

ORIGINAL ARTICLE

## 낙동강 상류 유역별 서식 어류의 중금속 특성

권희원 · 김영훈 · 김정진<sup>1)\*</sup>

안동대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>안동대학교 지구환경과학과

### Heavy Metal Characteristics of Fish in Watersheds of the Upper Region of the Nakdong River

Hee Won Kwon, Young Hun Kim, Jeong Jin Kim<sup>1)\*</sup>

*Department of Environmental Engineering, Andong National University, Andong 36729, Korea*

<sup>1)</sup>*Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 36729, Korea*

#### Abstract

Heavy metal contaminations were investigated in fishes inhabiting the basins of Andong, Imha and Yeongju dam basins along the upper stream of the Nakdong river. The characteristics of heavy metals contamination in fish were investigated based on sampling sites located in the Andong dam basin. The muscle tissue was analyzed for 267 objects of 26 species from the Andong dam, 50 objects of 17 species from Imha dam, 38 objects of 9 species from Youngju dam basin. The type and amount of heavy metals concentrated in the body of the fishes was found to be species-dependent. The heavy metal species which contamination increase through the Seokpo smelter are chromium, zinc, cadmium, and lead, and these are very likely the influence of the smelter. The concentration of eight heavy metals in fish from the Andong dam basin was higher than that in fish from the Imha and Youngju dam basins; the values for zinc, arsenic, and cadmium were significantly higher. However, mercury and lead exhibited high values in the Imha and Yeongju dam basins, respectively.

**Key words** : Nakdong river, Andong dam, Imha dam, Youngju dam, Fish, Heavy metal

#### 1. 서론

안동댐 상류는 봉화군 석포면까지 낙동강 본류의 윗 하 거리는 약 91 km 정도이며 고려, 연화, 삼용, 낙국 광산 등 수질과 퇴적물의 오염원으로 작용하는 폐금속광산이 50여 개소가 분포하고 있다. 또한, 낙동강 수계의 석포제련소는 아연 제련 및 아연괴, 황산, 황산동 등을 생산하고 있다. 과거부터 안동호는 상류 지역에 위치한 휴폐광산에 의한 오염과 관련된 문제가 제기되었으며, 최근

낙동강 최상류에 위치한 제련소에 의한 오염 가능성 및 오염원으로서 폐광산보다 더 많은 관심의 대상이 되고 있다. 영주댐은 낙동강 지류인 내성천에 위치하고 있으며 상류의 오염원으로는 작용할 수 있는 비전, 진곡, 금륜, 금봉, 대기 광산 등의 폐금속광산이 분포하고 있다. 임하댐은 낙동강 지류인 반변천에 위치하고 있으며 상류에는 일월, 가곡리, 화천리, 산운리 광산 등의 폐금속광산이 분포한다. 안동댐 상류에는 오염원으로 작용하는 제련소와 폐광산이 임하댐과 영주댐보다 훨씬 많이 분포하고

Received 18 November, 2021; Revised 18 January, 2022;

Accepted 3 February, 2022

\*Corresponding author: Jeong Jin Kim, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 36729, Korea

Phone : +82-54-820-5038

E-mail : jjkim@andong.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있어 이곳에 서식하는 물고기의 체내 중금속 특성은 타 지류와는 상당히 차이가 있을 것으로 생각된다.

낙동강에 분포하는 물고기는 낙동강 전체 수계에서 126종의 어류가 보고된 바 있으나(Chae, 2016), 오동정 종과 하구언 건설 이후에 채집기록이 없는 종을 제외하고, 외래종과 국내 이입종을 포함하여 현재는 약 90~100종의 어류가 서식하는 것으로 추정하고 있다(Yang, 1973; Ju and Jeon, 1977; Jang et al., 2001; Kang, 2011; Chae et al., 2015; Chae, 2016; Jeong et al., 2016; Han, 2016).

낙동강 상류 유역의 물고기 중금속과 관련된 연구에는 안동과 임하호에 서식하는 수종 어류의 조직 내 중금속 함량, 안동, 임하호에 서식하는 누치(*Hemibarbus labeo*)의 중금속 함량, 소수 어종을 대상으로 중금속 특성 연구가 진행되었으며, 어류 체내의 중금속 농도는 임하댐보다 안동댐에 서식하는 어류가 더 높은 것으로 나타났다(Shin et al., 2010a). 안동호와 임하호에 서식하는 붕어의 중금속 함량의 경우 안동호에 서식하는 붕어에서 높은 함량을 보이며, Cr, Cu, Cd 및 As는 함량의 차이가 큰 것으로 나타났다(Shin et al., 2010b). 안동호 및 상류수계 내 어류 중 수은 농도 특성 연구에 의하면 높은 먹이 단계에 있는 포식성 어종인 끄리, 블루길 등의 수은 농도가 높았으며, 초식성 또는 잡식성 어종인 모래무지, 피라미 등에서 낮은 것으로 나타났다(Byeon et al., 2010). 안동호의 경우 안동호 상류 지점의 폐광산과 농경지로부터 하상퇴적물이 유입되어 하상퇴적물 속에 포함된 유기물을 붕어가 먹이로 섭취함으로써 중금속 함량에 영향을 미친 것으로 판단하고 있다(Kim et al., 2009).

본 연구에서는 낙동강 상류지역의 안동댐, 임하댐, 영주댐 유역 서식 어류의 어종 및 위치에 따른 중금속 오염 특성을 비교 분석하고자 한다. 이를 위해 낙동강 상류 안동댐, 임하댐, 영주댐 유역에 서식하는 물고기를 채집하여 근육부에 대한 중금속 분석을 수행하였으며, 이를 기초로 유역별, 위치별 중금속 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 시료 채취 및 분석 방법

시료 채취 지점은 안동댐 유역 6개(Site-AD-01-06), 임하댐 유역(Site-IH-01), 영주댐 유역(Site-YJ-01)로

총 8개 지점이다(Fig. 1). 안동댐 유역의 경우 석포제련소(0 km)를 기준으로 상류 약 9.2 km(Site-AD-01), 하류로 3.1 km(Site-AD-02), 36.6 km(Site-AD-03), 52.1 km(Site-AD-04), 66.8 km(Site-AD-05), 89 km(Site-AD-06) 지점에서 어류를 채집하였다. Site-AD-01의 경우 석포제련소 상류에 위치하기 때문에 제련소의 영향을 전혀 받지 않았으며, Site-AD-02의 경우 제련소 하류 약 3.1 km이기 때문에 제련소의 영향을 직접적으로 받았을 것으로 판단되는 지점이다. 임하댐(Site-IH-01)과 영주댐(Site-YJ-01)은 유역 전체를 각각 1개 지점으로 구분하여 분석 자료를 정리하였다. 어류 채취 시기는 7월과 8월이며, 각 지점별로 채취 횟수는 1-5회로 총 20여회에 걸쳐 어류를 채집하였다. 어류 채집은 각 지점의 특성을 고려하여 모든 지점에서 그물(fishnet)을 이용하였으며, 보조 장비로 투망(cast net), 통발(fish trap), 주낙(long line hook), 족대(skimming nets) 등을 이용하였다(Table 1).

물고기 생체 시료 채취 및 중금속 분석 방법은 식품의약품안전처 식품공전의 식품가공공전, 일반시험법, 식품 중 유해물질, 중금속 분석 방법을 적용하여 분석하였다. 중금속 분석은 각 어종별로 최소 1개체에서 최대 40개체에 대해 분석을 수행하였다. 분석 시료 중 가장 많은 어종은 피라미(*Z. platypus*)로 6개 지점 40개체이며, 그 외 20개체 이상인 어종은 대농갱이(*L. ussuriensis*) 7개 지점 39개체, 갈겨니(*Z. temmincki*) 5개 지점 32개체, 꺾지(*C. herzi*) 6개 지점 25개체, 모래무지(*P. esocinus*) 6개 지점 22개체 등이다. 분석 중금속 항목은 크롬(Cr), 망간(Mn), 철(Fe), 니켈(Ni), 구리(Cu), 아연(Zn), 비소(As), 카드뮴(Cd), 수은(Hg), 납(Pb) 등 10개이다.

## 3. 연구 결과

### 3.1. 채집 어종

채집 어종은 갈겨니(*Zacco temmincki*), 강준치(*Erythrocyathus erythropterus*), 기름종개(*Cobitis hankugensis*), 꺾지(*Coreoperca herzi*), 끄리(*Opsariichthys bidens*), 납자루(*Acheilognathus lanceolata*), 납지리(*Acheilognathus rhombeus*), 누치(*Hemibarbus labeo*), 대농갱이(*Leiocassis ussuriensis*), 돌고기(*Pungtungia herzi*), 들마자(*Microphysogobio yaluensis*), 동사리(*Odontob*

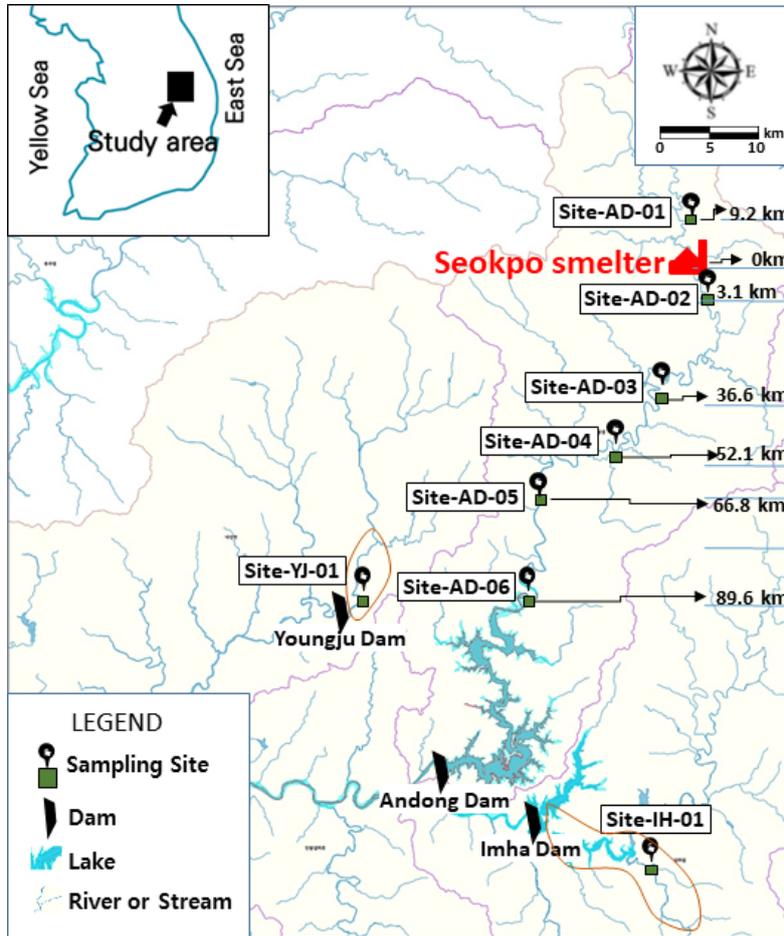


Fig. 1. Sampling site in Andong, Imha and Youngju dam basin area.

Table 1. Fishing gathering tools in sampling site

Basin	Sampling site	Fishing Tools
Andong dam basin	Site-AD-01	fishnet, fish trap
	Site-AD-02	fishnet, fish trap
	Site-AD-03	fishnet, fish trap
	Site-AD-04	fishnet, fish trap, cast net
	Site-AD-05	fishnet, fish trap, long line hook, cast net
	Site-AD-06	fishnet
Imha dam basin	Site-IH-01	fishnet, skimming nets, fish trap
Youngju dam basin	Site-YJ-01	fishnet, fish trap, cast net, skimming nets

**Table 2.** Species and specimens of fish analyzed by part of muscle from Andong, Imha and Youngju dam (33 fish species 355 specimens)

Scientific name	Andong dam basin						Imha dam basin	Youngju dam basin	Total	
	Site-AD-01	Site-AD-02	Site-AD-03	Site-AD-04	Site-AD-05	Site-AD-06	Site-IH-01	Site-YJ-01		
<i>Z. temmincki</i>	10	5	5	5	7				32	
<i>E. erythropterus</i>							6	3	4	13
<i>C. hankugensis</i>			1							1
<i>C. herzi</i>	2	3	5	5	7		3			25
<i>O. bidens</i>					1		2	4		7
<i>A. lanceolata</i>							2			2
<i>A. rhombeus</i>							2			2
<i>H. labeo</i>					4	1	2			7
<i>L. ussuriensis</i>			3	3	5					11
<i>P. herzi</i>	10	4	5	5	10		4	1		39
<i>M. yaluensis</i>			3	3						6
<i>O. platycephala</i>			2	2	4					8
<i>P. fulvidraco</i>								2		2
<i>C. cuvieri</i>						5				5
<i>S. asotus</i>	2	3		2						7
<i>P. esocinus</i>		2	4	5	5		2	4		22
<i>S. microdorsalis</i>	4	1		2						7
<i>M. salmoides</i>						4	3	3		10
<i>R. oxycephalus</i>		5								5
<i>C. auratus</i>			3	3		4	4	4		18
<i>L. macrochirus</i>						3				3
<i>K. rotundicaudata</i>	1									1
<i>N. multifasciata</i>							1			1
<i>C. splendidus</i>	6	3								9
<i>S. scherzeri</i>							2			2
<i>C. carpio</i>						3				3
<i>L. mediadiposalis</i>	10	5	1	5						21
<i>H. longirostris</i>		3	3	3	1			6		16
<i>S. chankaensis tsuchigae</i>			2	3	8		2			15
<i>S. variegatus wakiyae</i>							1			1
<i>H. eigenmanni</i>					1	6	5			12
<i>A. koreensis</i>							2			2
<i>Z. platypus</i>		5	2	5	8		10	10		40
Total	45	39	39	51	61	32	50	38		355

*utis platycephala*), 동자개(*Pseudobagrus fulvidraco*), 떡붕어(*Carassius cuvieri*), 메기(*Silurus asotus*), 모래무지(*Pseudogobio esocinus*), 미유기(*Silurus microdorsalis*), 배스(*Micropterus salmoides*), 버들치(*Rhynchocypris oxycephalus*), 붕어(*Carassius auratus*). 블루길(*Lepomis macrochirus*), 세코미꾸리(*Koreocobitis rotundicaudata*), 수수미꾸리(*Niwaella multifasciata*), 쉬리(*Coreoleuciscus splendidus*), 쏘가리(*Siniperca scherzeri*), 잉어(*Cyprinus carpio*), 자가사리(*Liobagrus mediadiposalis*), 참마자(*Hemibarbus longirostris*), 참물개(*Squalidus chankaensis tsuchigae*), 참중고기(*Sarcocheilichthys variegatus wakiyae*), 치리(*Hemiculter eigenmanni*), 갈납자루(*Acheilognathus koreensis*), 피라미(*Zacco platypus*) 등 33개 어종 355개체이다(Table 2). 안동댐 유역은 Site-AD-01, 8개 어종 45개체, Site-AD-02, 11개 어종 39개체, Site-AD-03 13개 어종 39개체, Site-AD-04, 14개 어종 51개체, Site-AD-05, 12개 어종 61개체, Site-AD-06, 6어종 32개체이며, 총 26개 어종 267개체이다. 임하댐 유역은(Site-IH-01) 17개 어종 50개체, 영주댐 유역은(Site-YJ-01) 9개 어종 38개체이다.

### 3.2. 물고기 어종별 중금속 농도

안동댐, 임하댐, 영주댐 수계에서 채취한 어종은 총 33종이며, 어종별 평균 중금속 농도는 Table 3에 표시하였다. 물고기 전체 크롬의 농도는 평균 0.04 mg/kg, 최대 0.09 mg/kg으로 평균값보다 높은 어종은 꺾지, 납자루, 떡붕어, 자가사리, 참물개이며 자가사리가 가장 높았다. 평균값 보다 낮은 농도를 나타내는 어종은 대농갱이와 버들치이다. 망간은 평균 0.51 mg/kg, 최대 4.79 mg/kg, 최소 0.10 mg/kg으로 높은 값을 나타내는 어종은 돌고기, 돌마자, 모래무지, 갈납자루이며 최대값은 수수미꾸리이며, 최소값은 배스이다. 철은 최대 농도값 18.56 mg/kg, 최소값 0.90 mg/kg, 평균 3.44 mg/kg으로 높은 농도의 어종은 납자루, 떡붕어, 붕어, 쉬리, 잉어로 떡붕어가 최대 농도값이고 최저 농도는 블루길이다. 니켈은 최대값 0.09 mg/kg, 최소값은 검출한계 이하이며, 평균값은 0.01 mg/kg으로 대부분 검출한계 이하 혹은 아주 낮은 값이다. 그 중 높은 농도의 어종은 0.09 mg/kg의 갈납자루, 0.07 mg/kg의 떡붕어이다. 구리는 평균 0.31

mg/kg, 최대값 1.07 mg/kg, 최소값은 검출한계 이하이며, 높은 값을 나타내는 어종은 떡붕어, 붕어, 쉬리, 피라미이고 가장 높은 농도의 어종은 떡붕어이다. 낮은 농도를 나타내는 어종은 강준치, 기름종개, 꺾지, 동사리, 블루길로 가장 낮은 농도를 가진 어종은 블루길이다.

아연은 최대값 38.70 mg/kg, 최소값 6.81 mg/kg으로 평균값은 20.90 mg/kg이다. 30 mg/kg 이상을 나타내는 어종은 버들치, 세코미꾸리, 쉬리, 피라미이며 가장 높은 최대값은 세코미꾸리이고 10 mg/kg 이하의 농도를 나타내는 어종은 미유기, 배스, 블루길, 쏘가리 등이다. 비소는 최대값 0.72 mg/kg으로 떡붕어가 가장 높고, 최소값 0.01 mg/kg으로 동자개가 가장 낮다. 평균값은 0.13 mg/kg이며 이보다 높은 값을 나타내는 어종은 납자루, 돌마자, 동사리, 떡붕어, 피라미이다. 카드뮴은 평균 0.02 mg/kg이며 최대값 0.13 mg/kg으로 0.1 mg/kg을 초과한 어종은 버들치이다. 대부분의 어종은 검출한계 이하 혹은 아주 낮은 농도이며, 그 중 대농갱이, 떡붕어, 버들치, 붕어, 쉬리, 참마자가 높은 값을 나타내었다. 수은은 평균값 0.05 mg/kg, 최대값 0.22 mg/kg, 최소값은 검출한계 이하이며, 0.1 mg/kg을 초과하는 어종은 갈겨니, 강준치, 기름종개, 쏘리이고 이중 최대값 0.22 mg/kg은 갈겨니이다. 납은 평균값 0.08 mg/kg, 최대값은 0.26 mg/kg, 최소값은 0.01 mg/kg으로 높은 농도를 보이는 어종은 높은 순서별로 버들치, 납자루, 갈겨니, 붕어, 강준치, 기름종개이다. 가장 낮은 농도를 보이는 어종은 동자개이다.

크롬의 평균 농도는 0.04 mg/kg 이며 최대값은 참물개의 0.09 mg/kg이다. 망간의 평균 농도는 0.51 mg/kg 이며 1.0 mg/kg 이상인 어종은 돌마자, 새코미꾸리, 수수미꾸리 등이다. 철의 농도는 0.90-18.56 mg/kg 으로 5.0 mg/kg 이상의 농도를 나타내는 어종은 납자루, 떡붕어, 붕어, 쉬리, 잉어 등이며 떡붕어는 18.56 mg/kg으로 다른 어종에 비해 아주 높았다. 구리는 평균 1.07 mg/kg 이며 아연은 최소 20.90 mg/kg이고 최대 38.70 mg/kg으로 버들치, 새코미꾸리, 수수미꾸리, 쉬리, 피라미 등이 높은 값을 나타내었다. 비소는 떡붕어, 카드뮴은 버들치에서 높고 수은은 육식성인 갈겨니, 강준치, 쏘리에서 높은 농도값을 나타내었다. 33개 어종 중 떡붕어는 철, 구리, 비소, 갈겨니는 수은과 납, 버들치는 아연, 카드뮴, 납, 새코미꾸리와 수수미꾸리는 망간과 아연, 쉬리는

**Table 3.** Average value of heavy metals in the muscle part by fish species from Andong, Imha and Youngju dam basin (33 fish species 355 specimens)

Scientific name	Cr (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Number of samples
<i>Z. temmincki</i>	0.05	0.26	1.68	0.01	0.18	15.12	0.08	0.01	0.22	0.22	32
<i>E. erythropterus</i>	0.04	0.19	1.47	0.01	0.11	12.48	0.09	0.01	0.21	0.14	13
<i>C. hankugensis</i>	0.04	0.30	2.08	0.01	0.13	23.29	0.13	0.01	0.15	0.13	1
<i>C. herzi</i>	0.08	0.15	1.79	0.01	0.14	24.64	0.09	0.01	0.07	0.05	25
<i>O. bidens</i>	0.05	0.14	1.87	0.01	0.16	20.25	0.08	0.01	0.19	0.04	7
<i>A. lanceolata</i>	0.07	0.34	5.00	0.01	0.38	12.09	0.24	0.01	0.03	0.23	2
<i>A. rhombeus</i>	0.03	0.36	2.37	0.01	0.33	13.36	0.17	0.01	0.01	0.04	2
<i>H. labeo</i>	0.03	0.20	2.55	0.01	0.30	21.78	0.08	0.01	0.06	0.04	7
<i>L. ussuriensis</i>	0.02	0.17	2.41	0.01	0.27	12.33	0.16	0.03	0.01	0.04	11
<i>P. herzi</i>	0.03	0.79	2.63	0.02	0.34	27.55	0.09	0.02	0.03	0.05	39
<i>M. yaluensis</i>	0.03	1.13	2.22	0.02	0.36	24.30	0.36	0.02	0.01	0.03	6
<i>O. platycephala</i>	0.02	0.29	1.70	0.01	0.15	16.20	0.30	0.01	0.01	0.01	8
<i>P. fulvidraco</i>	0.03	0.14	3.95	0.01	0.22	13.16	0.01	0.01	0.03	0.01	2
<i>C. cuvieri</i>	0.07	0.38	18.56	0.07	1.07	26.62	0.72	0.05	0.02	0.06	5
<i>S. asotus</i>	0.03	0.18	3.12	0.01	0.37	22.80	0.11	0.01	0.01	0.02	7
<i>P. esocinus</i>	0.02	0.74	1.79	0.01	0.26	20.09	0.07	0.02	0.05	0.05	22
<i>S. microdorsalis</i>	0.05	0.18	2.35	0.02	0.31	9.04	0.15	0.02	0.02	0.05	7
<i>M. salmoides</i>	0.02	0.10	1.45	0.01	0.20	9.24	0.06	0.01	0.02	0.06	10
<i>R. oxycephalus</i>	0.01	0.34	3.06	0.01	0.28	36.50	0.08	0.13	0.01	0.26	5
<i>C. auratus</i>	0.04	0.34	6.45	0.01	0.49	18.37	0.13	0.04	0.01	0.18	18
<i>L. macrochirus</i>	0.03	0.14	0.90	0.01	0.01	6.81	0.06	0.01	0.01	0.04	3
<i>K. rotundicaudata</i>	0.02	1.49	4.50	0.01	0.48	38.70	0.07	0.01	0.01	0.17	1
<i>N. multifasciata</i>	0.01	4.79	2.26	0.01	0.31	29.01	0.07	0.01	0.01	0.04	1
<i>C. splendidus</i>	0.05	0.42	6.20	0.03	0.61	35.03	0.07	0.05	0.07	0.10	9
<i>S. scherzeri</i>	0.03	0.15	2.07	0.01	0.18	9.33	0.04	0.01	0.08	0.05	2
<i>C. carpio</i>	0.03	0.15	6.18	0.01	0.27	27.64	0.14	0.01	0.03	0.04	3
<i>L. mediadiposalis</i>	0.08	0.32	4.26	0.02	0.28	16.12	0.09	0.02	0.01	0.09	21
<i>H. longirostris</i>	0.04	0.30	3.20	0.01	0.30	27.19	0.04	0.03	0.01	0.03	16
<i>S. chankaensis tsuchigae</i>	0.09	0.32	2.50	0.01	0.33	20.27	0.05	0.01	0.02	0.05	15
<i>S. variegatus wakiyae</i>	0.03	0.58	3.09	0.01	0.53	23.21	0.04	0.01	0.01	0.07	1
<i>H. eigenmanni</i>	0.05	0.20	3.07	0.01	0.26	20.48	0.18	0.01	0.01	0.08	12
<i>A. koreensis</i>	0.04	0.78	2.16	0.09	0.28	21.81	0.10	0.01	0.01	0.02	2
<i>Z. platypus</i>	0.05	0.47	4.68	0.02	0.47	34.91	0.23	0.01	0.03	0.10	40
Avg.	0.04	0.51	3.44	0.01	0.31	20.90	0.13	0.02	0.04	0.08	
Max.	0.09	4.79	18.56	0.09	1.07	38.70	0.72	0.13	0.22	0.26	
Min.	0.01	0.10	0.90	0.01	0.01	6.81	0.01	0.01	0.01	0.01	
STD	0.02	0.83	3.07	0.02	0.19	8.40	0.13	0.03	0.06	0.07	

**Table 4.** Average value of heavy metals in the muscle part by basin of Andong, Imha and Youngju dam (33 fish species 355 specimens)

Basin	Cr (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Number of samples
Andong dam	0.05	0.40	3.76	0.02	0.35	24.35	0.15	0.02	0.04	0.09	267
Imha dam	0.04	0.36	2.89	0.01	0.30	19.67	0.13	0.01	0.11	0.06	50
Youngju dam	0.03	0.30	2.64	0.01	0.25	18.23	0.05	0.01	0.06	0.09	38

철과 아연의 농도가 다른 어종에 비해 높은 값을 나타내었다.

저서성 물고기는 대농갱이, 메기, 모래무지, 미유기, 새코미꾸리, 수수미꾸리, 자가사리 등이다. 이주 새코미꾸리는 망간 1.49 mg/kg, 아연 38.70 mg/kg이며, 수수미꾸리는 망간 4.79 mg/kg, 아연 29.01 mg/kg으로 전체 평균 망간 0.51 mg/kg 보다 최대 9.4배, 아연의 경우 평균 20.90 mg/kg보다 최대 1.9배 이상 높다. 망간과 아연의 농도가 전체 평균 농도보다 높은 값을 나타내었다. 그러나 그 외 저서성 어류의 중금속 농도는 인지할 정도의 차이를 나타내지는 않는다. 저서성 어류가 아니고 잉어과에 속하는 떡붕어, 붕어, 잉어에서 철의 농도가 특징적으로 높게 나타난다. 석포제련소(Site-Ad-02) 하류에서 채취한 버들치와 쉬리의 아연 농도는 각각 36.50, 35.03 mg/kg으로 평균값 20.90 mg/kg보다 높게 나타났다.

### 3.3. 유역별 물고기 중금속 농도

Table 4는 유역별 물고기의 중금속 평균 농도를 나타낸 것이다. 크롬은 안동댐 0.05 mg/kg, 임하댐 0.04 mg/kg, 영주댐 0.03 mg/kg으로 안동댐 유역이 약간 높은 값을 나타내었다. 안동호에 서식하는 붕어 체내 중금속 함량은 임하호 보다 높으며 특히 크롬, 구리, 카드뮴, 비소의 함량의 차이가 크다(Kim et al., 2010). 망간은 크롬보다 전체적으로 농도가 높으며 안동댐이 0.40 mg/kg으로 임하댐과 영주댐의 각각 0.36, 0.30 mg/kg 보다 약간 높았다. 철은 안동댐이 3.76 mg/kg으로 임하댐, 영주댐보다 약 1.0 mg/kg 정도 높은 값을 나타내었다. 니켈은 세 유역 모두 0.02 mg/kg 이하로 아주 낮고, 구리는 안동댐 유역이 영주댐 유역 0.25 mg/kg 보다 0.1 mg/kg 높았다. 아연은 안동댐 유역 24.35 mg/kg으로 임하댐 및 영주댐 유역의 19.67과 18.23 mg/kg에 비해 아주 높았다.

비소는 안동댐 0.15 mg/kg과 임하댐 0.13 mg/kg에 비해 영주댐 유역이 0.05 mg/kg으로 아주 낮은 값을 나타내었다. 카드뮴은 안동댐 유역이 0.02 mg/kg으로 검출되지 않은 임하댐과 영주댐에 비해 상당히 높은 값을 나타내었다. 수은은 임하댐 유역이 0.11 mg/kg으로 안동댐 0.04 mg/kg과 영주댐 0.06 mg/kg에 비해 현저하게 높은 값을 나타내었다. 안동호 상류 수계에서 채집된 초식성 어류의 수은 농도는 전국 4대강 유역의 담수어류 평균 농도와 낮거나 유사한 수준인 반면에, 안동호 내에서 주로 채집된 꼬리, 배스 등의 포식성 어종의 수은 농도는 국내 평균 농도에 비해 높게 나타났다(Byeon et al., 2010). 납은 세 유역 모두 0.1 mg/kg이하로 낮지만 임하댐 보다 안동댐과 영주댐 유역이 약간 높은 경향을 나타내었다. 안동호에 서식하는 누치가 임하호에 서식하는 누치보다 중금속 함량이 높았으며, 이는 안동호의 수질과 저지에서 중금속 함량이 높은 것으로 보아 수환경의 수질과 저지에 포함된 유기물을 어류가 먹이로 섭취함으로써 어류에서도 높은 함량을 보인 것으로 생각된다(Shin et al., 2010b).

유역별 중금속 농도는 안동댐 유역이 납이 영주댐 유역과 유사한 것을 제외하면 중금속 10개 항목 중 크롬, 망간, 철, 니켈, 구리, 아연, 비소, 카드뮴 등 8개 항목이 임하댐과 영주댐 유역보다 높았다(Fig. 2). 안동댐의 경우 상류에 다수의 폐광산으로 부터 오염 물질이 유입되어 하상퇴적물 속에 포함된 오염된 유기물을 어류가 먹이로 섭취함으로써 중금속 함량에 영향을 미친 것으로 판단하고 있다(Kim et al., 2009). 또한, 시료채취 위치에 따른 중금속 농도를 보면 제련소 하부에서 채취한 시료(Site-Ad-02)에서 농도가 급격하게 증가하는 경향을 나타내기 때문에 제련소의 영향도 큰 것으로 판단된다. 임하댐 유역에서 채취한 물고기의 체내 수은 농도는

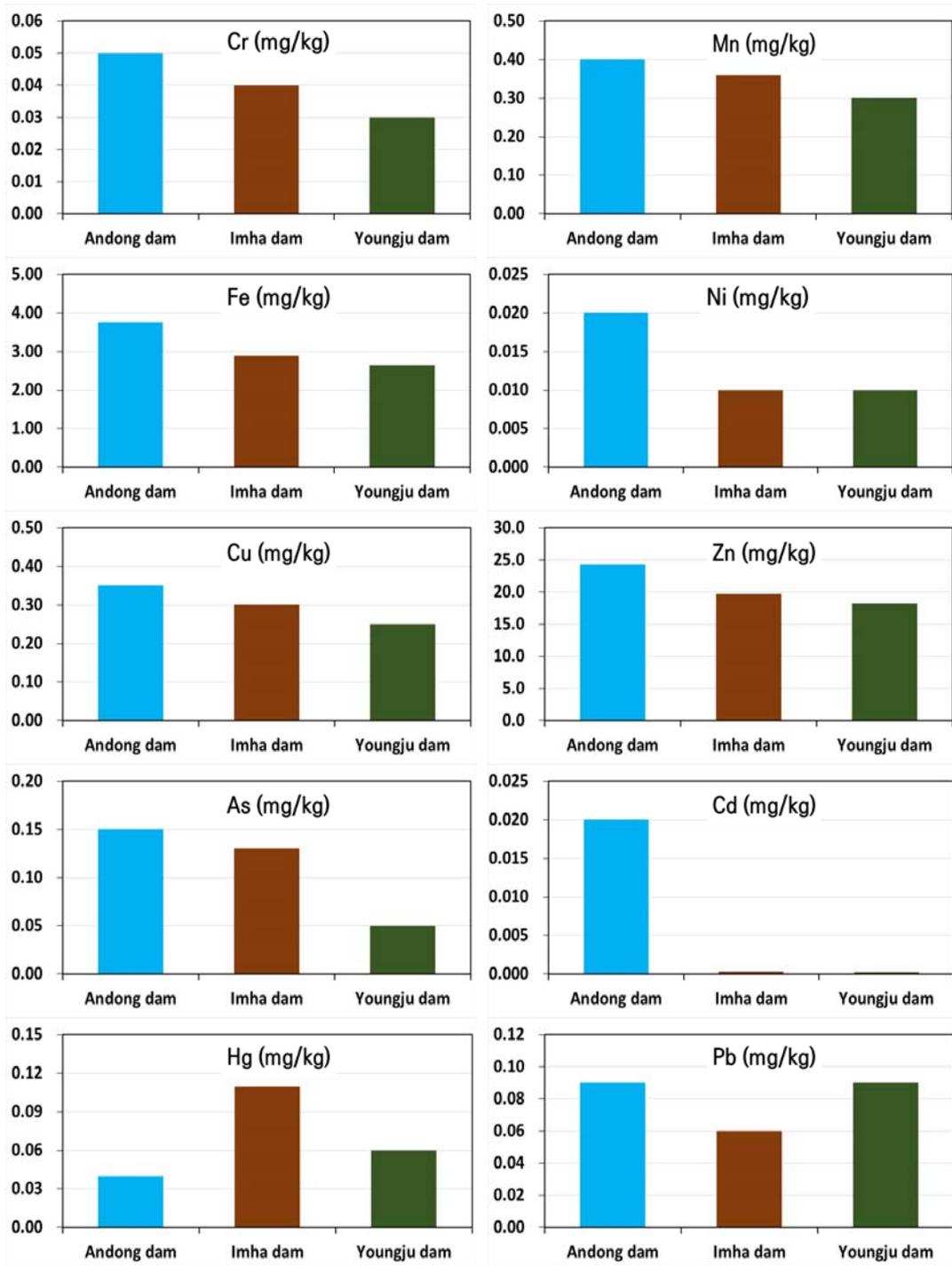


Fig. 2. Average value of heavy metals in the muscle part by basin of Andong, Imha and Youngju dam.

**Table 5.** Average value of heavy metals in the muscle part by sampling site and number of Andong, Imha and Youngju dam basin

Site No.	Cr (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Number of samples
Site-AD-01	0.04	0.39	3.45	0.02	0.35	20.11	0.10	0.01	0.04	0.09	45
Site-AD-02	0.06	0.47	3.78	0.02	0.38	34.86	0.10	0.06	0.04	0.15	39
Site-AD-03	0.03	0.43	2.49	0.01	0.27	22.41	0.16	0.03	0.04	0.09	39
Site-AD-04	0.06	0.54	2.72	0.02	0.26	20.26	0.13	0.03	0.05	0.08	51
Site-AD-05	0.06	0.37	2.87	0.01	0.31	24.10	0.15	0.01	0.04	0.07	61
Site-AD-06	0.03	0.21	5.83	0.02	0.37	18.47	0.21	0.01	0.04	0.09	32
Site-IH-01	0.04	0.36	2.89	0.01	0.30	19.67	0.13	0.01	0.11	0.06	50
Site-YJ-01	0.03	0.30	2.64	0.01	0.25	18.23	0.05	0.01	0.06	0.09	38

다른 유역에서 보다 높게 나타났다. 그러나 현재까지 연구에서는 임하댐 상류에 수은을 배출 오염원이 존재하지 않기 때문에 물고기 체내 수은의 기원에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

### 3.4. 안동댐 유역 거리별 물고기 중금속 농도

안동댐 상류에는 제련소와 다수의 폐광산이 분포하고 있어 이 유역에 서식하는 어류의 체내에는 다른 유역보다 중금속이 축적될 가능성이 높았다. Table 5는 안동댐 유역 거리에 따른 지점별 물고기의 체내 중금속 함량을 나타낸 것이다. 석포 제련소를 기준으로 Site-AD-01은 상류지역으로 제련소의 영향을 전혀 받지 않았으며, Site-AD-02는 제련소 하류 3.1 km 지점으로 제련소의 영향을 많이 받았을 가능성이 높은 지역이다. 중금속 항목별로 보면 크롬은 Site-AD-02 지점이 0.15 mg/kg으로 가장 높고 그 외는 0.08-0.09로 비슷한 값을 나타내었다. 망간은 0.21-0.54 mg/kg 범위이며 Site-AD-04지점이 가장 높고 06지점이 가장 낮다. 철은 가장 하류인 Site-AD-06지점이 5.83 mg/kg으로 가장 높으며, 니켈은 0.02 mg/kg 이하로 아주 낮은 값을 나타내었다. 구리는 0.26-0.38 mg/kg 범위로 Site-AD-02지점이 가장 높으며, 아연도 구리와 마찬가지로 02지점이 다른 지점에 비해 상당히 높은 값을 나타낸다. 철과 비소는 하류로 내려가면서 약간씩 높아지는 경향을 보이며 하류인 Site-AD-06지점이 가장 높았다. 카드뮴은 구리와 아연과 유사하게 Site-AD-02지점에서 가장 높으며, 수은은

0.04-0.06 mg/kg으로 대체로 낮다. 납은 구리, 아연, 카드뮴과 유사하게 Site-AD-02지점이 다른 지점에 비해 높은 값을 나타내었다.

석포제련소의 영향을 직접적으로 받은 것으로 추정되는 Site-AD-02지점에서 급격히 증가하는 중금속 항목은 크롬, 아연, 카드뮴, 납으로 이러한 중금속은 제련소의 영향일 가능성이 매우 높다(Fig. 3).

### 3.5. 수질 특성

Fig. 4와 Table 6는 물고기 채취 지점의 수질 시료의 현장 측정 및 중금속 분석 결과이다. 수질 시료에 대한 현장 측정 항목인 pH는 Site-AD-02 (8.90), Site-AD-03 (9.08)에서 아주 높으며, 전기전도도는 안동댐 유역 최상류인 Site-AD-01지점이 가장 높은 321  $\mu$ S/cm이다. 크롬은 안동댐 유역의 Site-AD-01에서 0.41  $\mu$ g/L로 가장 높으며, 망간이 Site-AD-01 3.18  $\mu$ g/L, 영주댐 유역의 Site-YJ-01 3.45  $\mu$ g/L로 가장 높았다. 철은 안동댐 유역의 AD-03, 04, 06과 임하댐 유역 IH-01지점이 10  $\mu$ g/L 이상이다. 니켈은 대체로 안동댐 유역이 높고 구리는 세 유역이 비슷한 값을 나타내었다. 아연은 안동댐 유역이 영주댐과 임하댐 유역보다 높으며 특히 제련소 하부인 AD-02지점이 높은 값을 나타내었다. 비소는 안동댐 유역의 최상류인 AD-01지점을 제외하고 임하댐과 영주댐 유역보다 높았다. 카드뮴과 수은은 안동댐 유역의 02와 03지점에서 높고 납은 안동댐 유역의 최상류인 AD-01 지점을 제외하고 대체로 높은 경향이 있었다.

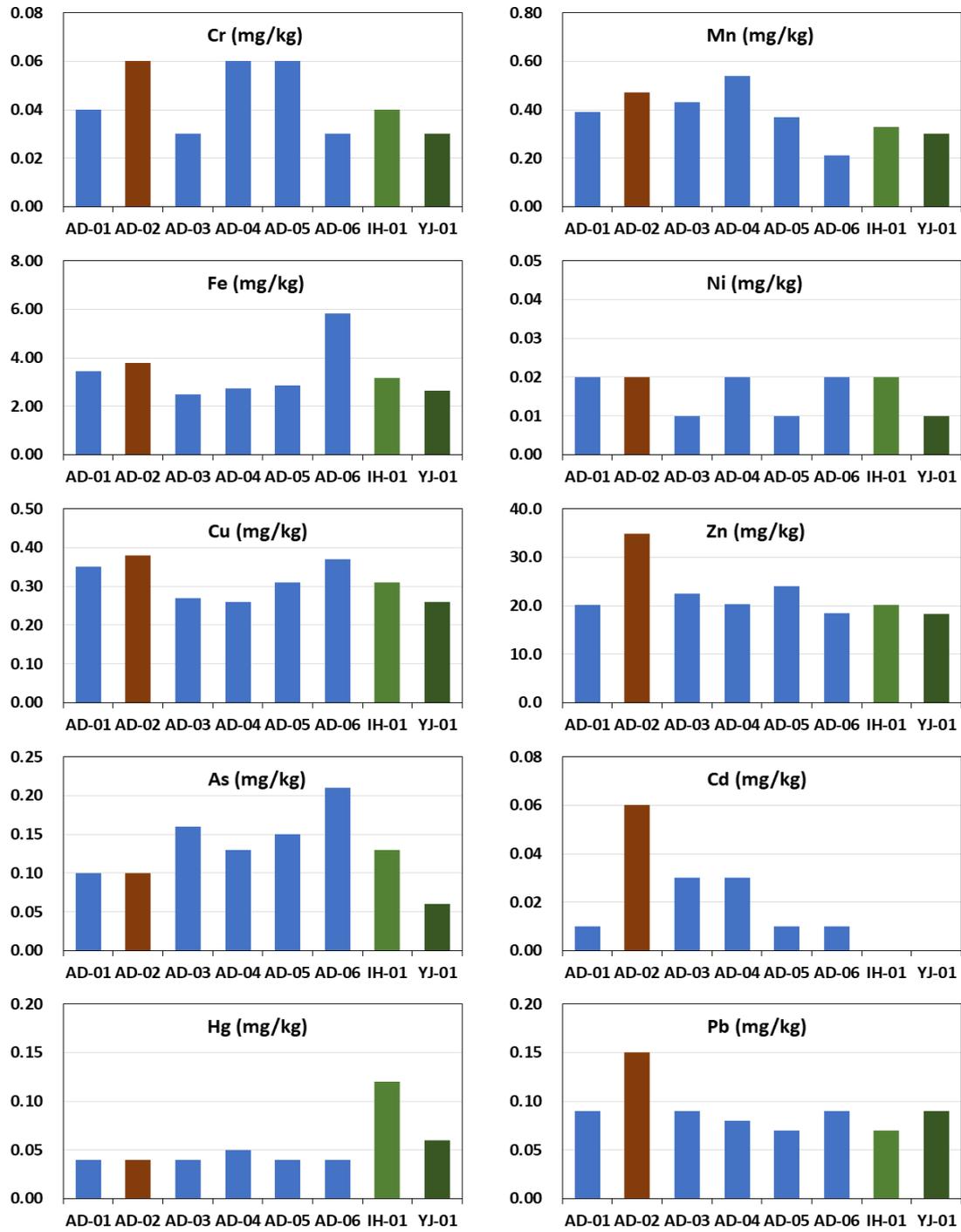


Fig. 3. Average value of heavy metals in the muscle part by sampling site of Andong, Imha and Youngju dam basin.

**Table 6.** Heavy metal concentration of water in fish sampling site of Andong, Imha and Youngju dam basin

Site No.	pH	EC ( $\mu$ S/cm)	Cr ( $\mu$ g/L)	Mn ( $\mu$ g/L)	Fe ( $\mu$ g/L)	Ni ( $\mu$ g/L)	Cu ( $\mu$ g/L)	Zn ( $\mu$ g/L)	As ( $\mu$ g/L)	Cd ( $\mu$ g/L)	Hg ( $\mu$ g/L)	Pb ( $\mu$ g/L)
Site-AD-01	7.63	321	0.41	3.18	3.91	1.98	3.58	2.50	0.64	0.56	0.41	0.12
Site-AD-02	8.90	241	0.39	2.03	6.95	1.24	3.79	6.79	3.06	0.78	0.54	0.72
Site-AD-03	9.08	194	0.30	1.06	13.08	1.43	3.81	3.38	6.37	1.37	0.60	0.79
Site-AD-04	7.90	216	0.21	1.04	13.27	1.01	3.77	3.30	8.50	0.52	0.44	0.63
Site-AD-05	7.39	152	0.11	2.82	7.62	1.23	3.69	4.43	6.13	0.48	0.42	0.71
Site-AD-06	7.69	182	0.11	2.50	10.95	0.85	3.54	2.70	6.65	0.40	0.40	0.89
Site-IH-01	8.03	172	0.28	2.80	15.12	0.78	3.50	0.77	1.19	0.46	0.41	0.20
Site-YJ-01	8.05	159	0.08	3.45	5.73	0.63	3.50	0.75	0.75	0.44	0.41	0.11

제련소의 영향을 받지 않는 Site-AD-01에서 높은 값을 나타내거나 유사한 값을 나타내는 항목은 기본적으로 제련소의 영향이 아닌 것으로 판단할 수 있다. 수질 특성은 주로 주변의 지질과 상당히 관련이 있기 때문에 폐광산이 다수 분포하는 안동댐 상류의 수질이 영주댐이나 임하댐 유역보다 농도가 높을 가능성은 충분하다. 그러나 여기에 대한 증거를 제시하기 위해서는 주변의 지질, 광산, 광화대에 대한 연구 및 이들로부터 수질로의 이동 경로에 대한 연구 결과가 있어야 될 것으로 판단된다. 본 연구에서는 안동댐, 영주댐, 임하댐 유역 서식 물고기의 중금속 분포 현상에 대해 환경적 측면에서의 접근하였다. 따라서 제련소와 같은 뚜렷한 오염원이 존재하여 그 오염원에 의해 수질이나 물고기에 영향을 미쳤다고 판단되는 경우에만 확정적으로 서술하였다.

기존의 수질분석에 의하면 안동댐 유역은 크롬, 카드뮴, 비소의 농도가 임하댐 유역보다 높으며, 아연과 납은 낮은 함량을 나타냈다(Kim et al., 2009). 본 연구에서 수질의 중금속 농도는 안동댐 유역이 아연, 비소, 카드뮴, 수은, 납이 임하댐과 영주댐 유역보다 현저하게 높았다. 제련소를 기준으로 급격하게 증가하는 항목은 아연, 비소, 카드뮴, 납으로 이들 중금속은 제련소의 영향으로 추정할 수 있다.

**3.6. 수질-물고기 상관관계**

물고기 채취 지점과 동일한 곳에서 채취한 수질 시료와 물고기 시료의 중금속 농도와 상관관계는 물에서 물고기로 중금속의 이동 가능성을 제시해준다. Fig. 5는 물

고기 채취 지점의 수질과 물고기 근육부 시료의 중금속 농도와의 상관관계이다. 낮은 상관관계( $R^2 < 0.10$ )를 나타내는 중금속은 크롬, 철, 니켈, 구리, 수은, 납 등으로 수질의 중금속 농도에 크게 영향을 받지 않는다. 중간 정도의 상관관계를 보이는 항목은 망간( $R^2 = 0.4382$ )과 비소( $R^2 = 0.4767$ ), 카드뮴( $R^2 = 0.2748$ )이다. 가장 높은 상관관계를 나타내는 금속은 아연( $R^2 = 0.7792$ )으로, 아연은 하천수에서 농도가 높으면 그곳에 서식하는 물고기 체내 아연의 농도가 높을 가능성이 크다.

**4. 결론**

어류의 근육부에 농집되는 중금속의 종류는 어종에 따라 다르다. 꺾지, 납자루, 떡붕어, 자가사리, 참몰개는 크롬의 농도가 높고, 망간은 돌고기, 돌마자, 모래무지, 수수미꾸리, 칼납자루 등에서 높았다. 철과 구리는의 농도는 떡붕어가 아주 높으며, 니켈은 떡붕어와 칼납자루가 높았다. 아연은 버들치, 새코미꾸리, 쉬리, 피라미, 비소 떡붕어, 카드뮴 버들치 등이 높았다. 수은은 갈겨니, 강준치, 꼬리, 납은 갈겨니, 납자루, 버들치, 붕어 등이 높은 값을 나타내었다. 저서성 어류의 경우 세코미꾸리와 수수미꾸리에서 망간과 아연의 농도가 높지만 그 외 대농갱이, 메기, 모래무지, 미유기, 자가사리 등에서는 높은 농도를 나타내지 않기 때문에 저서성 생물이라도 어종에 따라 중금속 특성은 다르다고 볼 수 있다.

수질의 중금속 농도는 안동댐 유역이 아연, 비소, 카드뮴, 수은, 납이 임하댐과 영주댐 유역보다 현저하게 높았다.

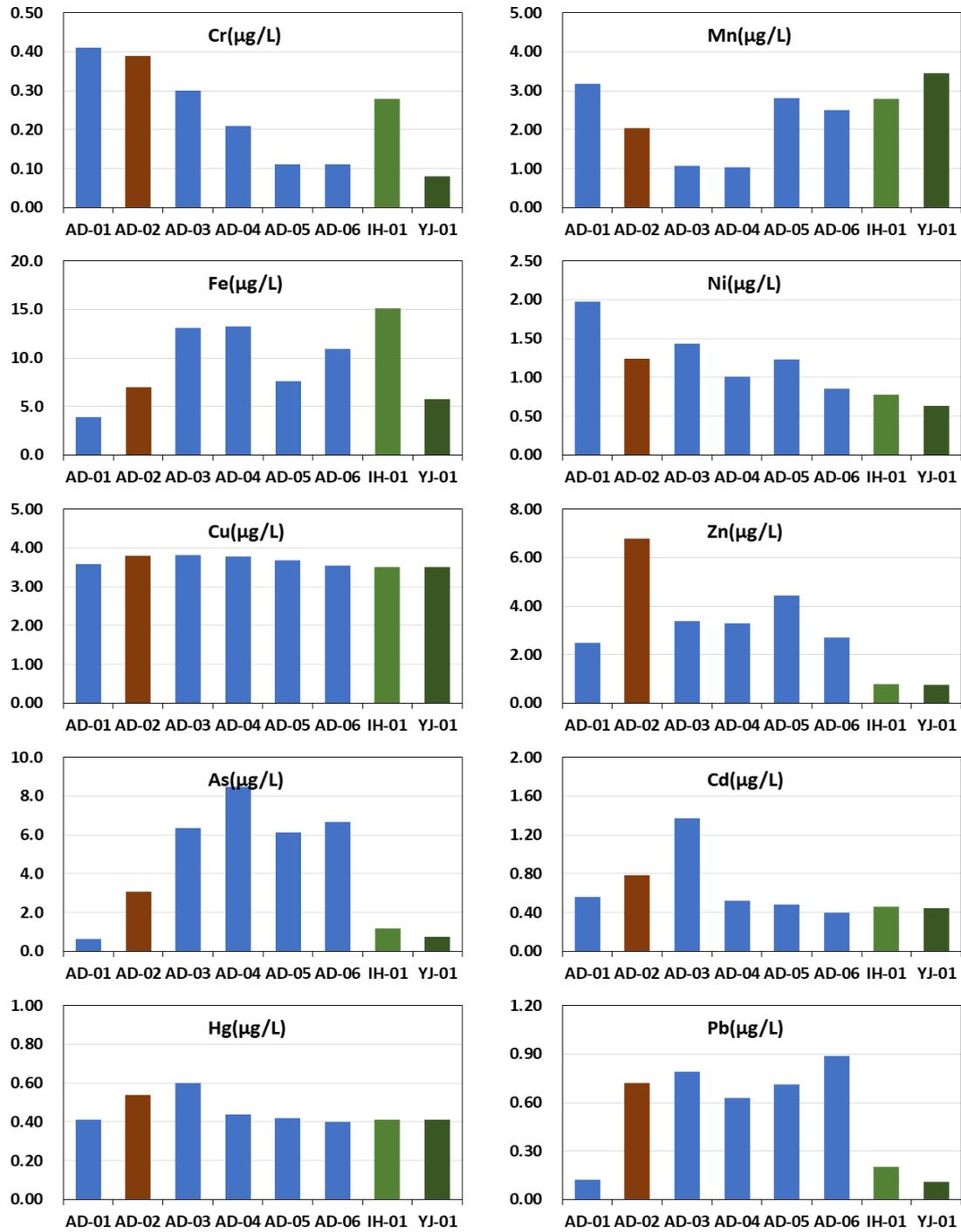


Fig. 4. Heavy metal concentration of water in fish sampling site of Andong, Imha and Youngju dam basin.

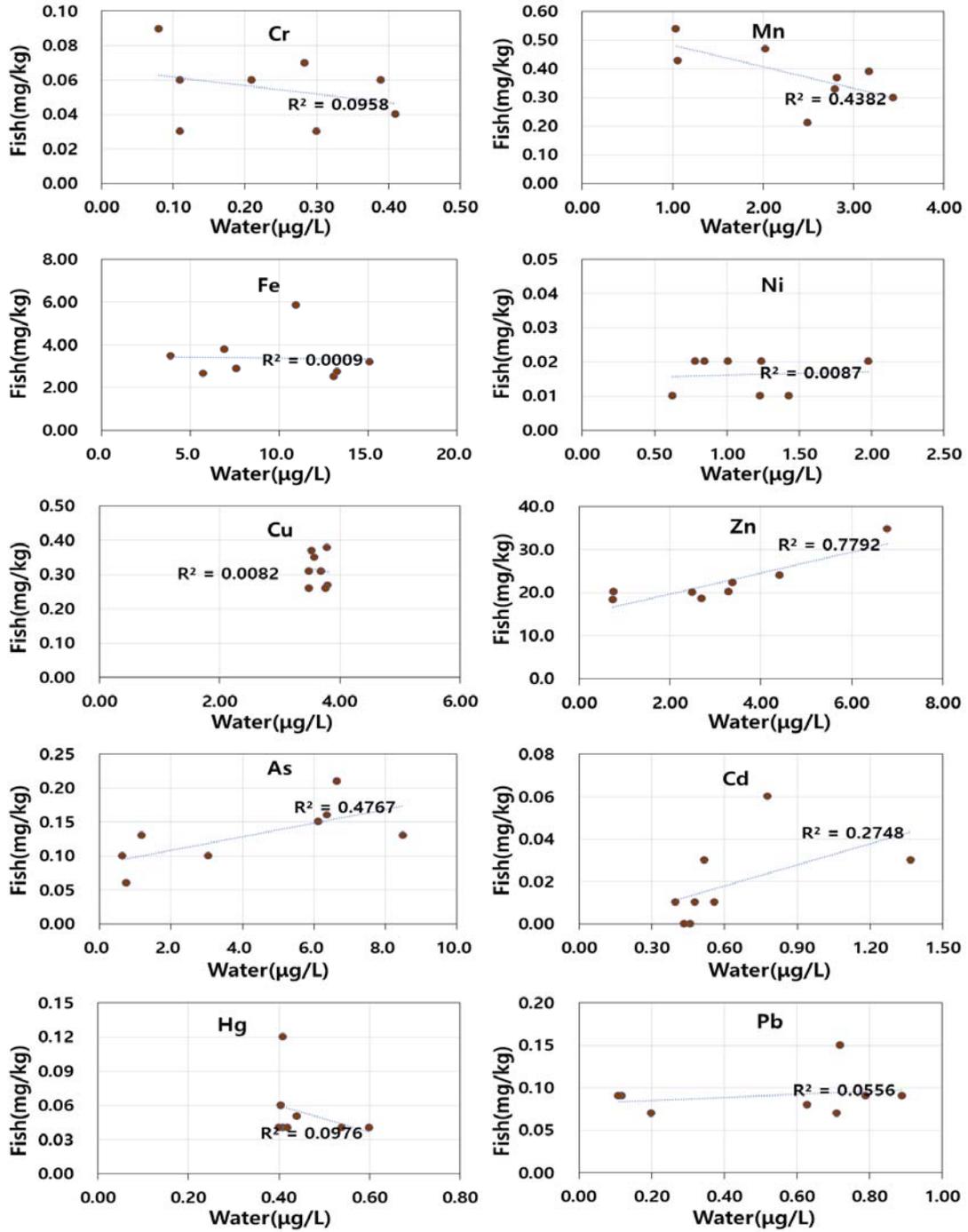


Fig. 5. Correlation of heavy metal concentration of water and fish muscle in the same sampling point.

제련소를 기준으로 급격하게 증가하는 항목은 아연, 비소, 카드뮴, 납으로 이들 중금속은 제련소의 영향으로 추정할 수 있다. 수질과 물고기의 중금속 농도 상관관계에서 가장 높은 상관성을 나타내는 금속은 아연으로 수질에서 농도가 높은 경우 그곳에 서식하는 물고기의 아연 농도가 높을 가능성이 크다.

중금속 10개 항목 중 수은과 납을 제외한 8개 항목이 안동댐 유역이 임하댐과 영주댐 유역보다 높으며 특히 아연과 비소, 카드뮴이 현저하게 높은 값을 나타내었다. 임하댐 유역은 수은이 안동댐이나 영주댐보다 아주 높은 값을 나타내었다. 향후 오염원이 거의 없는 임하댐 유역에 서식하는 물고기의 수은 농도가 높기 때문에 이에 대한 원인 규명 및 오염 경로 추적 연구가 필요하다.

안동댐 유역에서 타 유역보다 물고기 근육부의 중금속 농도가 높은 것은 상류의 오염원인 제련소와 폐금속 광산과 밀접한 관련성이 있는 것으로 판단된다. 특히 석포제련소를 기준으로 물고기 근육부의 중금속이 급격하게 증가하는 항목은 크롬, 아연, 카드뮴, 납으로 이러한 중금속은 제련소의 영향일 가능성이 매우 높았다.

### 감사의 글

이 논문은 환경부 대구지방환경청의 낙동강수계 환경기초조사사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다. 또한 본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업(2016R1D1A3B01013509)의 재원을 지원받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### REFERENCES

- Byeon, M. S., Lee, J. Y., Park, J. J., Shin, S. K., Han, J. S., Kim, Y. H., 2010, Study on mercury concentrations of freshwater fish from Lake An-dong and its upper stream, *Analytical Sci. & Technol.*, 23, 492 - 497.
- Chae, B. S., 2016, Present status and problems of freshwater fishes in the Nakdong River System, Korea, In: Abstracts of 2016 spring meeting of the Ichthyological Society of Korea, Nakdonggang National Institute of Biological Resources, Sangju, May 12~13 2016, 25-27.
- Chae, B. S., Kim, S. K., Kang, Y. H., Heo, N. S., Park, J. M., Ha, H. U., Hwang, U. W., 2015, Ichthyofauna and fish community structure in upper reach of the Nakdong River, Korea, *Korean J. Ichthyol.*, 27, 116-132.
- Han, K. N., 2016, Survey report of fishes resources in the Imha Reservoir, K-water, Andong, 280.
- Jang, M. H., Cho, G. I., Joo, G. J., 2001, Fish fauna of the main channel in the Nakdong River, *Korean J. Ichthyol.*, 34, 223-238.
- Jeong, C. H., Kim, B. G., Han, K. N., 2016, Review on fish fauna of the Imha-Dam Reservoir in the Nakdong River System, Korea, In: Abstracts of 2016 spring meeting of the Ichthyological Society of Korea, Nakdonggang National Institute of Biological Resources, Sangju, 88.
- Ju, I. Y., Jeon, S. R., 1977, Studies on the fish fauna from the Nakdong River, The areas of Sangju and Andong, *Korean J. Limnol.*, 10, 19-28.
- Kang, Y. H., 2011, Fish fauna and structural change of the fish community in the Nakdong River, Doctoral Dissertation of Kyungpook National University, Daegu, Korea.
- Kim, J. S., Shin, M. J., Lee, J. E., Seo, E. W., 2009, Heavy metal contents in tissues of *Carassius auratus* in Andong and Imha Reservoir, *J. Life Sci.*, 19, 1562-1567.
- Shin, M. J., Park, M. Y., Lee, J. E., Seo, E. W., 2010a, Heavy Metal Contents in Tissues of Fishes in Andong and Imha Reservoirs, *J. Life Sci.*, 20, 1378-1384.
- Shin, M. J., Park, M. Y., Lee, J. E., Seo, E. W., 2010b Heavy Metal Contents of *Hemibarbus labeo* in Andong and Imha Reservoirs, *Korean J. Limnol.*, 43, 377-384.
- Yang, H. J., 1973, Studies on the fish from the Nakdong River, The list of fishes and their distribution, *Korean J. Limnol.*, 6, 19-36.

- 
- Researcher. Hee-Won Kwon  
Department of Environmental Engineering, Andong National University  
heewon0424@gmail.com
  - Professor. Young-Hun Kim  
Department of Environmental Engineering, Andong National University  
youngkim@andong.ac.kr
  - Professor. Jeong-Jin Kim  
Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University  
jjkim@andong.ac.kr