

Pb의 노출에 따른 넙치, *Paralichthys olivaceus*, 치어의 생존, 성장 및 산소소비율의 변화

김성길[†] · 김재원 · 장석우 · 김상규 · 강주찬
부경대학교 수산생명의학과

Change of Survival, Growth and Oxygen Consumption Rate in the Juvenile Olive Flounder, *Paralichthys olivaceus* Exposed to Lead

Seong-Gil Kim[†], Jae-Won Kim, Suck-Woo Jang, Sang-Gyu Kim and Ju-Chan Kang
Department of Aquatic Life Medicine, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

Experiments were carried out to investigate the effects of lead exposure on survival, growth and oxygen consumption of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. Survival rate of the olive flounder was significantly affected above 150 $\mu\text{g/L}$. Growth rate of the olive flounder exposed to $\geq 150 \mu\text{g/L}$ of lead concentration was significantly lower than that of fish reared in normal condition. Metabolic rate of fish exposed to lead $\geq 80 \mu\text{g/L}$ concentration was significantly reduced with increasing lead concentration than that in normal condition. This study revealed that high lead concentration ($\geq 80 \mu\text{g/L}$) reduced growth and metabolic rates of juvenile olive flounder suggesting potential influence of lead on the natural mortality of olive flounder in the coastal areas.

Key word : *Paralichthys olivaceus*, Lead, Survival rate, Growth, Respiration rate

서 론

납 (lead)은 자연적으로 토양 (16 mg/kg)이나 강 (2 $\mu\text{g/L}$), 바다 (0.2 $\mu\text{g/L}$), 대기 (0.1 $\mu\text{g/m}^3$) 등 환경에 미량으로 존재한다 (ATSDR, 1993). 하지만, 납의 필요성에 따라 현재 전 세계적으로 생산량이 약 430만 톤/년 이상이 되고 있으며, 이중에 10% 정도가 자연환경으로 노출되어 납 오염을 유발하게 되며, 부분적으로는 연안에 유입되어 어류에 많은 악영향을 미치고 있다 (Clack, 1992).

즉, 어류의 근육기능 퇴화, 꼬리의 흑화, 척추 이상, 꼬리지느러미 변형 및 평행감각의 상실 등을 초래하고 (Holcombe et al., 1976; Johansson-Sjoberg and Larsson, 1979; Sorenson, 1991), 이중 꼬리의 흑화는 어류에서 신경독성증상의

하나로 척추기형의 전조이며, 궁극적으로는 꼬리부분의 퇴화 및 생식방해를 유발하며 극단적인 경우에는 사망하게 된다 (Hodson et al., 1978).

일반적으로 치어는 성어에 비해 납 오염에 더 민감하기 때문에 (Holcombe et al., 1976, Little et al., 1993), 납 오염에 대한 초기 지시자로 다양한 독성실험에 활용이 되고 있다 (Hodson, et al., 1984). 또한, 실험실환경에서 치어는 성어에 비해 대사율이 높아 납에 더 민감하며 대사실험에 적절하다고 하였다 (Sorenson, 1991).

넙치 (*Paralichthys olivaceus*)는 우리 나라의 대표적인 양식어종으로 저서성이며, 다른 어종에 비하여 이동범위가 좁기 때문에 연안지역에서 납 오염 또는 양식수의 이용과정에서 납에 노출시 많은 영향을 받을 것이라고 예상된다.

[†]Corresponding Author

따라서, 본 연구는 연안지역의 환경오염 및 양식용수의 이용과정에 파생될 수 있는 납 오염에 따른 넙치 치어의 생존, 성장 및 대사에 미치는 납의 만성독성을 검토하였다.

재료 및 방법

실험에 사용한 넙치 (*P. olivaceus*) 치어는 남해안 소재 육상수조식 양어장에서 분양을 받아 실험실로 운반한 후, 300 L의 순환 여과식 수조에서 한 달 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 순치시킨 넙치 중에 외관상 질병 증세가 나타나지 않고, 먹이섭취가 좋은 전장 8.33 ± 0.05 cm (mean \pm S.E., n = 300), 체중 5.09 ± 0.11 g의 개체들을 선별하여 실험에 사용하였다.

실험은 PVC수조 (52×36×30cm)를 사용하여 순환식 방법에 의해 실시하였으며, 실험해수의 환수시기는 2일을 원칙으로 하였으나, 수질측정 결과에 따라 수시로 교환하였다. 납 농도는 $Pb(NO_3)_2$ (Aldrich, USA)을 이용하여 예비실험을 바탕으로 80, 150, 230, 420 μ g-Pb/L의 4구간을 설정하였고, 대조구는 납을 첨가하지 않은 동일 해수를 사용하였다.

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

Parameter	Values
Temperature (°C)	20.5 ± 0.5
pH	8.2 ± 0.3
salinity (‰)	32.7 ± 0.4
SS (mg/L)	9.8 ± 0.2
Dissolved oxygen (mg/L)	7.1 ± 0.2
COD (mg/L)	0.93 ± 0.03
Ammonia (μ g/L)	12.66 ± 1.25
Nitrite (μ g/L)	1.37 ± 0.28
Nitrate (μ g/L)	9.62 ± 1.01
Phosphate (μ g/L)	5.05 ± 0.96
Fe (μ g/L)	5.02 ± 0.87
Pb (μ g/L)	N.D.*

* N.D. : Not detected

실험은 6주간 온도조절이 가능한 항온실에서 실시하였으며, 실험해수의 구성은 Table 1과 같다. 광주기는 12시간 간격 (light: 12 hour, dark: 12 hour)으로 조절하였다. 사료는 상업용 넙치 사료를 하루에 어체중 (습중량)의 3%를 2회로 나누어 공급하였다.

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

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

결 과

6주간의 실험기간 동안 넙치는 대조구에서 실험 종료시 까지 100%의 생존율을 보였다. 그러나, 납 농도 230 μ g/L 이상에서 생존율은 대조구에 비해 감소하는 경향을 나타냈다. 즉, 납 농도 230 μ g/L에서는 3주, 납 농도 420 μ g/L에서는 2주 후부터 감소하기 시작하여 실험 종료시에는

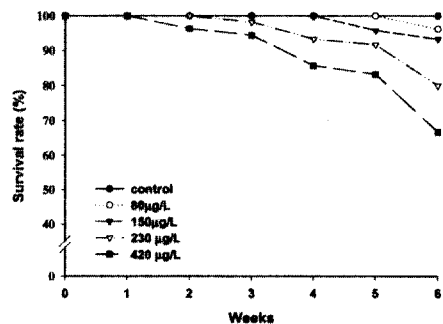


Fig. 1. Survival rate of *Paralichthys olivaceus* exposed to sub-lethal lead for 6 weeks.

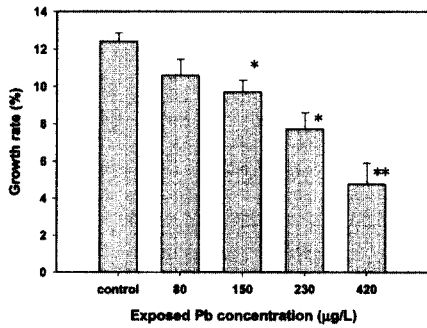


Fig. 2. Mean growth rate of *Paralichthys olivaceus* exposed to lead for 6 weeks. Vertical bars denote a standard error about mean. * indicated a significant difference from control for growth rate ($P < 0.05$). ** indicated a significant difference from control for growth rate ($P < 0.01$).

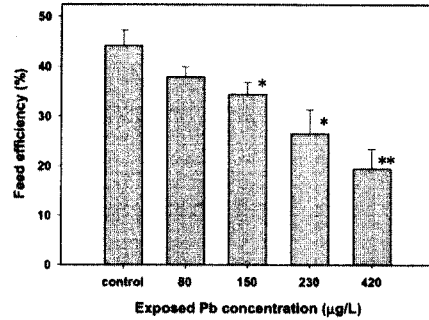


Fig. 3. Mean feed efficiency of *Paralichthys olivaceus* exposed to lead for 6 weeks. Vertical bars denote a standard error about mean. * indicated a significant difference from control for feed efficiency ($P < 0.05$). ** indicated a significant difference from control for growth rate ($P < 0.01$).

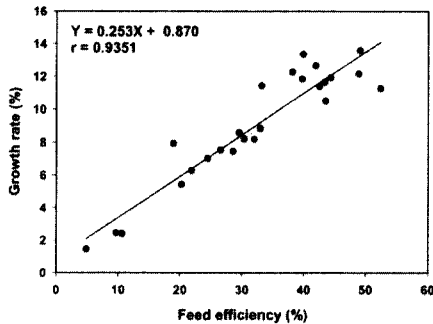


Fig. 4. Relationship between feed efficiency and growth rate in *Paralichthys olivaceus* exposed to lead for 6 weeks reflecting significant ($p < 0.01$).

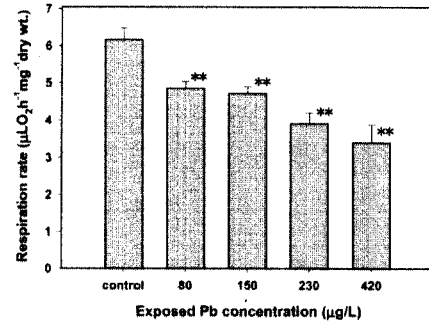


Fig. 5. Mean respiration rate of *Paralichthys olivaceus* exposed to lead for 6 weeks. Vertical bars denote a standard error about mean. ** Indicated a significant difference from control ($P < 0.01$).

대조구에 비해 각각 20.00% 및 33.20%가 감소하였다 (Fig. 1).

성장률은 대조구에서 평균 $12.41 \pm 0.46\%$ 로 가장 양호하였고, 납농도가 증가할수록 감소하였으며, 80 µg/L에서는 대조구에 비해 유의한 감소가 인정되지 않았으나 150 µg/L 이상에서는 유의하게 감소하였다 ($P < 0.05$). 즉, 납 농도 150, 230, 및 420 µg/L에서 대조구에 비해 각각 21.92, 37.79, 61.48%의 낮은 성장률을 나타냈다 (Fig. 2).

사료효율은 대조구가 $44.17 \pm 3.12\%$ 로서 가장 높게 나타냈다. 넙치의 사료효율은 납 농도가 증가할수록 감소하였으며, 80 µg/L에서는 대

조구에 비해 유의한 감소가 인정되지 않았으나 150 µg/L 이상에서는 유의하게 감소하였다 ($P < 0.05$). 또한, 납 농도가 가장 높은 420 µg/L에서 $19.37 \pm 4.10\%$ 으로 대조구에 비하여 44% 낮은 사료효율을 나타냈다 (Fig. 3). 또한, 성장률과 사료효율의 관계는 $Y = 0.253X + 0.870$ 의 선형식으로 표현되며, 상관계수가 0.935로서 강한 양의 상관관계를 가져 사료효율이 낮아짐에 따라 성장률이 감소하는 경향을 나타냈다 (Fig. 4).

넙치의 대사율은 납 농도 80, 150, 230 및 420 µg/L에서 대조구보다 각각 21.46, 23.89, 36.84 및 44.94%가 감소하여 노출농도가 증가함에 따라

감소하는 경향을 나타냈다. 그리고, 대사율은 납 농도 80 $\mu\text{g/L}$ 이상에서 대조구에 비해 유의하게 감소하였고 ($P < 0.01$), 420 $\mu\text{g/L}$ 농도에서는 대조구에 비하여 약 50%의 감소를 보였다 (Fig. 5).

고 찰

일반적으로 납은 중금속 중 어류에 있어서 생물학적인 기능을 가지거나 영양적으로 도움이 되지 못하는 불필요한 물질이며 (Thompson, 1990), 고농도에 단기간 노출되거나 혹은 저농도에 장기간 노출될 경우에는 궁극적으로는 호흡곤란, 행동변화, 성장장애, 생식이상, 생리적 변화 및 삼투조절 능력의 이상 등이 발생하며 최종적으로 사망에 이르기도 한다 (Leland and Kuwabara, 1985; Sorenson, 1991)

6주간 납에 노출시킨 넙치의 사료효율은 150 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도에서는 유의하게 감소하였고, 특히 420 $\mu\text{g/L}$ 의 납 농도에서는 대조구에 비해 56.15%가 감소하였다. 이 같은 결과는 201 $\mu\text{g/L}$ 의 납에 12일 이상 노출시킨 무지개송어 치어 (*Oncorhynchus mykiss*)에서 사료효율이 감소했다는 보고와 일치한다 (Burden et al., 1998). 또한, 500 $\mu\text{g/L}$ 이상의 높은 납 농도에 노출시킨 연준모치 (*Pimephales promelas*)는 사료효율이 감소하고 사료를 잘못 받아먹는 횟수가 증가한다고 하였다 (Weber et al., 1991). 이같이 사료효율의 감소원인은 납 자체의 독성뿐만 아니라 납에 대한 스트레스의 증가에 의한 것으로 파악된다 (Beitinger, 1990).

일반적으로 성장은 만성적인 독성연구의 중요한 관찰 요소이며, 어류의 자어 및 치어에 대한 매우 다양한 농도의 중금속 노출시 성장이 감소하는 경향이 있다 (Woltering, 1984). 6주간 납에 노출시킨 넙치 성장율은 150 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도에서는 유의한 감소를 나타냈고, 420 $\mu\text{g/L}$ 의 납 농도에서는 대조구에 비해 61.48%가 감소하였다. 이러한 결과는 201 $\mu\text{g/L}$ 의 납 농도에 29일 이상 노출시킨 무지개송어의 치어 (*O. mykiss*)에서 유

의한 성장의 감소가 있었다는 보고와 일치한다 (Burden et al., 1998). 따라서, 넙치의 성장을 감소는 납의 독성에 의한 것이며, 이 결과는 사료효율의 감소에서도 그 원인을 찾을 수 있다. 또한, 성장률과 사료효율의 관계가 강한 양의 상관을 나타내어 섭이율이 성장과 밀접한 관계를 가진다는 것을 알 수가 있다.

본 연구에서 넙치의 대사율은 납 농도 80 $\mu\text{g/L}$ 이상에서 대조구에 비해 유의하게 감소하였고, 420 $\mu\text{g/L}$ 농도에서는 대조구에 비하여 약 50%의 감소를 보였다. 이는 납에 노출시킨 가재 (*Procambarus clarkii*)에서 노출농도가 증가함에 따라 산소소비율이 감소되는 결과와 일치한다 (Torreblanca et al., 1987).

어류의 호흡기관은 구강과 한 쌍의 새개강, 아가미로 이루어져 있으며 아가미가 손상이 되면 호흡장애를 발생하게 되는데, 납에 노출된 어류는 아가미 새판의 손상으로 호흡곤란을 일으켜 호흡률 감소의 원인이 된다 (Sippel et al., 1983). Spicer and Weber (1991)는 중금속에 노출시킨 개와 새우에서 호흡의 방해는 중금속으로 인한 아가미의 세포학적인 손상이며, 이러한 손상은 아가미 상피조직이 두터워지고, 아가미 조직에서의 혈림프 형태가 동공화되거나 공간이 좁아진다고 하였다. 실제로 아치사농도의 납에 노출시킨 가재 (*Cherax destructor*)는 산소소비율이 감소하였는데 이는 납에 의해 아가미 미세구조가 손상되기 때문이라고 하였다 (Ahern and Morris, 1999). 또한, 납은 어류의 ALA-D (δ -aminolevulinic acid dehydratase) 활성을 감소시키는데, 이러한 ALA-D의 감소는 헤모글로빈의 생성을 감소하여 궁극적으로 호흡률을 감소시킨다 (Leland and Kuwabara, 1985; Rodrigues et al., 1989).

납에 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 생리화학적 장애가 사망원인이 될 수 있다고 하였다. 따라서, 납 농도 230 $\mu\text{g/L}$ 에서 20.0%, 420 $\mu\text{g/L}$ 에서 33.2%의 넙치사망은 과량의 납 노출에 의한 자체의 독성으로 파악할 수 있으며, 아가미조직의 손상으로 인한 호흡곤란의 원인도 고려해야 한다.

이상의 결과로부터 연안 해역 및 양식장 등에서 80 $\mu\text{g/L}$ 이상의 납이 6주 이상 지속될 경우, 넙치는 대사활동의 저하등으로 인해 성장장애를 일으킬 것이며, 210 $\mu\text{g/L}$ 이상의 납농도가 존재할 경우에는 치명적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

참고 문헌

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) : Toxicological profile for lead. US Department of Health and Human Services. 9-188, 1993.
- Ahern, M. D. and Morris, S. : Respiratory, acid-base and metabolic responses of the freshwater crayfish *Cherax destructor* to lead contamination. *Comp. Biochem. Physiol.*, 124A : 105-111, 1999.
- Beitinger, T. L. : Behavioral reactions for the assessment of stress in fishes. *J. Great Lake Res.*, 16 : 495-528, 1990.
- Burden, V. M., Sandheinrich, M. B. and Caldwell, C. A. : Effects of lead on the growth and δ -aminolevulinic acid dehydratase activity of juvenile rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Environ. Pollut.*, 101 : 285-289, 1998.
- Clark, R.B. : Metals, Marine Pollution, pp. 54~82, Oxford university press, New York, 1992.
- Hodson, P. V., Blunt, B. R. and Whittle, D. I. : Monitoring lead exposure of fish, Contaminant Effects on Fisheries, pp. 87-98, Carins, V. W., Hodson, P. V. and Nriagu, J. O., John Wiley & Sons, New York, 1984.
- Hodson, P. V., Blunt, B. R. and Spry, D. J. : Chronic toxicity of water-borne and dietary lead to rainbow trout *Salmo gairdneri* in lake Ontario water. *Wat. Res.*, 12 : 869-878, 1978.
- Holcombe, G. W., Benoit, D. A., Leonard, E. N. and McKim, J. M. : Long-term effects of lead exposure on three generations of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *J. Fish. Res. Board Can.*, 33 : 1731-1741, 1976.
- Johansson-Sjoberck, M. and Larsson, A. : Effects of inorganic lead on delta-aminolevulinic acid dehydratase activity and hematological variables in the rainbow trout *Salmo gairdneri*. *Arch. Environ. Comtam. Toxicol.*, 8 : 419-431, 1979.
- 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., 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.
- Leland, H. V. and Kuwabara, J. S. : Trace metals, Fundamentals of Aquatic Toxicology, pp. 374-415, Rand, G. M. and Petrocelli, S. R., Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1985.
- Little, E. E., Fairchild, J. F. and Delonay, A. J. : Behavioral methods for assessing impacts of contaminants on early life stage fishes. *Transactions Am. Fish. Soc. Symposium*. 14 : 67-76, 1993.
- McKim, J. M. and Goeden, H. M. : A direct measure of the uptake efficiency of a xenobiotic

- chemical across the gills of brook trout (*Salelinus fontinalis*) under normoxic and hypoxic conditions. *Comp. Biochem. Physiol.* 72C : 65-74, 1982.
- Rodrigues, A. L., Bellinaso, M. L. and Dick, T. : Effect of some metal ions on blood and liver delta-aminolevulinate dehydratase of *Pimelodis maculata* (Pisces, Pimelodidae). *Comp. Biochem. Physiol.*, 94B : 65-72, 1989.
- Sippel, A., Geraci, J. and Hodson, P. : Histopathological and physiological responses of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) to sublethal levels of lead. *Water Res.*, 17 : 1115-1121, 1983.
- Sorensen, E. M. : Lead, Metal Poisoning in Fish, pp. 95-118, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1991.
- Spicer, J. I. and Weber, R. E. : Respiratory impairment in crustaceans and molluscs due to exposure to heavy metal. *Comp. Biochem. Physiol.*, 100C : 339-342, 1991.
- Thompson, D. R. : Metal levels in marine vertebrate, *Heavy Metals in the Marine Environment*, pp 101-122, Furness, R. W. and Rainbow, P. S., CRC press, Florida, 1990.
- Torreblanca, A., Diaz-Mayans, J., Del Ramo, J. and Núñez, A. : Oxygen uptake and gill morphological alteration in *Procambarus clarkii* (Girard) after sub-lethal exposure to lead. *Comp. Biochem. Physiol.*, 86C : 219-224, 1987.
- Weber, D. N., Russo, A., Seale, D. B. and Spieler, R. E. : Waterborne lead affects feeding abilities and neurotransmitter levels of juvenile fathead minnows *Pimephales promelas*. *Aquat. Toxicol.*, 21 : 71-80, 1991.
- Wotering, D. M. : The growth response in fish chronic and early life stage toxicity tests: a critical review. *Aquat. Toxicol.*, 5 : 1-21, 1984.