

카드뮴 장기노출에 따른 넙치, *Paralichthys olivaceus*의 기관별 축적

장석우 · 김성길* · 강주찬
부경대학교 수산생명의학과

Cadmium Accumulation in Tissue of Olive Flounder, *Paralichthys olivaceus* During Long Term Exposure

Suck-Woo JANG, Seong-Gil KIM* and Ju-Chan KANG
Department of Aquatic Life Medicine, Pukyong National University,
Busan 608-737, Korea

Accumulation of cadmium (Cd) was investigated in organs (gill, liver, kidney, intestine) of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) exposed to sub-lethal concentration (5, 10, 50, 100 µg/L) of Cd for 30 days. Cd exposure resulted in an increased Cd accumulation in liver of flounder for exposure periods and Cd concentration, and Cd accumulation increased linearly with the exposure time. At 20 days of Cd exposure, the order of Cd accumulation in organs was gill>intestine>liver>kidney and after 30 days of exposure, Cd accumulation in organs was intestine>liver>gill>kidney. An inverse relationship was observed between the accumulation factor (AF) and the exposure level, but AF shows an increase with exposure time.

Key words: Cadmium, Accumulation, *Paralichthys olivaceus*, Exposure

서론

산업사회의 발달에 따라 해양에 존재하는 카드뮴과 같은 중금속은 노출농도가 증가되고 있으며, 이는 여러 가지 측면에서 어류에 많은 영향을 미치고 있다 (Bryan, 1976). 카드뮴은 어류에 있어서 성장장애를 비롯한 아가미에서의 칼슘 흡수 억제, 간 기능 저하뿐만 아니라 생식이나 대사작용을 방해하기도 한다 (Verboost et al., 1989; Sorensen, 1991; Lemaire and Lemaire, 1992; Soengas et al., 1996). 또한, 호흡관련 기능뿐만 아니라 혈장내 혈당이 증가하거나 칼륨과 칼슘을 저하시키는 등 혈장의 조성을 바꾸며 (Sorensen, 1991), 카드뮴에 노출된 어류의 간이나 신장, 근육 등의 기관에서는 대사활동을 저해하기도 한다 (Sastri and Subhadra, 1982).

어류에 있어서 카드뮴은 주로 신장, 간, 아가미 및 소화기관 등에 주로 축적되며, 카드뮴의 독성에 가장 민감한 기관은 신장으로 알려져 있다 (Woo et al., 1993). 어류의 카드뮴 축적이나 독성에 대한 기관별 연구로는 주로 간을 중심으로 연구가 되고 있는데, 이는 간이 기본적인 대사작용을 관장할 뿐 아니라, 카드뮴 독성에 대한 해독작용과 배출작용을 발생시키는 glutathione (GSH)과 metallothionein (MTs) 등이 발현되는 주요 기관이기 때문이다 (Landis and Yu, 1995). 어류의 중금속 축적은 어종, 개체, 섭식 방식, 서식환경 및 기관에 따라 상이하게 나타난다 (Spacie and Hamelink, 1985). 또한, 어류의 중금속 축적은 독성과 많은 관련이 있으며, 각 기관별 축적정도는 중금속 오염에 대한 biomonitor로 이용되기 때문에, 각 기관에 따른 중금속의 축적정도는 매우

중요한 의미를 갖는다 (Handy, 1992).

따라서 본 연구는 연안의 카드뮴 오염에 따른 어류에 대한 축적정도를 파악하기 위하여, 우리 나라 연안의 정착성 어류인 넙치 (*Paralichthys olivaceus*)를 대상으로 카드뮴 장기노출에 따른 각 기관별 축적정도를 조사하였다.

재료 및 방법

1. 실험어종

실험에 사용한 넙치 (*P. olivaceus*)는 남해 소재 육상수조식 양어장에서 분양을 받아 실험실로 운반한 후, 300 L의 순환 여과식수조에서 한달 이상 순치시켰다. 이때 수온, pH, 염분 및 용존산소는 각각 18.0 ± 0.2°C, 8.1 ± 0.2, 32.7 ± 0.4‰ 및 6.74 ± 0.84 mg/L 이었다. 이같은 조건에서 순치시킨 넙치 중에 외관상 질병의 증세가 나타나지 않고, 먹이 붙임이 좋은 전장 17.10 ± 0.11 cm, 체중 52.50 ± 0.90 g의 개체를 실험에 사용하였다.

2. 실험방법

실험은 환수식 방법에 의해 실시하였으며, 실험해수의 환수는 카드뮴농도의 변화를 고려하여 2일을 기준으로 하였으나 수질측정 결과에 따라 수시로 교환하였다 (Parsons et al., 1984). 실험농도는 급성독성 실험결과로부터 CdCl₂ (Aldrich Co.)를 사용하여 아치사농도를 기준으로 각각 100, 50, 10, 5 µg/L의 4구간을 설정하였다. 실험에 사용한 해수의 성분은 Table 1과 같으며, 대조구는 카드뮴을 첨가하지 않은 동일 해수를 사용하였다. 실험기간동안 먹이는 넙치용 사료를 어체중 (wet wt.)당 3%를 오전과 오후로 나누어 공급하였다.

*Corresponding author: cosmas@mail.pknu.ac.kr

Table 1. The chemical components of seawater used in the sub-lethal cadmium exposure experiment

Item	Value
pH	8.1 ± 0.2
Salinity (‰)	32.7 ± 0.4
Ammonia (μg/L)	88.07 ± 28.94
Nitrite (μg/L)	1.37 ± 0.28
Nitrate (μg/L)	25.21 ± 5.76
Phosphate (μg/L)	5.05 ± 0.96
Dissolved oxygen (mg/L)	6.74 ± 0.84
Cadmium (μg/L)	N.D.*

*N.D.: Not detected

3. 중금속 분석

중금속 분석을 위한 넙치의 각 기관별 시료는 30일간의 실험기간 중 매 10일마다 4마씩 채취하였다. 넙치의 간, 신장, 아가미 및 창자를 채취하여 각 기관을 3차 증류수로 세척한 후 60°C의 건조기에서 24시간 건조시키고 건중량을 측정하였다. 이러한 건중량을 바탕으로 시료 분해는 wet digestion method로 1:1 HNO₃ (Merck, re-distilled)를 사용하여 120°C의 hot plate에서 가온 시키면서 분해하여 유기물이 완전히 없어져 맑은 색깔이 될 때까지 위 과정을 반복하였다 (APHA, 1992). 이렇게 분해시킨 시료는 1% HNO₃, 20 mL를 넣어서 Furnace Atomic Absorption Spectro-

photometer (AAS, Perkin-Elmer)를 사용하여 농도를 측정하였으며, 카드뮴의 농도는 건중량 (μg/g)으로 환산하였다. 카드뮴에 대한 넙치의 각 기관별 축적계수 (accumulation factor; AF)는 다음 식에 따라 계산하였다 (Holwerda, 1991).

$$\text{Accumulation Factor (AF)} = \frac{[\text{Me}]_{\text{fw,exp}} - [\text{Me}]_{\text{fw,control}}}{[\text{Me}]_{\text{water}}}$$

[Me]_{fw,exp}: metal concentration in the experimental group in mg/g fresh weight

[Me]_{fw,control}: metal concentration in the control group in mg/g fresh weight

[Me]_{water}: metal concentration in the water in mg/L

각 기관별 카드뮴 농도의 유의성 검정은 대조구와 노출 농도 구간간의 차이를 ANOVA를 이용하여 실시하였고, 다중비교는 최소 유의차 검정으로 평균간의 차이를 검정하였다 (Zar, 1996).

결 과

실험기간동안 각 기관에 따른 카드뮴 축적 결과를 Fig. 1에 나타냈다. 아가미의 카드뮴 축적은 노출농도와 노출기간에 따라 증가를 하는 경향을 보여 대조구에 비해 10 μg/L 이상에서는 노출 10일 이후, 5 μg/L에서는 20일 이후 유의한 축적이 이루어졌다 (p<0.05).

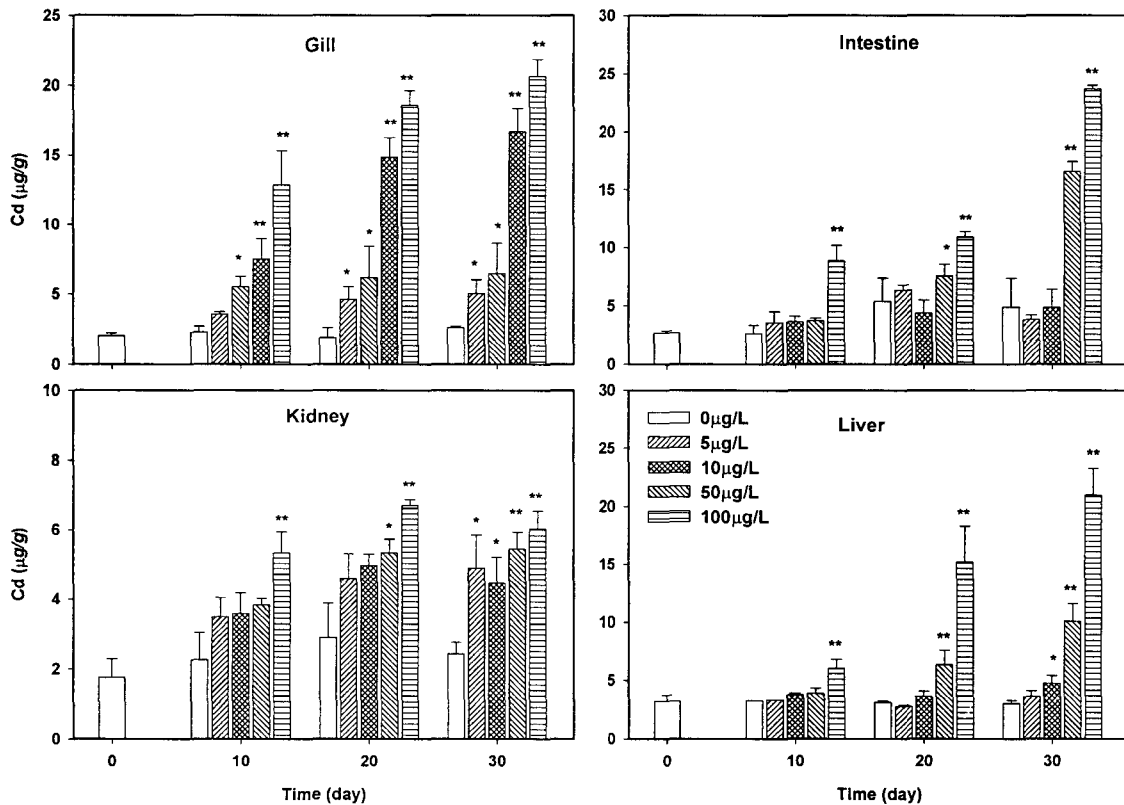


Fig. 1. Mean cadmium concentration in a gill, intestine, kidney and liver tissue of flounder, *Paralichthys olivaceus* (mean ± SE), exposed to cadmium. Significant differences from controls at each time interval are indicated with asterisks (* for p<0.05 and ** for p<0.01).

창자의 카드뮴 축적은 100 µg/L에서 10일 이후 유의하게 증가하였고 (p<0.01), 50 µg/L에서는 20일 이후에 유의하게 증가하였다 (p<0.05). 100 µg/L에서의 카드뮴 축적은 10일과 20일의 축적량은 커다란 차이가 보이지 않다가 20일 이후 급격하게 증가하여 30일에는 20일에 비해 거의 2배가 넘었다.

신장의 카드뮴 축적은 10일 이후 100 µg/L 농도에서 유의한 증가를 나타내었고 (p<0.01), 20일 이후 50 µg/L 농도에서, 30일에는 5 µg/L 이상의 농도에서 유의한 증가를 보였다 (p<0.05).

간의 카드뮴 축적은 10일 이후 100 µg/L 농도에서 유의하게 증가하였고 (p<0.01), 20일 이후는 50 µg/L 농도에서 (p<0.01), 30일째에는 10 µg/L 농도에서 유의한 증가를 나타내었다 (p<0.05).

한편, 아가미와 간의 카드뮴의 축적은 노출기간에 따라 직선적으로 유의한 증가를 나타내어 (p<0.05), 100 µg/L 농도에서 직선 회귀식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Cd (Gill) = 6.155 \text{ day} - 1.86, R^2 = 0.9081, p < 0.05$$

$$Cd (Liver) = 6.232 \text{ day} - 4.24, R^2 = 0.9648, p < 0.05$$

평균 축적량을 각 기관별로 그 차이를 보면 아가미>창자>간>신장의 순으로 나타났다 (Fig. 2). 하지만, 노출기간에 따른 기관별 축적양상의 약간의 차이를 나타내었다. 노출 20일까지는 기관별 축적순서는 아가미>간>창자>신장의 순서로 나타나지만, 노출 30일 이후에는 아가미와 간에서 축적이 완만한 경향을 나타내며, 창자의 축적은 급격한 경향을 나타내어 기관별 축적순서는 창자>

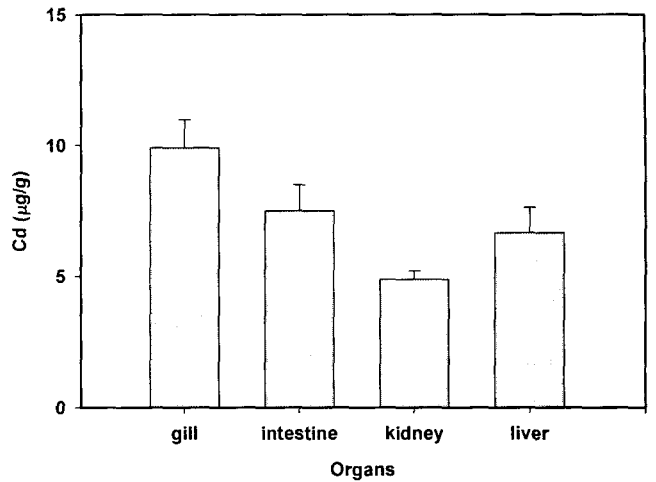


Fig. 2. Mean cadmium concentration in a gill, intestine, kidney and liver tissue of flounder, *Paralichthys olivaceus* (mean ± SE), exposed to cadmium during 30 day, respectively.

아가미>간>신장의 순서로 나타났다.

50 µg/L 이상의 카드뮴 농도에 노출시킨 넙치의 각 기관별 축적계수를 Fig. 3에 나타냈다. 넙치에 대한 카드뮴의 축적계수는 아가미와 신장, 창자에서 노출농도가 클수록 작으며, 노출 기간에 따라 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 3). 그러나, 간에서는 노출

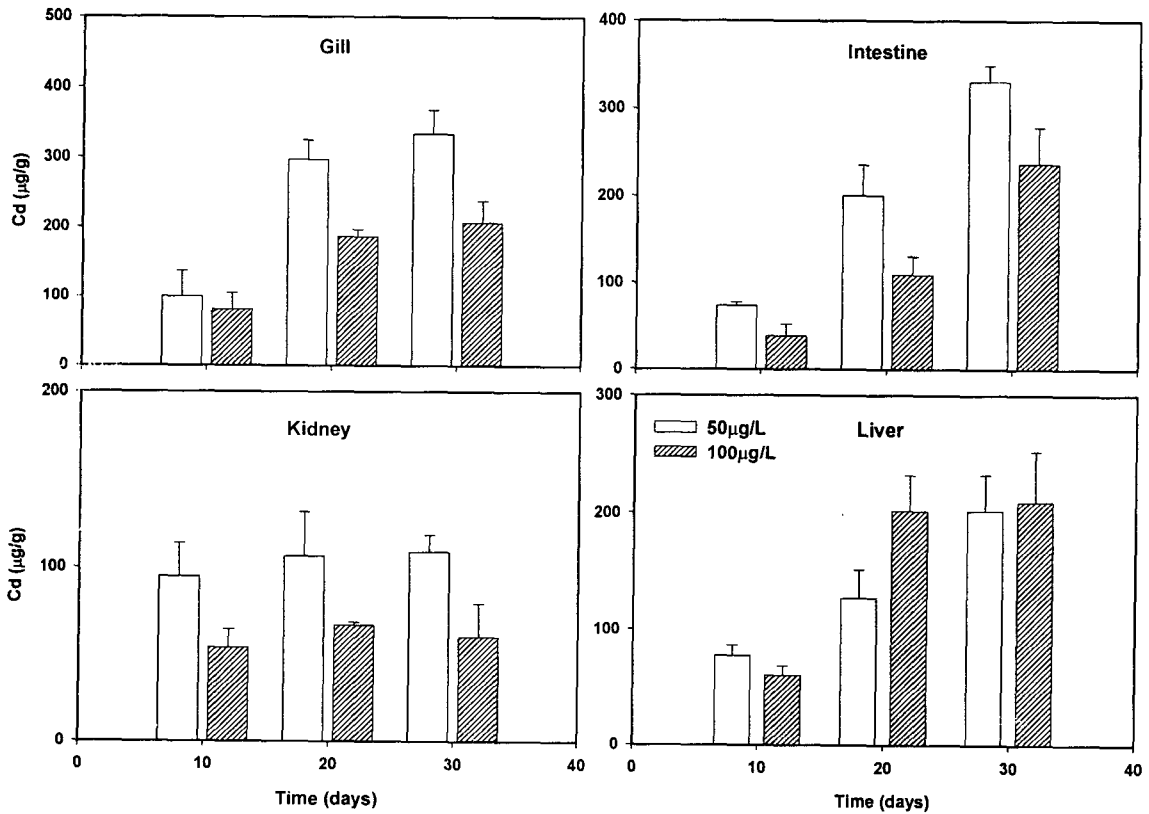


Fig. 3. Accumulation factor (AF) over time in a gill, intestine, kidney and liver tissue of flounder, *Paralichthys olivaceus* (mean ± SE), exposed to cadmium, respectively.

기간에 따라 축적계수가 증가를 하지만 노출농도에 따른 유의성은 발견되지 않았다. 농도 100 $\mu\text{g/L}$ 에서 노출 20일과 30일째의 축적계수는 변화가 크게 없는 결과를 보였고, 창자만이 노출기간에 따라서 지속적으로 증가하는 결과를 나타내었다.

고 찰

어류에서 중금속의 축적은 노출기간과 노출농도에 따라서 크게 영향을 받으며, 온도, 염분, 해수의 화학적인 특성, 어류의 연령이나 대사를 등 여러 요소에 따라서 영향을 받는다 (Pagenkopf, 1983; Heath, 1987; Goyer, 1991). 카드뮴 노출에 의한 넙치의 아가미, 간, 신장 및 창자의 카드뮴 축적은 노출농도와 노출기간에 따라 높게 축적되는 양상을 나타내어 다른 수중생물과 비슷한 양상을 보였다 (Gill et al., 1992; Pelgrom et al., 1995; McGeer et al., 2000). 그 중 간과 신장에서 카드뮴이 노출농도와 노출기간에 따라 높게 축적되는 것은 간과 신장이 중금속에 대한 해독작용과 배출작용에 매우 중요한 기능을 담당하며 MTs처럼 금속과 결합하는 단백질을 유도하기 때문이다 (Klaverkamp et al., 1994; Roesijadi, 1992).

일반적으로 수중생물은 중금속을 받아들인데 크게 2가지의 경로를 갖는다. 용존상태의 중금속은 아가미에서 주로 흡수를 하며, 먹이나 퇴적물과 같은 입자상태의 중금속은 주로 소화기관에서 흡수를 한다 (Leland and Kuwabara, 1985). 본 실험에서는 각 기관별로 그 차이를 보면 노출 20일까지의 평균 카드뮴 축적순서는 아가미>간>창자>신장의 순으로 나타났다. 위 순서에서 보듯 아가미가 가장 많이 축적하는 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 틸라피아 (Pelgrom et al., 1995)와 무지개송어 (Giles, 1988; Hollis et al., 2000)의 경우와도 일치한다. 아가미는 외부 환경과 직접 접촉을 하므로 물 속에 용존된 카드뮴과 결합할 가능성이 가장 높기 때문이라고 여겨진다. 또한, 어류가 중금속에 노출시 아가미에서 점액의 양이 증가하는데, 오히려 이러한 점액의 분비가 중금속과의 결합으로 중금속의 축적이 증가한다고 보고하고 있다 (Handy and Eddy, 1991; Reid and McDonald, 1991) 본 연구에서는 간이 신장에 비해 2~3배의 높은 카드뮴 축적을 나타내었는데, Cinier et al. (1999)은 53 및 443 $\mu\text{g/L}$ 의 카드뮴에 127일간 노출시킨 잉어 (*Cyprinus carpio*)에서 간보다 신장에서 2~4배의 높은 축적을 보였다고 보고하였다. 또한, 50 $\mu\text{g/L}$ 의 카드뮴에 28일 동안 노출시킨 뱀장어 (*Anguilla japonica*)에서도 간보다 신장에서 더 높은 카드뮴 축적을 나타내었다 (Yang and Chen, 1996). 그러나, 꺾지류 (Edgen and Nortter, 1980)와 가시고기 (Woodworth and Pascoe, 1980), 잉어 (Suresh et al., 1993) 등의 연구에서는 주로 간에서 축적이 된다고 하였다. 이렇게 간과 신장에서 축적의 차이는 생물의 개체변이와 종간의 차이에서 나며 (Kraal et al., 1995), 담수 경골어류는 카드뮴을 아가미에서 흡수하여 주로 신장에서 축적되는 반면에, 해수 경골어류는 아가미에서 흡수하여 신장보다는 주로 간에 축적한다 (Hawkins et al., 1980). 따라서, 담수 어종과는 달리 해수 어종인 넙치에서 신장에 비해 간에 축적정도가 높은 것은 서식환경의 차이와 종간의 차이에 따른 결과로 보인다. 또한, 본 실험에서 신장에서 카드뮴의 축적이 노출 20일에 가장 높은

값을 나타내다가, 노출 30일에는 거의 변화가 없는 상태를 나타내었다. 이는 신장에서 카드뮴의 축적이 20일 이후에는 포화상태에 이르는 것으로 판단된다.

카드뮴의 축적을 축적계수로서 표현하는데는 크게 2가지의 목적이 있다. 첫째는 어류가 노출되는 정도에 따라 얼마나 축적할 수 있는지를 파악하는 것이고, 둘째는 어류가 카드뮴을 축적하는 능력에 대해 적절한 한계를 찾는 것이다 (Sorensen, 1991). 본 실험에서 넙치의 카드뮴에 대한 축적계수는 노출농도와 반비례하며, 노출 기간에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 카드뮴에 장기간 노출된 잉어 (Cinier et al., 1999)와 뱀장어 (Yang and Chen, 1996)에서도 노출농도와 반비례하며, 노출기간에 따라 증가하여 본 연구결과와 같은 경향을 나타내었다.

본 연구에서 카드뮴 노출 30일째에는 각 기관별 축적의 순서가 창자>아가미>간>신장의 순으로 나타나 20일째까지의 축적 경향과는 약간 차이를 나타냈다. Kraal et al. (1995)의 연구에서는 80 $\mu\text{g/L}$ -Cd의 농도에서 35일간 노출시킨 잉어에서 기관별 축적은 창자가 가장 높았는데, 이는 카드뮴을 침착시키는 장의 기능적인 원인이거나 카드뮴을 담즙에 의해 창자로 배출하는 작용 (enterohepatic circulation) 때문이라고 하였다. 또한, 아가미, 신장 및 아가미에서 노출 30일째에는 축적계수의 변화가 거의 없는 것으로 나타나 넙치에 있어서 각 기관별 카드뮴의 축적은 노출기간이 길어질수록 간이나 아가미보다는 창자의 축적이 가장 많이 되는 것으로 예상된다. 위의 결과에서 보여주듯이 넙치에 있어서 카드뮴의 기관별 축적양상은 노출농도와 기간에 따라 달라짐을 알 수 있으며, 노출 30일 이후에는 간과 신장 및 아가미에서는 축적률이 감소되고 창자에서의 축적이 증가됨을 알 수가 있다.

요 약

넙치 (*Paralichthys olivaceus*)를 카드뮴 아치사 농도인 5, 10, 50, 100 $\mu\text{g/L}$ 의 구간에 노출시켜 30일 동안 아가미, 간, 신장, 창자에서 축적되는 정도를 조사하였다. 넙치에서 카드뮴의 축적은 아가미, 창자와 간에서 카드뮴의 노출농도와 노출기간에 따라서 증가를 하였으며, 그러한 양상은 선형적으로 증가를 하였다. 노출 20일까지는 기관별 축적순서는 아가미>간>창자>신장의 순서로 나타나지만, 노출 30일 이후에는 아가미와 간에서 축적이 완만한 경향을 나타내며, 창자의 축적은 급격한 경향을 나타내어 기관별 축적순서는 창자>아가미>간>신장의 순서로 나타났다.

카드뮴의 넙치에 대한 축적계수는 아가미와 신장, 창자에서 노출농도에 반비례하며, 노출 시간에 따라 증가하는 경향을 나타냈다.

참 고 문 헌

- APHA-AWWA-WEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th. ed. APHA. Washington, D.C. 1286pp.
- Bryan, G.W. 1976. Some aspects of heavy metal tolerance in aquatic organisms. In *Effects of Pollutants on Aquatic Organisms*, A.P. M. Lockwood, eds., Cambridge University press, London, pp.

- 7~35.
- Cinier, C.C., M. Petit-Ramel, R. Faure, D. Garin and Y. Bouvet. 1999. Kinetics of cadmium accumulation and elimination in carp *Cyprinus carpio* tissues. *Comp. Biochem. Physiol.*, 122C, 345~352.
- Edgren, M. and M. Notter. 1980. Cadmium uptake by fingerlings of perch (*Perca fluviatilis*) studied by Cd-115 m at two different temperatures. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 24, 647~651.
- Giles, M.A. 1988. Accumulation of cadmium by rainbow trout, *Salmo gairdneri*, during extended exposure. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 45, 1045~1053.
- Gill, T.S., C.P. Bianchi and A. Epple. 1992. Trace metal (Cu and Zn) adaptation of organ systems of the american eel, *Anguilla rostrata*, to external concentrations of cadmium. *Comp. Biochem. Physiol.*, 102C, 361~371.
- Goyer, R.A. 1991. Toxic Effects of Metal in Casarett and Doull's Toxicology; Basic Science of Poisons. 4th ed. Pergamon Press, Oxford, 1033pp.
- Handy, R.D. 1992. The assessment of episodic metal pollution. I. Use and limitation of tissue contaminant analysis in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after short waterborne exposure to cadmium or copper. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 22, 74~81.
- Handy, R.D. and F.B. Eddy. 1991. Effects of inorganic cations on Na⁺ adsorption to the gill and body surface of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) in dilute solutions. *Can. J. Fish. Aquat. Res.*, 48, 1829~1837.
- Hawkins, W.E., L.G. Tate and T.G. Sarphie. 1980. Acute effects of cadmium on the spot *Leiostomus xanthurus* (Teleostei): tissue distribution of renal ultrastructure. *J. Toxicol. Environ. Health.*, 6, 283~295.
- Heath, A.G. 1987. Water Pollution and Fish Physiology. CRC press, Florida, 245pp.
- 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: implication for biotic ligand modeling. *Aquat. Toxicol.*, 51, 93~105.
- Holwerda, D.A. 1991. Cadmium kinetics in freshwater clams. V. Cadmium-copper interaction in metal accumulation by *Anodonta cygnea* and characterization of metal binding protein. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 21, 432~437.
- Klaverkamp, J.F., W.A. MacDonald, D.A. Duncan and R. Wagemann. 1994. Metallothionein and acclimation to heavy metals in fish: A review. In *Contaminant Effects on Fisheries*, V.W. Cairns, P.V. Hodson and J.O. Nriagu, eds., *Adv. Environ. Sci. Technol. Series* 16, Wiley, New York, pp. 99~113.
- Kraal, M.H., M.H.S. Kraak, C.J. de Groot and C. Davids. 1995. Uptake and tissue distribution of dietary and aqueous cadmium by carp (*Cyprinus carpio*). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 31, 179~183.
- Landis, W.G. and M.H. Yu. 1995. Biotransformation, detoxification, and biodegradation. In *Introduction to Environmental Toxicology*, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 161~196.
- Leland, H.V. and J.S. Kuwabara. 1985. Trace metals. In *Fundamentals of Aquatic Toxicology*, G.M. Rand and S.R. Petrocelli, eds., Hemisphere Publishing Corporation, New York, pp. 374~415.
- Lemaire, G.S. and P. Lemaire. 1992. Interactive effects of cadmium and benzo(a)pyrene on cellular structure and biotransformation enzymes of the european eel. *Aquat. Toxicol.*, 22, 145~160.
- McGeer, J.C., C. Szebedinszky, D.G. McDonald and C.M. Wood. 2000. Effects of chronic sublethal exposure to waterborne Cu, Cd or Zn in rainbow trout. I: Iono-regulatory disturbance and metabolic costs. *Aquat. Toxicol.*, 50, 231~243.
- Pagenkopf, G.K. 1983. Gill surface interaction model for trace-metal toxicity to fishes: role of complexation, pH and water hardness. *Environ. Sci. Technol.*, 17, 342~347.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon press, New York, 173pp.
- Pelgrom, S.M.G., L.P.M. Lamers, R.A.C. Lock, P.H.M. Balm and S.E. W. Bonga. 1995. Interactions between copper and cadmium modify metal organ distribution in mature tilapia, *Oreochromis mossambicus*. *Environ. Pollut.*, 90, 425~423.
- Reid, S.D. and D.G. McDonald. 1991. Metal binding activity of the gills of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 48, 1061~1068.
- Roesijadi, G. 1992. Metallothioneins in metal regulation and toxicity in aquatic animals. *Aquat. Toxicol.*, 22, 81~114.
- Sastry, K.V. and K. Subhadra. 1982. Effect of cadmium on some aspects of carbohydrate metabolism in a freshwater catfish, *Heteropneustes fossilis*. *Toxicol. Lett.*, 14, 45~51.
- Soengas, J.L., M.J. Agra-Lago, B. Carballo, M.D. Andres and J.A.R. Veira. 1996. Effect of an acute exposure to sublethal concentration of cadmium on liver carbohydrate metabolism of atlantic salmon (*Salmo salar*). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 57, 625~631.
- Sorensen, E.M. 1991. Cadmium. In *Metal Poisoning in Fish*. CRC press, Boca Raton, Florida, pp. 175~234.
- Spacie, A. and J.L. Hamelink. 1985. Bioaccumulation. In *Fundamentals of Aquatic Toxicology*, G.M. Rand and S.R. Petrocelli, eds., Hemisphere Publishing Corporation, New York, pp. 495~525.
- Suresh, A., B. Sivaramakrishna and K. Radhakrishnaiah. 1993. Patterns of cadmium accumulation in the organs of fry and fingerlings of freshwater fish *Cyprinus carpio* following cadmium exposure. *Chemosphere*, 26, 945~953.
- Verboost, P.M., J.V. Roij, 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.
- Woo, P.T.K., Y.M. Sun and M.K. Wong. 1993. The effects of short-term acute cadmium exposure on blue tilapia, *Oreochromis aureus*. *Environ. Biol. Fish.*, 37, 67~74.
- Woodworth, J. and D. Pascoe. 1983. Cadmium uptake and distribution in sticklebacks related to the concentration and method of exposure. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 7, 525~530.
- Yang, H.N. and H.C. Chen. 1996. Uptake and elimination of cadmium by japanese eel, *Anguilla japonica*, at various temperatures. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 56, 670~676.
- Zar, J.H. 1996. Biostatistical Analysis. Prentice Hall, London, 662pp.

2002년 4월 11일 접수

2002년 8월 31일 수리