

낙동강 하류 퇴적물의 금속류 분포 및 오염도 평가

김효진, 조갑제, 이승민, 이희숙, 유상웅, 송희진, 김미희

물환경연구부 친수환경팀

Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Nakdong River Downstream

Kim Hyo-jin, Cho Gab-je, Lee Seung-min, Lee Hee-suk, Yoo Sang-woong, Song Hee-jin and
Kim Mi-hee

Recreational Water Environment Team

Abstract

This research work was focused to evaluate the contamination of heavy metals in sediments collected from Nakdong River downstream. From April to October 2021, we analyzed heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Cd and Hg), nutrients (Total nitrogen, Total phosphorus) and organic matter (Ignition Loss) in 13 sampling sites (main 5 st., tributary 4 st., estuary 4 st.). Heavy metals contents in main stream (Nm-1,2,3,4,5) and Nt-3 in tributary were at I level, which does not affect the benthos, according to the sediment pollution evaluation standard of the National Institute of Environmental Research (NIER). The Cu and As (Nt-1), Zn, Cu, As, Cd and Hg (Nt-2), Cd (Nt-4), Cu, Cr, As, Cd and Hg (Ne-1), As and Cd (Ne-2,3), Cd (Ne-4) contents were at II level, which was potential for toxicity in the benthos, according to NIER. The amount of Cr (Ne-1) was categorized as SEL (Severe Effect Level) and PEL (Probable Effect Level) by SQGs, SQAVs, respectively.

Sediment contamination was assessed on the basis of enrichment factor (EF), geo-accumulation index (I_{geo}), pollution load index (PLI) and potential ecological risk index (PERI). The value of $EF > 5$ for Zn and Cu (Nt-2), Cd (Nt-4) suggested that the contamination levels in sediments were moderate severe enrichment by anthropogenic activities. The I_{geo} values revealed that Zn (Nt-2), Cu (Nt-2) and Cd (Nt-4) were moderately polluted. The PLI values were 0.6 ~ 0.8 in main stream (Nm-1,2,3,4,5), 1.1 ~ 2.2 in tributary (Nt-1,2,3,4) and 0.9 ~ 1.8 in estuary (Ne-1,2,3,4). And Nt-2, Nt-4 and Ne-1 were founded to be 2.2, 1.8, 1.3 and 1.2 respectively. The PERI value were calculated on the basis of Er^i (risk index), it appeared that main stream (Nm-1,2,3,4,5), tributary (Nt-1,3) and estuary (Ne-2,3,4) were low ecological risk, however the value (PERI >150) of potential ecological risk assessment in Nt-2 (183), Nt-4 (180) and Ne-1 (193) suggest a moderate ecological risk effect.

The inter-correlational analysis among the metal contents showed that contaminants related to the

discharge of nutrients were considered to be main cause of heavy metals contamination in Nakdong River (tributary). And the concentration of Cr in Ne-1 was revealed to have a strong correlation with Pb, Zn, Cu and Cd ($r = 0.81 \sim 0.99$ $p < 0.01$), which can flow into the water system during the inflow of domestic sewage and the discharge oh industrial wastewater.

Key words : *Enrichment factor, Heavy metals, Pollution Load Index, Nakdong River, Surface sediments*

1. 서론

하천은 인간의 활동과 밀접한 연관이 있는 지역 중 하나로서 현재 인구의 증가에 따른 도시화 및 산업화에 따라 각종 오염물질이 유입되고 있으며, 유입되는 다양한 오염물질은 수중에서 부유되어 확산되거나 하상에 퇴적되어 환경을 변화시킨다.¹⁾ 이와 같은 오염물질 유입에 따른 환경변화를 연구하기 위해서는 일차적으로 영향을 받는 수중생물 및 수질뿐만 아니라 장기간의 환경변화를 추정할 수 있는 퇴적물에 대한 조사도 이루어져야 한다.

퇴적물은 수질에 함유된 유기물질 및 중금속 등의 오염물질에 비해 시간적 변화가 적고 상대적인 함유량이 많아 하천 환경을 지속적으로 평가하는데 유효하게 활용될 수 있다²⁾. 그러나 국내 하천 퇴적물에 대한 체계적인 관리는 2008년 국립환경과학원 하천.호소 퇴적물 모니터링 시범사업을 시작으로 2012년 하천.호소 퇴적물 오염평가 기준 제정 등 그 역사가 길지 않다.

2015년 시행된 국내 하천.호소 퇴적물 오염평가 기준에는 유기물질(완전연소가능량), 영양염류(총질소, 총인) 및 금속류(구리, 납, 니켈, 비소, 수은, 아연, 카드뮴, 크롬)가 있으며, 금속류는 저서생물에 독성이 나타날 가능성 정도에 따라 I~IV 등급으로 분류하고 있다.

퇴적물에 포함된 금속류는 수중에서 이온으로 존재하지 않고 입자상 물질과 높은 친화성으로 인해 퇴적물 중에 포함된 유기물질에 강하게 흡착되는 특성을 보인다³⁾. 또한 오염원이 제거된 후에도 지속적인 수질 오염을 야기할 수 있으며 흡착, 이온교환, 침전, 분해 및 미생물 활동과 같은 원인 등을 통하여 잠재적인 오염원으로 존재할 수 있어⁴⁾ 지속적인 모니터링과 관리가 필요하다.

특히, 하구는 육상과 해양환경이 인접한 지역으로 담수와 해수의 상호작용으로 인해 시.공간적으로 복잡

하게 변화하는 곳이며⁵⁾, 유량 및 퇴적물 공급에 의해 영향을 받는다⁶⁾. 낙동강 하류는 염해방지와 용수확보를 위해 하굿둑이 건설되어 유량이 인위적으로 조절되는 ‘조절 하천’의 특성을 가지게 되어, 기수역의 기능을 상실하였으며 이후 하구 일원의 지형변화가 계속되고 있다⁷⁾. 서낙동강은 대저수문과 녹산수문에 의해 수체가 정체됨에 따른 호소형 하천 특성으로 인해 하상에 퇴적된 오염물은 이동하지 않으며, 질소, 인, 중금속 등의 오염원을 누적시킴에 따른 수질 악화가 우려되고 있는 실정이다.⁸⁾ 이에 본 연구는 물금 이하 낙동강 본류 담수 구간과 서낙동강 등 지류 구간, 하굿둑과 인접한 하구 해역에 대하여 표층 퇴적물의 오염도 평가를 실시하였다. 하천 퇴적물 중금속에 대한 오염도 평가를 위해 국내외 환경기준과 비교하였으며, 다른 방법으로는 분석된 중금속 함량을 지각 물질 중 중금속 함량이나 오염되지 않은 지역의 배경농도를 이용하여 상대적인 오염도를 평가하는 방법을 이용하였다. 이러한 평가 방법으로는 금속류의 오염도를 평가하는 부하계수(EF, Enrichment factor), 지화학적 농축지수(Igeo, Index of geoaccumulation), 금속의 전체적인 오염도를 평가할 수 있는 오염부하계수(PLI, Pollution Load Index) 등을 활용한 연구들이 있으며^{9,10,11,12)}, 산출한 오염지수와 분석 결과를 바탕으로 낙동강 하류 지역에 분포하고 있는 퇴적물 오염도를 비교 평가하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상

낙동강 하구는 농업용수와 공업용수의 염해를 방지하고 교통망 확충을 위해 1983년부터 1987까지 하굿둑이 건설되었고 이후 공업단지를 포함한 산업시설 등의 개발로 인해 많은 환경적인 변화가 있었다.¹³⁾ 특히 낙동강 하류 구간은 주변 산업단지 조성으로 지속적으로 오염물질이 유입되고 있어 퇴적물의 오염 정도가

심한 곳으로 평가되고 있다¹⁴⁾. 서낙동강 등 지류 역시 상류에 위치한 대저수문과 하구에 위치한 녹산수문으로 인해 정체 수역화 되었으며 유역개발 및 도시화에 따른 오염물질 유입 등 수환경이 좋지 않은 상태이며, 서낙동강을 비롯한 맥도강, 평강천 3개의 국가하천과 조만강, 예안천, 주중천 등 15개 지방2급 하천과 자연적으로 형성된 소하천과 농업용수 공급을 위한 농수로가 복잡하게 형성되어 있다.¹⁵⁾

본 연구는 Fig. 1.에 나타낸 바와 같이 낙동강 수계 본류 구간(하굿둑 상류 28 km ~ 2 km 지점) 5개 지

료로 하였다.

완전연소가능량(IL(%)) 등 유기물 분석을 위해 체눈 크기 2 mm로 거른 다음 적당량을 취해 2000 rpm으로 20분간 원심분리한 다음 상층액을 버리고 잔류물을 10분간 혼합하여 시료로 하였다.

총질소(mg/kg), 총인(mg/kg) 등 영양염류 분석을 위해 건조한 시료를 2 mm 체를 통과시킨 다음 고르게 혼합하여 0.1 mm 체로 거른 후 분석용 시료로 하였다.

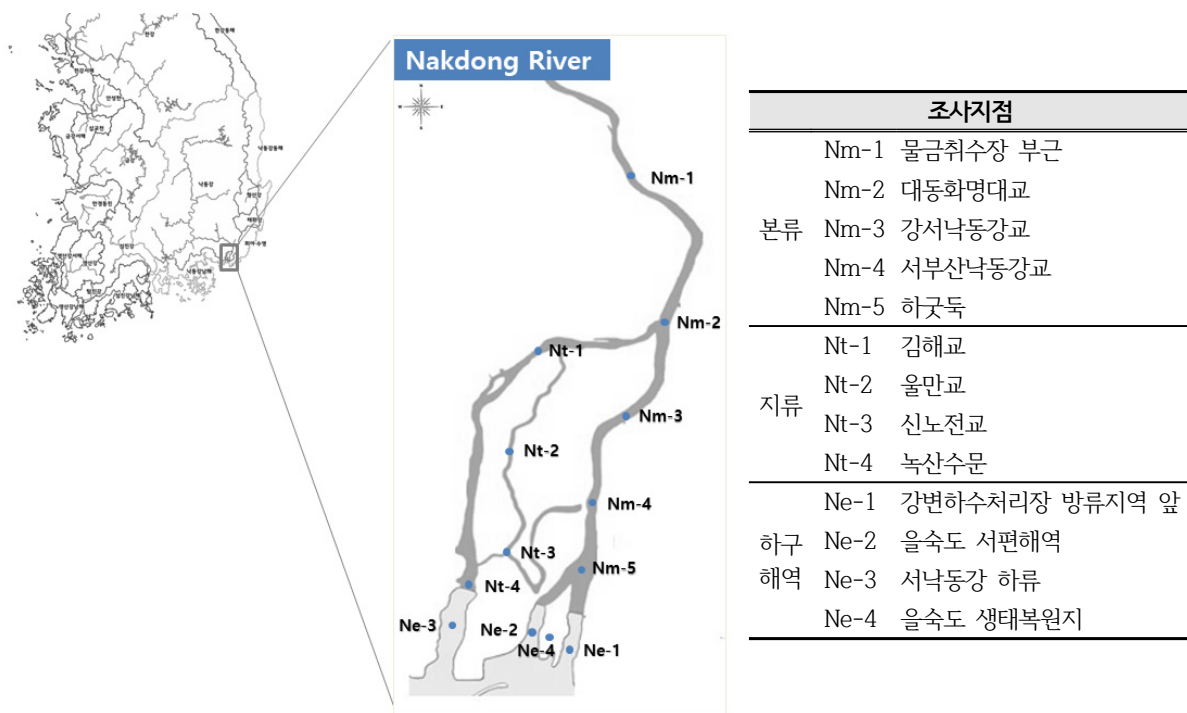


Fig. 1. Sampling sites in the study.

점, 서낙동강 2개 지점, 평강천 및 맥도강 각 1개 지점, 하구해역 4개 지점 등 총 13개 지점을 선정하여 2021년 상반기, 하절기, 하반기까지 총 3회에 걸쳐 표층 퇴적물을 조사하였다.

2.2. 시료의 채취 및 분석방법

시료는 수질오염공정시험기준 퇴적물편에 따라 포나 그랩(ponar grab) 채취기를 이용하여 표층 퇴적물을 채취하였다. 중금속 함량(heavy metals contents) 분석을 위하여 수면 아래 퇴적물을 여러 점 채취하여 혼합한 다음 체눈 크기 0.15 mm로 체거름을 한 다음 건조 시킨 후 0.063 mm 미만으로 분쇄하여 분석용 시

2.2.1. 금속류

조제한 분석용 시료 약 0.5 g을 정확히 취하여 테플론 비커에 넣고 진한 질산(HNO₃) 5 mL, 진한 과염소산(HClO₄) 2.5 mL, 진한 불산(HF) 5 mL를 순서대로 첨가하여 퇴적물과 산이 완전히 분해될 때까지 가열하였다. 퇴적물이 완전히 분해되면 질산용액(2%) 20 mL를 가하여 80 °C에서 시계접시를 덮지 않은 채 완전히 휘발시켜 불산을 제거한 후, 다시 질산용액(2%) 20 mL를 가하여 80 °C에서 용존시켰다. 100 mL 부피 플라스크로 질산용액(2%)로 표선을 맞춘 후 시험용액으로 하였다. 전처리한 시료는 ICP(Agilent 720-OES)를 사용하여 중금속 7항목(납, 아연, 구리, 크롬, 니켈,

비소, 카드뮴)을 분석하였다. 수은은 수은분석기(NIC 3P-3D)를 이용하여 금속류 분석용 시료를 별도의 전처리 없이 시료를 고온으로 가열 분해하여 수은을 기화시켜 다공성물질의 표면에 금을 코팅한 수은 포집제에 포집·농축시킨 후 가열하여 유리된 수은증기를 흡수셀에 도입하여 253.7 nm에서 원자흡광도를 측정하여 농도를 구하였다.

중금속 7종의 분석 결과의 신뢰성 확보를 위해 정도관리는 인증표준물질(SRM 2711a, National Institute of Standards & Technology, USA)을 수질오염공정시험기준 퇴적물편에 따라 시료와 동일한 전처리와 분석 방법으로 진행하였다(Table 1).

총질소를 측정하기 위해 알칼리성 과황산 포타슘 존재 하에 가압멸균 처리하여 산화시킨 후 여과시킨 다음 pH를 조절한 다음 자외선/가시선 분광광도계(UV-vis, Shimadzu, UV-2450)를 이용하여 220 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다.

총인을 측정하기 위해 퇴적물을 450 °C에서 3시간 강열하여 인을 산화시킨 후, 3.5 N 염산 용액을 넣어 16시간 동안 추출하였다. 여과 후 pH를 조절한 다음, 헵타몰리브덴산암모늄사수화물과 반응하여 생성된 몰리브덴산인암모늄을 아스코르빈산으로 환원하여 생성된 몰리브덴산의 흡광도를 880 nm에서 측정하여 총인의 양을 정량하였다.

Table 1. Analytical results of Standard Reference Material 2711a

Heavy metals	Analyzed value (mg/kg)	Certified value (mg/kg)	Recovery (%)	RSD (%)
Pb	1089.1 ± 2.9	1400 ± 10	77.8	0.5
Zn	291.5 ± 1.0	414.0 ± 11	70.4	0.7
Cu	116.8 ± 0.4	140.0 ± 2	83.4	0.7
Cr	38.2 ± 0.1	52.3 ± 2.9	73.0	0.6
Ni	19.4 ± 0.1	21.7 ± 0.7	89.6	1.1
As	97.5 ± 0.5	107.0 ± 5	91.1	1.0
Cd	41.7 ± 0.1	54.1 ± 0.5	77.1	0.4
Hg	6.48 ± 0.08	7.42 ± 0.18	87.3	2.5

인증표준물질(Standard Reference Material, SRM)의 회수율은 70.4 % ~ 91.1 % 로 나타났고, 정밀도는 1.1 % 이하로 수질오염공정시험기준 ES 04870.1 퇴적물 금속류-유도결합플라스마/원자발광분광법의 정도관리 목표(정밀도 : 상대표준편차 30 % 이하, 정확도 70 % ~ 130 %)를 만족하는 결과를 얻었다. 수은은 인증표준물질(SRM 2711a)을 수은분석기를 이용하여 시료와 동일한 방법으로 분석하였으며 회수율은 87.3 %로 나타났고, 정밀도는 2.5 %로 나타났다.

2.2.2. 유기물질 및 영양염류

완전연소가능량(Ignition Loss)을 측정하기 위해 시료를 110 °C에서 건조시킨 시료를 도가니에 담고 무게를 측정한 다음 550 °C에서 2시간 가열한 후 다시 무게를 측정하였다.

2.3. 퇴적물 오염도 평가

2.3.1. 국내 오염평가 기준

2015년 시행된 환경부 국립환경과학원 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준은 하천 퇴적물의 항목별 농도에 따라 독성이 나타날 가능성을 등급으로 분류하고 있다. 유기물 및 영양염류는 심각하고 명백한 오염을 나타내는 IV등급으로 분류하고, 금속류(Cu, Pb, Ni, As, Hg, Zn, Cd, Cr)는 저서생물에 독성을 나타낼 가능성 정도에 따라 I ~ IV 등급으로 구분하고 있다(Table 2).

I 등급은 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없는 경우, II 등급은 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있음을, III 등급은 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 비교적 높은 경우, IV 등급은 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 매우 높은 경우를 의미한다.

지점별 오염평가 기준은 하천·호소의 퇴적물 상태를 지점별로 종합 평가하기 위한 기준으로 항목별 등급에

따라 지질이나 대기의 영향을 일반적인 정도로 받는 곳에서 나타나는 상태인 “보통”, 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있으며, 독성시험을 통해 악영향을 확인이 필요한 “약간 나쁨”, 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 높으며, 조사 범위를 확대해 오염 규모 확인이 필요한 “나쁨”, 심각하고 명백하게 오염되었었으며, 중장기적으로 배출시설 및 공공수역 관리가 필요한 “매우 나쁨”단계인 총 4단계로 분류하고 있다 (Table 3).

2.3.2. 국외 오염평가 기준

미국과 캐나다 등에서는 Persaud (1993)¹⁶⁾가 제안한 퇴적물 품질 가이드라인(Sediment Quality

Guidelines, SQGs) 및 Smith (1996)¹⁷⁾가 제안한 퇴적물 품질 평가기준(Sediment Quality Assessment, SQAVs)을 퇴적물 평가에 활용하고 있다(Table 4).

SQGs에 따른 평가는 LEL(Lowest Effect Level)과 SEL(Severe Effect Level)로 나뉜다. LEL 미만은 저서생물에 대한 영향이 미비한 상태이며, SEL 이상은 해당 지점에 뚜렷한 오염이 예상되며, 대부분의 저서생물에 독성 영향을 미칠 수 있는 수준이다. SQAVs에 따른 평가는 TEL(Threshold Effect Level)과 PEL(Probable Effect Level)로 평가 할 수 있으며, TEL 이하는 부정적인 생태 영향이 거의 발생하지 않을 농도 수준, PEL 이상은 부정적인 생태 영향이 발생할 수 있는 농도 수준이다.

Table 2. Standards of the National Institute of Environmental Research for the assessment of heavy metal pollution in river sediments

		Class I	Class II	Class III	Class IV
Organic matter & Nutrients	Ignition Loss (%)				>13
	Total nitrogen (mg/kg)				>5,600
	Total phosphorus (mg/kg)				>1,600
Heavy metals	Cu (mg/kg)	≤48	≤228	≤1,890	>1,890
	Pb (mg/kg)	≤59	≤154	≤459	>459
	Ni (mg/kg)	≤40	≤87.5	≤330	>330
	As (mg/kg)	≤15	≤44.7	≤92.1	>92.1
	Hg (mg/kg)	≤0.07	≤0.67	≤2.14	>2.14
	Zn (mg/kg)	≤363	≤1,170	≤13,000	>13,000
	Cd (mg/kg)	≤0.4	≤1.87	≤6.09	>6.09
	Cr (mg/kg)	≤112	≤224	≤991	>991

Table 3. Standards of the National Institute of Environmental Research for pollution assessment of river and lake sediment sites

Class	Condition
Good	Class I for all 8 metal items
Fair	At least one Class II or Class III among 8 metal items
Poor	Class II standard index* 0.34 or higher
Very poor	At least on item of Class IV

* Class II standard index = $[\sum_{i=1}^n (EC_i/PEL_{Ki})]/8$ (EC_i : 항목별 농도, PEL_{Ki} : 금속류 항목별 II 등급 기준)

Table 4. Standards for assessment of heavy metal pollution for Sediment Quality Guidelines and Sediment Quality Assessment Values proposed by Persaud(1993) and Smith (1996)

Heavy metals (mg/kg)	Sediment Quality Guidelines (SQGs)		Sediment Quality Assessment Values (SQAVs)	
	LEL (Lowest Effect Level)	SEL (Severe Effect Level)	TEL (Threshold Effect Level)	PEL (Probable Effect Level)
Pb	31	250	35	91.3
Zn	120	820	123	315
Cu	16	110	35.7	197
Cr	26	110	37.3	90
Ni	16	75	18	36
As	6	33	5.9	17
Cd	0.6	10	0.596	3.53
Hg	0.2	2	0.174	0.486

2.3.3. 인위적인 오염도 평가

퇴적물에 축적된 중금속 농도는 외부의 인위적인 오염원에 의한 영향 이외 지질학적인 배경에 영향을 크게 받으며, 퇴적물 내 중금속 오염도는 자연적인 중금속 축적 가능성을 반영하는 과학적인 평가 방법이 필요하다.¹⁸⁾

따라서 퇴적물 내 금속류 오염도를 평가하기 위해 환경기준과 비교하는 방법 이외에도 검출된 중금속 함량을 지각물질 중 금속원소의 함량이나 연구지역 주변의 오염되지 않은 배경농도를 이용하여 자연적인 농도와 비교하는 방법을 이용할 수 있다. 자연적인 배경농도와 인위적인 축적을 고려한 평가 방법으로 부하계수(EF, Enrichment factor), 지화학적 농축지수(I_{geo} , Index of geo-accumulation), 오염지수(CF, Contamination factor), 오염부하지수(PLI, Pollution Load Index), 생태학적위험지수(Pollution Ecological Risk Index)를 이용한 방법이 있다. 본 연구에서는 배경농도는 국립환경과학원 지구화학적 기준도 작성사업 자료¹⁸⁾를 이용하여 도출한 낙동강 권역의 지화학적 배경농도(납 31 mg/kg, 아연 132 mg/kg, 구리 26 mg/kg, 크롬 50.4 mg/kg, 니켈 18.6 mg/kg)를 사용하였고 권역별 배경농도에서 제외한 항목들은 국가 배경농도¹⁹⁾(비소 14.9 mg/kg, 카드뮴 0.4 mg/kg)을 사용하였으며 수은은 하천퇴적물 오염평가 1등급 기준 0.07 mg/kg을 사용하였다.

부하계수 (EF, Enrichment factor)

부하계수는 퇴적물 시료에서 해당원소가 지각원소

의 농도에 대한 상대적인 함량을 이용하여 금속류의 인위적인 오염도를 평가하는 방법이다.²⁰⁾ 일반적으로 사용되는 지각원소로는 Al, Fe, Mn, Rb 및 Li이며 본 연구에서는 비교적 편차가 적고 농도가 높은 Li를 지각원소로 사용하였다.

EF는 아래의 식과 같이 계산할 수 있으며 $(M_{metal}/M_{reference})_{sediment}$ 는 퇴적물 시료에서 표준화 원소에 대한 중금속의 농도비이며, $(M_{metal}/M_{reference})_{reference\ value}$ 는 배경농도에서 표준원 원소에 대한 해당 금속의 비를 의미한다. 산출된 부하계수가 $0.5 < EF \leq 1.5$ 인 경우 지각으로부터 나타나는 자연적인 농도를 나타내며 1.5 이상인 경우 자연적인 풍화 및 인위적인 오염에 영향을 받는 것으로 판단 할 수 있다.²¹⁾

$$EF = \frac{(M_{metal}/M_{reference})_{sediment}}{(M_{metal}/M_{reference})_{reference\ value}}$$

지화학적 농축지수 (I_{geo} , Index of geo-accumulation)

지화학적 농축지수는 1979년 Muller에 의해 제안된 지수로 해당 금속 농도와 배경농도를 이용하여 상대적인 농축 정도를 평가할 수 있다. $M_{sediment}$ 는 해당되는 중금속의 농도이며 $M_{background}$ 는 금속의 배경농도로 보정을 위하여 상수 1.5를 곱하여 계산하였다. 지화학적 농축지수는 총 7가지 단계로 구분되며 지수가 높을 수록 오염도가 심한 것을 나타낸다(Table 5).²²⁾

$$I_{geo} = \log_2 M_{sediment} / (M_{background} \times 1.5)$$

Table 5. Classification of Sediment pollution by the I_{geo}

I_{geo} -class	I_{geo}	Designation of sediment quality
0	0	unpolluted
1	0-1	unpolluted/moderately polluted
2	1-2	moderately polluted
3	2-3	moderately to strongly polluted
4	3-4	strongly polluted
5	4-5	strongly to very strong polluted
6	5-6	very strong polluted

오염부하지수 (PLI, Pollution Load Index)

오염부하지수는 해당 지역에 분포하는 중금속의 전체적인 오염도를 평가할 수 있는 통합 지수로 해당 금속의 농도와 배경농도와의 비율로 오염지수(CF, Contamination factor)를 산정한 다음 개별 오염지수를 이용하여 오염부하지수를 산출할 수 있다.²³⁾ 항목별 CF 값을 계산하기 위해 아래의 식을 이용하였으며 M_{sediment} 는 해당 금속의 농도, $M_{\text{reference sediment}}$ 는 해당 원소의 배경농도를 의미한다. CF 값이 1 미만은 낮은 오염, 1 이상 3 미만은 보통 오염, 3 이상 6 미만은 상당한 오염, 6 이상이면 매우 높은 오염으로 구분된다.²⁴⁾ PLI를 산출하기 위해 아래의 식을 이용하였으며 n은 평가에 사용한 금속원소의 개수를 의미한다. 산출된 PLI가 1 보다 작으면 오염되지 않음을 의미하고, 1 보다 큰 값인 경우 인위적인 오염으로 구분할 수 있다.²⁵⁾

$$CF = M_{\text{sediment}} / M_{\text{reference sediment}}$$

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{1/n}$$

생태위험지수 (PERI, Pollution Ecological Risk Index)

생태위험지수(E_r)는 생태학적 위해성을 고려하여 오염도를 평가하는 지수로 아래와 같이 오염지수(CF)에 독성계수(T_r)를 곱하여 계산할 수 있으며, 금속마다 독성 영향을 보정하기 위해 지수 Pb(5), Zn(1), Cu(5), Cd(30), Hg(40), As(10), Cr(2), Ni(5)를 사용하였다. 생태위험지수는 위해성에 따라 단계별로 구분하며, 잠재적인 생태학적 위험지수는 항목별 생태위험지수를 합하여 지점별 생태학적 위해성 평가에 이용할 수 있다.²⁶⁾

Table 6. Classification of ecological risk index for metal elements

E_r^i (risk Index)	Classification
$E_r^i < 40$	low potential ecological risk
$40 \leq E_r^i < 80$	moderate potential ecological risk
$80 \leq E_r^i < 160$	considerable potential ecological risk
$160 \leq E_r^i < 320$	high potential ecological risk
$E_r^i \geq 320$	very high potential ecological risk

Table 7. Classification of potential ecological risk index

PERI (Potential ecological risk index)	Classification
$PERI < 150$	low ecological risk
$150 \leq PERI < 300$	moderate ecological risk
$300 \leq PERI < 600$	considerable ecological risk
$PERI \geq 600$	very high ecological risk

$$E_r^i = CF \times T_r^i$$

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

3. 연구결과

3.1. 퇴적물 중금속 및 영양염류 농도분포

본 조사 대상 13개 지점의 유기물질(완전연소가능량)과 영양염류(총질소, 총인)의 지점별 농도를 Fig. 2. 와 Fig. 3.에 나타내었다. 금속류 8종의 분석 결과, 납 19.9 ~ 73.5 mg/kg (평균 32.1 mg/kg), 아연 47.9 ~

981.6 mg/kg (평균 172.2 mg/kg), 구리 10.3 ~ 282.7 mg/kg (평균 43.0 mg/kg), 크롬 24.1 ~ 198.1 mg/kg (평균 52.5 mg/kg), 니켈 10.9 ~ 36.6 mg/kg (평균 21.2 mg/kg), 비소 7.4 ~ 25.7 mg/kg (평균 15.1 mg/kg), 카드뮴 불검출 ~ 1.7 mg/kg (평균 0.5 mg/kg), 수은 0.01 ~ 0.19 mg/kg (평균 0.06 mg/kg)의 범위로 나타났으며, 검출농도는 아연 > 크롬 > 구리 > 납 > 니켈 > 비소 > 카드뮴 > 수은 순으로 나타났다. 완전연소가능량은 0.20 ~ 21.46 %, 총질소는 206 ~ 4890 mg/kg, 총인은 314 ~ 4803 mg/kg의 농도분포를 보였다.

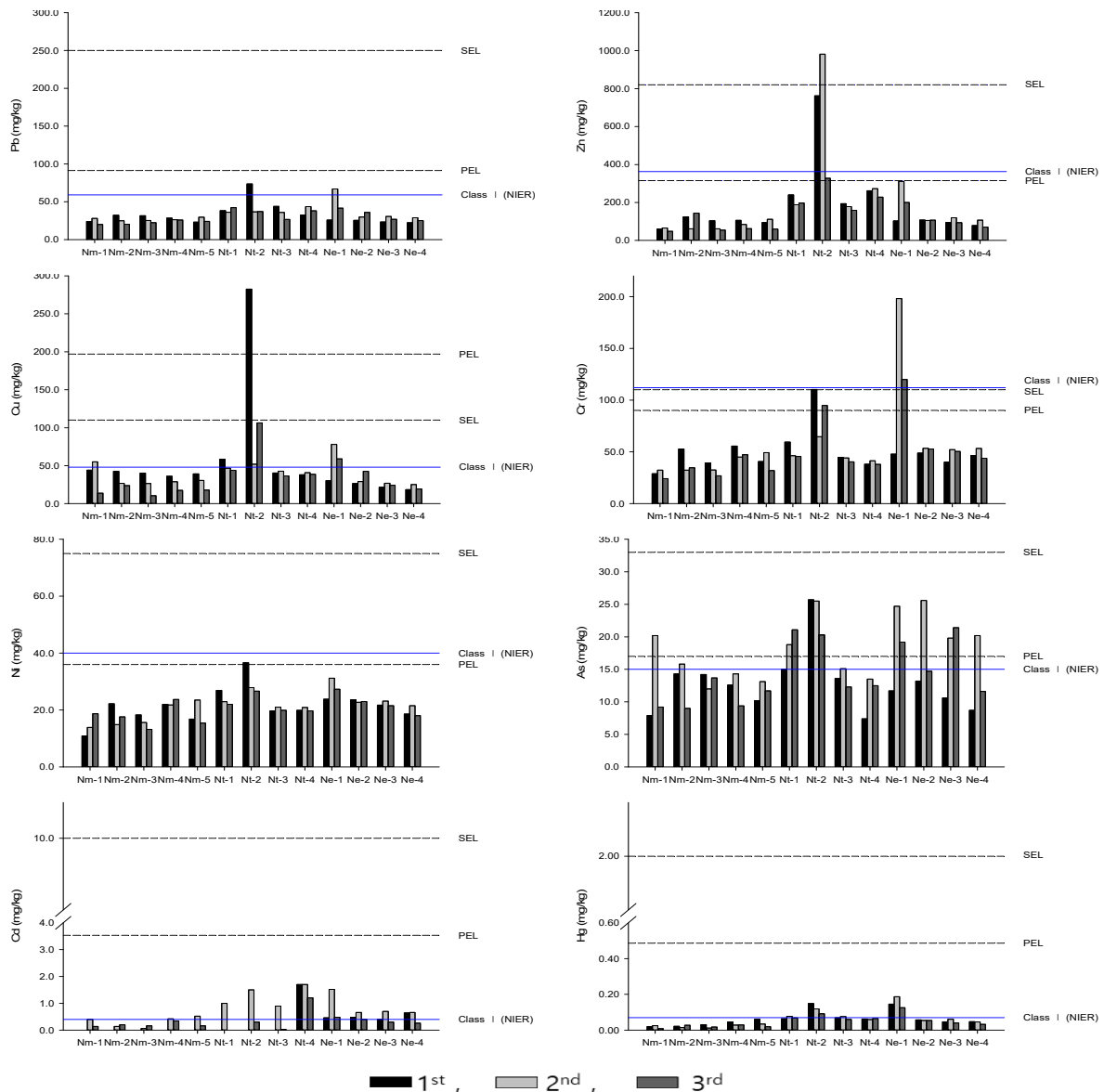


Fig. 2. The concentrations of heavy metals in the study area.

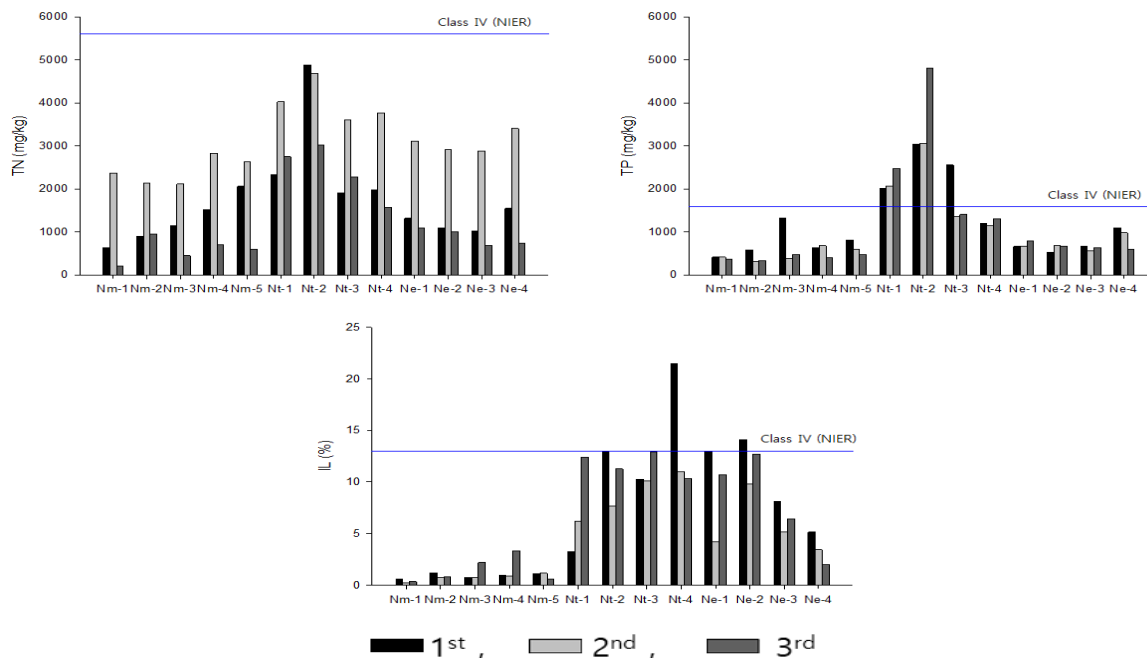


Fig. 3. The concentrations of Organic matter & Nutrients in the study area.

3.2. 퇴적물 오염도 평가

3.2.1. 국내 퇴적물 평가 기준 결과

조사대상 13개 지점의 평균 농도를 국내 하천.호소 퇴적물 오염평가 기준의 항목별 오염평가 기준에 따라 평가 한 결과, 본류(Nm-1,2,3,4,5) 지점은 금속류 전 항목 I 등급이며 유기물 및 영양염류는 IV등급 이내로 나타났다.

서낙동강 등 지류는 금속류 조사 결과, Nt-1 지점은

구리, 비소 II 등급, Nt-2 지점은 아연, 구리, 비소, 카드뮴, 수은이 II 등급으로 나타났으며, Nt-3 지점은 전항목 I 등급, Nt-4 지점은 카드뮴 II 등급으로 나타났고 나머지 금속류는 I 등급으로 나타났다. 유기물 및 영양염류 오염도는 Nt-1,2,3 지점은 총인 IV등급, Nt-4 지점은 완전연소가능량 IV등급으로 조사지점 중 유기물과 영양염류 오염도가 가장 높은 것으로 나타났다.

Table 8. Sediment pollution assessments from organic matter, nutrients and heavy metal concentrations in the study area

Site	Organic matter & Nutrients			Heavy metals								Class II index	Pollution Stage
	IL	TN	TP	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	As	Cd	Hg		
Nm-1	≤IV	≤IV	≤IV	I	I	I	I	I	I	I	I	0.13	Good
Nm-2	≤IV	≤IV	≤IV	I	I	I	I	I	I	I	I	0.15	Good
Nm-3	≤IV	≤IV	≤IV	I	I	I	I	I	I	I	I	0.13	Good
Nm-4	≤IV	≤IV	≤IV	I	I	I	I	I	I	I	I	0.16	Good
Nm-5	≤IV	≤IV	≤IV	I	I	I	I	I	I	I	I	0.15	Good
Nt-1	≤IV	≤IV	IV	I	I	II	I	I	II	I	I	0.23	Very poor
Nt-2	≤IV	≤IV	IV	I	II	II	I	I	II	II	II	0.42	Very poor
Nt-3	≤IV	≤IV	IV	I	I	I	I	I	I	I	I	0.19	Very poor
Nt-4	IV	≤IV	≤IV	I	I	I	I	I	I	II	I	0.28	Very poor
Ne-1	≤IV	≤IV	≤IV	I	I	II	II	I	II	II	II	0.33	Fair
Ne-2	≤IV	≤IV	≤IV	I	I	I	I	I	II	II	I	0.21	Fair
Ne-3	≤IV	≤IV	≤IV	I	I	I	I	I	II	II	I	0.19	Fair
Ne-4	≤IV	≤IV	≤IV	I	I	I	I	I	I	II	I	0.18	Fair

하구해역 지점의 금속류는 Ne-1 지점이 구리, 크롬, 비소, 카드뮴, 수은이 II 등급, Ne-2, Ne-3 지점은 비소, 카드뮴 II 등급, Ne-4 지점은 카드뮴이 II 등급으로 나타났으며, 나머지 금속류는 I 등급으로 나타났고 유기물과 영양염류는 IV등급 이내로 조사되었다.

낙동강 본류(Nm-1,2,3,4,5)는 지질이나 대기의 영향을 일반적인 정도로 받는 상태인 보통 등급, 서낙동강, 평강천, 맥도강 지점(Nt-1,2,3,4)은 유기물 및 영양염류 IV등급으로 매우 나쁨, 하구해역 지점(Ne-1,2,3,4)은 약간나쁨의 오염도를 보였다.

금속류 II등급 지수산출 결과, Nt-2 지점이 0.42로 오염도가 가장 높은 것으로 나타났으며 구간별로 본류(평균 0.14) < 하구해역(평균 0.23) < 서낙동강 등 지류(평균 0.28) 순으로 오염도가 높은 것으로 나타났다.

3.2.2. 국외 퇴적물 분류 기준 평가 결과

13개 지점의 금속류 8종의 평균 농도를 Sediment Quality Guidelines (SQGs)와 Sediment Quality Assessment Values (SQAVs)에 따라 평가하였으며, 결과는 Table 9.에 나타내었다.

Sediment Quality Guidelines (SQGs) 평가 결과, 본류는 전지점 Severe Effect Level (SEL)을 초과하지 않았다. 서낙동강 등 지류 Nt-2 지점이 구리, 하구

해역 Ne-1지점 크롬이 SEL을 초과하여 저서생물에 독성 영향을 미칠 수 있는 수준으로 나타났으며 납, 아연, 니켈, 비소, 카드뮴, 수은은 전 지점 초과하지 않은 것으로 나타났다.

Sediment Quality Assessment Values (SQAVs)에 따른 평가 결과, 본류는 전지점 Probable Effect Level (PEL)을 초과하지 않았으며 지류는 Nt-1지점이 비소, Nt-2지점이 아연, 비소가 PEL을 초과하였으며 하구해역 Ne-1지점이 크롬, 비소, Ne-2, Ne-3지점이 비소가 PEL을 초과하여 부정적인 생태영향을 미칠 수 있는 농도로 나타났다. 납, 구리, 니켈, 카드뮴, 수은은 전 지점 초과하지 않은 것으로 나타났다.

SQGs와 SQAVs에 따라 평가 한 결과 13개 지점 중 Nt-2과 Ne-1 지점이 가장 오염도가 높은 것으로 나타났다. 구간별로는 본류 < 하구해역 < 지류 순으로 오염도가 높은 것으로 나타났다.

3.2.3. 중금속에 의한 인위적인 오염도

국내외 기준과 연구지역 퇴적물 내 금속 농도를 비교한 결과 본류는 대체로 오염도가 낮은 것으로 나타났으며, 지류 Nt-2 지점과 하구해역 Ne-1 지점이 다른 지점보다 오염도가 높은 것으로 나타났다. Nt-2 지점은 아연, 구리, 비소가 다른 지역보다 높은 농도가

Table 9. Results of comparison of the heavy metal sediments collected from the Nakdong River Basin with the SQGs and SQAVs

Sites	Pb		Zn		Cu		Cr		Ni		As		Cd		Hg	
	SQGs ^a	SQAVs ^b	SQGs	SQAVs	SQGs	SQAVs	SQGs	SQAVs	SQGs	SQAVs	SQGs	SQAVs	SQGs	SQAVs	SQGs	SQAVs
Nm-1	I	I	I	I	II	II	II	I	I	I	II	II	I	I	I	I
Nm-2	I	I	I	I	II	I	II	II	II	II	II	II	I	I	I	I
Nm-3	I	I	I	I	II	I	II	I	I	I	II	II	I	I	I	I
Nm-4	I	I	I	I	II	I	II	II	II	II	II	II	I	I	I	I
Nm-5	I	I	I	I	II	I	II	II	II	II	II	II	I	I	I	I
Nt-1	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	III	I	I	I	I
Nt-2	II	II	II	III	III	II	II	II	II	II	II	III	II	II	I	I
Nt-3	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	I	I	I	I
Nt-4	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II	I	I
Ne-1	II	II	II	II	II	II	III	III	II	II	II	III	II	II	I	I
Ne-2	I	I	I	I	II	I	II	II	II	II	II	III	I	I	I	I
Ne-3	I	I	I	I	II	I	II	II	II	II	II	III	I	I	I	I
Ne-4	I	I	I	I	II	I	II	II	II	II	II	II	I	I	I	I

^a I : <LEL, II : ≥LEL, <SEL, III : ≥SEL, LEL: Lowest Effect Level, SEL: Severe Effect Level
^b I : <TEL, II : ≥TEL, <PEL, III : ≥PEL, TEL: Threshold Effect Level, PEL: Probable Effect Level

나타났으며, Ne-1 지점은 크롬의 평균 농도가 국내기준 II 등급, SQGs와 SQAVs 평가 결과 모두 Severe Effect Level, Probable Effect Level 수준으로 나타났다. 분석 결과를 바탕으로 자연적인 배경농도를 이용하여 인위적인 오염도를 평가하였으며 중금속 축적 여부와 생태학적 위험지수를 산정하였다.

부하계수(EF)

13개 지점의 금속류 평균 농도로 산정한 부하계수(EF)를 지점별로 나타내었다(Fig. 4.). 계산 결과, 납 1.0 ~ 2.1 (평균 1.5), 아연 0.8 ~ 7.0 (평균 1.8), 구리

1.1 ~ 7.6 (평균 2.4), 크롬 0.9 ~ 2.6 (평균 1.4), 니켈 1.2 ~ 2.2 (평균 1.6), 비소 1.1 ~ 2.1 (평균 1.4), 카드뮴 0.3 ~ 5.6 (평균 1.6), 수은 0.4 ~ 2.4 (평균 1.1)로 나타났다. 항목별로 아연(7.0), 구리(7.6)는 Nt-2, 카드뮴(5.6)은 Nt-4 지점에서 5 이상 높은 부하를 나타내어 인위적인 오염이 매우 심한 것으로 평가되었다. 구간별로는 본류 지점(Nm-1,2,3,4,5) 0.3 ~ 2.9, 서낙동강 등 지류(Nt-1,2,3,4) 1.1 ~ 7.6, 하구해역(Nm-1,2,3,4) 0.8 ~ 2.6으로 서낙동강 등 지류의 오염이 높은 것으로 나타났다.

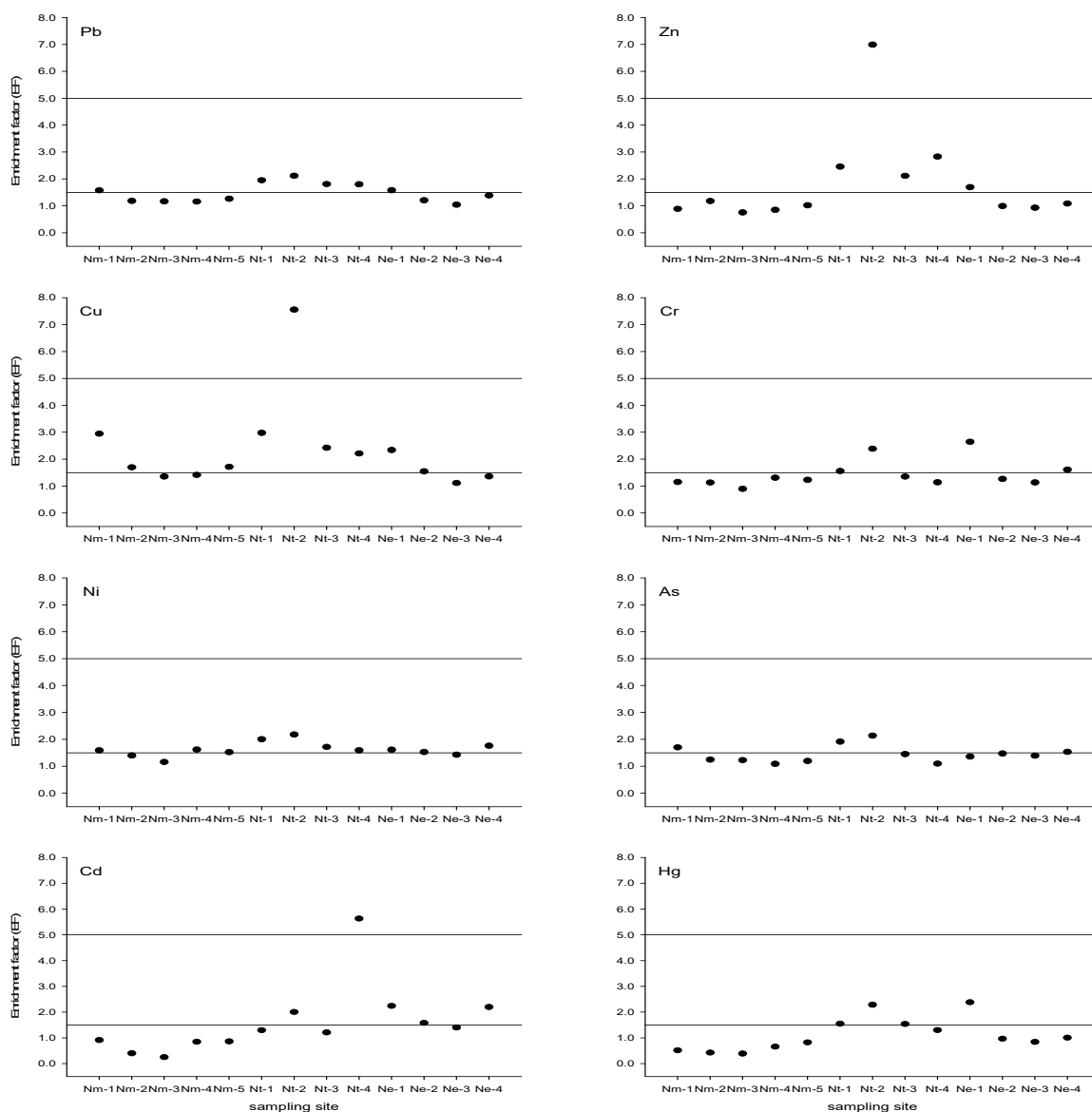


Fig. 4. Enrichment factors(EF) of surface sediments in the study area.

지화학적 농축지수(I_{geo})

지화학적 농축지수에 의한 평가 결과, 납 -1.0 ~ 0.1 (평균 -0.6), 아연 -1.8 ~ 1.8 (평균 -0.6), 구리 -0.9 ~ 1.9 (평균 -0.1), 크롬 -1.4 ~ 0.7 (평균 -0.6), 니켈 -0.9 ~ 0.1 (평균 -0.4), 비소 -1.0 ~ 0.1 (평균 -0.6), 카드뮴 -3.0 ~ 1.4 (평균 -0.8), 수은 -2.6 ~ 0.5 (평균 -1.2)로 나타났다(Fig. 5).

본류 (Nm-1,2,3,4,5)지점과 지류 Nt-3 지점, 하구 해역 Ne-2,3,4 지점은 전 항목 I_{geo}-class 0으로 오염되지 않은 상태로 나타났다. Nt-1 지점은 아연, 구리, Ne-1 지점은 구리, 크롬, 카드뮴, 수은이 I_{geo}-class 1로 인위적인 요인에 의한 오염이 있을 수 있는 수준으로 나타났다. Nt-2 지점 아연 1.8, 구리 1.9, Nt-4 지점 카드뮴 1.4로 I_{geo}-class 2이며, 보통의 오염 단계를

나타내었다.

I_{geo} 평가 결과 Nt-2 지점이 조사 대상 중 가장 오염도가 높았으며, 아연과 구리가 상대적으로 농축이 많이 이루어진 것으로 나타났다. Nt-4 지점은 카드뮴의 오염도가 높은 것으로 나타났고 Ne-1 지점은 구리, 크롬, 카드뮴, 수은 등 여러 항목에 걸쳐 농축의 영향이 약간 있는 것으로 나타났다.

오염지수(CF), 오염부하지수(PLI)

오염지수(CF) 평가 결과, 납 0.8 ~ 1.6 (평균 1.0), 아연 0.4 ~ 5.2 (평균 1.3), 구리 0.8 ~ 5.7(평균 1.7), 크롬 0.6 ~ 2.4 (평균 1.0), 니켈 0.8 ~ 1.6 (평균 1.1), 비소 0.7 ~ 1.6 (평균 1.0), 카드뮴 0.2 ~ 3.8 (평균 1.1), 수은 0.3 ~ 2.2 (평균 0.8)로 나타났다(Table

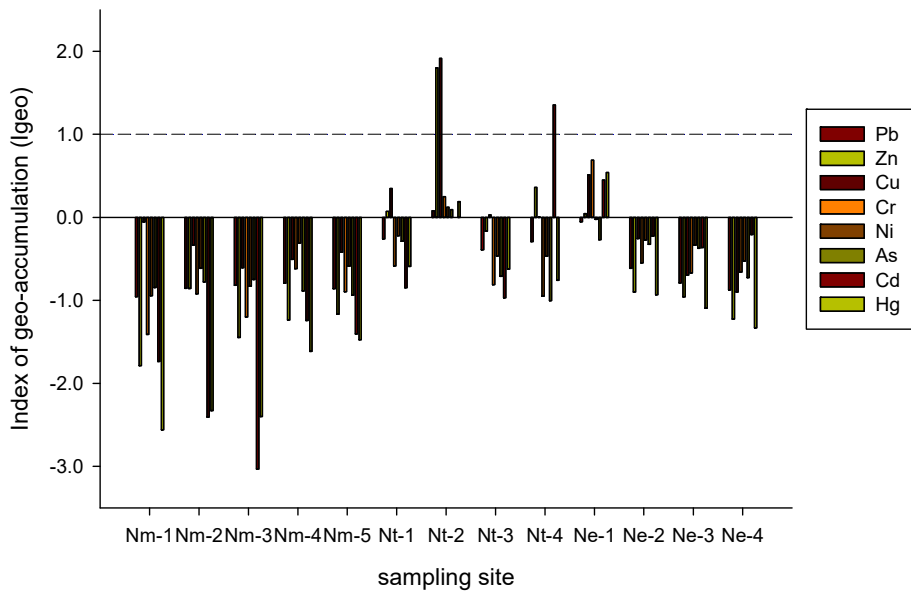


Fig. 5. Geo-accumulation index(I_{geo}) of surface sediments in the study sites.

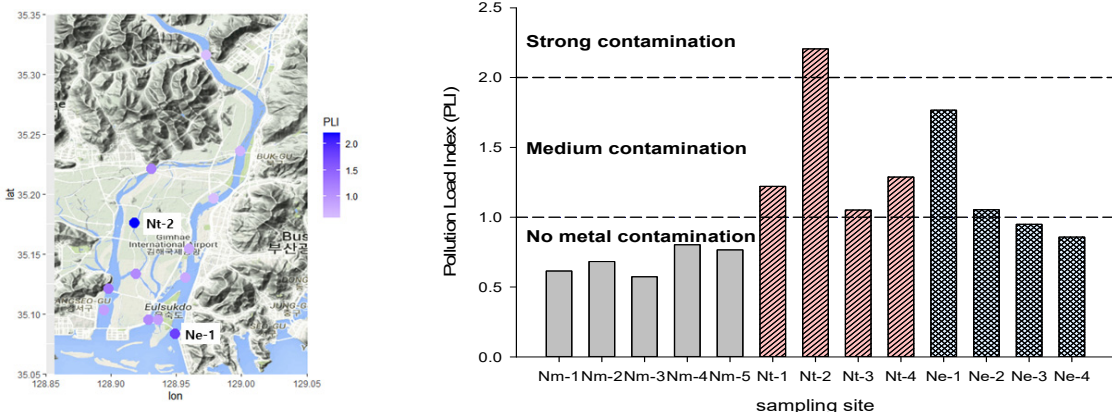


Fig. 6. Pollution load index results in the study area.

Table 10. Contamination factors and pollution load index(PLI) of surface sediment in the study area

Sites	Contamination Factor								PLI
	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	As	Cd	Hg	
Nm-1	0.8	0.4	1.4	0.6	0.8	0.8	0.5	0.3	0.6
Nm-2	0.8	0.8	1.2	0.8	1.0	0.9	0.3	0.3	0.7
Nm-3	0.9	0.6	1.0	0.7	0.8	0.9	0.2	0.3	0.6
Nm-4	0.9	0.6	1.1	1.0	1.2	0.8	0.6	0.5	0.8
Nm-5	0.8	0.7	1.1	0.8	1.0	0.8	0.6	0.5	0.8
Nt-1	1.3	1.6	1.9	1.0	1.3	1.2	0.8	1.0	1.2
Nt-2	1.6	5.2	5.7	1.8	1.6	1.6	1.5	1.7	2.2
Nt-3	1.1	1.3	1.5	0.9	1.1	0.9	0.8	1.0	1.1
Nt-4	1.2	1.9	1.5	0.8	1.1	0.7	3.8	0.9	1.3
Ne-1	1.4	1.5	2.1	2.4	1.5	1.2	2.1	2.2	1.8
Ne-2	1.0	0.8	1.3	1.0	1.2	1.2	1.3	0.8	1.1
Ne-3	0.9	0.8	0.9	0.9	1.2	1.2	1.2	0.7	0.9
Ne-4	0.8	0.6	0.8	1.0	1.0	0.9	1.3	0.6	0.9
Average	1.0	1.3	1.7	1.07	1.17	1.07	1.17	0.8	1.1

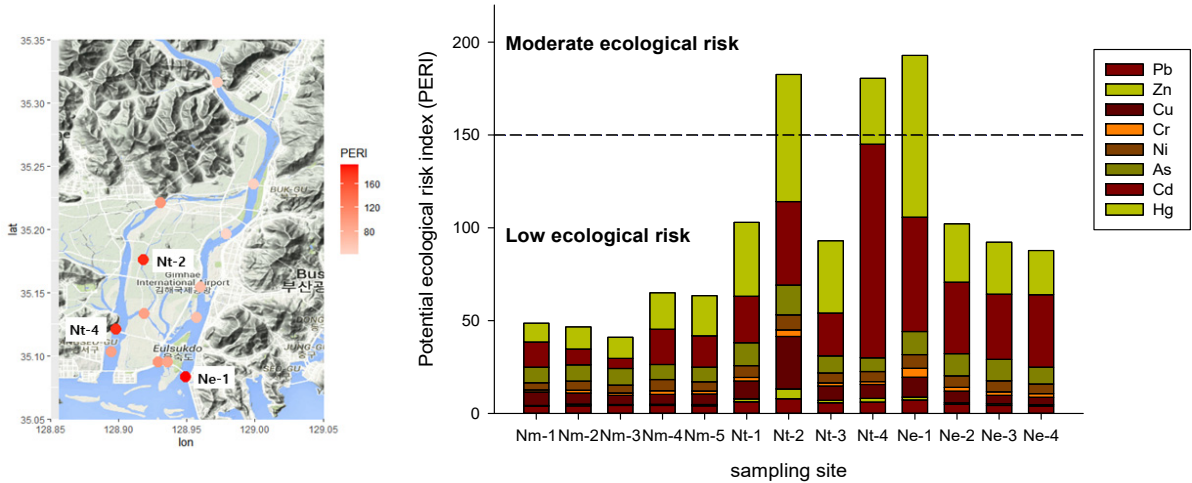


Fig. 7. Potential ecological risk index of heavy metals in the study area.

10., Fig. 6.).

구간별로 본류(Nm-1,2,3,4,5) 지점은 0.2 ~ 1.4, 지류(Nt-1,2,3,4) 지점은 0.7 ~ 5.7, 하구 해역(Ne-1,2,3,4) 지점은 0.6 ~ 2.4로 나타났다. 본류와 하구 해역은 낮은(low contamination level)에서 보통의 오염(moderate contamination level)의 오염을 보였으며, 지류 Nt-2 지점 아연(5.2), 구리(5.7), Nt-4 카드뮴(3.8)이 상당한 오염수준(Considerable contamination level)을 나타내었다.

항목별 CF 값을 이용하여 퇴적물 내 금속류의 종합적인 오염부하를 평가하기 위해 오염부하지수(PLI)를

산출 한 결과 0.6 ~ 2.2로 Nm-1, Nm-3 지점이 0.6으로 가장 낮았으며, Nt-2 지점이 2.2로 가장 높은 것으로 나타났다. 본류 (Nm-1,2,3,4,5) 지점은 평균 0.7로 오염되지 않은 상태, 하구 해역(Ne-1,2,3,4) 지점이 평균 1.2, 서낙동강 등 지류(Nt-1,2,3,4) 지점이 평균 1.4 순으로 중간 정도의 오염을 보였으며, Nt-2 지점은 조사지점은 가장 높은 오염부하지수를 나타내었다.

생태위험지수(PERI)

조사대상 지점의 생태학적 위험을 알아보기 위해 Risk index(Er^j)를 계산한 결과, 납 3.9 ~ 7.9 (평균

Table 11. Toxicity response factors(Eri) and potential ecological risk index(PERI) values for heavy metals in surface sediments from the study area

sites	Er ⁱ								PERI
	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	As	Cd	Hg	
Nm-1	3.9	0.4	7.2	1.1	3.9	8.3	13.5	10.2	49
Nm-2	4.1	0.8	5.9	1.6	4.9	8.7	8.5	11.9	47
Nm-3	4.3	0.6	4.9	1.3	4.2	8.9	5.5	11.4	41
Nm-4	4.3	0.6	5.3	2.0	6.0	8.1	19.0	19.6	65
Nm-5	4.1	0.7	5.6	1.6	5.0	7.8	17.0	21.6	63
Nt-1	6.3	1.6	9.6	2.0	6.4	12.3	25.0	39.8	103
Nt-2	7.9	5.2	28.3	3.6	8.2	16.0	45.0	68.4	183
Nt-3	5.7	1.3	7.7	1.7	5.4	9.2	23.0	38.9	93
Nt-4	6.1	1.9	7.5	1.6	5.4	7.5	115.0	35.5	180
Ne-1	7.2	1.5	10.7	4.8	7.4	12.4	61.5	87.2	193
Ne-2	4.9	0.8	6.3	2.1	6.2	12.0	38.5	31.5	102
Ne-3	4.3	0.8	4.6	1.9	5.9	11.6	35.0	28.1	92
Ne-4	4.1	0.6	4.0	1.9	5.2	9.1	39.0	23.8	88

5.2), 아연 0.4 ~ 5.2 (평균 1.3), 구리 4.0 ~ 28.3 (평균 8.3), 크롬 1.1 ~ 4.8 (평균 2.1), 니켈 3.9 ~ 8.2 (평균 5.7). 비소 7.5 ~ 16.0 (평균 10.1), 카드뮴 5.5 ~ 115.0 (평균 34.3), 수은 10.2 ~ 87.2 (평균 32.9)로 나타났다(Table 11).

납, 아연, 구리, 크롬, 니켈, 비소는 전지점 Erⁱ < 40 으로 잠재적인 생태학적 위험요소가 낮은 것으로 나타났다. 카드뮴은 Nt-2, Ne-1 지점이 각각 45.0, 61.5로 보통의 잠재적인 위험요소(Moderate potential ecological risk)로 나타났으며, Nt-4 지점이 115.0으로 상당한 잠재적인 생태학적 위험요소(Considerable potential ecological risk)로 나타났다. 수은은 Nt-2 지점이 68.4로 보통의 잠재적인 생태학적 위험요소, Ne-1 지점이 87.2로 상당한 잠재적인 생태학적 위험요소로 나타났다.

항목별 Erⁱ 값을 이용하여 PERI를 계산한 결과, Nt-2, Nt-4, Ne-1지점을 제외하고는 PERI < 150 으로 낮은 생태학적 위험지수를 나타내었다(Fig. 7.).

지점별로 분류(Nm-1,2,3,4,5)가 PERI 41 ~ 65로 낮은 수준을 보였으며, 서낙동강 등 지류 구간 (Nt-2, Nt-4) 과 하구둑 바깥 (Ne-1) 지점이 PERI ≥ 150 으로 잠재적인 생태학적 위험지수를 나타내었다.

3.4 지점별 금속류 상관관계 분석

조사대상 13개 지점의 퇴적물 분석 결과를 바탕으로

EF, I_{geo}, PLI, PERI 지수를 비교한 결과, 분류 구간 (Nm-1,2,3,4,5)과 지류 Nt-3, 하구 해역 Ne-2,3,4 지점은 다른 지점보다 오염도가 낮은 것으로 나타났다. 금속류 오염도와 유기물 및 영양염류 오염도가 상대적으로 높은 서낙동강 등 지류 구간과 하구 해역 구간을 대상으로 각 지점별 퇴적물의 중금속 농도와 완전연소 가능량, 총질소, 총인의 농도를 대상으로 상관관계를 구하였다(Fig. 8.).

서낙동강 등 지류 구간과 하구 해역에서 항목 간에 피어슨 상관계수를 계산 한 결과, 유기물 함량(완전연소가능량, IL)과 중금속은 상관성을 보이지 않았으며, 카드뮴을 제외한 각 원소 간의 상관관계는 하구 해역 ($r=0.29 \sim 0.99$), 지류 ($r=0.48 \sim 0.92$) 의 상관관계를 나타내었다.

총인은 하구 해역에서는 다른 중금속과 상관성을 나타내지 않았으나 IV등급으로 나타났던 지류 구간에서는 크롬($r=0.79, p<0.01$) 비소($r=0.69, p<0.05$)와 뚜렷한 상관성을 보였다. Nt-2 지점에서 높은 농도를 보였던 아연과 구리는 하구 해역에 비해 총질소, 총인과 상관성이 높은 것으로 나타났으며 주변 영양염 유입과 관련한 오염원이 중금속 함량을 제어하는 가장 주된 요인으로 판단된다. Nt-4지점에서 가장 높은 농축지수를 보였던 카드뮴은 지각원소인 Li과 뚜렷한 상관관계($r=0.61, p<0.05$)를 나타냈으나 다른 항목들과의 상관성은 낮은 것으로 나타났다. 카드뮴에 의한 오염은

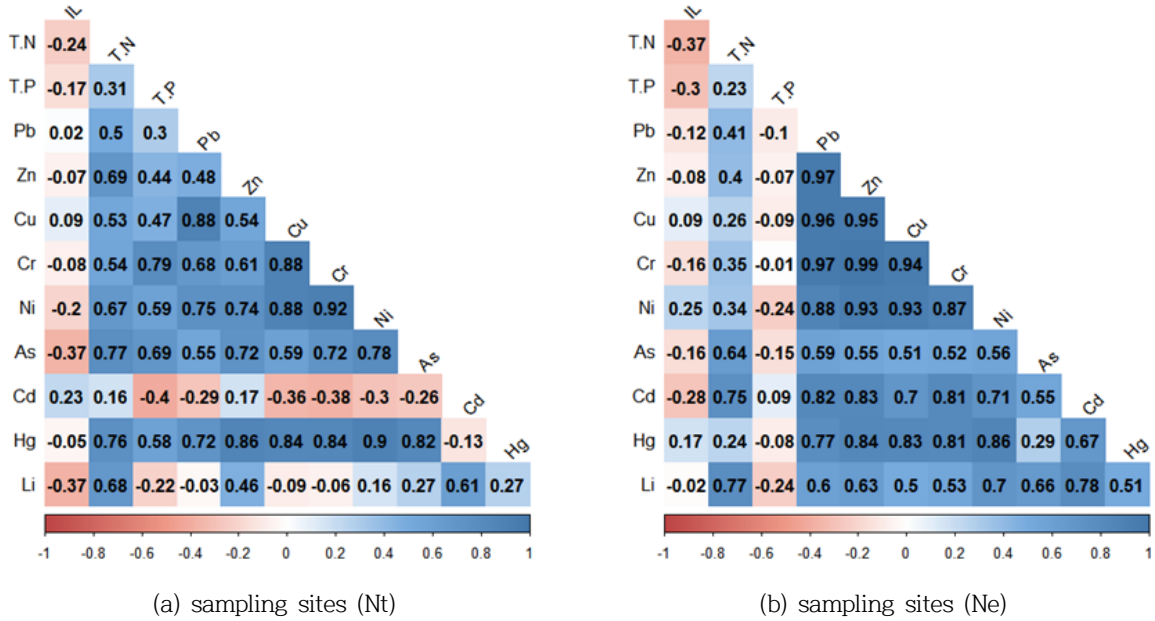


Fig. 8. Correlation coefficient between heavy metals and organic matter, nutrients in the study area.

지류 Nt-1,2,3에서 나타나지 않았고($I_{geo} \leq 0$), 다른 연구에서 실시한 조만강(조만교) 퇴적물 조사 결과¹⁸⁾에서 카드뮴이 다른 금속류에 비해 오염도가 높은 것으로 볼 때, 서낙동강은 상·하류 수문에 의해 정체수역이 형성되는 호소형 하천의 특성상 수계에 유입된 중금속 등 미세 부유물의 퇴적이 쉬운 환경이 조성되어 수계 내 오염이 높은 것으로 판단된다.

Ne-1 지점에서 높은 농도로 조사된 크롬은 지류 구간에 비해 납, 아연, 구리, 카드뮴, 수은($r=0.81 \sim 0.99$, $p<0.01$)과 강한 양의 상관관계를 보였고 부하계수(EF)가 1.6 ~ 2.6으로 나타나 이들 항목 간에 오염개연성이 다른 항목보다 높은 것으로 판단된다. 또한 납, 아연, 구리, 카드뮴은 인위적인 영향을 받는 대표적인 중금속들로 알려져 있으며, 인구가 밀집되고 산업이 발달한 지역에서 배출되는 생활하수 및 산업폐수로부터 유입된다는 보고^{27,28,29)}가 있어 이들 지역에 대한 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 낙동강 하류 구간을 대상으로 하천 퇴적물에 분포하고 있는 금속류의 오염도를 평가하기 위해 본류, 서낙동강 등 지류, 하구 해역 등 13개 지점에서 표층 퇴적물을 채취하여 중금속(납, 아연, 구리,

크롬, 니켈, 비소, 카드뮴, 수은) 함량을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 국내외 퇴적물 환경기준과 비교하였으며 중금속 부하계수, 지화학적 농축지수, 오염부하지수, 생태학적 위험지수를 산출하여 퇴적물 오염도 평가를 실시하였다.

1. 국내 퇴적물 오염평가 기준에 따라 평가한 결과, 본류(Nm-1,2,3,4,5)와 지류 Nt-3 지점은 금속류 전 항목 I 등급으로 평가되었다. 지류 Nt-1 지점은 구리, 비소 II 등급, Nt-2 지점은 아연, 구리, 비소, 카드뮴, 수은이 II 등급으로 나타났으며, Nt-4 은 카드뮴 II 등급으로 나타났다. 하구 해역 Ne-1 지점이 구리, 크롬, 비소, 카드뮴, 수은이 II 등급, Ne-2, Ne-3 지점은 비소, 카드뮴 II 등급, Ne-4 지점은 카드뮴이 II 등급으로 나타났다. 금속류 II 등급 지수 산출 결과, Nt-2 지점이 오염도가 가장 높은 것으로 나타났다. 국외 SQGs와 SQAVs에 따라 평가 한 결과 13개 지점 중 Nt-2와 Ne-1 지점이 가장 오염도가 높은 것으로 나타났으며 구간별로는 국내외 평가 결과 모두 본류 < 하구해역 < 지류 순으로 오염도가 높은 것으로 나타났다.
2. 부하계수(EF) 산출 결과, 본류 < 하구 해역 < 지류 순으로 중금속 오염이 높은 것으로 나타났다. 항목 별로 납, 크롬, 니켈, 비소, 수은은 인위적인 오염이

- 낮은 것으로 나타났으며, 아연, 구리는 Nt-2, 카드뮴은 Nt-4 지점에서 5 이상 높은 부하를 나타내어 인위적인 오염이 매우 심한 것으로 평가되었다. 지화학적 농축지수(I_{geo}) 산출 결과, 본류 (Nm-1,2,3,4,5)지점과 지류 Nt-3 지점, 하구 해역 Ne-2,3,4 지점은 전 항목 I_{geo} -class 0으로 오염되지 않은 상태로 나타났다. Nt-2 지점이 조사 대상 중 가장 오염도가 높았으며, 아연과 구리가 상대적으로 농축이 많이 이루어진 것으로 나타났다. Nt-4 지점은 카드뮴의 오염도가 높은 것으로 나타났고 Ne-1 지점은 구리, 크롬, 카드뮴, 수은 등 여러 항목에 걸쳐 농축의 영향이 약간 있는 것으로 나타났다.
3. 금속류의 종합적인 오염부하를 평가할 수 있는 오염부하지수(PLI) 산출 결과, 본류 (Nm-1,2,3,4,5)는 오염되지 않은 상태, 지류 (Nt-1,3,4) 지점과 하구 해역 (Ne-1,2,3,4) 지점은 중간 정도의 오염을 보였으며 Nt-2 지점은 조사지점은 가장 높은 오염부하지수를 나타내었다.
 4. 생태학적 위험요소를 기반으로 잠재적인 생태학적 위험지수(PERI)를 구하였으며, Nt-2, Nt-4, Ne-1 지점이 잠재적인 생태학적 위험지수를 나타내었으며 다른 지점에서는 낮은 생태학적 위험지수를 보였다.
 5. 오염도가 높은 지류와 하구 해역 구간에 대해 상관관계 분석을 실시한 결과, Nt-2 지점에서 높은 농도를 보였던 아연과 구리는 하구 해역에 비해 영양염류와 상관관계가 높은 것으로 나타나 수계 주변의 영양염류 유입과 관련한 오염원이 중금속 함량을 제어하는 주된 원인으로 판단된다. Nt-4 지점에서 가장 높은 농축이 있었던 카드뮴은 정체수역이 형성되는 호소형 하천의 특성상 수계에 유입된 중금속 등 미세 부유물의 퇴적이 쉬운 환경이 조성되어 수계 내 오염이 높은 것으로 판단된다. Ne-1 지점에서 높은 농도를 보이는 크롬은 생활하수 유입과 산업폐수 배출시 수계로 유입될 수 있는 납, 아연, 구리, 카드뮴과 강한 상관관계를 보여 이들 지역에 대한 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 안정민, 임태효, 이인정, 이경락, 정강영, 이재운, 천세역, 박인혁, “낙동강수계 댐과 다기능보의 연계운영을 통한 용수공급효율화에 관한 연구”, 한국물환경학회, **30**(2), pp.138-147(2014).
2. 신상은, 윤석태, 고영구, 오강호, “영산강 유역 하상 퇴적물의 지화학적 특성과 환경 변화”, 한국지형학회지, **22**(3), pp.31-42(2015).
3. Balkis, N. and Cagatay, M., “Factors controlling metal distributions in the surface sediments of the Erdek Bay, sea of Marmara, Turkey”, *Environment International*, **27**, pp.1-13(2001).
4. I. Thornton, “Applied Environmental Geochemistry”, *Academic Press, London*, 501(1983).
5. 이인철, 유창일, 윤한삼, “낙동강 부정형적 사주발달과 환경 인자간의 상관성 비교 연구”, 한국해양환경공학회지, **10**, pp.13-20(2007).
6. 김백운, 이상룡, 김부근, “낙동강 하구 신자도 해변 퇴적물 입도의 시간적인 변화”, 한국해양·해양공학회, **23**(4), pp.304-312(2011).
7. 부산광역시, 환경백서 (2020).
8. 한국개발연구원, 서낙동강수계 국가하천환경정비사업 (2017).
9. 김도희, 엄현호, “광양, 목포, 신안 주변해역 해저퇴적물의 오염도 평가에 관한 연구”, 해양환경안전학회지, **19**(4), pp.303-308(2013).
10. 정혜령, 나공태, 김경태, 김은수, 이승용, 최진영, 김경련, “부산 수영만 유역 하천 퇴적물 내 중금속 분포 및 오염평가 연구”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp.205-211(2016).
11. 김선영, 김형철, 이원찬, 황동운, 홍석진, 김정배, 조윤식, 김청숙, “용진군 어장관리해역의 수질 및 퇴적물 환경 특성”, 해양환경안전학회지, **19**(6), pp.570-581(2013).
12. Sekabira, K., Oryem Origa, H., Basamba, T. A., Mutumba, G., and Kakudidi. E., “Assessment of Heavy metal Pollution in the Urban Stream Sediments and its Tributaries”, *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, **7**(3), pp.435-446(2010).
13. 이형근, 이재학, 유옥환, 김종관, “낙동강 하구역 주변 대형저서동물 군집의 공간 특성”, 한국해양과학기술원, **27**(2), pp.135-148(2005).
14. 이준호, 양찬근, 한경수, 이태운, “마산만과 낙동강 하구역 해양 퇴적토의 중금속 오염도 산정 연

- 구”, 한국지반환경공학회, 21(3), pp.13-21(2020).
15. 낙동강수계관리위원회, 서낙동강 유역 오염도 현황조사 및 수질개선방안 수립 (2009).
 16. Persaud D, Jaagumagi R, Hayton A. Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario. Ontario Ministry for Environment and Energy, Queen's Printer for Ontario: Ontario(1993).
 17. Smith, S.L., MacDonald, D.D., Keenleyside, K.A., Ingersoll, C.G. and Field, J., “A Preliminary Evaluation of Sediment Quality Assessment Values for Freshwater Ecosystems”, *J. Great Lakes Res.* 22(3), pp.624-638(1996).
 18. 국립환경과학원, 하천퇴적물 배경농도 산정 연구 (2011).
 19. 한국지질자원연구원, 전국지구화학적 재해 평가기준도 작성 (2003).
 20. Bruland, K. W., Bertine, K., Koide M. and Goldberg, E. D., “History of Metal Pollution in southern California Coastal Zone”, *Environmental Science and Technology*, 8, pp.425-432(1974).
 21. Zhang, J., Liu, C.L., “Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuarine. Coastal and Shelf Science* 54, pp.1051-1070(2002).
 22. Müller G., “Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins, Veränderungen seit 1971” *Umschau Wiss Techn* 79(24), pp.778-783(1979).
 23. Tomlison L, Wilson G, Harris R, Jeffrey DW., “Problems in the assessments of heavy-metal levels in estuaries and formation of a pollution index”, *Helgol Meeresunters*, 33, pp.566-575(1980).
 24. Hakanson, L., “An ecological risk index for aquatic pollution control of sediment ecological approach”, *Water Research* 14, 975-1000(1980).
 25. Singh, H., Pandey, R., Singh, S.K., & Shukla, D.N., “Assessment of heavy metal contamination in the sediment of the River Ghahjara, a major tributary of the River Ganga in Northern India”, *Applied Water Science*, 7(7), pp.4133-4149(2017a).
 26. Håkanson, L., “An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach”, *Water Research*, 18(4), pp.975-1001(1980).
 27. Facchinelli, A., Sacchi, E., & Mallen, L., “Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils”, *Environmental Pollution*, 114(3), pp.313-324(2001).
 28. Ke, X., Gui, S., Huang, H., Zhang, H., Wang, C., & Guo, W., “Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China”, *Chemosphere*, 175, pp.473-481(2017).
 29. Kober, B., Wessels, M., Bollhöfer, A., & Mangini, A., “Pb isotopes in sediments of Lake Constance, Central Europe constrain the heavy metal pathways and the pollution history of the catchment, the lake and the regional atmosphere”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(9), pp.1293-1303(1999).