

## 카드뮴 장기노출 후 넙치, *Paralichthys olivaceus*의 기관에 따른 카드뮴의 배출

김성길\* · 장석우 · 강주찬  
부경대학교 수산생명의학과

### Cadmium Elimination in Tissue of Olive Flounder, *Paralichthys olivaceus* after Long-Term Exposure

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

Experiments were carried out to investigate the elimination of cadmium in tissues (gill, intestine, liver, kidney and muscle) of flounder, *Paralichthys olivaceus*, after sub-lethal Cd exposure (5, 50, 100 µg/L). During the depuration phase, Cd concentration in the gill decreased immediately following the end of the exposure period. The elimination rates at the end of depuration periods were 18% for 50 µg/L exposure and 70% for 100 µg/L exposure. Intestine showed fastest elimination rates of Cd at all concentration. At the end of the depuration period, the Cd concentration was similar to that in the control. Cd elimination in liver significantly decreased after 10 days of depuration period. After 20 days of depuration, the elimination rate was 66.20% in the fish exposed to 50 µg/L and 86.22% in the fish exposed to 100 µg/L. The order of cadmium elimination in tissues were decreased intestine > liver ≥ gill >> kidney during depuration periods. In this study the gill, intestine and liver showed faster elimination rate of Cd in 50, 100 µg/L-Cd exposure concentration. After the end of the Cd exposure, the Cd concentration in the kidney slowly decreased or remained constant and the Cd concentration in the muscle slowly increased or remained constant.

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

#### 서 론

산업사회의 발달에 따라 해양에 존재하는 카드뮴은 날로 노출 농도가 증가되고 있으며, 카드뮴 자체의 독성과 생물체에 축적되기 때문에 해양생태계에 악영향을 미치고 있다 (Jansen and Bro-Rasmussen, 1992).

카드뮴은 어류의 성장장애를 비롯한 아가미에서의 칼슘 흡수 억제, 간 기능 저하뿐만 아니라 생식이나 대사작용을 방해한다 (Verbost 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 (Sastry and Subhadra, 1982). 이같이 어류의 생리적인 기능에 미치는 카드뮴의 영향에 대한 보고는 많지만, 어류에 있어 카드뮴 축적과 제거에 대한 중금속의 작용기작 등에 대해서는 많이 알려져 있지 않다.

한편, 어류의 조직에서 배출되는 중금속은 온도, 내적활동력, 어류 연령, 어류의 대사 활성 및 중금속의 생체내 생물학적인 반감기 등에 의해 영향을 받는다 (Larson et al., 1985; Heath, 1987; Douben, 1989; Woo et al., 1993; Kargin, 1996; Nielsen and Andersen, 1996). 또한, 염분, 휴민산 (humic acid) 농도 및 온도 등의 환경 요인도 중금속 제거에 영향을 미치는 요인 중의 하나이다

(Van Dolah et al., 1987). 어류에 있어 중금속의 배출 경로는 아가미, 담즙, 배설물, 피부 및 점액을 거쳐서 이루어지며 (Varanasi and Markey, 1978; Heath, 1987), 이러한 중금속 제거양상에 대한 이해는 생물학적인 반감기 평가 등을 포함하여 건강보호라는 관점에서 매우 중요하다.

넙치 (*Paralichthys olivaceus*)는 우리나라의 대표적인 양식어종으로 저서성이며 (Dou, 1992; Jung et al., 2001), 다른 어종에 비하여 이동범위가 좁기 때문에 연안지역에서 중금속오염이나 또는 양식수의 이용과정에서 중금속에 노출시 많은 영향을 받을 것이라고 예상된다. 따라서 본 연구는 연안의 카드뮴 오염에 따른 어류의 중금속 제거양상을 파악하기 위하여, 넙치 (*P. olivaceus*)를 대상으로 기관별 축적된 카드뮴의 제거정도를 조사하였다.

#### 재료 및 방법

##### 실험어종

실험에 사용한 넙치 (*P. olivaceus*)는 남해 소재 육상수조식 양 어장에서 분양을 받아 실험실로 운반한 후, 300 L의 순환 여과식 수조에서 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. 이 같은 조건에서 순치 시킨 넙치 중에 외관상 질병의 증세가 나타나지 않고, 먹이 불임이 좋은 전장 17.10 ± 0.11 cm (mean ± S.E., n=240), 체중 52.50 ± 0.90 g의 개체를 실험에 사용하였다.

\* Corresponding author: sgkim9509@orgio.net

실험과정

카드뮴 노출은 환수식 방법에 의해 실시하였으며, 실험해수의 환수는 카드뮴농도의 변화를 고려하여 2일을 기준으로 하였으나 수질측정 결과에 따라 수시로 교환하였다 (Parsons et al., 1984). 실험에 사용한 해수의 성분은 Table 1과 같다. 먹이는 넙치용 사료를 어체중 (wet wt.)당 3%를 오전과 오후로 나누어 하루 2회 공급하였다. 실험농도는 예비실험을 바탕으로 CdCl<sub>2</sub> (Aldrich, USA)를 사용하여 각각 5, 50 및 100 µg/L의 3구간, 대조구는 카드뮴을 첨가하지 않은 자연해수를 사용하였다. 카드뮴 제거실험은 30일 동안 카드뮴에 노출시킨 개체를 정상해수로 이동시켜 20일 동안 사육하였다. 즉, 총 50일의 실험기간중 30일은 카드뮴노출을 20일은 카드뮴 제거 실험을 실시하였다.

Table 1. The chemical components of seawater used in the sublethal cadmium exposure and depuration experiment. Values indicate mean ± S.E.

Item	Value
Temperature (°C)	18.0 ± 0.2
Salinity (‰)	32.7 ± 0.4
pH	8.1 ± 0.2
SS (mg/L)	9.8 ± 0.2
Dissolved oxygen (mg/L)	6.74 ± 0.84
COD (mg/L)	0.93 ± 0.03
Ammonia (µg/L)	12.66 ± 1.25
Nitrite (µg/L)	1.37 ± 0.28
Nitrate (µg/L)	9.62 ± 1.01
Phosphate (µg/L)	5.05 ± 0.96
Fe (µg/L)	5.02 ± 0.87
Cd (µg/L)	N.D.*

\*N.D.: Not detected.

중금속 분석

중금속 분석을 위한 넙치의 각 기관별 시료는 노출 30일 이후, 정상해수로 옮겨 매 10일마다 8미씩 채취하였다. 넙치의 간, 신장, 아가미, 창자 및 근육을 채취하여 각 기관을 3차 증류수로 세척한 후 60°C의 건조기에서 24시간 건조시키고 건중량을 측정하였다. 이러한 건중량을 바탕으로 시료 분해는 wet digestion method로 1:1 HNO<sub>3</sub> (Suprapur grade, Merck, Germany)를 사용하여 120°C의 hot plate에서 가온시키면서 분해하여 유기물이 완전히 없어져 맑은 색깔이 될 때까지 위 과정을 반복하였다 (APHA, 1992). 이렇게 분해시킨 시료는 0.2 N HNO<sub>3</sub> 20 mL를 넣어서 Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS, Perkin-Elmer 3330)를 사용하여 농도를 측정하였으며, 카드뮴의 농도는 건중량 (µg/g)으로 환산하였다.

통계 분석

각 기관별 카드뮴 농도의 유의성 검정 (P<0.05)은 대조구와 노출 농도 구간간의 차이에 대해 ANOVA를 이용하여 실시하였고, 다중비교는 최소 유의차 검정 (Least significance difference test)으로 평균간의 유의성 (P<0.05)을 검정하였다 (Zar, 1996).

결과 및 고찰

수생 동물의 조직에서 배출되는 중금속은 온도, 생체내 활성, 어류 연령, 어류의 대사 활성 및 중금속의 생체내 생물학적인 반감기 등에 의해 영향을 받는다 (Larson et al., 1985; Heath, 1987; Douben, 1989; Woo et al., 1993; Kargin, 1996; Nielsen and Andersen, 1996). 일반적으로, 어류의 중금속 배출은 아가미, 담즙, 배설물, 피부 및 점액의 경로를 통해 이루어진다 (Varanasi and Markey, 1978; Heath, 1987).

아가미는 노출농도 100 µg/L에서 30일 노출 기간의 평균 축적 20.65 ± 1.51 µg/g에서 40일에는 17.00 ± 1.55 µg/g, 50일에는 6.29 ± 1.28 µg/g으로 각각 17.68%와 69.50%의 제거율을 보였다. 노출농도 50 µg/L 이상에서는 배출 10일째부터 유의한 감소 (P<0.05)를 나타내었다 (Fig. 1). 배출이 가장 빨랐던 기관은 창자로서 배출 10일째부터 노출농도 5, 50 및 100 µg/L에서 50% 이상의 제거율을 나타냈으며, 배출 20일째에는 거의 다 배출되어 대조구와 유사한 농도를 나타내었다 (Fig. 2). 간은 배출 10일째부터 노출농도 100 µg/L에서 유의한 감소를 나타냈지만 (P<0.05), 5와 50 µg/L에서는 유의한 감소를 보이지 않았다. 노출 20일 이후는 노출농도 50, 100 µg/L에서는 각각 66.20%와 86.22%의 유의성 (P<0.05) 있는 제거율을 나타냈다 (Fig. 3). 본 연구에서 카드뮴 배출실험 10일째부터 아가미, 창자와 간에서 높은 카드뮴의 제거가 나타났다. Kuroshima (1987)는 125 µg/L와 250 µg/L의 카드뮴에 노출되었던 벵어돔 (*Girella punctata*)의 아가미와 창자에서 카드뮴의 제거가 빨리 일어났으며, 간에서 카드뮴의 농도는 배출 4일째까지는 지속적으로 증가를 하다가 배출 10일이 지나서야 농도가 감소한다고 보고하였다. 이러한 원인은 한번 축적된 중금속은 제거되기 힘들며 기관 사이에서 재분배 때문이라고 하였다. 또한, Viarengo et al. (1985)은 카드뮴에 노출된 담치 (*Mytilus galloprovincialis*)의 카드뮴 농도는 한달 이상 일정한 농도를 유지하지만, 배출 70일 이후에는

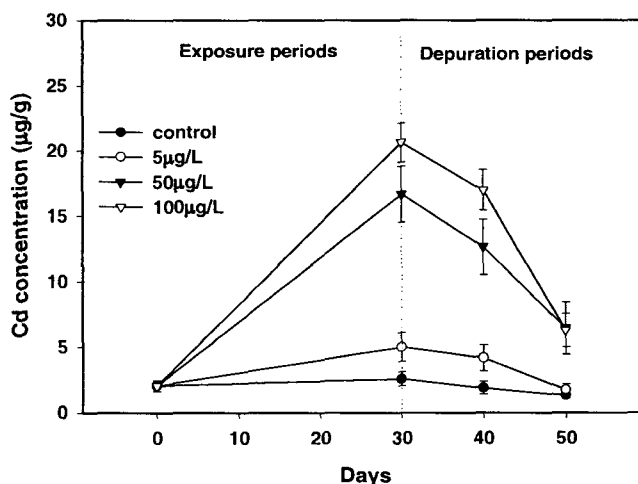


Fig. 1. Elimination of cadmium in the gill of *P. olivaceus*, pre-exposed to 0, 5, 50 and 100 µg/L-Cd. Vertical bar indicate means ± S.E.

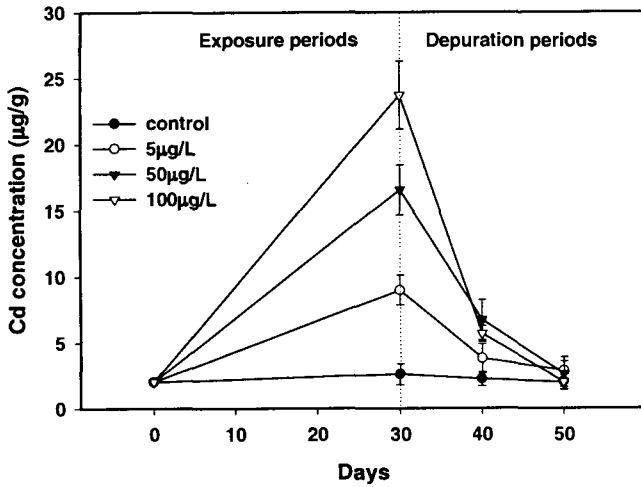


Fig. 2. Elimination of cadmium in the intestine of *P. olivaceus*, pre-exposed to 0, 5, 50 and 100 µg/L-Cd. Vertical bar indicate means ± S.E.

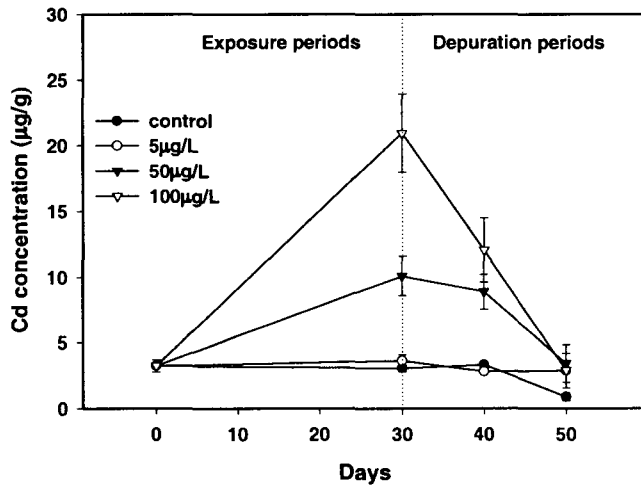


Fig. 3. Elimination of cadmium in the liver of *P. olivaceus*, pre-exposed to 0, 5, 50 and 100 µg/L-Cd. Vertical bar indicate means ± S.E.

아가미 (66%)와 소화선 (52%)에서 유의적으로 감소한다고 하였다. Kargin and Çođunn (1999)은 고농도 (100 µg/L와 1,000 µg/L)의 카드뮴에 노출된 틸라피아 (*Tilapia nilotica*)의 아가미에서는 카드뮴의 제거가 빨리 일어나는데, 이는 아가미가 수중환경과 직접적으로 맞닿아 있기 때문이라고 하였다. 하지만, 카드뮴에 노출되었던 제브라다니오 (*Brachydanio rerio*)의 간에서는 카드뮴의 농도가 카드뮴이 없는 해수에서도 증가한다고 하였다 (Wicklund et al., 1988). 이와 비슷한 결과는 틸라피아 (Woo et al., 1993)와 잉어 (Cinier et al., 1999), 뱀장어 (Yang and Chen, 1996) 등에서도 나타난다. 따라서, 기관에 따른 카드뮴의 제거 양상은 어종에 따라 다양한 차이가 나타남을 알 수가 있다.

신장에는 카드뮴 노출이후 각 구간에서 유의한 감소를 나타내지 않았으며 ( $P>0.05$ ), 배출이 이루어져도 10% 미만을 나타내어 카드뮴 배출이 거의 일어나지 않거나 농도를 유지하는 것으로 나타

났다 (Fig. 4). Harrison and Klaverkamp (1989)는 카드뮴에 72일간 노출된 무지개 송어 (*Salmo gairdneri*)와 송어 (*Coregonus clupeaformis*)의 신장에서는 청장기간에 카드뮴의 농도가 거의 일정하다고 하였다. 또한, 카드뮴에 24일간 노출된 뱀어돔 (*G. punctata*)의 신장에서는 유의성 있는 차이가 나지 않았다고 하였으며 (Kuroshima, 1987), 카드뮴 제거가 있어도 생물학적인 반감기가 1년 이상이라고 하였다 (Larson et al., 1985). 그러나, 제브라다니오 (*B. rerio*)의 신장에서 청장기간에서도 카드뮴의 축적이 지속된다고 하였다 (Wicklund et al., 1988). 따라서, 넙치의 신장에서 카드뮴의 제거율은 매우 낮으며, 제거된다고 하더라도 매우 느리게 나타나는 것으로 파악된다.

근육은 다른 기관들과는 달리 카드뮴 노출 이후 배출실험에서도 지속적인 농도 증가를 나타내고 있는데, 배출실험 20일째에는 노출농도 50, 100 µg/L에서 각각 25.00%와 38.59%의 유의한 ( $P<0.05$ )

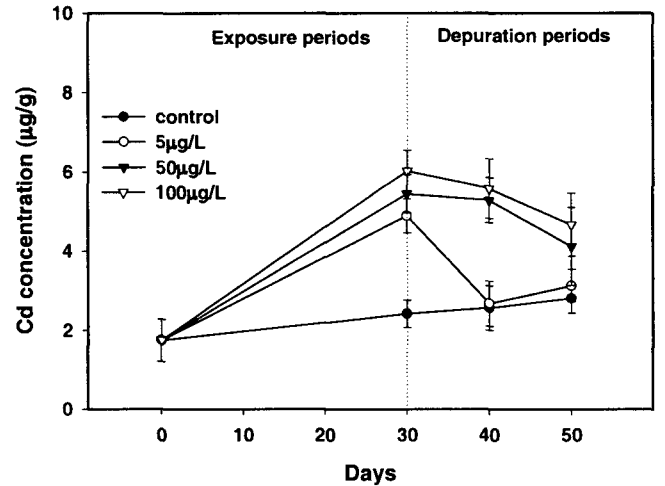


Fig. 4. Elimination of cadmium in the kidney of *P. olivaceus*, preexposed to 0, 5, 50 and 100 µg/L-Cd. Vertical bar indicate means ± S.E.

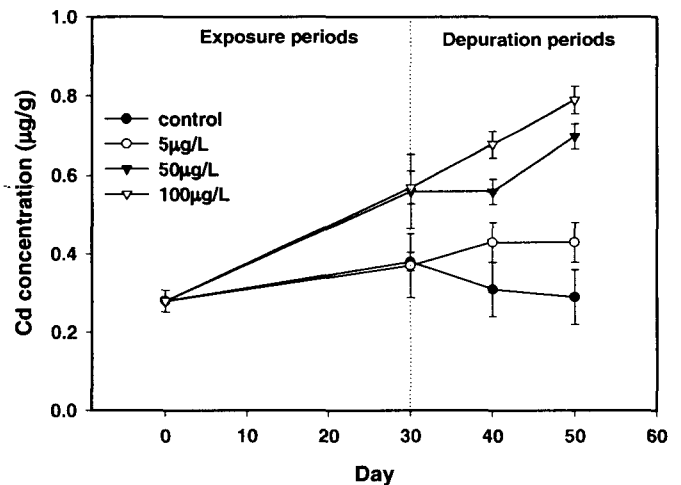


Fig. 5. Elimination of cadmium in the muscle of *P. olivaceus*, pre-exposed to 0, 5, 50 and 100 µg/L-Cd. Vertical bar indicate means ± S.E.

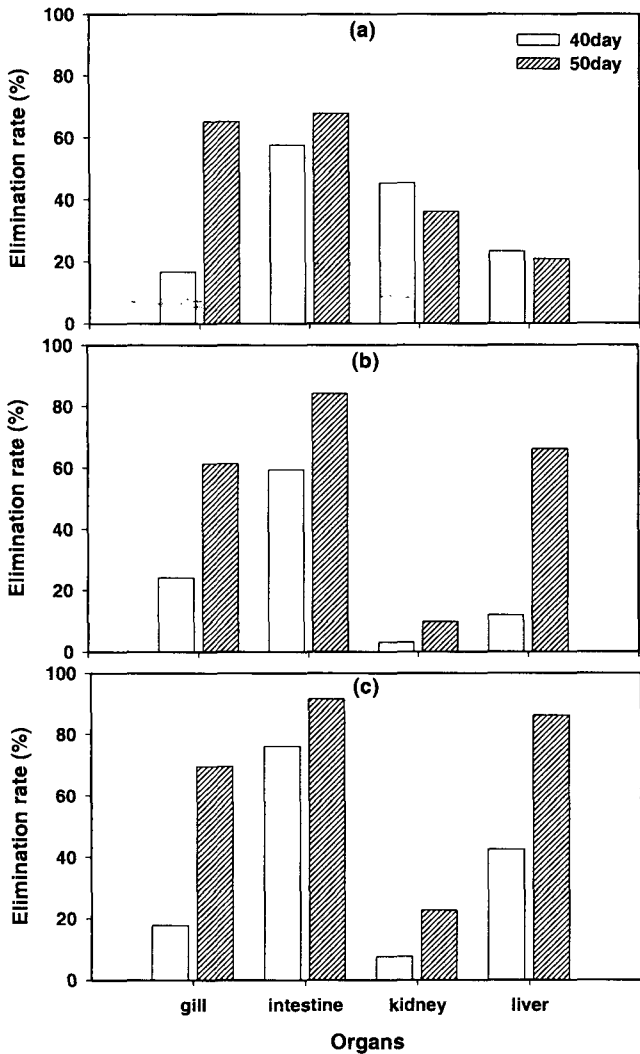


Fig. 6. Elimination rate of cadmium in gill, intestine, kidney and liver of *P. olivaceus*, pre-exposed to cadmium. (a) 5 µg/L, (b) 50 µg/L, (c) 100 µg/L.

농도증가를 나타내었다 (Fig. 5). Cinier et al. (1999)은 53 µg/L과 443 µg/L의 카드뮴에 127일 동안 노출되었던 잉어의 근육에서는 노출 후, 카드뮴 농도가 급속하게 감소한다고 하였다. 하지만, 고농도 (100 µg/L과 1,000 µg/L)의 카드뮴에 노출된 틸라피아 (*T. nilotica*)의 근육에서는 배출 20일째에 농도변화가 없거나 약간 상승하는 것으로 나타났다 (Kargin and Cođunn, 1999). 본 연구에서는 카드뮴 노출 후 20일간의 청장기간 동안 넙치의 근육에서는 농도가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 근육에 축적된 카드뮴은 제거가 힘들고, 각 기관에 축적된 카드뮴의 기관에 따른 재분배 때문이라고 추측된다.

카드뮴 노출 30일 후 배출되는 20일 동안 가장 많이 배출되는 기관의 순서는 창자 > 간 > 아가미 >> 신장의 순으로 나타났다 (Fig. 6). 아가미, 창자와 간은 배출 20일 동안 급격한 카드뮴의 제거가 나타났으며, 신장은 유의적인 배출이 이루어지지 않고 농도변화가 거의 없었다. 근육은 배출이 이루어지지 않고, 카드뮴이

없는 해수에서도 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 카드뮴이 배출되는 기간별로는 아가미와 창자에서 배출 10일째부터 급격한 카드뮴 제거가 일어났으며, 간은 배출 10일째까지는 완전한 제거가 일어나다가 20일 이후로 급격한 카드뮴의 제거가 일어났다.

일반적으로 중금속의 축적이 중금속의 제거보다는 빠르지만, 제거경로는 축적경로에 비해서 더 복잡한 양상을 갖는다 (Kargin and Cođunn, 1999). 이러한 원인으로서는 어류의 체내에서 중금속과 결합하는 단백질의 존재 때문이라고 하였다. 또한, Yang과 Chen (1996)에 따르면 중금속의 제거기작은 단백질과의 결합강도에 영향을 받는다고 하였으며, Metallothioneins (MTs)는 아연과 구리와 같은 필수요소뿐만 아니라 카드뮴과 수은 같은 불필요 요소의 조절에 커다란 역할을 담당한다고 하였다 (Roesijadi, 1992). 따라서, 본 연구에서 제거가 빨리 일어났던 아가미, 간과 창자에서는 카드뮴과 단백질의 결합이 약했으며, 제거가 느리거나 상승하였던 신장과 근육에서는 카드뮴과 단백질의 결합이 강할 수 있음을 시사하였다.

결론적으로, 넙치에 있어서 중금속의 제거는 해독기작 때문에 발생하며, 축적된 카드뮴의 재분배와 카드뮴 결합 단백질의 역할에 영향을 받는다고 할 수 있다. 앞으로는 카드뮴을 비롯한 중금속의 축적뿐만 아니라 이와 관련된 결합 단백질인 MTs 등에 관한 더 많은 연구가 필요하리라 믿는다.

### 요 약

넙치 (*P. olivaceus*)를 카드뮴 아치사 농도인 5, 50, 100 µg/L의 구간에 30일간 노출시킨후 청장기간을 가져 아가미, 간, 신장, 창자 및 근육에서 축적된 카드뮴의 제거정도를 조사하였다. 아가미에서는 노출농도 50 µg/L 이상에서는 배출 10일째부터 유의한 감소를 나타내었으며, 배출이 가장 빨랐던 기관은 창자로서 배출 10일째부터 노출농도 50, 100 µg/L에서 50% 이상의 제거율을 나타냈다. 간은 배출 10일째부터 유의한 감소를 나타냈으며, 노출 20일 이후에는 노출구간 50, 100 µg/L에서는 각각 66.20%와 86.22%의 제거율을 나타냈다. 신장에는 카드뮴 노출이후 각 구간에서 유의한 감소를 나타내지 않았으며, 근육은 다른 기관들과는 달리 카드뮴 노출 이후 배출실험에서도 지속적인 농도 증가가 나타났다. 카드뮴 노출 30일 후 배출되는 20일 동안 가장 많이 배출되는 기관의 순서는 창자 > 간 > 아가미 >> 신장의 순으로 나타났다. 아가미, 창자와 간은 배출 20일동안 급격한 카드뮴의 제거가 나타났으며, 신장은 유의적인 배출이 이루어지지 않고 농도변화가 거의 없었다. 근육은 배출이 이루어지지 않고, 카드뮴이 없는 해수에서도 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

### 참 고 문 헌

APHA-AWWA-WEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th. Ed. APHA. Washington, D.C., 1286pp.  
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.
- Dou, S.Z. 1992. Feeding habit and seasonal variation of stomach contents of flounder, *Paralichthys olivaceus* (T. & S.) in the Bohai Sea. Mar. Sci., 4, 277~281.
- Douben, P.E.T. 1989. Metabolic rate and uptake and loss of cadmium from food by the fish *Noemacheilus barbatulus* L. (stone loach). Environ. Pollut., 59, 177~202.
- Harrison, S.E. and J.F. Klaverkamp. 1989. Uptake, elimination and tissue distribution of dietary and aqueous cadmium by rainbow trout (*Salmo gairdneri*) and lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*). Environ. Toxicol., 8, 87~97.
- Heath, A.G. 1987. Water pollution and fish physiology. CRC press, Florida, USA, 245pp.
- Jansen, A. and F. Bro-Rasmussen. 1992. Environmental cadmium in Europe. Rev. Environ. Contam. Toxicol., 125~181.
- Jung, S.H., J.W. Kim, I.G. Jeon and Y.H. Lee. 2001. Formaldehyde residues in formalin-treated olive flounder (*Paralichthys olivaceus*), black rockfish (*Sebastes schlegelii*), and seawater. Aquaculture, 194, 253~262.
- Kargin, F. 1996. Elimination of cadmium from Cd-contaminated *Tilapia zilli* in media containing EDTA and freshwater: changes in protein level. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 57, 211~216.
- Kargin, F. and H.Y. Çođunn. 1999. Metal interactions during accumulation and elimination of zinc and cadmium in tissues of the freshwater fish *Tilapia nilptica*. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 63, 511~519.
- Kuroshima, R. 1987. Cadmium accumulation and its effect on calcium metabolism in the girella *Girella punctata* during a long-term exposure. Bull. Jap. Soc. Fish., 53, 445~450.
- Larson, A., C. Haux and M. Sjöbeck. 1985. Fish physiology and metal pollution: Results and experiences from laboratory and field studies. Ecotoxicol. Environ. Saf., 9, 250~281.
- 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.
- Nielsen, J.B. and O. Anderson. 1996. Elimination of recently absorbed methyl mercury depends on age and gender. Pharmacol. Toxicol., 79, 60~64.
- 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.
- 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. Vieira. 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.
- Van Dolah, F.M., T.C. Siewicki, G.W. Collins and J.S. Logan. 1987. Effects of environmental parameters on the elimination of cadmium by eastern oyster, *Crassostrea virginica*. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 8, 85~95.
- Varanasi, U. and D. Markey. 1978. Uptake and release of lead and cadmium in skin and mucus of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). Comp. Biochem. Physiol., 60C, 187~191.
- 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.
- Viarengo, A., S. Palmero, G. Zanicchi, R. Capelli, R. Vassiere and M. Orunesu. 1985. Role of metallothioneins in Cu and Cd accumulation and elimination in the gill and digestive gland cells of *Mytilus galloprovincialis* Lam. Mar. Environ. Res., 16, 25~36.
- Wicklund, A., P. Runn and L. Norrgren. 1988. Cadmium and zinc interaction in fish: Effects of zinc on uptake, organ, distribution and elimination of <sup>109</sup>Cd in the zebrafish, *Brachydanio rerio*. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 17, 345~354.
- Woo, P.T.K., M.S. Yoke and M.K. Wong. 1993. The effects of short-term acute cadmium exposure on blue tilapia, *Orcochromus aureus*. Environ. Biol. Fish., 37, 67~74.
- 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 9월 23일 접수

2003년 1월 30일 수리