

## 소양호 다중매체 내 수은오염실태 조사

### Study on Mercury Contamination in Multimedia Environment in Lake So-Yang

박상영 · 유 성 · 신형철 · 김성락 · 김평래 · 안명찬<sup>†</sup> · 한영지<sup>‡</sup>  
Sang-Young Park · Seong Yoo · Hyung-Cheol Shin · Seong-Rak Kim  
Pyung-Rae Kim · Myung-Chan Ahn<sup>‡</sup> · Young-Ji Han<sup>†</sup>

강원대학교 환경과학과  
Department of Environment Science, Kangwon National University

(2010년 5월 25일 접수, 2011년 3월 30일 채택)

**Abstract :** In this study the seasonal and spatial pattern of mercury (Hg) concentrations in multimedia environments were investigated in Lake So-Yang. Total mercury (TM) in water column greatly enhanced as turbidity and particulate organic carbon (POC) increased due to the severe runoff, suggesting that most of Hg existed as particulate Hg in Lake Soyang. We also collected 22 species of fish in Lake Soyang and Han River, and the average total mercury in fish was 0.073 ppm, lower than both Korean (0.5 ppm) and EPA criteria (0.3 ppm). However when considering the amount of fish intake for Korean the Hg criterion in fish must be more stringent than current value, and the advisory for fish consumption should be made. Hg in fish considerably varied with sampling sites, having the highest in the upper region (Yang-gu) and the lowest in downstream (Han River). This spatial variation was possibly derived by “bloom dilution” associated with high phosphorus loading or elevated DOC concentrations, or both. Total mercury in sediment varied from 69.9 to 98.3 µg/kg, which was relatively lower than those measured in Voyageurs National Park in Minnesota in USA (102~364 µg/kg).

**Key Words :** Mercury, Multi-media, Turbidity, Sediment, Fish, Lake

**요약 :** 본 연구는 소양호를 대상으로 장기간 동안 다매체 내 수은 농도 분포를 조사하였으며 소양호 총수은(TM; total mercury) 농도는 1.17 ± 1.09 ng/L 나타났다. 표층수 총 수은 농도를 보면 시간적 및 공간적 변이에 대한 통계적 유의성을 찾아 볼 수 없었으나, 탁도 및 입자성 유기탄소(particulate organic carbon; POC)의 농도와 뚜렷한 양의 상관성(P-value<0.01)이 있는 것으로 관측되었다. 또한 소양호의 경우 수은 유입원이 선행연구에서 언급된 대기 침적보다는 장마철 runoff로 인한 유입이 더 중요하다는 것을 나타낸다. 어류 내 수은은 한강과 소양호에서 총 22종의 어류를 채취하였으며, 어류 내 평균 총수은 농도는 0.073 ppm(습중량)으로 나타나, 우리나라의 기준치(0.5 ppm) 및 미국 EPA의 기준치(0.3 ppm)에 비해 낮은 농도를 보였다. 그러나 미국 EPA의 RfD(reference dose)를 바탕으로 본 연구에서 계산된 적정 기준치인 0.07 ppm을 상회하는 어류가 전체의 42%를 차지해 우리나라만의 어류섭취 관리대책이 필요하다. 어류를 채취한 세 지점, 한강, 신이리, 양구는 동일한 종에서 뚜렷하게 다른 농도 분포를 보였는데, 상류일수록 더 높은 농도를 나타냈다. 이는 호수의 부영양화 차이로 인한 지점별 어류 성장 속도의 차이가 원인인 것으로 생각된다. 소양호 저서퇴적물의 수은 농도 분포는 69.9~98.3 µg/kg으로 나타나 미국 미네소타 주의 Voyageurs National Park에서의 연구 결과(102~364 µg/kg)보다 약간 낮게 나타났다.

**주제어 :** 수은, 다매체, 탁도, 저서퇴적물, 어류, 호수

## 1. 서론

수은은 높은 독성을 나타내는 오염물질로서 다양한 화학종으로 구성되며 환경 내 매체 사이를 거동한다.<sup>1)</sup> 수은은 오염원(source)에서 배출된 후 계속해서 침적(deposition)과 재배출(re-emission)을 한다는 점에서 여타의 다른 중금속들과 차이가 있다. 수은에 대한 높은 관심은 유기 수은인 메틸수은이 높은 독성 및 생물 축적력을 지니기 때문에 촉발되었다. 자연계에서 수은은 0, +1, +2의 산화상태로 존재하나, 이 중 +1가는 불안정해서 환경 중에 거의 존재하지 않는다. 수은은 대부분 무기수은의 형태로 오염원에서 대기로 배출되고, 이 중 Hg<sup>0</sup>는 침적속도 및 용해도가 낮아 장거리 이동이 가능한 물질이나 가스상 Hg<sup>2+</sup>나 입자성 수은은 침적속도가 상당히 커서 다량이 배출원 주위의 호수나

지표면에 침적된다.<sup>2)</sup> 대기 중 Hg<sup>2+</sup>가 수생태계내로 유입되면 3가지 과정으로 이동 및 변형된다. 첫째, 무생물 및 생물적 화학반응에 의해 Hg<sup>0</sup>로 환원된 후 대기로 재배출되거나, 둘째, 수생태계 내에 존재하는 입자에 부착되어 퇴적되거나, 셋째 황 환원 박테리아에 의해 메틸수은(CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>)으로 변환될 수 있다.<sup>3)</sup> 메틸수은은 생물 농축되는 물질로써, 수중에 낮은 농도로 존재한다고 할지라도 먹이연쇄의 상위 단계(예: 육식성 어류 또는 사람) 개체 내에서 종종 높은 농도로 관측된다.<sup>4,5)</sup>

대기 중 무기수은은 현재 우리나라의 농도 수준인 1~5 ng/m<sup>3</sup> 하에서는 직접적인 건강 위해를 미친다고 하기 어렵다.<sup>6)</sup> 그러나 무기수은이 수생태계로 유입되어 메틸수은으로 변환되면 독성과 생물농축성이 크게 높아지며 특히 먹이연쇄의 상위 영양단계(예: 육식성 어류)에 축적되는 수은

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: youngji@kangwon.ac.kr Tel: 033-250-8579 Fax: 033-251-3991

<sup>‡</sup> 현재소속 : 원주 지방환경청 측정분석과

은 대부분이 메틸수은으로 알려져 있다.<sup>7)</sup> 따라서 대기 중 무기수은이 수생태계로 유입되는 과정, 무기수은의 수생태계 내 거동 양상, 그리고 메틸화에 대한 이해는 통합적 수은 연구에 필수적이다. 수생태계 내의 수은 중은 용존 가스상 수은(DGM: dissolved gaseous mercury), 이온상태인 무기  $Hg^{2+}$ , 입자성 수은, 그리고 메틸수은을 포함하여 크게 4 가지로 나누어진다. 이 중 용존 가스상 수은은 거의 모두가  $Hg^0$ 로 구성되어 있으며 생성되는 즉시 높은 증기압으로 인하여 대기로 휘발된다. 따라서 수생태계에 주로 존재하는 수은의 형태는 무기 및 유기  $Hg^{2+}$ 라고 할 수 있다. 이러한 수은은 수중, 퇴적물, 플랑크톤, 어류 등 다매체 사이를 거동하며 존재한다.

선행연구에 따르면 먹이사슬을 통해 축적된 어류 내 수은 농도는 일반적으로 어류의 나이(age)가 높을수록, 길이가 길수록, 무게가 많이 나갈수록, 그리고 영양단계가 높을수록 높은 농도를 나타낸다.<sup>8,9)</sup> 또한 다른 선행연구에 부영양화가 진행된 호수의 경우 동일한 길이의 동일어종 내 수은 농도가 빈영양호의 어류 내 수은 농도에 비해 낮은 경향을 보였다.<sup>10)</sup> 이는 부영양호에서 일어나는 “희석 효과(bloom dilution)”에 의한 것으로 종종 논의된다.<sup>11,12)</sup>

2005년 환경부와 보건 복지부가 공동으로 수행한 국민 혈중 중금속농도 조사 결과, 수은의 혈중 평균 농도는 4.34 mg/L로 미국, 독일 등에 비해 5~8배 높았고, 독일 기준치인 15 mg/L을 초과한 사람이 1.8%나 되었으며, 미국 환경보호국 권고 기준인 5.8 mg/L를 초과한 가임기 여성이 약 27%를 차지한 것이 보고되었다. 이는 수은 노출의 주된 경로인 어류의 섭취량이 상대적으로 크기 때문이거나 또는 우리나라 어패류 내 수은 함량 자체가 높기 때문일 수 있다.<sup>13)</sup> 우리나라의 경우 식품위생법에서 어류의 총수은 잔류기준을 0.5 ppm으로 정하고 있으며, 참치 등 다량어류와 새치류, 상어 등 심해성 어류에 대한 메틸수은 함량 기준치를 1.0 ppm 이하로 정하였다. 생선류의 소비가 높은 나라로 널리 알려진 일본의 경우는 심해성 어류와 참치류를 제외한 생선의 수은 잔류허용기준을 0.4 ppm으로 정하고 있으며, 메틸수은 기준을 0.3 ppm을 재적용하고 있다. 미국 EPA는 어류 체내의 수은 잔류 기준치를 0.3 ppm으로 설정하였다.<sup>14)</sup>

본 연구는 우리나라 최대의 호수인 소양호를 대상으로 다중매체 내 수은의 오염 실태를 장기간에 걸쳐 조사하여, 수중, 저서 퇴적물, 어류 내 수은 농도와 기타 물리-화학적 요인들의 영향을 살펴보았다. 어류의 경우는 소양호뿐만 아니라 한강에서도 채취하여, 두 하천과 호수의 특성에 따른 어류 내 수은 농도를 비교해보았다. 이 연구 결과는 향후 소양호 내 다중 매체간 수은의 거동 양상과 메틸수은의 생성 및 소멸 기작과 이에 관련하는 물질 파악 등에 기초 자료로서 중요하게 이용될 수 있다고 판단된다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 수중 총수은

**Table 1.** Hydrological characteristics of the drainage basin of Lake Soyang<sup>42)</sup>

Maximum surface area (km <sup>2</sup> )	70
Average surface area (km <sup>2</sup> )	44.4
Maximum water capacity (m <sup>3</sup> )	29 × 109
Average water storage (m <sup>3</sup> )	20 × 109
Mean hydraulic residence time (yr)	0.75
Mean depth (m)	33.8
Maximum length (km)	57
Average surface water level (as elevation) (m)	176
Watershed area (km <sup>2</sup> )	2703
Urban area in drainage basin (km <sup>2</sup> )	1
Forest and mountain area (km <sup>2</sup> )	2524
Agricultural area (km <sup>2</sup> )	159

소양호는 한국의 최대 인공호수로서 평균 면적을 비롯한 수리학적 특징은 Table 1과 같다. 소양호는 과거 많은 어류 양식업이 이루어 졌으나 현재는 허가된 인근 주민들의 어업만이 소규모로 진행되고 있으며, 유역은 대부분이 삼림이고 중소도시들(춘천, 양구, 인제)이 인접해 있다. 본 연구는 2006년 5월부터 2007년 10월까지 소양호의 중-하류 세 지점에 대하여(site 1~site 3; Fig. 1) 매 계절마다 3일씩 용량 6.2 L Vandorn 채수기를 이용하여 총수은에 대해 동일 시료(duplicates) 2개씩을 채취하여 분석하였다. 총수은은 수십벌(1, 10, 50, 80 m)로 채수하여 Falcon 50 mL conical tube에 담은 후 Teflon 테잎으로 밀봉한 후 polyethylene zipper bag을 3중으로 사용하여 대기 수은의 유입을 차단하였다. 또한 시료 부피의 0.5%의 0.08 M HCl을 첨가하여 휘발을 제한하였으며, 그 후 BrCl을 첨가하여 병 표면으로의 Hg의 흡착을 제한하는 동시에 시료 내 모든 수은을  $Hg^{2+}$ 로 산화시켜 휘발을 차단하였다. 총수은의 분석 절차는 U.S EPA Method 1631E를 따랐으며<sup>15)</sup> 분석은 CVAFS (cold vapor atomic fluorescence spectrophotometry; Tekran 2600)를 이용하였다.

시료 채취 및 분석에 사용되는 모든 실험기구는 EPA 1631E을 이용하여 산세척 하였다. 산세척은 1) 4M HCl에서 65~75℃로 36시간 동안 중탕, 2) 1% HCl에 담가 60~70℃로 24시간 보관, 3) 0.4% HCl에 담가 무균대에서 24시간 보관하였다. 모든 과정을 마치면, 3차 증류수로 깨끗이 세척한 후 무균대에서 건조시키고, 그 후 3중의 지퍼 백에 넣어 사용 전까지 무균대에서 보관하였다. 각 산세척 단계 사이에는 3차 증류수를 이용하여 3차례 이상 충분히 세척하고 다음 단계를 진행하였다.<sup>15)</sup> 물 시료뿐만 아니라 아래의 저서 퇴적물 및 어류 시료 채취 및 분석에 필요한 모든 실험기구는 동일하게 산세척하여 배경농도를 최대한 낮추었다.

### 2.2. 저서퇴적물 내 총수은

저서퇴적물 내 수은 농도의 계절변화와 지점별 변이를 알아보기 위하여, 2006년 5월부터 2008년 7월까지 매 계절마



Fig. 1. Sampling sites in Lake Soyang.

다 소양호 분류에서 3개의 지점을 선택하여 채니기를 이용해 저서퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 저서퇴적물은 채니기 (Grab Sampler)로 채취한 즉시 폴리에틸렌 지퍼 백을 이용하여 3중으로 밀봉시켜 외부와의 Hg<sup>0</sup> 교환에 의한 오염요인을 차단하였다. 또한 저서퇴적물 내 Hg<sup>2+</sup>은 태양광에 의한 광분해 기작으로 인해 Hg<sup>0</sup>으로 환원될 수 있기 때문에 채니 후 아이스박스에 넣어 이동하였다. 이동 된 저서퇴적물 시료는 동결건조기를 이용하여 48시간 동안 동결건조한 후 분석 전까지 -30℃ 이하의 냉동실에 보관하였다. 동결 건조 시에는 전후의 무게를 기록하여 추후 농도보정에 이용하였다.

동결건조 후 냉동보관 된 시료는 가열기화금아말감법을 이용하여 MA-2 (Nippon Instruments Corporation, NIC)로 분석함으로써, 시료를 습식 분해하지 않고 Hg를 직접 정량화할 수 있어 습식분해를 통한 CVAFS를 이용하는 방법에 비해 신속하고 정확한 분석이 가능하다(U. S. EPA Method 7473). 시료를 고온(200℃ 이상)으로 가열 분해한 후 수은을 800℃ 이상에서 기화시켜 금을 코팅한 수은포집체에 포집, 농축(Hg-amalgam)시켰다. 이어서 포집체를 가열하여 유리된 수은증기가 흡수셀에 도달하면 파장 253.7 nm에서 원자흡광도를 측정하여 수은 농도를 정량하였다.

### 2.3. 어류 내 총수은

어류는 2006년 여름에 한강(N= 38)과 소양호에서 채집하였으며, 소양호에서는 신이리(소양호 하류, N=22) 및 양구(소양호 상류, N=7)에서 각각 채집하였다(Fig. 1). 총 22종의 어류가 채집되었으며 종류와 크기에 관계없이 다양하게 채집하였다. 채집된 어류는 각각의 무게와 길이를 기록하였다. 각각의 어류에서 껍질을 벗긴 시료(skin-off)와 껍질을 벗기지 않은 시료(skin-on)를 구분해서, 근육조직을 포함한 소량(약 10 g)을 biopsy하여 48시간 동안 동결건조한 후 분석 전까지 냉동 보관하였다. 동결 건조한 후 냉동 보관된 시료는 원자흡광분석용 표준용액을 사용하여 0.001% L-cysteine 용액으로 희석하여 사용하였으며, 원자흡광법을 이용한 수은직접분석기인 MA-2 (NIC)와 DMA-80 (Direct mercury analyzer, NIC)의 두 기기로 측정 분석 하였다(U. S. EPA Method 7473). 측정원리는 저서 퇴적물 시료의 방법과 동

일하다. 이때 시료 가열 분해시 생성되는 측정방해 가스를 증류수 또는 완충용액에 통과(scrubbing)시켜 탈수, 탈산, 탈알칼리, 탈유리증기(de-organic vapor) 등을 행하는 가스 세정(gas-washing/de-humidifying)을 거쳤다.

### 2.4. 기타물질 및 기상자료

탁도(turbidity)와 입자성 유기탄소(particulate organic carbon; POC)는 2006년 5월, 9월, 11월과 2007년 2월, 6월, 10월에 총수은과 함께 측정하였다. POC는 미리 450℃로 구운 Whatman GF/F 필터를 이용하여 용존 유기탄소(dissolved organic carbon; DOC)를 여과시킨 후, 필터를 50℃에서 1시간동안 건조시킨 후 Flash EA1112 (thurnerFisher)를 이용하여 분석하였다. 수온과 수중 pH는 각각 YSI model 44 temperature probe 및 AP62 (fisher Sci.)를 이용하여 측정하였다. 기온, 일사량, 강우량, 풍향, 풍속 등의 기상자료는 소양담 위에 설치한 기상탑(davis instrument)을 이용하여 5분 간격으로 자료를 저장하였다. 총질소와 총인, BOD (biochemical oxygen demand), 용존산소 등의 수질자료는 환경부 자동수질측정망을 이용하였다.

### 2.5. QA/QC(정도관리)

시료를 분석하기 전에는 항상 표준용액을 사용하여 5-point 검량선의 R<sup>2</sup>가 특정 수치 이상일 경우(물 시료의 경우 0.9995, 퇴적물 및 어류 시료의 경우 0.9990)에만 분석을 시작하였다. 2개씩 채취한 물 시료(duplicates)의 총 수은 농도의 채취 및 분석 정밀도(overall precision)는 8.46±2.61%(기하평균±기하 표준편차)로 나타났으며, 두 세트 사이에 통계적 차이는 존재하지 않았다(Wilcoxon rank sum test, p-value>0.1) (N=49). 블랭크는 시료 농도의 1% 미만이었다.

퇴적물 시료는 매 시료를 5회씩 동일하게 분석하여 평균값을 사용하였고(5회 반복 측정의 평균 RPD는 4.74%), 10개의 시료 분석마다 표준용액을 분석하여 회수율을 파악하여 상대표준편차(RPD: Relative Percentage Deviation)가 10% 이내일 경우에 분석을 지속하였다. 표준용액의 RPD가 10% 이상 차이가 날 경우에는 검량선을 다시 작성하여 분석을 진행하였다.

어류 시료 역시 균질화하기 어렵기 때문에 한 시료당 5회씩 반복 측정하여 그 평균값으로 농도를 구하였으며, 5회 반복 측정의 RPD는 평균 10.2%로 나타났다. 어류 시료 분석 시에도 one-point 표준용액은 10번 측정할 때마다 한 번씩 찍었으며(차이가 10% 이내일 경우에만 분석 지속), one-point 표준용액의 주입과 함께 측정에 오차가 생길 수 있는 기기내의 잔류 수은 제거(purge)도 함께 시행했다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 수체 내 총수은 분포

수체 내 총수은 농도는 2006년 5, 9, 11월, 2007년 2, 6, 10월에 각 3일 동안 하루 3회씩 수심별로 측정을 실시하였다. 전체 기간 동안의 표층수 시료에 대한 총수은은 평균 농도는  $1.17 \pm 1.09$  ng/L이었다. 표층수 총수은의 농도를 보면 시간적 및 공간적 변이에 대한 통계적 유의성을 찾아볼 수 없었으나, 탁도 및 입자상 유기탄소(particulate organic carbon; POC)와 뚜렷한 관련성(P-value<0.01)이 있는 것으로 관측되었다(Fig. 2). 2006년 11월과 2007년 2월은 표층의 탁도가 크게 증가한 시기로, 2006년 여름에 발생한 대규모 장마에 기인하였다. 집중적인 강우는 용해도가 높은 오염 물질을 습식침적(wet deposition) 과정에 의해 직접 호수로 유입시키거나, 유역에서부터 runoff 되어 호수로 유입시킨다.<sup>16)</sup> 기존의 연구에 의하면 집중 강우 기간 동안 소양호 유역의 토양 침식이 대규모로 발생하여 소양호 내 탁수 문제를 종종 야기하였다.<sup>17)</sup> 1996년부터 나타나기 시작한 소양호의 탁수 발생은 1999년 집중강우에 의한 고농도의 탁수가 대량 유입됐고 이러한 현상은 2000년대 들어와서도 지속적으로 발생하고 있다.<sup>18)</sup> 이와 같은 소양호의 특성은 대기 수은이 평상시에 소양호 유역으로 지속적으로 침적된 후 장마철에 한꺼번에 소양호로 유입되었을 가능성도 배제할 수 없다. 본 연구에서는 2006년 여름철에 runoff에 의해 지류와 유역으로부터 대규모의 탁수가 증충으로 유입되어 소양호의 증충 탁도가 크게 증가한 것으로 나타났다(Fig. 2). 증충의 탁수는 성충현상으로 인해 수체 내 층간의 연직순환을 방해하는 기작으로 작용하여 증충에 머물게 되나, 겨울철이 되면 역전(turn-over) 현상에 의해 증충의 탁수가 표층으로 올라오게 되어 본 연구기간의 2006년 11월과 2007년 2월에 표층의 탁도(31.3NTU)가 2006년 9월(4.4 NTU)에 비해 약 7배 증가한 것을 관측할 수 있었다(Fig. 2). 또한 이

시기에 탁도와 더불어 표층수의 총수은 농도도 같이 증가하였다는 것을 볼 수 있다. 표층의 탁도가 증가한 2006년

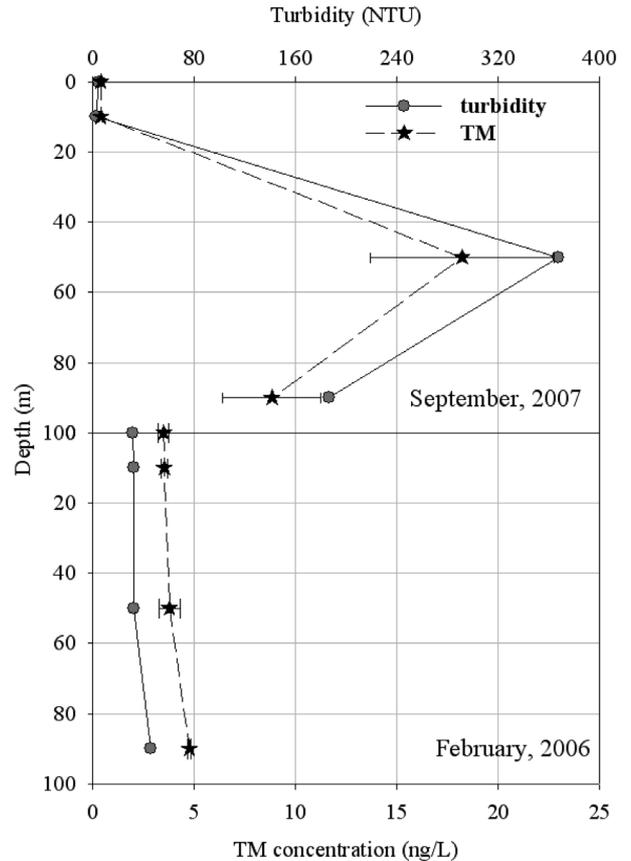


Fig. 3. Depth-dependent concentrations of total mercury (TM) and turbidity in summer (upper panel) and winter (lower panel).

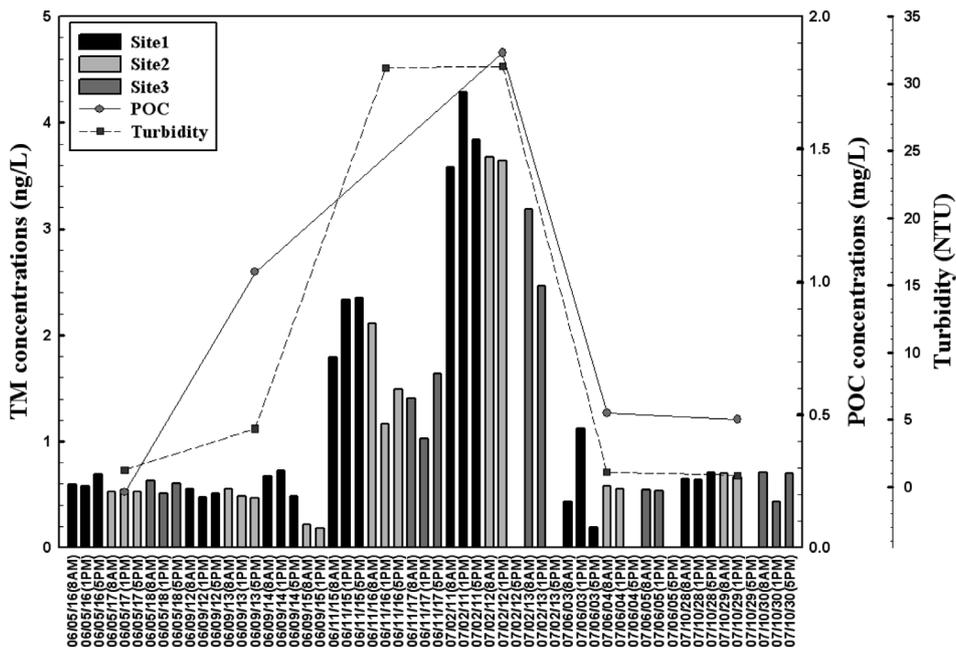


Fig. 2. Total mercury (TM) concentrations and turbidity in surface water in Lake Soyang.

11월과 2007년 2월을 탁수영향 기간으로 분류할 때 탁수영향 기간의 표층 총수은 농도는 2.50±1.06 ng/L로, 비 탁수영향 기간의 평균 농도인 0.56±0.17 ng/L에 비해 약 4배 이상 증가하였다. 뿐만 아니라 2006년 9월과 2007년 2월에 측정된 수심별 총수은 농도는 탁도와 동일한 수직적 분포를 보이고 있어, 소양호 내 총수은은 대부분이 입자상 수은으로 존재한다는 것을 뒷받침한다(Fig. 3).

본 연구에서는 수심별 총수은의 농도 분포도 조사하였는데, 외국의 대부분의 선행 연구에서는 일반적으로 수심이 깊어짐에 따라 입자상 물질의 침강으로 인해 수체의 저층부에서 총수은 농도가 증가하는 것으로 나타났다.<sup>19,20</sup> 그러나 소양호의 경우 우리나라의 강우 특성에 의해 여름철에 집중호우가 시작되고 이로 인한 대규모의 runoff가 발생하면서 탁수와 더불어 수은이 중층으로 다량 유입되는 특징을 보인다. 유입된 수은은 초겨울에 시작되는 소양호의 역전(turn-over) 현상에 의해 수심별로 고루 분포하게 되어, 표층의 수은 농도가 크게 증가한다. 증가된 표층의 수은은 광화학 반응 또는 미생물학적 반응에 의해 일부가 환원되어 대기로 재배출 되는 소멸원(sink)이 될 수 있다.<sup>21-26</sup> 또한 기존의 연구에 의하면 대기 침적(atmospheric deposition)으로 인한 직접적 유입은 호수의 수은 유입원 중 가장 중요한 경로라고 제시하였으나,<sup>27-29</sup> 본 연구에서는 소양호의 경우 강우 시 유역으로부터의 runoff가 직접적인 대기 침적에 비해 더 중요한 수은 유입원이라는 것을 나타낸다. 소양호의 경우 탁도와 총수은의 계절별 및 수심별 변화 경향이 일치하였는데, 대기중 입자성 물질(particulate matter)의 일

반적인 농도 수준(60 mg/m<sup>3</sup> 전후;<sup>30,31,32</sup>)을 고려해 볼 때, 집중호우 기간 동안 소양호의 탁도가 크게 증가한 이유가 대기 습식침적이라고 판단할 수 없기 때문이다.

### 3.2. 저서퇴적물 내 수은의 분포

계절별 및 위치별 저서 퇴적물 내 총 수은의 분포를 파악하기 위하여 본 연구에서는 매 계절마다 세 지점에서 시료를 채취하여 분석하였다. 저서퇴적물 내 평균 수은 농도는 82.2±6.9 µg/kg(69.9~98.3 µg/kg)(건중량)으로 나타났으며, 통계적으로 유의한 공간적 변이를 나타내지 않았다(Fig. 4; 지점 1: 85.7 µg/kg, 지점2: 88.5 µg/kg, 지점 3: 80.7 µg/kg). 또한 표층수의 총수은 농도와는 달리 뚜렷한 계절적 변이를 보이지 않고 일관성 있는 농도분포를 보였다. 본 연구에서 측정된 저서퇴적물 내 수은의 농도 범위는 대표적인 선행 연구인 미국 미네소타에 위치한 Voyageurs National Park 내 17개 호수의 수은 농도 분포인 102~364 µg/kg에 비해 상대적으로 낮은 값을 보이나,<sup>33</sup> Voyageurs National Park의 경우 소양호에 비해 규모가 매우 작은 호수들로 이루어져 있어 두 호수 사이에 수은의 거동 양상의 차이가 클 것으로 추론되어 소양호와 절대적인 농도 수준을 비교하기 어렵다.

또한 본 연구에서 소양호 퇴적물 내 수은 농도는 표층의 수은 농도와 상관관계가 나타나지 않았으며, 이는 소양호 퇴적물 내 수은이 호수 표층의 수은 농도에 영향을 거의 주지 않는다는 것을 나타낸다(Fig. 4). 소양호는 평균 수심이 33.8 m이고 최대 수심은 100 m인 매우 큰 수체로써, 심

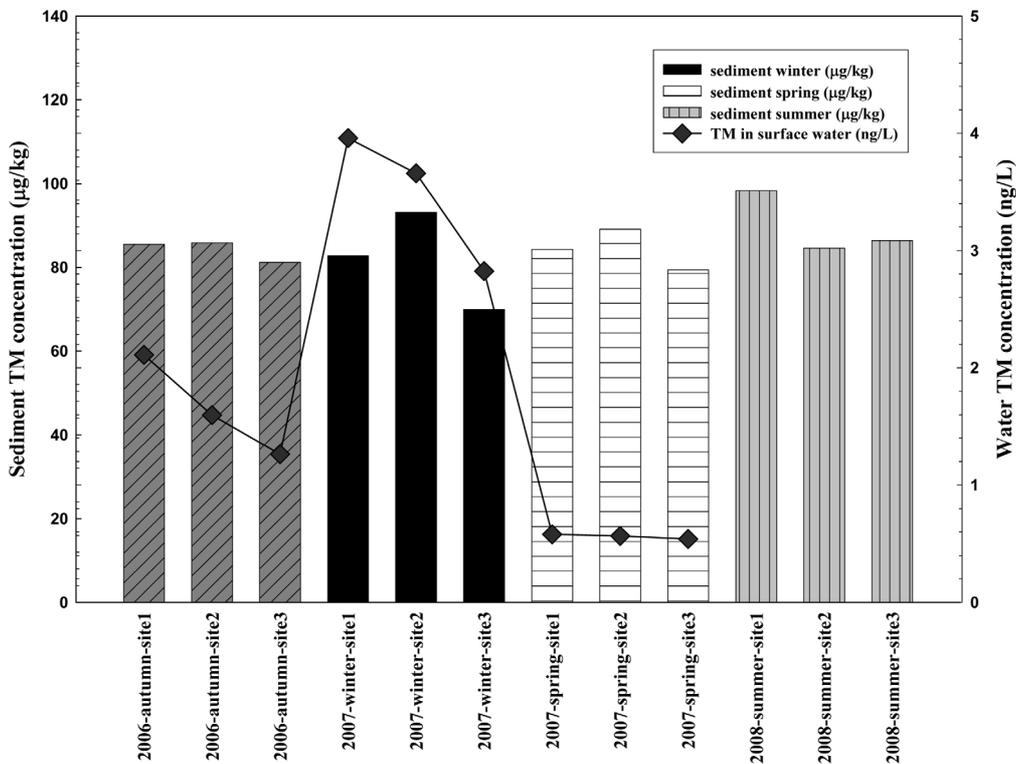


Fig. 4. Total mercury (TM) concentrations in sediment (bar) and in surface water (symbol).

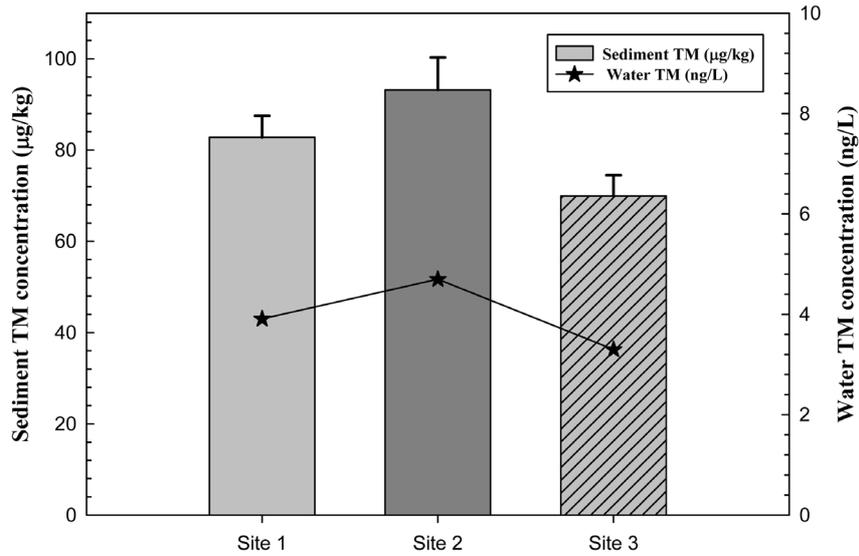


Fig. 5. Relationship between total mercury (TM) in sediment and total mercury (TM) in bottom water.

층과 표층이 혼합되는 겨울을 제외하고는 표층의 수은 농도는 저층이나 저서퇴적물의 영향을 받기보다는 오히려 runoff나 대기 침적 또는 광산화-환원 반응의 영향을 주요하게 받는 것으로 생각된다. 소양호 표층의 총수은 농도 변화가 runoff에 따른 탁도의 변화와 유의한 상관관계가 나타난 Fig. 2 및 Fig. 3은 이를 뒷받침한다.

그러나 확산에 의한 물질전달(mass transfer; 가스상 수은의 경우) 및 재비산(resuspension; 입자상 수은의 경우) 작용에 의해 상대적으로 높은 퇴적물 내 수은 농도가 호수 심층의 수은 농도에는 유의한 영향을 미칠 수 있다. 이를 파악하기 위하여 2007년 2월 11~13일 동안 측정된 소양호 심층수(표층수로부터 70 m 아래) 내 총수은 농도와 저서퇴적물 내 수은 농도의 상관관계를 살펴보았다(Fig. 5). 제한된 3개의 자료는 소양호 최심부 총수은 농도와 저서 퇴적물 내 총수은 농도가 뚜렷한 양의 상관관계를 보여준다( $R^2=0.982$ ). 이는 심층 수층-저서 퇴적물 간 이온상 2가 수은의 물질전달이 진행되고 있거나 입자성 수은의 침적 및 비산(suspension) 작용이 활발히 일어난다는 것을 시사한다. 그러나 본 연구에서 채취된 3세트의 자료만으로 이러한 결론을 내리기는 상당히 제한적이므로, 이를 뒷받침해 줄 수 있는 향후 연구가 필요하다.

### 3.3. 어류 내 수은의 분포

#### 3.3.1. 어종별 분포

어류를 통한 메틸수은의 섭취는 거의 대부분이 혈액으로 흡수되어 뇌를 포함한 모든 조직에 분포된다. 미국 환경청(US EPA)은 건강에의 악영향 없이 생애에 걸쳐 매일 섭취 가능한 메틸수은의 용량, 즉 RfD (reference dose)를 0.1 mg/kg-body weight/day으로 정하였다. 이를 바탕으로 미국민의 하루 평균 어류 섭취량인 17.5 g과 사람 평균 몸무게 70 kg으로 어류 내 메틸수은의 허용 기준치를 계산하여 미국 환경청에서는 0.3 ppm(섭취량 기준)을 메틸수은의 조직 잔여

기준치로 결정하였다.<sup>5)</sup>

$$TRC = \frac{BW \times (RfD - RSC)}{\sum FI} \quad (1)$$

여기서, TRC= 어류 내 메틸수은 허용 기준치(fish tissue criterion), RSC = 상대적 노출 기여도(relative source contribution = 0.027 mg/kg-body weight/day), BW = 몸무게(body weight, 70 kg), 그리고 FI = 일일 어류 섭취량(fish intake)이다.

우리나라 국민의 하루 평균 어류 섭취량은 1996~1999년 기준으로 74~94 g이고,<sup>34)</sup> 이를 바탕으로 동일한 RfD와 RSC를 사용하여 식 (1)에 의해 계산하면, 메틸수은의 어류 내 조직 잔여 기준치는 0.05~0.07 ppm가 되어 EPA 기준인 0.3 ppm보다 낮아야 한다는 것을 알 수 있다. 현재 우리나라는 식품위생법에서 어패류에 대한 총 수은 기준치를 0.5 ppm으로 정하고 있는데 이는 0.1 mg/kg-body weight/day의 RfD를 고려하였을 때 높게 책정되었다고 판단된다.

선행 연구들을 보면 어류 내 존재하는 수은은 거의 대부분(일반적으로 90% 이상) 메틸수은으로 존재한다고 제시하였으므로,<sup>7,35,36)</sup> 본 연구에서는 측정된 어류 내 총수은의 농도를 메틸수은의 농도로 가정하였다. 한강과 소양호에서 채취한 총 22(N=67)종의 어류를 습증량으로 계산하여 분석한 결과 전체 평균 수은 농도는 0.073 ppm으로, 식 (1)에서 계산된 어류 내 메틸수은의 조직 잔여 기준치와 유사하게 나타났다. 이 중 끄리의 평균 농도가 0.23 ppm로 가장 높은 수은 농도가 나타났으며 끄리, 돌고기, 중고기, 눈동자개, 메기의 체내 수은 농도가 0.1 ppm을 초과하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 또한 채취한 어류 중 0.07 ppm을 넘는 어류는 총 67마리 중에 31마리 이었으며, 이는 무려 전체 어류의 약 42%를 차지한다. 또한 육식성 어류(예: 끄리, 눈동자개, 메기, 블루길)는 잡식성 어류(누치, 잉어, 모래무지, 살치, 가시납지리)와 초식성 어류(예: 가승어)에 비해 높은

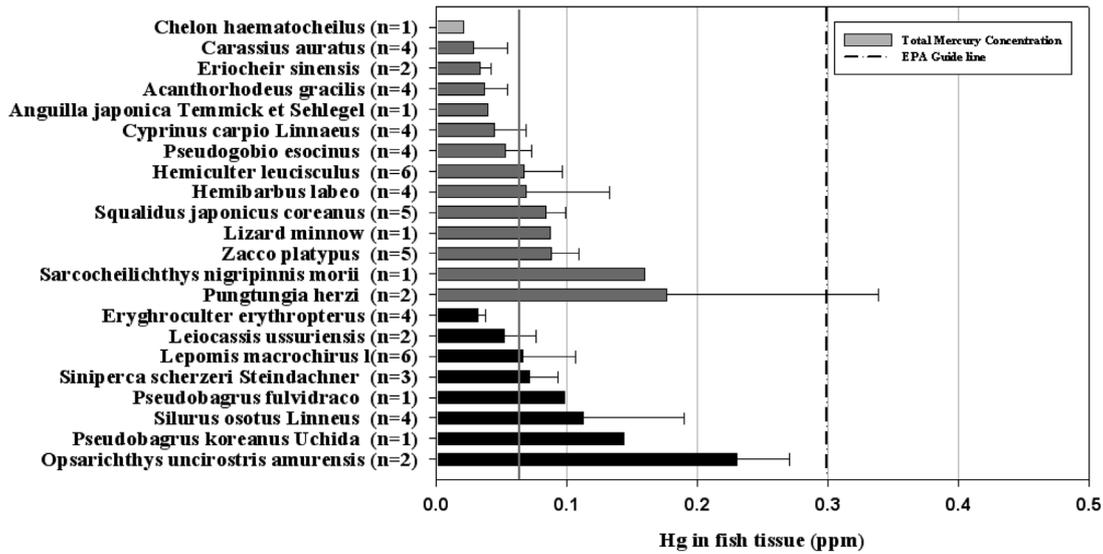


Fig. 6. Hg concentrations (ppm) in various fish species (black bar : carnivorous fish, dark gray : omnivorous fish, gray : herbivorous fish).

수는 농도를 나타내었다. 육식성어류의 경우 평균 수은 농도가 0.086 ppm, 초식성 어류의 경우 0.021 ppm으로 나타났으며, 잡식성을 가진 어류들은 0.067 ppm으로 초식성어류 < 잡식성 어류 < 육식성 어류 순으로 나타났다. 이는 메틸수은의 생물 농축성을 보여주는 결과로써 기존의 외국 연구에서도 볼 수 있는 현상이다.<sup>37)</sup>

또한 같은 종의 어류에서는 길이 및 몸무게와 체내 수은 농도 간에 양의 상관성이 있으며 이는 생물농축의 결과로 볼 수 있다.<sup>38)</sup> 본 연구에서는 어류 종류에 관계없이 어류 길이와 조직 내 수은 농도 간 상관관계를 살펴본 결과 P-value<0.01로 유의한 양의 상관관계가 나타났다(Fig. 7). 그러나 어류는 종별 및 지점별로 식습관 및 서식 환경 등이 다르며 먹이사슬의 위치가 다르기 때문에, 각각의 지점에서 채취한 각각의 종에 대하여 길이와 수은 농도 간의 상관관계를 비교하는 것이 더 정확하다. 본 연구에서 어류를

종류별로 채취된 시료 수가 제한적이기 때문에 피라미, 살치, 한강 블루길, 신이리 블루길에 대해서만 살펴볼 수 있었으며, 그 결과 피라미에서만 통계적으로 유의한 상관관계를 나타냈다(P-value<0.05).

3.3.2. 공간적 분포

본 연구에서는 각 지점별로 채취된 어류 체내의 수은 농도는 뚜렷한 차이가 나타났는데, 한강이 가장 낮았으며 신이리가 중간, 그리고 상류인 양구가 가장 높게 나타났다 (Table 2). 선행연구에 의하면 어류 내 수은 농도는 일반적으로 어류의 나이(age)가 높을수록, 길이가 길수록, 무게가 많이 나갈수록, 그리고 영양단계가 높을수록 높은 농도를 나타낸다.<sup>8,9)</sup> 따라서 어류 내 수은 농도를 측정할 때에는 반드시 길이와 무게를 동시에 측정하여야 한다. 그러나 본 연구에서 채취된 어류 내 수은 농도는 이러한 경향성을 나타내지 않았다. 양구에서 채취된 어류의 길이와 무게는 한강이나 신이리에서 채취된 어류에 비해 작음에도 불구하고, 수은의 농도가 상대적으로 높게 나타났는데 (Table 2), 그 이유로 몇 가지를 추론할 수 있다. 첫째, 한강이나 소양호 하류(신이리)에 비하여 소양호 상류(양구)로의 수은 유입량이 커서 소양호 상류 내의 수은 농도가 전반적으로 높거나, 둘째 소양호 상류 내의 총 수은 농도는 높지 않지만 메틸화 반응이 빠르게 진행되어 메틸수은의 농도가 높거나, 셋째 어류의 성장속도가 한강에 비해 느리기 때문이라고 가정할 수 있다. 본 연구에서는 한강에서의 수중 수은 농도를 측정하지 않았기 때문에 첫 번째 가정을 증명할 수 없지만, 소양호 상류(양구)의 유역 및 주변 도시를 고려하면 소양호 상류가 한강이나 소양호 하류에 비해 총 수은의 유입량이 높을 것이라고 기대되지 않는다. 또한 주된 메틸화 반응은 심층의 혐기성 상태에서 황환원 박테리아에 의해 일어나는 반응으로써,<sup>39)</sup> 소양호 상류가 한강과 소양호에 비해 혐기

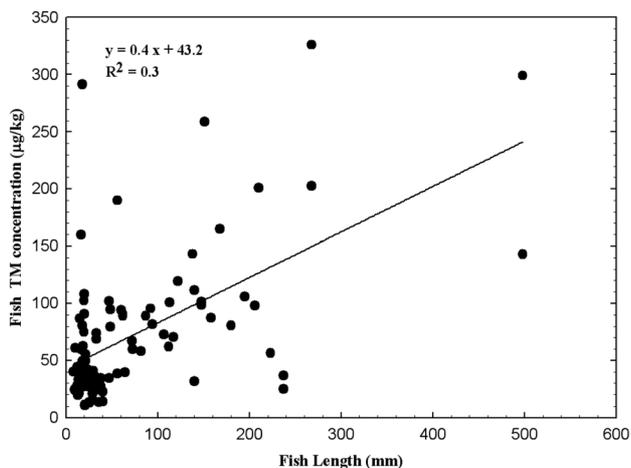


Fig. 7. Relationship between fish-Hg concentration and fish length.

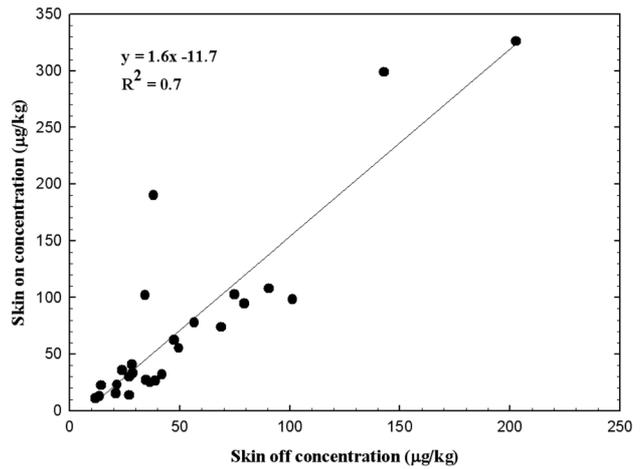
**Table 2.** Average Hg concentration in fish with length and weight of fish collected from three sampling sites

Site	Hg (mg/kg)	Length (mm)	Weight (g)	n
Han River	50.7±49.1	231	201.6	43
Shiniri	89.9±36.1	141	61.4	22
Yanggu	141.8±73.0	173.3	52.3	7

성 구역이 더 넓게 분포되어 있다고 보기 어렵다. 따라서 세 번째 가정이 소양호 상류 어류 내 높은 수은 농도를 설명할 수 있는 가장 가능성 있는 이유라고 볼 수 있다. 어류가 느리게 성장하면 어류의 나이(age)에 비해 길이나 몸무게가 상대적으로 작게 성장하기 때문에, 같은 길이의 어류를 비교하면 높은 수은 농도를 나타낸다. 기존의 연구에 의하면 물속의 인 농도가 높을수록, 즉 부영양화가 된 호수일수록 같은 종의 어류 내 수은 농도가 부영양화 되지 않은 호수보다 더 낮다.<sup>40)</sup> 그 이유는 부영양화 된 호수에서는 어류가 빠르게 성장하기 때문에 ‘희석(dilution)’효과, 즉 어류 부피의 빠른 증가로 인해 수은 농도가 희석되는 현상이 일어나기 때문으로 설명된다. 따라서 상대적으로 부영양화가 많이 진행된 이러한 원인이 한강의 어류가 소양호 상류에 비해 유의하게 낮은 수은 농도를 가지는 결과를 야기했다고 생각된다. 환경부 수질측정망 자료를 이용하여 소양호와 한강의 수질측정 자료를 비교해 본 결과 한강에서 측정자료 총 144개 평균 총질소 농도는 7.46 ± 6.15 mg/L, 총인은 0.51 ± 0.62 mg/L, BOD는 5.56 ± 7.48 mg/L로 측정되었으며, 소양호는 각각 1.56 ± 0.23 mg/L, 0.03 ± 0.04 mg/L, 0.98 ± 0.26 mg/L로 나타나 소양호보다 한강이 부영양화가 진행된 것으로 판단되며, 세 번째 가정이 한강에서 채집된 어류 내 수은 농도가 소양호에서 채집된 어류 내 수은 농도보다 낮게 나타난 것을 뒷받침할 수 있다. 지점별로 같은 종 어류의 체내 수은 농도를 분석한 결과 역시 돌고기를 제외한 나머지 시료에서는 한강이 가장 낮게 나타났으며 신이리와 양구가 상대적으로 높게 나타났다. 유일하게 모든 지점에서 채집된 붕어에서도 양구 0.067 ppm (n = 1), 신이리 0.021 ppm (n = 1), 한강 0.016 ppm (n = 2) 순으로 수은 농도가 높게 나타났다.

### 3.3.3. 껍질에서의 농도

본 연구에서는 어류의 근육 조직과 껍질에서의 수은 농도를 비교하기 위하여, 껍질을 제거한 근육 조직(skin-off)과 껍질을 포함한 근육 조직(skin-on)으로 분류하여 분석을 실시하였다. 껍질을 제거한 시료(skin-off)의 평균 수은 농도는 0.079 ppm으로 껍질을 포함한 시료(skin-on)의 평균 수은 농도인 0.058 ppm에 비해 약 1.4배 높게 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(Fig. 8, P-value<0.01). 지점별로는 한강에서 채취한(n = 21 set) skin-on 시료와 skin-off 시료의 평균 수은 농도가 각각 0.039 ppm과 0.053 ppm으로 나타났으며, 신이리(n = 4)는 skin-on 시료와 skin-off 시료의 평균 수은 농도가 각각 0.121 ppm과 0.187 ppm, 양구



**Fig. 8.** Comparison of Hg contents in fish-with-skin to without skin.

(N = 2)에서는 각각 0.129 ppm, 0.133 ppm로 측정되어, 껍질 조직보다 근육 조직에서 주된 수은의 축적이 일어난다는 것을 시사한다. 이는 대부분의 다른 생물농축 오염물질이 주로 지방 조직에 농축되는 반면, 수은의 경우 근육 조직에 농축된다는 기존의 연구를 뒷받침한다.<sup>41)</sup> 또한 이 결과는 향후 모든 연구에서 어류 내 수은 농도를 나타낼 때 근육 조직만을 포함한 것인지 또는 지방 조직 및 껍질을 같이 포함한 것인지 반드시 표기해야 한다는 것을 나타낸다.

## 4. 결론

본 연구에서는 소양호를 대상으로 장기간 동안 다매체 내 수은 농도 분포를 조사하였으며, 몇 가지 중요한 결과를 나타내고 있다. 첫째, 이제까지 연구된 대부분의 외국 선행 연구에서 수은의 가장 중요한 유입원으로 호수 표면으로의 직접적인 대기 침적(건식 및 습식 침적)을 꼽았는데, 소양호의 경우 장마철 run-off가 가장 중요한 유입원이다. 그러나 유역으로부터 다량의 수은이 소양호로 유입된 배경에는, 대기 수은이 평상시에 소양호 유역으로 지속적으로 침적된 후 장마철에 한꺼번에 소양호로 유입되었을 가능성이 크다. 따라서 수은의 대기 침적은 여전히 소양호의 간접적인 주요 유입원일 가능성을 배제할 수 없다. 이는, 아직 측정 데이터가 극히 모자란 수은의 대기 침적량 자료가 여전히 수은의 다매체 거동 연구에서 필수적이라는 사실을 나타낸다.

둘째, 한강과 소양호에서 채취한 총 22종의 어류 내 평균 총 수은 농도는 0.073 ppm으로 나타나, 우리나라의 기준치(0.5 ppm) 및 미국 EPA의 기준치(0.3 ppm)에 비해 낮은 농도를 보였다. 그러나 우리나라 국민의 높은 어류 섭취량과 미국 EPA의 RfD (reference dose)를 바탕으로 본 연구에서 계산된 적정 기준치인 0.07 ppm을 상회하는 어류가 전체의 42%를 차지해, 우리나라만의 수은 관리 대책 및 어류 섭취에 대한 조언(advisory) 마련이 시급하다.

셋째, 본 연구에서 어류를 채취한 세 지점, 한강, 신이리, 양구는 동일한 종에서 뚜렷하게 다른 농도 분포를 보였는데, 상류일수록 더 높은 농도를 나타냈다. 이는 호수의 부영양화 차이로 인한 지점별 어류 성장 속도의 차이가 원인인 것으로 생각된다. 이를 심층적으로 조사하기 위해서는 우리나라 호수 내 수은 농도의 공간적 분포를 더 집중적으로 광범위하게 조사해야 할 필요성이 있다.

넷째, 소양호 저서퇴적물의 수은 농도 분포는 69.9~98.3 µg/kg 범위로 미국 미네소타에 위치한 Voyageurs National park 내 17개 호수의 수은 농도 분포인 102~364 µg/kg에 비해 낮은 수은 농도를 나타내었다. 그러나 저서퇴적물에 근접한 최심층 수체 내 수은 농도와 저서퇴적물 내 수은 농도는 높은 상관관계를 나타냈고 이는 2가 수은의 수체-저서퇴적물간 교환이 빠르고 활발하게 진행되고 있다는 것을 뒷받침한다. 소양호는 수심이 매우 깊은 호수로서, 저서 퇴적물과 표층수 사이의 수은 농도 간 상관관계를 찾아볼 수 없었으나, 수심이 얇은 호수에서는 저서 퇴적물 내 수은 농도가 수중 수은 농도에 더 뚜렷한 영향을 미칠 것으로 생각된다. 저서 퇴적물 내 수은 농도가 수중에 비해 훨씬 더 높은 농도를 나타내는 것이 일반적이기 때문에, 향후 여러 환경적 요소(유기물질함량, AVS, 공극 등)가 고려된 저서 퇴적물과 수중 수은의 교환 연구가 시급히 진행되어야 한다고 생각한다.

## 사사

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(2009-0066591) 이에 감사드립니다.

KSEE

## 참고문헌

- Vette, A. F., Landis, M. S. and Keeler, G. J., "Deposition and emission of gaseous mercury to and from lake michigan during the lake michigan mass balance study," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 4525~4532(2002).
- Lynam, M. M. and Keeler, G. J., "Automated speciated mercury measurements in Michigan," *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 9253~9262(2005).
- Park, J. S., Oh, S., Shin, N. Y., Kim, M. K., Yi, S. M. and Zoh, K. D., "Seasonal variation in dissolved gaseous mercury and total mercury concentrations in Juam Reservoir, Korea," *Environ. Pollut.*, **154**, 12~20(2008).
- Fleming, E. J., Mack, E. E., Green, P. G. and Nelson, D. C., "Mercury methylation from Unexpected Sources: Molybdate-Inhibited Freshwater sediments and an Iron-Reducing Bacterium," *Appl. Environ. Microbiol.*, **72**, 4457~464(2006).
- U.S. EPA., "Mercury Update: Impact in Fish Advisories. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water," 4305, EPA-823-F-01-011(2001).
- Driscoll, C. T., Han, Y. J., Chen, C. Y., Evers, D. C., Lambert, K. F., Holsen, T. M., Kamman, N. C. and Munson, R. K., "Mercury Contamination in Forest and Freshwater Ecosystems in the Northeastern United States," *Bio. Sci.*, **57**, 17~28(2007).
- Meili, M., "The coupling of mercury and organic matter in the biogeochemical cycle towards a mechanistic model for the boreal forest zone," *Water Air Soil Pollut.*, **56**, 333~347 (1991).
- Ikingura, J. R. and Akagi, H., "Total mercury and methylmercury levels in fish from hydroelectric reservoirs in Tanzania," *The Science of the total Environment*, **304**(1-3), 355~68(2003).
- Mlean, N., Larned, S. T., Nikora, V., and Kutter, V., "Mercury in lakes and lake fishes on a conservation-industry gradient in Brazil," *Chemosphere*, **60**, 226~236(2005).
- Kamman, N. C., Lorey, P. M., Driscoll, C. T., Estabrook, R., Major, A., Pientka, B. and Glassford, E., "Assessment of mercury in waters, sediments, and biota of New Hampshire and Vermont lakes, USA, sampled using ageographically randomized design," *Environ. Toxicol. Chem.*, **23**, 1172~1186(2004).
- Essington, T. E. and Houser, J. N., "The effect of whole-lake nutrient enrichment on mercury concentration in age-1 yellow perch," *Transactions of the American Fisheries Society*, **132**, 57~68(2003).
- Charles, T. Driscoll., Young-ji, Han., Celia Y. Chen., David C. Evers., Kathleen Fallon Lambert., Thomas M. Holsen., Neil C. Kamman., And Ronald K. Munson "Mercury Contamination in Forest and Freshwater Ecosystems in the Northeastern United States," *Bioscience*, **57**(1), 17~29(2007).
- 정종수, 심상규, "국내 수은 연구 동향 및 관리 현황," 한국대기환경학회지, **25**(2), 99~107(2009).
- 김희연, 정도영, 노유섭, 오금순, 박성수, 서정혁, 이은주, 이윤동, 최우정, 엄 지윤, 송민수, 이종욱, 우건조, 경인지방 식품안전청 시험분석팀, 식품의약품청 식품평가부, "어류 중 메틸수은 분석법 확립 및 모니터링," 한국식품과학회지, 882~888(2005).
- U.S. EPA Method 1631, Revision E., "Mercury in Water by Oxidation, Purge and Trap, and Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry," U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 4303. EPA-821-R-02-019(2002).
- Chio, K. S., Kim, B. C. and Lee, U. H., "Characteristics of dissolved organic carbon in three layers of a deep reservoir, Lake Soyang, Korea," *Int. Rev. Hydrobiol.*, **86**(1), 63~76 (2001).
- Kim, B.-C., Chol, K.-S. Kim, C.-G., Lee, U. H. and Kim, Y.-H., "Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea," *Elsevier Sci.*, **34**(14), 3495~3504(2000).
- Kim, Y.-H. and Kim, B.-C., "Application of a 2-dimensional-water quality model (CE-QUAL-W2) to the turbidity interflow in a deep reservoir (Lake Soyang, Korea)," *Lake and Reservoir Management*, **22**(3), 213~222(2006).

19. Amyot, M., Mierle, G., Lean, D. R. S. and McQueen, D. J., "Sunlight-induced formation of dissolved gaseous mercury in lake waters," *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 2366~2371(1994).
20. Scherbatskoy, T., Shanley, J. B. and Keeler, G. L., "Factors controlling mercury transport in an upland forested catchment," *Water, Air, Soil Pollut.*, **105**, 427~438(1998).
21. O'Driscoll, N. J., Sicilian, S. D. and Lean, D. R. D., "Continuous analysis of dissolved gaseous mercury in freshwater lakes," *Sci. Total Environ.*, **304**, 285~294(2003).
22. O'Driscoll, N. J., Poissant, L. C., Ridal, J. and Lean, D. R. S., "Continuous analysis of dissolved gaseous mercury and mercury volatilization in the upper St. Lawrence river: exploring temporal relationships and UV attenuation," *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 5342~5348(2007).
23. Dill, C., Kuiken, T., Zhang, H. and Ensor, M., "Diurnal variation of dissolved gaseous mercury (DGM) levels in a southern reservoir lake (Tennessee, USA) in relation to solar radiation," *Sci. Total Environ.*, **357**, 176~193(2006).
24. Zhang, H., Dill, C., Kuiken, T., Ensor, M. and Crocker, W. C., "Change of dissolved gaseous mercury concentration in a southern reservoir lake (Tennessee) following seasonal variation of solar radiation," *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 2114~2119(2006).
25. Siciliano, S. D., O'Driscoll, N. J. and Lean, D. R. S., "Microbial reduction and oxidation of mercury in freshwater lakes," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 3064~3068(2002).
26. Wiatrowski, H. A., Ward, P. M. and Barkay, T., "Novel reduction of mercury(II) by mercury-sensitive dissimilatory metal reducing bacteria," *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 6690~6696(2006).
27. Landis M. S. and Keeler G. J., "Atmospheric mercury deposition to Lake Michigan during the Lake Michigan Mass Balance Study," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 4518~4524(2002).
28. Han, Y. J., Kim, T. S. and Kim, H. K., "Ionic constituents and source analysis of PM<sub>2.5</sub> in three Korean cities," *Atmospheric Environ.*, **42**, 4735~4746(2008).
29. Orihel, D. M., Paterson, M. J., Bodaly, R. A. and Hintelmann H., "Experimental evidence of a linear relationship between inorganic mercury loading and methylmercury accumulation by aquatic biota," *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 4952~4958(2007).
30. 김성연, 정문호, 손부순, 양원호, 최경호 "서울시 일부 지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구," 한국환경보건의학회지, **31**(4), 301~208(2005).
31. 김용표 "서울의 미세먼지에 의한 대기오염," 한국대기환경학회지, **22**(5), 535~553(2006).
32. 전진희, 한영지 "춘천시 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도 및 이온성분 농도의 특성에 관한 연구," 한국대기환경학회지, **24**(6) 682~692(2008).
33. Wiener, J. G. and Knights, B. C., "Mercury in Soils, Lakes, and Fish in Voyageurs National Park (Minnesota): Importance of Atmospheric Deposition and Ecosystem Factors," *Environ. Sci. Technol.*, **40**, 6261~6268(2006).
34. UNEP, "Global mercury assessment, Issued by UNEP Chemicals Geneva, Switzerland,"(2002).
35. Mason, R. P., Laporte, J. M. and Andres, S., "Factors controlling the bioaccumulation of mercury, methylmercury, arsenic, selenium, and cadmium by freshwater invertebrates and fish," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **38**, 283~297(2000).
36. Oh, S. H., Kim, M. K., Yi, S. M. and Zoh, K. D., "Distributions of total mercury and methylmercury in surface sediments and fishes in Lake Shihwa, Korea," *Sci. Total Environ.*, **408**, 1059~1068(2010).
37. Wiener, J. G., Krabbenhoft, D. P., Heinz, G. H. and Scheuhammer, A. M., "Ecotoxicology of mercury. In: Handbook of Ecotoxicology (2nd ed). Hoffman, D.J., Rattner, B.A., Burton, G.A. and Cairns, J. (eds)," CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 409~463(2003).
38. Howard A. Simonin., Jefferey J. Loukmas., Lawrence C. Skinner., Karen M. Roy., "Lake variability: Key factors controlling mercury concentrations in New York State Fish," *Environ. Pollut.*, **154**, 107~115(2008).
39. Pak, K. R. and R. Bartha., "Mercury methylation and demethylation in anoxic lake sediments and by strictly anaerobic bacteria," *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**, 1013~1017(1998).
40. John E. Gray., Mark E. Hines., "Biogeochemical mercury methylation influenced by reservoir eutrophication, Salmon Falls Creek Reservoir, Idaho, USA," *Chem. Geol.*, **258**, 157~167(2009).
41. Adam R. Schwindt., John W. Fournie., Dixon H. Landers., Carl B. Schreck and Michael L. Kent., "Mercury Concentrations in Salmonids from Western U.S National Parks and Relationships With Age and Macrophage Aggregates," *Environ. Sci. Technol.*, **42**(8), 1365~1370(2008).
42. Kim, B. C. and Kim, Y. H., "Phosphorus cycle in a deep reservoir in Asian monsoon area and the modeling with a 2-D hydrodynamic water quality model (CE-QUAL-W2)," *Korean J. Limnol.*, **37**(2), 205~212(2004).