

Article

조피볼락 *Sebastes schlegelii*의 생존율, 산소 소비율과 혈액 성상에 미치는 염분의 영향

오승용^{1,3*} · 김종관² · 장요순⁴ · 최희정¹ · 명정구¹

¹한국해양과학기술원 통영해양생물자원연구·보존센터

²한국해양과학기술원 해양생태계연구부

(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

³과학기술연합대학원대학교 해양생물학과

(305-350) 대전광역시 유성구 가정로 217

⁴한국해양과학기술원 동해연구소

(767-813) 경북 울진군 죽변면 해양과학길 48

Effect of Salinity on Survival, Oxygen Consumption and Blood Physiology of Korean Rockfish *Sebastes schlegelii*

Sung-Yong Oh^{1,3*}, Chong-Kwan Kim², Yo-Soon Jang⁴, Hee-Jung Choi¹, and Jung-Goo Myoung¹

¹Tong-Yeong Marine Living Resources Research & Conservation Center, KIOST

²Marine Ecosystem Research Division, KIOST

Ansan 426-744, Korea

³Department of Marine Biology, Korea University of Science & Technology

Daejeon 305-350, Korea

⁴East Sea Research Institute, KIOST

Uljin 767-813, Korea

Abstract : The effect of salinity on the survival, oxygen consumption and blood physiology of Korean rockfish *Sebastes schlegelii* (body weight 97.4 ± 1.7 g, mean \pm SD) was investigated at nine different salinities of 33.4 (control), 33.1, 32.8, 32.2, 31.0, 28.7, 23.9, 14.5 and 3.8 psu, respectively. Survival and blood physiology were measured at each salinity in two separate trials of 96 and 24 hr duration, respectively. Oxygen consumption rate (OCR) was determined at stepwise salinity exposure (33.4→33.1→32.8→32.2→31.0→28.7→23.9→14.5→3.8 psu) with an interval of 24 hr for each salinity. No death of fishes were observed in the range of 33.4 to 14.5 psu, but the survival rate was reduced to 26.7% at 3.8 psu after 96 hr. The OCRs were not significantly different in the range 33.4 to 28.7 psu ($p > 0.05$), but significantly increased until 14.5 psu and then drastically decreased at 3.8 psu compared to the control ($p < 0.05$). The concentrations of plasma Na^+ and Cl^- were significantly lower in fish exposed at 3.8 psu compared to the control ($p < 0.05$). The results of this study provide evidence that *S. schlegelii* exposed to concentrations below 23.9 psu show significant physiological responses to tolerate salinity changes under the experimental conditions we established.

Key words : *Sebastes schlegelii*, salinity, survival, oxygen consumption, blood physiology

*Corresponding author. E-mail : syoh@kiost.ac

1. 서 론

한국의 계절적 특성상 여름철 장마와 태풍으로 인한 집중호우로 단기간 동안 다량의 담수가 연안으로 유입되어 해수의 급격한 저염분 현상이 발생한다. 따라서 이러한 시기에 연안에 서식하는 생물들은 이러한 급격한 환경변화로 인한 스트레스와 생리적 변화를 겪게 된다(허 등 2003). 어류의 경우 환경수의 염분 변화는 체내 삼투압 변화를 초래하고 이에 대한 항상성(homeostasis) 유지를 위해 삼투압 조절(osmoregulation)을 하게 된다. 담수 경골어류의 경우 저장(hypotonic)의 환경수가 고장(hypertonic)의 어체 내로 유입되고, 이온들은 고장의 어체 내에서 저장의 담수로 배출되지만, 해산 경골어류는 반대 현상이 발생한다. 즉, 담수 어류는 체내 수분 평형을 유지하기 위해 물을 마시지 않는 반면, 해수 어류는 삼투압에 의한 고장의 환경으로 빼앗긴 체내의 수분을 보충하기 위해 해수를 마시며(Kirsch et al. 1985), 이를 통해 해수 내 이온(Na^+ , Cl^- , K^+)을 소화관 내에서 흡수한 후 아가미에서 배출한다(Kirsch and Meister 1982).

어류의 삼투압 조절 능력은 광염성(euryhaline) 또는 협염성(stenohaline) 어종에 따라 달라지지만, 급격한 염분 변화 또는 원래의 서식 염분 범위를 벗어난 장기적 노출의 경우 폐사를 유발하거나 성장 지연 등 생리적으로 부정적 영향을 미치는 스트레스 요인으로 작용한다(Partridge and Jenkins 2002; 이와 김 2005; 임 등 2005). 산소 소비율은 수서생물의 에너지 이용과 스트레스 반응을 조사하기 위해 널리 이용되는 대사율 지표로서(Pérez-Robles et al. 2012), 온도, 염분, 오염물질의 노출, 광도 그리고 용존산소와 같은 환경인자의 영향을 평가하는 타당한 방법으로 간주되고 있다(Brown and Terwillinger 1999; Altinok and Grizzle 2003). 환경수의 염분 변화 역시 어류의 산소 소비율의 변화를 유발하고 어종에 따라 그 변화 정도는 달라진다(Mosser and Hettler 1989; Abud 1992; 강 등 2000; 강 등 2004). 혈액 내 화학 성분 변화 역시 어류의 스트레스를 판단하고 건강도를 평가하는 지표로서(Wedemeyer and Yasutake 1977; Schreck 1982; Árnason et al. 2013), 염분 변화에 따른 다양한 어종의 생리적 변화를 조사하기 위한 연구가 이루어져 왔다(Imslund et al. 2008; Herrera et al. 2009; Imanpoor et al. 2012; 허 등 2002; 허 등 2003; 임 등 2005; 허 등 2006). 그러나 환경수의 염분 변화가 미치는 생리적 영향 정도는 제한적으로 알려져 있으며(Árnason et al. 2013), 특히 염분 변화가 빈번히 일어날 수 있는 연안 서식종에 대한 생리적 영향 파악이 필요하다.

조피볼락은 연안 정착성 어종이자 넓치 다음으로 높은 생산량을 보이는 우리나라 대표적 해산 양식어종으로서,

대부분 종묘 생산 이후 연안 지역의 해상 가두리에서 양식이 이루어지고 있다. 국립해양조사원이 수행하고 있는 해양관측 자료(2002~2012년)에 의하면 조피볼락 양식이 주로 이루어지고 있는 포항, 여수 그리고 통영 연안 지역 염분 변화의 경우 여름철에 최저 염분이 기록되고 있으며 특히, 포항 지역의 경우 9.3~10.3 psu 범위(7~9월)의 저염분 현상이 보고된 바 있다(<http://sms.khoa.go.kr/koofs>). 즉, 연안 지역은 여름철 장마, 집중 호우 및 육상 담수 유입에 따른 저염분 현상이 발생하고 있지만, 이로 인한 조피볼락의 생리적 영향에 대해 보고된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 염분 변화에 따른 조피볼락의 생존율, 산소 소비율 그리고 혈액 성분 변화를 통해 삼투압 조절을 위한 대사율 변화 및 혈액 내 생리학적 반응 정도를 조사하고, 향후 저염분 현상에 대응하기 위한 기초자료를 수집하였다.

2. 재료 및 방법

실험어

실험어는 한국해양과학기술원 통영해양생물자원연구·보존센터에서 사육 중이던 조피볼락(평균 무게 97.4 ± 1.7g)을 실험 2주 전 1000 L FRP 수조 4개와 침식식 생물여과조(5060 L) 그리고 포말분리기(96 L)로 이루어진 실내 순환여과식 시스템으로 옮겨 순치시킨 다음 사용하였다. 순치기간 동안 시판용 해산어 상품사료(E-hwa Feed Co., Korea, 단백질 함량 46.7%)를 일간 어체중의 1~2%를 공급하였으며, 수온은 히터와 냉각기를 이용하여 20.0 ± 0.1°C 그리고 광주기는 32-W 형광등을 이용하여 12L:12D 조건을 유지하였다. 사육 수조 내 용존산소는 유량 조절과 에어레이션을 통해 포화농도의 80% 이상을 유지하였으며, 순치기간 동안 사육수의 평균 pH와 염분은 각각 8.0 ± 0.2과 33.4 ± 0.1 psu이었다.

실험 장치

염분 변화가 조피볼락의 생존율과 혈액 성상에 미치는 영향은 생물여과조, 포말분리기 및 사육조로 이루어진 소형 순환여과시스템을 사용하여 조사하였다. 사육조는 가로 40 cm, 세로 60 cm, 높이 40 cm인 직사각형 형태의 플라스틱 수조이었으며, 수량은 74.0~75.0 L를 유지하였다. 용존산소의 공급을 위해 사육조에 에어스톤을 설치하여 에어레이션을 하였으며, 히터와 냉각기를 설치하여 수온을 조절하였고 수조 내 유량은 분당 2 L로 유지하면서 지속적인 노폐물의 배출과 용존산소의 보충을 해주었다.

염분 변화에 따른 조피볼락의 산소 소비율은 연속적으로 물이 흘러나가고 다시 재이용할 수 있도록 고안된 오와 노(2006)의 시스템을 변형한 호흡 측정 시스템을 사용하여 측정하였다. 호흡 측정 시스템은 공급탱크, 저수탱

크, 호흡실, 용존산소 측정실, 유량계 그리고 Multi Data Logger로 구성된 폐쇄 순환형 장치로서, 측정실 내 용존산소는 형광 용존산소 probe(MPA-48 Multi-Parameter Analyzer, Insite IG, USA)를 이용하여 용존산소를 측정하였고, 측정된 값은 컴퓨터와 연결된 GigaLog E Data Logger system을 이용하여 컴퓨터에 실시간 저장하였다. 실험어가 수용된 호흡실을 거쳐 나간 물은 산소 probe가 설치된 산소 측정실을 통과하도록 하였고, 물의 흐름은 호흡실 유입수와 배출수간 용존산소 농도 차이가 최소한 0.2 mg/L가 나도록 유량계를 이용하여 일정하게 조절하였다. 실험기간 동안 일정한 수온(19.7±0.3°C)을 유지하기 위해 시스템 내 냉각기[DA-100B, 1마력, 대일냉각기(주)]와 히터(용량 2 kW)를 설치하여 수온을 조절하였다.

실험 방법

실험 염분 농도는 24시간 이상 생존 가능한 최저 염분 농도 파악을 위한 예비실험을 통해 조사된 3.8 psu를 최저 농도로, 일반 해수 농도인 33.4 psu를 초기 농도로 설정한 뒤 희석 비율에 따라 각각 33.4(대조구, 희석 비율 0%), 33.1(1%), 32.8(2%), 32.2(4%), 31.0(8%), 28.7(16%), 23.9(32%), 14.5(64%) 그리고 3.8(100%) psu로, 총 9개 농도로 설정하였다. 염분 농도에 따른 조피볼락의 생존율과 혈액 성분 변화를 조사하기 위해 각 실험 염분 농도별로 조절된 실험 시스템 내 사육조에 조피볼락을 5마리씩 4반복 수용하여, 이 중 세 사육조에 수용된 조피볼락은 96시간 동안 24시간 간격으로 생존율을 조사하였고, 나머지 하나의 사육조에 수용된 조피볼락은 24시간 유지시킨 후 각각 채혈하여 혈액 내 변화를 조사하였다. 생존율과 혈액 성분 실험 기간 동안 먹이에 의한 영향을 배제하기 위해 수용 전 48시간 절식한 뒤 사육조에 수용한 뒤 먹이는 공급하지 않았다. 혈액은 헤파린으로 처리된 주사기(용량 1 mL)를 이용하여 미부동맥으로부터 채취한 후 4°C에서 5분간 방치한 후 hematocrit를 측정하였고, 12,000 rpm에서 5분간 원심분리하여 혈장을 추출한 다음 glutamic oxaloacetic transaminase(GOT), glutamic pyruvic transaminase(GPT), glucose(GLU), hemoglobin(Hb) 그리고 Na⁺, K⁺, Cl⁻를 FUJI DRY-CHEM 4000i(Fujifilm Co., Japan)를 사용하여 측정하였다.

산소 소비율 실험 역시 먹이 섭취에 따른 소화와 배설 등의 대사 작용에 의한 영향을 최소화하기 위해 실험 시작 48시간 동안 절식시킨 후 스트레스를 최소화하기 위해 2-phenoxyethanol(150 mg/L)로 마취시켜 무게를 측정한다. 다음 초기 염분 33.4 psu로 유지된 시스템 내 호흡실에 각각 5마리씩, 3반복 수용하여 실험을 실시하였다. 호흡실에 수용한 후 handling에 의한 영향을 배제하기 위하여 24시간 동안 안정시킨 후 매 24시간 간격으로 다음 단계의 실험

염분 농도(즉, 33.4→33.1→32.8→32.2→31.0→28.7→23.9→14.5→3.8 psu)로 1시간 이내에 조절하였다. 염분 변화에 따른 조피볼락의 산소 소비율은 염분 농도 변경 직전 6시간 동안 측정하였다. 즉, 각 염분 농도별 영향을 충분한 받도록 하기 위해 산소 소비율 측정 전 18시간 동안 유지시킨 다음 마지막 6시간 동안(즉, 각 염분 농도별 총 24시간) 산소 소비율을 30초 간격으로 측정 후 다음 염분 농도로 조절하였다.

산소 소비율(oxygen consumption rate, OCR)은 아래와 같은 방법에 따라 구하였다(Jobling 1982).

$$\text{OCR (mg O}_2\text{ kg}^{-1}\text{ h}^{-1}) = (\text{C}_i - \text{C}_o) \times \text{Q/W}$$

여기서, C_i = 어류 호흡실 유입수의 용존산소 농도(mg/L)

C_o = 어류 호흡실 배출수의 용존산소 농도(mg/L)

Q = 어류 호흡실을 지나가는 시간당 유량(L/h)

W = 호흡실 수용 어체중(kg)

자료 분석

모든 자료의 통계처리는 SPSS 11.5(SPSS Inc., USA) 통계 프로그램을 이용하여 분산분석(ANOVA)를 실시하였다. 분산분석 이전에 Levene's test를 통해 분산의 동질성(homogeneity)을 검정하였고, 분산분석 결과 유의한 차이가 있을 경우 Tukey's multiple range test로 평균간 유의성을 95% 신뢰수준에서 검정하였다. 각 염분별 시간당 평균 산소 소비율의 경우 반복구별로 pooling하여 분산분석을 수행하였다.

3. 결 과

생존율

염분 농도에 따른 96시간 조피볼락의 생존율 변화를 Table 1에 나타내었다. 염분 농도 33.4~14.5 psu 범위에서는 실험기간 동안 폐사 개체가 관찰되지 않았지만, 3.8 psu의 경우 실험 시작 48시간 후 생존율이 46.7%로 감소하였고, 72시간과 96시간 후에는 각각 40.0%와 26.7%로 감소하였다.

산소 소비율

염분 농도에 따른 조피볼락의 산소 소비율 변화는 Fig. 1에 나타내었다. 염분 농도 33.4~3.8 psu의 범위에서 조피볼락의 산소 소비율은 99.9~232.5 mg O₂ kg⁻¹ hr⁻¹ 범위이었으며, 염분 농도 31.0 psu(123.0~158.2 mg O₂ kg⁻¹ hr⁻¹)와 33.1 psu(111.4~172.5 mg O₂ kg⁻¹ hr⁻¹)에서 각각 최소와 최대 변동 폭을 보였다. 산소 소비율은 염분 농도 23.9~14.5 psu 범위에서 이전 산소소비율 보다 급격히 증가한 뒤 3.8 psu에서는 급격히 감소하는 경향을 보였다. 염분

Table 1. Survival rate of Korean rockfish exposed to nine different salinities for 96 hours

| Salinity (psu) | 33.4 | 33.1 | 32.8 | 32.2 | 31.0 | 28.7 | 23.9 | 14.5 | 3.8 |
|---------------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Elapsed time (hrs) | Survival rate (%)* | | | | | | | | |
| 24 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 48 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 46.7 ± 11.5 |
| 72 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 40.0 ± 20.0 |
| 96 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 26.7 ± 11.5 |

*Values indicate mean ± SD.

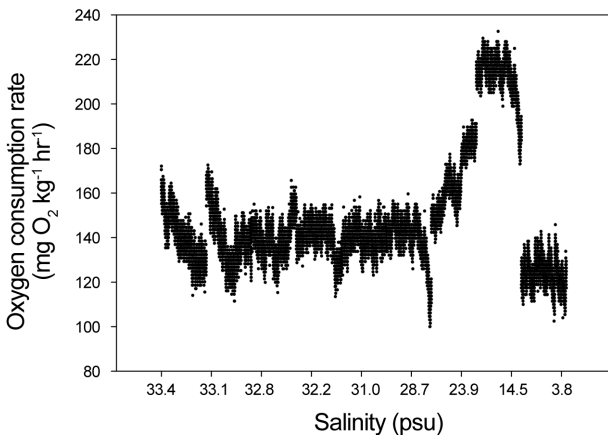


Fig. 1. Changes of oxygen consumption rate in fasted Korean rockfish exposed to nine different salinities

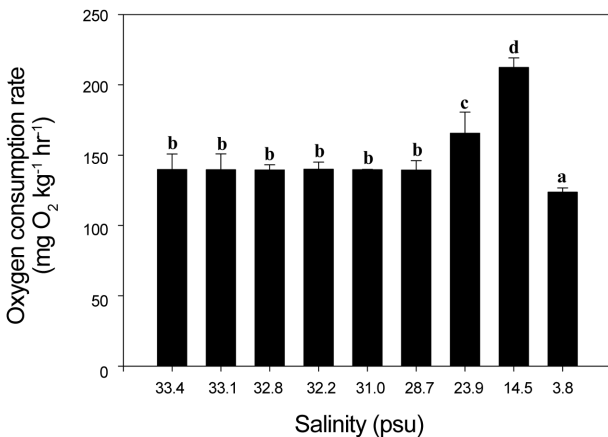


Fig. 2. Mean oxygen consumption rates of fasted Korean rockfish exposed to nine different salinities. Values (mean ± SD, n = 3) with different letter are significantly different (Turkey's multiple range test at p = 0.05)

농도에 따른 조피볼락의 시간당 평균 산소 소비율을 Fig. 2에 나타내었다. 염분 농도 33.4, 33.1, 32.8, 32.2, 31.0, 28.7, 23.9, 14.5 그리고 3.8 psu에서 조피볼락의 시간당 평균 산소 소비율은 각각 139.7, 139.6, 139.5, 139.9,

139.6, 139.4, 165.5, 212.4 그리고 123.7 mg O₂ kg⁻¹ hr⁻¹ 이었으며, 염분간 유의한 차이를 보였다(F = 29.962, df = 8, p < 0.001). 염분 농도 33.4~28.7 psu 범위에서는 유의한 차이가 없었지만(p > 0.05), 23.9~14.5 psu에서 유의하게 증가한 뒤 3.8 psu에서 가장 낮은 시간당 평균 산소 소비율을 보였다(p < 0.05).

혈액 정상

염분 농도에 따른 조피볼락의 혈액 정상 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 염분 농도 33.4~3.8 psu의 범위에서 24시간 노출한 조피볼락 혈액 내 Hb(F = 1.149, df = 8, p = 0.356), GOT(F = 0.616, df = 8, p = 0.759), GPT(F = 2.367, df = 8, p = 0.037), GLU(F = 4.721, df = 8, p = 0.001), hematocrit(F = 0.747, df = 8, p = 0.650) 그리고 K⁺(F = 3.398, df = 8, p = 0.005) 농도는 염분 농도에 따라 유의한 차이를 보이지 않거나 초기 농도인 33.4 psu(대조구)와 차이가 나타나지 않았다. 반면, 혈액 내 Na⁺(F = 9.532, df = 8, p < 0.001)와 Cl⁻(F = 4.016, df = 8, p = 0.002) 농도의 경우 염분 농도 33.4~14.5 psu 구간에서는 유의한 차이가 없었지만, 3.8 psu에서 유의하게 감소하였다.

4. 고찰

환경수의 장·단기 염분 변화는 어류의 체내 삼투압 조절을 위한 체내 이온 평형에 혼란을 가져와 상당한 스트레스를 주며, 여러 조직의 괴사 등을 유발하고 체내의 항상성 유지에 많은 에너지를 소모하게 함으로써 성장 지연이나 질병에 대한 저항력 감소를 초래하여 결국 폐사에 이르게 한다(Woo and Fung 1981; 장 등 2002; 김 등 2009). 본 실험의 경우 염분 14.5~33.4 psu 범위에서는 96시간 동안 폐사가 발생하지 않은 반면, 3.8 psu에서는 96시간 후 26.7%까지 생존율이 감소하였다. 염분 변화가 어류의 생존율에 미치는 영향은 어종에 따라 달라진다. 즉, 기수 지역에 주로 서식하는 숭어나 망둥어과 어류의 경우 담수 혹은 해수지역에 한정되어 서식하는 어류보다 넓은 범위의 염분 범위에서 생존이 가능하며(Martin 1990;

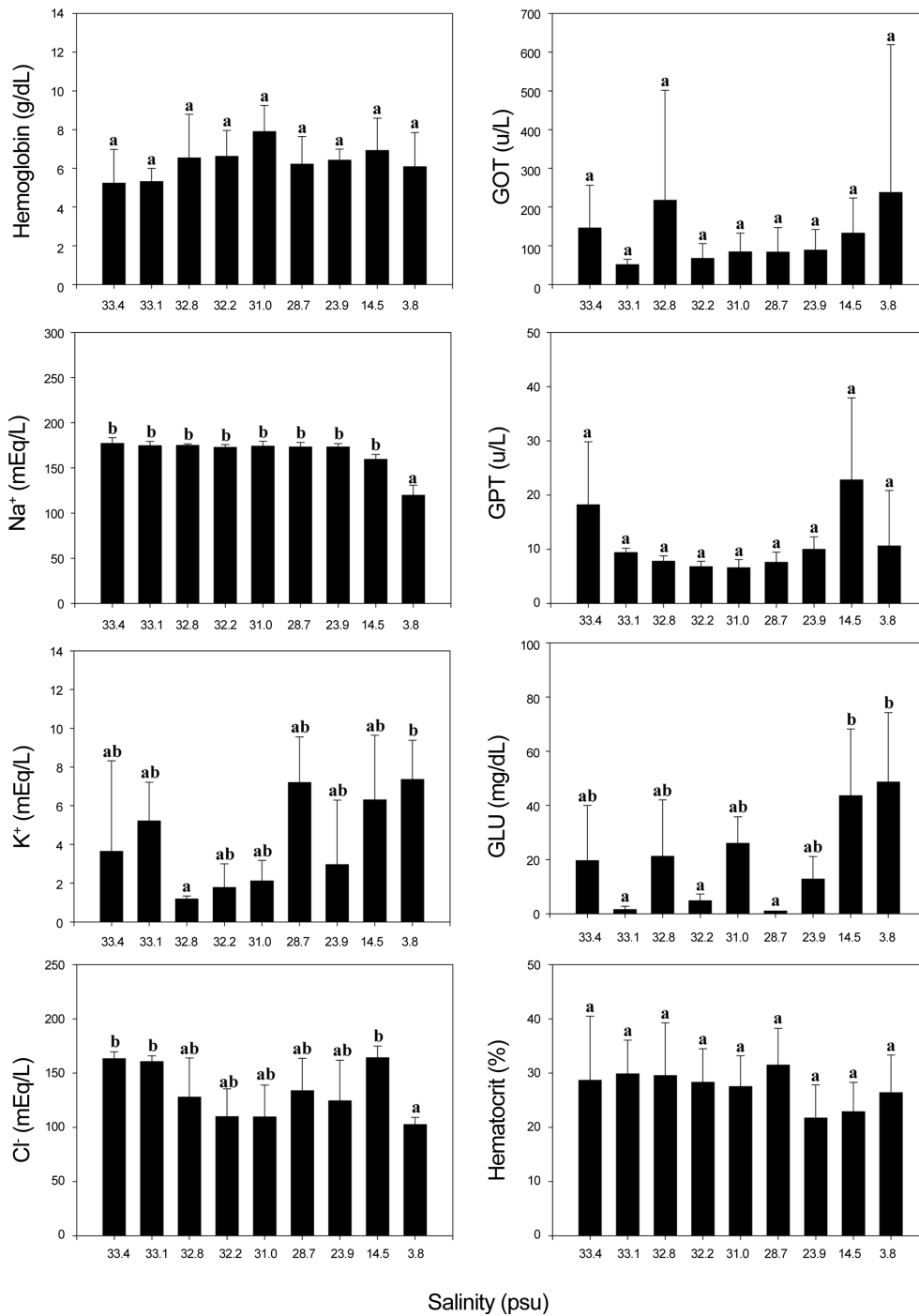


Fig. 3. Changes of the concentration of hemoglobin, Na⁺, K⁺, Cl⁻, GOT, GPT and glucose (GLU) in the blood plasma and hematocrit in the blood of Korean rockfish exposed to nine different salinities. Values (mean ± SD, n = 5) with different letter are significantly different (Turkey's multiple range test at p = 0.05)

강 등 2004), 해수에서 주로 서식하는 어류의 경우에도 넓은 염분 범위에서 생존할 수 있는 염분 저항성을 갖고 있다(Boeuf and Payan 2001; 김 등 2004). 예를 들어, 하구역 등의 염분이 낮은 기수지역에 서식하는 광염성 어류인 날개망둑(*Favonigobius gymnauchen*) (강 등 2000)과 두줄

망둑(*Tridentiger trigonocephalus*) (강 등 2004)은 모두 10.1~33.6 psu 범위에서 40일간 사육시 90% 이상의 생존율을 보인 반면, 3.4 psu 염분에서 각각 70.0%와 78.5%의 생존율을 보여 본 실험보다 낮은 염분에서 장기간 노출되어도 높은 생존율을 보였다. 김 등 (2004)은 해산어인 넙

치(*Paralichthys olivaceus*)를 대상으로 35, 20 그리고 5 psu에서 14주간 사육 시 각각 97.5, 88.8 그리고 86.2%의 생존율을 보였지만, 실험 시작 후 6일째까지는 폐사가 발생하지 않는다고 보고하였다. 따라서 조피볼락은 광염성 어종으로 알려져 있는 날개망둑, 두줄망둑 그리고 넙치에 비해 낮은 염분 저항성을 보이며, 저염분(즉, 3.8 psu) 조건에서 삼투압 조절 등의 실패로 인한 단기간 내에 생존율이 감소한 것으로 생각된다.

염분 변화는 체내 항상성 조절 기작과 연관된 에너지 흐름 및 대사활동과 연계되어(Salvato et al. 2001) 있어, 산소 소비율로 측정되는 호흡 대사율로 어류의 생리적 영향을 판단할 수 있다(Brown and Terwillinger 1999; Altinok and Grizzle 2003). 염분 변화에 따른 산소 소비율은 어종에 따라 다양하게 나타난다(Dalla Via et al. 1998; Morgan and Iwama 1998; 강 등 2000; 강 등 2004). Dalla Via et al. (1998)은 sea bass(*Dicentrarchus labrax*)를 대상으로 염분을 37→20→5→2 psu로 단계적으로 변화시킬 경우 각 염분 변화 시 약 30~80% 산소 소비율이 증가한다고 보고하였다. 이것은 환경수의 염분 변화가 어류 체내 삼투압 조절을 위한 이온 평형에 혼란을 유발하고 상당한 스트레스 요인으로 작용하며, 이를 보상하기 위한 체내 catecholamine과 corticosteroid와 같은 호르몬을 과다 분비함으로써 심장박동과 산소 소비를 증가시킨 것(Wedemeyer 1996; 이와 김 2005; 김 등 2009)으로 생각된다. 본 실험에서도 염분 23.9와 14.5 psu 조건에서 33.4 psu의 산소 소비율 보다 각각 18.5%와 52.0% 증가하였으며, 잡종 striped bass(*Morone chrysops* ♀ × *M. saxatilis* ♂)(임 등 2004)와 틸라피아(*Oreochromis niloticus*)(Iwama et al. 1997)에서도 동일한 현상이 보고되었다. 이에 반해, 강 등 (2000)은 날개망둑을 대상으로 염분 0, 3.4, 6.7, 10.1, 13.4, 20.2, 27.4 그리고 33.6 psu 조건에서 산소 소비율을 조사한 결과 20.2~33.6 psu 범위에서는 유의한 차이가 없었지만, 0.0~13.4 psu 범위에서는 33.6 psu 보다 15.8~24.1% 산소 소비율이 감소한다고 보고하였다. 두줄망둑(강 등 2004) 역시 동일한 염분 조건에서 13.4~33.6 psu 범위의 산소 소비율은 유의한 차이가 없었지만, 0.0~10.1 psu 범위에서는 28.4~52.3% 감소하는 것으로 보고하였다. 즉, 일정 염분 범위에서는 대사율에 차이를 보이지 않았지만, 일반적인 서식 범위를 벗어난 낮은 염분 범위에서는 산소 소비율이 감소하는 경향을 보였다. 본 실험에서도 3.8 psu에서는 33.4 psu보다 11.5% 산소 소비율이 감소하는 것으로 나타나 유사한 결과를 보였다. 이 밖에 spot(*Leiostomus xanthurus*)의 경우 염분이 증가할수록 산소 소비율이 증가하는(Mosser and Hettler 1989) 반면, croacker(*Micropogonias furnieri*)의 경우 등삼투압(iso-osmotic) 조건에서 가장 낮은 산소 소비율을 보이는(Abud

1992) 등, 각 어종마다 염분 변화에 대처하는 반응이 다르게 나타남을 알 수 있다.

어류의 혈액 내 성분은 외부 스트레스에 대한 반응 및 건강상태를 평가하는 지표로서, 염분 변화는 어류의 혈액 내 다양한 인자에 영향을 미친다(Wedemeyer and Yasutake 1977; Schreck 1982; 허 등 2002). 어류의 생리적 내성 한계에 근접하는 환경수의 염분 변화는 어류에게 스트레스 요인으로 작용하며(Árnason et al. 2013), 특히, 삼투압에 의한 스트레스는 혈중 cortisol과 GLU 농도를 동시에 증가시킨다. 즉, 삼투압 조절과 같은 항상성 유지에 문제가 발생하면 시상하부 내 삼투압 관련 수용기에 영향을 미쳐 뇌하수체 내 아세틸콜린의 분비를 유도하며, 최종적으로 부신피질에 의한 cortisol 분비를 증대시킨다(Tam et al. 1987; 한 등 2003; 임 등 2005). 이 cortisol은 아가미 염류 세포의 Na^+ - K^+ -ATPase 활성을 자극하여(Mayer-Gostan et al. 1987; 한 등 2003; 임 등 2005) 능동수송에 의한 Na^+ 펌프작동을 증진시키며 동시에 혈당 이용을 억제(Laycock and Wish 1983; 한 등 2003), 혈중 GLU 농도를 증가시킨다(Tam et al. 1987). 본 연구의 경우 cortisol 농도 측정이 이루어지지 않았지만, 저염분 조건(즉, 14.5과 3.8 psu)에서 평균 GLU 농도가 급격히 증가하는 동일한 경향이 나타났으며, 허 등(2006)에서도 동일한 결과를 보고하였다. 하지만 Imsland et al. (2008)은 Atlantic halibut(*Hippoglossus hippoglossus*)을 대상으로 15, 25 그리고 32 psu에서 4개월간 사육한 결과 15 psu 실험구 GLU 농도가 25와 32 psu 실험구 농도보다 낮게 나오는 반대 결과도 보고한 바가 있으며, 담수어인 goldfish(*Carassius auratus*)를 0, 6 그리고 12 psu에서 45일간 사육이 이루어져도 혈액 내 GLU 농도에는 영향을 미치지 않는다는 보고(Imanpoor et al. 2012)도 있어 어종과 사육기간에 따라 혈액 내 반응 정도는 상이한 것으로 나타났다. 본 실험에서 염분 변화에 따라 가장 크게 영향이 나타난 것은 혈액 내 Na^+ 와 Cl^- 이온 농도의 감소이었다. 해수에서 담수 환경으로 염분이 변화되면 해산어류는 체액보다 낮은 저장액(hypotonic solution)에 노출되어 혈장 내 Na^+ , K^+ 그리고 Cl^- 이 배출되기 때문에 Na^+ , K^+ 그리고 Cl^- 농도를 높게 유지하려는 고삼투압조절(hyper-osmoregulation)을 하게 된다(임 등 2005). 이와 같은 현상은 광염성 어류인 넙치(허 등 2006)와 잡종 striped bass(임 등 2005)에서도 보고된 바 있다. 하지만 조피볼락의 경우 가장 낮은 염분 조건인 3.8 psu에서 Na^+ 와 Cl^- 이온의 고삼투압조절이 이루어지지 않아 결국에는 폐사에 이르게 한 원인이 되는 것으로 생각된다. 이 밖에 염분 변화는 실험 조건에 따라 어류 체내 혈액 성상에 다양하게 영향을 미친다. 예를 들어 허 등 (2002)은 넙치를 대상으로 염분 35 psu에서 각각 0 psu와 15 psu 옮긴 다음 24시간 후 혈액성상을 조사한

결과, 염분 0 psu로 옮긴 경우 혈액 내 hematocrit, hemoglobin 그리고 GOT 농도가 증가하고 Na^+ 와 Cl^- 농도가 감소하였지만($p < 0.05$), 15 psu에서는 Cl^- 농도만이 감소한다고 보고하였다. 허 등 (2006)은 역시 넙치를 대상으로 15 psu에 순치시킨 후 0 psu로 옮길 경우 24시간 후 GOT와 GLU 농도가 증가하고 Na^+ 농도만이 감소한다고 보고하였다. 한 등 (2003)은 농어(*Lateolabrax japonicus*)를 대상으로 30 psu에서 1시간 또는 6시간 이내에 2 psu로 염분을 변화시켜 24시간 후 혈액성상을 조사한 결과, Na^+ 농도만이 1시간 실험구에서 유의한 증가가 나타났고, 그 외 혈액성상(즉, K^+ , Cl^- , GOP, GPT, GLU)은 초기 농도(즉, 30 psu)와 차이가 없다고 보고하고 있어 어종, 어류의 순치상태 및 염분 변화 조건 등에 따라 혈액 내 화학성상의 반응 정도는 달라짐을 알 수 있다. 본 실험 결과 조피볼락의 경우 저염분(즉, 3.8 psu) 조건에서 Na^+ 와 Cl^- 이온 농도의 감소가 두드러지게 나타나고, 스트레스 주요 지표 중 하나인 GLU 농도가 상승하는 패턴으로 볼 때 삼투압조절 실패와 더불어 저염분 적응을 위한 스트레스 반응이 함께 동반되어 폐사의 한 원인으로 작용한 것으로 생각된다. 그러나 14.5 psu 조건에서는 Cl^- 이온이 증가하는 경향을 보이고 있어 일정 수준의 저염분 조건에서 고삼투압조절을 위한 체내 대사작용이 추정되며, 추후 여기에 대한 보다 깊이 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

이상의 결과에서 염분 변화는 조피볼락의 생존, 대사와 혈액성상에 영향을 미치며, 23.9 psu 이하의 염분에서 삼투압조절을 위한 유의한 차이를 보이는 생리적 반응이 나타났다. 우리나라 조피볼락 주 양식지역인 포항, 여수, 통영 지역에서 2002~2012년 사이 보고된 여름철 염분이 본 실험에서 폐사가 발생한 3.8 psu까지 나타난 기록은 없지만, 포항지역에서 나타난 9.3~10.3 psu와 같은 저염분 현상은 조피볼락의 먹이 섭취, 성장 및 생존에 영향을 미칠 가능성이 높다. 특히, 산소 소비율이 급격히 증가한 염분 조건에서는 에너지 소비가 월등히 높을 것으로 생각되며, 양식장 내 용존산소 관리뿐만 아니라 영양 공급에 관한 세심한 관리가 이루어져야 할 것이다. 따라서 향후 조피볼락 양식 시 성장, 생존 및 사료 섭취 등에 영향을 미칠 수 있는 저염분 현상에 대한 장·단기 연구가 필요하며, 이를 바탕으로 여름철 저염분 현상 발생시 사육 방안 구축과 더불어 주변 환경 조건을 감안한 양식 적지 선정 등에 활용해야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 연구비(과제번호: PO01110, PE99202, PE99195) 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 실험기간 중 어류 사육과 관리, 자료

정리에 도움을 주신 김민석 책임기술원과 정유경 연구원 께도 감사드립니다.

참고문헌

- 강주찬, 진평, 이정식, 신윤경, 조규석 (2000) 날개망둑 치어의 생존, 성장 및 산소 소비율에 미치는 염분의 영향. 한국수산학회지 **33**:408-412
- 강주찬, 지정훈, 김성길, 박경수, 박승윤 (2004) 염분 농도에 따른 두줄망둑, *Tridentiger trigonocephalus* 치어의 내성. 한국환경생물학회지 **22**:153-158
- 김명진, 정상철, 송춘복 (2004) 염분에 따른 넙치(*Paralichthys olivaceus*)의 성장과 생존율. 한국어류학회지 **16**:100-106
- 김영수, 도용현, 민병화, 임한규, 이복규, 장영진 (2009) 염분 변화 속도를 달리한 담수산화 과정에서 강도다리 *Platichthys stellatus*의 생리학적 반응. 한국양식학회지 **22**:28-33
- 오승용, 노충환 (2006) 수온과 광주기에 따른 볼락, *Sebastes inermis* 치어의 산소 소비율. 한국양식학회지 **19**:210-215
- 이정열, 김덕배 (2005) 급격한 염분변화에 따른 황복의 산소 소비와 질소 배설. 한국양식학회지 **18**:45-51
- 임한규, 정민환, 한형균, 이종하, 장영진 (2004) 수온, 염분 및 광주기에 따른 잡종 striped bass(*Morone chrysops* × *M. saxatilis*)의 산소소비. 한국양식학회지 **17**:258-261
- 임한규, 한형균, 이종하, 정민환, 허준욱 (2005) 단계적 염분 변화가 striped bass 잡종(*Morone chrysops* × *M. saxatilis*)의 생리적 반응에 미치는 영향. 한국어류학회지 **17**:43-48
- 장영진, 민병화, 장해진, 허준욱 (2002) 해수사육에서 담수산육으로, 담수산육에서 해수산육으로 전환된 감성돔 치어, *Acanthopagrus schlegelii*의 혈액 생리학적 비교. 한국수산학회지 **35**:595-600
- 한형균, 강덕영, 전창영, 장영진 (2003) 염분 변화에 따른 농어, *Lateolabrax japonicus* 유어의 생리 반응과 성장 차이. 한국양식학회지 **16**:31-36
- 허준욱, 이정열, 김용호, 박인석, 장영진 (2006) 양식 넙치, *Paralichthys olivaceus*의 혈액학적 변화 및 생존율에 미치는 염분의 영향. 한국환경생물학회지 **24**:380-386
- 허준욱, 이복규, 장영진, 이종관, 임영수, 이종하, 박철환, 김병기 (2002) 사육수의 저염분 변화에 따른 넙치(*Paralichthys olivaceus*)의 스트레스 반응. 한국양식학회지 **15**:69-75
- 허준욱, 장영진, 이복규, 이정열 (2003) 저염분에서 사육한 양식 넙치(*Paralichthys olivaceus*)의 생리적 반응, 생존율 및 성장. 한국어류학회지 **15**:77-86
- Abud EOA (1992) Effects of salinity and weight on routine metabolism in the juvenile croaker, *Micropogonias furnieri* (Desmarest 1823). J Fish Biol **40**:471-472
- Altinok I, Grizzle JM (2003) Effect of low salinities on oxygen consumption of selected euryhaline and stenohaline

- freshwater fish. *J World Aquacult Soc* **34**:113-117
- Árnason T, Magnadóttir B, Björnsson B, Steinarsson A, Björnsson BT (2013) Effects of salinity and temperature on growth, plasma ions, cortisol and immune parameters of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Aquaculture* **380-383**:70-79
- Boeuf G, Payan P (2001) How should salinity influence fish growth? *Comp Biochem Physiol* **130C**:411-423
- Brown AC, Terwillinger NB (1999) Developmental changes in oxygen uptake in Cancer magister (Dana) in response to changes in salinity and temperature. *J Exp Mar Biol Ecol* **241**:179-192
- Dalla Via J, Villani P, Gasteiger E, Niederstatter H (1998) Oxygen consumption in sea bass fingerling *Dicentrarchus labrax* exposed to acute salinity and temperature changes: metabolic basis for maximum stocking density estimations. *Aquaculture* **169**:303-313
- Herrera M, Vargas-Chacoff L, Hachero I, Ruíz-Jarabo I, Rodiles A, Navas JI, Mancera JM (2009) Osmoregulatory changes in wedge sole (*Dicologlossa cuneata* Moreau, 1881) after acclimation to different environmental salinities. *Aquac Res* **40**:762-771
- Imanpoor MR, Najafi E, Kabir M (2012) Effects of different salinity and temperature on the growth, survival, haematocrit and blood chemistry of goldfish (*Carassius auratus*). *Aquac Res* **43**:332-338
- Imsland AK, Gústavsson A, Gunnarsson S, Foss A, Árnason J, Arnarson I, Jónsson AF, Smáradóttir H, Thorarensen H (2008) Effects of reduced salinities on growth, feed conversion efficiency and blood physiology of juvenile Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.). *Aquaculture* **274**:254-259
- Iwama GK, Takemura A, Takano K (1997) Oxygen consumption rates of tilapia in freshwater, seawater, and hypersaline sea water. *J Fish Biol* **51**:886-894
- Jobling M (1982) A study of some factors affecting rates of oxygen consumption of plaice, *Pleuronectes platessa* L. *J Fish Biol* **20**:501-516
- Kirsch R, Meister MF (1982) Progressive processing of ingested water in the gut of seawater teleosts. *J Exp Biol* **98**:67-81
- Kirsch R, Humbert W, Simoneaux V (1985) The gut as an osmoregulatory organ, comparative aspects and special references to fishes. In: Gilles R, Gilles-Baillien M (eds) *Transport Processes, Ion and Osmoregulation*. Springer Verlag, Berlin, pp 265-277
- Laycock J, Wish P (1983) *Essential Endocrinology*. 2nd. Oxford University Press, Oxford, 371 p
- Martin TJ (1990) Osmoregulatory in three species of Ambassidae (*Osteichthyes: Perciformes*) from estuaries in Natai. *S Afr J Zool* **25**:229-234
- Mayer-Gostan N, Wendelaar Bonga SE, Balm P (1987) *Mechanisms of hormone action on gill transport*. Academic Press, San Diego, pp 211-238
- Morgan JD, Iwama GK (1998) Salinity effects on oxygen consumption, gill Na⁺, K⁺-ATPase and ion regulation in juvenile coho salmon. *J Fish Biol* **53**:1110-1119
- Mosser ML, Hettler WF (1989) Routine metabolism of juvenile spot, *Leiostomus xanthurus*. *J Fish Biol* **35**:703-707
- Partridge GJ, Jenkins GI (2002) The effect of salinity on growth and survival of juvenile black bream (*Acanthopagrus butcheri*). *Aquaculture* **210**:219-230
- Pérez-Robles J, Re AD, Giffard-Mena I, Díaz F (2012) Interactive effects of salinity on oxygen consumption, ammonium excretion, osmoregulation and Na⁺/K⁺-ATPase expression in the bullseye puffer (*Sphoeroides annulatus*, Jenyns 1842). *Aquac Res* **43**:1372-1383
- Salvato B, Cuomo V, Muro RD, Beltramini M (2001) Effects of environmental parameters on the oxygen consumption of four marine invertebrates: a comparative factorial study. *Mar Biol* **138**:659-668
- Schreck CB (1982) Stress and rearing of salmonids. *Aquaculture* **28**:241-249
- Tam WH, Birkett L, Makaran R, Payson PD, Whitney DK, Yu CKC (1987) Modification of carbohydrate metabolism and liver vitellogenic function in brook trout (*Salvelinus fontinalis*) by exposure to low pH. *Can J Fish Aquat Sci* **44**:630-635
- Wedemeyer GA (1996) *Physiology of fish in intensive culture systems*. Chapman & Hall, New York, 232 p
- Wedemeyer GA, Yasutake WT (1977) *Clinical methods for the assessment of the effects of environmental stress on fish health*. Federal Government Series, U.S. Fish and Wildlife Service Technical paper 89, 18 p
- Woo NYS, Fung ACY (1981) Studies on the biology of red sea bream. 2. Salinity adaptation. *Comp Biochem Physiol* **69A**:237-242

국문 참고자료의 영어 표기

English translation / Romanization of references originally written in Korean

- Chang YJ, Min BH, Chang HJ, Hur JW (2002) Comparison of blood physiology in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegeli*) reared in converted freshwater from seawater and seawater from freshwater. *J Korean Fish Soc* **35**:595-600 (in Korean)

- Han H-K, Kang D-Y, Jun C-Y, Chang Y-J (2003) Effect of salinity change on physiological response and growth of yearling sea bass, *Lateolabrax japonicus*. J Aquaculture **16**:31-36 (in Korean)
- Hur JW, Chang YJ, Lee BK, Lee JY (2003) Effects of hypo-salinity on physiological response, survival and growth of cultured olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). Korean J Ichthyol **15**:77-86 (in Korean)
- Hur J-W, Lee B-K, Chang Y-J, Lee J-K, Lim Y-S, Lee J-H, Park C-H, Kim B-K (2002) Stress responses of olive flounder *Paralichthys olivaceus* to hyposalinity. J Aquaculture **15**:69-75 (in Korean)
- Hur JW, Lee JY, Kim YH, Park I-S, Chang YJ (2006) Effects of salinity on hematological changes and survival of cultured olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. Korean J Environ Biol **24**:380-386 (in Korean)
- Kang J-C, Chin P, Lee J-S, Shin Y-K, Cho K-S (2000) Effects of salinity on survival, growth and oxygen consumption rates of the juvenile gobiid, *Favonigobius gymnauchen*. J Korean Fish Soc **33**(5):408-412 (in Korean)
- Kang J-C, Lee J-H, Kim S-G, Park GS, Park SY (2004) Tolerance of juvenile gobiidae, *Tridentiger trigonocephalus* exposed to various salinity. Korean J Environ Biol **22**:153-158 (in Korean)
- Kim MJ, Chung SC, Song CB (2004) Effects of salinity on growth and survival of olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. Korean J Ichthyol **16**:100-106 (in Korean)
- Kim YS, Do YH, Min BH, Lim HK, Lee BK, Chang YJ (2009) Physiological responses of starry flounder *Platichthys stellatus* during freshwater acclimation with different speeds in salinity change. J Aquaculture **22**:28-33 (in Korean)
- Lee J-Y, Kim D-B (2005) The optimum salinity and the effects of the rapid salinity change on oxygen consumption and nitrogen excretion in river puffer, *Takifugu obscurus*. J Aquaculture **18**:45-51 (in Korean)
- Lim HK, Jeong MH, Han H-K, Lee JH, Chang YJ (2004) Oxygen consumption of hybrid striped bass (*Morone chrysops* ♀ *M. saxatilis* ♂) exposed to different temperature, salinity and photoperiod. J Aquaculture **17**:258-261 (in Korean)
- Lim HK, Han H-K, Lee J-H, Jeong MH, Hur JW (2005) Effects of gradual change of salinity on physiological response in hybrid striped bass (*Morone chrysops* × *M. saxatilis*). J Aquaculture **17**:43-48 (in Korean)
- Oh S-Y, Noh CH (2006) Effects of water temperature and photoperiod on the oxygen consumption rate of juvenile dark-banded rockfish, *Sebastes inermis*. J Aquaculture **19**:210-215 (in Korean)

Received Apr. 28, 2014

Revised May 30, 2014

Accepted Jun. 9, 2014