KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 56(4), 541-548, 2023

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 56(4),541-548,2023

사육 밀도와 개체 크기에 따른 북방전복(*Haliotis discus hannai*) 치패의 성장과 이동 특성

장현석[1] · 최미진[2] · 오영대[3] · 임한규[1,2]*

[1]국립목포대학교 바이오의약보건생명융합학협동과정, [2]국립목포대학교 해양수산자원학과, [3]국립수산과학원 수산종자육종연구소

Analysis of the Effects of Stocking Density and Individual Size on the Growth and Movement Characteristics of Juvenile Abalone *Haliotis discus hannai*

Hyun Seok Jang[1], Mi Jin Choi[2], Young Dae Oh[3] and Han Kyu Lim[1,2]*

[1]Interdisciplinary Program of Biomedicine, Health & Life Convergence Sciences Mokpo National University, Muan 58554, Republic of Korea
[2]Department of Marine and Fisheries Resources, Mokpo National University, Muan 58554, Republic of Korea
[3]Fisheries Seed and Breeding Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Haenam 59002, Republic of Korea

Behavior serves as an important indicator of the effects of environmental stressors on organisms. In this study, one-year-old abalone *Haliotis discus hannai* (15.1±0.8 mm) were used and each 0.34 m2 tank was stocked with 100, 150, 200, 250, and 300 juvenile abalone. After 328 days, we found that the low stocking density treatment showed significantly higher growth, whereas the high stocking density treatment showed significantly lower growth. In addition, abalone showed a lower rate of movement, distance moved, and velocity at higher stocking densities, but only velocity differed significantly. In contrast, In the Supplied the feed tanks significant difference between the moving distance and velocity. When the two groups of different sizes were mixed in tank, the rate of movement, distance moned, and velocity showed significant differences between differently-sized indivisuals. Our study indicates that breeding abalone at high densities has a negative effect on their growth and survival, which is thought to primarily be caused by spatial competition, and secondarily by differences in body size, ultimately affecting growth and productivity.

Keywords: Abalone, Density, Growth, Survival, Behavior

서 론

동물의 행동은 무작위적인 움직임이 아니라 생존을 보장하기 위한 체계적이며 예측 가능한 활동이다. 또한 행동변화를 통해 환경 스트레스 요인에 대한 영향을 인지하고 평가한 후 대응할 수 있다(Vogl et al., 1999; Brewer et al., 2001). 따라서 양식 동물을 사육관리 하는데 있어 양식 대상종의 행동에 대해 이해하는 것은 중요하다. 복족류인 전복의 행동에 관한 연구들로는 *Haliotis rubra*의 성장, 섭식, 행동, 육질에 촉각 자극이 미치는 영향(Allen et al., 2006), 먹이 공급량에 따른 *H. laevigata*의 섭식행동(Buss et al., 2015), 이동 패턴 분석을 통한 적정 사육 수온과 먹이 선호도 조사(Currie et al., 2016) 등 사육과 관련된 연구가 진행되어 있으며, 대부분 소수의 개체를 대상으로 연구가 진행되어져 왔었다. 그러나 양식 전복의 성장과 생존에 큰 영향을 미치는 요인인 사육 밀도에 따른 행동학적인 연구는 찾아볼 수 없는 실정이다. 전복 종자생산장에서 생산성을 높이기 위해 종자의 크기, 사육 밀도, 선별 주기 등과 같은 요소들이 중요하게 여겨지고 있다(Flemming and Hone, 1996). 특히 사육밀도는 *H. tuberculata* (Mgaya and Mercer, 1995), *H. rubra* (Huchette et al., 2003a), *H. rufescens* (Vivanco-Aranda et al., 2011), 북방전복(*H. discus hannai*) (Park et al., 2008a, 2008b), *H. asinine* (Jarayabhand et al., 2010) 등을 대상으로 한 연구들

***Corresponding author:** Tel: +82. 61. 450. 2395 Fax: +82. 61. 452. 8875
E-mail address: limhk@mnu.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.2023.0541
Korean J Fish Aquat Sci 56(4), 541-548, August 2023
Received 26 June 2023; **Revised** 24 July 2023; **Accepted** 26 July 2023
저자 직위: 장현석(대학원생), 최미진(전임연구원), 오영대(연구원), 임한규(교수)

에서 성장에 중요한 역할을 한다는 결과들이 이미 보고되어 있다. 전복류는 부착성 저서동물로서 사육 밀도에 따라 공간과 먹이 공급에 의존적인 성장 결과를 보였다(Ahmed et al., 2013). 이러한 밀도 의존적인 성장 결과에 따라 개체 당 부착 면적이 감소하면 결국 공간 경쟁으로 이어져 성장 감소를 초래할 수 있다고 보고되어 있다(Huchette et al., 2003b). 전복 양식장에서는 불균등한 성장으로 인해 개채마다 크기 차이가 발생하기 때문에 고른 성장을 위해 선별과 밀도 조절이 중요시되고 있다(Han, 1998). 사육 밀도가 높은 양식장에서 전복들은 서로 겹쳐 있는 상태로 바닥과 은신처(shelter)에 붙어 있거나 수면 위까지 올라와 있는 경우도 있다. 고밀도 전복 사육 환경은 이동성과 먹이로 접근하는 행동에 영향을 미칠 것으로 예상되지만 밀도와 섭식 행동에 관한 연구 결과는 전무한 실정이다(Douros, 1987). 대부분의 전복 양식장에서는 밀도로 인한 종내 먹이경쟁을 최소화하기 위해 적정량 이상의 충분한 사료를 공급하거나 비정기적으로 선별을 하고 있을 뿐(Huchette et al., 2003a; Steinarsson and Imsland, 2003), 전복의 먹이 섭식 행동에 대해서는 전혀 고려하지 않고 있다.

지금까지 전복 사육 밀도에 관한 연구들은 대부분 높은 사육밀도가 사육 중인 전복의 성장에 부정적인 영향을 미친다고 보고되어 있지만, 높은 밀도가 어떻게 성장에 부정적인 영향을 미치는 지에 관한 이유는 과학적으로 설명하지 못하고 있다. 따라서 어린 전복의 사육 밀도, 개체 크기, 사료 공급이 전복의 성장과 생존에 미치는 영향을 이해하기 위해 이동 거리(moving distacne, MD), 이동 속도(velocity, V), 이동률(moving rate, MR) 등과 같은 이동 특성을 조사하였다.

재료 및 방법

실험 대상종 및 시설

사육 밀도 실험은 2018년 09월 03일부터 2019년 07월 26일까지 총 328일간 실시하였으며, 개체 크기별 이동패턴 실험과 사료공급 후 개체 크기별 이동패턴 실험은 각각 2019년 12월 13일부터 2019년 12월 15일, 2020년 04월 07일부터 2020년 04월 09일까지 3일씩 전라남도 해양수산과학원 수산종자연구소에서 실시되었다. 밀도 실험용 어린 전복은 전라남도 완도군 고금면 전복 종자배양장에서 사육한 어린 북방전복(각장 15.1 ± 0.8 mm)을 사용하였으며, 사료공급과 개체 크기에 따른 이동패턴 실험용 전복은 같은 종자배양장에서 사육한 각장 30.05 ± 0.54 mm와 15.08 ± 0.59 mm 크기의 전복을 사용하였다. 실험 수조는 소형 polyvinyl chloride 수조(0.44 m × 0.78 m × 0.24 m)였으며, polycarbonate 재질의 쉘터(40 × 60 cm)를 각 수조에 하나씩 설치하였고, 쉘터의 총 단면적은 0.27 m^2였다.

실험구 설정 및 사육관리

사육밀도는 전복표준양식지침서(NIFS, 2008)의 m^2당 크기별 사육 밀도를 기준으로 각각 100, 150, 200, 250, 300마리씩 0.34 m^2 수조에 수용하였다. 치패의 개체 크기별 이동 패턴 실험은 각장 평균 크기 3 cm (large)와 각장 평균 크기 1.5 cm (small)인 2가지 실험구로 설정하였으며, 사료 공급 후 개체 크기에 따른 이동 패턴 실험은 두 가지 크기를 혼합한 실험구(mixed)까지 포함하여 3가지 실험구를 설정하였다. 각 실험구에 100마리씩 입식하였으며, 혼합 실험구는 다른 크기의 전복을 각각 50마리씩 총 100마리를 입식하였다. 사육 밀도실험은 2반복으로 실시하였으며, 나머지 2개의 실험은 모두 3반복으로 실험하였다. 사료는 시판되고 있는 전복 배합사료(DongA One, Co. Ltd., Seoul, Korea; crude protein 30%, crude lipid 4%, crude fiber 8%)를 사용하였으며, 사육 밀도 실험에서는 매일 오후 5시에 체중의 5%만큼 수온과 관계없이 동일하게 공급하였다. 사료 공급이 이동패턴에 미치는 영향을 연구하는 실험은 영상 촬영 1시간 전에 사료를 공급하였다. 실험기간 동안 환경조사를 위해 해양환경조사장비(YSI 5908; Xylem Inc., Washington DC, USA, USA)를 이용하여 매일 오전 9시에 수온, 용존산소, 염분, pH를 측정하였다.

성장도 조사

성장은 실험시작부터 30일 간격으로 종료까지 각 실험구마다 30마리씩 무작위로 채취하여 각장(shell length)과 중량(weight)을 측정하였다. 각장은 버니어캘리퍼스(Hando, Cheonan, Korea)를 이용하여 0.01 mm까지 측정하였고, 중량은 전자저울(KOLOGN, Shenzhen, China)을 이용하여 0.01 g까지 계측하였다. 측정된 각장과 중량을 이용하여 아래 식에 따라 절대성장율(absolute growth rate), 일간성장율(daily growth rate, DGR), 순간성장율(specific growth rate), 증중률(weight gain, WG), 일간증중율(daily weight gain, DWG), 순간증중율(specific weight gain, SWG)을 산출하였다.

산출된 각 성장식은 다음과 같다.

$$\text{Absolute growth rate (ARG; \%)} = (Le-Li)/Li \times 100$$

$$\text{Daily growth rate (DGR; \%·day-1)} = (Le-Li)/(T-t) \times 100$$

$$\text{Specific growth rate (SGR; \%·day-1)} = (\ln Le-\ln Li)/(T-t) \times 100$$

$$\text{Weight gain (WG; \%)} = (We-Wi)/Wi \times 100$$

$$\text{Daily weight gain (DWG; \% day-1)} = (We-Wi)/(T-t) \times 100$$

$$\text{Specific weight gain (SWG; \% day-1)} = (\ln We-\ln Wi)/(T-t) \times 100$$

We: 최종 평균 중량, Wi: 최초 평균 중량, Le: 최종 평균 각장, Li: 최초 평균 각장, T - t: 사육 일수

생존율(survival rate, SR) 조사를 위해 실험기간 동안 매일 청소할 때 폐사한 개체들을 확인하였고 매월 누적 개체수를 환산하여 월별 SR을 계산하였다.

이동패턴 분석

각 실험구마다 이동 패턴을 분석하기 위하여 적외선 CCTV 카메라(Smart IP Camera 1080P Full HD IP Camera 360; Xiaomi, Beijing, China)를 사용하였다. 영상촬영을 위하여 프레임(frame, 90×50×100 cm)을 제작하였고 촬영을 위해 카메라 고정핀을 프레임에 설치하여 고정시켰다. 영상 촬영은 전복의 이동 패턴을 정확히 분석하기 위해 촬영 시 쉘터는 제거하였으며, 화면 왜곡을 최소화하기 위하여 수조의 절반만 촬영하였다. 촬영 시간은 카메라가 녹화된 순간부터 5분간 카메라 2대를 사용하여 2개의 수조를 촬영하였다. 촬영시간은 Buss et al. (2015)의 연구를 참고하여 전복의 활동이 활발한 오후 9시에 매일 촬영을 시작하였다. 각 실험구 마다 촬영조건을 동일하게 맞추기 위해 매일 첫 촬영을 각각 다른 실험구로 옮겨가면서 실시하였다. 저장된 영상자료는 화면 가장자리의 왜곡과 밝기를 영상편집프로그램(PowerDirector 17; CyberLink, Taipei, Taiwan)을 이용하여 보정하였으며, Oh (2019)가 보라성게의 이동 패턴 분석을 위해 사용한 후처리영상소프트웨어(Logger Pro 3.15; Vernier Softeware, Beaverton, OR, USA)를 사용하였다. 영상분석은 평균 이동 거리 이상으로 이동한 개체를 움직인 것으로 판단하였으며 직접 추적하여 데이터를 획득하였다. 화면 바깥쪽에서 프레임으로 들어오는 개체는 추적하지 않았으며 화면에서 벗어나는 개체들은 벗어나기 직전까지의 데이터를 사용하였다. 획득한 데이터를 토대로 전복의 MR, MD, V를 계산하였으며 이동률은 화면에서 보이는 전체 마리 수를 기준으로 움직인 개체들의 마리 수를 계수하여 값을 얻었다. 또한 이동거리와 이동 속도는 소프트웨어에 기록된 x, y 좌표값을 이용하여 계산하였다. 좌표값을 이용한 계산식은 다음과 같다.

$$MD = \sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}$$

여기서 x, y는 평면상 전복 이동에 대한 좌표점이며 MD는 전복의 이동거리이다.

$$V = MD/T$$

V는 이동속도이며, T는 시간이다.

통계처리

각 실험에서 얻어진 측정값들은 평균과 표준오차(mean±SE)로 표시하였으며, 측정값들 사이의 유의차 유무는 SPSS-통계프로그램(version 23)을 이용하여 one way ANOVA 및 Duncan multiple test로 검정하였다($P<0.05$).

결 과

사육 밀도에 따른 성장 및 생존

전라남도 해양수산연구원 수산종자연구소에서 실시한 328일 동안의 사육 밀도 실험수조 내의 환경 측정결과 수온은 사육 150일째에 7.8℃로 가장 낮았으며, 사육 328일째에 24.5℃로 가장 높았다(Fig. 1) DO (dissolved oxygen)는 5.31–10.1 mg/L 범위였으며, 수온과 DO는 계절변화에 따라 주기적으로 변화된 값을 보였다(Fig. 1). pH는 사육 기간 동안 7.94–8.09 범위였고, 염분은 31.5–33.53 psu 범위였다(Fig. 1). pH와 염분은 수온과 DO에 비해 계절의 영향을 받지 않고 실험 기간 동안 일정한 값을 유지하였다.

어린 북방전복의 밀도에 따른 성장요인과 SR을 비교한 결과를 Table 1에 나타내었다. 절대성장률과 순간성장률은 사육밀도가 가장 낮은 100 ind/tank가 다른 실험구들과 비교하였을 때 유의적으로 높은 성장을 보였다($P<0.05$). 150 ind/tank와 200 ind/tank는 100 ind/tank와 비교하였을 때 유의적으로 낮은 성장을 보였으며, 250 ind/tank와 300 ind/tank는 다른 실험구들과 비교하였을 때 유의적으로 낮은 성장을 보였다($P<0.05$). DGR은 사육밀도가 가장 낮은 100 ind/tank가 다른 실험구들과 비교하였을 때 유의적으로 높은 성장을 보였으며, 사육밀도

Table 1. Growth performance and Survival rate of abalone *Haliotis discus hannai* juvenile at different densities in the tank for 328 days*

Stocking density	100 (ind/tank)	150 (ind/tank)	200 (ind/tank)	250 (ind/tank)	300 (ind/tank)
AGR (%)	105.5±0.33^a	99.2±0.07^b	98.9±0.13^b	97.2±0.03^c	96.6±0.10^c
DGR (%·day^{-1})	4.83±0.02^a	4.54±0.00^b	4.52±0.01^b	4.45±0.00^c	4.42±0.00^d
SGR (%·day^{-1})	0.22±0.01^a	0.21±0.02^b	0.21±0.01^b	0.21±0.00^c	0.21±0.00^c
WG (%)	396.7±1.67^a	365.0±3.33^b	332.5±2.50^c	325.8±2.50^c	309.2±4.17^d
DWG (%·day^{-1})	0.73±0.01^a	0.67±0.01^b	0.61±0.01^c	0.60±0.01^c	0.57±0.01^d
SWG (%·day^{-1})	0.49±0.02^a	0.47±0.01^b	0.45±0.00^c	0.44±0.00^c	0.43±0.01^d
FCR (%)	0.40±0.03^a	0.41±0.02^a	0.43±0.03^a	0.43±0.02^a	0.43±0.03^a
SR (%)	78±4.1^a	71.3±5.1^b	63.5±1.7^c	48±2.5^d	39.3±3.7^e

AGR, Absolute growth rate; DGR, Daily growth rate; SGR, Specific growth rate; WG, Weight gain; DWG, Daily weight gain; SWG, Specific weight gain. *Values with the same letter are not significantly different ($P<0.05$).

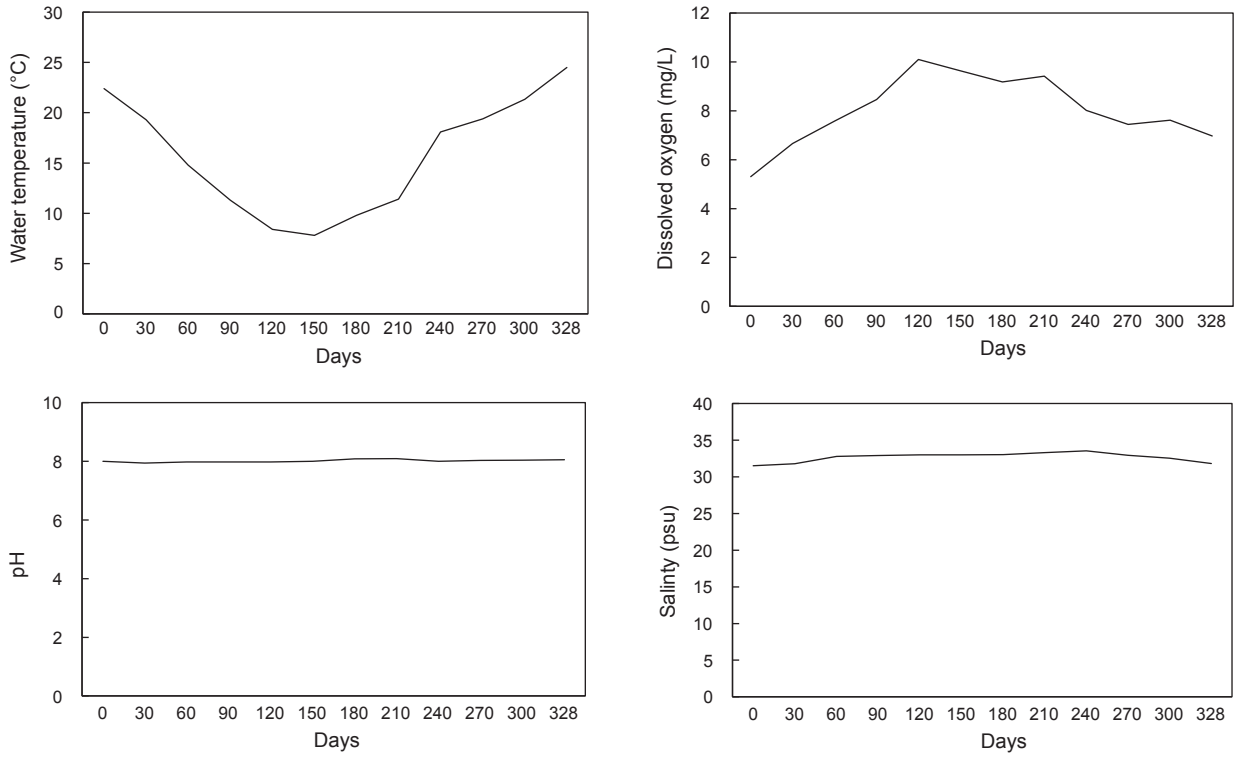

Fig. 1. Changes of environmental factors in experimental tanks for 328 days.

가 가장 낮은 300 ind/tank가 다른 실험구들과 비교하였을 때 유의적으로 낮은 성장을 보였다(P<0.05). WG, DWG, SWG 또한 사육밀도가 낮은 100 ind/tank가 다른 실험구들과 비교하였을 때 유의적으로 높은 성장을 보였으며, 사육밀도가 높은 300 ind/tank가 다른 실험구들과 비교하였을 때 유의적으로 낮은 성장을 보였다(P<0.05).

사육 밀도에 따른 이동 패턴

사육 밀도에 따른 북방전복의 이동률과 이동거리를 분석한 결과 100 ind/tank는 각각 34.3±2.34%, 61.58±5.32 cm로 모든 실험구들과 비교하였을 때 가장 높은 이동률과 이동거리를 보였고, 150 ind/tank는 24.3±0.06%로 100 ind/tank 와 비교하였을 때 낮은 이동률을 보였다(P<0.05) (Fig. 2). 200 ind/tank, 250 ind/tank, 300 ind/tank은 각각 15.2±0.81%, 12.7±0.66%, 16.9±1.73%로 서로 간의 유의적인 차이는 보이지 않았으며, 100 ind/tank, 150 ind/tank와 비교하였을 때 유의하게 낮은 이동률을 보였다(P<0.05) (Fig. 2).

치패 크기에 따른 이동 패턴

어린 전복의 크기에 따른 이동 패턴을 분석하였다. 이동률은 large가 47.08±7.28%였고, small은 42.43±5.75%로 유의적인 차이를 보이지 않았다(P>0.05) (Fig. 3). 이동 거리 또한 large가 30.41±1.54 cm였고, small은 26.68±2.67 cm로 유의적인 차이를 보이지 않았다(P>0.05)(Fig. 3). 그러나 이동 속도는 large가 0.287±0.02 cm/s로 small의 0.156±0.01 cm/s보다 빨랐다(P<0.05)(Fig. 3).

사료 공급 후 치패 크기에 따른 이동패턴

사료 공급 후 어린 전복의 크기에 따른 이동 패턴을 분석한 결과, large의 이동률은 35.57±4.23%였고, small은 38.29±5.11%로 유의적인 차이를 보이지 않았다(P>0.05) (Fig. 4). 그러나 이동 거리는 large가 63.58±6.24 cm였고, small이 34.06±5.04 cm로 유의적인 차이를 보였다(P<0.05) (Fig. 4). 이동 속도 또한 large가 0.463±0.03 cm/s였고, small이 0.194±0.01 cm/s로 유의적인 차이를 보였다(P<0.05) (Fig. 4).

2가지 크기의 전복을 혼합한 실험 결과에서 이동률은 mixed large (ML)는 37.14±3.95%였고, mixed small (MS)은 25±2.52%로 유의적인 차이를 보였다(P<0.05) (Fig. 4). 이동 거리와 이동속도 또한 ML이 각각 41.01±3.45 cm와 0.309±0.02 cm/s였고, MS는 30.15±2.21 cm와 0.217±0.03 cm/s로 유의적인 차이를 보였다(P<0.05)(Fig. 4).

고찰

사육 밀도는 양식생물들의 성장과 생존, 그리고 생산에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나이다(Gornati et al., 2004; Sch-

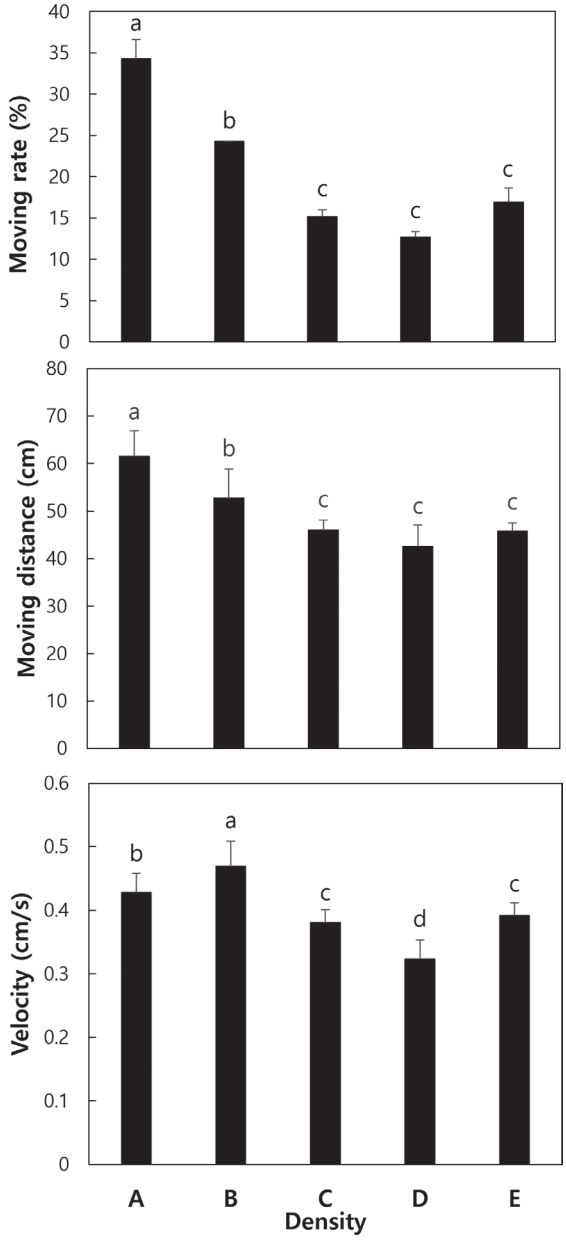

Fig. 2. Moving rate (%), Moving distance (cm), velocity (cm/s) of abalone *Haliotis discus hannai* juvenile at different densities. All values are expressed as mean±standard error, and different letters above the bars indicate significant difference (P<0.05). (A=100 ind/tank; B=150 ind/tank, C=200 ind/tank; D=250 ind/tank; E=300 ind/tank).

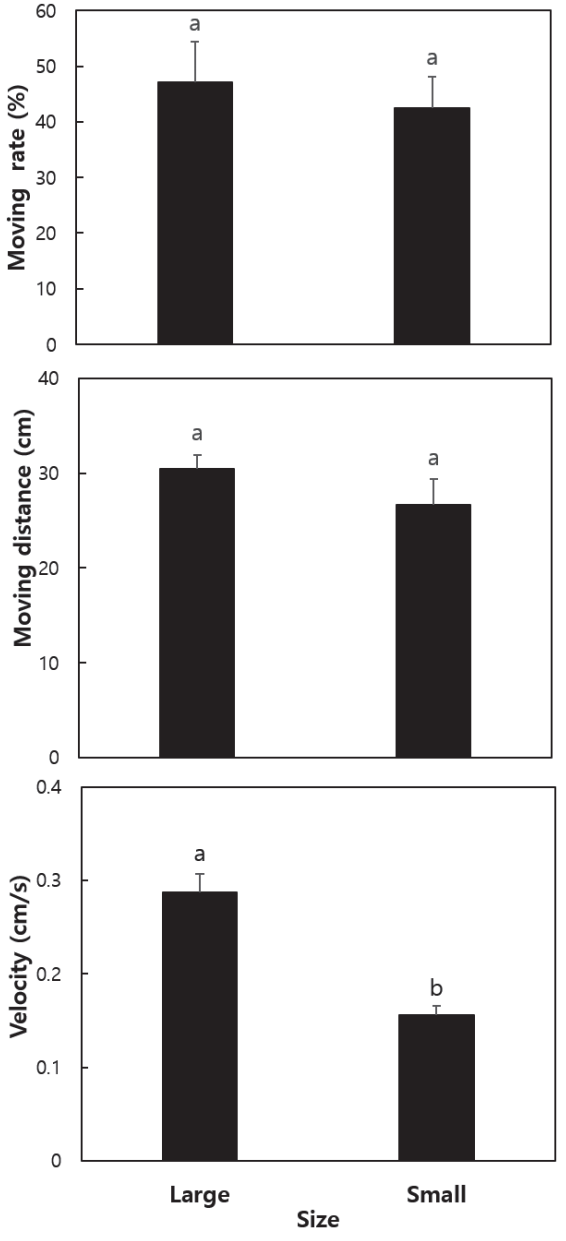

Fig. 3. Moving rate (%), Moving distance (cm), Velocity (cm/s) of abalone *Haliotis discus hannai* juvenile at different size (large, 3 cm; small, 1.5 cm) in each tank. All values are expressed as mean standard error, and different letters above the bars indicate significant difference (P<0.05).

ram et al., 2006). 사육 현장에서는 제한된 공간에서의 사료 공급으로 인한 종 내 먹이 경쟁 증가로 인해 성장 감소 및 폐사 현상이 나타나고 있기 때문에(Wu et al., 2009) 적정 사육 밀도를 설정하기 위해 많은 연구가 수행되어왔다. 본 연구에서도 기존의 연구들(Lloyd and Bates, 2008; Wassnig et al., 2010; Ahmed et al., 2013; Xiaolong et al., 2018)과 같이 사육 밀도가 치패의 성장과 생존에 영향을 미치는 결과를 보였다. 그러나 사료계수의 결과에서는 유의적인 차이를 보이지 않았다. 이것은 전복의 경우 어류와는 달리 먹이 섭식량을 정확히 파악하기 어렵기 때문에 실험구들 사이의 유의적인 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다. 전복 양식에 있어서 먹이는 총 생산 비용의 약

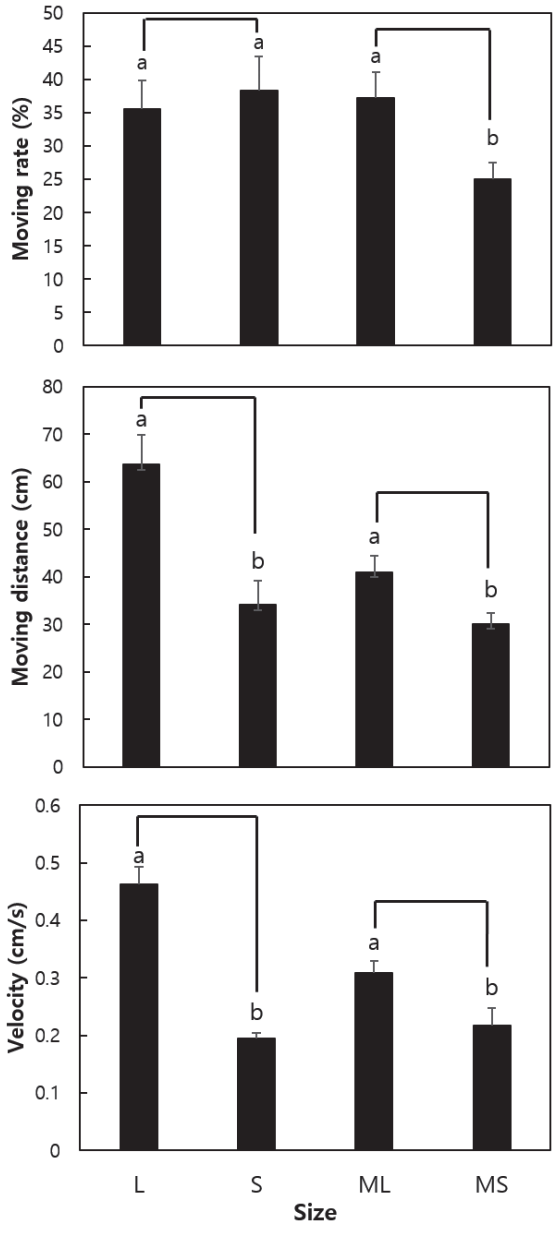

Fig. 4. Moving rate (%), moving distance (cm), velocity (cm/s) of abalone *Haliotis discus hannai* juvenile at different size (large, 3 cm; small, 1.5 cm) and mixed size (mixed large, 3 cm; mixed small, 1.5 cm) in each tank after feeding. All values are expressed as mean±standard error, and different letters above the bars indicate significant difference ($P<0.05$).

30%를 차지하며 이에 관련된 모든 연구들은 전복 생산 비용의 절감을 목표로하고 있다(Fleming et al., 1996; Stone et al., 2013). 전복 치패를 사육하는데 있어서 적정 밀도는 성장과 먹이에 대한 상호관계를 이해하는 것이 중요하며, 전복 치패의 생산성 향상을 위한 밀도에 따른 성장과 사료효율에 대한 추가적인 연구가 필요하겠다.

사육 밀도가 증가할수록 어린 전복들은 공간 차지를 위한 종내 경쟁이 심화되며, 고밀도는 개체마다 불균등한 성장을 초래하고 먹이까지의 접근성을 감소하게 만든다(Xiaolong et al., 2018). 또한 양식에서의 밀도는 먹이와 공간을 위한 경쟁을 통해 직접적으로 성장에 영향을 미칠 수 있다고 보고 되어있다(Hucethte et al., 2003b). 본 실험에서는 밀도에 따른 이동률과 이동 거리 결과에서 사육 밀도가 높아질수록 치패의 이동률이 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 전복의 겹쳐있는 특성이 이동을 제한시키고 공간경쟁을 심화시켜 성장을 억제시킨다는(Wu et al., 2009) 이전 연구결과와 같이 개체 수가 늘어남에 따른 이동 면적 감소와 서로 겹쳐있는 특성이 방해요인으로 작용했던 것으로 판단된다. 치패 각각의 움직임을 추적하였을 때 밀도가 낮은 실험구는 이동할 수 있는 공간이 많아 자유롭게 움직인 반면에 상대적으로 밀도가 높은 실험구에서는 이동할 수 있는 공간이 부족하였고 이동률도 낮았다. 또한 밀도가 높은 실험구에서는 개체가 이동할 때 다른 개체들이 경로를 가로막고 있거나 서로 겹쳐 있으면 바닥보다는 다른 치패들이 없는 벽쪽으로 이동하는 패턴을 보였다. 전복은 사육환경에 따라 대규모의 집합체를 형성하기도 하며 이로 인해 먹이와 공간 확보에 있어 경쟁이 심화되어 성장에 영향을 미치는 것으로 판단된다(Shepherd, 1986; Douros, 1987; McShane and Naylor, 1995; Lloyd and Bates, 2008; Lee et al., 2015).

이동 속도의 결과는 이동률, 이동 거리와 유사한 결과를 보였지만 사육 밀도가 가장 낮은 100마리 실험구에 비해 상대적으로 밀도가 높은 150마리 실험구가 유의적으로 높은 이동속도를 보였다. 이러한 결과는 5분이라는 짧은 분석 시간과 카메라 프레임의 제한으로 제외된 데이터가 있기 때문에 상대적으로 밀도가 낮은 실험구들 사이에서 차이가 나타난 것으로 판단되며, 전복 치패의 밀도에 따른 먹이 행동에 대한 추가적인 연구가 필요하겠다.

전복 치패는 초기 크기가 다른 집단들 사이에서 성장률에 유의미한 영향을 준다고 알려져 있다(Mgaya and Mercer, 1995). 또한 북방전복의 경우 크기가 작을수록 성장이 느리고 생존이 낮다고 보고되어 있다(Nie et al., 1996). 본 실험에서 크기가 각장 3 cm인 실험구(large)와 각장 1.5 cm인 실험구(small)에서 이동률과 이동 거리를 분석한 결과, 실험구들 사이에서 유의적인 차이를 보이지 않았다. 이는 각기 다른 공간에 있으면 크기가 큰 전복이 작은 전복보다 많이 이동하지 않는다는 것을 의미한다. Endemann et al. (1997) 연구에 의하면 어린 전복의 성장은 환경적인 요인 보다 유전적인 영향이 더 크기 때문에 크기 차이에 영향을 받지 않는다고 하였다. 또한 본 연구에서는 서로 같은 크기의 전복을 비교적 낮은 밀도로 입식하였다. 따라서 크기에 따른 요인이나 공간 부족으로 인한 피해를 받지 않았기 때문에 이동률이나 이동거리에서 유의적인 차이가 나지 않은 것으로 판단되며, 이와 같은 원인을 명확히 검증하기 위해 밀도 조건을

달리한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 보인다.

사료 공급 후 크기가 큰 전복과 작은 전복 사이의 이동률은 유의적인 차이를 보이지 않았다. 그러나 크기가 큰 전복과 작은 전복을 같은 수조에 혼합 입식하였을 때에는 크기가 작은 개체들의 이동률과 이동 거리, 이동 속도가 큰 개체들과 비교하였을 때 유의적으로 낮았다. 이러한 결과는 전복이 동종 사이에서 공식성이나 공격성은 없지만 같은 공간에서 개체간의 크기가 이동패턴에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 같은 크기끼리 전복을 사육하는 것이 성장에 긍정적인 영향을 주고, 개체들 사이의 크기 차이로 인한 전복 치패의 활동 제한은 먹이 활동에 영향을 주며 이는 성장과 생존에 영향을 미친다고 알려져 있다(Mgaya and Mercer, 1995). 영상분석 과정에서도 큰 전복들은 이동하는 도중 다른 전복들을 만나도 위로 넘어가거나 돌아서 가는 등 멈추지 않고 이동하는 특성을 보였다. 이러한 결과로 보았을 때 어떠한 자극이나 환경에 의한 전복의 행동은 많은 반응을 보여주고 단서를 제공하고 있다(Vogl et al., 1999; Brewer et al., 2001). 따라서 향후 연구에서는 전복의 이동 특성을 명확히 파악하고 이해하여 전복에게 맞는 적정 사육 관리 방법의 개발이 필요하겠다.

사 사

본 논문은 2020년 대한민국 교육부와 한국연구재단(NRF-2020S1A6A3A01109908) 및 해양수산부 해양수산과학기술진흥원(20220572, 수산종자산업 디지털혁신 기술개발)의 지원을 받아 수행된 연구 입니다.

References

Ahmed F, Koike Y, Strussmann CA and Watanabe S. 2013. Effect of density on growth and feed consumption of the abalones *Haliotis discus discus*, *H. gigantea*, *H. madaka* and their hybrids. Aquac Int 21, 969-986. https://doi.org/10.1007/s10499-012-9606-5.

Allen VJ, Marsden ID, Ragg NC and Gieseg S. 2006. The effects of tactile stimulants on feeding, growth, behaviour, and meat quality of cultured blackfoot abalone, *Haliotis iris*. Aquaculture 257, 294-308. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.02.070.

Brewer SK, Little EE, DeLonay AJ, Beauvais SL, Jones SB and Ellersieck MR. 2001. Behavioral dysfunctions correlate to altered physiology in rainbow trout (*Oncorynchus mykiss*) exposed to cholinesterase-inhibiting chemicals. Arch Environ Contam Toxicol 40, 70-76. https://doi.org/10.1007/s002440010149.

Buss JJ, Jones DA, Lumsdenb A, Harris JO, Bansemer MS and Stone DAJ. 2015. Restricting feed ration has more effect than diet type on the feeding behaviour of greenlip abalone *Haliotis laevigata*. Mar Freshw Behav Physiol 48, 51-70. https://doi.org/10.1080/10236244.2014.990701.

Currie KL, Davidson H, Bansemer MS, Harris JO and Stone DA. 2016. Ventral videographic assessment of the feeding behavior of juvenile greenlip [*Haliotis laevigata* (Donovan, 1808)] and hybrid (*H. laevigata*×*Haliotis rubra*) abalone in response to dietary and temperature manipulation. J Shellfish Res 35, 641-651.

Douros WJ. 1987. Stacking behavior of an intertidal abalone: an adaptive response or a consequence of space limitation?. J Exp Mar Biol Ecol 108, 1-14. https://doi.org/10.1016/0022-0981(87)90127-4.

Endemann F, Kaiser H and Hecht T. 1997. Size-sorted juvenile swordtails, *Xiphophorus helleri* Heckel 1848 (Family *Poeciliidae*), do not show improved growth. Aquac Res 28, 645-647. https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1997.00914.x.

Fleming AE, Van Barneveld RJ and Hone PW. 1996. The development of artificial diets for abalone: A review and future directions. Aquaculture 140, 5-53. https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01184-6.

Gornati R, Terova G, Vigetti D, Prati M, Saroglia M and Bernardini G. 2004. Effects of population density on seabass (*Dicentrarchus labrax*, L.) gene expression. Aquaculture 230, 229-239. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00426-5.

Han SJ. 1998. Abalone Culture. Guduck Publishing, Busan, Korea, 1-260.

Huchette SM, Koh CS and Day RW. 2003a. Growth of juvenile blacklip abalone (*Haliotis rubra*) in aquaculture tanks: Effects of density and ammonia. Aquaculture 219, 457-470. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00627-0.

Huchette SM, Koh CS and Day RW. 2003b. The effects of density on the behaviour and growth of juvenile blacklip abalone (*Haliotis rubra*). Aquac Int 11, 411-428. https://doi.org/10.1023/B:AQUI.0000004194.85299.38.

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.

Lee SW, Kim BH, Park MW, Kim TI and Son MH. 2015. Growth characteristics of juvenile abalone, *Haliotis discus hannai* by reared methods in order to high density intermediate culture in land-based tank. Korean J Malacol 31, 83-92. https://doi.org/10.9710/kjm.2015.31.2.83.

Lloyd MJ and Bates AE. 2008. Influence of density-dependent food consumption, foraging and stacking behaviour on the growth rate of the Northern abalone, *Haliotis kamtschatkana*. Aquaculture 277, 24-29. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.01.039.

McShane PE and Naylor JR. 1995. Small-scale spatial variation in growth, size at maturity, and yield-and egg-per-recruit relations in the New Zealand abalone *Haliotis iris*. N Z J Mar Freshw Res 29, 603-612. https://doi.org/10.1080/00288330

.1995.9516691.

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.

Nie Z, Ji M and Yan J. 1996. Preliminary studies on increased survival and accelerated growth of overwintering juvenile abalone, *Haliotis discus hannai* Ino. Aquaculture 140, 177-186. https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01195-1.

NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2008. Standard Manual of Abalone Culture. NIFS, Busan, Korea.

Oh Tg, Lee JK, Hwang HG, Pyeon YB, Oh WS, Han IW, Park GC and Lee KH. 2019. The behavioral response of purple sea urchins *Heliocodaris crassispina* to food and an electrical stimulus. Korean J Fish Aquat Sci 52, 524-533. https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0524.

Park JH, Kim HB, Kim PK and Jo JY. 2008a. 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.

Park JH, Kim PK and Jo JY. 2008b. Growth performance of disk abalone *Haliotis discus hannai* in pilot and commercial scale recirculating aquaculture systems. Aquacult Int 16, 191-202. https://doi.org/10.1007/s10499-007-9136-8.

Schram E, Van der Heul JW, Kamstra A and Verdegem MCJ. 2006. Stocking density-dependent growth of Dover sole (Solea solea). Aquaculture 252, 339-347. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.07.011.

Shepherd SA. 1973. Studies on southern Australian abalone (*genus Haliotis*) I. Ecology of five sympatric species. Austral J Mar Freshw Res 24, 217-257. https://doi.org/10.1071/MF9730217.

Steinarsson A and Imsland AK. 2003. Size dependent variation in optimum growth temperature of red abalone (*Haliotis rufescens*). Aquaculture 224, 353-362. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00241-2.

Stone DAJ, Harris JO, Wang H, Mercer GJ, Schaefer EN and Bansemer MS. 2013. Dietary protein level and water temperature interactions for greenlip abalone *Haliotis laevigata*. J Shellfish Res 32, 119-130. https://doi.org/10.2983/035.032.0118.

Vivanco Aranda M, Gallardo EscaŁrate CJ and Rio Portilla MAD. 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.

Vogl C, Grillitsch B, Wytek R, Hunrich Spieser O and Scholz W. 1999. Qualification of spontaneous undirected locomotor behavior of fish for sublethal toxicity testing. Part 1. Variability of measurement parameters under general test conditions. Environ Toxicol Chem 18, 2736-2742. https://doi.org/10.1002/etc.5620181213.

Wassnig M, Roberts RD, Krsinich A and Day RW. 2010. Effects of water flow rate on growth rate, mortality and biomass return of abalone in slab tanks. Aquac Res 41, 839-846. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02361.x.

Wu F, Liu X, Zhang G and Wang C. 2009. Effects of the initial size, stocking density and sorting on the growth of juvenile Pacific abalone, *Haliotis discus hannai* Ino. Aquac Res 40, 1103-1110. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02205.x.

Xiaolong G, Xian L, Ce S, Fucun W, Changbin S and Ying L. 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.