

ORIGINAL ARTICLE

성층기와 순환기에 따른 안동댐 퇴적물의 중금속 오염 특성 및 오염도 평가

권희원 · 김영훈 · 김정진^{1)*}

국립경국대학교 환경공학과, ¹⁾국립경국대학교 지구환경과학과

Characteristics of Heavy Metal Contamination and Pollution Assessment in Sediments of Andong Dam During Stratification and Circulation Periods

Hee-Won Kwon, Young Hun Kim, Jeong Jin Kim^{1)*}

Department of Environmental Engineering, Gyeongsuk National University, Andong 36729, Korea

¹⁾*Department of Earth and Environmental Sciences, Gyeongsuk National University, Andong 36729, Korea*

Abstract

This study evaluated heavy metal contamination in sediments from the Andong Dam reservoir under seasonal hydrological conditions. Sediment samples were collected during stratification and circulation periods. The concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd), lead (Pb), zinc (Zn), and mercury (Hg) were analyzed. Contamination levels were assessed using lake sediment quality guidelines and pollution indices, including the contamination factor, geoaccumulation index, and pollution load index. During the stratification period, Cd concentrations ranged from 1.10 to 10.70 mg/kg, whereas during the circulation period they ranged from 1.90 to 10.77 mg/kg. At some sites, concentrations exceeded Grade IV of the lake sediment contamination criteria, and the corresponding CF values reached approximately 27, indicating extremely high accumulation relative to background levels. As concentrations ranged from 4.70 to 103.27 mg/kg during stratification and from 14.70 to 98.20 mg/kg during circulation, with several sites also exceeding Grade IV. Zn concentrations reached up to 736.50 mg/kg, corresponding to Grade II at certain sites, whereas Pb and Hg exhibited relatively low contamination levels. The Igeo results classified Cd as strongly to extremely contaminated, and As as moderately to strongly contaminated at high-concentration sites. The PLI values exceeded 1 at most sites during both stratification and circulation periods, indicating multi-metal contamination, with some locations showing very high pollution burdens exceeding 4. The Andong Dam reservoir was thus evaluated as a high-accumulation contaminated reservoir type, with Cd and As concentrations significantly higher than the average levels reported for sediments in other dams and reservoirs in Korea.

Key words : Heavy metal, Sediments, Andong Dam, Stratification and circulation periods, Contamination factor

1. 서론

산업화와 도시화의 진행에 따라 수환경 내 중금속 오염은 중요한 환경 문제로 인식되고 있으며, 특히 하천 및 저수지 퇴적물은 중금속의 주요 저장소이자 잠재적

내부오염원으로 기능한다(Förstner and Wittmann, 1983). 중금속은 생분해되지 않고 장기간 환경 내에 잔존하며, 입자상 물질 및 유기물과 결합하여 퇴적물에 축적된다. 이러한 중금속은 수리 환경 변화, 산화·환원 조건 변동 및 퇴적물 재부유 과정 등을 통해 다시 수계로

Received 11 March, 2026; **Revised** 21 April, 2026;

Accepted 1 May, 2026

***Corresponding author :** Jeong Jin Kim, Department of Earth and Environmental Sciences, Gyeongsuk National University, Andong 36729, Korea

Phone : +82-54-820-5038

E-mail : jjkim@andong.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

방출될 수 있으며, 수질 악화 및 생태계 위해성을 증가시키는 요인으로 작용한다(Müller, 1969; Hakanson, 1980).

댐과 저수지는 유속 감소와 체류시간 증가로 인해 부유물질과 중금속의 침강 및 축적이 활발하게 발생하는 환경이다. 특히 보(weir) 및 저수지와 같은 정체수역에서는 퇴적물 집적(sediment focusing) 현상이 두드러지며, 유역으로부터 유입된 중금속이 장기적으로 축적되는 경향이 있다(Förstner and Wittmann, 1983). 국내에서도 저수지 및 하천 퇴적물의 중금속 오염 특성에 대한 연구가 수행되고 있으며, 유역 특성, 토지 이용 및 수리 조건에 따라 중금속 농도와 축적 특성이 크게 달라지는 것으로 보고되었다(Son et al., 2021; Jeong et al., 2022). 특히 유속이 감소하는 저수지 및 보 구간에서는 미세입자의 침강과 함께 중금속 축적이 증가하는 것으로 나타나, 퇴적물이 수환경 오염의 중요한 저장소로 작용할 수 있음이 확인되었다(Son et al., 2021).

퇴적물 중금속 오염 평가는 일반적으로 절대농도 기준을 이용하여 수행되지만, 자연적 배경농도의 영향을 고려하지 못하는 한계가 있다. 이에 따라 최근에는 배경농도를 고려한 오염도 지수 기반 평가 방법이 널리 활용되고 있다. 오염계수(contamination factor, CF)는 배경농도 대비 축적 정도를 정량적으로 평가하는 지표이며(Hakanson, 1980), 지화학적 축적지수(geoaccumulation index, Igeo)는 자연적 변동성을 보정하여 오염 정도를 평가할 수 있는 지표이다(Müller, 1969). 또한 복합오염지수(pollution Load Index, PLI)는 여러 금속의 오염도를 종합적으로 평가할 수 있는 지표로 활용되고 있다(Tomlinson et al., 1980; Abraham and Parker, 2008). 국내 주요 저수지를 대상으로 수행된 연구에서도 대부분 저수지는 낮은 오염 수준을 나타내는 반면, 일부 저수지는 특정 중금속의 축적이 높은 특성을 보이는 것으로 보고되었다(Jeong et al., 2022). 안동댐 유역은 광산 활동, 지질학적 배경, 농업 및 생활계 유입 등 다양한 잠재적 오염원을 포함하고 있으며, 특히 Cd와 As는 광산 및 자연 기원의 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다(Kim et al., 2015; Jeong et al., 2022).

안동댐은 낙동강 상류에 위치한 대규모 다목적 저수지로, 다양한 유역 환경의 영향을 받는 수계이다. 그러나 안동댐 퇴적물의 중금속 오염 특성에 대한 계절적 비교 연구는 제한적으로 수행되어 왔으며, 특히 성층기와

순환기에 따른 중금속 축적 특성과 오염도 지수를 종합적으로 평가한 연구는 부족한 실정이다. 저수지는 성층기와 순환기 동안 수온 구조 및 산화-환원 조건이 변화하며, 이러한 변화는 퇴적물 내 중금속의 거동에 영향을 미칠 수 있다. 안동댐은 일반적으로 여름철에 수온 성층이 형성되고, 가을철에는 전층 혼합(turnover)이 발생하는 전형적인 온대 저수지의 특성을 보이며, 성층기 동안 수온약층(thermocline)은 약 10-20 m 깊이에서 형성된다(Park et al., 2017). 따라서 본 연구에서는 안동댐 저수구역 퇴적물을 대상으로 성층기와 순환기 동안 중금속 농도를 분석하고, 국내 호소 퇴적물 오염평가기준과 함께 CF, Igeo 및 PLI를 적용하여 오염 수준을 종합적으로 평가하였다. 또한 국내 저수지 및 하천 퇴적물 연구 결과와 비교하여 안동댐 퇴적물의 오염 특성을 규명하고, 저수지 퇴적물 관리 및 수환경 보호를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 퇴적물 시료 채취 및 보관

안동댐 저수구역 내 퇴적물 시료는 성층기와 순환기의 수리 환경 특성을 반영하기 위하여 각각 여름철과 겨울철에 채취하였다. 저수구역 내 공간적 분포 특성을 고려하여 상류에서부터 LS-1~LS-9 지점에서 채취하였으며, 비교를 위한 대조군 시료는 낙동강 본류 유입부(SS-1), 동계천(SS-2), 역계천(SS-3) 및 안동댐의 보조댐 하류(SS-4)에서 채취하였다(Fig. 1).

퇴적물 시료는 그랩 샘플러(grab sampler)를 이용하여 0-20 cm 깊이에서 채취하였다. 채취 직후 시료는 폴리에틸렌 용기에 담아 외부 오염을 방지하였으며, 현장에서 아이스박스를 이용하여 저온 상태로 유지한 후 실험실로 운반하였다. 실험실 도착 후 시료는 분석 전까지 4℃ 이하에서 냉장보관하였다.

2.2. 중금속 분석 방법

독성 및 생태위해성이 높고 퇴적물 축적 및 먹이망 전이 가능성이 높은 대표적인 중금속인 비소(As), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 아연(Zn), 수은(Hg)의 함량 분석은 수질오염 공정시험기준의 표준 분석 절차에 따라 수행하였다. 채취한 퇴적물 시료는 실험실로 운반 후 40℃에서 건조한 뒤, 막자사발을 이용하여 균질화하고 100

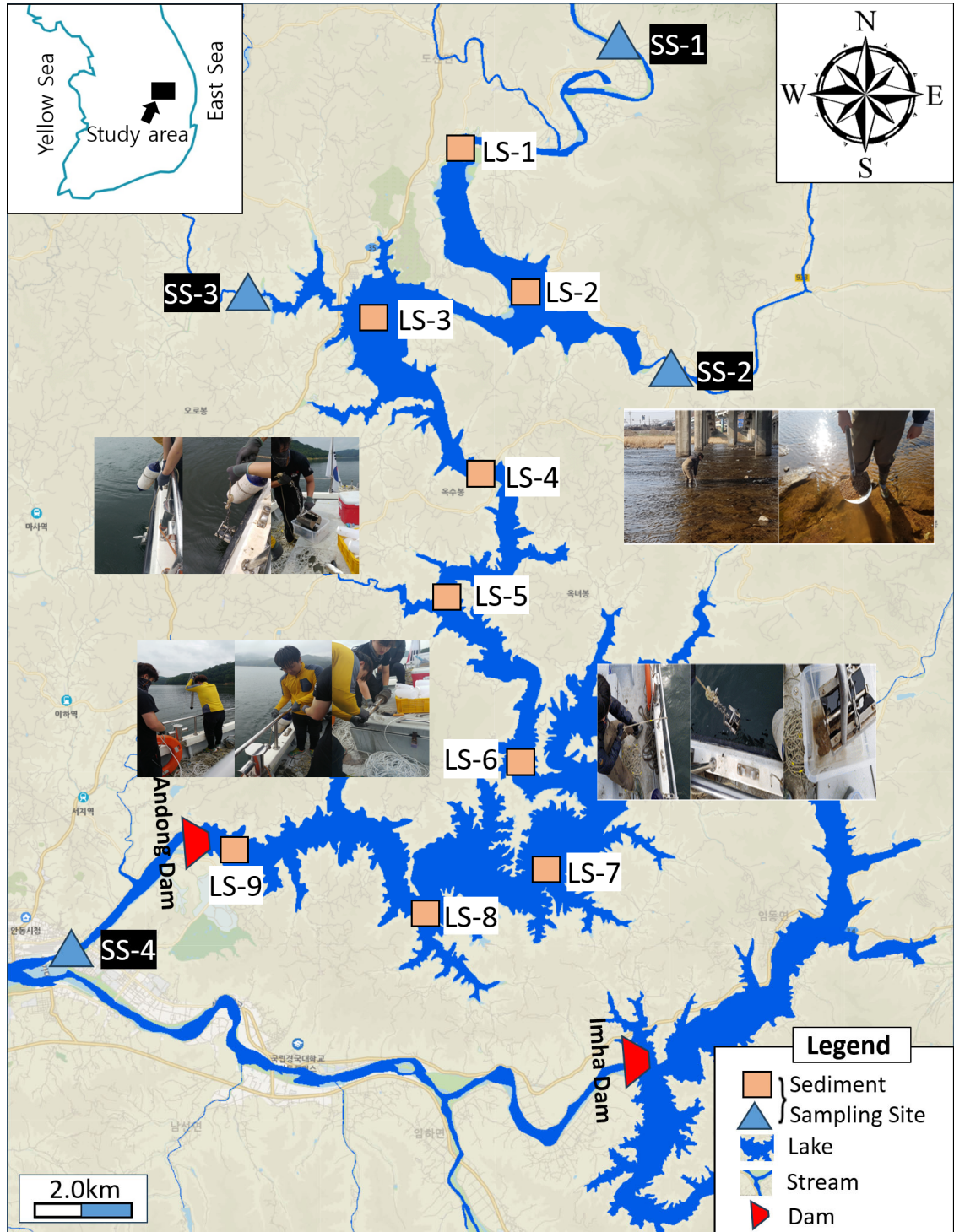


Fig. 1. Sediment sampling sites in Andong Dam reservoir (LS-1~LS-9) and control sites (SS-1~SS-4).

Table 1. Contamination classification based on CF, Igeo, and PLI values

CF values (Hakanson, 1980)	Igeo values (Müller, 1969)	PLI values (Tomlinson et al., 1980)
CF < 1: Low contamination	Igeo ≤ 0: Uncontaminated	PLI = 0: Unpolluted
1 ≤ CF < 3: Moderate contamination	0 < Igeo ≤ 1: Uncontaminated to moderately contaminated	PLI < 1: Background level
3 ≤ CF < 6: Considerable contamination	1 < Igeo ≤ 2: Moderately contaminated	PLI = 1: Baseline level of pollution
CF ≥ 6: Very high contamination	2 < Igeo ≤ 3: Moderately to strongly contaminated	PLI > 1: Presence of pollution
	3 < Igeo ≤ 4: Strongly contaminated	PLI > 2: Heavily polluted
	4 < Igeo ≤ 5: Strongly to extremely contaminated	PLI > 3: Very heavily polluted
	Igeo > 5: Extremely contaminated	

mesh 체를 통과시켜 분석용 시료로 사용하였다. 수은은 별도의 전처리 없이 직접 가열 분해가 가능한 Milestone사의 모델 DMA-80 evo 수은 전용 분석기를 이용하였으며, 그 외 중금속은 Perkin Elmer사의 AVIO 550 ICP-OES를 사용하여 분석하였다. 분석의 정확도와 정밀도를 확보하기 위하여 공시험(blank)과 표준용액, 표준물질(CRM)을 이용하였으며, 시료는 3회 반복 분석하여 평균값을 사용하고 검량선의 결정계수(R²)를 0.99 이상으로 유지하였다. 또한 각 금속별 기기 검출한계(LOD)는 기기 매뉴얼 기준에 따라 산정하였고, 분석 과정에서 교차오염을 방지하기 위하여 시료간 세척 절차를 수행하였다.

2.3. 오염도 지수 산정

퇴적물 중금속 오염 수준을 배경 대비 축적 관점에서 평가하기 위해 오염계수(contamination factor, CF), 지화학적 축적지수(geoaccumulation index, Igeo) 및 복합오염지수(pollution load index, PLI)를 산정하였다. CF는 측정 농도와 배경농도의 비율로 산정하였으며, 배경농도는 국립환경과학원에서 제시한 국내 하천 퇴적물 평균 배경치(As 14.9, Cd 0.4, Hg 0.065, Pb 50.2, Zn 215 mg/kg)를 적용하여 계산하였다(NIER, 2011). Igeo는 보정계수 1.5를 적용한 로그 함수식으로 계산하였으며, PLI는 분석된 모든 금속의 CF 값을 기하평균하여 산정하였다. 각 지수의 오염 단계 분류는 기존 문헌에서 제시한 기준(Hakanson, 1980; Müller, 1969; Tomlinson et al., 1980)을 적용하였다. Table 1은 오염도 계수, 지질축적지수 및 오염부하지수에 따

른 퇴적물 오염 등급 분류 기준을 나타낸 것이다.

오염계수 (CF, Hakanson, 1980)

$$CF = \frac{C_i}{B_i}$$

C_i = 시료 내 금속 농도(mg/kg)

B_i = 배경농도(mg/kg)

지화학적 축적지수(Igeo, Müller, 1969)

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5 \times B_i} \right)$$

1.5 = 자연 변동성 보정계수

복합오염지수(PLI, Tomlinson et al., 1980)

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)^{1/n}$$

n = 금속 개수

3. 결과 및 고찰

3.1. 성층기 퇴적물 중금속 특성

Table 2는 성층기 동안 안동댐 저수지 내 저수지 지점(LS-1~LS-9)과 대조군 지점(SS-1~SS-4)에서 채취한 퇴적물 시료의 중금속 농도를 나타낸 것이다. 성층기 동안 안동댐 저수구역 퇴적물(LS-1~LS-9)의 비소(As) 농도는 4.70~103.27 mg/kg 범위로 나타났으며 평균 68.42 mg/kg이다. 가장 낮은 농도는 LS-1 지점(4.70 mg/kg)이며, LS-3 (65.70 mg/kg) 이후 저수구역 하류로 갈수록 농도가 급격히 증가하여 LS-8 지점

Table 2. Heavy metal concentrations in sediment samples from the Andong Dam reservoir during the stratification period, including reservoir sites (LS-1~LS-9) and control sites (SS-1~SS-4)

Sample No.	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
LS-1	4.70	1.10	0.01	11.00	59.00
LS-2	33.07	6.10	0.12	93.00	315.00
LS-3	65.70	10.70	0.31	119.67	618.33
LS-4	71.10	8.13	0.18	111.00	463.33
LS-5	79.05	7.50	0.16	102.00	371.00
LS-6	82.20	6.57	0.18	117.00	348.00
LS-7	80.63	6.27	0.15	113.33	331.33
LS-8	103.27	9.97	0.16	117.33	566.67
LS-9	96.10	6.75	0.14	133.50	447.00
Min.	4.70	1.10	0.01	11.00	59.00
Max.	103.27	10.70	0.31	133.50	618.33
Avg.	68.42	7.01	0.16	101.98	391.07
SS-1	4.30	1.30	0.00	9.00	85.00
SS-2	3.60	1.30	0.03	45.00	52.00
SS-3	0.40	0.60	0.00	12.00	20.00
SS-4	3.60	1.00	0.01	14.00	35.00

에서 최대값인 103.27 mg/kg를 나타내었다. LS-9 지점 역시 96.10 mg/kg로 매우 높은 농도를 보여 국내 호소 퇴적물 오염평가기준상 IV등급 기준(92.1 mg/kg 초과)을 초과하는 고위험 오염 구간에 해당하였다. LS-6(82.20 mg/kg), LS-7(80.63 mg/kg) 및 LS-5(79.05 mg/kg)는 III등급 범위에 해당하는 중-고도 오염 수준을 나타내어 저수구역 전반에서 비소 농도가 높다는 것을 알 수 있다.

카드뮴(Cd)은 1.10~10.70 mg/kg 범위이며, 평균 7.01 mg/kg이다. LS-3 지점에서 10.70 mg/kg로 가장 높은 농도를 보여 IV등급 기준(6.09 mg/kg 초과)을 크게 초과하였으며, LS-8 지점(9.97 mg/kg), LS-4 지점(8.13 mg/kg), LS-5 지점(7.50 mg/kg) 및 LS-9 지점(6.75 mg/kg) 또한 모두 IV등급에 해당하는 농도값을 나타내었다. LS-6 지점(6.57 mg/kg)과 LS-7 지점(6.27 mg/kg) 역시 IV등급 수준을 초과하여 저수구역 전반에 걸쳐 높은 농도값을 나타내었다.

수은(Hg)은 0.01~0.31 mg/kg 범위로 나타났으며, LS-3 지점에서 최대값(0.31 mg/kg)이지만 모든 시료가 국내 기준상 I~II등급 범위에 해당한다. 납(Pb)은 11.00~133.50 mg/kg 범위이며 평균 101.98 mg/kg

이다. LS-9 지점에서 최대 농도인 133.50 mg/kg이며, LS-3(119.67 mg/kg), LS-6(117.00 mg/kg), LS-8(117.33 mg/kg) 및 LS-7(113.33 mg/kg)의 농도값으로 모두 II등급 범위에 해당한다. 아연(Zn)은 59.00~618.33 mg/kg 범위로 조사 항목 중 가장 높은 농도 수준을 보였으며 평균 391.07 mg/kg이다. LS-3 지점에서 618.33 mg/kg로 최대값을 나타내었으며, LS-8 지점 566.67 mg/kg과 LS-9 지점 447.00 mg/kg로 높지만 국내 기준상 II~III등급 범위에 해당하는 오염 수준이다.

반면 상류 유입부 및 하천 대조군 시료인 SS-1(As 4.30 mg/kg, Cd 1.30 mg/kg), SS-2(As 3.60 mg/kg, Cd 1.30 mg/kg), SS-3(As 0.40 mg/kg, Cd 0.60 mg/kg), SS-4(As 3.60 mg/kg, Cd 1.00 mg/kg)은 모든 중금속 항목에서 I~II등급 수준으로 저수구역 내부와 뚜렷한 차이를 나타내었다.

3.2. 순환기 퇴적물 중금속 특성

Table 3은 순환기 동안 안동댐 저수지 내 저수지 지점(LS-1~LS-9)과 대조군 지점(SS-1~SS-4)에서 채취한 퇴적물 시료의 중금속 농도를 나타낸 것이다. 순환기

Table 3. Heavy metal concentrations in sediment samples from the Andong Dam reservoir during the circulation period, including reservoir sites (LS-1~LS-9) and control sites (SS-1~SS-4)

Sample No.	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
LS-1	14.70	1.90	0.00	58.00	80.00
LS-2	27.70	4.70	0.07	58.00	314.00
LS-3	55.60	6.50	0.22	51.00	357.50
LS-4	60.57	10.53	0.19	70.00	499.67
LS-5	84.75	10.15	0.23	73.00	476.00
LS-6	81.60	10.77	0.18	62.67	530.33
LS-7	96.80	10.55	0.21	61.50	736.50
LS-8	98.20	10.60	0.18	64.00	607.67
LS-9	74.35	9.60	0.18	97.50	515.50
Min.	14.70	1.90	0.00	51.00	80.00
Max.	98.20	10.77	0.23	97.50	736.50
Avg.	66.03	8.37	0.16	66.19	457.46
SS-1	7.40	1.20	0.01	30.00	137.00
SS-2	7.50	1.80	0.01	45.00	58.00
SS-3	13.50	1.20	0.00	32.00	32.00
SS-4	6.90	0.90	0.00	51.00	26.00

동안 안동댐 저수구역 퇴적물(LS-1~LS9)의 중금속 농도는 성층기와 유사하거나 일부 금속에서 오히려 증가하는 경향을 보였다. 비소(As)는 14.70~98.20 mg/kg (평균 66.03 mg/kg) 범위로 분포하였으며, 카드뮴(Cd)은 1.90~10.77 mg/kg(평균 8.37 mg/kg), 수은(Hg)은 0.00~0.23 mg/kg(평균 0.16 mg/kg), 납(Pb)은 51.00~97.50 mg/kg(평균 66.19 mg/kg), 아연(Zn)은 80.00~736.50 mg/kg(평균 457.46 mg/kg) 범위를 나타내었다. 대조군 시료(SS-1, SS-2, SS-3, SS-4)는 모든 금속 항목에서 저수구역 내부보다 현저히 낮은 농도를 나타내었으며, 순환기에도 저수 구역은 중금속의 농도가 높게 유지되었다.

As는 LS-1(14.70 mg/kg)에서 가장 낮았으며 저수 구역 내부로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 특히 LS-7 지점에서 96.80 mg/kg, LS-8 지점에서 98.20 mg/kg로 측정되어 국내 기준상 IV등급 경계 또는 초과 수준(92.1 mg/kg)의 높은 오염 상태를 나타내었다. LS-5(84.75 mg/kg)와 LS-6(81.60 mg/kg)는 III등급 범위에 해당하여 고농도의 오염이 광범위하게 나타났다. 순환기에는 수체 혼합으로 저층 퇴적물과 수층 간 물질 교환이 활발해지지만, 상류 유입부하 증가와 재침

전 과정이 병행될 경우 As의 농도가 실질적으로 감소하지 않고 유지 또는 일부 지점에서 증가하는 현상이 보고되어 왔다(Gobeil et al., 1997; Owens et al., 2005).

Cd는 순환기 동안 뚜렷한 고농도 분포를 나타냈다. LS-4(10.53 mg/kg), LS-5(10.15 mg/kg), LS-6(10.77 mg/kg), LS-7(10.55 mg/kg), LS-8(10.60 mg/kg), LS-9(9.60 mg/kg)는 모두 국내 기준 IV등급(6.09 mg/kg 초과)을 초과하였으며, LS-3 지점 역시 6.50 mg/kg로 IV등급에 해당하였다. 이는 성층기보다 더 많은 지점에서 고농도 오염이 확인되었다. 순환기 혼합은 Cd의 일시적 재부유를 유발하지만, 지속적인 외부 공급과 재침전 과정으로 인해 총량 수준에서는 오염이 완화되지 않는 것으로 보고되어 있다(Salomons and Förstner, 1984; Simpson et al., 2013).

Hg는 최대 0.23 mg/kg (LS-5)로 나타나 전반적으로 낮은 수준을 유지하였다. 순환기 혼합에도 불구하고 Hg 농도는 성층기와 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 Hg는 생지화학적 형태 변화 가능성이 크기 때문에 장기 모니터링 측면에서는 지속적인 관리가 요구된다.

Pb는 LS-9 지점에서 97.50 mg/kg로 최대값을 나타냈으며, LS-4(70.00 mg/kg), LS-5(73.00 mg/kg),

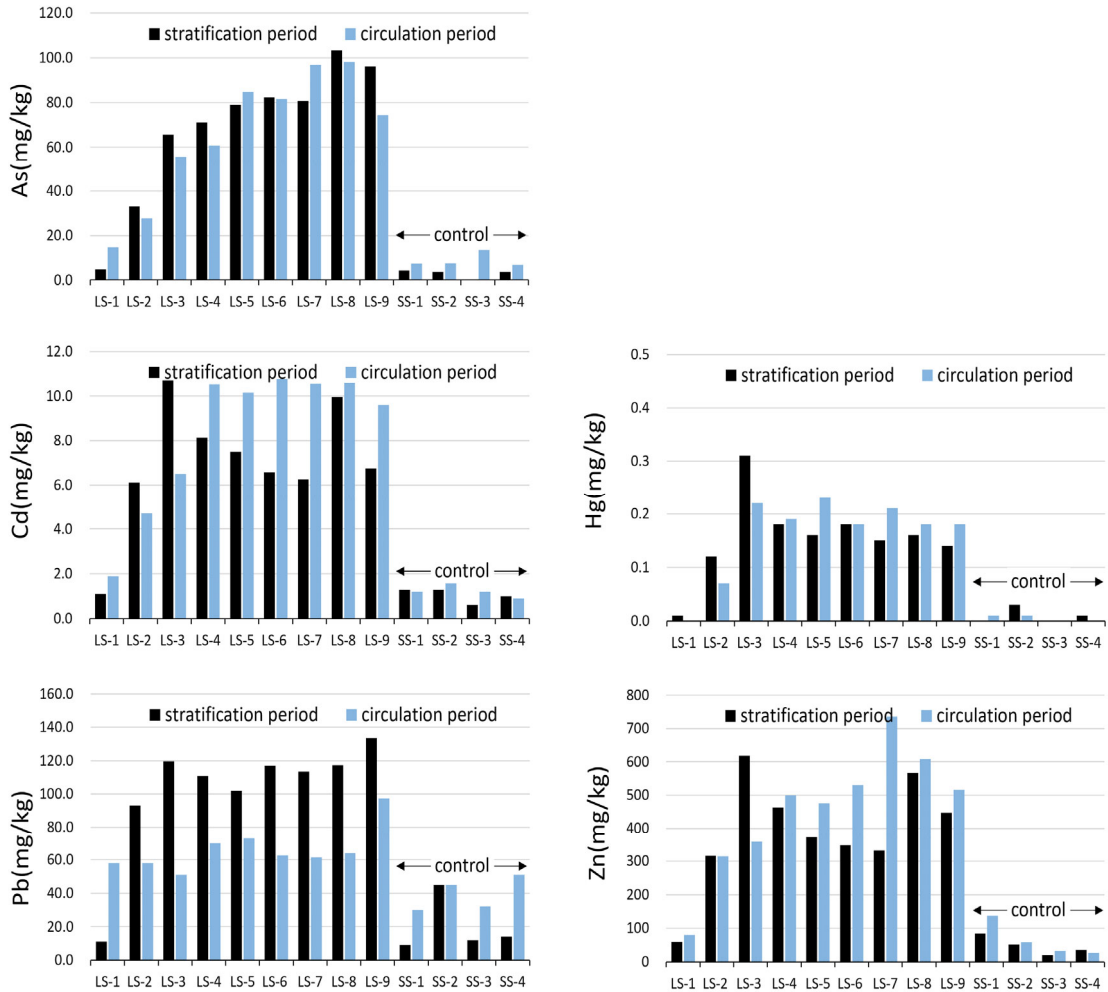


Fig. 2. Comparison of heavy metal concentrations in sediment samples from reservoir sites (LS-1~LS-9) and control sites (SS-1~SS-4) during the stratification and circulation periods.

LS-6(62.67 mg/kg), LS-7(61.50 mg/kg), LS-8(64.00 mg/kg) 등 저수구역 전반에서 II등급 범위의 중등도 오염 수준을 유지하였다.

Zn는 순환기 동안 더욱 뚜렷한 고농도 분포를 보였다. LS-7 지점에서 736.50 mg/kg로 전체 시료 중 최대값을 기록하였으며, LS-8(607.67 mg/kg), LS-6(530.33 mg/kg), LS-9(515.50 mg/kg), LS-4(499.67 mg/kg)에서도 매우 높은 농도를 나타내었다.

3.3. 성층기 및 순환기 퇴적물 중 중금속 농도 비교

Fig. 2는 성층기와 순환기 동안 안동댐 저수지 퇴적물 시료에서 측정된 As, Cd, Hg, Pb, Zn 농도를 저수지 지점(LS-1~LS-9)과 대조 지점(SS-1~SS-4)별로 나타낸 것이다. 모든 금속 원소는 저수지 지점에서 대조 지점보다 전반적으로 높은 농도를 보였다.

As의 농도는 LS-1에서 LS-9로 갈수록 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며, LS-6에서 LS-8 구간에서 가장 높은 값이 관측되었다. 순환기 동안 As 농도는 대부분의 지점에서 성층기와 유사하거나 약간 높은 값을 나타냈다.

Cd 농도는 모든 저수구역에서 높은 수준으로 나타났

Table 4. Contamination factor (CF), geoaccumulation index (Igeo), and pollution load index (PLI) of heavy metals in stratification period

Sample No.	CF					Igeo					PLI
	As	Cd	Hg	Pb	Zn	As	Cd	Hg	Pb	Zn	
LS-1	0.32	2.75	0.15	0.22	0.27	-2.25	0.87	-3.29	-2.78	-2.45	0.48
LS-2	2.22	15.25	1.85	1.85	1.47	0.57	3.35	0.30	0.31	-0.03	3.10
LS-3	4.41	26.75	4.77	2.38	2.88	1.56	4.16	1.67	0.67	0.94	5.33
LS-4	4.77	20.33	2.77	2.21	2.16	1.67	3.76	0.89	0.56	0.52	4.64
LS-5	5.31	18.75	2.46	2.03	1.73	1.82	3.64	0.72	0.44	0.20	4.32
LS-6	5.52	16.43	2.77	2.33	1.62	1.88	3.45	0.89	0.64	0.11	4.30
LS-7	5.41	15.68	2.31	2.26	1.54	1.85	3.39	0.62	0.59	0.04	4.15
LS-8	6.93	24.93	2.46	2.34	2.64	2.21	4.06	0.72	0.64	0.81	5.71
LS-9	6.45	16.88	2.15	2.66	2.08	2.10	3.49	0.52	0.83	0.47	4.95
Min.	0.32	2.75	0.15	0.22	0.27	-2.25	0.87	-3.29	-2.78	-2.45	0.48
Max.	6.93	26.75	4.77	2.66	2.88	2.21	4.16	1.67	0.83	0.94	5.71
Avg.	4.59	17.53	2.41	2.03	1.82	1.27	3.35	0.34	0.21	0.07	4.11
SS-1	0.29	3.25	0.00	0.18	0.40	-2.38	1.12	N.C.	-3.07	-1.92	0.51
SS-2	0.24	3.25	0.46	0.90	0.24	-2.63	1.12	-1.70	-0.74	-2.63	0.64
SS-3	0.03	1.50	0.00	0.24	0.09	-5.80	0.00	N.C.	-2.65	-4.01	0.17
SS-4	0.24	2.50	0.15	0.28	0.16	-2.63	0.74	-3.29	-2.43	-3.20	0.41

N.C.: Not calculated (below detection limit)

으며, LS-3부터 LS-8까지의 지점에서 유사한 범위의 높은 농도값을 나타내었다. 성층기와 순환기 간 Cd 농도는 일부 지점에서 차이를 보였으나 전반적으로 유사한 경향을 나타내었다. Hg 농도는 다른 금속에 비해 낮은 농도를 보였으나, 저수구역 전반에서 대조 지점보다 높은 값을 나타냈다. 성층기와 순환기 간 Hg 농도는 소폭의 변동을 보이며 일부 지점에서는 순환기 동안 증가하는 경향을 나타내었다.

Pb 농도는 저수지 지점 전반에서 높은 값을 나타내었으며, LS-3에서 LS-9까지 비교적 일정한 범위의 농도가 유지되었다. Zn는 가장 높은 농도 범위를 보였으며, 대부분의 저수구역에서 높은 값을 나타냈다. 순환기 동안 Zn 농도는 성층기에 비해 일부 지점에서 증가하는 경향을 보였다. 대조 지점(SS-1~SS-4)에서는 모든 금속이 저수지 지점에 비해 현저히 낮은 농도를 나타냈다.

3.4. 성층기 오염도 지수 특성

Table 4는 성층기(stratified layer) 퇴적물 시료의

중금속 오염도 지수(CF), 지질축적지수(Igeo) 및 오염부하지수(PLI) 결과이다. 성층기 저수구역(LS-1~LS-9)에서 CF 분석 결과, Cd가 모든 지점에서 높은 값을 나타내어 복합오염 특성을 나타내었다. Cd의 CF는 약 2.75(LS-1)에서 26.75(LS-3) 범위로 중간오염(moderate contamination)에서 매우 높은 오염수준(very high contamination)을 나타낸다. 저수 구역은 고오염 범주에 해당하는 CF>6로 성층기 동안 안동댐 저수구역 퇴적물이 Cd가 상당히 축적되어 있다는 것을 의미한다. 비소(As)는 LS-1에서 CF<1 수준인 반면, LS-8과 LS-9는 각각 약 6.93 및 6.45로 매우 높은 오염수준에 해당한다. Zn은 CF가 대체로 0.27~2.87 범위로 중간정도 오염 수준에 해당하였고, Pb와 Hg는 각각 0.22~2.66와 0.15~4.77 범위로 나타나 지점별 차이는 있으나 Cd나 As에 비해 상대적으로 낮은 오염도 보였다.

Igeo 분석 결과에서도 Cd가 가장 높은 값을 나타내었으며, 고농도 지점(LS-3, LS-8 등)에서는 Igeo가 4 이상으로 평가되어 강한 오염(strongly contaminated)에서 극심한 오염(extremely contaminated) 범주에 해

Table 5. Contamination factor (CF), geoaccumulation index (Igeo), and pollution load index (PLI) of heavy metals in circulation period

Sample No.	CF					Igeo					PLI
	As	Cd	Hg	Pb	Zn	As	Cd	Hg	Pb	Zn	
LS-1	0.99	4.75	0.00	1.16	0.37	-0.60	1.66	N.C.	-0.38	-2.01	1.19
LS-2	1.86	11.75	1.08	1.16	1.46	0.31	2.97	-0.48	-0.38	-0.04	2.46
LS-3	3.73	16.25	3.39	1.02	1.66	1.32	3.44	1.17	-0.56	0.15	3.18
LS-4	4.07	26.33	2.92	1.39	2.32	1.44	4.13	0.96	-0.11	0.63	4.32
LS-5	5.69	25.38	3.54	1.45	2.21	1.92	4.08	1.24	-0.05	0.56	4.64
LS-6	5.48	26.93	2.77	1.25	2.47	1.87	4.17	0.89	-0.27	0.72	4.62
LS-7	6.50	26.38	3.23	1.23	3.43	2.12	4.14	1.11	-0.29	1.19	5.18
LS-8	6.59	26.50	2.77	1.28	2.83	2.14	4.14	0.89	-0.24	0.91	5.01
LS-9	4.99	24.00	2.77	1.94	2.40	1.73	4.00	0.89	0.37	0.68	4.86
Min.	0.99	4.75	0.00	1.02	0.37	-0.60	1.66	-0.48	-0.56	-2.01	1.19
Max.	6.59	26.93	3.54	1.94	3.43	2.14	4.17	1.24	0.37	1.19	5.18
Avg.	4.43	20.92	2.50	1.32	2.13	1.36	3.64	0.83	-0.21	0.31	3.94
SS-1	0.50	3.00	0.15	0.60	0.64	-1.60	1.00	-3.29	-1.33	-1.24	0.87
SS-2	0.50	4.50	0.15	0.90	0.27	-1.58	1.59	-3.29	-0.74	-2.48	0.86
SS-3	0.91	3.00	0.00	0.64	0.15	-0.73	1.00	N.C.	-1.24	-3.33	0.71
SS-4	0.46	2.25	0.00	1.02	0.12	-1.70	0.59	N.C.	-0.56	-3.63	0.60

N.C.: Not calculated (below detection limit)

당하였다. Igeo 값이 3을 초과할 경우 인위적 기여가 뚜렷한 오염 상태로 해석할 수 있다(Müller, 1969). As 역시 LS-8~LS-9 지점에서 Igeo가 2~3 범위로 나타나 중간~강한 오염(moderately to strongly contaminated) 수준에 해당하였으며, 이는 자연 배경 농도를 초과하는 외부 유입 영향 가능성을 시사한다(Müller, 1969; Förstner and Wittmann, 1983). Igeo는 배경 농도 대비 1.5의 보정계수를 적용하여 지질학적 변동성을 고려하는 지수로, 자연 기원과 인위적 기원을 구분하는 데 유용한 평가 도구로 널리 활용되고 있다(Müller, 1969; Loska et al., 2004). 본 연구에서 Cd와 As가 높은 Igeo 등급을 보인 것은 해당 지점에서의 인위적 유입 가능성을 정량적으로 뒷받침한다.

복합오염지수(PLI)는 성층기 저수구역 다수 지점에서 1을 초과하였으며, Cd와 As의 농도가 동시에 높은 지점에서 높은 값을 나타낸다. 이는 특정 단일 금속이 아닌 복수 금속의 누적 효과가 반영된 결과로 해석된다(Tomlinson et al., 1980). 본 연구에서 산정된 PLI는 저수구역에서 대부분 3이상으로 매우 심한 오염도를 나타내었으며, 특히 LS-3, LS-8에서 5.33, 5.71로 매우

높은 값을 나타내어 국지적 고오염 특성을 나타내었다. 반면 대조군 지점은 대체로 1 미만 범위로 낮은 값을 나타내었다.

3.5. 순환기 오염도 지수 특성

Table 5는 순환기(circulation period) 퇴적물의 중금속 오염도 지수(CF), 지질축적지수(Igeo) 및 오염부하지수(PLI) 결과를 제시한다. 순환기 저수구역(LS-1~LS-9)에서 Cd의 CF는 4.75(LS-1)에서 26.93(LS-6) 범위로 나타났으며, 이는 상당한 오염(considerable contamination)에서 매우 높은 오염(very high contamination) 수준에 해당한다. 이러한 결과는 계절적 수체 혼합 이후에도 Cd의 축적이 완화되지 않고 지속됨을 의미한다.

As는 LS-7과 LS-8 등 일부 지점에서 CF ≥ 6 으로 평가되어 매우 높은 오염 수준을 보였으며, Zn은 전반적으로 성층기보다 CF 값이 상승하는 경향을 나타내었다. 이는 순환 과정에서 퇴적물 재부유 및 금속의 재분배가 발생했을 가능성을 시사한다(Förstner and Wittmann, 1983). 반면 Pb와 Hg는 지점별 변동은 존재하였으나

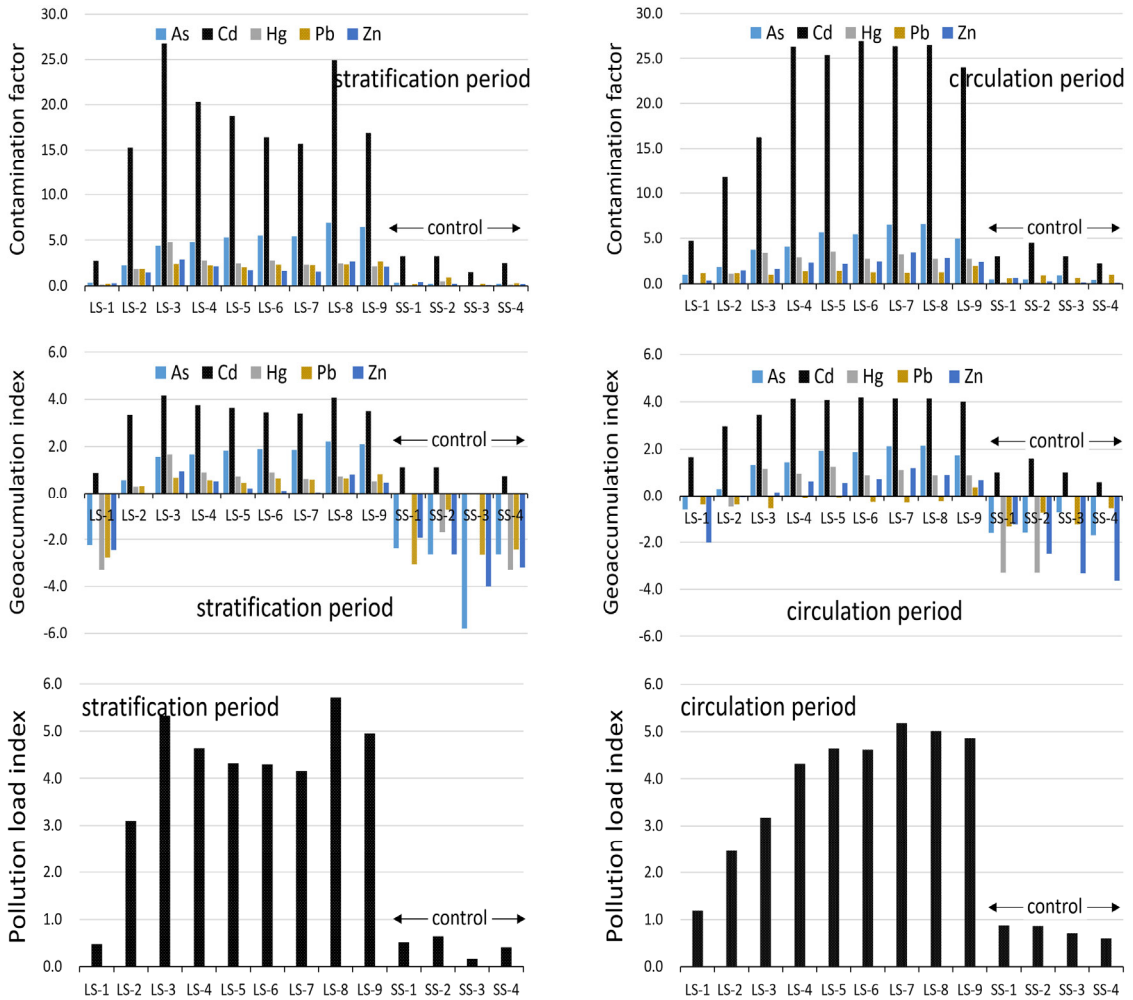


Fig. 3. Variations in contamination factor (CF), geoaccumulation index (Igeo), and pollution load index (PLI) of heavy metals in sediment samples from reservoir sites (LS-1~LS-9) and control sites (SS-1~SS-4) during the stratification and circulation periods.

Cd 및 As에 비해 상대적으로 낮은 오염 수준을 유지하였다.

PLI 또한 순환기 저수구역의 다수 지점에서 3을 초과하여 매우 심한 오염(very heavily polluted) 상태인 것으로 평가되었다. 본 연구에서는 Cd가 PLI 상승에 가장 크게 기여하였으며, 일부 구간에서는 Zn이 추가적으로 복합오염을 강화하는 요인으로 작용하였다. 이러한 결과는 순환기에도 저수구역 퇴적물의 다금속 복합오염 특성이 지속되고 있음을 정량적으로 뒷받침한다.

3.6. 오염도 지수(CF, Igeo, PLI)의 시기별 분포 특성

Fig. 3은 성층기와 순환기 동안 측정된 중금속 농도를 바탕으로 산정한 오염도 계수(CF), 지질축적지수(Igeo) 및 오염부하지수(PLI)를 지점별로 제시한 것이다. CF 값은 Cd가 가장 높게 나타났으며, 대부분의 저수지 지점에서 다른 금속에 비해 현저히 큰 값을 보였다. As와 Zn는 중간 수준의 CF 값을 나타냈으며, Pb와 Hg는 상대적으로 낮은 값을 유지하였다. 순환기 동안 CF 값은 일부 지점에서 증가 또는 감소하였으나 전체적인 분포 경향은 성층기와 유사하였다.

Igeo 값은 Cd와 As에서 주로 양의 값을 보였으며, 저수지 지점 대부분에서 대조 지점보다 높은 수치를 나타냈다. Hg와 Pb의 Igeo 값은 다수 지점에서 음의 값 또는 0에 근접한 값을 보였으며, Zn는 지점별로 양의 값과 음의 값이 혼재하였다. 대조 지점에서는 대부분의 금속 원소가 음의 Igeo 값을 나타냈다.

PLI 값은 모든 저수지 지점에서 1 이상의 값을 보였으며, LS-3부터 LS-8 구간에서 상대적으로 높은 값이 관측되었다. LS-1과 LS-2에서는 비교적 낮은 PLI 값이 나타났고, 대조 지점에서는 전반적으로 1 미만의 값이 유지되었다. 순환기 동안 PLI 값은 성층기와 유사한 범위를 보였으며 일부 지점에서 소폭의 변동이 확인되었다.

3.7. 안동댐과 국내 타 댐 퇴적물 오염도의 정량적 비교 분석

안동댐 저수구역 퇴적물은 성층기와 순환기 모두에서 국내 타 저수지 및 하천 퇴적물에 비해 현저히 높은 중금속 축적 특성을 나타냈으며, 특히 카드뮴(Cd)과 비소(As)가 주요 오염 기여 금속으로 확인되었다. Cd 농도는 1.10-10.77 mg/kg 범위로 나타나 국내 하천퇴적물 평균 배경치(Cd 0.4 mg/kg; NIER, 2011) 대비 최대 약 27배 높은 오염계수(CF)를 나타냈으며, 이는 매우 높은 오염 수준(CF \geq 6)에 해당한다. 반면 국내 주요 저수지를 대상으로 수행된 연구에서는 대부분 저수지 퇴적물의 Cd 농도가 낮은 수준으로 나타났으며, 일부 지점에서만 상대적으로 높은 오염 특성이 보고되었다(Jeong et al., 2022).

비소(As)는 안동댐에서 4.70-103.27 mg/kg 범위로 나타나 일부 지점에서 호소 퇴적물 기준을 초과하는 고농도 지점이 분포하였다. 국내 낙동강 및 주요 하천 퇴적물 연구에서도 As, Cd, Zn, Pb 등의 중금속이 광산 활동, 산업 배출 및 유역 기원의 영향을 받아 퇴적물에 축적되는 것으로 보고되었으며, 이러한 축적은 대부분 특정 지점에 국지적으로 나타나는 경향을 보였다(Kim et al., 2015; Jeong et al., 2022). 이에 비해 안동댐은 저수구역 전반에서 Cd와 As의 동시 고농도 축적이 나타난다는 점에서 차별성을 보인다.

Zn 역시 안동댐에서 최대 736.50 mg/kg로 국내 주요 하천 및 호 퇴적물에서 보고된 Zn 농도 범위보다 높은 수준을 나타냈다. 국내 낙동강, 금강 및 한강 수계 퇴적물 연구에서는 Zn 농도가 일반적으로 약 50-300 mg/kg 범위로 나타나 대부분 저~중등도 오염 수준에

해당하는 것으로 보고되었다(Kim et al., 2015; Kim et al., 2017).

복합오염지수(PLI)는 안동댐에서 대부분 지점이 3-6 범위로 나타나 매우 높은 복합오염 상태를 나타냈으며, 이는 국내 주요 저수지 및 하천 퇴적물에서 일반적으로 보고된 오염 특성과 비교할 때 현저히 높은 수준이다. 국내 주요 저수지를 대상으로 수행된 연구에서는 대부분 저수지에서 PLI가 1 이하 또는 1-2 범위의 오염 수준을 나타내며, 일부 지점에서만 상대적으로 높은 오염 특성이 나타나는 것으로 보고되었다(Jeong et al. 2022). 또한 낙동강 및 주요 하천 퇴적물 연구에서도 대부분 구간에서 중금속 오염이 배경 수준으로 평가되었으며, 특정 오염원 인근에서만 국지적 고농도 축적이 나타나는 것으로 보고되었다 (Kim et al., 2015; Kim et al., 2017). 이러한 결과와 비교할 때, 안동댐은 Cd 중심의 광범위한 고농도 축적과 As 고농도 지점이 동시에 나타나는 특징을 보이며, 국내 저수지 중에서도 높은 복합오염 특성을 갖는 호소로 평가된다. 따라서 안동댐 퇴적물이 국내 평균 저수지보다 높은 중금속 축적 특성을 가지며, 향후 퇴적물 관리 및 수환경 보호를 위해 Cd와 As를 우선 관리 대상으로 설정할 필요가 있음을 시사한다.

4. 결론

본 연구는 안동댐 저수구역 퇴적물을 대상으로 성층기와 순환기 수리 환경 변화에 따른 중금속 오염 특성을 규명하고, 호소 퇴적물 오염평가기준과 오염도 지수(CF, Igeo, PLI)를 적용하여 오염 수준을 종합적으로 평가하였다.

Cd는 성층기와 순환기 모두에서 광범위하게 고농도로 분포하여 다수 지점에서 호소 퇴적물 기준 IV등급을 초과하였고, 배경 대비 오염계수(CF)는 최대 약 27에 이르는 매우 높은 축적 수준을 보였다. 지화학적 축적지수(Igeo) 역시 강~극심 오염 단계로 분류되어, Cd 오염이 단기적 유입이 아닌 장기적 누적 과정에 의해 형성된 축적임을 보여준다. As는 일부 지점에서 IV등급을 초과하는 국지적 고농도 지점이 분포하였으며, 해당 지점에서 CF 및 Igeo 또한 고오염 특성이 뚜렷하게 나타났다. 국내 대다수 댐과 저수지 퇴적물의 중금속 농도가 배경 수준 또는 저오염 단계에 머무르는 경향과 다르게 안동댐은 일반 저수지 평균보다 현저히 높은 고농도 Cd와 As 축적 특성을 나타낸다.

본 연구에서는 안동댐 퇴적물이 계절적 수리 환경 변화에도 불구하고 중금속 축적이 완화되지 않는 장기적 오염 구조를 형성하고 있음을 규명하였으며, 안동댐 퇴적물 관리를 위한 전략 수립 시 Cd와 As를 최우선 관리 대상 금속으로 설정하고, 저수구역을 포함한 전 구간에 대한 체계적인 모니터링과 관리 대책이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 2026년도 교육부 및 경상북도의 재원으로 경북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2026-RISE-15-104).

REFERENCES

- Abraham, G. M. S., Parker, R. J., 2008, Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand, *Environ. Monit. Assess.*, 136, 227-238.
- Förstner, U., Wittmann, G. T. W., 1983, *Metal pollution in the aquatic environment*, Springer-Verlag, Berlin.
- Gobeil, C., Macdonald, R. W., Sundby, B., 1997, Diagenetic separation of cadmium and manganese in suboxic continental margin sediments, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 4647-4654.
- Hakanson, L., 1980, An Ecological risk index for aquatic pollution control, *Water Res.*, 14, 975-1001.
- Jeong, Y. S., Lee, D. S., Lee, D. Y., Kwak, I. S., Park, Y. S., 2022, Characterization of heavy metal pollution in sediments of major reservoirs in South Korea, *Korean J. Ecol. Environ.*, 55, 175-183.
- Kim, S., Ahn, J., Jung, K.-Y., Lee, K., Kwon, H.-G., Shin, D.-S., Yang, D.-S., 2017, Contamination assessment of heavy metals in river sediments (for the surface sediments from Nakdong River), *J. Korean Soc. Water Environ.*, 33, 460-473.
- Kim, S., Kim, J., Lee, K., Lee, K., Jeon, H., Yu, J., Lee, I., Ahn, J., 2015, Distribution and pollution of heavy metals in surface sediments from Nakdong River, *J. Environ. Sci. Int.*, 24, 969-980.
- Loska, K., Wiechuła, D., Korus, I., 2004, Metal contamination of farming soils affected by industry, *Environ. Int.*, 30, 159-165.
- Müller, G., 1969, Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River, *GeoJournal*, 2, 108-118.
- National Institute Environmental Research (NIER), 2011, Baseline concentrations of heavy metals in river sediments in Korea, Report no. TRKO201300007691, Incheon.
- Owens, P. N., Batalla, R. J., Collins, A. J., Gomez, B., Hicks, D. M., Horowitz, A. J., Kondolf, G. M., Marden, M., Page, M. J., Peacock, D. H., Peticrew, E. L., Salomons, W., Trustrum, N. A., 2005, Fine-grained sediment in river systems: Environmental significance and management issues, *River Res. Appl.*, 21, 693-717.
- Park, J. C., Um, M. J., Song, Y. I., Hwang, H. D., Kim, M. M., Park, D., 2017, Modeling of turbidity variation in two reservoirs connected by a water transfer tunnel in South Korea, *Sustainability*, 9(6), 993.
- Salomons, W., Förstner, U., 1984, *Metals in the hydrocycle*, Springer-Verlag, Berlin.
- Simpson, S. L., Batley, G. E., Chariton, A. A., 2013, Revision of the ANZECC/ARMCANZ sediment quality guidelines, CSIRO Land and Water Science Report 08/07, CSIRO Land and Water.
- Son, H. W., Shim, S. H., Oh, H., Choi, J. H., 2021, An assessment of heavy metal contamination in the Nakdong River around the weir, *Water*, 13, 684.
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., Jeffrey, D. W., 1980, Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index, *Helgol. Meeresunters.*, 33, 566-575.

-
- Postdoctoral Research Associate and Lecturer.
Hee-Won Kwon
Department of Environmental Engineering, Gyeongsuk National University
heewon0424@gmail.com
 - Professor. Young Hun Kim
Department of Environmental Engineering, Gyeongsuk National University
youngkim@andong.ac.kr
 - Professor. Jeong Jin Kim
Department of Earth and Environmental Sciences, Gyeongsuk National University
jjkim@andong.ac.kr