

자란만 패류양식해역의 퇴적물 특성 및 분포

조상만¹, 강주현², 김재훈³, 배현준⁴, 정우건⁴

¹군산대학교 해양생명응용과학부, ²한국해양수산연구소, ³한국해양과학기술원,
⁴경상대학교 해양식품생명의학과

Distributions and Characteristics of Surface Sediment Environment in Jaran Bay, Korea

Sang-Man Cho¹, Ju-Hyun Kang², Jae-Hoon Kim³, Hyeon-Jun Bae⁴ and Woo-Geon Jeong⁴

¹Department of Aquaculture and Aquatic Science, Kunsan National University, Deahak-ro 558, Gunsan 54150, Korea

²Korea Ocean & Fisheries Institute, Tongyeong 53005, south

³Deep-sea and Seabed Mineral Resources Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea,

⁴Department of Seafood and Aquaculture Science, Gyeongsang National University, Chonchideaguk-gil 38 Tongyeong 53064, Korea

ABSTRACT

To understand the distributions and characteristics of organic matter and heavy metal concentrations in the surface sediment of Jaran Bay, we investigated the grain size, IL (Ignition Loss), COD (Chemical oxygen demand), and heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) in surface sediments collected at 10 stations in this bay in August 2017. The grain size analysis indicate that surface sediment in Jaran Bay are characterized by Silt contents ranged from 70.4-81.0% (75.9%) and Clay content 19.0-29.6% (24.1%). IL of surface sediment range from 7.5-13.9% (10.3%) and COD was in the range of 4.2-18.8 mgO₂/g (12.4 mgO₂/g). A seven-element of surface sediments (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) were calculated by TEL (Threshold effect level), PEL (Probable effects level), Igeo (Geoaccumulation index), pollution load index (PLI) and ecosystem risk index (ERI). As a result of applying the marine environment standards TEL and PEL, Cu and Zn were slightly higher than the TEL standard values. However, all heavy metals were observed below the PEL standard values. Igeo also indicated that As showed 60% concerning moderate risk(Class 2). The pollution load index (PLI) for evaluating the total pollution level of trace metals was 0.9-1.1 (1.1), almost study area showed relatively high pollution(1.0) and The ecosystem risk index (ERI), was 63.7-81.8 (73.8), which was a low risk to all study area. The correlation matrix displays the existence of remarkable levels of correlation with both positive and negative values among different variable pairs. IL and COD showed no correlation. However, Pb and Zn values indicated strong positive values.

Key words: Jaran Bay, Surface sediment, Sediment pollution, Heavy metal, Organic matter

서론

경남 고성군 자란만은 우리나라의 대표적인 패류 생산해역

이며, 반 폐쇄성만으로 육상으로부터 소규모 하천을 통해 영양염류가 유입되어 기초생산력이 상대적으로 높다. 또한 유속이 완만하여, 여름철에 부영양화와 적조 그리고 빈산소 수괴와 같은 환경문제가 주기적으로 발생하는 해역이다. 이는 육상 영양염류와 양식해역에서 생산되는 패류 및 부착생물에서 배출되는 분(Feces) 과 의분(Pseudo feces)에 의해 표층 퇴적물의 유기물 농도를 증가시킨다. 이로 인해 박테리아가 산소를 더 많이 소비함으로써 빈산소 수괴가 발생하며, 저서동물 군집변화에 영향을 줄 수 있다 (Uede, 2008; Cranford *et al.*, 2009).

또한 육상으로부터 유입된 중금속 원소는 일반적으로 용해되어 이온 상태로 수계에 존재하지만, 대부분 고체상으로 변환

Received: December 10, 2020; Revised: December 21, 2020;
Accepted: December 30, 2020

Corresponding author: Woo-Geon Jeong

Tel: +82 (10) 3865-667, e-mail: jwg@gnu.ac.kr
1225-3480/24776

This is an Open Access Article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License with permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproducibility in any medium, provided the original work is properly cited.

되어 부유물이나 퇴적물에 흡착되어 존재한다 (Thornton, 1983). 이러한 표층 퇴적물에 존재하는 중금속은 유기물과 달리 난분해성이며, 유기물과 결합하거나 유기체에 축적되어 독성을 나타내기도 한다 (Jain, 2004; Peng *et al.*, 2009). 그리고 수계의 물리 화학적 특성 변화에 따라 표층 퇴적물의 중금속이 용출되어 수계생물에 영향을 미치며, 먹이사슬을 통해 수생생물뿐만 아니라 우리 건강에도 심각한 영향을 미칠 수 있다 (Zoumis *et al.*, 2001).

국내 참굴 양식산업은 1923년 경남 가덕도 연안 간석지에서 바다양식을 시작으로 1960년대까지 소극적인 양식방법인 투석식, 송지식 및 말목수하식 등으로 생산이 이루어졌지만, 1960년 말부터 통영, 거제, 고성 연안 중심으로 수하식 양식방법이 보급되어 대량생산되기 시작하였다. 1990년대 접어들면서 오랜 양식에 의한 문제점들이 발생하고, 재료 부진과 잦은 폐사 등으로 양식 생산량이 감소되기 시작하였다 (Cho, 1993; MIFAFF, 2012). 또한 양식장 장기연작에 의한 자가오염 증가와 밀식에 따른 환경문제들이 대두되었다.

연안해역의 퇴적물 환경평가를 위해 미국 환경청 (EPA) 은 퇴적환경지표 (Sediment quality index) 를 규정하였으며, 세부적으로 퇴적물 오염 (Sediment contaminants), 퇴적물 총유기탄소 (Sediment total organic carbon), 퇴적물 독성 (Sediment toxicity) 등으로 통합 평가하고 있다 (EPA, 2012). 일본의 경우, ‘지속적 양식생산 보호법’을 제정하였으며, 이에 따라 수질, 퇴적물, 저서생물을 지표로 하여 어장환경기준을 설정하였다(JFRCA, 2006). 국내의 경우, 2018년도 해양환경관리법에 따라 수질과 퇴적물의 해양환경기준을 재개정하였다.

국내 양식해역 표층 퇴적물의 유기물 및 중금속에 관한 연구들이 많이 진행되었으며, 연구해역인 자란만 퇴적물의 유기물과 중금속에 관한 연구는 2건이 보고되었다 (Cho and Park, 1983; Hwang *et al.*, 2018). 그리고 해역특성상 식품안정성 및 패류 양식장 생산성에 관련된 연구들이었으며 (Choi *et al.*, 1997; Choi *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2019), 퇴적물의 오염현황에 대한 연구는 미비하였다.

이 연구는 패류양식어장에 밀집하고 있는 경남 고성군 자란만 표층 퇴적물의 유기물과 중금속 농도를 조사하였다. 그리고 중금속 농도를 이용하여 오염평가를 하였으며, 이에 따라 패류 양식장 환경평가와 해역관리의 기초자료로 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 시료채취 및 퇴적물 분석

경남 고성 자란만 패류 양식해역의 퇴적물 환경특성 및 중금속 오염현황을 파악하기 위해 2017년 8월 선박을 이용하여

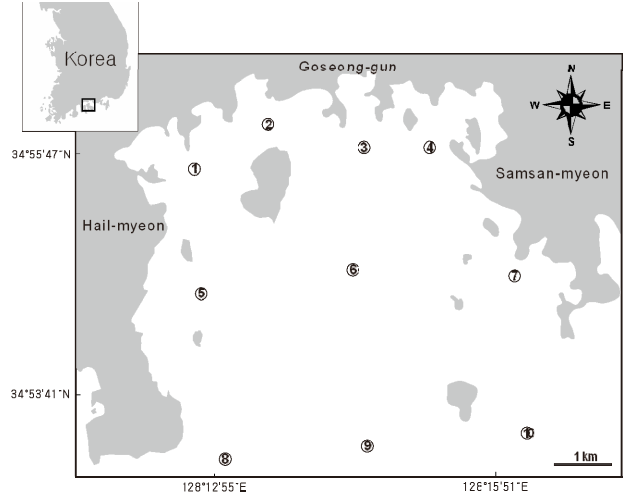


Fig. 1. A map showing sampling station for the organic matter, grain size and heavy metal in surface sediment of Jaran Bay.

10개 조사지점에서 코어 채취기 (Gravity core sampler) 로 퇴적물을 채취하였다 (Fig. 1). 채취한 퇴적물은 0-2 cm의 표층을 일회용 스푼으로 미리 산 처리한 샘플병에 옮겨 담아 냉동상태로 경상대학교 해양생물교육연구센터 해양생물환경연구실로 운반하였다.

운반된 시료는 급속 냉동하여 보관하였으며, 퇴적물 분석은 강열감량 (Ignition loss, IL), 화학적 산소요구량 (Chemical oxygen demand, COD), 입도분석 그리고 미량금속 7종 (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) 을 실시하였다.

유기물 함량을 측정하기 위해 강열감량을 분석하였다. 80°C 에 건조한 퇴적물 약 10 g을 550°C 회화로에서 4시간 동안 회화시킨 후, 전후 무게차이를 이용하여 계산하였다(MOF, 2013).

$$\text{강열감량(\%)} = \frac{(\text{가열전시료무게} - \text{가열후시료무게})}{\text{가열전시료무게}} \times 100$$

화학적 산소요구량은 과망간칼륨 (KMnO₄) 방법으로 유기물이 산화될 때 소모되는 산소량을 측정하여 퇴적물 환경에 미치는 영향을 분석하였다(MOF, 2013). 유기물에 대한 국내 환경기준이 아직 설정되지 않아, 일본 퇴적물 기준 (20 mgO₂/g) 을 참고하여 적용하였다.

입도는 채취한 퇴적물 약 10 g을 비이커에 담아 10% 염산과 10% 과산화수소를 이용하여 유기물과 탄산염을 제거하였다. 그리고 2 ϕ (250 μm) 체로 체질하여 입도 및 형상분석기 (Particle size & shape analyzer CILAS 1090LD shape analyzer) 로 분석하였다. 분석결과는 Folk and Ward (Folk

Table 1. Marine environment standard-subsea sediment

(Unit : mg/kg)	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Threshold Effects Level (TEL)	14.5	0.75	116	20.6	47.2	44.0	68.4
Probable Effects Level (PEL)	75.5	2.72	181	64.4	80.5	119	157

Table 2. Classification of PLI, ERI, and Igeo assessment of trace metals in this study

Index name: type	Contamination categories (Pollution levels)
Geo-accumulation index (I _{geo})	I _{geo} class=0 (I _{geo} value: < 0): unpolluted
	I _{geo} class=1 (I _{geo} value: 0-1): unpolluted/moderately polluted
	I _{geo} class=2 (I _{geo} value: 1-2): moderately polluted
	I _{geo} class=3 (I _{geo} value: 2-3): moderately to strongly polluted
	I _{geo} class=4 (I _{geo} value: 3-4): strongly polluted
	I _{geo} class=5 (I _{geo} value: 4-5): strongly to very strongly polluted
I _{geo} class=6 (I _{geo} value: > 5): very strongly polluted	
Pollution load index (PLI)	PLI > 1 : polluted, PLI < 1 : no pollution
Ecological risk index (ERI)	ERI < 100 : low risk
	100 ≤ ERI < 150 : moderate risk
	150 ≤ ERI < 200 : considerable risk
	200 ≤ ERI < 300 : very high risk
	ERI ≥ 300 : disastrous risk

and Ward, 1957) 와 Folk (Folk, 1968) 의 방법에 따라 퇴적물의 평균입도 (Mean grain size, Mz) 와 퇴적물 유형 (Sedimentary type) 을 구하였다.

분석 퇴적물의 중금속은 입도 영양을 최소화하기 위해 63 um 이하로 체 분리하여 이용하였다. 퇴적물을 완전분해시키는 완전분해법으로 전처리하였으며 (MOF, 2013), 미량금속 원소 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 등 총 7개 원소를 유도 결합 플라즈마 분광기 (ICP spectrometer OPTIMA 5300 DV) 로 분석하였다.

2. 중금속 오염평가

퇴적물 중금속 오염평가는 환경기준, 배경농도, 혼합물질, 위해성 및 잠재적 독성에 관한 다양한 평가방법들이 있다. 국내 해저 퇴적물의 해양환경 기준 (해양수산부 고시 제2018-10호) 은 해양 저서 생태계에 부정적인 영향등급에 따라 주의기준 (Threshold effect level, TEL : 부정적인 생태영향이 거의 없을 것으로 예측되는 농도) 과 관리 기준 (Probable effects level, PEL : 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 농도) 으로 퇴적물의 오염도를 살펴보았다 (Table 1).

농집지수 (Geoaccumulation index, I_{geo}) 는 연구해역의 퇴적물 중 오염되지 않는 미량금속 농도를 배경농도로 수치화 하여, 오염정도를 정량화하는 방법으로 계산하였다 (Müller, 1979). 그리고 서로 다른 지각에 존재하는 금속의 배경농도를

보정하기 위한 지수로 1.5를 곱하여 주었으며 (Stoffers *et al.*, 1986), I_{geo} 값은 Muller (1981) 가 제시한 오염정도에 따라 총 7단계로 구분하여 평가하였다 (Table 2).

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_{metal}}{B_{metal} \times 1.5}$$

B_{metal} = 오염되지 않은 해역의 미량금속 배경농도

C_{metal} = 연구해역 퇴적물 내 미량금속

연구해역 퇴적물의 종합적인 오염평가를 위해, 배경농도에 대한 미량금속 비 값을 이용하여 PLI (Pollution load index) 를 구하였다 (Tomlinson *et al.*, 1980). 그리고 미량금속 배경농도로는 국내외로 많은 연구자들이 사용하는 대륙붕 해역의 평균 미량금속 (As = 1.5 mg/kg, Cd = 0.098 mg/kg, Cr = 35 mg/kg, Cu = 25 mg/kg, Pb = 20 mg/kg, Zn = 71 mg/kg) 으로 사용하였다 (Taylor, 1964; Taylor and McLennan, 1995).

$$PLI = \sqrt[n]{(CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)}$$

$$CF = \left(\frac{C_{metal}}{B_{metal}} \right)$$

B_{metal} = 미량금속의 배경농도
 C_{metal} = 연구해역 퇴적물 내 미량금속의 농도
 n = 분석된 미량금속의 총 개수

퇴적물 미량금속에 대한 생태독성계수를 이용하여, 저서 생태계에 미치는 영향지수인 ERI (Ecological risk index) 를 구하였다 (Hakanson, 1980). 그리고 미량금속의 독성계수는 총 6개 (As = 10, Cd = 30, Cr = 2, Cu = 5, Pb = 5, Zn = 1) 를 이용하였다 (Sheykhi and Moore, 2013).

$$ERI = \sum_{i=1}^n E_i$$

$$E_i = T_{metal} \times \frac{C_{metal}}{B_{metal}}$$

B_{metal} = 각 미량금속의 배경농도
 C_{metal} = 연구해역 퇴적물 내 미량금속의 농도
 T_{metal} = 미량금속의 독성계수
 n = 분석된 미량금속의 총 개수

3. 통계분석

자란만 퇴적물 유기물과 미량금속들과의 상관분석을 IBM SPSS statistics V23 프로그램으로 분석하였으며, 두 변수의 상관관계 유무를 파악하기 위해 t값으로 가설검증 하였다.

결과 및 고찰

1. 표층 퇴적물의 입도특성 및 분포

퇴적물의 입도는 유기물과 미량금속 농도를 조절하는 인자로서 입자가 세립질일 수록 표면적이 넓어 유기물과 중금속을 더 많이 흡착할 수 있는 것으로 알려져 있다 (Horowitz, 1991; Hwang *et al.*, 2010). 연구해역인 자란만 표층 퇴적물 입도분석 결과, 전반적으로 실트의 함량이 70.4-81.0% (평균 75.9%) 으로 우세하였다. 그리고 점토 (Clay) 함량이 19.0-29.6% (평균 24.1%) 로 나타났으며, 모래 및 자갈은 모든 정점에서 나타나지 않았다. 그리고 입도분석 결과를 (Folk, 1968) 의 분류법으로 살펴보면, 실트 (clay, Z) 로 단일 퇴적물 유형으로 구분되었다 (Fig. 2). 이는 퇴적물의 기원과 물리적 영향 (파도, 조류 등) 과 같은 다양한 요인의 변동에 의해 그 구성이 유사하게 받고 있기 때문으로 생각되며, 유기물 및 미량금속 축적 가능성이 높은 해역으로 판단된다.

2. 표층 퇴적물의 유기물 분포 및 특성

일반적으로 표층 퇴적물은 유기물을 함유하고 있으며, 일

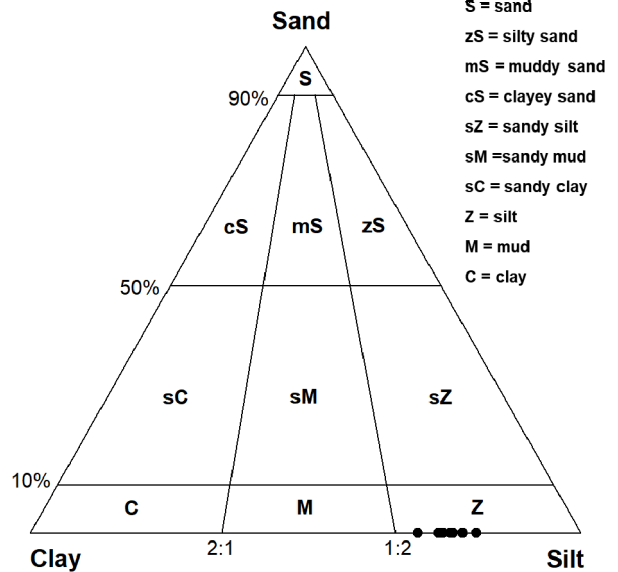


Fig. 2. The ternary diagrams showing the textures and the major sediment types of surface sediments in Jaran Bay.

차적으로 저층수로부터 공극수를 통하여 산소를 공급받아 유기물을 산화시키며, 이차적으로 미생물이나 그 밖의 작용에 의해서 유기물을 분해할 때 주변의 산소를 소비한다. 이때 산소의 공급이 소비를 따라가지 못할 때 빈산소상태가 되며 (Kim *et al.*, 2012), 이런 유기물은 해역의 환경변화나 생지화학적인 변화 지표로서 유용하다.

연구해역 내 퇴적물 유기물 분포 및 오염도를 평가하기 위하여, 강열감량 (IL) 과 COD를 측정하였다 (Fig. 3). IL 함량은 7.5-13.9% (평균 10.3%) 범위였으며, 만의 안쪽보다는 입구 쪽이 상대적으로 높았다. 그리고 COD함량은 4.2-18.8 mgO₂/g (평균 12.4 mgO₂/g) 범위였으며, 양식장이 밀집해 있는 곳이 상대적으로 높았다. 국내 수하식 패류 양식장이 성행하며, 반폐쇄적인 해역과 비교한 결과 (Table 3), 자란만 해역이 다른 해역보다 IL이 높게 관찰되었다. 인근해역인 진해만의 경우, IL은 2.8-10.2% (평균 7.91%), COD은 7.90-48.8 mgO₂/g (평균 32.9 mgO₂/g) 범위였다. 이전 (MIFAFF, 2009) 자란만 연구결과에 따르면, IL은 4.4-8.8% (평균 7.2%) 로 상대적으로 낮았으며, COD은 4.8-27.8 mgO₂/g (평균 16.8 mgO₂/g) 범위로 높게 나타났다. 유기물 오염정도를 일본의COD기준 (20 mgO₂/g) 적용결과 모든 정점에서 기준치 이하였다. 따라서 자란만은 유기물 오염이 다른 패류양식 해역보다 낮은 것으로 판단된다.

3. 표층 퇴적물의 중금속 농도 및 특성

주변 표층 퇴적물의 미량금속은 자연적 기원 이외에도 주

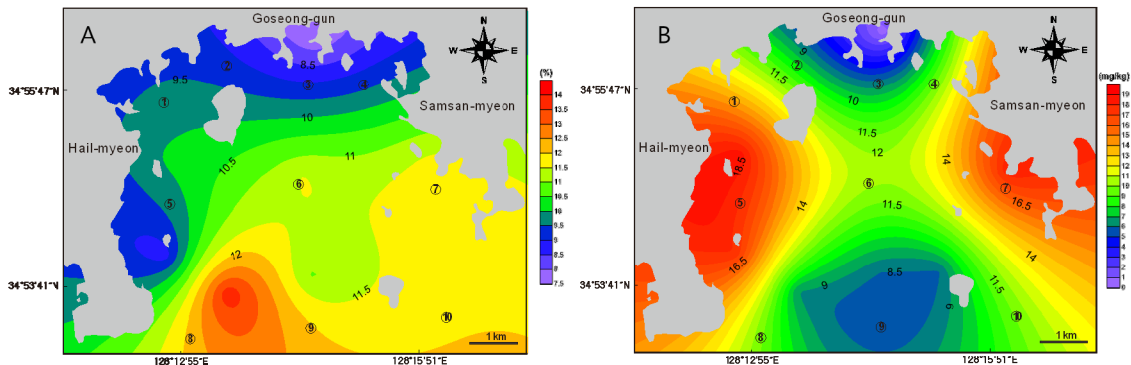


Fig. 3. The concentrations of IL and COD in surface sediment of Jaran Bay.

Table 3. The range and average of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD) in sediments from Korean coast

Study region	IL(%)	COD (mgO ₂ /g)	Reference
Jaran Bay	7.5-13.9 (10.3)	4.2-18.8 (12.4)	This study
Anjung Bay	6.4-11.7 (9.5)	17.9-43.8 (27.5)	Jeong <i>et al.</i> (2014)
Goeje Bay	7.7-9.9 (9.2)	17.9-26.6 (21.6)	Kim <i>et al.</i> (2019)
Jaran Bay	4.4-8.8 (7.2)	4.8-27.8 (16.8)	MIFAFF. (2009)
Jinhae Bay	2.8-10.2 (7.1)	7.9-48.8 (32.9)	Choi <i>et al.</i> (2017)

변 육상원으로부터 공급되는 오염물질에 의한 농도변화가 크게 나타나는 것으로 알려져 있으며, 해수 중 입자성 물질에 의해 흡착되어 퇴적물에 높은 농도로 축적된다 (Lim *et al.*, 2013). 이런 표층 퇴적물의 미량금속은 연안해역의 생지화학적 변화를 반영하며, 해수와 달리 장기간의 역사를 나타내주는 지표뿐만 아니라 오염물질의 유입과정과 기원을 나타내준다 (Choi *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2004).

자란만 주변 표층 퇴적물 중 중금속 농도는 As 1.1-4.1 mg/kg (평균 2.9 ± 0.9 mg/kg), Cd 0.139-0.149 mg/kg (평균 0.144 ± 0.04 mg/kg), Cr 24.9-33.9 mg/kg (평균 29.2 ± 3.0 mg/kg), Cu 16.8-31.3 mg/kg (평균 23.3 ± 5.3 mg/kg), Ni 8.3-13.8 mg/kg (평균 11.6 ± 1.6 mg/kg), Pb 8.7-16.8 (평균 11.1 ± 2.8 mg/kg), Zn 57.1-83.6 mg/kg (평균 65.4 ± 7.7 mg/kg) 의 범위였다 (Fig. 5).

일반적으로 As, Cd, Pb, Cr은 유해한 미량금속 (Toxic trace metal) 으로 장기간 노출시 해로운 것으로 알려져 있으며, Cu와 Zn은 생물필수 금속으로 고농도에는 독성작용으로 인해 유해한 영향을 준다 (Cantillo, 1998). 이 연구결과 자란만의 As, Cd, Cr, Ni 미량금속은 만의 바깥쪽 부분에서 상대적으로 높게 나타났으며, Cu, Pb, Zn은 만의 안쪽에 높은 수치를 보였다. 이는 만의 안쪽은 항구로써 선박에 사용하는 도

료 및 아연도금판에 의한 것으로 판단되며, 바깥쪽 부분은 인근 해역의 표층 퇴적물들 미량금속들이 물리적 영향으로 유입된 것으로 생각된다.

한편 Hwang *et al.* (2018) 의 연구에 따르면, 자란만 표층 퇴적물의 평균 중금속 농도는 우리가 연구한 중금속 농도와 차이보다 상대적으로 높게 나타났지만, 우리나라의 전체 연안의 중금속 평균값보다 낮았다. 또한 인근해역 고성만 표층퇴적물 중금속 농도와 비교결과, 모든 항목이 높게 관찰되었으며, 특히 폐광산이 위치한 표층 퇴적물 구리농도의 경우 190.9 mg/kg으로 약 8배 정도 차이가 났다 (Kang *et al.*, 2012). 또한 패류양식장이 밀집한 거제만과 진해만도 자란만의 표층 퇴적물 중금속 농도 보다 모두 높았다 (Table 4).

4. 표층 퇴적물의 중금속 오염도 평가

해저 퇴적물의 해양환경 기준 TEL과 PEL을 적용결과, 모든 조사정점에서 As, Cd, Cr, Ni, Pb은 TEL 미만으로 보였지만 Cu와 Zn은 다소 TEL기준치 보다 높게 나타났다. 하지만 중금속 모두 관리기준 PEL 기준치 이하로 모든 중금속에서 관찰되었다 (Fig. 4).

연구해역 내 퇴적물 중금속 농도를 기초로 계산한 농집지수 (I_{geo}) 를 평가하였다 (Table 2). 퇴적물에 함유된 중금속함량

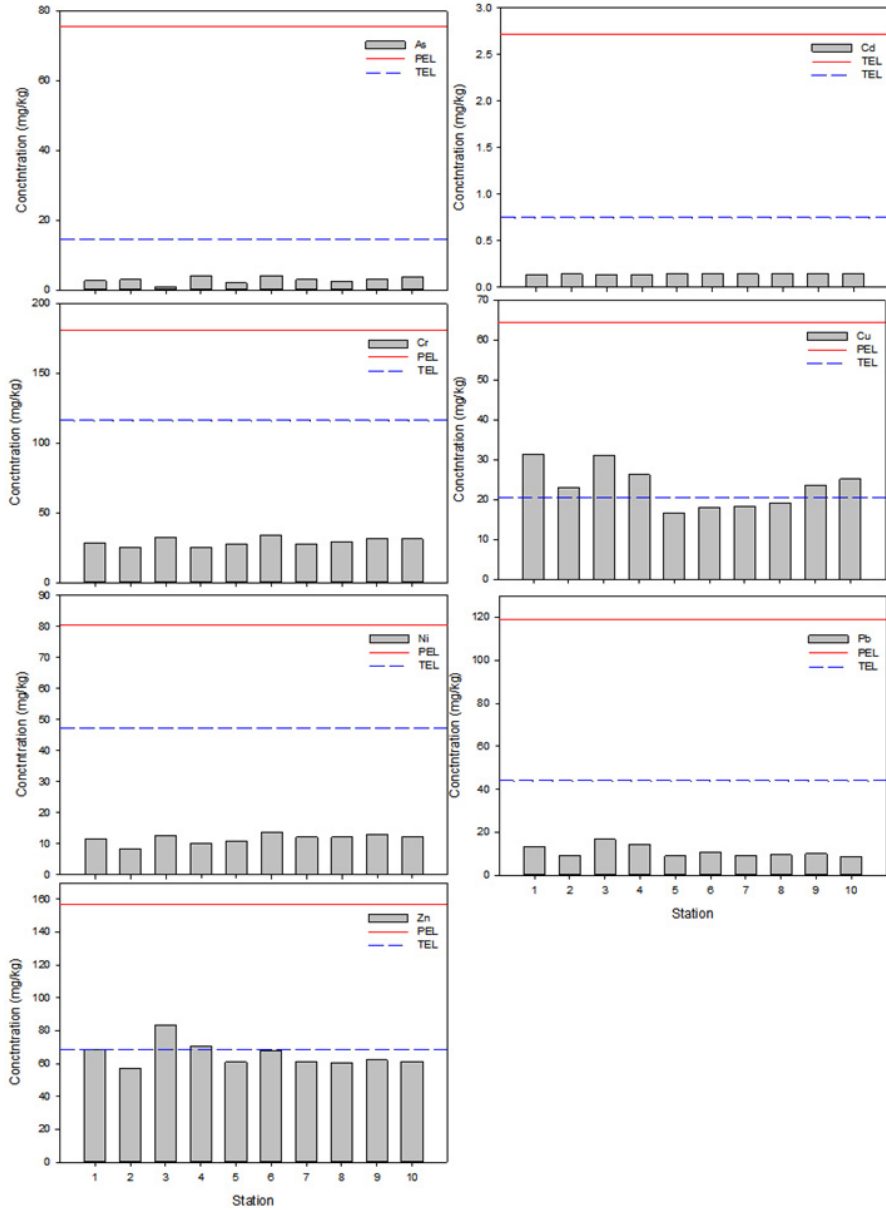


Fig. 4. Concentration of As, Cd, Cr, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn in sediments of each station around the study area. Solid lines represent marine environmental standard – Threshold Effects Level (TEL), Probable Effects Level (PEL).

을 오염되지 않은 금속 함량과 비교하여 정량화하는 방법으로 주로 퇴적물의 오염 평가에 사용되며, 농집정도를 등급화하여 간접적으로 오염 정도를 평가할 수 있다는 장점이 있다. 연구 결과, Pb는 모든 정점에서 Class 0으로 비오염수준 (Unpolluted) 관찰되었으며, Cd는 모두 Class 1로 비오염에서 중간 오염수준으로 (From unpolluted to moderately polluted) 나타났다. As는 Class 2 60%로 중간 오염수준

(Moderate risk) 으로 나타났다. Cr은 Class 0 90%였으며, Cu와 Zn의 Class 1은 각각 50%와 40%를 차지하였다 (Table 5).

퇴적물 내 표층 퇴적물 중금속의 종합적인 오염도를 평가하기 위하여 PLI값과 저서생물에 미치는 영향을 평가하기 위해 ERI를 구하였다 (Fig. 5). PLI는 0.9-1.1 (평균 1.1)로 대부분 조사정점에서 1.0을 초과하여, 오염된 상태 (Polluted) 였

Table 4. Comparison of trace metals (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn) between this study area and other bay

Study region	Metal(mg/Kg)						Reference
	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	
Jaran Bay	2.9	0.14	29.2	23.3	11.1	65.4	This study
Korean coast	9.1	0.25	58	37	35	122	Ra <i>et al.</i> (2013)
Goeje Bay	4.1	0.2	35.8	28.3	11.7	69.8	Kim <i>et al.</i> (2019)
Goseong Bay	17	0.2	88	43	24	142	Kang <i>et al.</i> (2012)
Jaran Bay	9.5	0.15	78	31	40	146	Hwang <i>et al.</i> (2018)
Jinhae Bay	11.1	0.5	70	57	40	167	Choi <i>et al.</i> (2015)

Table 5. Classification of geoaccumulation index (I_{geo}) and the number of I_{geo} for the heavy metal concentration in surface sediments of Jaran Bay

I_{geo} range	I_{geo} class	Designation of sediment quality	Number of I_{geo}					
			As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
> 5	6	Very strongly polluted	0	0	0	0	0	0
4-5	5	Strongly / very strongly polluted	0	0	0	0	0	0
3-4	4	Strongly polluted	0	0	0	0	0	0
2-3	3	Moderately / strongly polluted	0	0	0	0	0	0
1-2	2	Moderately polluted	6	0	0	0	0	0
0-1	1	Practically unpolluted / moderately polluted	3	10	1	5	0	4
< 0	0	Practically unpolluted	1	0	9	5	10	6

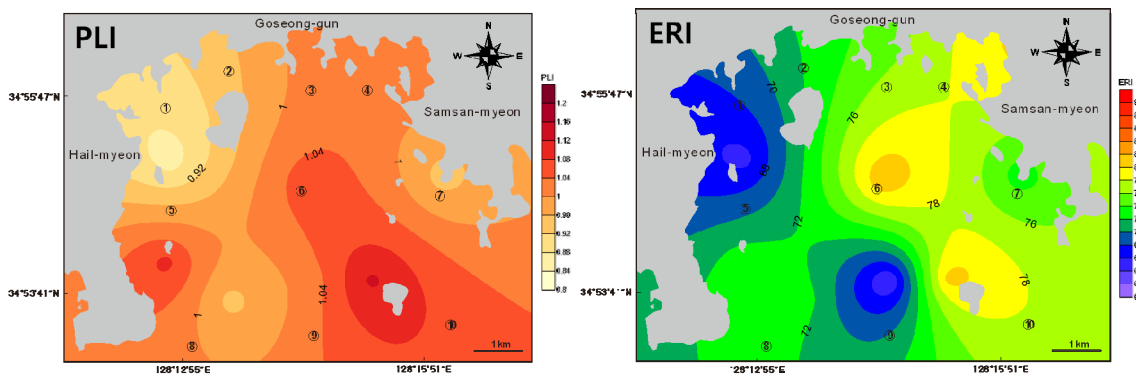


Fig. 5. The horizontal distributions of pollution load index (PLI) and ecological risk index (ERI) in surface sediment of Jaran Bay.

으며, 만의 안쪽 부근 정점 J4에서 1.129로 높게 나타났다. ERI는 63.7-81.8 (평균 73.8) 로 모든 조사정점에서 낮은 위험도(Low risk) 를 보였다.

5. 표층퇴적물의 유기물과 중금속간의 상관관계

자란만 표층 퇴적물의 유기물 (IL, COD) 과 중금속 (As,

Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) 간에 어떠한 상관관계를 나타내기 위하여 상관분석 (Pearson’s correlation coefficients) 을 실시하였다 (Table 6). 그 결과 자란만 표층 퇴적물은 모든 중금속과 유기물에 상관성을 보이지 않다. Cu는 Pb과 Zn이 양의 상관관계였으며, Pb은 Zn과 강한 양의 상관관계를 보였다. 이러한 자란만 해역은 유기물과 중금속간의 다른 양상을 보여주

Table 6. Pearson correlation matrix for the metal concentrations and sediment properties from Jaran bay

	IL	COD	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
IL	1.000								
COD	-0.031	1							
As	0.040	0.045	1						
Cd	-0.383	-0.073	0.368	1					
Cr	-0.462	-0.105	-0.033	0.497	1				
Cu	-0.198	-0.195	-0.237	-0.565	0.018	1			
Ni	-0.526	0.014	0.024	0.549	0.913**	-0.072	1		
Pb	0.086	-0.311	-0.353	-0.662*	0.068	0.757*	0.057	1	
Zn	0.029	-0.215	-0.398	-0.485	0.342	0.644*	0.308	0.940**	1

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$ (two-tailed)

었다. 이는 패류양식장 분포 및 밀집여부와 상관이 없는 것으로 선박에 의한 방호도로 및 인근 해역 중금속 농도의 영향을 받는 것으로 생각된다.

종합결론

경남 고성군 자란만은 전반적으로 실트의 함량이 70.4-81.0% (평균 75.9%) 이며, 점토 (Clay) 함량이 19.0-29.6% (평균 24.1%) 로 세립질 퇴적물이 우세하며, 유기물과 미량금속의 축적 가능성이 매우 높은 퇴적환경을 갖추고 있다.

연구해역인 자란만 패류양식장 주변 퇴적물의 유기물 특성을 살펴보면, IL은 7.5-13.9% (평균 10.3%) 범위였으며, COD함량은 4.2-18.8 mgO₂/g (평균 12.4 mgO₂/g) 범위였다. 일반적으로 양식장이 밀집해 있는 곳이 유기물 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 유기물 오염정도를 일본의COD기준 (20 mgO₂/g) 적용결과 모든 정점에서 기준치 이하로서 연구해역인 자란만은 유기물 오염이 다른 패류양식 해역보다 낮았다.

표층 퇴적물의 중금속 농도를 파악하기 위해 미량금속 (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) 농도를 분석하였다. 그 결과 As 1.1-4.1 mg/kg (평균 2.9 ± 0.9 mg/kg), Cd 0.139-0.149 mg/kg (평균 0.144 ± 0.04 mg/kg), Cr 24.9-33.9 mg/kg (평균 29.2 ± 3.0 mg/kg), Cu 16.8-31.3 mg/kg (평균 23.3 ± 5.3 mg/kg), Ni 8.3-13.8 mg/kg (평균 11.6 ± 1.6 mg/kg), Pb 8.7-16.8 (평균 11.1 ± 2.8 mg/kg), Zn 57.1-83.6 mg/kg (평균 65.4 ± 7.7 mg/kg) 의 범위였다. As, Cd, Cr, Ni 미량금속은 만의 바깥쪽 부분에서 상대적으로 높게 나타났으며, Cu, Pb, Zn은 만의 안쪽에 높은 수치를 보였다. 이는 만의 안쪽은 항구로써 선박에 사용하는 도로 및 아연도금판에 의한 것으로 판단되며, 바깥쪽 부분은 인근해역의 표층 퇴적물들의 미

량금속들이 물리적 영향으로 유입된 것으로 생각된다.

해저 퇴적물의 해양환경 기준 TEL과 PEL을 적용결과, Cu와 Zn에서 TEL기준치보다 다소 높게 나타났다. 하지만 중금속 모두 관리기준 PEL 기준치 이하로 모두 관찰되었다.

농집지수 (I_{geo}) 를 평가결과, As의 Class 2는 60%로 중간 오염수준 (Moderate risk) 으로 나타났고, 나머지 미량금속들은 Class 1로 비오염에서 중간 오염수준으로 (From unpolluted to moderately polluted) 이하로 관찰되었다.

퇴적물 중금속의 종합적인 오염도를 평가하기 위하여 PLI 값은 대부분 조사정점에서 1.0을 초과하였으며, 만의 안쪽 부근 정점 J4에서 1.129로 높게 나타났다. 그리고 저서생물에 미치는 영향을 평가하기 위해 ERI는 63.7-81.8 (평균 73.8) 로 모든 조사정점에서 낮은 위험도 (Low risk) 를 보였다.

그러므로 자란만에 생산되는 패류의 높은 생산성과 식품 안정성을 위하여 지속적인 모니터링 및 관리가 필요하며, 특히 저서환경에 영향을 줄 수 있는 어장 환경관리와 적정 양식밀도를 유지하여야 한다. 또한 추가적으로 유기물과 중금속 오염원에 대한 경로를 추적하여, 오염저감 및 퇴적환경 개선을 위한 근본적인 대책도 함께 필요로 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 경상대학교 해양생명교육연구센터에서 수행되었음.

REFERENCES

Cantillo, A. (1998) Comparison of results of mussel watch programs of the United States and France with worldwide mussel watch studies. *Marine Pollution Bulletin*, **36**: 712-717.

- Cho, C.h. (1993) Red tides in mariculture farms in Puksin bay, Korea. *Journal of Aquaculture*, **6**: 63-69.
- Cho, C.H., and Park, K.Y. (1983) Eutrophication of bottom mud in shellfish farms, the Goseong - Jaran bay. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **16**: 260-264.
- Choi, J.D., Jeong, W.G., and Kim, P.H. (1998) Bacteriological study of sea Water and oyster in Charan bay, Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **31**: 429-436.
- Choi, M., Chun, J., Woo, H., and Yi, H. (1999) Change of heavy metals and sediment facies in surface sediments of the Shihwa Lake. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, **8**: 593-600.
- Choi, M., Lee, I.-S., Hwang, D.-W., Kim, H.C., Yoon, S.-P., Yun, S., Kim, C.-S., and Seo, I.-S. (2017) Organic enrichment and pollution in surface sediments from Jinhae and Geoje-Hansan Bays with dense oyster farms. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **50**: 777-787.
- Choi, T.-J., Kwon, J.-N., Lee, G., Hwang, H., Kim, Y., and Lim, J.-H. (2015) Distribution and pollution assessment of trace metals in the surface sediments around farming area of Jinhae Bay. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, **21**: 347-360.
- Choi, W.J., Chun, Y.Y., Park, J.H., and Park, Y.C. (1997) The influence of environmental characteristics on the fatness of pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in Hansan - Koje bay. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **30**: 794-803.
- Cranford, P., Hargrave, B., and Doucette, L. (2009) Benthic organic enrichment from suspended mussel (*Mytilus edulis*) culture in Prince Edward Island, Canada. *Aquaculture*, **292**: 189-196.
- EPA, U. (2012) National Coastal Condition Report IV. EPA-842-R-10-003. Washington, DC: United States Environmental Protection ...
- Folk, R. (1968) Petrology of sedimentary rock, Hemphill's, Drawer M. University Station: 170.
- Folk, R.L., and Ward, W.C. (1957) Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, **27**: 3-26.
- Hakanson, L. (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, **14**: 975-1001.
- Horowitz, A.J. (1991) A primer on sediment-trace element chemistry pp. Lewis Publishers Chelsea.
- Hwang, D.-W., Ryu, S.-O., Kim, S.-G., Choi, O.-I., Kim, S.-S., and Koh, B.-S. (2010) Geochemical characteristics of intertidal surface sediments along the southwestern coast of Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **43**: 146-158.
- Hwang, H., Hwang, D.-W., Lee, G., Kim, H.-C., and Kwon, J.-N. (2018) Distributions of organic matter and heavy metals in the surface sediment of Jaran Bay, Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, **24**: 78-91.
- Jain, C. (2004) Metal fractionation study on bed sediments of River Yamuna, India. *Water research*, **38**: 569-578.
- Jeong, W.-G., Cho, S.-M., and Lee, S.-J. (2014) Physiochemical Characteristics and Heavy Metal in the Surface Sediments of Marine Shellfish Farming Waters in Anjung Bay, Korea. *The Korean Journal of Malacology*, **30**: 421-428.
- JFRCA. (2006) A Guide Book for the Improvement Plan in Aquaculture(instrucor). *Japan Fisheries Resource Conservation Association*, **79**.
- Kang, J.-H., Lee, S.-J., Jeong, W.-G., and Cho, S.-M. (2012) Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of oyster farms in Goseong Bay, Korea. *The Korean Journal of Malacology*, **28**: 233-244.
- Kim, J.-H., Cho, S.-M., and Jeong, W.-G. (2019) Characteristics of Sediment Environment in Geojeman Bay Shellfish Farms. *The Korean Journal of Malacology*, **35**: 19-31.
- Kim, P.-J., Park, S.-Y., Jang, S.-J., Jeon, S.-B., and Ju, J.-S. (2012) Biogeochemistry of alkaline and alkaline earth elements in the surface sediment of the Gamak Bay. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, **18**: 1-14.
- Lee, M.-K., Bae, W., Um, I.-K., and Jung, H.-S. (2004) Characteristics of Heavy Metal Distribution in Sediments of Youngil Bay, Korea. *Journal-korean society of environmental engineers*, **26**: 543-551.
- Lee, T., Cho, H.-L., Park, S.-E., Kim, Y., Kim, C.-s., and Kim, J.H. (2019) Estimation of land-based pollution loads to Jaranman Saryang island areas for export using a watershed model. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, **22**: 226-235.
- Lim, D.-i., Choi, J.-W., Shin, H.H., and Jung, H.S. (2013) Toxicological impact assessment of heavy metal contamination on macrobenthic communities in southern coastal sediments of Korea. *Marine pollution bulletin*, **73**: 362-368.
- Müller, G. (1979) Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971.
- MIFAFF. (2009) Report on water quality status in farming areas of Korea in 2009. Busan. Busan Korea 1-443.
- MIFAFF, M.o.F., Agriculture, Forestry and, Fisheries (2012) Standard manual of pacific oyster hanging culture. National Institute of Fisheries Science, pp 1-227.
- MOF. (2013) Marine environment standard methods, sediment method.
- Muller, G. (1981) Schwermetallbelastung der sedimente des neckars und seiner nebenflusse: eine estandsaufnahme.
- Peng, J.-f., Song, Y.-h., Yuan, P., Cui, X.-y., and Qiu, G.-l. (2009) The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of hazardous*

- materials*, **161**: 633-640.
- Ra, K., Kim, E.-S., Kim, K.-T., Kim, J.-K., Lee, J.-M., and Choi, J.-Y. (2013) Assessment of heavy metal contamination and its ecological risk in the surface sediments along the coast of Korea. *Journal of Coastal Research*, :105-110.
- Sheykhi, V., and Moore, F. (2013) Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor river, southwest Iran. *Environmental monitoring and assessment*, **185**: 3219-3232.
- Stoffers, P., Glasby, G., Wilson, C., Davis, K., and Walter, P. (1986) Heavy metal pollution in Wellington Harbour. *New Zealand journal of marine and freshwater research*, **20**: 495-512.
- Taylor, S. (1964) Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table.
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M. (1995) The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of geophysics*, **33**: 241-265.
- Thornton, I. (1983) Applied environmental geochemistry pp. Academic Press.
- Tomlinson, D., Wilson, J., Harris, C., and Jeffrey, D. (1980) Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer meeresuntersuchungen*, **33**: 566-575.
- Uede, T. (2008) Validity of acid volatile sulfide as environmental index and experiment for fixing its standard value in aquaculture farms along the coast of Wakayama Prefecture, Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **74**: 402-411.
- Zoumis, T., Schmidt, A., Grigorova, L., and Calmano, W. (2001) Contaminants in sediments: remobilisation and demobilisation. *Science of the total environment*, **266**: 195-202.