

금강수계 보구간 표층퇴적물 오염도 평가

양윤모 · 오다연 · 김대현 · 이대희 · 길기범 · 조윤해 · 이혜리 · 천세익 · 채민희[†]

국립환경과학원 금강물환경연구소

Pollution Assessment in Surface Sediments of Weir Constructed Sections in Geum River

Yunmo Yang, Dayeon Oh, Daehyun Kim, Daehee Lee, Gibeom Kil, Yoonhae Cho,
Hyeri Lee, Seok Cheon, and Minhee Chae[†]

Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

Received May 25, 2018/Revised June 25, 2018/Accepted July 5, 2018

To evaluate the overall level of pollution in surface sediments of weir-constructed sections in the Geum River, samples were collected at nine sites four times during the period from 2015 to 2016 (a total of 36 samples). Particle size distribution, organic matter, nutrients, and heavy metals were analyzed. The surface sediments were composed mainly of sand, and the sediment types were S (sand), zS (silty sand), and sZ (sandy silt). The concentrations of IL, T-N, and T-P were lower than the values of the class IV sediment pollution evaluation level (National Institute of Environmental Research standards). The results showed that the research sites were not severely or apparently not polluted by organic matter and nutrients. The pollution assessment and ecological risk of heavy metals were evaluated using various geochemical assessment indices (I_{geo} , EF, $mPEL_kQ$, and PLI). Our results indicate that there was anthropogenic pollution in the study area, moderately polluted especially by Cd and Zn.

Key words: Geum River, Organic matter, Heavy metal, Sediment, Geochemical assessment index

1. 서 론

하천 퇴적물은 수리학적 특성에 따른 유량과 유속 그리고 주변을 구성하고 있는 지질의 성분 등에 의해 공급과 공간적 변화 등을 반영하여 유속이 저하되는 구간부터 입자의 크기 순으로 순차적으로 퇴적된다.¹⁻⁴ 현재 우리나라는 4대강 사업으로 건설된 보의 영향을 받아 형성된 정체구간으로 인해 유로의 방향이 변화되었고,^{4,5} 지역경제 활성화를 위해 조성된 산업단지가 증가하면서 이와 인접한 하천은 인위적인 오염원 등의 유입으로 인해 고농도의 퇴적물이 쌓일 수 있는 환경에 있다.

퇴적물에 존재하는 금속류와 영양염류 등은 산화환원 전위, 유기탄소, pH, 용존산소 등의 조건에 따라 수층으

로 용출되어 저서생물체에 영향을 주거나 다시 퇴적물과 흡착하는 과정을 반복하면서 수질 및 수생태계에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁶⁻⁹ 따라서 수질과 수생태계 상태를 파악하기 위해 퇴적물의 오염물질 농도를 분석하는 것은 평가방법 중 하나라고 볼 수 있다.^{10,11}

최근 금강은 심각한 가뭄과 보 건설로 인한 유량과 유속 감소 등으로 일부 구간에서 정체수역이 형성되면서 극심한 환경변화를 겪고 있다. 이러한 변화에 대해 수질 및 수생태계에 관한 연구는 활발하게 진행되고 있으나 오염원의 최종 저장고인 하상퇴적물에 대한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다.

지금까지 금강 하상 퇴적물에 대한 연구는¹²⁻¹⁸ 유기물 및 금속류 분포 특성, 상관성 등을 중심으로 수행되

[†]To whom correspondence should be addressed.

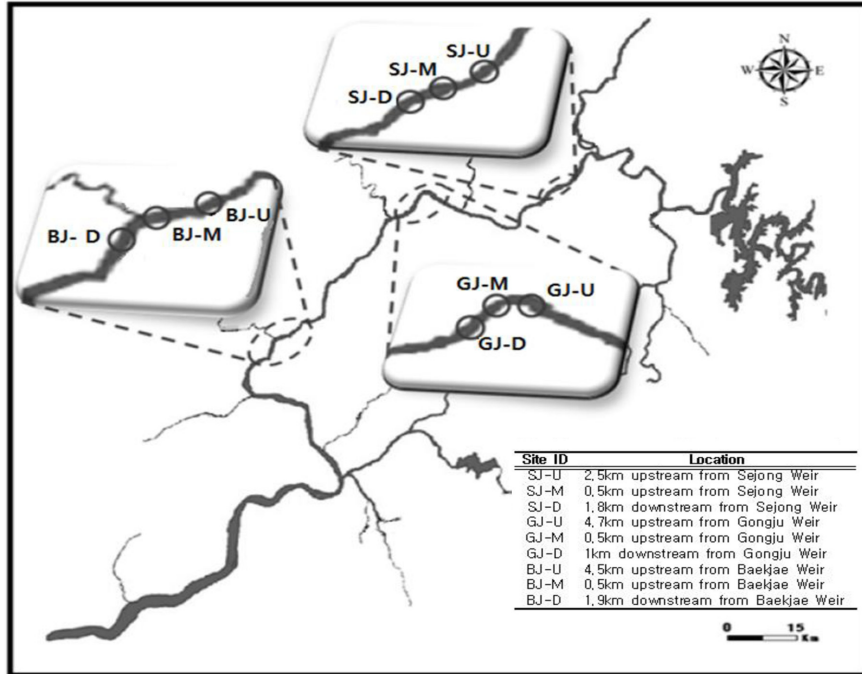


Fig. 1. Sampling sites.

어져 왔으나 2011년 이전에는 담수퇴적물에 대한 공정 시험기준이 마련되지 않았을 뿐 아니라 제정 이후에도 연구자에 따라 적용한 분석법이 상이하여 과거 연구자료와의 직접 비교는 어려운 상황이다.

최근 국내에서는 담수퇴적물 분석법이 제정(Korean ministry of Environment, 2011)되었고,¹⁹⁾ 하천과 호소로 나누어 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준(National Institute of Environmental Research, 2015)을 마련하여 금속류 8종에 대해서는 4단계 평가기준을 설정하였으나 여전히 유기물 및 영양염류 3종은 IV등급 여부만 판단하는 2단계 평가 기준만 제시되고 있어 명확한 담수퇴적물 오염평가기준이 필요한 상황이다.²⁰⁾

이에 본 연구에서는 금강 수계에 설치된 3개 보 구간 하천 퇴적물에 대한 유기물·영양염류와 금속류의 농도 분포를 조사하고, 그 결과를 국내의 기준에 따라 항목별, 지점별로 종합적으로 평가하였다. 향후 본 연구결과를 하천퇴적물이 금강수계의 수질과 수생태계에 미치는 영향을 평가하고, 오염물질의 오염원을 규명하는 등 종합적인 물환경 평가가 이루어지는데 중요한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취

금강 분류에 설치된 세종보, 공주보, 백제보 각 3개 보 구간 총 9개 지점에 대하여 하천 표층퇴적물을 2015년부터 2016년까지 총 4회 조사하였다(Fig. 1).

시료 채취는 수질오염공정시험기준(ES 04160.1, ES 04160.2; 2012)에 따라 포나 그래프를 이용하여 채취지점을 횡단면 5개소 이상에서 채취하여 골고루 혼합하였다. 혼합시료와 간극수를 이용하여 항목에 따라 현장에서 10 메쉬(체눈 크기 2 mm)와 100 메쉬(체눈 크기 0.15 mm)로 체질하고, 용기에 구분하여 담은 후 4°C 이하에서 냉장 운반·보관하였다.

2.2. 일반 항목 분석 방법

일반항목 중 함수율, 완전연소가능량, 입도, 화학적산소요구량(COD) 분석용 시료는 2 mm 이하의 시료를 3000 rpm으로 20분간 원심분리한 다음 상층액을 버리고 잔유물을 10분간 혼합하여 분석하였다. 입도분석의 경우 퇴적물오염공정시험방법(ES 04853.1)에 따라 전처리 후 입도분석기(Microtrac S3500 Extended wel,

Microtrac)를 이용하였다. 입자의 크기에 따라 2 mm 미만~0.063 mm 이상은 sand, 0.063 mm 미만~0.004 mm 이상은 silt, 0.004 mm 미만은 clay로 구분하였다. 화학적산소요구량(COD)은 망간법으로 분석하였으며(ES 04854.1), 함수율을 함께 측정하여 계산시 함수율을 보정하였다. 완전연소가능량은 110°C에서 건조시킨 시료를 ES 04852.1에 따라 5 g 이상 사용하여 분석하였다.

총유기탄소(TOC), 총질소(T-N), 총인(T-P), 수용성인(SRP)은 2 mm 이하의 시료를 풍건 후 분쇄·체질(체눈 크기 0.1 mm)하여 통과한 시료를 모아 분석용 시료로 사용하였다. 총유기탄소(TOC), 총질소(T-N)는 원소분석법(ES 04861.1, ES 04862.1)으로 시험하였으며 원소분석기는 Elementar사의 Vario Micro Cube CHNS 모델로 CN 모드로 측정하였다. 총인(T-P)과 수용성인(SRP)은 ES 04863.1과 ES 04864.1에 따라 아스코르빈산으로 환원하여 이 용액을 10 mm 셀에 옮겨 880 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다.

2.3. 금속류 항목 분석 방법

금속류 항목은 ES 04870~ES 04880에 따라 분석하였으며 0.15 mm 미만의 시료를 풍건 건조하여 분쇄와 체질(체눈 크기 0.063 mm)을 반복하여 시료 전량이 체를 빠져나오도록 한 것을 분석용 시료로 사용하였다. Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Li, Al은 유도결합플라즈마 원자발광분

광법에 따라 Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy(ICP-AES, Agilent 700 series)로 측정하였으며 As와 Cd은 유도결합플라즈마 질량분석법에 따라 Inductively coupled plasma mass spectroscopy(ICP-MS, Agilent 7900)을 이용하였다. Hg은 ES 04875.1에 따라 Teledyne instruments사의 Hydra C로 분석하였다.

2.4. 금속류 오염도 평가 방법

퇴적물 중의 금속류 오염도와 이로 인한 저서생물에 유해성 정도를 평가하고자 미국환경보호청(U.S. EPA) 오투호 담수퇴적물 분류기준, 캐나다 연방정부 환경자료회의(CCME)에서 정한 담수퇴적물에 대한 잠정퇴적물권고기준(Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life), 캐나다 온타리오주의 담수퇴적물 기준과 국내 하천 퇴적물 독성농도 DB를 통해 도출한 국내 「하천·호소 퇴적물의 오염평가 기준」 예규 제 2015-687호를 사용하여 검토하였다.^{20,28-30} 항목별 기준은 Table 1과 같다.

퇴적물의 오염 또는 인위적인 영향을 파악하기 위해 국내 하천 퇴적물 오염평가 기준(mPEL_{RQ})과 농축계수(Enrichment Factor, EF), 농집지수(Index of Geoaccumulation, Igeo), 오염부하계수(Pollution Load Index, PLI) 등 4가지 평가방법을 이용하였다.²⁰⁻²³

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

Item	U.S. EPA sediment quality standards			Canada				NIER sediment pollution evaluation standards			
	Non polluted	Moderately polluted	Heavily polluted	ISQG	PEL	LEL	SEL	Class I	Class II	Class III	Class IV
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.

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

퇴적물 내의 존재하는 금속류의 종합적인 오염도 및 위해성을 평가하기 위해 국내 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준에 따라 mean PEL_k quotient(mPEL_kQ)를 산정하였다(Table 2, Table 3).

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

여기서, EC_i는 금속류 항목별 농도, PEL_{ki}는 금속류

항목별 II등급 기준치이다.

농축계수(Enrichment Factor, EF)는 퇴적물 내에 보존성원소로 존재하는 Al으로 시료와 지각에 함유된 금속류의 농도를 보정한 뒤 시료와 지각의 농도비를 아래와 같은 식으로 산정한 방법이다.²¹⁾

$$EF = \frac{(metal/Al)_{Sample}}{(metal/Al)_{Crust}}$$

본 연구에서 쓰인 금속류의 지각 배경농도는 Rudnick and Gao(2003)에 보고된 값을 이용하였다.²⁴⁾ 여기서, (metal/Al)_{Sample}은 본 연구의 금속류 농도와 Al과의 농도비를 의미하며 (metal/Al)_{Crust}는 지각의 각 농도와 Al과의 농도 비를 의미한다.

농집지수(Index of Geoaccumulation, I_{geo})는 아래와 같이 계산하며 각 미량금속에 대하여 오염도를 7단계로 구별하였다(Table 3).²²⁾

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

C_n은 각 금속의 농도이고, 계수 1.5는 지각 기원의 영향을 보정하기 위해 사용되며 B_n은 각 금속 원소들의 배경농도 값을 의미한다.

오염부하계수(Pollution Load Index, PLI)는 해당되는 모든 금속 항목을 포함하여 전체적인 오염도를 평가하며 1을 기준으로 인위적 오염 여부를 판단하는데 주로

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%)

사용되고 있으며(Table 3) 그 식은 다음과 같다.²³⁾

$$PLI = (C1/B1 \times C2/B2 \dots C_n/B_n)^{1/n}$$

2.5. 상관관계 분석

측정된 자료는 IBM SPSS statistics version 20 프로그램의 상관분석 중 이변량 상관분석을 이용하여 피어슨 상관계수를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 입도 분포 특성

입도는 퇴적지역의 수리역학적 특성을 반영하는 것으로 알려져 있다.^{25,26)} 연구지역 내 표층퇴적물 중 sand, silt, clay의 함량(평균±표준편차)은 각각 34.9~97.9% (86.3±13.8), 2.1~57.3%(13.0±12.2), 0.0~7.8%(0.7±1.6)범위로 조사되었으며 GJ-M 지점을 제외한 전 지점에서 sand > silt > clay 순으로 나타나 sand가 가장 우세하게 분포하는 것으로 조사되었다.

퇴적물의 Mz(mean grain size)는 0.6~3.1 Φ(평균 1.4±0.5)범위였으며 Folk(1968) 분류법에 따라 연구지역 내 표층퇴적물의 유형을 살펴본 결과 사(S, sand), 실트질사(zS, silty sand), 사질실트(sZ, sandy silt) 등 3개의 퇴적물 유형으로 구분되었다(Table 4).²⁷⁾

방류 직전 보 상류지점에서 퇴적물이 쌓이는 현상은 공주보 구간에서 가장 두드러지게 나타났다. 세종보 구간에서는 오히려 보 하류 지점의 clay 비율이 증가했으며 백제보 구간에서는 상, 하류 지점간의 시간적 공간적 변화가 뚜렷하게 보이지 않았다. 이러한 결과는 보에 설치된 수문의 형태, 개방주기, 체류시간의 변화 등의 복합적 원인이 작용한 것으로 추정되며 향후 지속적인 연구를 통해 검증이 필요할 것으로 보인다.

3.2. 유기물 함량 및 오염도 평가

퇴적물 중 유기물 및 영양염류 농도의 오염정도를 평가하기 위해 미국 오대호 퇴적물 분류기준, 캐나다 온타리오주 환경부 담수퇴적물 환경기준과 국립환경과학원에서 제정한 하천·호소 퇴적물 평가기준을 이용하였다(Table 5).^{20,22,30)}

연구지역의 IL(Ignition Loss)은 세종보 > 공주보 > 백제보 순이었으며 조사기간 중 전 지점에서 최대 2.8% 이하로 나타나 매우 낮은 것으로 조사되었다. 보 구간별로 IL 농도를(평균±표준편차) 살펴보면 세종보 구간은

0.77~2.80%(1.42±0.54)이었으며 하류 지점인 SJ-D지점에서 가장 높은 농도를 보였다. 공주보 구간은 0.71~2.15%(1.13±0.49)으로 GJ-M지점에서 가장 농도가 높았다. 백제보 구간은 0.70~1.36%(1.11±0.19)으로 상·하류 지점 간 변화가 크지 않았다. 이러한 결과를 국립환경과학원 기준으로 평가해보면 전 지점이 13%를 초과하지 않아 IL에 의한 『심각하고 명백한 오염』은 없는 것으로 판단할 수 있다. 보다 세부적으로 오염 단계를 제시하고 있는 U.S. EPA 기준에 의하면 완전연소가능량이 5% 미만일 경우 오염되지 않은 퇴적물로 평가하고 있기 때문에 금강수계 보 설치구간 표층퇴적물의 유기물 오염은 비오염상태로 판단할 수 있다.

퇴적물의 또 다른 유기물 지표인 COD 농도도 IL과 동일하게 세종보 > 공주보 > 백제보 순으로 조사되었다. 구간별 농도를(평균±표준편차) 살펴보면 세종보 구간은 1,100~6,200 mg/kg(2,642±1,324)로 2016년 1차 조사시 SJ-D지점에서 가장 높은 농도를 보였다. 공주보 구간은 500~5,400 mg/kg(1,817±1,486)로 2015년 1차 조사 GJ-M지점에서 최대값을 나타내었다. 백제보 구간은 600~2,622 mg/kg(1,592±544) 범위로 최대값은 2016년 1차 조사 BJ-M지점에서 나타났다. U.S. EPA 담수퇴적물 분류기준에 따라 평가해보면 COD 농도가 40,000 mg/kg 미만일 경우 비오염으로 규정하고 있어 금강수계 보 설치구간의 유기물 오염 상태는 non polluted 상태로 판단된다(Table 6).

퇴적물의 난분해성유기물질 오염정도를 알 수 있는 TOC 농도도 IL, COD 농도 분포와 동일하게 세종보 > 공주보 > 백제보 순이었다. 세종보는 0.27~1.41%(0.59±0.28), 공주보는 0.18~1.16%(0.45±0.29), 백제보는 0.10~0.79%(0.39±0.18)로 2016년 1차 조사시 각각 SJ-D, GJ-M, BJ-M 지점에서 최대 농도를 보였다. 특히 SJ-D와 GJ-M 지점의 경우 캐나다 온타리오주에서 설정한 담수퇴적물 환경기준 중 LEL(Lowest Effect Level) 기준 농도를 초과하여 퇴적물에 서식하는 대다수의 저서생물에 악영향을 주지 않는 오염수준을 초과하는 것으로 평가되었다.

T-P의 경우 세종보 구간은 308~884 mg/kg(533±165), 공주보 구간은 234~657 mg/kg(398±137), 백제보 구간은 138~518 mg/kg(368±112) 범위로 조사되었다. 국내 퇴적물 평가기준에 따라 전 지점에서 1,600 mg/kg 미만으로 나타나 T-P에 의한 『심각하고 명백한 오염』은 없는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 U.S. EPA 기준에 따르면 모든 조사에서 non polluted로 평가될 수

Table 4. Sediment composition, mean grain size, and sediment type of surface sediments in the study area (S = sand, zS = silty sand, sZ = sandy silt)

Site	Sediment composition (%)	Mean (Φ)	Sediment type	
SJ	U		1.1	S
			1.4	S
			1.3	S
			1.3	zS
	M		1.1	S
			1.9	zS
			1.1	S
			1.2	zS
	D		0.6	zS
			1.3	zS
			1.1	zS
			1.4	zS
GJ	U		1.3	zS
			1.8	zS
			1.1	S
			1.4	S
	M		2.6	sZ
			3.1	sZ
			1.3	zS
			1.6	zS
	D		0.6	S
			1.3	S
			1.1	S
			1.4	S
BJ	U		1.2	S
			1.8	S
			1.3	S
			1.2	S
	M		1.3	S
			1.5	S
			1.2	S
			0.7	S
	D		1.7	S
			1.6	zS
			0.9	S
			1.2	zS

Table 5. Sediment quality standards of U.S. EPA, Sediment quality guidelines of Ontario, and Sediment pollution evaluation standards of NIER

Item (mg/kg)	US EPA			Ontario		NIER
	Non polluted	Moderately polluted	Heavily polluted	LEL	SEL	Class IV: Severe apparent pollution
IL (%)	< 5	5~8	> 8			> 13
COD	< 40,000	40,000~80,000	> 80,000			
TOC (%)				1	10	
TN (US EPA : TKN)	< 1,000	1,000~2,000	> 2,000			> 5,600
TP	< 420	420~650	> 650			> 1,600

Table 6. Monthly variation of average retention time (days) in weirs of the Geum River (Jul.~Sep., 2015~2016)

	Sejong weir		Gongju weir		Baekjae weir	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Jul.	0.7	0.2	1.7	0.5	2.3	0.7
Aug.	1.1	1.0	2.7	2.5	4.1	3.4
Sept.	1.8	1.0	4.4	2.5	6.9	3.2

있는 지점은 GJ-D지점으로만 나타났다. 2015년 1차 조사에서 non polluted 단계는 2개 지점(SJ-U, GJ-D), 420~650 mg/kg 범위로 moderately polluted 단계는 6개 지점이었고, GJ-M지점은 650 mg/kg을 초과하여 heavily polluted 단계로 나타났다. 2015년 2차에는 non polluted 단계 4개 지점(GJ-D, BJ 전 지점), moderately polluted 단계 4개 지점(SJ, GJ 상류구간)이었고, SJ-D지점은 650 mg/kg을 초과하여 heavily polluted 단계로 나타났다. 2016년 1차 조사에서는 non polluted 단계 4개 지점(GJ-U, GJ-D, BJ-U, BJ-D), moderately polluted 단계 4개 지점(SJ-U, SJ-M, GJ-M, BJ-M)이었고, SJ-D 지점은 2015년 2차에 이어 연속해서 heavily polluted 단계로 나타났다. 2016년 2차 조사에서는 T-P 농도가 전 지점에서 크게 감소하여 SJ-D지점(moderately polluted 단계)을 제외한 나머지 지점은 non polluted 단계로 조사되었다. 유기물 및 영양염류 농도가 48~65% 수준으로 크게 감소한 것은 집중 강우(2016년 7월) 및 펄스방류 효과 분석을 위한 보 수문개방(2016년 8월)에 따른 체류시간의 급격한 감소가 원인으로 판단된다(Table 6).³¹⁾ 그러나 퇴적물에 고농도의 인이 존재할 경우 생물교란 및 재부유 등에 의해 용출됨으로써 부영양화의 원인으로 작용하고, 수생태계를 악화시키기³²⁻³⁴⁾ 때문에 T-P에 대한 근본적인 관리대책이 필요할 것으로 보인다.

SRP의 농도가 높다는 것은 퇴적물 안에 수중으로 용출될 수 있는 인이 많이 존재한다는 것을 의미한다. 조사기간 중 SRP는 1.1 mg/kg(2016-2 BJ-U)~6.5 mg/kg(2016-1 GJ-M)으로 검출되어 매우 낮은 농도로 존재

했으며 이를 T-P 대비 SRP 비율로 환산하여 보면 0.4~1.2% 범위로 매우 낮은 비율이다(Fig. 2). 따라서 연구지역 내 표층퇴적물에서 인의 존재 형태가 주로 non soluble 형태로 존재하는 것으로 판단할 수 있다.

T-N의 농도 범위는 세종보 구간은 604~1,924 mg/kg(920±329), 공주보 구간은 329~1,531 mg/kg(736±354), 백제보 구간은 286~1,121 mg/kg(629±236)으로 세종보 > 공주보 > 백제보 순으로 나타났다. 세종보 구간에서는 2016년 1차 SJ-D지점에서, 공주보 구간에서는 2016년 1차 GJ-M지점에서, 백제보 구간에서는 2016년 1차 BJ-M지점에서 최대값을 보여 모든 구간에서 2016년 상반기에 가장 높은 농도를 나타내었으나 전 지점에서 5,600 mg/kg 미만으로 검출되어 국립환경과학원 하천퇴적물 오염평가 기준에 따라 T-N에 의한 『심각하고 명백한 오염』은 없는 것으로 판단된다.

3.3. 금속류 함량 및 오염도 평가

퇴적물 중의 금속류 총량 분석 결과를 토대로 지점평가, 항목평가와 각 오염원평가를 진행하였다(Fig. 3).

대부분의 금속 항목이 세종보 > 공주보 > 백제보 순으로 상류 구간의 농도가 높은 것으로 나타났고, Cr과 As의 경우만 백제보에서 높게 나타났다(Fig. 3). 퇴적물 금속류의 오염 수준을 판단하기 위해 국내·외 하천퇴적물 오염평가 기준 및 국외 평가기준인 농축지수(I_{geo})와 농축계수(EF)를 이용하였다. 먼저 국내·외 퇴적물 기준으로 금속류 오염도를 항목별로 평가하였다. Cr과 As의 경우 전 지점에서 국내 기준 I등급으로 나타나 Cr과 As

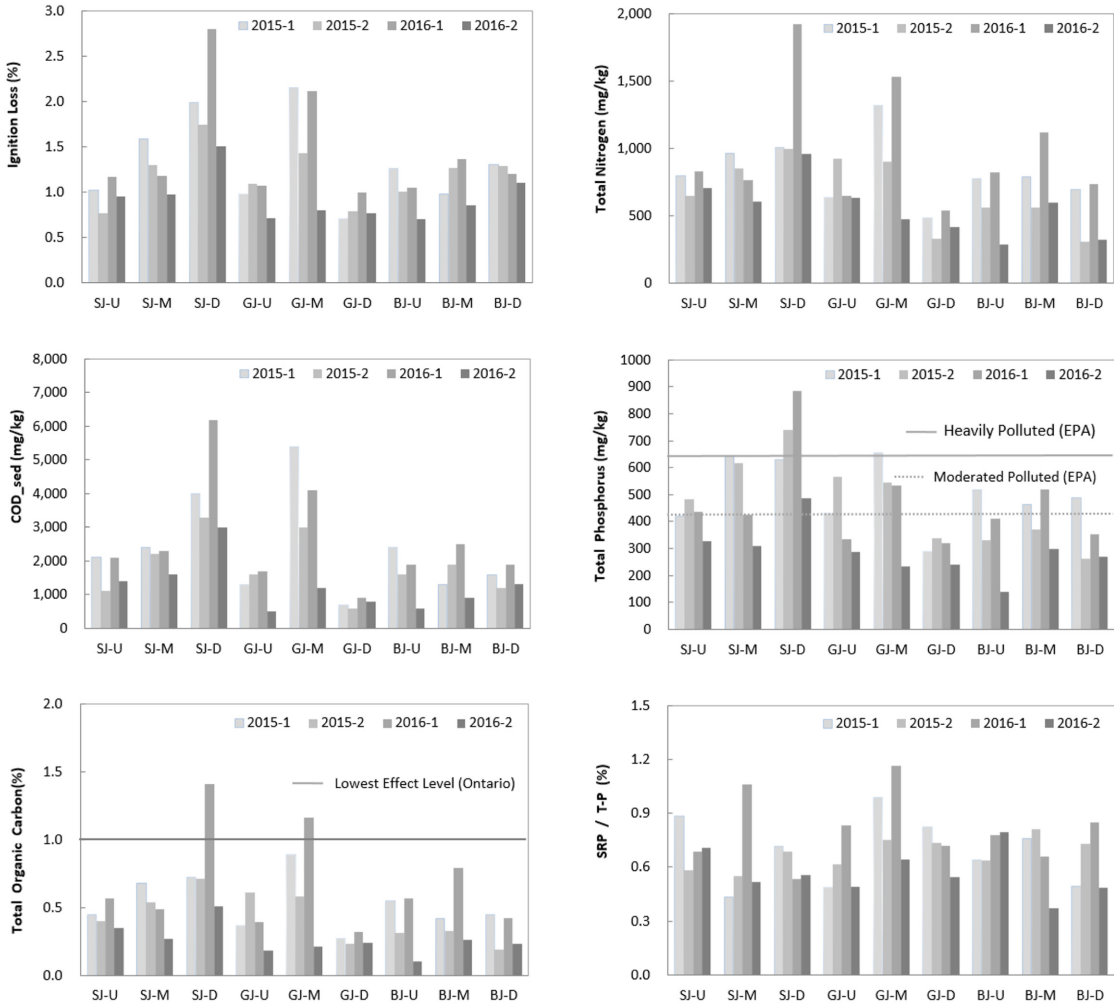


Fig. 2. Concentrations of IL, COD, TOC, T-N, T-P, and SRP/T-P in surface sediments of the study area.

로 인해 저서생물에 독성이 나타날 가능성은 거의 없는 것으로 평가되었으나, 두 금속 모두 캐나다 CCME의 ISQG와 온타리오주의 LEL 기준치를 대부분 초과하여 (Fig. 3), Cr과 As로 인해 대부분의 저서생물은 견딜 수 있지만 일부 저서생물에게 악영향을 주고 악영향이 시작될 수 있는 정도로 오염되었다고 평가되었다. Pb의 경우 2016년 1차 조사 SJ-D 지점에서 국내 기준으로 독성이 나타날 가능성이 있는 II 등급으로 평가된 것 외에는 모든 지점에서 I 등급으로 평가되었으나 U.S. EPA 오대호 기준으로는 대부분의 지점에서 moderately polluted 등급이었고 CCME의 ISQG와 온타리오주의 LEL 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 나머지 항목들은 총 36회 분석 중 Hg(29회) > Cd(23회) > Cu(20회)

> Ni(12회) 순으로 국내 기준 II 등급이 많은 것으로 나타났다. 국의 기준 평가 기준에 따르면 Hg은 2015년 1차 조사 결과 SJ-U 지점에서만 CCME의 ISQG 기준치를 초과하는 것으로 나타났고, 온타리오주 기준으로는 모든 지점에서 LEL 미만의 농도인 것으로 나타났다. Cd의 경우 U.S. EPA의 heavily polluted 단계에 해당하는 농도 수준을 보인 지점은 없었으며 2016년 2차 조사 결과 GJ-U 지점에서만 CCME의 ISQG와 온타리오주의 LEL 기준치를 초과하는 것으로 나타났고 그 외 모든 지점에서는 기준치 미만의 농도인 것으로 평가되었다. Hg과 Cd의 평가기준 농도가 국내 기준에 비해 국의 기준이 높게 설정된 반면 Ni은 좀 더 엄격하게 설정됨에 따라 전 지점에서 온타리오주의 LEL 기준치를 초

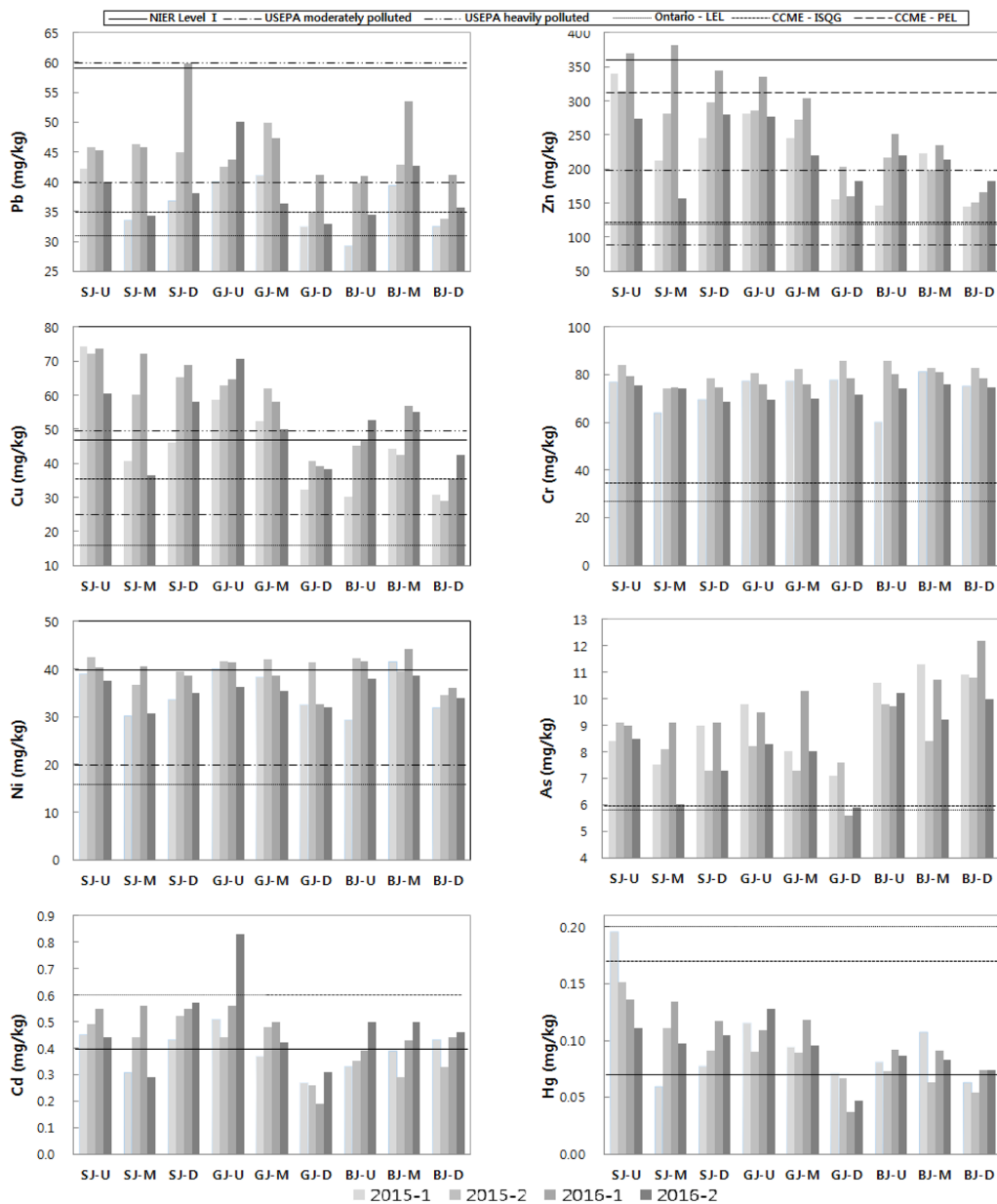


Fig. 3. Concentrations of total heavy metals in surface sediments of the study area.

과했으며 U.S. EPA 기준으로는 모든 지점에서 moderately polluted 단계의 오염이 있는 것으로 평가되었다. Cu 경우에는 국내 기준 II 등급으로 평가된 지점들이 U.S. EPA의 heavily polluted 단계인 것으로 나타났고, 전 지점에서 온타리오주의 LEL 기준치를 초과했으며 대부분의 지점에서 CCME의 ISQG 기준치 농도를 상회하는 것으로 평가되었다. Zn은 2016년 1차 조사에서 SJ-U와

SJ-M 두 지점에서만 국내 기준으로 II 등급인 것으로 평가되었으나, U.S. EPA 기준으로는 GJ-D 지점과 BJ-D 지점을 제외한 대부분의 지점에서 heavily polluted 단계인 것으로 나타났으며 모든 지점에서 CCME의 ISQG와 온타리오주의 LEL 기준치를 초과했을 뿐 아니라 2016년 1차 조사에서는 세종보 전 지점과 GJ-U 지점에서 CCME의 PEL 기준치를 초과하는 등 Zn 오염으로 인한

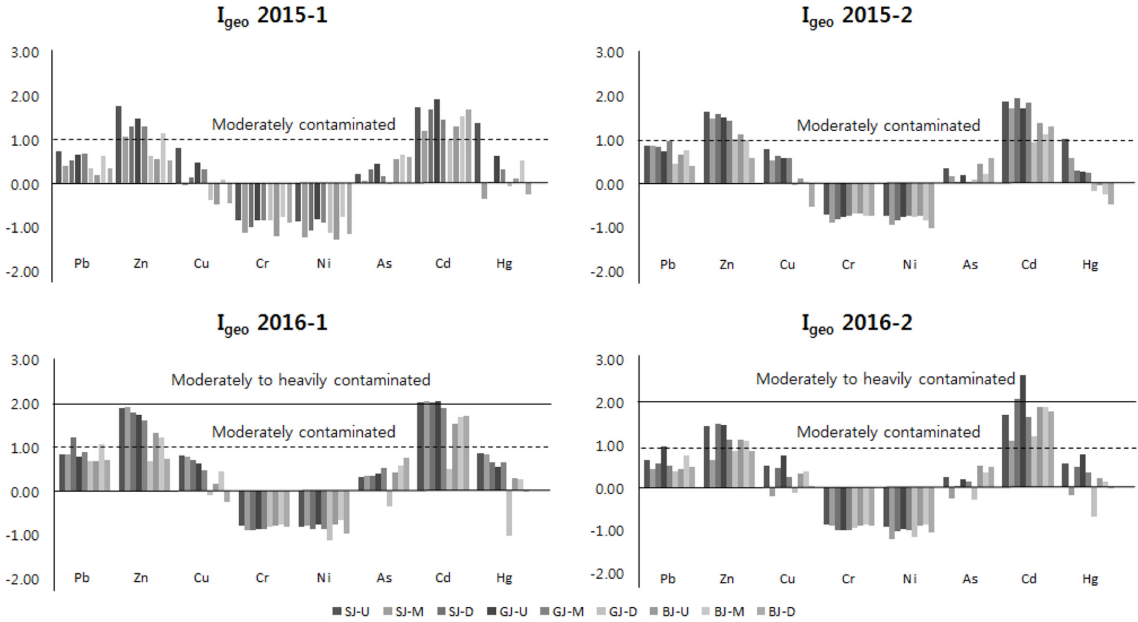


Fig. 4. Geoaccumulation index (I_{geo}) of heavy metals in surface sediments of the study area.

저서생물에 상당한 악영향이 있을 수 있는 것으로 평가되었다.

금강의 최대 지류이면서 가장 큰 오염원으로 알려진 미호천과 갑천은 각각 청주와 대전을 관통한 후 모두 세종보 상류에서 합류된다.³⁵⁾ 미호천과 갑천 유역 모두 다수의 환경기초시설 등이 산재하여 있고, 특히 갑천의 경우 금강 합류 전 500 m 위치에 폐수처리장이 위치해 있으며, 미호천 상류에는 미신고 축사가 상당수 있기 때문에 이에 따른 오염에 취약한 상황이다. Hg의 경우 미호천보다 산업단지의 영향을 많이 받는 갑천 퇴적물에 많은 양이 축적되는 것으로 보고된 바 있으며¹⁷⁾ Cd은 비료, 질소, 인산과 하·폐수 등이,^{36,37)} Cu와 Ni은 하수 슬러지, 농·축산업에 사용되는 사료와 비료 등이 인위적 오염원으로 보고되고 있어³⁸⁾ 미호천과 갑천이 금강 중~하류 하천퇴적물 금속류 오염에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

금속류의 상대적인 농축 정도를 세부적으로 알 수 있는 농집지수(Index of Geoaccumulation, I_{geo})를 항목별로 산출하여 평가하였다(Fig. 4). 그 결과, 조사시기별로 다소 변동은 있었으나 평균적으로 $Cd > Zn > Pb > As \approx Cu \approx Hg > Cr > Ni$ 순으로 나타났다. Cr과 Ni의 경우 모든 지점에서 $I_{geo} < 0$ 로 나타나 해당 항목에 의한 인위적 농축은 없는 것으로 판단되었다. 반면,

Cd과 Zn의 경우 다수의 지점에서 농집지수 1를 초과하여 moderately contaminated 단계인 것으로 나타났으며 특히 Cd의 경우 2016년 1차 조사시 SJ 전 지점과 GJ-U지점에서 농집지수 2를 초과하여 moderately to heavily contaminated 수준까지 오염이 진행된 것으로 평가되었고, 특히 SJ-D 지점과 GJ-U지점은 2016년 2차 조사에서도 계속해서 moderately to heavily contaminated 수준인 것으로 나타나 세종보 하류와 공주보 상류에서 Cd의 오염이 우려되었다. Cu와 As는 Class 0~Class 1로 비오염이거나 uncontaminated to moderately contaminated, Pb와 Hg은 Class 0~Class 2으로 대부분 uncontaminated to moderately contaminated 수준으로 평가되었다.

농축계수(Enrichment Factor, EF) 결과는 앞서 살펴본 농집지수와 유사한 양상을 보여 $Cd > Zn > Pb > Hg \approx As \approx Cu > Cr > Ni$ 순으로 산출되었다(Fig. 5). Cr과 Ni은 전 조사지점에서 농축계수 1 미만으로 나타나 인위적 오염은 진행되지 않은 것으로 나타났으나 Zn, Pb, Hg, As, Cu는 대부분의 경우 $1 < EF < 3$ 으로 minor enrichment 수준인 것으로 평가되었다. 특히 Cd의 경우 다수의 지점에서 $3 < EF < 5$ 으로 나타나 moderate enrichment 수준이었으며 2016년 2차 조사시 SJ-D, GJ-U, BJ-M 지점에서 $5 < EF < 10$ 단

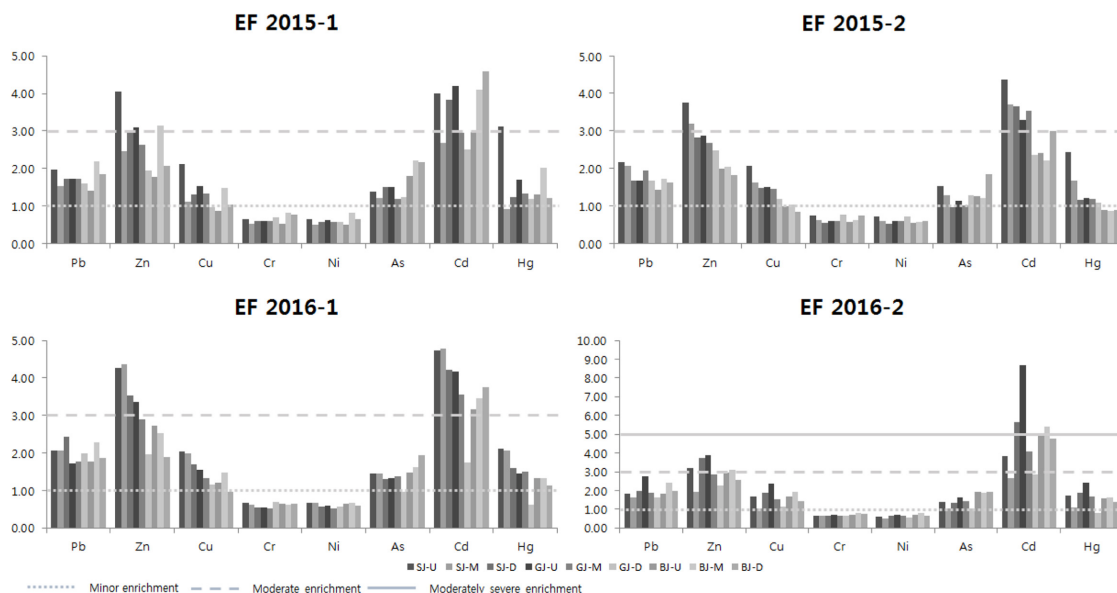


Fig. 5. Spatial distribution of enrichment factor (EF) of heavy metals in surface sediments of the study area.

계의 moderately severe enrichment 상태로 평가되었다.

퇴적물에 존재하는 금속류의 종합적인 오염도 및 저서생태계에 대한 위해성을 평가하기 위해 국내 하천 퇴적물 $mPEL_kQ$ 와 PLI 적용하여 지점별 종합 평가를 실시하였다. 연구지역의 $mPEL_kQ$ 은 전 지점 0.34 미만으로 퇴적물 오염 수준은 『보통』~『약간 나쁨』 단계인 것으로 평가되었다(Fig. 6). 다만, 앞서 Table 2에서 언급한 바와 같이 II 등급에 해당하는 농도가 1개 이상 있을 경우 『약간 나쁨』 단계로 평가되기 때문에 SJ-M(2015-1, 2016-2), BJ-M와 BJ-D(2015-2), GJ-D(2016-1, 2016-2) 지점에서만 『보통』으로 평가되었고, 그 외 지점에서는 『약간 나쁨』 단계로 나타나 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 것으로 평가되었다. PLI 기준으로 평가한 결과에서는 모든 지점이 기준 1을 초과하여 인위적 오염이 존재하는 것으로 나타났다(Fig. 6).

3.4. 항목간의 상관관계 분석

평균입도, 유기물, 금속류 등을 포함하여 상관관계를 분석하였다(Table 7). 퇴적물 내의 금속류에 영향을 주는 인자는 근원물질, 퇴적물의 입도, 유기물, 산화물 등이 있다고 알려져 있다.³⁹⁻⁴³⁾ T-P, Pb, Zn은 TOC와 $r=0.44^{**} \sim 0.87^{**}$ 범위의 유의성 있는 양의 상관성을 갖는 것으로 확인되었다. 인의 경우 생활하수에 의해 유입된

유기물질에 다량 함유된 것으로 알려져 있으며 Pb, Zn 등 금속들과 함께 유기물에 흡착하는 특성을 보인다고 보고된 바 있다.⁴⁴⁻⁴⁶⁾ 반면 금속류 농도와 평균입도와의 상관성은 확인되지 않아 다른 요인들의 작용을 받는 것으로 판단되며 앞서 언급한 갑천과 미호천 유역에 다수 존재하는 환경기초시설 등 인위적 요인의 영향을 받았을 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구는 금강분류에 설치된 세종보, 공주보, 백계보 설치구간의 퇴적물을 대상으로 입도, 유기물, 영양염류와 금속류를 분석하여 국내의 평가방법 등을 통해 오염도 평가와 상관분석을 진행하였다.

본 연구지역의 퇴적물 입도는 사(S, sand), 실트질사(zS, silty sand), 사질실트(sZ, sandy silt) 등 3개의 퇴적물 유형인 것으로 확인되었다. 유기물 및 영양염류의 오염정도를 국내 하천퇴적물 평가기준으로 볼 때 IL, T-N과 T-P 모두 4등급 미만으로 이로 인한 『심각하고 명백한 오염』은 없는 것으로 평가되었다. 그러나 TOC의 경우 SJ-D와 GJ-M 지점에서 캐나다 온타리오주에서 설정한 담수퇴적물 환경기준 중 LEL(Lowest Effect Level) 농도를 초과하여 저서생물에 영향을 줄 수 있는 정도의 유기물 오염이 있을 것으로 판단되었다. 또한 T-P

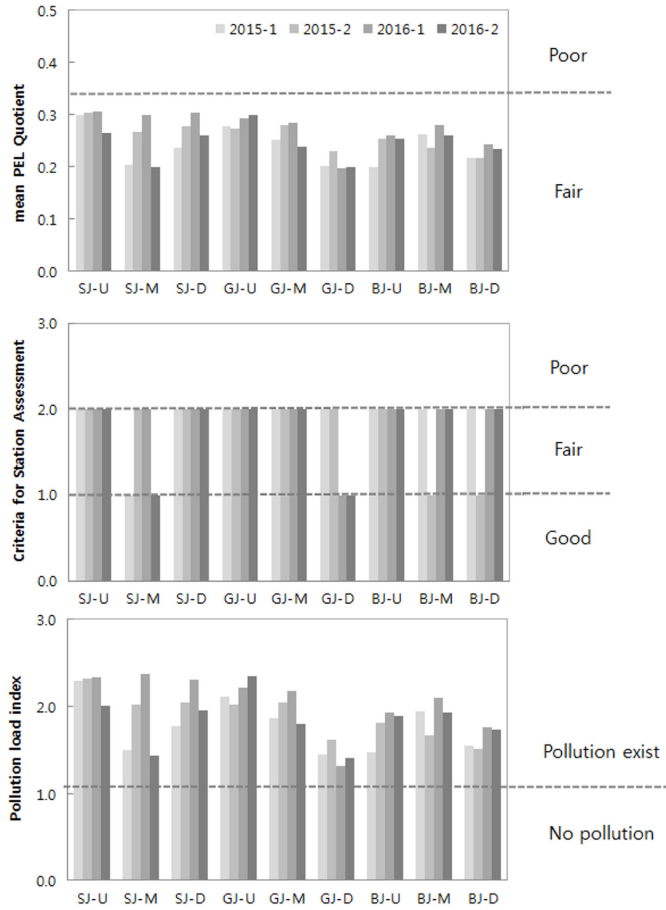


Fig. 6. Spatial distribution of mean PEL_k quotient ($mPEL_kQ$) and pollution load index (PLI) in surface sediments of the study area.

Table 7. Correlation matrix in the study area

	Mz	IL	COD	TOC	T-N	T-P	SRP	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	As	Cd	Hg
Mz	1	.148	.216	.105	.121	.198	.255	.173	.075	.124	.265	.258	-.137	.018	-.003
IL		1	.960**	.902**	.869**	.823**	.769**	.415*	.275	.143	-.161	-.008	.087	.111	.046
COD			1	.909**	.901**	.825**	.829**	.461**	.385*	.264	-.160	.086	.037	.157	.194
TOC				1	.973**	.871**	.827**	.568**	.441**	.319	-.099	.183	.105	.165	.242
TN					1	.855**	.797**	.628**	.486**	.400*	-.138	.196	.073	.275	.325
TP						1	.776**	.472**	.408*	.315	-.117	.139	-.010	.142	.216
SRP							1	.443**	.461**	.321	.067	.295	.070	.087	.308
Pb								1	.681**	.739**	.298	.631**	.061	.553**	.503**
Zn									1	.943**	.088	.606**	-.019	.660**	.816**
Cu										1	.106	.616**	-.078	.735**	.831**
Cr											1	.701**	.110	-.175	.018
Ni												1	.261	.329*	.477**
As													1	.248	.167
Cd														1	.636**
Hg															1

*Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). **Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

은 SJ-D(2015-2, 2016-1), GJ-M(2015-1) 두 지점이 U.S. EPA의 heavily polluted 기준을 초과하는 것으로 나타나 금강수계 부영양화의 원인이 될 수 있는 것으로 평가되었다.

입도와 타 항목간의 상관성은 확인되지 않았으며 T-P, Pb, Zn의 경우 TOC와 $r=0.44^{**}\sim 0.87^{**}$ 범위의 유의성 있는 양의 상관성을 갖는 것으로 나타나 금강의 최대 지류이자 오염원으로 알려진 갑천과 미호천 유역에 산재하는 환경기초시설 등 인위적 요인에 의해 금속류의 농도 변화가 있었을 것으로 판단되었다.

금속류의 경우 Pb, Zn, Cu, Cd와 Hg은 세종보 구간에서 높은 것으로 나타났으며 Cr과 As는 하류인 백제보 구간에서 높게 나타났다. 국내 하천퇴적물 오염평가 기준을 반영하여 항목별로 평가결과 총 36회 분석 중 Hg(29회) > Cd(23회) > Cu(20회) > Ni(12회) 순으로 II 등급이 많은 것으로 나타났다. 국외 오염도 기준을 반영하여 항목별로 평가한 결과 U.S. EPA 기준으로는 Zn이 GJ-D 지점과 BJ-D 지점을 제외한 대부분의 지점에서 heavily polluted 단계인 것으로 나타났으며 Cu의 경우에는 국내 기준 II 등급으로 평가된 지점들이 heavily polluted 단계인 것으로 평가되었다. Ni은 모든 지점에서 moderately polluted 단계의 오염이 있는 것으로, Pb은 대부분의 지점이 moderately polluted 단계로 나타났다. CCME 기준으로는 Zn이 2016년 1차 조사에서 세종보 전 지점과 GJ-U지점에서 PEL 기준치를 초과하였다. 또한 Zn과 Cr은 전 지점이, As, Pb과 Cu는 대부분 지점이 ISQG 기준을 초과하였다. 온타리오주 기준으로는 Zn, Cu, Ni과 Cr은 전 지점에서 LEL 기준치를 초과하였으며, As와 Pb은 대부분의 지점이 기준치를 초과하는 것으로 평가되었다. 다만, 국내 기준 II 등급이 많은 Cd과 Hg는 거의 대부분 U.S. EPA, CCME와 온타리오주의 기준치 미만으로 평가되었다.

농집지수(I_{geo})는 Zn과 Cd이 대부분 moderately contaminated 단계로 나타났으며 특히 Cd이 2016년 1차(SJ-U, SJ-M, SJ-D, GJ-U), 2016년 2차(SJ-D, GJ-U) 조사에서 moderately to heavily contaminated 단계로 나타났다. 또한 농축계수(EF) 결과에서도 Zn과 Cd이 대부분 moderate enrichment 단계였으며 2016년 2차 조사 결과 SJ-D, GJ-U, BJ-M 지점에서는 Cd이 moderately severe enrichment 상태로 평가되었다.

금속류 분석 결과를 반영하여 다양한 평가기준에 따라 지점별로 종합 평가한 결과, 평균 PEL_k 지수에 따르면 전 지점에서 $mPEL_kQ$ 0.34 미만으로 나타나 『나쁨』

단계로 평가된 지점은 없었으나 다수의 지점이 『약간 나쁨』 단계로 저서생물에 독성이 나타날 가능성은 존재하는 것으로 평가되었다. PLI 결과에서는 전 지점이 기준치 1을 초과하여 인위적 오염이 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참고문헌

1. A. D. Miall, A review of the braided river depositional environment, *Earth Science Review*, **1977**, 13, 1-62.
2. 유환수, 조석희, 고영구, 섬진강 유역의 하성 퇴적층에 관한 연구, *한국지구과학회지*, **2000**, 21, 174-187.
3. 김주용, 은고요나, 고영구, 윤석태, 오강호, 김동주, 전남 나주-영암지역의 영산강 하류 시추퇴적물의 퇴적환경과 지구화학적특성, *한국지구과학회지*, **2001**, 22, 301-316.
4. 오강호, 김주용, 고영구, 윤석태, 신상은, 박배영, 문병찬, 김해경, 광주광역시 하천의 표층퇴적물에 대한 지구화학적 특성과 오염, *한국지구과학회지*, **2003**, 24, 346-360.
5. 김신, 이권철, 김주연, 정강영, 안정민, 김형근, 이인정, 신동석, 양득석, 낙동강 본류에 분포하는 표층 퇴적물의 지화학적 특성 변화, *대한환경공학회*, **2017**, 26, 311-324.
6. 김도희, 수 저층의 저질 조사(I), *해양환경안전학회지*, **2007**, 13, 93-102.
7. 김익재, 국내 하천퇴적물의 오염현황: 문헌고찰과 관리방향, 한국환경정책평가연구원, 환경포럼, **2009**.
8. 이준기, 이태운, 하천퇴적물의 오염도 분석 및 퇴적물항목간의 상관관계에 관한 연구, *한국지반환경공학회지*, **2009**, 342-347.
9. 김익재, 황상일, 김호정, 하천·호소 퇴적물 관리방안 및 준설물질 활용방안, 한국환경정책평가연구원, 수시정책보고서, **2010**.
10. 이창희, 김은정, 호소 및 하천 오염퇴적물 관리방안, 한국정책평가연구원, **1998**.
11. 김건하, 정우혁, 최승희, 호수의 물 순환이 저지의 인 용출율에 미치는 영향, *한국물환경학회지*, **2005**, 21, 595-601.
12. 최만식, 이석훈, 이창복, 조영길, 금강 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성, *한국제4기학회*, **1996**, 10, 27-52.
13. 황동운, 류상욱, 김성길, 최옥인, 김성수, 고병설, 한국 서해남부 조간대 표층 퇴적물의 지화학적 특성, *한국수산과학회지*, **2010**, 43, 146-158.
14. 강학구, 금강유역 하천 퇴적물 중 수은, 메틸수은 및 중

- 금속 농도분포와 상관성에 관한 연구, 인하대학교 공과대학원, **2009**.
15. 박종민, 금강 수계 저질(低質) 중 중금속 분포특성, 청주대학교 대학원, **2013**.
 16. 황동운, 이인석, 최민규, 김숙양, 최희구, 퇴적물 오염기준을 이용한 금강 하구역 표층 퇴적물내 유기물 및 미량금속 오염 평가, *한국수산과학회지*, **2013**, 46, 930-940.
 17. 양운모, 심무준, 오다연, 간중범, 이준배, 홍선화, 이수형, 박상진, 금강에서 보 설치 후 퇴적물 중금속 분포, *한국환경농학회지*, **2015**, 34, 32-36.
 18. 이준배, 홍선화, 김동호, 허인에, 허유정, 간중범, 오다연, 김교영, 이영준, 이수형, 신호상, 금강수계 퇴적물 중 금속류 분석 및 상관성 조사, *한국분석과학회지*, **2014**, 27, 11-21.
 19. 환경부, 수질오염공정시험기준 - 퇴적물(환경부고시 제 2012-99호), **2012**.
 20. 국립환경과학원, “하천·호소 퇴적물 오염평가 기준”, **2015**, 국립환경과학원 예규 제 2015, 687.
 21. G. Blich, A scheme for assessing human impacts on coastal aquatic environments using sediment, *Coastal GIS*, **2003**.
 22. G. Müller, Schwermetalle in den sediments des Rhiens Veranderungen seit 1971, *Umschan*, **1979**, 79, 778-783.
 23. D. C. 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. *Helgol. Wiss. Weeresunters*, **1980**, 33, 566-575.
 24. R. L. Rudnick, and S. Gao, Composition of the Continental crust, *The Crust*, AmsterdamElsevier, **2003**, 1-70.
 25. S. Gao, and Collins, Net sediment transport patterns in ferred from grain-size trends, based upon definition of transport vector, *Sediment Geology*, **1992**, 80, 47-60.
 26. 이미경, 배우근, 엄인권, 정희수, 영일만 해역 표층퇴적물의 금속 분포 특성, *대한환경공학회지*, **2004**, 26, 543-551.
 27. R. L. Folk, Petrology of sedimentary rock, Hemphill Publishing Co., Austin TX, U.S.A., **1968**, 170.
 28. U.S. Environmental protection agency, <http://www.epa.gov>, November **2013**.
 29. Canadian Council of Ministers of the Environmental Protection (CCME), <http://www.CCME.ca>, **2018**.
 30. Guidelines for Identifying, Assessing and Managing Contaminated Sediments in Ontario, <http://www.ontario.ca>, **2018**.
 31. 금강홍수통제소, <http://www.geumriver.go.kr>, **2018**.
 32. 이진경, 안태웅, 오종민, 저수지 퇴적물로부터 인의 존재 형태가 수질에 미치는 영향에 대한 연구, *대한환경공학회지*, **2010**, 32, 840-850.
 33. 강민경, 최인영, 박지형, 최정현, 보 설치가 퇴적물 특성에 미치는 영향에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **2012**, 34, 597-603.
 34. 김범철, 김동섭, 허우명, 황길순, 최광순, 소양호에서 인의 존재 형태별 분포에 관하여, *한국수목학회*, **1995**, 28, 151-157.
 35. 이상진, 금강정비사업 이후 수환경모니터링 2차년 보고서, 충남발전연구원, **2013**.
 36. H. Zhang, and B. Shan, Historical records of heavy metal accumulation in sediments and the relationship with agricultural intensification in the Yangtze-Huaihe region, China, *Science of the Total Environment*, **2008**, 399, 113-120.
 37. N. T. Thuong, M. Yoneda, M. Ikegami and M. Takakura, Source discrimination of heavy metals in sediment and water to Lich River in Hanoi City using multivariate statistical approaches, *Environmental and Monitoring Assessment*, **2013**, 185, 8065-8075.
 38. 신성천, 충청남도 지구화학 지도책: 한국 지구화학 지도책(1:700,000) 제3집, 한국지질자원연구원, **2001**.
 39. U. Förstner, and G. T. Wittmann, Metal Pollution in the Aquatic Environment, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, **1981**, 486.
 40. W. Salomons, and U. Förstner, Metals in the Hydrocycle, Springer-Verlag, Berlin, **1984**, 349.
 41. D. C. Adriano, Trace Elements in the Terrestrial Environment, Springer-Verlag, Berlin, **1986**, 533.
 42. A. J. Horowitz, A Primer on sediment-trace element chemistry, Lewis Publishers, Chelsea (MI), **1991**, 136.
 43. D. J. Huisman, F. J. H. Vermeulen, J. Baker, A. Veldkamp, S. B. Kroonenberg, and G. T. Klaver, A geological interpretation of heavy metal concentration in soil and sediments in the southern Netherlands, *J. Geochemical. Exploration*, **1997**, 59, 163-174.
 44. H. Irving, and R. Willam, Order of stability of metal complex, *Nature*, **1948**, 162, 746-747.
 45. 오강호, 고영구, 김주용, 김해경, 최순천의 퇴적환경 및 퇴적물과 하천수의 지구화학적 특성, *한국환경과학회지*, **2002**, 11, 881-895.
 46. 오강호, 김주용, 고영구, 윤석태, 신상은, 박병연, 문병찬, 김해경, 광주광역시 하천의 표층퇴적물에 대한 지구화학적 특성과 오염, *한국지구과학회*, **2003**, 24, 346-360.