KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 59(5), 538-544, 2026

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 59(5),538-544,2026

수온과 사육밀도 변화에 따른 북방전복(*Haliotis discus hannai*)의 산소 소비

오승용* · 송미해

한국해양과학기술원 해양생명자원연구부

Effects of Water Temperature and Stocking Density on Oxygen Consumption of Abalone, *Haliotis discus hannai*

Sung-Yong Oh* and Mihae Song

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

This study investigated how water temperature and stocking density affect oxygen consumption and energy expenditure of abalone, *Haliotis discus hannai*. Abalone averaging 98.1 mm shell length and 117.0 g body weight were examined in a closed recirculating respirometry system. Oxygen consumption rate (OCR) was measured at 10, 15, 20, and 25°C under stocking densities of 10, 20, and 40 kg m^{-3}, with three replicates for each treatment. OCR increased with increasing water temperature from 10 to 20°C. However, at 25°C, OCR increased only slightly at 10 kg m^{-3} and decreased sharply by 74.5% and 80.9% at 20 and 40 kg m^{-3}, respectively. OCR of abalone was significantly affected by water temperature, stocking density, and their interaction ($P<0.0001$). Q_{10} values also declined markedly above 20°C, particularly at high densities. Daily energy loss rate increased with water temperature and stocking density up to 20°C but decreased under 20 and 40 kg m^{-3} conditions at 25°C. These findings provide essential information for dissolved oxygen supply and density management of 82.8–109.6 mm abalone in land-based abalone aquaculture.

Keywords: *Haliotis discus hannai*, Metabolic rate, Stocking density, Water temperature

서 론

전복은 *Haliotis* 속에 속하는 해양 복족류로서 전 세계의 열대 및 온대 해역에 널리 분포하며, 오래전부터 중요한 고부가가치 수산물 품종으로 아시아를 중심으로 양식 산업이 크게 발전해 왔다(Morash and Alter, 2016). 한국의 전복 양식업은 2025년 기준 생산량 27,376톤, 생산 금액 약 4,899억 원으로, 생산량은 전체 패류 양식의 약 7.0%에 불과하나 생산 금액은 약 56.5%를 차지하는 대표적 고부가가치 양식 품목이며(KOSIS, 2026), 주로 북방전복(*Haliotis discus hannai*) 생산에 기인한다(Lee et al., 2023). 하지만 전복 양식은 대부분 해상 가두리에서 이루어지기 때문에 계절적 수온 및 염분 변화로 인한 대량 폐사가 빈번하게 발생하고 있고(Vandepeer, 2006), 지구 온난화 현상과 연관된 수온 상승으로 인해 이러한 피해는 지속적으로 증가하는 실정이다(Lee et al., 2023). 육상 수조식 전복 양식은 외부 환경에 빠르게 대응하고 환경 관리의 장점이 있어 해상 가두리에서의 사육 및 생산 단점을 보완하는 양식 방법이다(Park et al., 2008a; Kim et al., 2014; Gao et al., 2018).

육상 수조식 전복 양식장의 생산성에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나는 단위 수면적 또는 단위 용적당 사육밀도이다(Gao et al., 2018). 적절한 고밀도 사육은 공간 이용 효율을 높일 수 있지만, 너무 높은 밀도의 경우 개체 간 공간 및 먹이 경쟁을 심화시키고 성장률과 생존율 감소와 함께 시스템 내 산소 소비량의 증가와 대사 노폐물로 인한 수중 용존산소 감소 및 이산화탄소와 암모니아 농도 증가 등 수질 악화를 초래할 수 있다(Gao et al., 2018). 이전의 많은 연구에서 사육밀도는 전복의 성장에 유의하게 영향을 미친다고 보고된 바 있다(Mgaya and Mercer, 1995; Park et al., 2008b; Jarayabhand et al., 2010; Vivanco-Aranda et al., 2011). 즉, 사육밀도는 양식 전복의 생리적 적응에 변화를 초래할 수 있으며, 이에 따른 성장, 사료 섭취, 면역

***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.2026.0538
Korean J Fish Aquat Sci 59(5), 538-544, October 2026
Received 25 August 2026; **Revised** 26 **September** 2026; Accepted 29 September 2026
저자 직위: 오승용(연구원), 송미해(기능원)



Fig. 1. Closed recirculating respirometer system used in this experiment for measuring oxygen consumption of abalone *Haliotis discus hannai* according to water temperature and stocking density.

및 에너지 대사에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다(Gao et al., 2018). 이와 아울러 수온은 수생동물의 성장과 생리적 과정에 있어 매우 중요한 결정 요인으로서(Searle et al., 2006), 일반적으로 수온 변화는 수생동물의 먹이 섭취량, 대사 효율, 소화 능력 등 다양한 반응에 영향을 미친다(Hoefnagel and Verberk, 2017). 특히, 변온동물인 전복은 수온에 매우 민감해 높은 수온 조건에서 면역력 감소와 다양한 스트레스 반응으로 인한 폐사율이 증가한다는 이전 보고가 있다(Dang et al., 2012; Vosloo et al., 2013; Ding et al., 2016).

산소 소비율(oxygen consumption rate, OCR)은 수생생물의 에너지 대사를 정량적으로 반영하는 핵심 지표로서(Kaushik, 1998), 환경 변화에 따른 생리적 반응 정도, 즉 항상성 유지를 위한 에너지 비용 및 스트레스 반응 정도를 평가할 수 있을 뿐만 아니라(Yin et al., 2013; Oh et al., 2020), 적합한 사육밀도와 산소 공급을 위한 유수량 등 양식 시스템 설계에 필요한 산소 요구량 산정을 위한 기초 자료로 활용할 수 있다(Avnimelech et al., 1992).

육상 수조식 양식장 내 전복 생산성 향상을 위해서는 필연적으로 사육밀도의 증가와 수온 상승에 따른 전복의 기초적인 산소 소비 및 대사 반응 관리가 요구되며, 이에 따른 사육 시스템 내 전복의 산소 요구량에 맞는 용존산소 공급 전략 수립이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 대표적 양식 품종인 북방전복(*H. discus hannai*)을 대상으로 수온 및 사육밀도에 따른 OCR의 정량화를 통해 OCR에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고, 이를 바탕으로 사육 시스템 내 산소 공급 전략 및 시스템 설계 기준 도출과 향후 여름철 고수온기 관리 연구를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

실험 전복 및 순치

실험 전복은 경남수산자원연구소에서 사육 중인 각장과 무게가 각각 82.8–109.6 mm [평균 각장 98.1±1.1 mm (mean±SE)]와 74.4–159.7 g (평균 무게 117.0±3.7 g) 범위의 양성 4년생 이상의 북방전복 114마리를 사용하였다. 실험 시작 2주 전(2026년 4월 23일) 경남수산자원연구소에서 한국해양과학기술원 생물실험동 내 실내 순환여과식 사육 시스템으로 옮겨 유리섬유강화플라스틱(fiberglass reinforced plastic, FRP) 원형수조(400 L) 2개에 100마리씩 수용하여 순치하였다. 실내 순치 기간 동안 미역을 공급하였으며, 수온, 염분 및 pH는 각각 10±0.1°C, 33.2±0.1 psu, 그리고 8.0±0.1로 유지하였다.

실험 장치

수온과 사육밀도에 따른 전복의 OCR 측정에는 생물호흡실 (0.4×0.4×0.4 m, 용적 0.064 m^3, 부착 면적 0.96 m^2), 상부 공급탱크, 하부 저수탱크, 용존산소 측정실 및 용존산소 측정 센서 (Model 4000; Insite Instrumentation Group, Inc., Slidell, LA, USA), 유량계(HSP-4; Corea Flow, Siheung, Korea) 및 multi data logger (MPA-48; Insite Instrumentation Group, Inc.)로 이루어진 폐쇄 순환형 호흡 측정 시스템(Fig. 1)을 이용하였다(Oh et al., 2020). 북방전복이 수용된 생물호흡실의 유량은 각 사육밀도와 수온별 전복 OCR에 따라 생물호흡실 유입 및 배출수간 최소 0.2 mg L^{-1} 이상(Oh et al., 2020)의 용존산소 농도 차이가 나도록 조절하였다. 실험 수온은 호흡 측정 시스템 내 설치된 용량 2 kW 히터(TH-SF2000; A-MI Corporation, Incheon, Korea)와 냉각기(DA-2000B; Daeil Co., Ltd., Busan, Korea)를 이용하여 일정하게 유지하였다(Oh et al., 2020).

실험 방법

실험 수온은 10, 15, 20, 그리고 25°C로 설정하였으며, 최초 설정 수온인 10°C 조건에서 2주 동안 순치한 후 실험에 사용하였다. 수온 10°C에서 순치하는 동안 미역을 공급하였으며, 실험 시작 전 3일간 절식시켜 먹이에 의한 영향은 배제한 뒤 상처 등이 없는 건강한 개체만을 선별하여 실험에 사용하였다.

최초 설정 수온 10°C에 순치된 북방전복은 시스템 내 호흡실에 수용 전 각장과 무게를 측정한 후, 실험 사육밀도 10, 20, 그리고 40 kg m^{-3} (부착 면적당 사육밀도 0.67, 1.33, 그리고 2.67 kg m^{-2})에 맞추어 호흡실 내 각각 5마리, 11마리, 그리고 22마리씩, 3반복 수용하였다. 호흡실에 수용한 후 계측 등 handling의

영향을 배제하고, 호흡실 내 적응을 위해 하루(즉, 24시간) 동안 추가 순치시킨 후 매 24시간 간격으로 다음 단계의 수온(즉, 10→15→20→25℃)으로 시간당 1℃씩 상승시켜 조절하였다(Song et al., 2024). Song et al. (2024)의 방법에 따라 각 사육밀도 조건에서 실험 수온의 영향이 충분히 반영되도록 OCR 측정이 이루어지기 전 13시간 동안 해당 실험 수온에 적응시킨 다음 수온 변경 직전 6시간 동안 30초 간격으로 측정하였다.

북방전복의 사육밀도와 수온에 따른 OCR은 다음의 식을 이용하여 산출하였다(Jobling, 1982).

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

여기서, C_i=호흡실 유입수의 용존산소 농도(mg L^{-1})

C_o=호흡실 배출수의 용존산소 농도(mg L^{-1})

Q=호흡실을 지나가는 시간당 유량(L h^{-1})

W=호흡실 수용 습중량(kg)

각 실험 조건에서 얻은 각 반복구의 OCR 측정값을 평균하여 통계분석의 기본 단위로 사용하였다. 수온 변화에 대한 북방전복의 대사 민감도는 각 사육밀도 조건에서 Q_{10} 지수로 나타냈으며, 해당 값은 Wuenschel et al. (2005)의 방법에 따라 산출하였다.

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

여기서, R_1과 R_2는 수온 T_1과 T_2일 때의 평균 OCR이다.

측정된 OCR에는 Brett and Groves (1979)가 제시한 에너지 전환계수(1 mg O_2=13.598 J=3.25 cal)를 적용하였다. 이를 바탕으로 각 수온 및 사육밀도 조건에서 북방전복의 산소 소비에 따른 에너지 소비율을 산출하였다.

자료 분석

자료의 통계 처리는 SPSS 11.5 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 이용하여 수행하였다. 정규성과 등분산성을 확인하였으며, 실험구 간 평균값의 차이는 ANOVA와 Tukey's multiple range test를 이용하여 검정하였다. 통계적 유의성은 95% 신뢰수준에서 판단하였으며, 수온과 사육밀도의 주효과와 상호작용은 이원분산분석(two-way ANOVA)으로 검증하였다.

결 과

북방전복의 OCR은 수온과 사육밀도에 따라 뚜렷하게 변화하였다(Fig. 2). 전반적으로 10℃에서 20℃까지 수온이 상승함에 따라 OCR이 증가하는 경향이 나타났으며, 20℃ 이상의 경우 사육밀도 10 kg m^{-3} 조건에서는 OCR의 증가 폭이 둔화되는 경향을 보인 반면, 사육밀도 20 kg m^{-3}와 40 kg m^{-3} 조건에서는 급격히 OCR이 감소하였다. 즉, 사육밀도 10, 20, 그리고 40 kg m^{-3} 조건에서 수온 10℃에서 15℃로 상승 시 각각 평균

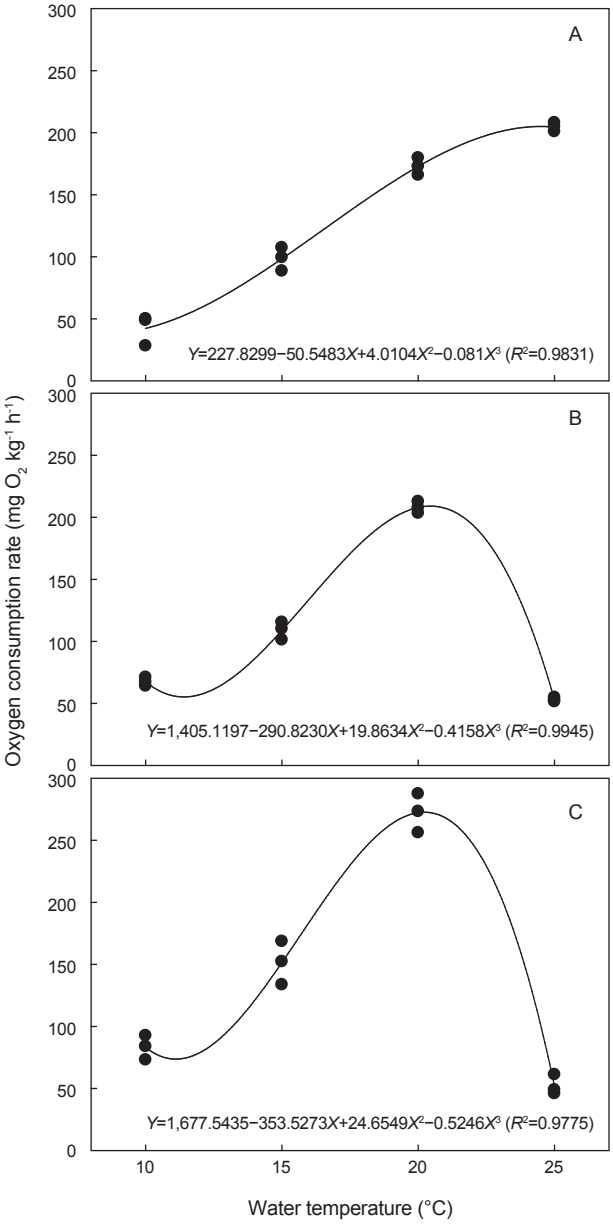


Fig. 2. Oxygen consumption rates of abalone *Haliotis discus hannai* exposed to three different stocking densities [10 kg m^{-3} (A), 20 kg m^{-3} (B), and 40 kg m^{-3} (C)] and four different water temperatures (10°C, 15°C, 20°C, and 25°C).

132.5%, 61.3%, 그리고 82.2% 증가하였고, 15℃에서 20℃로 상승 시 각각 평균 75.5%, 91.0%, 그리고 79.7% 증가하였다. 하지만 20℃에서 25℃로 상승 시 사육밀도 10 kg m^{-3}의 경우 OCR은 평균 11.6% 증가한 반면, 사육밀도 20 kg m^{-3}와 40 kg m^{-3}의 경우 각각 74.5%와 80.9% 감소하는 결과를 보였다. 이에 따라 사육밀도 10 kg m^{-3} 조건에서의 수온 상승에 따른 북방전복 OCR (Y)의 회귀식은 Y=227.8299−50.5483X+4.0104

$X^2-0.081X^3$ (R^2=0.9831, X: 수온)으로 나타났으며, 사육밀도 20 kg m^{-3}와 40 kg m^{-3} 조건의 OCR 회귀식은 각각 Y=1,405.1197−290.8230X+19.8634X^2−0.4158X^3 (R^2=0.9945)와 Y=1,677.5435−353.5273X+24.6549X^2−0.5246X^3 (R^2=0.9775)이었다. 이상의 결과에서 사육밀도(F=31.42, P<0.0001), 수온(F=417.98, P<0.0001) 그리고 사육밀도와 수온의 상호작용(F=114.68, P<0.0001) 모두 북방전복의 OCR에 유의한 영향을 미쳤다(Table 1).

수온과 사육밀도 변화에 따른 북방전복의 대사 민감도 Q_{10} 값은 Table 2에 제시하였다. 수온 10–15℃, 10–20℃, 10–25℃, 15–20℃, 15–25℃, 그리고 20–25℃ 구간의 Q_{10} 값은 사육밀도 10 kg m^{-3}의 경우 각각 6.21, 4.34, 2.96, 3.11, 2.09, 그리고 1.40이었고, 사육밀도 20 kg m^{-3}와 40 kg m^{-3}의 경우 각각 2.60, 3.09, 0.85, 3.67, 0.49, 그리고 0.07과 3.32, 3.29, 0.74, 3.27, 0.35, 그리고 0.04로 나타나 15–20℃ 구간을 제외한 모든 구간에서 사육밀도 10 kg m^{-3}의 Q_{10} 값이 높게 나타났다. 수온 20℃를 초과하는 구간에서는 Q_{10} 값이 급격히 감소하였으며, 특히 20–25℃ 구간의 경우 사육밀도 20 kg m^{-3}와 40 kg m^{-3}에서 각각 0.07과 0.04로 매우 낮게 나타나 고수온 조건에서 대사 민감도가 더 이상 비례적으로 증가하지 않았다.

수온과 사육밀도에 따른 북방전복의 호흡에 의한 일간 평균 에너지 소비율은 Fig. 3에 나타내었다. 북방전복의 일간 평균 에너지 소비율은 사육밀도 10, 20, 그리고 40 kg m^{-3} 조건에서 수온에 따라 각각 13.8–66.8, 17.3–67.9, 그리고 17.0–88.9 kJ kg^{-1} day^{-1} 범위로 나타나 사육밀도에 상관없이 수온 10℃에서 20℃까지 지속적으로 에너지 소비율이 증가한 반면, 20℃를 초과할 경우 증가 폭이 줄어들거나 오히려 감소하였다(P<0.05). 수온 10, 15, 그리고 20℃ 조건에서는 사육밀도가 높을수록 에너지 소비율이 증가하는 경향을 보였고 20℃, 40 kg m^{-3} 조건에서 가장 높은 에너지 소비율을 보였다(P<0.05). 하지만 수온 25℃에서는 사육밀도 20 kg m^{-3}와 40 kg m^{-3} 조건의 에너지 소비율이 10 kg m^{-3}보다 유의하게 감소하였다(P<0.05).

고 찰

본 실험 결과 수온, 사육밀도 및 수온과 사육밀도의 상호작용은 북방전복의 OCR, 즉 대사율에 유의한 영향을 미쳤으며(Table 1), 체내 생리 반응을 통한 항상성 유지를 위한 에너지 소비가 발생한다는 것을 알 수 있었다(Fig. 3). 수온은 북방전복의 OCR에 직접적인 영향을 미치는 환경 인자로 작용하였으며, 이전 연구 결과와 일치하였다(Kang et al., 2019; Duan et al., 2020). Duan et al. (2020)은 각장 26.7 mm와 69.1 mm 크기의 북방전복을 대상으로 5, 10, 15, 20 및 25℃ 조건에서 OCR을 측정한 결과 크기에 상관없이 수온 20℃까지 지속적으로 증가하여 가장 높은 OCR을 보인 후 20℃를 초과하여 수온 상승이 이루어질 경우 OCR이 감소하는 결과를 보여 본 실험과 동일하였으며, 수온과 OCR 간의 상관관계 역시 본 실험과 동일한 3차 함수로 제시하였다(Fig. 2). Hawkins (1995)는 수온에 따른 변온동물의 체내 효소 반응과 대사율의 경우 생리적 최적 수온 범위와 다르게 스트레스 반응이 나타나는 고수온 범위에 이를 경우 반드시 선형적으로 나타나지 않는다고 보고하였으며, Pörtner (2002) 역시 최적 서식 범위를 벗어난 저온과 고온 조건에서 체내 생리 반응이 감소하며 특히 고수온 조건의 경우 체내 산소 공급 능력과 산소 요구량 사이에 불균형을 초래하여 생리 기능의 제한으로 인한 대사 반응이 감소한다고 보고하였다. Kang et al. (2019)은 저온에서는 북방전복이 낮은 섭식과 체내 대사

Table 1. Results of two-way ANOVA on the effects of stocking density and water temperature on the oxygen consumption rates of abalone *Haliotis discus hannai*

Source	SS	d.f.	MS	*F*	P
Stocking density	5,759.39	2	2,879.69	31.42	<0.0001
Water temperature	114,920.08	3	38,306.69	417.98	<0.0001
Stocking density × water temperature	63,061.50	6	10,510.25	114.68	<0.0001
Residual	2,199.53	24	91.65		
Total	185,940.50	35			

SS, Sum of squares; d.f., Degrees of freedom; MS, Mean square.

Table 2. Q_{10} values of abalone *Haliotis discus hannai* exposed to different stocking densities and water temperature ranges

Stocking density (kg m^{-3})	Temperature interval (°C)					
	10–15	10–20	10–25	15–20	15–25	20–25
10	6.21	4.34	2.96	3.11	2.09	1.40
20	2.60	3.09	0.85	3.67	0.49	0.07
40	3.32	3.29	0.74	3.27	0.35	0.04

Q_{10}, Temperature coefficient of the oxygen consumption rate.

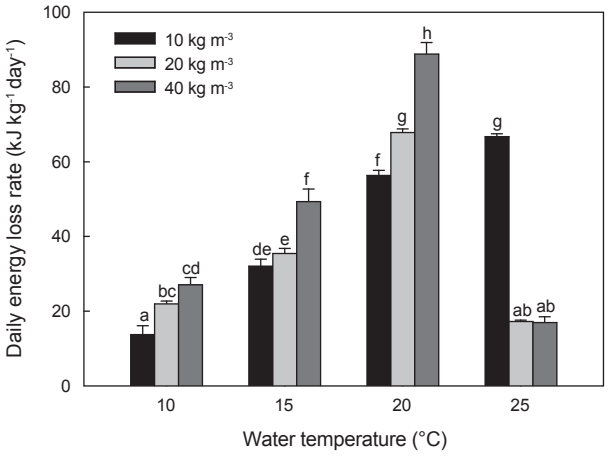


Fig. 3. Daily energy loss rate of abalone *Haliotis discus hannai* exposed to three different stocking densities and four different water temperatures. Values (mean±SE, n=3) with different letters are significantly different (P<0.05).

활동으로 인해 OCR이 감소한다고 보고하였다. 이상의 결과에서 본 실험의 25°C 조건에서 북방전복의 OCR 증가가 둔화되거나 감소하는 결과는 고수온에 의한 체내 스트레스 반응 등으로 인한 생리 기능의 저해 현상으로 나타난 것으로 생각된다. 하지만 본 연구는 수온을 시간당 1°C의 속도로 10→15→20→25°C로 단계적으로 상승시켜 실험이 이루어졌기 때문에 비교적 짧은 시간 내에 다음 수온에 노출되었다. 즉, 본 연구에서 관찰된 OCR은 장기간의 사육 및 생리적 순응에 의해 형성된 만성 적응이라기보다 단기간의 수온 상승에 대한 급성 또는 준급성 생리반응과 함께 실험 개체의 스트레스 반응, 활동성 변화 및 항상성 조절 기작 등이 동시에 반영된 결과로 볼 수 있다. 따라서 각 수온 조건에 장기적 적응이 이루어진 개체의 생리적 반응과는 차이가 있을 수 있으므로 본 연구의 결과를 양식 현장에서 장기간 사육된 개체의 수온 적응 반응으로 직접적으로 해석하는 데에는 한계가 있다. 향후 각 수온 조건의 장기 사육 환경에서 만성적 수온 적응 평가를 통한 대사 반응의 변화와 수온 민감도를 조사하기 위한 실험을 통해 만성 및 급성 영향에 대한 북방전복의 생리적 반응 비교가 필요하다.

Kang et al. (2019)은 북방전복의 수온 변화에 따른 반응 민감도를 파악하는 방법으로 Q_{10} 값에 초점을 두었다. Kang et al. (2019)은 수온 상승에 따라 북방전복의 OCR은 증가하지만, 저수온 및 고수온 구간에서 나타나는 수온 변화 민감도는 다르다는 것을 보고하였다. 즉, 8–18°C, 13–23°C, 그리고 18–28°C 구간의 Q_{10} 값을 각각 3.15, 1.87, 그리고 1.60으로 보고하여, 본 실험에서 나타난 고수온 구간으로 갈수록 Q_{10} 값이 감소하는 결과와 유사하였다. 이는 고수온에서 관찰된 낮은 OCR이 단순히 OCR이 감소했다는 의미가 아니라, 고수온 스트레스로 인한 활동성 저하, 섭식 감소 또는 대사 억제를 반영한다는 것을 시사한다(Vosloo et al., 2013; Ding et al., 2016). Australian abalone (*Haliotis laevigata*×*Haliotis rubra*)의 경우 고수온에 1주일간 사육한 결과 면역력 억제뿐만 아니라 아가미의 세포 손상이 관찰되어 호흡에 영향을 미칠 수 있다는 보고가 있으며(Hooper et al., 2014), Taiwan abalone (*Haliotis diversicolor supertexta*)의 경우 28°C에서 32°C로 수온을 증가시킬 경우 세포 내 respiratory burst가 유의하게 증가해 면역력이 감소하는 결과를 보였다(Cheng et al., 2004). 하지만 고온에 노출된 전복(*H. rubra*)의 경우 초기 1–7일간만 면역 반응을 보인 후 다시 대조구와 차이가 없어진다는 보고를 볼 때(Dang et al., 2012), 조사 대상 종과 실험 기간에 따라 고수온이 전복의 면역 반응에 미치는 영향이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 장기간 모니터링을 통한 북방전복의 OCR 변동 특성과 Q_{10}, 면역 지표 및 성장 특성 분석이 필요하다.

사육밀도는 양식 생산성을 좌우할 수 있는 중요한 양식 운영 지표로서, 고밀도 사육은 많은 생산량을 기대할 수 있지만 사육 시스템 내에서 충분한 산소 공급과 먹이 공급, 공간 및 환경 관리가 이루어지지 않을 경우 전복의 성장률, 면역 기능 및 생존율에 부정적인 영향을 미치게 된다(Park et al., 2008b; Gao et al., 2018). 본 실험 결과 사육밀도는 북방전복의 대사 생리에 직접적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉, 10–20°C 수온 조건에서 사육밀도 10 kg m^{-3}보다 20 kg m^{-3}와 40 kg m^{-3}의 OCR이 약 1.1–2.0배 증가한다는 것으로 볼 때 동일 용적 내 북방전복의 안정적인 사육 및 성장을 위해서는 동일한 수준의 OCR 또는 그 이상의 산소 공급이 필요하다는 것을 간접적으로 시사한다. 특히, 수온 25°C 조건에서는 10 kg m^{-3}의 경우 10–20°C에 비해 OCR의 증가 비율이 감소하고 20 kg m^{-3}와 40 kg m^{-3}에서는 20°C보다 오히려 약 75–80% 감소하는 대사율 저해 현상이 나타나는 결과로 볼 때 사육 시스템 내 충분한 산소 공급이 이루어지지 않을 경우 스트레스에 따른 폐사 발생 가능성이 높아질 수 있다. 하지만 가장 낮은 사육밀도인 10 kg m^{-3}의 경우 다른 고밀도구에 비해 OCR이 소폭이라도 증가할 수 있었던 것은 개체의 스트레스 반응 및 항상성 유지 등에 필요한 체내 생리적 반응 정도가 상대적으로 낮게 유지된 결과로 생각된다. 따라서 향후 사육밀도에 따른 산소 공급 정도, 사육 시스템 내 유수량 조절 및 부착 면적에 따른 북방전복의 스트레스 반응, 대사율 변동 및 성장 효율에 대한 연구를 통해 생산성 향상을 위한 시스템 내 산소 관리 방안 수립이 필요하다.

북방전복의 OCR은 에너지 수지에 직접적인 영향을 미치며(Fig. 3), 사육밀도에 따라 그 정도는 달라진다(Gao et al., 2018). Gao et al. (2018)은 평균 6.9 g의 북방전복을 대상으로 평균 수온 16.96–17.24°C와 600, 900, 1,200, 그리고 1,500 ind m^{-2}의 사육밀도 조건에서 30일간 사육하는 동안 호흡에 따른 일간 에너지 소비율이 실험 시작과 30일째 모두 600 ind m^{-2}에서 900 ind m^{-2}까지 증가함에 따라 증가하였지만 1,200 ind m^{-2}와 1,500 ind m^{-2}에서는 감소하는 경향을 보여, 본 실험에서 25°C

의 높은 사육밀도인 20 kg m^{-3}와 40 kg m^{-3}에서 에너지 소비율이 감소하는 결과와 유사하였다. 하지만 본 실험의 수온 조건(즉, 10–20°C)에서 나타난 사육밀도 증가와 함께 에너지 소비율이 증가한 결과와의 차이는 실험에 사용한 개체의 크기, 실험 기간 및 사육 조건의 차이에 기인한 것으로 생각된다.

이상의 결과에서 수온과 사육밀도는 82.8–109.6 mm 크기의 북방전복의 대사 반응에 직접적인 영향을 미치며, 고수온(25°C)에서는 OCR 증가가 둔화되거나 오히려 감소하며 사육밀도가 높아질수록 보다 많은 대사율 저해 현상이 나타나는 것을 볼 때, 북방전복의 안정적인 생산성 향상을 위해서는 용존산소 공급 장치가 필요하며, 각 수온 조건의 대사 반응별 에너지 소비를 감안한 먹이 공급 전략, 즉 수온별로 소비되는 대사 에너지를 보상하고 생존, 성장 및 항상성 유지를 위한 적절한 먹이 공급 방법 구축을 통해 지속 가능한 양식을 위한 기초 자료로 본 실험 결과를 활용할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 연구비(PG52420) 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 실험 생물을 지원해 주신 경남수산자원연구소 박대원 기술담당관님께 감사드립니다.

References

Avnimelech Y, Mozes N and Weber B. 1992. Effects of aeration and mixing on nitrogen and organic matter transformations in simulated fish ponds. Aquac Eng 11, 157-169. https://doi.org/10.1016/0144-8609(92)90002-F.

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, NY, U.S.A., 279-352.

Cheng W, Hsiao IS, Hsu CH and Chen JC. 2004. Change in water temperature on the immune response of Taiwan abalone *Haliotis diversicolor supertexta* and its susceptibility to *Vibrio parahaemolyticus*. Fish Shellfish Immunol 17, 235-243. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2004.03.007.

Dang VT, Speck P and Benkendorff K. 2012. Influence of elevated temperatures on the immune response of abalone, *Haliotis rubra*. Fish Shellfish Immunol 32, 732-740. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2012.01.022.

Ding J, Li L, Wu F and Zhang G. 2016. Effect of chronic temperature exposure on the immunity of abalone, *Haliotis discus hannai*. Aquac Res 47, 2861-2873. https://doi.org/10.1111/are.12736.

Duan J, Liu H, Chen S, Chang L, Bian L, Yao Y, Yang X and Yan X. 2020. Temperature effects on feeding and oxygen consumption rate of *Haliotis discus hannai* Ino. Chin Agric Sci Bull 36, 153-157. https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb20190900687.

Gao X, Li X, Shi C, Wu F, Song C and Liu Y. 2018. Effects of stocking density on growth, metabolism, and energy budget of *Haliotis discus hannai* Ino. Aquaculture 483, 84-95. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.09.045.

Hawkins AJS. 1995. Effects of temperature change on ectotherm metabolism and evolution: Metabolic and physiological interrelations underlying the superiority of multi-locus heterozygotes in heterogeneous environments. J Therm Biol 20, 23-33. https://doi.org/10.1016/0306-4565(94)00023-C.

Hoefnagel KN and Verberk WCEP. 2017. Long-term and acute effects of temperature and oxygen on metabolism, food intake, growth and heat tolerance in a freshwater gastropod. J Therm Biol 68, 27-38. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.11.017.

Hooper C, Day R, Slocombe R, Benkendorff K, Handlinger J and Goulias J. 2014. Effects of severe heat stress on immune function, biochemistry and histopathology in farmed Australian abalone (hybrid *Haliotis laevigata* × *Haliotis rubra*). Aquaculture 432, 26-37. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.03.032.

Jarayabhand P, Kruiroongroj W and Chaisanit C. 2010. Effects of stocking density on growth performance of Thai abalone, *Haliotis asinina*, Linnaeus 1758, reared under a semiclosed recirculating land-based system. J Shellfish Res 29, 593-597. https://doi.org/10.2983/035.029.0307.

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 HY, Lee YJ, Song WY, Kim TI, Lee WC, Kim TY and Kang CK. 2019. Physiological responses of the abalone *Haliotis discus hannai* to daily and seasonal temperature variations. Sci Rep 9, 8019. https://doi.org/10.1038/s41598-019-44526-3.

Kaushik SJ. 1998. Nutritional bioenergetics and estimation of waste production in non-salmonids. Aquat Living Resour 11, 211-217. https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)89003-7.

Kim BH, Park MW, Kim TI, Son MH and Lee SW. 2014. The growth and survival rate of juvenile abalone, *Haliotis discus hannai* at different intermediate culture type in net cage or indoor tank. Korean J Malacol 30, 235-242. https://doi.org/10.9710/kjm.2014.30.3.235.

KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2026. Agriculture, Forestry, and Fishery. Ministry of Data and Statistics, Daejeon, Korea. Retrieved from https://kosis.kr on September 23, 2026.

Lee HB, Jang HS, Oh YD, Lee YH and Lim HK. 2023. Analysis of the physiological responses of Pacific abalone (*Haliotis discus hannai*) to various stressors to identify a suitable stress indicator. J World Aquac Soc 54, 1407-1426. https://doi.org/10.1111/jwas.12969.

Mgaya YD and Mercer JP. 1995. The effects of size grading and stocking density on growth performance of juvenile abalone, *Haliotis tuberculata* Linnaeus. Aquaculture 136, 297-

312. https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)00066-6.
Morash AJ and Alter K. 2016. Effects of environmental and farm stress on abalone physiology: Perspectives for abalone aquaculture in the face of global climate change. Rev Aquac 8, 342-368. https://doi.org/10.1111/raq.12097.
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.
Park J, Kim PK and Jo JY. 2008a. Growth performance of disk abalone *Haliotis discus hannai* in pilot- and commercial-scale recirculating aquaculture systems. Aquac Int 16, 191-202. https://doi.org/10.1007/s10499-007-9136-8.
Park J, Kim HB, Kim PK and Jo JY. 2008b. The growth of disk abalone, *Haliotis discus hannai* at different culture densities in a pilot-scale recirculating aquaculture system with a baffled culture tank. Aquac Eng 38, 161-170. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.02.001.
Pörtner HO. 2002. Climate variations and the physiological basis of temperature dependent biogeography: Systemic to molecular hierarchy of thermal tolerance in animals. Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol 132, 739-761. https://doi.org/10.1016/S1095-6433(02)00045-4.
Searle T, Roberts RD and Lokman PM. 2006. Effects of temperature on growth of juvenile blackfoot abalone, *Haliotis iris* Gmelin. Aquac Res 37, 1441-1449. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01580.x.
Song M, Lee GS, Kang PJ, Park HM 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.
Vandepeer M. 2006. Abalone aquaculture subprogram: Preventing summer mortality of abalone in aquaculture systems by understanding interactions between nutrition and water temperature. South Australian Research and Development Institute (Aquatic Sciences), Adelaide, Australia, 85.
Vivanco-Aranda M, Gallardo-Escárate CJ and del Río-Portilla MA. 2011. Low-density culture of red abalone juveniles, *Haliotis rufescens* Swainson 1822, recirculating aquaculture system and flow-through system. Aquac Res 42, 161-168. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02545.x.
Vosloo D, Vosloo A, Morillon EJ, Samuels JN and Sommer P. 2013. Metabolic readjustment in juvenile South African abalone (*Haliotis midae*) acclimated to combinations of temperature and dissolved oxygen levels. J Therm Biol 38, 458-466. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2013.07.001.
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.
Yin F, Sun P, Peng S, Tang B, Zhang D, Wang C, Mu C and Shi Z. 2013. The respiration, excretion and biochemical response of the juvenile common Chinese cuttlefish, *Sepiella maindroni* at different temperatures. Aquaculture 402-403, 127-132. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.03.018.