

## 주암댐 호저 퇴적물에서의 수직적 중금속 분산과 $^{210}\text{Pb}$ 를 이용한 퇴적속도산정

이평구<sup>1\*</sup> · 염승준<sup>1</sup> · 연규훈<sup>1</sup> · 지세정<sup>1</sup> · 김지욱<sup>2</sup> · 오창환<sup>3</sup> · 김선옥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부, <sup>2</sup>한국수자원공사 조사기획처, <sup>3</sup>전북대학교 지구환경과학과

## Vertical Distribution of Heavy Metal Concentrations in Sediment Cores and Sedimentation Rate Using $^{210}\text{Pb}$ Dating Technique in the Juam Reservoir

Pyeong-Koo Lee<sup>1\*</sup> · Seung-Jun Youm<sup>1</sup> · Young-Shik Shin<sup>1</sup> · Se-Jung Chi<sup>1</sup> · Ji-Wook Kim<sup>2</sup> · Chang-Wan Oh<sup>3</sup> · Sun-Ok Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geological and Environmental Hazards Divisions, Korea Institute of Geoscience and Minerals, Daejeon 305-350, Korea

<sup>2</sup>Department of Investigation and Planning, Korea Water Resources Corporation

<sup>3</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University

### ABSTRACT

Twelve bottom sediments and three cores were collected in Juam reservoir for a study on transportation, which was controlled by particle grain size (2 mm-200  $\mu\text{m}$ , 200-100  $\mu\text{m}$ , 100-50  $\mu\text{m}$ , 50-20  $\mu\text{m}$ , <20  $\mu\text{m}$ ), and vertical distribution of heavy metals. Sediment cores were sliced into 2 to 5 cm intervals to measure heavy metal concentrations in interstitial water and sediments with depth. Pb isotopic compositions of core samples were determined to calculate sedimentation rate. Regardless of sampling sites, levels of heavy metals and trace elements in bottom sediments are nearly constant with mean values of 14.9  $\mu\text{g/g}$  for As, 0.81  $\mu\text{g/g}$  for Cd, 30.7  $\mu\text{g/g}$  for Cu, 34.7  $\mu\text{g/g}$  for Ni, 63.3  $\mu\text{g/g}$  for Pb and 87.9  $\mu\text{g/g}$  for Zn. In general, Cu, Pb, Zn, Ni, and Cr in fraction of <20  $\mu\text{m}$  exhibit the highest concentration, but content of As is the highest in grain size of 2 mm-200  $\mu\text{m}$  and 200-100  $\mu\text{m}$ . Fe and Mn occur as the dissolved compositions of the highest concentrations in interstitial waters and increase in their concentrations toward lower part of cores. On the contrary, concentrations of Zn and Cu show the highest value in the uppermost part in cores, suggesting these elements are released from reductive dissolution of hydroxides and oxidation of organic matters under different redox conditions. The highest accumulations of Cu, Ni, Pb, and Zn contents in the sediment cores are observed at 0-4 cm layers, and concentrations of Cu and Pb are especially high, implying these heavy metals are originated from anthropogenic sources. The apparent sedimentation rate estimated using unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is 0.91  $\text{cm year}^{-1}$ , corresponding about 10 cm sedimentation in total depth since construction of Juam dam. These results will provide available information for management of bottom sediment in Juam reservoir.

**Key words :** Bottom sediment, Heavy metal behaviour, Vertical distribution, Sedimentation rate

### 요 약 문

주암댐에 유입된 호저퇴적물의 입도(2 mm-200  $\mu\text{m}$ , 200-100  $\mu\text{m}$ , 100-50  $\mu\text{m}$ , 50-20  $\mu\text{m}$ , <20  $\mu\text{m}$ )별 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)의 이동과 퇴적 후 중금속의 수직적 분산 특성을 규명하기 위하여 12개 지점의 호저퇴적물과 3개 지점의 코아시료를 채취하였으며, 코아시료는 2-5 cm 간격으로 절단하여 깊이별 간극수와 퇴적물의 중금속 함량을 측정하였다. 호저퇴적물의 퇴적속도를 측정하기 위하여 코아시료에 대한  $^{210}\text{Pb}$  동위원소 연구를 수행하였다. 주

\*Corresponding author : pkleee@kigam.re.kr

원고접수일 : 2004. 8. 14 게재승인일 : 2005. 2. 1

질의 및 토의 : 2005. 4. 30 까지

암댐 호저 퇴적물의 중금속 및 미량원소의 함량은 퇴적위치와 상관없이 거의 일정한 함량을 보이며, 평균 함량은 As 14.9  $\mu\text{g/g}$ , Cd 0.81  $\mu\text{g/g}$ , Cu 30.7  $\mu\text{g/g}$ , Ni 34.7  $\mu\text{g/g}$ , Pb 63.3  $\mu\text{g/g}$ , Zn 87.9  $\mu\text{g/g}$ 이다. Cu, Pb, Zn, Ni 및 Cd의 함량은 20  $\mu\text{m}$  이하 입도의 퇴적물에서 가장 높은 반면, As는 2 mm-200  $\mu\text{m}$  혹은 200-100  $\mu\text{m}$  입도의 퇴적물에서 가장 높다. 간극수에 용해된 원소 중에서 가장 함량이 높은 것은 Fe와 Mn이었으며, 코아시료의 상부로부터 심부로 갈수록 함량이 증가하는 수직적 분산특성을 나타낸다. 반면에 용존 Zn과 Cu함량은 코아시료의 최상부에서 가장 높게 나타나며, 이는 산화-환원 전위차에 따른 유기물질 및 산화광물의 용해작용과 관련이 있다. 코아시료의 퇴적물 내 Cu, Ni, Pb 및 Zn 함량은 0-4 cm 구간에서 가장 높은 표면집적 현상이 관찰되며, Pb와 Cu 함량이 현저하게 높은 데, 이는 인위적인 오염에 기인하는 것으로 해석된다. "unsupported  $^{210}\text{Pb}$ "을 이용하여 계산된 호저퇴적물의 퇴적 속도는  $\omega = 0.91 \text{ cm year}^{-1}$ 이며, 이를 적용하면 주암댐이 완공된 이후 약 10 cm의 퇴적물이 평균적으로 퇴적된 것으로 추정된다. 이러한 자료는 주암댐 호수 바닥에 퇴적된 퇴적물의 관리방안을 마련하는 데 중요한 정보로 사용될 수 있을 것이다.

**주제어 :** 호저퇴적물, 중금속 거동특성, 수직적 분산, 퇴적물

## 1. 서 론

물은 인류의 역사와 더불어 필수적인 중요 자원으로 인식되어 왔으며, 댐은 수자원의 안정적 확보라는 측면에서 우리 인류에게 커다란 혜택을 제공하여 왔다. 우리나라는 1970년대 이후 산업이 급격하게 발달하면서 인구가 대도시로 집중됨으로써 식수 및 공업용수의 수요가 크게 증대되면서 여러 다목적 댐이 건설되었으나 최근 환경보호 및 생태계 보존이 사회적으로 가장 중요한 문제로 부각되면서 새로운 댐 건설이 어려워지는 실정이며, 더욱이 최근 강과 댐의 집수유역에 인구가 집중되고 산업화가 진행됨에 따라 오염물질의 배출이 증가하여 강과 댐의 수질을 오염시키고 있다. 또한 폐금속광산(약 1,000 여개)과 폐석탄광산(수백 개)이 산재하고 있어 시간이 갈수록 오염물질의 확산으로 인한 강과 댐의 퇴적물과 물의 질이 크게 악화되고 있으므로, 이에 대한 대책마련이 시급한 실정이다. 그러므로 현재 맑고 깨끗한 수자원의 안정적인 확보를 위해 해결해야 할 가장 시급한 과제는 현재 식수원으로 사용되고 있는 다목적댐의 수질보전과 저수량 확보를 위한 경제적인 관리방안을 구축하는 것이다. 이를 위하여 식수원으로 사용되는 다목적댐의 집수유역을 대상으로 중금속 오염물질의 발생-이동-용해-퇴적-침전-제어에 이르는 지구화학적 순환의 전과정에 대한 과학적인 평가기술 개발과 그에 따른 환경보전 기술 및 오염된 퇴적물에 대한 준설기술을 포함하는 관리방안 구축 기술을 시급하게 개발하여야 할 시점이다.

1991년 완공된 주암댐은 전라남도 보성강에 축조된 다목적댐으로서 저수용량은 457백만 톤이며, 광주, 순천, 광양, 여수, 여천시 등에 연간 488.8백만 톤의 생활 및 공업용수를 공급하고 있다(한국수자원공사, 2001). 염승준

등(2004)은 주암댐 집수유역 내에서 지질기원의 중금속 발생과 이동 특성에 관한 환경지구화학적 연구 및 중금속 분포 특성에 관한 연구를 수행하였다. 또한 이평구 등(2005)은 주암댐에 유입되는 3-4차 수계 퇴적물의 입도별 중금속 함량을 분석하여 퇴적물 입도에 따른 중금속의 거동 특성을 파악하고, 주암댐에 유입된 퇴적물의 중금속 함량에 미치는 영향 및 납 동위원소 분석을 이용한 주암댐 호저퇴적물의 중금속 기원을 규명하였다.

일반적으로 호수 퇴적물은 수계 오염물질의 저장고(sink) 역할을 하므로 중금속, 무기물질 또는 유기 화합물질 등에 의해서 오염되어 있을 가능성이 있다. 이러한 오염물질들은 점 또는 비점 오염원으로부터 수계를 통하여 유입된 후, 오염물질의 물리화학적 특성에 따라 수중 부유 물질 등에 흡착되어 퇴적되게 된다. 중금속 등 유해물질에 오염된 퇴적물은 저서환경 질서를 교란시키며, 생물학적 농축현상까지도 야기하게 된다. 생태계에 미치는 영향의 정도는 오염물질의 독성과 생물학적 흡수성(bioavailability)에 의해서 결정된다. 또한, 호수나 댐에 퇴적된 퇴적물에 수반된 중금속 등 오염물질은 퇴적 후 발생하는 환경의 변화(Eh, pH, chemistry 등)에 따라 퇴적물에 존재하는 산화광물과 유기물 등의 용해반응이 발생하게 되므로 이와 수반된 중금속 및 유기오염물질이 다시 용해되어 간극수를 통해 재 분산되게 될 것이다.

최근(약 200년 이후) 형성되어진, 심한 교란을 받지 않은 퇴적층의 연령을 측정하는 방법으로 퇴적물 내  $^{210}\text{Pb}$ 를 측정하는 하는 방법이 많이 사용되고 있다(Appleby and Olfeld, 1992). 많은 연구자들은  $^{210}\text{Pb}$  연령측정법을 이용하여 지난 세기동안 여러 생태계에서의 지화학적 변화를 이해하는 연구를 수행하였다(Koide, *et al.*, 1973; Goldberg, *et al.*, 1978; Wood, *et al.*, 1992; Silva-

Braganca, et al., 1995.; Hamilton, et al., 1996; Sayltes, et al., 1997).

이번 연구에서는 댐 저수지 호저 퇴적물의 현재 오염 상태와 인공호수의 축조 이후 퇴적된 호저 퇴적물의 오염 변화 양상을 정량적으로 평가하고 중금속의 수직적 거동 평가기술을 확립함으로써 상수원의 수질을 보전하고 개선 하는데 활용하고자 한다. 또한 퇴적물의 유입으로 감소되고 있는 저수량을 정량적으로 파악하고 향후의 변화 양상을 정확하게 예측하기 위하여 Pb-210(반감기 22.3년)을 이용하여 호저 퇴적물의 퇴적속도를 구하였다. 한편, 이를 통하여 호수저 퇴적물의 시간적(수직적) 중금속 함량의 역사 및 변천을 이해할 수 있다.

## 2. 시료채취 및 방법

### 2.1. 시료채취

#### 2.1.1. 호저 퇴적물 core (불교란) 시료 채취

주암호의 호저 퇴적물에 대한 시추조사 지역은 주암호의 서반부와 남쪽부분에서 유입되는 두 수계가 합쳐져 퇴적작용이 발생할 것으로 예측되는 지점을 대상으로 하였다. 먼저 Chirp을 이용하여 천부 탄성과 탐사를 실시하여, 3차원 퇴적층 분포 특성을 확인하였으며 (이평구 등, 2004), 선상에 설치된 중력식 시추기 (길이 1.0 m 이내)를 이용하여 총 12개 선정된 지점에서 시추를 실시하였다 (Fig. 1). 주암호는 댐 축조 연대가 짧고, 유입 퇴적물이 적어 이번 조사에서 3개 조사 지점에서만 시추코어가 획득되었다(Fig. 1). 또한, 퇴적물이 유입되는 주요 지점에서의 중금속의 수직적 분산특성과 주암댐 내에 퇴적된 퇴적물에서의 중금속의 수직적 분산특성을 비교하기 위하여 주암댐 가장자리에서도 코아시료를 채취하였다(Fig. 2). 시료채취 방법은 현장에서 교란되지 않은 곳에 시추기를 내려놓고 진공상태를 만들어 고화되지 않은 퇴적물을 아르릴 관으로 끌어올려 시료를 채취하였다.

현장에서 채취한 시추시료는 밀봉한 후 액체 질소에 담아 냉동시킨 후, 실험실로 이동하여 냉동 상태로 2.5 cm 간격으로 절단한 후 간극수를 채취하고 100 mesh 이하로 체질하여 50°C에서 건조 후 미분쇄하여 총 함량을 분석 하였다.

#### 2.1.2. 호수저 퇴적물의 시료 채취

주암호에서 공간적 퇴적작용의 차이에 따른 퇴적물의 퇴적 특성과 이에 따른 퇴적물 입도의 차이 및 중금속의 거동 특성을 확인하기 위하여 시추를 실시한 지역과 동일한 지역을 대상으로 grab 시료채취기를 이용하여 12개 퇴

적물 시료를 채취하였다(Fig. 1). 입도분석은 2 mm-200 μm, 200-100 μm, 100-50 μm, 50-20 μm, <20 μm의 5개 등급으로 구분하여 수행하였고, 분급된 시료는 50°C에서 건조시켰다.

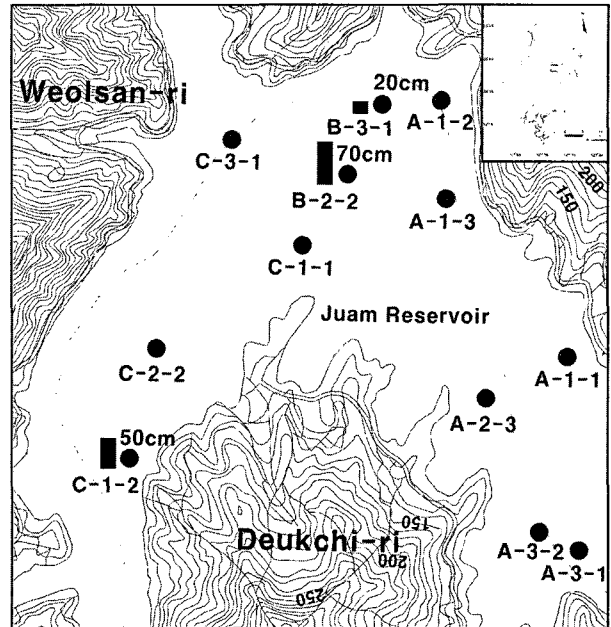


Fig. 1. The site map for grab(●) and core(■) sampling in the central areas of Juam reservoir.

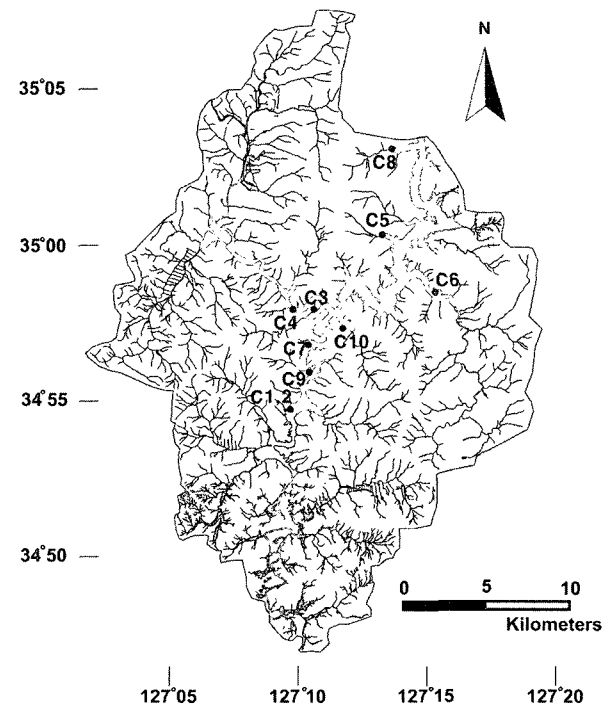


Fig. 2. The locations of core sampling sites in the border of Juam reservoir.

## 2.2. 화학분석 방법

### 2.2.1. 화학분석

총 함량분석 방법은 퇴적물에 함유되어 있는 총 중금속 함량을 측정하기 위해 실시되었다. 시료 1 g에 질산(HNO<sub>3</sub>) 5 mL를 넣은 뒤 온도 110°C에서 완전히 증발시킨 후, 과염소산(HClO<sub>4</sub>)과 질산의 혼합산 (1:5 비율)을 10 mL를 넣고 흰색의 연기가 완전히 없어질 때까지 증발시킨다. 이후, 6 N HCl를 10 mL를 넣고 30분간 끓이며, 실온까지 냉각시킨 후, 0.45 μm로 여과하여 ICP-AES로 분석하였다.

중금속 함량의 분석은 ICP-AES (Perkins-Elmer Optima 3000XL)를 이용하였으며, 분석조건은 RF Power 1300 watt, Plasma Flow 15 L/min, Coolant Flow 0.5 L/min, Nebulizer Flow 0.8 L/min 이었다. 사용된 시약은 analytical grade (Prolabo 또는 Merck)였고, ICP 분석 시 사용된 Pb, Zn, Cd, Fe, Mn의 standard metal solution은 1,000 ppm stock solution (Merck)을 희석하여 사용하였다. 전 분석과정에 이용된 탈이온수를 얻기 위해 Milli-Q Millipore system을 사용하였다.

<sup>210</sup>Pb의 농도는 한국기초과학지원연구원에서 <sup>210</sup>Pb의 grand-daughter인 <sup>210</sup>Po를 측정하여 얻었으며, 감마분석에 의하여 구하였다.

### 2.2.2. 조성광물 분석

32개 지점으로부터 채취한 시료의 광물학적 특성을 규명하기 위하여 X-선 회절분석을 실시하였다. X-선 회절분석은 PHILIPS X'PERT MPD Diffractometer (Cu Kα 40 KV, 25 mA)를 이용하였고, Cu target을 사용하여 3°-45°까지 2°/1분의 속도와 0.01의 간격으로 하였다.

## 3. 분석결과 및 토의

### 3.1. 주암댐 호저 퇴적물에서의 중금속 농도의 공간적 분포

주암댐의 두개의 주요 수계가 합류되는 지역의 12개 지점의 호저퇴적물 시료에 대한 중금속 및 미량원소 함량은 Table 1에 수록하였다. 12개 지점에서 채취한 호저 퇴적물의 중금속 및 미량원소의 각 평균함량은 시료 채취위치와 상관없이 거의 일정한 공간적 함량분포를 나타내고 있다.

As는 5.9~22.7 μg/g의 함량 범위를 나타내며, 평균값은 14.9 μg/g이다. Cd은 0.2~1.4 μg/g (평균, 0.81 μg/g)의 함량을 보이며, 1 μg/g 이상의 함량은 A-1-2, A-1-3, A-3-1 및 B-2-2 지점의 시료에서 확인된다. Cr은 평균함량이 61.8 μg/g 이며, 44.7~75.4 μg/g의 변화를 보이고 있으며, Cu는 평균함량이 30.7 μg/g로써 27.1~38.4 μg/g의 범위를 나타낸다. Ni의 평균함량은 34.7 μg/g 이며, 23.6~38.9

**Table 1.** The total concentrations of heavy metals and trace elements in bottom sediments in the central areas of Juam reservoir [μg/g]

sample No.	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
A-1-1	5.9	0.7	44.7	38.4	23.6	45.9	76.1	404.1
A-1-2	14.7	1.4	57.9	32.2	34.3	85.4	83.0	671.7
A-1-3	22.7	1.4	59.9	32.3	35.6	64.9	89.0	716.4
A-2-3	15.2	0.5	57.9	30.8	34.4	66.2	88.3	759.6
A-3-1	12.4	1.3	59.5	29.9	33.1	61.2	84.7	766.5
A-3-2	17.5	0.5	58.0	28.9	33.5	63.1	82.0	784.8
B-2-2	14.4	1.2	66.9	30.1	36.6	64.2	90.4	680.7
B-3-1	14.3	0.2	58.5	31.3	33.8	62.1	84.6	713.1
C-1-1	13.3	0.5	67.5	28.2	36.7	61.3	95.8	737.7
C-1-2	16.9	0.8	75.4	27.1	38.9	54.8	91.3	647.1
C-2-2	14.5	0.7	69.6	29.2	38.7	66.0	97.1	691.2
C-3-1	16.6	0.6	65.7	30.1	36.9	64.4	92.8	671.4
mean	<b>14.9</b>	<b>0.8</b>	<b>61.8</b>	<b>30.7</b>	<b>34.7</b>	<b>63.3</b>	<b>87.9</b>	<b>687.0</b>
stdev	3.9	0.4	7.8	2.9	4.0	9.0	6.1	98.8
min.	5.9	0.2	44.7	27.1	23.6	45.9	76.1	404.1
max.	22.7	1.4	75.4	38.4	38.9	85.3	97.1	784.8
Uncontaminated stream sediments <sup>1)</sup>	-	-	<b>112±43</b>	<b>25±8</b>	<b>35±19</b>	<b>21±3</b>	<b>100±32</b>	-
3rd-4th order stream sediments <sup>1)</sup>	-	-	<b>54.5±30.8</b>	<b>22.4±10.6</b>	<b>26.2±12.2</b>	<b>42.5±12.9</b>	<b>91.4±38.0</b>	<b>542.4±220</b>

<sup>1)</sup> 염승준 등(2004)

µg/g의 값을 보인다. Pb의 경우 평균함량이 63.3 µg/g (45.9~85.3 µg/g), Zn은 87.9 µg/g (76.1~97.1 µg/g) 그리고 Mn은 687.0 µg/g (404.1~784.8 µg/g) 이다.

한편, 주암댐 호저 퇴적물의 중금속 함량을 주암댐 집수구역 내 1-2차 수계의 하천퇴적물 및 3-4차 수계의 하천퇴적물 (염승준 등, 2004)과 비교 검토한 결과 Pb 및 Cu의 경우 호저 퇴적물에서 더 높은 함량을 나타내고 있음이 확인되었다. 이는 퇴적물이 주암댐 집수구역의 하천에서 주암댐 내 호수로 이동되는 과정에서 2차 적인 오염에 의해 이들 원소의 함량이 증가되고 있다는 것을 의미한다. Pb와 Cu의 경우, 호저 퇴적물 > 3-4차 수계 하천퇴적물 > 비오염 1-2차 수계 퇴적물, Zn은 비오염 1-2차 수계 퇴적물 > 3-4차 수계 하천퇴적물 > 호저 퇴적물, Ni과 Cr은 비오염 1-2차 수계 퇴적물 > 호저 퇴적물 > 3-4차 수계 하천퇴적물 순으로 함량이 높은 것으로 나타났다.

### 3.2. 호저 퇴적물의 입도별 중금속 함량

주암댐으로 유입되는 두 개의 하천이 합류되는 지점에서 채취된 호저 퇴적물에 대한 입도분석 결과와 입도분포 특성을 Table 2에 수록하였다. 호저 퇴적물은 모래입도가 전체의 평균 51.2%, 실트+점토입도는 48.7%로 구성되어 실트질(silty) 퇴적물로 분류된다.

As은 1개 시료 (A-1-1)를 제외하면 전 시료에서 2 mm-200 µm 입도에서 함량이 가장 높게 나타나고, 입도가 감소할수록 함량이 감소한다. 이런 특성은 함 As 광물은 적어도 200 µm 이상의 조립질 상태로 이동되는 것을 지시해준다. A-1-1 시료의 경우, As의 함량이 다른 시료보다 낮으나, 퇴적물 입도가 감소할수록 함량이 증가하는 경향은 As가 실트질 이하의 점토광물에 흡착되어 있음을 나타낸다. 각 시료의 퇴적물 입도별 Cd은 일정한 함량을 보이지 않으나, 대부분 2 mm-20 µm 입도에서의 함량이

**Table 2.** Summary of size analyses of bottom sediments in the central areas of Juam reservoir [g (%)]

sample		2mm-200µm	200-100µm	100-50µm	50-20µm	<20µm	Sum
Bottom	A-1-	47(14.1)	104(31.1)	46(13.8)	69(20.7)	68(20.4)	334
Sediments	C-3-1	12.5(8.7)	27.5(19.2)	36.5(25.5)	26.5(18.5)	40(28.0)	143
in Juam	C-1-2	11.5(8.6)	26.5(19.9)	33(24.8)	24(18.0)	38(28.6)	133
reservoir	A-2-3	7(5.4)	24.5(18.8)	22.5(17.2)	31.5(24.1)	45(34.5)	130.5

**Table 3.** The heavy metal and trace element concentrations in different grain size fractions of bottom sediments in the central areas of Juam reservoir [µg/g]

Sample No.		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
A-1-1	(2mm-200µm)	8.28	0.00	26.36	8.95	9.55	13.39	25.31	140.8
	(200-100µm)	15.00	0.74	46.59	21.07	20.55	33.71	59.75	319.6
	(100-50µm)	17.06	1.08	51.07	38.47	25.06	46.17	84.42	402.2
	(50-20µm)	17.93	0.77	45.82	52.92	24.68	50.47	90.30	384.0
	(20µm-)	16.81	0.00	49.07	63.18	29.40	62.55	111.83	428.4
A-2-3	(2mm-200µm)	80.97	1.33	46.20	36.65	29.37	60.52	89.57	712.3
	(200-100µm)	48.00	0.78	49.77	33.29	30.77	58.42	85.37	827.8
	(100-50µm)	50.24	0.00	52.99	35.88	31.64	63.91	94.89	847.0
	(50-20µm)	52.37	1.16	54.39	39.48	33.15	64.79	101.92	733.6
	(20µm-)	46.49	0.33	59.08	47.18	35.42	73.71	109.34	651.7
C-1-2	(2mm-200µm)	37.95	0.00	44.35	19.43	23.14	43.40	71.82	403.2
	(200-100µm)	42.54	0.00	67.03	31.19	36.44	67.41	105.00	647.9
	(100-50µm)	41.56	0.21	66.26	33.64	39.48	74.48	114.38	685.3
	(50-20µm)	36.80	0.00	74.45	38.96	43.65	91.60	138.57	743.4
	(20µm-)	30.78	0.00	83.90	42.81	50.96	121.94	163.45	720.3
C-3-1	(2mm-200µm)	55.73	0.00	88.94	31.08	50.33	129.64	137.59	832.7
	(200-100µm)	41.94	0.00	93.70	30.63	51.70	135.84	142.07	986.0
	(100-50µm)	37.01	0.00	94.85	32.48	53.31	147.53	155.05	977.6
	(50-20µm)	39.70	0.00	60.34	53.38	36.40	60.45	103.11	653.1
	(20µm-)	32.49	0.00	62.48	64.44	36.75	63.42	114.17	624.1

<20  $\mu\text{m}$  입도에서 보다 높았다(Table 3).

Zn, Pb, Cr 및 Ni의 함량은 A-2-3, C-1-2 및 A-1-1 시료 보다 상대적으로 C-3-1 시료에서 높게 나타나고, C-3-1 시료의 경우 2 mm-50  $\mu\text{m}$  입도에서 이들 원소의 함량이 가장 높으며, 50  $\mu\text{m}$  이하의 입도에서는 감소하는 경향이 관찰된다. 이는 이들 원소를 함유하는 광물이 50  $\mu\text{m}$  이상 입도를 갖는 것임을 시사해준다. A-2-3, C-1-2 및 A-1-1 시료에서는 실트질 이하의 입도로 감소할수록 Zn, Pb, Cr 및 Ni 함량이 증가하는 경향을 보여 이들 원소가 실트질 이하의 점토광물에 흡착되어 주암댐으로 이동 및 유입되는 것으로 추정된다. Cu의 경우, 각 시료에서 입도가 감소할수록 함량이 미약하게 증가하는 양상이 확인되고 있어 광물형태 보다는 주로 용존 이온으로 50  $\mu\text{m}$  혹은 실트질 이하의 점토광물에 흡착된 형태로 주암댐에 유입된다는 사실을 알 수 있다(Table 3).

주암댐 집수분지 내 3-4차 수계의 하천 퇴적물과 주암댐 호저 퇴적물의 입도별 중금속 함량을 비교하여 Table 4에 수록하였다. 2 mm-200  $\mu\text{m}$  입도의 퇴적물에서는 3-4차 수계의 하천퇴적물 보다 호저 퇴적물의 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn 함량이 약 2-4배 더 높았으며, As를 제외하면 이러한 양상이 200-100  $\mu\text{m}$  입도까지 지속된다. 100-50  $\mu\text{m}$  입도에서는 하천퇴적물의 As와 Cu 함량이 호저퇴적물에 비해 상대적으로 더 높은 것으로 나타났

며, 50-20  $\mu\text{m}$  입도에서는 하천퇴적물의 As, Cu 및 Zn 함량이 각각 1.5, 3.5 및 1.7배 더 높은 것으로 확인되었다. 한편, 20  $\mu\text{m}$  이하의 입도에서는 Ni를 제외한 모든 원소의 함량이 3-4차 하천퇴적물에 더 높은 것으로 나타났다. 20  $\mu\text{m}$  이하의 입도에서 두 입도분석 시료의 함량 차이가 가장 큰 원소는 Cd와 Cu로써 각각 63배와 16배의 차이를 보인다. 그 외에 Zn (4배), As (2.8배) 및 Pb (1.9배)도 함량 차이가 현저하다(Table 4). 이런 현상은 입도가 작은 <20  $\mu\text{m}$  퇴적물일수록 잘 관찰된다. 주암댐으로 하천수가 유입되는 지점에서 두 집수구역이 합쳐지는 지점까지 퇴적물 (<20  $\mu\text{m}$ )이 이동되면서 이들 원소 (Cd, Cu, Zn, As 및 Pb)의 함량이 현저하게 감소하는 것은 퇴적물에 수반된 이들 중금속 원소의 존재형태 차이에 기인한 것으로 추정된다. 즉, 이들 중금속 원소가 점토광물과 유기물에 흡착 혹은 착이온 형태로 주암댐에 유입된 후, 이동-퇴적작용 과정 동안 탈착 혹은 유기물의 분해작용으로 인해 중금속 이온의 용출이 발생하여 호저퇴적물에서 이들 원소의 함량이 감소한 것으로 해석되며, 이로 인해 주암댐 수질에 미약하게나마 영향을 줄 가능성이 있는 것으로 판단된다.

한편, 하천퇴적물과 비교하여 호저 퇴적물의 2 mm-100  $\mu\text{m}$  입도에서 중금속 함량이 높은 것은 호저 퇴적물의 간극수에 용해된 중금속이 광물형태로 침전되기 때문일 것

**Table 4.** Comparison of heavy metal concentrations in different grain size fractions between 3<sup>rd</sup>-4<sup>th</sup> order stream sediments and bottom sediments in the central areas of Juam reservoir [ $\mu\text{g/g}$ ]

grain size	sediments type		As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
2mm-200 $\mu\text{m}$	stream	range	2.7-139.8	0.0-0.1	9.3-33.9	4.7-11.6	5.5-11.3	10.0-41.0	17.5-52.4
		mean	<b>26.0</b>	<b>0.0</b>	<b>18.5</b>	<b>6.5</b>	<b>7.7</b>	<b>15.3</b>	<b>27.8</b>
	bottom	range	8.2-80.9	0.00-1.33	26.3-88.9	8.9-36.6	9.5-50.3	13.3-129.6	25.3-137.5
		mean	<b>45.7</b>	<b>0.33</b>	<b>51.4</b>	<b>24.0</b>	<b>28.0</b>	<b>61.7</b>	<b>81.0</b>
200-100 $\mu\text{m}$	stream	range	4.8-199.5	0.0	17.1-55.7	8.6-31.3	8.6-21.5	17.2-53.1	37.8-85.7
		mean	<b>37.9</b>	<b>0.0</b>	<b>33.9</b>	<b>17.3</b>	<b>13.1</b>	<b>26.6</b>	<b>59.2</b>
	bottom	range	15.0-48.0	0.00-0.74	46.5-93.7	21.0-33.2	20.5-51.7	33.7-135.8	59.7-142.0
		mean	<b>36.8</b>	<b>0.18</b>	<b>64.2</b>	<b>29.0</b>	<b>34.8</b>	<b>73.8</b>	<b>98.0</b>
100-50 $\mu\text{m}$	stream	range	6.0-321.9	0.0-0.6	21.4-68.4	22.5-110.8	11.2-28.7	22.2-84.5	59.4-158.9
		mean	<b>56.3</b>	<b>0.1</b>	<b>41.6</b>	<b>54.6</b>	<b>17.3</b>	<b>41.2</b>	<b>106.0</b>
	bottom	range	17.0-50.2	0.00-1.08	51.0-94.8	32.4-38.4	25.0-53.3	46.1-147.5	84.4-155.0
		mean	<b>36.5</b>	<b>0.32</b>	<b>66.2</b>	<b>35.1</b>	<b>37.3</b>	<b>83.0</b>	<b>112.1</b>
50-20 $\mu\text{m}$	stream	range	7.3-273.1	0.0-0.4	20.9-96.4	27.6-407.2	12.2-33.8	34.4-100.4	74.9-366.2
		mean	<b>55.4</b>	<b>0.1</b>	<b>48.1</b>	<b>163.3</b>	<b>20.9</b>	<b>57.9</b>	<b>186.7</b>
	bottom	range	17.9-52.3	0.00-1.16	45.8-74.4	39.4-53.3	24.6-43.6	50.4-91.6	90.3-138.5
		mean	<b>36.7</b>	<b>0.48</b>	<b>58.7</b>	<b>46.1</b>	<b>34.4</b>	<b>66.8</b>	<b>108.4</b>
20 $\mu\text{m}$ -	stream	range	6.0-513.2	3.8-7.1	29.6-133.8	290.1-1803.4	22.2-58.9	102.1-279.8	253.2-979.5
		mean	<b>88.0</b>	<b>5.1</b>	<b>70.7</b>	<b>871.0</b>	<b>37.8</b>	<b>154.3</b>	<b>499.2</b>
	bottom	range	16.8-46.4	0.00-0.33	49.0-83.9	42.8-64.4	29.4-50.9	62.5-121.9	109.3-163.4
		mean	<b>31.6</b>	<b>0.08</b>	<b>63.6</b>	<b>54.4</b>	<b>38.1</b>	<b>80.4</b>	<b>124.6</b>

으로 추정된다. 그러나 C-3-1 시료를 채취한 지점이 자연 수계와 연결된 장소이므로 이 자연수계로부터 유입된 하천퇴적물에 의해 직접적인 영향을 받기 때문일 가능성도 있으므로 정밀조사가 더 필요하다.

**3.3. 호저 퇴적물의 수직적 중금속 함량 분포 및 오염 평가**

**3.3.1. 퇴적물 내 간극수의 중금속 함량**

코아시료의 texture를 살펴보면 상부 8-11.5 cm까지는 점토 및 실트질로 구성되어 있어 주암댐 축조 이후에 퇴적된 호저 퇴적물로 추정된다. 하지만 그 이하의 퇴적물은 사질이 많아져 주암댐 축조 이전의 토양 및 하상퇴적물로 생각된다.

간극수의 Cd, Cu, Pb, Zn, Fe 및 Mn 함량 분석결과

에 의하면, 용존 성분 중에서 가장 함량이 높은 원소는 Fe와 Mn이며, 중금속 원소 중에서는 Zn과 Cu가 상대적으로 높은 것으로 나타났다(Table 5).

Fe와 Mn은 산화-환원 전위의 지시원소로써 코아시료의 상부에서 하부로 갈수록 함량이 증가하는 경향이 나타나며, 산화-환원 전위의 변화에 따른 용해작용과 밀접한 관련성을 보여준다. 코아시료 B-3-1에서 추출한 간극수에 용해된 Fe와 Mn의 함량은 각각 8.11-18.47 mg/L 및 2.45-4.99 mg/L이며, 코아시료의 10-12.5 cm 구간에서 가장 높은 함량을 나타낸다(Fig. 3). 코아시료 C-1-2의 경우, 각 17.5-20 cm와 35-40 cm 구간에서 용존 Fe와 Mn 함량이 각각 최대 26.51와 10.24 mg/L를 기록하였다(Fig. 4).

**Table 5.** The heavy metal and trace element concentrations in interstitial water extracted from bottom sediment cores in the central areas of Juam reservoir [mg/l]

Sample No.	Depth(cm)	Cd	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn
B-3-1	2	0.0019	0.0278	-	0.0284	8.95	2.75
	4	0.0021	0.0130	-	0.0198	12.80	2.94
	6	-	0.0043	-	0.0130	10.85	2.45
	8	0.0025	0.0179	-	0.0220	17.51	2.67
	10	0.0015	0.0025	-	0.0111	10.16	3.04
	12.5	0.0016	-	-	0.0153	18.47	4.99
	15	0.0021	0.0027	-	0.0194	8.11	4.28
C-1-2	2	-	0.0098	0.0228	0.0200	0.88	2.64
	4	-	0.0087	0.0202	0.0211	0.40	4.68
	6	-	0.0075	-	0.0081	0.32	5.22
	8	-	0.0042	-	0.0090	0.52	6.02
	10	-	0.0058	0.0214	0.0138	0.23	4.57
	12.5	0.0022	-	0.0223	0.0120	12.11	8.36
	15	-	-	0.0193	0.0100	7.52	7.56
	17.5	0.0038	0.0113	0.0168	0.0103	15.31	7.57
	20	0.0019	0.0062	0.0169	0.0064	16.42	8.40
	25	-	0.0085	0.0220	0.0051	7.52	7.57
	30	0.0027	0.0087	-	0.0120	10.17	7.46
	35	0.0018	0.0082	-	0.0087	5.81	6.66
	40	0.0053	0.0031	-	0.0112	26.51	10.24
45	0.0032	0.0046	-	0.0107	19.86	7.92	
B-2-2	2	-	0.2016	0.0243	0.0180	0.14	2.61
	4	-	0.0322	0.0235	0.0220	0.96	2.36
	6	-	0.5960	-	0.0643	0.44	2.02
	8	-	0.1671	-	0.0471	2.58	1.79
	10	-	0.0555	-	0.0356	2.22	1.64
	12.5	-	0.0504	-	0.0261	3.09	2.56
	15	-	0.1084	-	0.0499	1.79	2.60
	17.5	-	0.1746	-	0.0174	2.75	2.73
	50	0.0033	0.0300	-	0.0794	0.15	2.77
	55	-	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-	-
65	-	-	-	-	-	-	

코아시료 B-3-1에서는 0-2 cm 구간에서 용존된 Zn과 Cu 함량이 가장 높고, 각각 0.011-0.028 mg/L과 n.d.-0.028 mg/L 범위를 보여준다. 코아시료의 최상부 간극수에서 용존 Zn과 Cu 원소의 함량이 가장 높은 것은 산화 환원 전위 값에 규제되어 퇴적물에 수반된 이들 원소가 용해되었기 때문인 것으로 보인다. 간극수의 용존 Cd 함량은 코아시료의 심도와 무관하게 거의 일정하며, Pb의 함량은 검출한계 이하이다(Fig. 3).

코아시료 C-1-2의 경우, 간극수에서 검출된 Zn함량이 가장 높은 부분은 시추 시료의 0-4 cm 부분이며, 0.020-0.021 mg/L이었다. Zn 함량은 코아시료의 상부로부터 25 cm 심도까지 지속적인 감소 경향을 나타내고 있으며, 심도 25 cm부터 다시 증가하다가 45 cm 까지 일정하다. 간극수에 용해된 Cu함량도 코아시료의 상부로부터 하부로 갈수록 감소하는 경향이 관찰되고 있으나, 용해된 함량이 가장 높은 구간은 심도 15 cm 부분이다(Fig. 4). 간극수에 용해된 Pb 함량은 시추 시료의 최상부로부터 하부 25 cm 심도까지 검출되었으나, 그 이하로부터 45 cm 구간에서는 검출되지 않았다.

코아시료 B-2-2의 경우, 17.5 cm부터 65 cm 까지 퇴적물의 입도가 모래이었기 때문에 간극수를 채취할 수 없었다(Fig. 5). 용해된 Cu함량은 다른 두 시추 시료의 간극수의 Cu함량보다 현저하게 높으며, 0.050-0.596 mg/L으로 가장 높은 함량을 보이는 구간은 4-6 cm이었다. 용해된 Zn 함량은 0.017-0.064 mg/L이며, 가장 높은 함량

이 검출된 구간은 4-6 cm이었다. 한편, 간극수에 용해된 카드뮴 함량은 검출한계 이하였으며, Pb함량도 0-4 cm 구간에서만 검출되었다.

3.3.2. 호저 퇴적물에서의 중금속 함량의 수직적 분포  
호저퇴적물 코아시료의 수직적 중금속 함량은 Table 6

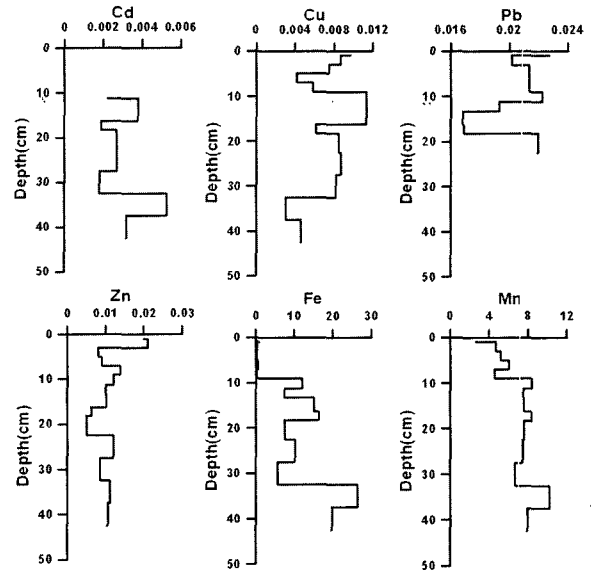


Fig. 4. The vertical distribution of heavy metal concentrations (mg/L) in interstitial water extracted from the bottom sediments (C-1-2).

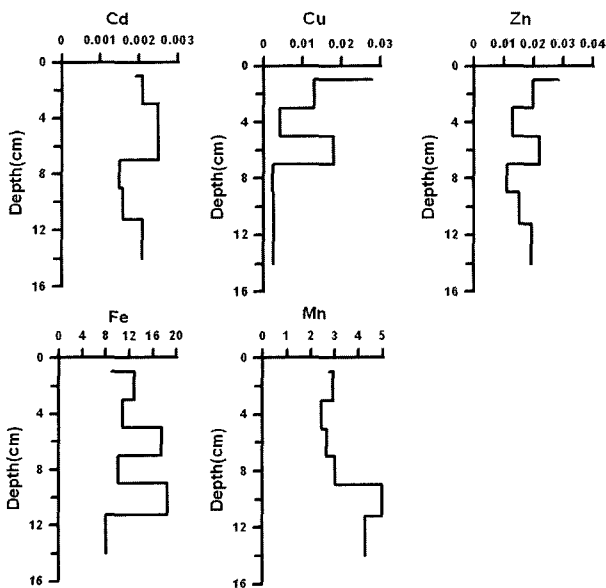


Fig. 3. The vertical distribution of heavy metal concentrations (mg/L) in interstitial water extracted from the bottom sediments (B-3-1).

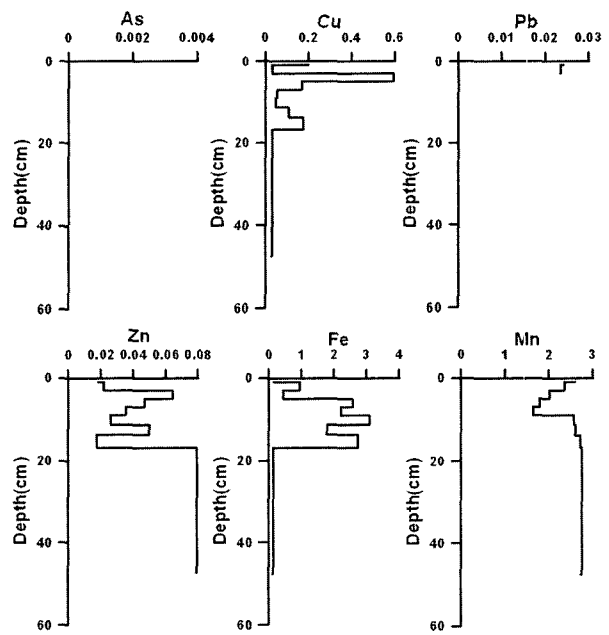


Fig. 5. The vertical distribution of heavy metal concentrations (mg/L) in interstitial water extracted from the bottom sediments (B-2-2).



에 수록하였다. 코아시료 B-3-1의 퇴적물 내 Cu, Ni, Pb 및 Zn 함량의 수직적 분포는 0-4 cm 구간에서 표면집적 (Surface enrichment) 현상이 관찰되었으며, 퇴적된 이후 산화-환원환경의 변화에 따른 용해반응에 의하여 이들 원소의 함량이 감소하기 때문이다(Fig. 6). 코아시료의 표면에서 Zn과 Ni 함량은 주암댐 내 집수구역의 오염되지 않은 지질기원 하천 퇴적물과 3-4차 수계 하천퇴적물의 함량과 거의 유사하다. Pb과 Cu 함량은 깊이에 관계없이 3-4차 수계 퇴적물의 함량보다 현저하게 높은 것으로 나타났다. 이는 주암댐으로 유입된 퇴적물이 호저 바닥에 퇴적되기까지 이동과정에서 이들 원소의 오염이 추가적으로

발생되고 있다는 것을 지시한다. 호저퇴적물에 함유된 Cr 함량은 코아시료 8-10 cm에서 검출된 함량(최대 232.2 µg/g)을 제외하면, 3-4차 수계퇴적물의 Cr함량과 거의 유사한 함량을 보이고 있으며, 시추 시료의 깊이에 관계없이 거의 일정한 함량을 나타내고 있다.

코아시료 C-1-2에서도, Cu, Pb 및 Zn의 표면집적현상이 관찰되었다(Fig. 7). Cr 및 Ni 함량의 수직적 분포는 서로 유사한 것으로 나타났으며, 8-25 cm 구간에서 완만하게 최대 함량을 보이고 있다. 이 시추 시료에서도 Zn과 Ni 함량은 3-4차 수계 퇴적물의 이들 원소의 함량과 유사한 것으로 나타났으며, Pb과 Cu 함량은 3-4차 수계 퇴적

**Table 6.** The heavy metal and trace element concentrations in sediment cores in the central areas of Juam reservoir [µg/g]

Sample No.	Depth(cm)	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
B-3-1	2	13.95	-	53.49	50.04	31.89	70.20	88.32	757.2
	4	16.62	-	56.01	42.03	31.11	68.58	86.13	681.6
	6	24.36	0.075	52.23	42.27	29.76	67.29	80.37	706.2
	8	16.56	-	51.03	38.94	28.86	63.24	80.55	692.4
	10	21.96	-	232.2	36.45	28.20	59.91	77.19	743.7
	12.5	25.38	-	48.84	37.86	27.27	62.97	87.99	797.1
	15	22.92	0.288	58.14	33.99	30.48	60.90	84.18	788.1
C-1-2	4	12.46	0.972	62.85	40.65	32.01	68.85	90.03	694.8
	6	12.98	0.552	64.20	39.00	32.76	65.91	86.70	694.5
	8	12.25	0.522	61.05	36.96	31.50	63.03	82.95	664.2
	10	12.20	0.975	68.31	42.81	33.57	63.63	88.65	693.0
	12.5	11.84	1.224	67.95	34.47	32.67	57.54	85.41	661.8
	15	9.92	1.230	65.76	37.86	31.98	55.56	85.05	628.8
	17.5	9.82	1.887	68.52	32.61	34.47	57.09	89.10	636.6
	20	11.47	1.011	66.66	32.25	32.43	54.57	82.92	634.8
	25	12.47	1.359	68.01	29.73	33.39	55.20	85.08	647.1
	30	12.77	0.969	64.65	27.36	31.68	52.89	86.22	638.7
	35	12.56	1.248	59.16	29.40	29.52	52.38	80.58	636.6
B-2-2	40	9.38	1.026	58.71	27.54	29.97	54.75	82.29	600.3
	45	12.68	0.552	54.18	32.10	28.38	56.34	78.42	608.7
	4	9.19	0.726	52.98	1001.4	24.33	92.13	102.42	524.4
	6	9.36	0.18	51.48	409.8	24.60	72.03	73.41	524.4
	8	9.80	0.225	55.56	356.4	28.02	80.25	73.80	576.6
	10	9.57	0.297	62.43	418.2	31.29	72.06	80.55	601.5
	12.5	8.72	1.023	69.66	410.4	34.35	70.68	79.23	643.2
	15	8.02	0.987	66.24	497.4	31.68	74.88	85.05	627.3
	17.5	8.17	0.936	69.57	570.6	25.32	55.92	101.61	434.7
	20	8.38	0.120	64.77	742.8	23.49	50.79	73.41	379.5
	25	8.10	-	52.71	747.6	21.18	58.92	78.03	378.9
	30	8.65	-	56.10	987.0	19.38	61.20	59.94	374.7
	35	8.97	-	55.20	739.8	21.33	48.45	59.73	480.3
40	9.33	0.666	59.31	353.4	23.61	54.24	78.45	606.3	
45	8.33	0.828	50.31	373.8	19.05	45.75	70.11	486.3	
50	8.86	1.038	59.19	507.6	23.88	53.46	81.63	747.0	
55	12.28	-	62.58	505.8	24.24	55.53	77.07	789.3	
60	11.67	0.432	59.55	378.0	23.85	54.48	81.39	779.1	
65	10.58	0.456	75.63	366.0	29.25	50.70	79.74	578.4	

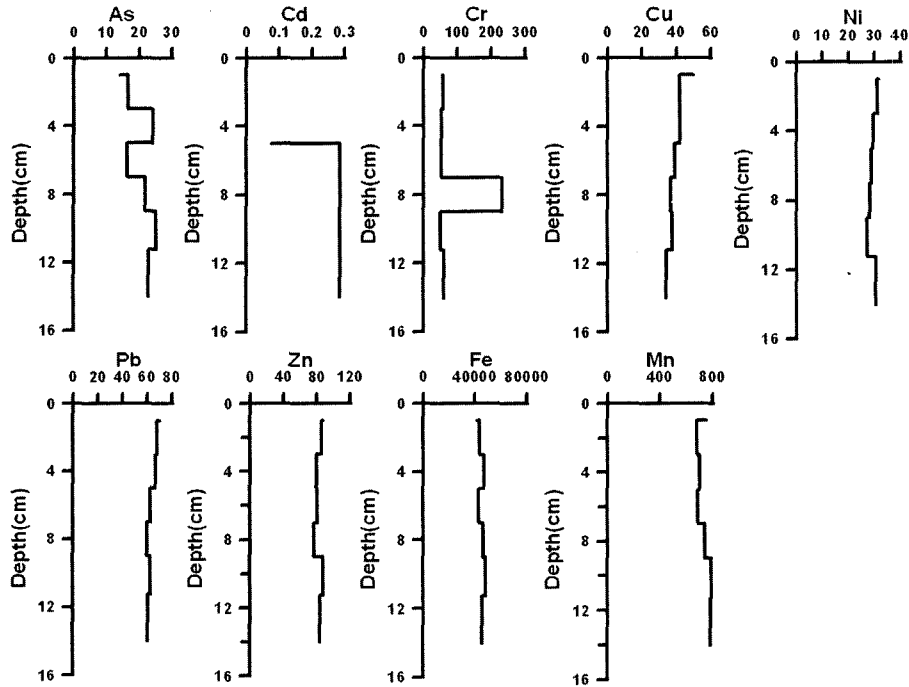


Fig. 6. The vertical distribution of heavy metal concentrations ( $\mu\text{g/g}$ ) in the bottom sediments (B-3-1).

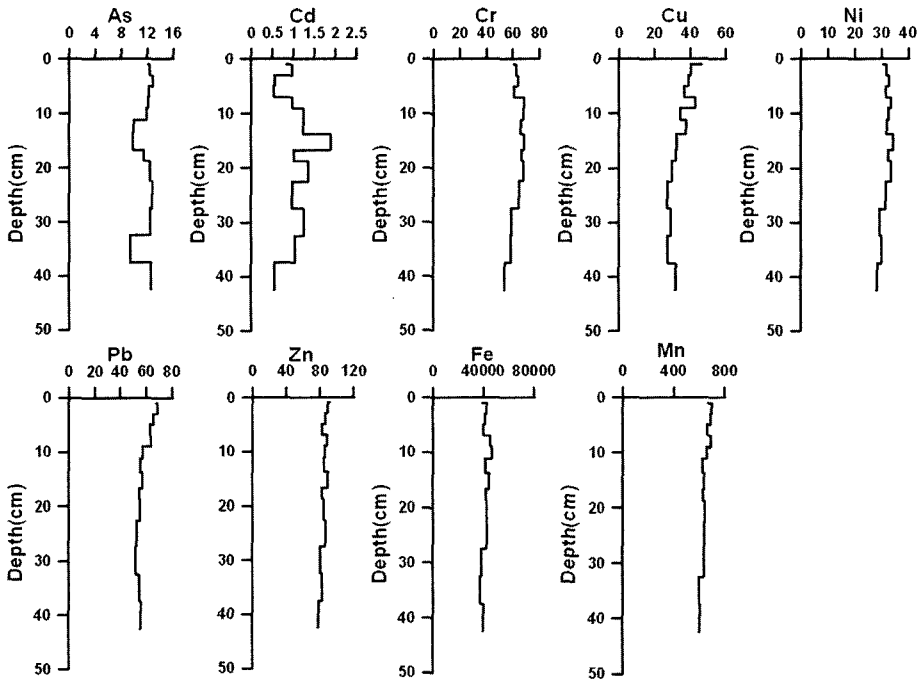


Fig. 7. The vertical distribution of heavy metal concentrations ( $\mu\text{g/g}$ ) in the bottom sediments (C-1-2).

물의 함량보다 더 높게 나타났다.

코아시료 B-2-2의 경우, 표면집적 현상이 현저한 원소는 Pb 뿐이며 Zn도 미약하게 관찰된다(Fig. 8). Cr 및 Ni의 수직적 분포 현상은 서로 유사한 것으로 나타났으며,

8-20 cm 구간에서 최대 집적현상을 보이고 있다. 한편, 퇴적물 표면부 (0-4 cm)에서의 Cu의 함량은 다른 두 코아시료에서 보다 함량이 최고 20배 높은 것으로 나타났다. 이런 Cu 함량은 주암댐으로 유입되는 3·4차 수계 하천퇴

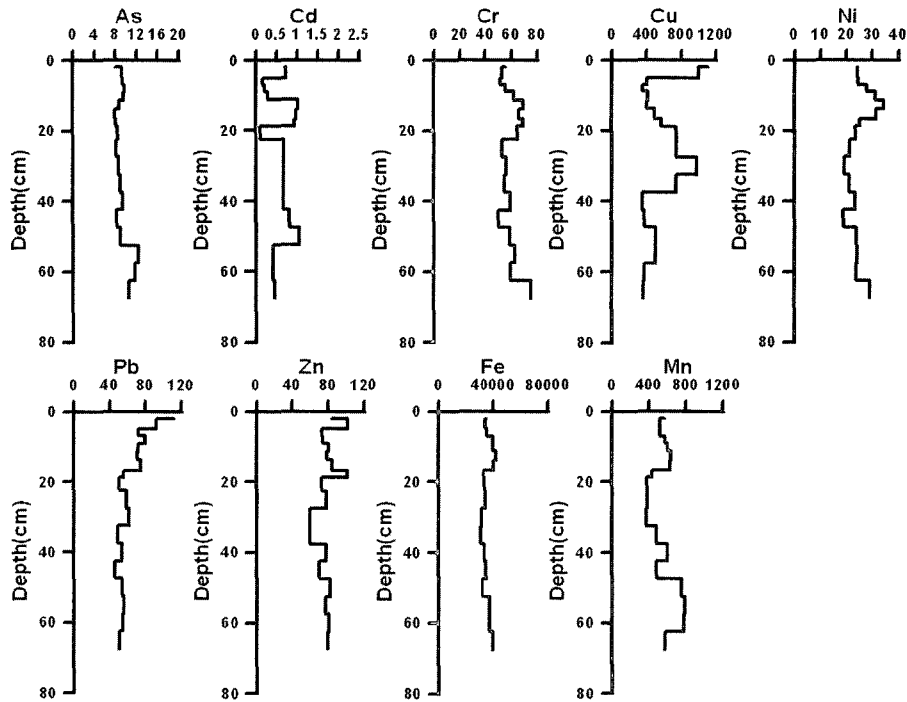


Fig. 8. The vertical distribution of heavy metal concentrations ( $\mu\text{g/g}$ ) in the bottom sediments (B-2-2).

적물 중 20  $\mu\text{m}$  이하의 실트질 하천퇴적물의 Cu 함량과 유사하다(이평구 등, 2005).

3.3.3. 주암댐의 유입구에서 채취한 코아시료에서의 중금속 원소의 수직적 분산특성

주암댐 호수의 연변부를 따라 3-4차 수계와 주암댐 호수가 합쳐지는 지점을 선택하여 채취한 코아시료에 대한 수직적 중금속의 분산특성과 주암댐 내의 코아시료에 대한 수직적 분산특성을 비교하였다.

코아시료 C-5를 제외하고, 3-4차 수계와 주암호가 합쳐지는 지점의 코아시료들의 Cu의 수직적 분산 특성은 서로 유사하게 나타난다. Cu는 퇴적물-물과의 접촉부에서 코아시료의 일정 심도까지 함량이 낮아지다가 일정 심도가 되면 다시 크게 증가된다. C-3 시료의 6-15 cm 구간, C-4의 8-16 cm 구간, C-6는 10-12 cm 구간, C-7는 6-10 cm 구간, C-8번은 14-20 cm 구간 및 C-9번 시료는 12-16 cm 구간에서 Cu 집적현상이 뚜렷하게 관찰되었다 (Table 7). 이런 결과는 유기물질과 밀접하게 수반된 Cu 이온이 퇴적작용 후 분해된 유기물질로 인하여 용출되었기 때문인 것으로 추정된다.

코아시료 C-4 시료에서는 As, Ni, Pb, Cd 및 Zn의 총 함량이 심도가 증가할수록 감소하는 표면집적 현상이 뚜렷하게 관찰되었으며, 이 결과는 주암댐이 건설된 후 주

암댐의 서반부로부터 유입된 퇴적물에 이들 원소의 인위적인 유입이 뚜렷하게 증가됨을 지시하는 것으로 해석된다. 중금속의 집적에 의해 영향을 받은 퇴적물의 깊이는 대략 8 cm 정도인 것을 의미한다. 이는 주암댐 집수구역 서반부에 분포하는 폐광된 석탄광산으로부터 유실된 폐석에 의한 영향일 것으로 판단된다. 코아시료 C-3번에서는 Pb, Zn 및 Ni, C-5번에서는 As의 표면집적 현상이 잘 관찰되었으며, C-6번에서는 Zn, Cd 및 Ni, C-7번에서는 Pb, Zn, Ni 및 Mn, C-8번에서는 Pb, C-9번에서는 As, Pb, Zn 및 Mn과 C-10에서는 Zn의 표면집적 현상이 미약하게 관찰되었다. 이런 결과는 주암댐 건설 이후 그 지점에서 이들 원소의 유입이 증가되고 있음을 지시한다 (Table 7).

3.4. <sup>210</sup>Pb 방법을 이용한 퇴적속도 산정

퇴적물 내 <sup>210</sup>Pb의 농도는 퇴적작용 기간 동안 상부 물로부터 유입된 기원, 지질시료의 고유함량 및 방사성 붕괴에 의해서 좌우된다. 대부분의 대기 중 <sup>210</sup>Pb는 자각으로부터 기원한 <sup>222</sup>Rn의 붕괴로 만들어진다. 이러한 <sup>210</sup>Pb는 강수 및 건조 강하에 의하여 <sup>210</sup>Pb의 반감기보다 짧은 기간 (22.3/year)에 지표로 떨어진다. 지구에서의 매년 <sup>210</sup>Pb의 퇴적율은 25 mBq/cm<sup>2</sup> 정도이며, 지리적 요인에 따라 상이한 값을 갖는다.

**Table 7.** The heavy metal and trace element concentrations in sediment cores in the border of Juam reservoir [ $\mu\text{g/g}$ ]

Sample No.	Depth(cm)	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
C-3	2	-	-	57.9	110.5	35.1	73.5	117.4	276.1
	4	-	-	49.8	84.8	29.8	55.8	86.6	239.7
	6	-	-	57.9	152.1	30.8	56.0	84.9	229.9
	10	-	-	58.4	158.6	30.2	55.5	85.9	237.6
	12.5	-	-	56.9	105.3	29.2	46.1	73.3	257.1
	15	-	-	71.2	140.9	33.1	58.0	88.9	312.6
	17.5	-	-	45.7	84.5	25.0	39.8	69.8	259.1
	20	-	-	72.9	66.5	34.6	54.8	88.1	382.1
C-4	2	14.3	1.9	32.8	77.5	32.9	73.0	96.0	449
	4	17.0	3.3	32.5	92.7	23.6	61.4	121.3	488
	6	15.7	1.9	31.2	75.1	22.7	65.2	84.8	495
	8	11.9	2.5	33.4	116.8	20.6	49.4	82.6	535
	10	10.2	1.3	31.3	123.1	18.1	45.5	59.4	632
	12	11.1	2.3	33.6	151.8	19.2	43.5	59.6	620
	14	6.4	1.7	38.2	150.3	20.3	45.3	64.7	552
	16	5.5	1.5	36.9	218.6	19.7	42.5	56.3	458
C-5	2	8.6	2.6	48.4	242.9	25.4	64.8	109.9	301
	4	8.1	2.2	48.4	272.2	24.9	80.3	109.2	286
	6	6.3	2.8	51.5	418.6	24.2	58.2	112.1	279
	8	6.9	2.4	55.9	276.3	26.8	58.6	105.2	301
	10	4.6	3.1	61.0	288.5	29.6	80.7	131.1	293
	12	6.8	2.7	59.4	173.1	29.2	62.2	106.2	299
	14	6.1	2.5	60.7	204.8	28.4	65.8	128.0	297
	16	6.8	2.6	62.8	173.8	35.9	53.4	91.6	300
C-6	2	8.4	3.3	54.8	98.2	26.2	50.7	92.7	382
	4	6.2	2.4	51.2	72.9	24.1	53.3	88.7	350
	6	5.8	2.7	51.9	81.6	24.8	53.2	96.3	368
	8	6.7	3.1	47.9	109.7	22.3	54.6	85.3	344
	10	6.8	2.4	47.1	366.0	20.8	51.7	80.4	332
	12	6.4	1.9	44.5	547.2	26.3	53.8	80.0	332
	14	5.4	2.4	47.0	331.2	33.0	50.0	80.3	302
	16	6.9	2.3	46.9	237.3	24.6	49.8	88.2	339
	18	12.3	2.4	54.2	136.5	30.9	53.3	85.3	452
C-7	2	-	-	55.6	48.4	36.5	56.5	92.2	474.6
	4	-	-	37.4	34.4	25.1	39.2	70.1	285.6
	6	-	-	53.4	49.1	32.5	59.2	80.4	380.1
	8	-	-	54.0	70.6	36.7	59.1	86.5	377.6
	10	-	-	47.7	80.4	30.7	51.6	73.7	298.1
	12.5	-	-	61.4	42.6	34.7	55.2	77.0	354.6
	15	-	-	43.6	39.2	24.5	41.5	57.3	276.6
	17.5	-	-	42.8	44.6	26.0	39.1	58.6	274.6
	20	-	-	46.4	40.2	24.9	41.7	59.3	283.6

호저 퇴적물 시추 시료 내  $^{210}\text{Pb}$  농도의 시간적(수직적) 변화를 이해하기 위해서는 이들 방사성 핵종의 기원을 알아야 한다. 시추 시료 내 각 층에서의  $^{210}\text{Pb}$ 는 3가지의 기원을 가진다. 이들은 크게 자연적인 기원과 인위적인 기

원으로부터 유래한다. 자연적인 것에는 2가지가 있는데, 그중 하나는 대기 중에서  $^{222}\text{Rn}$ 의 붕괴에 의해서 형성되는 것으로서 “unsupported  $^{210}\text{Pb}$ ” 라고 부르며, 이를 이용하여 퇴적물의 연령을 계산한다. 또 다른 하나는

Table 7. (coninued)

Sample No.	Depth(cm)	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
C-8	2	4.1	2.0	36.8	251.8	23.2	48.5	66.6	258
	4	2.5	1.3	31.9	137.5	17.4	37.9	62.4	212
	6	2.5	2.0	33.8	126.7	18.8	47.0	67.8	215
	8	2.5	1.3	32.8	130.0	18.1	36.5	62.4	208
	10	2.9	2.1	36.3	164.6	22.7	43.1	68.2	224
	12	2.6	1.9	35.3	145.5	19.2	37.4	70.6	251
	14	3.2	1.4	32.6	127.6	19.3	36.8	64.6	219
	16	3.5	1.8	36.9	241.0	20.9	36.5	67.1	240
	18	3.1	1.6	33.8	280.7	18.8	32.8	62.8	225
	20	3.1	1.9	36.4	283.6	20.9	36.5	71.9	264
	22	4.1	1.3	31.2	178.4	18.9	31.1	64.8	228
	24	4.3	3.1	35.7	225.4	24.4	43.0	96.2	280
C-9	2	17.2	2.8	58.9	94.6	36.4	62.3	94.4	480
	4	16.6	2.7	58.8	105.6	33.1	58.3	95.6	425
	6	13.3	2.3	55.5	86.4	31.4	64.6	90.8	354
	8	14.1	2.7	61.1	72.1	35.0	63.4	94.7	350
	10	14.1	3.1	62.0	116.8	33.5	65.4	91.0	336
	12	10.8	1.9	63.0	166.7	33.8	59.2	94.9	342
	14	9.1	0.6	63.9	235.4	32.4	49.5	92.6	336
	16	13.3	2.3	66.3	316.2	35.3	54.1	75.4	327
	18	16.7	3.1	73.0	153.9	36.3	51.0	82.7	368
	20	15.6	2.7	67.3	284.6	33.9	48.5	70.5	360
C-10	2	-	-	44.5	68.4	26.7	38.8	78.4	182.1
	4	-	-	41.5	64.1	24.8	37.5	71.1	173.3
	6	-	-	46.9	87.5	25.8	37.6	65.7	158.0
	8	-	-	53.0	140.2	30.5	34.5	67.9	167.2
	10	-	-	53.6	135.8	26.9	40.3	70.7	168.9
	12.5	-	-	69.1	132.0	29.4	44.8	71.4	187.5
	15	-	-	59.9	110.5	28.4	40.9	73.2	170.4

“supported <sup>210</sup>Pb” 라고 하며, 이는 원래부터 퇴적물 내에 존재하는 <sup>226</sup>Ra로부터 형성된 <sup>222</sup>Rn의 붕괴산물이다. 이와는 반대로 인위적인 기원의 <sup>210</sup>Pb은 산업시설로부터 수계로 직접 유출되는 방사성 핵종이 풍부한 폐기물로부터 유래한다.

“supported <sup>210</sup>Pb”은 일정한 값을 갖는다고 가정할 수 있다. 주암댐 호수저 퇴적물 시추 시료에서는 약 17.5 cm부터 거의 일정한 <sup>210</sup>Pb 값을 가진다(Table 8). 따라서 이들의 평균값을 “supported <sup>210</sup>Pb” 으로 정하였다. Fig 9에는 각 층의 깊이에 따른 로그 스케일의 <sup>210</sup>Pb excess activities (“unsupported <sup>210</sup>Pb” activities)를 도시하였다. 여기서 excess <sup>210</sup>Pb 값은 각 층에서 측정된 <sup>210</sup>Pb 값에서 “supported <sup>210</sup>Pb” 값을 뺀 값이다. 또한 Fig. 9에는 CF:CS <sup>210</sup>Pb model (constant flux : constant sedimentation rate)을 적용하여 얻어진 회귀선이 표시되어 있다(Robinson *et al.*, 1978). 이 모델에서는 퇴적물이 일정하게 유입되며, 퇴적속도도 일정하다고 가정한다. 이

Table 8. <sup>210</sup>Pb concentrations and sedimentation rate in the sediment core (B-2-2)

Depth (cm)	<sup>210</sup> Pb (mBq/g)	Sedimentation rate (cm/year)
0-2	230.8±11.8	0.91
4-6	213.6±14.0	
8-10	167.6±12.6	
12.5-15	177.0±6.8	
17.5-20	57.5±6.5	
45-50	58.3±4.7	

번 경우에 CF:CS 연령 모델을 선택한 것은 “unsupported <sup>210</sup>Pb”값과 깊이의 관계가 직선상으로 좋은 관계를 보여 주기 때문이다. 위의 가정에 따라, 깊이 z (cm)에서의 excess <sup>210</sup>Pb 값인 A(z) (Bq/kg)은 다음과 같다.

$$A(z) = A_0 \cdot e^{-\lambda \frac{z}{w}}$$

여기서 A<sub>0</sub> (Bq/kg)은 깊이 0 (퇴적물-물 경계면)에서 가

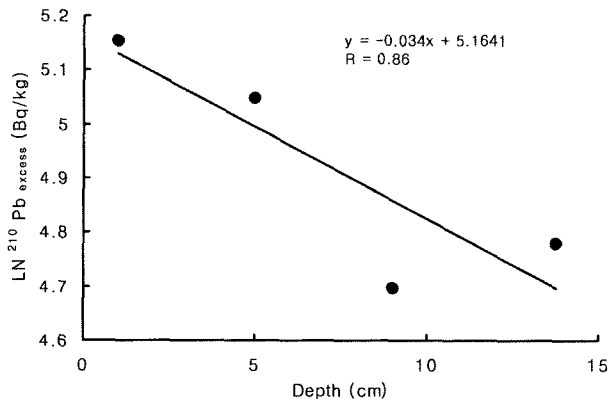


Fig. 9. The <sup>210</sup>Pb excess logarithmic profile in the sediment layers of the core B-2-2.

장 최근에 퇴적된 퇴적물의 excess <sup>210</sup>Pb (Bq/kg) 농도이며,  $\lambda$ 은 <sup>210</sup>Pb의 붕괴상수 ( $0.031 \text{ year}^{-1}$ ),  $\omega$ 는 퇴적율 ( $\text{cm year}^{-1}$ )이다.

<sup>210</sup>Pb 연령 측정은 다음과 같은 가정을 바탕으로 한다 :

- (i) 퇴적물 내에서의 <sup>210</sup>Pb의 손실은 오직 방사성 붕괴에 의해서만 발생된다(즉 퇴적작용이 일어난 후, 어떠한 층과의 혼합 및 <sup>210</sup>Pb의 화학적 이동은 일어나지 않는다) ;
- (ii) 퇴적물-물 경계에서의 방사성 핵종의 유입은 일정하게 유지 된다 ; (iii) 퇴적물 내의 <sup>226</sup>Rn에 의해 형성되는 지질매체 내의 <sup>210</sup>Pb의 농도는 항상 일정하다.

위와 같은 조건하에서, 퇴적물 시추 시료의 수직적 excess <sup>210</sup>Pb 분포로부터 구한 퇴적율은 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$A(z) = A_0 \cdot \exp(-bz)$$

여기서  $b$ 는 로그 스케일의 excess <sup>210</sup>Pb (Bq/kg) 농도와 깊이에 대한 관계식의 경사값이다. 이 값은  $\lambda/\omega$ 와 같은 값인 데, 여기서  $\omega$ 는 퇴적율 ( $\text{cm/year}$ )이며  $\lambda$ 는 방사성 붕괴 상수값이다( $0.0311/\text{year}$  for <sup>210</sup>Pb).

<sup>210</sup>Pb의 로그값과 깊이에 대한 least square weighted fitting은 다음과 같이 표시된다(Fig. 9).

$$\text{Ln } A(z) = 5.16 - 0.034 * z$$

위 식의 R 값은 0.86이며, 이로부터 계산된 퇴적 속도는 다음과 같다.

$$\omega = 0.91 \text{ cm year}^{-1}$$

이를 적용하면 주암댐 완공 이후 13년간 약 12 cm의 퇴적물이 평균적으로 퇴적된 것으로 추정된다. 이러한 연구 자료는 주암댐 호수 바닥에 퇴적된 퇴적물의 관리방안을

을 구축하는 데 중요한 정보로 사용될 것이다.

#### 4. 결 론

1. 주암댐 호저 퇴적물의 중금속 및 미량원소는 공간적으로 거의 일정한 함량을 보이며, 각 원소의 평균 함량은 As 14.9  $\mu\text{g/g}$ , Cd 0.8  $\mu\text{g/g}$ , Cu 30.7  $\mu\text{g/g}$ , Ni 34.7  $\mu\text{g/g}$ , Pb 63.3  $\mu\text{g/g}$ , Zn 87.9  $\mu\text{g/g}$ 이다. 1-2차 수계 및 3-4차 수계의 하천퇴적물과 비교하여 호저 퇴적물에 비교적 높은 Pb와 Cu 함량을 나타낸다.

2. Cu, Pb, Zn, Ni 및 Cr의 함량은 20  $\mu\text{m}$  이하 입도의 퇴적물에서 가장 높은 반면에 As는 2 mm-200  $\mu\text{m}$  혹은 200-100  $\mu\text{m}$  입도의 퇴적물에서 가장 높다. 3-4차 수계 하천퇴적물과 호저퇴적물의 입도별 중금속 함량을 비교하면, 2 mm-200  $\mu\text{m}$  입도에서는 호저퇴적물의 중금속 함량이 약 2-4배 더 높고, 20  $\mu\text{m}$  이하의 입도에서는 Ni를 제외한 모든 원소의 함량이 3-4차 수계 하천퇴적물에서 더 높은 것으로 나타났다.

3. 간극수에 용해된 원소 중에서 가장 함량이 높은 것은 Fe와 Mn이었으며, 일반적으로 코아시료의 상부로부터 하부로 갈수록 증가하는 경향이 관찰되었다. 반면에 용해된 Zn과 Cu함량이 가장 높은 부분은 코아시료의 최상부이며, 산화-환원환경의 변화에 따른 유기물질 및 산화광물의 용해작용과 관련이 있다.

4. 코아시료의 퇴적물 내 Cu, Ni, Pb 및 Zn 함량은 0-4 cm 구간에서 가장 높은 표면집적 현상이 관찰되었으며, Pb와 Cu 함량은 현저하게 높다. 이는 인위적인 오염에 기인하는 것으로 해석된다.

5. “unsupported <sup>210</sup>Pb”을 이용하여 계산된 주암댐 호저 퇴적물의 퇴적속도는  $\omega = 0.91 \text{ cm year}^{-1}$ 으로써 주암댐이 완공된 이후 13년간 약 평균 12 cm의 퇴적물이 퇴적된 것으로 추정된다. 이러한 자료는 주암댐 호수 바닥에 퇴적된 퇴적물의 관리방안을 구축하는 데 중요한 정보로 사용될 것이다.

#### 사 사

이 연구는 공공기술연구회 정책연구사업 (인공호수(주암댐) 내 중금속의 분포와 집적에 관한 전과정 평가, 정책-02-1)과 일부 한국지질자원연구원 기본사업(전국 금속광화대 권역별 중금속재해 전과정평가 및 자연안정화기술 개발, KR-04(연차)-13-1)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 염승준, 이평구, 강민주, 신성천, 유연희, 2004, 주암댐 집수유역 내 하상퇴적물의 중금속 오염현황과 거동 특성, *자원환경지질*, **37**, 311-324.
- 이평구, 염승준, 지세정, 박성원, 손병국, 김정찬, 신성천, 조호영, 권이균, 공기수, 연규훈, 강민주, 신영식, 2004, 인공호수(주암댐) 내 중금속의 분포와 집적에 관한 전과정평가, 한국지질자원연구원, p. 358.
- 이평구, 염승준, 지세정, 신영식, 오창환, 이요상, 2005, 입도가 주암댐 하천퇴적물의 중금속 함량에 미치는 영향과 납 동위원소를 이용한 오염원 규명, *자원환경지질 (투고중)*.
- 한국수자원공사, 2001, 주암다목적댐 관리연보, p. 391.
- Appleby, P.G. and Olfield, F., 1992, Application of  $^{210}\text{Pb}$  to sedimentation studies, In: Ivanovich, M. and Harmon, R.S. (ed.), *Uranium Series Disequilibrium. Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences*, p. 731-778.
- Goldberg, E.D., Hodge, V., Koide, M., and Griffin, J., 1978, A pollution history of Chesapeake Bay, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 1413-1425.
- Hamilton, T., Fowler, S., Miquel, J.C., and La-Rosa, J., 1996, Pb dating of sediment from Central and Northern Adriatic Sea: the deposition and preservation of sedimentary organic carbon, Conference on Physical and Biogeochemical Process of the Adriatic Sea, Ancona, Italy. April, p. 23-27.
- Koide, M., Brulant, K.W., and Goldberg, E.D., 1973,  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  and  $^{210}\text{Pb}$  geochronologies in marine and lake sediments, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **37**, 1171-1187.
- Sayltes, F.L., Livingston, H.D., and Panteleyev, G.P., 1997, The history and sources of particulate  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  deposition in sediments of the Ob River Delta, Siberia, *Sci. Total Environ.*, **202**, 25-41.
- Silva-Braganca, M., Julia-Camara, Oliveira-Godoy, and Jose-arcosde, 1995, Geochronological study of the Guanabara Bay (Rio de Janeiro State, Brazil) using Pb dating technique and the constant rate of supply model, Proceedings of the Symposium on Regional Integration in a Nuclear Energy, **606**, p. 221-231.
- Robinson, J.A., 1978, Geochemical and geophysical applications of radioactive lead, In: Nriagu (ed.), *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*, p. 285-393.
- Wood, J.M., Horwitz, P., and Cox, H., 1992, Levels of heavy metals in dated sediments from Lindisfarne Bay, Derwent Estuary, Tasmania, *Sci. Total Environ.*, **125**, 253-262.