

수온별 저산소 노출에 따른 조피볼락(*Sebastes schlegeli*)의 혈액성상 변화

지보영 · 도용현* · 민병화 · 박미선 · 황형규 · 명정인 · 조재권

국립수산과학원 양식관리과

Changes of Blood Parameters in Korean rockfish *Sebastes schlegeli* Subjected to Acute Hypoxia at Different Water Temperatures

Bo Young Jee, Yong Hyun Do*, Byung Hwa Min, Mi Seon Park, Hyung Gyu Hwang,
Jeong In Myeong and Jae Kwon Cho

Aquaculture Management Division, National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI),
Busan 46083, Korea

Abstract - The objective of this study was to evaluate the effects of acute hypoxia on the physiological stress responses (plasma cortisol as the primary response, and hematocrit, hemoglobin, plasma glucose, sodium, chloride, osmolality, aspartate aminotransferase (AST) and alanine aminotransferase (ALT) as the secondary responses) of Korean rockfish. The mortality in Korean rockfish started at 0.7 mg L^{-1} and 0.8 mg L^{-1} levels at 12°C and 20°C , respectively. And the time required for the mortality in experimental fish was 274 and 148 minutes at 12°C and 20°C , respectively. Levels of hematocrit, hemoglobin, AST, ALT, ion concentration, osmolality, glucose and cortisol had significantly increased with decreasing dissolved oxygen at 12°C and 20°C .

Key words: Korean rockfish *Sebastes schlegeli*, hypoxia, stress response

서 론

수중생물에 있어 용존산소(dissolved oxygen, DO)는 가장 중요한 환경요소 중 하나이다. 수중환경에 있어서 저산소(hypoxia) 현상에 대한 정의는 많은 연구에서 이루어진바 있으며, 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 수중생물이 생존할 수 없는 DO의 범위로 보통 2.0 mg L^{-1} 또는 그 이하로 나타내었으며(Chesney *et al.* 2000), 두 번째는 DO가 포화수치보다 낮은 상태를 저산소로 나타내었다(Timmerman and

Chapman 2004; Hattink *et al.* 2005).

저산소 현상은 계절적 변동(광주기 및 수온), 염분약층이나 수온약층의 형태로 나타나는 수직층위형성(vertical stratification) 및 조류 소탕 등에 의해 자연적으로도 나타날 수 있지만(Rosenberg *et al.* 1991; Pihl *et al.* 1992), 최근에는 인간 활동에 의해 발생하는 유기물이 자연환경으로 유입되면서 빈번히 발생하고 있다(Dalla via *et al.* 1998; Peckol and Rivers 1995). 우리나라에서도 저산소 수괴형성은 조류 소탕이 원활하지 못하고, 연안이 부영양화되어 수중에 축적된 유기물이 많은 곳에서 여름철 수온이 상승하면서 발생한다고 알려져 있다(NFRDI 2009). 저산소로 인한 심각한 문제는 어류를 비롯한 다양한 수서생물을 대량폐사시킬 수 있다는 것이다(Baden *et al.* 1990). 자연환경에서의 유영생물은 이러한

* Corresponding author: Yong Hyun Do, Tel. 051-720-2432,
Fax. 051-720-2439, E-mail. hyun5719@gmail.com

저산소 수피로부터 도피할 수 있으나, 가두리 및 수하식 양식생물은 자의적 도피가 불가능하므로 저산소 수피 발생 시 피해가 불가피하다.

급격한 저산소 노출에 따른 다양한 생리화학적 변화가 여러 어종에서 밝혀져 있다(Caldwell and Hinshaw 1994; Lays *et al.* 2009; Sun *et al.* 2012). 또한 저산소는 혈중 CO₂, 글루코스, hematocrit (Ht), hemoglobin (Hb)의 상승(Smit and Hattingh 1978)과, 나아가 먹이섭식, 성장, 사료효율의 감소를 초래한다(Chabot and Dutil 1999). 저산소는 양식어류에 있어 뇌, 간, 근육의 에너지 대사에 장애 및 스트레스를 유발함으로써 폐사에 직접적으로 영향을 미친다(Van Raaij *et al.* 1994; Lays *et al.* 2009).

조피볼락(*Sebastes schlegeli*)은 성장적수온이 18~24°C로 알려져 있으며, 우리나라 연안에서 월동이 가능하고 성장속도가 비교적 빨라 중요한 양식대상종 중 하나이며, 또한 본종의 생태적 특성인 정착성 성질을 이용하여 연안 자원 조성을 위해 방류되고 있는 어종이다(Cho *et al.* 1998). 하지만 조피볼락이 주로 양식되고 있는 남해안은 여름철에 고수온, 저산소수피 및 적조 등의 환경적인 문제가 빈번히 발생하고 있으며 대량폐사의 원인이 되고 있다.

본 연구의 목적은 조피볼락을 대상으로 저산소 노출에 따른 스트레스 반응을 조사하여 조피볼락 사육을 위한 생물학적 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험어

본 실험에 사용된 조피볼락은 충청남도 태안군에 소재한 가두리 양식장으로부터 구입하여 국립수산물품질관리원(부산 기장군)의 1톤 유수식 원형 FRP 수조 2개에 각각 45마리(평균 전장 26.9±0.3 cm, 체중 301.1±8.0 g)를 수용한 후 2주간 적응시켰다. 이 기간 동안 수온, 염분 및 용존산소는 각각 12.5±0.3°C, 34.0±0.1 psu, 7.7±0.2 mg L⁻¹였다. 하루에 2회 상업용 배합사료를 공급하였고, 실험 24시간 전부터는 절식하였다.

2. 실험 조건

조피볼락의 저산소 노출실험은 12°C와 20°C에서 실시하였다. 설정 수온은 수온환경조절장치(Aquatron, Yuwon Co., Korea)를 이용하여 유지하였으며, 실험 전 각각의 수온에서 10일간 적응시켰다. 적응기간 동안 유입수량과 에어레이션을 증가시켜 DO를 포화상태로 유지하였다. 저산소 상태는 수

Table 1. Concentration of dissolved oxygen (DO) at each sampling times (percent saturation) in 12°C and 20°C

Water temperature (°C)	DO (%)	DO (mg L ⁻¹)
12	100	8.5
	50	4.2
	30	2.6
	10	0.9
	7.7	0.7
20	100	7.4
	50	3.7
	30	2.2
	10.9	0.8

중에 질소가스(N₂)를 일정하게 주입(1.5 L min⁻¹)하여 DO를 감소시켜 만들었으며, 그 변화를 수질측정기(YSI-556NPS, USA)로 모니터링하였다.

3. 혈액 채취 및 분석

스트레스 반응 조사를 위한 채혈은 DO 농도가 각 수온에서 100, 50, 30, 10% 및 폐사 직전(비정상적인 유영과 자의적인 유영이 불가능한 상태)에 실시하였으며, 채혈 시기의 DO 농도는 Table 1과 같다. 혈액 샘플링 시 수조로부터 8마리의 실험어를 포획하여 즉시 마취(tricaine methan sulphonate, MS-222, Sigma, USA; 150 ppm)시킨 후, heparin sodium 처리된 주사기(3 mL)를 사용하여 실험어의 미부혈관으로부터 혈액을 채취하였으며, 2반복으로 진행하였다. 혈액의 일부는 Ht 및 Hb을 측정에 사용하였으며, 나머지는 원심분리(4°C, 10,000 rpm, 15분)하여 혈장을 분리하여 분석전까지 -80°C의 초저온 냉동고에 보관하였다.

Ht는 혈액을 모세유리관에 넣어 원심분리(10,000 rpm, 10분)하여 Ht 측정판(MICRO-HAEMATOCRIT READER, Hawksley Co, UK)으로, Hb은 자동생화학분석기(Fuji dry-chem 4000i, Fujifilm Co., Japan)로 측정하였다.

혈장 코티졸은 cortisol EIA kit(Oxford, USA)를 사용하여 효소면역분석(enzyme immunoassay, EIA)로 측정하였다. 코티졸의 분석 시 Inter-assay coefficients of variation (CV) 및 Intra-assay CV는 각각 9.8% 및 4.5%이었다. 혈장의 글루코스 및 aspartate aminotransferase (AST), alanine aminotransferase (ALT), Na⁺, K⁺ 및 Cl⁻은 자동생화학분석기, 삼투질 농도는 삼투압측정기(Vapro 5520, WESCOR Co., USA)로 측정하였다.

4. 통계분석

실험 결과의 자료값은 평균±표준오차로 나타내었으며, SPSS 통계프로그램(ver. 18.0)을 사용하여 one way-ANOVA

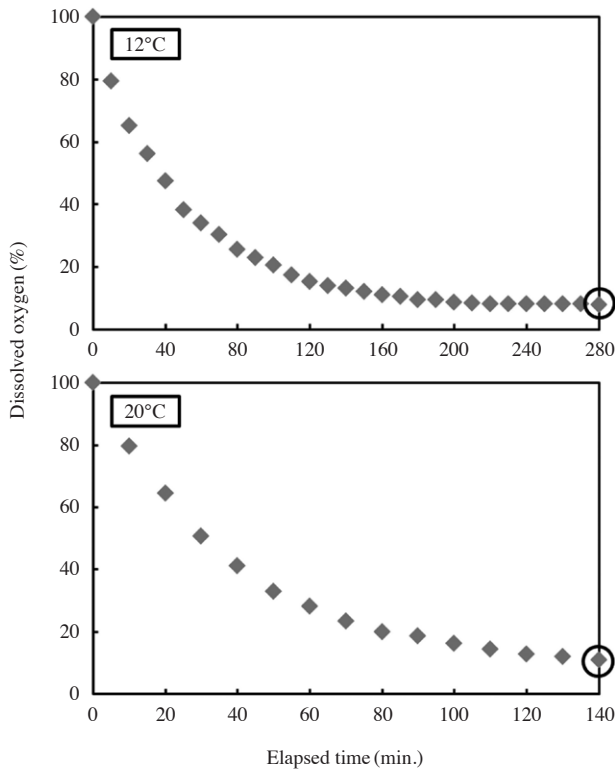


Fig. 1. Profile of dissolved oxygen (%) of hypoxia treatment at 12°C (up) and 20°C (down) on Korean rockfish *Sebastes schlegeli*. ○: the point of starting mortalities {up: 0.7 mg L⁻¹ (7.7%), down: 0.8 mg L⁻¹ (10.9%)}

및 Duncan’s multiple range test로 유의성을 검정하였다 ($P < 0.05$).

결 과

1. 폐사 산소 농도

조피볼락의 폐사가 처음으로 발생하기 시작한 DO 농도는 12°C와 20°C에서 각각 0.7 mg L⁻¹, 0.8 mg L⁻¹로 비슷하였으며, 소요시간은 각각 274분, 148분으로 나타났다(Fig. 1).

2. 코티졸 및 글루코스

코티졸은 12°C에서 DO 농도가 100%일 때 29.4 ± 12.1 ng mL⁻¹이었던 것이, 폐사 직전에 146.3 ± 16.0 ng mL⁻¹로 약 5배 증가하였다. 20°C에서도 100%일 때 39.5 ± 8.0 ng mL⁻¹로 나타났으나, 폐사 직전에 93.0 ± 13.3 ng mL⁻¹로 약 2배 증가하였다(Fig. 2).

글루코스 수치는 12°C에서 DO 농도가 100%일 때 113.9 ±

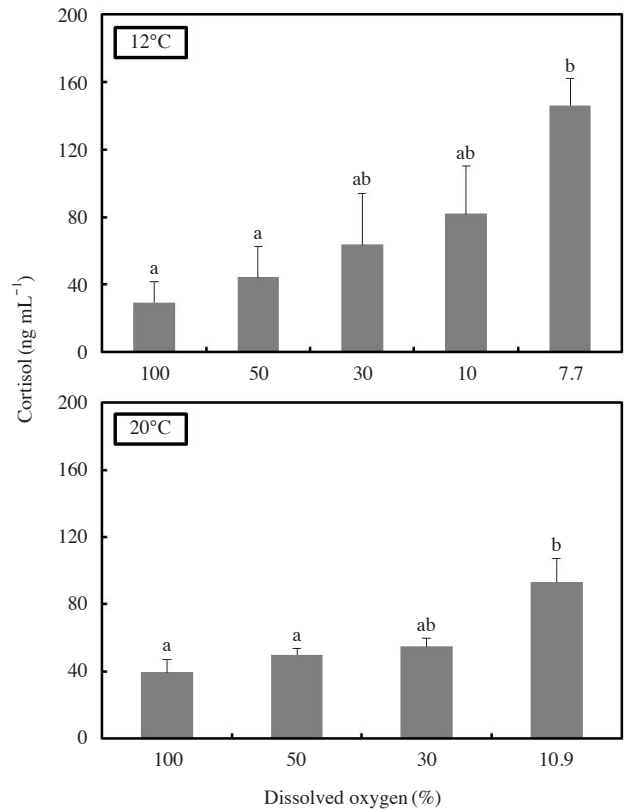


Fig. 2. Levels of cortisol in Korean rockfish *Sebastes schlegeli* on decreasing dissolved oxygen at 12°C and 20°C. Values are mean ± S.E. Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

17.6 mg dL⁻¹에서 10%일 때 195.9 ± 27.5 mg dL⁻¹, 폐사 직전에 309.9 ± 14.6 mg dL⁻¹로 유의하게 증가하였다. 20°C에서도 100%일 때 93.3 ± 20.4 mg dL⁻¹에서 50%일 때 123.5 ± 24.2 mg dL⁻¹, 폐사 직전에 259.4 ± 20.9 mg dL⁻¹로 증가하였다(Fig. 3).

3. Ht 및 Hb

12°C에서 Ht는 DO의 농도가 100%일 때 30.7 ± 1.0%에서 30%일 때 35.9 ± 1.1%, 폐사 직전에 44.2 ± 1.0%로 증가하였다. Hb도 DO 농도 100%일 때 8.4 ± 0.4 g dL⁻¹에서 10%일 때 9.9 ± 0.4 g dL⁻¹로 유의하게 증가하여 폐사 직전에는 10.8 ± 0.3 g dL⁻¹로 나타났다. 20°C에서도 Ht와 Hb는 DO 농도가 감소할수록 증가하는 경향을 보였다(Table 2).

4. AST 및 ALT

12°C에서 AST 수치는 DO의 농도가 100%일 때 10.0 ± 1.1 U L⁻¹에서 10%와 폐사 직전에 각각 22.3 ± 5.1 U L⁻¹와

26.1±5.5 U L⁻¹로 증가하였다. ALT 수치도 100%일 때 4.3±0.2 U L⁻¹로 나타났으나, 10%와 폐사 직전에 각각 6.0±0.8 U L⁻¹와 6.4±0.5 U L⁻¹로 증가하였다. 20°C에서 AST 수치는 DO의 농도가 100%일 때 14.5±3.4 U L⁻¹로 나타났으나 폐사 직전에 8.4±0.9 U L⁻¹로 증가하였으며, ALT 수치도 폐사 직전에 8.4±0.9 U L⁻¹로 증가하였다(Table 2).

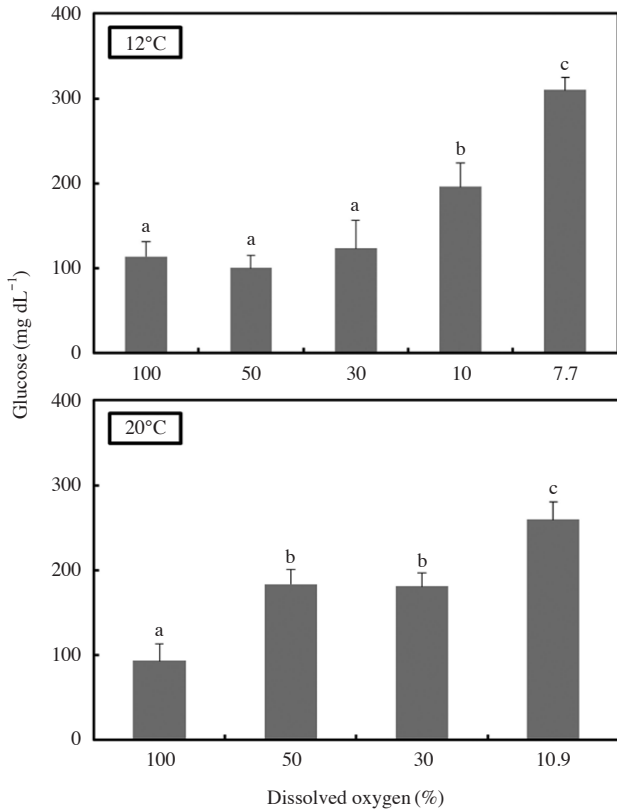


Fig. 3. Levels of glucose in Korean rockfish *Sebastes schlegeli* on decreasing dissolved oxygen at 12°C and 20°C. Values are mean ± S.E. Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

5. 이온 및 삼투질 농도

Na⁺ 농도는 12°C에서 DO 농도가 100%일 때 164.1±1.2 mmol L⁻¹로 나타났으며, 폐사 직전에 171.7±0.9 mmol L⁻¹로 폐사 직전에 증가하는 경향을 나타내었다. 20°C에서도 100%일 때 166.0±0.6 mmol L⁻¹로 나타났으나, 12°C와 마찬가지로 폐사 직전에 증가하는 경향을 나타내었다. K⁺ 농도는 12°C에서 DO 농도가 100%일 때 1.3±0.1 mmol L⁻¹에서 30% 1.6±0.1 mmol L⁻¹로 증가하기 시작하여 폐사 직전에 1.8±0.1 mmol L⁻¹로 나타났다. 20°C에서는 100%일 때 1.8±0.1 mmol L⁻¹에서 10%와 폐사 직전에 각각 2.3±0.1 mmol L⁻¹와 2.5±0.1 mmol L⁻¹로 증가하였다. Cl⁻ 농도는 12°C에서 DO 농도가 100%일 때 145.7±1.6 mmol L⁻¹에서 30% 151.6±1.7 mmol L⁻¹로 증가하였으며, 20°C에서는 폐사 직전에 증가하였다. 삼투질 농도는 12°C에서 DO 농도가 100%일 때 349.4±2.8 mOsm kg⁻¹로 나타났으나 10%와 폐사 직전에 각각 353.6±2.8 mOsm kg⁻¹과 378.3±1.9 mOsm kg⁻¹로 증가하였다. 20°C에서도 100%일 때 337.8±3.1 mOsm kg⁻¹로 나타났으나, 10%와 폐사 직전에 증가하였다(Table 3).

고 찰

수중에 녹아 있는 DO는 수중동물의 호흡에 필요한 중요 요인으로, 수중동물의 생리·생태학적 조건에 큰 영향을 미친다(Do *et al.* 2014). 또한 DO 농도가 낮은 저산소 조건에서 어체의 생리·생화학적 적응과 관련된 연구들이 보고된 바도 있다(Pollock *et al.* 2007; Min *et al.* 2013). 이러한 DO는 포화산소량과 관련하여 수온의 영향을 많이 받고 있으며, 본 연구에서도 12°C와 20°C의 폐사가 발생하기 시작하는 시간이 차이를 나타내었다. 이것은 어체가 스트레스 환경에서 항상성을 유지하는 데 있어서 수온이 영향을 미치는 것

Table 2. Levels of hematocrit (Ht), hemoglobin (Hb), aspartate aminotransferase (AST) and alanine aminotransferase (ALT) in Korean rockfish *Sebastes schlegeli* on decreasing dissolved oxygen (DO) at 12°C and 20°C

WT (°C)	DO (%)	Ht (%)	Hb (g dL ⁻¹)	AST (U L ⁻¹)	ALT (U L ⁻¹)
12	100	30.7±1.0 ^a	8.4±0.4 ^a	10.0±1.1 ^a	4.3±0.2 ^a
	50	33.1±2.1 ^{ab}	9.3±0.7 ^{ab}	15.8±4.3 ^{ab}	5.0±0.4 ^{ab}
	30	35.9±1.1 ^b	9.6±0.3 ^{abc}	10.5±2.1 ^a	4.6±0.4 ^{ab}
	10	39.9±1.4 ^c	9.9±0.4 ^{bc}	22.3±5.1 ^b	6.0±0.8 ^{bc}
	7.7	44.2±1.0 ^d	10.8±0.3 ^c	26.1±5.5 ^b	6.4±0.5 ^c
20	100	30.1±1.1 ^a	8.2±0.3 ^a	14.5±3.4 ^a	5.4±0.5 ^a
	50	34.4±0.9 ^b	9.4±0.3 ^b	17.6±6.6 ^{ab}	3.1±0.5 ^a
	30	37.8±1.1 ^c	9.4±0.4 ^b	13.3±1.8 ^a	3.0±0.5 ^a
	10.9	42.0±1.0 ^d	10.3±0.4 ^b	28.3±3.6 ^b	8.4±0.9 ^b

WT: water temperature. Values are mean ± S.E. Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

Table 3. Plasma Na⁺, K⁺, Cl⁻ and osmolality levels of Korean rockfish *Sebastes schlegeli* on decreasing dissolved oxygen (DO) at 12°C and 20°C

WT (°C)	DO (%)	Na ⁺ (mmol L ⁻¹)	K ⁺ (mmol L ⁻¹)	Cl ⁻ (mmol L ⁻¹)	Osmolality (mOsm kg ⁻¹)
12	100	164.1 ± 1.2 ^a	1.3 ± 0.1 ^a	145.7 ± 1.6 ^a	349.4 ± 2.8 ^{ab}
	50	162.8 ± 2.0 ^a	1.4 ± 0.2 ^{ab}	143.0 ± 2.5 ^a	346.2 ± 1.5 ^{ab}
	30	166.0 ± 1.6 ^{ab}	1.6 ± 0.1 ^{bc}	151.3 ± 1.3 ^b	339.4 ± 2.4 ^a
	10	168.3 ± 1.8 ^{ab}	1.7 ± 0.1 ^{bc}	153.6 ± 1.7 ^b	353.6 ± 2.8 ^b
	7.7	171.7 ± 0.9 ^b	1.8 ± 0.1 ^c	152.6 ± 1.7 ^b	378.3 ± 1.9 ^c
20	100	166.1 ± 0.6 ^a	1.8 ± 0.1 ^a	150.5 ± 1.0 ^{ab}	337.8 ± 3.1 ^a
	50	165.1 ± 1.6 ^a	2.0 ± 0.2 ^{ab}	146.4 ± 1.6 ^a	343.8 ± 1.8 ^{ab}
	30	168.5 ± 1.4 ^a	2.3 ± 0.1 ^{bc}	154.1 ± 1.8 ^{bc}	349.1 ± 2.0 ^b
	10.9	175.9 ± 2.3 ^b	2.5 ± 0.1 ^c	158.7 ± 2.2 ^c	380.8 ± 3.4 ^c

WT: water temperature. Values are mean ± S.E. Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

으로 판단할 수 있다. Saint-Paul (1984)에 의하면 tambaqui *Colossoma macropomum*을 저산소 조건에서 계절적인 혈액 성분 변화를 조사한 결과, Hb과 적혈구 수가 수온이 높은 시기에 더 크게 증가했다고 보고하였다. 이것은 높은 수온의 저산소 조건에서 어체가 항상성을 유지하기 위해 더 큰 에너지를 필요로 하는 것으로 판단할 수 있었다.

어류에서 코티졸은 corticosteroid로 스트레스를 받는 동안 혈장의 코티졸 농도가 뚜렷하게 상승하므로, 주로 스트레스 지표로 이용된다(Mommsen *et al.* 1999). 저산소 노출은 스트레스 요인 중 하나로서 이에 따른 어체의 코티졸 상승은 감성돔(*Acanthopagrus schlegeli*), 대서양대구(*Gadus morhua*), spotted wolfish 등의 어종에서 보고되고 있다(Herbert and Steffensen 2005; Lays *et al.* 2009; O'Connor *et al.* 2011; Min *et al.* 2013). 스트레스에 의해 일어나는 혈중 코티졸의 상승은 글루코스 신생합성(gluconeogenesis)을 촉진시켜 글루코스의 혈중 분비를 증가시키며, 본 연구에서도 동일한 현상이 관찰되었다. 이렇게 증가된 글루코스는 스트레스로 인해 증가된 에너지 요구를 충족시켜 항상성을 유지할 수 있도록 한다(Vijayan *et al.* 1997). 저산소 스트레스 요인에 의한 글루코스의 증가는 틸라피아(*Oreochromis niloticus*) (Delaney and Klesius 2004), 시베리안 철갑상어(*Acipenser baeri*) (Maxime *et al.* 1995) 등 여러 어종에서 나타나고 있으며, 본 연구에서도 저산소 노출은 혈장의 글루코스 상승을 유도하였다. 이와 같은 어체의 혈장 코티졸과 글루코스의 동반상승은 스트레스의 일차적 지표로 가장 널리 이용되며, 혈액의 Ht, Hb, AST 및 ALT 등은 이차적 지표로서 어체의 건강도 및 생리 활성을 평가하는 데 이용된다(Davis and Parker 1990). 또한 본 연구에서 12°C에서의 코티졸의 상승폭이 20°C보다 더 높게 나타나는 경향을 보였다. 이 결과는 폐사가 발생하기 시작하는 농도에 도달하기까지의 시간이 12°C가 20°C보다 약 2배 정도 더 소요되어 장시간 스트레스 요인에 노출되었기 때문으로 판단할 수 있다.

Ht 및 Hb과 같은 혈액학적 인자는 스트레스 반응을 나타내지만, 생체의 산소소비능력을 나타내기도 한다(Chang *et al.* 1999). 본 연구에서 12°C와 20°C의 DO를 감소시키면서 Ht와 Hb의 변화를 관찰한 결과 모두 수치가 증가하는 경향을 나타내었다. 저산소에 의한 Ht의 증가는 rock perch *Scorpaena porcus*, sea carp *Diplodus annularis*, jack mackerel *Trachurus mediterraneus* (Silkin and Silkina 2005) 등의 어류에서 보고된 바 있으며, 본 연구의 결과와도 일치하였다. Ht의 증가는 적혈구수의 증가를 비롯하여 적혈구 팽창, 혈장 감소 또는 이러한 요인들의 조합에 따라 나타난다고 하였다(Peterson 1990). 또한 Qureshi *et al.* (1995)에 의하면 저산소에 노출된 *Cyprinion watsoni*의 혈중 Hb 수치가 증가했다고 보고된바 있으며, 본 연구의 결과와 일치하였다. 그리고 저산소에 노출된 어류의 Hb는 산소와의 결합력이 증가한다고 알려져 있다(Wood and Johansen 1972; Randall 1982; Val *et al.* 1995). 본 연구에서도 Ht와 Hb은 12°C 및 20°C의 DO 농도가 낮아질수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 이와 같은 결과는 저산소의 환경 조건에서 어류가 산소 운반능력을 높여 체내 항상성을 유지하기 위한 노력으로 판단할 수 있다.

해산어류와 담수어류 모두에서 이온 및 산-염기 조절작용이 일어나는 주된 기관은 아가미이며(McDonald *et al.* 1982), 아가미 조직에서 일어나는 이온교환을 통해 이러한 조절이 가능하다고 보고된바 있다(Heisler 1986). 어류에 작용하는 스트레스 요인들은 삼투압조절에 혼란을 야기시켜 혈장의 Na⁺, K⁺, Cl⁻ 및 삼투질 농도의 변화를 초래한다고 보고된바 있다(Nolan *et al.* 1999; Choi *et al.* 2007). 어류는 체내에 일정한 염분을 유지함으로써 세포 내외의 이온 경사를 유지하며, 이러한 이유로 끊임없이 삼투압 조절 작용을 하게 된다(Min *et al.* 2013). 하지만 본 연구에서 12°C와 20°C 모두 DO가 감소함에 따라 이온 농도 및 삼투질 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 저산소가 스트레스 요인으로 작용하여 조피볼락의 삼투압 조절 능력에 영향을 미친 것

로 판단할 수 있다.

AST와 ALT는 아민기 전이효소로 척추동물의 간 기능을 나타내는 일반적인 지표가 되며, 어류에서는 수온변화, 저산소, pH, 암모니아, 중금속에 등에 의한 스트레스 반응을 평가하는 데 사용되고 있다(Pan *et al.* 2003). 본 연구에서도 12°C와 20°C 모두 폐사 직전에 AST와 ALT 수치가 상승하는 결과를 나타내었다. 이 결과는 저산소에 의한 스트레스 반응으로 폐사 직전에 간세포의 손상이 나타나 AST와 ALT 수치가 상승한 것으로 판단된다.

저산소는 조피볼락에 스트레스 요인으로 작용하여 스트레스 지표 호르몬인 코티졸의 상승을 유발하였으며, 2차적 반응으로 글루코스, Ht, Hb, 이온, 삼투질 농도, AST, ALT의 상승을 유발한 것으로 판단된다. 또한 높은 수온의 저산소 조건에서 조피볼락의 폐사가 일어나는 시간 및 DO 농도가 더 빠른 것으로 나타났다.

적 요

12°C에서 DO 농도가 0.7 mg L⁻¹일 때 조피볼락의 폐사가 발생하였으며, 소요시간은 274분이었다. 20°C에서는 DO 농도가 0.8 mg L⁻¹일 때 조피볼락의 폐사가 발생하였으며, 소요시간은 148분이었다. DO 농도의 감소는 스트레스 요인으로 작용하여 12°C와 20°C에서 1차적으로 코티졸 및 글루코스 농도를 상승시켰다. 또한 Ht, Hb, AST, ALT, 이온 농도, 삼투질 농도도 12°C와 20°C에서 폐사 직전에 증가하는 경향을 보였다.

사 사

이 논문은 2015년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업(R2015018)의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Baden SP, L Pihl and R Rosenberg. 1990. Effects of oxygen depletion on the ecology, blood physiology and fishery of the Norway lobster *Nephrops norvegicus*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 67:141-155.
- Caldwell CA and J Hinshaw. 1994. Physiological and hematological responses in rainbow trout subjected to supplemental dissolved oxygen in fish culture. Aquaculture 126:183-193.
- Chabot D and JD Dutil. 1999. Reduced growth of Atlantic cod in non-lethal hypoxic condition. J. Fish. Biol. 55:472-491.
- Chang YJ, MR Park, DY Kang and BK Lee. 1999. Physiological responses of cultured olive flounder *Paralichthys olivaceus* on series of lowering seawater temperature sharply and continuously. J. Korean Fish. Soc. 32:601-606.
- Chesney EJ, DM Baltz and RG Thomas. 2000. Louisiana estuarine and coastal fisheries and habitats: Perspectives from a fish's eye view. Ecol. Appl. 10:350-366.
- Cho SH and SB Hur. 1998. Effects of enrichment of rotifers and *Artemia* on larvae mass production of rockfish *Sebastes schlegeli*. J. Aquaculture 11:437-447.
- Choi CY, BH Min, PG Jo and YJ Chang. 2007. Molecular cloning of PEPCK and stress response of black porgy *Acanthopagrus schlegeli* to increased temperature in freshwater and seawater. Gen. Comp. Endocrinol. 152:47-53.
- Dalla Via D, G Van den Thillart, O Cattani and P Cortesi. 1998. Behavioural responses and biochemical correlates in *Solea solea* to gradual hypoxic exposure. Can. J. Zool. 76:2108-2113.
- Davis KB and NC Parker. 1990. Physiological stress in striped bass: Effect of acclimation temperature. Aquaculture 91:349-358.
- Delaney MA and PH Klesius. 2004. Hypoxic conditions induce Hsp70 production in blood, brain and head kidney of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.). Aquaculture 236:633-644.
- Do YH, BH Min, JI Myeong, YJ Jee and YJ Chang. 2014. Effects of water temperature and salinity on blood properties and oxygen consumption in hagfish *Eptatretus burgeri*. J. Fish. Mar. Sci. Edu. 26:214-222.
- Hattink J, G De Boeck and R Blust. 2005. The toxicokinetics of cadmium in carp under normoxic and hypoxic conditions. Aquat. Toxicol. 75:1-15.
- Heisler N. 1986. Acid-base regulation in fishes. In Acid-Base Regulation in Animals (ed. Heisler N), pp. 397-450.
- Herbert N and J Steffensen. 2005. The response of Atlantic cod *Gadus morhua*, to progressive hypoxia: fish swimming speed and physiological stress. Mar. Biol. 147:1403-1412.
- Lays N, MMT Iversen, M Frantzen and EH Jørgensen. 2009. Physiological stress responses in spotted wolffish *Anarhichas minor* subjected to acute disturbance and progressive hypoxia. Aquaculture 295:126-133.
- Maxime V, G Nonnotte, C Peyraud, P Williot and JP Truchot. 1995. Circulatory and respiratory effects of an hypoxic stress in the Siberian sturgeon. Respir. Physiol. 100:203-212.

- McDonald DG, RL Walker, PRH Wilkes and CM Wood. 1982. H⁺ excretion in the marine teleost *Parophrys vetulus*. J. Exp. Biol. 123:123-144.
- Min BH, MS Park, JI Myeong and HG Hwang. 2013. Physiological stress responses in black seabream *Acanthopagrus schlegelii* subjected to acute hypoxia. Kor. J. Fish. Aquat. Sci. 46:819-826.
- Mommsen TP, MM Vijayan and TW Moon. 1999. Cortisol in teleosts: dynamic, mechanisms of action, and metabolic regulation. Rev. Fish. Biol. Fish. 9:211-268.
- NFRDI. 2009. Handbook on Oceanography, Marine Environment and Harmful Marine Organisms. Hexagondesign, Busan, Korea, 108-113.
- Nolan DT, RLJM Op't Veld, PHM Balm and SE Wendelaar Bonga. 1999. Ambient salinity modulates the response of the tilapia *Oreochromis mossambicus* (Peters) to net confinement. Aquaculture 177:297-309.
- O'Connor EA, TG Pottinger and LU Sneddon. 2011. The effects of acute and chronic hypoxia on cortisol, glucose and lactate concentrations in different populations of three-spined stickleback. Fish. Physiol. Biochem. 37:461-469.
- Pan CH, YH Chien and B Hunter. 2003. The resistance to ammonia stress of *Penaeus monodon* Fabricius juvenile fed diets supplemented with astaxanthin. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 297:107-118.
- Peckol P and JS Rivers. 1995. Physiological responses of the opportunistic macroalgae *Cladophora vagabunda* (L) Vandenhoek and *Gracilaria tikvahiae* (Mclachlan) to environmental disturbances associated with eutrophication. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 190:1-16.
- Peterson MS. 1990. Hypoxia-induced physiological changes in two mangrove swamp fishes: sheepshead minnow *Cyprinodon variegatus* lacepede and sailfin molly *Poecilia latipinna*. Comp. Biochem. Physiol. A 97:17-21.
- Pihl L, SP Baden, RJ Diaz and LC Schaffner. 1992. Hypoxia-induced structural changes in the diet of bottom feeding fish and crustacea. Mar. Biol. 112:349-361.
- Pollock MS, LMJ Clarke and MG Dube. 2007. The effects of hypoxia on fishes: from ecological relevance to physiological effect. Environ. Rev. 15:1-14.
- Qureshi IZ, MA Hafeez and SA Shaikh. 1995. Hematological response of the fish, *Cyprinion 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.
- Rosenberg R, B Hellman and B Johansson. 1991. Hypoxic tolerance of marine benthic fauna. Mar. Ecol. Prog. Ser. 79:127-131.
- Silkin YA and EN Silkina. 2005. Effect of hypoxia on physiological-biochemical blood parameters in some marine fish. J. Evolutionary Biochem. Physiol. 41:527-532.
- Smit GL and H Hattingh. 1978. The effect of respiratory stress on carp hemoglobin. Comp. Biochem. Physiol. A 59:369-374.
- Sun H, J Li, L Tang and Z Yang. 2012. Responses of crucian carp *Carassius auratus* to long-term exposure to nitrite and low dissolved oxygen levels. Biochem. Syst. Ecol. 44:224-243.
- Timmerman CM and LJ Chapman. 2004. Behavioral and physiological compensation for chronic hypoxia in the sailfin molly *Poecilia latipinna*. Physiol. Biochem. Zool. 77:601-610.
- Val A, J Lessard and DJ Randall. 1995. Effects of hypoxia on rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* - Intraerythrocytic phosphates. J. Exp. Biol. 198:305-310.
- Van Raaij MTM, E Bakker, MC Nieveen, H Zirkzee and GEEJM van den Thillart. 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 109:755-767.
- Vijayan MM, CE Pereira, G Grau and GK Iwama. 1997. Metabolic responses associated with confinement stress in tilapia: the role of cortisol. Comp. Biochem. Physiol. C 116:89-95.
- Wood SC and K Johansen. 1972. Adaptation to hypoxia by increased HbO₂ affinity and decreased red cell ATP concentration. Nat. New Biol. 237:278-293.

Received: 10 September 2015

Revised: 1 December 2015

Revision accepted: 2 December 2015