

넙치(*Paralichthys olivaceus*) 산소 소비율에 미치는 Pop-up Satellite Archival Tag (PSAT) 체외 부착과 수온의 영향

이근수 · 강필준 · 박혜미 · 오승용*

한국해양과학기술원 해양생명자원연구부

External Attachment of Pop-up Satellite Archival Tag (PSAT) and Water Temperature Affect Oxygen Consumption Rate of the Olive Flounder *Paralichthys olivaceus*

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

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

This study aimed to examine the effect of external pop-up satellite archival tags (PSATs) attachment and water temperature on the oxygen consumption rate (OCR) of the olive flounder (mean body weight 2281.7 g). The OCRs of fish were measured under conditions of three different water temperature conditions (15, 20, and 25°C) and two different tagging methods [non-tagging, control; bio-logger external attachment with a miniature PSAT (dummy mrPAT), BEA] using a closed flow-through respirometer. The OCRs of fish linearly increased with the increase in water temperature in both the control and BEA ($P < 0.001$); however, the OCRs of BEA were approximately 1.8–1.9 times lower than those of the control at each water temperature ($P < 0.001$). The Q_{10} values of the control and BEA were the highest in the water temperature range of 15 to 20°C, but sensitivity to water temperature changes was higher in BEA than in the control. The metabolic energy loss rate (MEL) of fish increased with increasing water temperature regardless of external tagging, but the MEL of the control was higher than that of BEA ($P < 0.001$). These results demonstrate that OCR, thermal sensitivity, and energy expenditure are all affected in adult olive flounder with external PSAT attachment.

Keywords: Bio-logging, Metabolic rate, Tagging, Thermal effect, Biotelemetry

서론

생물원격측정(biotelemetry)에 이용되고 있는 바이오로거(bio-logger) 중 하나인 PSAT (pop-up satellite archival tag)는 1990년대 이후로 다양한 해양어류의 수직, 수평 및 계절적 이동(Block et al., 2001; Musyl et al., 2011b)과 경골 및 판새어류(elasmobranch)의 방류 후 폐사율 정량화(Musyl et al., 2011a; Marshall et al., 2015; Eddy et al., 2016) 등 많은 연구에 활용되어 왔다(Lynch et al., 2017). 이와 아울러 최근에는 양식 어류의 사료 섭취, 환경변화에 대한 반응 및 사육환경 내 움직임 및 행동 패턴 연구를 위해 다양한 tag를 사용한 생물원격측정 방법

이 이용되고 있다(Føre et al., 2011; Macaulay et al., 2021). 어류의 생물원격측정에 사용되는 다양한 바이오로거의 부착 방법은 복강내 삽입하거나 등근육 또는 등지느러미 등에 부착하는 방법이 일반적이며(Bridger and Booth, 2003; Horodysky and Graves, 2005; Moyes et al., 2006; Jepsen et al., 2015), 부착 다음 일정시간 후 해당 개체에서 떨어져 해수면으로 상승하여 Argos (advanced research and global observation satellite)와 교신을 통해 저장된 데이터를 수집하는 방식인 PSAT의 경우(Lynch et al., 2017) 체외부착 방법만을 이용할 수밖에 없다. 하지만 이와 같은 체외부착 방법은 대상 어류의 표피, 근육 손상 및 스트레스 원인으로 작용하여 다양한 생리적·행동적 영향

*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.2023.0660>

Korean J Fish Aquat Sci 56(5), 660-666, October 2023

Received 22 September 2023; Revised 11 October 2023; Accepted 13 October 2023

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

뿐만 아니라 부착된 PSAT의 탈락까지 발생할 수 있어(Counihan and Frost, 1999; Thorstad et al., 2000; Collins et al., 2002; Cottril et al., 2006; Park and Oh, 2018; Oh and Jeong, 2021), 생물원격측정 전 PSAT 부착에 따른 대상 어류의 생리적 영향에 대한 사전 모니터링이 매우 중요하다.

산소 소비율(oxygen consumption rate, OCR)은 다양한 외부 인자 변화에 따른 수서생물의 스트레스 및 항상성 조절에 따른 에너지 비용 등 체내 대사반응 평가지표이자(Pérez-Robles et al., 2012; Oh et al., 2020) 대상생물의 생리적 영향을 정량화하는 방법으로써 이용되며(Oh et al., 2014; Lynch et al., 2017), PSAT 부착에 따른 생리적 영향 판단을 위해 OCR이 활용되고 있다(Methling et al., 2011; Lynch et al., 2017; McGuigan et al., 2021). 이와 함께 체내 생리반응의 조절인자인 수온 역시 대상어류의 대사율에 직접적인 영향을 미치는 요인으로서(Brett and Groves, 1979; Pirozzi and Booth, 2009; Oh et al., 2012), 바이오로거 외부 부착에 따른 영향 평가 시 고려해야 할 주요 외부환경인자로 간주된다.

넙치(*Paralichthys olivaceus*)는 우리나라에서 가장 대표적인 양식 어종이자 우리나라 전 연안에 분포하는 어종으로서(Oh et al., 2020), 현재 연안지역에서 발생하고 있는 고수온, 적조, 저산소, 냉수대 및 폭우 등 다양한 환경변화로 인한 지리생태학적·양식생리학적 영향 구명을 위한 생물원격측정 연구가 요구된다. 이전 연구에서 수온 및 체중(Oh et al., 2012) 그리고 염분(Oh et al., 2020)에 의한 넙치의 OCR 변화가 보고된 바 있지만, PSAT 부착에 따른 대사율 영향에 대한 연구는 이루어진 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 PSAT 부착 및 수온에 따른 넙치의 OCR 변화와 이에 따른 에너지 비용 정도의 정량화를 통해 향후 바이오로거 PSAT 활용 및 넙치의 생물원격측정 연구를 위한 기초 자료를 수집하였다.

재료 및 방법

실험어 및 순치

실험어는 한국해양과학기술원 생물실험동 내 생물여과조, 포말분리기 및 사육수조로 이루어진 순환여과식 시스템에서 사육 중인 평균 무게 $2,281.7 \pm 104.0$ g (mean \pm SD)인 넙치 18마

리를 사용하였다. 실험 전 실험어는 어체중의 1.0–1.5% 비율로 배합사료(crude protein content 51.0%; Aller Aqua Co., Christiansfeld, Denmark)를 공급하였으며, 사육수온은 시스템 내 설치된 냉각기와 히터를 이용해 $20.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 조건에서 순치시켰다. 순치기간 동안 염분, 용존산소 및 pH는 각각 32.5 ± 0.3 psu, 7.3 ± 0.5 mg/L 그리고 7.8 ± 0.2 를 유지하였다.

실험 장치

바이오로거 부착 및 수온에 따른 넙치의 OCR 측정은 폐쇄 순환형 호흡 측정 시스템(Oh et al., 2014, 2020)을 사용하였다. 바이오로거 부착 넙치가 수용된 호흡실을 통과하는 유량은 수온별 산소 소비에 따라 호흡실 유입 및 유출수의 용존산소 농도 차이가 최소 0.2 mg/L 이상(Oh et al., 2020)이 되도록 유량계를 통해 조절하였고, 설정된 실험 수온은 시스템 내 설치된 냉각기(DA-2000B; Daeil, Busan, Korea)와 heater (용량 2 kW)를 사용하여 조절 및 유지하였다.

실험 방법

실험 수온은 15°C , 20°C 그리고 25°C 로 설정하였으며, 실험 수온 중 하나인 20°C 로 설정된 소형 순환여과식 시스템 3 set에, 실험어를 각 set별 6마리씩 무작위로 수용한 뒤 20°C 를 제외한 나머지 2 set의 수온을 하루 1°C 씩 서서히 내리거나 높여 설정 수온 15°C 와 25°C 로 조절한 다음 최소 10일 이상 실험 수온에 순치한 후 실험에 사용하였다. 실험 전 각 실험 수온 순치기간 동안 어체중의 1.0–1.5%로 배합사료를 공급하였지만, OCR 측정 전 사료 섭취 영향을 배제하기 위해 2일간 절식 시킨 후 실험에 이용하였다.

사용된 바이오로거 PSAT는 이전 연구(Park and Oh, 2018; Oh and Jeong, 2021)에서 보고된 것과 동일한 무게 40 g과 길이가 127 mm인 dummy mrPAT (mark report PAT) (Wildlife Computers Inc., Redmond, WA, USA)를 사용하였다. 부착방법은 넙치 등지느러미 아래 2.0–3.0 cm 부근의 등근육 부위에 약 2.0–2.5 cm 간격으로 wilton applicator pin (Wildlife Computers Inc.)을 사용하여 외경 및 내경이 각각 4.24 mm 및 2.64 mm의 silicon tube를 삽입한 후 tube 내 mono filament를 삽입하여 mrPAT와 연결하였다(Fig. 1). 모든 실험어는 핸들링 및 바



Fig. 1. The appearance of dummy mrPAT (mark report PAT) attached to the dorsal muscles of olive flounder *Paralichthys olivaceus* applied in this study.

이오로거 부착에 따른 스트레스 감소를 위해 2-phenoxyethanol (Junsei Chemical Co., Ltd., Koshigaya, Japan) 150 mg/L로 마취한 후 무게 측정과 부착을 수행하였다(Oh and Jeong, 2021). Dummy mrPAT 부착 후 모든 넙치는 부착 부위에 iodine solution 소독 후 oxytetracycline 200 mg/L 농도의 해수에서 1분간 약육한(Oh and Jeong, 2021) 다음 OCR 측정 시스템 내 호흡실에 수용하였다. OCR 측정은 핸들링 및 실험 수온에 반응시키기 위해 호흡실 내에서 12시간 이상 안정시킨 후 6시간 동안 30 초 간격으로 측정하였다. 설정된 실험 수온 조건별로 바이오로거 체외 부착구(bio-logger external attachment, BEA) 및 미부착구인 대조구(control) 개체 1마리씩 각각 독립적으로 호흡실에 수용하여 OCR을 측정하였으며, 각 3회 반복 실험하였다. 바이오로거 부착 및 수온에 따른 넙치의 OCR은 아래의 방법에 따라 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)

대조구와 BEA의 OCR은 반복구별로 pooling하여 각 평균값을 data unit으로 사용하였고, 수온 변화 영향을 파악하기 위해 아래의 식을 이용하여 대사 반응율(Q_{10})을 구하였다(Wuenschel et al., 2005).

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

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

바이오로거 부착과 수온에 따른 넙치의 에너지 소비 정도는 에너지 전환 계수($1 \text{ mg O}_2 = 13.598 \text{ J} = 3.25 \text{ cal}$) (Brett and Groves, 1979)를 사용하여 에너지 소비율을 구하였다.

통계 분석

각 조건별 OCR과 에너지 소비율의 통계처리는 SPSS 11.5 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 분산분석(ANOVA)을 통해 유의한 차이가 있을 경우 Tukey's multiple range test로 평균간 유의성을 95% 신뢰수준에서 검정하였다. 바이오로거 부착 영향은 T-test를 통해, 수온과 바이오로거 단독 또는 복합 영향은 two-way ANOVA를 통해 검정하였다.

결 과

바이오로거 PSAT 체외 부착 및 수온에 따른 넙치의 평균 OCR은 Table 1에 나타내었다. 바이오로거 부착구, 즉 BEA와 대조구 모두 수온 상승에 함께 OCR은 유의하게 증가하였고($P < 0.001$), 모든 실험 수온에서 대조구의 OCR이 BEA의 OCR보다 유의하게 높았다($P < 0.001$). 하지만 수온 상승에 따른 OCR 증가 비율의 경우 대조구는 수온 15°C에서 20°C, 20°C에서 25°C 그리고 15°C에서 25°C로 상승 시 평균 OCR은 각각 31.7%, 12.6% 그리고 48.3% 증가한 반면, BEA는 각각 33.5%, 20.2% 그리고 60.5%로 나타나, 수온 상승 시 BEA의 OCR 증가 비율이 높게 나타났다. 수온(T)에 따른 바이오로거 미부착 넙치(즉, 대조구)와 체외 부착 넙치(즉, BEA)의 OCR은 각각 $\text{OCR} = 25.4430 + 4.0843T$ ($r^2 = 0.91$, $P < 0.0001$)와 $\text{OCR} = 4.6139 + 2.6793T$ ($r^2 = 0.97$, $P < 0.0001$)의 회귀식으로 나타났다. 이상의 결과에서 바이오로거 부착, 수온 및 두 인자의 상호작용 역시 넙치의 OCR에 유의한 영향을 미쳤다(Table 1). 바이오로거 체외 부착 및 수온 변화에 따른 넙치의 Q_{10} 값을

Table 1. Oxygen consumption rate (OCR) of olive flounder *Paralichthys olivaceus* subjected to two different tagging methods (TA) and three different water temperatures (T)

T (°C)	Tagging methods				
	Control (mg O ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹)		BEA (mg O ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹)		
15	84.6±4.17 ^{c(a)**}		44.3±1.37 ^{c(b)}		
20	111.4±1.26 ^{b(a)}		59.2±1.71 ^{b(b)}		
25	125.4±2.65 ^{a(a)}		71.1±0.82 ^{a(b)}		
Regression	OCR=25.4430+4.0843T ($r^2=0.91$, $P<0.0001$)		OCR=4.6139+2.6793T ($r^2=0.97$, $P<0.0001$)		
Two-way ANOVA	d.f.	SS	MS	F	P
TA	1	10,773.99	10,773.99	684.432	0.001
T	2	3,492.38	1,746.19	110.929	0.001
TA×T	2	172.555	86.278	5.481	0.02
Error	12	188.898	15.741		

Control, Non-tagging; 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 different superscripts in parenthesis within the same row are significantly different ($n=3$, $P<0.001$).

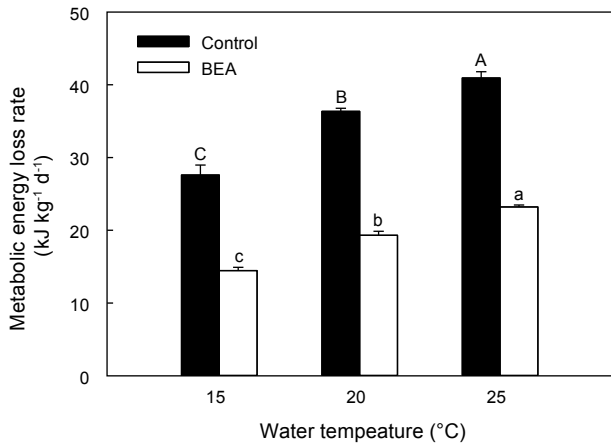


Fig. 2. Metabolic energy loss rate of olive flounder *Paralichthys olivaceus* subjected to two different tagging methods and three water temperatures. Control, Non-tagging; BEA, Bio-logger external attachment.

Table 2에 나타내었다. 대조구와 BEA 모두 수온 15–20°C 구간에서 가장 높은 Q_{10} 값을, 20–25°C 구간에서 가장 낮은 값을 보여, 바이오로거 부착에 상관없이 수온 15–20°C 구간에서 가장 높은 대사반응을 보였다.

바이오로거 체외 부착 및 수온 변화에 따른 넙치 대사 에너지 소비율은 Fig. 2에 나타내었다. 수온 15, 20 그리고 25°C에서 일간 평균 에너지 소비율은 대조구의 경우 각각 27.6, 36.4 그리고 40.9 kJ kg⁻¹ d⁻¹이었고, BEA의 경우 각각 14.5, 19.3 그리고 23.2 kJ kg⁻¹ d⁻¹로 나타나, 바이오로거 부착에 상관없이 수온 상승에 따라 유의하게 에너지 소비율이 증가하였으며($P < 0.001$), 각 실험 수온에서 대조구가 BEA보다 약 1.8–1.9배 높은 대사 에너지 소비율을 보였다($P < 0.001$).

고 찰

본 실험 결과 바이오로거 체외 부착이 넙치 OCR에 영향을 미치는 것으로 나타나 이전 연구 보고와 유사하였지만(Shepherd, 1973; Arnold and Holford, 1978; Steinhausen et al., 2006; McGuigan et al., 2021), 그 양상은 다양하게 나타났다. McGuigan et al. (2021)은 mahi-mahi *Coryphaena hippurus*를

Table 2. Q_{10} value of the olive flounder *Paralichthys olivaceus* subjected to two different tagging methods for different water temperature ranges

Group	Temperature interval (°C)		
	15–20	20–25	15–25
Control	1.73	1.27	1.48
BEA	1.78	1.44	1.60

Control, Non-tagging; BEA, Bio-logger external attachment.

대상으로 miniature PSAT 체외 부착 후 측정된 OCR은 부착 여부에 영향을 받지 않았지만, 유영(swimming)시에는 부착구 OCR이 미부착구에 비해 16.1–21.4% 감소하는 결과를 보고한 반면, cutthroat trout *Salmo clarki* (Shepherd, 1973), Atlantic cod *Gadus morhua* (Steinhausen et al., 2006) 그리고 eel *Anguilla anguilla* (Methling et al., 2011)의 경우 바이오로거 부착 후 유영 시 부착구 OCR은 오히려 증가하는 상반된 결과를 보였다. 이와 같은 어류 유영 시 OCR 증가는 외부에 부착된 바이오로거로 인한 항력(drag force) 증가가 일반적인 원인으로 간주되며(Arnold and Holford, 1978; Lewis and Muntz, 1984; Mellas and Haynes, 1985; Methling et al., 2011), Mellas and Haynes (1985)은 이에 대한 근거로 무지개송어(*Salmo gairdneri*)를 대상으로 바이오로거를 체내 이식한 것보다 보다 외부 부착한 개체의 피로 도달시간이 훨씬 빠르다는 것을 보고하였지만, Lynch et al. (2017)은 PSAT 체외 부착이 sandbar shark *Carcharhinus plumbeus*의 대사율에 영향을 미치지 않는다고 보고하여 어종마다 다양한 결과를 보였다. 본 실험의 경우 부착구에서 모든 수온 조건에서 낮은 OCR을 보여 앞서 언급된 연구 보고와 차이를 보였지만, 이것은 어종(benthic vs pelagic), 크기, 바이오로거 종류 및 무게, 그리고 실험방법 등의 차이에 의해 나타난 것으로 생각된다. 이와 아울러 바이오로거 부착으로 유발된 유영 능력(swimming performance)의 감소가 아가미의 수중 용존산소 섭취(ram ventilation)의 제약 요인(McGuigan et al., 2021)으로 작용해 낮은 OCR을 보인 하나의 원인일 수 있어, 향후 다양한 내·외부인자에 대한 영향 평가가 필요하다.

본 실험 결과 수온은 바이오로거 부착과 상관없이 넙치 OCR에 직접적인 영향을 미쳤으며, 이전 연구 결과와 일치하였다(Kim et al., 1995; Oh et al., 2012; Lim et al., 2021). 일반적으로 서식수온 범위 내 어류의 OCR은 수온 상승에 따라 선형적(즉, $OCR = a + bT$, $T = \text{수온}$)으로 증가하며(Paul, 1986; Kim et al., 1995; Oh et al., 2012; Lim et al., 2021), 본 실험 결과도 동일하였다. Kim et al. (1995)은 평균 무게 3.3 g의 넙치를 대상으로 수온(T) 15.2°C에서 24.2°C로 상승할 경우 $OCR = -339.60 + 34.05T$ 을 보고하였고, Oh et al. (2012)은 평균 무게 9.1 g과 266.4 g의 넙치 치어와 미성어를 수온 15.0°C에서 25°C로 상승할 경우 각각 $OCR = -82.06 + 28.30T$ 와 $OCR = -52.52 + 14.73T$ 을 보고해 본 실험 결과와 유사한 회귀식을 보였다. 하지만 수온에 따른 OCR 상승 기울기(즉, b)의 경우 Kim et al. (1995)과 Oh et al. (2012)이 보고한 14.73–34.05에 비해 본 실험에서 낮게(즉, 2.68–4.08, Table 1) 나타난 것은 실험에 사용한 개체 크기에 기인한 것으로 생각된다. 본 실험과 동일한 수온 범위에서 9–266 g의 넙치를 대상으로 보고한 Oh et al. (2012)의 평균 OCR의 범위 164.9–638 mg O₂ kg⁻¹ h⁻¹에 비해 본 실험의 OCR 범위(즉, 44.3–125.4 mg O₂ kg⁻¹ h⁻¹)가 낮게 나타난 것은 2 kg 이상의 넙치를 대상으로 실험이 이루어졌기 때문이다. 일반적으로 체중 증가에 따라 단위 체중당 대사율

은 감소하기 때문에(Kim et al., 1995; Oh et al., 2007, 2012), 이로 인한 OCR 절대값의 감소가 동일 수온 범위 내 OCR 상승 기울기 역시 소형 개체보다 낮게 나타난 요인으로 사료된다. 동일하게 본 실험의 수온 상승에 따른 넙치의 평균 OCR 상승 비율은 15–25°C 범위에서 약 48.3–60.5%로 나타나, Oh and Jeong (2021)이 보고한 동일 수온 범위에서 넙치 치어와 미성어의 OCR 상승 비율(약 79.7–89.3%)과의 차이 역시 크기 차이에 기인한 것으로 생각된다. 하지만 수온 구간별 OCR 상승 비율은 부착구가 비부착구에 비해 높은 것은 바이오로거 부착에 따른 부력 상승 및 체외 손상, 항력 증가 등과 함께 수온 상승의 복합 영향이 스트레스 요인으로 작용해 더 높은 상승 비율의 원인이 된 것으로 사료된다. Two-way ANOVA 결과(Table 1)에서도 바이오로거 부착과 수온 상호 작용 역시 OCR에 영향을 미친다는 것을 볼 때 이와 같은 현상을 유추해 볼 수 있다.

해산어류의 수온 변화에 적응하기 위한 체내 반응율인 Q_{10} 값은 대상 어류의 온도 민감성을 나타내는 지표로 간주된다(Spanopoulos-Hernández et al., 2005; Oh et al., 2012). 본 실험 결과 1.27–1.78 범위를 보여 동일 종의 치어와 미성어를 대상으로 Oh et al. (2012)이 보고한 1.57–2.28 범위와는 차이를 보였지만, 앞서 언급한 바와 같이 실험어의 크기 차이에 기인한 것으로 생각된다. 하지만 Oh et al. (2012) 역시 미성어 Q_{10} 값의 경우 15–20°C 범위에서 가장 높고 20–25°C 범위에서 가장 낮게 나타나 본 실험 결과와 동일하였다. 하지만 조피볼락(*Sebastes schlegelii*)의 경우 치어와 미성어 모두 15–20°C 보다 20–25°C 에서 더 높은 온도 민감성을 나타내는 것(Oh et al., 2007)으로 볼 때, 어종 및 크기 등에 따라 차이를 보였다. 미부착구(즉, 대조구)에 비해 부착구의 높은 Q_{10} 값(Table 2)은 수온 변화에 대한 민감성뿐만 아니라 부착에 따른 상호작용이 영향을 미친 것으로 생각된다.

OCR은 체내 대사반응에 의한 에너지 소비율을 정량화하는 주요 지표로서(Oh et al., 2007, 2012), 본 실험 결과 수온 및 바이오로거 부착이 넙치의 대사 에너지 소비율에 영향을 미쳤다(Fig. 2). Oh and Jeong (2021)은 본 실험과 동일한 수온 조건에서 넙치 치어와 미성어의 대사에너지 소비율 53.8–208.2 kJ kg⁻¹ d⁻¹를 보고하여 본 실험에서 나타난 14.5–40.9 kJ kg⁻¹ d⁻¹과는 차이를 보였지만, 이것은 실험 방법과 크기 차이에 의한 것으로 판단된다. 특히, 부착구의 대사 에너지 소비율이 미부착구에 비해 1.8–1.9배 감소한 것은 앞서 언급한 바와 같이 바이오로거 부착 개체의 유영 능력 감소에 따른 ram ventilation 제약(McGuigan et al., 2021)이 하나의 원인으로 생각할 수 있지만, 본 실험과 같이 한정된 호흡실 조건과 달리 자유 유영이 가능한 경우 유영 시 바이오로거가 부착된 개체의 에너지 소비율이 약 26% 증가한다는 보고(Palstra et al., 2007)를 볼 때, 향후 다양한 실험 조건에서의 영향 연구가 요구된다.

이상의 결과에서 바이오로거 PSAT 부착, 수온 및 두 인자의 상호작용은 넙치의 OCR, 수온 변화 민감성 및 대사 에너지 소

비율에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 향후 넙치의 생물원격측정 연구를 위한 바이오로거 체외 부착 영향 평가를 위해 고려해야 하는 기초 정보를 제공한다.

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

- Arnold GP and Holford BH. 1978. The physical effects of an acoustic tag on the swimming performance of plaice and cod. ICES J Mar Sci 38, 189–200. <https://doi.org/10.1093/icesjms/38.2.189>.
- Brett JR and Groves TDD. 1979. Physiological energetics. In: Fish Physiology, Vol. 8. Bioenergetics and Growth. 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, Blackwell SB, Williams TD, Prince ED, Farwell CJ, Boustany A, Teo SL, Seitz A, Walli A and Fudge D. 2001. Migratory movements, depth preferences, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna. Science 293, 1310–1314. <https://doi.org/10.1126/science.1061197>.
- Collins MR, Cooke DW, Smith TIJ, Post WC, Russ DC and Walling DC. 2002. Evaluation of four methods of transmitter attachment on shortnose sturgeon, *Acipenser brevirostrum*. J Appl Ichthyol 18, 491–494.
- Cottrill RA, Økland F, Aarestrup K, Jepsen N, Koed A, Hunter KJ, Butterworth KG and McKinley RS. 2006. Evaluation of three telemetry transmitter attachment methods for female silver-phase American eels (*Anguilla rostrata* Lesueur). J Great Lakes Res 32, 502–511. [https://doi.org/10.3394/0380-1330\(2006\)32\[502:EOTTTA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3394/0380-1330(2006)32[502:EOTTTA]2.0.CO;2).
- Counihan TD and Frost CN. 1999. Influence of externally attached transmitters on the swimming performance of juvenile white sturgeon. Trans Am Fish Soc 128, 965–970. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1999\)128%3C0965:IOEATO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1999)128%3C0965:IOEATO%3E2.0.CO;2).
- Eddy C, Brill R and Bernal D. 2016. Rates of at-vessel mortality and post-release survival of pelagic sharks captured with tuna purse seines around drifting fish aggregating devices (FADs) in the Equatorial Eastern Pacific Ocean. Fish Res 174, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.09.008>.

- Føre M, Alfredsen JA and Grønningsæter A. 2011. Development of two telemetry-based systems for monitoring the feeding behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in aquaculture sea-cages. *Comput Electron Agric* 76, 240-251. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.003>.
- Horodysky AZ and Graves JE. 2005. Application of pop-up satellite archival tag technology to estimate postrelease survival of white marlin (*Tetrapturus albidus*) caught on circle and straight-shank (J) hooks in the western North Atlantic recreational fishery. *Fish Bull* 103, 84-96.
- 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 Biotelem* 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>.
- Kim IN, Chang YJ and Kwon JY. 1995. The patterns of oxygen consumption in six species of marine fish. *J Korean Fish Soc* 28, 373-381.
- Lewis AE and Muntz WRA. 1984. The effects of external ultrasonic tagging on the swimming performance of rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson. *J Fish Biol* 25, 577-585. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1984.tb04904.x>.
- Lim HK, Han HS and Hur JW. 2021. Effects of water temperature changes on oxygen consumption and hematological factors in olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Fish Aquat Sci* 24, 99-107. <https://doi.org/10.47853/FAS.2021.e10>.
- 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 L, Oppedal F, Føre M and Dempster T. 2021. Tag use to monitor fish behaviour in aquaculture: A review of benefits, problems and solution. *Rew Aquac* 13, 1565-1582. <https://doi.org/10.1111/raq.12534>.
- Marshall H, Skomal G, Ross PG and Bernal D. 2015. At-vesSEL and post-release mortality of the dusky (*Carcharhinus obscurus*) and sandbar (*C. plumbeus*) sharks after longline capture. *Fish Res* 172, 373-384. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.07.011>.
- 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>.
- Moyes CD, Fragoso N, Musyl MK and Brill RW. 2006. Predicting postrelease survival in large pelagic fish. *Trans Am Fish Soc* 135, 1389-1397. <https://doi.org/10.1577/T05-224.1>.
- Musyl MK, Brill RW, Curran DS, Fragoso NM, McNaughton LM, Kikkawa BS and Moyes CD. 2011a. Post-release survival, vertical and horizontal movements, and thermal niche partitioning in five species of pelagic sharks. *Fish Bull* 109, 341-368.
- Musyl MK, Domeier ML, Nasby-Lucas N, Brill RW, McNaughton LM, Swimmer JY, Lutcavage MS, Wilson SG, Galuardi B and Liddle JB. 2011b. Performance of pop-up satellite archival tags. *Mar Ecol Prog Ser* 433, 1-28. <https://doi.org/10.3354/meps09202>.
- 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. <https://doi.org/10.4217/OPR.2014.36.2.135>.
- 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, 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 Aquat Sci*, 53, 620-627. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0620>.
- 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, 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.
- 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 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>.

- Paul AJ. 1986. Respiration of juvenile pollock, *Theragra chalcogramma* (Pallas), relative to body size and temperature. *J Exp Mar Biol Ecol* 97, 287-293. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(86\)90246-7](https://doi.org/10.1016/0022-0981(86)90246-7).
- Pérez-Robles J, Re AD, Giffard-Mena I and Díaz F. 2012. Interactive effects of salinity on oxygen consumption, ammonium 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>.
- 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>.
- Shepherd B. 1973. Transmitter attachment and fish behaviour. *Underw Telem Newsl* 3, 8-11.
- 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>.
- 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>.
- 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>.