

고수온기 용존산소 농도가 실내 사육 조피볼락, *Sebastes schlegelii*의 생존율과 생리학적 변화에 미치는 영향

김우식 · 강희웅* · 이경미†

국립수산과학원 서해수산연구소(인턴연구원 · *연구관 · †연구사)

Effect of Dissolved Oxygen Concentration in High Water Temperatures Period on Survival Rate and Physiological Changes of Black Rockfish, *Sebastes Schlegelii* Reared Indoors

Woo Sik KIM · Hee Woong KANG* · Kyung Mi LEE†

West Sea Fisheries Research Institute(intern researcher · *senior researcher · †researcher), NIFS

Abstract

This study investigated the effect of increasing dissolved oxygen concentration using oxygen dissolver and liquefied oxygen on survival rate and physiological changes to reduce mortality of black rockfish (*Sebastes schlegelii*) in high water temperature periods. The experiment divided into 4 groups (A, control group (water temperature 23-24°C, no device install); B, combination of liquefied oxygen and oxygen dissolver; C, liquefied oxygen; D, without device install). The water temperature was raised by 0.5°C per day and maintained for a week after reaching 30°C. The dissolved oxygen concentration was significantly higher in group B compared to another groups. In survival rate, in group D, death occurred when the water temperature reached 30°C, and the entire populations died within 7 days. The survival rate of the group B and C was 100%. As a result of blood analysis, osmolality and magnesium showed significant differences only in group D. Glucose and cortisol, which are used as stress indicators, were measured significantly lower in group B and C. GPT and GOT were measured to be significantly higher only in group D. Therefore, it is believed that the use of oxygen dissolvers and liquefied oxygen will be effective in reducing the mass mortality of marine net cage in high water temperature periods by increasing the amount of dissolved.

Key words : Black rockfish, High water temperature, Dissolved oxygen, Survival rate, Blood analysis

I. 서론

전 세계적으로 지구온난화로 인한 기온 상승이 문제되고 있으며 이에 따라 해양생태계에서는 수온 상승과 고수온 현상에 대해 주목하고 있다. 고수온 현상이란 해수면의 온도가 평균보다 높은

상태로 짧게는 며칠 길게는 몇 주까지 지속되는 것을 말한다. 이러한 고수온 현상의 원인으로는 엘니뇨 등으로 인해 해역 수온 자체가 높아지는 ‘해양형 고수온’과 대기압과 태양복사열로 인해 고수온 현상이 발생하는 ‘대기형 고수온’이 있으며 이 두 요인이 복합적으로 작용해서 발생하기

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

* 이 논문은 2024년도 국립수산과학원 수산시험연구사업 양식생물 자연재해 피해 판별기술 연구(R2024042) 의해 연구되었음.

도 한다(Lee et al., 2020). 국내 연안에서도 온난화에 의한 수온상승이 지속적으로 관찰되고 있다(Han and Lee, 2020).

이러한 수온상승은 해양생태계 생물의 성장, 생식, 행동, 면역체계 등에 변화를 주어 토종 생물종의 개체수 감소와 외래생물종 유입 등을 야기시켰으며(Ju and Kim, 2012), 먹이가 되는 생물 군집 조성 및 생태계 기능을 변화시켜 생태계 먹이망 구조의 변화를 일으킬 수 있다(Kang et al., 2012).

최종적으로 수온상승은 대부분 해양에서 생물 다양성의 변화 및 수산 자원의 감소가 나타날 수 있다. 특히 변온동물인 어류는 일정범위 내 수온 변화에서 항상성을 가지지만 급격한 수온변화에 민감하여 대사, 삼투압 조절, 면역반응 등 생명활동에 큰 영향을 준다(Lee et al., 2013). 위와 같은 요인들이 지속되면 스트레스 반응으로 이어진다(Song et al., 2019). 스트레스 반응이 일어나면 생물은 이에 적응하기 위해 생리적 반응을 나타내지만 스트레스 한계치를 장기간 넘기게 되면 만성 스트레스에 의한 성장, 생식력, 질병 저항성 등이 저하되며 지속적인 스트레스는 양식생물의 대량 폐사와 같은 피해로 나타난다(Lee et al., 2002).

수온이 상승하면 해수의 용존산소 용해량이 감소하는 반면 생물학적 소비는 증가하게 된다(Do et al., 2016). 용존산소량이 감소하면 수중생물의 호흡에 필요한 산소량이 감소하게 되고, 사료 섭취와 사료 전환율에 영향을 미치며, 산소 스트레스가 지속될 경우 질병에 대해 취약해 지고 폐사를 일으킨다(Hvas et al., 2017; Oldham et al., 2019). 수온상승으로 인해 저산소 환경이 유지되면 어류는 항상성 유지를 위해 적혈구 수를 증가시켜 혈액의 산소 포화량을 높이게 되고 이러한 과정에서 혈액 성상이 변화된다(Gaulke et al., 2014; Kim, 2021).

이같이 고수온 현상은 해양생물에 직·간접적으로 영향을 미쳐 어류의 생존에 큰 영향을 주는 원인 중 하나로 작용하고 있다. 최근 국내에서는 각 해역에서 양식생물이 자주 대량 폐사가 발생

하는 원인분석을 진행해 왔으며 고수온 현상 영향이 양식생물의 생존에 큰 위협이라고 판단하고 있다(Choi et al., 2009; Han and Lee, 2022).

이러한 고수온기 폐사문제에 대한 위협은 인지하고 있으나 다양한 요인이 복합적으로 작용하고 있어 뚜렷한 대응 방법은 아직 연구 중에 있다. 고수온 피해 중 용존산소가 부족해서 생기는 피해를 줄이기 위해 액화산소를 이용하는 방안을 제시할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 고수온기 조피볼락의 폐사를 줄이기 위해 산소용해기 및 액화산소를 이용한 용존산소 농도 증가가 생존율에 미치는 영향과 생리학적 변화를 조사하였다.

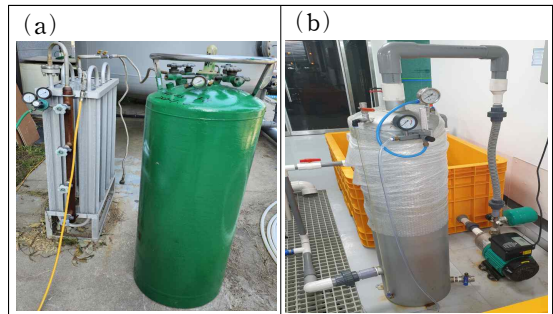
II. 연구 방법

1. 실험어

실험에 사용된 조피볼락(*Sebastes schlegelii*)은 평균 체중 310.0±19.3 g, 평균 전장 27.1±0.6 cm로 충청남도 서산시 천수만 가두리양식장으로부터 구입하여 실내 수조에 23~24°C로 순치시켰다.

2. 실험 조건

용존산소 공급을 위한 장치로 액화산소와 산소용해기를 사용하여([Fig. 1]) 4가지 실험조건으로 분류하였다. 액화산소와 산소용해기를 복합적으로 설치한 복합구(B), 액화산소만 단독으로 설치한



[Fig. 1] (a) Liquefied oxygen and (b) Oxygen dissolver for supplying dissolved oxygen.

고수온기 용존산소 농도가 실내 사육 조피볼락, *Sebastes schlegelii*의 생존율과 생리학적 변화에 미치는 영향

실험구(C), 그리고 두 장치를 설치하지 않은 미설치구(D)로 나누었으며, 고수온 조건을 위하여 하루에 0.5℃씩 수온을 상승시켜 30℃ 도달 후 일주일간 유지하였다. 그리고 수온 영향을 비교하기 위해 초기수온 23~24℃에서 액화산소 및 산소용해기를 설치하지 않은 실험구(대조구, A)를 설정하였다. 실험에 사용한 모든 수조는 약 1톤(1.2×1.2×0.8 m)이었고, 각 수조당 실험어를 30마리씩 입식하여 실험기간동안 사료는 공급하지 않았다.

3. 수온, 용존산소 및 생존율 측정

실험수조의 수온 및 용존산소 농도는 수질측정기(YSI-EXO2, YSI Inc., USA)를 이용하여 매일 2회(9~12시, 13~16시) 변화를 측정하였다. 수온은 일일 평균치를 계산하였고 용존산소 농도는 모든 측정값의 평균값으로 나타냈다. 생존율은 실험기간 각 실험구의 폐사개체를 계수한 후 누적하여 산정하였다.

4. 혈액 분석

산소공급장치 미설치구의 수온이 30℃에 도달 후 폐사가 발생한 시점에서 혈액학적 분석을 진행하였다. 각 수조당 실험어 6마리를 MS-222 (ethyl3-aminobenzonate methanesulfonate salt, SIGMA ALDRICH)로 마취한 후 헤파린 처리된 주사기를 사용하여 미부정맥에서 채혈하였다. 혈액 삼투압 (osmolality)은 전혈을 이용하여 vapor pressure osmometer (Wescor 5600, Logan, UT, USA)로 측정하였다. 헤마토크리트(hematocrit, Ht)는 채혈한 일부 혈액을 미세관 내에 넣어서 microhematocrit 원심분리기(VS-12000, KOR)에서 12,000 rpm으로 10분간 원심분리 후 microhematocrit reader

(KS-Reader-A, USA)를 이용하여 측정하였다. 헤모글로빈은 임상용 kit (Asan Pharm. Co., Ltd)를 이용하여 Cyan-methemoglobin법으로 측정하였다.

혈장성분 변화를 분석하기 위해 채취한 혈액을 4℃에서 12,000 rpm으로 15분간 원심분리 후 혈장을 분리하고 칼슘(calcium), 마그네슘(magnesium), 혈당(glucose)은 시판되고 있는 임상용 kit (Asan Pharm. Co., Ltd., Korea)를 이용하여 분석하였고, 코르티솔(cortisol)은 Cortisol ELISA Kit (Enzo Life Sciences Inc.)를 이용하여 분석하였다. 혈장 효소 활성으로 GOT (glutamic oxalate transaminase), GPT (glutamic pyruvate transaminase)는 King-King 법으로 임상용 kit (Asan Pharm. Co., Ltd)를 이용하여 분석하였다.

5. 통계 분석

실험결과와 자료값은 평균±표준오차로 나타내었고, SPSS 통계 프로그램(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하여 One way ANOVA test 및 사후 검정으로 Duncan's multiple range test를 통해 $p < 0.05$ 일 때 유의성이 있는 것으로 간주하였다.

III. 연구 결과

1. 용존산소

각 실험구의 용존산소 농도는 액화산소와 산소용해기 복합구가 9.39±0.22 mg/L, 액화산소 단독구는 7.89±0.17 mg/L, 미설치구 4.15±0.11 mg/L 및 대조구는 4.70±0.07 mg/L 였고, 산소용해기와 액화산소 복합설치구의 용존산소는 9 mg/L 이상으로 다른 실험구에 비해 유의하게 높았다(<Table 1>).

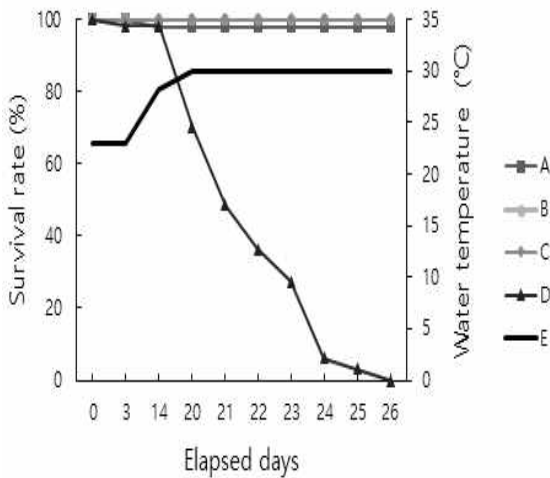
<Table 1> Dissolved oxygen by the system for high water temperature damage reduction

DO	A	B	C	D
(mg/L)	4.70±0.07 ^c	9.39±0.22 ^a	7.89±0.17 ^b	4.15±0.11 ^c

* A, Control (23~24℃, No device install); B, Oxygen dissolver + Liquefied oxygen (30℃); C, Liquefied oxygen (30℃); D, No device install (30℃)

2. 생존율

고수온 설정 실험구 중 액화산소와 산소용해기 미설치구의 생존율은 수온 30℃에 도달하자 폐사가 발생하였고 이후 7일만에 전량 폐사하였다. 액화산소와 산소용해기 복합구와 액화산소 단독 설치구는 100%를 나타내었고, 대조구(23~24℃, 미설치구)는 실험초기에 한마리만 폐사하였다 ([Fig. 2]).



[Fig. 2] Survival rate of black rockfish, *Sebastes schlegelii* by the system for high water temperature damage reduction. A, Control (23~24℃, No device install); B, Oxygen dissolver + Liquefied oxygen (30℃); C, Liquefied oxygen (30℃); D, No device install (30℃); E, Water temperature.

3. 혈액분석

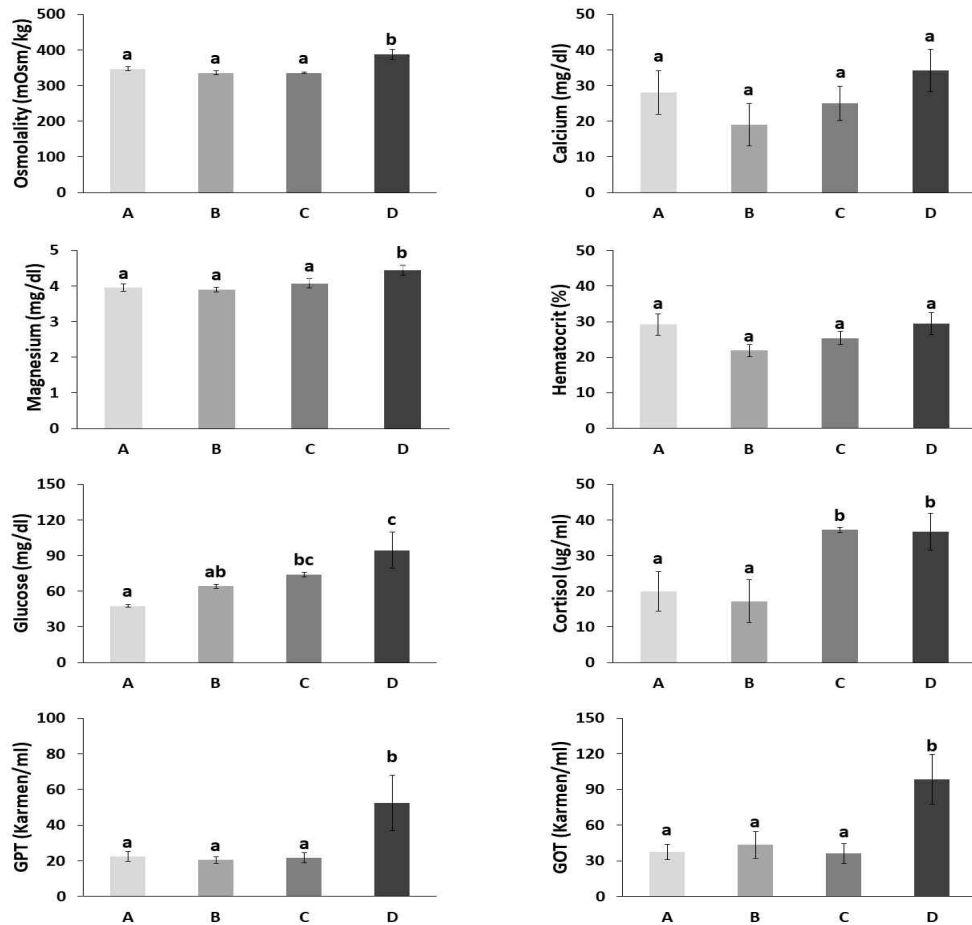
헤마토크리트와 칼슘은 실험구간 유의한 차이를 보이지 않았으나 삼투압과 마그네슘은 설치구만 유의차를 보였다. 스트레스 지표로 이용되는 혈당과 코르티솔은 액화산소와 산소용해기를 함께 설치한 복합 실험구에서 유의차를 보였다. GPT와 GOT는 미설치구만 유의차를 보였다([Fig. 3]).

IV. 결론

본 연구에서는 고수온기 수온 상승에 따라 용존산소 감소가 양식생물에 영향을 미치므로 용존산소를 높일 수 있는 방안으로 액화산소와 산소용해기를 이용하여 양식 조피볼락에 대상으로 실내에서 실험을 진행하였다. 피해저감장치를 설치하지 않은 가온 수조(30℃)와 자연수온 수조(23~24℃, 대조구)의 DO는 큰 차이가 없었으나, 실험기간 가온 수조의 DO값은 4.15 mg/L로 더 낮았으며 액화산소 및 산소용해기와 액화산소 복합구에서 유의한 차이를 보였다. 해수의 용존산소량은 수온과 밀접한 관련이 있으며 수온이 증가할수록 산소 포화도가 감소함에 따라 용존산소량도 감소하게 된다(Lim et al., 2008). Lee et al. (2022)의 연구에 따르면 해상가두리양식장에서 용존산소 농도는 액화산소 및 산소용해기 복합구, 액화산소 설치구 그리고 미설치구 순으로 낮아져 본 연구와 비슷한 결과를 보였다. 따라서 이러한 피해저감 장치들은 용존산소 증대에 효과가 있는 것으로 생각된다.

용존산소는 수온뿐만 아니라 양식장의 크기, 사육밀도 및 주변환경에 의한 영향도 크다. 따라서 실내실험인 본 연구는 해상가두리 양식장의 사육밀도를 최대한 유사한 조건으로 실험하였다. 조피볼락 양식 표준 매뉴얼(Hwang et al., 2017)에 따르면 해상가두리 양식장에서 조피볼락(전장 25~30 cm, 체중 281~491 g)의 표준 사육밀도의 경우 단위중량 9.59~13.5 kg/m³으로 수조 1톤 기준 26~34 마리이다. 따라서 본 연구와 Lee et al.(2022)의 사육장소 및 크기는 다르나 사육밀도는 표준 매뉴얼에 따라 실험하였으므로 양식장 크기나 개체수에 의한 변수는 크지 않다고 본다. 다만 해상가두리 양식장의 경우 주변환경(밀물, 썰물과 바람 등)의 영향에 의한 해수 유동 등으로 용존산소 유실이 일어날 수 있어 본 연구의 실내실험에 비해 용존산소 농도가 조금 낮게 나타난 것으로 생각된다.

고수온기 용존산소 농도가 실내 사육 조피볼락, *Sebastes schlegelii*의 생존율과 생리학적 변화에 미치는 영향



[Fig. 3] Blood analysis of black rockfish, *Sebastes schlegelii* by the system for high water temperature damage reduction. 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. A, Control (23~24°C, No device install); B, Oxygen dissolver + Liquefied oxygen (30°C); C, Liquefied oxygen (30°C); D, No device install (30°C).

어류의 혈액성상은 영양 및 생리 상태를 확인할 수 있는 중요한 지표로서 용존산소를 높이는 피해저감 장치 설치여부에 따른 조피볼락의 건강 및 스트레스 등을 확인하고자 하였다. 먼저 혈장 삼투압과 무기성분인 칼슘 및 마그네슘을 측정하였다. 삼투압은 어류의 스트레스 반응 지표로서 항상성 변화의 지표로 이용되어지며(Herbert and Steffensen, 2005) 혈청 내 무기성분인 칼슘과 마그네슘은 항상성을 위한 이온조절 역할을 수행한

다(Bijvelds et al., 1998). 삼투압과 마그네슘은 액화산소와 산소용해기 미설치 고수온 실험구가 다른 실험구와 비교해서 유의차를 보였고 칼슘은 각 실험구간 유의차는 없었으나 마찬가지로 미설치 고수온 실험구에서 다른 실험구에 비해 높은 값을 나타내었다. 이온과 삼투압은 항상 변화하는 해수환경에서 생물이 항상성을 유지하기 위한 중요한 조절기구이다. 수중 용존산소가 낮아지게 되면 어류에게 스트레스로 작용하여 행동변화와

생리학적 변화를 일으킨다(Herbert and Steffensen, 2005). 강도다리의 경우 24°C 이상의 고수온은 삼투압 조절 문제를 일으키며(Min et al., 2014), Kim(2021)과 Jee et al.(2015)의 연구에서는 조피볼락의 사육수온이 상승하고 용존산소가 감소함에 따라 삼투압 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 수온상승과 저산소가 어류에게 스트레스 요인으로 작용한다고 보여지며, 액화산소와 산소용해기 설치에 따른 용존산소 증가가 어류의 환경변화에 의한 스트레스를 낮춰주는데 도움이 된다고 보여진다.

어류의 스트레스를 확인하는 방법으로 혈액을 통한 헤마토크리트와 혈당 및 코르티졸이 있다. 저산소는 혈중 혈당과 헤마토크리트의 상승(Smit and Hattingh, 1978)을 보이며 먹이섭식, 사료효율, 성장 감소를 일으킨다(Chabot and Dutil, 1999). 위와 같은 다양한 현상이 어류에게 스트레스로 작용되며 다양한 스트레스로 인하여 폐사가 발생하게 된다. 헤마토크리트는 어류의 산소 운반능력과 생리 상태를 확인하는데 좋은 인자이다(Jia et al., 2021). Kim(2021)은 수온 상승과 용존산소 감소는 헤마토크리트의 증가를 보이며, Jee et al.(2015)의 연구에서는 수온상승에 대한 효과보다 용존산소에 따라 헤마토크리트의 값이 변하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 헤마토크리트가 실험구간 유의차이는 없었으나 액화산소와 산소용해기 설치구들이 수치가 낮은 경향을 보여 피해저감 장치 설치를 통한 산소 공급 증가가 어류의 스트레스를 낮춰 주는데 효과가 있는 것으로 보여진다. 어류의 스트레스 상황을 알아보는 또 다른 방법으로는 혈당과 코르티졸을 측정하는 방법이 있다. 코르티졸은 glucocorticoid 호르몬의 일종으로 혈액을 통해 조직 내로 들어가 조직 내의 GR (glucocorticoid receptor)과 결합하여 조직 내의 글리코겐을 분해함으로써 혈당이 혈액 내로 방출되어 이를 에너지원으로 사용, 스트레스 상황에 대처함으로 항상성을 되찾게 된다(Bonga, 1997). Kim(2021)과 Jee et al.(2015)의 연

구에 따르면 조피볼락에 수온변화와 저산소 상태를 적용하였을 때 수온이 상승할수록 그리고 용존산소가 감소할수록 어류의 혈중 혈당과 코르티졸 농도가 증가하는 양상을 보였다.

Lee et al.(2022)은 사육 밀도와 산소용해기 및 액화산소에 따른 혈중 혈당을 비교한 결과 사육 밀도별 혈당의 차이는 없었으나 산소용해기와 액화산소 복합구가 다른 실험구와 비교해 유의한 차이를 보였다. 본 연구에서 혈당은 대조구, 액화산소와 산소용해기 복합구, 액화산소 단독구, 미설치 고수온 수조 순으로 수치가 나왔으며 각 실험구간 유의차를 보였고, 코르티졸은 액화산소 단독구와 미설치 고수온 수조가 다른 실험구에 비해 높은 값을 나타내었다. 이 결과를 통해 고수온 현상이 조피볼락에 스트레스로 작용하였으며 피해저감 장치를 통해 스트레스를 낮출 수 있었으며 액화산소 단독 사용보다 산소용해기를 복합적으로 사용할 경우 좀더 좋은 효과를 볼 수 있다고 판단되어진다.

어류의 근육, 신장질환 및 간을 통한 건강도 검사를 위해서 GPT (Glutamic pyruvic transaminase)와 GOT (glutamic oxaloacetic transaminase)를 분석하였다. 정상적인 상태에서 GPT와 GOT는 주로 간세포와 심근세포에 존재하며 단백질 대사에 관여한다. 그러다 급격한 수온상승, 암모니아 또는 중금속에 의한 스트레스 작용으로 간 손상이 발생할 경우 혈액으로 방출하게 되는 특성을 가지고 있어 어류의 건강상태를 쉽게 모니터링하는데 쓰이는 지표이다(Pan et al., 2003; Ming et al., 2012). 조피볼락의 경우 스트레스나 질병에 감염될 경우 황간, 갈변, 위축간의 임상학적 특성을 보일 수 있다. 이러한 경우 정상상태의 간 보다 GPT, GOT 수치가 높게 측정되는데 이는 아스파라진산염 아미노 전이효소(AST/GOT)와 알라닌 아미노전이효소(ALT/GPT)가 간 손상 시 혈액에 더 많이 확산되기 때문으로 간기능장애 평가에 용이한 지표라 볼 수 있다(Choi et al., 2011). 강도다리와 감성돔의 경우 적정수온 이상의 고수온

해수에 노출된 경우 폐사는 없었으나 GPT, GOT 값이 높게 나타났으며(Min et al., 2014), 조피볼락의 경우 수온상승 및 용존산소 감소 상태가 발생할 경우 GPT, GOT 값이 높았다(Do et al., 2016; Jee et al., 2015). 조피볼락 해상가두리 양식장에서 피해저감 장치를 설치한 저밀도 및 고밀도 실험구의 혈액성상을 조사한 결과 고수온기 GPT, GOT 값은 유의한 차이가 없었으나, 고밀도구에서 GOT 수치가 유의하게 높아졌다(Lee et al., 2022). 본 연구 결과 고수온 조건(30°C)에서 액화산소와 산소용해기 복합구와 액화산소 단독구의 GPT, GOT 수치가 대조구(23~24°C)와 유사하고, 액화산소와 산소용해기 미설치 고수온 실험구에서만 GPT, GOT가 유의하게 높은 값을 보였다. 따라서 피해저감 장치설치 등을 통한 산소공급 증가는 어류의 스트레스를 낮추는 효과가 실내실험에서 확연히 나타났다.

본 연구에서 고수온기 실내수조에 피해저감 장치(액화산소, 산소용해기)를 이용하면 용존산소 농도를 높일 수 있으며, 조피볼락의 생존율도 높아지는 것을 확인하였다. 조피볼락의 혈액학적 성상 분석결과 피해저감 장치 미설치구의 혈액압 투압, 마그네슘, 혈당, 코르티졸, GPT, GOT가 증가하였으며, 액화산소와 산소용해기를 복합으로 이용한 피해저감 장치 설치구는 대조구와 유의한 차이가 없는 것으로 보아 여름철 고수온기에 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 적정 사육밀도에서 산소용해기와 액화산소를 이용하면 현장 가두리양식장에 용존산소량을 증가시켜 고수온기 양식어류의 피해를 줄이는데 효과가 있을 것으로 생각된다.

References

- Bijvelds MJ, Velden JA, Kolar ZI and Flik G(1998). Magnesium transport in freshwater teleosts. The J Experi Biolo 201, 1981~1990.
<https://doi.org/10.1242/jeb.201.13.1981>
- Bonga SEW(1997). The stress response in fish. Physiological Reviews 77(3), 591~625.
<https://doi.org/10.1152/physrev.1997.77.3.591>
- Chabot D and Dutil JD(1999). Reduced growth of Atlantic cod in non-lethal hypoxic condition. J Fish Biol 55(3), 472~491.
<https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1999.tb00693.x>
- Choi HS, Myoung JI, Park MA and Cho MY(2009). A study on the summer mortality of Korean rockfish *Sebastes schlegelii* in Korea. J Fish Pathol 22(2), 155~162.
- Choi HS, Huh MD, Lee MK, Choi HJ and Park MA(2011). Histopathological observation of liver in cultured black rock fish *Sebastes schlegelii* in low temperature season. J Fish Pathol 24(3), 225~236.
<https://doi.org/10.7847/jfp.2011.24.3.225>
- Do YH, Min BH, Kim YD and Park MS(2016). Changes on hematological factors and oxygen consumption of Korean rockfish *Sebastes schlegelii* in high water temperature. JFMSE 28(3), 738~745.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.3.738>
- Gaulke GL, Dennis CEIII, Wahl DH and Suski CD(2014). Acclimation to a low oxygen environment alters the hematology of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Fish Physiol Biochem 40, 129~140.
<https://doi.org/10.1007/s10695-013-9830-6>
- Han IS and Lee JS(2020). Change the annual amplitude of sea surface temperature due to climate change in a recent decade around the Korean Peninsula. J Kor Soc Mari Envir & Saf 26(3), 233~241.
<https://doi.org/10.7837/kosomes.2020.26.3.233>
- Han JD and Lee DC(2022). A review of the mass-mortalities of sea-cage farm fishes. J Fish Pathol 35(1), 1~25.
<http://doi.org/10.7847/jfp.2022.35.1.001>
- Herbert NA and Steffensen JF(2005). The response of Atlantic cod, *Gadus morhua*, to progressive hypoxia: fish swimming speed and physiological stress. Mar Bio 147(6), 1403~1412.
<https://doi.org/10.1007/s00227-005-0003-8>
- Hwang HK, Min BH, Cho JK, Kim KD, Won KM and Paek JY(2017). Reared in net cage culture. In: Standard manual of black rockfish culture. Myeong JI, Jun JC and Lee JY, National institute of

- fisheries science., 44~45.
- Hvas M, Folkedal O, Imsland A and Oppedal F(2017). The effect of thermal acclimation on aerobic scope and critical swimming speed in Atlantic salmon, *Salmo salar*. J Experi Bio 220(15), 2757~2764. <https://doi.org/10.1242/jeb.154021>
- 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. Kor J Environ Biol 33(4), 412~418. <http://doi.org/10.11626/KJEB.2015.33.4.412>
- Jia Y, Wang J, Gao Y and Huang B(2021). Hypoxia tolerance, hematological, and biochemical response in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*. L). Aqua 535, 1~8. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736380>
- Ju SJ and Kim SJ(2012). Assessment of the impact of climate change on marine ecosystem in the South Sea of Korea. Oce Pol Resea 34(2), 197~199. <http://doi.org/10.4217/OPR.2012.34.2.197>
- Kang YH, Ju SJ and Park YG(2012). Predicting impacts of climate change on Sinjido marine food web. Oce Pol Resea 34(2), 239~251. <https://doi.org/10.4217/OPR.2012.34.2.239>
- Kim HY(2021). Changes in metabolic rate and hematological parameters of black rockfish (*Sebastes schlegeli*) in relation to temperature and hypoxia. J Fish Pathol 34(2), 213~224. <http://doi.org/10.7847/jfp.2021.34.2.213>
- Lee DC, Kim DH, Kim SM, Kang MS, Hong MJ, Kim JH and Park SI(2002). Effects of stress induced by changes of water temperature on the non-specific defense mechanism in cultured olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. J Fish Pathol 15(2), 65~75.
- Lee DC, Park YC, Jeon CY, Yang JY, Hur YB, Kim JW and Cho KC(2013). A report on the 2012 mass summer mortalities of black rockfish, *Sebastes schlegeli* in the Southeast Sea. Kor J Fish Pathol 26(3), 173~183. <https://doi.org/10.7847/jfp.2013.26.3.173>
- Lim DI, Kang MR, Jang PG, Kim SY, Jung HS, Kang YS and Kang YS(2008). Water quality characteristics along mid-western coastal area of Korea. Oce Pol Resea 30(4), 379~399. <https://doi.org/10.4217/OPR.2008.30.4.379>
- Lee KM, Koh SJ, Kim WS and Kang HW(2022). Effects of damage reduction in high water temperature period on the installation of liquefied oxygen and oxygen dissolver in marine net cage. JFMSE 34(5), 922~931. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.10.34.5.922>
- Lee SJ, Park MS, Kwon MH, Kim YH and Park YG(2020). Two major modes of East Asian marine heatwaves. Environ Res Lett 15(7) 074008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8527>
- Min BH, Park MS and Myeong JI(2014). Stress responses of starry flounder, *Platichthys stellatus*(Pallas) following water temperature rise. J Environ Bio 36(5), 1057~1062.
- Ming J, Xie J, Xu P, Ge X, Liu W and Ye J(2012). Effects of emodin and vitamin C on growth performance, biochemical parameters and two HSP70s mRNA expression of Wuchang bream (*Megalobrama amblycephala* Yih) under high temperature stress. J FSI 32(5), 651~661. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2012.01.008>
- Oldham T, Nowak B, Hvas M and Oppedal F(2019). Metabolic and functional impacts of hypoxia vary with size in Atlantic salmon. Compar Bioche Physiol Part A 231, 30~38. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2019.01.012>
- Pan CH, Chien YH and Hunter B(2003). The resistance to ammonia stress of *Penaeus monodon* fabricius juvenile fed diets supplemented with astaxanthin. J Experi Mar Bio Ecol 297(1), 107~118. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2003.07.002>
- Smit GL and Hattingh J(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)
- Song M, Zhao J, Wen HS, Li Y, Li JF and Li LM(2019). The impact of acute thermal stress on the metabolome of the black rockfish (*Sebastes schlegelii*). PLoS ONE 14(5): e0217133. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217133>

-
- Received : 23 February, 2024
 - Revised : 09 April, 2024
 - Accepted : 18 April, 2024