

갑천 표층 퇴적물의 금속류 분포 및 오염도 평가

양윤모 · 채민희[†] · 이대희 · 길기범 · 김도형 · 조윤해 · 천세억

국립환경과학원 금강물환경연구소

Spatial Distribution and Pollution Assessment of Metals in the Sediments of a Gap Stream, Korea

Yun-Mo Yang, Min-Hee Chae[†], Dae-Hee Lee, Gi-Beom Kil, Do-Hyeong Kim,
Yoon-Hae Cho, and Se-Ok Cheon

Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

Received April 9, 2019/Revised May 21, 2019/Accepted May 28, 2019

The purpose of this study was to evaluate the sediment contamination levels of the midstream and downstream areas of the Gap Stream, a major tributary of the Geum River in Korea. Ten monitoring stations were selected to investigate metal contaminations in the sediment, with samples taken in May and October 2018, before and after rainy season respectively. Comprehensive evaluation was conducted according to both foreign and Korean standards for freshwater sediment contamination assessment as well as relevant test methodology. The analysis of sediment particle size, sediment contaminant distribution, the environmental effects on bodies of water, and the correlation between sediment variables were all included in the study. The evaluation of the results, using the mean PEL_k quotient ($mPEL_kQ$), demonstrated that five stations before and seven stations after the rainy season had high possibilities of toxicity in the benthos. Two positions were determined to be within the “very poor” range level of contamination stages prior to the rainy season. The Pollution Load Index (PLI), used to determine the existence or non-existence of man-made contaminants, indicated the presence of man-made contamination at every station. In the majority of stations, contamination levels of Hg, Cd, and Cu were determined to be class II or higher, according to South Korean standards. Enrichment Factor and Index of Geoaccumulation (I_{geo}) analyses showed that the contaminants with the highest levels present were Hg, Cd and Zn. In particular, Hg was found to be the most concerning metal present with a level III contamination, indicating heavy to extreme contamination in some stations.

Key words: Metals, Sediment, Gap Stream, Enrichment Factor, Index of Geoaccumulation, Geum River

1. 서 론

최근 우리나라는 산업발달, 주거환경의 밀집과 농·축산업 등으로 인해 생활하수와 산업 및 농축산 폐수 등의 각종 오염원이 발생되고, 강우 시 하수처리장에서 발생하는 설계 용량 이상의 월류수, 일부 사업장의 무단 배출과 비점오염원 등이 하천에 유입되어 수질 환경을 꾸준히 악화시키고 있다. 특히, 도심하천은 산업단지에서 배출되는 산업폐수와 인간 활동에서 발생

되는 생활하수 등의 인위적인 오염원에 많이 노출되어 있다.¹⁻³⁾

대전광역시의 도시개발은 1990년대 초 엑스포 개최와 둔산 신시가지 개발 등으로 짧은 시간에 하천 정비를 진행하면서 생태계가 훼손되었다.⁴⁾ 2003년부터 ‘3대 하천 살리기’ 사업을 진행하여 하·폐수처리시설과 하수관거 등을 정비하고 보완하였지만, 강우 시 하수관로에 쌓여 있던 퇴적오염물질들이 토구의 유량 증가로 바이패스 되어 하천으로 유입되며 하수처리장 방

[†]To whom correspondence should be addressed.

류수로 인해 현재까지도 많은 양의 오염원이 갑천으로 유입되고 있다.⁵⁻⁸⁾

갑천은 대전광역시시의 3대 하천 중 하나로 대둔산에서 발원하여 여러 개의 소하천이 유입되고, 대전1·2산업단지 부근에서 대전천이 유입된 유등천과 합류한다. 최종 합류된 갑천은 라바보에서 정제한 후 대전1·2산업단지, 대전하수처리장을 지나 탑립돌보에서 한 번 더 정제되고 관평천 유입 이후 대전3·4산업단지를 지나 금강으로 유입된다.

하천 퇴적물은 악화된 수질을 흡착하고 수리학적 특성에 따른 유속 및 하천 지형의 영향을 받아 입자의 무게 순으로 유속이 감소되는 구간부터 퇴적된다. 퇴적물에 존재하는 영양염류와 금속류들은 산화환원전위, pH, 용존산소, 유기탄소 등의 조건에 따라 수층으로 용출과 퇴적물의 흡착을 반복하며 저서생물체와 수생태계 및 수질에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.⁹⁻¹¹⁾

2017년 대전녹색환경지원센터에서 발표한 갑천 자료에 의하면 본 연구 지점의 퇴적층의 깊이는 약 5~30 cm 이며 특히 원촌교와 불무교에서 퇴적층이 가장 깊은 것으로 보고되었다.¹²⁾ 또한, 오염된 갑천의 퇴적물은 대청댐에서 방류한 금강의 첫 번째 오염원이자 최대 오염원으로 선행 연구에서 언급한 바 있다.^{13,14)}

갑천 하류의 하상 퇴적물에 관한 연구는 2002년 퇴적물의 유기물 분석에 대한 연구와¹⁵⁾ 2006년 0.1 N HCl 추출 방식의 금속류 연구가¹⁶⁾ 진행되었다. HCl로 퇴적물 내 금속을 추출하여 분석할 경우 산화물 형태로 존재하는 금속의 양만큼 추출된다. 산화물 형태라 함은 철과 망간 수산화물 형태와 이것들과 결합되어 있는 금속을 의미하며 황철석으로 전이될 수 있는 형태로 간주한다.¹⁷⁾ 즉, 두 연구 모두 담수퇴적물 공정시험기준이 마련되지 않았던 시점이었으며 적용한 분석법이 상이하여 과거 연구 자료와의 직접 비교는 어려운 상황이다.

국내에서는 2011년 담수퇴적물공정시험기준이 마련되었고 2012년 하천·호소 퇴적물 오염평가기준을 제정하였으나 금속류의 경우 미국 워싱턴주 및 캐나다 온타리오주의 기준을 차용하였다. 이후 2015년 국내 퇴적물 독성 DB를 구축하여 금속류 8종에 대해 4단계로 구분하는 국내 기준을 제정했으나 일부 금속의 경우 국외 기준에 비해 높게 설정되어 있어 미국과 캐나다 담수퇴적물기준과 함께 비교하여 평가하였다. 또한 조사지점에 대한 종합평가를 위해 퇴적물 독성을 예측할 수 있는 mPEL_RQ와 지각배경농도와 기준

금속을 이용한 농축계수, 오염도 단계를 7단계로 나누어 평가하는 농집지수 등을 함께 활용하였다. 향후 본 연구결과는 갑천의 수생태계와 수질에 미치는 영향을 평가하고, 오염원의 원인 규명 등 종합적인 수질환경 평가에 대한 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점

본 연구의 조사 지점은 갑천 라바보 하류와 원촌교 상류 사이를 G1 지점으로 선택하였고, 환경부 수질 및 수생태계 기준 중 약간나쁨(IV) 단계에 해당하는 원촌교 하류부터 금강합류 전까지를 4개의 지점으로 나누었다. 대전1·2산업단지 우수토실 월류를 통한 오염여부를 확인하기 위해 원촌교 하류 G2 지점, 대전하수처리장 방류 후 탑립돌보 전 G3 지점, 대전 제4산업단지와 테크노밸리 사이 G4 지점과 제3·4산업단지를 지나 금강과 합류 직전 갑천의 말단 G5 지점까지 5개 구간을 직접적인 오염원 유입에 노출되어 있는 퇴적물과 노출되지 않는 퇴적물의 금속류 농도를 비교하기 위해 좌(L), 우(R)로 나누어 총 10개 지점을 2018년 우기 전(5월), 후(10월)로 2회 조사하였다(Fig. 1).

2.2. 시료채취 및 전처리

시료채취 방법은 수질오염공정시험기준(ES 04160.1, ES 04160.2; 2012)¹⁸⁾에 따라 스쿱과 포나 그래프를 이용

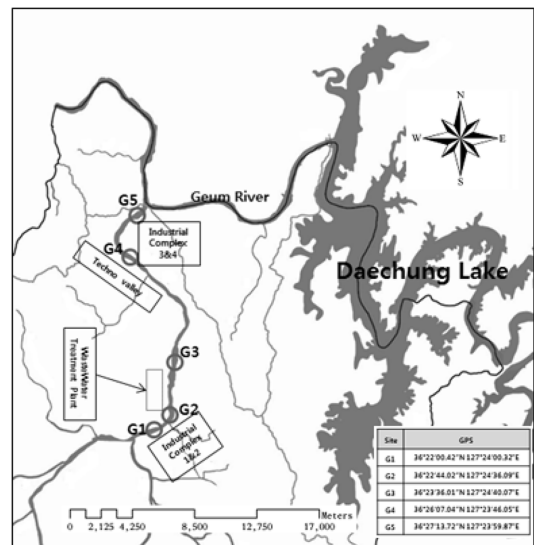


Fig. 1. Sampling sites.

하여 채취 지점을 좌·우로 나누어진 구간을 횡단면 5개 소 이상 채취 후 혼합하였다. 혼합시료는 현장에서 간극수를 이용하여 체눈 크기 2 mm와 0.15 mm(나일론(nylon))로 각각 습식 체질하고, 체를 통과한 시료는 시료 용기에 각각 보관 후 4°C 이하로 냉장 운반·보관하였다. 입도분석은 현장에서 2 mm 체질하여 얻은 시료를 퇴적물오염공정시험방법(ES 04853.1)에 따라 과산화수소(6% H₂O₂)를 가하여 유기물을 제거하였다. 과산화수소는 유기물과의 반응이 완전히 없을 때까지 추가적으로 주입하였으며 반응이 끝난 후에는 시료가 마르지 않는 수준에서 가열하고 증류수로 세척하였다. 금속류 항목은 ES 04870~ES 04880에 따라 분석하였으며 현장에서 100 메쉬 체질한 시료를 풍건 건조하여 분쇄와 체질(체눈 크기 0.063 mm) 한 것을 분석용 시료로 사용하였다. 분석용 시료는 테프론 용기에 적당량 취하여 질산(HNO₃), 과염소산(HClO₄)과 불산(HF)을 2:1:2비율로 순차적으로 주입하였으며 완전분해를 위해 흑연블럭 130°C에서 시료가 혼합산에 완전히 분해 될 때까지 가열하였다. 완전분해 된 시료는 질산(2% HNO₃)에 용해 및 희석하여 분석에 사용하였다.

2.3. 분석 방법

입도(ES 04853.1)는 입자의 크기에 따라 2~0.063 mm

이상은 모래, 0.063 미만~0.004 mm 이상은 실트, 0.004 mm 미만은 점토로 구분하기 위해 입도분석기(Microtrac S3500 Extended wel, Microtrac)로 측정하였다. Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Li, Al은 유도결합플라즈마 원자발광 분광법(ES 04870.1)에 따라 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, Agilent 700 series)로 측정하였으며 As와 Cd은 유도결합플라즈마 질량분석법(ES 04870.2)으로 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy, Agilent 7900)를 이용하였다. Hg은 자동수은분석기법(ES 04875.1)에 따라 AMA (Automatic Mercury Analyzer, Teledyne instruments Hydra C)로 분석하였다.

2.4. 금속류 오염도 평가 방법

퇴적물 내 금속류의 오염 수준을 파악하고, 이로 인한 저서생물에 유해성 정도를 평가하고자 국내 「하천·호소 퇴적물의 오염평가 기준」 예규 제 2015-687호, U.S. EPA의 오대호 담수퇴적물 기준, 캐나다 연방정부 환경각료회의(Canadian Council of Ministers of the Environment)에서 정한 잠정퇴적물권고기준(Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life)과 온타리오주의 담수퇴적물 기준을 사용하여 검토하였다.¹⁹⁻²²⁾ 항목별 기준은 Table 1과 같다.

퇴적물 오염 또는 인위적인 영향을 파악하기 위해

Table 1. Sediment quality standards of the U.S. EPA, sediment quality guidelines of Canada (CCME, Ontario), and sediment pollution evaluation standards of Korea(NIER).

Item	U.S. EPA sediment quality standards			Canada				NIER sediment pollution evaluation standards				
	non-polluted	moderately polluted	heavily polluted	CCME ¹⁾		Ontario ²⁾		Class I	Class II	Class III	Class IV	
				ISQG	PEL	LEL	SEL					
Cu	< 25	25~50	> 50	35.7	197	16	110	48	≤ 228	≤ 1,890	> 1,890	
Pb	< 40	40~60	> 60	35	91.3	31	250	59	≤ 154	≤ 459	> 459	
Ni	< 20	20~50	> 50	-	-	16	75	40	≤ 87.5	≤ 330	> 330	
Metals (mg/kg)	As			5.9	17	6	33	15	≤ 44.7	≤ 92.1	> 92.1	
	Hg			0.17	0.486	0.2	2	0.07	≤ 0.67	≤ 2.14	> 2.14	
	Zn	< 90	90~200	> 200	123	315	120	820	363	≤ 1,170	≤ 13,000	> 13,000
	Cd	-	-	> 8	0.6	3.5	0.6	10	0.4	≤ 1.87	≤ 6.09	> 6.09
	Cr	-	-	-	37.3	90	26	110	112	≤ 224	≤ 991	> 991

¹⁾ISQG (Interim Freshwater Sediment Quality Guidelines) predicting no biological effect below ISQG and PEL(Probable Effect Levels) predicting frequently adverse effect biological effect above PEL, Canadian Council of Ministers of the Environment

²⁾LEL(Lowest Effect Level), SEL(Severe Effect Level), Environment Canada-Ontario Ministry of the Environment

※ Status of the grade of sediment
 Class I: Status of sediments with almost no possibility toxicity.
 Class II: Status of sediments with possible toxicity.
 Class III: Status of sediments with possibility is relatively high toxicity.
 Class IV: Status of sediments with very high possibility toxicity.

국내 하천 퇴적물 오염평가 기준(mPEL_kQ)과 농축 계수(Enrichment Factor, EF), 농집지수(Index of Geoaccumulation, I_{geo}), 오염부하계수(Pollution Load Index, PLI) 등 4가지 평가방법을 이용하였다.^{19,23-25)} 아래의 평가방법은 2018년도에 발표한 선행연구 “금강수계 보구간 표층퇴적물 오염도 평가”와 동일한 방법으로 평가하였다.

퇴적물 내의 존재하는 금속류의 종합적인 오염도

Table 2. Criteria for station assessment.

Category	Status
Good	All 8 metals are Class I
Fair	At least 1 metal is Class II or Class III
Poor	mPEL _k Q value is higher than 0.34
Very Poor	At least 1 metal is Class IV

※Status and further investigation recommended for each category of station

- Good: Status of sediments which are affected by geological background concentration and air deposition

- Fair: Status of sediments with possible toxicity, which needs to be assessed by sediment toxicity test

- Poor: Status of sediments with probable toxicity, which needs to be comprehensively assessment by gradient sampling to identify the spatial scale and the severity of contamination

- Very Poor: Status of sediments with severe adverse effect, which should be managed by source control and the prevention measures of secondary pollution

Table 3. Classification of pollution load index (PLI), enrichment factor (EF), index of geoaccumulation (I_{geo}), and mean PEL_k quotient (mPEL_kQ) indices of trace metals used in this study.

Index	Range	Class	Sediment quality
PLI	≤ 1		No pollution
	> 1		Polluted
EF	≤ 1		No enrichment
	1 < EF ≤ 3		Minor enrichment
	3 < EF ≤ 5		Moderate enrichment
	5 < EF ≤ 10		Moderately severe enrichment
	10 < EF ≤ 25		Severe enrichment
	25 < EF ≤ 50		Very severe enrichment
I _{geo}	> 50		Extremely severe enrichment
	≤ 0	0	Practically uncontaminated
	0 < I _{geo} ≤ 1	1	Uncontaminated to moderately contaminated
	1 < I _{geo} ≤ 2	2	Moderately contaminated
	2 < I _{geo} ≤ 3	3	Moderately to heavily contaminated
	3 < I _{geo} ≤ 4	4	Heavily contaminated
mPEL _k Q	4 < I _{geo} ≤ 5	5	Heavily to extremely contaminated
	> 5	6	Extremely contaminated
	< 0.34		Nontoxic
	≥ 0.34		Toxic (positive predictive value is over 77%)

및 위해성을 평가하기 위해 국내 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준에 따라 mean PEL_k quotient (mPEL_kQ)를 산정하였다(Table 2)(Table 3).¹⁹⁾

$$mPEL_{kQ} = \frac{\sum_{i=1}^8 \left(\frac{EC_i}{PEL_{ki}} \right)}{8}$$

여기서, EC_i는 금속류 항목별 농도, PEL_{ki}는 금속류 항목별 II등급 기준치이다.

농축계수(Enrichment Factor, EF)는 지각기원의 자연적 또는 인위적인 오염 정도를 평가하기 위한 방법으로 퇴적물 내에 보존성원소로 존재하는 Al(Aluminum)으로 시료와의 비를 지각의 배경농도로 보정한 농도비를 아래와 같은 식으로 산정한 방법이다.²³⁾

$$EF = \frac{(metal/Al)_{sample}}{(metal/Al)_{crust}}$$

본 연구에서 쓰인 금속류의 지각 배경농도는 Rudnick and Gao(2003)에 보고된 값을 이용하였다.²⁶⁾

농집지수(Index of Geoaccumulation, I_{geo})는 상대적인 금속의 농집정도를 나타내는 지수로서 금속 함량을 오염되지 않은 금속함량과 비교하여 직접 퇴적물의 오염도를 등급화 할 수 있는 방법으로 각 금속류

에 대한 오염도를 7단계로 구별하기 위해 아래와 같이 계산된다(Table 3).²⁴⁾

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right)$$

C_n 은 각 금속류의 측정농도를, 1.5는 지각 기원을 보정하기 위해 사용되는 계수이고, B_n 은 각 금속류의 배경농도이며 Rudnick and Gao(2003)에 보고된 값을 이용하였다.

오염부하계수(Pollution Load Index, PLI)는 측정된 금속류의 농도와 배경농도의 비를 갖고 전체적인 오염도를 평가하며 그 값이 기준 1을 초과할 시 인위적 오염인 것으로 판단한다(Table 3). 그 식은 다음과 같다.²⁵⁾

$$PLI = (C_1/B_1 \times C_2/B_2 \cdots C_n/B_n)^{1/n}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 입도 분포 특성

갑천 퇴적물의 입도를 측정해본 결과 우기 전 평균

Sand(85%) > Silt(10.2%) > Clay(0.3%) 순이었고, 우기 후 평균 Sand(94.7%) > Silt(5.3%) > Clay(0.0%) 순으로 조사되었으며 평균 입도의 크기는 0.32 ~ 0.80 mm이다. 자세한 내용은 Table 4에 제시하였다. 우기 전인 5월에 채취한 시료에서는 G4-L 지점이 Silt(15.1%)와 Clay(1.0%)가 가장 많은 것으로 나타났으며 G1 지점을 제외한 나머지 지점의 Silt 비율은 비슷하였다. 반면, 우기 후인 10월 조사에서는 탑립돌보로 인해 정체 구간이 형성되는 G3-R 지점의 Silt 비율이 가장 많았다. 나머지 지점은 우기의 영향을 받아 유량 증가로 인해 퇴적물이 이동한 것으로 판단된다. 또한 5월에 몇몇 지점에서 Clay를 확인할 수 있었으나, 10월 조사에서는 나타나지 않았다. 갑천은 G5 지점 하류에서 금강으로 합류되는데 대청댐에서 방류를 할 경우 금강의 유량과 유속이 증가하며 수초가 발달하고, 수위가 낮은 G5 지점 좌안에서 밀도류와 정체구간이 형성되어 많은 양의 퇴적물이 퇴적될 수 있는 환경이 된다. 반면 우기에는 많은 양의 퇴적물이 갑천에서 금강으로 유입되어 금강 하류로 이동하게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 갑천의 입도는 대부분 Sand

Table 4. Sediment composition and mean grain size of surface sediments in the study area

Site		Composition of Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean (mm)
1st	G1-L		9.4	-	0.57
	G1-R		6.4	-	0.43
	G2-L		12.6	0.1	0.80
	G2-R		12.3	0.7	0.53
	G3-L		11.1	0.2	0.57
	G3-R		12.5	0.7	0.70
	G4-L		15.4	1.0	0.53
	G4-R		7.4	-	0.55
	G5-L		11.4	-	0.32
	G5-R		4.4	-	0.52
2nd	G1-L		5.6	-	0.39
	G1-R		1.9	-	0.65
	G2-L		6.5	-	0.53
	G2-R		6.3	-	0.73
	G3-L		6.9	-	0.74
	G3-R		9.1	-	0.74
	G4-L		4.2	-	0.54
	G4-R		7.7	-	0.78
	G5-L		0.6	-	0.65
	G5-R		3.6	-	0.42

very fine sand 63~125(um)% fine sand 125~250(um)% medium sand 250~500(um)% coarse sand 500~1000(um)% very coarse sand 1000(um)<%

로 이루어져 있으며 Udden(1941)과 Wentworth(1922)의 분류 기준에 따라 Sand를 Very fine sand(극세립사), Fine sand(세립사), Medium sand(중립사), Coarse sand(조립사)와 Very coarse sand(극조립사) 5가지 방법으로 나누어 정리하였다. ^{27,28)} 조사지점은 대부분 Medium sand(250~500 µm)와 Coarse sand(500~1000 µm)의 비율이 가장 높은 것으로 나타났다. 가장 낮은 비율을 차지하고 있는 Very fine sand(63~125 µm)는 우기 후 전체 지점이 낮아졌으며 특히 G5-L 지점에서 크게 낮아지는 것으로 나타났다. Fine sand(125~250 µm)의 경우 우기 후 G2-R, G3-R, G4-R 지점에서 증가하였다. Medium sand는 우기 전·후 대비 G1-R와 G5-L 지점에서 크게 증가하였으며 Coarse sand와 Very coarse sand(1000 µm <) 역시 몇몇 지점에서 우기 후 증가하는 것으로 나타났다. 이는 우기 후 Medium sand를 기준으로 이하의 입자들이 줄어 들고 이상의 입자들이 증가하는 것으로, 강우로 인한 유량증가로 많은 양의 퇴적물이 하류를 통해 금강으로 흘러 들어감에 따라 Clay, Silt, Very fine sand, Fine sand와 일부의 Medium sand는 강우의 영향을 받았을 것으로 판단된다. 이전의 연구 자료들은 대부분 Silt 이하의 세립한 입자들이 유기물 또는 금속류 함량과 높은 상관성 있는 것으로 보고되었지만 인위적인 오염원이 있는 도심지역의 하천에서는 Sand를 보다 세분화하여 금속류 함량과 비교할 필요성이 있다고 판단된다.

3.2. 금속류 분포 및 오염원 기원

갑천 퇴적물 중의 금속류 총량 분석 결과를 각각의 항목별로 우기 전·후로 비교하여 나타냈다(Fig. 2).

Pb는 G2-R 지점에서 가장 높았으며 G2 지점부터 하류까지 국내 퇴적물 II등급 기준인 59 mg/kg을 초과하거나 유사한 농도인 것으로 나타났다. 국내 기준 II등급은 저서생물에게 독성이 나타날 가능성이 있는 수준이나 U.S. EPA 기준으로는 Heavily polluted 단계를 초과하였다. 특히 G2-R 지점 우기 전·후, G3-L과 G4-L 지점의 우기 전 Pb 농도는 Canada CCME의 PEL 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 대전1·2산업단지에 입주한 업체의 배출수는 합류식 관로를 통해 대전하수처리장으로 이송되어야 하지만 일부는 우수토실을 통해 월류하여 G2 지점의 우안으로 유입된다. Pb의 인위적인 하천 유입 경로는 대표적으로 공업폐수와 배기가스이며 이동과 확산은 주로 Pb·Cu·Zn

제련, 철강 공업과 전지 제조 등이 있으며 하수 슬러지 또는 소각 분지 등 다양한 경로를 통하는 것으로 알려져 있다.²⁹⁾ 또한 대전산업단지관리공단의 2018년도 3분기 조사에 따르면 대전1·2산업단지외 편입지역 총 353개 업종 중 철강과 기계 업종이 약 57%, 섬유 5%, 석유화학 8%와 전기전자 업종이 10%를 차지하고 있는 것으로 조사되었다.³⁰⁾

Zn은 G2-R 지점에서 우기 전에 가장 높았으며 우기 후에는 G3 지점에서 높아지는 것으로 나타났다. 이는 우기의 영향 및 G2 지점과 G3 지점 사이의 하수종말처리장 방류수의 유입으로 증가된 유속에 의해 첫 번째 정체구간인 탐립돌보가 설치된 G3 지점으로 이동하였거나 우수관거를 통해 우기에 유입되었을 것으로 판단된다. Zn은 저서생물 및 모든 생물에게 필요한 필수 원소이며 농도가 높아도 독성에 의한 영향은 크지 않은 것으로 알려져 있다.³¹⁾ 하지만 대부분 지점에서 국내 II등급 기준을 초과하였으며 우기 후 G1-L 지점을 제외한 전체 지점의 Zn 농도가 U.S. EPA Heavily polluted 단계를 초과하였고, 국내 II등급에 속하는 지점들은 CCME의 PEL 기준을 초과하였다. Zn의 인위적인 하천 유입 오염원으로는 도로에 쌓인 타이어 마모 입자가 우기에 우수관로를 통해 하천으로 유입과 산업폐수 등이 대표적인 오염원이다. 특히 Zn은 청동 또는 합금 제조에 많이 쓰이며 철강의 보호막으로 많이 사용되고 있다. 대전1·2산업단지의 철강 사업장의 비율은 19%를 차지하고 있다.

Cu는 G1-L 지점을 제외한 전체 지점에서 국내 기준 II등급 이었으며 라바보 하류 G1 지점을 제외한 모든 지점이 U.S. EPA Heavily polluted 단계를 초과하였다. 또한 앞서 언급한 Pb, Zn과 마찬가지로 우기 전 G2-R 지점에서 가장 높게 나타났으며 우기 후에는 하류 G3-R 지점에서 가장 높았다. Cu는 Zn과 마찬가지로 필수 원소지만, 과하게 되면 독성을 발생시키는 것으로 알려져 있다.³¹⁾ Cu의 주요오염원으로는 비철금속 제련, 탈색 방지제, 전선, 전기도금, 철강공업과 하수 슬러지 등이 있다. 대전1·2산업단지 내 철강 및 기계 업종 외에 비철금속(3%)과 섬유의복(5%) 업종이 입주해 있다.

Cu의 우기 전 농도를 살펴보면 G2-R, G3-R과 G4-L 지점에서 III등급과 IV등급인 것으로 나타났다. IV등급은 저서생물에게 독성이 나타날 가능성이 매우 높은 등급으로 해당 지점들은 Canada CCME의 PEL 기

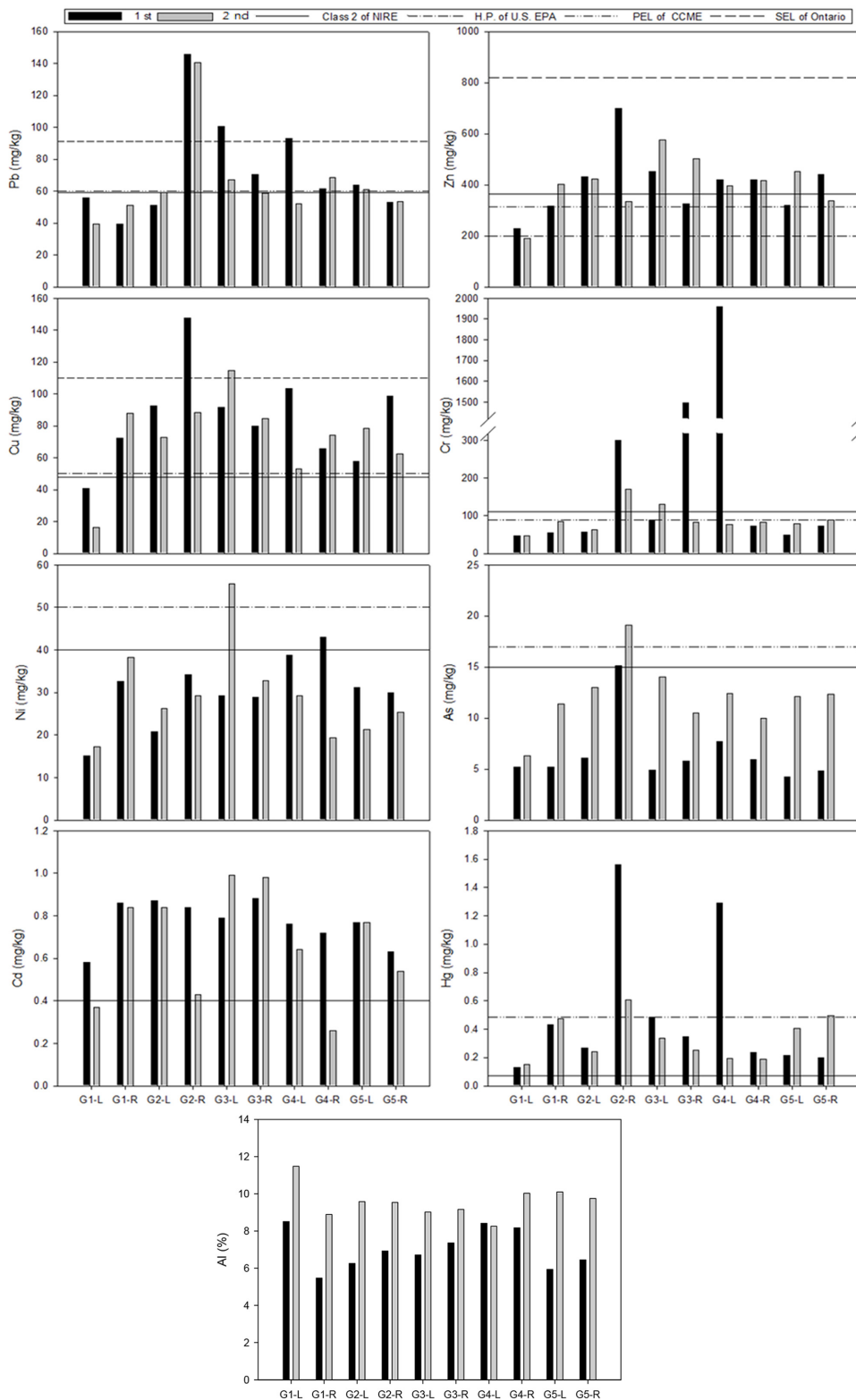


Fig. 2. Concentrations of total metals in surface sediments of the study area.

준과 온타리오주 담수퇴적물 SEL 기준도 초과하였다. 하지만 우기 후 Cr의 농도가 낮아진 것으로 보아 이는 오랜 기간에 걸쳐 퇴적되었다기보다는 짧은 기간에 높은 농도의 오염원이 유입되었을 것이라 판단된다. Cr은 주로 염색물감의 색소, 가죽 염색, 섬유 염색, 하수 슬러지, 오디오나 비디오테이프와 특수강철 제조에 합금 원료로 많이 사용되고 있다.

Ni은 모든 지점에서 국내 기준 II등급으로 나타났으며 대부분의 지점이 U.S. EPA의 Moderately polluted 단계이거나 온타리오의 LEL 기준을 초과하였다. 특히 우기 전 G3-L 지점에서 U.S. EPA의 Heavily polluted 단계였다. 대부분의 금속이 지점에 따라 변화양상이 다소 상이하게 나타난 반면, As는 전 지점 우기 후 오염도가 상승하였다. 특히 G2-R 지점의 경우 우기 전·후 국내 기준 II등급으로 우기 후 증가하였으며 U.S. EPA의 Heavily polluted 단계인 것으로 나타났다. Cd은 우기 후 G1-L과 G4-R 지점을 제외한 모든 지점이 국내 기준 II등급과 Canada CCME의 ISQG, 온타리오주 담수퇴적물 LEL 기준 농도를 상회하였다.

Hg은 우기 전 G2-R과 G4-L 지점에서 국내 기준 III등급과 Canada CCME의 PEL 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 저서생물에게 독성이 나타날 가능성이 비교적 높은 단계이다. 우기 후 G2-L 지점의 농도는 낮아졌지만 III등급 기준과 유사한 농도 수준이었으며 여전히 Canada CCME의 PEL 기준을 초과하였다. 또한 우기 전 G3-L 지점과 우기 후 G5-R 지점도 같은 기준에 속하였다. G1~G4 지점은 우기 후 농도가 우기 전 농도보다 유사하거나 감소한 반면, G5 지점은 좌안과 우안 모두 증가하는 것으로 나타났다. G5 지점의 영향을 주는 직접적인 요인은 대전·3·4 산업단지이다. 대덕산업단지관리공단의 2019년 2월에

조사한 결과에 따르면 3·4산업단지 내 입주업체 현황은 기계(47%), 화학(17%) 업체와 전기·전자(8%) 등 총 207개의 업체가 입주하여 있다.³²⁾

3.3. 금속류 오염도 평가

저서생태계에 대한 위해성 평가 및 금속류 농도를 취합하여 지점의 종합적인 오염도를 평가하기 위해 국내 하천퇴적물 mPEL_kQ와 국외 기준 PLI를 사용하여 갑천 조사지점의 종합적인 오염도를 평가하였다(Fig. 3).

mPEL_kQ 기준은 금속류 한 개라도 II등급 또는 III등급 항목을 포함하고 있으면 지점 종합평가에서 『약간 나쁨』 평가를 받는다. 이는 저서생물에 독성이 나타날 수도 있으며 독성 실험을 통해 확인이 필요한 단계로 갑천 조사지점 모두 『약간 나쁨』 이상으로 평가되었다. 또한 지수 0.34를 초과한 지점들은 우기 전 G2-R, G3-L과 G4-R 지점이며 우기 후에는 G1-R, G2-L, G2-R, G3-L, G3-R, G5-L과 G5-R 지점이다. 이 지점들은 『나쁨』 단계이며 이는 독성이 나타날 가능성이 높기 때문에 독성 실험 및 상·하류로 조사범위를 확대하여 오염원 규모를 확인하여야 한다. 우기 전 G3-R과 G4-L 지점은 Cr의 영향으로 『매우 나쁨』 단계로 나타났다. 이는 심각하고 명백하게 오염되었음을 의미하며 중장기적으로 배출시설 및 공공수역 관리가 필요한 단계이다. PLI는 모든 지점이 기준 1을 초과하여 인위적 오염이 있는 것으로 나타났으며 특히 G2-R과 G4-L 지점의 우기 전·후 평균이 높게 나타났다.

인위적인 오염도를 평가하기 위해 농축계수 (Enrichment Factor, EF)와 금속류의 농축 정도를 세부적으로 평가하기 위해 농집지수(Index of Geoaccumulation, I_{geo}) 두 가지 방법으로 각각의 지점별 항목들을 평가하였다(Table 5)(Fig. 4).

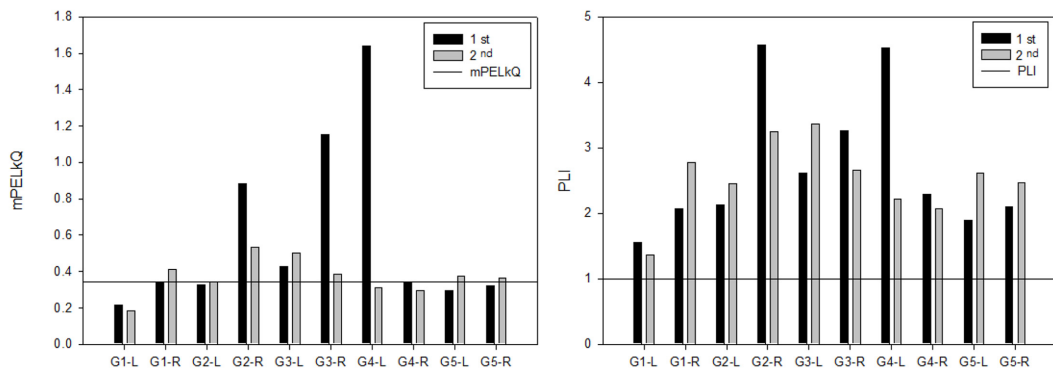


Fig. 3. Spatial distribution of mean PELK quotient (mPEL_kQ) and pollution load index (PLI) in surface sediments of the study area.

Table 5. Spatial distribution of Enrichment factor(EF) of metals in surface sediments of the study area.

	site	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	As	Cd	Hg
1 st	G1-L	3.14	3.28	1.39	0.49	0.31	1.04	6.17	2.55
	G1-R	3.46	7.05	3.86	0.90	1.03	1.61	14.24	12.81
	G2-L	3.91	8.38	4.30	0.80	0.58	1.65	12.59	6.95
	G2-R	10.09	12.27	6.21	3.84	0.86	3.70	10.98	36.76
	G3-L	7.19	8.19	3.97	1.19	0.76	1.24	10.66	11.83
	G3-R	4.58	5.38	3.16	18.00	0.68	1.34	10.83	7.71
	G4-L	5.31	6.07	3.58	20.64	0.80	1.55	8.18	24.98
	G4-R	3.62	6.23	2.35	0.79	0.91	1.23	7.98	4.69
	G5-L	5.15	6.56	2.83	0.74	0.91	1.20	11.74	5.93
	G5-R	3.93	8.32	4.46	1.00	0.80	1.26	8.84	5.08
	site	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	As	Cd	Hg
2 nd	G1-L	1.64	2.02	0.42	0.36	0.26	0.93	2.92	2.17
	G1-R	2.76	5.51	2.88	0.85	0.75	2.15	8.56	8.67
	G2-L	2.95	5.38	2.22	0.59	0.47	2.30	7.94	4.15
	G2-R	7.07	4.25	2.70	1.59	0.53	3.40	4.08	10.41
	G3-L	3.57	7.76	3.70	1.29	1.07	2.64	9.94	6.08
	G3-R	3.07	6.68	2.68	0.80	0.62	1.95	9.69	4.52
	G4-L	3.02	5.85	1.87	0.82	0.62	2.55	7.02	3.81
	G4-R	3.28	5.05	2.15	0.73	0.34	1.69	2.35	3.04
	G5-L	2.89	5.46	2.26	0.70	0.37	2.03	6.90	6.50
	G5-R	2.62	4.22	1.86	0.82	0.45	2.14	5.02	8.29

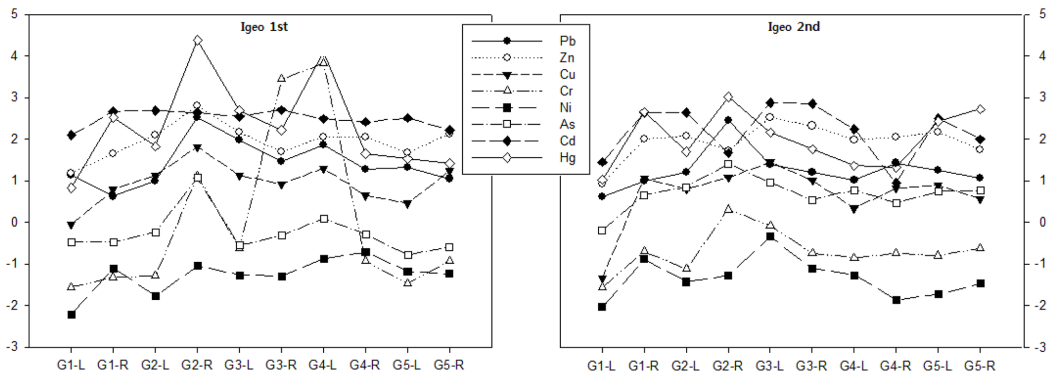


Fig. 4. Geoaccumulation index (Igeo) of metals in surface sediments of the study area.

먼저 농축계수를 통한 오염도 평가결과에서는 우기 전 G2-R 지점에서 Hg이 Very severe enrichment 상태로 나타났으며 Pb, Zn과 Cd 역시 Severe enrichment 상태인 것으로 평가되었다. 전체 지점에서 Cd과 G1-L 제외한 지점의 Zn 그리고 G1-L과 G4-R를 제외한 지점의 Hg이 Moderately severe enrichment 이상으로 평가되었다. 특히 Cd의 경우 G1-R, G2, G3 그리고 G5-L 지점이, Hg은 G1-R, G3-L과 G4-L 지점이 Severe enrichment 상태인 것으로 평가되었다. 또

한 Cr은 G3-R과 G4-L 두 지점에서 Severe enrichment 로 평가되었다. 우기 후에는 Severe enrichment 상태로 평가된 지점은 G2-R 지점 외에는 없었으며 As를 제외한 나머지 금속류는 우기 전보다 대체로 유사하거나 낮은 농축계수를 보였다. Cd은 G1-L, G2-R과 G4-R 지점을 제외한 모든 지점과, Zn은 G1-L, G2-R, G5-R 지점을 제외한 모든 지점이 Moderately severe enrichment 상태인 것으로 나타났다. 또한 G1-R, G3-L과 G5 지점의 Hg 역시 Moderately severe

enrichment로 평가되었다. Cu, Cr, Ni과 As는 우기 전·후 대다수 지점에서 Minor or Moderate enrichment 상태로 평가되었다.

농집지수 평가 결과를 살펴보면 우기 전 G2-R과 G4-L 지점의 Hg이 Heavily to extremely contaminated 단계인 것으로 평가되었다. Heavily contaminated 상태로는 우기 전 G3-R과 G4-L 지점의 Cr 항목과 우기 후 G2-R 지점의 Hg으로 평가 되었다. Cd의 경우 우기 전 모든 지점이 Moderately to heavily contaminated 단계였으며 우기 후에 G1-L, G2-R과 G4-R 지점의 상태가 낮아지는 것을 확인하였다. Zn 역시 대부분 지점이 Moderately to heavily contaminated 단계였으며 Pb은 대부분 지점이 Moderately contaminated 상태였으나 G2-R 지점에서만 우기 전과 후 모두 Moderately to heavily contaminated 단계였다. Cu는 G1-L 지점을 제외한 나머지 지점들이 Class 1 또는 Class 2 상태로 나타났으며 Ni은 모든 지점이 Practically uncontaminated 상태로 평가되었다.

4. 결 론

갑천 퇴적물 오염은 라바보 이후 G1 우안에서부터 우려할 만한 수준으로 시작되어 최하류인 G5 지점보다 G2~G4 지점에서 오염도가 더 높은 것으로 확인 되었다. 또한 좌·우안의 오염도 차이가 크게 나타나 인공구조물, 환경기초시설의 위치, 수초의 발달 등에 영향을 받았을 것으로 판단되었다. 각 지점에 따라 우려되는 요인들이 달랐는데, G1 지점의 경우 상류 라바보 우안에서 10일 이상 정체되었던 하층수가 유입되어³³⁾ 우안의 오염도가 높았고 G2 지점은 우안에 위치한 대전1·2산업단지 처리수 일부가 하수처리장으로 이송되지 못하고 우수토실로 월류, 갑천으로 유입되어 G2 우안은 물론 G2 하류 갑천 우안 퇴적물 오염에 직접적이고 장기적인 원인으로 작용할 것으로 파악되었다. G3 지점은 G2 우안으로부터 이송된 오염, 하수종말처리장 방류수, 탑립돌보의 영향이 복합적으로 나타난 것으로 보이며 G4 지점은 대덕연구개발특구 내 특정수질유해물질 배출시설의 입지를 제한하고 있음에도 우기 전 조사에서 Cr과 Hg은 오염도가 매우 높아 향후 배출수 이송관로 및 업체 냉각수 등에 대한 정밀조사가 필요할 것으로 판단된다. G5 지점은 대전3·4산업단지의 영향으로 우안의 오염도가 더 클 것으로 예상했으나, 오히려 수초가 발달하여 물 흐름

이 거의 없는 좌안에서 높은 것으로 나타나 퇴적물 평가 시 지형적 특징을 반드시 함께 고찰해야 할 것으로 판단된다.

갑천의 퇴적물 입도는 우기 전·후 모두 Sand의 비율이 가장 우세하였으며 그 중 Medium sand 와 Coarse sand의 비율이 높았다. 지점별 금속류 분석 결과 G2 지점은 우안의 Cr과 Hg이 국내 기준 III등급, G3 지점 Cr의 경우 우기 전 우안에서 IV등급, G4 지점은 우기 전 좌안에서 Cr과 Hg의 오염이 매우 높아 각각 IV등급과 III등급으로 평가되었다. 지점별 종합평가 결과 우기 전 G2-R, G3-L과 G4-R 지점과 우기 후 G1-R, G2 양안, G3 양안, G5 양안이 mPEL_kQ 기준을 초과하였다. G3-R과 G4-L 지점은 Cr의 영향으로 우기 전 『매우 나쁨』 단계로 나타났다.

인위적인 오염도를 나타내는 EF 평가에서 우기 전 대부분 지점의 Hg, Zn과 Cd이 Moderately severe enrichment 이상으로 평가되었다. 특히 G2-R 지점에서 Hg은 Very Severe enrichment로 Pb, Zn과 Cd은 Severe enrichment 상태로 평가되었다. G3-R과 G4-L 지점은 우기 전 Cr이 Severe enrichment 상태로 나타났다. I_{geo} 평가 결과 역시 Hg, Zn과 Cd 대부분의 지점이 Moderately to heavily contaminated 상태 혹은 이상인 지점도 있는 것으로 나타났다. Cr은 우기 전 조사에서 G3-R과 G4-L 지점에서 EF(Severe enrichment)와 I_{geo}(Heavily contaminated) 모두 높았다. 즉 Hg, Zn, Cd과 몇 지점의 Cr이 다른 항목에 비해 인위적인 오염이 크게 높은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다. (NIER-2018-03-03-002)

참고문헌

1. 이종태, 이진일, 남윤규, 한규홍, “금강 수계 농업용수의 수질”, *한국환경농학회지*, **1999**, 18, 2, 122-125.
2. 배영주, “금강 수계 하천의 수질특성 및 수질에 대한 토지이용도 영향”, *충남대학교 대학원 석사논문*, **2009**.
3. 김지일, 최지용, 안광국, “청주지역의 도시하천인 미호천에서 시공간적 수질변이 특성 및 유입지천의 영향”, *한국환경과학회지*, **2014**, 23, 3, 433-445.
4. 김두일, “도시하천에 대한 인위적 간섭 특성 및 하천 관리 방안”, *한국지역지리학회지*, **2008**, 14, 1, 1~18.

5. 박정수, 권영지, 임봉수, “공공하수처리시설 부근 갑천 하류부의 수질 특성 및 개선방안”, *Journal of the Institute of Industrial Technology*, **2017**, 28, 2, 41-50.
6. 이기영, 서동일, “대전 갑천의 수질변화 경향 및 주요 수질 영향 인자 분석”, *대한환경공학회지*, **2014**, 37, 9, 517-525.
7. 주연연, 임봉수, “차집관로와 하수처리시설의 설치에 따른 도시하천의 수질변화 특성”, *대한환경공학회지*, **2004**, 36, 12, 813-820.
8. 윤혜영, “금강수질에 미치는 대전갑천의 영향 분석 및 관리방안에 관한 연구”, 충남대학교 대학원 석사논문, **2015**.
9. 김도희, “수 저층의 저질 조사 (I)”, *해양환경안전학회지*, **2007**, 13, 1, 93-102.
10. 이준기, 이태윤, “하천퇴적물의 오염도 분석 및 퇴적물 항목간의 상관관계에 관한 연구”, *한국지반환경공학회지*, **2009**, 342-347.
11. 김익재, 황상일, 김호정, “하천·호소 퇴적물 관리방안 및 준설물질 활용방안”, *수시정책보고서, 한국환경정책평가연구원*, **2010**.
12. 안광국, “갑천 중심의 지방하천 수생태계 훼손실태 진단 및 생태복원 방안”, 대전녹색환경지원센터, **2017**.
13. 양윤모, 심무준, 오다연, 간중범, 이준배, 홍선화, 이수형, 박상진, “금강에서 보 설치 후 퇴적물 중금속 분포”, *한국환경농학회지*, **2015**, 34, 32-36.
14. 양윤모, 오다연, 김대현, 이대희, 길기범, 조윤해, 이혜리, 천세억, 채민희, “금강수계 보 구간 표층퇴적물 오염도 평가”, *한국환경분석학회지*, **2018**, 21, 3, 125-138.
15. 임봉수, 박희동, 최유정, 오수현, “갑천하류부에서 퇴적물의 오염실태조사”, *Journal of the Institute of Industrial Technology*, **2002**, 13, 1, 57-63.
16. 정찬호, 이상구, “대전지역 주요하천 하상퇴적물의 물리화학적 특성 및 중금속 분포”, *한국광물학회지*, **2006**, 19, 4, 259-264.
17. Y. M. Yang, M. H. Chae, S. O. Cheon, and M. J. Shim, “Geochemical properties and pollution assessment of heavy metals in the sediments of Daechug Lake, Korea”, *Environmental Quality Management*, **2018**, 27, 4, 163-171.
18. 환경부, “수질오염공정시험기준 - 퇴적물(환경부고시 제 2012-99호)”, **2011**.
19. 국립환경과학원 “하천·호소 퇴적물 오염평가 기준”, 2015, 국립환경과학원 예규 제 **2015**. 687.
20. US Environmental protection agency, <http://www.epa.gov>, November 2013.
21. Canadian Council of Ministers of the Environmental Protection (CCME), <http://www.CCME.ca>, 2018.
22. Guidelines for Identifying, Assessing and Managing Contaminated Sediments in Ontario, <http://www.ontario.ca>, 2018.
23. G. Brich, “A scheme for assessing human impacts on coastal aquatic environments using sediment. In: Woodcoffe, C.D., Furness, R.A.(Eds.), Coastal GIS 2003.” *Wollongong University Papers in Center for Maritime Policy*, Australia, **2003**, 14.
24. G. Müller, “Schwermetalle in den sediments des RhiensVeränderungenseit 1971”, *Umschan*, **1979**, 79, 778-783.
25. D. L. Tomlinson, J. G. Wilson, C. R. Harris, and D. W. Jeffrey, “Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index”, *Helgolandermeeresuntersuchungen*, **1980**, 33, 566-575.
26. R. L. Rudnick, S. Gao, “Composition of the Continental crust, The Crust”, *AmsterdamElsevier*, **2003**, 1-70.
27. J. A. Udden, “Mechanical composition of clastic sediment”, *Bulletin of the Geological Society of America*, **1914**, 25, 1, 655-744.
28. C. K. Wentworth, “A scale of grade and class terms for clastic sediments”, *Thejournal of geology*, **1922**, 30, 5, 377-392.
29. 신성천, “충청남도 지구화학 지도책 : 한국 지구화학 지도책(1:700,00) 제3집”, *한국지질자원연구원*, **2001**.
30. 대전산업단지관리공단, www.djic.or.kr, 2018년.
31. E. Merian, “Metals and their compounds in the environment. Occurrence”, Analysis and Biological Relevance. UCH, Weintrein-New York, **1991**.
32. 대덕산업단지관리공단, www.dicox.or.kr, 2019년.
33. 이재근, “갑천유역의배출부하량 적정화 방안”, 기본연구 보고서, 대전세종연구원, **2016**.