

## 도심인공호 퇴적물의 총증금속, 용존증금속, 생물이용성 증금속의 연관성 규명

백 용 육 · 안 윤 주\*

(전국대학교 환경과학과)

**Examining the Interrelation of Total, Soluble, and Bioavailable Metals in the Sediments of Urban Artificial Lakes. Baek, Yong-Wook and Youn-Joo An\* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)**

Total metals, soluble metals, and bioavailable metals were monitored at the sediments of urban lakes located in Seoul, Korea during spring season 2006. The metals measured were zinc, arsenic, chromium, copper, nickel, and cadmium, which are known to be toxic to human health and ecosystems. The main sources of heavy metals in the lakes were urban runoff and atmospheric deposition associated with air pollution in urban areas. Extraction by using a weak electrolyte solution ( $0.1\text{ M Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) was used to predict bioavailability of the metals. Among the six heavy metals studied, copper was the most bioavailable, based the weak electrolyte extraction techniques. Since metal toxicity is related to metal bioavailability, the results were consistent with the high ecotoxicity of copper, compared to other heavy metals. Overall results suggest that there was no direct relationship between total and bioavailable metal concentration, although zinc, copper and cadmium show some relationships.

**Key words :** urban artificial lake, sediment, heavy metal, bioavailability, copper

### 서 론

환경다매체중 퇴적물(Sediment)은 수체와 함께 수환경의 기본 구성요소로서 저서생물(Benthic organism)의 서식지를 제공하는 동시에 증금속, 유기물질, 영양염류, 박테리아 등 각종 오염물질의 저장소(Sink)로 작용한다. 특히, 퇴적물에 축적된 증금속은 PBT(Persistency, Bioaccumulation, Toxicity) 성질로 인해 일단 퇴적물에 유입되면 오래 체류하며, 생지화학적 환경변화에 따라 수중으로 재 용출되어 수질을 악화시킬 뿐 아니라, 수생태계에 악영향을 미치고, 최종적으로는 먹이사슬 경로를 통해 인간의 건강을 위협한다. 최근 들어 우리나라의 환경정책도

다매체간 유기적 상호작용을 고려하는 환경다매체 통합 관리로 전환을 시도하면서, 그동안 대기, 물, 토양매체에 비해 관심이 적었던 퇴적물에 대한 연구가 비교적 활발하게 시도되고 있다. 국내에서 진행된 퇴적물 오염 관리를 목표로 한 연구는 호수 및 하천 오염퇴적물의 관리방안(한국환경정책평가연구원, 1998), 수서퇴적물 환경기준 개발에 관한 연구(한국환경정책평가연구원, 2000), 그리고 물환경종합평가방법 개발 조사연구(환경부, 2006) 등이 있으며, 국내 퇴적물의 오염현황 조사를 토대로 국외의 기준 설정사례가 제시되어 있다. 2000년 이전의 연구에서는 국내 지역특이성을 고려하지 않은 초기 연구가 진행되었으나, 최근에 환경부에서 수행된 연구는 하천과 호수 등의 각 수역 특성에 따른 기준의 차별화를 고려하

\* Corresponding author: Tel: 02) 2049-6090, Fax: 02) 2201-6295, E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr

여 퇴적물의 권고기준안을 제시하였다. 예비 권고기준안은 유해 중금속인 구리, 아연, 납, 수은, 크롬, 카드뮴을 대상으로 자연 상태, 약간오염, 중간오염, 현저한 오염, 그리고 심한오염에 대해 각각 5단계의 오염도로 분리하여 제시하고 있다(환경부, 2006).

현재까지 국내의 퇴적물 내에서 중금속에 의한 오염연구는 총량분석이 주를 이루고 있다. 권고기준안은 있으나 아직까지 퇴적물에 대한 국내환경기준이 없기 때문에 대신 토양오염기준을 살펴보면, 크롬( $\text{Cr}^{6+}$ )을 제외하고는 카드뮴, 구리, 비소, 납, 나켈, 수은 등은 모두 총량기준으로 규제가 이루어지고 있다. 따라서 현재까지 축적된 중금속자료들은 총량자료가 거의 대부분이다. 그러나 총중금속은 생물이 흡수할 수 있는 형태인 생물이용성 중금속(Bioavailable metal)과는 일치하지 않으므로, 중금속 총량에 관한 연구만으로는 중금속에 생태계에 미치는 영향이나 독성을 파악하는데 한계성이 있다. 생물체는 환경 중에 존재하는 총중금속을 이용할 수 있는 것이 아니라, 총량 중 생물이용이 가능한 량, 즉 생물이용량 만큼만 흡수가 가능하다. 따라서 생물이용량 측정은 독성중금속이 생태계나 인체에 미치는 영향을 파악하기 위해 필수적인 사안이다.

도시지역에 인공적으로 조성된 호수들은 도시민의 휴식과 레크리에이션 공간으로 활용되고 있다. 수자원의 확보를 위해 도시에서 떨어진 지역에 건설된 대규모 인공호와는 달리 도심의 소형인공호들은 저수용량이 적고, 체류시간이 길다는 특성을 가지고 있다. 특히 도심의 대기 오염으로 인해 오염된 침적물의 낙하나 산성강우는 도시 인공호 내 퇴적물에서 영향을 미치는데, 대기 중 입자상물질(Particulate matter)에 흡착된 중금속들은 낙하나 강우와 함께 호수에 유입되고, 수체의 부유입자에 다시 흡착, 침전됨으로써 최종적으로 퇴적물에 축적되게 된다.

본 연구에서는 휴식과 레크리에이션 공간으로 활용되고 있는 도시지역에 조성된 인공호(Urban artificial lake)를 대상으로, 퇴적물에 축적된 총중금속, 용존중금속, 그리고 생물이용성 중금속의 상호연관성을 분석하였다. 본 연구의 생물이용량은 Bioassay를 수행하는 대신 간접적인 방법인 약전해질추출법(Weak-electrolyte extraction, WEE)을 이용하여 예측하였다. 기준에 수행된 관련 연구에서 WEE는 퇴적물(또는 토양)과 약하게 결합되어 있어 생물이 이용가능한 중금속을 추출할 수 있는 기법으로 잘 알려져 있으며, 약전해질추출량과 생물이용량과의 상관관계가 기존에 보고된 바 있다(Basta and Gradwohl, 2000; Conder and Lanno, 2000; Conder et al., 2001; An and Campbell, 2003).

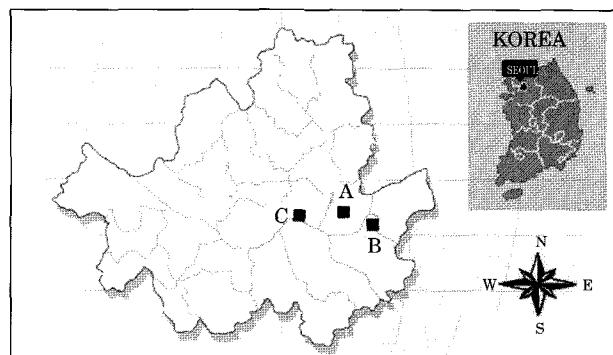


Fig. 1. Locations of study sites.

## 재료 및 방법

### 1. 조사 시기 및 조사지점 선정

본 연구는 2006년 3월부터 7월까지 총 4회에 걸쳐 도심인공호(A, B, C 호수)의 호수수 및 퇴적물을 채취하였고, 일부 항목들은 샘플채취와 동시에 현장에서 측정하였다. 조사지역은 서울 강동구에 위치하고 있으며(Fig. 1), 조사지점은 A호수 3지점, B호수 2지점, C호수 3지점이었다. 본 지역은 인근 지역 주민들이 휴식 공간으로 자주 이용하는 지역이고, 호수의 조성 기간이 10년 이상이라는 공통적인 특성을 갖고 있다. 또한 대상 호수들은 각각의 개별적인 특이성을 갖고 있다. A호수는 주변에 산책로와 도로의 존재로 차량 및 시민의 접촉이 잦은 지역이며, 인근 지역에서 현재 대규모의 건물 건축이 진행되어, 다수의 분진이 발생되고 있다. 호수 B는 지역주민을 위해 조성된 공원 내 구조물의 일부로 호수 내에 인공 분수 시설 및 산책로가 조성되어 있으며, 호수 외곽지역은 토양유실 방지목적의 조경이 조성되어 있다. C지역은 호수 B와 인접한 지역의 호수로서 별도의 인위적 관리는 되고 있지 않으며, 대상 지역 인근에 8차선의 도로가 존재하여 차량이동이 많은 지역이다.

### 2. 호수수 채취 및 분석

현장측정항목은 Multi-Meter (U-22XD, Horiba, Japan)를 이용하여 수소이온농도, 전기전도도, 탁도, 용존산소, 온도, 수심, 염도, 총고형물질, 산화환원전위(Redox potential)를 2회 반복 측정하였다. 또한 시료 일부를 아이스박스에 보관, 당일 실험실로 이동하여 질산염, 아질산염, 암모니아성 질소, 총질소, 인산염, 총인, 총유기탄소량을 Spectroquant (NOVA 60, Merck, Germany) 분석기기를 이용

하여 측정하였다. 호소수 내 용존중금속 측정을 위하여 호소수 20 mL을 0.45  $\mu\text{m}$  Hydrophobic PTFE Syringe 필터를 이용하여 여과한 후, ICP-AES (JY-138-ULTRACE, Jobin Yvon, France)를 이용하여 중금속 함량을 측정하였다. 본 연구의 조사대상 중금속은 국내 환경기준항목(토양오염기준 및 수질규제기준중 배출허용기준)에 포함된 카드뮴, 구리, 비소, 니켈, 크롬, 아연을 대상으로 하였다. 이 중 4항목은 퇴적물 예비권고기준안에도 포함되어 있다.

### 3. 퇴적물 채취 및 분석

퇴적물 시료 채취 지역은 호소수 채취 지역과 동일하며, 퇴적물 시료는 Peterson dredge sampler (Code 1097, LaMotte Company, USA)를 이용하여 표층퇴적물 (0~2 cm)을 채취하였다. 현장퇴적물 측정항목인 pH, 산화환원 전위는 Soil pH/ORP Meter (Model IQ-400, IQ Scientific Instruments, USA)로 2회 반복 측정하였고, 퇴적물 Texture, 유기물함량은 각각 Soil texture unit (Code 1067, LaMotte Company, USA)과 Soil organic matter test kit (Model ST-OR, Code 5020, LaMotte Company, USA)을 이용하여 분석하였다. 중금속 분석을 위하여, 퇴적물 내에 존재하는 불필요한 물질을 제거한 후 120°C 오븐에서 24시간 건조하였다. 분쇄한 퇴적물 시료 0.1 g을 Teflon digestion vessel에 담은 후 혼합산(질산: 과염소산: 불화 수소산=4 : 1 : 4) 5 mL을 분주한 뒤 24시간 동안 Sand Bath (C-SB, Chang-Shin Scientific Co., Korea)에서 천천히 가열하여 전처리를 하였다. 대부분의 시료가 용해된 후, 약간의 초순수를 첨가하여 잔류산을 증발시켰다. 증발이 완료된 후 20 mL의 초순수를 첨가하여 회석한 후 0.45  $\mu\text{m}$  Hydrophobic PTFE syringe 필터 (JPT 045-15-100, ALBET Filtrations & Separation Technology, USA)를 이용하여 여과하였다. 전처리 완료된 시료는 ICP-AES (JY-138-ULTRACE, Jobin Yvon, France)를 이용하여 중금속의 함량을 측정하였다. 또한 퇴적물내의 용존성(Water soluble fraction) 중금속 함량을 측정하기 위하여 분쇄된 퇴적물 시료 1.0 g을 50 mL Pyrex Tube에 담은 후 초순수 20 mL을 첨가하였다. 혼합액은 교반기를 이용 120 rpm에서 16시간 교반하였으며 교반이 완료된 후에는 상동액 분리를 위해 원심분리기를 이용하여 15분간 1,500 rpm으로 원심 분리하였다.

### 4. WEE를 이용한 생물이용성 중금속 추출

생물이용성 중금속의 추출법은 An and Campbell (2003)

의 실험법에 근거하여 대표적인 WEE추출법에 해당하는 Calcium nitrate 추출방법이 사용되었다. 퇴적물은 105°C 오븐에서 24시간 건조, 분쇄된 후, 시료 1.0 g을 50 mL Pyrex Tube에 담은 후 0.1 M Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>용액 20 mL을 첨가하였다. 혼합액은 교반기를 이용 120 rpm에서 16시간 교반하였으며 교반이 완료된 후에는 원심분리기를 이용하여 15분간 1,500 rpm으로 원심 분리하였다. 상동액 추출 후 총 중금속 추출과 동일한 방법으로 최종 여과를 실시하였으며, 전처리 완료된 시료는 ICP-AES (JY-138-ULTRACE, Jobin Yvon, France)를 이용하여 중금속의 함량을 측정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 퇴적물과 상층수의 물리화학적 특성

퇴적물과 상층수의 물리화학적 특성은 Table 1과 같다. 호소수의 수소이온농도의 변화는 기온 및 계절변화에 따른 조류의 증가에 따른 현상으로 분석되며, 전기전도도와 탁도 변화 역시 조류의 증가와 연관이 있는 것으로 보인다. 수질의 오염 정도를 예측할 수 있는 질산염과 아질산 염의 수치는 미국 환경청의 수질환경기준치(EPA 1976, 수질기준, 아질산성 질소; 10)를 초과하지 않는 것으로 분석되었으나, 최근의 오염 정도를 평가하는 항목인 암모니아성 질소의 경우 기준치를 초과하는 수치로 나타나 도심인 공호의 오염이 증가하는 추세임을 나타내고 있다. 퇴적물의 경우 기온 및 계절 변화에 의한 수소이온농도의 증가 및 호수 외곽지역 및 중심부의 토성변화가 관찰되었다. 퇴적물 내 유기물의 함량은 부영양화가 지속된 것으로 알려진 (Kim et al., 2003) A-1, A-2, A-3에서 높은 값이 관찰되었으며, 각 대상지역별로 상이한 수치를 나타내었다. 한편 호소수 내의 용존 중금속 함량은 호수 B지역을 제외하고 대상 물질의 검출한계 이하로 나타났다. 니켈의 경우 호수 A, B, C에서 검출되었으나 그 농도는 매우 낮았다.

### 2. 퇴적물 내 총중금속과 용존중금속의 연관성

퇴적물 내의 중금속의 총량과 용존량을 측정한 결과, 도심인 공호 퇴적물에 대한 총중금속의 검출빈도별 순위는 아연, 구리, 크롬, 니켈, 비소, 카드뮴 순으로 나타났다. 대상 중금속별 최대값을 비교한 경우에는 아연이 가장 높은 수치로 검출되었고 그 뒤를 이어 비소, 구리, 크롬, 니켈이 비슷한 범위를 보였고, 마지막으로 카드뮴의 순서

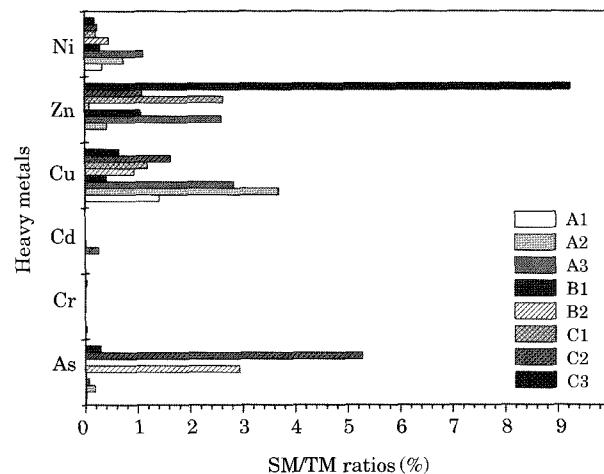
**Table 1.** Physicochemical conditions of lake water and sediments in the three study sites.

	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	C-1	C-2	C-3
<b>Lake Water</b>								
pH	8.67	9.44	9.44	9.25	7.73	9.44	9.44	9.44
Conductivity (mS/m)	21.0	20.6	21.7	19.3	27.7	20.6	20.6	20.6
Turbidity (NTU)	4.5	6	14	24	10.5	6	6	6
DO (mg L <sup>-1</sup> )	12.8	12	13.7	12.6	10.5	12	12	12
Temperature (°C)	11.4	21.8	20.4	15.6	14.6	21.8	21.8	21.8
Salinity (%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
TDS (g L <sup>-1</sup> )	0.14	0.13	0.14	0.13	0.18	0.13	0.13	0.13
ORP (mV)	557	580	582	541	575	580	580	580
Nitrate-N (mg L <sup>-1</sup> )	0.9	0.008	0.009	0.048	0.071	0.008	0.008	0.008
Nitrite-N (mg L <sup>-1</sup> )	0.1	0.2	0.2	1.4	1.1	0.2	0.2	0.2
Ammonia-N (mg L <sup>-1</sup> )	0.079	0.076	0.060	0.083	0.193	0.076	0.076	0.076
Total Nitrogen (mg L <sup>-1</sup> )	1.5	1.0	0.9	1.7	2.3	0.1	0.1	0.1
Phosphate (mg L <sup>-1</sup> )	0.5	0.5	0.6	1.1	0.5	0.5	0.5	0.5
Total phosphorus (mg L <sup>-1</sup> )	0.13	0.15	0.15	0.24	0.16	0.15	0.15	0.15
TOC (mg L <sup>-1</sup> )	14.3	18.4	17.5	6.9	11.3	18.4	18.4	18.4
<b>Sediment</b>								
pH	6.13	7.11	7.14	6.73	6.97	7.04	8.37	7.68
Temperature (°C)	16.3	15.4	15.5	15.1	15.0	15.5	15.2	15.6
Soil texture	Sand	Sandy Clay	Sandy Clay	Sand	Sandy Clay	Sandy Loam	Sandy Loam	Sandy Loam
% SOM	6.53	5.03	5.48	3.02	1.61	2.2	3.31	2.2

\*DO (Dissolved Oxygen); TDS (Total Dissolved Solid); ORP (Oxidation Reduction Potential); TOC (Total Organic Carbon); SOM (Soil Organic Matter)

로 나타났다. 퇴적물 내의 총중금속 함량은 대상 지역별로 많은 변동성을 보였으며, 특히 도로 인근에 위치한 호수 C의 경우 고농도의 중금속 함량이 측정되었는데, 이는 차량에서 배출된 중금속이 도시유출수의 형태로 호수에 유입된 것으로 예상된다. 전체 대상 지역에서 평균적으로 높은 함량을 보인 중금속은 아연, 구리, 크롬의 순서로 측정되었으며 니켈의 경우 대부분 평균적인 농도가 측정되었다. 그러나 비소의 경우 호수 A에서 208 mg kg<sup>-1</sup>의 높은 함량을, 호수 C에서는 9.6 mg kg<sup>-1</sup>의 낮은 함량을 나타내며 대상 지역별로 높은 변동성을 보였다.

본 연구에서는 도심인공호의 중금속 오염정도를 파악하기 위하여 국내 대형호(자연호)의 중금속 오염농도와 비교분석하였다. 국내 자연호의 측정 자료는 환경부에서 수행한 물환경종합평가방법 개발 조사연구(III) 최종보고서(환경부, 2006)의 퇴적물분야의 자료를 활용하였다. 그 결과 비소는 국내 자연호 측정값에서 대부분 0.4 mg kg<sup>-1</sup> 이하의 값을 나타내었으나, 도심인공호에서는 수배에서 최대 수백 배 이상이 측정되었다. 크롬은 국내 자연호 측정값에서 모두 검출한계 값을 나타내고 있으나, 도심인공호에서는 비소와 유사한 경향을 보였다. 도심인공호간의 비교에서는 인공호 주변에 점오염원이 존재한 지역(B-2)



**Fig. 2.** Ratios of soluble metals (SM) and total metals (TM) in urban lake sediments.

의 값이 높았다. 카드뮴의 경우 국내 자연호 및 도심인공호에서 모두 비슷한 수치를 나타내었으나, 도로가 인접한 도심인공호 B-1과 B-2에서 매우 높은 수치가 검출되었다. 이 결과는 교통량이 많은 지역의 호수에 차량배출원과 관련이 있는 크롬이 높게 검출될 수 있음을 나타낸다.

한편 퇴적물 내의 중금속 용존량을 살펴보면 거의 모든 조사지점에서 크롬이 검출한계 미만으로 측정되었는데, 그 이유는 낮은 수용해도에 기인하는 것으로 판단된다. 나머지 중금속의 경우도 지역별, 물질별로 차이가 있었으나 대부분 용존량은 매우 낮았다. Fig. 2는 퇴적물 내의 총중금속에 대한 용존중금속의 비율을 도출한 결과이다(용존중금속의 경우 검출빈도 이하로 측정되는 경우가 있어 그 비율이 산정되지 않은 경우가 있었다). 용존성 중금속의 비율은 대부분 매우 낮게 산정되었는데, 이는 총중금속 중 극히 일부만 물에 녹을 수 있음을 시사한다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 총량에 대한 용존량의 비율은 카드뮴이 매우 낮았으며 아연과 구리가 비교적 높았으나 비율범위는 주로 3% 미만인 것으로 나타나, 총량대비 용존량은 낮은 것으로 분석되었다.

### 3. 퇴적물 내 총중금속과 생물이용성 중금속의 연관성

약전해질추출기법(WEE)으로 예측된 생물이용성 중금속의 경우 아연이 가장 높은 검출값을 나타내었고, 그 뒤로 구리와 니켈의 순서로 검출되었다. 비소의 경우 그 함량은 비교적 낮게 측정되었으나, 대부분의 지역에서 검출한계 이상으로 나타났으며, 크롬은 용존량과 마찬가지로 한 조사지점을 제외하고는 모두 검출한계 미만으로 나타나서 생물이용성이 낮은 것으로 예상되었다.

Fig. 3A는 총량대비 생물이용량의 비율을 나타낸 것으로, 생물이용량 자체는 아연이 높게 검출되었으나 총량대비 비율로 나타낸 경우 구리가 가장 높게 나타났다. An and Campbell (2003)의 미국 텍사스와 오클라호마 주경에 있는 텍소마 호수(Lake Texoma)를 대상으로 한 총량대비 생물이용량 연구에서도 구리가 가장 생물이용성이 높은 것으로 보고된 바 있다. 이는 조사대상 중금속 중 구리의 생물이용성이 가장 높은 것임을 시사하며, 구리의 생태독성이 다른 중금속에 비해 높다는 기존의 독성연구 결과와도 일치한다. 생물이용성이 높은 구리의 경우 실제 수행된 생태독성실험에서 높은 독성을 나타내고 있다. 대표적인 퇴적물 생태독성실험종인 깔따구(Chironomidae)를 이용한 수체 내 구리의 생태독성 실험 결과는 96시간의 노출 결과  $0.15 \text{ mg L}^{-1}$ 의 반수치사율(LC50)을 보이고 있다(Fargašová., 2001). 또한 퇴적물 내 용존 구리이온의 물벼룩 독성실험에서도  $26 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 높은 독성을 나타내고 있어(Gillis et al., 2006), 구리는 다른 유해중금속과 비교하여 생태 독성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 이는 본 연구결과와도 일맥상통하는 것으로 구리의 높은 생물이용성과 관련이 있을 것으로 판단된다.

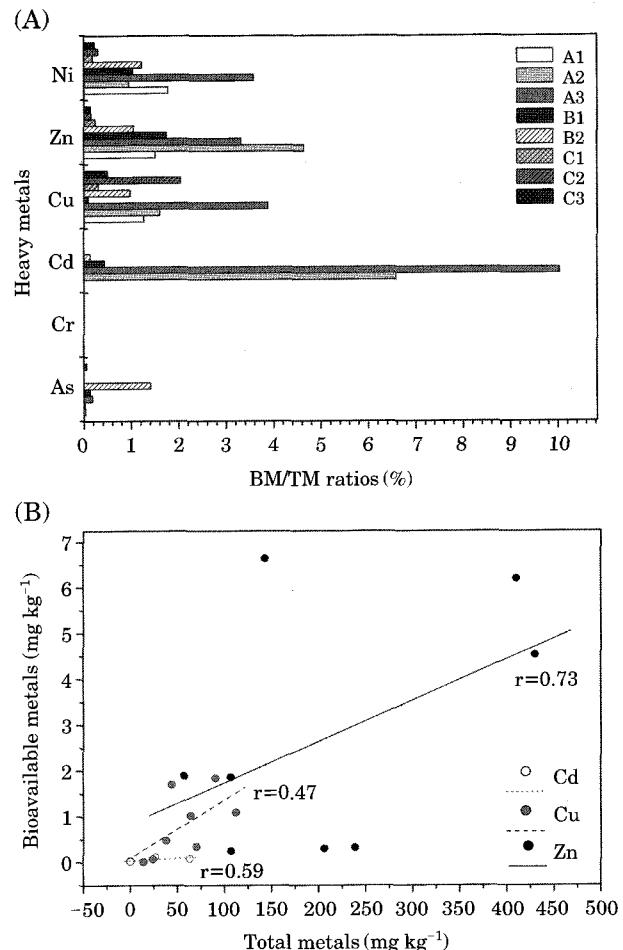


Fig. 3. (A) Ratios of bioavailable metals (BM) and total metals (TM) in urban lake sediments. (B) Correlation between total metals and bioavailable metals of Cd, Cu, Zn, "r" indicates the Pearson's correlation coefficient.

중금속의 총량과 생물이용량에 관한 측정 자료를 토대로 Pearson의 상관도 분석법을 수행한 결과 조사대상 중금속 6종 중 아연( $r=0.73$ ), 카드뮴( $r=0.51$ ), 구리( $r=0.47$ )가 비교적 연관성이 있는 것으로 나타났으며, 특히 아연의 연관성이 가장 높은 것으로 나타났다(Fig. 3B). 한편 상관성이 거의 없는 중금속은 니켈( $r=0.34$ )과 비소( $r=0.08$ )로 나타났으며, 크롬은 물이나 약전해질에 거의 녹지 않기 때문에 총중금속을 제외한 용존중금속 및 생물이용성 중금속 농도가 대부분 검출한계 미만으로 나타났으므로 상관성 분석이 불가능하였다. 결론적으로 중금속의 총량과 생물이용량은 중금속 종류별로 차이가 있으며, 향후 중금속 연구는 총량과 함께 생물이용량 측정이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 조사지점이 도심 인공호이므로 관리인에 의해 시료채취를 제한당하는 경우가 있어 그 자료수가 많지 않다는 제한성을 가지고 있다. 그러나 국내에서 도심 인공호를 대상으로 유해중금속의 총량, 용존량, 생물이용량에 대한 연관성을 분석한 첫 시도이고, 추가적인 관련 연구의 기초 자료로 활용성이 높을 것으로 생각된다.

## 적  요

대도시의 기본 생활수준 향상을 위해 건립된 인공호는 지역적 환경요인에 의한 퇴적물 중금속 오염이 우려된다. 본 연구의 퇴적물 조사대상인 도심의 소형인공호들은 저수용량이 적고, 체류시간이 길며, 도시대기오염으로 인한 침적물낙하와 함께 호수에 유입될 수 있는 중금속이 최종적으로 퇴적물에 축적된다. 본 연구에서는 도시지역에 조성된 인공호를 대상으로 퇴적물매체에 축적된 총중금속, 용존중금속, 그리고 생물이용성 중금속의 상호연관성을 규명하고자 시도하였다. 생물이용량은 약전해질추출법(Weak-Electrolyte Extraction, WEE)에 의해 측정하였다. 도심인공호 전체 조사지역에 대한 퇴적물의 총중금속 검출빈도는 아연, 구리, 크롬, 니켈, 비소, 카드뮴 순으로 확인되었고, 총량에 대한 검출은 아연이 가장 높은 수치를 나타내었다. 총중금속에 대한 생물이용성 중금속의 비율은 중금속별, 축정지역별로 매우 상이하였으며 전반적으로 중금속의 생물이용성은 구리(Cu)가 높은 것으로 나타났다. 높은 생물이용성을 나타낸 구리의 경우 기존 독성연구 결과와 비교한 결과 높은 생태독성을 나타내고 있어 본 연구에서 예측한 현상을 지지하고 있으나, 차후 생물검정법(Bioassay)을 통한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

## 사  사

이 논문은 2005년 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2005-015-C00501).

## 인  용  문  헌

김경웅, 이현구. 1996. 대전지역 하천수 및 하상퇴적물에서의 중금속오염, 한국자원공학회지 33: 266-273.  
김기현, 조진형, 박남준. 2000. 낙동강 하구역 퇴적물 중금속의

- 분포와 오염의 역사 추정, 한국해양학회지 5: 285-294.  
김호섭, 박제철, 황순진. 2003. 수심이 얕은 부영양 인공호(일감호)의 동·식물플랑크톤 동태학, 육수지 36: 286-294.  
양한섭, 김성수. 1994. 수영만 퇴적물의 퇴적속도와 중금속 오염, 한국수산학회지 27: 643-658.  
전상호. 1990. 한강퇴적물에 함유된 오염물질의 존재형태와 이동성에 관한 연구, 육수지 23: 32-42.  
한국환경정책평가연구원. 1998. 호수 및 하천 오염퇴적물 관리 방안. p. 87-107.  
한국환경정책평가연구원. 2000. 수서퇴적물 환경기준 개발에 관한 연구. p. 64-77.  
홍혁기, 박종민, 김동훈, 임홍빈. 2005. 시화호 표층퇴적물의 중금속 분석, 한국환경분석학회지 8: 1-6.  
환경부, 국립환경과학원. 2006. 물환경종합평가방법 개발 조사 연구(III)-퇴적물 조사 및 평가체계 연구. p. 171-185.  
An, Y.-J. 2004. Soil ecotoxicity assessment using cadmium sensitive plants. *Environ. Pollut.* 127: 21-26.  
An, Y.-J. and D.H. Campbell. 2003. Total, dissolved, and bioavailable metals in Lake Texoma Marinas. *Environ. Pollut.* 122: 253-259.  
APHA. 1995. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. Port City Press, Maryland.  
Caruso, J.A. and M.M. Bayon. 2003. Elemental speciation studies-new directions for trace metal analysis. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 56: 148-163.  
Davis, A. and J.N. Galloway. 1993. Distribution of Pb between sediments and pore water in Woods Lake, Adirondack State Park, New York, U.S.A. *Appl. Geogr.* 8: 51-65.  
Fargašová, A. 2001. Winter Third-to Fourth-Instar Larvae of *Chironomus plumosus* as Bioassay Tools for Assessment of Acute Toxicity of Metals and Their Binary Combinations. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 48: 1-5.  
Gillis, P.L., C.M. Wood, J.F. Ranville and P.C. Fraser. 2006. Bioavailability of sediment-associated Cu and Zn to *Daphnia magna*. *Aquat. Toxicol.* 77: 402-411.  
Gioia, S.M.C.L., M.M. Pimentel and M. Tessler. 2006. Sources of anthropogenic lead in sediments from an artificial lake in Brasilia-central Brazil. *Sci. Total Environ.* 365: 125-142.  
Girling, A.E., L. Tattersfield, G.C. Mitchell, N.O. Crossland, D. Pascoe, S.J. Blockwell, S.J. Maund, E.J. Taylor, A. Wenzel, C.R. Janssen and I. Jüttner. 2000. Derivation of predicted no-effect concentrations for lindane, 3,4-dichloroaniline, atrazine, and copper. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 46: 148-162.  
Hamilton, M.A., R.C. Russo and R.V. Thurston. 1977. Trimmed Spearman-Karber method for estimating median lethal concentrations in toxicity bioassays. *Environ. Sci.*

- Tech. 11: 714-719, Correction 12: 417.
- Lu, X.Q., I. Werners and T.M. Young. 2005. Geochemistry and bioavailability of metals in sediments from northern San Francisco Bay. *Environ. Int.* 31: 593-602.
- Oremland, R.S. and J.F. Stoltz. 2003. The ecology of arsenic. *Science* 300: 939-944.
- Pascual, J.A., C. Garcia, T. Hernandez, J.L. Moreno and M. Ros. 2002. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biol. Biochem.* 32: 1877-1883.
- Rigollet, V., A. Sfriso, A. Marcomini and M.L. De Casabianca. 2004. Seasonal evolution of heavy metal concentrations in the surface sediments of two Mediterranean *Zostera marina* L. beds at Thau lagoon (France) and Venice lagoon (Italy). *Bioresource Technol.* 95: 159-167.
- Roach, A.C. 2005. Assessment of metals in sediments from Lake Macquarie, New South Wales, Australia, using normalization models and sediment quality guidelines. *Mar. Environ. Res.* 59: 453-472.
- US EPA. 1976. Quality criteria for water. PB-263 943. National technical information service, Washington, DC.
- US EPA. 1998. Guidelines for ecological risk assessment. EPA/630/R-95/002F. Risk assessment forum, Washington, DC.
- van den Berg, G.A., J.P.G. Loch, J.J.G. Zwolsman and L.M. van der Heijdt. 1998. Non-steady state behaviour of heavy metals in contaminated freshwater sediments. *Water Sci. Technol.* 37: 39-46.

(Manuscript received 27 February 2008,  
Revision accepted 16 March 2008)