

# 완전분해와 전분해 방법에 의한 영산강·섬진강수계 퇴적물의 중금속농도 상관관계 Correlation of Heavy Metal Concentrations between Total Digestion and Aqua Regia Digestion for Sediments from Yeongsan and Seomjin Watersheds

오다연·최경균·허인애\*·황인성\*\*·김영훈\*\*\*

허진\*\*\*\*·신현상\*\*\*\*\*·오정은\*\*·신원식\*\*\*\*\*·박정훈†

Da-Yeon Oh · Kyoung-Kyoon Choi · In-Ae Huh\* · Inseong Hwang\*\* · Young-Hoon Kim\*\*\*

Jin Hur\*\*\*\* · Hyun-Sang Shin\*\*\*\*\* · Jeong-Eun Oh\*\* · Won-Sik Shin\*\*\*\*\* · Jeong-Hun Park†

전남대학교 환경공학과 · \*국립환경과학원 물환경제어연구과 · \*\*부산대학교 사회환경시스템공학부 · \*\*\*안동대학교 환경공학과

\*\*\*\*세종대학교 환경에너지융합학과 · \*\*\*\*\*서울과학기술대학교 환경공학과 · \*\*\*\*\*경북대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Chonnam National University · \*National Institute of Environmental Research

\*\*Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University · \*\*\*Department of Environmental Engineering,

Andong National University · \*\*\*\*Department of Environmental and Energy, Sejong University

\*\*\*\*\*Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

\*\*\*\*\*Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

(2010년 12월 11일 접수, 2011년 1월 14일 채택)

**Abstract :** In this study, the correlations of concentrations in sediment heavy metals between two pretreatment methods, total digestion and aqua regia digestion, have been investigated. Total 43 samples had been collected from streams and lakes in Yeongsan and Seomjin watersheds. They were decomposed in two pretreatment methods and five metal components (Cd, Cr, Ni, Pb, Zn) were analyzed. Overall average concentrations of heavy metals were Zn>Cr>Pb>Ni>Cd in the order. The concentrations of aqua regia digestion were 35.0% (Cd), 53.8% (Cr), 66.2% (Ni), 64.4% (Pb) and 76.4% (Zn) of the concentrations of total digestion and heavy metal concentrations of total digestion were higher. Heavy metal concentrations in sediments from lakes were higher than those from streams. The correlation equations between the concentrations of total digestion and aqua regia digestion were obtained. The concentrations of Zn and Ni, which showed strong linear correlations, increased in aqua regia digestion as the concentration in total digestion increased. The linear correlation coefficients between two digestion methods for most analyzed metals were above the average correlation. However, these results can be applied with limitations due to heterogeneity of sediments.

**Key Words :** Yeongsan River, Sediment, Heavy Metals, Total Digestion, Aqua Regia Digestion, Correlation

**요약 :** 본 연구에서는 완전분해와 전분해 전처리 방법에 따른 중금속 농도 사이에 대한 상관관계를 알아보고자 하였다. 영산강·섬진강 수계 하천 및 호소에서 총 43점의 퇴적물 시료를 채취하여, 두 방법으로 전처리하고 5성분의 금속(Cd, Cr, Ni, Pb, Zn)을 분석하였다. 전체적인 중금속의 평균농도는 Zn>Cr>Pb>Ni>Cd 순으로 나타났으며, 전분해 값은 완전분해 값의 35.0% (Cd), 53.8% (Cr), 66.2% (Ni), 64.4% (Pb), 76.4% (Zn)로 완전분해시 중금속 농도가 높게 나타났다. 호소의 중금속 농도가 하천의 농도보다 높게 나타났다. 완전분해와 전분해 농도 사이의 상관관계식을 구하였으며, 강한 상관관계를 가지는 것을 나타낸 Zn 및 Ni의 경우 완전분해 농도가 증가할 경우 왕수에 의한 용출농도도 같이 증가하는 것으로 나타났다. 나머지 중금속들에서도 두 분해법에 의한 퇴적물의 중금속농도 사이에 보통이상의 선형상관관계가 있는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 퇴적물의 불균질성으로 인해 제한적으로 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주제어 :** 영산강, 퇴적물, 중금속, 완전분해, 전분해, 상관관계

## 1. 서론

대도시 인근 하천은 인간활동과 밀접한 관계를 이루며 하천으로부터 유입되는 다양한 유해물질들은 수중생태계 및 하상에 퇴적되는 퇴적물을 오염시켜 수중 환경을 비롯한 전 지구적인 환경에 변화를 가져온다.<sup>1)</sup> 퇴적물은 유수(fluid flow)에 의해 이동한 입자들이 하천 및 호소 바닥에 침전되어 누적된 입자이며, 하천이나 호소의 상태에 따라 수질에 중요한 영향을 미칠 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 특히 우리나라는 집중 강우시 퇴적물이 하천 하류나 호소

바닥층으로 이동하여 축적되는데, 이들 퇴적물로부터 독성 오염물질이 용출될 경우 하천 및 호소의 수질에 심각한 영향을 미치기도 한다.

하천 및 호소 오염에 대한 연구들은 대체적으로 수질을 주 대상으로 활발하게 진행되고 있는데, 하천환경을 전체적으로 이해하기 위해서는 하상퇴적물 내의 농약, PCBs, PAHs, VOCs와 같은 유기화합물, 질소와 인과 같은 영양염류, 중금속 등의 다양한 오염물질의 거동을 살피는 것이 중요하다. 이들 오염물질은 다양한 환경조건에 따라 흡착, 탈착, 이온교환, 침전, 가수분해, 미생물 활동과 같은 메커니즘을

† Corresponding author E-mail: parkjeol@jnu.ac.kr Tel: 062-530-1855 Fax: 062-530-1859

통하여 퇴적층에 누출되거나 수계로 용출된다. 특히 하상 퇴적물 내의 중금속은 하천수에 비해 함량이 높아 지속적인 환경영향을 평가하는데 보다 적절한 지구화학적 매개체이다. 또한 하상퇴적물 내 중금속은 존재형태에 따라 물리화학적 환경의 변화에 의해 중금속이 재용출 될 수도 있다.<sup>2)</sup> 이는 pH, ORP, DO 농도 등 하천 및 호소의 환경적 요인과 유량, 유속, 조도계수 등 수리적 요인에 의해 영향을 받으며, 이 때 오염물질의 저장 및 유출원으로서 퇴적물의 역할은 매우 중요하다. 따라서, 퇴적물의 오염특성과 이로 인한 하천 및 호소 수질과의 상호관계를 면밀히 분석하여 용출된 오염물질로부터의 환경피해를 최소화하고, 하천 및 호소 수질관리 및 효율적인 저층관리에 대한 기초자료를 제공할 수 있는 연구가 필요하다.

최근 들어 우리나라의 하천 및 호소 퇴적물로 인한 수질 오염에 대한 인식이 높아지면서 퇴적물 관련 연구가 진행되고 있다.<sup>3-6)</sup> 그러나 아직까지 퇴적물 환경기준설정 등을 비롯한 오염퇴적물의 영향평가, 퇴적물 오염방지를 위한 방안, 오염된 퇴적물의 제거 및 처리를 위한 지침, 환경을 고려한 퇴적물의 처리방안 등 퇴적물 관리와 관련된 모든 분야에 걸쳐 관리기준이 설정되어 있지 않은 상황이다.<sup>7)</sup> 또한, 퇴적 환경 및 하상퇴적물 중에 함유된 금속성분들의 지구화학적 특성 및 오염에 관한 연구들은 상대적으로 저조한 실정이다.<sup>1,8,9)</sup> 퇴적물 연구조사 활성화 및 신뢰성 확보를 위하여 국내 실정에 맞는 하천 및 호소 퇴적물의 시료채취 및 분석방법을 확립하고 정리하는 작업이 필요하다.

현재 국내 하천 및 호소 퇴적물에 대한 중금속 분석방법 기준이 뚜렷하게 확립되어 있지 않은 상태로 해양환경공정시험방법과 토양오염공정시험기준이 퇴적물 분석에 준용되고 있다. 이들 두 시험 기준의 전처리 방법들이 다르기 때문에 즉, 해양환경공정시험 방법에서는 퇴적물 완전분해(Total digestion)를 토양오염공정시험 기준에서는 전분해(Aqua regia digestion)를 전처리 방법으로 선택을 하고 있기 때문에 측정분석결과 값 해석에서 혼란이 야기되고 있다. 이들 두 분석값 차이에 대한 국내 연구가 미미한 상태이며, 따라서 이들 값 사이에 대한 국내 상관관계에 대한 연구가 절실히 필요한 상태이다. 이들에 대한 상관관계가 존재할 경우 상관관계식을 통한 두 측정값 차이에 대한 분석 및 해석이 가능할 수도 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 두 공정시험 기준에서 제시하는 전처리 방법을 통하여 하천 및 호소 퇴적물의 중금속을 분석하고, 두 전처리 방법에 따른 분석값 사이의 상관관계를 연구하고자 하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1. 시료조사지점 선정 및 시료채취

#### 2.1.1. 조사지점선정

영산강·섬진강의 하천 및 호소지점을 기반으로 『퇴적물 측정망 운영 기본계획('07.12)』의 전국기본측정망(하천 111

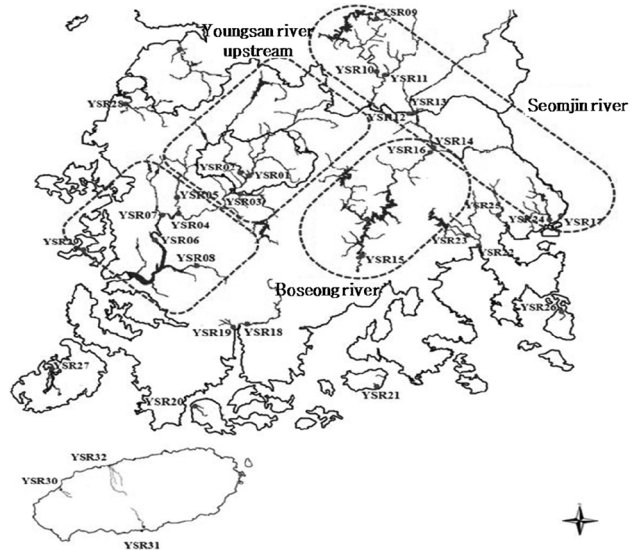


Fig. 1. Stream sediment sampling points.

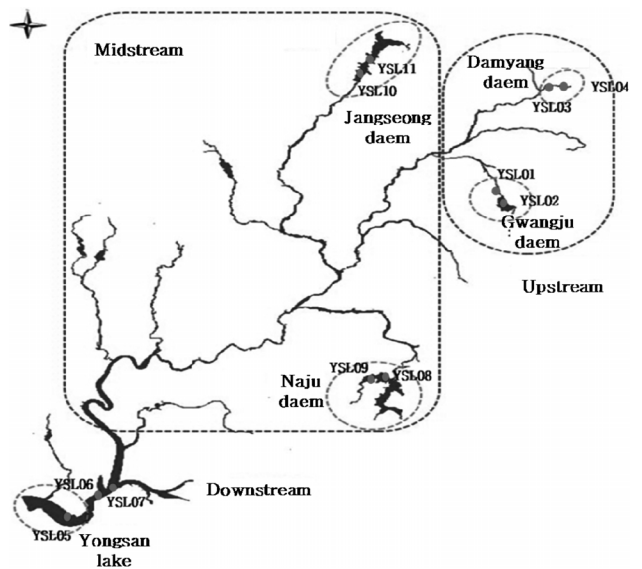


Fig. 2. Lake sediment sampling points.

개소, 호소는 분류구간 28개 호소)을 고려하여 영산강·섬진강 유역 하천의 수질측정망에 인접한 지역 32개, 각 하천의 분류구간 호소의 11개 장소를 시료채취 지점으로 선정하고<sup>10)</sup> 각 채취지점 및 시료번호를 Fig. 1과 Fig. 2에 도식하였다.

#### 2.1.2. 시료채취

퇴적물 시료의 시료채취는 그랩채취기(Grab sampler)를 이용하여 1지점에서 3회 이상 시료를 채취하여 플라스틱, 나무 등의 이물질 제거 후, 폴리에틸렌병에 담아 냉장상태로 실험실로 운반하였다. 채취된 시료는 자연 건조시킨 후 눈금간격 0.15 mm의 표준체(100 mesh)로 체 걸음하여 산분해 시료로 하였다.

### 2.2. 시험방법

Table 1. Sequential extraction tests

Fraction	Extractant	Extraction conditions	SSR <sup>a</sup>	Wash step
1	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0.05 M)	4 h shaking, 20°C	1:25	
2	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> (0.05 M)	16 h shaking, 20°C	1:25	
3	(NH <sub>4</sub> )-oxalate buffer (0.2 M); pH3.25	4 h shaking in the dark, 20°C	1:25	NH <sub>4</sub> -oxalate (0.2 M); pH 3.25 SSR 1:12.5; 10 min shaking in the dark
4	(NH <sub>4</sub> )-oxalate buffer (0.2 M) + ascorbic acid (0.1 M) pH 3.25	30 min in a water basin at 96±3°C in the light	1:25	NH <sub>4</sub> -oxalate (0.2 M); pH 3.25 SSR 1:12.5; 10 min shaking in the dark
5	HNO <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Microwave digestion	1:50 <sup>b</sup>	

<sup>a</sup>SSR: soil solution ratio<sup>b</sup>After the digestion

전처리는 국토해양부의 해양환경공정시험방법(완전분해)과 환경부의 토양오염공정시험기준(전분해)에 준하여 실시하였다.<sup>11,12)</sup> 즉, 해양환경공정시험방법에 따른 완전분해방법에서는 HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub> 및 HF를 이용하여 퇴적물을 완전분해 하였으며,<sup>11)</sup> 토양오염공정시험기준에 따른 전분해 방법에서는 왕수를 이용하여 퇴적물을 부분적인 산분해를 하였다.<sup>12)</sup> 각 분해처리 후 분해액은 syringe filter (0.45 μm pore)로 여과 후 유도결합 플라즈마-원자발광분광계(ICP-AES)로 분석하였다.<sup>12)</sup> 분석한 중금속 항목은 Cd, Cr, Ni, Pb, Zn을 측정하였다.

연속추출실험은 퇴적물 시료 중 10개 지점(하천 6개, 호소 4개 지점)을 선정하여 Wenzel et al.<sup>13)</sup>의 방법에 따라 비특이적 흡착, 특이적 흡착, 무정형 철 및 알루미늄 수산화물, 결정형 철 및 알루미늄 수산화물, 잔류태 등 5가지 형태로 추출하였다.<sup>13)</sup> 중금속 존재형태별 분석방법은 Table 1에 요약하여 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 조사지점 특성

하천 퇴적물은 뿔질에서 모래/자갈질까지 입자의 크기가 다양하였고, 호소 퇴적물은 대부분 뿔질 및 실트질로 구성되어 있었으며, 자갈이나 모래질은 포함되어 있지 않았다.

#### 3.2. 전처리 방법에 따른 중금속 농도

전처리 방법에 따라 분석한 퇴적물 시료를 하천과 호소로 구분하여 중금속별 평균농도를 Table 2에 나타냈다. 하천 퇴적물의 경우 완전분해 및 전분해시 평균농도는 각각 Cd 0.250 mg/kg, 0.096 mg/kg, Cr 34.2 mg/kg, 18.1 mg/kg, Ni 17.5 mg/kg, 12.1 mg/kg, Pb 21.3 mg/kg, 13.5 mg/kg, Zn 63.2 mg/kg, 52.4 mg/kg로 나타났다. 그리고 호소 퇴적물의 경우 완전분해 및 전분해시 평균농도는 각각 Cd 0.590 mg/kg, 0.181 mg/kg, Cr 38.3 mg/kg, 21.4 mg/kg, Ni 18.7 mg/kg, 10.9 mg/kg, Pb 30.5 mg/kg, 20.3 mg/kg, Zn 80.7 mg/kg, 49.7 mg/kg로 나타났다.

평균농도를 중금속별 전분해 농도 대 완전분해 농도의 비로 보면, 하천 퇴적물의 경우 38.4%에서 82.9%, 호소 퇴적

Table 2. Metal average concentrations in sediments studied

Component	Average concentration (mg/kg)					
	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn	
River	Total digestion	0.250 (0.266)	34.2 (21.9)	17.5 (17.1)	21.3 (13.0)	63.2 (37.9)
	Aqua regia digestion	0.096 (0.0612)	18.1 (9.93)	12.1 (18.5)	13.5 (12.3)	52.4 (52.2)
	Ratio(%)	38.4	52.9	69.1	63.3	82.9
Lake	Total digestion	0.590 (0.135)	38.3 (10.3)	18.7 (5.43)	30.5 (6.30)	80.7 (17.1)
	Aqua regia digestion	0.181 (0.0382)	21.4 (7.37)	10.9 (3.63)	20.3 (4.14)	49.7 (16.5)
	Ratio (%)	30.6	55.8	58.2	66.5	61.5
Total	Total digestion	0.337 (0.281)	35.3 (19.6)	17.8 (14.9)	23.6 (12.3)	67.6 (34.5)
	Aqua regia digestion	0.118 (0.0672)	19.0 (9.38)	11.8 (16.0)	15.2 (11.2)	51.7 (45.6)
	Ratio (%)	35.0	53.8	66.2	64.4	76.4

\*Parenthesis: Standard deviation

물의 경우 30.6%에서 66.5%의 범위로 전분해 보다 완전분해 방법으로 퇴적물 시료를 전처리하였을 때 중금속의 농도가 높게 용출되었으며, 하천 및 호소 퇴적물에서 Cd의 경우 가장 낮은 비율로 나타났으며, 하천 퇴적물에서는 Zn이 호소 퇴적물에서는 Pb의 비율이 가장 높게 나타났다. 또한, 완전분해시 하천 퇴적물보다 호소 퇴적물에서 중금속의 평균농도가 1.07~2.36배 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

전체평균농도는 완전분해 및 전분해시 각각 Cd 0.337 mg/kg, 0.118 mg/kg, Cr 35.3 mg/kg, 19.0 mg/kg, Ni 17.8 mg/kg, 11.8 mg/kg, Pb 23.6 mg/kg, 15.2 mg/kg, Zn 67.6 mg/kg, 51.7 mg/kg으로 나타났다. 즉, 각 중금속의 전분해 값은 완전분해 값의 35.0% (Cd), 53.8% (Cr), 66.2% (Ni), 64.4% (Pb), 76.4% (Zn)으로 나타났다. 전처리 방법에 관계없이 하천 및 호소에서 Zn>Cr>Pb>Ni>Cd의 농도 순으로 Zn의 농도가 가장 높고 Cd의 농도가 가장 낮은 것으로 나타났다.

또한, Fig. 3의 중금속별 농도분포도를 통해서도 중금속에 따라 차이는 있으나 분석한 대부분 시료가 전분해 보다 완전분해 방법으로 전처리시 농도가 높게 나타났고 완전분해 및 전분해 방법 모두에서 하천시료 보다는 호소시료에

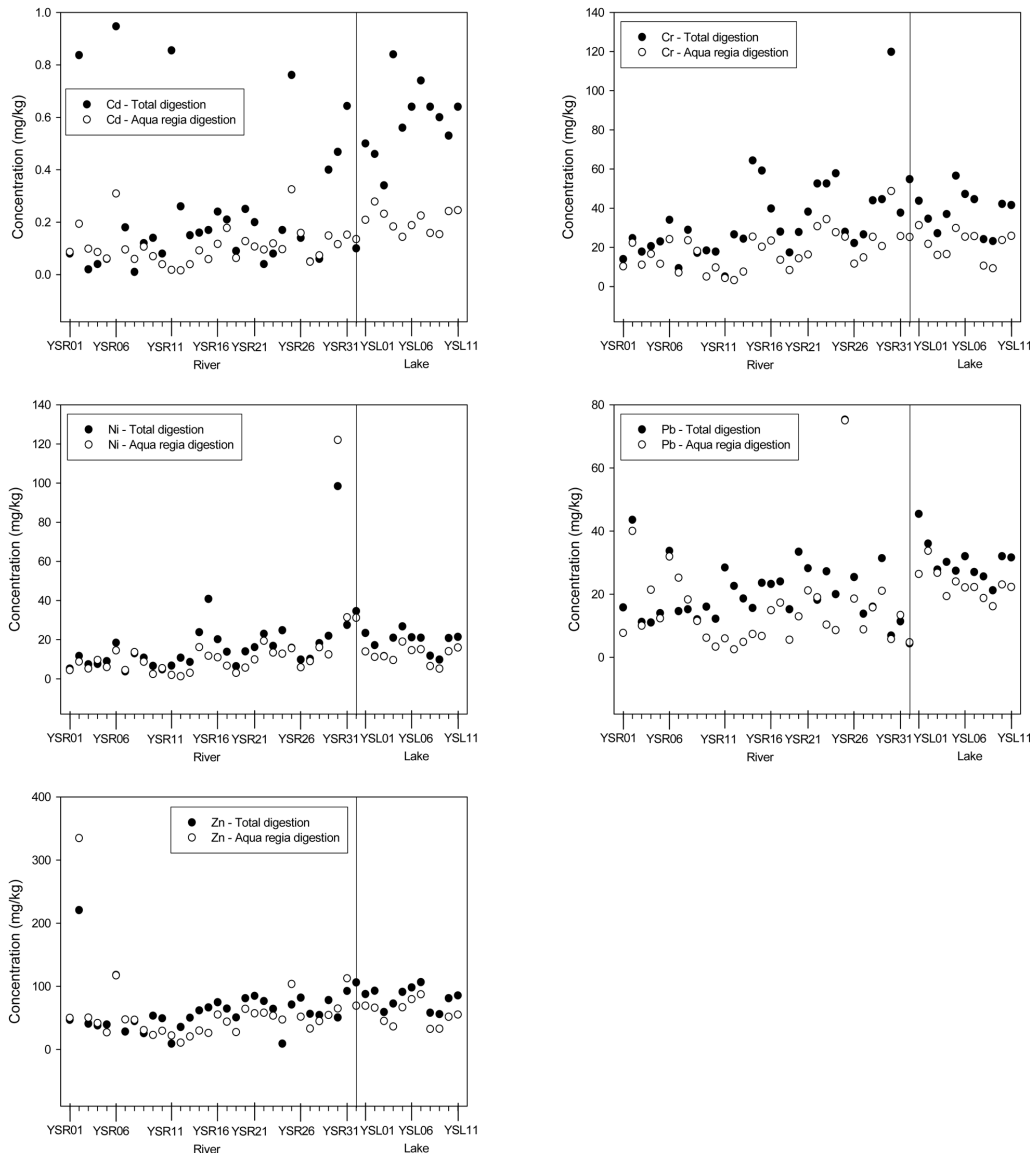


Fig. 3. Heavy metal concentrations in sediments from two pretreatment methods.

서 중금속의 농도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

두 전처리 방법에 의한 농도의 차이는 분해시 사용한 산의 종류에 따른 것으로 완전분해시 불산(HF)에 의해 전분해에서는 분해되지 않는 실리카 성분을 분해하기 때문에 중금속 농도가 더 높게 나오는 것으로 알려져 있다.<sup>14-16)</sup> 또한, 호소 퇴적물은 주로 실트/펄질로 구성되어 하천 퇴적물에 비해 미세입자로 구성되어 있었으며, 상대적으로 높은 중금속 농도를 보여 호소에서 중금속 축적이 일어나는 것으로 사료되며, 특히 Cd와 Pb의 축적이 높은 것으로 나타났다.

퇴적물의 중금속 농도 범위는 다른 연구에서도 이와 유사한 결과를 찾아볼 수 있었다.<sup>9,12,17,18)</sup> 국토해양부<sup>19)</sup>의 연구에서 남해안 여러 해역 중금속 배경농도를 구하였으며, 중금속의 농도를 구하기 위해 퇴적물을 혼합산(HF, HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)으로 완전분해 전처리 후 분석하였다.<sup>19)</sup> 분석결과 Zn (60~110 mg/kg)>Cr (30~60 mg/kg)>Pb (10~26 mg/

kg)>Ni (15~23 mg/kg)>Cd (N.D~0.1 mg/kg)의 농도 범위를 보였다. 본 연구에서의 분석결과와 유사한 농도값을 보였으며, Cd을 제외한 모든 중금속의 평균값이 이들 농도범위에 포함되었다.<sup>19)</sup>

임동일<sup>18)</sup> 등의 연구에서 한국 연안 퇴적물을 혼합산(HF, HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub>)으로 완전분해 전처리하여 중금속의 농도를 분석하였다.<sup>18)</sup> 분석결과 연안퇴적물에서 중금속의 평균농도가 Zn (76.3 mg/kg)>Cr (53.4 mg/kg)>Pb (26.5 mg/kg)>Ni (22.5 mg/kg)>Cu (21.9 mg/kg)으로 나타났다. 조영길<sup>9)</sup> 등의 연구에서 혼합산(HF, HClO<sub>4</sub>, HCl)을 이용한 완전분해를 통하여 영산강 하상 퇴적물내 중금속농도를 분석하였으며, 분석결과 평균농도가 Zn>Cr>Pb>Cu>Ni 순인 것으로 발표하였다.<sup>9)</sup>

또한, 윤정기<sup>17)</sup> 등의 연구에서는 왕수시험방법에 의한 산림토양의 자연함유량 중금속 평균값은 Zn (54.2 mg/kg)>Cr (25.3 mg/kg)>Pb (18.4 mg/kg)>Ni (17.68 mg/kg)>Cd (0.287

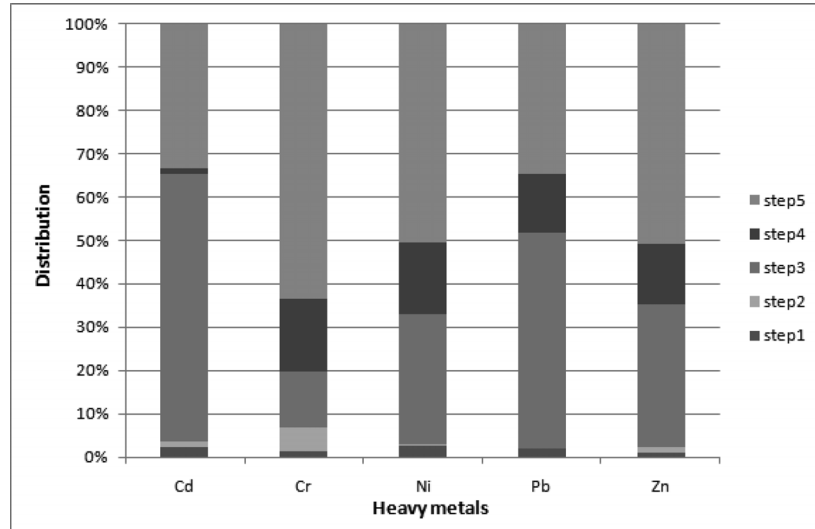


Fig. 4. Distribution percents (%) of heavy metals in each fraction of sediment, step1: non-specifically sorbed; step2: specifically sorbed; step3: amorphous and poorly-crystalline hydrous oxides of Fe and Al; step4: well-crystalline hydrous oxides of Fe and Al; step5: residual.

mg/kg)으로 발표하였으며,<sup>17)</sup> 이는 본 연구와 동일한 중금속 농도 순서이다. 그러므로 위 중금속 농도 순서는 국내 자연 환경에 존재하는 토양 및 퇴적물의 중금속의 농도 순인 것으로 사료된다.

### 3.3. 연속추출실험

각 중금속별 존재형태 분석을 위해 하천퇴적물 6개와 호소 퇴적물 4개 시료에 대해 연속추출실험을 실시하였으며, 연속추출실험의 결과를 중금속별 평균값으로 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 각 중금속별 존재형태 비율이 모두 다르게 나타났다. 예를 들어 5단계(잔류형태)에 존재하는 Cd와 Cr, Ni, Pb, Zn은 각각 33.3%, 63.4%, 50.4%, 34.7%, 50.9%로 나타났다. 즉, 각 중금속별 존재형태가 모두 달리 나타난 것이 두 전처리 방법에서 중금속별 전분해 값과 완전분해 값의 비가 각각 다르게 나타나는 결과로 사료된다.

### 3.4. 상관관계

완전분해와 전분해에 대한 중금속별 농도 상관관계를 구하고 분석하기 위해 피어슨 상관계수(Pearson's Correlation Coefficient,  $r$ ), 결정계수(Coefficient of Determination,  $r^2$ ) 및 회귀직선식( $y=\alpha x+\beta$ )을 이용하였고, 이를 Table 3에 나타냈다.

회귀직선식을 이용하여 분석시 상관계수( $r$ )는 절대값의 범위가  $0 < r < 0.1$ 이면 거의 무시될 수 있는 선형관계,  $0.1 < r < 0.3$  약한 선형관계,  $0.3 < r < 0.7$  보통 선형관계,  $0.7 < r < 1.0$  강한 선형관계로 표현한다.<sup>20,21)</sup> 결정계수는 회귀직선식의 적합도 검사에 이용되며 1에 가까울수록 좋은 회귀모형이라고 판단되며, 회귀직선식의 기울기값( $\alpha$ )이 클수록 완전분해 값이 증가할 때 전분해 값도 기울기에 비례하여 같이 증가하는 것을 의미한다.

Table 3. Correlation and determination coefficients between concentrations obtained from two digestion methods

	Heavy metal	IRI <sup>a</sup>	R <sup>2</sup> <sup>b</sup>	Slop( $\alpha$ ) <sup>c</sup>	Intercept( $\beta$ ) <sup>c</sup>
River	Cd	0.602	0.362	0.138	0.061
	Cr	0.858	0.737	0.388	4.81
	Ni	0.940	0.884	1.01	-5.56
	Pb	0.821	0.674	0.888	-3.04
	Zn	0.873	0.762	1.20	-23.51
Lake	Cd	0.358	0.128	-0.100	0.240
	Cr	0.907	0.823	0.645	-3.28
	Ni	0.857	0.735	0.573	0.194
	Pb	0.614	0.377	0.403	8.04
	Zn	0.939	0.883	0.908	-23.6
Total	Cd	0.656	0.431	0.156	0.065
	Cr	0.855	0.732	0.410	4.52
	Ni	0.934	0.872	0.997	-5.90
	Pb	0.823	0.678	0.750	-2.48
	Zn	0.845	0.715	1.11	-23.8

<sup>a</sup> R : correlation coefficient

<sup>b</sup> R<sup>2</sup> : determination coefficient

<sup>c</sup> Linear regression line,  $Y = \alpha X + \beta$

Table 3에서 상관계수 분석결과 Cd은 하천 및 호소 퇴적물 모두에서 Pb은 호소 시료에서 보통 선형관계를 나타내고 나머지 중금속들은 강한 선형관계를 가지는 것으로 나타났다. 완전분해 농도와 전분해 농도 사이의 직선식에 대한 결정계수는 Ni (0.872)>Cr (0.732)>Zn (0.715)>Pb (0.678)>Cd (0.430) 순으로 나타났다. Ni의 회귀모형이 가장 좋은 것으로 나타났으며, Cd이 가장 낮은 결정계수를 보였다. 전체적인 기울기 값은 Zn (1.11)>Ni (0.997)>Pb (0.750)>Cr (0.410)>Cd (0.156) 순으로 나타났다. 즉 Zn 및 Ni의 경우 완전분해에서 이들 함유량이 증가할 경우 왕수에 의한 용출농도도 같이 증가함을 알 수 있으며, Cd의 경우 완전분

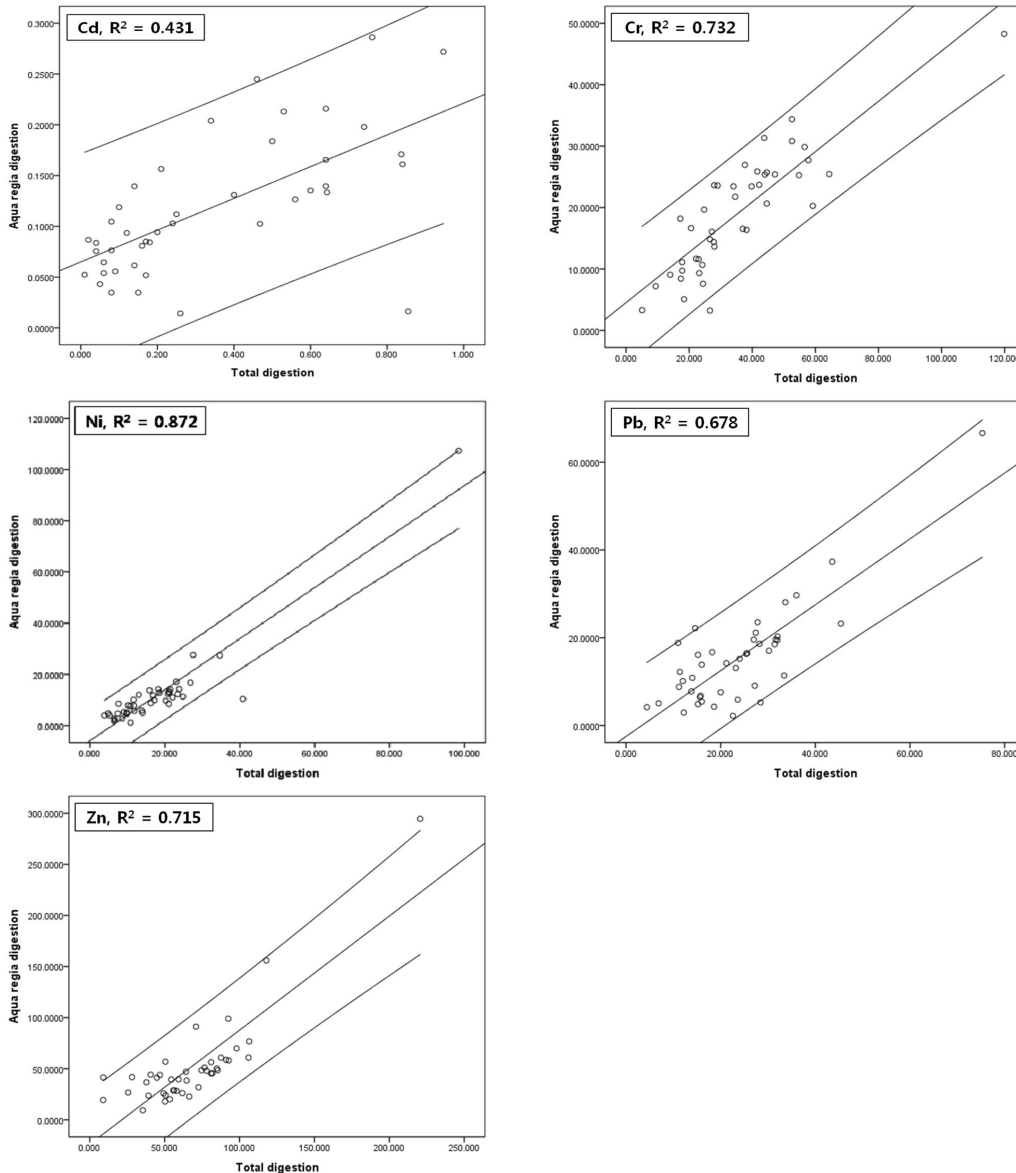


Fig. 5. Linear regression with 95% confidence interval lines between two pretreatment methods.

해에서 Cd 함유량이 증가하여도 왕수에 의한 용출농도 증가는 상당히 제한적임을 알 수 있다.

중금속 농도 분포에 따른 회귀직선식 및 95% 신뢰구간을 Fig. 5에 나타냈다. 상관계수 및 결정계수 값이 클수록 회귀직선 주변에 분석 값들이 모여있고 95% 신뢰구간이 좁아지면서 두 전처리 분석방법 사이에 강한 상관관계를 나타냈다. Ni의 경우 상관관계식에 의한 선 주변에 농도 값들이 모여있고, Cd의 경우 농도 값들이 선 주변에 산만하게 흩어져 있는 것으로 나타났다.

회귀직선식, 상관계수 및 결정계수 분석을 통하여 완전분해와 전분해에 의한 퇴적물의 중금속농도 사이에 보통이상의 선형상관관계가 있는 것으로 나타났다. 특히, Ni, Cr 및 Zn의 경우 하천과 호소 퇴적물 모두에서 강한 선형상관관계가 있는 것으로 나타났다. 그러므로 영산강 섬진강 수계 퇴적물은 본 연구에서 제시한 상관관계식을 이용하여

Ni과 Cr, Zn의 경우 토양오염공정시험기준에 따라 전처리한 전분해 중금속 농도를 구할 경우 해양오염공정기준에 따른 완전분해에 의한 중금속 농도를 대략적으로 예측할 수 있고, 또는 그 역으로 전분해 농도를 예측 할 수도 있을 것이다. 그러나, 퇴적물의 불균질적인 특성으로 인해 오차가 본 연구를 초과하여 충분히 벗어날 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서 진행되지 않은 퇴적물의 구성성분 및 지질 특성에 따른 추가적인 연구를 통하여 퇴적물 특성별 세분화된 농도 상관관계가 도출 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

국내 하천 및 호소 퇴적물에 대한 중금속분석방법 기준이 뚜렷하게 확립되어있지 않아 해양오염공정시험(완전분

해)과 토양오염공정시험기준(전분해)이 퇴적물 분석에 준용되고 있는 상황이다. 본 연구에서는 두 분석값 사이에 대한 상관관계를 알아보기 위해 영산강·섬진강 수계에서 총 43개 퇴적물 시료를 채취하였으며, 두 전처리 방법(완전분해, 전분해)에 따라 전처리 후 중금속의 농도를 분석하였다. 전체적인 중금속의 평균농도는  $Zn > Cr > Pb > Ni > Cd$  순으로 나타났으며, 전분해 값은 완전분해 값의 35.0% (Cd)와 53.8% (Cr), 66.2% (Ni), 64.4% (Pb), 76.4% (Zn)로 완전분해시 중금속 농도가 높게 나타났다. 분석한 모든 중금속에서 호소의 농도가 하천의 농도보다 높게 나타나 호소의 경우 중금속 축적이 일어나는 것으로 판단되었으며, 특히, Cd과 Pb의 축적이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

두 분석법 사이의 농도 상관관계식 구하였으며, 이들 식을 통하여 Zn 및 Ni의 경우 완전분해에서 함유량이 증가할 경우 왕수에 의한 용출농도도 같이 증가하는 것으로 나타났으며, Cd의 경우 완전분해에서 퇴적물 내 Cd 함유량이 증가하여도 왕수에 의한 용출농도 증가는 상당히 제한적인 것으로 나타났다. 또한, 두 분해법에 의한 퇴적물의 중금속 농도 사이에 보통이상의 선형상관관계( $0.656 < r < 0.934$ )가 있는 것으로 나타났다. 특히, Cr, Ni 및 Zn의 경우 상관계수가 하천 퇴적물에서 각각 0.858, 0.940, 0.873, 호소 퇴적물에서 각각 0.907, 0.857, 0.939로 모두에서 강한 선형상관관계가 있는 것으로 나타났다. 퇴적물 특성별 세분화된 농도 상관관계 도출을 위해 퇴적물의 구성성분 및 지질특성에 따른 추가적인 연구가 요구된다.

## 사사

본 연구는 국립환경과학원의 ‘하천 호소 퇴적물 모니터링 시범 사업’ 및 한국환경산업기술원의 ‘토양지하수 오염방지기술개발사업(GAIA Project)’의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

## 참고문헌

- 김주용, 은고요나, 고영구, 윤석태, 오강호, 김동주, “전남 나주-영암지역의 영산강 하류 시추퇴적물의 퇴적환경과 지구화학적 특성,” 한국지구과학회지, **22**, 301~317(2001).
- 류호돈 김선준, “동두천 부근 신천의 하천수 및 하상퇴적물의 중금속오염,” 한국자원공학회지, **35**, 80~89(1998).
- 박선구, 김성수, 고오석, “호소내 퇴적물의 수질오염물질 분석(II) - 중금속,” *Anal. Sci. Technol.*, **14**(2), 140~146(2001).
- 박선구, 양영모, “호소내 퇴적물의 근접도에 따른 수질오염물질 분석(I) - COD, T-N, T-P, pH -,” *Anal. Sci. Technol.*, **14**(3), 238~243(2001).
- 박선구, 송기봉, 조기환, “호소내 퇴적물의 중금속 분석 비교,” 한국분석과학회지, **14**(2), 173~179(2001).
- 장병욱, 우철용, 김성필, “농촌 중소 하천 및 저수지 퇴적물의 오염현황,” 농촌계획, **9**(2), 1~6(2003).
- 이준기, 김석구, 송재홍, 이태운, “부산시 도심하천 퇴적물의 유기물 및 중금속 오염도 평가,” 한국지반환경공학회 논문집, **11**(1), 35~43(2010).
- 김주용, 정철환, 오강호, 고영구, 문정준, 유경아, “광주부근 영산강과 광주천의 하상퇴적물의 중금속 오염,” 한국지구과학회지, **20**, 96~100(1999).
- 조영길, 김주용, “영산강 하상퇴적물의 중금속 함량,” 한국환경과학회지, **7**, 281~290(1998).
- 환경부, “하천 호소 퇴적물 모니터링 기본계획 수립 연구,” 환경부(2007).
- 국토해양부, “해양환경공정시험방법,” 국토해양부(2008).
- 환경부, “토양오염공정시험기준,” 환경부(2009).
- Wenzel, W. W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E. and Adriano, D. C., “Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure,” *Anal. Chim. Acta*, **436**, 309~323(2001).
- Balcerzak, M., “Sample Digestion Methods for the Determination of Traces of Precious Metals by Spectrometric Techniques,” *Anal. Sci.*, **18**, 737~750(2002).
- Chen, M. and Ma, L. Q., “Comparison of Three Aqua Regia Digestion Methods for Twenty Florida Soils,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **65**, 491~499(2001).
- Gaudino, S., Galas, C., Belli, M., Barbizzi, S., Zorzi, P. d., Jacimovic, R., Jeran, Z., Pati, A. and Sansone, U., “The role of different soil sample digestion methods on trace elements analysis: a comparison of ICP-MS and INAA measurement results,” *Acc. Qual. Assur.*, **12**, 84~93(2007).
- 윤정기, 김동호, 김태승, 박종결, 정일록, 김종하, 김혁, “우리나라 토양의 중금속 자연배경농도 평가,” 한국지하수토양환경학회지, **14**(3), 32~39(2009).
- 임동일, 최진용, 정희수, 최현우, 김영욱, “한국 연안 퇴적물 내 중금속 원소의 자연적 배경농도 연구,” *Ocean and Polar Res.*, **29**(4), 379~389(2007).
- 국토해양부, “해양환경기준 설정 및 개선방안 연구,” (2009).
- 박성현, “SPSS (PASW) 17.0 이해와 활용,” (2009).
- 원태연, “통계조사분석 : SPSS (PASW statistics) 18.0,” (2010).