

# 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*)의 생존, 산소소비 및 생리학적 반응에 미치는 저수온의 영향

신윤경\* · 최영재 · 김원진<sup>1</sup>

국립수산과학원 남해수산연구소, <sup>1</sup>충청남도수산자원연구소

## Survival, Oxygen Consumption and Stress Response of Parrotfish *Oplegnathus fasciatus* Exposed to Different Lower Temperature

Yun Kyung Shin\*, Young Jae Choi and Won Jin Kim<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Chung cheongnam-do Institute of Fisheries Resources, Chungnam Boryoung 33508, Korea

The sudden drop of water temperature in winter is very threatening factor that affects the productivity of farmed fish and the management in aquafarm. In this study, we investigated the effect of low temperature on the survival, oxygen consumption and stress responses of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* due to acute drop of water temperature. The survival rate of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* was 5% at 6°C, 95% at 8°C and 100% at 10°C on the 4<sup>th</sup> day of exposure in each experimental temperature. Low-lethal temperature for 4days of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* (4 day-LT<sub>50</sub>) was 6.99°C (confidence limit, 6.55-7.42°C). Oxygen consumption rate was significantly decreased with decreasing water temperature. Temperature coefficient (Q<sub>10</sub>) was found to be 4.0 between 10°C and 8°C and 0.39 between 8°C and 6°C. As a result of investigating the stress response according to the drop in water temperature, the concentration of SOD (Superoxide dismutase), cortisol, glucose, total Ig, AST (Aspartate) and ALT (Alanine aminotransferase) increased with decreasing of water temperature. This study would be useful for the management of temperature about cultured fish.

Keywords: Low temperature tolerance range, *Oplegnathus fasciatus*, Survival, Stress response

### 서론

어류양식장에서 수온은 어류의 성장과 생산력에 영향을 미치는 결정적인 역할을 한다(Beitinger and Bennet, 2000; Pörtner and Peck, 2010). 변온동물인 어류는 수온의 변화에 따라 생리적 순응에 의존하는 온도순응자(Cooper et al., 2019)이며, 어류의 생리와 행동은 수온과 밀접하게 연관되며(Huey and Stevenson, 1979; Cooper et al., 2019), 어류가 생리적으로 기능할 수 있는 온도 범위가 있다. 어류의 호흡률은 대사율을 추정하기 위해 이용되고 있으며(Reyes et al., 2011), 산소소비율이 대사의 척도가 되고 있다. 어류의 산소소비율은 수온을 포함한 다양한 환경요인에 영향을 받으며, 어류의 건강과 관련한다(Burton et al., 2011). 일반적으로 어류의 대사율은 수온과 직접적인 관

계를 나타내며, 수온 10°C 증가에 따라 대사율이 2-3배 증가하며(Schmidt-Nielsen, 1997), 이는 온도계수(Q<sub>10</sub>)으로 나타낼 수 있다. 변온동물에서 수온변화에 대한 산소소비율에 대한 평가는 온도계수를 이용하여 서식지에서 생존가능성을 추정할 수 있는 지표가 될 수 있다(Carvalho and Phan, 1997). 어류혈액의 생리·생화학적 특징은 수온, 서식지의 환경변화 등에 영향을 받으므로 어류의 건강도 평가를 위해 어류의 혈중 생화학적 분석은 매우 유용한 지표이다(Ferguson et al., 2010; Fazio et al., 2013). 어류의 생존, 생리 등에 미치는 수온의 영향에 대하여 혈액의 스트레스 반응으로 분석한 연구는 red spot grouper (Cho et al., 2015), Atlantic cod *Gadus morhua* (Kunz et al., 2016), sea bass (Kir and Demirci, 2018) 등 다양하다. 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*)은 한국 남해안의 해상가두리에서 양성되고 있

\*Corresponding author: Tel: +82. 61. 690. 8971 Fax: +82. 61. 685. 9073

E-mail address: yunkshin@korea.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.2020.0725>

Korean J Fish Aquat Sci 53(5), 725-732, October 2020

Received 26 May 2020; Revised 23 June 2020; Accepted 31 August 2020

저자 직위: 신윤경(연구관) 최영재(연구사) 김원진(연구사)

는 온대성 주요 양식어종으로 겨울철의 급격한 수온하강 및 수온변동으로 인해 양성관리에 어려움이 있으며, 저수온으로 인한 피해가 종종 발생하고 있는 실정이므로, 겨울철 양성관리를 위한 하한수온 및 저수온으로 인해 나타나는 돌돔의 생리학적 변화와 하한수온에 대한 정보는 필요하다.

본 연구는 겨울철 수온하강으로 인해 빈번하게 폐사가 발생하고 있는 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*)의 양식현안을 해소하고 양성관리를 위한 기초자료로 활용하기 위해 돌돔의 하한수온내성범위, 대사반응 및 혈액학적 반응에 대한 연구를 수행하였다.

## 재료 및 방법

실험에 사용된 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*)은 경남 통영시 산양읍 소재 해상가두리 양식장에서 2018년 10월에 구입하여 실험실로 옮긴 후 1톤 유수식 수조에서 사육 관리하였으며, 실험시작 한 달 전부터 수온  $14 \pm 1^\circ\text{C}$ 에 순치시켜 실험에 사용하였다. 순치기간 동안 염분은  $33.6 \pm 0.5$  psu, 용존산소농도는  $9.7 \pm 0.5$  mg/L를 유지하였으며, 먹이는 수협사료(침강골드 3호)를 매일 2회씩 공급하였다. 저수온에 대한 하한내성 수온을 분석하기 위하여 실험수온은 10 (대조구), 8, 6, 4,  $2 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 였으며, 염분은 일반해수로서  $33.6 \pm 0.5$  psu였다. 대조구 실험수온은  $10 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 였으며, 2주일간 순치시킨 후 각 실험 수온으로 하강하여 급성 수온노출 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 개체는 450마리였으며, 실험어의 크기는 평균 전장  $15.3 \pm 0.9$  cm, 평균 전중량  $75.4 \pm 16.6$  g이었다. 실험방법은 450 L수조를 이용하여 180 L/h를 환수하는 방법의 유수식으로 1회 실험시 4일간 수행하였으며, 3회 반복실험을 수행하였다. 실험수온은 냉각기(DA-1000B, Daeil, Busan, Korea)와 온도조절기(DOV-882F, Daeil, Busan, Korea)를 이용하여 조정하였다. 생존율은 12시간 간격으로 점검하고 사망개체를 선별하여 생존율로 환산하여 구하였고, 반수치사수온(50% lethal temperature)은 probit법에 의해 분석(Finney, 1971)하였으며, 사망개체는 실험어류가 뒤집혀서 아가미 뚜껍의 운동이 정지되었을 때 사망으로 판정하였다. 모든 실험은 3회 반복하여 평균값을 이용하였다. 산소소비율은 수온하강에 따른 돌돔의 저수온에 대한 대사반응을 파악하기 위하여 수온 14, 12, 10, 8,  $6 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 에 4일 동안 노출시킨 후 respirometer와 산소흡측정기(Orbis 3600, Orbis, Zurich, Switzerland)를 이용하여 실험 전후 respirometer 내 용존산소의 차로서 구하였다. 온도계수( $Q_{10}$ )은 아래에 나타낸  $Q_{10}$ 의 방정식(Schmidt-Nielsen, 1997)을 이용하여 산소소비율에 대한 순응영향을 평가하였다.

$$Q_{10} = (\text{Rate}_2 / \text{Rate}_1)^{(10 / \text{Temp}_2 - \text{Temp}_1)}$$

여기서  $\text{Rate}_2$ 와  $\text{Rate}_1$ 은 T2와 T1에서 산소소비율을 나타낸다. 돌돔의 스트레스반응은 각 실험수온에 노출시킨 후 4일째 살아가는 개체를 대상으로 돌돔의 미부동맥에서 3 mL 주사기를

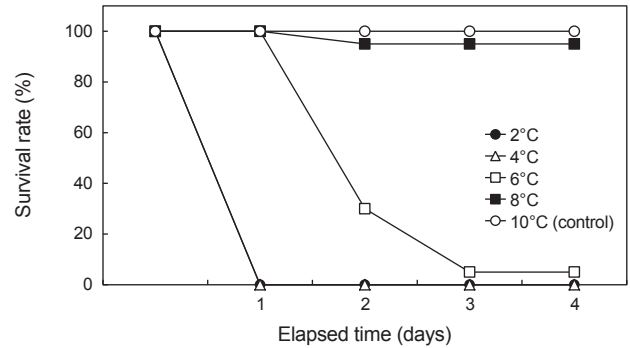


Fig. 1. Survival rate of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* with decreasing of water temperature.

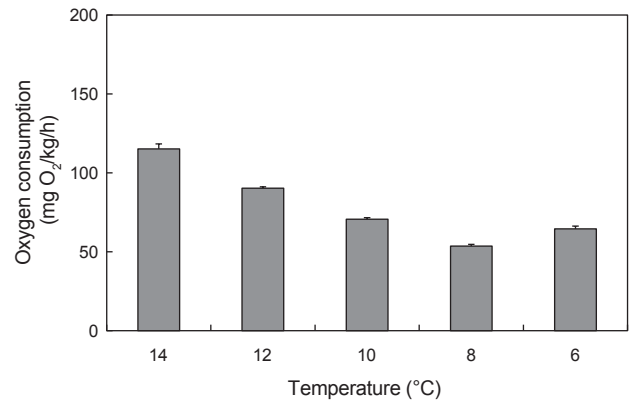


Fig. 2. Changes in oxygen consumption rate of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* with decreasing temperature.

이용해 혈액을 채취하였다. 채혈한 혈액은 capillary tube에 넣고  $-4^\circ\text{C}$ 에서 10,000 rpm으로 10분간 원심분리하여 혈장을 분리한 후  $-80^\circ\text{C}$ 에 보관하고 분석시에 사용하였다. 혈장의 glucose, ALT (alanine aminotransferase)와 AST (aspartate aminotransferase)는 FUJI-CHEM 7000i (Fujifilm, Tokyo, Japan)에서 전용 kitslide를 사용하여 분석하였다. 혈장내 SOD (superoxide dismutase), CAT (catalase), cortisol은 어류 ELISA kit (Cusabio Biotech, Wuhan, China)를 사용하였으며, Versamax SoftMax pro 6 (Molecular Devices, San Jose, CA, USA)를 이용하여 파장 450 nm에서 흡광도를 측정하였다. Total Ig는 bradford assay를 통하여 단백질양을 측정하여 파장 595 nm에서 분석하였다. 혈장 내 malondialdehyde (MDA) 활성도는 TBARS assay kit (Cayman, product number: 10009055)를 사용하였고, 혈액내 삼투질농도는 삼투압 측정기 Osmomat 3000 (Gonotec, Berlin, Germany)을 이용하여 분석하였다. 실험결과에 사용된 유의성 검정은 SPSS 19.0을 이용하여 one-way ANOVA로 통계처리 후 Duncan's multiple range test로 사후 검증하였다.

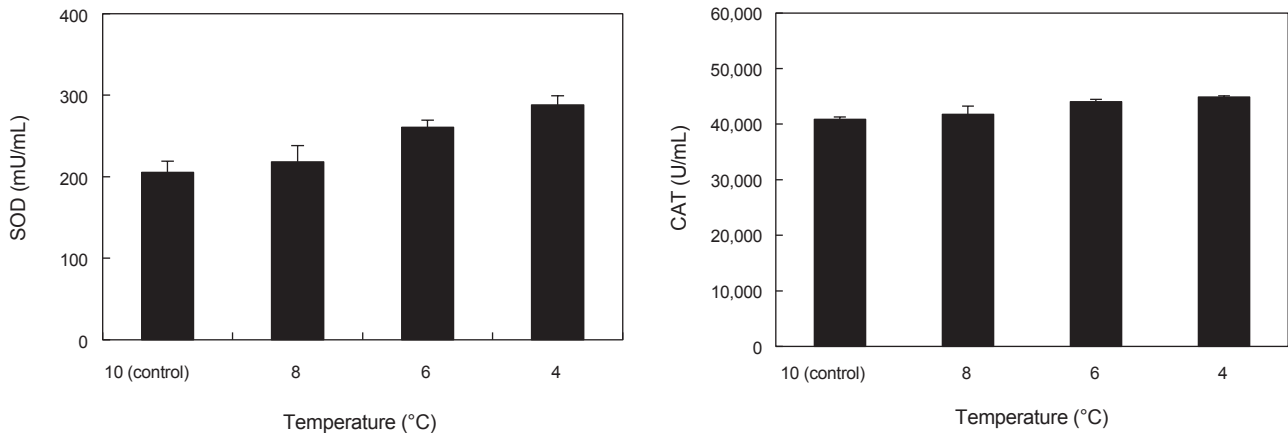


Fig. 3. Changes in the enzymatic activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) in blood of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* exposed to different experimental temperature.

## 결 과

### 수온 하강에 따른 생존율

수온하강이 돌돔의 생존에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 실험어를 대조구 수온 10°C에서 2주간 순치시킨 후 실험 수온 8, 6, 4 및 2°C에 급성으로 노출시킨 생존율 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 수온 2°C의 경우에는 노출 후 2시간째 모두 폐사하였으며, 수온 4°C에서는 노출 10시간째부터 어체가 뒤집히기 시작하여 노출 18시간째 모두 폐사하였다. 수온 6°C에서는 노출 2일째 생존율 30%, 노출 4일째 5% 생존하였다. 반면 수온 8°C에서는 노출 4일째 95%, 수온 10°C에서는 실험기간 동안 폐사 개체는 관찰되지 않았다. 각 실험수온에 노출시킨 4일 동안 돌돔의 저수온에 대한 반수치사 수온(LT<sub>50</sub>)은 6.99°C (6.55-7.42°C)였다.

### 수온하강에 따른 산소소비율 변화

수온하강에 따른 돌돔 대사율의 변화를 파악하기 위하여 수온 14, 12, 10, 8, 6±0.5°C에 4일 동안 노출 시킨 후 산소소비율을 측정하였다(Fig. 2). 산소소비율은 수온 14°C에서 115.1±14.8 mgO<sub>2</sub>/kg/h였으며, 10°C에서 70.6±3.9 mgO<sub>2</sub>/kg/h, 수온 8°C에서는 53.5±5.2 mgO<sub>2</sub>/kg/h으로 수온 하강에 따라 유의하게 감소(P<0.05)하였다. 반면 수온 6°C에서는 64.5±8.1 mgO<sub>2</sub>/kg/h으로 8°C에 비해 다소 증가하는 양상을 보였다(Fig. 2).

### 수온 하강에 따른 스트레스 반응

수온 하강에 따른 돌돔의 스트레스 반응을 알아보기 위하여, 수온 10°C, 8°C 및 6°C의 경우, 각 실험수온에 4일간 노출 시킨 후 생존한 개체를 대상으로 혈액 내 SOD, CAT, total Ig, cortisol, glucose, malonaldehyde (MDA), AST, ALT 및 osmolality의 변화를 분석하였다. 그러나 4°C의 시험구는 노출 18시

간 이내 폐사하는 점을 감안하여 폐사하기 전 실험어가 뒤집혔을 때 혈액 채취 후 스트레스반응을 분석하여 수온 10°C, 8°C, 6°C의 시험구 결과와 비교하였다. 돌돔의 혈액내 활성산소 제거효소인 SOD활성도는 수온 4°C에서 가장 높게 나타났으며, 대조구 10°C에 비해 수온이 하강할수록 유의하게 증가하는 경향을 보였다(P<0.05). CAT농도는 수온 4°C와 6°C간에 유사하였으나, 대조구 10°C와 비교하여 유의하게 높은 것으로 나타났다(P<0.05) (Fig. 3). Fig. 4는 수온 하강에 따른 돌돔의 혈중 total Ig, cortisol, glucose, malondialdehyde (MDA), AST, ALT에 대한 스트레스 반응을 나타낸 것이다. 수온하강에 따른 혈중 total Ig 농도는 대조구 10°C에서 1.4±0.3 µg/µL으로 가장 높게 나타났으며, 수온이 하강함에 따라 유의하게 감소하는 경향을 보였고(P<0.05), 수온 4°C에서 0.8±0.5 µg/µL으로 가장 낮은 값을 나타내었다(Fig 4). 반면, cortisol은 total Ig와는 다른 경향을 보였으며, 수온 4°C에서 가장 높은 농도 2.005 ng/mL를 나타내었고, 수온 하강에 따라 증가하였으며 8°C 이하로 하강할수록 수온 간 유의한 차이를 나타내었다(P<0.05) (Fig. 4). Glucose 농도는 4°C에서 가장 높게 나타났으며, 대조구에 비해 수온이 하강할수록 증가하는 경향을 보여 cortisol 농도의 결과와 유사한 경향을 보였다. 또한 수온하강에 따른 혈중 MDA 농도 변화를 관찰한 결과, 4°C에서 가장 높은 농도인 1.593 µM를 나타내었으며, 6°C 이상의 수온에서는 유의한 차이를 보이지 않았다. 혈중 ALT와 AST는 수온 4°C에서 가장 높은 농도를 나타내었으며, 대조구에서 수온 하강에 따라 유의하게 증가하였다(Fig. 4). 한편 혈액내 삼투질농도는 대조구와 수온 8°C와 유의한 차이를 나타내지 않았으나(P>0.05), 수온 6°C 노출구에서 가장 높았으며, 4°C에서는 감소하는 경향을 보였다(Fig. 5).

## 고 찰

돌돔은 한국의 제주도를 중심으로 남해안 압초지대에 주로

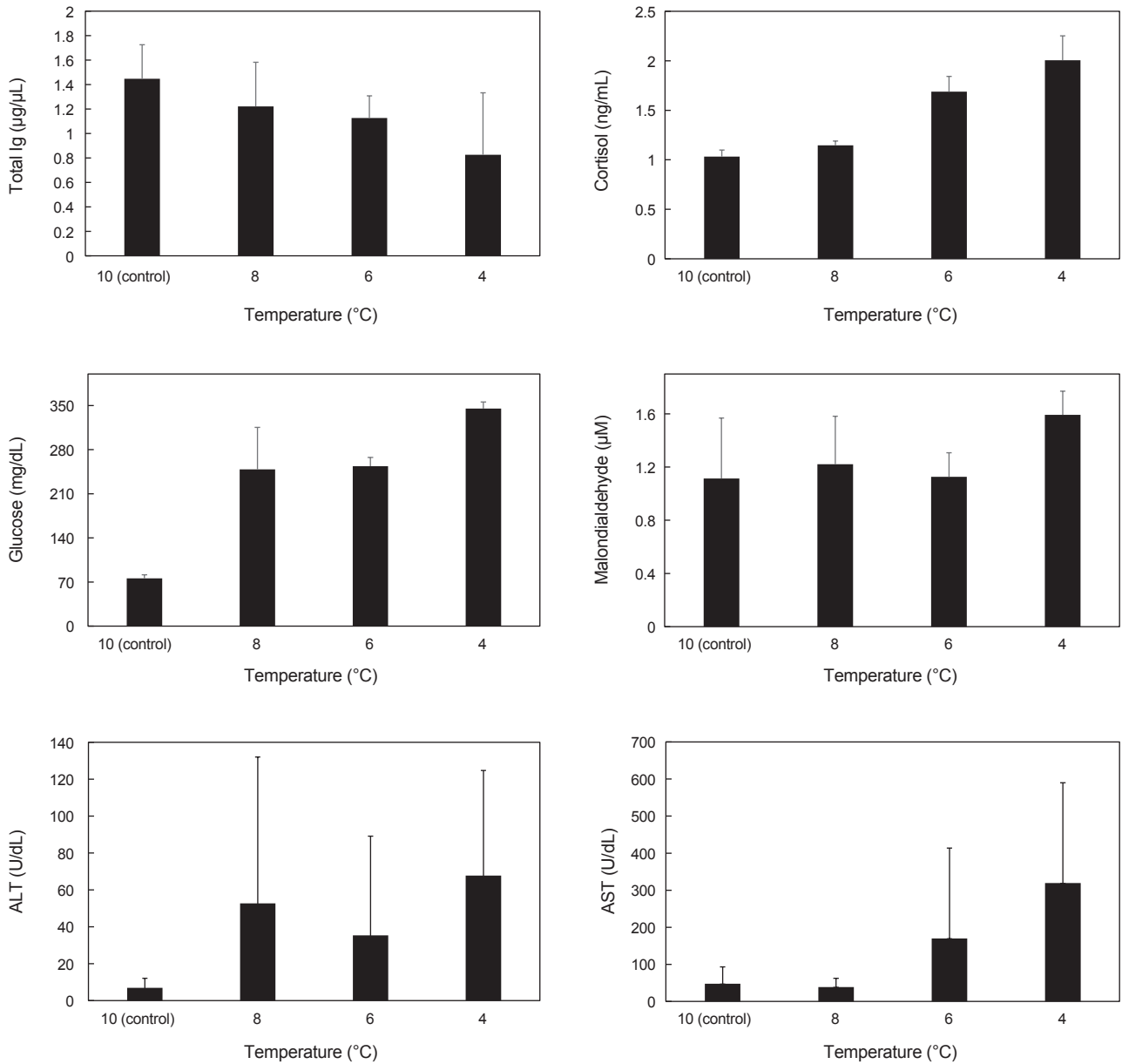


Fig. 4. Changes in total Ig, total cortisol, glucose, malondialdehyde, ALT and AST in blood of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* exposed to different experimental temperature. ALT, Alanine aminoreansferase ; AST, Aspartate transaminonase.

서식하는 온대성 고급어종으로, 성어기 사육을 위한 적정수온은  $25^{\circ}\text{C}$  내외이다(Kim et al., 2008)이다. 한국에서 돌돔양식은 1987년부터 종묘생산 기술개발을 시작으로 1993년도에 대량생산 체제가 구축되었으며, 주로 통영지역을 중심으로 해상 가두리에서 양식되고 있으나 양성과정에서 겨울철 수온 하강기에 종종 대량폐사가 발생하고 있다. 어류양식장에서 수온은 어류의 성장과 생산력에 영향을 미치는 결정적인 역할을 하며 (Beitinger et al., 2000; Pörtner and Peck, 2010), 어류의 수온 내성 범위는 어류가 생리적으로 기능할 수 있는 수온의 범위를

의미하므로 이들의 생리적 범위 내에서 어류가 선호(Perez et al., 2003) 또는 적절한 수온(Huey and Stevenson, 1979)이 있다고 알려져 있다.

본 연구는 겨울철 저수온으로 인한 돌돔의 폐사를 줄이기 위해 월동가능한 수온의 범위와 저수온노출시 나타나는 생리적 반응을 알아보기 위해 수행되었다. 온대성 양식어종의 저수온에 대한 반수치사수온은 Table 1에 요약한 것과 같이 농어목도미과에 속하는 참돔의 반수치사 수온은  $6.54^{\circ}\text{C}$  ( $6.31\text{--}6.76^{\circ}\text{C}$ )였으며(Shin et al., 2018), 감성돔의 경우 생존가능한 수온은



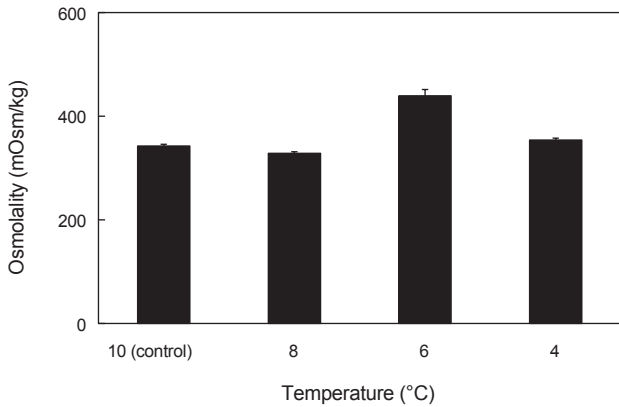


Fig. 5. Changes in Osmolality in blood of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* exposed to different experimental temperature.

3.5°C이상으로 보고(MERI, 2000)되고 있다. 또한 복어목 쥐치과에 속하는 쥐치는 5.8-8.1°C (MERI, 2000), 말쥐치는 6.97°C (6.69-7.27°C)으로 보고(Kim et al., 2019)되고 있다. 이러한 결과는 본 연구의 농어목 돌돔과에 속하는 돌돔의 반수치사저수온 6.99°C (6.55-7.42°C)와 유사하게 나타나고 있으며, 이는 겨울철 7°C 이하 수온이 지속될 때 폐사가 발생할 수 있는 수온으로 분석된다. 그러나 폐사를 일으키는 수온은 어류의 순치 수온에 따라 다소 변할 수 있고(Reyes et al., 2011), 어류의 폐사는 생존에 필요한 생리적 과정을 순치수온에 최적화시키지 못하고, 어류의 내적 체온 조절에 실패했을 때 발생한다(Bellgraph et al., 2010; Reyes et al., 2011).

수온 변화는 수서동물의 많은 생리적 과정에 뚜렷한 변화를 나타내며, 생리적 범위내에서 수온증가는 대부분의 대사과정을 가속화한다. 어류의 호흡률은 대사율을 추정하는 도구로 이용되어오고 있으며(Reyes et al., 2011), 대사의 척도가 되는 산소소비율은 동물이 내성을 갖는 모든 범위 내에서 온도가 증가함에 따라 일정한 비율로 증가한다(Hazel and Prosser, 1974). 산소소비율은 체내 항정성 조절 과정과 연결되는 대사작용 및 에너지흐름과 관련되므로(Salvato et al., 2001), 어류의 대사율은 산소소비율 측정으로 추정할 수 있으며, 성장을 위한 적정 수온은 온도계수( $Q_{10}$ )으로 추정할 수 있다(Xiuping et al., 2019). 온도계수( $Q_{10}$ )는 온도에 대한 생물의 민감도를 나타내며, 온도

변화 후 수서생물이 조절할 수 있는 대사능력의 척도이다(Mazumder et al., 2019).

온도계수( $Q_{10}$ )의 감소는 어류의 대사율이 감소하는 것을 의미하며(Diaz et al., 2007), 본 연구에서 돌돔의 수온간  $Q_{10}$  (Table 2)은 14-12°C의 경우 3.38, 12-10°C에서 3.40으로 유의한 차이를 나타내지 않았으나 10-8°C에서는 4.0으로 증가한 후 8-6°C 범위에서 0.39로 가장 낮았다. 이는 6°C이하에서 대사기능이 현저히 감소하면서 생존이 어려워지는 상태인 것으로 추정된다.

어류에서 급성 저수온 스트레스는 세포막의 유동성을 저해하고 조직손상을 유도하며(Qi et al., 2013; Cheng et al., 2017), 활성산소(ROS)를 증가시킬 수 있다(Chandra et al., 2000; Meng et al., 2014; Xu et al., 2018). 본 연구에서 돌돔의 항산화효소 SOD와 CAT는 수온 하강에 따라 증가하였으며, 이는 참돔(Shin et al., 2018)과 말쥐치(Kim et al., 2019) 등 온대성 양식 어류에서 5°C와 6°C 수온에 노출된 후 유의하게 활성 증가가 나타난 것과 유사한 결과를 나타내어 6°C 이하 저수온에서 조직내 ROS 생성이 증가하여 이를 제거하기 위한 방어기작(Paital, 2013)으로 SOD와 CAT가 증가한 것으로 추정된다.

척추동물의 방어 기전중 후천적 면역반응은 항원의 자극에 의해 숙주가 특이적인 면역글로불린(Ig)을 생산한다. 이들 면역글로불린은 병원체를 제거하거나 혈액 또는 기관으로 병원성 인자가 유입되는 것을 막는 기능(Rauta et al., 2012)을 하기때문에 어류의 total Ig은 어류의 체액성 면역 반응을 측정할 수 있는 지표로 이용된다(Rauta et al., 2012). 본 연구에서 돌돔의 total Ig은 수온 하강에 따라 감소하는 경향을 보여 저수온에 대한 민감도가 높은 것으로 나타났다. 코티졸과 글루코스는 매우 중요한 어류의 스트레스반응 지표(Sampaio and Freire, 2016)로 보고되지만, 극지방 어류는 겨울동안 체온유지를 위해 높은 혈당을 나타낸다(Ibarz et al., 2010). 본 연구에서 저수온에 노출된 돌돔의 혈중 코티졸과 글루코스가 유의하게 증가한 점은 온대성 어종이 수온 하강에 순치하기 위한 중요한 생리적 반응으로 여겨진다.

ALT와 AST는 아미노산 대사에 필요한 효소로서 세포막활성에 중요한 지표이다(Cheng et al., 2017). 또한 저수온 노출은 간에 영향을 주는 스트레스요인으로 ALT와 AST효소활성의 증가를 유도하며(Cheng et al., 2017; Sun et al., 2019), 쯧산의 축

Table 1. The lower temperature range of temperature about cultured fishes

Species	Lower temperature range (°C)	References
<i>Oplegnathus fasciatus</i>	middle size	6.99 (6.55-7.42)
	Juvenile	4.9-8.1
<i>Pagrus major</i>	6.54°C (6.31-6.76°C)	Shin et al., 2018
<i>Acanthopagrus schlegelii</i>	>3.5°C	MERI, 2000
<i>Stephanolepis cirrifer</i>	5.8-8.1	MERI, 2000
<i>Thamnaconus modestus</i>	6.97°C (6.69- 7.27°C)	Kim et al., 2019

Table 2. Temperature coefficient ( $Q_{10}$ ) of parrotfish *Oplegnathus fasciatus* with decreasing water temperature

Temperature range (°C)	Temperature coefficient ( $Q_{10}$ )
14-12	3.38
12-10	3.40
10-8	4.00
8-6	0.39

적, 이온 불균형과 에너지소비 등의 생리적 스트레스를 유발시키며, 행동장애를 보임에 따라 결국 저수온에 기인한 스트레스로 인해 폐사를 유도할 수 있다(Donaldson et al., 2008). 돌돔은 6°C 저수온 노출에서 ALT와 AST가 현저하게 증가하는 양상을 보였다. 저수온 노출에 대한 유사한 결과는 hybrid grouper (Xiuping et al., 2019)에서도 나타나고 있으며, sea bream은 저수온기 동안 근육과 간조직의 글리코겐을 이용하여 혐기성대사로 유도되며, 혈액내 젖산이 축적된다(Samaras et al., 2016). 본 연구에서 돌돔은 수온 6°C에서 삼투질 농도가 가장 높았으나, 말쥐치(Kim et al., 2019)에서 저수온간에 유의한 차이를 보이지 않았으며, 참돔 *Pargus major* (Shin et al., 2018)과 *Alosa pseudoharengus* (Stanley and Colby, 1971)에서는 수온 하강에 따라 증가하는 이온불균형을 나타내었다.

어류와 같은 변온동물에서 체온조절을 위한 행동반응은 생존을 좌우하는 매우 중요한 생리적 반응이며(Crawshaw, 1977), 대부분의 어류는 주로 행동으로 체온을 조절한다고 보고되고 있다(Bicego et al., 2007). 특히 저수온 쇼크의 공통적인 반응은 평형이 상실되고 반응이 느리고 유영력이 감소하는데, 평형 상실은 어류가 도망갈 수 없도록 하는 결과를 가져와 결국은 폐사에 이르게 한다(Fuiman and Batty, 1997; Smith and Hubert, 2003). 본 연구에서 수온이 하강함에 따라 돌돔의 유영행동은 둔화되고 움직임이 거의 없이 한쪽으로 몰리는 현상을 보였으며, 6°C 이하 수온에서는 노출시간이 길어짐에 따라 몸의 균형을 잃고 뒤집힌 채 유영하다가 폐사하였으며, 폐사당시에는 지느러미주변과 체표면에 모세혈관 출혈 및 피부괴사 등의 현상이 관찰되었다. 이는 저수온 쇼크에 의해 어류에서 나타나는 공통적인 현상(Fuiman and Batty, 1997; Smith and Hubert, 2003) 저수온에 노출된 말쥐치에서도 유사하게 관찰되었다(Kim et al., 2019).

따라서 본 연구의 결과를 종합해보면 겨울철 수온 하강에 따른 돌돔의 하한내성수온은 6.99°C (6.55-7.42°C)이었으며, 8°C 이하에서 산소소비율이 감소하여 온도계수( $Q_{10}$ )는 수온 10-8°C간에 4.0, 8-6°C간에 0.39로 수온 6°C이하에서 생존에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 수온 하강에 의한 스트레스 반응 결과 하한내성수온범위 이하에서 면역글로블린의 농도가 감소하고 스트레스 지표로 이용되고 있는 SOD, glucose, cortisol의 농도가 증가하는 현상 등으로 미루어볼 때 온대성 양식 어종인 돌돔 양성에서 하한내성수온의 범위를 벗어날 경우 저

수온에 의한 치명적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각 된다.

## 사 사

본 연구는 2020년도 국립수산물과학원 수산과학연구소(R2020010)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Bellgraph BJ, McMichael GA, Mueller RP and Monroe JL. 2010. Behavioural response of juvenile Chinook salmon *Oncorhynchus tshawytscha* during sudden temperature increase and implications for survivor. *J Therm Biol* 35, 6-10. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2009.10.001>.
- Beitinger TL and Bennet WA. 2000. Quantification of the role of acclimation temperature in temperature tolerance of fishes. *Environ Biol Fishes* 58, 277-288.
- Bicego KC, Barros RCH and Branco LGS. 2007. Physiology of temperature regulation: comparative aspects. *Comp Biochem Physiol A* 147, 616-639. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.06.032>.
- Burton T, Killen SS, Armstrong JD and Metcalfe NB. 2011. What causes intraspecific variation in resting metabolic rate and what are its ecological consequence?. *Proc R Soc* 278, 3465-3473. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.1778>.
- Carvalho P and Phan V. 1997. Oxygen consumption and ammonia excretion of *Xiphopenaeus kroyeri* Heller (Penaeidae) in relation to mass temperature and experimental procedures shrimp oxygen uptake and ammonia excretion. *J Exp Mar Biol Ecol* 209, 143-156. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(96\)02703-7](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(96)02703-7).
- Chandra J, Samali A and Orrenius S. 2000. Triggering and modulation of apoptosis by oxidative stress. *Free Radic Biol Med* 3, 323-333. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(00\)00302-6](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(00)00302-6).
- Cheng CH, Ye CX, Guo ZX and Wang AL. 2017. Immune and physiological responses of pufferfish *Takifugu obscurus* under cold stress. *Fish Shellfish Immunol* 64, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.03.003>.
- Cho HC, Kim JE, Kim HB and Beak HJ. 2015. Effects of water temperature change on the hematological responses and plasma cortisol levels in growing of red spotted grouper, *Epinephelus akaara*. *Dev Reprod* 19, 19-24. <https://doi.org/10.12717/devrep.2015.19.1.019>.
- Crawshaw LI. 1977. Physiological and behavioral reactions of fish to temperature change. *J Fish Res Board Can* 34, 730-734. <https://doi.org/10.1139/f77-113>.
- Cooper CJ, Mueller C and Eme J. 2019. Temperature tolerance and oxygen consumption of two South American tetras, *Paracheirodon innessi* and *Hyphessobrycon herbertaxelrodi*. *J Therm Biol* 86, 1024-1034. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.102434>.

- Díaz, F, Re A, González R, Sánchez L, Leyva G and Valenzuela F. 2007. Temperature preference and oxygen consumption of the largemouth bass *Micropterus salmoides* (Lacépède) acclimated to different temperature. *Aqua Res* 38, 1387-1394. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01817.x>.
- Donaldson MR, Cooke SJ, Patterson DA and Macdonald JS. 2008. Cold shock and fish. *J Fish Biol* 73, 1491-1530. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.02061.x>.
- Fazio F, Filiciotto F, Marafioti S, Di Stefano V, Assenza A, Placenti F and Mazzola SM. 2013. Automatic analysis to assess haematological parameters in farmed gilthead sea bream (*Sparus aurata* Linnaeus, 1758). *Mar Freshw Behav Phys* 45, 63-73. <https://doi.org/10.1080/10236244.2012.677559>.
- Ferguson RMW, Merrifield DL, Harper GM, Rawling MD, Mustafa S, Picchiatti S and Davies SJ. 2010. The effect of *Pediococcus acidilactici* on the gut microbiota and immune status of on-growing red tilapia *Oreochromis niloticus*. *J App Microbiol* 109, 851-862. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04713.x>.
- Finney DJ. 1971. Probit analysis. 3rd. Cambridge University Press, London, U.K., 333.
- Fuiman LA and Batty RS. 1997. What a drag is getting cold: Partitioning the physical and physiological effects of temperature on fish swimming. *J Exp Bio* 200, 1745-1755.
- Kim HJ, Lee HJ, Kim WJ and Shin YK. 2019. Survival, hematological and histological changes of file fish *Thamnaconus modestus* adult exposed to different lower temperature. *Korean J Ichthyol* 31, 201-207. <https://doi.org/10.35399/ISK.31.4.3>.
- Kim KM, Lee JU, Moon TS, Lee CH, Yang MH, Kang YJ and Jo JY. 2008. Optimum feeding rate of parrot fish *Oplegnathus fasciatus* during the low temperature season. *J Aquaculture* 21, 299-303.
- Kir M and Demirci Ö. 2018. Thermal tolerance and standard metabolic rate of juvenile European sea bass (*Dicentrarchus labrax*, Linnaeus, 1758) acclimated to four temperatures. *J Thermal Biol* 78, 209-213. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.10.008>.
- Kunz KI, Frickenhaus S, Hardenberg S, Johansen T, Leo E, Pörtner HO and Mark FC. 2016. New encounters in Arctic water a comparison of metabolism and performance of polar cod *Boreogadus saida* and Atlantic cod *Gadus morhua* under ocean acidification and warming. *Polar Biol* 39, 1137-1153.
- Hazel JR and Prosser CL. 1974. Molecular mechanisms of temperature compensation on poikilotherms. *Ohysiol Rev* 54, 620-677. <https://doi.org/10.1152/physrev.1974.54.3.620>.
- Huey RB and Stevenson RD. 1979. Integrating thermal physiology and ecology of ectotherms: a discussion of approaches. *Am Zool* 19, 357-366. <https://doi.org/10.1093/icb/19.1.357>.
- Ibarz A, Padros F, Gallardo MA, Fernandez-Borras J, Blasco J and Tort L. 2010. Low temperature challenges to gilthead sea bream culture: review of cold-induced alterations and 'Winter Syndrome'. *Rev Fish Biol Fisher* 20, 539-556. <https://doi.org/10.1007/s11160-010-9159-5>.
- Meng X, Liu P, Li J, Gao B and Chen P. 2014. Physiological responses of swimming crab *Portunus tribusterculatus* under cold acclimation: Antioxidant defense and heat shock proteins. *Aquaculture* 434, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.07.021>.
- MERI (Marine Ecology Research Institute). 2000. Report of marine ecology research institute. *Rep Mar Ecol Res Inst* 2, 54-66.
- Paital B. 2013. Antioxidant and oxidative stress parameters in brain of *Heteropneustes fossilis* under air exposure condition; role of mitochondrial electron transport chain. *Eco-toxicol Environ Saf* 95, 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.05.016>.
- Perez E, Diaz F and Espina S. 2003. Themoregulatory behavior and critical thermal limits of the angelfish *Pterophyllum scalare* (Lichtenstein) (Pisces: Cichlidae). *J Therm Biol* 28, 531-537. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(03\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(03)00055-X).
- Pörtner HO and Peck MA. 2010. Climate change effects on fishes and fisheries: towards a cause-and-effect understanding. *J Fish Biol* 77, 1745-1779. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02783.x>.
- Qi Z, Liu Y, Luo S, Chen C, Liu Y and Wang W. 2013. Molecular cloning, characterization and expression analysis of tumor suppressor protein p53 from orange-spotted grouper, *Epinephelus coioides* in response to temperature stress. *Fish Shellfish Immun* 35, 1466-1476. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2013.08.011>.
- Rauta PR, Nayak B and Das S. 2012. Immune system and immune responses in fish and their role in comparative immunity study: A model for higher organisms. *Immunol Lett* 148, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.imlet.2012.08.003>.
- Reyes I, Díaz F, Denise A and Pérez J. 2011. Behavioral thermoregulation, temperature tolerance and oxygen consumption in the Mexican bullseye puffer fish *Sphoeroides annulatus* Jenyns (1842), acclimated to different temperatures. *J Thermal Biol* 36, 200-205. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2011.03.003>.
- Mazumder SK, Ghaffar MA, Tomiyama T and Das SK. 2019. Effects of acclimation temperature on the respiration physiology and thermal coefficient of Malabar blood snapper. *Res Physiol Neurobiol* 268, 103-113. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2019.103253>.
- Salvato B, Cuomo V, Di Muro R and Beltrami M. 2001. Effects of environmental parameters on the oxygen consumption of four marine invertebrates: a comparative factorial study. *Mar Biol* 138, 659-668.
- Samaras A, Papandroulakis N, Costari M and Pavlidis M. 2016. Stress and metabolic indicators in a relatively high (European sea bass, *Dicentrarchus labrax*) and a low (meagre,

- Argyrosomus regius*) cortisol responsive species, in different water temperatures. *Aquacul Res* 47, 3501-3515. <https://doi.org/10.1111/are.12800>.
- Sampaio FDF and Freire CA. 2016. An overview of stress physiology of fish transport: changes in water quality as a function of transport duration. *Fish Physiol* 17, 1055-1072. <https://doi.org/10.1111/faf.12158>.
- Schmidt-Nielsen K. 1997. *Animal physiology: Adaptation and Environment*. Cambridge University Press, London U. K., 359.
- Shin YK, Kim YD and Kim WJ. 2018. Survival and physiological responses of red sea bream *Pagrus major* with decreasing sea water temperature. *Korean J Ichthyol* 30, 131-136. <https://doi.org/10.35399/ISK.30.3.1>.
- Smith MA and Hubert WA. 2003. Simulated thermal tempering versus sudden temperature change and short-term survival of fingerling rainbow trout. *N Am J Aquac* 65, 67-69. [https://doi.org/10.1577/1548-8454\(2003\)065<0067:STTVST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8454(2003)065<0067:STTVST>2.0.CO;2).
- Stanley JG and Colby PJ. 1971. Effects of temperature on electrolyte balance and osmoregulation in the alewife *Alosa pseudoharengus* in fresh and sea water. *Trans Am Fish Soc* 100, 624-638. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1971\)100<624:EOTOEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1971)100<624:EOTOEB>2.0.CO;2).
- Sun ZZ, Tan XH, Liu QY, Ye HQ, Zou CY, Xu ML, Zhang YF and Ye CX. 2019. Physiological, immune responses and liver lipid metabolism of orange-spotted grouper *Epinephelus coioides* under cold stress. *Aquaculture* 498, 545-555. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.08.051>.
- Xiuping F, Qin X, Zhang C, Zhu Q and Chen J. 2019. Metabolic and anti-oxidative stress responses to low temperature during the waterless preservation of the hybrid grouper (*Epinephelus fuscogutatus*♀×*Epinephelus lanceolatus*♂). *Aquaculture* 508, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.04.054>.
- Xu ZH, Regenstein JM, Xie DD, Lu WJ, Ren XC, Yuan JJ and Mao LC. 2018. The oxidative stress and antioxidant responses of *Litopenaeus vannamei* to low temperature and air exposure. *Fish Shellfish Immunol* 72, 564-571. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.11.016>.