한국환경분석학회지 제21권 (제4호) 292~303, 2018
J. of the Korean Society for Environmental Analysis

영산강 수계 표층 퇴적물의 금속류 분포 및 오염도 평가

양해종 · 강태우† · 봉기문 · 정효진 · 양원준 · 한종학 · 정희정 · 황순홍 · 김경현
국립환경과학원 영산강물환경연구소

Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of the Yeongsan River

Hae Jong Yang, Tae-Woo Kang†, Ki Moon Bong, Hyo Jin Jeong, Won Jun Yang, Jong Hak Han, Heejung Jung, Soon Hong Hwang, and Kyunghyun Kim

Yeogsan River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gwangju 61011, Korea

Received November 13, 2018/Revised November 24, 2018/Accepted December 6, 2018

The particle sizes and heavy metal concentrations (Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, As, Cr, Ni, Li, Al) of surface sediments of the Yeongsan River were analyzed to assess the distribution and pollution level of heavy metals. The distribution of particle sizes was dominated by sand in the upstream sites (MS1-MS7) and by silt loam in the downstream sites (MS8-ML3), but MS3 and MS6, located slightly upstream of the two weirs, were found to be loamy sand and silt loam, respectively. The concentrations of Pb, Zn, Cu, Cd and Hg were higher at the upstream sites, while As, Cr, Ni and Li were higher at the downstream sites. The heavy metals of crustal origin (As, Cr, Ni and Li) were strongly correlated with particle size, while the other heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd and Hg) were weakly correlated with particle size. Considering their concentrations, most of heavy metals were evaluated as having almost no toxic effects on benthic organisms, at all sites. In addition, anthropogenic contamination by the I_{geo}, EF and CF were found to have no impact at most sites, with only low levels of pollution at the others. Using the PLI method, the MS2 and MS3 sites, located upstream, were assessed to be affected by anthropogenic contamination. Most importantly, Zn, Cu and Hg were found to be the elements responsible for most pollution, and they were highest at the upstream sites, implying pollution by domestic sewage and urban discharge.

Key words: Surface sediments, Heavy metals, Pollution assessment, Yeongsan river

1. 서 론

최근 인구 밀도의 증가와 산업의 발달로 급격하게 도시화와 산업화가 진행되면서 발생된 생활하수와 산업폐수에 의한 하천의 오염은 중요한 환경문제로 대두되고 있다. 하천의 오염은 대부분 산업폐수, 광산업, 농업, 생활하수 등의 인위적인 활동에 의해 유래되지만 하천 주변의 다양한 토지이용에 따른 토양 침식과 암석의 풍화작용 등 자연적인 영향에 의해서도 발생한다.[1-6] 특히, 인위적인 활동에 의한 생활하수와 산업폐수들은 하천으로 처리하기가 용이하기 때문에 대부분 직접 방류되고 있으며, 이로 인한 하천은 다양한 오염원들로부터 취약한 상태에 노출되고 지속적인 유입에 의해 오염이 우려되고 있는 실정이다.[7] 이러한 오염물질들은 다양한 경로를 통해 하천으로 유입된 후 유속과 유량 등의 수리학적 특성 및 수질의 물리화학적 작용에 의해 하천에 침강 및 축적되어 최종적으로 퇴적물에 존재한다. 그리고 퇴적물에 축적된 오염물질들은 하천의 물리 화학적 조건에 따라 수중으로 용출되거나 재결합하는 과정을 거쳐 수질의 변화를 초래하고, 더 나아가서는 수생태계 동

†To whom correspondence should be addressed.
Tel: 82-62-970-3990, Fax: 82-62-970-3999, E-mail: kangtw@korea.kr

식물들에게 영향을 미칠 뿐만 아니라 이들의 먹이망(food web)에 의해 인간의 건강까지도 위협할 수 있다고 알려졌다.[8,9] 따라서 퇴적물은 하천수와 수생생물들과 달리 오랜 시간동안 하천으로 유입된 오염물질들의 정보를 정확하게 파악하고 제공하기 위한 대상물질로 활용되고 있어 중요한 의미를 갖는다.[10]

특히, 오염물질 중 금속류는 산소를 고갈시키거나 부영양화를 야기하는 유기물들과 다르게 수중에서 용존 및 입자 상태로 쉽게 소멸되지 않고 오랫동안 잔류하는 물질로서 최종적으로 퇴적물에 흡착되어 존재하는 것으로 알려져 있다.[11] 퇴적물에 포함된 금속류들은 수중의 농도들보다 높은 농도로 분포하고 있으며, 이들은 자체적으로 독성을 띠거나 수생생물들에 의한 흡수로부터 축적되어 오염을 유발함으로써 잠재적인 오염물질로 구분되고 있다.[12,13] 따라서, 하천의 금속류 오염평가는 시간과 장소 그리고 주변 지형 등 단기간의 수환경 변화가 쉽게 반영되는 수질뿐만 아니라 시공간적으로 변화가 적고 상대적으로 금속류의 농도가 높아서 오랜기간 동안 지속적인 오염 특성이 잘 나타나는 퇴적물에 대한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다고 하였다.[14,15] 이에 국내에서도 하천의 오염정도를 파악하기 위해 오염물질이 축적되는 퇴적물을 대상으로 금속류에 대한 오염도 평가가 이루어지고 있는 실정이며,[10,15-23] 국외에서는 이미 많은 연구가 활발히 진행되어 왔다.[24-26] 퇴적물의 금속류 오염도 평가는 단순 산술적인 농도 비교와 인위적인 오염 영향을 평가하기 위한 방법들이 널리 활용되고 있으나, 산술적인 비교 평가는 오염도를 정확하게 평가하기에 한계가 있는 반면,[27] 지구축적지수와 농축지수 등의 지구화학적 접근법은 인위적으로 유입된 오염원들에 대한 금속류의 상대적인 오염 상태를 평가하기 위한 방법으로 많은 연구자들에 의해 널리 사용되고 있는 것으로 알려졌다.[1,28-30]

최근 영산강은 4대강 정비 사업을 통해 본류에 2개의 보가 축조되었고, 이로 인하여 하천의 물리적 환경 변화가 발생하여 수심이 깊어지고 흐름이 지체됨으로써 유량과 유속 등이 감소되어 체류시간을 증가시키고 정체구역 내에 퇴적물의 세립화가 이루어지기 때문에 하천 퇴적물의 극심한 변화에 대한 연구 필요성이 제시되었다.[31] 4대강 정비 사업 직후 영산강의 하천 퇴적물에 대한 연구는 일부 진행된 바가 있으나 하천의 안정화가 이루어지지 않은 상태에서 퇴적물의 오염도를 평가하기에는 결과가 미미하여 장기적인 모니터링이 필요하다고 하였다.[15]

따라서, 본 연구는 영산강 수계에 위치한 하천 중 퇴적물의 입도와 금속류 분석을 통해 지점에 따른 금속류 분포 특성과 분석 항목들 간에 상관관계를 확인하였고, 국내외 퇴적물 환경기준과 비교 평가하였다. 또한 분석된 금속류 농도를 I_{geo}, EF, CF 및 PLI의 4가지 방법으로 산출하여 금속류의 인위적인 오염도를 파악함으로써 영산강 수계 하천 퇴적물에 대한 수질관리 개선에 활용하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점

본 연구의 대상유역인 영산강은 전라남도와 전라북도의 경계를 형성하고 있는 유역으로 광주천, 황룡강 및 지석천이 합류하면서 남서 방향으로 유하하여 고막원천과 함평천이 합류한다. 영산강 수계는 유역 면적 3,468 km^2, 유로 연장 137 km 및 하천 연장이 1,086 km으로 영산강 중류에 4대강 사업으로 승촌보와 죽산보가 축조되어 있다. 조사 지점은 하천 중 본류 9개 및 지류 4개 지점과 하류에 하구역 3개 지점을 포함하여 총 16개 지점을 선정하였다. 본류 지점들은 승촌보 및 죽산보 상하류에 위치한 광주2-1(MS1), 광산U(MS2), 광산(MS3), 광산D(MS4), 죽산U(MS5), 죽산(MS6), 죽산D(MS7), 영산포-1(MS8)과 하류의 무안1(MS9) 지점이었고, 지류 지점들은 황룡강3-1(TR1), 지석천4(TR2), 고막원천2-1(TR3), 영암천(TR4) 그리고 하구역 지점들은 하굿둑 상류의 영산호3(ML1), 영산호2(ML2), 영산호1(ML3)을 대상으로 조사하였다(Fig. 1). 퇴적물 조사 시기는 2015년부터 2016년까지 2년간 하천 퇴적물의 경우 상하반기로 구분하여 년 2회, 하구역 퇴적물의 경우 상반기에만 년 1회 수행하였다.

2.2. 시료 채취 및 전처리

하천 및 하구역의 표층 퇴적물 시료는 하천 흐름의 수직 방향으로 5군데 이상을 선정하여 각 지점으로부터 포나 그랩(ponar grab) 또는 스쿱(scoop)을 가지고 일정하게 시료를 채취한 후 혼합하여 약 5 kg 이상 확보하였고, 혼합된 시료들은 균질화 과정을 거쳐 대표성을 갖도록 준비하였다. 준비한 시료는 2 mm 체로 통과시켜 과산화수소(H_2O_2)를 가하여 유기물을 제거한 뒤 입도 분석에 사용하였고, 비금속 나일론(nylon) 재질의 0.15 mm 체로 통과시킨 시료는 풍건시킨 다음 자동분쇄기(Pulverisette 6, FRITSCH GmbH, Ger.)를 가지고

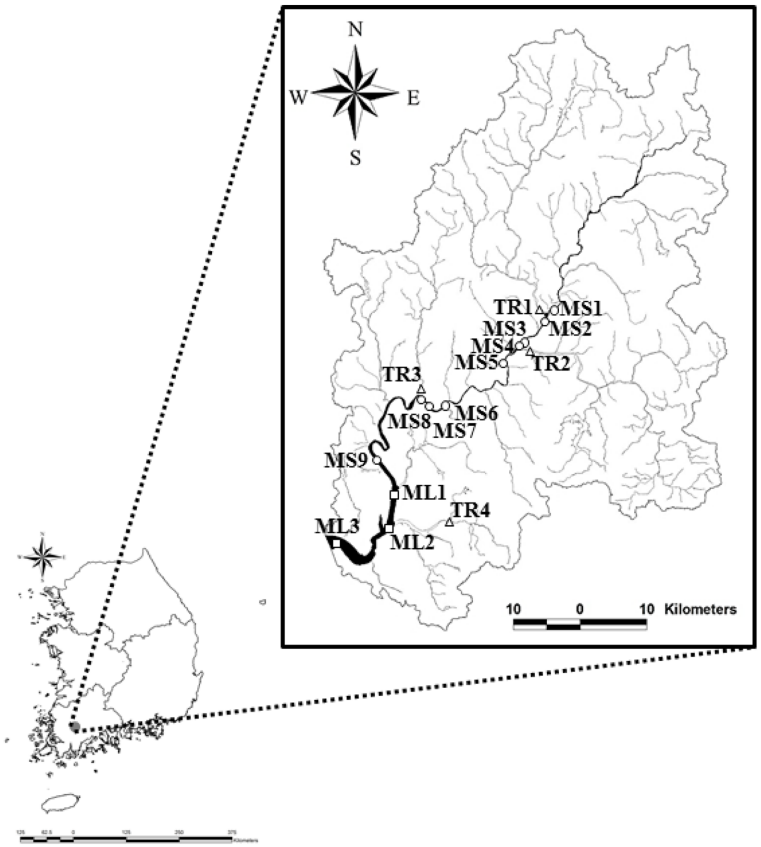

Fig. 1. Map showing the sampling sites of surface sediments in the Yeongsan River.

0.063 mm 미만이 되도록 분쇄한 후 금속류 분석을 위한 전처리용 시료로 사용하였다. 금속류 분석을 위한 전처리는 건조된 시료에 혼합산(HNO_3:$HClO_4$:HF=2:1:2)을 가하여 흑연블럭을 이용하여 130°C에서 완전히 분해가 될 때까지 가열하였다. 완전히 분해된 시료는 2% 질산(HNO_3) 용액 20 mL을 가하여 용해시켜 분석에 사용하였다.[32)]

2.3. 입도 및 금속류 분석

입도 분석은 전처리가 완료된 시료를 입도분석기(S 3500 Extended, Microtrac, USA)를 이용하여 입자 크기에 따라 구분하였고, 모래는 2 mm 미만~0.063 mm 이상, 미사는 0.063 mm 미만~0.004 mm 이상 그리고 점토는 0.004 mm 미만으로 분류하였다. 금속류 항목들 중 Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Al 및 Li은 유도결합플라즈마 원자발광분광기(700S, Agiletn, USA)를 이용하였고, As와 Cd은 유도결합플라즈마 질량분석기(7900, Agilent, USA)로 측정하였다. Hg은 수은분석기(Hydra II_C, Teledyne, USA)로 측정하였다. [32)]

2.4. 금속류 오염도 평가

퇴적물의 금속류 오염도 평가는 저서생물에 대한 위해성을 평가하는 것으로 국내외 담수 퇴적물 기준과 비교 검토하였다(Table 1). 비교 평가에 이용된 국외 기준은 Persaud(1993)와 Smith 등(1996)에 의해 제시된 품질 가이드라인(Sediment Quality Guidelines, SQGs) 및 품질 평가 기준(Sediment Quality Assessment Values, SQAVs)으로 담수 퇴적물에 대한 잠정 권고기준이며, SQGs 및 SQAVs 경우는 각각 미국 뉴욕과 뉴저지 및 캐나다 온타리오주 그리고 미국 텍사스와 캐나다 연방정부 환경각료회(Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME)에서 활용되고 있다.[33,34)] 국내 기준은 환경부 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)에 의한 “하천·호소 퇴적

Table 1. Comparison between international and domestic environmental standards for sediments

Metals (mg/kg)	SQGs[1]		SQAVs[2]		SPAS[3]			
	LEL	SEL	TEL	PEL	I	II	III	IV
Pb	31	250	35	91.3	≤ 59	≤ 154	≤ 459	> 459
Zn	120	820	123	315	≤ 363	≤ 1,170	≤ 13,000	> 13,000
Cu	16	110	35.7	197	≤ 48	≤ 228	≤ 1,890	> 1,890
Cd	0.6	10	0.596	3.53	≤ 0.4	≤ 1.87	≤ 6.09	> 6.09
Hg	0.2	2	0.174	0.486	≤ 0.07	≤ 0.67	≤ 2.14	> 2.14
As	6	33	5.9	17	≤ 15	≤ 44.7	≤ 92.1	> 92.1
Cr	26	110	37.3	90	≤ 112	≤ 224	≤ 991	> 991
Ni	16	75	18	36	≤ 40	≤ 87.5	≤ 330	> 330

[1]LEL (Lowest Effect Level) and SEL (Severe Effect Level) of Sediment Quality Guidelines by Persaud (1993), [2]TEL (Threshold Effect Level) and PEL (Probable Effect Level) of Sediment Quality Assessment Values by Smith (1996), [3]Class of sediment pollution assessment standard by National Institute of Environmental Research of Korea (2015). Class I: Status of sediment 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.

물의 오염평가 기준"과 비교 평가하였다.[35)]

퇴적물 내 금속류의 인위적인 오염에 대한 영향 평가는 지각 기원 및 배경 지역의 금속류 농도로부터 지구축적지수(Index of geoaccumulation, I_{geo}), 농축지수(Enrichment factor, EF), 오염지수(Contamination factor, CF) 및 오염부하지수(Pollution Load Index, PLI)의 4가지 방법을 이용하여 확인하였다. 본 연구에서 사용된 지각 기원의 보존성 원소는 Al, Li, Fe, Mn 및 Rb 등이 있으나 상대적으로 농도가 높고 편차가 적은 Li를 사용하였고, 배경 농도는 국립환경과학원에 의해 제시된 Pb (38.1 mg/kg), Zn (137 mg/kg), Cu (26.5 mg/kg), Cr (73.8 mg/kg), Ni (27.2 mg/kg), Li (37.5 mg/kg), As (14.9 mg/kg), Cd (0.4 mg/kg), Hg (0.065 mg/kg)을 활용하였다.[36)]

I_{geo}는 금속류의 상대적인 농축정도를 나타내는 방법으로 각 금속류의 농도(Cn)와 지각 기원 영향 보정상수 1.5를 곱한 배경농도(Bn)로부터 다음 식 $I_{geo}=\log_2(C_n/1.5\times B_n)$에 의해 계산하였다. 계산된 I_{geo} 값이 0 이하는 비오염, 0~1은 비오염에서 보통 오염, 1~2는 보통 오염, 2~3은 보통 오염에서 강한 오염, 3~4는 강한 오염, 4~5는 강한 오염에서 매우 강한 오염, 5 이상은 매우 강한 오염으로 구분된다.[37)]

EF는 지각원소의 상대적인 함량 변화로부터 각 금속류의 농축정도를 나타내는 방법으로 입도 영향을 배제하기 위해 다음 식 $EF=[(C_M/Li)_{sample}]/[(C_M/Li)_{background}]$에 의해 계산하였다. $(C_M/Li)_{sample}$은 퇴적물 시료의 금속류과 보존성 원소(Li)의 농도 비이며, $(C_M/Li)_{background}$는 배경 시료의 금속류와 보존성 원소(Li)의 농도 비를 의미한다. 계산된 EF 값이 0.5~1.5는 자연 풍화 과정에 의한 오염되지 않은 수준이며, 1.5(또는 2) 이상은 지각기원이 아닌 대기 또는 하천을 통한 외부 유입에 의한 인위적인 오염으로 구분된다.[38-40)]

CF는 금속류의 오염 수준을 평가하는 방법으로 각 금속류의 농도(C_{sample})와 배경농도($C_{background}$)로부터 다음 식 $CF=(C_{sample}/C_{background})$에 의해 계산하였다. 계산된 CF 값이 1미만은 낮은 오염, 1~3은 보통 오염, 3~6은 상당한 오염, 6이상은 매우 높은 오염으로 구분된다.[41)]

PLI는 분석된 금속류 전체의 오염도를 종합적으로 평가하는 방법으로 각각의 금속류에 대한 CF로부터 다음 식 $PLI=(CF_1\times CF_2\times CF_3\times\ldots\times CF_n)^{1/n}$에 의해 계산하였다. 계산된 값이 1이하는 오염이 없는 상태이나 1 이상은 오염된 상태로 구분된다. 반면, I_{geo}, EF 및 CF는 PLI와 다르게 각각의 금속류 항목에 대한 오염도를 평가하는데 이용된다.[42,43)]

3. 결과 및 고찰

3.1. 입도 분포

영산강 수계에 위치한 하천 및 하구역을 대상으로 2015년부터 2016년까지 2년 동안 조사된 표층 퇴적물의 평균 입도 함량은 점토, 미사 및 모래로 구분하여 Fig. 2에 나타내었다.

하천의 본류와 지류 및 하구역들에 대한 전 지점의 평균 입도 함량은 점토 2.7%, 미사 30.3%, 모래 67.0% 순으로 모래 비중이 높게 나타났으나, 본류 지점들은 점토 1.9%, 미사 27.2%, 모래 70.9%, 지류 지점들은 점

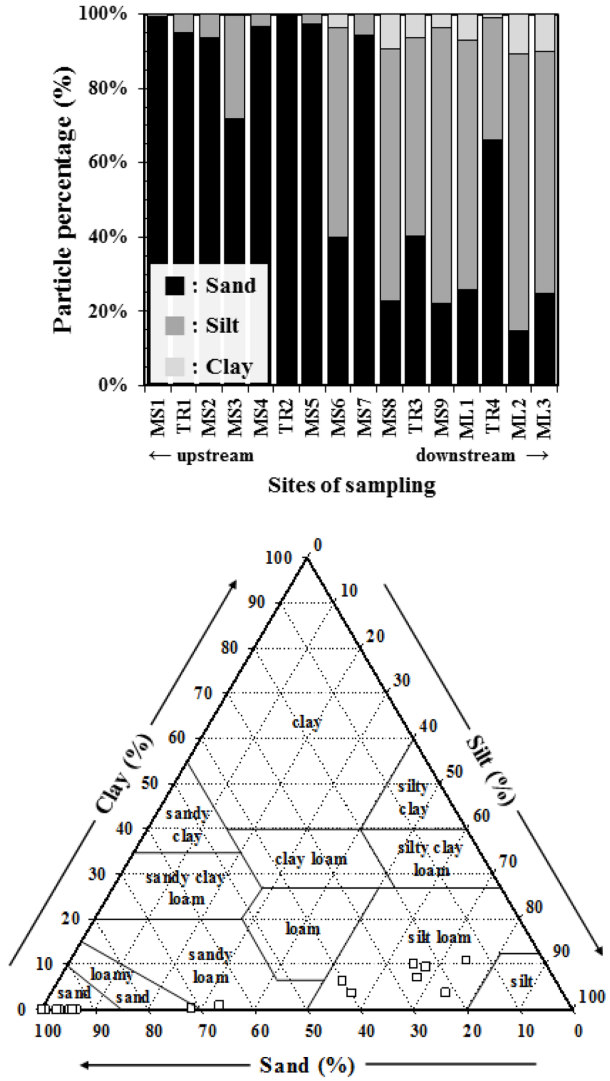

Fig. 2. The distribution of particle size (above) and ternary diagram of particle size (below) in surface sediments collected from the Yeongsan River and its tributaries and estuary.

토 1.9%, 미사 22.8%, 모래 75.3%, 하구역 지점들은 점토 9.4%, 미사 68.8%, 모래 21.8%였다. 조사대상 구간의 하천 및 하구역을 상류(MS1~MS7) 및 하류(MS8~ML3)로 구분하여 지점별 평균 입도 함량을 살펴보면, 상류의 경우 MS3 및 MS6 지점을 제외한 점토 함량은 모든 지점에서 확인되지 않았고, 미사는 0.0~6.5%, 모래는 93.5~100% 범위였고, 하류의 경우 점토 함량은 1.1~10.9%, 미사는 32.9~74.5%, 모래는 14.7~66.1% 범위로 조사되었다. 특히, 보가 설치된 MS3 및 MS6 지점은 각각 점토 0.4%, 미사 27.9%, 모래 71.8% 및 점토 3.7%, 미사 56.5%, 모래 39.9%로 상류의 다른 지점들보다 점토+미사 함량이 높게 나타났으나, MS6 지점은 하류 지점들과 비슷한 분포 특성을 보였다.

지점별 표층 퇴적물의 입도 유형을 Folk(1968)에 의해 제시된 삼각다이어그램 방법으로 평가한 결과,[44] 상류 지점들은 대부분 모래였으나 보가 설치된 MS3와 MS6 지점의 경우 각각 양질사토와 미사양토로 나타났고, 하류 지점들은 양질사토인 TR4 지점을 제외하고 모든 지점들에서 미사양토 특성이 나타났다. 이와 같은 결과는 하천정비사업 전(1996~2002년)과 후(2013년)에 영산강

수계에서 조사된 오(2002)와 신 등(2015)의 연구 결과인 퇴적물의 입도 유형들과 비슷하게 나타났다.[15,45] 특히, 신 등(2015)은 하천정비사업 전후의 결과를 통계적으로 비교 평가한 후 퇴적물의 세립화가 일부 진행되고 있음을 보고하였다.[15] 하지만 본 연구 결과에 의하면, 보가 설치된 지점(MS3, MS6)과 하류 지점(MS8~ML3)들의 점토와 미사 함량은 신 등(2015)에 의한 결과보다 낮게 평가되었다.[15] 이러한 것은 퇴적물 채취지점과 채취방법 등 조사방법에 의한 차이로 판단되나 향후 지속적인 연구를 통해 퇴적환경 변화에 대한 평가가 필요하리라 생각된다.

이상의 결과로부터, 보가 설치된 지점과 하류 지점들에서 퇴적물의 입도는 다른 지점들보다 점토와 미사 비율이 상대적으로 높아 비교적 세립한 퇴적 특성이 나타났고, 이러한 것은 인공적인 보와 하굿둑의 설치로 유속이 감소되어 체류시간이 길어지고, 또한 하류의 경우 완만한 하상의 경사가 퇴적 발생에 영향을 주었기 때문이라 생각된다. 최근 남한강, 금강 및 낙동강에서 보를 대상으로 조사한 결과에서도 퇴적물의 입도 중 점토와 미사 비율이 증가하는 것으로 보고하였다.[18-23,46]

3.2. 금속류 농도 분포

영산강 수계에 위치한 하천 및 하구역을 대상으로 2015년부터 2016년까지 2년 동안 조사된 표층 퇴적물에 대한 금속류 평균 농도의 분포 특성은 항목별 및 지점별로 구분하여 Fig. 3에 나타내었다.

하천의 본류와 지류 및 하구역을 대상으로 금속류 10종(Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, As, Cr, Ni, Li, Al)을 분석한 결과, 전 지점의 평균 농도는 각각 29.6±9.2 mg/kg, 163±82 mg/kg, 32.0±16.8 mg/kg, 0.253±0.128 mg/kg, 0.0674±0.0421 mg/kg, 7.27±2.04 mg/kg, 47.2±13.7 mg/kg, 19.7±4.4 mg/kg, 55.6±14.8 mg/kg 및 8.99±1.61%이었고, 이들 농도들은 Hg<Cd<As<Ni<Pb<Cu<Cr<Li<Zn<Al 순으로 높게 나타났다. 신 등(2015)은 2013년에 본 연구와 유사한 지점들로부터 표층 퇴적물을 조사하였는데,[15] 이들 금속류들의 평균 농도(Hg, As 제외)는 각각 26.1 mg/kg, 85.6 mg/kg, 13.5 mg/kg, 0.0368 mg/kg, 36.6 mg/kg, 18.3 mg/kg, 46.2 mg/kg 및 7.64%로 보고하였다. 본 연구 결과를 이들 금속류 농도와 비교해보면, Pb, Cr, Ni, Li 및 Al 농도들은 유사하였으나, Zn와 Cu는 약 2배, Cd은 약 7배 정도 높았다.

지점별 금속류 평균 농도의 경우, Pb와 Cd은 MS3에서 각각 44.1±10.1 mg/kg와 0.415±0.065 mg/kg, Zn와 Cu는 MS2에서 각각 293±100 mg/kg와 62.4±22.2 mg/kg, Hg은 MS1에서 0.139±0.040 mg/kg, As는 ML1에서 10.3±2.1 mg/kg, Cr, Ni 및 Li은 ML2에서 각각 66.5±2.6 mg/kg, 28.5±2.4 mg/kg, 84.5±0.3 mg/kg 그리고 Al은 TR1에서 10.6±0.9%로 가장 높았다. 전반적인 금속류 분포 특성은 상류에서 Pb, Zn, Cu, Cd, Hg의 농도가 높은 반면에 하류에서 As, Cr, Ni, Li의 농도가 높게 나타났으며, Al의 경우는 상하류 간에 큰 차이가 없었다. 이들의 농도들은 상류의 MS2~MS3 지점과 하류의 ML1~ML3 지점들에서 가장 높았고, 나머지 지점들은 대부분 비슷한 분포 특성을 보였다. 또한 본류와 지류를 비교해보면, Pb, Zn, Cu, Cd, Hg 농도들은 본류에서 높아 상대적으로 큰 차이를 보인 반면 As, Cr, Ni, Li, Al 농도들은 서로 비슷하게 나타났다. 특히, Hg 농도의 경우는 다른 금속류들과 달리 상류인 MS1 지점에서 가장 높게 나타났으며, 이러한 농도는 본류 중 상류에서 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보여 상류에 존재하는 점오염원의 영향을 받는 것으로 생각된다.

일반적으로, 금속류 중 Pb, Zn, Cu, Cd 및 Hg은 퇴적물에서 대표적인 오염형 금속으로 알려져 있으며,[47] 이들은 인구가 밀집된 지역과 산업공단 등에서 배출된 생활하수와 산업폐수로부터 퇴적물에 인위적인 오염을 유발할 수 있다고 많은 연구자들에 의해 보고되었다.[10,48] 그리고 영산강 수계를 대상으로 조사된 선행 연구에 의하면, 이러한 금속류들은 산업공단과 도심하천 등 점오염원의 영향을 받는 지점들에서 다른 지점들보다 대부분 높게 검출되었다고 보고하였는데 본 연구에서도 같은 경향을 보였다.[10,49-51]

3.3. 상관성 평가

영산강 수계에 위치한 하천 및 하구역을 대상으로 2015년부터 2016년까지 2년 동안 조사된 표층 퇴적물 중 입도와 금속류 평균 농도들 사이 상관성 평가는 SPSS 21로 상관계수(Pearson's correlation coefficient, r)를 산출하여 Table 2에 나타내었다.

입도와 금속류 10종(Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, As, Cr, Ni, Li, Al)에 대한 상관성 평가는 피어슨 상관계수 방법에 의해 산출된 절대값을 상관관계가 없거나 무시해도 될 수준($r<0.2$), 약한 상관관계($0.2<r<0.4$), 보통 상관관계($0.4<r<0.6$) 및 강한 상관관계($0.6<r<1.0$)로 구분하여 확인하였다.[52]

입도와 금속류 10종(Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, As, Cr,

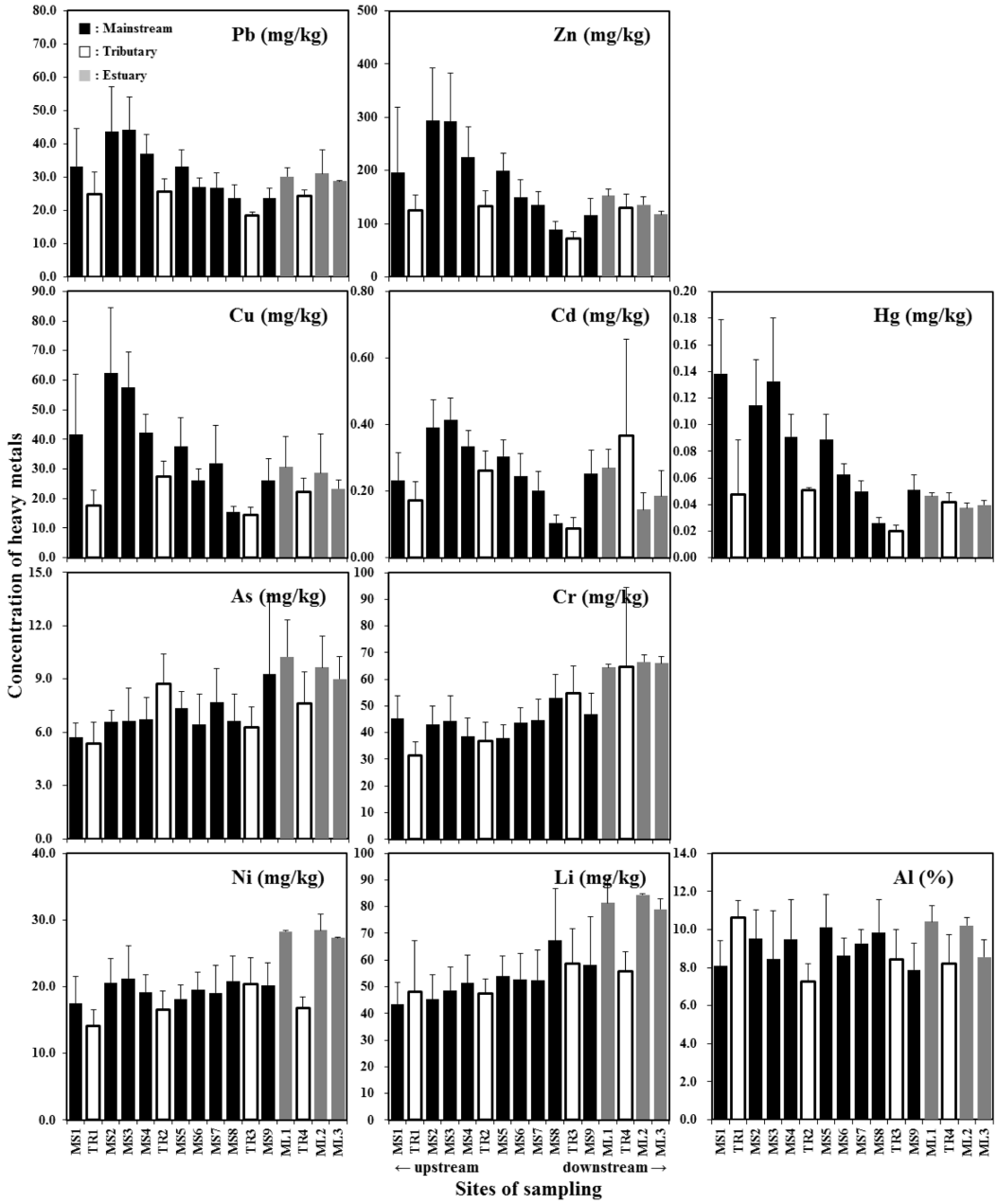

Fig. 3. The concentration distribution of heavy metals in surface sediments collected from the Yeongsan River and its tributaries and estuary.

Ni, Li, Al)에 대하여 상관성을 평가한 결과, 금속류 중 Pb, Zn, Cu, Cd 및 Hg 항목은 모래 및 미사+점토와 각각 약한에서 보통 수준의 양(0.379~0.585) 또는 음의 상관관계(0.349~0.629)를 보인 반면에 Cr, Ni 및 Li은 각각 강한 음(0.722~0.817) 또는 강한 양의 상관관계(0.703~0.905)로 확인되었고, As인 경우는 각각 음(0.529) 또는 양의 상관관계(0.496~0.526)가 나타났다. 금속류 항목들 간에 비교한 결과, 이들 상관 특성은 오염형(Pb, Zn, Cu, Cd 및 Hg) 및 지각 기원(As, Cr, Ni 및 Li) 금속들의 두 그룹으로 나누어 나타났고, 상관계수는 각

Table 2. Correlation coefficients of particle size and heavy metals in surface sediments of the Yeongsan River

	Sand	Silt	Clay	Pb	Zn	Cu	Cd	Hg	As	Cr	Ni	Al	Li
Sand	1.000												
Silt	-0.998**	1.000											
Clay	-0.907**	0.881**	1.000										
Pb	0.379	-0.378	-0.349	1.000									
Zn	0.513*	-0.502*	-0.542*	0.967**	1.000								
Cu	0.475	-0.465	-0.498*	0.953**	0.973**	1.000							
Cd	0.460	-0.430	-0.629**	0.721**	0.815**	0.767**	1.000						
Hg	0.585*	-0.573*	-0.614*	0.839**	0.896**	0.884**	0.678**	1.000					
As	-0.529*	0.526*	0.496	-0.119	-0.248	-0.147	-0.029	-0.402	1.000				
Cr	-0.743**	0.729**	0.767**	-0.210	-0.358	-0.296	-0.233	-0.446	0.588*	1.000			
Ni	-0.722**	0.703**	0.790**	0.151	-0.057	0.022	-0.184	-0.224	0.692**	0.756**	1.000		
Al	-0.066	0.046	0.208	0.160	0.066	-0.005	-0.170	-0.124	-0.010	0.027	0.263	1.000	
Li	-0.817**	0.793**	0.905**	-0.233	-0.439	-0.399	-0.436	-0.582*	0.723**	0.819**	0.880**	0.362	1.000

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

각 0.678~0.973 및 0.588~0.880 범위를 보였는데 이는 많은 연구자들에 의해 보고된 퇴적물 연구 결과들과 비슷하게 나타났다.[10,11,15,17-22,45,48-51)]

퇴적물 중 금속류는 일반적으로 퇴적물의 입도, 유기물, 산화물, 주변 지역의 점토광물 등과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며,[53-58)] 또한 이들은 입도의 세립화가 증가함에 따라 영향을 받는다고 보고되었다.[50,51)] 하지만, 본 연구에서는 지각 기원 금속들에서 입도들과 강한 상관성이 나타난 반면 오염형 금속들에서 미약한 상관 특성을 보였으며, 특히 상류 MS2~MS3 지점들은 입도 중 미사와 점토 함량이 낮음에도 불구하고 오염형 금속류들의 농도가 다른 지점들에 비해 상대적으로 높게 조사되었다(Fig. 3). 따라서, 이러한 금속류들의 특성은 입도보다 다른 인위적인 요인이 더 지배적으로 영향을 받았다는 한산거제만 및 울산항 주변의 퇴적물로부터 조사된 연구들과 비슷하게 나타났고,[48,59)] 또한 영산강 수계에서 조사된 연구들에서도 생활하수 등에 의한 유기물의 영향이 크게 작용하였다고 보고되었다.[10,50,51)]

3.4. 중금속 오염도 평가

영산강 수계에 위치한 하천 및 하구역을 대상으로 2015년부터 2016년까지 2년 동안 조사된 표층 퇴적물에 대한 금속류 농도들을 국외 및 국내의 기준들과 비교 평가하여 Table 3에 나타내었다.

국외 기준인 SQGs는 퇴적물 중의 금속류 농도가 저서생물에 대한 독성 영향이 관찰되지 않는 수준(Lowest Effect Level, LEL)과 뚜렷한 영향으로 오염이 관찰될 수 있는 수준(Severe Effect Level, SEL)으로 구분되며, 또한 SQAVs도 저서생물의 악영향이 발생하지 않을 것으로 예상되는 수준(Threshold Effect Level, TEL)과

Table 3. Comparison between sediment criteria (SQGs, SQAVs and SPAS) and average concentration of heavy metals detected in the surface sediments of the Yeongsan River (presented as the percentage of the number of sites which fail the criteria over the total number of sites)

Metals (mg/kg)	SQGs			SQAVs			SPAS				Concentration of this study	
	< LEL	≥ LEL < SEL	≥ SEL	< TEL	≥ TEL < PEL	≥ PEL	I	II	III	IV	Aver±SD	Range
Pb	62.5	37.5	0	81.3	18.8	0	100	0	0	0	29.6±9.2	18.4-44.1
Zn	25.0	75.0	0	25.0	75.0	0	100	0	0	0	163±82	71.5-293
Cu	12.5	87.5	0	68.8	31.3	0	87.5	12.5	0	0	32.0±16.8	14.6-62.4
Cd	100	0	0	100	0	0	93.8	6.3	0	0	0.253±0.128	0.0875-0.415
Hg	100	0	0	100	0	0	68.8	31.3	0	0	0.0674±0.0421	0.0203-0.139
As	12.5	87.5	0	12.5	87.5	0	100	0	0	0	7.27±2.04	5.35-10.3
Cr	0	100	0	12.5	87.5	0	100	0	0	0	47.2±13.7	31.5-66.5
Ni	6.3	93.8	0	25.0	75.0	0	100	0	0	0	19.7±4.4	14.1-28.5

빈번하게 발생할 것으로 예상되는 수준(Probable Effect Level, PEL)으로 분류한다. 그리고 국내 기준인 경우는 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없는 I등급, 독성이 나타날 가능성이 있는 II등급, 독성이 나타날 가능성이 비교적 높은 III등급, 독성이 나타날 가능성이 매우 높은 IV등급으로 4단계로 구분한다.

전체 16개 지점으로부터 조사된 금속류 농도들을 국외 기준들인 SQGs 및 SQAVs와 비교 평가한 결과, 8종의 모든 금속류들은 전 지점들에서 SEL 및 PEL 수준으로 평가되어 독성 영향이 없는 것으로 확인되었다. 하지만 6종의 금속류들(Pb, Zn, Cu, As, Cr, Ni)은 일부 지점들에서 LEL과 SEL 및 TEL과 PEL 수준의 범위 내로 조사되어 오염 정도가 미약하거나 악영향이 발생할 가능성이 내포하고 있음을 암시하였으나, Cd 및 Hg은 전 지점들에서 LEL 및 TEL 수준 이하로 악영향이 나타날 가능성이 거의 없는 것으로 평가되었다. 또한 국내 기준과 비교한 경우에서도 대부분 금속류들이 전 지점에서 I등급으로 저서생물에 대한 독성이 나타날 가능성이 거의 없는 것으로 평가되었지만, Cu, Cd 및 Hg은 전 지점 중에서 극히 일부 상류의 본류 지점들에서만 각각 12.5%(2개 지점, MS2~MS3), 6.3% (1개 지점, MS3) 및 31.3%(5개 지점, MS1~MS5)정도 II등급으로 평가되어 독성이 나타날 가능성이 확인되었으나 향후 독성시험을 통한 검증이 필요할 것이라 판단된다.

퇴적물 내 금속류에 의한 인위적인 오염도 평가는 I_{geo}, EF, CF 및 PLI 방법에 의해 평가하여 Fig. 4와 5에 나타내었다. I_{geo} 평가에 의하면, 8종의 모든 금속류들은 대부분 지점에서 0 이하로 비오염 수준으로 나타났으나, Zn, Cu 및 Hg은 상류의 본류 일부 지점들에서만 1 이하로 보통 오염 수준이 확인되었고, 지점들은 각

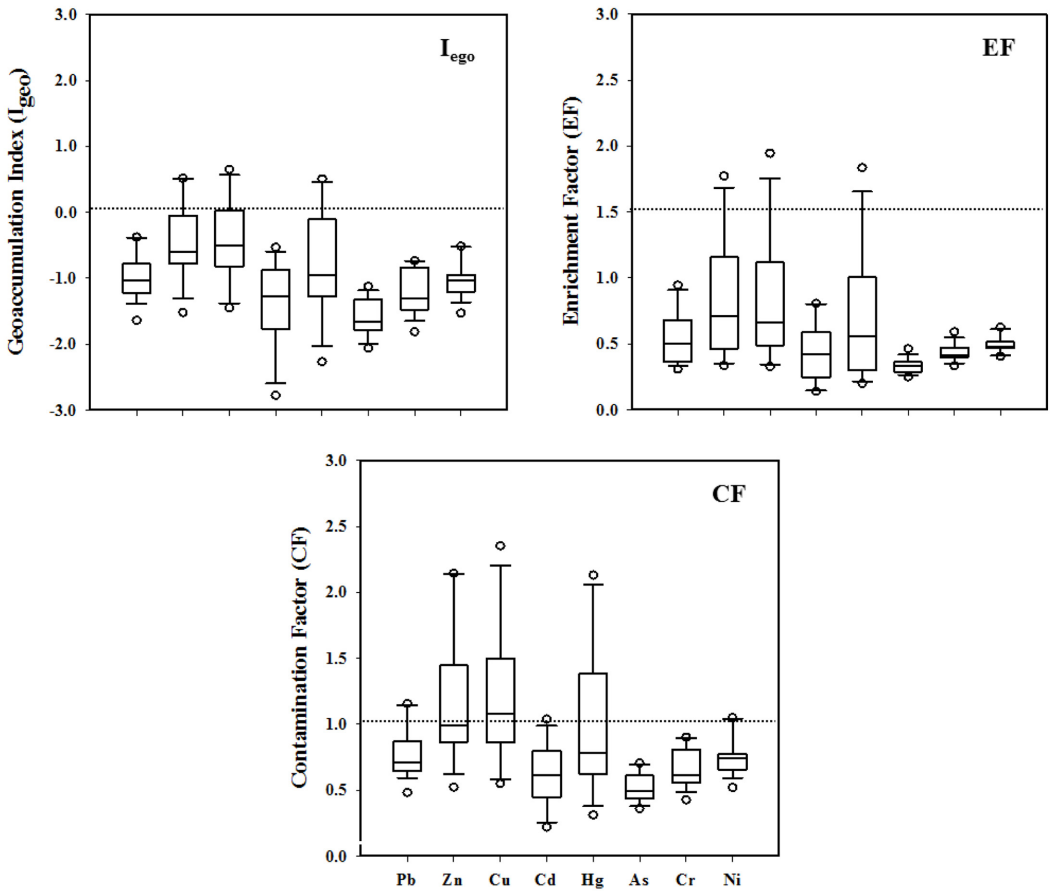

Fig. 4. Box-and-whisker plots for the geoaccumulation index (I_{ego}), enrichment factor (EF) and contamination factor (CF) of heavy metals in surface sediments collected from the Yeongsan River and its tributaries and estuary.

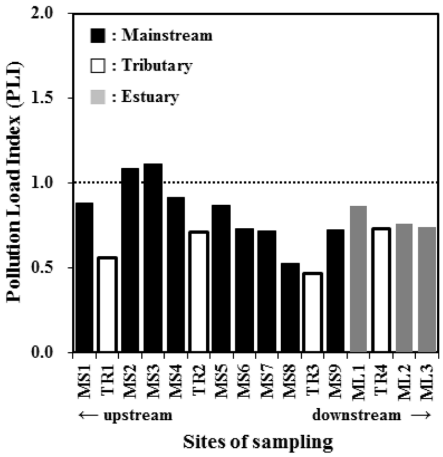

Fig. 5. The distribution of pollution load index (PLI) in surface sediments collected from the Yeongsan River and its tributaries and estuary.

각 MS2~MS4, MS1~MS4 및 MS1~MS3이었다. 또한 EF 평가에서도 I_{ego}와 마찬가지로 8종의 모든 금속류들이 대부분 지점에서 1.5 이하로 오염되지 않은 수준으로 나타난 반면 Zn와 Cu의 경우 MS2와 MS3 및 Hg의 경우 MS1과 MS3 지점들에서 1.5 이상의 인위적인 오염으로 평가되었다. CF 방법에 의한 평가 결과, As와 Cr은 전 지점에 낮은 오염으로 나타난 반면에 나머지 금속류들은 대부분 낮은 오염에서 보통 오염으로 평가되었다. 보통 오염으로 확인된 금속류들의 경우, Pb는 MS2와 MS3 지점, Zn는 MS1~MS6과 ML1 지점, Cu는 MS1~MS5, MS7, ML1~ML2 및 TR2 지점, Cd은 MS3 지점, Hg은 MS1~MS5 지점 그리고 Ni은 ML1~ML3 지점에서만 나타났다. 또한, 금속류 전체의 오염도를 종합적으로 평가하기 위해 분석된 금속류 8종의 CF로부터 PLI를 평가한 결과, 조사된 지점들은 대부분 1 이하로 금속류에 의한 인위적인 오염이 없는 상태로 나타났으나, 상류의 본류에 위치한 MS2와 MS3 지점에서 1 이상으로 오염된 상태로 확인되었다.

종합적으로, 영산강 수계의 금속류 오염도는 8종의 금속류들 중에서 Zn, Cu 및 Hg 항목이 가장 높게 평가되었고, 본류 구간의 지점들 중에서는 생활하수와 도심하천 등으로 인위적인 오염의 영향이 많은 상류의 하천들에서 높은 특성을 보였다. 이러한 것들은 오염도가 높은 지점들 주변에 거주 인구가 많고 하수처리장 및 산업공단 등의 점오염원들이 밀집되어 있었기 때문이라 판단되나 저서생물에 대한 독성이 나타날 가능성이 매우 낮아 심각하게 우려할 수준이 아니라고 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 영산강 수계 표층 퇴적물 중 금속류들의 농도 분포와 오염도를 평가하기 위하여 입도와 금속류 10종(Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, As, Cr, Ni, Li, Al)을 분석하였다. 금속류들의 오염도 평가는 퇴적물의 국내외 환경기준과 비교하였고, 그리고 I_{geo}, EF, CF 및 PLI의 4가지 방법을 이용하여 인위적인 오염도를 확인하였다. 입도 분포는 상류와 하류로 구분하여 모래와 양질사토가 우세하였으나, 상류에 보가 설치된 MS3와 MS6 지점의 경우 각각 양질사토와 미사양토로 나타났다. 금속류들의 농도 분포는 상류에서 Pb, Zn, Cu, Cd, Hg가 높은 반면 하류에서 As, Cr, Ni, Li이 높았다. 상관성 평가 결과, 지각기원의 금속류(As, Cr, Ni, Li)들은 입도들과 강한 상관관계를 보인 반면 오염형 금속류(Pb, Zn, Cu, Cd, Hg)들은 약하게 나타났다. 금속류 농도들을 국내외 환경기준과 비교한 결과, 대부분의 금속류들은 전 지점들에서 저서생물에 대한 독성 악영향이 거의 없는 것으로 평가되었다. 또한 I_{geo}, EF 및 CF 방법에 의한 인위적인 오염도 평가에서도 대부분 지점들에서 영향이 없는 것으로 나타났으나 일부 지점들에서 낮은 오염 수준이 확인되었다. PLI 방법에 의하면, 상류에 위치한 MS2와 MS3 지점은 인위적인 오염의 영향을 받는 것으로 평가되었다. 본 연구로부터, 영산강 수계의 금속류 오염도는 상류에 위치한 하천들에서 Zn, Cu 및 Hg 항목이 가장 높게 평가되어 주변에 생활하수와 도심하천 등의 인위적인 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. F. Çevik, M. Z. L. Göksu, O. B. Derici, and Ö. Findik, “An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses”, *Environmental Monitoring and Assessment*, **2009**, 152, 309-317.
2. H. Feng, H. Jiang, W. Gao, M. P. Weinstein, Q. Zhang, W. Zhang, L. Yu, D. Yuan, and J. Tao, “Metal contamin-

ation in sediments of the western Bohai Bay and adjacent estuaries, China", *Journal of Environmental Management*, **2011**, 92, 1185-1197.
3. C. Hernandez-Crespo and M. Martín, "Determination of background levels and pollution assessment for seven metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Mn) in sediments of a Mediterranean coastal lagoon", *Catena*, **2015**, 133, 206-214.
4. B. Keshavarzi, Z. Mokhtarzadeh, F. Moore, M. R. Mehr, A. Lahijanzadeh, S. Rostami, and H. Kaabi, "Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Karoon River, Khuzestan Province, Iran", *Environmental Science and Pollution Research*, **2015**, 22, 19077-19092.
5. Z. Sun, X. Mou, C. Tong, C. Wang, Z. Xie, H. Song, W. Sun, and Y. Lv, "Spatial variations and bioaccumulation of heavy metals in intertidal zone of the Yellow River estuary, China", *Catena*, **2015**, 126, 43-52.
6. F. Xu, L. Qiu, Y. Cao, J. Huang, Z. Liu, X. Tian, A. Li, and X. Yin, "Trace metals in the surface sediments of the intertidal Jiaozhou Bay, China: Source and contamination assessment", *Marine Pollution Bulletin*, **2016**, 104, 371-378.
7. M. Chabukdhara and A. K. Nema, "Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: A chemometric and geochemical approach", *Chemosphere*, **2012**, 87, 945-953.
8. V. M. Dekov, Z. Komy, F. Araújo, A. Van Put, and R. Van Grieken, "Chemical composition of sediments, suspended matter, river water and ground water of the Nile (Aswan-Sohag traverse)", *Science of Total Environment*, **1997**, 201, 195-210.
9. B. J. Alloway, I. Thornton, G. A. Smart, J. C. Sherlock, and M. J. Quinn, "Metal availability", *Science of Total Environment*, **1988**, 75, 41-69.
10. 조영길, 김주용, "영산강 하상퇴적물의 중금속 함량", *한국환경과학회지*, **1998**, 7, 281-290.
11. 정희호, 김동우, Nguyen Hoang Lam, 최태봉, 조현서, "한국 남서해 환경보전해역의 표층퇴적물 내 중금속 오염", *한국환경분석학회지*, **2017**, 20, 93-99.
12. H. M. V. M. Soares, R. A. R. Boaventura, A. A. S. C. Machado, and J. C. G. Esteves da Silva, "Sediment as monitors of heavy metal contamination in the Ave river basin (Portugal): Multivariate analysis of data", *Environmental Pollution*, **1999**, 105, 311-323.
13. V. G. Caccia, F. J. Millero, and A. Palanques, "The distribution of trace metals in Florida Bay sediments", *Marine Pollution Bulletin*, **2003**, 46, 1420-1433.
14. 나공태, 김은수, 김종근, 김경태, 이정무, 김의열, "시화호 코어 퇴적물 내 미량금속 분포 특성 및 오염 평가", *한국해양과학기술원*, **2013**, 35, 69-83.
15. 신상은, 윤석태, 고영구, 오강호, "영산강 유역 하상퇴적물의 지화학적 특성과 환경 변화", *한국지형학회지*, **2015**, 22, 31-42.
16. 김휘중, 양재의, 이재영, 전상호, "폐광산 지역 옥동천 퇴적물내에 포함된 중금속의 존재형태 및 이동성", *한국지하수토양환경학회지*, **2005**, 10, 44-51.
17. 이준배, 홍선화, 김동호, 허인애, 허유정, 간종범, 오다연, 김교영, 이영준, 이수형, 신호상, "금강수계 퇴적물 중 금속류 분석 및 상관성 조사", *한국분석학회지*, **2014**, 27, 11-21.
18. 양윤모, 심무준, 오다연, 간종범, 이준배, 홍선화, 이수형, 박상진, "금강에서 보 설치 후 퇴적물 중금속 분포", *한국환경농학회지*, **2015**, 34, 64-68.
19. 김신, 김주언, 이권철, 이규열, 전혜린, 유재정, 이인정, 안정민, "낙동강 수계 표층 퇴적물의 중금속 분포와 오염도", *한국환경과학회지*, **2015**, 24, 969-980.
20. 김신, 이권철, 김주언, 정강영, 안정민, 김형근, 이인정, 신동석, 양득석, "낙동강 본류에 분포하는 표층 퇴적물의 지화학적 특성 변화", *한국환경과학회지*, **2017**, 26, 311-324.
21. 김신, 안정민, 정강영, 이권철, 권헌각, 신동석, 양득석, "하천 퇴적물 내 중금속 오염도 평가에 관한 연구(낙동강 수계 표층 퇴적물을 대상으로)", *한국물환경학회지*, **2017**, 33, 460-473.
22. 양윤모, 오다연, 김대현, 이대희, 길기범, 조윤해, 이혜리, 천세억, 채민희, "금강수계 보구간 표층퇴적물 오염도 평가", *한국환경분석학회지*, **2018**, 21, 125-138.
23. 안정민, 임태효, 김성민, 이상수, 김신, 이권철, 김용석, 양득석, "낙동강 강정고령보 상류 퇴적물 측정망 지점의 중금속 오염도 및 대표성 평가", *한국환경과학회지*, **2018**, 27, 477-488.
24. W. Calmano and U. Förstner, "Sediments and toxic substances: Environmental effects and ecotoxicity", **1996**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
25. A. Farkas, C. Erratico, and L. Viganò, "Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po", *Chemosphere*, **2007**, 68, 761-768.
26. G. Bartoli, S. Papa, E. Sagnella, and A. Fioretto, "Heavy metal content in sediments along the Calore River, *Journal of Environmental Management*, **2012**, 95, S9-S14.
27. A. M. Idris, "Combining multivariate analysis and geochemical approaches for assessing heavy metal level in sediments from Sudanese harbors along the Red Sea coast", *Microchemical Journal*, **2008**, 90, 159-163.
28. D. G. Cuadrado and G. M. E. Perillo, "Principal component analysis applied to geomorphologic evolution", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **1997**, 44, 411-

419.
29. J. A. Villaescusa-Celaya, E. E. Gutierrez-Galindo, and G. Flores-Munoz, "Heavy metals in the fine fraction of coastal sediments from Baja California (Mexico) and California (USA)", *Environmental Pollution*, **2000**, 108, 453-462.
30. K. Loska and D. Wiechula, "Application of principal component analysis for the estimation of source heavy metal contamination in surface sediments from Rydnik Reservoir", *Chemosphere*, **2003**, 51, 723-733.
31. 오해성, 허인애, 최정현, "영산강 퇴적물 인의 존재형태에 대한 실험실 연구", *대한환경공학회지*, **2017**, 39, 519-526.
32. 환경부, "수질오염공정시험기준-퇴적물(환경부고시 제2012-99호)", **2012**.
33. D. Persaud, R. Jaagumagi, and A. Hayton, "Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario", *Ontario Ministry of the Environment*, **1993**.
34. S. L. Smith, D. D. MacDonald, K. A. Keenleyside, C. G. Ingersoll, and L. J. Field, "A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystem", *Journal of Great Lakes Research*, **1996**, 22, 624-638.
35. 국립환경과학원, "하천·호소 퇴적물 오염평가 기준(국립환경과학원 예규 제2015)", **2015**.
36. 국립환경과학원, "하천퇴적물 배경농도 산정 연구", **2011**.
37. G. Müller, "Schwermetalle in den sediments des Rheins Veranderungen seit 1971", *Umschan*, **1979**, 79, 778-783.
38. S. Covelli and G. Fontolan, "Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines", *Environmental Geology*, **1997**, 30, 34-45.
39. J. Zhang and C. L. Liu, "Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China - Weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **2002**, 54, 1051-1070.
40. F. Xu, Z. Liu, Y. Cao, L. Qiu, J. Feng, F. Xu, and X. Tian, "Assessment of heavy metal contamination in urban river sediments in the Jiaozhou Bay catchment, Qingdao, China", *Catena*, **2017**, 150, 9-16.
41. L. Håkanson, "An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach", *Water Research*, **1980**, 14, 975-1001.
42. 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", *Helgoländer Meeresunters*, **1980**, 33, 566-575.
43. P. S. Harikumar, U. P. Nasir, and M. P. Mujeebu Rahman, "Distribution of heavy metals in the core sediments of a tropical wetland system", *International Journal of Environmental Science and Technology*, **2009**, 6, 225-232.
44. R. L. Folk, "Petrology of sedimentary rock", **1968**, Hemphill's, Austin. Texas, 170.
45. 오강호, "영산강 유역 퇴적환경과 하천수 및 퇴적물의 오염" 전남대학교 대학원, **2002**.
46. 강민경, 최인영, 박지형, 최정현, "보 설치가 퇴적물 특성에 미치는 영향에 관한 연구", *대한환경공학회지*, **2012**, 34, 597-603.
47. U. Förstner and G. T. W. Wittmann, "Metal pollution in the aquatic environment", **1981**, Heidelberg Springer Berlin Heidelberg.
48. 황동운, 이인석, 최민규, 심정희, "한산거제만 주변 퇴적물의 유기물과 미량금속 분포 특성", *한국환경분석학회지*, **2015**, 18, 131-143.
49. 김주용, 정철환, 오강호, 고영구, 문정준, 유경아, "광주 부근 영산강과 광주천의 하상퇴적물의 중금속 오염", *한국지구과학회지*, **1999**, 20, 96-100.
50. 오강호, 김주용, 고영구, 윤석태, 신상은, 박배영, 문병찬, 김해경, "광주광역시 하천의 표층퇴적물에 대한 지구화학적 특성과 오염", *한국지구과학회지*, **2003**, 24, 346-360.
51. 오강호, 김주용, 고영구, 윤석태, 서구원, 박배영, 신상은, 김해경, "상류수계 영산강 하상퇴적물의 지화학적 특성과 오염", *한국물환경학회지*, **2005**, 21, 520-527.
52. 김범종, "SPSS/PC$^+$ 사용법과 통계분석기법 해설", **1994**, 98-99, 학현사.
53. U. Förstner and G. T. W. Wittmann, "Metal pollution in the aquatic environment", **1981**, 486, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
54. W. Salomons and U. Forstner, "Metals in the hydrocycle", **1984**, 349, Springer-Verlag, Berlin.
55. D. C. Adriano, "Trace elements in the terrestrial environment", **1986**, 533, Springer-Verlag, Berlin.
56. A. J. Horowitz, "A primer on sediment-trace element chemistry", **1991**, 136, Lewis Publishers, Chelsea (MI).
57. D. J. Huisman, F. J. H. Vermeulen, J. Baker, A. Veldkamp, S. B. Kroonenberg, and G. Th. Klaver, "A geological interpretation of heavy metal concentrations in soil and sediments in the southern Netherlands", *Journal of Geochemical Exploration*, **1997**, 59, 163-174.
58. A. Facchinelli, E. Sacchi, and L. Mallen, "Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils", *Journal of Environmental Pollution*, **2001**, 114, 313-234.
59. 황동운, 이인석, 최민규, 최희구, "울산항 주변 표층 퇴적물내 유기물과 미량금속 분포 특성 및 오염 평가", *한국환경분석학회지*, **2015**, 17, 146-160.