

〈Original article〉

6가크롬 노출에 따른 넙치, *Paralichthys olivaceus*의 혈액학적 성상 및 혈장성분의 변화

김진영 · 성기현 · 임록지 · 서승아 · 조영록¹ · 김준환^{1,*}

선문대학교 수산생명의학과, ¹국립수산과학원 서해수산연구소

Effects of Exposure to Hexavalent Chromium on Hematological Parameters and Plasma Components in Flatfish, *Paralichthys olivaceus*

Jin-Young Kim, GheeHyun Sung, Lok-Ji Lim, Seung-A Seo,
Yeong-Rok Cho¹ and Jun-Hwan Kim^{1,*}

Department of Aquatic Life and Medical Science, Sun Moon University,
Asan 31460, Republic of Korea

¹West Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science,
Taeam 32132, Republic of Korea

Abstract - *Paralichthys olivaceus* (mean length, 13.3 ± 1.6 cm; mean weight, 25.6 ± 3.7 g) were exposed to waterborne hexavalent chromium at different concentrations (0, 0.5, 1.0, and 2.0 mg L⁻¹) for 10 days. Hematological parameters such as hemoglobin and hematocrit of *P. olivaceus* were significantly decreased after waterborne chromium exposure. There were no significant alterations in inorganic plasma components, calcium, or magnesium after waterborne chromium exposure. Organic plasma components such as glucose and cholesterol levels were significantly increased after exposure to chromium at concentration over 1.0 mg L⁻¹. However, significant change in total protein was not observed. Enzymatic plasma components such as aspartate aminotransferase (AST), alanine aminotransaminase (ALT), alkaline phosphatase (ALP) levels were significantly increased after chromium exposure. Results of this study indicate that waterborne chromium exposure can cause significant alterations in hematological parameters and plasma components of *P. olivaceus*. Such changes in parameters could be used as reliable indicators for toxic effects of waterborne chromium exposure.

Keywords : metal toxicity, blood physiology, chromium exposure, *Paralichthys olivaceus*

서 론

중금속은 토양, 농작물, 하천수 및 지하수 등의 육상수계

뿐만 아니라 해양에도 존재하며, 생물학적으로 분해되지 않고 생태계에 남아 환경오염을 초래할 수 있다(Lee and Chon 2004; Lushchak *et al.* 2008). 크롬은 가장 독성이 강한 중금속 중 하나이며, 수중의 높은 수준의 크롬노출은 chrome-tanning 사업, 전기도금, 섬유, 염색 및 사진 산업과 같은 다

* Corresponding author: Jun-Hwan Kim, Tel. 041-675-3773,
Fax. 041-675-7077, E-mail. junhwan1982@korea.kr

양한 산업 폐수로 인해 일어난다(Kim and Kang 2016a). 크롬은 산화환원활성금속으로서 수중에서 주로 3가 및 6가 산화수로 존재한다(Chon *et al.* 2007; Castro *et al.* 2014). 6가크롬은 도금 및 페인트 생산의 원료로 사용되며, 산업활동 후 배출수로 인해 수생환경의 오염을 유발한다(Lee and Chon 2004; Castro *et al.* 2014). 또한 6가크롬은 수중에서 쉽게 용해되어 유동적으로 이동하기 때문에 잘 용해되지 않는 3가크롬에 비해 생물체내에서 작용하는 독성이 10~100배 더 높으며(Chon *et al.* 2007; Nam *et al.* 2017), 생물에서 돌연변이 및 암을 유발하는 등 많은 병리 현상을 나타낼 수 있다(Lushchak *et al.* 2008).

또한, 6가크롬은 주로 Oxide이나 Oxyanions의 형태로 존재하며, 비특이적 음이온 수송시스템을 통해 세포로 통과한 후 세포 내부에서 안정한 형태의 3가크롬으로 환원된다(Park 1996; Matsumoto *et al.* 2006). 이 과정 중 발생하는 독소인 활성산소종(ROS; Reactive Oxygen Species)은 동물세포 내에서 효소의 불활성화 및 변이, DNA합성의 저해, 세포소기관의 손상에 의한 세포괴사나 사멸 등과 같은 독성 및 발암작용을 나타낸다(Han *et al.* 2006; Park *et al.* 2006). 6가크롬은 어류 체내 ATPase와 관련된 수송을 억제시켜 아가미 및 내장과 같은 흡수성 기관에서 호흡 및 삼투압 기능의 손상을 일으킨다(Kim and Kang 2016a). 6가크롬의 축적은 주로 비장, 간 및 신장에서 발생하며(Kuykendall *et al.* 2006), 이러한 독성 영향은 어류 혈액에서 생리학적 변화를 일으킬 수 있다(Mazon *et al.* 2002).

어류의 혈액학적 성상은 수계환경에서 각종 환경요인과 화학물질에 대해 밀접한 관계를 가진다(Carvalho and Fernandes 2006). 6가크롬에 노출된 어류는 독성작용으로 인한 세포괴사로 Hemoglobin 및 Hematocrit 수치의 감소와 같은 빈혈이 나타나고, 간세포의 손상으로 AST (aspartate aminotransferase), ALT (alanine transferase) 및 ALP (alkaline phosphatase) 수치의 증가를 유발할 수 있다(Shaheen and Akhtar 2012). 또한, 6가크롬은 어류의 혈중 콜레스테롤 수치의 증가로 인한 고콜레스테롤혈증(hypercholesterolemia)을 나타낸다(Shaheen and Akhtar 2012). 따라서, 혈액 및 혈장 성분은 6가크롬 독성에 따른 수생 동물의 생리학적 반응을 확인할 지표로 사용된다(Kim and Kang 2017).

본 실험에 사용되는 넙치, *Paralichthys olivaceus*는 성장이 빠르고 고밀도 사육이 가능하며, 소비층이 두터워 우리나라에서 가장 많이 생산되고 있는 어종 중 하나이다(Kim *et al.* 2005). 6가크롬은 해양환경에 자연적으로 존재하며, 높은 농도의 6가크롬 노출은 수생동물에게 유독하게 작용할 수 있다(Kim and Kang 2016a). 하지만, 6가크롬에 노출된 넙치의 독성학적 연구는 다양하게 이루어지지 않고 있다. 따라서

본 연구는 해양환경에 높은 수준으로 존재할 수 있는 6가크롬이 넙치에 미치는 독성영향을 평가하기 위해, 6가크롬 노출에 따른 넙치의 혈액학적 성상 및 혈장성분의 변화를 관찰하였다.

재료 및 방법

1. 실험어 및 실험환경

본 실험에 사용한 실험어는 20°C에서 사육 양성된 평균 무게 25.6±3.7 g, 평균 전장 13.3±1.6 cm의 넙치 치어를 태안소재의 중요생산장에서 분양을 받아 실험을 실시하였다. 실험 전 일주일간 실험실 환경에서 순치를 실시하였으며, 실험에 사용된 해수의 성분은 Table 1과 같다. 노출은 6가크롬 K₂Cr₂O₇ (Sigma Chemical, St. Louis, MO, ≥99.0%)를 증류수에 녹여 표준원액 1000 mg L⁻¹를 만든 후, 각 수조에 0, 0.5, 1.0, 2.0 mg L⁻¹의 농도로 10일간 노출을 실시하였다. 각 20 L 사육수조에 각 농도구간당 6마리씩 48마리를 이용하였고, 노출 5일과 10일 후 sampling을 실시하였다. 각 노출 실험 수조의 실제 6가크롬의 양은 ICP-MS (ELAN 6600DRC, Perkin-Elmer)를 이용하여 측정하였고, Table 2에 나타내었다.

2. 혈액학적 성상

6가크롬 노출 5일과 10일 후, 혈액학적 분석을 위해 채혈을 실시하였다. 혈액은 헤파린(Sigma Chemical, St. Louis, MO) 처리된 주사기를 이용해 채취 후, 즉시 적혈구용적(Hematocrit)과 헤모글로빈(Hemoglobin)을 측정하였다.

Table 1. Chemical components of seawater and experimental condition used in experiments

Item	Value
Temperature (°C)	20.0±0.5
pH	7.9±0.2
Salinity (‰)	33.1±0.2
Dissolved Oxygen (mg L ⁻¹)	8.1±0.4
Ammonia (mg L ⁻¹)	0.12±0.03
Nitrite (mg L ⁻¹)	0.16±0.07
Nitrate (mg L ⁻¹)	1.31±0.24

Table 2. Analyzed waterborne chromium concentration (mg L⁻¹) from each source

Waterborne Cr concentration (mg L ⁻¹)				
Waterborne Cr concentrations	Control	0.5	1.0	2.0
Measured Cr concentrations	0.01	0.47	1.08	2.13

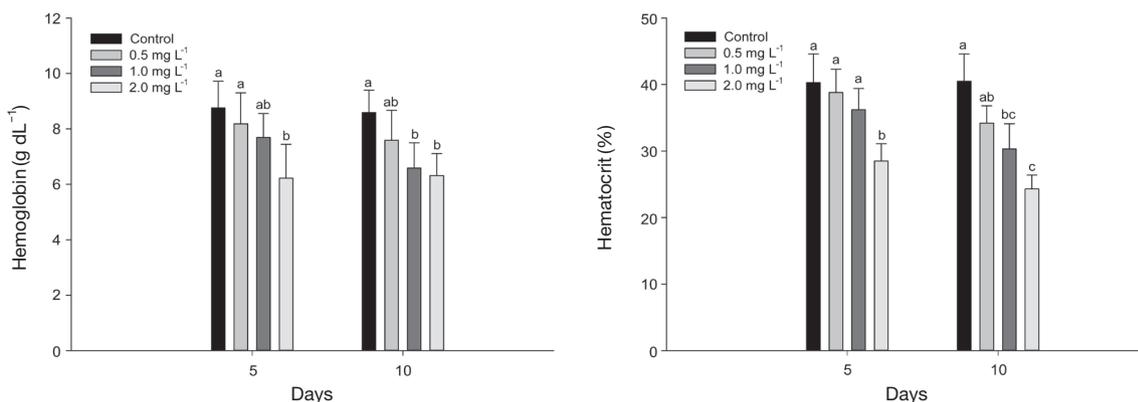


Fig. 1. Hematological parameters (hemoglobin and hematocrit) in flatfish, *Paralichthys olivaceus*, after exposure to different concentrations of waterborne chromium for 10 days. Values with different superscripts after 5 and 10 days of exposure are significantly different ($p < 0.05$) as determined by Tukey's multiple range test.

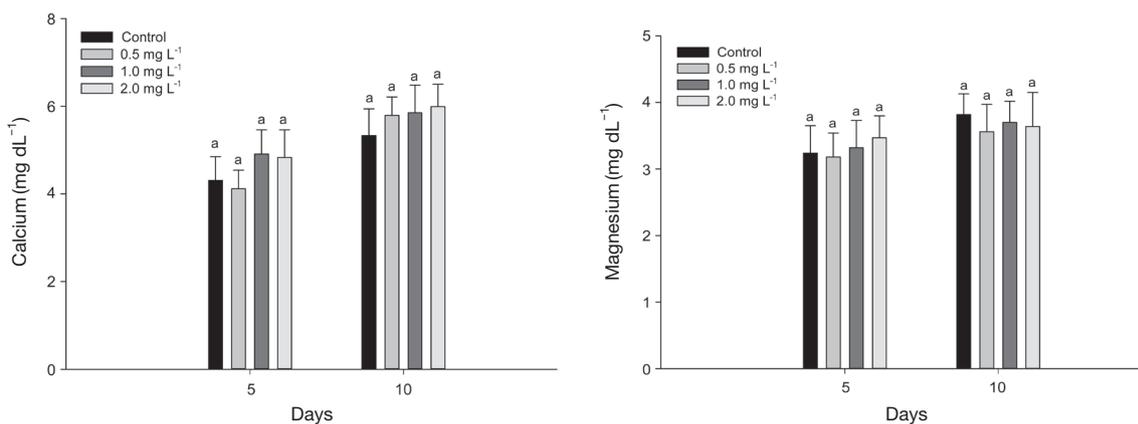


Fig. 2. Inorganic plasma components (calcium and magnesium) in flatfish, *Paralichthys olivaceus*, after exposure to different concentrations of waterborne chromium for 10 days. Values with different superscripts after 5 and 10 days of exposure are significantly different ($p < 0.05$) as determined by Tukey's multiple range test.

Hematocrit는 모세관 내로 혈액을 넣어, Microhematocrit centrifuge (VS-12000, Korea)에서 12,000 rpm, 10분간 원심 분리 후 Micro-hematocrit reader를 이용하여 측정하였다. Hemoglobin 수치는 임상용 kit (Asan Pharm. Co., Ltd.)를 이용하여 Cyan-methemoglobin법으로 측정하였다.

3. 혈장성분 분석

6가크롬 노출에 따른 혈장성분을 분석하기 위해 채취한 혈액을 4°C에서 3000×g로 15분간 원심분리 후 혈장을 분리하였다. 혈장 무기성분으로 칼슘(Calcium), 마그네슘(Magnesium)을 측정하였다. 칼슘은 OCPC법, 마그네슘은 Xylidyl blue-I법에 따라 임상용 kit (Asan Pharm. Co., Ltd)를 이용하여 측정하였다. 혈장 유기성분으로 혈당(Glucose), 콜

레스테롤(Cholesterol) 및 총 단백질(Total protein)을 측정하였다. 혈당은 GOD/POD법, 콜레스테롤은 비색법, 총 단백질은 Biuret법에 의해 시판되고 있는 임상용 kit (Asan Pharm. Co., Ltd)를 이용하였다. 혈장 효소활성으로 AST (Aspartate aminotransferase), ALT (Alanine aminotransminase) 및 ALP (Alkaline phosphatase)를 측정하였다. AST와 ALT는 505 nm에서 Reitman-Frankel법, ALP는 King-King법으로 500 nm에서 임상용 kit (Asan Pharm. Co., Ltd)를 이용하여 분석하였다.

4. 통계분석 방법

독성실험을 위한 반수치사농도는 probit 모델을 이용하여 SPSS 통계 프로그램 (SPSS Inc.)으로 확인하였다. 본 실험분

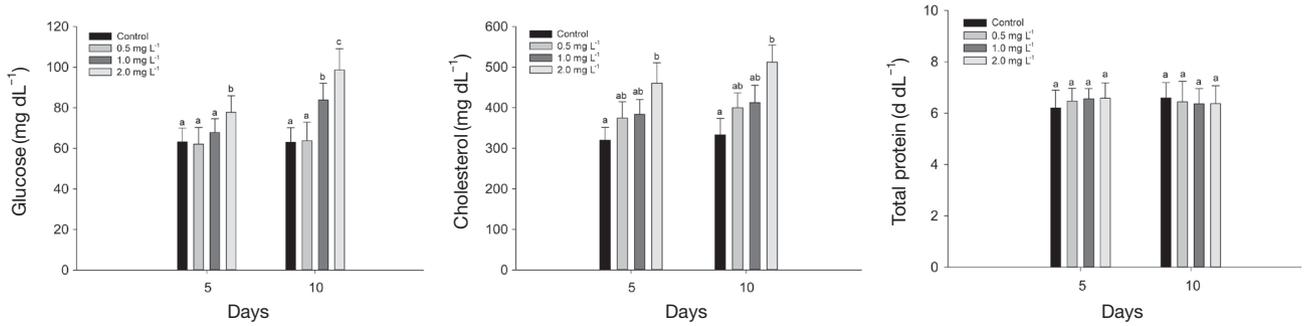


Fig. 3. Organic plasma components (glucose, cholesterol, and total protein) in flatfish, *Paralichthys olivaceus*, after exposure to different concentrations of waterborne chromium for 10 days. Values with different superscripts after 5 and 10 days of exposure are significantly different ($p < 0.05$) as determined by Tukey's multiple range test.

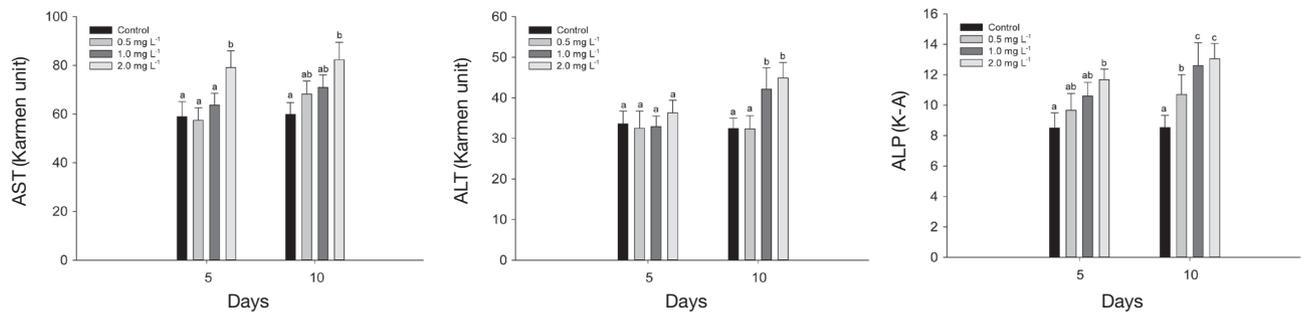


Fig. 4. Enzymatic plasma components (AST, ALT, and ALP) in flatfish, *Paralichthys olivaceus*, after exposure to different concentrations of waterborne chromium for 10 days. Values with different superscripts after 5 and 10 days of exposure are significantly different ($p < 0.05$) as determined by Tukey's multiple range test.

석은 노출물질별 농도에 따른 각 6마리를 분석에 이용하였고, 모든 실험은 3반복으로 이루어졌다. 실험 분석 결과에 대한 통계학적 유의성은 SPSS 통계 프로그램 (SPSS Inc.)을 이용하여 ANOVA test를 실시하여 Tukey's multiple range test를 통해 $p < 0.05$ 일 때 유의성이 있는 것으로 간주하였다.

결 과

1. 혈액학적 성상

6가크롬 노출에 따른 넙치의 혈액학적 성상의 변화는 Fig. 1에 나타내었다. Hemoglobin 수치는 6가크롬 노출 5일 후 2 mg L^{-1} 에서 유의적 감소를 나타내었으며, 노출 10일 후 1 mg L^{-1} 이상의 농도에서 유의적 감소를 나타냈다 ($p < 0.05$). Hematocrit는 노출 5일 후 2 mg L^{-1} 및 노출 10일 후 1 mg L^{-1} 이상에서 유의적 감소를 나타내었다 ($p < 0.05$).

2. 혈장성분

6가크롬 노출에 따른 넙치의 혈장 무기성분의 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 혈장 무기성분인 calcium과 magnesium은 6가크롬의 노출에 따른 유의적인 변화는 나타내지 않았다. 6가크롬 노출에 따른 넙치의 혈장 유기성분의 변화는 Fig. 3에 나타내었다. 혈장 glucose는 노출 5일 후 2 mg L^{-1} 의 6가크롬 농도에서 유의적인 증가를 나타내었고, 노출 10일 후 1 mg L^{-1} 이상의 6가크롬 농도에서 유의적인 증가를 나타내었다 ($p < 0.05$). 혈장 total protein은 6가크롬 노출 농도에 의한 유의적인 변화는 나타나지 않았다. 혈장 cholesterol은 노출 5일과 10일 후 2 mg L^{-1} 의 6가크롬 노출 농도에서 유의적인 증가를 나타내었다 ($p < 0.05$).

6가크롬 노출에 따른 넙치의 혈장 효소성분의 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 혈장 AST는 6가크롬 노출 5일과 10일 후 2 mg L^{-1} 농도에서 유의적인 증가를 나타내었다 ($p < 0.05$). 혈장 ALT는 노출 5일 후에는 6가크롬 노출에 따른 유의적인 변화는 나타나지 않았지만, 노출 10일 후 1 mg L^{-1} 이

상의 6가크롬 노출 농도에서 유의적인 증가를 나타내었다 ($p < 0.05$). 혈장 ALP는 노출 5일 후 2 mg L^{-1} 의 농도에서 유의적 증가가 나타났으며, 노출 10일 후 0.5 mg L^{-1} 이상의 6가크롬 농도에서 유의적인 증가가 나타났었다 ($p < 0.05$).

고 찰

수생생물에서 독성물질의 노출에 따른 독성영향은 생물학적 조건과 수중의 물리-화학적 특성, 독성물질의 종류, 유형 및 노출기간의 차이에 따라 다양하게 나타난다 (Vutukuru 2005). 본 실험에서는 수중 6가크롬 노출에 따른 넙치 *Paralichthys olivaceus*의 독성영향을 평가하였다.

혈액학적 성상의 변화는 중금속에 노출된 어류의 스트레스에 의해 변화를 나타내며 (Kim *et al.* 2017), 수중 6가크롬 노출된 어류는 6가크롬의 독성 작용에 의해 체내의 Hemoglobin 및 Hematocrit 수치 감소를 유발할 수 있다 (Kim and Kang 2016b). 본 실험에서 6가크롬에 노출된 넙치 *P. olivaceus*의 Hemoglobin 및 Hematocrit 수치에서 유의적 감소를 보였다. 이러한 유의적 감소는 6가크롬의 노출로 활성산소종 (ROS)이 생성되며, 그로 인한 세포소기관의 피사 및 사멸, 조혈 조직의 손상으로 인한 Hemoglobin 및 Hematocrit 수치 감소로 판단된다. Kim and Kang (2016b) 또한 6가크롬에 노출된 조피볼락 *Sebastes schlegelii*는 독성 작용에 의해 산소결합능력이 저하되어 세포 종창 (Cell swelling) 및 조직피사로 인한 Hemoglobin과 Hematocrit의 수치감소를 보고했다. 따라서 수중 6가크롬은 넙치의 혈액학적 성상에 독성으로 작용하여 생리적 변화를 유발하였다.

혈장의 무기성분인 Calcium과 Magnesium은 삼투압 변화를 나타내는 주요한 지표이며, 다양한 환경변화에 의해 수치가 변할 수 있다 (Kim *et al.* 2017). Rogers *et al.* (2003)은 낱에 노출된 무지개 송어 *Oncorhynchus mykiss*의 혈장 Calcium은 유의적 감소를 보였으며, 혈장 Magnesium은 작은 증가를 보였다고 보고했다. 하지만 Kim and Kang (2016b)은 6가크롬에 노출된 조피볼락 *S. schlegelii*의 혈장 Calcium과 Magnesium의 유의적 변화는 관찰되지 않았다고 보고했다. 본 실험에서 6가크롬에 노출된 넙치 *P. olivaceus*의 혈장 Calcium과 Magnesium의 유의적 변화는 관찰되지 않았다.

혈중 Glucose 수치는 외부 환경 스트레스에 의해 민감하게 반응하며 신뢰성 있는 지표로 사용된다 (Kim and Kang 2016b). 어류와 같은 척추동물은 스트레스로부터 생존하기 위해 에너지를 이용하여 대사 작용을 하며, 그 결과로 혈중 Glucose 수치가 증가한다 (Firat and Kargin 2010). 본 실험

에서, 6가크롬의 노출된 넙치 *P. olivaceus*의 혈중 Glucose는 유의적 증가를 보였으며, 이러한 증가는 어류가 스트레스에 의한 간과 근육의 Glycogen을 사용하여 Glucose를 증가시키는 것으로 판단할 수 있다 (Firat and Kargin 2010). Al-Akel and Shamsi (1996) 또한 6가크롬에 노출된 잉어 *Cyprinus carpio*의 혈중 Glucose는 유의적 증가를 보고하였다. 혈중 Cholesterol은 세포막 필수구성분이며, 스테로이드 호르몬 전구체이고, 환경적 스트레스를 판단하는 주요한 지표로 이용된다 (Kim *et al.* 2017). 혈중 Cholesterol의 증가는 간과 신장기능의 장애로 인한 결과로 판단된다 (Kim *et al.* 2016). Oner *et al.* (2008)은 6가크롬에 노출된 틸라피아 *Oreochromis niloticus*의 혈중 Cholesterol의 증가를 보고하였으며, 본 실험에서도 6가크롬 노출에 따라 넙치 *P. olivaceus*의 혈중 Cholesterol의 유의적 증가를 보였다. Total protein은 수분평형과 영양상태를 판단하는 유용한 지표이며, 중금속 노출수치에 따라 민감하게 반응한다 (Firat and Kargin 2010; Kim *et al.* 2016). Vutukuru (2003)는 6가크롬에 노출된 잉어 *Labeo rohita*에서 조직 손상에 의한 혈중 Total protein의 감소를 보고한 바 있으나, 본 실험에서는 6가크롬 노출에 따른 혈중 Total protein의 유의적 변화는 나타나지 않았다.

혈장 AST (Aspartate aminotransferase), ALT (Alanine aminotransferase) 및 ALP (alkaline phosphatase)와 같은 효소 성분은 간 손상 지표로 이용되며, 중금속에 노출된 어류와 같은 척추동물의 혈장성분 변화의 중요한 지표로 사용된다 (Shaheen and Akhtar 2012; Kim and Kang 2016b). 본 실험에서 6가크롬의 노출은 넙치 *P. olivaceus*의 혈장 AST, ALT 및 ALP의 유의적 증가를 보였다. Shaheen and Akhtar (2012)와 Kumari *et al.* (2011) 또한 6가크롬에 노출된 잉어 *Cyprinus carpio*와 *Labeo rohita*의 혈장 AST, ALT 및 ALP의 유의적 증가를 보고하였다. Kim and Kang (2016b)은 6가크롬에 노출된 조피볼락 *S. schlegelii*의 혈장 AST, ALT에서 유의적 증가를 보고하였다. 본 실험의 넙치 *P. olivaceus*의 혈장 효소의 증가는 6가크롬으로 인한 간세포의 손상에 따른 것으로 판단된다. 전반적으로 수중 6가크롬은 넙치의 혈장성분에 영향을 주었으며, 독성으로 작용하여 생리적 변화를 초래하였다.

본 실험에서 수중의 6가크롬 노출은 넙치의 혈액학적 성상 (Hemoglobin 및 Hematocrit)과 혈장 성분 (Glucose, Cholesterol, AST, ALT 및 ALP)에 유의적인 변화를 유발하였다. 본 실험의 결과는 수중의 6가크롬이 실험어인 넙치에 독성으로 작용하여, 혈액생리에 영향을 주었으며, 전반적으로 1.0 mg L^{-1} 이상의 6가크롬의 노출은 혈액 및 혈장성분에 영향을 주기 때문에 환경적 주의가 요구될 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 넙치 치어(평균 체장 13.3 ± 1.6 cm, 평균 체중 25.6 ± 3.7 g)를 수중 6가크롬에 10일간 0, 0.5, 1.0, 2.0 mg L⁻¹의 농도로 노출시켜 독성영향 판단하기 위해 수행되었다. 넙치 hemoglobin과 hematocrit와 같은 혈액학적 성상은 수중 크롬노출에 의해 유의적으로 감소하였다. 혈장 무기성분인 calcium과 magnesium은 크롬노출에 의해 유의적인 변화는 나타나지 않았다. 혈장 무기성분인 glucose와 cholesterol과 같은 1.0 mg L⁻¹ 이상의 크롬노출에 의해 유의적으로 증가하였지만, total protein은 유의적인 변화는 나타나지 않았다. 혈장 효소성분인 AST, ALT, ALP는 크롬노출에 의해 유의적인 증가가 나타났다. 본 실험의 결과는 수중 크롬노출은 넙치의 혈액 및 혈장성분에 유의적인 변화를 유발하며, 이러한 지표의 변화는 수중 크롬노출의 독성영향을 판단하는 주요한 지표가 될 것이다.

사 사

이 논문은 2018년 국립수산물학원 ‘바이오플라크를 이용한 해수양식 기술개발(대하, 넙치) (R2018014)’의 지원으로 수행된 연구입니다. 본 연구 수행에 도움을 주신 권세안 연구원, 김기욱 연구원에게 감사의 인사 드립니다.

REFERENCES

- Al-Akel AS and MJK Shamsi. 1996. Hexavalent chromium: Toxicity and impact on carbohydrate metabolism and hematological parameters of carp (*Cyprinus carpio* L.) from Saudi Arabia. *Aquat. Sci.* 58:24-30.
- Carvalho CS and MN Fernandes. 2006. Effect of temperature on copper toxicity and hematological responses in the neotropical fish *Prochilodus scrofa* at low and high pH. *Aquaculture* 251:109-117.
- Castro MP, FR Moraes, RY Fujimoto, C Cruz, MA Belo, MAA Moraes and JRE Moraes. 2014. Acute toxicity by water containing hexavalent or trivalent chromium in native Brazilian fish, *Piaractus mesopotamicus*: Anatomopathological alterations and mortality. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 92:213-219.
- Chon CM, SH Moon, JS Ahn, YS Kim, JH Won and KH Ahn. 2007. Fate and transport of Cr (VI) contaminated groundwater from the industrial area in Daejeon. *Econ. Environ. Geol.* 40:403-418.
- Firat O and F Kargin. 2010. Individual and combined effects of heavy metals on serum biochemistry of Nile Tilapia *Oreochromis niloticus*. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 58:151-157.
- Han DS, SW Jeon, SJ Yang, BN Choi, SH Suk, GY Hong and HJ Song. 2006. The effect of poncirin on hexavalent chromium in HIN3T3 fibroblasts in vitro. *Korea J. Herbol.* 21:101-107.
- Kim GU, HS Jang, JY Seo and SM Lee. 2005. Effect of feeding frequency of extruded pellet on growth and body composition of juvenile flounder, *Paralichthys olivaceus* during the winter season. *J. Aquacult.* 18:31-36.
- Kim JH, HJ Park, IK Hwang, DH Kim, CW Oh, JS Lee and JC Kang. 2016. Alterations of hematological parameters, plasma constituents and antioxidant responses in the sablefish *Anoplopoma fimbria* depending on salinity. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 49:830-837.
- Kim JH and JC Kang. 2016a. Oxidative stress, neurotoxicity, and metallothionein (MT) gene expression in juvenile rock fish *Sebastes schlegelii* under the different levels of dietary chromium (Cr⁶⁺) exposure. *Ecotox. Environ. Safe.* 125:78-84.
- Kim JH and JC Kang. 2016b. The chromium accumulation and its physiological effects in juvenile rockfish, *Sebastes schlegelii*, exposed to different levels of dietary chromium (Cr⁶⁺) concentrations. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 41:152-158.
- Kim JH and JC Kang. 2017. Effects of dietary chromium exposure to rockfish, *Sebastes schlegelii* are ameliorated by ascorbic acid. *Ecotox. Environ. Safe.* 139:109-115.
- Kim JH, KW Kim, SH Bae, SK Kim, SK Kim and JH Kim. 2017. Alterations in hematological parameters and antioxidant responses in the biofloc-reared flatfish *Paralichthys olivaceus* following ammonia exposure. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 50:750-755.
- Kumari K, N Ranjan and RC Sinha. 2011. Multiple biomarker response in the fish, *Labeo rohita* due to hexavalent chromium. pp. 155-158. In Proceedings of the 2nd International Conference on Biotechnology and Food Science. vol. 7. IACSIT Press.
- Kuykendall JR, KL Miller, KN Mellinger and AV Cain. 2006. Waterborne and dietary hexavalent chromium exposure causes DNA-protein crosslink (DPX) formation in erythrocytes of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Aquat. Toxicol.* 78:27-31.
- Lee JS and HT Chon. 2004. Human risk assessment of toxic heavy metals around abandoned metal mine sites. *Econ. Environ. Geol.* 37:73-86.
- Lushchak OV, OI Kubrak, MZ Nykorak, KB Storey and VI

- Lushchak. 2008. The effect of potassium dichromate on free radical processes in goldfish: possible protective role of glutathione. *Aquat. Toxicol.* 87:108–114.
- Matsumoto ST, MS Mantovani, MIA Malaguttii, AL Dias, IC Fonseca and MA Marin-Mrales. 2006. Genotoxicity and mutagenicity of water contaminated with tannery effluents, as evaluated by the micronucleus test and comet assay using the fish *Oreochromis niloticus* and chromosome aberrations in onion root-tips. *Genet. Mol. Biol.* 29:148–158.
- Mazon AF, EAS Monteiro, GHD Pinheiro and MN Fernadez. 2002. Hematological and physiological changes induced by short-term exposure to copper in the freshwater fish, *Prochilodus scrofa*. *Braz. J. Biol.* 62:621–631.
- Nam AR, JA Park, TG Do, JW Choi, US Choi, KN Kim, ST Yun and SH Lee. 2017. Chromium (VI) removal from aqueous solution using acrylic ion exchange fiber. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 39:112–117.
- Oner M, G Atli and M Canli. 2008. Changes in serum biochemical parameters of freshwater fish *Oreochromis niloticus* following prolonged metal (Ag, Cd, Cr, Cu, Zn) exposures. *Environ. Toxicol. Chem.* 27:360–366.
- Park EJ, MS Kang, DS Kim and KS Park. 2006. Induction of oxidative stress by hexavalent chromium in human bronchial epithelial cells (BEAS-2B). *J. Environ. Toxicol.* 21:357–363.
- Park HS. 1996. Formation of reactive oxygen species and Cr (V) entities in chromium (VI) exposed A549 cells. *Korean J. Environ. Toxicol.* 11:49–57.
- Rogers JT, JG Richards and CM Wood. 2003. Ionoregulatory disruption as the acute toxic mechanism for lead in the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquat. Toxicol.* 64:215–234.
- Shaheen T and T Akhtar. 2012. Assessment of chromium toxicity in *Cyprinus carpio* through hematological and biochemical blood markers. *Turk. J. Zool.* 36:682–690.
- Vutukuru SS. 2003. Chromium induced alterations in some biochemical profiles of the Indian major carp, *Labeo rohita* (Hamilton). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 70:118–123.
- Vutukuru SS. 2005. Acute effects of hexavalent chromium on survival, oxygen consumption, hematological parameters and some biochemical profiles of the Indian major carp, *Labeo rohita*. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2:456–462.

Received: 15 March 2018

Revised: 17 April 2018

Revision accepted: 30 April 2018