

넙치, *Paralichthys olivaceus* 치어의 생존, 성장 및 산소소비에 미치는 수은의 만성적 독성

강주찬 · 황운기[†] · 지정훈 · 김성길 · 김재원
부경대학교 수산생명의학과

Chronic Toxicity of Mercury on Survival, Growth and Oxygen Consumption in the Juvenile Olive Flounder *Paralichthys olivaceus*

Ju-Chan Kang, Un-Gi Hwang[†], Jung-Hoon Jee, Seong-Gil Kim and Jae-Won Kim
Department of Aquatic Life Medicine, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

Effect of mercury (Hg) toxicity on survival, growth, feed efficiency and oxygen consumption were examined in the juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. Fishes were exposed to sublethal concentrations of Hg ranging from 0 to 0.13 mg/L for 6 weeks. Hg reduced survival rate in a concentration and exposure period-dependent way and suddenly reduction occurred at Hg concentrations greater than 0.05 mg/L after 6 weeks. Growth rate and feed efficiency also significantly decreased at greater than 0.028 and 0.05 mg/L, respectively. Oxygen consumption rate was significantly decreased to 25 and 32% than that of the control at the Hg concentration of 0.05 and 0.13 mg/L, respectively. These results suggest that Hg toxicity inhibit physiological function including growth, feed efficiency and oxygen consumption in the juvenile olive flounder, resulting in survival failure at high concentration.

Key words : *Paralichthys olivaceus*, Hg, Survival rate, Growth rate, Feed efficiency, Oxygen consumption rate

서론

금속은 해수의 자연 성분으로 토양과 암석의 풍화 및 채광활동이나 화산폭발 등으로 유래하는 것으로 알려지고 있지만, 최근에는 급속한 산업 발달로 인한 사용량의 증가로 해양에 유입되는 양이 증가하고 있다. 이들 가운데는 철과 구리처럼 해양생물의 대사활동을 촉진하는 필수 미량원소로 존재하는 금속이 있는가 하면, 매우 낮은 농도에서도 생물에게 유독한 작용을 하는 것으로 알려진 중금속도 존재한다 (Kang et al., 1997; Kim et al., 2001).

수은 (Hg)은 생물에 대한 유독성이 다른 어떤 중금속보다도 강한 것으로 알려져 있으며, 수은 전지, 제지공업, 형광등, 페인트 및 살충제 등의 사용으로 인해 환경 중에 유입되는 것으로 알려져 있다 (Mitra, 1986). 해양에 유입된 Hg은 염화물이 우세한 Hg(OH)₂나 HgCl₂의 형태로 존재하지만 입자성 물질에 흡착되어 있어서 수용액 중에 나타나지 않을 뿐만 아니라 저질 중에 존재하는 미생물에 의해 무기 형태의 Hg이 독성이 강하고 배설이 되지 않는 유기, 메틸 Hg 형태로 전환되는 것으로 알려져 있으며 (Grant, 1971; Wood, 1972; Clark, 1989), 해양생물의 체내농도

[†]Corresponding Author

가 수중농도보다도 수배나 더 높은 것으로 알려져 금속이 해양의 먹이연쇄상에서 생물학적 확대에 의해 고 영양단계에서 점진적으로 농축된다는 생물학적 확대설과 일치하는 것으로 알려지고 있다 (Knauer and Martin, 1972; Brown and Parsons, 1978).

최근, 한국에서도 급격한 산업발달에 의해 해양으로 유입되는 중금속의 독성에 관한 연구가 활발히 진행되어 오고 있지만 대부분이 진주담치, *Mytilus edulis* (Lee and Lee, 1984), 백합, *Meretrix lusoria* (Park and Kim, 1979) 및 굴, *Crassostrea gigas* (Choi et al., 1992) 등과 같은 조개류를 대상으로 이루어져 생물종에 따른 영향의 정도를 파악하기 위한 연구가 시급하게 이루어져야 할 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구는 한국의 대표적 양식어종으로 경제적인 가치가 클 뿐만 아니라 저서성 연안 정착 어류이며 운동성이 적어 연안환경 오염 지표 종으로 이용 가능할 것으로 생각되는 넙치, *Paralichthys olivaceus* 치어의 생존, 성장, 사료효율 및 산소소비에 대한 수은의 만성적 독성을 검토하였다.

재료 및 방법

넙치, *Paralichthys olivaceus* 치어를 남해안 소재의 양어장에서 분양받아 실험실의, 300 L 순환 여과식 수조에서 넙치용 부상사료를 공급하면서 30일간 순응시킨 후, 외관상 질병의 증세가 나타나지 않고 먹이 붙임이 좋은 어류 (전장 8.33 ± 0.05 cm, 체중 5.09 ± 0.11 g)를 선발하여 실험어로 사용하였다.

실험은 PVC 수조 ($52 \times 36 \times 30$ cm)를 이용해 순환식으로 실시하였으며, 실험해수는 2일을 원칙으로 전량 환수하였으나, 수질의 오염상태에 따라 수시로 교환하여 Hg 독성 이외의 다른 요인에 의한 영향을 최대한 배제하였다. Hg ($HgCl_2$, Aldrich Co.)에 대한 노출농도는 증류수를 용매로 하여 13 mg/L (w/v)의 stock solution을

만들어 희석하여 급성독성 시험을 바탕으로 한 0, 0.012, 0.028, 0.05, 0.13 mg/L의 5 농도구로 이루어졌으며 대조구에는 용매인 증류수를 첨가해 6주간 노출하였다. 실험 기간동안 공급해수의 수온은 항온 조건에서 $20 \pm 0.3^\circ C$ 를 유지하였으며, 실험에 사용한 해수의 성분은 Table 1과 같다. 사료의 공급은 상업용 넙치 사료를 하루에 체중의 3%를 2회로 나누어 공급하였다.

Table 1. Chemical components of the seawater used in the experiment of Hg toxicity.

Item	Value
Temperature ($^\circ C$)	20 ± 0.3
Salinity (‰)	32.7
pH	8.2
Dissolved oxygen (mg/L)	7.1
NH ₄ ⁺ -N ($\mu g/L$)	88.1
NO ₂ ⁻ -N ($\mu g/L$)	1.4
NO ₃ ⁻ -N ($\mu g/L$)	25.2
PO ₄ ³⁻ -P ($\mu g/L$)	5.1
COD (mg/L)	0.98
SS (mg/L)	9.4
Fe ($\mu g/L$)	5.2
Hg ($\mu g/L$)	N.D.*

*N.D.: not detected

넙치의 생존, 성장, 사료효율 및 산소소비에 대한 Hg 독성의 영향은 6주간 노출동안 1주일마다 조사하였다. 생존은 매 24시간을 기준으로 사망한 개체를 계수 하였으며, 성장은 실험수조에 수용하기 전에 실험어의 체중을 사료효율은 체중과 섭취한 사료량을 측정하여 1주일마다 성장률과 사료효율을 계산하였다 (Kang et al. 1997). 산소 소비율은 유수식 순환방식 장치에 의해 측정하였다 (Kang et al., 1995). 본 실험 장치에는 실험 수조를 O₂ 가스에 의해 산소 포화상태로 유지할 수 있는 수조에 연결하여 실험 수조의 유입수를 포화도 100% 상태로 유지하였다. 실험 수조의 유출수에는 용존산소 측정기를 설치하였고, 용존산소 측정기에는 기록계를 연결시켜 산

소 소비량을 기록하였다. 산소소비량은 기록계의 수치를 10분 간격으로 6회의 평균치로 계산하였으며 각 실험농도별로 6주간의 실험기간동안 매주 1회 생존한 5개체를 선별하여 측정하여, 단위건중당 산소소비량으로 나타내었다. Hg 독성이 넙치의 성장, 사료효율 및 산소소비에 미치는 영향은 1주일 간격으로 6번 측정된 평균값으로 나타내었으며, 실험결과는 one-way ANOVA (Fisher PLSD test)와 Fisher's *t*-test를 실시하여 $P < 0.01$ 에서 통계적 유의성을 판단하였다.

결과

넙치의 생존율에 미치는 Hg의 영향을 Fig. 1에 나타내었다. 6 주간의 실험기간 동안 Hg를 첨가하지 않은 대조구에서는 사망개체가 전혀 나타나지 않아 100%의 생존율을 나타내었지만, Hg 노출 실험구에서는 농도와 노출기간이 증가할수록 생존율이 감소하는 경향을 나타내었다. 저 농도인 0.012와 0.028 mg/L의 농도구에서 6주간 노출된 넙치의 생존율은 92와 81%로 비교적 높은 생존률을 나타내었지만, 0.05 mg/L와 0.13 mg/L의 농도구에서는 노출기간의 증가와 더불어 생존율이 급격히 감소해 4주 후에는 각각 42와 10%를 나타냈으며 6주 후에는 8과 0%의 생존율을 나타내었다.

Hg 독성이 성장률에 미치는 영향을 Fig. 2에 나타내었다. Hg가 증가할수록 성장율은 점점 감소하는 경향을 나타내고 있으며 0.012 mg/L의 농도구에서 대조구에 비해 6% 감소해 성장률이 15.85%를 나타내었지만 유의적인 차이는 나타나지 않았다 ($P > 0.01$). 그러나 0.028, 0.05 및 0.13 mg/L의 농도구에서는 대조구에 비해 각각 23, 28 및 30% 감소하여 13.03, 12.26 및 11.87%로 대조구에 비해 유의적으로 감소하였다 ($P < 0.01$).

사료효율에 미치는 Hg의 영향을 Fig. 3에 나타내었다. Hg가 증가할수록 사료효율은 점점 감소하는 경향을 나타내고 있으며 0.012와 0.028

mg/L의 농도구에서 대조구에 비해 각각 7과 12% 감소해, 사료효율이 40.15와 38.07%를 나타냈지만 유의적인 차이는 없었다 ($P > 0.01$). 그러나, 0.05와 0.13 mg/L의 농도구에서는 대조구에 비해 40과 45% 감소해, 사료효율이 26.03과 33.92%로 대조구에 비해 유의적으로 감소하였다 ($P < 0.01$).

넙치의 산소 소비에 미치는 Hg의 영향은 성장 및 사료효율과 비슷하게 Hg가 증가 할수록 점점 감소하는 경향을 나타냈으며 (Fig. 4), 0.012와 0.028 mg/L의 농도 구에서 대조구에 비해 각

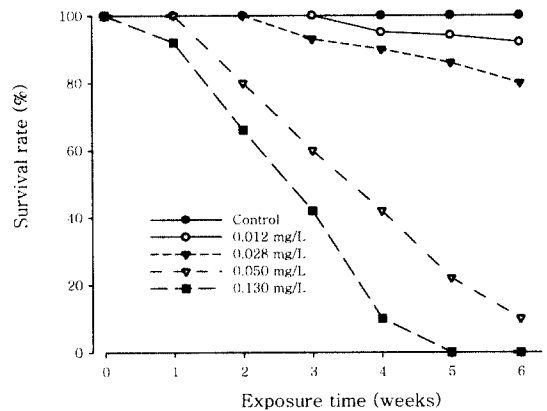


Fig. 1. Changes of survival rate in the juvenile olive flounder exposed to sublethal concentrations of Hg for 6 weeks.

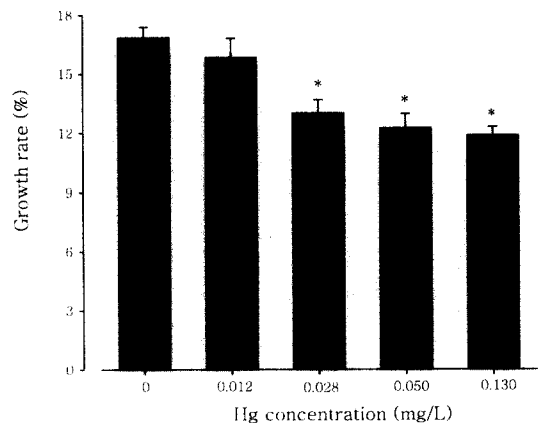


Fig. 2. Growth rate of juvenile olive flounder exposed to sublethal concentrations of Hg for 6 weeks. Vertical bars represent the SE of the mean for five fish. * $P < 0.01$ for control (0 mg/L Hg).

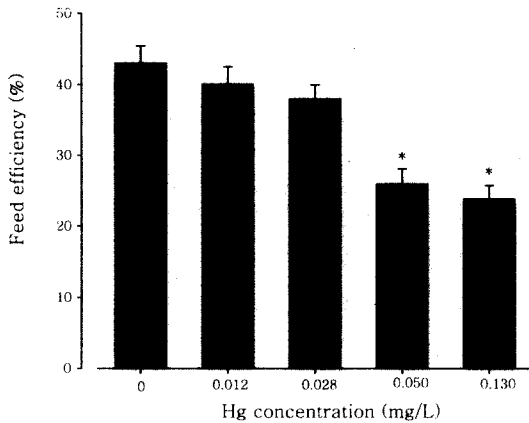


Fig. 3. Feed efficiency of juvenile olive flounder exposed to sublethal concentrations of Hg for 6 weeks. Vertical bars represent the SE of the mean for five fish. * $P < 0.01$ for control (0 mg/L Hg).

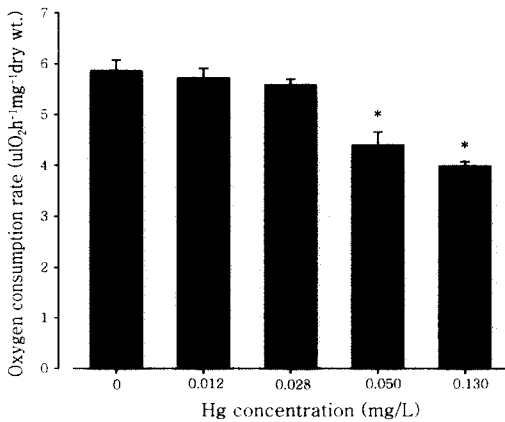


Fig. 4. Oxygen consumption rate of juvenile olive flounder exposed to sublethal concentrations of Hg for 6 weeks. Vertical bars represent the SE of the mean for five fish. * $P < 0.01$ for control (0 mg/L Hg).

각 3과 5% 감소해, 산소 소비율이 5.73과 5.60 $\mu\text{L O}_2$ 를 나타냈지만 유의적으로 감소하지는 않았다 ($P > 0.01$). 그러나, 0.05와 0.13 mg/L의 농도 구에서는 대조 구에 비해 25와 32% 감소해, 4.41과 4 $\mu\text{L O}_2$ 로 대조 구에 비해 유의적으로 감소하였다 ($P < 0.01$).

고찰

중금속이 수서 생물에 미치는 독성은 환경요

인, 생물의 생리적인 상태 및 생물의 종에 따라 다르게 나타나며 (De Listle and Roberts, 1988; Birregaard, 1990), 같은 농도에서도 노출기간이 길면 독성에 대한 영향은 더욱 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 노출기간이 길수록 넙치의 생존율은 급격히 감소하는 경향으로 고농도인 0.05와 0.13 mg/L의 농도 구에 노출된 지 1주일에 생존율이 각각 100과 92%를 나타냈으나 4주 후에 42와 10%, 6주 후에는 10과 0%의 생존율을 나타내었다.

중금속에 노출된 어류의 사망 원인으로는 독성에 의한 아가미 상피조직의 손상으로 호흡과 이온조절 능력의 저하에 의한 것으로 알려져 있다 (Wood *et al.*, 1988; Wicklund-Glynn *et al.*, 1992; Waring *et al.*, 1996). 따라서, 본 실험에서도 넙치의 생존율은 아가미 상피조직의 손상에 의한 호흡장애로 생각되어진다 실제로, Hg 농도가 증가할수록 산소소비량이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 생존율이 급격히 감소한 0.05와 0.13 mg/L의 농도 구에서 산소 소비율이 현저히 감소하는 결과를 나타내었다. Gaudy *et al.* (1991)은 곤쟁이류, *Neomysis awatschenis*를 Cd에 노출했을 때 생존율과 산소소비가 감소한다고 보고하였으며, Kange *et al.* (1999)은 Fe이 넙치의 아가미 구조를 손상시켜 산소소비가 감소한다고 보고하였다. 따라서, 생존율과 산소소비의 감소는 Hg 독성에 따른 아가미 조직의 손상에 의한 생리적 변화의 한 요인으로 사료된다.

Gaudy *et al.* (1991)은 곤쟁이류, *Leptomysis lingvura*는 Cd 농도가 높을수록 산소소비와 성장률이 감소한다고 보고하였으며, Miliou *et al.* (1998)은 중금속에 노출된 송사리, *Poecilia reticulata*의 성장이 억제되었다고 보고하였다. 본 연구에서도 성장에 대한 Hg 독성의 영향은 산소 소비율의 양상과 비슷하게 0.05와 0.13 mg/L의 농도 구에서 현저히 감소하였다. 또한, Bryan (1971)은 중금속에 노출된 해산동물의 효소활성이 직접적으로 저해되어 산소소비의 변화가 나타난다고 보고하였다. 따라서, 산소 소비율과 같

은 대사율은 어류의 체내 생리작용 및 성장과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 또한, 성장율과 사료효율은 매우 높은 상관관계 ($r^2=0.82$)를 나타내어 (data not shown), 사료효율이 높아질수록 성장률이 증가하는 것으로부터 대사율의 증가는 사료효율의 증가를 도모해 성장률을 촉진시키는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 Hg 독성은 넙치의 생리적 기능을 저해해 생존율을 감소시키는 것으로 나타났다. 실제로, 연안 정착성 저서 어류인 넙치는 연안해역으로 유입되는 Hg에 만성적으로 노출될 가능성이 많으며, 저 농도의 Hg 일지라도 메틸화 되어 어 체내에 축적되므로 장기간 노출되면 생리적 변화를 유발해 생존에 악영향을 미칠 것이다.

요약

산업활동의 증가로 인해 해양에 유입되는 수은 (Hg)이 저서성 연안정착 어류인 넙치, *Paralichthys olivaceus* 치어의 생존, 성장, 사료효율 및 산소소비에 미치는 영향을 조사하였다. 6주 동안 0-0.13 mg/L의 아치사 농도에서 넙치를 사육하며 Hg 독성에 대한 영향을 조사하였다. Hg 농도와 노출기간이 증가할수록 생존율은 감소했으며 6주 후, 0.05 mg/L 이상의 농도 구에서 생존율이 급격히 감소했다. 성장률과 사료효율 또한, 각각 0.028 mg/L ($P<0.01$)와 0.05 mg/L ($P<0.01$) 이상의 농도 구에서 현저하게 감소하였다. 산소소비용은 0.05 mg/L와 0.13 mg/L의 농도 구에서 각각 대조 구에 비해 25 ($P<0.01$)와 32% ($P<0.01$) 감소해, 유의적인 차이를 나타내었다.

이상의 결과로부터 Hg 독성은 넙치의 성장, 사료효율 및 산소소비와 같은 생리적 기능을 저해해 생존율을 감소시키는 것으로 나타났다.

참고 문헌

Birregaard, P. : Influence of physiological condition

on cadmium transport from haemolymph to hepatopancreas in *Carcinus maenas*. Mar. Biol., 106 : 199-206, 1990.

- Brown, D. A. and Parsons, T. R. : Relationship between cytoplasmic distribution of mercury and toxic effects on zooplankton and chum salmon exposed to mercury in a controlled ecosystem. J. Fish. Res. Bd. Can., 35 : 880-884, 1978.
- Bryan, G. W. : The effects of heavy metals in marine and estuarine organisms. Proc. R. Soc., 117 : 389-410, 1971.
- Choi, H. G., Park, J. S. and Lee, P. Y. : Study on the heavy metal concentration in mussel and oyster from the Korean coastal water. J. Korean Fish. Soc., 25 : 485-494, 1992.
- Clark, R. B. : Marine pollution. Clarendon, Oxford, 220pp, 1989.
- De Listle, P. F. and Roberts, M. H. : The effects of salinity on cadmium toxicity to the estuarine mysid *Mysidopsis bahia*: role of chemical speciation. Aquat. Toxicol., 12 : 357-370, 1988.
- Gaudy, P., Guerin, J. P. and Kerambrum, P. : Sublethal effects of cadmium on respiratory metabolism, nutrition, excretion and hydrolyase activity in *Leptomysis lingvura* (Crustacea: Mysidacea). Mar. Biol., 109 : 493-501, 1991.
- Grant, N. : Mercury and man. Environ., 13(4) : 3-15, 1971.
- Kang, J. C., Kim, H. Y. and Chin, P. : Toxicity of copper, cadmium and chromium on survival, growth and oxygen consumption of the mysid, *Neomysis awatschenis*. J. Korean Fish. Soc., 30 : 874-881, 1997.
- Kang, J. C., Lee, J. S. and Jee, J. H. : 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, 1999.
- Kang, J. C., Matsuda, O. and Chin, P. : 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, 1995.
- Kim, S. G., Kwak, H. S., Choi, C. I. and Kang, J. C. : Accumulation of heavy metal by sea squirt, *Halocynthia roretzi*. J. Korean Fish. Soc., 34 : 125-130, 2001.
- Knauer, G. A. and Martin, J. H. : Mercury in a marine pelagic food chain. Limnol. Oceanogr., 17 : 868-876, 1972.
- Lee, S. H. and Lee, K. W. : Heavy metals in mussels in the Korean coastal waters. J. Korean Soc. Oceanogr., 19 : 111-117, 1984.
- Miliou, H., Zaboukas, N. and Moraitou-Apostolopoulou, M. : Biochemical composition, growth and survival of the guppy, *Poecilia reticulata*, during chronic sublethal exposure to cadmium. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 35 : 58-63, 1998.
- Mitra, S. : Mercury in the ecosystem. Trans. Tech. Publ., 18 : 322-327, 1986.
- Park, J. S. and Kim, H. G. : Bioassays on marine organisms II. Acute toxicity test of mercury, copper and cadmium to clam, *Meretrix lusoria*. Bull. Korean Soc., 12(2) : 113-117, 1979.
- Waring, C. P., Brown, J. A., Collins, J. E. and Prunet, P. : Plasma prolactin, cortisol, and thyroid responses of the brown trout, *Salmo trutta*, exposed to lethal and sublethal aluminium in acidic soft waters. Gen. Comp. Endocrinol., 102 : 377-385, 1996.
- Wicklund-Glynn, A., Norrgren, L. and Malmborg, O. : The influence of calcium and humic substances on aluminium accumulation and toxicity in the minnow, *Phoxinus phoxinus*, at low pH. Comp. Biochem. Physiol., 102C : 427-432, 1992.
- Wood, C. M., Playle, R. C., Simons, B. P., Goss, G. G. and McDonald, D. G. : Blood gases, acid-base status, ions, and hematology in adult brook trout, *Salvelinus fontinalis*, under acid/aluminum exposure. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 45 : 1575-1586, 1988.
- Wood, J. M. : A progress report on mercury. Environ., 14(1) : 33~39, 1972.