

안동호 및 상류수계 내 어류 중 수은 농도 특성연구

변명섭 · 이재윤 · 박진주¹ · 신선경¹ · 한진석¹ · 김영희¹ ★

국립환경과학원 유역생태연구팀, ¹화학물질연구과
(2010. 7. 26. 접수, 2010. 10. 18. 승인)

Study on mercury concentrations of freshwater fish from Lake An-dong and its upper stream

**Myeong-Seop Byeon, Jae-Yoon Lee, Jin-Joo Park¹, Sun-Kyoung Shin¹,
Jin-Seok Han¹ and Young-Hee Kim¹**

National Institute of Environmental Research, Incheon 404-170, Korea

(Received July 26, 2010; Accepted October 18, 2010)

요 약: 본 연구에서는 안동호 유역의 수은오염 특성을 살펴보기 위하여 안동호 및 상류 수계 내 담수 어류 중 수은 농도를 조사하고, 국내 연구결과와 비교하였다. 안동호 내에서 채집된 어류는 잡식성 및 포식성 어종으로 수은 농도는 37~611 ng/g이었으며, 대표적인 포식성 어종인 끄리에서 198±97 ng/g으로 가장 높게 나타났다. 안동호 상류수계인 낙동강 본류 구간에서 채집된 어종은 대부분 초식성 및 잡식성 어종으로 모래무지, 피라미 등에서 21±16 ng/g 및 33±24 ng/g으로 낮게 나타났다. 특히 안동호 내 참마자 및 배스 등의 수은농도가 동일 어종의 국내 담수어류 평균에 비해 높게 조사되었다.

Abstract: In this study, mercury concentrations in freshwater fish from Lake An-dong basin were investigated and were compared with the results of the national freshwater fish monitoring survey. The mercury concentrations of fish from Lake An-dong were in the range of 37~611 ng/g and Korean piscivorous chub, the top predator showed the highest average mercury concentrations, 198±97 ng/g. Most of fish caught from upstream of Lake An-dong were herbivorous and omnivorous, and goby minnow and pale chub showed relatively lower mercury concentrations of 21±16 ng/g and 33±24 ng/g, respectively. Especially, mercury concentrations of long nosed barbel and largemouth bass caught from Lake An-dong were found to be higher than those of the average of the national survey monitoring data.

Key words: Mercury, freshwater fish, Lake An-dong, bioaccumulation

1. 서 론

수은의 배출량은 인간의 산업 활동 이후, 급속히

증가되어 전 지구적으로 연간 6600톤의 수은이 대기
기로 배출되며, 이 중 33~36%가 직접적인 인위적
배출에 기인한 것이고, 나머지 배출량은 화산활동,

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)32-560-7196 Fax : +82-(0)32-568-2039

E-mail : heek89@korea.kr

토양 및 해수 중의 수은 방출에 의한 것으로 추정된다.¹ 수은은 호흡, 소화기관, 피부의 3가지 경로를 통해 인체에 축적되고 90% 이상이 어패류의 섭취로부터 축적되는 것으로 알려져 있다.² 미국의 경우, 배출원에서의 수은 배출기준 관리와 함께 어패류 섭취 권고기준을 설정하여 수은의 인체노출 저감을 위한 위해성 관리를 실시하고 있다. 2004년을 기준으로, 설정된 어패류 섭취 권고기준의 76%가 수은 오염에 기인한 것으로, 44개 주 및 1개 준주(territory)가 수은오염에 의한 어패류 섭취권고기준을 가지고 있다. 캐나다는 1997년 어패류 섭취권고기준의 97%가 수은오염에 기인한 것으로 조사된 바 있다.³

어류 중의 수은농도는 수질오염의 좋은 지표로 사용된다. 이는 수은의 위해성이 어류 섭취에 기인하는 바가 매우 크며, 어류의 경우 수은의 체내배출 반감기가 평균 100~200일 정도로 느리게 배출이 이루어지므로 환경변화 또는 계절적 변화에 따른 농도변화의 영향이 크지 않기 때문이다.³ 일반적으로 어류 중 수은 농도는 먹이단계가 높은 포식성 어종일수록, 동일 어종인 경우, 개체 크기에 비례하여 증가하며, 연령이 높아 수은이 축적되는 기간이 길수록 또한 증가한다. 또한 이와 함께 어류 중 수은 농도는 물, 퇴적물 중의 수은 농도, pH, 황화물 농도, 수온 등 서식환경에 따라 영향을 받으므로 유역의 특성에 따라 비슷한 지리적 위치의 호소라도 어류 중의 수은 농도는 크게 다를 수 있다. 물, 퇴적물 중의 수은 농도는 유역으로의 수은 유입량으로부터 결정되며, 주로 대기 침적(deposition), 유거수(run-off) 및 토양 침식(erosion) 등이 주요 유입원이다. 특히 유역의 크기가 큰 경우, 토양으로부터의 수은 유입이 증가하며, 또한 농경지역 및 산림지역 보다는 메틸수은의 생성이 증대되는 습지 등의 유역 환경이 있는 호소에서의 어류 중 수은 농도가 높은 것으로 알려져 있다.⁴

본 연구의 조사지점인 안동호 유역은 태백시, 안동시, 봉화군, 영양군 및 울진군에 걸쳐 있으며, 유역면적은 1,584 km²로 낙동강 전체 유역면적의 6.7%를 차지하고 있다. 또한 유역 내에는 200 여개 이상의 폐광이 위치하고 있으며, 평균 경사도는 40.5%로 협곡이 많고 경사가 급해, 집중강우 시 광미 유실에 의한 중금속 오염 개연성이 있는 지역이다.⁵ 본 연구에서는 안동호 및 상류 수계의 어류 중의 수은농도 및 특성을 조사하고, 어종별 수은 농도를 기존의 국내 조사 결과와 비교하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료채취

안동호 및 그 상류 수계의 어류 중 수은 농도를 조사하기 위하여 9개 지점에서 어류 시료를 채취하였다. 채취지점은 Fig. 1에서와 같이 수질측정망 황지1 지점부터 안동호 유입지점인 도산지점 내의 8개 지점 (St.1~St.8), 안동호 유입지점 중 태곡교(St.10) 및 안동호 지점(St.9)으로 5월과 8월에 각각 시료를 채집하였다. 하천 조사지점의 수심은 30~100 cm 수준이었으며, 일부 구간에서는 하중도 형태로 하상이 노출되기도 하였다. 종 분류는 채집 현장에서 1차 동정하였으며, 채집된 시료는 드라이아이스가 들어있는 아이스박스에 넣어 냉동시켜 실험실로 운반하고, 분석 시까지 냉동보관 하였다.

2.2. 총수은 분석방법

총수은 분석은 EPA method 7473의 아말감 가열기



Fig. 1. Map of Lake An-dong basin and sampling sites for freshwater fish

화 방식의 수은자동분석기(DMA-80, Milestone Srl, Italy)를 이용하여 분석하였다.⁶ 어류시료 무게를 정확히 잰 후 분석용기에 담아 분해로(Decomposition furnace)에 넣고 시료 중의 수분을 제거하기 위해 200 °C에서 1분간 가열, 산소와 함께 650 °C에서 3 분간 가열하여 시료를 분해하였다. 촉매환원로(Catalytic furnace)에서 정량에 방해가 될 수 있는 시료 중의 할로젠 화합물, 질산화물 및 황산화물들이 제거되고, 아말감 생성기(Amalgamator)에 선택적으로 결합된 Hg(0) 형태의 수은을 750 °C에서 12 초간 가열하여 탈착시킨 후 253.7 nm 파장에서 원자흡광도값을 측정하여 수은의 농도를 구하였다.

검정곡선은 인증표준물질 MESS-3 (NRC, Ottawa, Canada)의 인증값으로부터 수은의 농도가 2, 5, 10, 20 ng이 되도록 인증표준물질을 0.025, 0.054, 0.105, 0.207 g 취한 후, 이에 대한 원자흡광도값을 구하여 작성하였다. 방법검출한계를 구하기 위하여 Ottawa sand를 시료와 동일한 방법으로 7 회 측정하였다. 방법검출한계는 측정값의 표준편차에 student's t 값($n=7$, $t=3.14$)을 곱한 결과, 0.19 ng/g 이었다.

정도관리를 위하여 MESS-3를 시료와 동일한 과정으로 분석하고, 인증값과 비교하여 검증한 결과, 평균값이 93.8 ± 1.7 ng/g ($n=26$)로서 인증값의 확장불확도

범위(91.0 ± 9.0 ng/g) 내에서 잘 일치하였으며, 평균회수율 103% 및 상대표준오차 1.84%로서 분석절차에 이상이 없음을 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

안동호 및 상류수계에서 채집한 피라미, 버들개, 참마자, 치리 등 담수어류 18종 511개체에 대한 수은 농도를 Table 1에 제시하였다. 채집된 어류 중 수은 농도는 먹이단계가 높은 육식성 어종인 끄리에서 198 ± 97 ng/g으로 가장 높게 나타났으며, 모래무지, 피라미 등 초식성 또는 잡식성 어종에서는 21 ± 16 ng/g 및 33 ± 24 ng/g으로 낮게 나타났다. 이는 수은의 생물축적성 (bioaccumulation)에 기인한 것으로 어패류 중의 수은 농도는 먹이단계에 따라 증가하며, 수은의 생물농축계수는 $10^4 \sim 10^6$ 으로 알려져 있다. 이와 함께, 일반적으로 같은 어종 중의 수은 농도는 어류의 크기, 즉 길이 또는 무게에 비례하여 증가하며, 수은이 축적되는 기간이 길수록 또한 증가한다.^{2,7} 특히 가장 수은 농도가 높게 나타난 끄리는 대부분 피라미, 참붕어 등을 먹이로 섭취하여, 어류의 크기에 비해 수은의 체내 축적(body burden) 정도가 큰 어종으로 알려져 있다.

어류 크기에 대한 수은 농도변화의 영향을 알아보

Table 1. Total mercury concentrations of freshwater fish from Lake An-dong basin

Species	No.	Length \pm SD (cm)	T-Hg \pm SD (ng/g, wet wt.)	Ranges (ng/g, wet wt.)
Dark chub	8	9.8 \pm 2.5	31 \pm 19	18~77
Korean aucha perch	7	9.1 \pm 2.7	39 \pm 28	12~92
Stripped shiner	6	6.9 \pm 1.3	28 \pm 13	11~43
Goby minnow	6	10.0 \pm 2.8	21 \pm 16	10~52
Amur minnow	158	7.0 \pm 1.0	46 \pm 21	17~147
Eastern spine loach	17	9.9 \pm 1.3	28 \pm 11	15~53
Korean shinner	11	9.3 \pm 1.2	61 \pm 37	16~161
Siberian stone loach	15	9.7 \pm 1.7	38 \pm 16	19~66
Korean chub	39	7.4 \pm 1.8	38 \pm 26	17~153
Korean torrent catfish	11	9.1 \pm 1.8	48 \pm 41	21~165
Pale chub	55	6.5 \pm 1.8	33 \pm 24	12~116
Long-nosed barbel	45	9.3 \pm 2.9	121 \pm 39	12~207
Korean bleak	12	8.2 \pm 1.2	115 \pm 93	28~393
Culter brevicauda	21	18 \pm 2.0	123 \pm 44	74~282
Korean piscivorous chub	25	18.7 \pm 3.9	198 \pm 97	125~611
Largemouth bass	5	10.9 \pm 3.1	100 \pm 39	37~135
Blue gill	11	9.9 \pm 1.3	101 \pm 48	47~174
Sharpbelly	41	13.7 \pm 3.1	156 \pm 46	63~268
Total	511	9.4 \pm 4.2	72.8 \pm 62.9	11~611

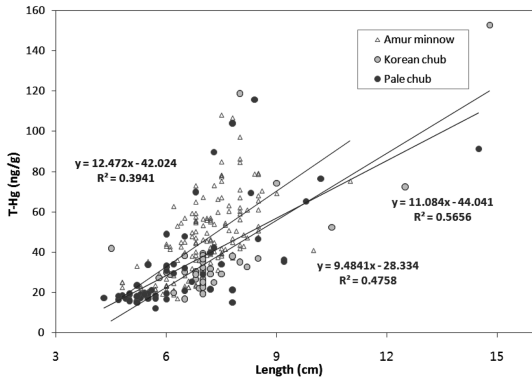


Fig. 2. Correlations between mercury concentrations and fish length of specific species(1).

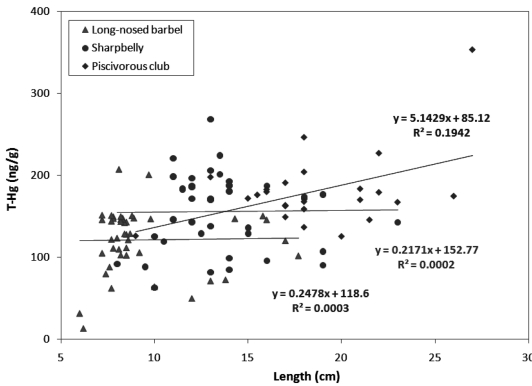


Fig. 3. Correlations between mercury concentrations and fish length of specific species(2).

기 위하여, 본 연구에서 20개 이상의 개체가 채집된 버들개, 참갈겨니, 참마자, 치리, 피라미, 꼬리 등의 6개 어종에 대해 무계별 수은의 함량을 살펴보았다. Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이, 버들개, 참갈겨니, 피라미 등의 경우에는 어류의 체장이 증가할수록 수은의 농도가 증가하며 이에 대한 상관관계수(correlation coefficient) r 값은 0.63~0.75 ($p < 0.05$)으로 어류의 크기와 수은 농도 사이에 통계적으로 유의한 상관관계가 있음이 나타났다. 그러나 Fig. 3에 제시된 바와 같이, 참마자, 치리, 꼬리의 경우, 일반적인 경향과는 달리 어류의 체장과 수은 농도와의 상관성이 나타나지 않았다. 육식성 어종인 꼬리는 안동호 내에서 채집되었으며, 잡식성 어종인 치리는 안동호 유입지점인 도산지점과 안동호 내에서, 참마자는 도산지점에서만 채집되어, 채집지점에 따른 영향이 아닌 것으로 판단된다. 특히 참마자의 경우, 2006~2008년 환경부의 ‘어패류 등 생체내 수은축적조사’ 결과에서 어류의 체장과 수은농

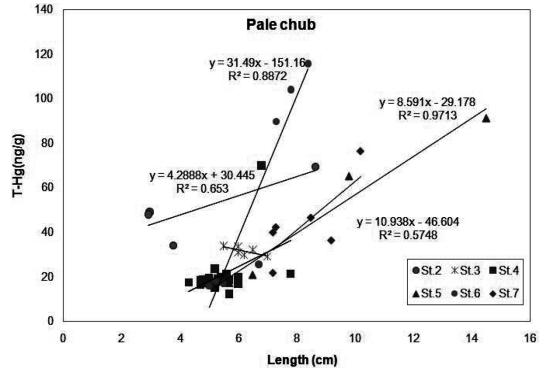


Fig. 4. Comparison of mercury concentration of Pale chubs between different sampling sites

도간의 상관성이 높게 나타난 바 있다($r^2=0.78$, $p < 0.05$).⁸ 따라서 이에 대한 원인과약을 위해서는 안동호 유역에서의 식·동물성 플랑크톤 등의 먹이시슬별 수은농도 조사가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

안동호 상류 수계의 서식환경을 비교하기 위하여, 채집지점별 어류 중 수은농도를 비교해보았다. 일반적으로 어류 중의 수은농도를 조사하기 또는 채집지점별로 비교하기 위해서는 채집된 어종에 대한 길이 보정이 선행되어야 한다.⁷ 본 연구에서는 공분산분석(ANCOVA)을 통해 채집된 어종별 평균체장을 도출하고 채집지점별 농도를 비교하였다. 채집된 어종별 평균 수은농도는 지점별로 큰 차이를 보이지 않았으며, 수심이 깊어지는 하류로 갈수록 어류의 체장이 길어지고 수은농도가 증가하는 경향을 보였다. 여러 지점에서 충분한 개체가 채집된 피라미의 수은농도와 체장간의 상관관계를 Fig. 4에 제시하였다. St.7에서 채집된 피라미의 체장과 수은농도간의 기울기가 다른 지점에 비해 크게 나타났으나, 통계적으로 유의미한 차이를 확인하지 못하였다. 또한 평균 체장의 피라미에 대한 채집지점별 수은 농도를 비교한 결과, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 채집지점별 거리가 10 km 이내로서 비교적 가까워 어류의 경우, 서식환경의 차이를 나타내지 않은 것으로 추정된다.

안동호 유역의 수은오염도 평가를 위하여 본 연구에서 조사된 안동호 유역의 어류 중 수은 농도를 환경부의 어패류 등 생체내 수은 축적조사의 국내 담수 어류 조사결과와 비교하였다. 어패류 등 생체내 수은 축적조사사업에서는 2006년부터 2008년까지 3년간 전국 4대강 유역의 총 57 중권역 92개 지점에서 담수 어류를 채집하고, 수은 농도를 조사하였다.⁸ Fig. 5에

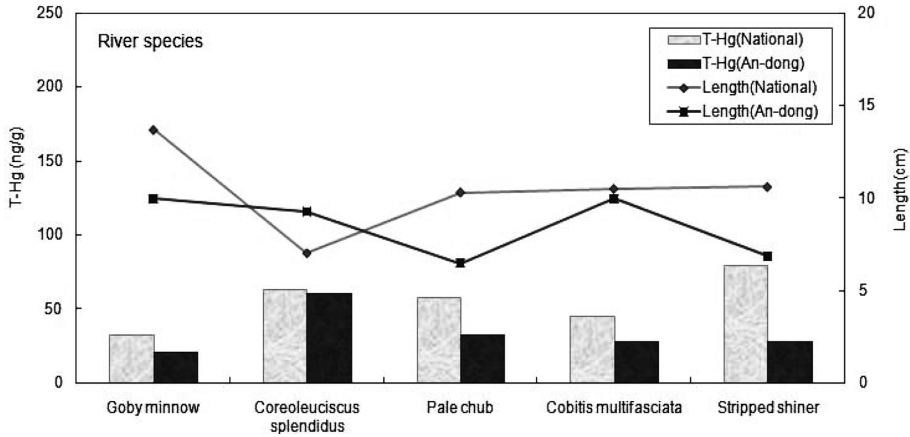


Fig. 5. Comparison of mercury contents in freshwater fish from upstream of Lake An-dong with national average.

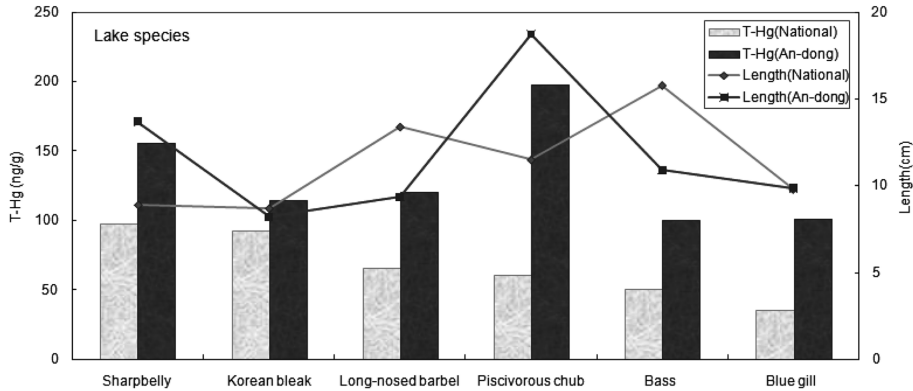


Fig. 6. Comparison of mercury contents in freshwater fish from Lake An-dong with national average.

서 보여지는 바와 같이 안동호 상류 수계에서 채집된 먹이단계가 낮은 피라미, 모래무지, 수수미꾸리, 쉬리, 돌고기의 경우, 평균 체장이 작은 안동호 상류 수계 어류의 수은농도가 환경부의 조사결과에 비해 모두 낮게 나타났다. 그러나 Fig. 6에서와 같이 안동호 내에서 주로 채집된 먹이단계가 높은 썩리, 치리, 참마자, 배스, 블루길, 참물개의 경우, 모든 어종의 수은농도가 환경부 조사결과에 비해 높게 나타났으며, 참마자, 배스의 경우는 평균체장이 작음에도 불구하고 높은 수은 농도를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 안동호 상류 수계 및 안동호 내의 어류 중 수은 농도를 조사하고, 기존의 국내 연구결과와 어종별 수은 농도를 비교하였다. 일반적인 경향과

같이, 높은 먹이단계에 있는 포식성 어종인 썩리, 블루길 등의 수은 농도가 높았으며, 초식성 또는 잡식성 어종인 모래무지, 피라미 등에서 낮게 나타났다. 참마자, 치리, 썩리의 경우, 어류의 체장과 수은 농도와의 상관성이 나타나지 않아 이에 대한 원인 조사가 필요한 것으로 판단된다. 안동호 상류 수계에서 채집된 어종별 평균 수은농도는 지점별로 큰 차이를 보이지 않았으며, 수심이 깊어지는 하류로 갈수록 어류의 체장이 길어지고 수은농도가 증가하는 경향을 보였다. 또한 안동호 상류 수계에서 채집된 초식성 어류의 수은농도는 전국 4대강 유역의 담수어류 평균 농도와 낮거나 유사한 수준인 반면에, 안동호 내에서 주로 채집된 썩리, 배스 등의 포식성 어종의 수은 농도는 국내 평균 농도에 비해 높게 나타났다. 이러한 결과는 환경부의 조사결과와 유사한 결과로서, 안동호 유역의 수은 오염특성을 정확히 파악하기 위해서는 물, 퇴적물

중의 메틸수은 농도 조사 및 메틸수은의 생성인자들에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. R. P. Mason and G-R. Sheu, Role of the ocean in the global mercury cycle, *Global Biogeochemical Cycles* **16**, 1093(2002).
2. USEPA, Health effects of mercury and mercury compounds, Mercury study report to Congress. Vol. V, December, 1997.
3. USEPA, Draft Guidance for Implementing the January 2001 Methylmercury Water Quality Criterion, Appendix E., EPA-823-B-04-001, 2006.
4. R. Harris, D. P. Krabbenhoft, R. Mason, M. W. Murray, R. Reash and T. Saltman, Ecosystem responses to mercury contamination, SETAC, CRC Press, NY, U.S.A., 2006.
5. 경북환경기술센터, “낙동강유역 상류지역 휴·폐공산의 하류환경영향조사 및 적정관리방안- 낙동강 상류지역 하상의 광미혼합퇴적물 환경영향조사”, 2005.
6. USEPA, SW-846 Method 7473: “Mercury in Solids and Solutions by Thermal Decomposition Amalgamation and Atomic Absorption Spectrophotometry”, 2005.
7. USUG, A static model and national data set for partitioning fish-tissue mercury concentration variation between spatiotemporal and sample characteristic effects., *Scientific investigation report*, 2004-5199(2004).
8. 환경부, “어패류 등 생체 내 수은축적 조사”(3차년도), 2008.