

월동기 저수온 충격에 따른 양식산 가송어 *Mugil haematocheilus*의 생리생화학적 반응

강덕영* · 강희웅 · 김규희 · 조기채 · 김효찬¹
국립수산과학원 서해수산연구소, ¹부경대학교

Effect of Cold Shock on the Physiological Responses of the Cultured mullet, *Mugil haematocheilus* in Winter

Duk-Young KANG*, Hee-Woong KANG, Gyu-Hee KIM, Ki-Che JO and Hyo-Chan KIM¹
WSFRI, NFRDI, 707 Eulwang-dong, Jung-gu, Incheon 400-420, Korea
¹Department of Aquaculture, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Physiological responses of mullet *Mugil haematocheilus* to cold shock in winter were investigated. The experimental mullets were initially acclimated at 10.0°C and then the water temperature was reduced to -1.2°C for cold shock experiment. The stress responses was monitored for nearly 50 hours. The parameters monitored include survival rate, plasma alanine aminotransferase (ALT), aspartate aminotransferase (AST), glucose (GLU), total protein (TP), electrolytes (Na⁺, K⁺, Cl⁻), cortisol and thyroid hormones (TT₄, TT₃, FT₄ and FT₃). With the exception of the TP and electrolytes, most parameters changed significantly during the cold shock. The survival rate did not change from 10°C to -0.6°C, but decreased significantly below -1.0°C, and was zero at -1.2°C. The plasma AST and ALT concentrations increased remarkably from 2.5°C to 0.5°C and from 2.5°C to 1.5°C, respectively, and then declined rapidly as the temperature decreased to -1.2°C. The plasma GLU concentration did not change until -0.5°C, and then the concentration increased significantly at -1.2°C. The plasma cortisol concentration increased remarkably from 2.5°C to -0.5°C, and then declined at -1.2°C. The plasma thyroid hormones showed two changes during the cold shock. Both plasma T₄ concentrations increased remarkably from 2.5°C to 0.5°C, then declined rapidly until -1.2°C, while both plasma T₃ concentrations decreased significantly from 10°C to 2.5°C, and then remained significantly lower than the concentration at 10°C.

Key words: *Mugil haematocheilus*, Cold shock, Stress, Cortisol, Thyroid hormones

서 론

수온은 어류의 정상적인 생명 현상에 영향을 미치는 가장 중요한 환경인자 중 하나이다. 자연계에 있어 국소적인 수역 내 서식 환경인 수온의 급변은 비유영성 또는 저유영성 생물체에게는 치명적일 수 있지만, 상대적으로 유영성이 강한 어류의 경우는 호조건의 서식 수온을 찾아 이동할 수 있기 때문에 그에 따른 피해를 입지 않을 수 있다. 그러나 폐쇄적인 인공 서식 환경에서 생활하는 양식산 또는 축양용 어류들의 경우 주변 수온의 급격한 교란은 해당 종에게는 스트레스로 작용하고, 이로 인한 일련의 급성 생리 반응들은 이들의 건강, 성장력 및 생존율에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서 수온 급변에 의한 어류 스트레스 반응에 대해 적절한 제어가 이루어지지 않을 경우 어류의 성장 감소 또는 대량 폐사에 의한 양식 생산성 하락으로 이어질 수 있어, 경제성 높은 어류를 사육하고 있는 산업 현장에서는 스트레스 제어 기술을 핵심 어류 양식 사육 기술 중 하나로 여기고 있다.

급격한 온도 교란은 폐쇄적 사육 공간에서 생활하는 어류에

게 1차적으로 생리적인 스트레스를 가할 수 있으며 (Davis and Parker, 1990; Ishioka, 1980), 2차적으로 체대사 변화 (Woo, 1990) 및 혈액성상 변화 (Ryan, 1995) 등의 현상을 유도할 것으로 본다. 실제로 급성 스트레스 상태에서 어류는 생체에너지의 부족현상으로 인한 환경수영 영향을 직접적으로 받게 되고, 그로 인해 체대사 관련 호르몬 변화 (Davis and Parker, 1990; Ishioka, 1980; Robertson et al., 1987, 1988), 혈중 이온농도 변화 및 전해질 조절 교란 등이 초래된다는 보고가 있다 (Robertson et al., 1988; Ishioka, 1980). 그러나 이 과정에서 스트레스를 극복하기 위해 생리학적 기능의 조절에 필요한 대사에너지의 소비가 요구된다. 즉 스트레스성 온도 조건에 생체 세포들이 성공적으로 보상 및 적응하기 위해서는 항상성 유지 에너지 생산과 관련된 대사성 호르몬들의 분비와 그에 따른 호기성 및 혐기성 대사 경로를 통한 에너지 공급이 필수적으로 수반되어야 하며, 스트레스 강도가 높을수록 이를 해소하기 위해 필요한 에너지 요구량은 증가하게 된다 (Schreck, 1982; Davis et al., 1985; Barton and Iwama, 1991). 따라서 변화된 환경조건에 따른 생리학적 보상과 적응을 위해 필요한 에너지 요구량을 맞추기 위해, 최종적으로 신경계와 내분비계

*Corresponding author: dykang@hotmail.com

조절에 의한 적응 과정에 돌입하게 된다.

이러한 연결 현상에는 직접 관여된 지표 인자들이 존재하며, 그 중 1차적으로 제시되는 것은 어류의 두신(head kidney) 조직에서 만들어지는 스트레스 지표 호르몬인 코티졸(cortisol)이란 물질이다. 이 호르몬의 스트레스 관련성은 이미 많은 연구자들에 의해 밝혀진 바 있다. 그러나 월동기 한파가 일어나는 조건에서 보고된 사례는 드물다. 또한 최근에는 만성 스트레스 상태에서 생체대사 활성화와 관련되어 갑상선에서 생성되는 갑상선호르몬(thyroid hormones)이 내분비적 대사 활성화 지표 물질로 활용될 수 있음을 일부 연구자들이 주장하고 있다(Parker and Specker, 1990; Choubey and Pandey, 1993; Pavlidis et al., 1999; Gaylord et al., 2001). 이 호르몬의 스트레스 내분비적 관련성은 사육 수온과 상관없는 여타 인자들에 의해 발생하는 스트레스 조건과 계절적 수온 변화에 의한 스트레스 상황에서 확인된 것으로, 월동기 한파 발생에 의한 단기 저수온 충격에 따른 스트레스 상태에서 조사된 연구는 찾아 볼 수 없다. 따라서 월동기 한파 조건에서 단기 수온 급변에 따른 내분비적 대사 정보는 여전히 부족하다. 한편 혈액 생화학적인 면에서는 스트레스를 회복하기 하기 위해 요구되는 에너지 생산과 관련하여 일시적으로 나타나는 저단백혈증(hypo-proteinemia) 및 고혈당증(hyperglycemia)을 응용해, 혈중 단백질 및 글루코즈 농도를 생리학적 스트레스 반응 조사 시에 신뢰도가 높은 정밀 지표로서 사용하고 있으며, 건강도와 관련지어 간 기능성 대사효소인 ALT (alanine aminotransferase) 및 AST (aspartate aminotransferase)를 스트레스 지표로 이용하기도 한다. 하지만 어류의 경우 봄철 또는 여름철 고수온기에 갑자기 나타나는 냉수대 영향에 관한 연구의 일환(Chang et al., 1999; Park et al., 1999)으로 진행된 저수온 충격 실험에서 확인된 것으로, 월동기 한파에 의한 단기 저수온 충격에 따른 스트레스 상태에서 나타나는 현상과 관련된 연구 자료는 찾아 보기 힘든 실정이다.

숭어류(가숭어 *Mugil haematocheilus*와 참숭어 *Mugil cephalus*)는 한국의 산업적 중요 어종으로 생산량 측면에서 넙치, 조피볼락, 참돔에 이어 네 번째로 많이 생산되는 품종으로 2005년도를 기준으로 천해어류양식 총 생산량 81,437 MT 중 5,500 MT를 차지한다(해양수산통계연보, 2006). 이렇게 산업적으로 중요한 어종인 가숭어는 한국의 전 연안에 분포하며, 서남해안을 중심으로 양식이 시행되고 있으며, 특히 서해안의 경우 축제식 양식장을 활용한 가숭어 양식이 이루어지고 있다. 이와 같은 축제식 가숭어 양식의 경우, 월동기의 낮은 겨울철 수온으로 어체의 면역기능과 건강도 약화로 인한 영양성 질병이 종종 나타나며, 또한 1월과 2월 사이 나타나는 기습 한파로 인해 실외 양식장 내 가숭어가 집단 폐사하는 일이 종종 발생함으로써, 양식 어가에 경제적 손실을 입히고 있는 실정이다. 특히 수심이 얇고, 물의 유동이 작은 축제식 양식장의 경우 그 피해는 더욱 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 한파에 의한 서식 수온의 급격한 변화는 사육 어류에게는 엄청난 스트레스로 작용하여, 순간적인 체대사 및 항상성 붕괴로 이

어져 성장과 생존에 막대한 악영향을 주는 것으로 추정된다. 하지만 한파의 영향에 의한 양식 어류의 생체대사 반응 과정에 대한 이해가 부족하며, 관련 연구 자료는 찾아보기 힘들다. 국내의 경우에는 일부 연구자들에 의해 봄과 여름철 동해안 냉수대 발현에 따른 수온 급강하 영향에 관한 생리학적 연구 보고(Park et al., 1999; Chang et al., 1999)가 일부 알려져 있지만, 동절기 한파와 관련된 어류 생리학적, 내분비학적 연구 보고는 찾아보기 힘들다.

그러므로 본 연구는 양식산 가숭어 *M. haematocheilus*를 대상으로, 월동기 한파 상황과 유사하게, 단기간 사육수의 급격한 수온 하강(저수온 충격)이 어체의 혈중 생화학 및 내분비적 생리현상에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고, 그로 인한 사육 군집의 생존력은 단기간에 어느 정도 충격을 받는 지 알아보고자 한다.

재료 및 방법

실험어 및 사육시설

실험어는 국립수산물과학원 서해수산연구소에 실내 수조에서 사육 중인 가숭어(전장 33.9 ± 0.4 cm, 체중 429.1 ± 15.8 g, $n=30$)로서, 1주간 수온 10°C 에서 예비 사육하여 안정시킨 다음, 실험에 이용하였다. 실험 기간은 2006년 1월 9일부터 1월 11일까지 약 50시간이었으며, 동 기간동안 실험어에게 먹이는 공급되지 않았다. 실험 수조는 1톤의 FRP 수조를 이용하였으며, 생존율을 파악하기 위해 3반복으로 실험을 실시하였다. 실험개시 이전에는 사육수 환수없이 지수식 상태에서 히터를 이용해 10°C 로 유지하여 주었으며, 실험 개시와 더불어 일정량의 자연해수(약 1°C)와 더불어 냉각해수(-1.2°C)를 주입하여, 실험 수온으로 낮추었으며, 최종적으로 -1.2°C 까지 수온을 낮추어 실험을 실시하였다. 이때 pH는 7.4 ± 0.3 였으며, 용존산소량은 5 ppm 이상이 되도록 조절하였다. 또한 실험어의 안정과 도피방지를 위하여 차광막을 설치하였다.

실험방법

실험 수온은 Fig 1과 같이, 실험 개시 시 월동기 가온 수온인 10°C 에서 시작하여 12시간 7.6°C , 24시간 5.5°C , 48시간에는 가온을 하지 않은 자연해수 수온인 2.5°C 로 완만하게 수온을 하강시켰으며, 이후 48시간 37분부터 50시간 9분까지는 $2.0^\circ\text{C} \rightarrow 1.8^\circ\text{C} \rightarrow 1.5^\circ\text{C} \rightarrow 1.0^\circ\text{C} \rightarrow 0.5^\circ\text{C} \rightarrow -0.1^\circ\text{C} \rightarrow -0.5^\circ\text{C} \rightarrow -0.6^\circ\text{C} \rightarrow -1.0^\circ\text{C} \rightarrow -1.2^\circ\text{C}$ 로 급격하게 수온을 낮춰 주었다. 실험어는 채혈을 위해 실험개시 24시간 전부터 절식시켰으며, Fig. 1에 제시한 수온 변동점에서, 해파린 처리 주사기를 이용해 마취제를 사용하지 않은 상태에서 1분 이내에 가숭어의 미부동맥으로부터 혈액을 채취하였다. 각 실험에서 채취한 혈액은 원심분리(12,000 rpm, 5분)하여 혈장을 추출한 다음, ALT, AST, GLU (glucose), TP (total protein), 전해질(Na^+ , K^+ , Cl^-), 갑상선호르몬(thyroid hormones: THs) 및 코티졸(cortisol) 분석 시까지 -70°C 에서 보관하였다.

혈장 ALT (GPT/ALP-III), AST, GLU, TP 및 전해질은 FUJI

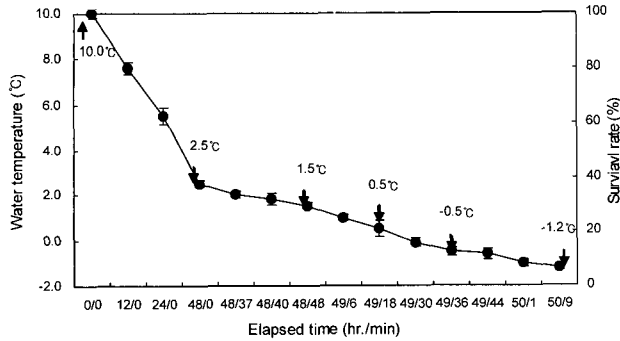


Fig. 1. The pattern of acute temperature change in the experiment. Arrows indicate the blood sampling time.

DRI-CHEM 3500 *i* 전용 분석용 kit. 슬라이드를 사용하여 FUJI DRI-CHEM 3500 *i* (Fujifilm Co., Japan)에서 분석하였다. 이때 사용된 ALT의 kit 슬라이드는 측정범위 10-1000 u/L의 GPT/ALP-PⅢ (Fujifilm Co., Japan)을 사용하였으며, AST의 경우 측정범위 10-1000 u/L의 GOT/AST-PⅢ (Fujifilm Co., Japan), TP는 측정범위 2.0-11.0 g/dL의 TP-PⅢ (Fujifilm Co., Japan), GLU는 측정범위 10-600 mg/dL의 GLU-PⅢ (Fujifilm Co., Japan)를, 그리고 전해질은 Na⁺ 측정범위 75-250 mEq/L, K⁺ 측정범위 1.0-14.0 mEq/L, Cl⁻ 측정범위 50-175 mEq/L인 전용 슬라이드 Na⁺-K⁺-Cl⁻ (Fujifilm Co., Japan)를 사용하였다. 한편 실험용 황복의 혈중 total L-thyroxine (TT₄), total 3,5,3'-triiodo-L-thyronine (TT₃), free L-thyroxine (FT₄), free 3,5,3'-triiodo-L-thyronine (FT₃) 및 cortisol 분석은 각각 Wallac DELFIA 전용 kit을 이용해 fluorometer인 Victor 2D (PerkinElmer, USA)에서 chemiluminescent immunoassay에 의해 실시하였다. 이때 TT₄, TT₃, FT₄ 및 FT₃ 및 cortisol의 일간변동 C.V. (interassay coefficient of variation)은 TT₄=2.98, TT₃=1.15, FT₄=2.71, FT₃=2.63였으며, 일내변동 C.V. (intraassay coefficient of variation)은 TT₄=2.04, TT₃=2.22, FT₄=3.07, FT₃=2.57였다.

통계처리

각 실험에서 얻어진 자료에 대한 값의 유의차 유무는 SPSS-통계패키지를 이용해 신뢰도 95%에서 ANOVA 및 Duncan's multiple range test에 의해 판정하였다.

결 과

생존율

한파 모델에 의해 동절기 평균수온 10°C에서 실험을 시작하여, 50시간 -1.2°C로 급강하 시켰을 경우 생존율을 살펴보면 다음과 같다. 실험 시작 후 48시간에 2.5°C로 수온을 하강시켰을 경우, 이 기간 동안 수온하강에 따른 폐사개체는 관찰되지 않았으며, 그에 따른 생존율 변화는 없었다. 이후 1시간 44분 만에 수온을 2.5°C (48시간)에서 -0.6°C (49시간 44분)까지 감소시켰을 때, 사육개체들의 활동성이 감소되었지만 역시 폐사개체들은 나타나지 않았다. 그로부터 17분 이후 수온을 -0.4°C

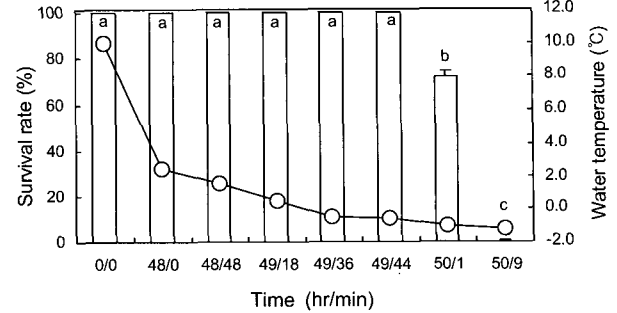


Fig. 2. Change of survival rate following an acute down regulation of water temperature. Different letter on the bar means significant difference at the levels of 5%.

□, Survival rate; ○, water temp.

더 낮추어 -1.0°C로 하강시키자, 실험 개체들 중 약 28%가 폐사하는 것으로 확인되었으며, 8분 뒤 -0.2°C 더 낮추어 -1.2°C에 이르자 전량 폐사하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 2).

생화학적 변화

혈장 AST의 경우 실험 개시 10°C에서 35±6.7 u/L으로 나타났지만, 48시간 뒤 2.5°C에서는 662.4±186.9 u/L으로 유의하게 증가한 것을 알 수 있으며, 이후 -0.5°C까지 400-600 u/L의 농도를 나타내어 여전히 높은 농도를 나타내었다. 단지 실험 종료시점인 -1.2°C에 이르러서는 AST농도가 182.2±84.0 u/L으로 다소 낮아져, 실험 개시단계보다는 여전히 높은 것을 알 수 있었다. ALT의 경우 실험 개시 10°C에서 5.3±0.9 u/L으로 나타났지만, 48시간 뒤 2.5°C에서는 약 4배 증가한 22.4±9.7 u/L으로 유의하게 증가한 것을 알 수 있으며, 이후 1.5°C에는 27.0±4.2 u/L으로 다시 증가하는 경향을 보였다. 하지만 수온이 0.5°C에 이르자 실험 개시 수준인 7.6±2.0 u/L으로 유의하게 감소하여, 실험 종료시점인 -1.2°C에 이르러서는 3.4±0.4 u/L로 안정을 찾아가는 것으로 나타났다. 한편 TP의 경우 실험개시 후 별 차이를 찾아 볼 수 없었으며, GLU는 10°C 실험 개시 62.7±6.2 mg/dL로서 -0.5°C 66.0±19.5 mg/dL까지 별 차이가 없었지만, 실험 종료시점인 -1.2°C에 이르러서만 111.8±25.6 mg/dL로 유의하게 증가하는 것을 알 수 있었다 (Fig. 3). 한편 전해질 (Na⁺-K⁺-Cl⁻)의 경우 실험 기간 동안 어떠한 변화도 관찰되지 않았다 (Fig. 4).

코티졸 및 갑상선호르몬 변화

혈장 코티졸의 경우 실험 개시 10°C에서 48.5±4.8 ng/mL으로 나타났지만, 48시간 뒤 2.5°C에서는 173.7±20.1 u/L으로 급격하게 증가하였으며, 1.5°C 122.9±15.2 ng/mL로 다소 감소하였다가, 0.5°C와 -0.5°C에 218.0±40.6 ng/mL와 204.9±54.5 ng/mL로 실험 기간 중 가장 높은 값을 나타내었다. 이후 실험 종료 시점인 -1.2°C에 이르러서는 98.7±8.9 ng/mL 유의하게 낮아져 있었지만, 실험 개시단계보다는 여전히 높은 수준을 나타내었다 (Fig. 5).

혈장 갑상선호르몬은 TT₄, TT₃, FT₄, FT₃와 같이 4가지로

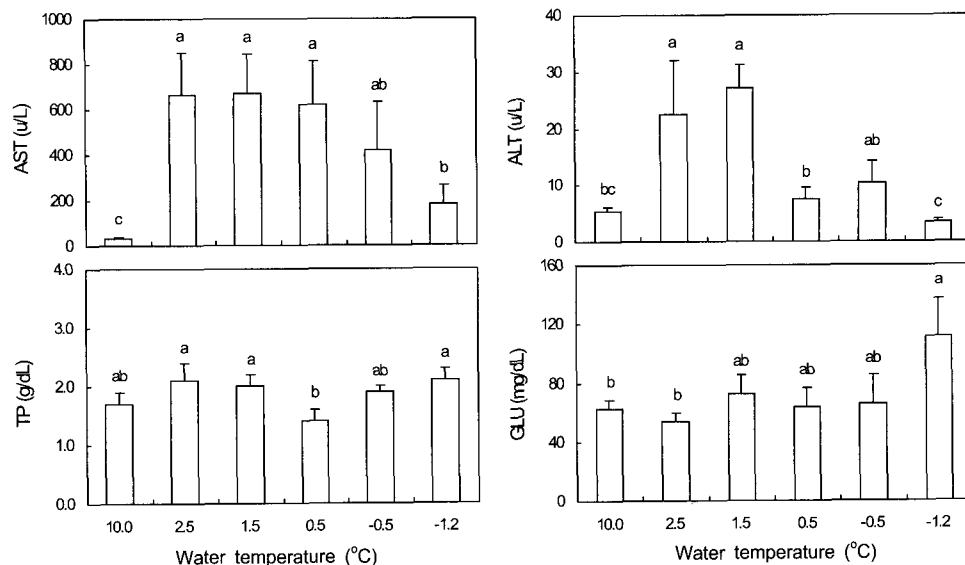


Fig. 3. Variations of AST, ALT, TP and GLU in plasma of mullet, *M. haematocheilus*, following an acute down regulation of water temperature. Different letter on the bar means significant difference at the levels of 5%.

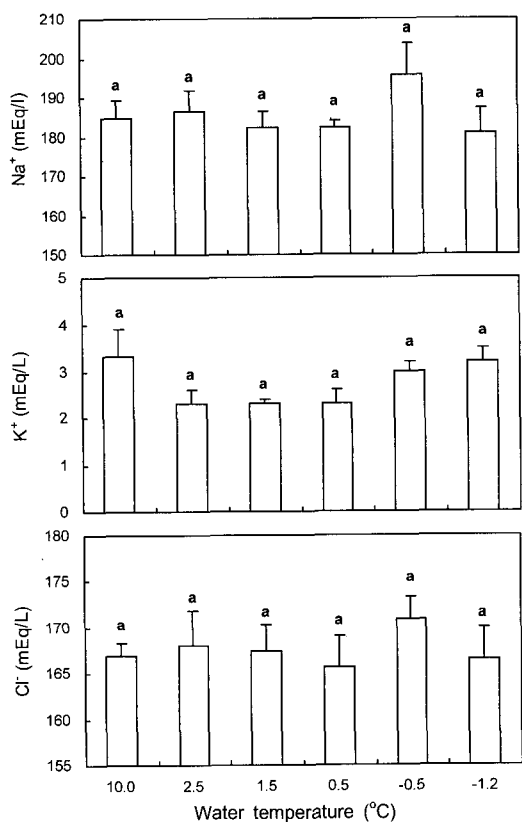


Fig. 4. Variations of Na⁺, K⁺, Cl⁻ in plasma of mullet, *M. haematocheilus*, following an acute down regulation of water temperature. Different letter on the bar means significant difference at the levels of 5%.

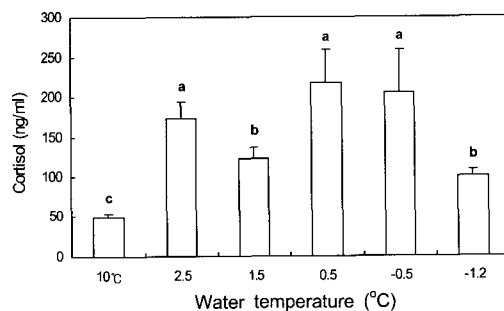


Fig. 5. Variations of cortisol in plasma of mullet, *M. haematocheilus*, following an acute down regulation of water temperature. Different letter on the bar means significant difference at the levels of 5%.

60.9±11.6 ng/dL으로 나타났지만, 48시간 뒤 2.5°C에서는 246.6±85.9 ng/dL으로 급격하게 증가하였으며, 1.5°C 157.7±44.5 ng/dL로 다소 감소하였다가, 0.5°C에 441.0±161.7 ng/dL로 실험 기간 중 가장 높은 값을 나타내었다. 이후 -0.5°C에 324.1±98.5 ng/dL로 감소하기 시작하여, 실험 종료 시점인 -1.2°C에 이르러서는 110.7±10.0 ng/dL로 실험 개시 수준 근방까지 떨어지는 경향을 나타내었다. TT₃의 경우 실험 개시 10°C에서 161.6±22.5 ng/dL으로 나타났지만, 48시간 뒤 2.5°C에서는 37.1±12.7 ng/dL으로 유의하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 이후 1.5°C에서 -1.2°C까지 40.3-44.5 ng/dL 정도의 낮은 혈장 수준을 지속적으로 유지하였다 (Fig. 6). FT₄의 경우, TT₄와 유사한 경향을 나타내었다. 실험 개시 10°C에서 1.23±0.15 ng/dL으로 나타났지만, 48시간 뒤 2.5°C에서는 1.80±0.34 ng/dL, 1.5°C 1.61±0.26 ng/dL로 다소 감소하였다가, 0.5°C에 2.65±0.76 ng/dL로 실험 기간 중 가장 높은 값을 나타내었다. 이후

나누어 구분해 보았다. 우선 TT₄의 경우 실험 개시 10°C에서

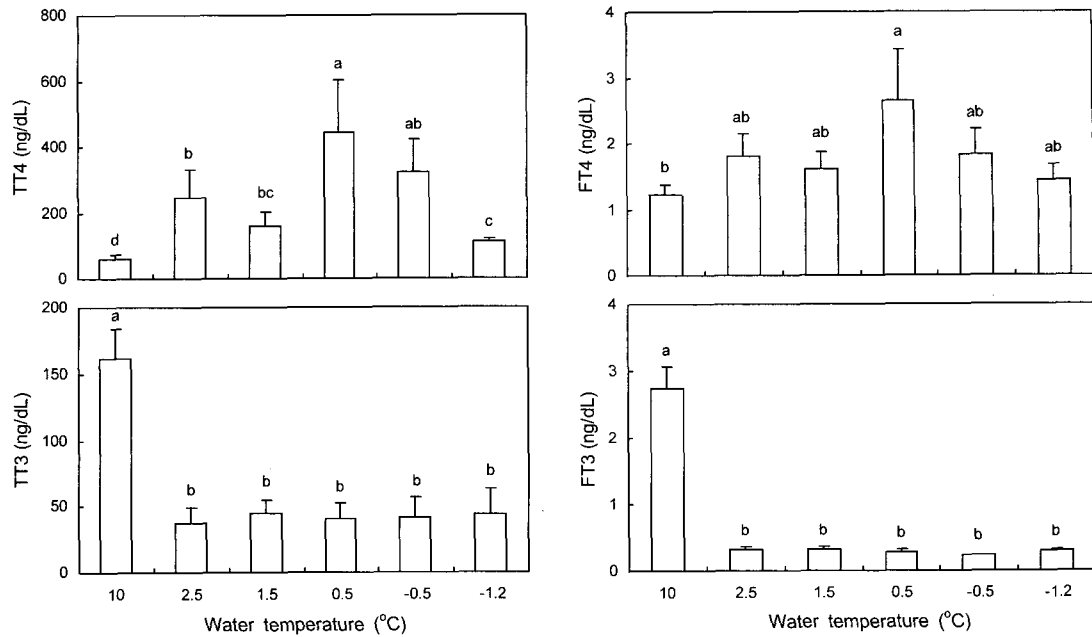


Fig. 6. Variations of thyroid hormones in plasma of mullet, *M. haematocheilus*, following an acute down regulation of water temperature. Different letter on the bar means significant difference at the levels of 5%.

-0.5°C에 1.82 ± 0.39 ng/dL로 감소하기 시작하여, 실험 종료 시점인 -1.2°C에 이르러서는 1.45 ± 0.22 ng/dL로 실험 개시 수준으로 떨어지는 경향을 나타내었다. FT₃의 경우 역시, TT₃와 유사한 경향으로 실험 개시 10°C에서 2.75 ± 0.31 ng/dL으로 나타났지만, 48시간 뒤 2.5°C에서는 0.31 ± 0.05 ng/dL으로 유의하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 이후 1.5°C에서 -1.2°C까지 $0.24-0.32$ ng/dL 정도의 낮은 혈장 수준을 지속적으로 유지하였다 (Fig. 6).

고찰

우리나라 연안 수온의 계절 변화는 해산 양식 어류의 생리적 대사 및 건강도에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 특히 서해 중부해역의 동계 저수온기는 친해 양식 어류들에게는 생존을 위협하는 도전의 시기로 받아들일 수 있다. 하지만 아직까지 국내 양식 어류에 있어 성장대사가 정지하는 극한 수온에서 생존을 이어나가야 하는 경우, 이들 생체 내에서는 어떤 생리적 반응이 나타나는지에 관한 연구결과는 찾아보기 힘들다. 특히 생리활성호르몬의 내분비적 기전 및 어체 건강도 측면에서 동계 한파 수온 조건이 어떤 작용을 나타낼지에 의문이다. 또한 우리나라 중서부 연안의 양식 어류 월동을 위해, 이 시기에 한파가 불어 닥쳤을 경우 양식 어류의 생체활성 성과 건강도에 미치는 영향에 대한 연구 자료가 요구된 적이 없다.

현재 국내 가숭어 양식은 우리나라 서남해안을 중심으로 가두리 또는 육상 축제식 등에서 이루어지고 있다. 특히 가두리나 축제식으로 이루어지는 실외 양식의 경우, 자연산 활어

들처럼 계절 변화에 의한 서식 수온 변화에 따른 성장과 생존이 영향을 받는 계절적 활성변이 시기에 직면할 가능성이 높다. 하지만 아직까지 가숭어의 경우, 어느 정도 수온이 성장과 생존의 임계치인지에 관한 연구 자료가 없어, 겨울철 한파에 대비하기 위한 생물학적 정보가 전혀 제공되지 못하고 있는 실정이다. 단지 가숭어가 저온에 강하다는 점 때문에 다른 어종과 달리 급격한 저온수 충격에 상대적으로 강한 내성과 생리 활성을 나타낼 것으로 추정하고 있다. 따라서 월동기 및 한파 시기에 가숭어의 생리 활성은 어떻게 변하며, 어체 건강도 및 체대 대사활성 호르몬에는 어떤 변화를 유발할 지에 관한 의문이 남는다. 그러므로 본 연구에서는 양식산 가숭어를 이용해 동계 한파 모델 적용을 위해 겨울철 수온을 급격히 하강시켰으며, 이때 가숭어의 스트레스 반응을 관찰하기 위해 생리학적 활성 및 생체활성 호르몬(코티졸 및 갑상선 호르몬) 대사과정을 조사하였다. 이를 기초로 월동기 한파에 따른 임계 저수온과 생물학적 반응 등에 관한 정보를 제공하고자 하였다.

본 연구에서 겨울철 저수온 충격에 따른 가숭어 생존율을 조사해 본 결과, 실험 개시 수온인 10°C에서부터 -0.6°C(실험 시작 후 49시간 44분)까지 폐사 개체들은 나타나지 않아 생존율의 변화는 찾아 볼 수 없었다. 그러나 17분 이후 수온을 -0.4°C 더 낮추어 -1.0°C로 하강시키자, 실험 개체들 중 약 28%가 폐사하는 것으로 확인되었으며, -0.2°C 더 낮추어 -1.2°C에 이르자 전량 폐사하는 것으로 보아, 가숭어의 생존율변에서 저온 임계치는 -0.6°C인 것으로 확인되었다.

혈액 생리학적 측면에서는 AST, ALT, TP, GLU 및 전해질

(Na^+ , K^+ , Cl^-)를 살펴보았다. 우선 AST와 ALT는 사람과 동물에 있어 대부분 간 세포내에 존재하여 간 기능 검사지표로서 활용되고 있는 것으로, 많지는 않지만 신장, 심장, 근육세포에서도 존재하는 것으로 알려져 있다. 이들 효소들은 단기간에 손상 또는 무리가 가해지거나, 장기간에 걸쳐 서서히 간 세포가 파괴될 경우 혈액 속에 해당 효소들이 유출되어 수치가 올라가게 되어 혈중에서 지속적으로 높은 수치로 나타난다. 또한 단기간 과격한 운동에 의한 근 활동 또는 스트레스성 쇼크에 의한 근 활동으로 인해 근육세포에 무리가 갈 경우 세포내 효소가 혈액으로 유출되어 수치가 올라 갈 수 있으나, 이것은 혈중에서 일시적으로 높은 수치로 나타났다가 안정을 되찾으며 정상 수준으로 회복되는 것으로 알려져 있다. 본 연구 결과 AST는 수온이 10°C 이하로 낮아지자 급격히 증가하다가 -0.5°C 이후부터 다시 정상 수준으로 감소하는 경향을 보였으며, ALT의 경우 역시 10°C 이하로 낮아지자 급격히 증가하다가, 0.5°C 이하에서 다시 정상 수준을 회복하는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 현상은 저수온 충격이 직접적으로 간 기능을 떨어뜨려 나타난 현상이기 보다, 단기간 저수온 충격에 의한 스트레스성 근 활동이 동반된 현상으로 AST와 ALT가 동반 상승했다가 정상 수준으로 회복하는 것으로 추정해 볼 수 있다. 특히 급상승된 AST와 ALT 농도가 임계 저수온에 가까워질수록 정상 수준으로 감소되어 가는 현상은 저수온 마취효과로 짐작된다. 즉 마취성 저수온에 의한 어체의 근 활동의 감소 또는 정지가 일정수준 이하의 수온에서 나타날 것이며 이로 인해 수온충격에 의해 급상승된 AST와 ALT 수치가 정상 수준으로 회복되는 것으로 사료된다. 하지만 여기에 대한 구체적 증거를 제시하지 못한 아쉬움이 남아, 차후에 이 부분에 대한 좀 더 세밀한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

한편 본 연구에서 조사한 TP, GLU 및 전해질들의 경우 다른 연구들과 달리 본 연구에서는 일정한 경향이 없이 정체상을 나타내고 있었다. 즉 스트레스를 극복하기 위해 요구되는 과다한 생체 대사 에너지 소모를 위한 근 단백질 분해에 따른 혈중 단백질 농도 상승, 글리코겐 분해대사 (glycogenolysis)와 글루코스 신생합성 (gluconeogenesis)의 효소활성이 높아짐 (Barton and Iwama, 1991; Davis et al., 1985; Pickering 1989)에 따른 고혈당 증상 (Robertson et al., 1987; Barton and Schreck, 1987) 및 대사유지 에너지 부족에 의한 삼투조절 균형의 파괴 및 전해질 교란에 의한 체내 항상성 붕괴는 전혀 관찰할 수 없었다. 단지 GLU가 실험 종료시 대부분 개체들의 폐사상태에서 실험 개시 시점보다 높은 수치를 나타낸 것이 특이한 점이다. 이러한 점들은 현재까지 보고된 일반 급성 스트레스 반응과 다른 결과로 사료된다.

다음으로 스트레스 지표호르몬인 코티졸 반응을 살펴보기로 하겠다. 저수온 충격에 따른 스트레스 반응에 충실하게 반응하는 것으로 알 수 있었다. 실험 개시 수온인 10°C 와 달리 2.5°C 수온에서 코티졸 농도의 급격한 상승이 나타났으며, 이 농도는 0.5°C - -0.5°C 에서 최대치로 나타났다. 이후 실험

종료 시점인 -1.2°C 에 이르러서는 다소 감소하는 경향을 보이기 했지만, 여전히 실험 개시단계보다는 여전히 높은 수준으로 나타나, 저수온 충격이 지속적으로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 한가지 주목해야 할 부분이 있다. 일반적으로 생체 스트레스 지표인 코티졸과 글루코스의 농도는 서로 상관관계를 나타내면서 혈중에서 변화되어가는 것으로 알려져 있다. 하지만 앞서 설명한 것처럼 GLU는 저수온 충격에 따른 스트레스성 반응으로 해석할 만한 혈중 수치 변화는 찾아 볼 수 없었다. 스트레스성 대사 지표로 이용된 혈중 글루코스 농도는 본 연구에서 주로 정체현상을 나타내었으며, 실험 종료 시점인 -1.2°C 에 이르러서만 유의하게 높은 값을 나타내었다. 그러나 코티졸의 경우에는 저수온 충격에 따른 스트레스에 즉각적이면서도 지속적인 반응을 나타내어 상반된 모습을 보인 것이다. 따라서 스트레스에 의해 코티졸 농도 상승에 의한 글루코스 농도의 증가현상이 동반되지 않는 것에 대해서는 많은 의문점이 제기된다. 이러한 현상의 원인으로 추정해 볼 수 있는 대사과정으로는 첫째 에너지 소비량의 증가에 따른 혈중 글루코스를 에너지원으로 이용할 결과로 추정해 볼 수 있다. 둘째로는 일반적으로 급성스트레스에서는 분비된 카테콜아민과 코티졸의 단백질 이화작용으로 인하여 각각 glycogenolysis와 gluconeogenesis 활성 증가로 (Barton and Iwama, 1991; Davis et al., 1985; Pickering, 1989) hyperglycemia이 나타난다 (Robertson et al., 1987; Barton and Schreck, 1987; Ishioka, 1980). 그러나 본 연구에서 나타난 글루코스 농도의 감소 또는 정체 현상은 수온 하강시 Q_{10} 의 법칙에 따른 생체대사 저하에 의한 글루코스 생성 및 소비속도가 낮아지는 반면 스트레스에 의한 글루코스 생성 및 소비속도가 높아지므로 서로 상쇄효과에 의해 나타난 결과로도 생각해 볼 수 있다. 이러한 결과는 이미 Ishioka (1980), Park et al. (1999) 및 Chang et al. (1999)에 의해서도 보고된 것으로 보아, 수온에 따른 스트레스 반응에 있어 GLU를 대사지표로 활용하는 것에는 어려움이 있을 것으로 사료된다.

한편 갑상선호르몬은 체대사 활성 지표 호르몬으로 알려져 있다. 그러나 어류에 있어 이 호르몬의 생리학적 역할에 대해서는 여전히 구멍이 미흡하며, 어떤 외부 또는 내부 인자들에 의해 갑상선호르몬의 활성이 영향을 받는지에 정확하게 구명되어 있지는 않다. 단지 온도변화 (Parker and Specker, 1990), 먹이공급 (Gaylord et al., 2001), 주야리듬 (Pavlidis et al., 1999), 계절변화 (Choubey and Pandey, 1993) 등에 따라 혈중 농도가 변화한다는 것이 보고 된 바 있으며, 아직 어떤 상호 연관성에 의해 기작이 이루어지는지 확인되지는 않는다. 특히 계절적 변이와 관련되어 갑상선호르몬의 활성 변동이 일어난다는 사실이 일부 연구자들에 의해 보고된 바가 있지만 (Choubey and Pandey, 1993), 이것은 생체 내 성호르몬의 연주기 변화에 의한 것으로 생식현상과 관련지어 보는 시각이 지배적이다 (Kang et al., 1998; Kwon et al., 1999). 그러나 타 연구 결과들을 볼 때 이러한 논리는 계절적 수온 변화를 간과하였기에 가능한 논리인 것으로 사료된다. 즉 갑상선호르몬의 계절 변화는

성호르몬의 연주기 변화와 관련되어 있기보다는 서식지 수온의 계절적 변화에 의해 보다 직접적으로 영향을 받을 가능성이 높으며 (Parker and Specker, 1990), 그렇지 않으면 서식수온 변화와 연동한 체대사량 변동에 따른 2차적 영향에 의한 것을 배제할 수 없다. 이러한 현상은 성호르몬의 영향 아래에서 이루어지는 것이 아니라, 계절적 수온 변화가 어류의 대사량 변화를 유도하고, 그로인해 갑상선의 분비 활성화에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 여전히 갑상선 활성화가 계절적 수온변화에 따른 직접적인 영향인지 아니면 수온에 의해 감소된 대사량 저하에 의한 2차적인 영향인지에 관해서는 여전히 의문이 남는다. 이에 본 연구에서는 동절기에 먹이를 공급하지 않는 상태에서 수온을 극한까지 감소시켰을 경우, 갑상선호르몬 활성이 어떻게 변하는지를 조사하여 수온이 직접적으로 갑상선 활성화에 영향을 미치는지에 관한 궁금증을 해결하고자 하였다.

우선 TT₄와 FT₄는 수온 10°C에서 0.5°C까지 수온이 하강함에 따라 상승하는 경향을 나타내었으며, 이후 -0.5°C부터 실험 종료 시점인 -1.2°C까지는 실험개시 수준으로 감소하는 경향을 나타내었다. TT₃와 FT₃의 경우는 혈장 T₄ 계열과 반대로 실험 개시 48시간 뒤 2.5°C에서부터 유의하게 감소하여, 실험 종료 시까지 지속적으로 유의하게 낮은 값을 나타내었다. 이와 같이 먹이를 공급하지 않은 상태에서 가승어에게 저수온 충격을 제공하였을 경우, 동일 계열 내에서는 활성 변이를 찾아볼 수 없었다. 즉 혈장 T₄ 계열과 T₃ 계열 모두 total 형태이거나 free 형태이든 갑상선호르몬의 원료로서 적어도 저수온 충격에 따른 변동성은 동일하다는 것은 흥미로운 사실이다. 그러나 계열 간의 경우에는 변동성 경향에는 뚜렷한 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 즉 갑상선호르몬의 원료적인 혈장 T₄ 계열은 코티졸과 같은 경향으로 2.5°C-0.5°C 수준의 저수온 충격에서는 일시적으로 상승하다가 0°C 이하로 수온이 낮아질 경우 다시 제자리로 돌아오는 경향을 보였다. 그에 반해 대사에 직접적으로 관여하는 혈장 T₃ 계열은 독립적인 형태로 활성이 나타나는 것을 알 수 있었다.

그럼 이런 현상은 왜 일어나는 것일까? 이를 위해서는 우선 갑상선 호르몬 생성에 있어 대사 경로에 대한 이해가 우선되어야 할 것으로 본다. 일반적으로 알려져 있는 갑상선호르몬은 T₂, T₃, rT₃, T₄와 같이 크게 4종류로 나뉘볼 수 있다 (Eales and Brown, 1993). 이 중에서 경골어류에서 생리활성을 지닌 것은 T₃와 T₄인 것으로 알려져 있으며, 최근에 와서는 rT₃가 특정 부위에서 생리활성을 나타내는 것이 보고되고 있다. 그러나 여전히 학계에서는 T₃와 T₄만을 생리활성 호르몬으로 인정하고 있으며, 그 중에서도 T₄를 원료로 하여 간과 신장에서 deiodinase를 통해 생성되는 T₃가 실질적인 생리 활성형 호르몬인 것으로 일부 연구자들에 의해 추정되고 있다 (Eales and Brown, 1993). 이러한 대사합성 경로를 본 연구결과와 연결시켜본다면, 10°C에서 0.5°C까지의 급격한 수온 하강은 가승어에게 급성스트레스를 제공함과 동시에 저 수온에 의한 대사량 감소를 유도하였을 가능성이 높다. 따라서 체대사를

조절하는 갑상선 호르몬 중 실질적인 생리활성호르몬인 T₃ 필요성은 낮아질 것으로 추정되며, 그로인해 T₃ 합성을 위한 5'-deiodinase에 의한 deiodination 대사과정은 약화될 수 밖에 없을 것으로 본다. 따라서 본 연구 결과와 같이 2.5°C 이하에서는 유의하게 낮은 혈중 T₃ 농도가 관찰되었으며, 체내 T₃ 요구량 감소는 자연적으로 체내 T₄ 소비 감소로 이어져 혈중 T₄ 농도가 높게 나타날 수 있을 것으로 본다. 따라서 본 연구의 갑상선 호르몬의 농도변화가 직접적인 스트레스의 영향보다는 저수온에 의한 대사량 감소에 의한 영향이 더 크지 않을까 추론해 본다. 물론 스트레스, 코티졸 및 혈중 갑상선호르몬 농도 변화 간에 직접적인 관계를 배제할 수는 없지만, 아직 스트레스 상태에서 코티졸과 갑상선호르몬의 직접적인 연결고리를 아직 학계에서 찾아보기 힘들기 때문에 여기서는 논의로 배제하고자 한다.

이상으로 본 연구에서는 양식산 가승어를 대상으로 동계 한파 모델에 의한 단기간 저수온 충격이 생체에 어떤 영향을 미치는지를 확인해 보았다. 그 결과 실시간의 수온 하강에 따른 스트레스 관련 생체지수의 변화와 코티졸 및 갑상선과 같은 내분비적 변동이 일어나는 것을 확인할 수 있었으며, 한파에 따른 대량 폐사 가능성은 생존 임계수온 -0.6°C 이하에서 일어날 수 있기 때문에, 0°C 이하의 수온조건이 일어날 경우 월동기 축제식 양식 현장에서는 이에 대한 적극적인 대처가 이루어져야 할 것으로 본다.

사 사

본 연구는 2004년부터 2007년까지 한국해양수산기술진흥원 수산특정연구개발 과제 (F10401006A210000110)에 의해 수행된 결과로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Barton, B.A. and C.B. Schreck. 1987. Influence of acclimation temperature on interrenal and carbohydrate stress responses in juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Aquaculture*, 62, 299-310.
- 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. *Ann. Rev. Fish. Dis.*, 3-26.
- Chang, Y.J., M.R. Park, D.Y. Kang and B.K. Lee. 1999. Physiological responses of cultured olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) on series of lowering seawater temperature sharply and continuously. *J. Kor. Fish. Soc.*, 32, 601-606.
- Choubey, B.G. and P.K. Pandey. 1993. Seasonal changes in oxygen consumption in relation to environmental factors and ECH of thyroid gland in the fish *Clarias*

- batrachus* (L.) female. Environ. Ecol., 11, 243-245.
- Davis, K.B. and N.C. Parker. 1990. Physiological stress in striped bass: effect of acclimation temperature. Aquaculture, 91, 349-358.
- Davis, K.B., P. Torrance, N.C. Parker and M.A. Suttle. 1985. Growth, body composition, and hepatic tyrosine aminotransferase activity in cortisol fed channel catfish, *Ictalurus punctatus* Rafinesque. J. Fish Biol., 27, 177-184.
- Eales, J.G. and S.B. Brown. 1993. Measurement and regulation of thyroidal status in teleost fish. Rev. Fish Biol. Fish., 3, 299-347.
- Gaylord, T.G., D.S. MacKenzie and D.M. III 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.
- Ishioka, H. 1980. Stress reactions in the marine fish. I. Stress reactions induced by temperature change. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., 46, 523-532.
- Kang, D.Y., Y.J. Chang, Y.C. Shon and K. Aida. 1998. Changes in plasma levels of thyroid and sex steroid hormones in rockfish (*Sebastes schlegeli*) during maturation and parturition periods. J. Kor. Fish. Soc., 31, 574-580.
- Kwon, J.Y., Y.J. Chang, Y.C. Sohn and K. Aida. 1999. Plasma and ovarian thyroxine levels in relation to sexual maturation and gestation in female *Sebastes inermis*. J. Fish Biol., 54, 370-379.
- Park, M.R., Y.J. Chang and D.Y. Kang. 1999. Physiological response of the cultured olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) to the sharp changes of water temperature. J. Aquacult., 12, 221-228.
- Parker, S.J. and J.L. Specker. 1990. Salinity and temperature effects on whole-animal thyroid hormone levels in larval and juvenile striped bass, *Morone saxatilis*. Fish Physiol. Biochem., 8, 507-514.
- Pavlidis, M., M. Paspatis, M. Koistinen, T. Paavola, P. Divanach and M. Kentouri. 1999. Diel rhythms of serum metabolites and thyroid hormones in red porgy held in different photoperiod regimes. Aquacult. Int., 7, 29-44.
- Pickering, A.D. 1989. Factors affecting the susceptibility of salmonid fish to disease. Rev. Freshwat. Biol. Assoc., 57, 61-80.
- Robertson, L., P. Thomas and C.R. Arnold. 1988. Plasma cortisol and secondary stress responses of cultured red drum (*Sciaenops cellatus*) to several transportation procedure. Aquaculture, 68, 115-130.
- Robertson, L., P. Thomas., C.R. Arnold and J.M. Trant. 1987. Plasma cortisol and secondary stress responses of red drum to handling, transport, rearing density, and disease outbreak. Prog. Fish-Cult., 49, 1-12.
- Ryan, S.N. 1995. The effect of chronic heat stress on cortisol levels in the Antarctic fish *Pagothenia borchgrevinki*. Experientia, 51, 768-774.
- Schreck, C.B. 1982. Stress and rearing of salmonids. Aquaculture, 28, 241-249.
- Woo, N.Y.S. 1990. Metabolic and osmoregulatory change during temperature acclimation in the red sea bream, *Chrysophrys major*: Implications for its culture in the subtropics. Aquaculture, 87, 197-208.

2007년 2월 13일 접수
2007년 8월 3일 수리