

순환여과시스템에서 염분농도가 전복, *Haliotis discus hannai*에 미치는 영향

한지도, 박훈, 김다운, 김승철, 전미애, 김수철, 이덕찬

국립수산과학원 남해수산연구소 양식산업과

Effect of salinity on abalone, *Haliotis discus hannai* in recirculating aquaculture system

Jido Han, Hon Park, Daun Kim, Sung-Chul Kim, Mi-Ae Chun, Su-Chul Kim and Deok-Chan Lee

Aquaculture management Division, South Sea Fisheries Research Institute, NIFS, Yeosu 59780, Korea

ABSTRACT

When abalones were farmed in a Recirculating Aquaculture System (RAS) with inadequate water conditioning for a long time, the salt concentration gradually increased to more than 36 psu. This study raised abalones in different salt concentrations (30, 33, 36, and 39 psu) in a RAS and examined growth (shell and weight), cumulative mortality, changes in blood components, and histological changes to explore the effect of salt concentration on these parameters. During the two-week experiment, the daily growth rate decreased and the cumulative mortality increased as the salt concentration in the water increased. Concentrations of K^+ , Na^+ , and Cl^- ions in the hemolymph changed significantly, and the cell mortality of blood cells increased. In addition, histopathological alterations in gill and digestive tubule of the abalone showed more obvious with experimental condition of salinity increase. Based on the results, a salinity of 36 psu or higher is not a suitable environment for the survival of abalones.

Key words : abalone, *Haliotis discus hannai*, RAS, salinity, growth

서 론

2021년 우리나라 전복 양식생산량은 23,061 톤으로 이전 2000년에 비해 200배 이상 증가하였으며, 이러한 증가율은 동일 기간 대비 세계 1위 및 전복양식생산량 세계 2위에 해당하는 다 (KMI 수산업관측센터). 그러나 전복양식 생산해역에 따라 다소 차이는 있으나 다양한 원인으로 매년 일정 비율의 누적 폐사가 발생하고 있다. 양식전복 폐사 원인과 관련하여 직접적인 연관성에 대한 연구가 꾸준히 이루어져야 할 것으로 보이지만 기후변화에 의한 수온 상승과 대내외의 사육환경 악화가 주

요 인자로 지목되고 있다 (NIFS, 2016 & 2017). 뿐만 아니라 일본 각료회의가 2023년부터 일본 원전사고에 따른 오염수의 해상 방류를 결정함에 따라 전복을 포함한 양식생물의 생산 활동과 이미지 제고에 영향을 미칠 수 있는 잠재적 악제가 되고 있다.

수산생물 양식산업에서 기후변화를 포함한 다양한 사육환경 변화에 대응할 수 있는 방법 중 하나로 순환여과시스템 (recirculating aquaculture system, RAS) 이 주목받고 있다 (van Rijn, 1996; Davis and Arnold, 1998; Zhang *et al.*, 2011; Widiasa *et al.*, 2018). 복족강 (class Gastropoda) 에 속하는 전복에 대한 순환여과시스템 양식 실험이나 산업화는 2000년대 들어 호주 (Butterworth, 2010), 뉴질랜드 (Wright, 2011), 중국 (Wu *et al.*, 2012), 일본 (Koizumi and Tsuji, 2017) 등에서 보고되었으나 최근에는 드문 편이다. 또한, 우리나라에서 전복에 대한 순환여과시스템 사육은 실험용 수조 규모에서 어리거나 중간육성용 전복을 이용하여 양성 가능성과 성장에 대해 연구를 수행한 바 있다 (Park *et al.*, 2008).

좋은 사육 조건에도 불구하고 가두리양식장에서 양식하는

Received: March 12, 2023; Revised: March 23, 2023;
Accepted: March 29, 2023

Corresponding author: Deok-Chan Lee

Tel: +82 (61) 690-8981, e-mail: saranghase@korea.kr
1225-3480/24836

This is an Open Access Article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License with permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproducibility in any medium, provided the original work is properly cited.

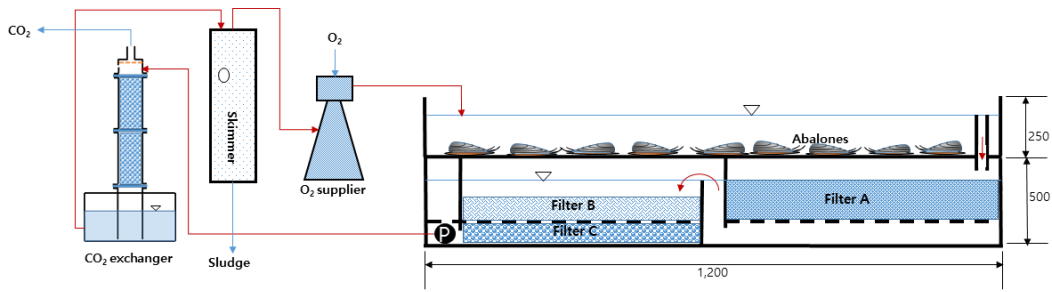


Fig. 1. Configuration of a recirculating aquaculture system (RAS) used for the salinity survey of abalone, *Haliotis discus hannai*.

전복의 폐사 비율이 증가 추세이며, 이러한 현상은 완도뿐만 아니라 고흥, 신안, 진도 등에도 나타나고 있다. 전복의 주요 폐사 및 피해 원인으로 수온 상승, 가두리양식장 증가에 의한 조류 변화, 태풍, 적조, 용존산소 변화, 가두리 내 퇴적물 축적과 산란 등 환경과 전복 자체의 문제에 기인한 것으로 추정된다 (Won *et al.*, 2013; Shin *et al.*, 2017; NIFS, 2016 & 2017). 특히, 수온과 염분은 해양 연체동물에 영향을 미치는 주요 인자로 epigenetic differentiation을 유도할 수 있으며, 전복의 성장과 면역반응에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Kong *et al.*, 2017; Min *et al.*, 2017; Creencia and Noro, 2018; 국립수산물학원, 2019). 북방전복 (*Haliotis discus hannai*) 치어의 수온과 염분에 대한 최적 조합은 각각 23-25°C, 30-36 psu 이며, 37 psu 에서도 생존할 수 있다고 하였다 (Shin *et al.*, 2011; Kong *et al.*, 2017). 각장 3 cm 와 6 cm 전후 크기 전복의 염분에 대한 6일-반수치사농도 (6d-LS₅₀) 는 각각 23.9 psu와 24.9 psu로 제시하였다 (국립수산물학원, 2019).

우리나라에서는 장마철 또는 여름철 폭우에 의해 가두리 양식전복의 폐사가 발생하고 있는데, 폭우에 의해 2020년 영산강 하구 (외달도 해역) 와 2021년 강진군 마량면 마량항 인근 해역과 진도군 북부해역의 가두리 양식전복 폐사가 이에 속한다. 그러나 고염분이 북방전복의 성장과 폐사에 미치는 영향에 대해 밝힌 예는 드물며, 상기 Shin *et al.* (2011) 이 제시한 37 psu 이상에서 실험한 예는 없다. 특히, 순환여과시스템을 이용한 전복의 성장 실험에서 시간 경과에 따라 사육수 내 염분농도가 서서히 증가하여 36 psu 까지 상승 (자료 제시하지 않음) 한 바 있어, 고염분이 북방전복에 미치는 영향을 확인할 필요성이 있다.

본 연구에서는 북방전복의 순환여과시스템 양식에서 나타날 수 있는 고염분에 의한 영향을 확인하고, 한계가 되는 염분농도를 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험구 구성 및 실험 조건

실험생물인 전복을 이용한 실험은 순환여과시스템을 구성하여 수행하였다 (Fig. 1). 각 실험구 RAS의 사육수 총량은 각각 600 L 이었으며, 실험 종료까지 환수하지 않았다. 각 실험구 RAS의 사육수는 물리적 및 생물학적 여과장치, 산소공급장치 (O₂ supplier), 이산화탄소제거장치 (CO₂ exchanger), 단백질회수장치 (skimmer) 등으로 수질을 관리하였으며, 사육수는 재사용하였다. 실험기간 동안 수온 21.7 ± 1.0°C, 일일 순환량 60회, pH 7.8 이상, 용존산소 4.5 mg/L 이상의 조건을 유지하였다.

2. 실험생물 및 밀도

전남 여수시 화양면 소재 육상수조양식장으로부터 분양받은 실험전복은 평균 각장 48.5 ± 1.7 mm, 각폭 31.9 ± 0.7 mm, 전중 9.8 ± 1.2 g 이었다. 분양받은 전복은 RAS 로 옮겨 수온 21.7 ± 1.0°C에서 7일간 순치한 후 염분농도 30, 33, 36 및 39 psu 에 수용하였다. 실험전복은 가두리양식장의 일반적 사육밀도와 유사한 340 마리/m² 로 조정하였으며, 순치 및 2주간의 실험기간 동안 먹이는 공급하지 않았다.

3. 시료 처리와 조사

실험을 시작하기 전 각 시험구의 전복 30 마리를 무작위로 선택하여 패각 표면에 인식표 (label) 를 부착하였으며, 실험 종료 시 이들에 대한 각장과 각폭은 μm 단위로, 무게는 mg 단위로 측정하여 일간성장률로 나타내었다. 또한, 실험전복의 폐사 조사는 매일 2회 실시하였으며, 실험 종료 후 누적폐사율로 나타내었다. 실험 시작 후 0, 7, 14일째에 각 시험구에서 10마리의 전복을 무작위로 채취하여 채혈한 후 생리적 변화를 조사하였다. 혈림프 내 혈구 비율과 혈구사망율 (hemocyte mortality) 에 대한 변화는 flowcytometry (DB, USA) 로 분석하였으며, 혈림프의 pH, pCO₂와 pO₂ 농도, K⁺ 이온, Na⁺ 이온, Ca²⁺ 이온 및 Cl⁻ 이온 농도는 혈액가스분석기 (ABL90, Radiometer) 를 이용하여 조사하였다.

Table 1. Quantitative scoring of histological alterations

	None	Mild	Moderate	Severe
Frequency (%)	0	< 30.0	30.1-70.0	70.1-100
Quantitative scoring	-	+	++	+++

-, non; +, mild; ++, moderate; +++, severe.

Table 2. Growth of abalone, *Haliotis discus hannai* exposed to different salinity in RAS

Measurements	Salinity				
	30 psu	33 psu	36 psu	39 psu	
Shell length (μm)	Initial	48,946.7 \pm 1.0	48,261.3 \pm 1.4	48,548.8 \pm 1.2	47,930.0 \pm 1.2
	Final	49,735.6 \pm 0.8	49,572.5 \pm 2.3	49,868.8 \pm 1.5	48,631.3 \pm 1.7
	Final-Initial	788.9	1,311.2	1,320.0	701.3
	Daily growth rate (%)	1.6	2.7	2.7	1.5
Shell width (μm)	Initial	32,067.8 \pm 0.7	31,757.5 \pm 0.9	32,107.5 \pm 0.7	32,291.3 \pm 1.0
	Final	32,776.7 \pm 0.7	32,692.5 \pm 1.1	32,987.5 \pm 0.8	32,676.3 \pm 0.8
	Final-Initial	708.9	935.0	880.0	385.0
	Daily growth rate (%)	2.2	2.9	2.7	1.2
Total weight (mg)	Initial	9,751.1 \pm 0.5	9,865.0 \pm 1.0	10,058.8 \pm 0.5	9,667.5 \pm 0.7
	Final	9,796.7 \pm 1.0	9,941.3 \pm 1.9	9,870.0 \pm 0.8	9,665.0 \pm 1.0
	Final-Initial	45.6	76.3	-188.8	-2.5
	Daily growth rate (%)	0.5	0.8	-1.9	0

* Daily growth rate (%) = [(present measured value - past measured value) / past measured value] \times 100.

4. 조직학적 관찰

광학현미경 조직표본 제작은 아가미와 소화선을 적출하여 중성포르말린 (10%) 에 24시간 고정한 후, 흐르는 물로 36-48 시간 동안 수세하였다. 그 후 알코올 농도 순으로 탈수과정을 거쳐 파라핀에 포매하였다. 포매된 조직은 마이크로톰을 이용하여 두께 5 μm 로 연속절편하였다. 제작된 조직절편은 Mayer’s hematoxylin-eosin (H-E) 염색을 실시하였다. 아가미와 소화선의 조직학적 변화 정도는 조직학적 변성을 보이는 개체수를 기준으로 출현율에 아래의 식으로 계산하여 백분율 (%) 로 나타낸 뒤, Table 1과 같이 4단계로 구분하였다.

$$\text{Frequency of histological alterations (\%)} = \frac{\text{Number of histological alteration in gill and digestive tubule}}{\text{Total number of analysed abalones}} \times 100$$

5. 통계분석

실험전복의 생리적 영향 분석에서 각 실험구 사이의 비교는 one-way ANOVA를 사용하였으며, 시험구 간의 유의차 비교는 Tukey test 및 Dunn’s method로 수행하였다. 신뢰수준은 $p < 0.001$ 로 하였다.

결 과

1. 일간성장율

전복 패각 (각장과 각폭) 의 일간성장율은 염분농도 39 psu 에서 급격히 낮아졌으며, 무게는 염분농도 36 psu 이상에서 감소하는 경향을 보였다 (Table 2). 각장의 일간성장율은 30, 33, 36 및 39 psu 에서 각각 1.6, 2.7, 2.7 및 1.5% 를 보였으며, 각폭의 일간성장율은 각각 2.2, 2.9, 2.7 및 1.2% 를 나타내었다. 또한, 전중의 일간성장율은 각각 0.5, 0.8, -1.9 및 0% 를 보였다.

순환여과시스템에서 염분농도가 전복, *Haliotis discus hannai*에 미치는 영향

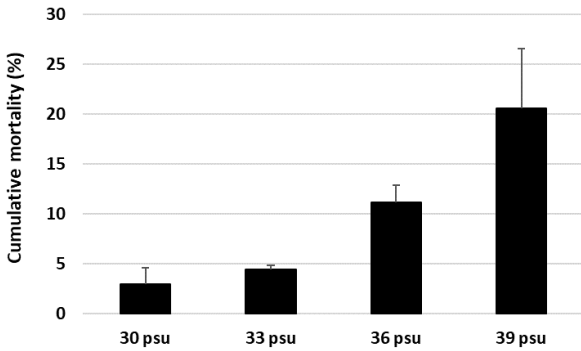


Fig 2. Cumulative mortality of abalone, *Haliotis discus hannai* exposed to different salinity.

2. 누적폐사율

본 실험에서 평균 누적폐사율은 염분농도 30 psu 와 33 psu 에서 각각 2.9% 와 4.4% 를 나타내었으나, 36 psu 와 39 psu 에서 각각 11.2% 와 20.6% 로 높게 나타나 염분농도

가 높아질수록 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 2).

3. 생리변화 조사

실험전복의 생리적 변화 조사에서 혈림프 내 hyalinocyte 비율은 염분농도 36 psu 에 이를 때까지 증가한 후 39 psu 에서 감소하는 경향을 보였으며, 염분농도 36 psu 부터 혈구 사망률 (hemocyte mortality) 이 증가하였다 (Fig. 3). 또한, 사육수의 염분농도가 증가할수록 혈림프 내 pCO_2 농도와 pO_2 농도는 감소하는 경향을 보였으며, K^+ 이온, Na^+ 이온 및 Cl^- 이온 농도는 높아지는 것으로 나타났다 (Table 3).

4. 조직학적 조사

아가미 새엽의 상피층은 단층 원주형 상피세포와 다수의 점액세포로 구성되어 있으며, 원주형 상피세포들의 측면부에는 다수의 섬모들이 잘 발달되어 있다 (Fig. 4A, B). 염분에 노출된 전복 아가미는 2주 경과 후, 염분 36 psu 에서는 상피세포의 섬모가 일부 탈락되고 점액 분비량이 늘었으며 (Fig. 4C),

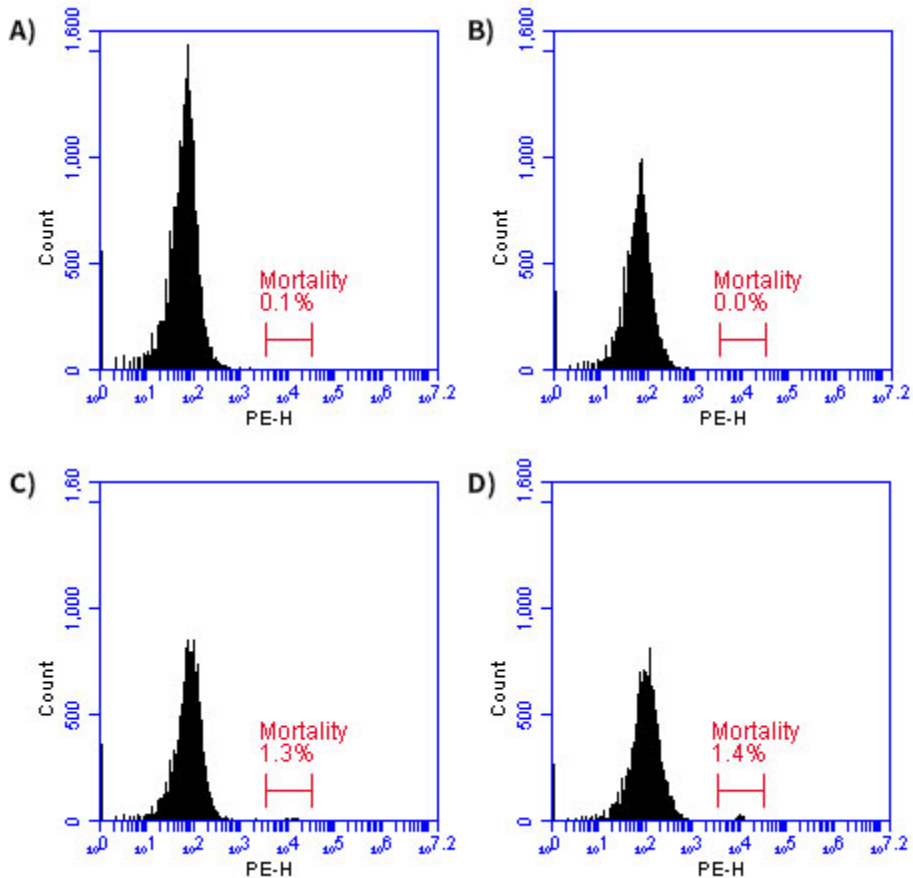


Fig. 3. Results of measuring cell mortality using flow-cytometry for abalone, *Haliotis discus hannai* blood cells exposed to different salinity. A) 30 psu, B) 33 psu, C) 36 psu and D) 39 psu.

Table 3. Hematological changes in abalone, *Haliotis discus hannai* exposed to different salinity in RAS

Salinity	pH	pCO ₂ (mmHg)	pO ₂ (mmHg)	K ⁺ (mmol/L)	Na ⁺ (mmol/L)	Ca ²⁺ (mmol/L)	Cl ⁻ (mmol/L)
30 psu	6.87 ± 0.06	8.33 ± 0.88	28.28 ± 11.82	9.49 ± 0.38	447.33 ± 2.96	7.64 ± 0.07	461.56 ± 3.68 ^b
33 psu	6.91 ± 0.06	8.07 ± 0.33	30.51 ± 13.72	9.72 ± 0.27	479.56 ± 1.01	7.04 ± 0.09 ^a	491.44 ± 1.88 ^a
36 psu	6.91 ± 0.03	7.89 ± 0.47	21.08 ± 10.54	9.900.42a	532.50 ± 1.43 ^a	7.19 ± 0.03 ^b	534.30 ± 0.07 ^{ab}
39 psu	6.90 ± 0.04	8.14 ± 0.73	22.08 ± 12.05	10.29 ± 0.31 ^{ab}	573.80 ± 1.62 ^{ab}	7.14 ± 0.04 ^a	568.70 ± 2.67 ^{ab}

a, Significant difference with experimental group 30 psu, b, Significant difference with experimental group 33 psu.

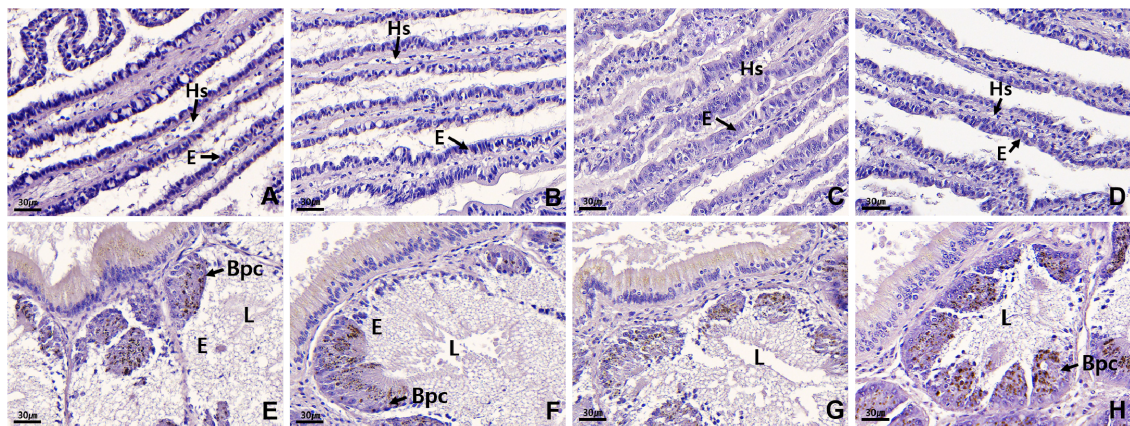


Fig. 4. Histological alteration of gill (A-D) and digestive tubule of hepatopancreas (E-H) of the abalone, *Haliotis discus hannai* exposed to different salinity. **A** and **E**: 30 psu, **B** and **F**: 33 psu, **C** and **G**: 36 psu, **D** and **H**: 39 psu. H-E stain, x400. Bpc, basophilic cell; E, epithelial cell; Hs, hemolymph sinus; L, lumen.

39 psu에서는 상피세포가 수축되고 섬모가 대부분 탈락하였다 (Fig. 4D). 소화선은 다수의 소화선세포들로 구성되어 있으며, 소화선세포 상피층은 상피세포와 호염기성세포로 구분할 수 있다. 염분에 노출된 전복의 소화선세포는 2주 경과 후, 30 psu에서 상피세포의 변성이 관찰되며 (Fig. 4E), 36 psu에서는 상피세포와 호염기성 세포의 변성이 관찰되었다 (Fig. 4G). 39 psu에서는 상피세포의 공포화와 파괴가 진행되고, 호염기성세포의 수가 증가하였다 (Fig. 4H).

고찰

염분은 해양 연체동물에 영향을 미치는 주요 인자로 epigenetic differentiation을 유도할 수 있으며, 전복의 성장에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Bohle, 1972; Kong *et al.*, 2017; Creencia and Noro, 2018). 해양무척추 동물은 염분 변화에 의해 생존, 산소 소비 등 대사활동 및 다양한 생리적 변화를 나타내지만, 시간이 지나면서 적응하여 회복하기도 한다. 그러나 큰 폭의 염분 변화에 노출되면 에너지 균

형을 조절하지 못하고 폐사에 이르게 된다 (Pierce and Greenberg, 1972; Ramamoorthi *et al.*, 1973; Widdows, 1985; Matthews and Fairweather, 2004; Shin *et al.*, 2011). 급격한 염분 변화는 이매패류의 세포 내 균형을 파괴하며, 기관계의 조직변성 및 파괴를 유발하여 먹이 섭식 및 산소 소비와 같은 생리적 기능에 영향을 주어 폐사를 유발한다 (Sunila and Lindstrom, 1985; Gauthier-Clerc *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2011). 전복을 포함한 패류의 저염분에 대한 영향을 제시한 자료는 다수 있으나 고염분의 영향에 대한 자료는 매우 제한적이다. 전복용 순환여과시스템의 사전 운용에서 사육수 환수율을 낮추었을 때 증발량 증가로 염분농도가 증가하는 것을 확인하였다. 그러므로 전복용 순환여과시스템의 제작과 운용을 위한 적정 염분농도 구명을 위해 해수의 일반적인 염분농도에서 뿐만 아니라 고염분 (36 및 39 psu)에서의 성장, 폐사, 생리 변화 등에 대한 영향을 파악하고자 하였다.

전복 패각 (각장과 각폭)의 일간성장률은 염분농도 39 psu에서 급격히 낮아졌으며, 무게는 염분농도 36 psu 이상에서 급격히 감소하는 경향을 보였다 (Table 1). 고염분에서 전복

Table 4. Quantitative scoring of gill and digestive tubule histological alterations of the abalone, *Haliotis discus hannai* exposed to high salinity

Histological alterations		30	33	36	39
Gill	DE	+	+	++	++
	DC	+	-	++	-
	DM	+	-	+++	+++
Digestive tubule	DE	++	+	++	+++
	DB	+	+	++	+++

Score values: -, none; +, mild; ++, moderate; +++, severe; DB: degeneration of basophilic cell; DC: disappearance of cilia; DE: degeneration of epithelial cell; DM: degeneration of mucous cell.

패각의 일간성장률이 낮은 것은 삼투압 조절의 어려움과 패각 성장을 위해 요구하는 이온 성분을 원활하게 공급받지 못하기 때문으로 보이며, 이는 Creencia and Noro (2018) 의 주장과 유사하다. 또한, 실험전복의 무게 감소는 실험 준비 및 실험기간 동안 먹이를 공급하지 않은 것이 주요 원인으로 판단된다.

본 실험에서 각 염분농도별 평균 누적폐사율은 염분농도 30 psu 와 33 psu 에서 2.9-4.4%를 나타낸 것에 비해 36 psu 와 39 psu 에서 11.2-20.6%로 높게 나타나 염분농도가 폐사에 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 2). 북방전복 성체를 이용한 염분농도 영향 실험에서 염분 37 psu에서 95% 이상의 생존율을 보인다고 한 실험 결과와 유사한 것으로 판단되며, 저염분으로 옮겼을 때 전복의 삼투압이 사육수의 삼투질 농도와 쉽게 순치되지 않는 것 (Shin *et al.*, 2011) 과 연관하여 고염분에서도 동일하게 적용될 것으로 사료된다.

실험전복의 생리적 변화 조사에서 혈림프 내 hyalinocyte 비율은 염분농도 36 psu 에 이를 때까지 증가한 후 39 psu 에서 감소하는 경향을 보였으며, 염분농도 36 psu 부터 혈구 사망률이 증가하였다 (Fig. 3). 전복 (*H. discus discus*) 의 혈구는 hyalinocyte와 blast-like cells 나눌 수 있으며, 상처의 수복, 패각 재생, 영양물질의 소화와 수송, 배설 및 생체방어 등에 관여하는 것으로 알려져 있다 (박성우·오명주, 2001; Donaghy *et al.*, 2010). 북방전복 치패는 온도 스트레스를 받게 되면 미토콘드리아 내부에서 아미노산과 지방산의 불완전한 대사가 일어나 대사 중간체의 대량 축적이 발생하며, ATP 생성에 영향을 미치게 된다 (Durazo and Viana, 2013; Vosloo *et al.*, 2013; Pörtner *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2020). 다양한 스트레스는 전복을 포함한 패류의 혈구수 감소, 방어력과 기능 저하, 폐사 등에 영향 (Soudant *et al.*, 2004; Min *et al.*, 2017; Shin *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2022) 을 미치는 것으로 알려져 있어, 상기의 전복 hyalinocyte 감소와 혈구사망률 증가는 고염분에 의한 삼투조절 어려움 등의 생리적 스트레스와 연관이 있을 것으로 판단된다. 또한, 사육수의

염분농도가 증가할수록 혈림프 내 pCO_2 농도와 pO_2 농도는 감소하는 경향을 보였으며, K^+ 이온, Na^+ 이온 및 Cl^- 이온 농도는 높아지는 것으로 나타났다 (Table 2). 36 psu 와 39 psu 시험구의 혈림프 내 pO_2 농도는 33 psu 대비 27.6-30.9% 감소한 것은 hyalinocyte 감소와 혈구사망률 증가뿐만 아니라 고염분에 의한 혈구의 스트레스로 인한 산소결합력 저하가 원인으로 사료된다.

염분농도 변화 조건에 노출된 전복의 아가미에서 상피세포의 변성과 소화선세포에서 상피세포와 호염기성 세포의 변성이 확인되었다. 아가미 상피세포의 변성은 호흡 및 산소 소비가 정상적으로 이루어지지 못함을 의미하며, 소화선세포의 상피세포와 호염기성 세포의 변성은 소화 및 흡수가 원활하지 못함을 의미한다. 기관계의 변성은 염분농도가 높아질수록 악화되었으며 이는 전복의 생리적 기능을 약화시켜 폐사를 유발하는 원인으로 판단된다.

그러므로 36 psu 이상의 염분농도에서 전복을 사육하였을 때 생리적 변화를 일으키며, 나아가 폐사에 이를 수 있으므로 염분의 관리가 필요한 것으로 사료된다.

요 약

전복을 순환여과시스템 (Recirculating Aquaculture System, RAS) 에서 사육할 때, 환수량이 적은 상태로 장기간 가동하면 사육수 내 염분농도가 서서히 상승하여 36 psu 이상 까지 이르는 것을 확인하였다. 그러므로 본 연구에서는 전복용 순환여과시스템에서 염분농도 (30, 33, 36 및 39 psu) 를 다르게 하여 전복을 관리하고, 성장 (패각과 중량), 누적폐사량, 혈액 내 성분 변화, 조직학적 변화 등을 조사하여 고농도의 염분이 전복에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 2주간의 실험에서 사육수 염분농도가 높아질수록 일간성장률은 감소하였으며, 누적폐사율은 증가하였다. 전복 혈림프 내 K^+ 이온, Na^+ 이온, Cl^- 이온의 농도가 심하게 변화하였으며, 혈구세포의

cell mortality가 증가하였다. 또한, 조직학적 변화는 염분농도가 높아질수록 전복의 아가미와 소화선세관에서 변화가 뚜렷이 관찰되었다. 이러한 결과를 종합하면, 전복용 순환여과시스템 내 36 psu 이상의 염분농도는 전복의 생존에 부적절한 환경인 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국립수산물과학원 연구사업인 ‘가두리 양식전복 부착생물 제어 연구 (R2023047)’ 에 의해 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Bohle, B. (1972) Effects of adaptation to reduced salinity on filtration activity and growth of mussels (*Mytilus edulis*). *Journal of Experimental Marine Biological Ecology*, **10**: 41-49.
- Butterworth, A. (2010) Integrated multi-trophic aquaculture systems incorporating abalone and seaweeds. NUFFIELD Australia Project No. 0914(A report for NUFFIELD Australia Farming Scholar).
- Creencia, L.A. and Noro, T. (2018) Effects of salinity on the growth and mucous cells of the abalone *Haliotis diversicolor* Reeve, 1846. *International Aquatic Research*, **10**: 179-189.
- Davis, D.A. and Arnold, C.R. (1998) The design, management and production of a recirculating raceway system for the production of marine shrimp. *Aquacultural Engineering*, **17**: 193-211.
- Donaghy, L., Hong, H.-K., Lambert, C., Park, H.-S., Shim, W.J. and Choi, K.-S. (2010) First characterisation of the population and immune-related activities of hemocytes from two edible gastropod species, the disk abalone, *Haliotis discus discus* and the spiny top shell, *Turbo cornutus*. *Fish and Shellfish Immunology*, **28**: 87-97.
- Duranzo, E. and Viana, M.T. (2013) Fatty acid profile of cultured green abalone (*Haliotis fulgens*) exposed to lipid restriction and long-term starvation. *Ciencias Marinas*, **39**: 363-370.
- Gauthier-Clerc, S., Pellerin, J., Blaise, C. and Gagne, F. (2002) Delayed gametogenesis of *Mya arenaria* in the Saguenay fjord (Canada): a consequence of endocrine disruptors. *Comparative Biochemistry and Physiology*, **131C**: 457-467.
- Kim, J.-H., Lee, H.-M., Cho, Y.-G., Shin, J.-S., Yoo, J.-W., Hong, H.-K. and Choi, K.-S. (2022) Effects of spawning stress on the immune capacity of blood cockle *Tegillarca granosa* occurring on the south coast of Korea. *Fish and Shellfish Immunology*, **120**: 15-22.
- Koizumi, Y. and Tsuji, Y. (2017) Abalone *Haliotis* spp., Tackle of recirculating aquaculture in Fishes. Application of recirculating aquaculture systems in Japan (ed. by Takeuchi, T.). Springer Tokyo, pp. 175-211.
- Kong, N., Liu, X., Li, J., Mu, W., Lian, J., Xue, Y. and Li, Q. (2017) Effects of temperature and salinity on survival, growth and DNA methylation of juvenile Pacific abalone, *Haliotis discus hannai* Ino. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, **35**: 1248-1258.
- Matthews, Y.T.G. and Fairweather, P.G. (2004) Effect of lowered salinity on the survival, condition and reburial of *Soletellina alba* (Lamarck, 1818)(Bivalvia: Psammobiidae). *Austral Ecology*, **29**: 250-257.
- Min, E., Kim, S. H., Lee, J. S. and Kang, J. C. (2017) Effects on the antioxidant and immunological parameters in two species of the abalone, *Haliotis discus discus* and *Haliotis gigantea* during thermal stress. *Korean Journal of Malacology*, **33**: 73-81.
- NIFS (2016) Cause survey report on aquaculture damage in the South-west Coast. pp. 178-241.
- NIFS (2017) Cause survey report on aquaculture damage in the South-west Coast. pp. 119-267.
- Park, J.J., Lee, J.S. and Lee, J.S. (2011) Fine structure and histopathological changes exposed to acute high salinity of the gill of Japanese clam, *Corbicula japonica*. *Korean Journal of Malacology*, **27**: 15-27.
- Park, J., Kim H.B., Kim P.K. and Jo, J.Y. (2008) The growth of disk abalone, *Haliotis discus hannai* at different culture densities in a pilot-scale recirculating aquaculture system with a baffled culture tank. *Aquaculture Engineering*, **38**: 161-170.
- Pierce, S.K. and Greenberg, M.J. (1972) The nature of cellular volume regulation in marine bivalves. *Journal of Experimental Biology*, **57**: 681-692.
- Pörtner, H.O., Bock, C. and Mark, F.C. (2017) Oxygen- and capacity-limited thermal tolerance: bridging ecology and physiology. *Journal of Experimental Biology*, **220**: 2685-2696.
- Ramamoorthi, K., Venkataramanujam, K. and Srikrishnadhas, B. (1973) Mass mortality of *Lingula anatina* (Lam.) (Brachiopoda) in Porto Novo waters. *Current Science*, **42**: 285-286.
- Shin, Y.K., Lee, W.C., Kim, D.W., Son, M.H., Jun, J.C., Kim, E.O. and Kim, S.H. (2011) Seasonal changes in physiology of the abalone *Haliotis discus hannai* reared from Nohwa Island on the south coast of Korea. *Korean Journal of Malacology*, **28**: 131-136.
- Shin, Y.R., Kim, B.H., Choi, H.S., Koo, J.H., Park, J.W., Lee, D.C. and Park, J.J. (2017) A case study of damage on net cage cultured abalone in Wando, Jellanam-do by the combined effect. *Korean Journal of Malacology*, **33**: 329-336.
- Soudant, P., Paillard, C., Choquet, G., Lambert, C., Reid, H.I., Marhic, A., Donaghy, L. and Birkbeck, T.H. (2004) Impact of season and rearing site on the physiological and immunological parameters of the Manila clam *Venerupis (=Tapes, =Ruditapes) philippinarum*. *Aquaculture*, **229**: 401-418.
- Sunila, I. and Lindstrom, R. (1985) Survival, growth and shell deformities of copper-and cadmium-exposed

- mussels (*Mytilus edulis* L.) in brackish water. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **21**: 555-565.
- van Rijn, J. (1996) The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture, A review. *Aquaculture*, **139**: 181-201.
- Vosloo, A., Laas, A. and Vosloo, D. (2013) Differential responses of juvenile and adult South Africa abalone (*Haliotis midae* Linnaeus) to low and high oxygen level. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, **164**: 192-199.
- Widdows, J. (1985) The effects of fluctuating and abrupt changes in salinity on the performance of *Mytilus edulis*. **In**: Marine Biology of Polar Regions and Effects of Stress on Marine Organism. (ed. by Gray, J. S., Christiansen, M.E.), Wiley-Interscience, New York, pp. 555-566.
- Widiassa, I.N., Harviant, G.R.O., Susanto, H., Istirokhatun, T. and Agustini, T.W. (2018) Searching for ultrafiltration membrane molecular weight cut-off for water treatment in recirculating aquaculture system. *Journal of Water Process Engineering*, **21**: 133-142.
- Won, K.M., Kim, B.H., Jin, Y.G., Park, Y.J., Son, M.H., Cho, M.Y., Park, M.A. and Park, M.W. (2013) Infestation of the abalone, *Haliotis discus hannai*, by the *Polydora* under intensive culture conditions in Korea. *Journal of Fish Pathology*, **26**: 139-148.
- Wright, J.P. (2011) pH control in recirculating aquaculture systems for Pāua (*Haliotis iris*). Victoria University of Wellington.
- Wu, Y., Sun, J., Chai, Y. and Xu, C. (2012) Recirculating aquaculture system with multi-layer drawer culture tanks for juvenile abalone and its effects. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **28**: 185-190.
- Xu, F., Gao, T. and Liu, X. (2020) Metabolomics adaptation of juvenile Pacific abalone *Haliotis discus hannai* to heat stress. *Scientific Reports*, **10**: 6353.
- Yang, H.W., Cho, Y.K., Seo, G.H., You, S.H. and Seo, J.W. (2014) Interannual variation of the southern limit in the Yellow Sea Bottom Cold Water and its causes. *Journal of Marine Systems*, **139**: 119-127.
- Zhang, S.Y., Li, G., Wu, H.B., Liu, X.G., Yao, Y.H., Tao, L. and Liu, H. (2011) An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. *Aquaculture Engineering*, **45**: 93-102.
- 국립수산과학원 (2019) 양식어업인을 위한 전복 사육관리 매뉴얼, pp. 119-139.
- 박성우·오명주 (2001) 수족혈액학. 도서출판 대경, pp. 157-198.