

Research Paper

미호강 상류 보 퇴적물의 오염도 분석

김경미*** · 최준수* · 조영철**
충북보건환경연구원*, 충북대학교 환경공학과**

Extent of Pollution of Sediments at Weirs in the Upper Region of the Miho River

Kyungmi Kim*** · Junsu Choi* · Youngcheol Cho**

Chungbuk Research Institute of Health and Environment*
Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University**

요약: 금강의 주요 지천인 미호강 상류에 위치한 보로 인해 형성된 퇴적물의 오염도를 분석하였다. 10개의 보를 대상으로 3월, 10월, 12월에 퇴적물을 채집하여, 완전연소가능량, COD_{sed}, 총질소(T-N), 총인(T-P), 수용성인, 금속류(As, Cd, Cu, Pb, Ni, Zn, Cr) 농도를 분석하였다. 퇴적물의 유기물 오염도는 높지 않았으나, T-N과 T-P의 농도는 높았다. 특히 T-P의 경우 30개의 시료 중 20개의 시료가 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」에서 정한 III 등급 이하에 속하는 것으로 나타났다. 금속류 중에는 Cd의 오염도가 가장 심하였다. 「하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준」에 따라 퇴적물의 오염도를 분류한 결과, '보통', '약간 나쁨', '나쁨', '매우 나쁨' 단계에 속하는 퇴적물은 각각 0개, 12개, 7개, 11개이었으며, 이에 따라 미호강 상류 보의 퇴적물의 오염상태가 심각하며, 수질을 악화시키는 내부오염원으로 작용할 것으로 판단되었다. 따라서 미호강의 수질 개선을 위하여 미호강 분류 및 칠장천의 축산폐기물에 대한 관리, 보로 인해 형성된 퇴적물 준설 등의 관리 방안 수립이 필요할 것으로 판단된다.

주요어: 미호강, 보, 퇴적물, 내부오염원, 총인

Abstract: The contamination of sediments formed by weirs located in the upper region of the Miho River, a major tributary of the Geum River, was analyzed. Sediments were collected from 10 weirs in Mar., Oct., and Dec., and the following parameters were analyzed: ignition loss, sediment chemical oxygen demand, total nitrogen (T-N), total phosphorus (T-P), soluble reactive phosphorus, and metal concentrations (As, Cd, Cu, Pb, Ni, Zn, Cr). The organic contamination level of the sediments was not high; however, the concentrations of T-N and T-P were elevated. Notably, among the 30 samples, 20 were classified as below Class III according to the "Criteria for Contamination Assessment of River and Lake Sediments." Among the metals, cadmium (Cd) exhibited the highest level of contamination.

First Author: Kyungmi Kim, Tel:+82-43-220-5961, E-mail: skybluemi@korea.kr, ORCID: 0009-0007-3216-2652

Corresponding Author: Youngcheol Cho, Tel:+82-43-261-3577, E-mail: choym@chungbuk.ac.kr, ORCID: 0000-0001-7444-143X

Co-Author: Junsu Choi, Tel:+82-43-220-5973, E-mail: cjs8617@korea.kr, ORCID: 0009-0008-7584-9240

Received: 3 November, 2024. Revised: 5 December, 2024. Accepted: 18 December, 2024.

According to the "Criteria for Contamination Assessment of River and Lake Sediments by Site," the sediments were classified into the following categories: 0 samples were rated 'normal,' 12 samples 'slightly poor,' 7 samples 'poor,' and 11 samples 'very poor.' This indicates that the contamination status of the sediments in the upper Miho River is serious and is likely to act as an internal pollution source that worsens water quality. Therefore, in order to improve the water quality of the Miho River, it is deemed necessary to establish management measures such as management of livestock waste in the main stream of the Miho River and Chiljangcheon and dredging of sediment formed by the Weirs.

Keywords: Miho River, Weir, Sediment, Internal pollution source, Total phosphorus

I. 서론

물은 인간의 삶에 필수적이고 유한한 자원으로 양질의 수자원을 확보하기 위한 수자원 관리가 필요하다. 하지만 산업 발달 및 도시화와 같은 인위적인 활동이 증가함에 따라 물의 자정능력을 초과하는 오염물질이 수역에 유입되어 수질이 점차 악화되고 있다. 점오염원과 비점오염원으로부터 유입되는 입자성 오염물질은 하류로 운반되다가 비교적 유속이 약한 하천, 호소, 하구, 해양 바닥에 침강되어 퇴적물(sediment)을 형성한다(Lee and Lee, 2000; Wang et al., 2005; Lee et al., 2003; Walling et al., 2001).

유기물, 영양염류, 유해화학물질, 중금속 등이 지속적으로 유입될 경우 오염물질이 퇴적물에 농축·축적될 가능성이 높으며(Klavins and Apsite, 1997), 퇴적물이 하천의 양안이나 보 근방에 쌓이게 되면 퇴적, 확산, 재부유, 생물교란 등으로 퇴적물에 존재하는 질소와 인과 같은 영양염류가 용출되어 부영양화를 가속화시키는 내부 오염원으로 작용하기도 한다(Kim, 2002; Reddy et al., 1995, 1999; Lee et al., 2010; Park et al., 2022). 특히 인은 국내 하천 및 호소에서 조류 생장의 주요 제한요인이기 때문에 수질 관리를 위하여 오염된 퇴적물에 대한 지속적인 모니터링과 관리가 필요하다(Bengtsson et al., 1975; Cho and Chung, 2007; Kim et al., 2013).

안정된 수자원 이용을 위하여 하천을 횡단하여 축조된 보(淤)는 도심부의 확대에 의한 농경지의 도시화, 논농사 위주에서 비닐하우스 단지로의 변화와 같은 경작방식의 변화에 의한 토지이용의 변화, 시설의 노후화 및 상류로부터 유입된 토사 퇴적 등으로 취수보 고유의 기능 및 용도가 상실되고 있는 실정이다(Ahn et al.,

2006). 최근에는 용도 변경 또는 기능 상실된 보는 관리소홀로 인해 하천 생태 통로의 단절, 수변 서식처 악화 등의 문제가 제기되고 있으며, 특히 보에 의해 하천 흐름이 정체됨으로서 형성된 오염 퇴적물에 의한 수질 악화 문제가 심각하게 대두되고 있다(Jeong et al., 2018).

미호강은 금강의 우안으로 합류되는 제1지류로서 칠장천, 보강천, 무심천, 석남천, 조천, 병천천 등의 지류를 포함하고 있다(Yoon et al., 2019). 미호강 유역 면적은 1,855.35 km²로 금강 유역의 18.7%를 차지하고 있으나, 금강 유역 내 전체 인구의 약 32%가 미호강 유역에 거주한다(Yoon et al., 2019). 금강 본류(세종보 상류)에 대한 미호강의 수량 기여율은 53.5%이며, 수질 기여율은 총인(T-P)과 BOD의 각각 85.7%, 78.5%로 금강 지류 중 가장 큰 기여도를 가지고 있다(Bae, 2021).

미호강은 2019년 기준 BOD와 T-P가 각각 4.94 mg/L, 0.132 mg/L로, "중권역별 물환경 목표 기준에서 정한 수질(미호강 중권역; BOD 3.0 mg/L 이하, T-P 0.10 mg/L 이하, 어류 생물지수, C)"을 달성하지 못하여 「금강 대권역 물환경 관리계획('16~'25)」에서 중점관리 중권역으로 분류되었다(Song et al., 2021). 또한 미호강 상류에 위치한 총량관리 지점인 미호A의 수질이 2014년 이후 지속적으로 악화되고 있는데, 이에 대한 원인으로 미호강 상류 지역(음성군)에서 유입되는 오염된 물과 미호A 측정지점 상류에 위치한 여천보로 인한 정체 현상인 것으로 여겨지고 있으며, 이로 인해 형성된 퇴적물이 오염원으로 지적되고 있다(Bae, 2021). 따라서 본 연구에서는 미호강의 상류에 위치한 보로 인해 생성된 퇴적물의 오염도를 분석하고, 미호강 상류의 수질 개선을 위해 이의 관리 방안을 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 지역 및 시료 채취

미호강 본류와 이의 지류인 칠장천에 위치한 10개 주요보에 침적된 퇴적물을 채집하여 오염도를 분석하였다(Table 1; Figure 1). 동주원보(S1), 중보(S2), 갯거리(S3), 새보(S4), 관지미보(S5)은 미호강 지류인 칠장천에 위치하며, 미호천6(S6), 막골보(S7), 자래보(S8), 여천보(S9), 작천보(S10)은 미호강 본류에 위치한다. 퇴

Table 1. Geological information of sampling sites

Site	Name	GPS
S1	Dongjuwon Weir	37°00'28"N, 127°26'19"E
S2	Jung Weir	36°59'13"N, 127°26'51"E
S3	Ganggeori Weir	36°58'40"N, 127°26'55"E
S4	Sae Weir	36°57'48"N, 127°27'33"E
S5	Gwanjimi Weir	36°56'25"N, 127°27'29"E
S6	Mihocheon6 Weir	36°56'11"N, 127°27'40"E
S7	Makgol Weir	36°55'59"N, 127°26'57"E
S8	Jarae Weir	36°54'52"N, 127°26'36"E
S9	Yeocheon Weir	36°46'52"N, 127°30'06"E
S10	Jakcheon Weir	36°41'04"N, 127°26'06"E

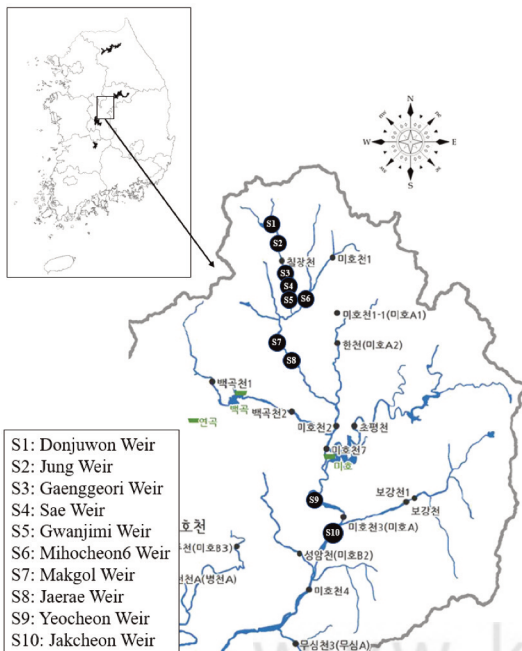


Figure 1. The map of site taken sediment samples

적물 시료 채집은 영농기(4월~10월)의 농업용수 공급 기간(4월~9월)을 제외하고 2018년 3월, 10월, 12월에 각각 1회씩 수행하였는데, 보의 보의 수문을 개방하여 바닥이 드러난 상태에서 보의 중간 지점에 있는 퇴적물을 채집하였다.

2. 분석항목 및 방법

퇴적물 시료에서 수소이온농도(pH), 화학적산소요구량(COD_{sed}), 완전연소가능량(ignition loss, IL), 총질소(total nitrogen, T-N), 총인(total phosphorus, T-P), 용존무기인(soluble reactive phosphorus, SRP), 금속류(As, Cd, Cu, Pb, Ni, Zn, Cr, Al) 농도를 분석하였다. pH, COD_{sed}, T-N, T-P는 수질오염공정시험기준(NIER, 2017a)에 따라 분석하였으며, 금속류의 농도는 토양오염공정시험기준(NIER, 2017b)에 따라 왕수를 이용한 산분해법으로 시료를 전처리한 후 분석하였다.

전처리된 시료에서 금속류 농도를 측정하기 위하여 Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-OES 5110, Agilent, CA, USA)를 사용하였다. 중금속에 대한 오염도지수(pollution index)는 국내 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」의 「[별표 3] 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준」에서 정한 「금속류 'II' 등급 기준 지수」를 구하였으며, 다음 식(1)에 따라 구하였다(NIER, 2022). 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」에서는 8종의 금속류에 대하여 「금속류 'II' 등급 기준 지수」를 제시하였으나, 본 연구에서는 수은을 제외한 7종의 금속류를 대상으로 기준 지수를 산출하였다. 수은의 경우 여천보, 작천보 등의 보 주변 수질에 대한 예비조사에서 불검출로 나타나 대상 항목에서 제외하였다.

$$\text{금속류 'II' 등급 기준 지수} = \frac{\sum_{i=1}^7 \left(\frac{EC_i}{PEL_{Ki}} \right)}{7} \quad (1)$$

위 식에서 EC_i는 시료 중 7종의 금속류(As, Cd, Cu, Pb, Ni, Zn, Cr) 농도이며, PEL_{Ki}는 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」의 「[별표 2] 하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」에서 7종의 금속류에 대한 'II' 등급 기준치를 의미한다(Table 2).

퇴적물로부터 용출되는 영양염류를 분석하기 위하여, 정제수 1 L에 젖은 퇴적물 100 g을 넣고 200 rpm으로

Table 2. Criteria for river sediment pollution assessment by parameter in the Criteria for Contamination Assessment of River and Lake Sediments

Parameter	Item	Grade ^{**}			
		I	II	III	IV
Organics & Nutrients ¹	Ignition loss (%)	≤3	≤8	≤11	>11
	Total organic carbon (%)	≤1.0	≤2.5	≤4.0	>4.0
	Total nitrogen (mg/kg)	≤1,000	≤2,800	≤5,000	>5,000
	Total phosphorus (mg/kg)	≤500	≤950	≤1,500	>1,500
Metals ²	Copper (mg/kg)	≤48	≤228	≤1,890	>1,890
	Lead (mg/kg)	≤59	≤154	≤459	>459
	Nickel (mg/kg)	≤40	≤87.5	≤330	>330
	Arsenic (mg/kg)	≤15	≤44.7	≤92.1	>92.1
	Mercury (mg/kg)	≤0.07	≤0.67	≤2.14	>2.14
	Zinc (mg/kg)	≤363	≤1,170	≤13,000	>13,000
	Cadmium (mg/kg)	≤0.4	≤1.87	≤6.09	>6.09
	Chromium (mg/kg)	≤112	≤224	≤991	>991

^{**} Status of sediments by grade

¹ For organics and nutrients; Grade I: Background level condition; Grade II: Slightly contaminated condition; Grade III: Contaminated condition requiring attention; Grade IV: Serious and obvious contaminated condition

² For metals; Grade I: Very unlikely to be toxic to benthos; Grade II: Potential to be toxic to benthos; Grade III: Likely to be toxic to benthos; Grade IV: Very likely to be toxic to benthos

6시간 동안 진탕한 후 입자물질을 제거하기 위하여 상정수를 침전·여과하였다(NIER, 2017c). 상정수에서 T-P와 T-N의 농도는 수질오염공정시험기준(NIER, 2017a)에서 정한 방법에 따라 분석하였다.

지점 및 시기에 따른 분석 결과의 차이를 확인하기 위하여 통계분석을 실시하였다. Kolmogorov-Smirnov test를 이용해 자료의 정규성을 검토한 후, 정규성을 따르지 않는 자료는 비모수적 검정법인 Wilcoxon Rank-Sum Test와 Wilcoxon Signed-Ranks Test를 사용하여 분석하였다(Mishra et al. 2019). 분석을 위한 프로그램은 StataNow 18.5 (StataCorp LLC, TX, USA)를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 퇴적물의 유기물 및 영양염류 오염도 분석 결과

퇴적물의 유기물 오염지표로 사용되는 IL은 0.73 ~ 9.30%의 범위였으며, COD_{sed}는 0.15 ~ 2.43 mg/kg이었다(Table 3). 환경부에서 하천·호소 퇴적물의 오염 평가를 위해 운영 중인 “하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준”에서 IL에 대한 I, II, III, IV 등급 기준은 각각 3% 이

하, 8% 이하, 11% 이하, 11% 초과이다(NIER, 2022; Table 2). 분석된 30개의 시료 중 I, II, III 등급에 속하는 시료의 수는 각각 25개, 3개, 2개이었으며, IV 등급에 속하는 시료는 없었다(Table 4). 따라서 미호강 상류 보에서 채집된 퇴적물은 대체적으로 유기물에 의한 오염 정도는 낮은 것으로 판단된다. 상류(S1~S6), 중류(S7, S8), 하류(S9, S10)에서 IL의 평균값은 각각 1.45(±0.56)%, 1.72(±0.81)%, 5.40(±3.66)%로 하류 퇴적물의 평균값이 상류 또는 중류에 비하여 높았으나, 퇴적물의 유기물 오염도가 통계적으로 유의미한 차이는 없는 것으로 나타났다(Wilcoxon Rank-Sum Test, $p>0.05$). 하류 지점인 S9와 S10에서 퇴적물 중 IL은 각각 1.32 ~ 6.44%, 0.73 ~ 9.30%의 범위로 채취 시기에 따라 차이가 크게 나타났다. 12월에 채집된 시료를 제외하고, 상류 또는 중류의 퇴적물과 하류 퇴적물의 IL 함량을 비교하면, 하류에서 IL 함량이 상류 또는 중류에 비해 크게 높은 것으로 나타났다(Wilcoxon Rank-Sum Test, $p<0.05$). 이러한 결과는 상류에서 유입된 유기물이 물의 흐름에 의해 하류로 이동하여 침강하였거나, 하류로 갈수록 하류의 증가로 인한 유속 감소로 인해 퇴적물이 쌓이는 현상 때문인 것으로 판단된다(Yang et al., 2021). 시기에 따른

Table 3. Results of analysis of physico-chemical parameters in sediment

Site	Month	pH	WC (%)	IL1 (%)	Conc. (mg/kg)			
					COD _{sed}	T-N	T-P	SRP1
S1	Mar	7.1	18.0	3.14	0.98	2,062	1,756	93.0
	Oct	6.7	25.9	1.49	0.57	2,242	1,714	73.9
	Dec	7.1	20.3	1.09	0.25	849	1,187	37.3
S2	Mar	7.6	20.9	0.94	0.24	1,685	1,164	80.8
	Oct	7.0	22.9	0.99	0.26	825	1,090	33.8
	Dec	7.2	24.5	1.00	0.24	1,100	1,302	59.8
S3	Mar	7.9	17.8	1.04	0.19	2,022	1,205	67.9
	Oct	6.9	24.3	1.39	0.50	915	1,159	21.7
	Dec	6.9	30.8	1.60	0.29	1,719	3,442	62.5
S4	Mar	7.7	26.5	1.10	0.31	3,839	2,047	73.4
	Oct	7.2	22.5	1.61	0.28	641	4,178	15.9
	Dec	6.8	20.0	1.47	0.31	1,593	1,393	75.9
S5	Mar	7.4	32.3	2.52	0.89	1,298	738	40.6
	Oct	6.3	21.2	1.21	0.27	796	5,046	45.7
	Dec	7.3	26.9	1.68	0.30	1,230	3,920	32.6
S6	Mar	7.2	18.8	1.09	0.15	330	626	6.1
	Oct	6.8	28.8	1.32	0.20	164	793	0.0
	Dec	6.7	24.8	1.34	0.24	294	648	4.9
S7	Mar	6.6	16.2	1.10	0.19	1,057	793	26.8
	Oct	6.9	21.6	0.82	0.15	496	1,370	10.1
	Dec	6.6	24.9	1.78	0.32	800	862	3.6
S8	Mar	7.7	26.4	1.25	0.33	2,268	2,139	52.5
	Oct	6.5	30.8	2.52	0.69	281	470	0.0
	Dec	6.6	28.8	2.82	0.43	546	612	0.6
S9	Mar	6.6	29.0	5.74	1.50	6,101	2,574	129.6
	Oct	6.7	38.0	6.44	1.24	676	7,273	0.9
	Dec	7.5	24.7	1.32	0.27	652	492	1.7
S10	Mar	7.2	49.4	8.89	2.32	1,144	3,544	0.9
	Oct	6.7	35.9	9.30	2.43	881	1,153	5.1
	Dec	7.1	25.7	0.73	0.19	444	620	0.0
Average		7.0	26.0	2.30	0.60	1,298	1,844	33.7

¹ Abbreviations: WC, water content; IL, ignition loss; SRP, soluble reactive phosphorus

오염도는 3월, 10월, 12월 시료에서 평균값은 각각 2.68 (± 2.66)%, 2.71 (± 2.84)%, 1.48 (± 0.57)%로 12월에 채취된 시료에서 낮았으나, 통계적으로 유의한 차이는 없었다(Wilcoxon Signed-Ranks Test, $p > 0.05$).

퇴적물의 시료에서 T-N의 농도는 164 ~ 6,101 mg/kg이었으며, 지점 및 시기에 따른 변이가 매우 큰 것으로 나타났다(Table 3). 상류(S1~S6), 중류(S7, S8), 하류(S9, S10)에서 평균값은 각각 1,311 (± 888), 908 (± 718), 1,650

($\pm 2,194$) mg/kg으로, 지점에 따른 퇴적물 총질소 오염도의 차이는 없었다(Wilcoxon Rank-Sum Test, $p > 0.05$). 시기에 따른 오염도는 3월, 10월, 12월 시료에서 평균값은 각각 2,181 ($\pm 1,665$), 792 (± 568), 923 (± 480) mg/kg로 10월 또는 12월에 채취된 시료에 비해 3월에 채취된 시료에서 총질소의 농도가 더 높았다(Wilcoxon Signed-Ranks Test, $p < 0.05$).

퇴적물 중 T-P의 농도는 470 ~ 7,273 mg/kg이었다

Table 4. Pollution assessment from organic matter, nutrients, and heavy metals in the sediment samples

Site	Month	Organic matter & Nutrients			Heavy metals ²			mPEL ₁ Q ³ value	Pollution stage
		IL	T-N	T-P	Cu	Zn	Cd		
S1	Mar	II ¹	II	IV	I	I	I	0.17	Very poor
	Oct	I	II	IV	I	I	III	0.39	Very poor
	Dec	I	I	III	I	I	III	0.32	Poor
S2	Mar	I	II	III	II	II	I	0.23	Slightly poor
	Oct	I	I	III	I	I	III	0.30	Poor
	Dec	I	II	III	I	I	III	0.32	Poor
S3	Mar	I	II	III	I	I	I	0.15	Slightly poor
	Oct	I	I	III	I	I	III	0.28	Poor
	Dec	I	II	IV	I	I	II	0.25	Very poor
S4	Mar	I	III	IV	II	II	III	0.62	Very poor
	Oct	I	I	IV	II	I	III	0.35	Very poor
	Dec	I	II	III	II	I	II	0.31	Slightly poor
S5	Mar	I	II	II	II	I	I	0.16	Slightly poor
	Oct	I	I	IV	II	I	III	0.32	Very poor
	Dec	I	II	IV	II	I	III	0.32	Very poor
S6	Mar	I	I	II	I	I	I	0.04	Slightly poor
	Oct	I	I	II	I	I	II	0.12	Slightly poor
	Dec	I	I	II	I	I	II	0.16	Slightly poor
S7	Mar	I	II	II	I	I	I	0.10	Slightly poor
	Oct	I	I	III	I	I	II	0.24	Poor
	Dec	I	I	II	I	I	II	0.24	Slightly poor
S8	Mar	I	II	IV	I	I	I	0.14	Very poor
	Oct	I	I	I	I	I	III	0.33	Poor
	Dec	I	I	II	I	I	II	0.23	Slightly poor
S9	Mar	II	IV	IV	I	I	I	0.11	Very poor
	Oct	II	I	IV	I	I	III	0.30	Very poor
	Dec	I	I	I	I	I	II	0.18	Slightly poor
S10	Mar	III	II	IV	I	I	I	0.17	Very poor
	Oct	III	I	III	I	I	III	0.30	Poor
	Dec	I	I	II	I	I	II	0.19	Slightly poor

1 Class of sediment status based on “Criteria for Contamination Assessment of River and Lake Sediments” (NIER, 2022)

2 Only heavy metals with Class II or higher are showed

3 Mean of PEL (probable effect level) quotient for Metals (equation 1) based on “Criteria for Contamination Assessment of River and Lake Sediments (NIER, 2022)

(Table 3). 상류(S1~S6), 중류(S7, S8), 하류(S9, S10)에서 평균값은 각각 1,856(±1,344), 1,041(±619), 2,609(±2,576) mg/kg이었으며, 총질소와 마찬가지로 지역에 따른 퇴적물 총인 오염도의 차이는 없었다(Wilcoxon Rank-Sum Test, $p>0.05$). 국내에서 퇴적물 오염도가 높은 것으로 알려진 기흥저수지의 경우 상류, 중류, 하류

에서 퇴적물 중 T-P의 농도는 각각 1,866(±980), 1,810(±618), 2,172(±302) mg/kg로 본 연구에서 분석된 오염도와 유사한 범위였다(Oh et al., 2018). 따라서 미호강 상류 보의 퇴적물로부터 T-P 용출로 인한 내부부하 발생 가능성이 매우 높을 것으로 예상된다. 시기에 따른 오염도는 3월, 10월, 12월 시료에서 평균값은 각각

Table 5. Concentrations of metals in sediment

Site	Month	Concentration (mg/kg)							
		Al	Cu	Pb	Ni	As	Zn	Cd	Cr
S1	Mar	25,400	42.0	18.0	33.0	nd1	206.9	0.1	67.6
	Oct	95,067	38.4	15.9	37.7	10.6	198.1	2.5	69.7
	Dec	214,000	30.3	13.0	36.6	7.9	126.5	1.9	67.3
S2	Mar	21,767	65.5	20.4	37.2	nd	423.9	0.2	76.6
	Oct	252,133	35.3	15.2	27.0	6.3	184.5	1.9	52.3
	Dec	125,567	40.6	16.2	29.4	4.5	188.0	1.9	69.4
S3	Mar	19,733	32.6	18.0	29.7	nd	191.0	0.1	58.7
	Oct	179,500	23.2	17.2	20.3	4.5	172.3	2.0	39.3
	Dec	91,333	32.4	14.5	20.8	3.6	181.1	1.6	46.6
S4	Mar	27,267	176.7	24.9	37.0	nd	682.3	4.1	50.4
	Oct	131,900	105.5	19.4	24.6	2.9	190.0	2.2	44.8
	Dec	198,933	92.7	16.3	30.8	2.8	168.6	1.6	50.5
S5	Mar	26,233	64.5	18.9	19.7	nd	181.6	0.3	36.7
	Oct	359,600	62.1	20.5	23.4	4.1	182.1	2.1	41.9
	Dec	204,000	82.3	21.9	22.3	4.0	196.6	2.0	32.4
S6	Mar	11,367	7.4	10.0	5.9	nd	69.0	nd	14.3
	Oct	75,900	5.9	9.7	5.6	1.1	58.4	1.0	13.2
	Dec	139,833	15.7	12.2	6.7	1.9	78.0	1.3	14.4
S7	Mar	22,633	28.6	17.5	14.2	nd	129.1	0.1	30.7
	Oct	152,467	29.5	17.4	16.7	3.8	145.9	1.7	33.3
	Dec	172,000	34.5	19.1	14.2	3.2	132.3	1.7	39.8
S8	Mar	30,967	39.4	25.1	17.7	nd	253.7	0.2	28.0
	Oct	24,733	14.0	12.2	10.4	3.0	88.6	3.4	19.1
	Dec	161,500	24.9	16.0	17.3	5.0	122.8	1.6	23.9
S9	Mar	42,013	18.4	17.9	12.6	4.1	142.5	0.2	23.4
	Oct	271,233	26.3	45.8	12.8	3.3	156.7	2.3	25.4
	Dec	70,533	17.4	12.9	14.8	3.2	79.5	1.2	26.0
S10	Mar	3,092	27.3	22.6	37.1	nd	138.6	0.1	76.0
	Oct	323,300	21.8	20.2	23.9	3.7	139.9	2.3	44.6
	Dec	192,433	20.2	9.2	22.3	2.0	56.2	1.2	38.3
Average		122,215	41.8	17.9	22.1	4.1	175.5	1.4	41.8
Natural background ²		-	15.3	18.4	17.7	6.83	54.3	0.29	-
Chungbuk background ³		-	17.7±4.1	17.9±3.1	11.7±4.1	6.2±3.75	75.6±8.5	0.22±0.04	-

1 nd: under detection limit

2 Natural background concentration (Yoon et al., 2009)

3 Background concentration in soils in Chungbuk (Kim et al., 2016)

1,659(±937), 2,425(±2,274), 1,448(±1,223) mg/kg로 평균값으로는 채집 시기에 따른 차이가 나타나지 않았다 (Wilcoxon Signed-Ranks Test, $p>0.05$). 지점별로 채집 시기에 따른 오염도를 분석한 결과, 일부 지점에서는

채집 시기와 상관없이 비교적 일정한 값을 나타내었으나, S9(여천보), S10(작천보)의 경우에는 채집 시기에 따라 농도의 차이가 크게 나타났다. 이는 S9와 S10에서 10월 시료 채집 이전에 하상 정리 작업이 수행되었

으며, 이에 따라 IL, COD_{sed} , T-N의 농도로 10월에 비해 12월에 급격히 감소하였다.

2. 퇴적물의 금속류 오염도 분석 결과

퇴적물에서 Al의 농도를 측정된 결과, 평균 122,215 mg/kg으로 퇴적물 건조중량의 12.2%를 차지하였으며, 최대값은 S5의 10월 시료에서 359,600 mg/kg이었고, 최소값은 S10의 3월 시료에서 3,092 mg/kg이었다(Table 5). 지각에서 Al은 O, Si 다음으로 높은 비중을 차지하는 원소이며, 금속류 중 가장 많은 비율을 차지하고 있다(Ricolleau et al., 2011). 퇴적물 내에서 Al은 자연농도에 비해 인위적 오염에 의한 농도 변화가 작아 다른 금속류의 오염도를 평가할 때 표준화 원소로 사용되기도 한다(Brugmann et al., 1992; Paulson et al., 1993; Kim et al., 2017).

「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」에서 정하고 있는 금속류 중에서 Pb, Ni, As, Cr은 I등급 이내의 농도를 나타내어 오염도가 낮은 것으로 보인다(Table 4). 퇴적물 중 Zn은 대부분의 시료에서 I 등급을 나타내었으나, 30개 중 2개의 시료(S2와 S4의 3월)에서 II 등급이었다. 퇴적물 중 Zn의 농도는 충북 지역의 토양에서 측정된 배경 농도의 약 2.5배 높은 것으로 나타났다(Kim et al., 2016). 토양 중 Zn은 pH 7.7 이하에서는 Zn^{2+} 형태로 존재하여 유기물이나 점토광물에 흡수되며, 높은 pH에서는 $ZnOH$, $Zn(OH)_2$ 형태가 되기 때문에 토양 중에는 Zn 착화합물이 많이 존재하게 된다(Kim et al., 2016). 조사 대상 퇴적물의 pH는 6.3~7.7 범위이었으므로, Zn^{2+} 의 형태로 퇴적물에 있는 점토질에 흡착되어 존재하는 것으로 판단된다. Cu의 경우 30개 시료 중 7개가 II 등급을 나타내었다.

가장 오염도가 심한 금속류는 Cd으로 30개 시료 중 II 등급과 III 등급이 각각 9개와 12개이었다(Table 4). 3월, 10월, 12월에 채집된 시료에서 Cd 농도는 각각 0.54 ± 1.24 , 2.14 ± 0.61 , 1.60 ± 0.29 mg/kg으로 10월이나 12월에 비해 3월에 채집된 시료에서 낮게 측정되었다(Table 5). S4(새보)를 제외한 지점에서 3월에 채취된 시료는 모두 I 등급이었으나, 10월과 12월에 채집된 시료에서는 II 등급 또는 III 등급이었다. 본 연구에서 측정된 퇴적물 중 Cd의 농도는 우리나라 토양의 Cd에

대한 자연배경농도와 비교하였을 때 5~10배 높은 것으로 나타나, Cd의 오염에 대한 관리가 필요한 것으로 판단된다(Yoon et al., 2009). Cd은 도료의 재료 및 플라스틱 공장, 전지, 사진 재료, 살균제로 폭넓게 사용되고 있으며 자동차의 윤활유나 타이어에 함유되어 있기도 하며 식물에 쉽게 흡수되는 것으로 알려져 있다(Mohammad, 2023).

3. 퇴적물 용출 실험 결과

퇴적물 내 영양염류가 수질에 미치는 영향을 간접적으로 평가하기 위해 실험실 내 용출 실험을 실시하였다. 퇴적물에 정제수를 넣고 진탕하여 생성된 용출액 중 영양염류 농도와 퇴적물 내 SRP, T-P, T-N의 농도와 상관성을 분석하였다. 용출액의 T-N 농도와 퇴적물 T-N 농도는 상관관계가 높은 것으로 나타났다(Figure 2; 상관분석, $R=0.789$, $p<0.001$). T-P의 경우 용출액과 퇴적물

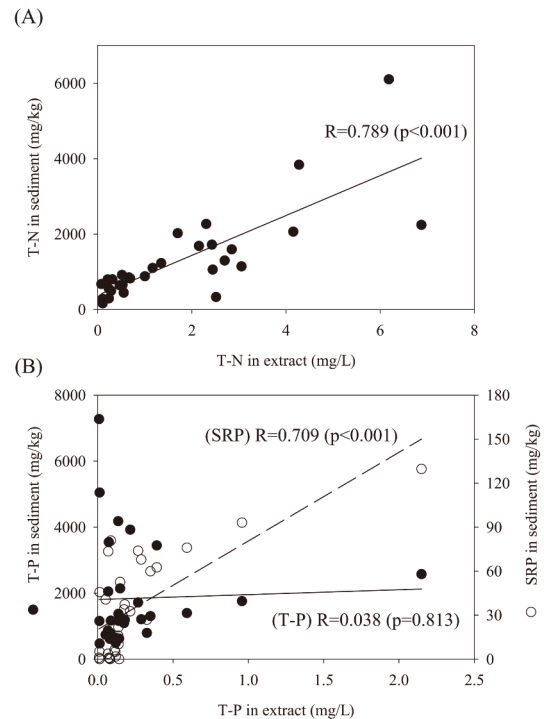


Figure 2. Relationship between the concentration of total nitrogen (T-N) in sediment and extract from release experiment (A) and between the concentration of total phosphorus (T-P) and soluble reactive phosphorus (SRP) in sediment and extract from release experiment (B).

에서 상관성이 없는 반면(Figure 2; 상관분석, $R=0.038$, $p=0.813$), 용출액의 T-P 농도와 퇴적물의 SRP 농도는 상관성이 높았다(Figure 2; 상관분석, $R=0.709$, $p<0.001$). SRP는 퇴적물에서 수체로 방출된 뒤 직접적으로 미생물에 의해 사용 가능하며 용출되기 가장 쉬운 형태의 인으로 알려져 있다(Cho and Chung, 2007). 혐기성 조건에서는 퇴적물에 존재하는 인의 형태 중 AI 또는 Fe 과 결합되어 있는 인이나 reductant soluble-P가 주로 용출되지만, 하천과 같은 호기성 조건에서는 간극수에 존재하는 soluble and loosely bound-P와 같은 수용성 인이 용출되어 수질에 미치는 영향이 큰 것으로 알려져 있다(Oh and Cho, 2015). 따라서 하천에서는 직접적으로 미생물에 의해 사용이 가능하며 용출되기 쉬운 SRP에 대한 모니터링과 퇴적물 항목별 오염평가 기준 마련에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 퇴적물 오염도 분석

국내에서는 국립환경과학원 고시에서 정한 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」에 따라 하천 및 호소 퇴적물의 오염도를 평가하고 있다(NIER, 2022; Table 2). 이는 퇴적물의 지질학적 특성, 국내 환경에서의 오염물질이 저서생물에 미치는 영향 등을 조사하여 설정되었다(Oh et al., 2018). 이 기준의 “[별표 1] 하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준”은 퇴적물의 항목별 농도에 따라 독성이 나타날 가능성을 구분한 오염평가 기준이며, 하천 퇴적물에 대하여 유기물 및 영양염류 4항목(IL, TOC, T-N, T-P), 금속류 8항목(Cu, Pb, Ni, As, Hg, Zn, Cd, Cr) 등 총 12개 항목을 활용하여 퇴적물의 질을 평가하고 있다. 또한, 퇴적물의 오염상태를 종합적으로 판단하기 위해 “[별표 3] 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준”에 따라 ‘보통’, ‘약간 나쁨’, ‘나쁨’, ‘매우 나쁨’ 등 4단계로 평가하도록 하였다. 한 지점이 여러 조건에 중복 해당될 경우에는 높은 오염도 단계로 판정하도록 정하였다(NIER, 2022). 본 연구에서는 대상 지점의 퇴적물에 대하여 유기물 및 영양염류 3항목(IL, T-N, T-P), Hg를 제외한 금속류 7항목(Cu, Pb, Ni, As, Zn, Cd, Cr)을 분석하여 오염도를 평가하였다.

IL의 경우 전체 30개 퇴적물 시료 중 25개가 I 등급이었으며, II 등급과 III 등급은 각각 3개와 2개로 하류인

S9와 S10 지점의 시료에서만 나타났다(Table 4). T-N의 경우에는 I 등급과 II 등급이 각각 16개, 12개였고, III 등급과 IV 등급이 각각 1개씩이었다. I 등급 이외의 등급을 나타낸 시료의 비율은 상류, 중류, 하류에서 각각 56%(10개/18개), 33%(2개/6개), 33%(2개/6개)이었다. T-P의 경우에는 전체 30개 시료 중 20개가 III 등급 또는 IV 등급이었으며, 상류, 중류, 하류에서 각각 70%, 33%, 67%가 이들 등급에 해당되었다. 금속류의 경우에는 Pb, Ni, As, Cr은 모든 시료에서 I 등급 수준이었으며, Cu, Zn은 각각 7개, 2개의 시료에서 II 등급을 나타내었고, Cd은 I 등급, II 등급, III 등급이 각각 9개, 9개, 12개로 금속류 중 가장 오염도가 심하였다. 7 종류의 금속류 농도를 활용하여 「하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준」에서 정한 “금속류 ‘II’ 등급 기준 지수(식 1)”를 계산한 결과, 0.04 ~ 0.62 범위였으며, 상류에 위치한 S1, S4 지점에서 오염 기준인 0.34를 초과한 시료가 각각 1개, 2개이었으며, 다른 지점에서는 이 기준을 초과하지 않았다.

유기물 및 영양염류 3항목과 금속류 7항목의 결과를 바탕으로 “[별표 3] 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준”에 따라 퇴적물의 오염도를 분류한 결과, ‘보통’, ‘약간 나쁨’, ‘나쁨’, ‘매우 나쁨’ 단계가 각각 0개, 12개, 7개, 11개이었다(Table 4). ‘매우 나쁨’ 단계의 퇴적물은 T-P 농도가 IV 등급에 속하여 나타난 결과이며, ‘나쁨’은 유기물 및 영양염류 등급이 주의가 필요한 오염된 상태인 III 등급이거나, 금속류 중 Cd의 농도가 III 등급에 속하여 나타난 결과이다. “[별표 3] 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준”에서 ‘보통’은 지질이나 대기의 영향을 일반적인 정도로 받는 곳에서 나타나는 상태이며, ‘약간 나쁨’은 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있으며, 독성시험을 통해 악영향 확인이 필요한 상태, ‘나쁨’은 저서생물에 독성이 나타날 가능성 높으며, 조사 범위를 상·하류로 확대하여 오염 규모 확인이 필요한 상태, ‘매우 나쁨’은 심각하고 명백하게 오염되었으며, 중장기적으로 배출시설 및 공공수역 관리가 필요한 상태를 의미한다(NIER, 2022). 따라서 미호강의 수질 개선을 위하여 상류 보에 누적된 퇴적물의 관리가 필요할 것으로 판단된다.

국내에서는 퇴적물의 오염도에 따른 준설 기준이 공

식적으로 설정되어 있지 않으나, 1993년 팔당호의 수질개선을 목적으로 “팔당호 퇴적물 준설사업” 계획을 수립할 때 외국 사례를 활용하여 제시된 기준과 서울 시에서 한강의 수질개선 목적으로 1994년 잠실수중보 상류 취수장 부근의 준설 사업을 실시할 때 설정된 기준, 대청호의 수질 개선을 위하여 제시된 준설 기준이 퇴적물의 오염 정도를 평가하는 기준으로 사용되기도 한다(KARICO, 2005; Kim et al., 2012; Oh and Cho, 2015; Yang et al., 2004). 팔당호 준설 기준은 T-N, T-P, IL 및 COD_{sed}에 대하여 각각 1,100 mg/kg, 800 mg/kg, 7.0%, 20,000 mg/kg(2.00%)을 기준으로 정하고, ‘4개 항목 중 2~3개 항목이 기준을 초과한 지역 또는 특정 항목의 농도가 매우 높은 지역’을 준설 대상 지역으로 설정하도록 하였다(KARICO, 2005). 본 연구에서 분석된 10개 지점 중 S6(미호천6)을 제외한 9개 지점의 각각 1~2개의 시료에서 팔당호 준설 기준을 초과하였다. 특히 3월에 채취된 10개의 시료 중 S5, S6, S7을 제외한 7개 지점의 시료가 이를 초과하였다. 반면, S1과 S2, S3, S4 채집시료는 각각 3월과 10월 그리고 3월과 12월에서 총질소와 총인의 팔당호 준설 기준을 초과하였다. S10에서 채집된 시료 3개 중 3월과 10월 시료에서 각각 3개와 2개 항목이 팔당호 준설 기준을 초과하여 오염이 가장 심한 것으로 나타났다.

대청호 퇴적물 준설 기준은 완전연소가능량과 COD_{sed}는 팔당호와 같은 기준을 적용하였으며, 총질소와 총인은 각각 3,000 mg/kg과 1,500 mg/kg을 기준으로 정하였으며, ‘4개 항목 중 2개 이상 항목이 기준치를 상회하는 지역’의 준설을 권장하였다(KARICO, 2005). 대청호 준설 기준에 따라 미호강 상류 퇴적물의 오염도를 평가하면, S4와 S9의 3월 시료와 S10의 3월 시료에서 2개 이상의 항목이 기준치를 초과하였다. 이러한 결과로 판단할 때, 미호강 상류 퇴적물의 오염도는 매우 높기 때문에, 하천 수질 개선을 위하여 퇴적물에 의한 내부부하 저감을 위한 준설 등 퇴적물 관리 사업이 필요할 것으로 보인다.

미호강 상류 오염원에 대한 선행 연구에 따르면, 미호강 분류는 생활계 점오염원과 축산계 및 토지계의 비점오염원으로부터의 부하량이 큰 것으로 나타났다(Lee et al., 2019). 또한, 본 연구의 대상 지점인 칠장천의

T-P 배출부하량은 축산계 점오염원의 비중이 높았다. 따라서 미호강의 수질 개선을 위하여 공공처리시설의 처리 효율 향상 등 지천별 점오염원 관리와 축산폐기물로부터 유래되는 비점오염원 관리가 필요한 것으로 판단된다. 여천보와 작천보의 분석 결과를 보면 12월 채취 시기에 IL, COD_{sed}, T-N의 농도가 급격하게 감소하였으며, 이는 채취 시기 이전에 시행한 하상 정리의 결과로 판단된다. 이와 같이 용수 수요가 적은 시기에 보의 수문을 조절하여 보 주변 퇴적물의 하상 정리 또는 준설을 고려하는 것도 대안이 될 것으로 판단된다.

V. 결론

금강 수계의 주요 하천인 미호강에 위치한 10개의 주요 보로 인해 형성된 퇴적물의 오염도를 평가하였다. IL로 측정된 유기물의 오염도는 높지 않았으나, T-N과 T-P의 농도는 각각 164~6,101 mg/kg과 470~7,273 mg/kg 범위로, 지점 및 채취 시기에 따른 차이가 큰 것으로 나타났다. 국립환경과학원 고시에서 정한 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」에 따라 평가한 결과, T-N의 경우 총 30개의 시료 중 I 등급, II 등급에 속하는 시료가 각각 16개, 12개인 반면, T-P는 시료 중 20개가 III 등급 또는 IV 등급으로, T-N에 비해 T-P의 오염도가 높은 것으로 판단되었다. 금속류 중에서 가장 오염도가 심한 것은 Cd으로 30개 시료 중 II 등급과 III 등급이 각각 9개와 12개이었다. 「하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준」에 따라 퇴적물의 오염도를 분류한 결과, ‘보통’, ‘약간 나쁨’, ‘나쁨’, ‘매우 나쁨’ 단계에 속하는 퇴적물은 각각 0개, 12개, 7개, 11개인 것으로 나타났으며, 이에 따라 미호강 보의 퇴적물의 오염상태가 심각하며, 수질을 악화시키는 내부오염원으로 작용할 것으로 판단되었다. 따라서 미호강의 수질 개선을 위하여 공공처리시설 등 점오염원 관리와 축산폐기물로부터 유래되는 비점오염원 관리가 선행되어야 하며, 퇴적물의 효율적인 관리를 위해서 용수 수요가 적은 시기에 보의 수위를 조절한 후 준설이나 하상정리를 고려하는 것도 대안이 될 것으로 사료된다.

사사

이 논문은 2024학년도 충북대학교 연구년제 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Ahn HK, Woo H, Rhee DS, Kwon BA. 2006. A study on stream eco-corridor rehabilitation by removal of out-aged weirs. Proceeding of the Conference of the Korean Society of Civil Engineers. KSCE. pp. 540-543. [Korean Literature]
- Bae MS. 2021. Integrated Water Management Plan for the Miho River Basin through Social Participation. Chungbuk Research Institute, Cheongju, Republic of Korea. [Korean Literature]
- Bengtsson L, Fleischer S, Lindmark G, Ripl W. 1975. Lake Trummen restoration project. I. Water and sediment chemistry. *Int Ver Theor Angew Limnol Verh.* 19: 1080-1087.
- Brügmann L, Bernard PC, van Grieken R. 1992. Geochemistry of suspended matter from the Baltic Sea 2. Results of bulk trace metal analysis by AAS. *Mar Chem.* 38: 303-323.
- Cho YC, Chung SW. 2007. Sediment release rate of nutrients from Namyang Reservoir. *J Korean Soc Environ Eng.* 29: 1345-1352. [Korean Literature]
- Jeong A, Kim S, Yu W, Kim Y, Jung K. 2018. Estimation of river dredging location and volume considering flood risk variation due to riverbed change. *J Korean Soc Hazard Mitig.* 18: 279-291. [Korean Literature]
- Kim DH. 2002. A study on the measurement of nutrients release from sediment. *J Environ Sci.* 11: 1333-1337. [Korean Literature]
- Kim HY, Huh I, Choi JH. 2013. Investigation of nutrient release from the sediments near weir in the Namhan River. *J Korean Soc Environ Eng.* 35: 554-563. [Korean Literature]
- Kim S, Ahn J, Jung K, Lee K, Kwon H, Shin D, Yang D. 2017. Contamination assessment of heavy metals in river sediments (for the surface sediments from Nakdong River). *Journal of Korean Society on Water Environment.* 33: 460-473. [Korean Literature]
- Kim YJ, Kim MH, Song YS, Kim KM, Lee JW, Cho SY. 2016. Survey on soil pollution by land use in Chungcheongbuk-do. *Journal of Chungcheongbuk-do Research Institute of Health & Environment.* 25: 262-300. [Korean Literature]
- Kim SH, Ahn TW, Choi IS, Oh JM. 2012. The evaluation on solidification of dredged sediment for recycle from stagnant water area. *Journal of Environmental Impact Assessment.* 21(1): 63-69. [Korean Literature]
- Klavins M, Apsite E. 1997. Sedimentary humic substances from lakes in Latvia. *Environment International.* 23: 783-790.
- Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (KARICO). 2005. A Study on the Deriving of Sediments Quality Guideline for Reservoir Dredging and the Use of Dredged Soil, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation, 45-48. [Korean Literature]
- Lee JK, Ahn TW, Oh JM. 2010. A study on the influence of water quality on the phosphorus fraction properties from reservoir sediments. *J Korean Soc Environ Eng.* 32: 840-850. [Korean Literature]
- Lee JS, Kim YC, Hwang GS. 2003. Changes of the sediment properties in small agricultural reservoirs before and after rainy season. *KSCE J Civ Environ Eng Res.* 23: 359-368. [Korean Literature]
- Lee KJ, Kim YS, Kim YJ, Park DK, Lim KM, Kim MS, Won KJ, Hwang JS, Lim JH. 2019. A survey of the upper reaches of Mihocheon. *Journal of Chungcheongbuk-do Research Institute of*

- Health & Environment. 28: 147-219. [Korean Literature]
- Lee YS, Lee KS. 2000. A study on release characteristics of sediment and its impacts on water quality in Daechong dam reservoir. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 9: 99-107. [Korean Literature]
- Mishra P, Pandey CM, Singh U, Gupta A, Sahu C, Keshri A. 2019. Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*. 22: 67.
- Mohammad V. 2023. Heavy metals in surface soils and crops, In AA Basim (ed.), *Heavy Metals*, IntechOpen.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2017a. Standard Methods for Testing Water Pollution, Notification No. 2017-57, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2017b. Standard Methods for Testing Soil Pollution, Notification No. 2017-22, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2017c. Standard Methods for Testing Waste, Notification No. 2017-54, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2022. Criteria for Contamination Assessment of River and Lake Sediments. Rule No. 830, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea. [Korean Literature]
- Oh KH, Cho YC. 2015. Evaluation of contamination level of the sediments from Chusori and Chudong areas in Daechung Reservoir. *J Korean Soc Environ Eng*. 37: 277-284. [Korean Literature]
- Oh KH, Kim SJ, Cho YC. 2018. Analysis of sediment contamination levels in the Giheung Reservoir. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 34: 26-32. [Korean Literature]
- Park JC, Kim DS, Choi KS. 2022. Sediment material contents and settling velocity of particle material in the constructed wetland in Sookcheon in the catchment of Daechong Reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment*. 55: 244-250. [Korean Literature]
- Paulson A, Curl Jr H, Feely R. 1993. The biogeochemistry of nutrients and trace metals in Hood Canal, a Puget Sound fjord. *Marine Chemistry*. 43: 157-173.
- Reddy K, Diaz O, Scinto L, Agami M. 1995. Phosphorus dynamics in selected wetlands and streams of the Lake Okeechobee Basin. *Ecological Engineering*. 5, 183-207.
- Reddy K, Kadlec R, Flaig E, Gale P. 1999. Phosphorus retention in streams and wetlands: A review. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 29: 83-146.
- Ricolleau A, Fei Y, Corgne A, Siebert J, Badro J. 2011. Oxygen and silicon contents of earth's core from high pressure metal-silicate partitioning experiments. *Earth and Planetary Science Letters*. 310: 409-421.
- Song YH, Lee YH, Lee JG, Park YK, Kim KE. 2021. Policy Analysis and Response Measures for Water Quality Improvement in Miho River. Daejeon-Sejong Research Institute, Daejeon, Republic of Korea. [Korean Literature]
- Walling D, Russell M, Webb B. 2001. Controls on the nutrient content of suspended sediment transported by British rivers. *Sci Total Environ*. 266: 113-123.
- Wang S, Jin X, Pang Y, Zhao H, Zhou X. 2005. The study of the effect of pH on phosphate sorption by different trophic lake sediments. *J Colloid Interface Sci*. 285: 448-457.
- Yang TS, Koh JM, Lee KS. 2004. A study on basic testing method of dredging deposit sludges

- in lower layers. Journal of Korea Society of Environmental Administration. 10(4): 339-348. [Korean Literature]
- Yang YM, Chae MH, Lee DH, Park YK, Seok KS. 2021. Assessment of water quality and sediment pollution in Gap Stream. J Environ Anal Health Toxicol. 24: 13-25.
- Yoon H, Kim J, Chae M, Cho Y, Cheon S. 2019. Assessment of water quality in the Miho Stream using multivariate statistics. Journal of Environmental Impact Assessment. 28: 373-386. [Korean Literature]