

2014-2023년 특별관리해역에서의 퇴적물 중금속 농도 분포 특성 및 오염도 평가

송치선¹ · 최만식^{2,†} · 이용우³ · 선철인⁴ · 박건우⁵¹충남대학교 해양환경과학과 대학원생²충남대학교 해양환경과학과 교수³해양환경공단 해양수질처 처장⁴해양환경공단 해양수질처 과장⁵해양환경공단 해양수질처 대리

Distribution and Contamination Assessment of Heavy Metals in Sediments of Special Management Sea Areas during 2014–2023

Chiseon Song¹, Mansik Choi^{2,†}, Yongwoo Lee³, Chulin Sun⁴, and Geonwoo Park⁵¹Graduate Student, Department of Marine Environmental Science,
Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea²Professor, Department of Marine Environmental Science,
Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea³Director, Marine Environment Monitoring Department,
Korea Marine Environment Corporation, Busan 49111, Korea⁴Manager, Marine Environment Monitoring Department,
Korea Marine Environment Corporation, Busan 49111, Korea⁵Assistant Manager, Marine Environment Monitoring Department,
Korea Marine Environment Corporation, Busan 49111, Korea

요 약

2014년부터 2023년까지 우리나라 특별관리해역 표층퇴적물 내 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)의 시공간적 분포 특성을 살펴보고 오염도를 평가하였다. Zn, Cu, Pb의 평균 농도는 마산만(각각 260, 59.0, 52.8 mg/kg), 부산연안(169, 61.3, 42.4 mg/kg), 울산연안(263, 91.4, 83.9 mg/kg)에서 높게 나타났으며, 이는 국내 연안 배경농도에 비해 약 2–6배 높은 수준이다. 해양환경기준 및 I_{geo} 평가에서는 울산연안과 부산연안에서 기준 초과 사례가 반복적으로 확인되었으며, 항만 및 산업시설 인접 정점에서 높은 오염도가 나타났다. 특히 울산 온산항 인근 정점에서는 일부 금속이 해양환경기준의 관리기준을 초과하였고, 중중도 이상의($I_{geo} \geq 2$)오염으로 평가되었다. 시계열 분석 결과, Cu는 해역별로 상반된 경향을 보였는데 광양만에서는 10년 평균 농도가 22.6 mg/kg에서 28.7 mg/kg으로 27.3% 증가한 반면, 울산연안에서는 142 mg/kg에서 73.2 mg/kg으로 48.3% 감소하였다. 본 연구는 10년 이상 축적된 시계열 자료를 기반으로 특별관리해역 간 중금속의 공간적·시간적 대비를 정량적으로 제시하였으며, 산업 활동과 환경관리 정책 변화가 퇴적물 중금속 농도에 차별적으로 반영될 수 있음을 보여주었다. 이러한 결과는 향후 해역별 맞춤형 오염총량관리 및 장기 모니터링 전략 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

Abstract – This study investigated the spatiotemporal distribution and contamination assessment of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn) in surface sediments of Korea’s Special Management Sea Areas from 2014 to 2023. The mean concentrations of Zn, Cu, and Pb were relatively high in Masan Bay (260, 59.0, and 52.8 mg/kg, respectively), the Busan coastal area (169, 61.3, and 42.4 mg/kg), and the Ulsan coastal area (263, 91.4, and 83.9 mg/kg), corresponding to approximately two to six times higher than background coastal sediments. Assessments based on marine sediment quality guidelines, including the Threshold Effects Level (TEL; caution level) and Probable Effects Level (PEL; management level), together with the geo-accumulation index (I_{geo}), revealed the repeated

[†]Corresponding author: mschoi@cnu.ac.kr

exceedances in the Ulsan and Busan coastal areas, particularly at stations adjacent to ports and industrial facilities. In particular, several stations near Onsan Harbor in the Ulsan coastal area exceeded the PEL for certain metals and were classified as moderately to heavily contaminated ($I_{geo} \geq 2$). Time-series analysis showed contrasting regional trends in Cu concentrations: in Gwangyang Bay, the annual mean concentration increased by 27.3%, from 22.6 mg/kg to 28.7 mg/kg during 10 years, whereas in the Ulsan coastal area it decreased by 48.3%, from 142 mg/kg to 73.2 mg/kg. This study quantitatively demonstrates spatial and temporal contrasts in heavy metal contamination among Special Management Sea Areas, indicating that industrial activities and changes in environmental management policies may be differentially reflected in sediment heavy metal concentrations. These findings provide a scientific basis for the development of region-specific pollution load management and long-term monitoring strategies.

Keywords: Metals(금속), Contamination assessment(오염도 평가), Special Management Areas(특별관리해역), Surface sediments(표층 퇴적물), I_{geo} (농집지수)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

우리나라에서는 연안 환경 보전을 위해 「해양환경관리법」 제15조에 따라 해양환경기준의 유지가 곤란한 해역을 특별관리해역으로 지정하여 관리하고 있다(KMGL[2022]). 특별관리해역은 항만, 산업단지, 하천 유입 등 다양한 오염원이 집중되는 지역으로, 국가 차원의 체계적이고 강화된 관리가 요구된다(Kim *et al.*[2022]; Lee *et al.*[2009]). 이러한 해역은 연안 생태계 보전뿐 아니라 지역사회 및 산업 활동과도 밀접하게 연계되어 있어 그 관리의 중요성이 크다(Choi *et al.*[2016]).

특별관리해역에서 주요 관리 대상 오염물질 중 하나는 중금속이다. 중금속은 자연적 풍화 과정뿐 아니라 산업활동, 도시화, 교통, 하수 및 강우유출수 등 다양한 인위적 요인에 의해 해양으로 유입된다(Jeong *et al.*[2019]). 유입된 중금속은 유기물, (수)산화물 및 광물 입자에 흡착하여 고상(solid phase)으로 전환된 후 퇴적물로 침강하며(Thornton[1983]), 장기간 축적된 뒤 재부유나 산화·환원 반응 등을 통해 재이동(remobilization)되어 수층의 잠재적 오염원으로 작용할 수 있다(Horowitz[1985]; Morse and Luther[1999]). 또한 일부 금속은 먹이사슬을 통해 생물농축되어 상위 영양단계 생물과 인간에게 영향을 미칠 수 있다(Clark[2001]). 항만 활동과 선박 방오도료 역시 연안 퇴적물 중금속의 주요 인위적 기원으로 보고된 바 있다(Turner[2010]; Birch and Taylor[1999]).

정부는 이러한 문제를 해결하기 위해 특별관리해역을 중심으로 연안오염총량관리제, 오염퇴적물 정화·복원 사업, 국가 차원의 퇴적물 조사 및 관리체계 개선 등을 추진해왔다(Lee *et al.*[2009]; Choi *et al.*[2016]; MOF[2019]). 일부 해역에서는 개선 효과가 보고되었으나, 단기적·국지적 정화에 머무르는 경우가 많으며 산업단지 및 하천을 통한 지속적 유입으로 인해 퇴적물 중금속 농도가 여전히 높은 수준을 유지하는 한계도 지적되고 있다(Cho *et al.*[2014]; Kim *et al.*[2022]).

이에 본 연구는 2014년부터 2023년까지 10년간 특별관리해역 표층 퇴적물 내 중금속 농도의 시계열 변화와 공간 분포 특성을 통합적으로 분석하였다. 이를 통해 해역 간 오염 수준과 장기 변화 경향을 비교하고, 산업 활동 및 환경관리 정책 변화가 퇴적물 중금속 농도에

미친 영향을 검토하고자 한다. 본 연구 결과는 연안오염총량관리제의 실효성 평가와 해역별 차별화된 관리 전략 수립을 위한 과학적 근거를 제공할 것이다.

1.2 연구지역 개요

특별관리해역은 해양환경기준의 유지가 곤란하거나 생태계 보전에 장애가 발생할 우려가 있는 해역으로, 현재 우리나라에는 시화호·인천연안, 광양만, 마산만, 부산연안, 울산연안 등 5개 해역이 지정되어 있다. 시화호·인천연안은 반폐쇄성 인공호 및 연안으로, 국가 산업단지와 도시지역에서 발생한 오염물질이 다수의 하천을 통해 유입되는 구조를 갖는다. 조력발전소 가동 이후 일부 수질 개선이 보고되었으나, 상류 산업지역의 영향은 여전히 지속되고 있다(MOF[2013]). 광양만은 반폐쇄성 만 형태의 해역으로, 석유화학단지 및 제철소 등 대규모 산업시설이 위치하고 있으며 항만 활동이 활발하다(Won and Go[1975]). 지속적인 준설과 매립으로 퇴적환경이 변화하였고, 산업 및 생활계 오염물질 유입의 영향을 받고 있다(Park *et al.*[1984]; Lee *et al.*[2013]). 마산만은 해수 교환율이 낮은 반폐쇄성 내만으로 오염물질 축적이 용이한 지형적 특성을 가진다. 과거 고농도 퇴적물 오염이 보고되어 대규모 준설 정화사업이 시행된 바 있으며(Kwon[2004]), 이후 점진적 안정화가 이루어졌으나 여전히 관리 대상 해역으로 분류된다. 부산연안은 대규모 도시 및 항만 활동이 집중된 지역으로, 하천 유입과 항만-선박 활동에 따른 오염부하가 높은 특성을 보인다(부산광역시[2016]). 울산연안은 석유화학 및 비철금속 산업단지가 밀집한 대표적 중화학공업 연안으로, 산업 활동의 영향으로 퇴적물 중금속 오염이 지속적으로 보고되어 왔다(Hwang *et al.*[2014]; Sun *et al.*[2015]).

2. 재료 및 방법

2.1 연구방법

본 연구에서 사용된 자료는 해양수산부에서 지원하고 해양환경공단에서 시행하는 해양환경측정망에서 얻은 결과이며, 조사 및 분석방법은 ‘해양환경공정시험기준’에 따라 수행되었다. 해양환경측정망 자료 중 특별관리해역인 광양만 14개 정점, 마산만 19개 정점, 부산연안 27개 정점, 시화호·인천연안 25개 정점, 울산 연안 22개 정

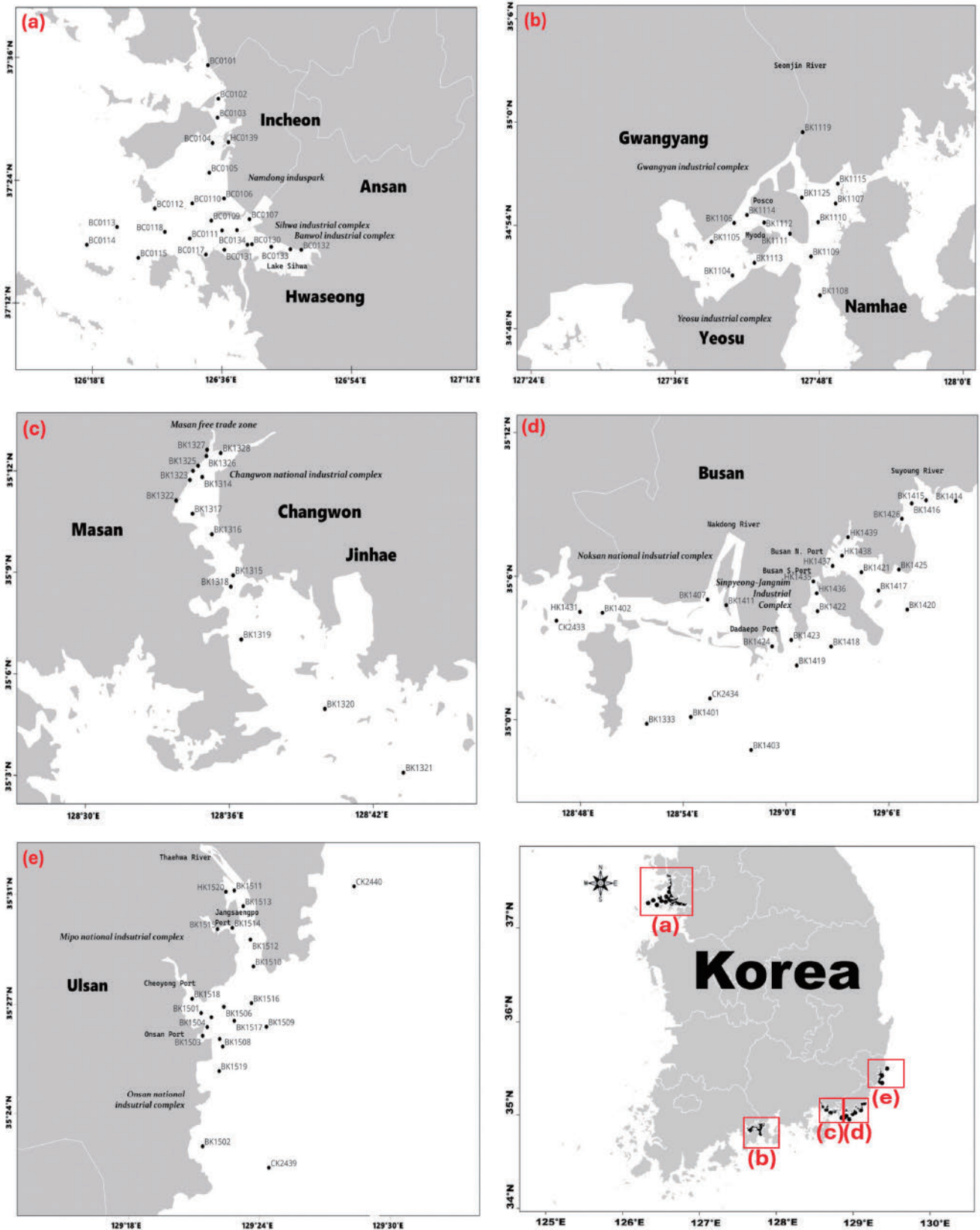


Fig. 1. A map showing the sampling locations in Marine Environment Monitoring Program operated by Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM). The program focuses on the special management areas of the marine environmental network: (a) Lake Sihwa and Incheon Coast, (b) Gwangyang Bay, (c) Masan Bay, (d) Busan Coast, and (e) Ulsan Coast

점에서 2014년부터 2023년까지 조사된 표층 퇴적물 내 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, Li) 자료를 이용하였다(Fig. 1).

2.2 중금속 오염도 평가 방법

표층 퇴적물 내 중금속 오염도 평가는 국내 해양환경기준(해양수산부 고시 제2013-186호)과 배경농도를 이용한 오염도 평가 방법(I_{geo})을 이용하였다. 해양환경기준 평가방법으로 As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb는 각 기준 농도를 직접 비교하였으며 Cu와 Zn은 Li으로 측정 농도를 입도 보정하여 기준 농도와 비교하여 주의기준(threshold effects level, 주의기준)과 관리기준(probable effects, 관리기준)로 구분하여 평가하였다. 주의기준 이하는 부정적인 영향이 거의 없을 것으로 예측되는 범위이며, 주의기준과 관리기준 사이는 부정적인 생태영향이 발현될 가능성이 있는 범위, 관리기준 이상은 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 범위로 지정하고 있다(MOF[2013]).

배경농도를 이용한 오염도 평가는 농집지수(I_{geo} : Geoaccumulation-Index)를 이용하는 방법(Müller, [1981]) 시료의 중금속 농도를 아래 식을 이용하여 배경농도와 비교하여 계산한 후 오염도를 총 7 단계로 분류하여 나타냈다(Table 1).

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right) \tag{1}$$

여기서 I_{geo} = 농집지수

C_s = 시료의 중금속 농도

B_s = 시료에 해당하는 중금속 배경농도

이때, 각 시료에서 중금속의 배경농도(B_s)는 Woo *et al.*[2019]이 제시한 한국연안 퇴적물의 중금속 배경농도와 보존성원소 Li 농도와의 관계식을 사용하여 변형된 I_{geo} (농집지수, 식 2)를 계산하였고 농집지수에 따른 오염도는 Müller [1969]의 방법을 따라 평가하였다(Table 1).

$$Enrichment\ Factor = \frac{\left(\frac{Metal}{Conservative\ element} \right)_{sample}}{\left(\frac{Metal}{Conservative\ element} \right)_{background}} \tag{2}$$

$$= \frac{Metal_{sample}}{Slope} \times Conservative\ element_{sample} + y-axis$$

3. 결과 및 고찰

3.1 중금속 농도의 공간적 분포특성

5개 특별관리해역 10년 동안의 표층퇴적물 내 중금속 분석결과는 Table 2에 요약하였다. 전체적으로 중금속 농도(평균)는 As가 2.57~31.4 mg/kg(평균 11.8 mg/kg), Cd은 0.02~7.62 mg/kg(평균 0.44 mg/kg), Cr은 10.8~147 mg/kg(평균 68.8 mg/kg), Cu는 1.58~1,550 mg/kg(평균 54.8 mg/kg), Hg는 0.000412~3.96 mg/kg(평균 0.12 mg/kg), Ni은 4.09~54.6 mg/kg(평균 28.5 mg/kg), Pb는 11.3~885 mg/kg(평균 47.8 mg/kg)그리고 Zn은 12.3~1,764 mg/kg(평균 182 mg/kg) 범위로 나타나, 중금속 항목별로 최소값과 최대값 사이에 15~1000배 차이를 보였다.

전체 해역의 중금속 농도는 항목별 최소값과 최대값 사이에 뚜렷한 공간적 농도 구배를 보였으며, 평균 및 최대 농도를 기준으로 한

Table 1. Classification of geo-accumulation index (I_{geo}) values and corresponding pollution levels (after Müller, 1969)

	Class	I_{geo} Range	Pollution Level
Geo-accumulation index (I_{geo})	0	$I_{geo} \leq 0$	Unpolluted
	1	$0 < I_{geo} \leq 1$	Unpolluted to moderately polluted
	2	$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderately polluted
	3	$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderately to strongly polluted
	4	$3 < I_{geo} \leq 4$	Strongly polluted
	5	$4 < I_{geo} \leq 5$	Strongly to very strongly polluted
	6	$I_{geo} > 5$	Very strongly polluted

Table 2. Heavy metal concentrations (mg/kg) in surface sediments of the Special Management Areas during 2014–2023, with Li-normalized background values (Woo *et al.*, 2019) and South Korean coastal averages. Values in parentheses indicate mean concentrations

Area	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	reference
BG (Li-normalized)	7.4	0.134	46.1	14.7	0.0159	20.0	25.2	69.8	Woo <i>et al.</i> , 2019
Lake Sihwa-Incheon Coast n = 241	2.57~23.8 (9.08)	0.0152~0.846 (0.150)	10.8~147 (68.0)	1.58~264 (28.2)	0.000412~0.132 (0.024)	4.09~54.6 (25.3)	11.3~79.9 (27.0)	12.3~411 (93.8)	
Gwangyang Bay n=140	6.69~15.2 (10.4)	0.0609~0.42 (0.144)	54.7~88.2 (72.6)	13.7~42.4 (24.8)	0.00823~0.0701 (0.026)	22.2~39.3 (31.1)	23.4~39.9 (29.9)	64.8~190 (129)	
Masan Bay n=190	4.18~20.8 (11.5)	0.120~2.19 (0.873)	32.5~84.4 (65.3)	18.8~123 (59.0)	0.0139~0.683 (0.099)	15.6~42.2 (29.0)	26.7~126 (52.8)	105~602 (260)	This study
Busan Coast n=270	5.60~23.8 (12.3)	0.0447~1.67 (0.261)	30.8~128 (70.4)	7.19~1.55×10 ³ (61.3)	0.00298~1.47 (0.104)	12.8~41.7 (27.4)	19.3~407 (42.4)	65.0~863 (169)	
Ulsan Coast n=220	6.80~31.4 (15.4)	0.110~7.62 (0.780)	42.1~114 (68.5)	15.5~1.06×10 ³ (91.4)	0.012~3.96 (0.321)	20.4~46.9 (31.3)	18.1~885 (83.9)	87.3~1.76×10 ³ (263)	

해역별 오염 수준은 중금속 항목에 따라 상이한 양상을 나타냈다.

각 중금속별 평균 농도를 기준으로 해역별 순서를 살펴보면, As, Cu, Hg, Pb, Zn의 5개 항목에서 울산연안이 가장 높은 농도를 기록하였다. 구체적으로 As는 울산 > 부산 > 마산 > 광양 > 시화·인천 순이었으며, Cu, Hg, Pb, Zn 역시 울산연안이 가장 높았으며, 부산연안과 마산만이 차례로 높은 수준을 보였다. 반면, Cd은 마산만에서 가장 높은 평균 농도를 나타냈으며(마산 > 울산 > 부산 > 시화·인천 > 광양), Cr은 광양만(광양 > 부산 > 울산 > 시화·인천 > 마산), Ni은 울산연안과 광양만(울산 ≈ 광양 > 마산 > 부산 > 시화·인천)에서 상대적으로 우세한 분포를 보였다.

최대 농도를 기준으로 한 순서 또한 평균 농도와 유사한 경향을 보였으나, 일부 항목에서는 국지적 고농도 정점의 영향으로 순위 변동이 확인되었다. As, Cd, Hg, Pb, Zn의 최대치는 모두 울산연안에서 관측되었으나, Cu의 경우 부산연안에서 가장 높은 농도를 보였다. 또한 Cr과 Ni은 시화·인천연안에서 최대값이 나타나, 해당 해역 내 특정 정점이 인근 산업 활동의 직접적인 영향을 받고 있음을 시사하였다.

한편, Woo *et al.*[2019]이 제시한 국내 연안 배경농도(Table 5)와 비교하여 인위적 오염 기여도를 평가하였다. 분석 결과, Cr과 Ni은 모든 해역의 평균 농도가 배경농도(Cr: 46.1 mg/kg, Ni: 20 mg/kg)의 약 1.3~1.6배 범위 내에 분포하여 해역 간 차이가 크지 않았으며, 이는 지질학적 배경치의 영향이 지배적임을 암시한다. 반면, 나머지 금속들은 배경농도를 수 배 이상 상회하는 뚜렷한 오염 양상을 보였다. 울산연안은 Hg 농도가 배경농도 대비 약 20배 수준으로 나타나, 조사 해역 중 가장 높은 농도 수준을 보였다. 이어 Cd(5.8배), Cu(6.2배), Zn(3.8배), Pb(3.3배) 순으로 배경농도보다 현저히 높았다. 특히 울산연안의 일부 정점에서는 Pb와 Zn이 배경농도 대비 각각 35배와 25배에 달했다. 마산만은 Cd 평균 농도가 배경농도 대비 약 6.7배 높게 나타나 국내의 대표적인 Cd 고축적 해역임을 재확인하였으며, 부산연안은 Cu 평균 농도가 배경농도보다 약 4.2배 높은 수준을 유지하여 항만 및 선박 활동에 의한 인위적 기여가 지속되고 있음을 보여준다.

이와 같이 해역별로 우세하게 나타나는 금속 조성은 인접 산업 활동과 연관되는 경향을 보였다. 울산연안은 Cu, Pb, Zn, Hg가 동시에 높은 다금속 특성을 나타내어 온산국가산업단지의 석유화학 및 비철금속 관련 산업 영향이 반영된 것으로 판단된다. 이와 같은 울산연안의 다금속 복합 오염 양상은 Sun *et al.*[2015]에서 보고한 As, Cd, Pb, Zn 중심의 고농도 분포 특성과 전반적으로 유사하다. 즉, 울산연안은 과거와 현재 모두 산업단지 및 항만 인접 해역에서 복합 금속 오염이 우세하게 나타나는 구조를 유지하고 있음을 보여준다. 부산연안은 Cu 중심의 고농도 특성이 두드러져 항만 운영 및 선박 정비 활동과의 관련성이 있음을 나타낸다. 마산만은 Cd, Pb, Zn이 전반적으로 높게 나타나 반폐쇄성 내만 환경에서 장기간 산업 및 도시 기원의 물질이 축적된 결과로 해석된다. 광양만은 Cr과 Ni이 상대적으로 우세하여 제철 및 금속 가공 산업과의 연관 가능성이 제시되며, 시화·인천연안은 Cr, Ni가 비교적 높고 일부 정점에

서 Cu, Zn가 국지적으로 증가하여 반월·시화 산업단지의 영향을 반영하는 것으로 판단된다. 전반적으로 Cr과 Ni은 해역 간 변동폭이 비교적 제한적인 반면, Cd, Cu, Hg, Pb 및 Zn은 특정 산업지역 인접 정점에서 현저히 증가하는 경향을 보여 공간적 이질성이 뚜렷하였다.

3.2 중금속 오염도 평가

특별관리해역 표층퇴적물 내 중금속 오염도는 해양환경기준(주의기준 및 관리기준)과 지수법인 농집지수(Index of Geoaccumulation)를 활용하여 평가하였다. 해양환경기준에서 제시하는 주의기준과 관리기준은 퇴적물 내 오염물질 농도의 환경관리 수준을 구분하기 위해 설정된 기준으로, 주의기준은 해양환경의 악화 가능성이 있어 지속적인 관찰 및 관리가 요구되는 농도 수준을 의미하며, 관리기준은 오염이 심화된 상태로 적극적인 저감 및 관리조치가 필요한 수준을 의미한다(MOF[2021]).

특정 금속에서 주의기준 초과 빈도가 높게 나타나는 경우, 이는 국지적인 단기 배출 사건보다는 해역 전반에서 해당 금속의 농도가 상대적으로 높게 유지되고 있을 가능성을 시사한다(Woo *et al.*[2019]). 이러한 광역적 농도 증가는 저서생물 군집 구조 및 종 다양성에 영향을 미칠 수 있으며(Wui *et al.*[1993]), 일부 중금속은 먹이사슬을 통한 생물농축(bioaccumulation)을 통해 상위 영양단계 생물에 잠재적 영향을 미치는 환경적 스트레스 요인으로 작용할 수 있다(Clark[2001]; Choi *et al.*[2016]). 다만, 해양환경기준의 주의기준 및 관리기준은 생태독성 발생 확률을 직접적으로 제시하는 통계적 기준이라기보다는 해양환경 보전을 위한 정책적·관리적 판단 기준으로 활용된다는 점에서, 생태영향 해석 시에는 보완적 지표와의 종합적 검토가 필요하다.

농집지수는 0(Class 0, 비오염)에서 6(Class 6, 극심한 오염)까지 7개 등급으로 구분되며(Müller, 1969), 입도 및 자연적 농도 변동의 영향을 상대적으로 제거할 수 있어 해역 간 비교에 유리한 장점을 가진다. 본 연구에서는 농집지수 등급을 Group 1(Class 0; 비오염), Group 2(Class 1-2; 보통오염), Group 3(Class 3~6; 심함 이상의 오염)으로 범주화 하였다.

3.2.1 해양환경기준을 이용한 오염도 평가

해양환경기준에 따른 분석 결과, 특별관리해역 내 금속별 오염 수준과 발생 빈도에서 뚜렷한 공간적 차별성이 확인되었다(Table 3).

시화호 및 인천연안은 전반적으로 금속 농도가 주의기준 이하였으나, 시화·반월국가산업단지에 인접한 정점(BC0132, BC0133)의 Cu와 Zn은 지속적인 주의기준 초과 양상을 보였다. 특히 정점 BC0132에서는 Cu의 관리기준 초과가 반복적으로 발생하였다. 이러한 상류 및 산업단지 인접 정점의 Cu, Zn 고농도 현상은 육상 하천 및 배후 산업지역 기원의 오염물질이 해양 퇴적환경으로 전이될 수 있다는 선행 연구(Choi *et al.*[2016])를 뒷받침한다. 또한, 제4차 시화호 특별관리해역 관리계획(2024)에서 지적된 반월산단의 노후 관로 및 하수·우수·산업배수의 잘못된 연결에 따른 산업계 오염물

질 유입 문제를 고려할 때, 본 연구에서 확인된 기준 초과는 육상 기원 오염원의 지속적인 영향을 반영한 결과로 해석된다. 이는 해당 정점이 실제 독성 발현 확률이 50%를 상회할 수 있는 생태적 위험 구역에 해당하며, 국지적 점오염원의 영향이 강하게 지속되고 있음을 시사한다.

광양만은 Cr과 Ni 농도가 타 해역 대비 상대적으로 높았음에도 불구하고 대부분 주의기준 미만으로 유지되어, 생태학적 위해 가능성은 낮은 것으로 평가되었다. 반면, 마산만은 As, Cu, Pb가 빈번하게 주의기준을 초과(초과 빈도 30% 이상)하였다. 특정 해역 내 주의기준 초과 빈도가 30%를 상회한다는 것은 오염이 국지적 정점을 넘어 해역 전체의 만성적 오염으로 고착화되었음을 의미한다.

부산연안은 북항 및 남항을 중심으로 Cu, Hg, Pb, Zn이 반복적으로 주의기준을 초과하였다. 특히 부산남항 정점(HK1435)에서는 10년간 총 9회에 걸쳐 Cu 농도가 관리기준을 초과하였다. 이러한 양상은 항만 활동 및 선박 유지·보수 과정이 Cu 축적의 주요 원인임을 시사하며, 부산항 내 국지적 항만 기원 오염을 보고한 Han *et al.*[2016]의 연구 결과와도 부합한다. 이는 오염물질의 유입 속도가 해역의 자정 능력을 초과하여, 저서생물에게 확정적인 위해를 끼칠

수 있는 임계 수준에 도달했음을 보여준다.

울산연안은 타 해역에 비해 오염 범위가 가장 광범위하고 정도 또한 심각하였다. As의 경우 10년간 전체 시료의 약 48%에서 주의 기준을 초과하였으며, 특히 온산항(BK1503)과 처용항(BK1518) 인근에서는 Cu, Hg, Pb, Cd 등이 반복적으로 관리기준을 초과하였다. 이는 Sun *et al.*[2015]이 보고한 산업시설 인접 정점의 고농도 금속 축적 양상과 일관되며, 온산항 및 처용항 주변이 현재까지도 울산 연안 내 핵심 고위해 정점으로 기능하고 있음을 시사한다. 관리기준의 빈번한 초과는 인근 산업단지의 특정 공정이나 선박 방오도료, 하수종말처리장 방류수 등 강력한 점오염원의 영향이 누적된 결과로 판단된다.

종합하면, 주의기준의 높은 초과 빈도는 저서 생태계가 상시적인 환경 스트레스에 노출되어 있음을 의미하며, 관리기준을 초과하는 정점들은 생물체에 직접적인 급성 독성을 유발할 수 있는 생태적 위험 구역(Hotspot)으로 간주된다. 따라서 주의기준 초과 빈도가 30% 이상인 지역은 광역적인 환경 부하 저감 대책이, 관리기준 초과 정점은 오염 퇴적물 준설이나 피복과 같은 집중적인 정화 사업이 우선적으로 병행되어야 한다고 판단된다.

Table 3. Assessment of heavy metal contamination in surface sediments from the Special Management Sea Areas based on the Korean marine sediment quality guidelines (2014–2023)

n = (2014 ~ 2023)		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Korean marine sediment guideline	주의기준(mg/kg)	14.5	0.75	116	20.6	0.11	47.2	44.0	68.4
	관리기준(mg/Kg)	75.5	2.72	181	64.4	0.62	80.5	119	157
LakeSiwaha·Incheon Coast n = 241 (%) (Hg, n=240)	< 주의기준	234 (97)	239 (99)	240 (99.6)	216 (90)	238 (99)	239 (99)	236 (98)	208 (86)
	주의기준 ~ 관리기준	7 (3)	2 (1)	1 (0.4)	18 (7)	2 (1)	2 (1)	5 (2)	33 (14)
	관리기준 <	0 (0)	0 (0)	0 (0)	7 (3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Gwangyang Bay n = 140 (%)	< 주의기준	138 (99)	140 (100)	140 (100)	140 (100)	140 (100)	140 (100)	140 (100)	140 (100)
	주의기준 ~ 관리기준	2 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	> 관리기준	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Masan Bay n = 190 (%)	< 주의기준	165 (87)	64 (33.7)	190 (100)	129 (68)	135 (71.1)	190 (100)	60 (31.6)	84 (44)
	주의기준 ~ 관리기준	25 (13)	126 (66.3)	0 (0)	61 (32)	54 (28.4)	0 (0)	129 (67.9)	102 (54)
	> 관리기준	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0.5)	0 (0)	1 (0.5)	4 (2)
Busan Coast n = 270 (%)	< 주의기준	222 (82)	264 (6)	268 (99)	205 (76)	214 (79)	270 (100)	211 (78.1)	180 (67)
	주의기준 ~ 관리기준	48 (18)	6 (2)	2 (1)	52 (19)	49 (18)	0 (0)	55 (20.4)	84 (31)
	> 관리기준	0 (0)	0 (0)	0 (0)	13 (5)	7 (3)	0 (0)	4 (1.5)	6 (2)
Ulsan Coast n = 220 (%)	< 주의기준	114 (52)	185 (84)	220 (100)	115 (52)	106 (48)	220 (100)	114 (52)	88 (40)
	주의기준 ~ 관리기준	106 (48)	23 (10.5)	0 (0)	90 (41)	81 (37)	0 (0)	78 (35)	115 (52)
	> 관리기준	0 (0)	12 (5.5)	0 (0)	15 (7)	33 (15)	0 (0)	28 (13)	17 (8)

Table 4. Groups of I_{geo} classes for heavy metals in surface sediments from Five special management coastal areas (2014–2023). Values are presented as the number of samples, with percentages in parentheses

Study Area	Level	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
LakeSiwha·Incheon Coast n = 241(%) (Hg, n = 240)	Group 1	201(83)	209(87)	188(78)	176(73)	179(74)	220(91)	228(95)	213(88)
	Group 2	40(17)	32(13)	53(22)	54(22)	59(25)	21(9)	13(5)	28(12)
	Group 3	0(0)	0(0)	0(0)	11(5)	3(1)	0(0)	0(0)	0(0)
Gwangyang Bay n = 140(%)	Group 1	140(100)	139(99)	140(100)	139(99)	135(96)	140(100)	140(100)	140(100)
	Group 2	0(0)	1(1)	0(0)	1(1)	5(4)	0(0)	0(0)	0(0)
	Group 3	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
Masan Bay n = 190(%)	Group 1	163(86)	21(11)	190(100)	46(24)	32(17)	190(100)	82(43)	53(28)
	Group 2	27(14)	103(54)	0(0)	144(76)	134(70)	0(0)	108(57)	136(72)
	Group 3	0(0)	66(35)	0(0)	0(0)	24(13)	0(0)	0(0)	1(0)
Busan Coast n = 270(%)	Group 1	180(67)	183(68)	254(94)	151(56)	81(30)	270(100)	213(79)	153(57)
	Group 2	90(33)	82(30)	16(6)	95(35)	141(52)	0(0)	54(20)	114(42)
	Group 3	0(0)	5(2)	0(0)	24(9)	48(18)	0(0)	3(1)	3(1)
Ulsan Coast n = 220(%)	Group 1	83(38)	46(21)	217(99)	44(20)	15(7)	219(99.5)	115(52)	59(27)
	Group 2	137(62)	148(67)	3(1)	148(67)	106(48)	1(0.5)	86(39)	145(66)
	Group 3	0(0)	26(12)	0(0)	28(13)	99(45)	0(0)	19(9)	16(7)

Note: I_{geo} classes were categorized into three groups based on the pollution intensity originally proposed by Müller (1969): Group 1 (Class 0; $I_{geo} \leq 0$): Unpolluted. Group 2 (Class 1–2; $0 < I_{geo} \leq 2$): Moderately polluted. Group 3 (Class 3–6; $I_{geo} > 2$): Heavily to extremely polluted. n indicates the total number of sampling stations in each area.

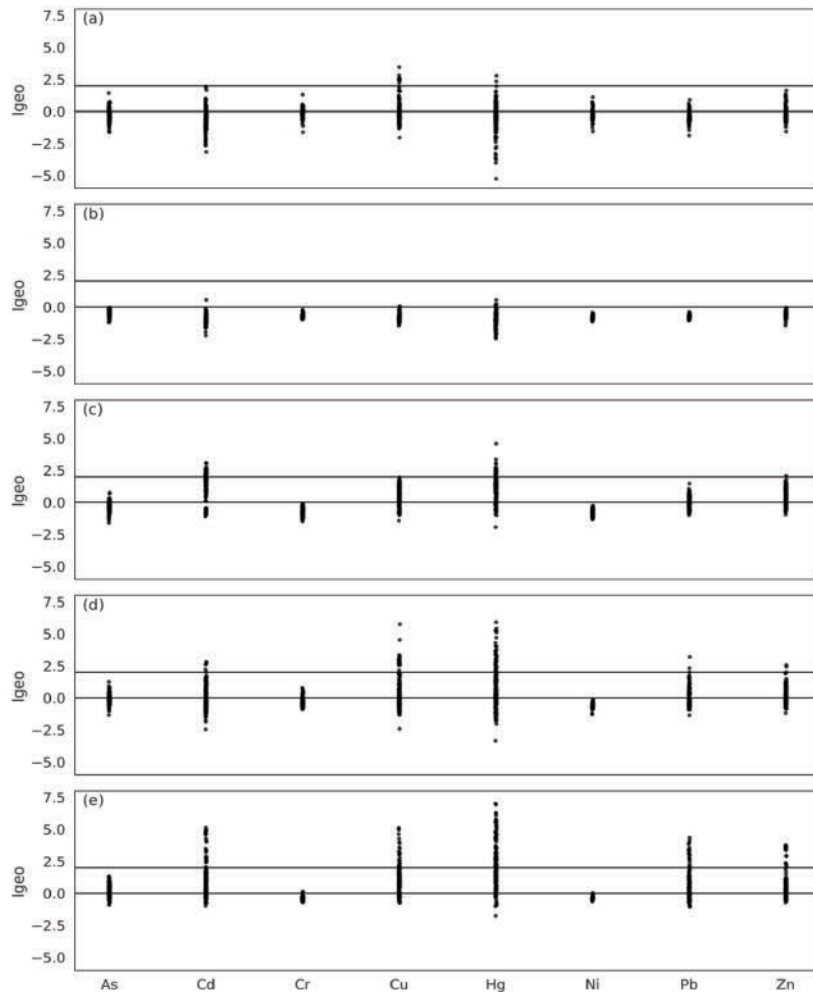


Fig. 2. Geo-accumulation index (I_{geo}) of heavy metals across five special management areas (2014–2023). Panels represent (a) Lake Sihwa-Incheon Coast, (b) Gwangyang Bay, (c) Masan Bay, (d) Busan Coast, and (e) Ulsan Coast. Horizontal lines indicate $I_{geo} = 0$ and $I_{geo} = 2$. I_{geo} values were classified as Group 1 (≤ 0), Group 2 (0–2), and Group 3 (> 2).

3.2.2 배경농도를 이용한 오염도 평가

농집지수 평가 결과(Table 4, Fig. 2)는 해양환경기준에 따른 평가와 전반적으로 유사한 공간적 경향을 보였으나, 배경농도 대비 상대적 축적 정도 측면에서 해역 간 차이가 보다 명확하게 구분되었다. 특히 각 해역에서 우세하게 나타난 금속 종류와 Group 3(심함 이상의 오염) 비율의 차이는 해역별 오염 특성을 구분하는 데 중요한 지표로 작용하였다.

해역별로 살펴보면, 시화호·인천연안은 대부분의 금속이 Group 1(비오염)에 해당하여 전반적으로 안정적인 축적 상태를 보였다. 다만 Cu에서만 약 5%가 Group 3에 해당하였으며, 이는 특정 산업단지 인접 정점에서 국지적 축적을 반영한다. 이러한 양상은 시화호·인천연안이 전반적으로 저축적 상태를 유지하면서도 일부 점오염원에 의해 특정 금속이 선택적으로 증가하는 구조임을 시사한다.

광양만은 전 금속 항목의 96% 이상이 Group 1로 분류되어 조사 해역 중 가장 낮은 중금속 축적 수준을 나타냈다. Cr과 Ni의 농집지수가 타 해역에 비해 다소 높은 경향을 보였으나 대부분 0~2 구간에 머물렀으며, Group 3에 해당하는 고농도 시료는 관찰되지 않았다. 이는 광양만이 전반적으로 안정적인 배경 수준을 유지하고 있으며, 특정 금속의 집중 축적보다는 비교적 균질한 분포 특성을 보이는 해역임을 의미한다.

반면, 마산만은 Cd에서 35%가 Group 3에 해당하여 중증도 이상의 축적이 뚜렷하게 확인되었다. 이와 같은 결과는 반폐쇄성 내만이라는 마산만의 지형적 특성과 장기간 축적 구조를 반영하며, Kim [2018]에서 보고된 Cd 중심 오염 특성이 현재까지도 지속되고 있음을 보여준다. 다만, 본 연구에서는 Cd의 평균 농도 수준이 과거 보고와 유사한 범위에 있으면서도, 일부 고농도 정점의 분포 양상은 시기별로 다소 차이를 보여 향후 정점별 장기 비교가 추가로 필요하다. Cu, Zn 및 Hg 또한 Group 2 이상의 비율이 높게 나타나 다금속 복합 축적 양상을 보였다. 특히 Cd은 타 해역 대비 가장 높은 Group 3 비율을 보여 마산만의 대표적 우세 금속으로 판단된다. 이러한 특성은 반폐쇄성 내만 환경에서 오염물질의 체류 시간이 길고, 장기간 산업 및 도시 기원의 유입이 누적된 결과로 해석된다.

부산연안은 Hg에서 18%, Cu에서 9%가 Group 3에 해당하여 항만 활동과 연관된 금속의 상대적 축적도가 높게 나타났다. Pb와 Zn 역시 일부 정점에서 Group 2 이상 구간에 분포하여 복합적 오염 특성을 보였다. 그러나 Cd의 Group 3 비율은 마산만이나 울산연안에 비해 낮은 수준을 유지하였다. 이는 부산연안이 특정 금속(Hg, Cu)을 중심으로 국지적 고농도 축적이 나타나는 항만 중심형 오염 구조임을 시사한다.

울산연안은 전 해역 중 가장 높은 농집지수 분포 범위를 나타냈으며, Hg의 45%가 Group 3에 해당하여 가장 심각한 축적 수준을 보였다. Cu, Cd, Pb 및 Zn 또한 Group 3 비율이 상대적으로 높아 다금속 복합 축적 특성이 뚜렷하게 나타났다. 특히 Hg와 Cu는 타 해역에 비해 현저히 높은 축적 비율을 보여 울산연안이 중화학 및 비철 금속 산업 영향이 집중된 고강도 오염형 해역임을 명확히 보여준다.

금속별로 해역 간 비교를 종합하면, Cr과 Ni는 대부분 해역에서

Group 1 또는 2에 분포하여 상대적 축적 수준이 낮고 해역 간 변동 폭도 제한적이었다. 반면 Cd, Cu, Hg, Pb 및 Zn은 특정 산업 밀집 해역에서 Group 3 비율이 크게 증가하는 경향을 보여 공간적 이질성이 뚜렷하였다. 특히 Hg는 울산연안과 부산연안에서, Cd은 마산만과 울산연안에서, Cu는 부산연안과 울산연안에서 상대적으로 높은 축적도를 나타내어 금속별 우세 해역이 구분되었다.

종합하면, 농집지수 기반 축적 특성에 따라 광양만은 저오염·안정형 해역, 시화호·인천연안은 국지적 점오염 영향형 해역, 마산만은 Cd 중심의 반폐쇄성 만성 축적형 해역, 부산연안은 Hg, Cu 중심의 항만 복합 오염형 해역, 울산연안은 Hg, Cu, Cd, Pb, Zn이 복합적으로 축적된 중화학 산업 밀집 고강도 오염형 해역으로 구분될 수 있다. 이러한 공간적 차이는 해역별 산업 구조, 수리·지형학적 조건, 그리고 장기간 축적 이력의 복합적 영향이 반영된 결과로 판단된다.

3.3 중금속 농도의 시간적 분포특성

시간에 따른 중금속 농도의 변화 경향을 평가하기 위해 두가지 방법을 이용하였다. 첫 번째는 농집지수 등급을 기반으로 심한 오염을 나타내는 Group 3(고오염) 비율의 시간적 변화를 살펴보았다(Table 5). 두 번째로 각 시기별 해역별 평균값을 사용하여 시간적 변화를 살펴보았으며 장기적인 변화 경향은 단순 선형 회귀분석을 통계적으로 유의한 경우($p < 0.05$)에 한하여 회귀선을 제시하였다(Fig. 3~Fig. 4). 퇴적물에서 중금속 농도는 외부 오염원으로부터의 공급뿐만 아니라 퇴적물의 지화학적 특성에 의해 지배된다. 이러한 지화학적 특성에는 입자 크기 및 비표면적과 같은 물리적 요인과 철·망간 산(수산)화물, 유기물 및 점토광물과 같은 구성 물질에 의한 화학적 요인이 포함된다. 일반적으로 세립질 퇴적물은 비표면적이 크고 점토광물 및 산화물 성분의 비율이 높아 금속과의 결합 가능성이 증가하며, 그 결과 상대적으로 높은 금속 농도를 나타내는 경향이 있다(Horowitz, 1991). 따라서 동일한 오염 부하 조건에서도 입자 조성 차이에 따라 중금속 농도는 상당한 변동을 보일 수 있다.

이러한 입도 의존성을 보정하기 위해 평균 입도를 직접 활용하기도 하나, 실제로 중금속 분석 시료와 입도 분석 시료가 분리되어 존재하는 경우가 많아 동일 시료 기준의 정밀 보정에는 한계가 있다. 이에 따라 중금속과 동시에 분석 가능하며, 입도 변화를 대표할 수 있는 보정 원소(normalizer element)를 활용하는 방법이 널리 적용되고 있다. 보정 원소는 중금속과 유사하게 세립질 성분에 결합하는 특성을 가지면서도 인위적 오염의 영향을 상대적으로 적게 받는 원소가 적합하다. 일반적으로 Al, Fe, Mg, Ti, Cs, Li 등이 사용되며, 한반도 연안 퇴적물 연구에서는 Al (Lim *et al.*[2007]; Woo *et al.*[2019]), Cs (Song *et al.*[2014]; Song and Choi[2017]), Li (Woo *et al.*[2019]) 등이 입도 보정 원소로 활용되어 왔다. 본 연구에서는 Li를 보정 원소로 사용하였는데, 인위적 배출원의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 알려져 있다(Woo *et al.*[2019]). 또한 Li는 중금속과 동일 시료에서 동시 분석이 가능하여 분석 오차를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 모든 금속 농도는 다음 식에 따라 Li 농도로 정규화하였다(식 3).

Table 5. Annual variation in the number of samples classified as Group 3 according to the geo-accumulation index (I_{geo}) values for each metal across the five special management areas from 2014 to 2023

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
n		21	25	25	23	25	23	24	25	25	25
LakeSiwha-Incheon Coast	As	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cd	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cu	-	2 (8%)	1 (4%)	1 (4%)	2 (8%)	2 (9%)	1 (4%)	1 (4%)	1 (4%)	-
	Hg	-	-	-	-	-	-	-	1 (4%)	-	1 (4%)
	Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gwangyang Bay (n = 14 annually)		No Group 3 samples observed									
Masan Bay (n = 19 annually)	As	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cd	9 (47%)	7 (37%)	8 (42%)	5 (26%)	7 (37%)	8 (42%)	5 (26%)	5 (26%)	4 (21%)	8 (42%)
	Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Hg	2 (11%)	4 (21%)	3 (16%)	1 (5%)	4 (21%)	4 (21%)	3 (16%)	-	2 (11%)	1 (5%)
	Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zn	-	-	-	-	-	-	1 (5%)	-	-	-
Busan Coast (n = 27 annually)	As	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cd	1 (4%)	1 (4%)	-	-	-	-	-	1 (4%)	2 (7%)	-
	Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cu	3 (11%)	3 (11%)	3 (11%)	2 (7%)	2 (7%)	2 (7%)	-	3 (11%)	3 (11%)	3 (11%)
	Hg	8 (30%)	5 (19%)	4 (15%)	1 (4%)	4 (15%)	5 (19%)	6 (22%)	6 (22%)	3 (11%)	6 (22%)
	Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pb	-	-	-	-	-	-	2 (7%)	-	1 (4%)	-
	Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	2 (7%)	1 (4%)
Ulsan Coast (n = 22 annually)	As	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cd	2 (9%)	1 (5%)	2 (9%)	2 (9%)	2 (9%)	4 (18%)	2 (9%)	4 (18%)	5 (23%)	2 (9%)
	Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cu	3 (14%)	2 (9%)	3 (14%)	2 (9%)	2 (9%)	2 (9%)	3 (14%)	4 (18%)	4 (18%)	3 (14%)
	Hg	13 (59%)	8 (36%)	9 (41%)	7 (32%)	9 (41%)	13 (59%)	8 (36%)	8 (36%)	10 (46%)	14 (64%)
	Ni	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pb	2 (9%)	1 (5%)	2 (9%)	1 (5%)	2 (9%)	1 (5%)	2 (9%)	3 (14%)	3 (14%)	2 (9%)
	Zn	2 (9%)	1 (5%)	2 (9%)	1 (5%)	2 (9%)	-	2 (9%)	2 (9%)	2 (9%)	2 (9%)

note: I_{geo} values were classified into Group 1 (≤ 0), Group 2 (0-2), and Group 3 (> 2). Values are presented as the number of Group 3 samples, with percentages in parentheses indicating the proportion relative to the total number of samples collected in each year. A hyphen (-) indicates that no samples were classified as Group 3 for the corresponding metal and year.

$$C_{Li\ norm} = C_{metal} \times \frac{\overline{C_{Li}}}{C_{Li, sample}} \quad (3)$$

여기서 $C_{Li\ norm}$ = Li 농도로 표준화한 금속 농도(mg/kg)

C_{metal} = 시료의 중금속 농도(mg/kg)

$C_{Li, sample}$ = 해당 시료의 Li 농도(mg/kg)

$\overline{C_{Li}}$ = 각 해역에서 Li 평균 농도(mg/kg)

시화호·인천연안은 As농도에서 통계적으로 유의한 선형 추세가 확인되지 않았으나 시계열적 분포상 뚜렷한 단계적 안정화 양상을 보였다(Fig. 3(a)). As 농도는 2014-2016년 동안 상대적으로 높은 수준을 유지하다가 2017년을 기점으로 급격히 감소하였으며, 이후

저농도 상태로 안정화된 경향이 관찰되었다. 이는 2011년 시화 조력발전소 가동 이후 가속화된 해수 유통 확대와 상류 오염원 차단 사업의 성과가 2010년대 중반을 지나며 저층 퇴적 환경의 안정화로 이어진 결과로 해석된다.

또한 Cu와 Hg를 제외한 대부분의 금속 항목에서는 Group 3 시료가 관찰되지 않았다. 그러나 Cu의 경우 2015년부터 2022년까지 매년 1~2건(4~9%)의 Group 3 시료가 지속적으로 발생하였으며, 이는 주로 시화·반월국가산업단지에 인접한 정점(BC0132, BC0133)에 국한되어 나타났는데, 이러한 양상은 산업단지 내 금속 가공 및 도금 공정 등에서 발생하는 점오염원이 인근 간선수로를 통해 유입되어 국지적으로 축적되는 전형적인 근원지 인접 오염(Source-proximal

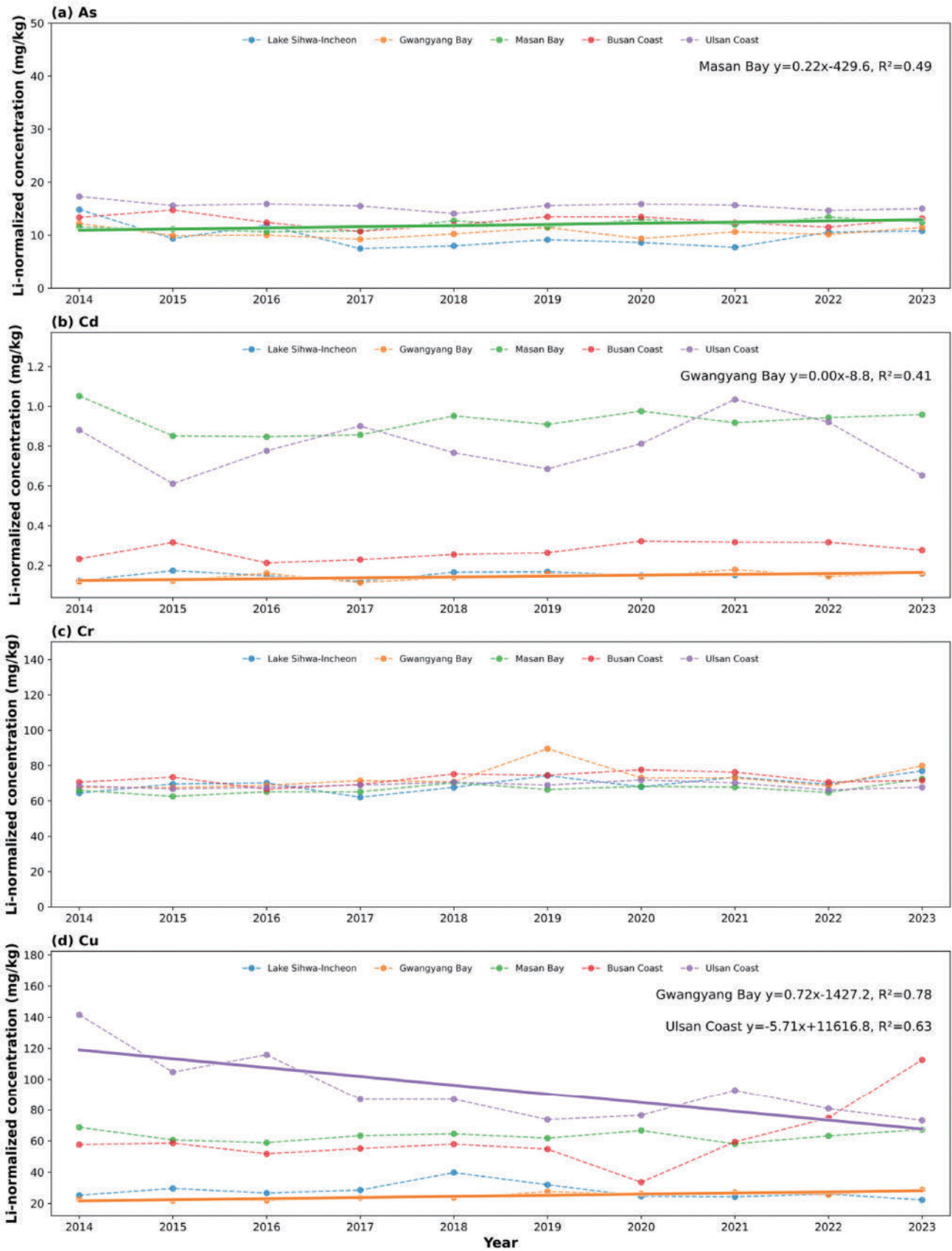


Fig. 3. Temporal variations of annual mean Li-normalized As, Cd, Cr, and Cu concentrations (mg/kg) in surface sediments from the special management areas during 2014–2023. Points and dashed lines indicate annual mean values, and solid lines represent significant linear trends ($p < 0.05$).

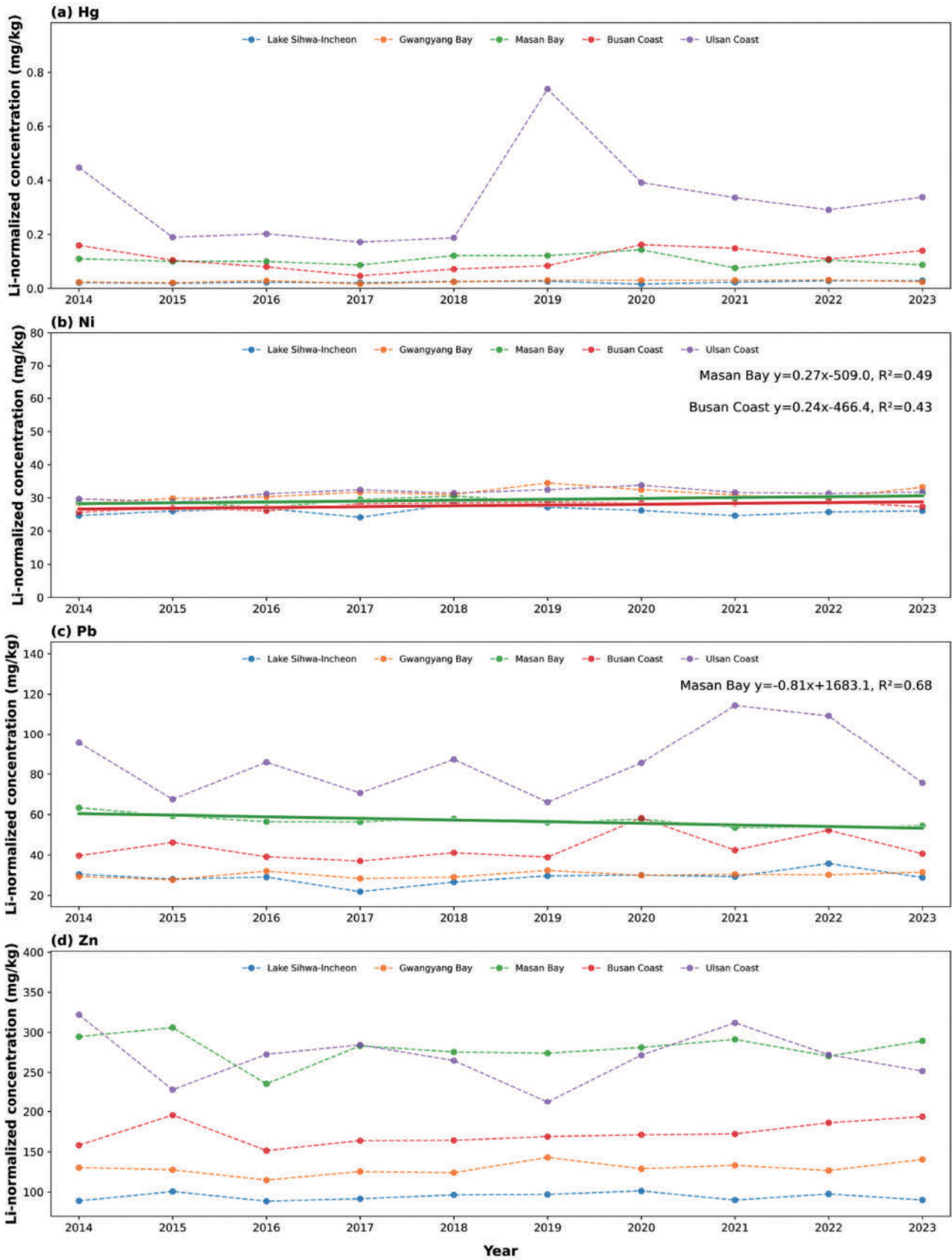


Fig. 4. Temporal variations of annual mean Li-normalized Hg, Ni, Pb, and Zn concentrations (mg/kg) in surface sediments from the special management areas during 2014–2023. Points and dashed lines indicate annual mean values, and solid lines represent significant linear trends ($p < 0.05$).

pollution)' 특성을 반영한다. 반면에 Hg는 2021년(BC0113)과 2023년(BC0114)에 각각 1건(4%)이 Group 3에 해당하였다(Table 5). Cu 및 Zn과 달리 육상 오염원과 거리가 있는 외해측 정점에서 나타났다는 점에서 차별적인 거동 특성을 보인다. 이러한 결과는 Hg이 하천을 통한 직접 유입 외에도 대기 침적이나 외해로부터의 조석류에 의한 이동 등 복합적인 경로를 통해 공급될 수 있음을 시사하며, 시화호 내측의 폐쇄적 오염 관리뿐만 아니라 광역적인 수은 거동 모니터링의 필요성을 뒷받침한다.

광양만은 조사 해역 중 Cu의 시간적 변화가 가장 특징적으로 나타난 해역이다(Fig. 3(d)). 광양만의 평균 Cu 농도는 2014년 22.6 mg/kg에서 2023년 28.7 mg/kg으로 증가하여, 조사기간 동안 총 6.15 mg/kg 증가하였고 이는 약 27.3%의 증가에 해당한다. 다만 연도별 평균 농도는 단조롭게 증가한 것은 아니었으며, 2014~2015년, 2019~2020년, 2021~2022년 사이에는 소폭 감소가 나타났고, 2015~2016년 및 2017~2018년 사이에는 큰 변화 없이 유사한 수준을 유지하였다. 그럼에도 불구하고 조사기간 전체로 보면 2014년 대비 2023년의 농도 수준은 증가한 것으로 나타났다. 선형 회귀분석에서도 광양만의 Cu는 연평균 약 +0.72 mg/kg·yr⁻¹의 유의한 증가 경향을 보였다($p=0.0008$, $R^2=0.78$). Cd 역시 연평균 약 +0.004 mg/kg·yr⁻¹의 유의한 증가 경향을 보였으나($p=0.047$, $R^2=0.41$), 증가폭은 Cu에 비해 미미한 수준이었다. 이러한 지속적 상승 경향은 광양만의 지형적 폐쇄성과 산업적 확장성이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 광양만은 외해와의 해수 교환이 제한적인 반폐쇄성 해역으로, 유입된 오염물질이 외부로 확산되지 못하고 내측에 퇴적되는 트랩(Trap)효과가 나타난다. 특히 최근 10년간 광양국가산업단지의 가동 효율이 유지되는 가운데, 이차전지 소재 및 신소재 관련 신규 산업 시설의 확충과 광양항의 물동량 증가는 선박 방오도로 및 산업 공정으로부터 새로운 Cu 부하원으로 작용했을 가능성이 크다(Turner[2010; Park et al.[2021]). 광양만의 Cu 농도 범위(13.7~42.4 mg/kg)가 타 해역 대비 낮고 Group 3의 고오염 시료는 전 기간 동안 발생하지 않았다는 점에서(Table 5) 현재 광양만의 오염도가 안정적으로 관리되고 있음을 보여주지만, 동시에 배경 농도 자체가 상향 평준화되는 단계적 오염 심화 과정에 있음을 시사한다. 또한 Jeong et al.[2020]이 제시한 산업단지 및 항만 배후지역의 도로측 퇴적물과 강우 유출에 의한 비점오염원 유입 가능성과 연계하여 지속적인 모니터링과 함께 세립질 퇴적물 내 중금속 축적 속도에 대한 지속적인 추가적 조사가 요구된다.

마산만은 항목별로 회복과 정체가 공존하며, 높은 연도별 변동성을 보이는 복합적인 거동 해역으로 나타났다. Pb는 연평균 약 -0.81 mg/kg·yr⁻¹의 유의한 감소 경향을 보인($p=0.003$, $R^2=0.68$) 반면, As는 연평균 약 +0.22 mg/kg·yr⁻¹($p=0.025$, $R^2=0.49$), Ni는 +0.27 mg/kg·yr⁻¹($p=0.025$, $R^2=0.49$)로 유의한 증가 추세를 나타냈다(Fig. 3(a), Fig. 4(b)). 그러나 이러한 수치적 경향성은 단조로운 시계열 변화라기보다는 연도별 변동 폭과 일부 연도에 집중된 국지적 고농도 시료의 영향이 혼재된 결과로 보이며, 이는 폐쇄적인 지형 조건하에서 간헐적인 오염원 유입과 체류 효과가 반복적으로 작용한 결과로 해석

된다.

항목별 차별화된 거동의 세부 원인과 마산만의 관리 이력을 연계한 해석은 다음과 같다. 첫째, Pb 농도의 유의한 감소는 과거 대규모 오염퇴적물 정화 사업의 성과를 반영한다. 마산만 내측(마산항 제4·5부두 및 중앙부두 인근)에서는 2010년부터 2014년까지 약 40만 m³ 이상의 고오염 퇴적물을 제거하는 '오염퇴적물 정화복원 사업'이 시행되었다(MOF[2015]) 2014년 이후 Pb의 Group 3 시료가 관찰되지 않는 점은 이러한 물리적 제거 사업이 국지적 고오염대를 해소하는 데 실질적인 기여를 했음을 뒷받침한다. 이는 대규모 준설 사업 이후 마산만 내측의 중금속 농도가 유의미하게 감소했다는 선행 연구(Hwang et al.[2015]; Lee et al.[2011])와 일치하는 결과이다. 비록 연도별 변동성은 존재하나 극심한 오염 단계로 이어지지 않는 것은 유연휘발유 사용 금지 등 광역적 오염원 통제와 더불어 저층의 직접적인 오염원 제거가 효과를 거두었음을 의미한다. 둘째, Cd와 Hg의 만성적 고오염은 지형적 폐쇄성에 갇힌 '유산 오염(Legacy pollution)'의 한계를 보여준다. Cd는 전 기간 동안 지속적으로 Group 3 시료가 출현하였으며, 연도별 비율도 21~47%로 매우 높게 유지되었다. Hg 역시 매년 1~4건(5~21%)의 Group 3 시료가 반복적으로 관찰되어 단발성 사건이 아닌 만성적 부담이 존재함을 시사한다(Table 5). 이는 과거 가전·기계·화학 공정이 밀집했던 창원국가산업단지 배후 해역과 봉합갯벌 인근에 누적된 오염 부하가 신규 유입 차단(연안오염총량관리제)만으로는 단기간에 해소되기 어려운 지점에 도달했음을 의미한다.

특히 마산만은 장기간 축적된 유산 오염물질이 조석 및 선박 활동에 의해 지속적으로 재부유(Resuspension)되어 외해로 확산되거나 재퇴적된다는 점이 지적된 바 있다(Lim et al.[2007]; Choi et al.[2014]). 이러한 현상은 준설 구역 외곽에 잔류한 Hg 등이 지속적으로 재배치되면서 외해측 정점까지 영향을 미치는 만성적 오염으로 작용하고 있는 것으로 판단된다. 셋째, As와 Ni의 증가 경향은 신규 비점오염원 유입 및 환경 변화와 관련된 가능성이 크다. 최근 확인된 증가 추세는 정화 사업 이후 새롭게 형성된 퇴적 환경이나 도시화에 따른 신규 비점오염원 유입과 관련될 수 있다. 실제로 마산만으로 유입되는 하천 및 우수관로를 통한 비점오염원이 중금속 농도 유지의 주요 원인으로 보고된 바 있으며(Jeong et al.[2020]), 특히 Ni의 경우 스테인리스강 등 특수 금속 가공 산업이 활발한 배후 산업의 특성이 반영된 것으로 보인다. As는 하구역의 환원 환경 변화에 따른 퇴적물 내 용출 가능성 등 화학적 거동 변화에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 결론적으로 마산만은 정화 사업을 통한 일부 항목(Pb)의 성공적 개선과 지형적 한계에 갇힌 만성적 오염(Cd, Hg)의 잔류가 공존하는 해역이다. 이는 단순한 유입 저감 정책을 넘어, 오염이 심각한 특정 정점에 대한 정밀한 정화 사업과 배후 산업 비점오염원의 엄격한 관리가 병행되어야만 실질적인 해역 회복이 가능함을 시사한다.

부산연안에서는 Ni이 연평균 약 +0.24 mg/kg·yr⁻¹($p=0.04$, $R^2=0.43$)의 유의한 증가 경향을 보였지만, 그 증가폭이 미미하여 해역 전체의 화학적 특성을 변화시키는 수준은 아니었다(Fig. 4(b)).

Cu, Zn, Cr, Pb 등 대부분의 금속 항목은 조사 기간 동안 뚜렷한 장기적 추세 없이 비교적 안정적인 범위 내에서 변동하는 양상을 보였다(Fig. 3~Fig. 4). 이러한 안정화 경향은 과거 부산 남항(2009~2014년) 및 용호만 일대에서 대대적으로 시행된 ‘오염퇴적물 정화·복원 사업’의 효과가 장기적으로 유지되고 있음을 나타낸다(KOEM[2014]; MOF[2015]). 당시 부산 남항에서만 약 24만 m³ 이상의 고오염 퇴적물이 제거되었으며, 이는 부산연안 전반의 평균 오염도를 낮추고 안정화하는 데 결정적인 기여를 한 것으로 판단된다. 그러나 광역적인 평균 수준의 안정화에도 불구하고, Group 3의 출현 빈도는 특정 항목과 지점에서 만성적으로 높게 나타났다(Table 5). 특히 Hg의 Group 3 출현 비율은 2014년 30%(8건)로 정점을 기록한 이후 다소 감소하였으나, 이후에도 4~22% 수준으로 지속 확인되었다. 주목할 점은 이러한 Hg오염이 특정 항만에 국한되지 않고 부산연안 전반의 여러 정점(BK1416, BK1420, BK1424, BK1426 등)에서 광범위하게 반복된다는 것이다. 이는 Hg이 하천 유입뿐만 아니라 항만 내 대형 선박의 잦은 입·출항에 따른 저층 퇴적물 재부유(Resuspension)와 연안 조석류를 통한 확산 등 복합적인 경로로 거동하고 있음을 뒷받침한다(Choi *et al.*[2014]; Kim *et al.*[2018]). 또한, Cu는 부산 남항 근처(BK1435, BK1436)와 북항(HK1437) 정점에서 조사 기간 내내 7~11%의 Group 3 빈도를 기록하며 항만 활동에 기인한 국지적 축적 양상을 뚜렷이 보였다. Cd, Pb, Zn 역시 일부 연도에서 고오염 시료가 지속적으로 관찰되었다. 이는 정화 사업을 통해 광역적인 평균 오염도는 개선되었으나, 선박 수리, 하역, 방오도로 바리 등 항만 활동이 집중되는 고오염 지점에서는 심각한 오염이 완전히 해소되지 않았음을 의미한다. 결과적으로 부산연안은 전반적인 환경 수준의 안정화와 항만 중심의 국지적 고오염 구조가 공존하는 양상을 보였다. 향후 항만 내 특정 정점에 대한 정밀한 점오염에 대한 관리 전략이 요구된다.

울산연안은 조사기간 동안 Cu의 변화가 가장 뚜렷한 감소 양상으로 나타난 해역이다(Fig. 3(d)). 평균 Cu 농도는 2014년 142 mg/kg에서 2023년 73.2 mg/kg으로 감소하여, 조사기간 동안 총 68.4 mg/kg 감소하였고 이는 약 48.3%의 감소에 해당하였다. 다만 연도별 평균 농도는 단조롭게 감소하지 않았으며, 2015~2016년, 2019~2020년, 2020~2021년에는 일시적인 반동이 나타났다. 그럼에도 불구하고 조사기간 전체로 보면 울산연안의 Cu 농도 수준은 전반적으로 감소한 것으로 해석된다. 선형 회귀분석에서도 연평균 $-5.71 \text{ mg/kg-yr}^{-1}$ 의 유의한 감소 경향이 확인되었다($p=0.0062$, $R^2=0.63$). Sun *et al.* [2015]에서 보고된 울산-온산 연안의 Cu 평균 농도가 약 140 mg/kg 이상이었던 점을 고려하면, 본 연구에서 확인된 울산연안의 10년 평균 Cu 농도(91.4 mg/kg)는 과거보다 낮은 수준이다. 이는 울산연안의 Cu 오염 수준이 여전히 높은 범위에 속함에도 불구하고, 장기적으로는 일부 완화되는 방향의 변화를 보였음을 시사한다. 이러한 장기적 감소 경향의 주요 원인은 하역 및 물류 체계의 물리적 변화와 정책적 관리 강화의 결합으로 해석할 수 있다. 우선, 온산-온산항에 집중되어 있던 비철금속(동정광 등) 물류 부하를 분산하기 위해 일부 하역 기능을 부산 감천항 및 남신항 등 인근항만으로

이전하고, 노후화된 하역 설비를 밀폐형 연속식 하역기(CSU, Continuous Ship Unloader)로 교체함에 따라 과거 주요 오염원이었던 낙광 및 분진의 해상 유입이 직접적으로 차단된 효과가 컸던 것으로 판단된다(MOF[2021]). 또한, 2018년 울산연안이 특별관리해역으로 지정된 이후 시행된 연안오염총량관리제(TPLMS)는 Cu를 중점 관리 항목으로 설정하여 육상 점오염원의 배출을 엄격히 제한하였다. MOF[2021]에 따르면 제도 시행 이후 Cu 오염 부하량이 시행 전 대비 약 90% 이상 급감한 것으로 보고되었으며, 이러한 정책적 성과가 해저 퇴적물의 금속 농도 감소라는 실질적인 환경 변화로 이어진 것으로 보인다. 다만, 2015~2016년 및 2019~2021년 사이에 나타난 일시적인 농도 반동은 하구역 준설 활동이나 국지적인 배출원 변동에 기인할 가능성이 있으므로, 향후 상세 관리 이력 및 항만 운영 데이터와의 병행 검토가 요구된다. 한편, 울산연안은 전체 해역 중 Group 3 시료 발생이 가장 두드러진 해역이었다(Table 5). 특히 Hg는 전 기간 동안 7~14건(32~64%)의 높은 Group 3 시료가 지속적으로 확인되어 가장 뚜렷한 양상을 보였다. Hg는 처용항과 온산항 주변 정점(BK1501, BK1503, BK1507, BK1518 등) 및 온산국가산업단지 인접 내만 정점에서 반복적으로 Group 3이 관찰되었고, 2023년에는 총 14건(64%)이 발생하여 여전히 높은 수준을 유지하였다. Cd도 대부분의 연도에서 1~5건(5~23%)의 Group 3 시료가 나타났으며, Cu는 2~4건(9~18%), Pb는 1~3건(5~14%), Zn는 0~2건(0~9%) 범위에서 반복적으로 Group 3 시료가 확인되었다. 반면 As, Cr 및 Ni에서는 Group 3 시료가 관찰되지 않았다. 울산연안에서 관찰된 Cu 농도의 지속적 감소는 2017년 이후 본격 시행된 연안오염총량관리제(TPLMS)와 오염퇴적물 정화사업의 영향을 반영할 가능성이 있다. 울산-온산공단은 비철금속 제련 및 자동차-조선 산업이 밀집된 지역으로, Cu는 주요 관리 대상 배출 항목 중 하나로 알려져 있다. 총량제 도입 이후 육상기인 폐수 내 Cu 배출에 대한 규제가 강화되었으며, 온산항 및 장생포항 인근에서 수행된 오염퇴적물 준설사업(2015~2019년)은 고농도 Cu가 축적된 표층 퇴적물을 물리적으로 제거하는 역할을 수행한 것으로 보고되었다(KOEM[2021]). 한편 Hg 및 Cd은 과거 산업활동에 의해 심층 퇴적층에 축적된 과거 오염의 잔존 영향이 크게 작용하는 금속으로 단기간 내 농도 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는 경향이 보고된 바 있다(Woo *et al.* [2019]). 따라서 울산연안에서의 Cu 감소는 제도적·물리적 관리 조치가 퇴적물 환경 개선으로 연결된 사례로 해석될 가능성이 있다.

4. 결 론

본 연구는 2014~2023년 동안 국내 특별관리해역 표층퇴적물의 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)에 대한 공간적 분포와 10년간의 장기 시계열 변화를 통합적으로 분석하였다. 연구 결과, 특별관리해역의 중금속 오염은 해역별 산업 구조, 항만 활동의 역동성, 그리고 수리·지형 조건에 따라 뚜렷한 공간적 이질성을 보였으며, 주요 시사점은 다음과 같다. 첫째, 정책 및 산업 체계의 변화가

퇴적물 환경 개선에 실질적으로 기여함을 확인하였다. 울산연안에서 관찰된 Cu 농도의 유의한 감소(2014년 142 mg/kg에서 2023년 73.2 mg/kg으로 감소)는 밀폐형 하역 설비(CSU) 도입과 같은 물류 현대화와 연안오염총량관리제(TPLMS)의 효과가 결합된 결과로 해석된다. 마산만과 부산연안에서 나타난 Pb의 안정화 역시 과거 대규모 오염퇴적물 정화복원 사업의 장기적 성과를 반영한다. 반면, 평양만 Cu의 유의한 증가(2014년 22.6 mg/kg에서 2023년 28.7 mg/kg)으로 증가는 반폐쇄성 지형에 따른 트랩(Trap) 효과와 이차전지 등 신규 산업 기반 확장이 맞물려 배경 농도가 상향 평균화되는 단계적 오염 심화 과정에 있음을 시사한다. 둘째, 광역적인 평균 수준의 개선에도 불구하고 항만 중심의 이중적 오염 구조가 고착화되고 있음을 확인하였다. 부산 남항 및 북항, 마산항 내측 등 항만 활동이 집중된 특정 정점에서는 주의기준 및 관리기준 초과 사례가 반복되었으며, 특히 Hg와 Cd은 시계열적 감소 없이 높은 농집지수 등급을 유지하였다.

이는 과거 산업 활동으로 누적된 유산 오염(Legacy pollution)이 선박 항행에 의한 재부유(Resuspension)나 배후 산단의 비점오염원 유입을 통해 지속적으로 재배치되고 있음을 의미한다.

본 연구는 표층퇴적물 자료를 기반으로 하여 심층 퇴적물의 오염 이력 복원이나 금속의 생물학적 이용가능성(Bioavailability) 평가에는 한계가 있다. 또한, 개별 배출원의 정량적 기여도를 산정하지 못해 오염 기원의 직접적인 인과관계를 규명하는 데 제약이 따랐다. 향후에는 퇴적물 코어 분석을 통한 장기 축적 이력 복원, 금속의 화학적 분획(Speciation) 분석, 그리고 수치 모델링을 활용한 배출원 추적(Source apportionment) 연구가 병행되어야 한다. 이러한 다각적 접근을 통해 해역별 오염 특성에 기반한 전략을 수립함으로써, 연안오염총량관리제의 실효성을 제고하고 연안 생태계의 실질적인 회복을 견인할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 해양수산부 해양환경측정망 운영사업의 지원으로 수행되었습니다. 본 과제에 현장 조사 및 시료 분석에 기여하신 다수의 연구자와 조사 선박을 운영하여 주신 분들께 감사드립니다. 또한 이 논문을 세심하게 검토하여 주신 익명의 심사위원들께 감사드립니다.

References

- [1] Birch, G.F. and Taylor, S.E., 1999, Source of heavy metals in sediments of a contaminated estuary (Sydney Harbour, Australia). *Science of the Total Environment*, 227(2-3), 123-138.
- [2] Burton, E.D. *et al.* 2006, Geochemical partitioning of copper, lead, and zinc in estuarine sediments. *Environmental Pollution*, 144(1), 232-239.
- [3] Busan Metropolitan City 2016, Busan Statistics. <http://www.busan.go.kr> (Accessed 2 Apr 2016).
- [4] CCME 2001, Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables. Updated 2001. Winnipeg.
- [5] Cho, K.D. *et al.* 2014, Study on the contamination sources around Lake Shihwa – Part 1. The characteristics of water qualities and heavy metals in the stream water. *Proceedings of the Korean Society of Oceanography Conference*, Busan, Korea, pp. 1-10.
- [6] Choi, M.S. *et al.* 2014, The effect of sediment resuspension on the metal mobilization in semi-enclosed bays. *Journal of Coastal Research*, 70, 452-458.
- [7] Choi, J.Y. *et al.* 2016, A study on the improvement plan of marine contaminated sediment management system. KIOST Report, MOF, 2016.
- [8] Clark, R.B., 2001, *Marine Pollution* (Fifth edition). Oxford, 236 pp.
- [9] Förstner, U. and Wittmann, G.T.W., 1981, *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, Berlin.
- [10] Han, G.M. *et al.*, 2016, Assessment of Persistent Organic and Heavy Metal Contamination in Busan Coast: Application of Sediment Quality Index. *Ocean and Polar Research*, 38(3), 171-184.
- [11] Horowitz, A.J., 1985, *A primer on trace metal-sediment chemistry*. US Government Printing Office, 67 pp.
- [12] Hwang, D.W. *et al.*, 2014, Distribution and pollution assessment of organic matter and trace metals in surface sediment around Ulsan Harbor. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 17(3), 146-160.
- [13] Hwang, K.H., Kim, G.Y., Jeon, J.H. and Lee, D.I., 2015, Assessment of Metal Contamination and Remediation Effectiveness in Masan Bay. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 18(2), 79-87.
- [14] Jeong, D. *et al.*, 2018, Contamination and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of the Masan Bay and Ulsan Coast. *Proceedings of the Korean Society of Marine Environment & Safety Conference*, 2018, 144-144.
- [15] Jeong, H., Kim, K.T., Kim, E.S., Ra, K. and Lee, S.Y., 2016, Sediment Quality Assessment for Heavy Metals in Streams Around the Shihwa Lake. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 19(1), 25-36.
- [16] Jeong, H. *et al.*, 2019, Study on dissolved and particulate heavy metals in stream water and stormwater runoff from Suyeong watershed in Busan special management area, Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 22(4), 203,214.
- [17] Jeong, H., Choi, J.Y. and Ra, K.T., 2020, Assessment of metal pollution of road-deposited sediments and marine sediments in Gwangyang Bay. *The Sea*, 25(2), 42,53.
- [18] Kim, G. *et al.*, 2018, Characteristics of heavy metal distribution and resuspension in the Busan Coast. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 112-121.
- [19] Kim, B.H., 2018, Assessment of heavy metal contamination and ecological risk in surface sediments of the special management sea areas. Master's Thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea.

- [20] Kim, D.H. *et al.*, 2022, A study on the introduction of a total pollutant load management system in Gwangyang Bay, Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 28(6), 899-905.
- [21] Kim, J.Y. *et al.*, 2019, Assessment of heavy metal contamination in coastal sediments near industrial complexes in Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 110186.
- [22] KMGL 2022, Korean Ministry of Government Legislation. <http://www.law.go.kr/>
- [23] KOEM 2014, Final Report of the Contaminated Sediment Remediation Project in Busan South Port. Korea Marine Environment Management Corporation.
- [24] KOEM 2021, Comprehensive Evaluation of the Contaminated Sediment Remediation Projects in Ulsan and Jangsaengpo Harbors. Korea Marine Environment Management Corporation.
- [25] Kwon, Y.T., 2004, Evaluation of Heavy Metal Pollution in the Dumping Site of the Dredged Sediment, Masan Bay. *Journal of the Korean Society*, 7(2), 75-81.
- [26] Lee, C.H. *et al.*, 2009, Characteristics and constraints of pollutant load allocation reflected in the total pollutant load management plans of Masan Bay special management area. *Ocean Policy Research*, 24(2), 1-25.
- [27] Lee, M.O. *et al.*, 2013, Marine environmental studies in Gwangyang Bay, Korea: Past, present, and future direction. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 24(4), 161-178.
- [28] Lee, J.S. *et al.*, 2011, Evaluation of Marine Sediment Contamination and Remediation Effectiveness in Masan Bay. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 17(1), 1-10.
- [29] Lee, S.H. *et al.*, 2021, Influence of grain size and organic matter on the distribution of trace metals in estuarine sediments. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(11), 4425-4441.
- [30] Lim, D.I., Choi, J.Y., Jung, H.S., Choi, H.W. and Kim, Y.O. 2007, Natural Background Level Analysis of Heavy Metal Concentration in Korean Coastal Sediments. *Ocean and Polar Research*, 29(4), 379-389.
- [31] Long, E.R. *et al.*, 1995, Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19(1), 81-97.
- [32] MacDonald, D.D. *et al.*, 1996, Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 5(4), 253-278.
- [33] Maslennikova, S. and Larina, N., 2012, The effect of sediment grain size on heavy metal content. *Lakes, Reservoirs and Ponds*, 6(1), 43-54.
- [34] MOF 2013, Marine environment quality criteria. MOF Notification No. 2013-186.
- [35] MOF 2013a, Korean Standard Method for Marine Environment. MOF Notification No. 2013-230.
- [36] MOF 2013b, Shihwa Lake Marine Environment Improvement Project. MOF.
- [37] MOF 2015, Final Report on the Remediation of Contaminated Marine Sediments in Masan Bay. Masan Regional Office of Oceans and Fisheries.
- [38] MOF 2019, A study on the introduction of seawater management by total pollutant load management system in Ulsan and Gwangyang Bay, specially managed sea area (2018), p. 442.
- [39] MOF 2021, Performance Report on the Reduction of Pollutant Loads in the Ulsan Special Management Sea Area. MOF.
- [40] MOF, Ministry of Environment, and Gyeonggi-do 2024, The 4th Management Plan for the Shihwa Lake Special Management Area.
- [41] Morse, J.W. and Luther, G.W., 1999, Chemical influences on trace metal-sulfide interactions in anoxic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(19-20), 3373-3378.
- [42] Muller, G., 1969, Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.
- [43] Muller, G., 1981, Schwermetallbelastung der Sedimente des Neckars und Seiner Nebenflüsse: eine Estandsaufnahme. *Chem. Zeitung*, 105, 157-164.
- [44] Park, Y.A. *et al.*, 1984, Sedimentary environments of the Gwangyang Bay, southern coast of Korea. *Journal of the Oceanological Society of Korea*, 19(1), 82-88.
- [45] Song, Y. and Choi, M.S., 2017, Assessment of heavy metal contamination in sediments along the coast of South Korea using Cs-normalized background concentrations. *Marine Pollution Bulletin*, 117(1-2), 532-537.
- [46] Song, Y., Choi, M.S., Lee, J.Y. and Jang, D.J., 2014, Regional background concentrations of heavy metals (Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb) in coastal sediments of the South Sea of Korea. *Science of the Total Environment*, 482-483, 80-91.
- [47] Sun, C.I. *et al.*, 2015, Pollution and ecological risk assessment of trace metals in surface sediments of the Ulsan-Onsan coast. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 18(4), 245-253.
- [48] Thornton, I., 1983, Applied environmental geochemistry. Academic Press.
- [49] Turner, A., 2010, Marine pollution from antifouling paint particles. *Marine Pollution Bulletin*, 60(2), 159-171.
- [50] Won, J.H. and Go, N.P., 1975, Water quality of the culture beds of hard clam and adjacent sea of the Yeosu Refinery of Honam Oil Refinery Co. in Kwangyang Bay. *Bulletin of the Korean Fisheries Society*, 8(2), 73-84.
- [51] Woo, J. *et al.*, 2019, Background concentration and contamination assessment of heavy metals in Korean coastal sediments. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 24(1), 64-78.
- [52] Wui, I.S. *et al.*, 1993, Factor analysis of the environmental impact on microbial population in Kwangyang Bay. *Korean Journal of Environmental Biology*, 11(1), 11-16.

Received 22 September 2025

1st Revised 19 November 2025, 2nd Revised 22 April 2026

Accepted 24 April 2026