

남동해 연안 퇴적물 내 미량금속 분포 및 생태위해도 평가

황동운¹ · 최민규* · 임재현 · 이인석² · 이가람 · 나수진

국립수산과학원 기후환경연구부 해양환경연구과, ¹국립수산과학원 연구기획과, ²국립수산과학원 서해수산연구소 기후환경지원과

Trace Metal Distribution and Ecological Risk Assessment in Marine Sediments from the Southeast Coastal Areas of Korea

Dong-Woon Hwang¹, Minkyu Choi*, Jae-Hyun Lim, In-Seok Lee², Garam Lee and Sujin Na

Division of Marine Environment Research, National Institute of Fisheries Science (NIFS), Busan 46083, Republic of Korea
¹R&D Planning and Coordination Department, National Institute of Fisheries Science (NIFS), Busan 46083, Republic of Korea
²West Sea Fisheries Institute, National Institute of Fisheries Science (NIFS), Incheon 22383, Republic of Korea

The concentrations of trace metals and organic matters in marine sediments collected from southeast Korean coastal areas were investigated. The primary purpose of this study was to evaluate the contamination status, spatial distribution and potential ecological risks associated with the physiochemical composition in the studied areas. We found that the concentrations of trace metals in marine sediments were as follows: Fe > Mn > Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg. According to the sediment quality guidelines (SQGs) of Korea, concentrations of Zn, Cr, Cu and Cd at all sampling sites were below threshold effect levels (TEL). However, concentrations of As, Hg, and Pb (i.e., at the 94–98% of sampling sites), were below the TEL. In addition, concentration factors (CF) in the surveyed area were found to be associated with low ecological risks, whereas As, Hg, and Cu showed moderate to high risk levels in some inner parts of the studied bays. Finally, the pollution load index (PLI) and ecological risk index (ERI) of the elucidated metals were linked to moderate ecological risk, pointing to the possibility of being deleterious to some benthic organisms.

Keywords: Trace metals, Marine sediments, Concentration factor, Pollution load index, Ecological risk index

서론

우리나라의 2021년도 어업 총생산량은 382만톤이었으며, 이중 해면양식업은 어업 총생산량의 약 62.8% (240만톤)로 가장 큰 기여를 하였고, 다음으로 연근해어업 94.1만톤(24.6%), 원양어업 43.9만톤(11.5%), 내수면어업 4.3만톤(1.1%) 순이었다 (KOSIS, 2022). 특히, 해면양식업 생산량은 2001년 60만톤에서, 2011년 150만톤, 2021년 240만톤으로 지난 20년간 비약적으로 증가해 왔다. 이러한 해면양식업의 큰 성장에도 불구하고 장기간에 걸친 양식어장의 이용과 과밀양식, 무분별한 양식어장의 확장 등으로 유기물 및 미량금속 등에 의한 오염도 함께 증가되고, 부영양화에 따른 적조와 빈산소수괴 발생 등 2차 오염으로 인해 양식생물의 성장 저하 및 대량 폐사가 발생하여 양

식어장의 생산성이 저해되고 있는 실정이다(Lee et al., 2011; Choi et al., 2017; Hwang et al., 2018). 따라서, 고부가가치 해면양식 생산량 증대뿐만 아니라 양식의 지속가능성을 유지하기 위하여 양식어장 주변의 수서 및 저서환경에 대한 지속적인 환경조사 및 진단 연구는 매우 중요하다. 저서환경의 연안 퇴적물은 다양한 오염원로부터 기인한 유기물, 미량금속 등 오염물질이 흡착과 침적 과정을 통해 축적되는 최종 기착지이자 중요한 저장소로서 역할을 한다. 연안 퇴적물은 연안역에서 발생하는 다양한 생지화학적 환경변화를 반영하기 때문에 환경변화 연구에 유용한 매체로 미량금속의 오염 역사 등 인위적인 활동에 의해 야기되는 연안 환경변화를 이해하는데 중요한 판단 기준으로 이용되어 왔다(Zwolsman et al., 1997; Chapman et al., 1998). 일반적으로 미량금속은 암석의 풍화, 화산활동, 인간

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2540 Fax: +82. 51. 720. 2515

E-mail address: mkchoi3@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0438>

Korean J Fish Aquat Sci 56(4), 438-448, August 2023

Received 22 May 2023; Revised 11 July 2023; Accepted 2 August 2023

저자 직위: 황동운(연구사), 최민규(연구관), 임재현(연구사), 이인석(연구사), 이가람(연구원), 나수진(연구원)

의 산업활동 등 다양한 오염원으로부터 배출되고, 높은 잔류성(persistence), 생물축적성(bioaccumulation)과 독성(toxicity)을 가지고 있다. 따라서 인위적 활동이 활발한 연안에서 퇴적물 내 미량금속의 농축(enrichment), 오염현황 및 역사에 대한 연구가 지속적으로 수행되어져 왔다. 퇴적물 내 미량금속 오염평가는 인위적인 활동으로 인한 특정 미량금속의 농도변화 및 해양생물에 미치는 위해도를 파악하는데 매우 유용한 방법이고, 많은 연구자들은 퇴적물에서 미량금속 오염지수(contamination index)를 활용하여 오염도를 보다 정량적으로 평가해왔다(Lee et al., 2004; Yuan et al., 2012; Ra et al., 2013; Choi et al., 2015b; Hwang et al., 2015a, 2015b, 2018; Won et al., 2020). 예로서, 미량금속 농축인자(enrichment factor; geo-accumulation index), 오염 부하 지수(pollution load index, PLI), 생태계 위해도 지수(ecological risk index, ERI)와 같은 오염지수는 생태학적인 악영향이 발생할 수 있는 조사정점을 구분하고, 다른 해역에 비해 오염되거나 악영향이 원인일 수 있는 미량금속 종류에 대한 정보도 제공할 수 있다.

우리나라 남해안은 전국 양식장(어업면허권 및 양식 면적)의 80%가 분포하고 있다(KOSIS, 2022). 특히, 남동해 연안은 경상남도 남서부에 위치한 진주만에서부터 남동쪽에 위치한 거제-한산만까지 넓은 해역에 걸쳐 있다(Fig. 1). 남동해 연안은 리아스식 해안과 반폐쇄적인 내만, 다도해 등 지형적인 특성으로 인해 양식의 최적 해양 환경 조건을 갖추고 있어 각종 어류 및 패류 양식장이 밀집되어 있으며, 패류 양식 생산량은 전체 양식 생산량의 약 20-30%의 높은 비중을 차지하고 있다(KOSIS, 2022). 해양수산부는 이러한 남동해 연안의 수산학적인 중요성을 인식하여 1971년부터 남동해 연안의 거제-한산만 해역(제1

호해역, 20.5 km²), 자란만·사량도해역(제2호해역, 94.9 km²), 미륵도해역(제3호해역, 31.1 km²), 창선해역(제6호해역, 59.1 km²), 강진만해역(제7호해역, 52.9 km²)은 수출용 패류생산 해역으로 지정하여 관리하고 있다(MOF, 2023). 또한 수산자원관리법에 근거하여 1975년부터 남해통영I(남해군, 하동군, 132.1 km²), 남해통영 II(고성군, 남해군, 사천시, 통영시, 386.0 km²), 한산만(거제시, 고성군, 통영시, 342.4 km²)을 수산자원보호구역으로 지정하여 관리하고 있다(MOF, 2020). 그러나 대부분의 남동해 연안(고성자란만, 통영연안-북신만, 거제-한산만)에서 조류소통 미흡, 퇴적환경 오염 등으로 매년 6-10월까지 반폐쇄적인 내만을 중심으로 빈산소수괴가 발생하고 있으며, 양식생물 폐사 등 수산피해도 발생하고 있다(NIFS, 2022). 현재까지 이들 해역에 대한 퇴적물 중 유기물 및 미량금속 등의 환경조사는 남해 강진만(Choi et al., 2015a), 고성자란만(Hwang et al., 2018), 거제-한산만(Hwang et al., 2015b) 등 일부 내만에 대해 부분적으로 수행되었고, 남동해 연안 전반에 걸친 환경조사 및 오염수준의 직접적 비교분석은 부재한 실정이다.

본 연구에서는 수산학적으로 매우 중요한 해역인 남해 강진만에서부터 거제-한산만에 이르는 남동해 연안 퇴적물의 미량금속 농도 분포특성, 오염, 생태위해도 평가 등을 실시하여 이들 해역에서 인위적 활동에 따른 환경오염 상태를 진단하고자 하였다. 이를 위하여 2016년 2월에 연구해역 내 연안 퇴적물(47개 조사정점에 대해서 미량금속 10종[비소(As), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 구리(Cu), 철(Fe), 수은(Hg), 리튬(Li), 망간(Mn), 납(Pb), 아연(Zn)]과 함께 입도(grain size), 유기물 오염지표[강열감량(ignition low, IL)], 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS)]

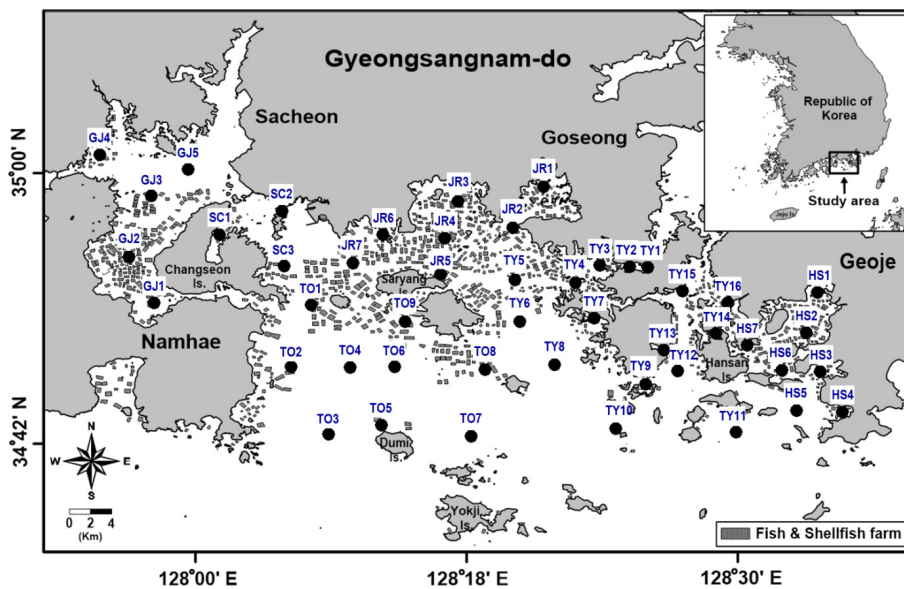


Fig. 1. Sampling location in the Southeast coastal area of Korea.

을 조사·분석하였다.

재료 및 방법

시료채취

본 연구에서는 2016년 2월 남동해 연안 6개 해역, 즉 남해 강진만(GJ1-5), 사천연안(SC1-3), 고성자란만(JR1-7), 통영연안(TY1-16), 통영외안(TO1-9), 거제-한산만(HS1-7)의 총 47개 정점에서 연안 퇴적물 시료를 채취하였다(Fig. 1). 표층 퇴적물(-4 cm) 시료는 채니기(Van Veen grab sampler; area, 0.05 m²)를 이용하여 채취한 시료는 미리 산으로 세척된 polyethylene 병에 담아 실험실로 운반한 후 실험전까지 냉동보관 하였다.

시료 전처리 및 분석방법

퇴적물 중 미량금속(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Pb, Zn) 분석은 Hwang et al. (2006, 2015a, 2015b)이 제시한 방법에 기초하였고, 퇴적물의 입도, IL, AVS, COD은 해양환경공정시험기준(MOF, 2021b)에 기초하여 분석하였다.

미량금속은 습식 퇴적물 약 200 g을 -80°C에서 동결건조한 후 상온에서 막자사발(Agate mortar)로 분쇄하여 균질화 하였으며, 플라스틱 재질의 체(4 Ø)로 체질하여 세립한 퇴적물이 이용하였다. Hg은 동결건조한 세립질 퇴적물 약 0.1 g을 다른 전처리 과정 없이 자동수은분석기(Automatic mercury analyzer; DMA-80; Milestone, Balsamo Milan, Italy)로 분석하였다. 그 외 미량금속(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Pb, Zn)은 동결건조한 세립질 퇴적물 약 0.5 g에 혼합산(HNO₃:HF:HClO₄=2:2:1)을 첨가하여 산분해법(acid digestion)으로 전처리하였다. 시료는 130°C에서 7시간 이상 가열하여 분해한 후, 2% 질산(HNO₃)을 이용하여 잔사가 남지 않을 때까지 완전히 녹여 여과지(Toyo 5C, 110 mm; Advantec, Tokyo, Japan)로 여과하였으며, 여과액을 100 mL 부피 플라스크로 정용한 뒤 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS; Elan DRC-e; Perkin Elmer, Shelton, WA, USA)로 분석하였다. 분석결과의 정확도 검증을 위해 캐나다 국가연구위원회 산하연구소(National Research Council Canada, NRCC)에서 제작한 해양 퇴적물의 인증표준물질(certified reference material, CRM)인 MESS-3 (Hg)와 PACS-2 (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Pb, Zn)를 시료와 동일한 방법으로 전처리하여 분석하였다. 이때, 각 미량금속의 평균 회수율은 99±6%였고, Pb 88%로 가장 낮은 수준이었고, Fe 105%로 가장 높은 수준이었다(Table 1).

입도는 습식 퇴적물 약 100 g에 과산화수소(H₂O₂)와 염산(HCl)을 넣어 유기물과 탄산염을 제거한 후, 4 Ø (<63 µm) 체로 습식 체질하여 조립질과 세립질로 구분하였다. 4 Ø보다 큰 조립질 입자는 70°C에서 건조 후 건식 체질하였고, 4 Ø 이하의

세립질 입자는 1 L 메스실린더에 퇴적물을 넣어 침강시킨후 상등액을 제거하여 남긴 약 80 mL를 자동입도분석기(Sadigraph III 5120; Micromeritics, Norcross, GA, USA)로 분석하였다. 분석결과는 1 Ø 간격으로 입자의 크기별 무게 백분율을 구하여 자갈(gravel), 모래(sand), 실트(silt), 점토(clay)의 함량을 산정하였다. 또한 퇴적물의 평균입도(mean grain size, Mz)와 퇴적상(sedimentary type)은 Folk and Ward (1957)와 Folk (1968)의 방법에 따라 각각 구하였다.

AVS는 습식 퇴적물 약 2 g을 황화수소 발생관에 넣어 황산(H₂SO₄)과의 반응으로 생성된 황화수소를 검지관에 통과시켜 변색된 지점의 눈금으로 추정하였다. COD는 습식 퇴적물 약 1-2 g을 각각 2개의 삼각플라스크에 옮겨 담은 후 0.1 N 과망간산칼륨(KMnO₄)과 10% 수산화나트륨(NaOH)을 넣고 혼합하여 끓는 물에 1시간 동안 중탕하였다. 이후 실온으로 냉각하여 10% 요오드화칼륨(KI)과 4% 아지드나트륨(NaN₃)을 넣어 유리섬유여과지로 여과한 용액을 0.1N 티오황산나트륨(Na₂S₂O₃·H₂O)으로 적정하였고, 적정시 소요된 양으로 농도를 계산하였다. IL은 건조한 퇴적물 약 10 g을 회화로에 넣어 550°C에서 4시간 동안 회화시킨 후, 회화 전과 후의 무게차이를 이용하여 계산하였다. 본 연구에서 미량금속과 AVS, COD의 농도는 퇴적물의 함수량을 보정하여 건중량(dry weight)을 기준으로 계산하여 제시하였다.

미량금속의 오염 및 생태위해도 평가

연안 퇴적물의 미량금속 오염 평가는 다양한 평가방법이 활용되고 있으며, 본 연구에서는 국내외 연구자들(Pan et al., 2014; Zhu et al., 2016; Won et al., 2020; Hwang et al., 2021)에 의해 널리 이용되고 있는 방법, 즉 국가에서 설정한 퇴적물 기준(sediment quality guidelines, SQGs)과의 비교와, 대표적인 오염지수인 PLI 및 ERI를 활용하여 실시하였다.

Table 1. Recovery of certified reference materials (PACS-2 and MESS-3; marine sediments) in this study

Trace metal	Certified value (mg/kg)	Measured value (N=3, mg/kg)	Recovery (%)
As	26.2±1.5	27.0±1.2	103±4
Cd	2.11±0.14	2.15±0.05	102±2
Cr	90.7±4.6	81.7±2.5	90±3
Cu	310±12	300±5	97±2
Fe	40,900±600	42,779±1314	105±3
Hg*	0.091±0.009	0.093±0.001	102±1
Li	32.2±2.0	31.8±0.3	99±1
Mn	440±19	456±15	104±3
Pb	183±8	162±2	88±1
Zn	364±23	371±7	102±2

*Hg was analyzed in MESS-3.

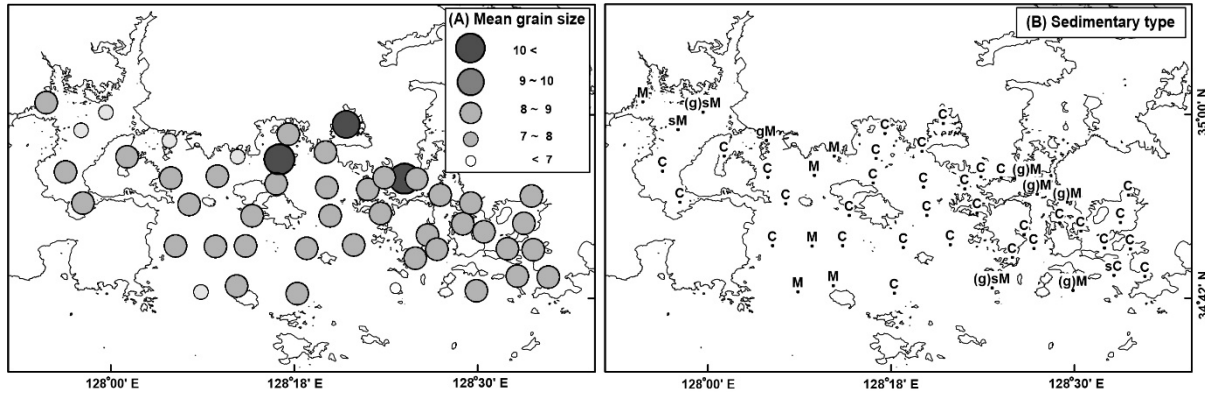


Fig. 2. Mean grain size (A) and sedimentary type (B) in marine sediments from the Southeast coastal area of Korea. Korea (Abbreviation: C-Clay, sC-sandy clay, M-mud, gM-gravelly mud, sM-sandy mud, (g)sM- slightly gravelly sandy mud).

SQGs는 국내 “해양환경 보전 및 활용에 관한 법률” 제13조 해양환경기준에서 제시한 미량금속 7종(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)에 대한 주의기준(threshold effects levels, TEL)과 비교하여 오염수준을 평가하였다. 여기서, 퇴적물의 As, Cd, Cr, Hg, Pb 농도는 TEL과 직접 비교하였고, Cu와 Zn 농도는 연구해역의 퇴적물 중 Li 농도로 보정된 Cu와 Zn 농도와 비교하였다(MOF, 2018).

PLI는 연구해역의 퇴적물 중 각 미량금속 농도(C_{sample})와 지각 혹은 오염되지 않은 해역의 퇴적물 중 각 미량금속의 배경농도($C_{baseline}$)의 비율($CF=C_{sample}/C_{baseline}$)을 이용하여 오염수준을 평가하는 방법이다. 이때, $CF < 1$ (low degree; Class 0), $1 \leq CF < 3$ (moderate degree; Class 1), $3 \leq CF < 6$ (considerable degree; Class 2), $CF \geq 6$ (very high degree; Class 3)으로 구분할 수 있으며, PLI는 각 미량금속 성분에 대한 CF 계산한 후 식(1)과 (2)로 산정할 수 있다(Tomlinson et al., 1980).

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

$$= (CF_{As} \times CF_{Cd} \times CF_{Cr} \times \dots \times CF_{Zn})^{1/7} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, CF_n (concentration factor)는 미량금속 n의 CF값을 의미하며, 본 연구에서는 지각물질 중 함량이 풍부한 Fe과 퇴적물의 산화/환원 상태에 따라 농도가 크게 변화하는 Mn을 제외한 미량금속 7종(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)에 대해 CF값을 계산하였다. 이때, 7종의 미량금속에 대한 배경농도($C_{baseline}$)는 최근 Woo et al. (2019)이 보고한 우리나라 연안 퇴적물의 미량금속 배경농도(As, 7.4 mg/kg; Cd, 0.134 mg/kg; Cr, 46.1 mg/kg; Cu, 14.7 mg/kg; Hg, 0.016 mg/kg; Pb, 25.2 mg/kg; Zn, 69.8 mg/kg)를 이용하였다. $PLI > 1$ 인 경우에 배경농도에 비해 오염된 상태이며, PLI 값이 보다 클수록 미량금속의 오염도는 높다는 것을 의미한다.

ERI는 퇴적물 중 미량금속의 농도가 저서생태계에 미치는 위

해도 수준을 평가하는 방법이며, PLI에서 사용한 CF값과 미량금속의 독성계수(toxic coefficient, T)를 이용하여 다음 식(3)–(5)로 산정할 수 있다(Hakanson, 1980).

$$E_n = T_n \times CF_n \dots\dots\dots (3)$$

$$ERI = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \dots\dots\dots (4)$$

$$= E_{As} + E_{Cd} + E_{Cr} + \dots + E_{Zn} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, T_n 은 각 미량금속의 독성계수이며, 퇴적물 오염평가에 널리 사용되고 있는 독성계수 값(As, 10; Cd, 30; Cr, 2; Cu, 5; Hg, 40; Pb, 5; Zn, 1)을 사용하였다(Wang et al., 2011; Sheykhi and Moore, 2013). ERI 값에 따라 오염수준을 평가할 수 있으며, $ERI < 100$ (low risk, 저서생물에 부정적인 생태영향을 줄 가능성이 낮은 상태), $100 < ERI < 150$ (moderate risk, 약간 부정적인 생태영향을 줄 수 있는 상태), $150 < ERI < 200$ (considerable risk, 상당한 부정적인 생태 영향을 줄 수 있는 상태), $200 < ERI < 300$ (very high risk, 매우 심한 부정적인 영향을 줄 수 있는 상태), $ERI > 300$ (disastrous risk, 극심한 부정적인 생태영향을 줄 수 있는 상태)의 총 5개오염상태로 구분할 수 있다(Zhang et al., 2012).

결과 및 고찰

입도조성

퇴적물의 입도조성에 의해 계산된 퇴적물의 평균입도는 평균 $8.6 \pm 0.6 \phi$ (범위 6.1–10.2 ϕ)로 연구해역은 주로 8 ϕ (입자 직경 0.004–0.008 mm)와 9 ϕ (입자 직경 0.002–0.004 mm) 범위의 주로 세립한 퇴적물로 이루어져 있었다(Table 2, Fig. 2). 남동해 연안 퇴적물은 점토(clay, 입자 직경 0.004 mm 이하)의 함량이 평균 $70.1 \pm 10.6\%$ 로 가장 높았으며 실트(silt, 입자 직경

0.063 mm 이하)가 평균 $26.1 \pm 10.3\%$ 였고, 모래(sand, 입자 직경 2 mm 이하)와 자갈(gravel, 입자 직경 2 mm 이상)이 각각 평균 $3.6 \pm 7.4\%$ 와 $0.2 \pm 1.0\%$ 로 비교적 낮은 함량을 보였다. 남동해 연안 퇴적물에서 점토와 실트의 함은 $96.2 \pm 7.9\%$ 로 연구해역의 대부분을 차지하였다. Folk (1968)의 분류법에 따라 퇴적상을 구분하였을 때, 니(mud, 12.8%), 점토(clay, 68.1%), 사질니(sandy mud, 2.1%), 사질점토(sandy clay, 2.1%), 약역사질니(slightly gravelly sandy mud, 12.8%), 역질니(gravelly mud, 2.1%)으로 총 6개의 유형으로 구분되었으며, 주요한 퇴적상은 점토(clay) 퇴적물이었다(Fig. 2).

남동해 연안을 6개 해역으로 구분하여 살펴보면, 점토의 함량은 고성자란만($73.7 \pm 16.0\%$)에서 가장 높았고, 통영연안($72.5 \pm 10.1\%$), 사천연안($71.8 \pm 1.3\%$), 거제-한산만($71.1 \pm 4.6\%$)에서 70% 이상을 보였으며, 통영외안($65.8 \pm 12.1\%$)과 강진만($62.7 \pm 5.9\%$)에서 상대적으로 낮은 수준을 보였다(Table 2). 평균입도는 고성자란만($8.8 \pm 0.8 \phi$)에서 가장 높았고, 통영연안($8.7 \pm 0.8 \phi$), 통영외안($8.6 \pm 0.3 \phi$), 거제-한산만($8.6 \pm 0.2 \phi$), 사천연안($8.3 \pm 0.8 \phi$), 강진만($8.3 \pm 0.4 \phi$) 순으로 낮았다. 특히, 본 연구해역의 평균입도는 서해안 조간대인 영광-무안연안(5.5ϕ ; Hwang et al., 2010), 압해도(6.9ϕ ; Hwang et al., 2011), 신안연안(5.3ϕ ; Hwang and Kim, 2011)과 비교했을 때 약 2-4 ϕ 정도 높았으며, 최근 Koo et al. (2019)이 보고한 남서해 연안의 수산자원보호구역인 가막만($7.8 \pm 0.2 \phi$), 여자만($7.8 \pm 0.6 \phi$), 득량만($7.7 \pm 0.3 \phi$), 완도연안($7.0 \pm 1.2 \phi$), 함평만($6.3 \pm 2.5 \phi$)보다도 약 2-4 ϕ 정도 높은 값을 나타내었다. 이러한 퇴적물 분

포는 반폐쇄적인 만이 많고, 만의 입구에는 크고 작은 섬들이 산재해 있어서 세립한 퇴적물이 외해로 빠져나가지 않는 연구해역의 지형학적 특성 때문인 것으로 생각되며(Choi et al., 2013), 이로 인해 세립한 퇴적물이 넓게 분포함으로써 유기물 및 미량금속의 축적이 매우 용이한 퇴적환경을 형성하고 있는 것으로 판단된다.

유기물 오염

퇴적물 내 유기물 지표(IL, AVS, COD)를 분석하여 연구해역 퇴적물의 유기물 함량 및 분포 특성을 살펴보았다. IL은 전체 조사정점에서 5.24-10.0% 범위로 평균 $7.93 \pm 1.01\%$ 의 분포 특성을 보였다. 퇴적물의 COD는 6.6-26.7 mg/g 범위와 평균 16.2 ± 4.8 mg/g을 보였고, AVS는 0.001-0.687 mg/g 범위와 평균 0.121 ± 0.162 mg/g을 보였다(Table 2). 국립수산과학원 양식장 적지조사 퇴적물 기준(COD 20 mg/g 이하, AVS 0.2 mg/g 이하)과 비교해 보면, COD는 본 연구해역의 퇴적물 47개 조사정점 중 8개(17%)가 기준을 초과하였고, AVS는 10개(23%)가 기준을 초과하였다. 또한 해양수산부의 국내 어장환경기준(AVS 0.5 mg/g 이하)과 비교시, 47개 조사정점 중 2개(4%)가 초과하였다. 이 외에도 부영양화물질에 의한 해양 퇴적물의 오염정도를 판단하는 부영양화물질 정화지수(CIET)를 이용하여 본 연구해역 퇴적물 오염도를 평가할 수 있다(MOF, 2021a). CIET는 부영양화물질 평가항목(IL, COD, AVS)에 대한 기준농도별 평가점수를 합산하여 산정할 수 있으며, 이때 CIET가 6이상이면 부영양화물질에 의해 오염된 퇴적물이며,

Table 2. Summary of grain size (Mz), contents of organic matters and trace metal concentrations in marine sediments from the Southeast coastal areas of Korea

		Mz (ϕ)	Clay (%)	Organic matter		
				IL (%)	AVS (mg/g)	COD (mg/g)
Gangjin Bay (n=4)	Mean \pm SD	8.3 \pm 0.4	62.7 \pm 5.9	8.08 \pm 0.77	0.157 \pm 0.204	16.5 \pm 7.7
	Range	7.7-8.6	53.3-67.5	7.27-8.91	0.002-0.419	9.1-25.4
Sacheon Coast (n=3)	Mean \pm SD	8.3 \pm 0.8	71.8 \pm 1.3	8.14 \pm 2.39	0.213 \pm 0.234	17.2 \pm 7.5
	Range	7.3-8.8	70.3-72.6	5.44-10.02	0.002-0.464	8.8-23.4
Goseong-Jaran Bay (n=7)	Mean \pm SD	8.8 \pm 0.8	73.7 \pm 16.0	7.36 \pm 1.18	0.104 \pm 0.163	15.0 \pm 4.2
	Range	7.8-10.1	50.7-98.1	5.28-8.54	0.002-0.424	9.1-21.1
Tongyoung Coast (n=16)	Mean \pm SD	8.7 \pm 0.8	72.5 \pm 10.1	8.30 \pm 1.06	0.135 \pm 0.206	17.7 \pm 4.7
	Range	6.1-10.2	43.4-95.8	5.24-10.00	0.001-0.687	7.3-26.7
Tongyoung Outer Coast (n=9)	Mean \pm SD	8.6 \pm 0.3	65.8 \pm 12.1	7.72 \pm 0.34	0.070 \pm 0.059	13.8 \pm 4.1
	Range	7.7-8.8	34.6-73.4	7.15-8.28	0.002-0.163	6.6-20.0
Geoje-Hasan Bay (n=7)	Mean \pm SD	8.6 \pm 0.2	71.1 \pm 4.6	7.71 \pm 0.50	0.108 \pm 0.093	16.1 \pm 2.9
	Range	8.4-8.9	63.9-77.2	7.02-8.26	0.014-0.262	12.2-20.9
Total (n=47)	Mean \pm SD	8.6 \pm 0.6	70.1 \pm 10.6	7.93 \pm 1.01	0.121 \pm 0.162	16.2 \pm 4.8
	Range	6.1-10.2	34.6-98.1	5.24-10.02	0.001-0.687	6.6-26.7

IL, Ignition low; AVS, Acid volatile sulfide; COD, Chemical Oxygen demand.

Table 2. Continued

		Trace metal								
		Fe (%)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	As (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)
Gangjin Bay (n=4)	Mean±SD	3.39±0.34	938±234	121±16	67.5±7.7	37.0±3.7	24.1±5.9	10.3±0.4	0.10±0.04	0.030±0.004
	Range	2.92–3.69	652–1,293	101–140	56.0–74.8	32.2–41.2	18.0–33.7	9.5–10.7	0.06–0.15	0.024–0.034
Sacheon Coast (n=3)	Mean±SD	3.56±0.29	1237±166	129±9	74.6±7.4	38.4±2.9	24.8±0.7	9.6±0.6	0.08±0.01	0.028±0.002
	Range	3.22–3.74	1,080–1,412	118–135	66.0–79.6	35.1–40.2	24.0–25.2	9.0–10.2	0.08–0.08	0.026–0.030
Goseong-Jaran Bay (n=7)	Mean±SD	3.93±0.53	858±131	131±18	79.7±14.5	38.6±3.5	24.5±5.4	9.3±1.0	0.08±0.03	0.024±0.003
	Range	3.25–4.73	616–978	105–149	56.4–99.6	33.8–43.8	17.7–43.8	8.4–11.3	0.05–0.14	0.020–0.029
Tongyoung Coast (n=16)	Mean±SD	3.95±0.32	701±203	137±15	81.9±6.5	37.3±5.8	36.2±14.1	10.3±3.5	0.12±0.10	0.039±0.023
	Range	3.54–4.76	468–1,128	118–174	67.0–90.9	31.7–53.8	22.1–73.3	7.6–21.8	0.04–0.38	0.025–0.117
Tongyoung Outer Coast (n=9)	Mean±SD	3.62±0.17	644±136	122±7	81.6±3.5	35.9±3.9	20.8±1.8	8.6±0.8	0.08±0.03	0.026±0.004
	Range	3.32–3.81	501–956	110–130	76.0–87.2	32.2–43.4	18.5–23.1	7.7–9.7	0.04–0.14	0.020–0.031
Geoje-Hasan Bay (n=7)	Mean±SD	3.79±0.26	656±145	133±12	77.8±5.3	35.9±6.3	32.3±7.0	8.7±1.4	0.08±0.03	0.031±0.003
	Range	3.54–4.17	520–887	120–152	68.1–84.0	30.9–49.6	22.8–41.5	7.4–11.8	0.04–0.13	0.028–0.037
Total (n=47)	Mean±SD	3.78±0.37	766±230	130±14	78.9±8.7	37.1±4.8	28.9±10.9	9.5±2.2	0.09±0.07	0.031±0.014
	Range	2.92–4.76	468–1,412	101–174	56.0–99.6	30.9–53.8	17.7–73.3	7.4–21.8	0.04–0.38	0.020–0.117

퇴적물의 정화가 필요한 것으로 판단할 수 있다. 본 연구해역에서 CIET는 3–6 범위로 평균 4.1를 보였으며, 47개 조사정점 중 1개(TY2, 통영연안-북신만 내측)만 초과하였다. 따라서 본 연구해역은 세립한 퇴적물이 넓게 분포하고 있지만, 아직 퇴적물의 정화가 필요한 만큼 유기물 오염이 심각하지 않은 것으로 판단된다

해역별 IL 농도를 살펴보면, 가장 높은 값을 보인 통영연안(8.30±1.06%)과 사천연안(8.14±2.39%), 강진만(8.08±0.77%)에서 8% 이상을 보였고, 통영외안(7.72±0.34%), 거제-한산만(7.71±0.50%), 고성자란만(7.36±1.18%)순으로 낮았다 (Table 2). COD 농도도 역시 가장 높은 값을 보인 통영연안(17.7±4.7 mg/g)과 사천연안(17.2±7.5 mg/g)에서 17 mg/g 이상으로 보였고, 강진만(16.5±7.7 mg/g), 거제-한산만(16.1±2.9 mg/g), 고성자란만(15.0±4.2 mg/g), 통영외안(13.8±4.1 mg/g) 순으로 낮았다. AVS 농도는 가장 높은 농도를 보인 사천연안(0.213±0.234 mg/g)에서 0.2 mg/g 이상의 가장 높은 수준을 보였고, 강진만(0.157±0.204 mg/g), 통영연안(0.135±0.206 mg/g), 거제-한산만(0.108±0.093 mg/g), 고성자란만(0.104±0.163 mg/g), 통영외안(0.070±0.059 mg/g) 순으로 낮았다. AVS 농도는 해역 내에서 높은 표준편차를 보였는데, 최대 농도는 통영연안(TY2, 0.687 mg/g), 사천연안(SC1, 0.464 mg/g), 고성자란만(JR1, 0.424 mg/g)과 강진만(GJ4, 0.419 mg/g)에서 조사되었다. AVS 농도는 유기물 유입량, 조류소통 등과 밀접한 관련성이 있으며, 조류소통이 원활하지 않은 해역에 유기물 농도가 증가할 경우 퇴적물은 혐기성환경으로 변하게 되고 황화물, 즉 AVS 농도는 증가하게 된다(Choi et

al., 2022). 상대적으로 높은 AVS 농도(0.2 mg/g 이상)는 주로 반폐쇄적인 내만의 안쪽 해역(GJ1, GJ4, SC1, JR1, JR3, TY1, TY2, TY3, HS1, HS2)에서 조사되었고, 외측 해역에서는 0.02 mg/g 이하의 낮은 수준을 보였다. AVS 농도는 COD 농도와 유의한 상관관계($r=0.636$, $P<0.01$)를 보였고, 이는 AVS와 COD 농도의 공간분포가 매우 유사함을 의미한다. 반면, AVS 농도와 IL의 상관계수는 0.23 ($P>0.05$)으로 통계적으로 유의하지 않았다. 한편, 일반적으로 연안 퇴적물 중 유기물 함량은 퇴적물의 평균 입도와 밀접한 관련이 있으며 대체로 세립질 퇴적물일수록 유기물 함량이 높은 것으로 알려져 있다(Hyun et al., 2003; Choi et al., 2007). 본 연구에서도 평균입도와 유기물 함량(COD, IL, AVS)과의 상관계수는 0.350–0.376 ($P<0.05$)이었으며, 통계적으로 유의한 수준이었다. 또한 본 연구해역 내 유기물 지표의 오염기준을 초과한 정점은 역시 주로 니(mud) 또는 점토(clay)의 세립한 퇴적물로 이루어져 있었다.

미량금속 농도분포

남동해 연안 퇴적물 중 각 미량금속의 농도는 Fe 2.92–4.76% (평균 3.78±0.37%), Mn 468–1,412 mg/kg (평균 766±230 mg/kg), Zn 101–174 mg/kg (평균 130±14 mg/kg), Cr 56.0–99.6 mg/kg (평균 78.9±8.7 mg/kg), Pb 30.9–53.8 mg/kg (평균 37.1±4.8 mg/kg), Cu 17.7–73.3 mg/kg (평균 28.9±10.9 mg/kg), As 7.4–21.8 mg/kg (평균 9.5±2.2 mg/kg), Cd 0.04–0.38 mg/kg (평균 0.09±0.07 mg/kg), Hg 0.020–0.117 mg/kg (평균 0.031±0.014 mg/kg) 순으로 낮은 농도를 보였다(Table 2). 공간적으로 통영연안과 고성자란

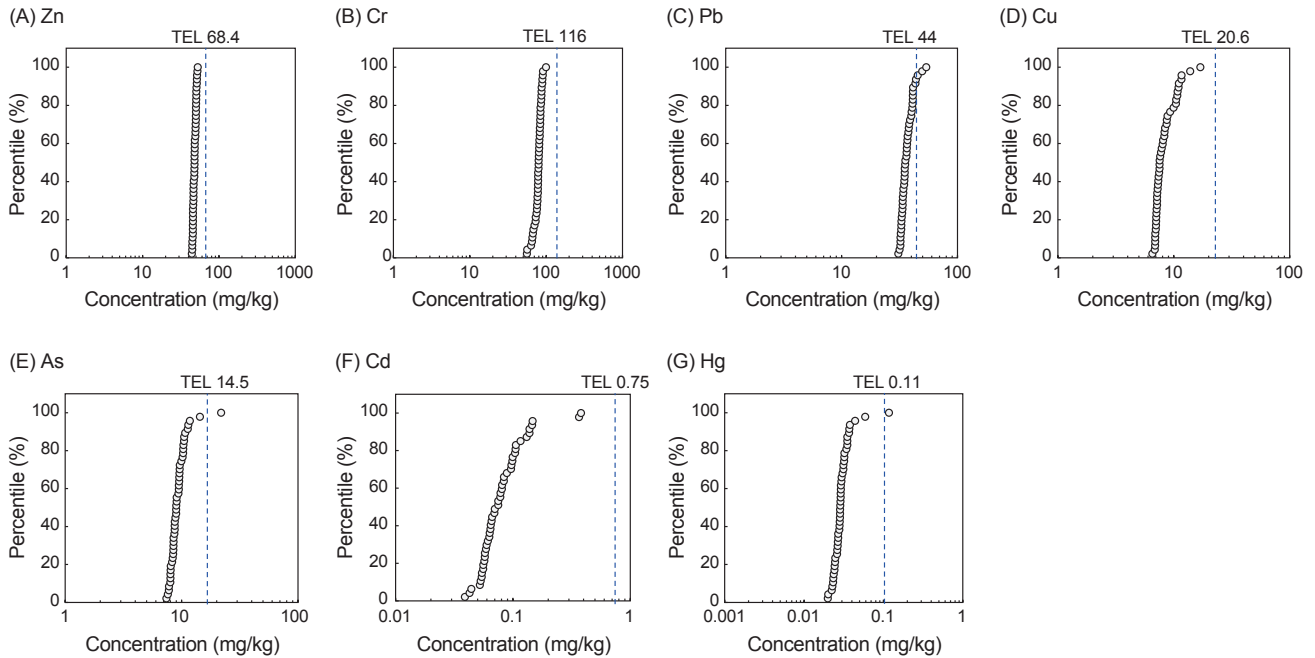


Fig. 3. Cumulative distribution of trace metals (Zn, Cr, Pb, Cu, AS, Cd, and Hg) in this study, in comparison with sediment quality guidelines, TEL (threshold effects level) recommended by Ministry of Oceans and Fisheries in Korea.

만 부근에서 다른 해역에 비해 높은 미량금속 농도를 보였으나, 본 연구의 6개 해역별 미량금속의 잔류패턴은 모두 동일한 패턴($\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$)을 나타내었다. 이러한 미량금속의 잔류패턴은 남해안에 위치한 반폐쇄적인 내만인 여자만 및 강진만(Choi et al., 2015a), 가막만(Kim et al., 2012)에서 측정된 퇴적물 중 미량금속의 잔류패턴과 일치하였다. 또한, 서해안의 목포연안(Hwang et al., 2013), 곰소만(Choi et al., 2015b), 태안반도 갯벌(Hwang et al., 2014b) 그리고 우리나라 전체 연안 퇴적물 중 미량금속 잔류패턴과도 일치하였다(Hwang et al., 2016). 한편, 울산항(Hwang et al., 2014a)과 시화호(Kim et al., 2005)와 같이 항만 및 산업단지 주변과 통영-거제연안의 어류양식장(Hwang et al., 2021)과 같이 인간활동에 의해 인위적인 오염원의 영향을 많이 받는 해역에서 미량금속의 잔류패턴($\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$)과 다소 차이를 보였다.

퇴적물의 미량금속 농도와 평균입도, COD와의 상관분석 결과, 평균입도와 통계적으로 유의한 상관성($p < 0.05$)을 보인 미량금속은 5종(Fe , Zn , Cr , Cu , Hg)이었으며, COD와 유의한 상관성을 보인 미량금속은 8종(Cr 제외)이었다. 따라서 본 연구 해역에서 퇴적물 중 미량금속의 분포는 평균입도 보다는 유기물 함량의 영향을 더 받는 것으로 판단되며, 이전에 Choi et al. (2015a)이 본 연구해역에 속해 있는 남해 강진만 퇴적물에서도 이와 같은 결과를 보고한 바 있다.

미량금속 오염도 평가

미량금속에 의한 퇴적물 오염도 평가를 위해 앞서 설명한 대로 본 연구에서는 SQGs, PLI, ERI 평가방법을 이용하여 남동해 연안 내 퇴적물의 오염현황 및 저서생물에 대한 위해도를 평가하였다. 먼저, 해양환경기준은 국가마다 해양환경특성 및 토종 생물영향을 고려하여 설정된 값이며, 본 연구의 미량금속 조사결과를 국내 해양 퇴적물 중 미량금속에 대한 해양환경기준인 주의기준(TEL)과 비교하였다(MOF, 2018). Cu와 Zn의 농도는 Li의 농도($73\text{--}109\text{ mg/kg}$, 평균 $90 \pm 10\text{ mg/kg}$)를 이용하여 입도의 영향을 고려한 보정된 농도를 사용하였으며, 이때 보정된 농도는 Cu $6.5\text{--}17.0\text{ mg/kg}$ (평균 $8.5 \pm 2.1\text{ mg/kg}$)와 Zn $44\text{--}53\text{ mg/kg}$ (평균 $48 \pm 2\text{ mg/kg}$)의 범위였다. 남동해 연안 내 모든 정점에서 Zn, Cr, Cu, Cd는 TEL보다 낮았지만, Pb, As, Hg는 일부 정점에서 TEL을 초과하였다(Fig. 3). Pb 농도는 조사정점 3개(TY1, TY2, HS1)에서 TEL을 초과하였고, As와 Hg 농도는 조사정점 1개(TY1)에서 TEL을 초과하였다(Fig. 4). 특히, 통영연안의 복신만 내측(TY1)에서 Pb, As, Hg의 오염이 우려되었다.

퇴적물 미량금속의 배경농도 수준과 비교하여 남동해 연안 퇴적물의 오염부하수준(PLI)을 평가하였고, 미량금속(7종)에 대한 CF를 계산 후 식(2)을 이용하여 정점별 PLI를 산정하였다. 미량금속(7종)에 대한 CF는 Cu $1.2\text{--}5.0$ (평균 2.0), Hg $1.2\text{--}7.3$ (평균 2.0), Cr $1.2\text{--}2.2$ (평균 1.7), Pb $1.2\text{--}2.1$ (평균 1.5), Zn

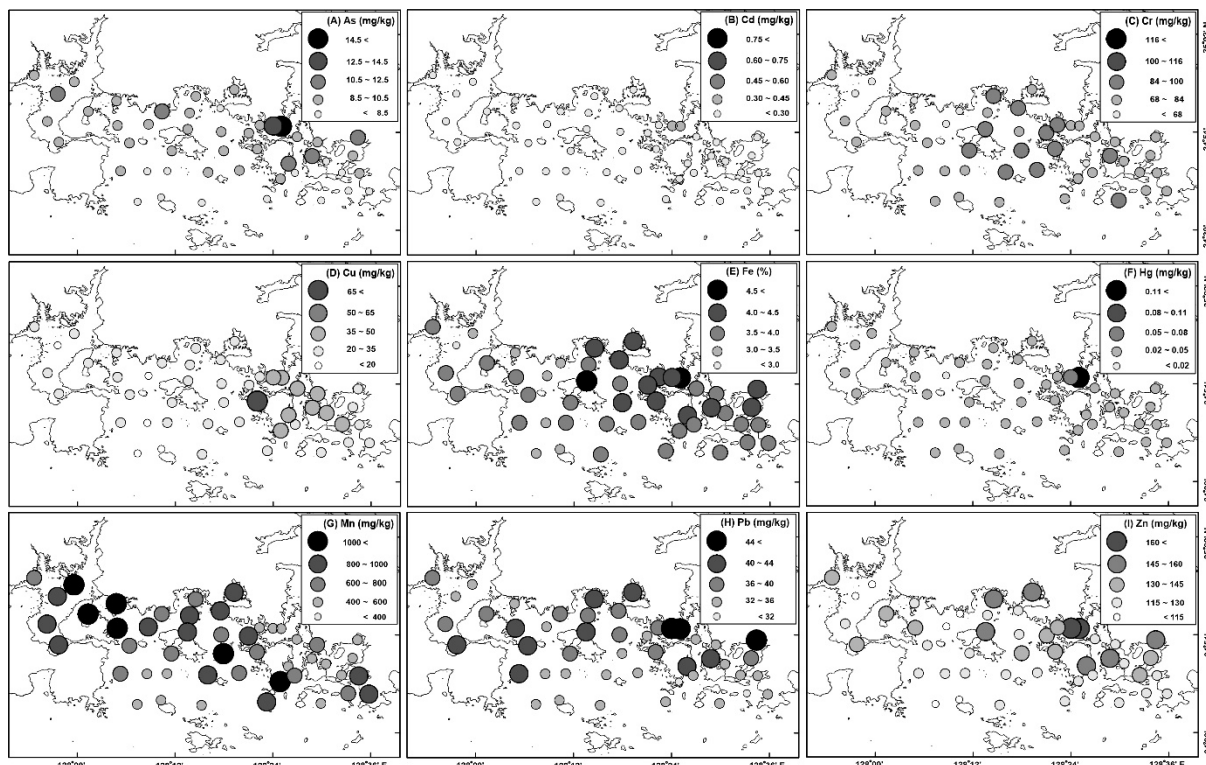


Fig. 4. Spatial distributions of trace metal (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, and Zn) concentration in marine sediments from the Southeast coastal area of Korea.

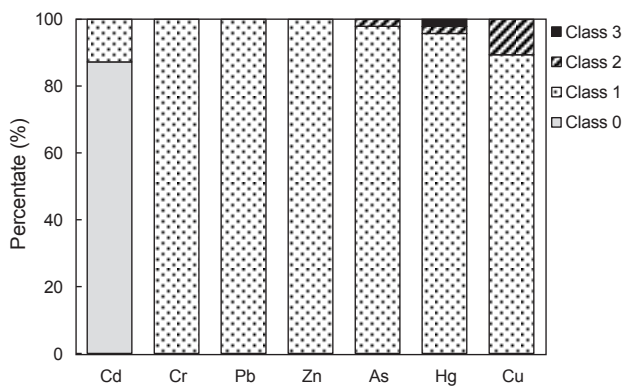


Fig. 5. Percentage of samples according to CF (concentration factor) values for trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, and Zn). Each class in legend is defined as $CF < 1$ (low degree) for Class 0, $1 \leq CF < 3$ (moderate degree) for Class 1, $3 \leq CF < 6$ (considerable degree) for Class 2, $CF \geq 6$ (very high degree) for Class 3.

1.4–2.5 (평균 1.9), As 1.0–3.0 (평균 1.3), Cd 0.3–2.8 (평균 0.7)의 범위를 보였다. $CF < 1$ (low degree; Class 0), $1 \leq CF < 3$ (Moderate degree; Class 1), $3 \leq CF < 6$ (considerable degree; Class 2), $CF \geq 6$ (very high degree; Class 3) 일 때, Cd (Class

0)을 제외한 미량금속 6종은 대부분 Class 1으로 배경농도보다 오염된 상태를 보였고, 다소 높은 오염수준(Class 2와 Class 3)이 조사된 성분은 As, Hg, Cu이었다(Fig. 5). 본 연구해역에서 PLI는 1.4–1.6 (평균 1.4) 범위로 모든 정점에서 PLI가 1을 초과하여 우리나라 연안 퇴적물 중 미량금속 배경농도보다 높은 인위적인 오염의 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며, 특히 $PLI \geq 1.5$ 을 보이는 통영연안 3개 정점(TY1, TY2, TY7)은 오염도에 있어서 Hg, As, Cu의 기여도가 매우 컸다(Fig. 6). 연구해역은 서해 경기만 퇴적물(0.17–1.03, 평균 0.61; Won et al., 2020)과 남서해 연안 퇴적물(0.6–1.3, 평균 1.0; Koo et al., 2019) 보다 높은 수준이었고, 통영-거제연안 어류양식장 퇴적물(1.4–3.5, 평균 2.3; Hwang et al., 2021)보다 낮은 수준이었다.

저서생물에 부정적인 생태영향 정도를 파악하기 위해 식(5)를 이용하여 정점별 ERI를 계산한 결과, 범위는 91–440 (평균 135)을 보였다. 연구해역은 서해 경기만 퇴적물(17.0–104 평균 57.1, Won et al., 2020)과 남서해 연안 퇴적물(61–118, 평균 85; Koo et al., 2019) 보다 높은 수준이었고, 통영-거제연안 어류양식장 퇴적물(120–610, 평균 258; Hwang et al., 2021)보다 낮은 수준이었다. ERI는 생태위해도에 따라 5단계로 구분되며, 약간 부정적인 생태영향을 줄 수 있는 상태(moderate risk,

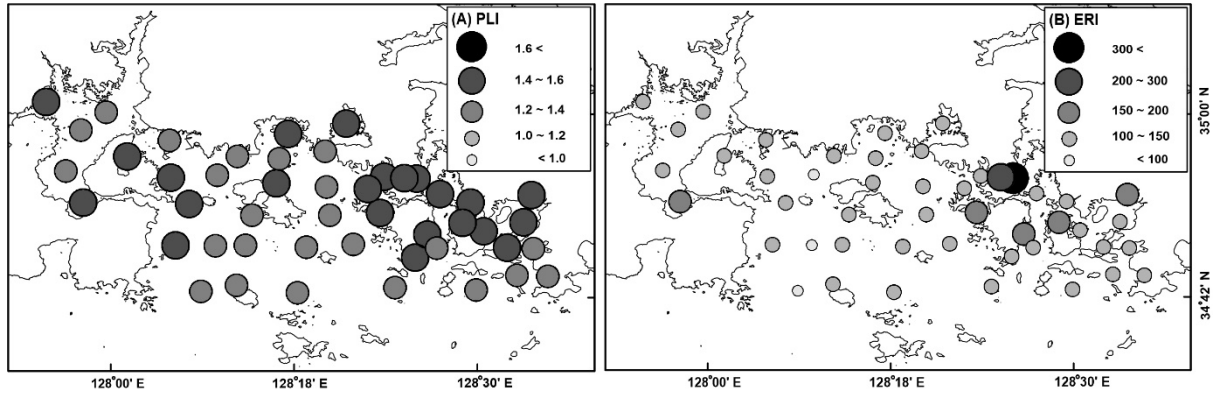


Fig. 6. Spatial distributions of (A) PLI (pollution load index) and (B) ERI (ecological risk index) in marine sediments from the Southeast coastal area of Korea.

100<ERI<150)는 37개 정점(79%)로 대부분을 차지하였고, 저서생물에 위해성을 줄 가능성이 낮은 상태(Low risk, ERI<100)는 3개 정점(6%)으로 조사되었다. 또한 저서생물에 상당한 위해성을 줄 수 있는 상태(Considerable risk, 150<ERI<200)는 5개 정점(11%), 저서생물에 매우 심한 위해성을 줄 수 있는 상태(Very high risk, 200<ERI<300)과 저서생물에 극심한 위해성을 줄 수 있는 상태(disastrous risk, ERI>300)는 각각 1개 정점(2%)에서 조사되었다(Fig. 6). 통영연안-북신만 내측(TY1, TY2)에서 ERI는 각각 ERI 440과 280으로 가장 높은 위해도를 보였다. 조사정점(TY1, TY2)은 통영 도심 인근이며, 하수처리장 배출수 등 오염원의 직접적인 영향을 받는 해역이고, 유기물 함량(AVS, COD, IL)도 가장 높았던 정점이었다.

남동해 연안 퇴적물 오염도 평가를 위해 미량금속의 SQGs 비교와 오염지수(PLI, ERI)의 결과를 종합하면, 남동해 연안 퇴적물에서 미량금속은 연안 배경농도보다 약간 높은 수준이었지만, 전반적으로 낮은 오염도를 보였다. 오염분포 특성은 외해에서 반폐쇄적인 만 내만으로 갈수록 미량금속과 유기물 함량은 증가하는 패턴을 보였고, 다만 내만 일부 정점에서 높은 오염수준을 보였다. 통영연안의 북신만 내측(TY1, TY2)은 저서생물에 매우 심한 위해성을 줄 수 있는 수준까지 오염되었으며, 이것은 인위적인 배출원과 미약한 조류소통에 의해 상당량의 유기물뿐만 아니라 미량금속(As, Hg, Cu)이 축적되었기 때문으로 판단되었다. 따라서 앞으로 남동해 연안 퇴적물에서 오염된 해역과 비오염된 해역으로 구분하여 저서환경 보전 및 개선을 위한 차별화된 정책이 요구된다.

사 사

본 연구는 2023년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2023014)의 지원으로 수행된 연구입니다. 이 연구의 현장조사 및 시료분석에 도움을 준 국립수산과학원 어장환경과 황현진, 이수미 연구원에게 감사드립니다.

References

- Chapman PM, Wang F, Janssen C, Persoone G and Allen HE. 1998. Ecotoxicology of metals in aquatic sediments: Binding and release, bioavailability, risk assessment, and remediation. *Can J Fish Aquat Sci* 55, 2221-2243. <https://doi.org/10.1139/f98-145>.
- Choi JM, Woo HJ and Lee YG. 2007. Suspended sediments influx and variation of surface sediments composition in semienclosed bay - Spring season in Yeolja Bay, South Coast of Korea. *J Korean Soc Mar Environ Engineer* 10, 1-12.
- Choi M, Kim HC, Hwang DW, Lee IS, Kim YS, Kim YJ and Choi HG. 2013. Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeolja Bay and Gangjin Bay, Korea. *Korean J Fish Aqua Sci* 46, 424-436. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0424>.
- Choi M, Lee IS, Kim HC and Hwang DW. 2015a. Distributions and contamination status of trace metals in surface sediments of shellfish farming areas in Yeolja and Gangjin Bays, Korea. *Korean J Fish Aqua Sci* 48, 789-797. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0789>.
- Choi M, Lee IS, Kim CS, Kim HC and Hwang DW. 2015b. Distributions of organic matter and trace metals in surface sediments around a Manila clam *Ruditapes philippinarum* farming area in Gomso Bay, Korea. *Korean J Fish Aqua Sci* 48, 555-563. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0555>.
- Choi M, Lee IS, Hwang DW, Kim HC, Yoon SS, Yun S, Kim CS and Seo IS. 2017. Organic enrichment and pollution in surface sediments from Jinhae and Geoje-Hansan Bays with dense oyster farms. *Korean J Fish Aqua Sci* 50, 777-787. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2017.0777>.
- Choi A, Lee TK, Cho H, Lee WC and Hyun JH. 2022. Shift in benthic bacterial communities associated with farming stages and a microbiological proxy for assessing sulfidic sediment conditions at fish farms. *Mar Pollut Bull* 178, 113603. <https://doi.org/10.1016/j.marpollbul.2022.113603>.

- Folk RL. 1968. Petrology of Sedimentary Rock. Hemphill Publishing Co., Austin, TX, U.S.A., 170.
- Folk RL and Ward WC. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *J Sediment Petrol* 27, 3-26.
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Wat Res* 14, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
- Hwang DW, Jin HG, Kim SS, Kim JD, Park JS and Kim SG. 2006. Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan harbor, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 39, 106-117. <https://doi.org/10.5657/kfas.2006.39.2.106>.
- Hwang DW, Ryu SO, Kim SG, Choi OI, Kim SS and Koh BS. 2010. Geochemical characteristics of intertidal surface sediments along the southwestern coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 43, 146-158. <https://doi.org/10.5657/kfas.2010.43.2.146>.
- Hwang DW and Kim SG. 2011. Evaluation of heavy metal contamination in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam province using geochemical assessment techniques. *Korean J Fish Aquat Sci* 44, 772-784. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2011.0772>.
- Hwang DW, Park SE, Kim PJ, Koh BS and Choi HG. 2011. Assessment of the pollution levels of organic matter and metallic elements in the intertidal surface sediments of Aphae Island. *Korean J Fish Aquat Sci* 44, 759-771. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2011.0759>.
- Hwang DW, Kim PJ, JungRH and Yoon SP. 2013. Distributions of organic matter and trace metals in intertidal surface sediment from the Mokpo-Haenam coast. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 454-466. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0454>.
- Hwang DW, Lee IS, Choi M and Choi HG. 2014a. Distribution and pollution assessment of organic matter and trace metals in surface sediment around Ulsan Harbor. *J Korean Soc Environ Anal* 17, 146-160.
- Hwang DW, Lee IS, Choi M and Choi HG. 2014b. Distribution of organic matter and trace metals in sediment around Tidal-flat oyster *Crassostrea gigas* farming area on the Taean Peninsula, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 47, 1014-1025. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2014.1014>.
- Hwang DW, Lee IS, Choi M and Shim JH. 2015a. Distribution of organic matter and trace metal concentrations in surface sediments around the Hansan-Geoj Bay. *J Korean Soc Environ Anal* 18, 131-143.
- Hwang DW, Lee IS, Choi M, Kim CS and Kim HC. 2015b. Evaluation of pollution level for organic matter and trace metals in sediments around Taehwa River Estuary, Ulsan. *Korean J Fish Aquat Sci* 48, 542-554. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0542>.
- Hwang DW, Kim SG, Choi M, Lee IS, Kim SS and Choi HG. 2016. Monitoring of trace metals in coastal sediments around Korean Peninsula. *Mar Pollut Bull* 102, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.045>.
- Hwang DW, Hwang HJ, Lee G, Kim SY, Park SH, Yoon SP. 2021. Organic matter and heavy metals pollution assessment of surface sediment from a fish farming area in Tongyoung-Geoje Coast of Korea. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 27, 510-520. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2021.27.4.510>.
- Hwang H, Hwang DW, Lee G, Kim HC and Kwon JN. 2018. Distributions of organic matter and heavy metals in the surface sediment of Jaran Bay, Korea. *J Kor Soc Mar Environ Saf* 24, 78-91. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2018.24.1.078>.
- Hyun S, Choi JW, Choi JS and Lee T. 2003. Surface sediment characteristics and benthic environments in the mouth of Jinhae Bay, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 36, 700-707. <https://doi.org/10.5657/kfas.2003.36.6.700>.
- Kim PJ, Shon SG, Park SY and Kim SS. 2012. Biogeochemistry of metal and nonmetal elements in the surfage sediment of the Gamak Bay. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 18, 67-83. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2012.18.2.067>.
- Kim KT, Kim ES, Cho SR, Chung KH and Park JK. 2005. Distribution and pollution of heavy metals in the environmental samples of the Lake Shihwa. *J Kor Soc Mar Environ Engineering* 8, 148-157.
- Koo JH, Lee G, Hwang H, Kim JB, Kim SS and Hwang DW. 2019. Distribution of organic matter and heavy metals in the surface sediments from fishery resources protection areas in the southwestern coast of Korea. *J Kor Soc Mar Environ Saf* 25, 666-677. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.6.666>.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2022. Agriculture, Forest and Fishery Survey. Retrieved from https://kosis.kr/statHtml.do?orgid=146&tblld=DT_114_2013_S0013&conn_path=12 on Apr 3, 2023.
- Lee MK, Bae W, Um IK and Jung HS. 2004. Characteristics of heavy metal distribution in sediments of Youngil Bay, Korea. *J Kor Soc Environ Eng* 26, 543-551.
- Lee WC, Cho YS, Hong SJ, Kim HC, Kim JB and Lee SM. 2011. Estimation of ecological carrying capacity for oyster culture by ecological indicator in Goeje-Hansan Bay. *J Kor Soc Mar Environ Saf* 17, 315-322. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2011.17.4.315>.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2018. Quality Guidelines for Marine Environment in Korea. Notification No. 2018-10, MOF, Sejong, Korea, 10.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2020. Management Guideline for Fisheries Resource Protection Areas. Notification No. 526. MOF, Sejong, Korea, 3.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2021a. Guideline on Survey, Cleanup, and Mmanagement for Contaminated Marine Sediments. Notification No. 2021-79, MOF, Sejong, Korea, 3.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2021b. Standard Ana-

- lytical Method for Marine Environments. Notification No. 2021-7, National Institute of Fisheries and Science, Busan, Korea, 4.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2023. Coastal Areas Designed and Managed for Shellfish Aquaculture. Notification No. 2023-30, MOF, Sejong, Korea, 4.
- NIFS (National Institute of Fisheries and Science). 2022. Annual Report on Occurrence and Distribution of Hypoxia in Southern Coastal Areas of Korea. NIFS, Busan, Korea, 23.
- Ra K, Kim ES, Kim KT, Kim JK, Lee JM and Choi JY. 2013. Assessment of heavy metal contamination and its ecological risk in the surface sediments along the coast of Korea. *J Coast Res* 65, 105-110. <https://doi.org/10.2112/SI65-019.1>.
- Pan J, Pan J and Wang M. 2014. Trace element distribution and ecological risk assessment of seawater and sediments from Dingzi Bay, Shandong Peninsula, North China. *Mar Pollut Bull* 89, 427-434. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.022>.
- Sheykhi V and Moore F. 2013. Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor River, Southwest Iran. *Environ Monit Assess* 185, 3219-3232. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2785-8>.
- Tomlinson DL, Wilson JG, Harris CR and Jeffrey DW. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters* 33, 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>.
- Woo JS, Lee HJ, Park JK, Park KK, Cho DJ, Jang DJ, Park SJ, Choi MS and Yoo JK. 2019. Background concentration and contamination assessment of heavy metals in Korean coastal sediments. *Korean Soc Oceanogr* 24, 64-78. <https://doi.org/10.7850/jkso.2019.24.1.064>.
- Wang Y, Yang Z, Shen Z, Tang Z, Niu J and Gao F. 2011. Assessment of heavy metals in sediments from a typical catchment of the Yangtze River, China. *Environ Monitor Assess* 172, 407-417. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1343-5>.
- Won JH, Lee YW, Park MO and Sun CI. 2020. Characteristics of seawater quality and surface sediments around Youngheung Island in Gyeonggi Bay, the Western coast of Korea. *J Kor Soc Environ Energy* 23, 246-257. <http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2020.23.4.246>.
- Yuan H, Song J, Li X, Li N and Duan L. 2012. Distribution and contamination of heavy metals in surface sediments of the South Yellow Sea. *Mar Pollut Bull* 64, 2151-2159. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.07.040>.
- Zhang W, Liu X, Cheng H, Zeng EY and Hu Y. 2012. Heavy metal pollution in sediments of a typical mariculture zone in South China. *Mar Pollut Bull* 64, 712-720. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.01.042>.
- Zhu Z, Xue J, Deng Y, Chen L and Liu J. 2016. Trace metal concentration in surface sediments of intertidal zone from Qinhuangdao, China, revealed by geochemical and magnetic approaches: Distribution, sources, and health risk assessment. *Mar Pollut Bull* 105, 422-429. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.046>.
- Zwolsman JJG, Van Eck B and Van Der Weijden CH. 1997. Geochemistry of dissolved trace metals (cadmium, copper, zinc) in the Scheldt estuary, southwestern Netherlands: Impact of seasonal variability. *Geochim Cosmochim Acta* 61, 1635-1652. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00029-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00029-X).