

액화산소와 산소용해기 설치에 따른 해상가두리 양식장의 고수온 피해저감 효과

이경미* · 고수진* · 김우식* · 강희웅**

†국립수산과학원(연구사) · *국립수산과학원(인턴 연구원) · **국립수산과학원(연구관)

Effects of Damage Reduction in High Water Temperature Period on the Installation of Liquefied Oxygen and Oxygen Dissolver in Marine Net Cage

Kyung Mi LEE† · Su-Jin KOH* · Woo Sik KIM* · Hee-Woong KANG**

†National Institute of Fisheries Science(researcher) · *National Institute of Fisheries Science(intern
researcher) · **National Institute of Fisheries Science(senior researcher)

Abstract

This study investigated the effect of damage reduction devices installed to reduce the mass mortality of farmed fish at high water temperatures period in marine net cage. The effect of rearing densities on fish mortalities in summer was also investigated. It was found that, dissolved oxygen and survival rate of Korean rockfish, *Sebastes schlegeli* in the experimental groups, i.e. the net cages equipped with liquefied oxygen and oxygen dissolver and with a lower rearing density were found to be higher than in the controls, i.e. net cages without the above devices and a higher density. According to the blood analysis results of the experimental fish, hemoglobin, hematocrit, glucose, glutamic oxalate transaminase (GOT) and glutamic pyruvate transaminase (GPT) in the fish of the control cage without damage reduction devices increased while the same blood parameters in the fish of the experimental group showed no significant difference from the initial values. Dissolved oxygen concentrations were found to be higher in the group with the combined use of both liquefied oxygen and oxygen dissolver than in the group with the single use of either device. It was concluded that the damage reduction devices and lower rearing densities were effective to raise dissolved oxygen concentrations in the high water temperature period.

Key words : Korean rockfish, Damage reduction devices, Dissolved oxygen, Blood analysis

1. 서론

조피볼락(*Sebastes schlegeli*)은 2019년 국내 어류양식 총생산량의 약 24%인 20,348톤을 차지하여 넘쳐 다음 두 번째로 많이 양식되고 있다(Statistics Korea, 2020). 조피볼락 성장 적정 수온은 15~20℃로 수온이 23℃ 이상이 되면 먹이 섭

취량이 줄어들고, 25℃ 이상에서는 생리기능이 저하되므로 고수온에 민감한 어종이다(Choi et al., 2009).

해상가두리 양식장 어류는 인위적인 사료 공급, 고밀도 사육, 여름철의 고수온과 겨울철의 저수온으로 인한 화학적, 물리적 변화로 최적 환경 유지가 어려워 스트레스에 노출되기 쉽다. 특히

† Corresponding author : 032-745-0713, bioykm@korea.kr

* 이 논문은 2022년도 국립수산과학원 수산시험연구사업 양식생물 자연재해 피해 판별기술 연구(R2022020)의 지원으로 수행된 연구입니다.

조피볼락은 고수온에 약하여 여름철 수온 상승으로 인해 체내의 생리 조건이 변화되어 최종적으로 이들의 성장과 생존에 영향을 미친다(Horning and Pearson, 1973). 우리나라는 온난화 현상으로 해수온이 지속적으로 상승하고(Kim et al., 2018), 일부 해역의 여름철 수온은 28~30℃로 고수온 특보가 발령되는 경우가 잦아지고 있다(KMA 2018; Yoo et al., 2018). 최근 고수온기 양식생물 대량폐사와 같은 피해가 반복적으로 발생함에 따라, 고수온 피해 예방을 위한 근본적인 대책이 필요하다.

또한 수온 상승에 의한 용존산소의 감소는 수중 동물의 생리·생태학적 활성에 큰 영향을 미친다. 수온에 따른 산소소비량과 같은 어류 대사에 관한 정보는 유수량 및 수용밀도를 결정하기 위한 기본적인 전제조건 중 하나로 사용된다(Brown et al., 1984). 산소 감소는 어류의 혈중 glucose, hematocrit (Ht), CO₂ 의 상승(Smit and Hattingh, 1978)과 먹이 섭식, 사료효율, 성장의 감소를 초래한다(Chabot and Dutil, 1999). 또한 양식 어류에 있어 저산소는 근육, 간, 뇌의 에너지 대사에 스트레스 및 장애를 유발하여 폐사에 영향을 준다(Van Raaij et al., 1994; Lays et al., 2009). 여러 어종에서 급격한 저산소 노출에 따른 생리학적 변화가 연구되었다(Caldwell and Hinshaw,

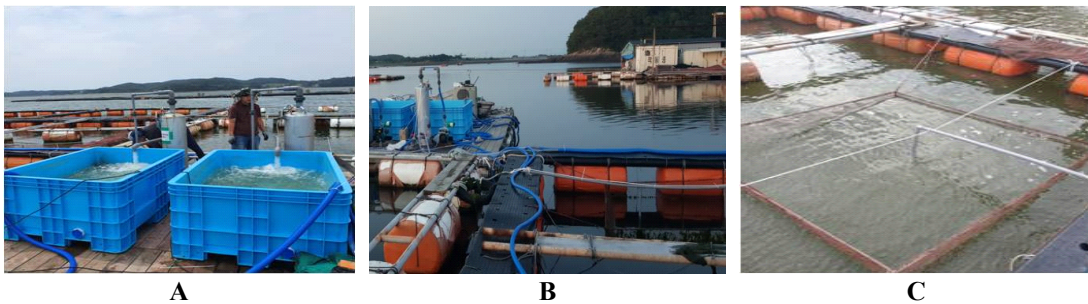
1994; Lays et al., 2009; Sun et al., 2012).

자연에서 서식하는 어류는 갑자기 환경이 변화하여 생리적 대사활동에 위협을 받을 때는 다른 서식 환경으로 이동 할 수 있으나, 제한된 공간에서 사육되는 양식어류는 환경변화에 적응해야 한다(Itazawa and Hanyu, 1991). 고수온 피해저감에 관한 대책 방안은 지속적으로 논의되어 왔으나 현장에 활용 가능한 국내외 고수온 피해저감 연구 및 기술개발 연구는 미흡한 실정이다. 기존의 양식 방법으로 사육을 한다면 고수온의 반복적 피해가 예상되므로 이를 극복할 수 있는 맞춤형 피해저감 기술개발이 요구된다. 따라서 본 연구는 고수온 피해저감 장치로 액화산소와 산소용해기를 이용하여 여름철 고수온기 해삼가두리 양식어류의 폐사저감에 효과가 있는지를 확인하고자 하였다.

II. 연구 방법

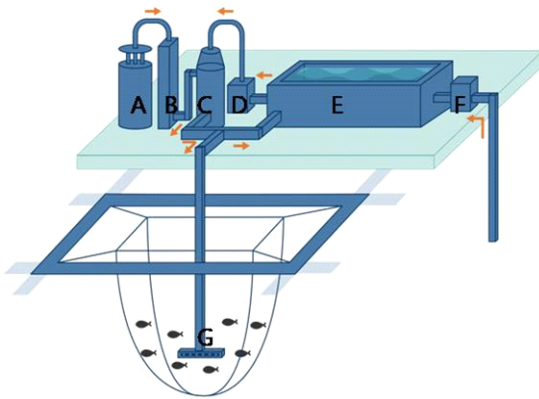
1. 고수온 피해저감 장치 설치 및 실험어 사육조건

고수온기 피해저감 장치로 산소용해기 및 액화산소를 이용하여 현장에서의 효과를 확인하기 위해 충청남도 서산시 창리 인근 해삼가두리 양식장에 설치하였다([Fig. 1]).



[Fig. 1] System for high water temperature damage reduction, liquefied oxygen and oxygen dissolver in marine net cage of Korean rockfish, *Sebastes schlegeli*. A; Oxygen dissolver, B; System for high water temperature damage reduction in marine net cage, C; Experimental marine net cage.

설치구는 산소용해기와 액화산소를 복합적으로 이용한 복합구([Fig. 2])와 액화산소를 단독으로 설치한 액화산소구로 나누었고, 대조구를 미설치구를 설정하였다. 추가로 사육밀도에 대한 영향을 확인하기 위해 피해저감 장치 설치구 및 대조구를 각각 고밀도군과 저밀도군으로 나누어 설정하였다. 즉, 고밀도와 저밀도 대조구, 고밀도 실험구(액화산소와 산소용해기복합구, 액화산소 단독구) 및 저밀도 실험구(액화산소와 산소용해기복합구, 액화산소 단독구)로 구성되어 총 6개의 가두리를 준비하였다. 모든 가두리 크기는 2×2×5 m(가로×세로×높이)이고, 조피볼락(평균체중 522.9 ±7.15 g, 평균전장 29.5±0.10 cm)을 대조구 포함 고밀도, 저밀도군에 각각 300 kg(약 600마리), 150 kg(약 300마리) 입식하였다.



[Fig. 2] Schematic diagram (not to scale) of the high water temperature damage reduction system used in the present study. Arrows indicate directions of water flow. A; Liquefied oxygen, B; Carburetor, C; Oxygen dissolver, D; Recirculation pump, E; Water tank, F; Flush pump, G; Disperser of air and water. Liquefied oxygen + Oxygen dissolver; (A→B) + (F→E→D→C) ⇒ G, Liquefied oxygen; (A→B) ⇒ G.

고수온 조건을 위해 고수온 주의보 발령기간(2019년 8월 8일~8월 29일)에 맞추어 실험(2019

년 8월 9일~9월 4일)을 실시하였고, 실험기간에는 사료를 공급하지 않았다. 해상가두리 수온은 실시간 수온측정기(HOBO® TidbiT® Temp Data Logger, ONSET., USA)를 이용하였다. 용존산소 농도는 수질측정기(YSI-EXO2, YSI Inc., USA)를 이용하여 각 실험구 가두리당 6개 지점(액화산소 배출이 되는 가두리 중간지점의 해수면에서 수직으로 각각 0.5, 2.5, 4.5 m 및 수평으로 1 m 떨어진 가두리 끝에서 수직으로 각각 0.5, 2.5, 4.5 m)을 측정하여 평균치를 계산하였다. 피해저감 장치인 액화산소는 0.8 L/hour로 공급하였고, 조피볼락 입식 후 폐사개체를 수집하여 계수한 뒤 생존율을 산정하였다.

2. 혈액채취 및 분석

혈액학적 분석을 위해 실험개시 시점과 종료 시점에 헤파린(Sigma Chemical St. Louis, MO, USA) 처리한 3 mL 일회용 주사기를 이용하여, 각 가두리당 10마리의 실험어 미부정맥에서 채혈 후 분석하였다. 혈액학적 정상인 hemoglobin (Hb)은 임상용 kit (Asan Pharm. Co., Ltd., Korea)를 이용하여 Cyan-methemoglobin법으로 측정하였으며, Ht는 모세관 내로 혈액을 넣어, Micro Hematocrit centrifuge (HWLAB C-11000, HuaWei Scientific Instrument Co., Ltd., China)에서 12,000 rpm (13,684 g), 10분간 원심분리 후 Micro-hematocrit reader를 이용하여 측정하였다.

혈장성분 변화를 분석하기 위해 채취한 혈액을 4°C에서 12,000 rpm로 15분간 원심분리 후 혈장을 분리하였다. 혈장 glucose 및 혈장 효소활성의 GOT (glutamic oxalate transaminase), GPT (glutamic pyruvate transaminase)는 시판되고 있는 임상용 kit (Asan Pharm. Co., Ltd., Korea)를 이용하여 각각 Biuret법, GOD/POD법 및 King-King법을(GOT, GPT) 통해 흡광광도기(500 nm)로 측정하였다. 혈장 cortisol은 Cortisol ELISA kit (Enzo Life Sciences Inc., USA)를 이용하여 측정하였다.

3. 통계분석 방법

실험 결과들에 대한 통계학적 유의성은 SPSS 통계 프로그램(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하여 ANOVA test를 실시하고, 사후검정으로 Duncan's multiple range test를 통해 $p < 0.05$ 일 때 유의성이 있는 것으로 간주하였다.

Ⅲ. 연구 결과

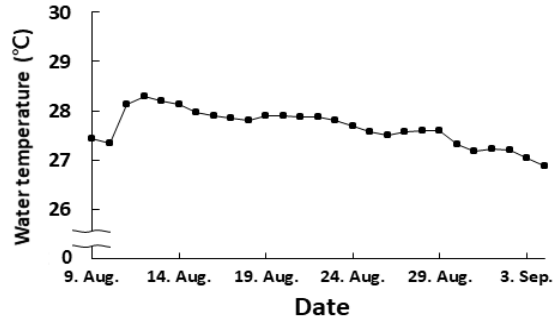
1. 수온

실험기간(2019년 8월 9일~9월 4일)에 측정된 실시간 수온 결과는 [Fig. 3]에 나타내었고, 평균 수온은 27.7°C이었다. 실험기간 중 가장 높은 수온은 28.3°C(8월 12일), 가장 낮은 수온은 26.9°C(9월 4일)이었다([Fig. 3]).

2. 용존산소 농도

실험구와 대조구 모두 각 가두리당 6개 지점에서 측정된 용존산소 농도 중 최저값~최고값 및 전체평균값으로 나타내었다(<Table 1>). 용존산소 평균농도는 고밀도군과 저밀도군의 피해저감 장치 설치구(액화산소+산소용해기 복합구/액화산소 단독구)에서 미설치구보다 유의적으로 높게 나타났다. 특히, 액화산소와 산소용해기 복합설치구 중 저밀도군의 용존산소 평균농도가 4.37±0.18 mg/L로 가장 높았고, 피해저감 장치 미설치구의 고밀도군에서 3.48±0.07 mg/L로 가장 낮았다. 사

육밀도에 있어서는 저밀도군이 고밀도군에 비해 용존산소 평균농도가 높게 나타났으나 유의적 차이는 없었다.



[Fig. 3] Daily mean values of surface water temperature of Changri (Seosan) in Cheonsu Bay in 2019.

그리고 피해저감 장치 설치구의 가두리 내 측정지점에 따른 용존산소 농도는 고밀도, 저밀도 상관없이 액화산소가 배출되는 가두리 중간지점에서 높은 경향이 나타났고, 액화산소 배출에서 떨어진 가두리 끝의 용존산소 농도는 낮은 경향이 나타났으나 가두리 내 측정지점에 따른 유의적 차이는 보이지 않았다.

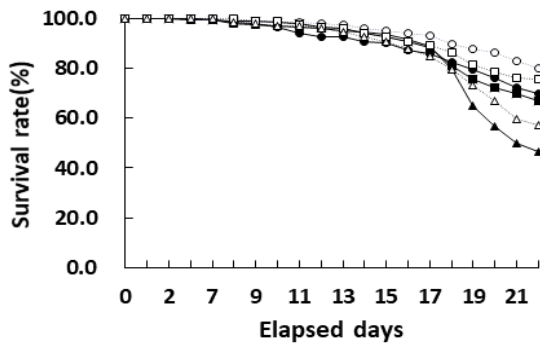
3. 생존율

피해저감 장치 설치 여부 및 사육밀도에 따른 실험기간동안의 실험어 생존율은 [Fig. 4]에 나타내었다.

<Table 1> Dissolved oxygen (min~max, mean±standard error) according to system for high water temperature damage reduction and culture density of Korean rockfish, *Sebastes schlegeli*. The mean±standard error with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$) as determined by Duncan's multiple range test (Unit: mg/L)

Density	Liquefied oxygen +Oxygen dissolver	Liquefied oxygen	Non-installation (control)
High	2.82~7.50 (4.30±0.09) ^a	2.80~7.02 (4.04±0.11) ^a	2.07~4.80 (3.48±0.07) ^b
Low	2.96~12.70 (4.37±0.18) ^a	2.61~9.80 (4.14±0.14) ^a	2.39~4.98 (3.62±0.07) ^b

고밀도군에서 피해저감 장치 설치구의 액화산소+산소용해기 복합구와 액화산소 단독구의 최종 생존율은 각각 70.0%, 66.7%였고, 두 실험구간의 유의적 차이는 없었다. 또한 저밀도군에서 피해저감 장치 설치구의 복합구와 단독구의 최종 생존율은 각각 80.0%, 75.7%였고 유의적 차이는 없었다. 미설치구의 경우 실험시작 후 17~18일째부터 피해저감 장치 설치구보다 폐사가 증가하여 미설치구 고밀도군과 저밀도군의 최종 생존율은 각각 46.7%, 57.0%였다. 피해저감 장치 설치여부에 따른 최종 생존율은 미설치구의 생존율보다 유의적으로 모두 높게 나타났고, 사육밀도에 따른 생존율은 저밀도군이 고밀도군보다 유의적으로 높게 나타났다.



[Fig. 4] Survival rate of Korean rockfish, *Sebastes schlegeli* in system for high water temperature damage reduction and culture density. ●-; (High density) Liquefied oxygen + Oxygen dissolver, ■-; (High density) Oxygen dissolver, ▲-; (High density) Non-installation, ○-; (Low density) Liquefied oxygen + Oxygen dissolver, □-; (Low density) Oxygen dissolver, △-; (Low density) Non-installation.

4. 혈액학적 성상

사육밀도 및 피해저감 장치 설치여부에 따른 실험어의 혈액학적 성상 변화는 [Fig. 5]에 나타내었다. Hb은 피해저감 장치를 설치한 고밀도군

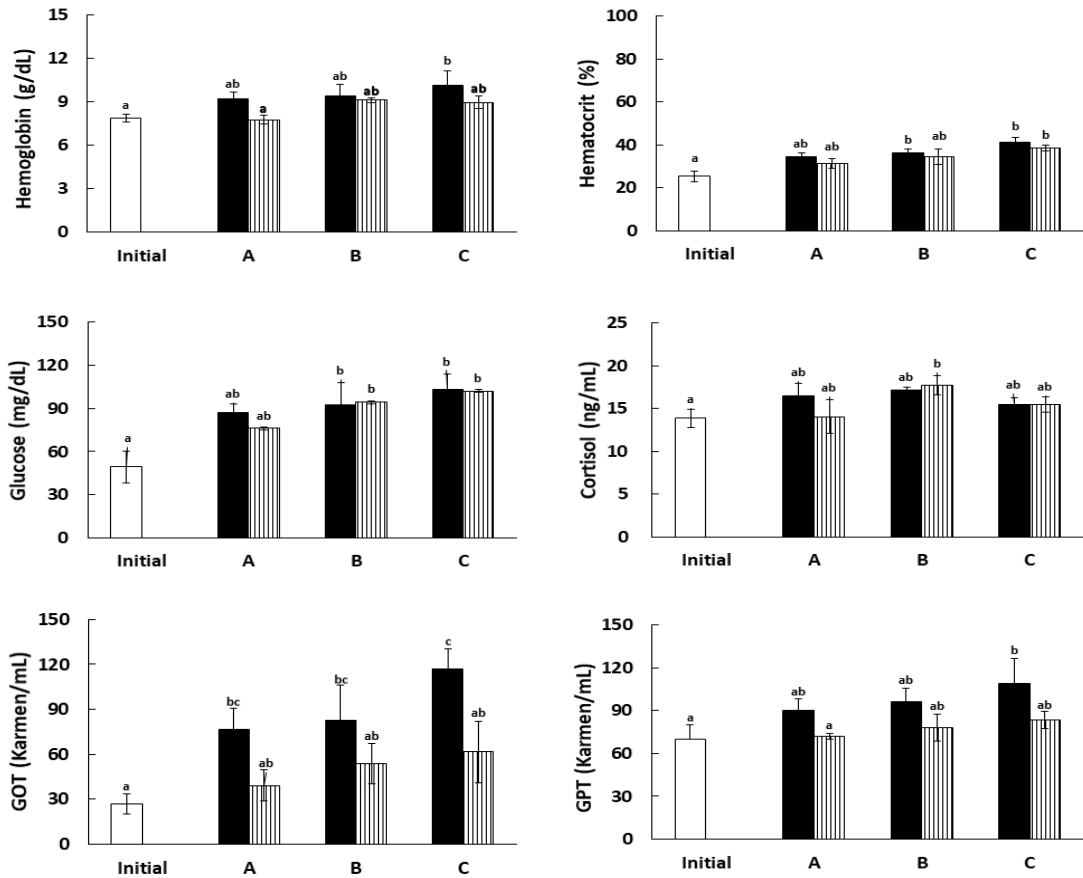
및 저밀도군에 실험 초기값과 비교해 유의적 차이는 없었으나, 고밀도군의 미설치구만 유의적으로 증가했다($p < 0.05$). Ht는 고밀도군 및 저밀도군에서 산소용해기와 액화산소를 복합으로 설치한 구 모두 실험 초기값에 비해 유의적으로 차이가 없었으나, 고밀도군 및 저밀도군의 미설치구는 모두 유의적으로 증가했다($p < 0.05$). Glucose는 초기값에 비해 피해저감 장치구와 미설치구 모두 증가하였으나, 고밀도군 및 저밀도군에서 산소용해기와 액화산소를 복합으로 설치한 구는 실험 초기값에 비해 유의적으로 차이가 없었고, 그 외 실험구에서는 유의적으로 증가했다($p < 0.05$). Cortisol은 실험 초기값에 비해 피해저감 장치 설치구와 미설치구 모두 유의적 차이는 나타나지 않았다($p > 0.05$). GOT는 저밀도군의 모든 실험구에서 초기값에 비해 증가 경향을 보였으나 유의적 차이는 없었다($p > 0.05$). 또한 고밀도군은 저밀도군에 비해 증가하는 경향이 나타났고, 고밀도군의 모든 실험구는 초기값에 비해 유의적으로 증가하였다($p < 0.05$). GPT는 고밀도군 모두 증가하는 것으로 나타났으나 미설치구만 유의적으로 증가하였다($p < 0.05$).

IV. 결론

본 연구는 여름철 고수온기 해상가두리 양식어류의 대량폐사 피해 저감을 위한 방안으로 액화산소와 산소용해기를 이용하여 피해저감 장치 효과를 현장에서 확인하기 위해 용존산소 농도, 조피볼락의 생존율, 혈액성상의 생리적 반응을 조사하였다. 또한 고수온기 사육밀도에 따른 영향도 확인하였다.

천수만 내 해상가두리 양식어류는 대부분 조피볼락으로 서해권역에서 중요한 어종이지만, 최근 여름철 고수온으로 2013, 2016, 2018년에 대량폐사 피해가 반복적으로 발생했다. 특히 창리는 천수만에서도 고수온 피해가 가장 많고, 여름철 수

액화산소와 산소용해기 설치에 따른 해상가두리 양식장의 고수온 피해저감 효과



[Fig. 5] Blood analysis of Korean rockfish, *Sebastes schlegeli* in system for high water temperature damage reduction in high and low density culture. Vertical bar denotes a standard error. The values with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$) as determined by Duncan's multiple range test. □; Initial values, ■; High density, ▨; Low density, A; Liquefied oxygen + Oxygen dissolver, B; Oxygen dissolver, C; Non-installation (control).

온도 1~2°C 높아서 본 연구의 실험장소로 선정 하게 되었다.

실험 사육밀도의 기준은 조피볼락 양식 표준 매뉴얼(NIFS, 2017)에 제시되어있는 해상가두리 양식장의 조피볼락 크기별 표준 사육밀도(평균체 중 491 g, 가두리 면적 5×5 m일 때 3,369마리)에 따라 본 연구에 사용된 조피볼락 크기(평균체 중 522.9±7.15 g) 및 가두리 면적(2×2×5 m)을 고려하여 계산한 표준 사육밀도(약 500마리)를 기준으로 고밀도군(약 600마리)과 저밀도군(약 300

마리)을 나누었다.

용존산소 농도는 어류의 생존과 성장에 필수적이며, 시스템 내 사육밀도와 먹이공급량 등을 결정 짓는데 중요하게 작용하며(Dalla Via et al., 1998), 저산소로 인한 문제는 어류를 비롯한 다양한 수서생물의 대량폐사를 야기시킬 수 있다(Baden et al., 1990). 수온이 높아질수록 조피볼락의 산소소비량은 어체의 대사에 직접적인 영향을 주는 조절인자로 작용하고(Do et al., 2016), 경골 어류의 산소소비율은 수온 상승에 따라 직선적으

로 증가한다(Kim et al., 1995). 본 실험에서 용존 산소 농도는 피해저감 장치(산소용해기 및 액화 산소) 설치구가 미설치구에 비해 높게 나타나 고수온기 액화산소 및 산소용해기 설치가 용존산소 농도를 높이는데 효과가 있는 것으로 생각된다. 또한 사육밀도에 따른 용존산소 농도 결과 저밀도군이 고밀도군보다 높게 나타나 고수온기 사육 밀도를 낮추는 것도 용존산소 농도 저하를 막을 수 있을 것으로 생각된다.

실험어 생존율 또한 미설치구보다 피해저감 장치 설치구에서 높게 나타났고, 저밀도군이 고밀도군에 비해 높게 나타나 용존산소 농도와 일치하는 경향을 보였다. 따라서 고수온기 피해저감 장치를 설치하는 것뿐만 아니라 사육밀도를 낮추는 것도 고수온기 생존율을 높이는 효과가 있는 것으로 생각된다.

어류의 혈액성상은 영양 및 생리 상태를 확인할 수 있는 중요한 지표(Ishioka, 1980; Garrido et al., 1990; Hrubec et al., 2000)로서 이를 통해 피해저감 장치 설치여부 및 사육밀도에 따른 조피볼락의 건강 및 스트레스 등을 확인하고자 하였다.

Hb과 Ht는 생체의 산소운반 능력을 가지며, 생리활성 스트레스의 지표로 사용된다(Chang et al., 1999). 수온 상승 자극은 해산어류의 Hb 및 Ht를 증가시키고, 수온 하강 자극은 Hb 및 Ht를 감소시킨다(Davis and Parker, 1990; Ishioka, 1980). Qureshi et al.(1995)은 저산소에 노출된 *Cyprinion watsoni*의 Hb가 증가하고, 그리고 저산소에 노출된 어류의 Hb은 산소와 결합력이 증가한다고 알려져 있다(Wood and Johansen, 1972; Randall 1982; Val et al., 1995). 본 연구에서 용존산소 농도가 제일 낮은 고밀도군 미설치구의 Hb이 유의적으로 증가하는 결과와 일치한다. 그러나 고밀도와 저밀도의 피해저감 장치 설치구의 Hb은 초기값에 비해 유의적 차이는 없는 것으로 보아 액화산소, 산소용해기에 의한 산소공급이 효과가 있는 것으로 생각한다. 또한 Ht는 고밀도군과 저밀도군의 설치구는 실험 초기값에 비해 유의차가 없었고, 미

설치구는 모두 초기값에 비해 유의적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 본 연구 미설치구의 Hb와 Ht의 증가 결과는 고수온, 저산소 복합조건에서 어류가 체내 항상성을 유지하기 위해 산소 운반능력을 높이는데 필요한 에너지가 더 필요하는 것으로 판단할 수 있다.

혈중 glucose는 외부 환경 스트레스에 민감하게 반응하여 신뢰성 있는 지표로 사용된다(Lee and Ryu, 2011). Glucose는 일반적으로 간이 손상되면 수치가 증가하는 경향을 보인다(Robertson et al., 1987). Chang et al.(2001)은 쥐노래미(*Hexagrammos agrammus*)의 경우 수온 변화에 의한 스트레스 실험에서 혈중 glucose 농도가 저수온보다 고수온에서 높게 측정되었다. 본 연구 또한 고수온 조건으로 인해 고수온 주의보 발령기간에 실험한 것으로 28℃ 이상 고수온에 지속적인 노출로 초기 glucose 농도에 비해 모든 실험구에서 증가하는 것으로 나타났다. 고수온 스트레스로 인해 체내 항상성 유지하기 위한 에너지를 수급으로 glucose 신생합성(gluconeogenesis)을 통해 혈중 glucose 분비를 증가시킨 것으로 생각된다. 본 연구에서 산소용해기와 액화산소를 복합으로 설치할 경우 미설치구에 비해 glucose가 낮은 것으로 나타나 고수온기 용존산소 공급이 에너지 소비를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

어류가 스트레스 요인에 노출되면 cortisol 분비 증가와 간세포 파괴에 의한 glucose의 동반 상승이 알려져있지만, 본 연구에서 cortisol은 glucose 증가하는 경향과 일치하지 않고 용존산소 공급 및 사육밀도에 의한 cortisol은 유의차가 나타나지 않았다. 또한 Wedemeyer et al.(1990)은 연어과 어류에서 스트레스를 받지 않은 안정상태에서 혈중 cortisol 농도를 30~40 ng/mL라 하였고, Do et al.(2016)는 조피볼락의 안정조건(15~21℃)에서 cortisol 농도는 28.8~38.8 ng/mL로 나타났지만, 본 연구에서는 수온 26.55~30.05℃에서 13.8~17.1 ng/mL로 낮은 수치를 보였다. Barton and Iwama (1991)가 cortisol 농도는 어종, 크기, 발달

단계, 영양상태, 수온, 시간 등 환경 요인에 따라 영향을 받는다고 보고하였는데, 본 실험에서 cortisol 농도는 고수온 노출과 실험기간동안 사료를 공급하지 않아 어류의 영양결핍 등이 영향을 준 것으로 판단된다.

사육밀도는 어류에 있어 성장, 사료섭취, 산소 소비량 등 직접적인 영향을 미친다(Rowland et al., 2006). 지나친 고밀도 사육의 경우 어류에게 스트레스의 요인으로 작용하여 고수온기에는 폐사 발생을 일으킬 수도 있다. 본 연구에서 사육 밀도에 따른 생존율은 유의차가 나타났으나, 혈중 glucose 및 cortisol은 유의차가 없는 것으로 나타났다. 사육밀도는 어류의 서식공간과 먹이경쟁으로 인해 성장에 영향을 주지만, 본 실험은 사료 공급을 하지 않아 먹이경쟁도 없고, 조피볼락 평균체중은 522.9±7.15 g로 3년정도 사육한 성어로 22일간의 짧은 실험기간으로는 밀도에 따른 성장이나 혈중 glucose, cortisol에 영향을 미치지 못한 것으로 생각된다.

GOT와 GPT는 어류 건강 상태와 간 손상 평가 지표(Ramesh et al., 2018)로써 고밀도군의 GOT, GPT는 저밀도군보다 증가하는 경향을 보였고, 고밀도군의 미설치구 GOT는 모든 실험구에 비해 유의적으로 증가하였다. 따라서 피해저감 장치를 설치하는 것이 미설치구 조피볼락보다 건강도나 간 손상이 덜 할 것으로 생각된다.

본 연구는 조피볼락 해상가두리 양식장에 고수온기 피해저감 장치(액화산소, 산소용해기)를 설치함으로써 생존율과 용존산소 농도의 상승효과를 확인하였다. 특히 액화산소 및 산소용해기를 단독으로 설치하는 것보다 복합적으로 설치하는 것이 생존율과 용존산소 농도에서 가장 효과가 높았다. 조피볼락 사육밀도를 낮추는 것도 효과를 증대시켰다. 따라서 고수온이 도래하기 전에 해상가두리 양식장에 고수온 피해저감 장치를 설치한다면 대량폐사 피해를 줄일 것으로 기대된다.

References

- Baden SP, Pihl L and Rosenberg R(1990). Effects of oxygen depletion on the ecology, blood physiology and fishery of the Norway lobster *Nephrops norvegicus*. Mar Ecol Prog Se 67, 141~155.
<http://doi.org/10.3354/meps067141>
- Barton BA and Iwama GK(1991). Physiological changes in fish from stress in aquaculture with emphasis on the response and effects of corticosteroids. Ann Rev Fish Dis 1, 3~26.
[http://doi.org/10.1016/0959-8030\(91\)90019-G](http://doi.org/10.1016/0959-8030(91)90019-G)
- Brown JAG, Jones A and Matty AJ(1984). Oxygen metabolism of farmed turbot *Scophthalmus maximus*: I. the influence of fish size and water temperature on metabolic rate. Aquaculture 36(3), 273~281.
[http://doi.org/10.1016/0044-8486\(84\)90242-4](http://doi.org/10.1016/0044-8486(84)90242-4)
- Caldwell CA and Hinshaw J(1994). Physiological and hematological responses in rainbow trout subjected to supplemental supplemental dissolved oxygen in fish culture. Aquaculture 126(1-2), 183~193.
[http://doi.org/10.1016/0044-8486\(94\)90259-3](http://doi.org/10.1016/0044-8486(94)90259-3)
- Chabot D and Dutil JD(1999). Reduced growth of Atlantic cod in non-lethal hypoxic condition. J Fish Biol 55(3), 472~491.
<http://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1999.tb00693.x>
- Chang YJ, Hur JW, Lim HK and Lee JK(2001). Stress in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) and fat cod (*Hexagrammos otakii*) by the sudden drop and rise of water temperature. J Korean Fish Soc 34(2), 91~97.
- Chang YJ, Park MR, Kang DY and Lee BK(1999). Physiological responses of cultured olive flounder *Paralichthys olivaceus* on series of lowering seawater temperature sharply and continuously. J Korean Fish Soc 32(5), 601~606.
- Choi HS, Myoung JI, Park MA and Cho MY(2009). A study on the summer mortality of Korean rockfish *Sebastes schlegeli* in Korea. J Fish Pathol 22(2), 155~162.
- Dalla VJ, Villani P, Gasteiger E and Niederstatter H(1998). Oxygen consumption in sea bass fingerling *Dicentrarchus labrax* exposed to acute salinity and temperature changes: metabolic basis for maximum stocking density estimation. Aquaculture 169(3-4),

- 303~313.
[http://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00375-5](http://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00375-5)
- Davis KB and Parker NC(1990). Physiological stress in striped bass: Effect of acclimation temperature. *Aquaculture* 91, 349~358.
- DO YH, Min BH, Kim YD and Park MS(2016). Changes on hematological factors and oxygen consumption of Korean rockfish *Sebastes schlegeli* in high water temperature. *JFMSE* 28(3), 738~745.
<http://doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.3.738>
- Garrido MA, Perez P, Titus JA, Valdayo MJ, Winkler DF, Barbieri SA, Wunderlich JR and Segal DM(1990). Targeted cytotoxic cells in human peripheral blood lymphocytes. *J Immunol* 144(8), 2891~2898.
- Heisler N(1986). Acid-base regulation in fishes. In *Acid-Base Regulation in Animals* (ed. Heisler N), 397~450.
- Horning WBI and Pearson RE(1973). Growth temperature requirement and lower lethal temperature for juvenile smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*). *J Fish Res Bd Can* 30(8), 1226~1230.
<http://doi.org/10.1139/f73-194>
- Hrubec T, Cardinale JL and Smith SA(2000). Hematology and plasma chemistry reference intervals for cultured tilapia *Oreochromis* hybrid. *Vet Clin Pathol* 29(1), 7~12.
<http://doi.org/10.1111/j.1939-165X.2000.tb00389.x>
- Ishioka H(1980). Stress reactions in the marine fish, 1: Stress reactions induced by temperature change. *Bull Jpn Soc Sci Fish* 46(5), 523~532.
- Itazawa Y and Hanyu I(1991). *Fish Physiology*. Koseisha-Koseikaku, Tokyo, Japan, 621pp.
- Jee BY, Do YH, Min BH, Park MS, Hwang HG, Myeong JI and Cho JK(2015). Changes of blood parameters in Korean rockfish *Sebastes schlegeli* subjected to acute hypoxia at different water temperatures. *Korean J Environ Biol* 33(4), 412~418.
<http://doi.org/10.11626/KJEB.2015.33.4.412>
- Kim JH, Kim JY, Lim LJ, Kim SK, Choi HS and Hur YB(2018). Effects of waterborne nitrite on hematological parameters and stress indicators in olive flounders, *Paralichthys olivaceus*, raised in bio-floc and seawater. *Chemosphere* 209, 28~34.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.082>
- KMA(2018). 2017 Abnormal Climate Report. Korea Meteorological Administration. Seoul, Korea, 1~190.
- Lays N, Iversen MMT, Frantzen M and Jørgensen EH(2009). Physiological stress responses in spotted wolffish (*Anarhichas minor*) subjected to acute disturbance and progressive hypoxia. *Aquaculture* 295(1-2), 126~133.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.06.039>
- NIFS(National Institute of Fisheries Science)(2017). Standard manual of aquaculture on Korean rockfish. Pusan, Korea, 44~45.
- Qureshi IZ, MA Hafeez and SA Shaikh. 1995. Hematological response of the fish, *Cyprinus watsoni*, to hypoxia, anemia and hyperthermia. *Pak J Zool* 27, 219~227.
- Randall D(1982). The control of respiration and circulation in fish during exercise and hypoxia. *J Exp Biol* 100, 275~288.
- Robertson L, Thomas P, Arnold CR and Trant JM (1987). Plasma cortisol and secondary stress responses of red drum to hantransport, rearing density, and disease outbreak. *Prog Fish-Cult* 49(1), 1~12.
[http://doi.org/10.1577/1548-8640\(1987\)49<1:PCASSR>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1577/1548-8640(1987)49<1:PCASSR>2.0.CO;2)
- Rowland SJ, Mifsud C, Nixon M and Boyd P(2006). Effects of stocking density on the performance of the Australian freshwater silver perch (*Bidyanus bidyanus*) in cages. *Aquaculture* 253(1-4), 301-308.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.04.049>
- Statistics Korea(2020). Statistic database for aquaculture production. Retrieved from <http://kostat.go.kr> on March 10.
- Smit GL and H Hattingh(1978). The effect of respiratory stress on carp hemoglobin. *Comp Biochem Physiol A* 59(4), 369~374.
[https://doi.org/10.1016/0300-9629\(78\)90180-9](https://doi.org/10.1016/0300-9629(78)90180-9)
- Sun H, Li J, Tang L and Yang Z(2012). Responses of crucian carp *Carassius auratus* to long-term exposure to nitrite and low dissolved oxygen levels. *Biochem Syst Ecol* 44, 224~243.
<https://doi.org/10.1016/j.bse.2012.06.011>
- Van Raaij Marcel TM, Bakker E, Nieveen MC, Zirkzee H and van den Thillart Guido EEJM (1994). Energy status and free fatty acid patterns in tissues of common carp *Cyprinus carpio*, L. and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*, L. during severe oxygen restriction. *Comp Biochem Physiol*

A 109(3), 755~767.

[https://doi.org/10.1016/0300-9629\(94\)90219-4](https://doi.org/10.1016/0300-9629(94)90219-4)

Wood SC and Johansen K(1972). Adaptation to hypoxia by increased HbO₂ affinity and decreased red cell ATP concentration. Nat New Biol 237, 278~293.

<http://doi.org/10.1038/newbio237278a0>

Yoo JT, Kim YH, Song SH and Lee SH(2018). Characteristics of egg and larval distributions and catch changes of anchovy in relation to abnormally

high sea temperature in the South Sea of Korea. J Korean Soc Fish Ocean Technol 54(3), 262~270.

<https://doi.org/10.3796/KSFOT.2018.54.3.262>

-
- Received : 29 July, 2022
 - Revised : 05 October, 2022
 - Accepted : 12 October, 2022