

적조발생시기 참돔의 절식과 사육밀도에 따른 성장과 혈액성상

김원진 · 이정용¹ · 신윤경 · 원경미^{2,*}

국립수산과학원 남동해수산연구소, ¹서해수산연구소 양식산업과, ²병리연구과

Growth and Blood Characteristics of Red Sea Bream *Pagrus major* by Starvation and Stocking Density during Red Tide by Won-Jin Kim, Jeong-Yong Lee¹, Yun-Kyung Shin and Kyoung-Mi Won^{2,*} (South East Sea Fisheries Research Institute, NFIS, Tongyoung 53085, Republic of Korea; ¹West Sea Fisheries Research Institute, NFIS, Incheon 22383, Republic of Korea; ²Pathology Research Division, NIFS, Busan 46083, Republic of Korea)

ABSTRACT In order to minimize the damage on the red sea bream *Pagrus major* by a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*, we investigated the effect of feeding, starvation and stocking density on the survival rate, growth, growth restoration and physiological response of *P. major* exposure to *C. polykrikoides*. The experimental groups were divided into three groups such as F-HD (feeding and high density with 6.4 kg/m³), S-HD (starvation and high density with 6.4 kg/m³) and S-LD (starvation and low density with 3.2 kg/m³) according to stocking density and starvation in marine cage (11 m × 11 m × 5 m). The F-HD was fed throughout the experiment for 9 weeks, whereas S-HD and S-LD were not fed for 5 weeks and then refeeding for 4 weeks. Survival rate was the lowest in F-HD (85.5%) and S-LD was the highest (97.3%). The growth rates of S-HD and S-LD were significantly lower than F-HD during starvation period for 4 weeks, but rapidly recovered after feeding. The nutritional status such as ALB, TP, TCH, TG were similar to tendency of growth data. Ht, Hb, AST, ALT and GLU levels were significantly higher in the F-HD than in the starvation groups at the same time (in 3 week) during starvation period. But starvation groups did not differ during starvation period. As a result, F-HD is more sensitive to stress than S-HD and S-LD. Thus, during *C. polykrikoides* bloom period, starvation and stocking density control can help survival and growth restoration of the red sea bream.

Key words: *Cochlodinium polykrikoides*, red tide, starvation, stocking density, refeeding, growth, hematological characteristic, red sea bream

서 론

*Cochlodinium polykrikoides*는 1995년 이후 지속적으로 발생하는 적조의 원인생물로서 어류치사 종으로 보고되고 있다 (Kim *et al.*, 1997). *C. polykrikoides*에 의한 적조피해는 1995년 약 9,550만 달러의 수산피해를 일으켰으며 (Kim *et al.*, 1997), 매년 지속적으로 양식산업의 경제적 손실을 야기한다. 유해적조의 발생기간은 1980년대 1주일 이하로 발생하였지만, 90년대에 들어서며 1달 이상의 지속기간을 보였으며 (Park *et al.*, 2013), 양식생물에 가장 큰 피해를 준 *C. polykrikoides*의 최장

지속기간은 86일로 보고되었다 (NIFS, 2014). 발생기간의 장기화 경향을 보이는 *C. polykrikoides* 적조는 나로도, 남해도, 통영에서 주로 발생 (Lim *et al.*, 2008; Lee and Choi, 2009)하여 남해안에 적조발생이 집중적으로 나타났다. 특히, 1998년부터 2016년까지 남해안의 양식어류 피해의 주요 원인은 적조 (37.4%), 고수온 (31.0%), 저수온 (26.5%) 순으로 조사되어 (Lee *et al.*, 2018) 적조에 의한 대량폐사의 심각성을 보여주고 있다. 이러한 적조피해를 최소화하기 위하여 국립수산과학원은 매년 적조특보를 발령하고 있으며 (Park *et al.*, 2013), 적조의 조기검출을 위한 분자탐침기법 (Park *et al.*, 2016a, 2016b), 적조 발생 환경특성 (Lim *et al.*, 2008), 적조시기 수온 및 염분 분포 (Lee and Choi, 2009) 등 적조와 관련된 지속된 연구는 주로 적조 발생의 사전예방, 적조생물의 생태·생리 연구에 집중되어 있어 적

*Corresponding author: Kyoung-Mi Won Tel: 82-51-720-2492,
Fax: 82-51-720-2498, E-mail: kyoungmiwon@korea.kr

조 노출에 따른 어류의 생리학적 반응 및 성장에 대한 연구는 미비한 실정이다.

참돔은 남해안에서 주로 양식되는 온대성 어류(Chyung, 1977)로서, 국내 생산량은 6,806톤으로 양식어류 생산량의 7.9%(KOSIS, 2017)를 차지하는 주요 양식어종이다. 참돔의 서식수온은 10~28°C 범위이며, 적정 성장수온은 20~28°C로(Yoo, 2000), 20°C 이상의 하절기에는 사료섭식이 활발하고 생리적 대사가 원활하여 빠른 성장을 보인다(Choi *et al.*, 2008). 하지만 수온이 20°C 이하로 떨어지면 사료 섭취량이 감소하고, 15°C 이하에서는 식욕과 활동량이 감소(Yoo, 2000)하기 때문에 동절기 월동을 위해서는 하절기 동안 참돔의 양성관리가 더욱 중요한 시기라고 볼 수 있다. 그러나 하절기 참돔의 성장시기와 맞물려 적조발생에 의한 대량폐사가 빈번하게 발생하고 있으므로 이에 대응하기 위하여 양식시설(어류 가두리양식장)에 적조특보 단계별 황토살포, 사육밀도 조절(저밀도), 먹이공급량 조절(절식)을 제시하고 있다(NIFS, 2016). 그중 1996년부터 시행된 황토살포는 적조생물 입자를 흡착, 응집, 침전 작용을 통해 적조구조체의 한 방법으로 사용되고 있다(Kim, 2000c; Sengco *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2016c). 하지만 황토살포로 인한 저서 생태계 파괴(Park and Lee, 2006), 저층 수 산소 결핍(Anderson, 2009) 등의 문제점을 동반하고 있어, 실제 양식현장의 밀도와 절식을 통한 양식어장 현장대응 연구의 필요성이 제기된다. 또한 밀도조절과 절식을 통한 성장감소는 어가소득에 영향을 미칠 수 있기 때문에 먹이 재공급을 통한 성장회복에 관한 추가 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 경남 남해군 미조면 *C. polykrikoides* 적조발생 인근해역에서 사육관리중인 참돔 성어를 대상으로 절식과 밀도의 영향을 조사하였으며, 절식 이후 먹이를 재공급하여 참돔의 성장 및 혈액학적 변화를 통해 회복 가능여부를 분석하였다. 이 자료는 적조시기 가두리양식 어류의 적조피해를 최소화하기 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

재료 및 방법

1. 실험어 및 사육조건

경남 남해군 소재의 가두리양식장에서 사육중인 참돔 성어를 구입하여 남해군 미조면 미조리 인근 해상가두리 1조(11 m × 11 m × 5 m)를 구분하여 실험조건에 따라 그물을 설치하고 실험을 진행하였다. 실험조건은 섭식-고밀도(F-HD: feeding and high density), 절식-고밀도(S-HD: starvation and high density), 절식-저밀도(S-LD: starvation and low density) 세 그룹으로 구분하였고, 고밀도구는 31.25 m³ 공간에 참돔 200마리씩 수용하여 6.4 kg/m³를 유지하였고, 저밀도구는 125 m³ 공간에 400마리를 수용하여 3.2 kg/m³를 유지하였다. 실험결과

오차를 최소화하기 위해 상처가 없는 건강한 개체를 선별해 실험을 진행하였다. 실험개시 시 실험어의 전장은 41.6±0.7 cm, 체중 979.3±49.9 g이었으며, 사료 섭식과 절식 그리고 사육밀도 이외의 조건을 동일하게 설정하여 연구를 진행하였다.

여름철 적조시기 *C. polykrikoides*의 지속기간이 한 달 이상 지속될 수 있는 점을 감안하여 절식구는 5주간 절식 후 4주간 사료를 공급하고, 섭식구는 9주간 지속적으로 사료를 공급하였다. 5주간의 절식기간 동안 1주일 간격으로 계측 및 샘플을 실시하였고, 절식 후 4주간의 먹이 공급기간 동안에는 2주 간격으로 계측 및 샘플을 실시하였다. 먹이는 상업용 EP 침강사료(Suhyupfeed, Korea)를 2일 1회 반복으로 공급하였고, 사료의 입자크기는 7.5~9.3 mm였다. 실험기간 동안 수질측정기(YSI 650 MDS, YSI incorporation, USA)를 이용하여 측정하는 수온 20.7~25.5°C, 염분 31.3~32.7 psu, 용존산소 5.8~8.6 mg/L의 범위였다.

2. 적조 밀도

*C. polykrikoides*의 밀도는 표층과 수심 8, 17 m의 해수를 채수 후 광학현미경(Olympus BX53, Japan)을 이용하여 1 mL에 존재하는 *C. polykrikoides* cell을 계수하였다. 또한 국립수산물학원 적조정보시스템의 8월부터 10월까지 적조발생자료를 비교하였다(NIFS, 2015).

3. 생존율 및 성장

실험개시일로부터 절식시기까지 성장도 측정은 1주 간격으로 5주간 진행하였으며, 절식 후 사료 재공급의 성장도 측정은 2주 간격으로 4주간 실시하였다. 실험어 성장 계측은 각 실험구의 가두리에서 30마리씩을 포획하여 MS-222(Sigma, USA) 100 ppm으로 마취 후 전장과 체중을 측정하였다. 전장은 digital vernier calipers를 사용하여 1 mm 단위로 계측하였고, 체중은 전자저울을 사용하여 0.01 g까지 측정하였다. 측정된 전장 및 체중 데이터로 전장성장률(GRL, growth rate for total length % = [실험종료 시 전장 - 실험개시 시 전장] / [실험개시 시 전장] × 100)과 체중성장률(GRW, growth rate for body weight % = [실험종료 시 체중 - 실험개시 시 체중] / [실험개시 시 체중] × 100), 일간성장률(SGR, specific growth rate % = [Ln(실험종료 시 체중) - Ln(실험개시 시 체중)] / 사육 일수 × 100) 그리고 비만도(CF, condition factor = [체중 / 전장³] × 100)를 각각의 식으로 계산하였다. 또한 실험구별 폐사 개체를 계수하여 생존율을 산정하였다.

4. 혈액채취 및 분석

적조시기 가두리 참돔의 사육밀도와 섭식유무 그리고 절식

후 먹이 공급에 따른 혈액의 생리생화학적 차이를 비교하기 위해, 참돔을 MS-222 (Sigma, USA) 100 ppm으로 마취시킨 후 헤파린이 처리된 3 mL 주사기를 이용하여 미부동맥으로부터 신속하게 채혈하였다. 채혈 후 냉장 보관된 혈액을 capillary tube에 넣고 8,000 rpm으로 10분간 원심분리 후 Micro-hematocrit reader (Hawksley, UK)를 사용하여 hematocrit (Ht)을 측정하였다. Hemoglobin (Hb)은 FUJI DRI-CHEM 7000i (Fujifilm, Japan)로 전혈을 측정하였다. 나머지 혈액은 4°C에서 12,000 rpm으로 5분간 원심분리하여 혈장을 분리한 후 -74°C에 보관하고 분석 시에 사용하였다. 샘플 일자별 실험구별 각각 10개 혈장을 FUJI DRI-CHEM 7000i (Fujifilm, Japan)로 전용 kit slide를 사용하여 9개 항목, albumin (ALB), total cholesterol (TCHO), total protein (TP), triglyceride (TG), blood urea nitrogen (BUN), creatinine (CRE), aspartate aminotransferase (AST), alanine aminotransferase (ALT), glucose (GLU)를 분석하였다.

5. 통계처리

각 실험결과로부터 얻어진 자료값(mean ± S.D.)에 대한 유의성 검정은 SPSS 19.0을 사용하여 혈액분석은 Kruskal-Wallis test를 실시하였고, 성장도 및 비만도는 one-way ANOVA로 통계처리 후 Duncan's multiple range test를 통해 검증하였다(P < 0.05).

결 과

1. 생존율 및 적조 밀도

9주간 지속적으로 사료를 공급한 F-HD(섭식-고밀도)와 5주간 절식 후 4주간 사료를 공급한 S-HD(절식-고밀도), S-LD(절식-저밀도)의 참돔 생존율은 Fig. 1에 나타내었다. F-HD, S-HD 그리고 S-LD의 생존율은 각각 85.5%, 93.0%, 97.3%로 F-HD에서 가장 낮은 생존율을 보였으며, 생존율이 가장 높은 S-LD와는 11.8%의 차이를 나타냈다. *C. polykrikoides* 밀도는 실험개시 초반 50~200 cells mL⁻¹을 나타냈다. 2주에서 3주 사이 2,400~4,750 cells mL⁻¹의 적조가 발생하였으며(Fig. 1), 이때 F-HD에서 생존율이 가장 큰 폭으로 6% 감소하였다.

2. 성장

실험어의 전장은 실험개시 시 41.6±0.7 cm였으며, 절식구(S-HD, S-LD)의 5주간 절식기간 동안 지속적으로 사료를 섭취한 섭식구(F-HD)는 43.6±0.8 cm로 성장하여 절식구와 전장에 있어서 유의한 차이를 나타냈다(P < 0.05). 하지만 절식구의 먹이 공급 후 실험종료 시 섭식구와 절식구의 전장 성장은 유의

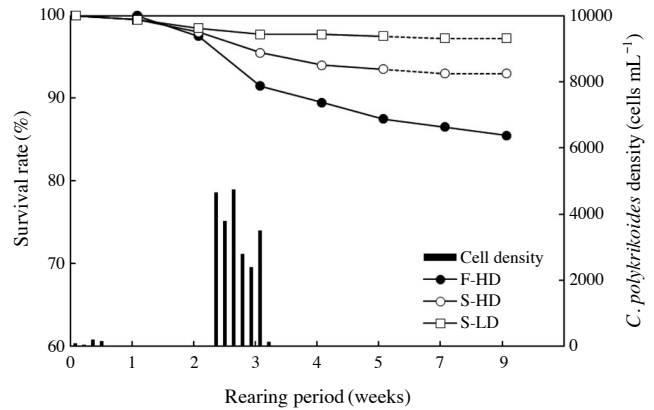


Fig. 1. Survival rate of the red sea bream *Pagrus major* in feeding group (fed for 9 weeks) and starvation groups (broken line: starvation for 5 weeks and then fed for 4 weeks) during red tide. Black bar is cell density of *C. polykrikoides*. F-HD; feeding and high density with 6.4 kg/m³, S-HD; starvation and high density with 6.4 kg/m³, S-LD; starvation and low density with 3.2 kg/m³.

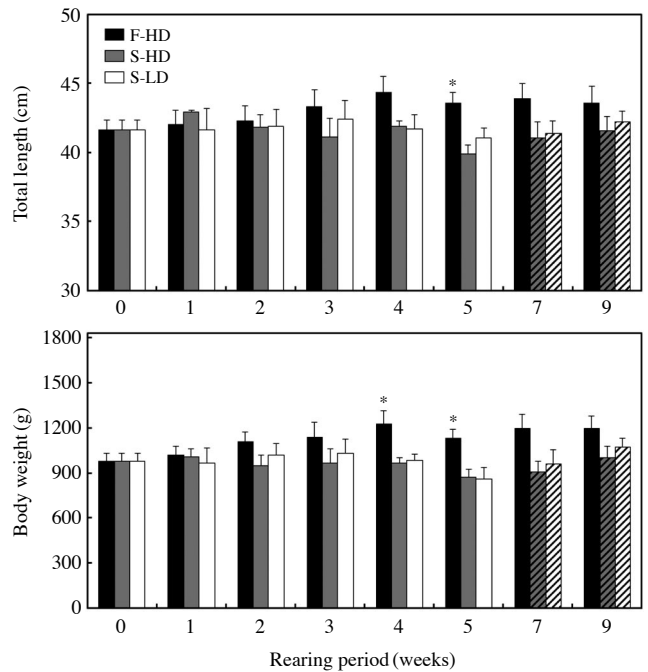


Fig. 2. Total length and body weight of the red sea bream *Pagrus major* after starvation (gray and white bar) and subsequent refeeding (bar with diagonal line) during red tide. Asterisks indicate significant difference among three groups (P < 0.05). F-HD; feeding and high density with 6.4 kg/m³, S-HD; starvation and high density with 6.4 kg/m³, S-LD; starvation and low density with 3.2 kg/m³.

한 차이를 보이지 않았으며(P > 0.05), 밀도 차이를 둔 S-HD와 S-LD 사이에서도 유의한 차이를 보이지 않았다(Fig. 2). 체중은 실험개시 시 979.3±49.9 g에서 절식기간 동안 F-HD는 1,132.5±55.8 g으로 체중이 증가하였고 S-HD와 S-LD는 각각

Table 1. Growth rate for total length and body weight, specific growth rate and condition factor of red sea bream *Pagrus major* after starvation and subsequent refeeding

Factors	Starvation period			Refeeding period		
	F-HD	S-HD	S-LD	F-HD	S-HD	S-LD
¹ GRL (%)	4.7±2.2*	-4.2±1.6	-1.4±1.9	0.01±2.4	4.3±2.9	2.9±2.1
² GRW (%)	15.6±6.3*	-11.0±4.0	-12.6±5.9	5.7±3.5 ^a	15.0±4.4 ^{ab}	25.5±6.3 ^b
³ SGR (%)	0.43±0.15*	-0.34±0.14	-0.39±0.19	0.2±0.09 ^a	0.5±0.2 ^{ab}	0.81±0.1 ^b
⁴ CF	1.4±0.02*	1.3±0.03	1.2±0.02	1.4±0.06	1.4±0.05	1.4±0.03

Values are mean±S.E.M (feeding: n=30, starvation: n=30). Asterisks indicate significant difference among three groups ($P<0.05$). Different alphabetic letters means significantly different ($P<0.05$).

¹Growth rate for total length (GRL, %) = (final total length - initial total length)/initial total length × 100

²Growth rate for body weight (GRW, %) = (final body weight - initial body weight)/initial body weight × 100

³Specific growth rate (SGR, %) = [ln (final body weight) - ln (initial body weight)]/days × 100

⁴Condition factor = (body weight/total length³) × 100

F-HD; feeding and high density with 6.4 kg/m³, S-HD; starvation and high density with 6.4 kg/m³, S-LD; starvation and low density with 3.2 kg/m³

871.4±54.8, 856.3±78.9g으로 체중이 감소하여 F-HD와 1.29, 1.32배의 유의한 체중 차이를 보였다($P<0.05$). 절식기간 체중의 유의한 차이는 4주와 5주에 나타났으며, S-HD와 S-LD의 사료공급 후 실험종료 시 F-HD와의 성장차이는 각각 1.19, 1.11배로 감소하였으며 유의한 차이를 보이지 않았다(Fig. 2).

세 실험구의 절식기간과 절식 후 먹이 재공급 기간의 전장 성장률(GRL), 체중성장률(GRW), 일간성장률(SGR) 및 비만도(CF)는 Table 1에 나타내었다. F-HD의 절식기간 전장성장률은 4.7±2.2%으로 S-HD(-4.2±1.6%)와 S-LD(-1.4±1.9%)의 마이너스 전장 성장과는 유의한 차이를 보였다($P<0.05$). F-HD의 체중성장률도 마이너스 성장을 보인 절식구들과 유의한 차이를 보였다. 일간성장률 역시 절식구 S-HD와 S-LD에서 각각 -0.34±0.14%, -0.39±0.19%의 성장을 나타내 0.43±0.15%의 성장을 보인 F-HD와 유의차를 보였다($P<0.05$). 비만도에서도 유사한 성장률 차이를 보여 절식기간 F-HD에서 모든 성장률이 유의하게 높게 나타났다. 그러나 절식 후 먹이 공급 기간에는 S-HD와 S-LD의 전장성장률과 비만도 차이를 보이지 않았다. 하지만 먹이공급 후 S-HD와 S-LD의 빠른 성장회복으로 체중성장률과 일간성장률은 S-LD, S-HD, F-HD 순으로 높은 수치를 보였다.

3. 혈액성상 분석

밀도와 절식에 따라 F-HD, S-HD 그리고 S-LD 세 그룹으로 구분하여 9주 동안 혈액성상의 변화를 분석한 결과는 영양상태와 신장기능 관련 혈액성상은 Fig. 3, 산소운반 능력 등 스트레스 관련 혈액성상 변화는 Fig. 4와 Fig. 5에 구분하여 정리하였고, S-HD와 S-LD의 절식기간 수치변화는 실선으로, 5주 절식 후 4주간의 섭식기간은 점선으로 표시하였다.

F-HD의 ALB는 3주부터 1.45±0.05 g/dL로 두 절식구와 유의한 차이를 보였으며 7주까지 유의한 차이는 지속되었다. S-HD와 S-LD는 실험개시 후 절식기간 동안 지속적으로 감소하

였으며, 먹이 공급 후 개시수준보다 상승하여 섭식구와 차이를 보이지 않았다. TCHO의 농도는 F-HD에서 다소 높은 수치를 보였지만 세 그룹 모두 유의한 차이를 보이지 않았다. 하지만 3주와 5주에는 F-HD가 유의하게 높게 나타났으며, 특히 5주차에는 S-HD, S-LD와 각각 1.85, 1.78배 차이를 보였다. S-HD, S-LD는 절식기간 감소경향을 보이고, 섭식 후 농도가 증가하였다. TP는 ALB와 유사한 경향을 보였으며, 3, 4, 5주에 F-HD는 유의한 차이를 나타냈다($P<0.05$). S-HD, S-LD는 절식기간 동안 개시 시보다 낮은 3.82~4.91 g/dL의 수준을 보이고 섭식 후 개시 시 수준으로 상승하였다. F-HD의 TG농도는 2주차에 401.0±54.4 mg/dL로 급격히 증가하였고, 같은 시기 급격히 감소한 S-HD(98.7±8.54 mg/dL)와 S-LD(71.0±5.84 mg/dL)와 비교하였을 때 각각 4.0, 5.6배의 유의한 차이를 보였다($P<0.05$). 유의한 차이는 3주차까지 유지되었지만 수치는 대폭 감소하였다. BUN은 F-HD가 3주차에 6.42 mg/dL로 급격히 증가하였고 4주차까지 유의한 차이를 유지하였다($P<0.05$). CRE는 F-HD가 2주부터 5주차까지 유의하게 높았으며, 5주차에는 F-HD, S-HD, S-LD 순서로 높게 나타났다.

Ht은 F-HD에서 3주차와 4주차에 유의한 증가를 보였으며($P<0.05$), 특히 3주차에 57.1±2.2%로 실험기간 중 가장 높은 수치를 나타냈다. S-HD와 S-LD는 유사한 패턴으로 차이를 보이지 않았다. Hb도 Ht과 유사하게 3주와 4주차에 F-HD의 유의한 증가를 나타냈다. AST는 3주차에 45.6±7.7 U/L로 절식구들과 2배 이상의 높은 수치를 보였으며, 2주와 4주 그리고 5주에는 F-HD, S-HD, S-LD 순서로 AST 수치가 높게 나타났다. ALT도 3주차에 F-HD가 급격히 상승하여 유의한 차이를 보였다. GLU는 2주차까지 그룹 별 차이를 보이지 않았지만 3주차에 F-HD가 165.3±7.9 mg/dL로 2주차 80.7±9.3 mg/dL보다 약 2배 증가하여 가장 높은 수치를 보였다. 3주차의 S-HD, S-LD도 증가하는 경향을 보였지만 F-HD의 수치와는 유의한 차이를 보였다($P<0.05$). 그리고 급격히 감소한 후 5주와 7주에 다시 절식구와 유의한 차이를 나타냈다.

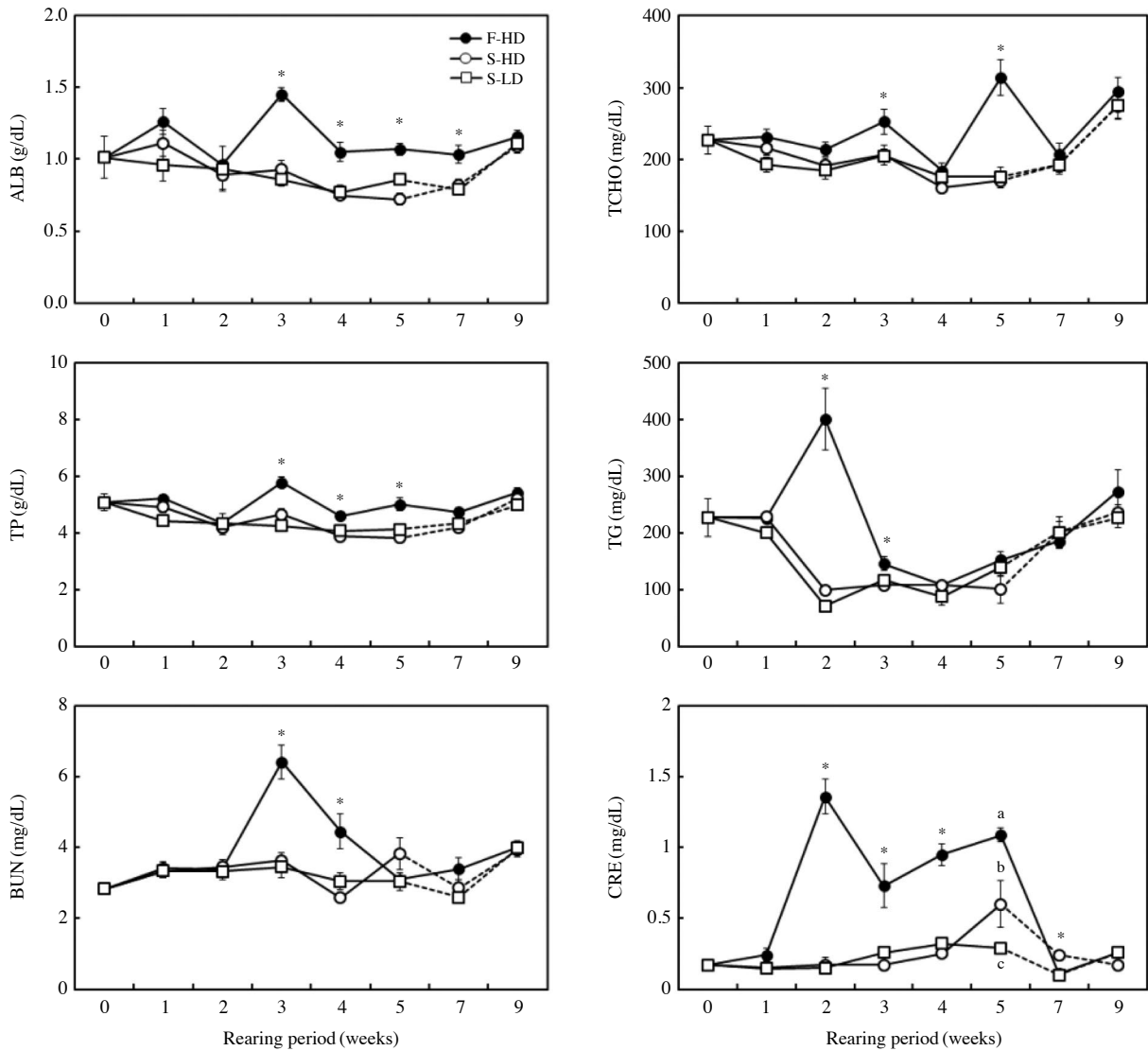


Fig. 3. Change of albumin (ALB), total cholesterol (TCHO), total protein (TP), triglyceride (TG), blood urea nitrogen (BUN) and creatinine (CRE) levels in the blood plasma of red sea bream *Pagrus major* during red tide. ●: fed for 9 weeks; ○, □: starvation for 5 weeks and then fed for 4 weeks. The asterisk indicates significant differences among three groups at the same sampling point ($P < 0.05$). F-HD; feeding and high density with 6.4 kg/m^3 , S-HD; starvation and high density with 6.4 kg/m^3 , S-LD; starvation and low density with 3.2 kg/m^3 .

고찰

C. polykrikoides 적조에 의한 어류의 대량폐사는 1995년 이후 지속적으로 발생하였다. 1998년부터 2016년까지 남해안의 어류 피해 주요원인이 적조일 만큼 고수온과 더불어 양식어업의 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 적조시기 양식현장에서는 양식어류 피해를 최소화하기 위해 섭식량 조절(절식), 밀도 조절을 실시하고 있어, 본 연구에서는 적조시기 가두리사육 참돔의 사육관리 방안으로 밀도와 절식의 영향을 연구하고, 절식 후 먹이 제공급에 따른 참돔의 성장과 생리적 반응을 조사하였다.

양식어류의 생존율은 수온 (Barton and Iwama, 1991; Kim, 2004) 염분 (Hur *et al.*, 2006) 조도 (Han *et al.*, 2005; Strand *et al.*, 2007) 등의 환경적 요인에 영향을 받으며, 특히 하절기에는 수온 상승으로 인한 고수온과 적조에 노출되어 대량폐사로 이어져 생존율에 큰 영향을 받는다. 특히 *C. polykrikoides* 적조는 어종에 따라 폐사율이 다르게 나타나며 넙치와 같은 저서성어류보다는 참돔, 돌돔, 쥐치와 같은 회유성 어류에 더 민감한 것으로 알려져 있다 (Lee *et al.*, 2003). Park *et al.* (2013)은 $1,000 \text{ cells mL}^{-1}$ 이상의 고밀도 *C. polykrikoides* 적조가 가두리나 육상양식장에 유입되면 2시간 이내에 폐사할 수 있다고 하였으며, 초반의 $50 \sim 200 \text{ cells mL}^{-1}$ 밀도에 노출 시 생존율에는 큰

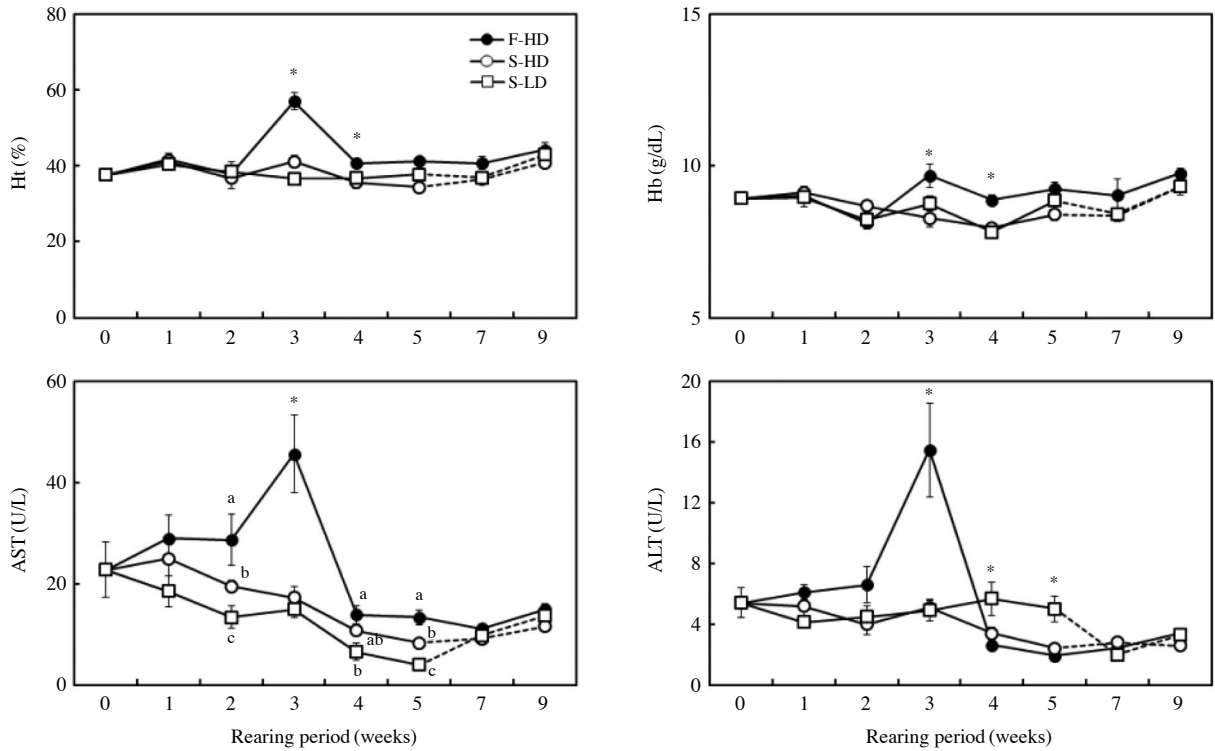


Fig. 4. Change of hematocrit (Ht), hemoglobin (Hb), aspartate aminotransferase (AST) and alanine aminotransferase (ALT) in the blood plasma of red sea bream *Pagrus major* during starvation (solid line) and then feeding (broken line) for 9 weeks. The asterisk indicates significant differences among three groups at the same sampling point ($P < 0.05$). F-HD; feeding and high density with 6.4 kg/m³, S-HD; starvation and high density with 6.4 kg/m³, S-LD; starvation and low density with 3.2 kg/m³.

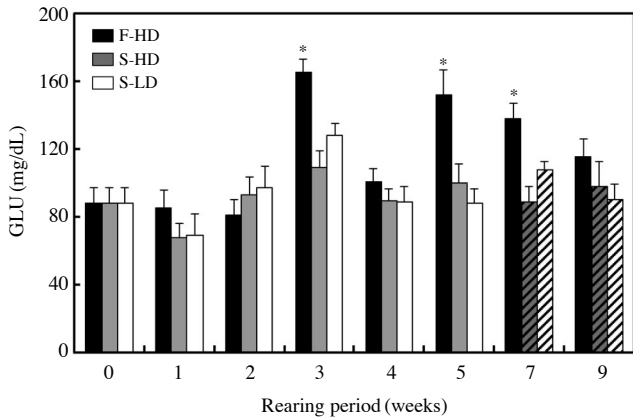


Fig. 5. Change of glucose (GLU) levels in the blood plasma of the red sea bream *Pagrus major* after starvation (gray and white bar) and subsequent refeeding (bar with diagonal line) during red tide. The asterisk indicates significant differences among three groups at the same sampling point ($P < 0.05$). F-HD; feeding and high density with 6.4 kg/m³, S-HD; starvation and high density with 6.4 kg/m³, S-LD; starvation and low density with 3.2 kg/m³.

영향을 미치지 않았다. 하지만 본 연구의 종료 시 F-HD(섭식-고밀도구), S-HD(절식-고밀도구) 그리고 S-LD(절식-저밀도구)의 생존율은 각각 85.5%, 93.0%, 97.3%로 F-HD가 가장 낮

은 생존율을 보였다. 실험개시 2~3주 사이 *C. polykrikoides* 적조가 2,400~4,750 cells mL⁻¹ 범위로 발생한 후 F-HD의 생존율이 6% 감소하여 가장 높은 폐사율을 나타냈다. Kim *et al.* (2000b)의 참돔을 대상으로 한 *C. polykrikoides* 적조 노출 실험에서는 3,000, 5,000, 8,000 cells mL⁻¹에서 24시간 동안 폐사율은 각각 20, 60, 100%로 나타났다. 또한 Kim *et al.* (2000a)의 노출 실험 역시 적조노출 1시간 후 참돔이 격렬한 유영을 보이며 1,000, 3,000, 5,000 cells mL⁻¹에서 각각 0%, 30%, 60%의 폐사율을 나타냈다. 폐사에 도달하는 시간에는 차이가 있었지만 두 연구의 공통점은 3,000 cells mL⁻¹ 이상에서 폐사가 시작되는 것으로 나타났다. 이로 미루어 위의 두 실내 실험과 현장 실험을 진행한 본 연구의 수온, 적조의 이동 확산, 발생 기간에는 차이가 있지만 3주차 F-HD의 급격한 생존율 감소는 *C. polykrikoides* 적조 노출 시 섭식의 영향으로 추정된다. 또한 두 절식구 사이의 생존율은 S-HD보다 저밀도인 S-LD에서 더 높게 나타났다. 적조 노출 후 S-HD의 생존율은 93%, S-LD는 97.3%를 유지하여 적조 노출 시 사육밀도에 따른 다른 연구결과와 비교 대상은 없지만 같은 조건에서 저밀도 역시 생존율에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

양식어류는 성장 촉진과 사료효율의 증진을 위해 조건별 절식이 되기도 하지만(Cook *et al.*, 2000; Gaylord *et al.*, 2001;

Cho and Lee, 2002), 하절기 적조나 고수온에 대비하여 인위적인 섭식량 조절이나 절식을 실시한다. 절식기간 동안 기초대사 및 항상성 유지를 위한 저장에너지 소비는 성장감소로 이어지며(Weatherley and Gill, 1987; Azzaydi *et al.*, 2000), 본 연구결과에서도 5주간의 절식기간 동안 전장 성장은 5주차에, 체중은 4, 5주에 섭식구(F-HD)와 절식구(S-HD, S-LD)의 유의한 차이를 나타냈다. 이러한 절식에 의한 성장 감소는 어류의 성장단계(Lee *et al.*, 2016), 절식 기간(Park *et al.*, 2012; Morshedi *et al.*, 2017)에 관계없이 나타나는 당연한 결과이지만, 하절기 가두리에서 참돔 성어의 절식실험을 진행한 Kim *et al.* (2017)의 결과에서는 절식 개시 후 2주부터 종료 시(10주)까지 체중 성장의 유의한 차이를 나타냈다. 본 연구와의 절식기간 동안의 체중성장 차이는 *C. polykrikoides* 적조 노출에 의한 섭식량 감소가 F-HD 체중 증가에 영향을 미친 것으로 예상된다. 5주간의 절식기간과 절식 후 4주간의 섭식기간 성장률을 나누어 확인한 결과, 5주간의 절식기간 동안 F-HD는 GRL, GRW, SGR, CF의 모든 성장률에서 S-HD, S-LD와 유의한 차이를 나타냈으며, 절식기간 GRL, GRW 그리고 SGR은 두 절식구 모두 마이너스 성장을 보여, 하절기 참돔 치어(Lee *et al.*, 2016)와 성어(Kim *et al.*, 2017)의 절식기간 성장률과 유사한 결과를 나타내었다. 절식 후 4주간 섭식기간 종료 시 GRW은 S-LD ($25.5 \pm 6.3\%$), S-HD ($15.0 \pm 4.4\%$), F-HD ($5.7 \pm 3.5\%$) 순으로 높게 나타나 적조노출 후에도 절식과 저밀도에 의한 성장회복의 가능성을 확인하였으며, SGR도 유사한 결과를 보였다. 이러한 결과는 일정기간 절식 후 영양원이 재공급되게 되면 성장이 정상 또는 그 이상으로 나타나는 보상성장(compensatory growth)으로 해석되어진다(Weatherly and Gill, 1981; Wang *et al.*, 2000; Cho and Lee, 2002). 보상성장의 효과는 절식기간(Gaylord and Gatlin, 2000; Morshedi *et al.*, 2017), 사료 성분(Jobling *et al.*, 1994), 공급 횟수(Dwyer *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2008) 등에 따라 다르기 때문에 적조시기의 절식 후 최적화된 성장회복 조건을 찾기위한 연구가 추가되어야 할 것으로 사료된다.

절식 이외에도 고밀도 사육은 먹이와 서식공간의 경쟁으로 스트레스가 증가하여 사료섭취율과 성장에도 영향을 미친다(Brett, 1979; Papoustoglou *et al.*, 1987; Bolasina *et al.*, 2006). 절식기간 적조 노출 후 S-HD와 S-LD 두 절식구 사이의 유의한 성장차이는 나타나지 않았다. 하지만 S-HD는 섭식구 평균 체중의 76.9%에서 4주간 먹이 재공급 후 83.7%로 6.8% 체중회복을 보였으며, S-LD는 75.6%에서 89.7%로 14.1% 여체중이 증가하여 밀도에 따른 성장회복의 차이를 확인하였다. Atlantic cod, *Gadus morhus*와 parrotfish *Oplegnathus fasciatus*의 경우 사육밀도의 증가가 성장과 사료 섭취율을 감소시켰지만(Lambert and Dutil, 2001; Kim, 2011), rockfish, *Sebastes schlegelii*는 고밀도 실험구의 먹이경쟁 자극과 사료섭취량 증가로 성장률이 증가하였다(Oh and Park, 2016). 이런 밀도에 의한 성장

차이는 어종과 노출된 사육환경에 따라 다를 수 있을 것으로 생각된다.

혈액성상은 어류의 영양 및 생리상태를 확인할 수 있는 중요한 지표(Hrubec *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2017)이기 때문에 적조 시기 절식과 밀도에 따른 건강상태와 생리변화를 조사하고자 하였다. ALB, TCHO, TP 그리고 TG는 어류의 영양상태 및 에너지 소비패턴을 나타내는 지표로(Caruso *et al.*, 2012), 먹이 섭취량 부족이나 영양결핍 등에 의해 감소하며, 특히 절식이 장기화 될수록 유의한 차이를 나타낸다(Furne *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013). ALB, TCHO, TP, TG는 S-HD와 S-LD 두 절식구에서 공통적으로 5주간 절식기간 동안 감소 경향을 나타내었지만, 먹이 재공급 후 개시수준이나 그 이상으로 회복하여, Kim *et al.* (2013), Rossi *et al.* (2015)의 절식기간에 따른 영양상태의 회복과 유사한 결과를 보였다. 어류의 지질 에너지 저장원인 중성지방 TG와 총콜레스테롤 TCHO는 어류의 영양상태와 환경변화에 따라 크게 변화한다(Babin and Vernier, 1989). 본 연구에서도 5주간 절식기간 동안 단백질 에너지원 ALB과 TP의 감소보다는 지질 TCHO와 TG의 감소가 더 크게 나타났다. 특히 TG는 절식 2주차에 개시 시보다 S-HD는 56.5%, S-LD는 68.7%로 감소하여, F-HD와 아주 대조적인 결과를 나타냈다. 절식구의 TG 감소는 절식 시 체내 항상성 및 대사 유지를 위한 에너지원으로 단백질보다 지질이 우선적으로 사용된다는 결과(Hung *et al.*, 1997)로 해석되어진다. 또한 어류는 절식 시 지질을 우선적으로 사용하고 장기적으로 절식이 진행되면 지방분해 활성 저하로 단백질 이화작용이 촉진되어 단백질이 가장 늦게 에너지원으로 사용되어진다(Love, 1980; Shearer *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013). 이러한 에너지 사용 순서로 미루어 본다면 적조시기의 5주간의 참돔 절식은 단백질보다는 지질의 감소가 크게 나타나 절식의 장기화도 가능할 것으로 예상된다. 위 결과로 미루어 5주간의 절식기간 동안 적조 노출 시 영양상태는 저하되었지만 먹이 재공급을 통해 회복 가능하였고, 3주차 F-HD의 유의한 증가는 적조노출에 따라 체내 항상성을 유지하기 위한 에너지원 사용으로 간주된다.

BUN과 CRE는 어류의 삼투압조절 기능에 이상이 있을 때 상승하는 신장 기능의 지표로 알려져 있다(Wood *et al.*, 2003). BUN은 적조에 노출 후 3주차 F-HD에서 급격히 상승하여 6.42 ± 0.5 mg/dL으로 가장 높은 수치를 보이고 4주차까지 절식구와 비교하여 유의하게 상승하였다. 이러한 결과는 Kim *et al.* (2017)의 하절기 참돔 성어의 안정 시 BUN 4.4~5.0 mg/dL와 비교하였을 때 차이를 보여 적조 노출에 의한 삼투조절에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 또한 CRE도 2주부터 5주차까지 섭식구와 절식구의 유의한 차이가 지속되었다. Jung *et al.* (2006)은 하절기 정상 참돔의 CRE는 0.2~0.4 mg/dL로 제시하였고, 본 연구의 절식구 S-HD와 S-LD는 0.14~0.32 mg/dL 범위로 차이를 보이지 않았지만, F-HD는 0.73~1.36 mg/dL의

범위로 차이를 보여 적조 노출에 의한 삼투압조절 기능에 영향을 미친 것으로 생각된다.

C. polykrikoides 적조 노출에 의한 폐사원인으로는 점액질, 산소 차단 (Shim *et al.*, 2009), 혈중 산소분압 (PO₂) (Kim *et al.*, 2000a), 활성산소 reactive oxygen species (ROS)와 아가미 기능 저하 (Kim *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2000b; Lee *et al.*, 2003), 어류 독성 (Onoue *et al.*, 1985; Tang and Gobler, 2009) 등이 보고되었다. Kim *et al.* (2000a)은 *C. polykrikoides* 적조 밀도별 참돔 노출 실험에서 폐사의 주요원인은 혈중 PO₂의 감소이며, 이로 인해 2차적으로 혈액학적 변화가 야기된다고 고찰하였다. 이 연구에서 5,000 cells mL⁻¹에 노출된 참돔의 몸부림치는 개체, 빈사상태 개체의 pH와 PO₂은 감소하였지만 Ht, Hb은 유의한 차이를 보이지 않아, 적조 노출 후 급격한 상승을 보인 본 연구와 차이를 보였다. 하지만 Kim *et al.* (2000b)은 적조에 노출되어 몸부림치는 개체와 빈사상태 개체처럼 폐사에 가까워진 개체에서만 pH와 PO₂ 감소를 나타낼 것으로 추측하였고, 폐사직전 개체의 산소 회복능력이 상실되어 본연구와 Ht, Hb 차이를 나타낸 것으로 판단된다. 또한 *C. polykrikoides*의 지수적 성장단계에서 ROS가 최대치를 보이며, 적조에 의해 발생된 ROS는 아가미세포의 구조적, 기능적 저하를 야기하고 (Kim *et al.*, 1999), 아가미에서 점액 분비를 자극하여 아가미 기능을 저하시킨다. 아가미 기능 저하는 H⁺, CO₂ 이동에 관여하는 탄산탈수효소의 촉매작용을 비활성화시켜 혈중 pH와 PO₂를 감소를 야기한다. pH와 PO₂ 감소는 혈액의 산소 포화도를 낮추어 체내 산소부족으로 이어졌지만, 적조 노출로 인해 부족해진 어체 내 산소공급과 에너지공급을 위한 F-HD Hb의 상승으로 예상된다. 그리고 저산소 상태나 신속하게 산소운반 능력을 증대시키고자 할 때 비장에 축적된 적혈구를 혈중으로 방출하여 Ht을 증가시켜 대응하는 것으로 알려져 있어 (Yamamoto *et al.*, 1980), 적혈구 용적을 늘려 산소를 공급하기 위해 Ht도 같은 시기에 급격한 상승을 한 것으로 판단된다.

간세포의 손상이나 변형, 과사와 같은 간 장애의 지표로 사용되는 AST, ALT는 어류의 스트레스 지표로도 사용된다 (Pan *et al.*, 2003). 두 혈장 효소 AST, ALT도 공통적으로 적조에 노출된 후 F-HD에서 급격한 증가를 보여 AST, ALT는 각각 45.6 ± 7.7, 15.5 ± 3.1 U/L로 절식구들과 유의한 차이를 보였다. 실험기간 중 S&H, S-LD 두 절식구의 AST, ALT 범위가 4.0~22.8, 2.0~5.7 U/L인 것을 감안하면, 적조 노출 후 약 2배가 상승하였다. 화학물질이나 활성산소에 의한 지질 과산화가 나타나는 환경에 노출되면 간세포의 손상으로 AST, ALT가 증가하는 것으로 알려져 있어 (Maita, 2007), 2,400~4,750 cells mL⁻¹ 밀도에서 6일간 *C. polykrikoides* 적조에 노출된 참돔의 간 기능이 손상된 것으로 예상된다.

코티졸의 혈중 수치는 어류의 스트레스 지표로 폭넓게 사용되고 있다 (Barton and Iwama, 1991). *C. polykrikoides* 적조

5,000 cells mL⁻¹에 노출된 참돔의 코티졸 수치는 대조구의 수치보다 몸부림치는 개체와 빈사상태 개체가 각각 2배, 5배 높은 수치를 나타내어, 적조 노출에 의한 스트레스 반응으로 고찰하였다 (Kim *et al.*, 2000a). 스트레스에 노출된 어류는 1차적으로 코티졸이 증가하고 (Wendelaar Bonga, 1997), 항상성을 유지에 필요한 에너지 공급을 위해 글루코즈 신생합성 (gluconeogenesis)을 통한 동반상승으로 혈중 GLU 수치를 증가시킨다 (Thomas and Robertson, 1991). 본 연구에서도 적조 노출 후 F-HD가 165.3 ± 7.9 mg/dL로 S-HD의 1.5배, S-LD의 1.3배 상승하여 유의한 차이를 나타내어, *C. polykrikoides* 적조 노출이 S-HD, S-LD보다 F-HD에 더 큰 스트레스로 작용한 것으로 해석된다.

이상의 결과, *C. polykrikoides* 적조에 노출된 참돔 F-HD에서 가장 낮은 생존율을 보였으며, 절식구는 5주간의 절식기간 동안 밀도에 관계없이 마이너스 성장을 보였다. 이는 절식기간 동안 절식구의 영양상태가 저하된 결과로 보여진다. 하지만 절식구들의 먹이 재공급 후 영양상태는 빠르게 호전되었으며, 4주간의 먹이 재공급 후 S-LD에서 빠른 성장회복을 보였다. 또한 적조 노출 후 F-HD에서 스트레스와 생리활성 지표들이 급격히 증가하여, 적조 노출 시 먹이공급과 밀도는 산소공급 감소와 스트레스 문제를 야기하여 생존율에 영향을 미칠 것으로 여겨진다.

요 약

본 연구는 매년 *C. polykrikoides* 적조에 의해 발생하는 양식 어류 폐사의 피해를 최소화하기 위해 적조시기 참돔의 절식과 밀도의 영향을 조사하였다. 해상가두리 (11 m × 11 m × 5 m)에서 섭식-고밀도 (F-HD), 절식-고밀도 (S-HD), 절식-저밀도 (S-LD) 세 그룹으로 구분하여 5주간의 절식 후 4주간의 먹이공급을 통해 참돔의 생존율, 성장, 성장회복 그리고 혈액학적 변화를 조사한 결과, 생존율은 F-HD에서 85.5%로 가장 낮았고, S-LD는 97.3%로 높은 생존율을 보였다. 5주간의 절식기간 동안 두 절식구는 전장, 체중 성장률에서 마이너스 성장을 보여 섭식구와 유의한 차이를 보였다 ($P < 0.05$). 하지만 먹이 재공급 후 두 절식구 모두 성장회복을 보였다. 특히 S-LD는 먹이 재공급기간 동안 빠른 성장회복을 통해 보상성장 경향을 보였으며, 섭식구와 유의한 차이를 나타냈다 ($P < 0.05$). ALB, TCHO, TP, TG 혈액분석을 통한 실험구의 영양상태는 절식구에서 섭식구에 비해 유의하게 감소하였지만 먹이 공급 후 실험개시 시 수준으로 빠르게 회복하였다. 스트레스와 생리활성 지표인 Ht, Hb, AST, ALT 그리고 GLU가 적조 노출 후 F-HD에서 동일한 시기에 급격히 상승하여, 적조시기 섭식, 고밀도 사육환경은 양식어류에게 더 민감한 사육환경으로 작용할 것으로 여겨진다.

다. 따라서 본 연구의 적조시기 절식과 밀도에 따른 생존율, 성장회복, 혈액성상을 통한 결과를 토대로, 적조 노출에 따른 절식과 밀도 조절이 사육어류 관리방안을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2018년 국립수산물과학원 수산과학연구사업(R2018045)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Anderson, D.M. 2009. Approaches to monitoring, control and management of harmful algal blooms (HABs). *Ocean. Coast. Manage.*, 52: 342-347.
- Azzaydi, M., F.J. Martines, S. Zamora, F.J. Sanchez-Valquez and J.A. Madrid. 2000. The influence of nocturnal vs. diurnal feeding under winter conditions on growth and feed conversion of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*, L.). *Aquaculture*, 182: 329-338.
- Babin, P.J. and J.M. Vernier. 1989. Plasma lipoproteins in fish. *J. Lipid Res.*, 30: 467-489.
- Barton, B.A. and G.K. Iwama. 1991. Physiological changes in fish from stress in aquaculture with emphasis on the response and effects of corticosteroids. *Annu. Rev. Fish Dis.*, 1: 3-26.
- Bolasina, S., M. Tagawa, Y. Yamashita and M. Tanaka. 2006. Effect of stocking density on growth, digestive enzyme activity and cortisol level in larvae and juveniles of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Aquaculture*, 259: 432-443.
- Brett, J.R. 1979. Environmental factors and growth. In "Fish Physiology Vol. 8, Bioenergetics and growth". Academic Press, New York, 599-677.
- Caruso, G., M.G. Denaro, R. Caruso, L. Genovese, F. Mancari and G. Maricchiolo. 2012. Short fasting and refeeding in red porgy (*Pagrus pagrus*, Linnaeus 1758): Response of some haematological, biochemical and non-specific immune parameters. *Mar. Environ. Res.*, 81: 18-25.
- Cho, S.H. and J.K. Lee. 2002. Compensatory growth in juvenile olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) in the spring. *J. Fish. Sci. Tech.*, 5: 122-126.
- Choi, H.S., S.H. Jung, Y.B. Hur and J.Y. Yang. 2008. Study on the winter mass mortality of red sea bream, *Pagrus major* in South sea area. *J. Fish. Pathol.*, 21: 35-43. (in Korean)
- Chyung, M.K. 1977. The fishes of Korea. Il Ji Sa, Seoul, 361pp. (in Korean)
- Cook, J.T., A.M. Sutterlin and M.A. McNiven. 2000. Effect of food deprivation on oxygen consumption and body composition of growth enhanced transgenic Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Aquaculture*, 188: 47-63.
- Dwyer, K.S., J.A. Brown, C. Parrish and S.P. Lal. 2002. Feeding frequency affects food consumption, feeding pattern and growth of juvenile yellowtail flounder (*Limanda ferruginea*). *Aquaculture*, 213: 279-292.
- Furne, M., A.E. Morales, C.E. Trenzado, M. Garcia-Gallego, M.C. Hidalgo, A. Domezain and A.S. Rus. 2012. The metabolic effects of prolonged starvation and refeeding in sturgeon and rainbow trout. *J. Comp. Physiol. B.*, 182: 63-76.
- Gaylord, T.G. and D.M. Gatlin. 2000. Assessment of compensatory growth in channel catfish *Ictalurus punctatus* R. and associated changes in body condition indices. *J. World Aquacult. Soc.*, 31: 326-336.
- Gaylord, T.G., D.S. MacKenzie and D.M. Gatlin. 2001. Growth performance, body composition and plasma thyroid hormone status of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) in response to short-term feed deprivation and refeeding. *Fish. Physiol. Biochem.*, 24: 73-79.
- Han, D., S. Xie, W. Lei, X. Zhu and Y. Yang. 2005. Effect of light intensity on growth, survival and skin color of juvenile Chinese longsnout catfish. *Aquaculture*, 248: 299-306.
- Hrubec, T., J.L. Cardinale and S.A. Smith. 2000. Hematology and plasma chemistry reference intervals for cultured tilapia *Oreochromis hybrid*. *Vet. Clin. Pathol.*, 29: 7-12.
- Hung, S.S.O., W. Liu, H. Li, T. Storebakken and Y. Cui. 1997. Effect of starvation on some morphological and biochemical parameters in white sturgeon, *Acipenser transmontanus*. *Aquaculture*, 151: 357-363.
- Hur, J.W., J.Y. Lee, Y.H. Kim, I.S. Park and Y.J. Chang. 2006. Effects of salinity on hematological changes and survival of cultured olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Kor. J. Environ. Biol.*, 24: 380-386. (in Korean)
- Jobling, M., O.H. Meloy, J. Dos Santos and B. Christiansen. 1994. The compensatory growth response of the Atlantic cod: effects of nutritional history. *Aquaculture*, 2: 75-90.
- Jung, S.H., S.G. Byun, B.Y. Jee and H.S. Choi. 2006. Application of veterinary chemistry analyzer used to hematological analysis of marine fish cultured in floating netcage. *J. Fish. Pathol.*, 19: 253-265. (in Korean)
- Kim, C.S., S.G. Lee, C.K. Lee, H.G. Kim and J. Jung. 1999. Reactive oxygen species as causative agents in the ichthyotoxicity of the red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. *J. Plankton Res.*, 21: 2105-2115.
- Kim, C.S., H.M. Bae, S.J. Yun, Y.C. Cho and H.G. Kim. 2000a. Ichthyotoxicity of a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*: aspect of hematological responses of fish exposed to algal blooms. *J. Fish. Sci. Tech.*, 3: 111-117.
- Kim, C.S., S.G. Lee and H.G. Kim. 2000b. Biochemical responses of fish exposed to a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 254: 131-141.
- Kim, H.C., D.Y. Kang and Y.J. Chang. 2008. Effects of repeated food deprivation on growth and survival of the juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus*. *Kor. J. Fish. Aquat. Sci.*, 41: 125-133. (in Korean)

- Kim, H.G., S.G. Lee and K.H. An. 1997. Recent red tides in Korean coastal waters. Nat. Fish. Res. Develop. Ins., 280pp.
- Kim, H.Y. 2004. Survival and physiological response of *Pagrus major* exposed to sudden change of water temperature. Bull. Fish. Sci. Inst., 13: 9-15. (in Korean)
- Kim, P.K. 2011. Effects of stocking density and dissolved oxygen concentration on the growth and hematology of the parrotfish *Oplegnathus fasciatus* in a Recirculating Aquaculture System (RAS). Kor. J. Fish. Aquat. Sci., 44: 747-752. (in Korean)
- Kim, S.J. 2000c. Removal of red tide organisms: 2. Flocculation of red tide organisms by using loess. J. Kor. Fish. Soc., 33: 455-462. (in Korean)
- Kim, S.K., N.Y. Sim, I.K. Jang, C. Lee, Y.D. Kim, B.K. Kim and J.W. Kim. 2013. Physiological and histological characteristics of starry flounder *Platichthys stellatus* after starvation and re-feeding. Kor. J. Fish. Aquat. Sci., 46: 793-800. (in Korean)
- Kim, W.J., K.M. Won, Y.K. Shin and J.Y. Lee. 2017. Change of growth and blood characteristics on starvation of red sea bream *Pagrus major* cultured in marine net cage in summer. Kor. J. Ichthyol., 29: 165-175. (in Korean)
- KOSIS. 2017. Korean Statistical Information Service, Statistic Database for Fisheries Production, Retrieved from <http://www.kosis.kr>. (in Korean)
- Lambert, Y. and J. Dutil. 2001. Food intake and growth of adult Atlantic cod (*Gadus morhua*) reared under different condition of stocking density, feeding frequency and size-grading. Aquaculture, 192: 233-247.
- Lee, D.C., K.M. Won, M.A. Park, H.S. Choi and S.H. Jung. 2018. An analysis of mass mortalities in aquaculture fish farms on the southern coast in Korea. Ocean Policy Research, 33: 1-16. (in Korean)
- Lee, J.Y., J.H. Lee and J.W. Hur. 2016. Effect of starvation on survival and physiological response in red sea bream *Pagrus major* in Summer. Kor. J. Fish. Aqua. Sci., 49: 620-627. (in Korean)
- Lee, M.O. and J.H. Choi. 2009. Distributions of water temperature and salinity in the Korea southern coastal water during *Cochlodinium polykrikoides* blooms. J. the Korean Soc. Mar. Environ. Eng., 12: 235-247. (in Korean)
- Lee, S.G., H.G. Kim, E.S. Cho and C.K. Lee. 2003. Mortality of fishes and shellfishes to harmful algal blooms. Fish. Aquat. Sci., 6: 160-163.
- Lim, W.A., Y.S. Lee and S.G. Lee. 2008. Characteristic of environmental factors related to outbreak and decline of *Cochlodinium polykrikoides* bloom in the southeast coastal waters of Korea, 2007. The Sea, 13: 325-332. (in Korean)
- Love, R.M. 1980. Feeding and Starvation. In: The chemical biology of fishes, Vol 2: Advances 1968-1977. Academic Press, London and New York, 2: 133-229.
- Maita, M. 2007. Fish health assessment. Dietary supplements for the health and quality of cultured fish. CAB International, Washington, 10-34.
- Morshedi, V., P. Kochanian, M. Bahmani, M.A. Yazdani, H.R. Pourali, G. Ashouri and H. Pasha-Zanoosi. 2017. Cyclical short-term starvation and refeeding provokes compensatory growth in sub-yearling Siberian sturgeon, *Acipenser baerii* Brandt, 1869. Anim. Feed Sci. Technolo., 232: 207-214.
- NIFS, National Institute of Fisheries Science. 2014. Information system of red tide. Annual report of NIFS on red tide of Korea. http://www.nifs.go.kr/red/news_2.red. (in Korean)
- NIFS, National Institute of Fisheries Science. 2015. Information system of red tide. Annual report of NIFS on red tide of Korea. http://www.nifs.go.kr/red/news_2.red. (in Korean)
- NIFS, National Institute of Fisheries Science. 2016. Fish farm red tide response manual. Manual of NIFS on red tide of Korea. (in Korean)
- Oh, S.Y. and J.W. Park. 2016. The effects of feeding frequency on the growth, food consumption, body composition, and hematological response of the Korean rockfish *Sebastes schlegelii*. Kor. J. Fish. Aquat. Sci., 49: 600-606. (in Korean)
- Onoue, Y., K. Nozawa, K. Kumanda, K. Takeda and T. Aramaki. 1985. Toxicity of *Cochlodinium* type '78 Yatsushiro occurring in Yatsushiro Sea. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 51: 147-151.
- Pan, C.H., Y.H. 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.
- Papoutsoglou, S.E., E. Papapaskeva-Papoutsoglou and M.N. Alexis. 1987. Effects of density on growth rate and production of rainbow trout over a full rearing period. Aquaculture, 66: 9-17.
- Park, C.H. and B.H. Lee. 2006. Effects of loess application in costal benthic ecosystem. J. Environ. Sci., 15: 1035-1043. (in Korean)
- Park, I.S., J.W. Hur and J.W. Choi. 2012. Hematological responses, survival, and respiratory exchange in the olive flounder, *Paralichthys olivaceus*, during starvation. Asian-Australasian J. Anim. Sci. (AJAS), 25: 1276-1284.
- Park, T.G., K.M. Won and W.J. Kim. 2016a. Use of molecular detection technique for red tide warning of *Cochlodinium polykrikoides*. The Sea, 21: 44-47. (in Korean)
- Park, T.G., J.J. Kim, W.J. Kim and K.M. Won. 2016b. Development of real-time RT-PCR for detecting viable *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae) cysts in sediment. Harmful Algae, 60: 36-44.
- Park, T.G., W.A. Lim, Y.T. Park, C.K. Lee and H.J. Jeong. 2013. Economic impact, management and mitigation of red tides in Korea. Harmful Algae, 30: S131-S143.
- Park, Y.T., H.S. Park, T.G. Park, G.H. Ahn, M.H. Son, P.J. Kim and M.E. Park. 2016c. Effects of yellow clay contents on removal efficiency of harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. J. Fish. Mar. Sci. Edu., 28: 1662-1672. (in Korean)
- Rossi, A., J. Cazenave, C. Bacchetta, M. Campana and M.J. Parma. 2015. Physiological and metabolic adjustments of *Hoplostern-*

- num littorale* (Teleostei, Callichthyidae) during starvation. *Ecol. Ind.*, 56: 161-170.
- Sengco, M.R., A. Li, K. Tugend, D. Kulis and D.M. Anderson. 2001. Removal of red- and brown-tide cells using clay flocculation Laboratory culture experiments with *Gymnodinium breve* and *Aureococcus anophagefferens*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 210: 41-53.
- Shearer, G., O. Savinova and W. Harris. 2012. Fish oil-how does it reduce plasma triglycerides? *Biochim. Biophys. Acta (BBA) - Mol. Cell Biol. Lipids*, 1821: 843-851.
- Shim, J.M., C. Lee, Y.H. Lee and B.S. Kim. 2009. Response of oxygen consumption and gill tissue of fish exposed to red tide organism *Cochlodinium polykrikoides*. *J. Environ. Sci.*, 18: 1283-1289. (in Korean)
- Strand, A., A. Alanara, F. Staffan and C. Magnhagen. 2007. Effects of tank colour and light intensity on feed intake, growth rate and energy expenditure of juvenile Eurasian perch *Perca fluviatilis*. *Aquaculture*, 272: 312-318.
- Tang, Y.Z. and C.J. Gobler. 2009. Characterization of the toxicity of *Cochlodinium polykrikoides* isolates from Northeast US estuaries to finfish and shellfish. *Harmful Algae*, 8: 454-462.
- Thomas, P. and L. Robertson. 1991. Plasma cortisol and glucose stress responses of red drum (*Sciaenops ocellatus*) to handling and shallow water stressors and anesthesia with MS-222, quinaldine sulfate and metomidate. *Aquaculture*, 96: 69-86.
- Wang, Y., Y. Cui, Y. Yang and F. Cai. 2000. Compensatory growth in hybrid tilapia, *Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*, reared in seawater. *Aquaculture*, 189: 101-108.
- Weatherley, A.H. and H.S. Gill. 1981. Recovery growth following periods of restricted rations and starvation in rainbow trout *Salmo gairdneri* Richardson. *J. Fish. Biol.*, 18: 195-208.
- Weatherley, A.H. and H.S. Gill. 1987. The biology of fish growth. 4. Protein, lipid and caloric contents. Academic Press, London, U.K., pp. 139-146.
- Wendelaar Bonga, S.E. 1997. The stress response in fish. *Physiol. Rev.*, 77: 591-625.
- Wood, C.M., M.D. McDonald, L. Sundin, P. Laurent and P.J. Walsh. 2003. Pulsatile urea excretion in the gulf toadfish: mechanisms and controls. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 136: 667-684.
- Yamamoto, K.I., Y. Itazawa and H. Kobayashi. 1980. Supply of erythrocytes into the circulating blood from the spleen of exercised fish. *Comp. Biochem. Physiol.*, 65: 5-11.
- Yoo, S.K. 2000. Mariculture. Guduk Publishing Co., 570-590. (in Korean)