

점농어(*Lateolabrax maculatus*) 산소 소비율에 미치는 바이오로거 부착 방법과 수온의 영향

오승용*

한국해양과학기술원 해양생명자원연구부

Influence of Biologger Attachment Method and Water Temperature on Oxygen Consumption of Spotted Sea Bass *Lateolabrax maculatus*

Sung-Yong Oh*

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

An experiment was conducted to examine the effect of four different external biologger attachment methods: no attachment (control), anchor attachment (AA), monofilament attachment (MA), and silicon tube attachment (SA); at three different water temperatures (15, 20, and 25°C) on the oxygen consumption rate (OCR) of spotted sea bass (mean body weight 2,175.0 g). Fish OCRs were significantly affected by the biologger attachment method ($P<0.001$), water temperature ($P<0.001$), and their interaction ($P<0.001$). Fish OCRs increased significantly with increasing in water temperature, independent of the biologger attachment method. The OCRs of AA, MA, and SA were considerably higher than that of the control in 20°C. At 25°C, the OCR of AA was significantly higher than the other attachment methods, but there was no difference among the control, MA, and SA. The Q_{10} values of AA, MA, and SA were highest at water temperatures ranging from 15 to 20°C. The metabolic energy consumption rate (MEC) of fish increased with increasing water temperature in all experimental groups, and the MEC of AA was the highest at all water temperatures. These results indicated that SA is an appropriate biologger attachment method for spotted sea bass under our experimental condition.

Keywords: Biotelemetry, Metabolic cost, Tagging method, Thermal effect

서 론

바이오로거(biologger)를 이용한 생물원격측정(biotelemetry)은 해양 어류의 GIS (geographic information system) 기반 수평, 수직 및 계절적 분포 특성뿐만 아니라 서식 수온 등 다양한 생태적 정보 수집과 더불어 양식 어류의 사육환경 내 행동 패턴 및 연안 지역 해양 개발 과정 중 발생하는 해양생물자원의 반응 패턴 등을 연구하는 주요한 학문 분야이다(Block et al., 1998; Arnold and Dewar, 2001; Bridger and Booth, 2003; Musyl et al., 2011; Lynch et al., 2017; Oh and Jeong, 2021; Lee et al., 2023; Park and Oh, 2023; Park et al., 2024). 생물원격측정에 사용하는 다양한 바이오로거 중 PSAT (pop-up satel-

lite archival tag)는 대형 해양 포유류, 경골 및 판새어류와 같은 해양생물을 대상으로 장시간에 걸친 이동 추적 및 생태학적 특성 연구에 장점을 가지는 tag로서(Stokesbury et al., 2004; Wilson et al., 2006; Graves et al., 2009; Musyl et al., 2011; Park and Oh, 2023; Park et al., 2024), 대상생물에 체외 부착한 PSAT는 프로그램된 일정 시간 후 탈락된 뒤 해수면으로 떠오른 다음 저장된 자료를 ARGOS (advanced research and global observation satellite)로 전송하는 방식으로 운용된다(Schaefer et al., 2007; Hazen et al., 2012; Park and Oh, 2023; Kang et al., 2024; Park et al., 2024). 하지만 이와 같은 PSAT의 체외 부착은 대상 생물 종과 크기에 따라 부정적 영향을 미칠 수 있는 단점이 있다(Grusha and Patterson, 2005; Steinhausen et al.,

*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.2024.0709>

Korean J Fish Aquat Sci 57(6), 709-716, December 2024

Received 29 November 2024; Revised 5 December 2024; Accepted 9 December 2024

저자 직위: 오승용(책임연구원)

2006; Burgerhout et al., 2011; Methling et al., 2011; Lee et al., 2023; Oh, 2023; Kang et al., 2024). 바이오로거의 체외 부착에 따른 부정적 영향은 참돔(*Pagrus major*)와 조피볼락(*Sebastes schlegelii*; Park and Oh, 2018), 방어(*Seriola quinqueradiata*; Oh and Jeong, 2021), 뱀장어(*Anguilla anguilla*; Burgerhout et al., 2011; Methling et al., 2011), 대서양 대구(*Gadus morhua*; Steinhausen et al., 2006) 및 넙치(*Paralichthys olivaceus*; Lee et al., 2023) 등 다양한 어종에서 체내 혈액 성분, 스트레스 호르몬 및 에너지 소비에 관해 보고된 바 있어, 바이오로거 활용한 생물원격측정 연구를 위해서는 이에 대한 사전 연구가 요구된다.

산소 소비율(oxygen consumption rate, OCR)은 수중의 용존산소 농도를 비교적 쉽게 높은 신뢰성으로 측정할 수 있기 때문에 어류의 대사율을 측정하는 일반적인 방법으로 간주된다(Turker, 2011). 이에 이전 많은 연구에서 다양한 어종들을 대상으로 주변 환경 변화에 따른 스트레스 및 항상성 유지 등에 필요한 체내 생리적 반응 정도의 정량화 지표로서뿐만 아니라 양식 어류의 최적 성장 및 먹이 섭취 등을 결정하기 위한 bioenergetic model 구축에 필수 인자로 OCR을 활용하고 있다(Jobling, 1981; Dube and Hosetti, 2010; Cech Jr and Brauner, 2011; Lynch et al., 2017; Leonard and Skov, 2022).

특히, OCR은 바이오로거 체외 부착과 같은 외부 인자의 영향에 따른 어류의 생리적 영향 및 energetic 정도를 파악하기 위한 한 방법으로도 이용되고 있다(Steinhausen et al., 2006; Burgerhout et al., 2011; Methling et al., 2011; McGuigan et al., 2021; Lee et al., 2023). 이와 더불어 수온은 어류의 체내 생리반응과 에너지 소비에 직접적인 영향을 미치는 가장 중요한 외부 환경인자로서, 어류 개체의 대사 범위를 나타낼 수 있어(Fry, 1947), 바이오로거 체외 부착에 따른 각 개체의 대사 생리적 영향을 파악하기 위해서 고려해야 할 주요 인자 중 하나이다(Lee et al., 2023).

점농어(*Lateolabrax maculatus*)는 대표적 광염성 양식어종이자 우리나라 연안 지역에 분포하는 주요 어족자원으로서 바이오로거를 활용한 생물원격측정 연구를 통한 다양한 지리생태학적 정보 수집이 요구되는 자원이지만(Oh, 2023), 이에 대한 연구는 부족한 실정이다. 점농어를 대상으로 바이오로거 활용을 위한 바이오로거 최적 부착 위치(Oh, 2023) 및 체외 부착방법(Kang et al., 2024)에 대한 보고가 있었지만, 바이오로거 부착에 따른 생리적 대사비용, 즉 OCR 변화 연구는 이루어진 바가 없다. 특히, 바이오로거 부착방법은 대상어류에 대한 부착효율뿐만 아니라 스트레스를 유발할 수 있어(Kang et al., 2024), 이에 대한 생리적 영향 파악이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 바이오로거 부착방법 및 수온에 따른 점농어의 OCR 변화와 이에 따른 에너지 비용의 조사를 통해 바이오로거 부착에 따른 체내 생리반응의 정량화와 영향 정도를 파악하기 위한 기초 자료를 수집하였다.

재료 및 방법

실험어 및 순치

실험어는 실내 순환여과식 시스템 내 사육수조(1.5×1.5×0.6 m)에서 사육 중인 평균 무게와 전장이 각각 2,175.0±298.6 g (mean±SD)와 63.8±2.6 cm인 점농어 12마리를 사용하였다. 점농어는 일간 어체중의 1.0–1.5% 비율로 배합사료(crude protein content 51.0%; Aller Aqua Co., Christiansfeld, Denmark)를 공급하였고, 사료 섭취 영향을 배제하기 위해 실험 시작 전 2일간 절식시켰다. 순치기간 동안 수온은 15°C로 유지하였고 염분과 pH는 각각 34.3–34.6 psu와 7.6–8.0 범위이었다.

실험 장치

점농어의 OCR 측정은 공급탱크(head tank), 저수탱크(reservoir), 호흡실(respiration chamber), 용존산소 측정실(DO sensor chamber), 유량계(flowmeter) 그리고 multi data logger로 구성된 폐쇄 순환형 호흡 측정 시스템을 사용하였다(Oh et al., 2014). 실험 기간 동안 호흡실을 통과하는 유량은 최소 0.2 mg/L 이상의 용존산소 농도 차이가 유지되도록 조절하였으며(Oh et al., 2020), 시스템 내 설치된 히터(유량 2 kW)와 냉각기(DA-2000B; Daeil, Busan, Korea)를 통해 각 실험 수온을 유지하였다.

실험 방법

실험 수온은 15°C, 20°C 및 25°C로 설정하였으며, 호흡 측정 시스템에 수용하기 전 10일 이상 15°C 조건에서 순치시켰다. 바이오로거 체외 부착방법은 Kang et al. (2024)에서 보고한 방법과 동일하게 앵커 부착구(anchor attachment, AA), 모노필라멘트 부착구(monofilament attachment, MA) 그리고 실리콘 튜브 부착구(silicon tube attachment, SA) 및 미부착구(control)의 4가지 실험구로 설정하였다. 부착에 사용한 바이오로거 PSAT는 이전 연구(Lee et al., 2023; Kang et al., 2024)에서 이용된 무게 40 g과 길이 127 mm의 dummy mr (mark report) PAT (Wildlife Computers Inc., Redmond, WA, USA)를 사용하였다. 실험구 AA, MA 및 SA의 anchor (무게 0.46 g, 길이 20.2 mm), monofilament (두께 0.64 mm) 및 silicon tube (내경 2.64 mm, 외경 4.24 mm)를 활용한 dummy mrPAT 부착방법은 Kang et al. (2024)의 방법과 동일하였지만, silicon tube 방식의 경우 silicon tube 내 cable tie 대신에 monofilament를 삽입하여 dummy mrPAT와 연결하여 부착하였다(Lee et al., 2023; Fig. 1). 모든 실험어는 핸들링 및 dummy mrPAT 부착에 따른 스트레스 저감을 위해 2-phenoxyethanol (Junsei Chemical Co., Ltd., Koshigaya, Japan) 150 mg/L로 마취시킨(Oh, 2023) 다음 각 부착방법으로 바이오로거를 부착 후 항생제 oxytetracycline 200 mg/L 농도의 해수에서 1분간 약욕한 다음(Oh and Jeong, 2021; Lee et al., 2023) 최초 실험 수온인 15°C로 조절된 폐쇄

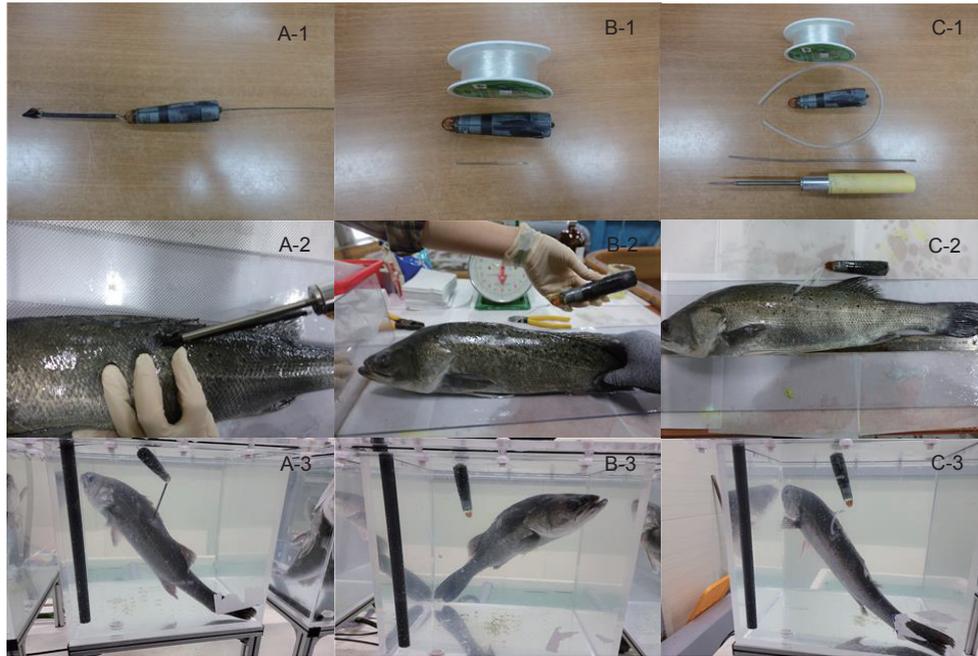


Fig. 1. Measurement of oxygen consumption rate of spotted sea bass *Lateolabrax maculatus* exposed to three water temperatures (15, 20, and 25°C) and three different biologger attachment methods. Anchor attachment type, A-1–A-3; Monofilament attachment type, B-1–B-3; Silicon tube attachment type, C-1–C-3.

순환형 호흡 측정 시스템 내 호흡실에 1개체씩, 3반복 수용하였다. 점농어의 OCR은 최초 호흡실에 수용한 후 handling에 의한 영향 배제와 실험 수온에 반응시키기 위해 24시간 동안 안정시킨 후 측정하였다. 각 실험 수온은 24시간 간격으로 변경하였다. 즉, 최초 실험 수온(즉, 15°C)에 반응시킨 후 다음 단계의 수온(즉, 15°C→20°C→25°C)로 시간당 1.0°C 간격으로 상승시켜 조절한 뒤 최소 12시간 이상 순치시킨 후 다음 단계의 수온으로 변경하기 직전 6시간 동안 측정하였다. 호흡실에 유입되는 물은 충분한 용존산소 농도를 유지하기 위해 저수조 내 에어레이션 을 통한 90% 이상의 산소 포화도를 유지시켰다. 바이오로거 부착방법 및 수온에 따른 점농어의 OCR은 Jobling (1982)이 보고한 아래와 같은 식을 이용하여 구하였다.

$$OCR (mg O_2 kg^{-1} h^{-1}) = (C_i - C_o) \times Q / W$$

C_i=어류 호흡실 유입수의 용존산소 농도(mg/L)

C_o=어류 호흡실 배출수의 용존산소 농도(mg/L)

Q=어류 호흡실을 지나가는 시간당 유량(L/h)

W=호흡실 수용 어체중(kg)

바이오로거 부착구(즉, AA, MA 및 SA)와 대조구의 수온별 OCR은 반복구별로 pooling 후 각 평균값을 data unit으로 사용하였고, 수온 변화에 따른 대사 반응율(Q₁₀)은 아래의 식을 이용하여 구하였다(Wuenschel et al., 2005).

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

여기서, R₁과 R₂는 수온 T₁과 T₂일 때의 평균 OCR

수온 및 바이오로거 부착방법에 따른 점농어의 에너지 소비율은 Brett and Groves (1979)이 제시한 에너지 전환 계수(1 mg O₂=13.598 J=3.25 cal)를 사용하여 구하였다.

통계 분석

모든 실험 결과는 통계 프로그램 SPSS 11.5 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 사용하여 실험구 사이의 분산분석(ANOVA)을 실시하였으며, 유의한 차이가 있을 경우 Tukey's multiple range test로 95% 신뢰수준에서 평균간 유의성을 검정하였다.

결 과

바이오로거 부착방법 및 수온에 따른 점농어의 평균 OCR은 Table 1에 나타내었다. 바이오로거 부착방법에 상관없이 수온 상승에 따라 점농어의 OCR은 유의하게 증가하였다(P<0.001). 수온(T)에 따른 점농어의 평균 OCR은 대조구의 경우 OCR=-7.9570+4.0698T (r²=0.90, P<0.0001)이었고, AA, MA 그리고 SA 실험구의 경우 각각 OCR=-6.7259+4.7970T (r²=0.93, P<0.0001), OCR=-10.0704+4.5654T (r²=0.96, P<0.0001), 그리고 OCR=18.2339+3.1601T (r²=0.91, P<0.0001)의 회귀식

Table 1. Oxygen consumption rate (OCR) of spotted sea bass *Lateolabrax maculatus* exposed to four different biologger attachment methods (BAM) and three different water temperatures (T)

BAM T (°C)	Control	AA	MA	SA	
	mg O ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹				
15	56.5±0.60 ^{c(a)**}	62.5±0.75 ^{c(a)}	56.4±0.66 ^{c(a)}	64.2±0.73 ^{c(a)}	
20	66.5±0.45 ^{b(c)}	94.8±0.35 ^{b(a)}	85.2±0.60 ^{b(b)}	84.4±0.48 ^{b(b)}	
25	97.2±0.38 ^{a(b)}	110.4±0.61 ^{a(a)}	102.1±0.29 ^{a(b)}	95.8±0.69 ^{a(b)}	
Regression	OCR=-7.9570+4.0698T (r ² =0.90, P<0.0001)	OCR=-6.7259+4.7970T (r ² =0.93, P<0.0001)	OCR=-10.0704+4.5654T (r ² =0.96, P<0.0001)	OCR=18.2339+3.1601T (r ² =0.91, P<0.0001)	
Two-way ANOVA					
	d.f.	SS	MS	F	P
BAM	3	1,119.982	373.327	35.813	<0.001
T	2	10,359.117	5,179.558	496.866	<0.001
BAM×T	6	665.185	110.864	10.635	<0.001
Error	12	250.187	10.424		

Control, Non-tagging; AA, Anchor attachment; MA, Monofilament attachment; SA, Silicon tube attachment. *Values (mean±SE) with different superscripts within the same column are significantly different (n=3, P<0.001). **Values (mean±SE) with different superscripts in parenthesis within the same row are significantly different (n=3, P<0.001).

을 보였다. 수온 15°C의 경우 대조구와 바이오로거 부착구(즉, AA, MA, 그리고 SA) 간의 평균 OCR은 유의한 차이를 보이지 않았다(P>0.05). 수온 20°C의 경우 AA 실험구가 가장 높고 대조구가 가장 낮은 평균 OCR을 보였지만(P<0.001), MA와 SA 실험구 간에는 차이가 없었다(P>0.05). 수온 25°C의 경우 AA 실험구의 평균 OCR이 대조구, MA 및 SA 실험구의 평균 OCR 보다 유의하게 높았지만(P<0.001), 대조구, MA 및 SA 실험구 간에는 차이가 없었다(P>0.05). 이상의 결과에서 바이오로거 부착방법(P<0.001), 수온(P<0.001) 및 두 인자의 상호작용(P<0.001) 모두 점농어의 OCR에 유의한 영향을 미쳤다 (Table 1).

바이오로거 부착방법 및 수온에 따른 점농어의 Q₁₀ 값을 Table 2에 나타내었다. 바이오로거 부착구(즉, AA, MA 그리고 SA)의 경우 수온 15–20°C 구간에서 가장 높고 20–25°C 구간에서 가장 낮은 Q₁₀ 값을 보였지만, 대조구는 반대의 경향을 보였다.

Table 2. Q₁₀ values of the spotted sea bass *Lateolabrax maculatus* exposed to four different biologger attachment methods for different water temperature ranges

Group	Temperature interval (°C)		
	15–20	20–25	15–25
Control	1.39	2.14	1.72
AA	2.40	1.36	1.78
MA	2.29	1.44	1.82
SA	1.74	1.29	1.49

Control, Non-tagging; AA, Anchor attachment; MA, Monofilament attachment; SA, Silicon tube attachment.

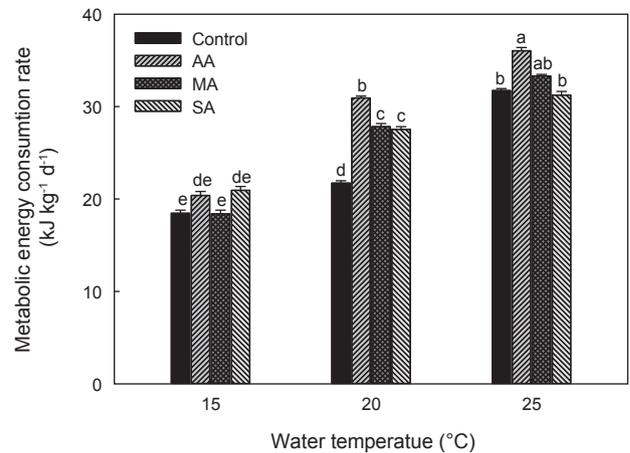


Fig. 2. Metabolic energy consumption rate of spotted sea bass *Lateolabrax maculatus* according to four different biologger attachment methods and three water temperatures (15, 20, and 25°C). Control, Non-tagging; AA, Anchor attachment; MA, Monofilament attachment; SA, Silicon tube attachment.

실험이 이루어진 15–25°C 구간의 대조구, AA, MA 및 SA 실험구의 Q₁₀ 값은 각각 1.72, 1.78, 1.82 그리고 1.49로 SA 실험구가 가장 낮게 나타났다.

바이오로거 부착방법 및 수온에 따른 점농어의 일간 대사에너지 소비율은 Fig. 2에 나타내었다. 바이오로거 부착방법에 상관없이 수온 상승에 따라 대사에너지 소비율은 증가하였다. 대조구의 경우 15°C에서 20°C로 상승할 경우 약 17.7% 대사에너지 소비율이 증가하였고, 20°C에서 25°C로 상승할 경우 약

46.1%, 그리고 15°C에서 25°C로 상승할 경우 약 72.0% 대사에너지 소비율이 증가하였다. 수온 15°C에서 20°C로, 20°C에서 25°C로, 그리고 15°C에서 25°C로 상승할 경우 실험구 AA의 경우 각각 51.7, 16.5 그리고 76.8% 증가하였고, MA와 SA 실험구의 경우 각각 51.1, 19.7 및 80.9%와 31.5, 13.5 및 49.2% 대사에너지 소비율이 증가하였다. 수온 15°C의 경우 대조구와 바이오로저 부착구 간의 대사에너지 소비율은 차이가 없었지만 ($P>0.05$), 20°C에서는 AA, MA 그리고 SA 실험구가 대조구 보다 각각 약 42.4, 28.1 및 26.8% 대사에너지 소비율이 증가하였다 ($P<0.05$). 수온 25°C에서는 AA 실험구만이 대조구와 SA 실험구 보다 각각 13.6%와 15.3% 높은 대사에너지 소비율을 보였고 ($P<0.05$), 대조구, MA 그리고 SA 실험구 간에는 차이가 없었다 ($P>0.05$).

고찰

본 실험 결과 수온과 바이오로저 체외 부착방법 및 두 인자의 상호작용 모두가 점농어의 OCR에 영향을 미치는 것으로 나타나 이전 연구 보고와 일치하였다 (Lee et al., 2023). 바이오로저 부착방법의 영향은 점농어의 대사율에 다르게 나타났다. 수온 15°C의 경우 바이오로저 부착방법은 점농어의 OCR에 영향을 미치지 않았지만, 수온 20°C와 25°C 경우 대조구에 비해 AA와 MA가 유의한 증가 현상을 보였다. 이것은 수온 상승으로 유발된 점농어의 유영 (swimming) 활동의 증가와 함께 바이오로저 부착으로 생겨난 항력 (drag force) 증가도 수반되어 대사에너지의 소비가 높아진 것으로 생각된다 (Mellas and Haynes, 1985; Burgerhout et al., 2011; Methling et al., 2011; Tudorache et al., 2014). 즉, 바이오로저의 체외 부착은 항력 증가 및 기동성이 감소하는 등 다양한 수생생물의 유영 능력에 유의한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Culik et al., 1993; Watson and Granger, 1998; Wilson et al., 2004; Grusha and Patterson, 2005; Pavlov et al., 2007; Hazekamp et al., 2010; Tudorache et al., 2014). 또한 바이오로저를 부착하기 위해 피부와 근육을 통과하는 nylon wire 등으로 고정하는 방법은 대상 어류의 유영 능력, 운동성 및 행동에 영향을 미칠 수 있다는 이전 연구 (Jellyman and Tsukamoto, 2002; Aarestrup et al., 2009; Methling et al., 2011) 결과를 볼 때, 본 연구에서 이루어진 바이오로저 부착방법 역시 점농어의 유영 능력 등에 영향을 미쳐 OCR 증가 원인으로 보인다. 하지만, 본 실험 결과 SA의 OCR은 20°C의 경우만 제외하고 대조구와 유의한 차이가 없고 AA 및 MA에 비해 유의하게 낮거나 낮은 경향을 보였다. 이것은 이전 연구에서 보고된 바이오로저 체외부착에 따른 대상생물의 스트레스 유발과 함께 부착부위 감염 및 상처 확대 등 다양한 체내 생리적 영향과 체외 기계적 외상이 원인일 수 있다 (Park and Oh, 2018; Oh and Jung, 2021; Oh, 2023; Kang et al., 2024; Oh et al., 2024). Kang et al. (2024)은 본 실험과 동일하게 평균 무게 2,630.8 g의 점농어를 대상으로 anchor (즉, 본 실험의 AA), monofilament (MA), 그

리고 silicon tube (SA) 방식으로 바이오로저를 부착한 후 1-84 일 사이의 혈액성상을 조사한 결과 anchor 및 monofilament 부착구에서 glutamic oxaloacetic transaminase, hemoglobin, glucose, total cholesterol 및 cortisol 농도가 바이오로저 미부착구 보다 높게 나타났지만, silicon tube 부착구에서는 미부착구와 유의한 차이가 없다고 보고하였다. 즉, 바이오로저 부착으로 유발된 스트레스 반응은 어류의 항상성 유지에 영향을 미치게 되고 이로 인한 에너지 비용의 증가에 따른 대사율 증가현상을 유추해 볼 때, SA가 다른 부착방법에 비해 스트레스 유발 가능성이 가장 낮다는 것을 알 수 있다. 이로 인해 AA 및 MA에 비해 SA가 가장 낮은 OCR을 나타낸 것으로 보인다. Tudorache et al. (2014)은 본 연구에서 이루어진 근육층을 통과하는 바이오로저 부착방법 대신 피부에 부착하는 방법을 통해 유영 능력에 미치는 영향을 감소시킬 수 있다는 것을 볼 때, 향후 부착방법별 체내 스트레스 반응, 유영 능력 및 OCR의 상관관계에 대한 연구가 필요하다.

수온은 어류 체내 반응에 가장 직접적인 영향을 미치는 외부 환경요인으로서, 수온 상승으로 인한 체내 생리적 활성 반응의 증가는 항상성 유지를 위한 대사율 증가를 유발하고 결과적으로 어류의 OCR 증가로 나타난다 (Oh et al., 2006; Song et al., 2024). Oh et al. (2006)은 평균 5.5 g의 점농어를 대상으로 수온 15, 20, 그리고 25°C와 염분 0, 15, 및 30 psu 조건에서 OCR을 측정할 결과 328.8-659.9 mg O₂ kg⁻¹ h⁻¹의 범위를 보여, 수온 15°C에 비해 20°C와 25°C의 OCR은 약 1.3-2.0배 증가하는 결과를 보여, 본 실험의 1.2-1.8배 증가와 유사하였다. 하지만 본 실험의 OCR 범위 (즉, 56.4-110.4 mg O₂ kg⁻¹ h⁻¹)와의 차이는 실험 크기의 영향에 기인한 것으로, 이전 실험 (Oh et al., 2006)에 비해 약 350배 이상 크기 (즉, 평균 2,100 g 이상)로, 일반적으로 체중이 증가함에 따라 단위 체중당 OCR은 감소하기 때문이다 (Cai and Summerfelt, 1992; Oh et al., 2012). 어류의 수온 상승에 따른 OCR 반응은 일반적으로 서식수온 범위 내에서 직선적 (즉, OCR=a+bT, T=수온)으로 증가하며 (Oh et al., 2020; Lee et al., 2023; Song et al., 2024), 본 실험 결과도 일치하였다. 하지만 대조구, AA, MA, 그리고 SA의 수온에 따른 OCR 상승 기울기 (즉, b)의 경우 각각 4.0698, 4.7970, 4.5654, 그리고 3.1601로 나타나 바이오로저 부착방법이 수온 상승으로 유발되는 대사반응 정도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. Oh et al. (2023) 역시 평균 2,281.7 g의 넙치를 대상으로 수온 15-25°C 범위에서 바이오로저 부착 여부에 따른 OCR을 측정할 결과 부착구와 미부착구의 OCR 상승 기울기 (b)는 각각 4.0843과 2.6793으로 나타나 본 실험과 유사하게 바이오로저 부착이 수온 상승에 따른 대사반응 정도는 상이하다는 결과를 보고하였다. 하지만 수온 증가에 따른 바이오로저 부착구 (단, SA 제외)의 OCR 증가 비율이 미부착구 (즉, 대조구) 보다 높은 것은 바이오로저 부착에 따른 항력 증가, 체외 손상 및 스트레스 반응 등과 함께 수온 상승의 복합영향이 반영된 것으로 생

각되며, 바이오로거 부착방법 및 수온의 상호작용 역시 점농어의 OCR에 영향을 미친다는 결과와 일치한다(Table 1).

수서생물의 수온 변동에 따른 체내 민감성(Spanopoulos-Hernández et al., 2005)을 나타내는 Q_{10} 값의 경우 1.29–2.40의 본 실험 결과와 동일 어종(평균 5.5 g)을 대상으로 동일 수온 구간에서 이루어진 이전 결과 1.63–2.26 (Oh et al., 2006)와 차이를 보인 것은 개체 크기 차이와 실험 방법에 기인한 것으로 보인다. 넙치(*P. olivaceus*)를 대상으로 silicon tube를 활용한 mrPAT를 부착구의 Q_{10} 값은 본 실험과 동일하게 15–20°C 구간에서 가장 높았지만, 실험이 이루어진 15–25°C 모든 구간에서 바이오로거 부착구가 미부착구 보다 높은 Q_{10} 값(Lee et al., 2023)을 보여 본 실험과 차이를 보였다. 이것은 어종, 크기 및 부착방법 등의 차이에 기인한 것으로, 향후 다양한 조건별 대상 어종의 민감성 파악이 요구된다.

바이오로거 부착 및 수온에 따른 점농어의 에너지 소비율은 수온 상승에 따라 증가하였으며 이전 결과와 일치하였다(Oh et al., 2006). Oh et al. (2006)은 본 실험과 동일한 수온 조건에서 점농어 치어를 대상으로 일간 대사에너지 소비율 224.6–450.7 kJ kg⁻¹ d⁻¹를 보고하여 본 실험의 18.4–36.0 kJ kg⁻¹ d⁻¹과 차이를 보였고, 수온 15°C에서 25°C로 상승할 경우 15°C에 비해 약 91.8–98.1% 증가 비율(Oh et al., 2006)은 본 실험의 49.2–80.9%에 비해 높게 나타났다. 이것은 동일 어종이지만 대상으로 한 크기와 실험 방법의 차이에 의한 것으로 생각된다. 바이오로거 부착방법 및 수온에 따른 가장 높은 대사에너지 소비율은 20°C 조건의 AA에서 미부착구에 비해 가장 높은 42.4% 이었고, MA 28.1% 그리고 SA 26.8% 순이었다. Palstra et al. (2007) 역시 바이오로거 부착 개체의 에너지 소비율이 증가한다는 결과를 볼 때, 바이오로거 부착에 따른 항력 증가가 원인으로 판단되지만, 오히려 바이오로거 부착이 유영 능력을 감소시켜 OCR이 감소한다는 보고(McGuigan et al., 2021; Lee et al., 2023)도 있어, 어종별 다양한 조건에서의 바이오로거 부착 영향 연구가 필요하다.

이상의 결과에서 수온, 바이오로거 부착방법 및 두 인자의 상호작용 모두는 점농어의 대사 반응에 유의한 영향을 미치지만, SA 부착방법이 타 부착방법(즉, AA 및 MA)에 비해 가장 영향이 적고 효과적이라는 것을 알 수 있다. 본 결과는 점농어를 대상으로 향후 biotelemetry 연구를 위한 바이오로거 적용 사전 연구로서, 최적 부착방법에 대한 영향 평가를 위한 하나의 방법론과 기초 정보로 활용할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20203030020080, 해상풍력 단지 해양공간 환경 영향 분석 및 데이터베이스 구축, PN91870)으로 이루어진 연구입니다. 본 연구의 진행 및 분석을 도와주신 정유경 연구원께 감사드립니다.

References

- Aarestrup K, Økland F, Hansen MM, Righton D, Gargan P, Castonguay M, Bernatchez L, Howey P, Sparholt H, Pedersen MI and McKinley RS. 2009. Oceanic spawning migration of the European eel (*Anguilla anguilla*). Science 325, 1660. <https://doi.org/10.1126/science.1178120>.
- Arnold G and Dewar H. 2001. Electronic tags in marine fisheries research: A 30-year perspective. In: Electronic Tagging and Tracking in Marine Fisheries. Reviews: Methods and Technologies in Fish Biology and Fisheries, vol 1. Sibert JR and Nielsen JL, eds. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 7-64.
- Brett JR and Groves TDD. 1979. Physiological energetics. In: Bioenergetics and Growth. Fish Physiology, vol. 8. Hoar WH, Randall DJ and Brett JR, eds. Academic Press, New York, NY, U.S.A., 279-352.
- Bridger CJ and Booth RK. 2003. The effects of biotelemetry transmitter presence and attachment procedures on fish physiology and behavior. Rev Fish Sci 11, 13-34. <https://doi.org/10.1080/16226510390856510>.
- Block BA, Dewar H, Farwell C and Prince ED. 1998. A new satellite technology for tracking the movements of Atlantic bluefin tuna. Proc Natl Acad Sci USA 95, 9384-9389. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.16.9384>.
- Burgerhout E, Manabe R, Brittijn SA, Aoyama J, Tsukamoto K and van den Thillart GE. 2011. Dramatic effect of pop-up satellite tags on eel swimming. Naturwissenschaften 98, 631-634. <https://doi.org/10.1007/s00114-011-0805-0>.
- Cai Y and Summerfelt RC. 1992. Effects of temperature and size on oxygen consumption and ammonia excretion by walleye. Aquaculture 104, 127-138. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(92\)90143-9](https://doi.org/10.1016/0044-8486(92)90143-9).
- Cech Jr JJ and Brauner CJ. 2011. Techniques in Whole Animal Respiratory Physiology. Elsevier Inc., Amsterdam, Netherlands. <https://doi.org/10.1016/B978-0-1237-4553-8.00128-3>.
- Culik BM, Wilson RP and Bannasch R. 1993. Flipper-bands on penguins: What is the cost of a life-long commitment?. Mar Ecol Prog Ser 8, 209-214. <https://doi.org/10.3354/meps098209>.
- Dube PN and Hosetti BB. 2010. Respiratory distress and behavioural anomalies of Indian major carp, *Labeo rohita* (Hamilton) exposed to sodium cyanide. Recent Res Sci Tech 2, 42-48.
- Fry FEJ. 1947. Effects of the environment on animal activity. University of Toronto Studies. Biol Ser 55, 5-62.
- Graves JE, Horodysky AZ and Latour RJ. 2009. Use of pop-up satellite archival tag technology to study postrelease survival of and habitat use by estuarine and coastal fishes: An application to striped bass (*Morone saxatilis*). Fish Bull 107, 373-383.

- Grusha DS and Patterson MR. 2005. Quantification of drag and lift imposed by pop-up satellite archival tags and estimation of the metabolic cost to cownose rays (*Rhinoptera bonasus*). *Fish Bull* 103, 63-70.
- Hazen EL, Maxwell SM, Bailey H, Bograd SJ, Hamann M, Gaspar P, Godley BJ and Shillinger GL. 2012. Ontogeny in marine tagging and tracking science: Technologies and data gaps. *Mar Ecol Prog Ser* 457, 221-240. <https://doi.org/10.3354/meps09857>.
- Hazekamp AAH, Mayer R and Osinga N. 2010. Flow simulation along a seal: The impact of an external device. *Eur J Wildl Res* 56, 131-140. <https://doi.org/10.1007/s10344-009-0293-0>.
- Jellyman D and Tsukamoto K. 2002. First use of archival transmitters to track migrating freshwater eels *Anguilla dieffenbachii* at sea. *Marine Ecol Prog Ser* 233, 207-215.
- Jobling M. 1981. Temperature tolerance and the final preferendum-rapid methods for the assessment of optimum growth temperatures. *J Fish Biol* 19, 439-455. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1981.tb05847.x>.
- 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 bi-logger attachment efficiency of spotted sea bass *Lateolabrax maculatus* depending on external bi-logger 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>.
- Leonard JN and Skov PV. 2022. Capacity for thermal adaptation in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): Effects on oxygen uptake and ventilation. *J Therm Biol* 105, 103206. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103206>.
- 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>.
- 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.
- Musyl MK, Domeier ML, Nasby-Lucas N, Brill RW, McNaughton LM, Swimmer JY, Lutcavage MS, Wilson SG, Galuardi B and Liddle JB. 2011. Performance of pop-up satellite archival tags. *Mar Ecol Prog Ser* 433, 1-28. <https://doi.org/10.3354/meps09202>.
- 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, Jang YS, Park HS, Choi YU and Kim CK. 2012. The influence of water temperature and body weight on metabolic rate of olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Ocean Pol Res* 34, 93-99.
- 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, 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. <https://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 Polar Res* 36, 135-143. <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2014.36.2.135>.
- Oh SY, Maeng JH and Kang HS. 2024. Effect of bi-logger 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, Shin CH, Jo JY, Noh CH, Myoung JG and Kim JM. 2006. Effects of water temperature and salinity on the oxygen consumption rate of juvenile spotted sea bass, *Lateolabrax maculatus*. *Korean J Ichthyol* 18, 202-208.
- Palstra AP, Heppener DFM, van Ginneken VJT, Szekely C and van den Thillart GEEJ. 2007. Swimming performance of silver eels is severely impaired by the swim-bladder parasite *Anguillicola crassus*. *J Exp Mar Bio Eco* 352, 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.08.003>.
- 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 J and Oh SY. 2023. A review on fish bio-logging for bio-

- telemetry applications. *Fish Aquat Sci* 26, 698-707. <https://doi.org/10.47853/FAS.2023.e62>.
- Park JW and Oh SY. 2018. Physiological responses of marine fish to external attachment of pop-up satellite archival tag (PSAT). *Ocean Pol Res* 40, 169-176. <https://doi.org/10.4217/OPR.2018.40.3.169>.
- Pavlov VV, Wilson RP and Lucke K. 2007. A new approach to tag design in dolphin telemetry: Computer simulations to minimise deleterious effects. *Deep Sea Res II Top Stud Oceanogr* 54, 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.11.010>.
- Schaefer KM, Fuller DW and Block BA. 2007. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the northeastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data. *Mar Biol* 152, 503-525. <https://doi.org/10.1007/s00227-007-0689-x>.
- Song, M, Lee GS, Kang PJ, Park HY and Oh SY. 2024. Water temperature and salinity affect oxygen consumption in the black sea bream *Acanthopagrus schlegelii*. *Korean J Fish Aquat Sci* 57, 547-553. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0547>.
- 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>.
- 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>.
- Stokesbury MJ, Teo SL, Seitz A, O'Dor RK and Block BA. 2004. Movement of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) as determined by satellite tagging experiments initiated off New England. *Can J Fish Aquat Sci* 61, 1976-1987. <https://doi.org/10.1139/f04-130>.
- 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.
- Turker H. 2011. The effect of water temperature on standard and routine metabolic rate in two different sizes of Nile tilapia. *Kafkas Univ Vet Fak Derg* 17, 575-580.
- Watson KP and Granger RA. 1998. Hydrodynamic effect of a satellite transmitter on a juvenile green turtle (*Chelonia mydas*). *J Exp Biol* 201, 2497-2505. <https://doi.org/10.1242/jeb.201.17.2497>.
- Wilson R, Kreye JM, Lucke K and Urquhart H. 2004. Antennae on transmitters on penguins: Balancing energy budgets on the high wire. *J Exp Biol* 207, 2649-2662. <https://doi.org/10.1242/jeb.01067>.
- Wilson SG, Polovina JJ, Stewart BS and Meekan MG. 2006. Movements of whale sharks *Rhincodon typus* tagged at ningaloo reef, Western Australia. *Mar Biol* 148, 1157-1166. <https://doi.org/10.1007/s00227-005-0153-8>.
- 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>.