anim Biotelemetry* 3, 49. <https://doi.org/10.1186/s40317-015-0086-z>.
- 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>.
- Kang PJ, Lee GS and Oh SY. 2024. Blood property and biollogger attachment efficiency of spotted sea bass *Lateolabrax maculatus* depending on external biollogger attachment methods. *J Mar Life Sci* 9, 22-32. <https://dx.doi.org/10.23005/ksmls.2024.9.1.22>.
- Lee GS, Kang PJ, Park HM and Oh SY. 2023. External attachment of pop-up satellite archival tag (PSAT) and water temperature affect oxygen consumption rate of the olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Korean J Fish Aquat Sci* 56, 660-666. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0660>.
- Lynch SD, Marcek BJ, Marshall HM, Bushnell PG, Bernal D and Brill RW. 2017. The effects of pop-up satellite archival tags (PSAT) on the metabolic rate and swimming kinematics of juvenile sandbar shark *Carcharhinus plumbeus*. *Fish Res* 186, 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.08.013>.
- Macauley G, Warren-Myers F, Barrett LT, Oppedal F, Fore M and Dempster T. 2021. Tag use to monitor fish behaviour in aquaculture: A review of benefits, problems and solutions. *Rev Aquac* 13, 1565-1582. <https://doi.org/10.1111/raq.12534>.
- McGuigan CJ, Schlenker LS, Stieglitz JD, Benetti DD and Grosell M. 2021. Quantifying the effects of pop-up satellite archival tags on the swimming performance and behavior of young-adult mahi-mahi (*Coryphaena hippurus*). *Can J Fish Aquat Sci* 78, 32-39. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2020-0030>.
- Mellas EJ and Haynes JM. 1985. Swimming performance and behavior of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) and white perch (*Morone americana*): Effects of attaching telemetry transmitters. *Can J Fish Aquat Sci* 42, 488-493. <https://doi.org/10.1139/f85-066>.
- Methling C, Tudorache C, Skov PV and Steffensen JF. 2011. Pop up satellite tags impair swimming performance and energetics of the European eel (*Anguilla anguilla*). *PLoS One* 6, e20797. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020797>.
- Oh SY. 2023. Effect of bio-logger attachment location on blood characteristics and bio-logger attachment efficiency in spotted sea bass *Lateolabrax maculatus*. *Korean J Fish Aquat Sci* 56, 651-659. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0651>.
- Oh SY. 2024. Influence of biollogger attachment method and water temperature on oxygen consumption of spotted sea bass *Lateolabrax maculatus*. *Korean J Fish Aquat Sci* 57, 709-719. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0709>.
- Oh SY and Jeong YK. 2021. Effects of external pop-up satellite archival tag (PSAT) tagging method on blood indices and PSAT attachment efficiency of yellowtail *Seriola quinqueradiata*. *Korean J Fish Aquat Sci* 54, 38-45. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0038>.
- Oh SY, Maeng JH and Kang HS. 2024. Effect of biollogger attachment on the stress and health state of the spotted sea bass *Lateolabrax maculatus*. *J Mar Sci Eng* 12, 793. <https://doi.org/10.3390/jmse12050793>.
- 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 schlegeli*. *Korean J Ichthyol* 19, 1-7.
- Park J and Oh SY. 2023. A review on fish bio-logging for biotelemetry applications. *Fish Aquat Sci* 26, 698-707. <https://doi.org/10.47853/FAS.2023.e62>.
- Park J, Lee WY, Bae S and Oh SY. 2024. Horizontal and vertical movement patterns of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) in the east sea of Korea. *Fish Aquat Sci* 27, 76-86. <https://doi.org/10.47853/FAS.2024.e9>.
- Park JW and Oh SY. 2018. Physiological responses of marine fish to external attachment of pop-up satellite archival tag (PSAT). *Ocean Polar Res* 40, 169-176. <https://doi.org/10.4217/OPR.2018.40.3.169>.
- Park KD, Kang YJ, Huh SH, Kwak SN, Kim HW and Lee HW. 2007. Feeding ecology of *Sebastes schlegeli* in the Tongyeong marine ranching area. *J Kor Fish Soc* 40, 308-314. <https://doi.org/10.5657/kfas.2007.40.5.308>.
- Pérez-Robles J, Re AD, Giffard-Mena I and Díaz F. 2012. Interactive effects of salinity on oxygen consumption, ammoni-

- um excretion, osmoregulation and Na⁺/K⁺-ATPase expression in the bullseye puffer (*Sphoeroides annulatus*, Jenyns 1842). *Aquac Res* 43, 1372-1383. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02940.x>.
- Perry RW, Adams NS and Rondorf DW. 2001. Buoyancy compensation of juvenile Chinook salmon implanted with two different size dummy transmitters. *Trans Am Fish Soc* 130, 46-52. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(2001\)130%3C0046:BCOJCS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2001)130%3C0046:BCOJCS%3E2.0.CO;2).
- Pirozzi I and Booth MA. 2009. The effect of temperature and body weight on the routine metabolic rate and postprandial metabolic response in mullet, *Argyrosomus japonicus*. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 154, 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2009.05.010>.
- Schabetsberger R, Økland F, Kalfatak D, Sichrowsky U, Tambets M, Aarestrup K, Gubili C, Sarginson J, Boufana B, Jehle R, Dall'Olmo G, Miller MJ, Scheck A, Kaiser R and Quartly G. 2015. Genetic and migratory evidence for sympatric spawning of tropical Pacific eels from Vanuatu. *Mar Ecol Prog Ser* 521, 171-187. <https://doi.org/10.3354/meps11138>.
- Song M, Gong D, Cui X, Yu X, Xu P, Xing B and Yin L. 2023. Study on feeding behavior and biological sound of *Sebasts schlegelii*. *Front Mar Sci* 10, 1131522. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1131522>.
- Smircich MG and Kelly JT. 2014. Extending the 2% rule: The effects of heavy internal tags on stress physiology, swimming performance, and growth in brook trout. *Anim Biotelemetry* 2, 16. <https://doi.org/10.1186/2050-3385-2-16>.
- Steinhausen MF, Andersen NG and Steffensen JF. 2006. The effect of external dummy transmitters on oxygen consumption and performance of swimming Atlantic cod. *J Fish Biol* 69, 951-956. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2006.01143.x>.
- Thorstad EB, Økland F and Finstad B. 2000. Effects of telemetry transmitters on swimming performance of adult Atlantic salmon. *J Fish Biol* 57, 531-535. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2000.tb02192.x>.
- Thorstad EB, Rikardsen, AH, Alp A and Økland F. 2013. The use of electronic tags in fish research - An overview of fish telemetry methods. *Turkish J Fish Aquat Sci* 13, 881-896. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v13_5_13.
- Tudorache C, Burgerhout E, Brittijn S and van den Thillart G. 2014. The effect of drag and attachment site of external tags on swimming eels: Experimental quantification and evaluation tool. *PLoS One* 9, e112280. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112280>.
- 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>.
- Yamada, U, Shirai S, Irie T, Tokimura M, Deng S, Zheng Y, Li C, Kim YU and Kim YS. 1995. Names and illustrations of fishes from the East China Sea and the Yellow Sea: Japanese, Chinese, Korean. Overseas Fishery Cooperation Foundation, Tokyo, Japan, 1-288.