

카드뮴의 장기노출에 따른 넙치, *Paralichthys olivaceus*의 생존, 성장 및 대사율의 변화

강주찬 · 김성길⁺ · 지정훈
부경대학교 수산생명의학과

Long-Term Sublethal Cadmium Exposure Effected Survival, Growth and Metabolic Rate Change in the Olive Flounder, *Paralichthys olivaceus*

Ju-Chan KANG, Seong-Gil KIM⁺ and Jung-Hoon JEE
Department of Aquatic Life Medicine, Pukyong National University,
Busan 608-737, Korea

Experiments were carried out to investigate the effects of long term sub-lethal cadmium exposure on survival, growth and metabolic rate of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* for 6 weeks. Survival rate of the flounder was significantly affected above 980 µg/L. Growth rates of the flounder exposed to ≥ 210 µg/L of cadmium concentration were significantly decreased than that exposed to normal condition. Metabolic rate in the cadmium concentration ≥ 210 µg/L was significantly reduced with increasing cadmium concentration than that in normal condition. This study revealed that high cadmium concentration (≥ 210 µg/L) reduced growth and metabolic rate of the juvenile flounder suggesting potential influence on the natural mortality of olive flounder in the coastal areas.

Key words: *Paralichthys olivaceus*, Cadmium, Survival rate, Growth, Respiration rate

서론

카드뮴은 통상 지각에서 0.1 mg/kg, 해수 중에서는 0.1 µg/L 이하로 매우 낮은 농도가 검출되지만, 산업사회와 더불어 많은 양이 토양이나 해양으로 유입되고 있는 현실이다 (Stoeppler, 1991). 카드뮴은 생물체에 강한 독성을 나타내는 중금속중의 하나이며, 현재는 해양환경의 주요 오염원중에 하나이다 (Sorensen, 1991).

카드뮴은 여러 가지 측면에서 어류에 저해영향을 미친다. 즉, 어류의 성장장해를 비롯하여 아가미에서의 칼슘 흡수 억제, 간 기능 저하뿐만 아니라 생식이나 대사작용을 방해하기도 한다 (Verbost et al., 1989; Sorensen, 1991; Lemaire and Lemaire, 1992; Soengas et al., 1996). 또한, 호흡에 관련된 기능이나 고혈당, 저혈 칼륨 및 저혈칼슘을 유발하는 혈장의 조성을 바꾸며 (Sorensen, 1991), 간이나 신장, 근육 등의 기관에서는 대사활동을 저해하기도 한다 (Sasthy and Subhadra, 1982). 이 같이 어류에 대한 카드뮴 독성에 대하여 많은 연구들이 진행되고 있으나 이를 대부분은 담수어종에 한정되어 있는 실정이다.

국내의 해양동물에 대한 카드뮴 독성에 대한 연구는 Park and Kim (1979)이 방어와 돌돔의 급성독성, Kang et al. (1997)이 곤쟁이 (*Neomysis awatschenis*)의 생존, 성장에 미치는 만성독성이 있다. 그리고, 진주담치 (*Mytilus edulis*), 바지락 (*Tapes japonica*), 전복 (*Haliotis discus*), 꼬막 (*Anadara broughtoni*), 우렁쟁이 (*Halocynthia roretzi*) 등의 저서동물을 대상으로 축적에 대한 연구 (Park et al., 1977; Lee and Lee, 1984; Choi et al., 1992;

Kim et al., 2001)가 있으나 해산 어류의 만성독성에 대한 연구는 극히 미비한 실정이다.

넙치 (*Paralichthys olivaceus*)는 우리 나라의 대표적인 양식어종으로 저서성이며, 다른 어종에 비하여 이동범위가 좁기 때문에 연안지역에서 중금속오염이나 또는 양식수의 이용과정에서 중금속에 노출시 많은 영향을 받을 것이라고 예상된다. 따라서, 본 연구는 연안지역의 환경오염 및 양식용수의 이용과정에서 파생될 수 있는 카드뮴 오염에 따른 넙치의 생존, 성장 및 대사에 미치는 카드뮴의 만성독성을 검토하였다.

재료 및 방법

넙치 (*P. olivaceus*) 치어는 남해안 소재 육상수조식 양어장에서 분양을 받아 실험실로 운반한 후, 300 L의 순환 여과식 수조에서 한달 이상 순치시켰다. 이때, 수온, pH, 염분 및 용존산소는 각각 20.5 ± 0.5°C, 8.2 ± 0.3, 32.7 ± 0.4 ‰ 및 7.1 ± 0.2 mg/L이었다. 이와 같은 조건에서 순치 시킨 넙치 중에 외관상 질병 증세가 나타나지 않고, 먹이불임이 좋은 넙치 (전장 8.33 ± 0.05 cm, 체중 5.09 ± 0.11 g)를 선택하여 실험에 사용하였다.

실험은 PVC수조 (52×36×30 cm)를 사용하여 순환식 방법에 의해 실시하였으며, 실험해수의 환수시기는 2일을 원칙으로 하였으나, 수질측정 결과에 따라 수시로 교환하였다. 카드뮴농도는 CdCl₂ (Aldrich Co.)를 사용하였고, 예비실험을 바탕으로 0 (control), 90, 210, 450, 980 µg-Cd/L의 5구간을 설정하였다.

실험은 6주간 온도조절이 가능한 항온실에서 실시하였으며, 실험해수의 조건은 Table 1과 같다. 광주기는 12시간 간격 (light: 12 hour,

⁺Corresponding author: cosmas@mail1.pknu.ac.kr

Table 1. The chemical components of seawater and experiment condition used in the cadmium exposure experiments. Values indicate mean \pm S.D.

Item	Value
Temperature	20.5 \pm 0.5°C
Salinity	32.7 \pm 0.4 ‰
pH	8.2 \pm 0.3
SS	9.8 \pm 0.2 mg/L
Dissolved oxygen	7.1 \pm 0.2 mg/L
COD	0.93 \pm 0.03 mg/L
Ammonia	12.66 \pm 1.25 μ g/L
Nitrite	1.37 \pm 0.28 μ g/L
Nitrate	9.62 \pm 1.01 μ g/L
Phosphate	5.05 \pm 0.96 μ g/L
Fe	5.02 \pm 0.87 μ g/L
Cd	N.D.*

*N.D.: Not detected.

dark: 12 hour)으로 조절하였다. 먹이는 상업용 넙치 사료를 하루에 두 번 어체중 (습중량)의 3%를 2회로 나누어 공급하며 사육하였다.

넙치의 생존은 매 24시간을 기준으로 사망한 개체를 계수하여 나타내었으며, 사료효율과 성장률을 7일 간격으로 측정하여 계산하였다. 넙치의 대사는 산소소비율로 나타내었고, 산소소비율은 각 실험농도별로 6주간의 실험기간동안 매주 1회 생존한 5개체씩에 대하여 측정하여 (Kang et al., 1995), 평균 산소소비율은 단위건중량당 산소소비량으로 표시하였다.

생존율에 대한 유의성은 X^2 -test로 검정하였으며, 성장과 대사에 대한 통계적 처리는 ANOVA test를 실시한 후 사후 다중비교는 최소유의차 검정 (Least-signification difference test)으로 평균간의 유의성 ($P < 0.05$)을 검정하였다.

결 과

넙치치어의 생존에 미치는 카드뮴의 영향은 Fig. 1에 나타났다. 6주간의 실험기간 동안 넙치는 대조구에서 실험 종료시까지 100%의 생존율을 보였다. 또한, 카드뮴 농도 450 μ g/L 농도에서 노출 1주 후부터 사망개체가 발견되었으나 유의한 차이는 인정되지 않았다. 그러나, 카드뮴 농도 980 μ g/L에서는 노출 1주부터 생존율이 감소하기 시작하여 노출 6주째에는 86.7%까지 감소하여 대조구에 비해 유의한 감소를 나타냈다 ($P < 0.05$).

넙치치어의 성장에 미치는 카드뮴의 영향은 Fig. 2에 나타났다. 성장률은 매 7일마다 측정하여 노출기간동안 전체 평균 성장률로 나타났다. 대조구에서 평균 16.82 \pm 0.48%를 나타내 가장 양호한 성장률을 보였다. 넙치의 성장률은 카드뮴농도가 증가할수록 감소하였으며, 90 μ g/L에서는 대조구에 비해 유의한 감소가 인정되지 않았으나 210 μ g/L 이상에서는 유의하게 감소하였다 ($P < 0.05$).

사료효율에 미치는 카드뮴의 영향은 Fig. 3에 나타났다. 사료효율은 대조구가 43.65%로서 가장 높게 나타났다. 넙치의 사료효율은 카드뮴농도가 증가할수록 감소하였으며, 90 μ g/L에서는 대조구에 비

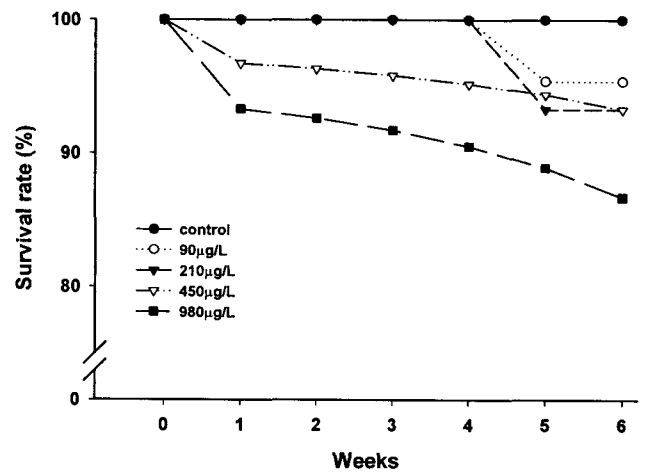


Fig. 1. Survival rate of *P. olivaceus* exposed to sub-lethal cadmium for 6 weeks.

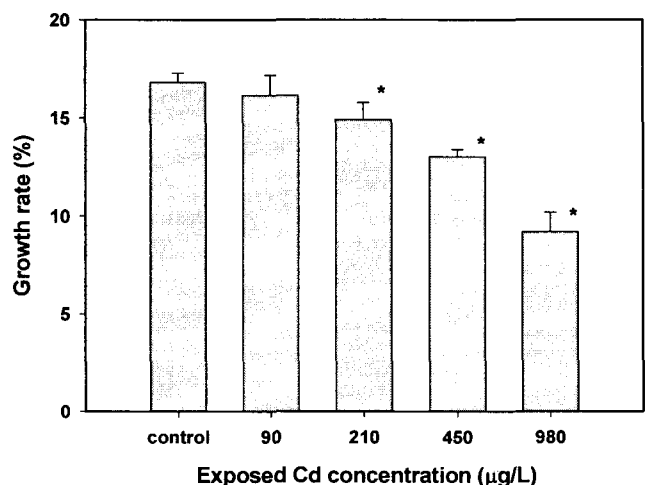


Fig. 2. Mean growth rate of *P. olivaceus* exposed to cadmium for 6 weeks. Vertical bar denotes a standard deviation. *Indicated a significant difference from control for growth rate ($P < 0.05$).

해 유의한 감소가 인정되지 않았으나 210 μ g/L 이상에서는 유의하게 감소하였다 ($P < 0.05$). 또한, 노출농도가 가장 높았던 980 μ g/L에서는 30.56%로 대조구에 비하여 30%나 낮은 감소를 나타냈다. 또한, 성장률과 사료효율의 관계는 상관계수 (r^2)가 0.881로서 강한 양의 상관관계를 가져 사료효율이 낮아짐에 따라 성장률이 감소하는 경향을 나타냈다.

넙치의 대사는 카드뮴농도 90, 210, 450, 980 μ g/L에서 대조구보다 각각 3.3, 18.3, 30.0, 50.1%가 감소하여 노출농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다 (Fig. 4). 그리고, 대사는 카드뮴농도 90 μ g/L에서는 대조구에 비해 유의한 차이가 인정되지 않았으나, 210 μ g/L 이상의 농도에서는 대조구에 비해 유의하게 감소하였고, 980 μ g/L 농도에서는 대조구에 비하여 약 50%의 감소를 보였다.

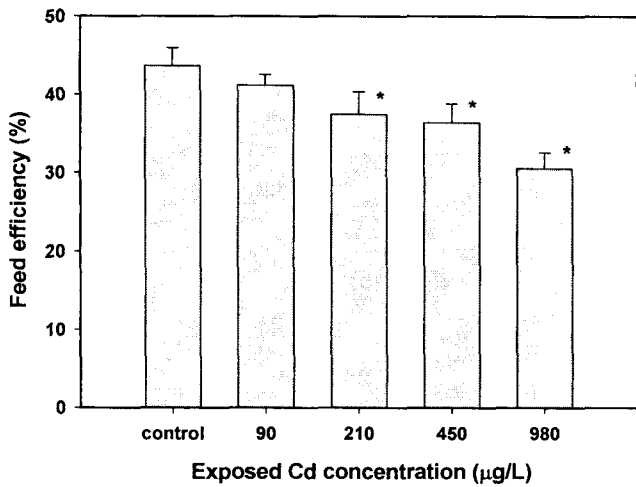


Fig. 3. Mean feed efficiency of *P. olivaceus* exposed to cadmium for 6 weeks. Vertical bar denotes a standard deviation. *Indicated a significant difference from control for feed efficiency ($P < 0.05$).

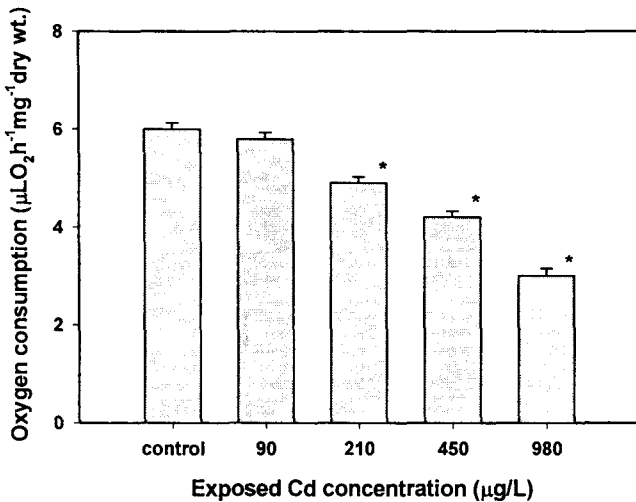


Fig. 4. Oxygen consumption of *P. olivaceus* exposed to cadmium for 6 weeks. Vertical bar denotes a standard deviation. *Indicated a significant difference from control ($P < 0.05$).

고 찰

일반적으로 어류는 카드뮴에 대한 해독능력이 다른 해양무척추 동물보다는 높다고 하지만 (Langston, 1980), 고농도에 단기간 노출되거나 혹은 저농도에 장기간 노출될 경우에는 궁극적으로는 성장장애, 생식이상 및 삼투조절 능력의 이상 등이 발생하며 최종적으로 사망에 이르기에도 한다 (Sangalang and O'Halloran, 1972; Versteeg and Giesy, 1986).

6주간 카드뮴에 노출시킨 넙치 생존율은 980 µg/L 농도에서는 노출 1주부터 감소하기 시작하여 노출 6주째에는 유의한 감소를 나타냈다. 카드뮴에 노출된 어류의 사망원인에 대해서는 현재까지

명확하게 밝혀지고 있지는 않지만, Mckim and Goeden (1982)에 따르면 중금속에 노출된 어류의 사망은 중금속 자체의 독성 등에도 원인이 있으나, 아가미의 손상에 의한 호흡곤란 등의 생리학적 장애가 사망원인이 될 수 있다고 하였다. 또한, 어류가 높은 농도의 중금속에 노출이 되면 중금속 독성에 의하여 빈산소상태를 경험하며 이러한 상황에 적응하기 위하여 생리적인 변화가 뒤따른다고 하였다 (Wilson and Taylor, 1993; De Boeck et al., 1997). 따라서, 카드뮴에 노출시킨 넙치는 상기의 복합적 원인에 의해 사망한 것으로 추측된다.

카드뮴에 노출된 넙치는 농도가 증가할수록 성장률이 감소하는 결과를 나타내었으며, 210 µg/L 이상에서는 유의한 감소를 나타냈다. 이 같은 결과는 500~1,500 µg/L의 카드뮴에 30일 동안 노출시킨 송사리 (*Poecilia reticulata*)는 노출농도와 노출기간에 따라 상승작용을 일어나 성장을 방해한 보고 (Miliou et al., 1998)와 일치한다. 또한, Ricard et al. (1998)는 카드뮴 농도 10과 25 µg/L에 30일 동안 노출시킨 무지개 송어에서 체중의 증가가 노출농도의 증가와는 역상관관계를 나타내고 있다고 하였고, 이와는 다른 어종으로 아치사 농도에 30일간 노출시킨 *Gatostomus comersoni*, *Micropterus dolomieu*와 *Jordanella floridae* 등도 성장률이 감소되는 결과를 나타내고 있다 (Spehar, 1976; Eaton et al., 1978).

Jones et al. (2001)에 따르면 Cd에 노출된 rainbow trout에서는 성장호르몬의 발현이 지연되며, 이는 카드뮴이 발정호르몬인 에스트로겐의 조절을 방해하여 성장호르몬의 발현을 저해하기 때문이라고 하였다. 또한, 중금속에 노출된 잉어 (*Cyprinus carpio*)는 노출기간에 길어지면서 성장이 지연되는 결과를 나타내는데, 이는 중금속에 노출됨에 따라 먹이를 통해 얻은 에너지를 성장에 이용한 것이 아니라 항상성 유지와 중금속에 대한 방어기작에 이용하였기 때문이라고 하였다 (De Boeck et al., 1997). 따라서 카드뮴에 노출된 넙치는 상기의 원인에 의해 성장이 감소하는 것으로 추측되며, 카드뮴에 6주 동안 노출될 경우 210 µg/L 농도 이상에서 그 영향이 나타날 것으로 예상된다.

어류의 호흡기관은 구강과 한 쌍의 새개강, 아가미로 이루어져 있으며 아가미가 손상이 되면 호흡장애를 발생하게 되는데, 중금속에 노출된 어류는 아가미 새개의 손상으로 호흡곤란을 일으켜 호흡을 감소의 원인이 된다 (McKim and Goeden, 1982; Sippel et al., 1983). 실제적으로 아치사농도의 카드뮴에 노출시킨 곤쟁이류 (*N. awatschenis*)는 카드뮴의 농도가 높을수록 산소소비가 감소한다고 하였다 (Gaudy et al., 1991). 또한, 카드뮴과 다른 금속인 철의 노출에 대한 넙치의 영향에 대한 연구에서 lamella 등의 아가미 구조가 손상이 되어 산소 소비가 감소하였다고 하였다 (Kang et al., 1999).

6주간의 90, 210, 450, 980 µg/L의 카드뮴에 노출된 넙치의 산소 소비율은 대조구에 비해 각각 3.3, 18.3, 30.0, 50.1%가 감소하였고, 210 µg/L 농도 이상에서는 유의한 감소를 나타냈다. 이와는 반하는 결과로 Hollis et al. (2000)의 보고에 따르면 30일 동안 0.07과 0.11 µg/L의 카드뮴에 노출시킨 무지개송어 (*Oncorhynchus mykiss*)의 산소 소비율은 변화가 없었다고 하였으나, 위 노출농도는 자연적인 농도범위를 벗어나지 않으며, USEPA의 기준치 (USEPA, 1986)인

0.32 $\mu\text{g/L}$ 보다는 낮은 농도로서 아가미 조직의 손상 등의 문제가 발생하는 정도의 농도가 되지 않았을 것으로 추측된다.

이상의 결과와 토의로부터 연안 해역 및 양식장 등에서 210 $\mu\text{g/L}$ 이상의 카드뮴이 6주 이상 지속될 경우, 넙치는 대사활동의 저하 등으로 인해 성장장애를 일으킬 것이며, 980 $\mu\text{g/L}$ 이상일 경우에는 사망할 것으로 예상된다.

요 약

넙치의 생존, 성장 및 대사에 미치는 카드뮴의 만성적 독성을 파악하기 위하여 6주 동안 여러 가지 카드뮴 농도에 노출시켜 실험을 실시하였다. 넙치의 생존율은 카드뮴농도 980 $\mu\text{g/L}$ 에서 유의한 감소를 나타냈다. 넙치의 성장률과 사료효율은 카드뮴농도가 증가할수록 감소를 하여 210 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도에서는 대조구에 비하여 유의한 감소를 나타냈다. 넙치의 대사율은 카드뮴농도 90, 210, 450, 980 $\mu\text{g/L}$ 에서 대조구보다 각각 3.3, 18.3, 30.0, 50.1%가 저하하여 210 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도에서는 유의한 감소를 나타냈다.

참 고 문 헌

- Choi, H.G., J.S. Park and P.Y. Lee. 1992. Study on the heavy metal concentration in mussel and oyster from the Korean coastal water. *J. Korean Fish. Soc.*, 25, 485~494.
- De Boeck, G., A. Vlaeminck and R. BLust. 1997. Effects of sublethal copper exposure on copper accumulation, food consumption, growth, energy stores, and nucleic acid content in common carp. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 33, 415~422.
- Eaton, J.G., J.M. McKim and G.W. Holcombe. 1978. Metal toxicity to embryos and larvae of seven freshwater fish species-I. Cadmium. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 19, 95~103.
- Gaudy, R., J.P. Guerin and P. Kerambrum. 1991. Sublethal effects of cadmium on respiratory metabolism, nutrition, excretion and hydrolase activity in *Leptomysis lingvura* (Crustacea: Mysidacea). *Mar. Biol.*, 109, 493~501.
- Hollis, L., J.C. McGeer, D.G. McDonald and C.M. Wood. 2000. Effects of long term sublethal Cd exposure in rainbow trout during soft water exposure: implications for biotic ligand modelling. *Aquat. Toxicol.* 51, 93~105.
- Jones, I., P. Kille and G. Sweeney. 2001. Cadmium delays growth hormone expression during rainbow trout development. *J. Fish Biol.*, 59, 1015~1022.
- Kang, J.C., H.Y. Kim and P. Chin. 1997. Toxicity of copper, cadmium and chromium on survival, growth and oxygen consumption of the mysid, *Neomysis awatschenis*. *J. Korean Fish. Soc.*, 30, 874~881 (in Korean).
- Kang, J.C., J.S. Lee and J.H. Jee. 1999. Ecophysiological responses and subsequent recovery of the olive flounder, *Paralichthys olivaceus* exposed to hypoxia and iron. II. Survival, metabolic and histological changes of the olive flounder exposed to iron. *J. Korean Fish. Soc.*, 32, 699~705 (in Korean).
- Kang, J.C., O. Matsuda and P. Chin. 1995. Combined effects of hypoxia and hydrogen sulfide on survival, feeding activity and metabolic rate of blue crab, *Portunus trituberculatus*. *J. Korean Fish. Soc.*, 28, 549~556 (in Korean).
- Kim, S.G., H.S. Kwak, C.I. Choi and J.C. Kang. 2001. Accumulation of heavy metal by sea squirt, *Halocynthia roretzi*. *J. Korean Fish. Soc.*, 34, 125~130 (in Korean).
- Langston, W.J. 1990. Toxic effects of metal and the incidence of metal pollution in marine ecosystem. In: Heavy metals in the marine environment. Furness, R.W. and P.S. Rainbow eds. CRC press. Florida, pp. 101~122.
- Lee, S.H. and K.W. Lee, 1984. Heavy Metals in Mussels in the Korean Coastal Waters. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 19, 111~117.
- Lemaire, G.S. and P. Lemaire, 1992. Interactive effects of cadmium and benzo(a)pyrene on cellular structure and biotransformation enzymes of the liver of the European eel. *Aquat. Toxicol.*, 22, 145~160.
- McKim, J.M. and H.M. Goeden. 1982. A direct measure of the uptake efficiency of a xenobiotic chemical across the gills of brook trout under normoxic and hypoxic conditions. *Comp. Biochem. Physiol.* 72C, 65~69.
- Miliou, H., N. Zaboukas and M. Moraitou-Apostolopoulou. 1998. Biochemical composition, growth and survival of the guppy, *Poecilia reticulata*, during chronic sublethal exposure to cadmium. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 35, 58~63.
- Park, C.K., K.R. Yang and I.K. Lee, 1977. Trace metals in several edible marine algae of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 12, 41~47.
- Park, J.S. and H.G. Kim, 1979. Bioassays on marine organisms. III. Acute toxicity test of mercury, copper, cadmium and to yellow-tail, *Seriola quinqueradiata* and Rock Bream, *Oplegnathus fasciatus*. *J. Korean Fish. Soc.*, 12, 119~123.
- Ricard, A.C., C. Daniel, P. Anderson and A. Hontela. 1998. Effects of subchronic exposure to cadmium chloride on endocrine and metabolic functions in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 34, 377~381.
- Sangalang, G.B. and M.J. O'Hallorn. 1972. Cadmium-induced testicular injury and alteration of androgen synthesis in brook trout. *Nature*, 140, 470~471.
- Sastry, K.V. and K. Subhadra. 1982. Effect of cadmium on some aspects of carbohydrate metabolism in a fresh water catfish, *Heteropneustes fossilis*. *Toxicol. Lett.* 14, 45~51.
- Sippel, A., J. Geraci and P. Hodson. 1983. Histopathological and physiological responses of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) to sublethal levels of lead. *Water Res.*, 17, 1115~1121.
- Soengas, J.L., M.J. Agra-Lago, B. Carballo, M.D. Andrés and J.A.R. Vieira. 1996. Effect of an acute exposure to sublethal concentrations of cadmium on liver carbohydrate metabolism of Atlantic Salmon (*Salmon salar*). *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.*, 57, 625~631.
- Sorensen, E.M. 1991. Cadmium. In: Metal poisoning in fish. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 175~234.
- Spehar, R.L. 1976. Cadmium and zinc toxicity to flagfish, *Jordanella floridae*. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 33, 1939~1945.
- Stoeppler, M. 1991. Cadmium. In: Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis and biological relevance. Merian, E., eds. VCH, Weinheim, pp. 803~851.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1986. Quality criteria for water. USEPA Office of Water Regulations

- and standards, Washington DC, USEPA 440/5-85-001.
- Verbost, P.M., J. Van Rooij, G. Flik, R.A.C. Lock and S.E. Wendelaar Bonga. 1989. The movement of cadmium through freshwater trout branchial epithelium and its interference with calcium transport. *J. Exp. Biol.*, 145, 185~197.
- Versteeg, D. and J.P. Giesy. 1986. The histological and biochemical effects of cadmium exposure in the bluegill sunfish (*Lepomis macrochirus*). *Ecotox. Environ. Safety*, 11, 34~43.
- Wilson, R.W. and E.W. Taylor. 1993. The physiological response of freshwater rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, during acutely lethal copper exposure. *J. Comp. Physiol.*, 163, 38~47.

2002년 8월 16일 접수
2003년 1월 25일 수리