양식산과 방류산 조피볼락(*Sebastes schlegeli*)의 간장 중 해독 및 항산화 효소계의 비교

이지선 · 변희국 · 전중균*

국립강릉원주대학교 해양생물공학과

Comparison of Xenobiotic Metabolism and Antioxidative Status in Cultivated and Stocked Rockfish *Sebastes schlegeli*

Ji-Seon Lee, Hee-Guk Byun and Joong-Kyun Jeon*

Department of Marine Biotechnology, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

This study compared the composition and texture of muscle and levels of detoxification and antioxidant enzymes in the livers of stocked and cultivated rockfish *Sebastes schlegeli* released after the primary culture stage in Tongyoung, South Korea. The crude lipid content of muscle was significantly higher ($P<0.05$) in cultivated rockfish than stocked rockfish, while the texture did not differ significantly ($P>0.05$). The condition factor (CF) and hepatosomatic index (HSI) did not differ significantly and the growth of stocked and cultivated rockfish was similar. The levels of the detoxification enzymes cytochrome P450 (CYP) and Ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD) were significantly lower in the livers of stocked rockfish, perhaps because of their reduced exposure to xenobiotic compounds. In addition, stocked rockfish had a significantly ($P<0.05$) lower CAT and higher GR than cultivated rockfish, but similar levels of tGPx, SOD, GSH, and GSSG. The present study shows that the growth rates of stocked and cultivated rockfish are similar and that stocked rockfish are exposed to fewer xenobiotic compounds and less oxidative stress.

Key words: Stocked, Rockfish, Texture, Xenobiotic enzyme, Antioxidant enzyme

서 론

우리나라의 총 어업 생산량은 최근 몇 년간은 대략 300만 톤 전후이며, 그 중에서 천해양식어업 생산량은 1,300,000 톤 정도여서 총 어업 생산량의 약 40%를 조금 넘고 있으며, 품종별로는 어류가 40% 이상을 차지하고 있다. 특히 조피볼락의 경우, 일반해면어업에서 어획되는 양은 지난 1990년 500,000 톤을 넘었던 것이 이후 줄어들어 1995년에는 1,700 톤에 불과하였으나 최근 들어 늘어나면서 2010년에는 2,400 톤이 되었다. 하지만 천해양식 품종으로 조피볼락의 양식생산량은 해를 더 해감에 따라 늘어나고 있어 1995년의 985 톤에 비해 2010년에는 2만 톤을 상회함으로써 무려 28배가 넘는 신장세를 나타내었고, 생산량으로만 따지면 넙치류 다음으로 많은 양식어종이기도 하다(MOMAF, 2011). 한편, 우리나라에서는 1986년 이후 연안과 내수면에 수산생물종묘를 방류하여 수산자원의 증강을 도모하고 있고, 방류량은 참돔 등을 비롯하여 그 동안 58억 마리에 이르며, 특히 조피볼락은 볼락이나 황점볼락과 더불어 전 해역에 공통적으로 방류하는 어종이고, 조피볼락의 방류량은 2005년에 278만 마리, 2007년에 695만 마리로 어류에서는 넙치 다음으로 많이 방류하고 있다. 게다가 조피볼락의 자

원조성 효과는 방류 전에 비해 어획량이 1.5-1.8배나 증가하였다는 보고가 있고(MOMAF, 2011), 양적으로 크게 증가한 것은 분명하지만 이들 방류어종의 질적인 평가는 아직 충분히 이루어지지 않고 있다고 여겨진다.

산업의 급격한 발달에 따라 외인성 화학물질 등의 유독물질 유입이 해양으로 현저히 증가하였고 이에 따른 직접적 해양생물자원의 독성유발 및 독성물질 축적으로 인한 2차 피해가 증가하였다. 특히 과거 외국의 유류유출사고에서 발견된 결과(Lee and Anderson, 2005)를 고려하면, 외인성 화학물질을 통한 해양생물의 독성 피해는 적지 않은 것으로 추정된다. 외인성 화학물질에 오염되었을 경우 외인성 화학물질의 대사와 배설을 촉진하기 위하여 어류 간장이나 패류에서 이물질(xenobiotics)의 대사에 관여하는 소화선의 약물대사 phase II 효소의 변화도 예상된다. 어류 및 패류에서 약물대사효계 phase I 효소의 하나인 mixed-function oxygenase (MFO) cytochrome P450은 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)의 대사에 관여하며 외부 화학물질에 오염시 활성유도가 관찰된다(Colodi et al., 1984; Gagnon and Holdway 1998; Peters et al., 1999). Phase II 대사효소계인 UDP-glucuronosyl transferase (UDPGT) 및 glutathione S-transferase (GST)는 endogenous compounds, xenobiotics 및 phase I 효소에 의해 생성된 1차 대

*Corresponding author: jkjeon@gwnu.ac.kr

사물질의 무독화와 배설에 중요한 역할을 한다(Clark, 1989). 이 phase II 효소들도 화학물질에 의한 오염시 활성이 변화되기 때문에 오염지표로서의 역할에 대한 연구가 수행되어왔다(Moreira et al., 2004). 이와 같이 약물대사효소의 변화는 외인성 화학물질에 의한 오염의 중요한 생화학적 지표의 위치에 있다(Moreira et al., 2004).

따라서 본 연구에서는 조피볼락을 대상으로 방류한 개체와 가두리에서 양식한 개체들의 건강도를 검토할 목적으로 이들의 간장 중 해독효소계(xenobiotics metabolizing enzymes)와 항산화효소계(antioxidative enzymes)를 비교하였으며, 이하 그 결과를 보고한다.

재료 및 방법

대상어류 및 처리

본 실험에서는 조피볼락(*Sebastes schlegeli*)을 사용하였다. 실험에 사용한 양식산 조피볼락은 2005년 8월 중순 경남 통영시 산양면 한국해양연구원 현장에서 사육한 양식산 15마리를 선택하여 사용하였다. 방류산 조피볼락은 양식산과 동일한 곳에서 중간 육성한 개체를 사용하였고, 방류를 위하여 경상남도 통영 주변해역에 위치한 가두리의 방류환경에서 먹이공급을 중단하고 5일간 순치하였다. 순치가 끝난 후 2005년 3월에 수중에서 가두리를 개방하여 방류하였다. 방류산은 양식산 어류 채집과 동일한 시기에 방류지점으로부터 200 m 이상의 벗어난 해역에서 채집하였고, 채집된 개체 중 아가미 표식이 되어 있는 개체 15마리를 선택하여 분석에 사용하였다. 현장에서 체장과 체중을 측정한 다음 간장을 적출하여 무게를 측정하였고, 간장은 액체질소로 동결시킨 후 드라이아이스에 보관하였으며, 근육은 빙장한 상태로 실험실로 옮긴 후 실험에 사용하였다.

분석

개체별 체장(cm)과 체중(g)으로는 비만도(condition factor, CF)를 계산하였다. CF는 $(\text{body weight} / \text{body length}^3) \times 10^3$ (Vanstone and Markert, 1968)의 공식으로 계산하였으며, 방류산과 양식산의 CF를 비교하기 위하여 one-way analysis of variance (ANOVA)로 계산하여 적용하였다. 체중에 대한 간장 중량의 비율로는 간중량지수(hepatosomatic index, HSI)를 각각 계산하였다. HSI는 $\text{liver weight} \times 100 / \text{body weight}$ 의 식으로 구하였다. 또한 근육 중 일반성분은 AOAC방법(AOAC, 1995)에 따라 분석하였다. 수분은 상압가열건조법, 조회분은 건식회화법, 단백질은 Kjeldahl법 그리고 지방은 Soxhlet법으로 측정하였다. 탄력도는 등쪽 근육을 $4 \times 3 \times 2$ cm (W×H×D)의 크기로 잘라 Rheometer (COMPAC-100, SUN Scientific, Japan)로 strength (강도), hardness (경도), cohesiveness (응집), springness (탄성), gumminess (점성) 및 brittleness (취성)

의 6가지 항목을 측정하여 분석하였다.

효소원 제조

조직 1g 당 4배 양의 0.1M sodium phosphate buffer (pH 7.4)를 가하여 빙냉상에서 glass teflon homogenizer로 마쇄하였다. 이 마쇄액을 냉장 원심분리기(Sorvall RC-5B, USA)로 4℃에서 600×g에서 10분간 원심분리하여 핵 및 미마쇄 부분을 제거한 상등액을 10,000×g에서 20분간 원심 분리하여 침전물인 mitochondria를 분리하였다. 상등액은 다시 초고속 원심분리기(HIMAC CP 70MX, HITACHI, Japan)로 105,000×g에서 1시간 원심분리하여 cytosolic 분획으로, 침전물은 동량의 0.1M sodium phosphate buffer (pH 7.4) 용액을 가하여 현탁시킨 시료액을 다시 105,000×g에서 1시간 재원심분리하여 microsomal 분획을 얻었다. 이때 얻은 cytosolic 분획은 항산화 효소계 활성 측정용 효소원으로 사용하였으며, microsomal 분획은 cytochrome P450 (CYP) 및 ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD)의 활성 측정용 효소원으로 사용하였다.

약물대사효소 및 항산화효소 분석

약물대사효소로는 CYP (Omura and Sato, 1965)와 EROD (Burke and Mayer, 1974)를 분석하였다. 약물대사효소 활성 측정은 0.1 M potassium phosphate (pH 7.4)에 2 mg/ml의 BSA, 10 μM dicoumarol, NADPH regeneraing system (5 mM glucose 6-phosphate, 5 unit/mL glucose 6-phosphate dehydrogenase), 10 μM NADPH, 2.5 μM 7-ethoxyresorufin이 포함된 2 mL의 반응물에 microsome 시료를 혼합한 후 37℃에서 20분간 반응시켰다. 반응 후 형성된 resorufin을 excitation 파장 550 nm, emission 파장 585 nm에서 resorufin의 fluorescence를 측정하였다. Blank에는 microsome을 제외한 모든 반응 성분을 포함시켰다. Resorufin의 발생량은 resorufin 표준 곡선으로부터 계산하여 결과는 mole resorufin/mg protein/min으로 나타냈다. Microsome내의 단백질의 농도는 Lowry et al. (1951)의 방법으로 측정하였다. 항산화계 능력은 효소인 superoxide dismutase (SOD; SOD assay kit, Wako, Japan), catalase (CAT; Cohen et al., 1970), glutathione peroxidase (GPx; Lawrence and Burk, 1976) 및 glutathione reductase (GR; Worthington and Rosemeyer, 1974)의 활성과 비효소 성분인 환원형 글루타치온(reduced glutathione, GSH)과 산화형 글루타치온(oxidized glutathione, GSSG)의 농도를 Beutler (1975) 방법에 따라 분석하였다. SOD 활성 측정은 potassium phosphate buffer (100 mM K₂HPO₄, 100 mM KH₂PO₄, 200 mM KCl, 10 mM EDTA, pH 7.4) 용액과 1 mM xanthine, 1% deoxycholate, 1.5 mM potassium cyanate, 0.2 mM cytochrome C를 혼합한 후 미토콘드리아 분획에 첨가하고, 마지막으로 xanthine oxidase (XOD)를 첨가하여 550 nm의 파장

에서 2분간 효소활성을 측정하였다. CAT의 활성은 0.05 M phosphate buffer (pH7.0) 1.9 mL을 시료 간 조직 획분에 가한 후 800×g에서 20분간 원심분리하고 난 뒤 상등액을 100 µL 취해서 과산화수소 용액 1 mL를 혼합하여 240 nm에서 90초 동안 흡광도 감소를 측정하여 분석하였다. 간 조직 중 GPx의 활성은 0.1 M phosphate buffer (4 mM EDTA) 400 µL, 0.01 M NaN₃ 70 µL, 0.01 M GSH 70 µL, 1.5 mM NADPH 70 µL, H₂O 360 µL, GSSG-reductase (1.8 U/mL) 20 µL 및 간 조직 획분 10 µL를 혼합하여 상온에서 1분간 방치한 후 5 mM H₂O₂ 100 µL를 가해 잘 혼합한 후 340 nm에서 90초 동안 흡광도 감소를 측정하여 분석하였다. 그리고 시료 중의 단백질 농도는 Lowry et al. (1951)의 방법으로 정량하였다.

통계처리

모든 측정치는 평균±표준편차로 나타내었으며, SPSS (V. 10.0)를 사용하여 one-way ANOVA test를 실시하였고, Duncan's program으로 95% 신뢰구간에서 유의차 검정을 하였다.

결과 및 고찰

근육의 일반성분 및 조직감

방류산과 양식산 조피볼락 근육 중 일반성분을 분석한 결과는 Table 1에 나타났다. 양식산의 수분, 조회분 및 조단백질의 함량은 각각 77.59, 1.25 및 16.31 g/100g으로 나타났으며, 방류산의 수분, 조회분 및 조단백질의 함량은 76.69, 1.05, 15.60 g/100g으로 두 그룹 간에 차이가 없었다. 양식산의 조지방 함량은 1.59 g/100, 방류산의 조지방은 2.39 g/100으로 방류산의 조지방 함량이 양식산의 조지방 함량보다 유의적으로 높았으며($P<0.05$), 양식산과 자연산 어류에서는 일반성분 중 지질 및 수분 함량에 차이가 있다는 것은 이미 알려져 있다(Shin et al., 2008). 그러나 방류산과 양식산의 일반성분에 차이가 있는 것으로 나타났다. 방류산과 양식산 조피볼락 근육의 조직감은 strength (강도), hardness (경도), cohesiveness (응집), springness (탄성), gumminess (검성) 및 brittleness (취성)의 6가지 항목을 측정하여 Table 2에 나타났다. 방류산 근육의 조직감을 분석한 결과, 강도, 경도, 응집, 탄성, 검성 및 취성은 각각 208.63 dyne/m², 900.50 dyne/m², 40.32%, 56.07%, 2.48 kg 및 1.30 kg 이었으며, 양식산 근육의 강도, 경도, 응집, 탄성, 검성 및 취성은 각각 194.43 dyne/m², 894.17 dyne/m², 36.12%, 56.41%, 2.11 kg 및 1.30 kg으로 나타났다. 방류산과 양식산

Table 2. Comparison of rheology parameters in dorsal muscle of the cultivated and the stocked rockfish *Sebastes schlegeli*

	Stocked	Cultivated
Strength (dyne/m ²)	208.63 ± 3.80 ^{ns}	194.43 ± 36.76
Hardness (dyne/m ²)	900.50 ± 59.40 ^{ns}	894.17 ± 65.73
Cohesiveness (%)	40.32 ± 1.65 ^{ns}	36.12 ± 7.56
Springness (%)	56.07 ± 3.41 ^{ns}	56.41 ± 2.79
Gumminess (kg)	2.48 ± 0.19 ^{ns}	2.11 ± 0.21
Brittleness (kg)	1.30 ± 0.19 ^{ns}	1.30 ± 0.23

ns : not significant.

간의 조직감 분석 항목을 비교한 결과, 뚜렷한 유의차가 나타나지 않았다($P>0.05$). 동해안에서 어획된 자연산 조피볼락 (*S. schlegeli*)의 경도, 응집 및 탄성은 각각 383.29 dyne/cm², 57.67 % 및 66.78%로 보고되었다(Oh et al., 2007). 자연산 조피볼락에 비하여 양식산 및 방류산 조피볼락의 경도는 더 높은 값을 나타내지만, 응집 및 탄성은 낮은 값을 나타냈다. 일반적으로 양식산 어류 근육의 경도는 자연산 어류의 근육에 비하여 다소 높다고 보고되어 있으며(Shin et al., 2008), 이는 배합사료의 공급에 따른 차이로 추정된다.

비만도(CF)와 간중량지수(HSI)

방류산과 양식산 조피볼락의 비만도(CF)와 간중량지수(HSI)를 비교한 결과는 Fig. 1과 같다. CF는 양식산(1.6±0.2)이 방류산(1.5±0.1)에 비해 유의적인 수준은 아니지만 약간 높았고, HSI도 마찬가지로 양식산(2.6±0.8)이 방류산(2.1±0.6)보다 높지만 유의차는 없었다. Lee et al. (2000)의 연구에서 자연산 및 양식산 조피볼락의 CF 및 HSI를 비교한 결과, 비만도는 양식산이 자연산보다 높은 값을 보였으며, HSI는 자연산이 양식산보다 유의적으로 낮은 값을 나타냈다. 본 연구에서도 방류산의 HSI가 양식산에 비해 낮게 나타났다. 이는 자연산은 서식지역에 따라 먹이부족 및 포식자로부터 도포 등에 의한 운동량 증가로 인하여 에너지의 소비가 증가한 것으로 생각된다. 반면에 스트레스 및 에너지 소비가 자연산 보다 적은 양식산은 CF 및 HSI 값이 자연산보다 높게 나타났다. 그러나 방류산 및 양식산 조피볼락의 CF 및 HSI 값은 유의적 차이의 나타내지 않으므로, 이는 가두리에 수용되어 정기적으로 충분한 양의 사료를 공급받는 양식산 개체들에 비해 방류산 어류도 외형적인 성장은 조금도 손색이 없이 성장하고 있음을 보여준다

Table 1. Comparison of chemical composition in muscle of the cultivated and the stocked rockfish *Sebastes schlegeli* (g/100 g)

	Moisture	Crude ash	Protein	Crude lipid
Cultivated	77.59 ± 1.24 ^{ns}	1.25 ± 0.36 ^{ns}	16.31 ± 0.63 ^{ns}	1.59 ± 0.09
Stocked	76.69 ± 1.51	1.05 ± 0.06	15.60 ± 0.88	2.39 ± 0.41*

ns : not significant, Significantly different from control at * $P<0.05$.

Fig. 1. Comparison of condition factor (CF) and hepatosomatic index (HSI) of the cultivated and the stocked rockfish *Sebastes schlegeli*.

Fig. 2. Comparison of hepatic cytochrome P450 (CYP) level and 7-ethoxyresorufin deethylase (EROD) activity of the cultivated and the stocked rockfish *Sebastes schlegeli*. *Significant compared to control by Duncan's multiple range test at $P<0.05$.

간장내의 약물대사효소 및 항산화 효소

간장은 어류를 비롯한 모든 척추동물에게 있어 해독에 관여하는 가장 중요한 기관이고 지질이 많아 지용성의 각종 유기화합물이 축적되기 때문에 사료에 첨가되는 각종 약물이나 기타 화학물질에 의해서 해독효소의 활성이 교란될 수가 있다 (Thomas, 1990). 방류산과 양식산 조피볼락의 간장 중 약물대사효소 반응을 조사한 결과는 Fig. 2와 같다. CYP 농도는 방류산(0.11 ± 0.05 nmol/mg)이 양식산(0.18 ± 0.07 nmol/mg)에 비해 유의적으로 낮았고($P<0.05$), EROD 활성도 방류산(1.18 ± 0.23 nmol/min/mg)이 양식산(1.80 ± 0.36 nmol/min/mg)에 비해 유의적으로 낮았다($P<0.05$). Jung et al. (2008)의 연구에서 가두리 양식장의 조피볼락의 EROD 활성도는 0.6 nmol/min/mg으로 나타났으며, 본 연구에서 측정된 EROD 활성도는 가두리 양식장의 조피볼락(Jung et al., 2008)의 활성도보다 다소 높게 나타났다. 일반적으로 외인성 화학물질이 체내로 들어오면 해독효소가 유도되거나 저해되는 반응을 일으키는데, 항생제 등 약물은 CYP나 EROD를 유도한다고 알려져 있다 (Thapliyal and Maru, 2001). 따라서 본 결과에서 방류산이 양

식산에 비해 CYP와 EROD 수준이 낮은 것은 외인성 화학물질에 노출될 기회가 적었기 때문이라 여겨진다. 해양의 각종 오염물질은 어류의 산소 이용에도 영향을 미쳐서 아가미 호흡으로 체내로 흡입한 산소 중 일부는 superoxide anion으로 되며, 독성이 강한 이 성분은 SOD에 의해 과산화수소로 되지만, 생체에서는 CAT나 GPx가 분해하여 독성이 없는 물과 산소로 만든다. GPx의 대사관여에는 glutathione (GSH)이 필요하며, GSH는 GPx가 과산화수소를 분해하는 과정에서 GSSG로 변환되었다가 GR에 의해서 다시 환원되는 사이클을 이루어 항산화 효소계를 구성한다(Apel and Hirt, 2004). 그리고 어류는 생활하는 동안에도 끊임없이 주변의 여러 요인들에 의해서 항산화 효소계가 영향을 받는데, 기생충(Marcogliese et al., 2005)이나 세균 오염(Osatomi et al., 2002), 용존산소(Filho et al., 2005)나 염분 또는 수온(Martinez-Alvarez et al., 2002) 등의 수질변화, 중금속(Basha and Rani, 2003)이나 유기오염물질(Achuba and Osakwe, 2003), 농약(Oruc and Uener, 2000), 오염도(Otto and Moon, 1996) 등의 환경적 요인, 오존(Ritola et al., 2002)이나 자외선(Charron et al., 2000) 노출에 의해서

Fig. 3. Comparison of antioxidant enzymes level of the cultivated and the stocked rockfish *Sebastes schlegeli*.

*Significant compared to control by Duncan's multiple range test at $P < 0.05$.

Fig. 4. Comparison of hepatic reduced glutathione (GSH) and oxidized glutathione (GSSG) level of the cultivated and the stocked rockfish *Sebastes schlegeli*.

영향을 받을 뿐 아니라 생물 자체의 성장 과정(Rudneva, 1999)이나 어종(Rudneva, 1997)에 따라서도 차이를 보인다고 알려져 있다. 방류산과 양식산 조피볼락의 간장에서 SOD, CAT, 총 GPx (tGPx) 및 GR의 활성을 조사한 결과는 Fig. 3, 그리고 GSH 및 GSSG의 농도는 Fig. 4와 같다. SOD 활성은 방류산(82.9 ± 5.2 U)이 양식산(71.2 ± 6.9 U)에 비해 유의적으로

높았고($P < 0.05$), CAT 활성은 방류산(5.2 ± 1.9 U/g)이 양식산(6.8 ± 2.9 U/g)보다 유의적으로 낮았으나($P < 0.05$), GR 활성은 방류산(58.5 ± 13.4 $\mu\text{mol/min/mg}$)이 양식산(40.2 ± 12.1 $\mu\text{mol/min/mg}$)보다 유의적으로 높았다($P < 0.05$). 하지만 총 GPx 활성은 두 그룹간에 유의적인 차이가 없었다($P > 0.05$). 그리고 방류산과 양식산의 GSH 농도는 각각 26.2 ± 4.5 , 27.6 ± 3.7 $\mu\text{mol/mg}$ 이

었고, GSSG의 농도도 각각 0.64 ± 0.19 , 0.59 ± 0.10 $\mu\text{mol/mg}$ 으로 두 그룹 간에는 유의적인 차이가 없었다($P > 0.05$) (Fig. 4). 이들 결과에서 방류산이 양식산에 비해서 CAT 활성이 낮으면서 GR 활성이 높은 것은 방류산이 산화스트레스를 상대적으로 덜 받고 있음을 보여주는 것이다. 그리고 GSH와 GSSG의 비율(GSSG/GSH)은 세포내의 산화-환원 상태를 반영하는 지표로 이용되는데, 정상적인 휴지 상태의 조직은 1% 정도이나 GSH가 GSSG로 산화되면 이 비율은 급격히 변화한다. 본 실험에서는 양식산 및 방류산의 지표는 각각 0.011 및 0.012로 두 그룹의 어류는 모두 아주 정상적인 산화환원 상태를 유지하고 있음을 보여준다. 이상의 결과를 정리하면 방류산 조피볼락은 양식산에 비해 성장은 뒤떨어지지 않으며, 더욱이 방류함으로서 외인성 화학물질에 노출되는 기회가 적을 뿐 아니라 산화스트레스도 적게 받고 있다고 여겨지므로 자연환경에 방류하는 개체의 생존환경이 낫다고 여겨진다. 실내양식장은 방수도로 및 수온조절시스템 등으로 인한 polycyclic aromatic hydrocarbons, Polychlorobiphenil, diethyl phthalate 등과 같은 외부물질에 쉽게 노출된다(López-Galindo et al., 2010). 또한 연근해의 가두리 양식장의 어류는 육지에 유입되는 유류폐기잔여물, 중금속 및 제조제등의 유기염소 등의 외부물질에 쉽게 노출이 되지만, 방류산 어류에 비하여 외부물질로부터 회피에 제약을 받게 된다. 이상의 결과로 방류산 조피볼락은 양식산에 비해 성장은 뒤떨어지지 않으며, 해독효소계나 항산화효소계는 상대적으로 안정적인 경향을 보이고 있어 가두리에서 기르기보다는 자연 환경에 방류한 것이 산화스트레스를 적게 받기 때문에 생존 환경이 양호한 것을 보여주고 있다.

사 사

본 연구는 강릉원주대학교의 학술연구사업과 한국해양연구원의 『바다목장화사업』의 지원을 받아 수행한 것이기에 감사드립니다.

참고문헌

- AOAC. 1995. Official methods of analysis. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC, U.S.A., 69-74.
- Aple K and Hirt H. 2004. REACTIVE OXYGEN SPECIES: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. *Annu Rev Plant Biol* 55, 373-399.
- Achuba F and Osakwe S. 2003. Petroleum-induced free radical toxicity in African catfish (*Clarias gariepinus*). *Fish Physiol Biochem* 29, 97-103.
- Basha PS and Rani AU. 2003. Cadmium-induced antioxidant defense mechanism in freshwater teleost *Oreochromis mossambicus* (Tilapia). *Ecotoxicol Environ Saf* 56, 218-221.
- Beutler E. 1975. Red Cell Metabolism : A Manual of Biochemical Methods 2nd edn, Grune and Stratton, New York, 69.
- Burke MD and Mayer RT. 1974. Ethoxyresorufin: direct fluorometric assay of a microsomal O-dealkylation which is preferentially inducible by 3-methylcholanthrene. *Drug Metab Disp* 2, 583-588.
- Charron RA, Fenwick JC, Lean DRS and Moon TW. 2000. Ultraviolet-B radiation effects on antioxidant status and survival in the zebrafish, *Brachydanio rerio*. *Photochem Photobiol* 72, 327-333.
- Clark AG. 1989. The comparative enzymology of the glutathione S-transferases from non-vertebrate organisms. *Comp Biochem Physiol* 92, 419-446.
- Cohen G, Dembiec D and Marcus J. 1970. Measurement of catalase activity in tissue extracts. *Anal. Biochem* 34, 30-38.
- Collodi P, Skekoll MS and Rice SD. 1984. Hepatic aryl hydrocarbon hydroxylase activities in coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) exposed to petroleum hydrocarbons. *Comp Biochem Physiol* 97, 447-451.
- Gagnon MM and Holdway DA. 1998. MFO induction in Atlantic salmon (*Salmo salar*) during and after exposure to Bass Strait crude oil. *Aus J Exotox* 4, 29-35.
- Filho DW, Torres MA, Zaniboni-Filho E and Pedrosa RC. 2005. Effect of different oxygen tensions on weight gain, feed conversion, and antioxidant status in piapara, *Leporinus elongatus*. *Aquaculture* 244, 349-357.
- Jung JH, Kim SJ, Lee TK, Shim WJ, Woo S, Kim DJ and Han CH. 2008. Biomarker responses in caged rockfish (*Sebastes schlegeli*) from Masan Bay and Haegeumgang, South Korea. *Mar Pollut Bull* 57, 599-606.
- Lawrence RA and Burk RF. 1976. Glutathione peroxidase activity in selenium-deficient rat liver. *Biochem Biophys Res Com* 76, 952-958.
- Lee HYM, Park MW and Jeon IG. 2000. Comparison of nutritional characteristics between wild and cultured juvenile black rockfish, *Sebastes schlegeli*. *J Korean Fish Soc* 33, 137-142.
- Lee RF and Anderson JW. 2005. Significance of cytochrome P450 system responses and level of fluorescent aromatic compounds in marine wild life following oil spills. *Mar Pollut Bull* 50, 705-723.
- López-Galindo C, Vargas-Chacoff L, Nebot E, Casanueva JF, Rubio D, Solé M and Mancera JM. 2010. Sublethal effects of the organic antifoulant Mexel®432 on osmoregulation and xenobiotic detoxification in the flatfish *Solea senegalensis*. *Chemosphere* 79, 78-85.
- Lowry OH, Roseborough NJ, Farr LA and Randall RJ. 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J Biol Chem* 193, 265-275.
- Marcogliese DJ, Brambilla LG, Gagne F and Gendron AD. 2005. Joint effects of parasitism and pollution on oxidative stress biomarkers in yellow perch *Perca flavescens*. *Dis Aquat Org* 63, 77-84.
- Martinez-Alvarez RM, Hidalgo MC, Domezain A, Morales AE, Garcia-Gallego M and Sanz A. 2002. Physiological changes

- of sturgeon *Acipenser naccarii* caused by increasing environmental salinity. *J Exp Biol* 205, 3699-3706.
- MOMAF. 2011. Statistic Database for Fisheries Production. Korea National Statistical Office, Daejeon.
- Moreira SM, Moreira-Santos M, Ribeiro R and Giulhermino L. 2004. The "Coral Bullker" fuel oil spill on the north coast of Portugal: spatial and temporal biomarker responses in *Mytilus galloprovincialis*. *Ecotoxicology* 13, 619-630.
- Oh SH, Jung YK, Kim SH and Kim SD. 2007. Quality Characteristics of Sliced Raw-fish Washed by Different Methods during Storage. *Korean J Food Preserv* 14, 571-577.
- Omura T and Sato R. 1964. The carbon monoxide-binding pigment of liver microsomes. *J Biol Chem* 239, 2370-2378.
- Oruc EO and Uener N. 2000. Combined effects of 2,4-D and azinphosmethyl on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in liver of *Oreochromis niloticus*. *Comp Biochem Physiol* 127, 291-296.
- Osatomi K, Kanai K, Hara K and Ishihara T. 2002. Changes in Cu, Zn-SOD activity in Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* with bacterial infection. *Nippon Suisan Gakkaishi* 68, 207-213.
- Otto DME and Moon TW. 1996. Endogenous antioxidant systems of two teleost fish, the rainbow trout and the black bullhead, and the effect of age. *Fish Physiol Biochem* 15, 349-358.
- Peters LD, Shaw JP, Nott M, O'Hara SCM and Livingstone DR. 1999. Development of cytochrome P450 as a biomarker of organic pollution in *Mytilus* sp. Field studies in United Kingdom (Sea Empress's oil spill) and the Mediterranean Sea. *Biomarkers* 4, 425-441.
- Ritola O, Peters LD, Livingstone DR and Lindstroem-Seppae P. 2002. Effects of in vitro exposure to ozone and/or hyperoxia on superoxide dismutase, catalase, glutathione and lipid peroxidation in red blood cells and plasma of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Aquacult Res* 33, 165-175.
- Rudneva II. 1997. Blood antioxidant system of Black Sea elasmobranch and teleosts. *Comp Biochem Physiol* 118, 255-260.
- Rudneva II. 1999. Antioxidant system of Black Sea animals in early development. *Comp Biochem Physiol* 122, 265-271.
- Rueda-Jasso R, Conceicao LEC, Dias J, De Coen W, Gomes E, Rees JF, Soares F, Dinis MT and Sorgeloos P. 2004. Effect of dietary non-protein energy levels on condition and oxidative status of Senegalese sole (*Solea senegalensis*) juveniles. *Aquaculture* 231, 417-433.
- Shin GM, Ahn YS, Shin DM, Lee JH, Kim HJ, Yoon MS, Heu MS and Kim JS. 2008. Comparison of muscle texture between red seabreams cultured by feeding and starving. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 37, 1148-1153.
- Thapliyal T and Maru GB. 2001. Inhibition of cytochrome P450 isozymes by curcumins in vitro and in vivo. *Food Chem Toxicol* 39, 541-547.
- Thomas P. 1990. Teleost model for studying the effects of chemicals on female reproductive endocrine function. *J Exp Zool Suppl* 4, 126-128.
- Worthington DJ and Rosemeyer MA. 1974. Human Glutathione Reductase: Purification of the Crystalline Enzyme from Erythrocytes. *Eur J Biochem* 48, 167.

2011년 12월 20일 접수

2012년 4월 11일 수정

2012년 4월 17일 수리