

2011년 곰소만 표층퇴적물의 지화학적 특성 및 중금속 오염도 평가

김형숙 · 김형철* · 이원찬¹ · 홍석진 · 황동운 · 조윤식² · 김진호 · 김선영

국립수산과학원 어장환경과, ¹남해수산연구소, ²갯벌연구센터

Geochemical Characteristics of Surface Sediments and an Evaluation of Trace Metal Pollution in Gomso Bay, Korea, 2011

Chung-sook Kim, Hyung Chul Kim*, Won Chan Lee¹, Sokjin Hong, Dong-Woon Hwang, Yoon-Sik Cho², Jin ho Kim and Sunyoung Kim

Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

¹South Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Yeosu 59780, Korea

²Tidal Flat Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Gunsan 54014, Korea

To understand the geochemical characteristics of Gomso Bay, which features extensive Manila clam, we measured various geochemical parameters, organic matter, and trace metals (Cu, Cd, Pb, Zn, Cr, Hg, As and Fe) of intertidal and subtidal surface sediments in 2011. The surface sediments consisted of sedimentary facies including gravel (0.21%), sand (61.1%), silt (32.1%), and clay (6.5%). The chemical oxygen demand (COD) and acid volatile sulfide (AVS) values in most areas were below sediment quality criteria (COD, 20 mg/g·dry; AVS, 0.2 mg /g·dry). Trace metals in the surface sediments were below pollution thresholds, except for As (morderately polluted). Sediment quality was evaluated using the trace metal pollution load index (PLI) and ecological risk index (ERI), which showed that sediments were generally not polluted and at low risk; however, values along the outer bay were higher. We expect these results will be valuable for sustainable aquaculture production and environmental management in Gomso Bay.

Key words: Gomso Bay, Sediment, Organic pollution, Geochemical characteristic, Trace metal

서론

우리나라 수산업은 자원고갈, 어장 축소 등으로 잡는 어업에서 기르는 어업으로 전환되면서 양식기술이 발달하고 양식품종이 다양해졌지만, 연안 양식어업이 집약적으로 성행하면서 연안환경이 변화되고 있다. 패류양식은 생태계 내 식물플랑크톤 등 입자성유기물질(particulate organic matter, POM)을 여과·섭식(filter feeding)하여 수질 정화의 순기능적 역할을 하지만, 그 과정에서 생물대사활동에 의한 배설물(faeces)과 의분(pseudo-faeces)이 퇴적물에 축적되어 저서환경에 영향을 끼친다(Danovaro et al., 2004, Choi et al., 2015). 따라서 퇴적물의 환경 변화 및 오염은 바닥식 패류 양식의 성장과 생산성에 영향을 주므로 양식어장 환경변화를 파악하여 효율적으로 관리할 수 있는 방안마련이 필요하다. 서해연안은 조수간만의 차가 크고 먹이원이 풍부하여 패류 생산에 적합한 환경을 가지고 있으며, 주요 품종인 바지락 생산량이 1990년대부터 다목적 댐 건

설과 대규모 간척사업 등으로 인해 연안환경(인위적인 해안선 변화와 수산 동·식물의 서식지 감소)이 변화되어 감소하고 있다(Chang et al., 2007, Choi et al., 2013, Park et al., 2015). 전라북도 서해안의 부안군과 고창군 사이에 위치한 반폐쇄성 내만인 곰소만은 만 면적의 80% 이상이 조간대로 구성되어 있으며, 해수 교환율이 높은 수리적 특성을 가지고 있다(Yang and Kim, 2002; Jeong et al., 2006). 곰소만은 백합, 바지락 등 바닥식 패류양식 활동이 조간대 및 조하대에서 활발히 이루어지고 있는 우리나라의 대표적 패류 생산지로 잘 알려져 있고, 김과 같은 해조류 양식도 성행하고 있어 생태적으로 경제적 가치가 매우 높은 해역이다(MLTM, 2011). 곰소만에 위치한 부안 줄포만과 고창갯벌은 2010년에 습지보호지역으로 람사르 습지에 등록되었으며, 내륙습지와 매우 다른 생태적 특성을 지닌 해양보호구역(Marine Protected Area)으로써 생물 다양성이 풍부하고 생태계 보전가치가 매우 높으며 생태관광에도 이용되고 있다(Oh and Rho, 2013). 곰소만을 대상으로 다양한 연구가 진행되

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0567>



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.

Korean J Fish Aquat Sci 50(5) 567-575, October 2017

Received 4 September 2017; Revised 28 September 2017; Accepted 18 October 2017

*Corresponding author: Tel: +82. 51-720-2523 Fax: +82. 51-720-2515

E-mail address: hckim072@korea.kr

고 있는데 곰소만의 퇴적학적 특성 및 층서학적 연구(Chang et al., 1993; Cho et al., 2001; Shon, 2001; Kim et al., 2006), 조간대 퇴적물의 계절적 변화와 장기적 변화 특성(Chang and Choi, 1998; Yang and Kim, 2002), 갯벌 퇴적물 내의 현생 유공충에 대한 연구(Park and Lee, 1994; Woo et al., 1995), 퇴적물 중 미세조류의 생체적 구조(Lee et al., 2012), 곰소만 하전리 갯벌에서의 바지락 성장-생태(Baek et al., 2014) 등이 있지만, 곰소만의 환경변화에 관한 연구는 상대적으로 미흡하다.

본 연구는 우리나라의 대표적 바지락 서식지인 곰소만을 대상으로 퇴적환경 변화와 오염도를 평가하기 위해 퇴적학적 특성(입도, 분급도, 왜도, 첨도), 유기물(강열감량, 화학적 산소요구량, 산취발성황화물, 총유기탄소, 총질소) 및 미량금속(Cu, Cd, Pb, Zn, Cr, Hg, As, Fe)의 공간적 농도분포 특성을 조사하였다.

재료 및 방법

대상해역

곰소만은 전북 부안군과 고창군 사이에 위치해 있으며, 육지 쪽으로 길게 뻗은 반 폐쇄적인 내만형으로 만 입구 넓이는 7-9 km, 입구에서 내만까지의 길이는 약 20 km이다(Fig. 1). 곰소만의 총면적은 약 100 km²이고 조간대의 면적은 약 75 km²이며, 평균 수심 10 m 이하이다. 곰소만 남쪽 해안의 하전리 인근에 소규모 하천인 주진천이 위치하고, 곰소만 입구에서 북쪽 40 km 지점의 해안으로 금강이 유입된다(Lee, 2006). 조석은 반일주조가 우세하며, 대조차는 670 cm, 소조차는 132 cm이고(KHOA, 2012), 조류의 유속은 창조류(115 cm/sec)보다 낙조류(150 cm/sec)가 우세한 편이다(NGI, 1981). 곰소만 주변의 지질은 백악기 화산암과 쥐라기 화강암, 선캄브리아기의 편마암으로 구성되어 있다(NGI, 1981).

현장조사 및 분석

곰소만 퇴적물의 지화학적 환경특성을 파악하기 위하여 2011년 8월과 12월에 7개 정점에서 van Veen grab을 이용하여 표층퇴적물(0-2 cm)을 교란되지 않게 채집하였다(Fig. 1). 채집한 퇴적물 시료는 강열감량(ignition loss, IL), 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 산취발성황화물(acid volatile sulfide, AVS), 총유기탄소(total organic carbon, TOC), 총질소(total nitrogen, TN)에 대하여 유기물의 계절적 변화를 살펴보았다. 입도(grain size), 미량금속은 1회(8월) 채집하였는데, 조석으로 인해 시간적 제약과 이동이 어려워 채집이 불가능한 정점 2를 제외하고 분석하였다. 퇴적물 입도와 IL, COD, AVS 항목은 해양환경공정시험기준(MLTM, 2010)에 따라 분석하였고, TOC와 TN은 Hwang et al., (2006), 미량금속은 Choi et al. (2015)에 따라 분석하였다. 퇴적물 입도분석은 평균 입도(Mz), 분급도(sorting)와 왜도(skewness)를 Folk and Ward (1957)에 따라 계산하였다.

표층 퇴적물 내 미량금속의 오염도를 파악하기 위하여 오염기준치(sediment quality guidelines, SQGs), 농축계수(enrichment factor, EF), 농집지수(geo-accumulation index, I_{geo})를 계산하여 비교하였고, 오염 부하량 지수(pollution load index, PLI)와 생태학적 위험 지수(ecological risk index, ERI)를 이용하여 퇴적물 내 종합적인 위험도를 평가하였다.

퇴적물관리기준(SQGs)은 퇴적물 내 미량금속의 농도와 오염현황을 미국 해양대기청(national oceanic and atmospheric administration, NOAA)에서 권고한 ERL (effect range low) (Buchman, 2008)값과 비교하였다.

표층 퇴적물의 농축계수(EF)는 퇴적물내 광물의 구성비율을 고려하여 금속원소의 함량을 보정하는 방법으로 국·내외 연구자들은 지각물질과 각 금속원소 중에 높은 농도로 존재하고 오

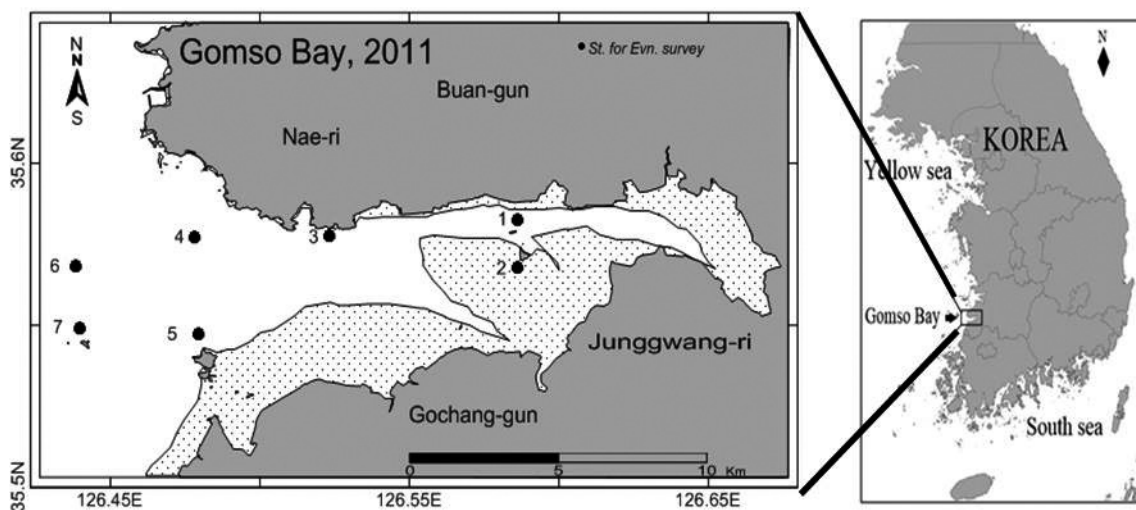


Fig. 1. Study area and sampling stations in Gomso Bay.

염의 영향이 적은 Fe (Diaz-de Alba et al., 2011; Hwang et al., 2011)이나 Al (Bastami et al., 2012; Ra et al., 2013)의 농도비를 이용한다. 이 연구에서는 퇴적물 중 Fe을 보정원소로 하여 식(1)으로 EF를 계산하였다(Sinex and Helz, 1981, Hwang et al., 2015a).

$$Enrichment\ Factor(EF) = \frac{(Me/Fe)_{observed}}{(Me/Fe)_{crust}} \dots\dots(1)$$

여기서 (Me/Fe)_{observed}는 연구해역 퇴적물 중 Fe에 대한 각 미량금속의 농도비, (Me/Fe)_{crust}는 전 세계 연안 대륙붕 지역의 퇴적물 중 Fe에 대한 각 미량원소의 농도비를 의미한다.

Muller (1979)가 제안한 농집지수(I_{geo})는 다음과 같은 식(2)으로 계산하여 각 미량금속에 대하여 총 7개 등급으로 오염 여부를 세분화하였다.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_{metal}}{B_{metal} \times 1.5} \dots\dots(2)$$

여기서 C_{metal}은 연구해역 퇴적물 중 미량금속의 농도, B_{metal}은 미량금속의 바탕농도(background value), 1.5는 지각기원에 의한 영향을 보정하기 위하여 사용하였다(Zhang and Liu, 2002).

퇴적물의 전체적인 오염도를 평가하기 위하여 분석된 미량금속을 모두 포함하여 Tomlinson et al. (1980)가 제안한 오염부하량지수(PLI)를 식(3)으로 계산하였다.

$$PLI = \sqrt[7]{CF_{Cr} \times CF_{Cd} \times CF_{Pb} \times CF_{Cu} \times CF_{Zn} \times CF_{Hg} \times CF_{As}} \quad (3)$$

여기서 CF(=C_{metal}/B_{metal})는 미량금속의 바탕농도(B_{metal})에 대해 측정된 미량금속의 농도(C_{metal})비를 의미하고, Fe는 지각에 풍부하게 존재하는 미량금속이기 때문에 제외하고 총 7개 원소에 대하여 PLI를 계산하였다.

ERI는 생태독성계수를 이용하여 미량금속이 저서생태계에 미치는 영향에 대한 위해도 평가를 Hakanson(1980)가 제안한 다음과 같은 식(4)와 식(5)으로 계산하였다.

$$E_i = T_{metal} \times \frac{C_{metal}}{B_{metal}} \dots\dots(4)$$

$$ERI = \sum_{i=1}^n E_i \dots\dots(5)$$

여기서, B_{metal}은 각 미량금속의 바탕농도, C_{metal}은 연구해역 내 퇴적물 중 미량금속의 농도, T_{metal}는 독성계수(Cr 2, Cd 30, Zn 1, Cu 5, Pb 5, As 10, Hg 40), n는 분석한 미량금속의 총 개수이다(Lim et al, 2013; Sheyhi and Moore, 2013).

한편, 지각에서 미량금속농도와 미량금속의 바탕농도는 국내외 연구자(Chen et al., 2007; Zhang et al., 2009; Hwang and Kim, 2011)들이 이용하고 있는 Taylor (1964)와 Taylor and MLennan (1995)이 보고한 전세계 연안 대륙붕 지역의 퇴적물 중 미량금속의 농도(Fe 3.5%, Mn 600 mg/kg, Zn 71 mg/kg, Cr 35 mg/kg, Ni 20 mg/kg, Pb 20 mg/kg, Cu 25 mg/kg, As 1.5 mg/kg, Cd 0.098 mg/kg, Hg 0.08 mg/kg)를 사용하였다(Hwang et al., 2015b).

결과 및 고찰

퇴적학적 특성

곰소만 표층퇴적물의 입도 분석결과, 퇴적물 내 구성성분의 함량분포는 자갈(gravel) 0-2.55 (평균 0.2)%, 모래(sand) 8.57-100 (평균 61.1)%, 실트(silt) 0-80.62 (평균 32.1)%, 점토(clay) 0-18.16 (평균 6.5)%를 보였다. 자갈은 만 입구부인 정점 4에서만 나타났고, 모래는 대죽도(정점 5) 부근에서 100%의 함량 분포를 보였다. 입도를 구성하는 성분 중 가장 높은 점유율을 보인 모래는 만 외측에서 내만으로 갈수록 감소하였으며, 실트는 내만으로 갈수록 높게 나타나 공간적으로 상반되는 분포특성을 보였다.

Folk (1968)의 퇴적상 분류에 의해 구분한 결과를 Table 1에 나타내었으며, 연구지역은 모래에서 점토까지 다양한 퇴적물로 구성되어 있다. 곰소만 표층 퇴적물은 사질(sand, S), 모래질 실트(sandy silt sZ), 실트(silt, Z), 함력니사질[slightly gravelly muddy, (g) mS], 함력사질[slightly gravelly sand, (g) S]의 5개

Table 1. Composition of statistical parameters and sediment type in Gomso Bay

station	Composition(%)				Mean (Ø)	Sorting (Ø)	Skewness	Kurtosis	Sediment type (Folk, 1968)
	Gravel	Sand	Silt	Clay					
1	0	21.68	64.52	13.8	5.32	2.10	0.59	1.93	sZ
3	0	40.46	50.89	8.65	4.57	1.65	0.53	1.95	sZ
4	2.55	73.02	21.88	2.54	3.63	1.17	0.02	2.67	(g)mS
5	0	100	0	0	3.41	0.17	0.04	1.02	S
6	0	100	0	0	3.39	0.17	-0.01	1.02	S
7	0	8.57	80.62	10.81	5.31	1.64	0.40	2.39	Z

의 퇴적상으로 구분되었다. 만 외부에서는 모래퇴적상이 우세하고, 만 내부에서는 모래질실트퇴적상이 우세하였다. 퇴적물의 평균입도는 2.80-6.02 (평균 4.3)Ø 범위로 실트퇴적물로 구성되었으며, 만 내부로 갈수록 평균입도가 세립해지는 경향을 보였다. 퇴적물의 입도조성이 얼마나 균일한가를 나타내는 분급도는 0.17-2.50 (평균 1.17)Ø 범위로 불량한(poorly sorted) 분급도를 보였다. 입도 정규분포 곡선의 비대칭성 정도를 나타내는 왜도는 -8.58~0.60 (평균 -0.56) 범위로 강한 음의 왜도(왼쪽으로 치우친 조립질 꼬리)를 보이며, 첨도는 0.90-2.67 (평균 1.64) 범위로 정규분포에 비해 중앙으로 매우 뾰족한 첨도(very leptokurtic)를 보였다. 즉, 다양한 입도를 가진 퇴적분포로 구성되어 있고 비균질한 분포양상을 보이고 있다.

이상과 같이 곰소만 내측의 퇴적상은 자갈과 모래 함량이 낮은 분포를 가지며 외측으로 갈수록 조립된 퇴적물로 바뀌면서 모래 함량이 증가하는 변화를 나타낸다. 최근의 연구 결과 (Chang et al., 2007)이 보고한 곰소만 주변 조간대 퇴적물 분포와 유사한 양상을 보였다. 이러한 원인은 곰소만의 경우 입구가 넓어 조석, 조류, 파랑 등과 같은 수리에너지의 영향을 크게 받는 것으로 보이며, 특히 조류가 강한 만 외측에 모래질이 우세한 것으로 사료된다.

유기물 분포 특성

곰소만의 표층퇴적물 내 유기물 오염의 정도를 평가하기 위하여 퇴적물 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산취발성황화물량(AVS), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN)를 하계 및 동계에 걸쳐 조사한 결과를 Table 2에 나타내었다. 곰소만의 IL의 농

도분포는 1.90-7.58 (평균 3.72)% 범위로 만 내측인 정점 2에서 가장 낮고 만 외측인 정점 6에서 가장 높았다. 8월에는 1.9-7.6 (평균 3.8)%, 12월에는 2.2-4.7 (평균 3.6)% 범위를 보였고, 정점 3, 4, 6에서 평균값을 초과하였다. COD의 농도 분포는 2.17-13.13 (평균 6.33) mg/g·dry weight (이하 mg/g·dry) 범위로 8월에는 2.17-13.13 (평균 5.86) mg/g·dry, 12월에는 4.38-9.15 (평균 6.99) mg/g·dry 범위로 12월이 8월보다 상대적으로 높았으며, IL과 유사한 공간적 분포 특성을 나타내었다. AVS의 농도 분포는 not-detected (ND)-0.26 (평균 0.07) mg/g·dry 범위로 8월에는 ND-0.21 (평균 0.06) mg/g·dry, 12월에는 0.01-0.26 (평균 0.08) mg/g·dry 범위로 조사시기에 따른 차이가 없었다. TOC 농도는 8월에 1.15-9.15 (평균 3.91) mg/g·dry, 12월에 0.8-3.25 (평균 1.65) mg/g·dry로 8월이 12월보다 2배 이상 높은 농도를 보였다. 공간적으로 만 외측에서 높은 농도를 보였고, 만 내측과 대죽도에서 평균보다 낮은 농도를 나타내었다. TN 농도는 8월에 0.2-1.25 (평균 0.54) mg/g·dry, 12월에 0.1-0.35 (평균 0.19) mg/g·dry 로 8월이 12월보다 높은 농도를 보여 TOC와 유사한 계절적 분포 경향을 보였지만, 만 외측에서 상대적으로 더 높은 농도를 보여 공간적으로 다른 분포 특성을 보였다. 곰소만의 퇴적변화가 기상의 영향을 받아 여름에는 세립질 퇴적물이 퇴적되고 겨울에는 여름에 퇴적된 퇴적물이 침식되는 연구결과(Ruy et al., 2001; Hwang and Kim, 2011; Choi et al., 2015)를 통해 12월에 곰소만 조간대에서의 낮은 유기물 함량을 가진 세립된 퇴적물이 조하대로 이동하여 유사한 결과를 보여 8월에 TOC와 TN의 농도가 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다.

Table 2. The range and average of mean grain size (Mz), ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), acid volatile sulfide (AVS), total organic carbon (TOC) and total nitrogen(TN) in sediments from Korean coast

Study Region	Mz	IL	COD	AVS	TOC	TN	C/N	Reference
Gomso Bay (Sublittoral zone)	2.8-6.0 (4.3)	1.9-7.6 (3.7)	2.2-13.1 (6.3)	ND-0.26 (0.07)	0.8-9.2 (3.0)	0.10-1.25 (0.39)	5.8-9.3 (7.70)	This study
Deukryang Bay	-	3.1-21.5 (5.6)	0.4-18.2 (5.7)	ND ¹ -3.30 (0.36)	-	-	-	Yoon(2003)
Gamak Bay	-	4.6-11.6 (7.1)	2.3-99.3 (30.98)	ND-10.29 (1.02)	5.5-23.2 (10.34)	0.71-2.99 (1.37)	5.4-10.8 (7.61)	Noh et al. (2006)
Geoje-Hansan Bay	-	5.7-12.9 (8.0)	17.2-55.8 (31.4)	ND-0.78 (0.13)	12.9-27.6 (18.7)	1.70-3.70 (2.43)	5.5-10.7 (7.27)	MIFAFF (2008)
Jinhae Bay	-	7.1-13.3 (9.7)	10.6-51.9 (29.3)	0.08-3.0 (0.66)	14.7-49.4 (27.7)	1.71-7.74 (3.69)	6.0-9.6 (7.66)	MIFAFF (2008)
Goseung-Jaran Bay	8.3-10.6 (9.3)	4.4-8.8 (7.2)	4.8-27.8 (16.8)	ND-0.48 (0.08)	7.2-21.5 (14.5)	1.20-2.83 (2.03)	5.4-8.5 (7.10)	MIFAFF (2009)
Yeoja Bay	7.6-10.1 (8.8)	3.1-6.3 (5.0)	3.7-22.4 (10.4)	ND-0.55 (0.13)	4.3-12.1 (8.4)	0.55-1.45 (1.09)	-	Choi et al. (2013)
Gomso Bay (Tital zone)	2.6-4.8 (4.1)	0.7-2.0 (1.3)	0.68-3.95 (2.3)	ND-00.07 (0.02)	0.7-2.3 (1.5)	0.10-0.35 (0.22)	-	Choi et al. (2015)

¹ND, Not Detected. (), mean value.

퇴적물 내 탄소와 질소의 비 값을 이용하여 축적된 유기물의 기원을 평가하였으며, 곰소만의 C/N 비 값은 5.75-9.29 (평균 7.71) 범위로 나타났으며, 모든 정점에서 10 이하의 값으로 나타나 퇴적물에 축적되는 유기물은 주로 해양생물의 기초생산에 의해서 이루어는 것으로 판단 할 수 있다(Muller, 1977). 수하식 패류양식장인 거제·한산만과 고성·자란만 보다 C/N 비는 다소 높았지만, 진해만과 비슷한 값을 보이고 있다(Table 2). IL, COD, AVS, TOC, TN는 패류양식이 활발하게 활동하고 있는 남해안의 득량만, 가막만, 거제·한산만, 진해만, 고성·자란만, 여자만의 반폐쇄적인 내만과 비교하여 낮은 농도 분포를 나타내었다(Table 2).

COD는 전 지역에서 퇴적물 오염기준치인 20 mg/g-dry (JFRCA, 1983) 이하의 양호한 상태를 보였고, AVS는 일부 정점(8월 정점 6, 12월 정점 7)을 제외하고 퇴적물 오염기준치인 0.2 mg/g-dry (JFRCA, 1983)를 초과하지 않았다. 수산동식물이 서식할 수 있는 수질과 퇴적물에 관한 어장환경기준(해양수산부 고시 제 2014-96호, 2014년 8월 11일 시행)에서 TOC 20 mg/g-dry (MOF, 2014)과 무생물발생해역의 TOC 임계값인 26-30 (평균 28, 체사피크만) mg/g-dry (Llansó, 1992) 및 18-38 (평균 30, 동경만) mg/g-dry (Komoda, 2012)을 초과하는 지역은 없었다. 따라서, 곰소만의 표층 퇴적물내 유기물 오염정도를 종합적으로 평가하면, 대부분의 지역에서 유기물 오염은 진행되지 않았으며 바지락 등 양식생물을 포함한 저서동물이 서식하기에 양호한 퇴적물 환경을 유지하고 있는 것으로

판단된다.

미량금속 농도 분포 및 오염도 평가

퇴적물 내 Cu와 Zn과 같은 미량금속은 생물에게 필수원소이지만 지속적으로 잔류하는 특성을 지니고 있어 임계농도를 초과하게 되면 저서생물과 수생생물에게 직접적으로 영향을 주고 (Ra et al., 2013), Ag, Cd, Hg와 같은 미량금속은 필수원소가 아니면서 그 독성이 매우 강하여 낮은 농도에서도 저서생물에 큰 영향을 미친다(Ralph and Burchett, 1998).

곰소만 표층 퇴적물 중 금속원소의 농도와 지역별 분포특성을 Fig. 2에 나타내었다. 표층 퇴적물 중 미량금속 평균농도는 Cu 10.7±4.7 mg/kg-dry, Cd 0.042±0.022 mg/kg-dry, Pb 16.1±2.4 mg/kg-dry, Cr 52.2±14.8 mg/kg-dry, As 6.6±3.4 mg/kg-dry, Zn 63.0±15.7 mg/kg-dry, Hg 0.011±0.005 mg/kg-dry, Fe 2.92±0.73%로 나타났다.

퇴적물 중 금속원소의 농도는 만 내측과 수로에 해당하는 지역보다 만 외측에서 다소 높은 것으로 나타났다. 이것은 곰소만 퇴적물 내 유기물 농도의 분포 특성과 일치한다. 퇴적물 내 미량금속 오염 현황을 알아보기 위해 농축계수(EF)와 농집지수(I_{geo})를 이용하여 평가한 결과를 Table 3과 Table 4에 나타내었다. EF가 1.5 미만이면 오염되지 않은 자연적인 상태로, 1.5 이상이면 인위적인 오염으로 평가되는데(Zang and Liu, 2002), 연구지역 내 퇴적물의 Cu, Pb, Zn, Cd, Hg은 평균 EF 값이 1.5 이하로 오염되지 않은 자연적인 농도를 보존하고 있는 것으로

Table 3. Ratios of trace metals relative to Fe in surface sediments of Gomso Bay and in earth crust reported by Taylor (1964) and Taylor and McLennan(1995)

	Metals/Fe×1000					Metals/Fe×10000	
	Cu/Fe	Pb/Fe	Zn/Fe	Cr/Fe	As/Fe	Cd/Fe	Hg/Fe
Gomso Bay	0.36	0.57	2.16	1.78	0.22	0.014	0.004
Earth's crust	0.71	0.57	2.03	1.00	0.04	0.028	0.023
E.F.	0.50	1.00	1.06	1.78	5.03	0.51	0.16

Table 4. Levels of sediment pollution by geoaccumulation index(I_{geo}) (Muller, 1979) and the number of I_{geo} class for the concentrations of trace metals in surface sediments of Gomso Bay

I _{geo}	I _{geo} Class	Designation of sediment quality	I _{geo}							
			Cu	Cd	Pb	Cr	As	Zn	Hg	Fe
> 5	6	Very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	5	Strongly/very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0
3-4	4	Strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	3	Moderately/strongly polluted	0	0	0	0	1	0	0	0
1-2	2	Moderately polluted	0	0	0	0	4	0	0	0
0-1	1	Practically unpolluted/moderately polluted	0	0	0	3	2	0	0	0
0	0	Practically unpolluted	7	7	7	4	0	7	7	7
Average of I _{geo}			-1.93	-2.03	-0.91	-0.06	1.42	-0.79	-3.59	-0.88

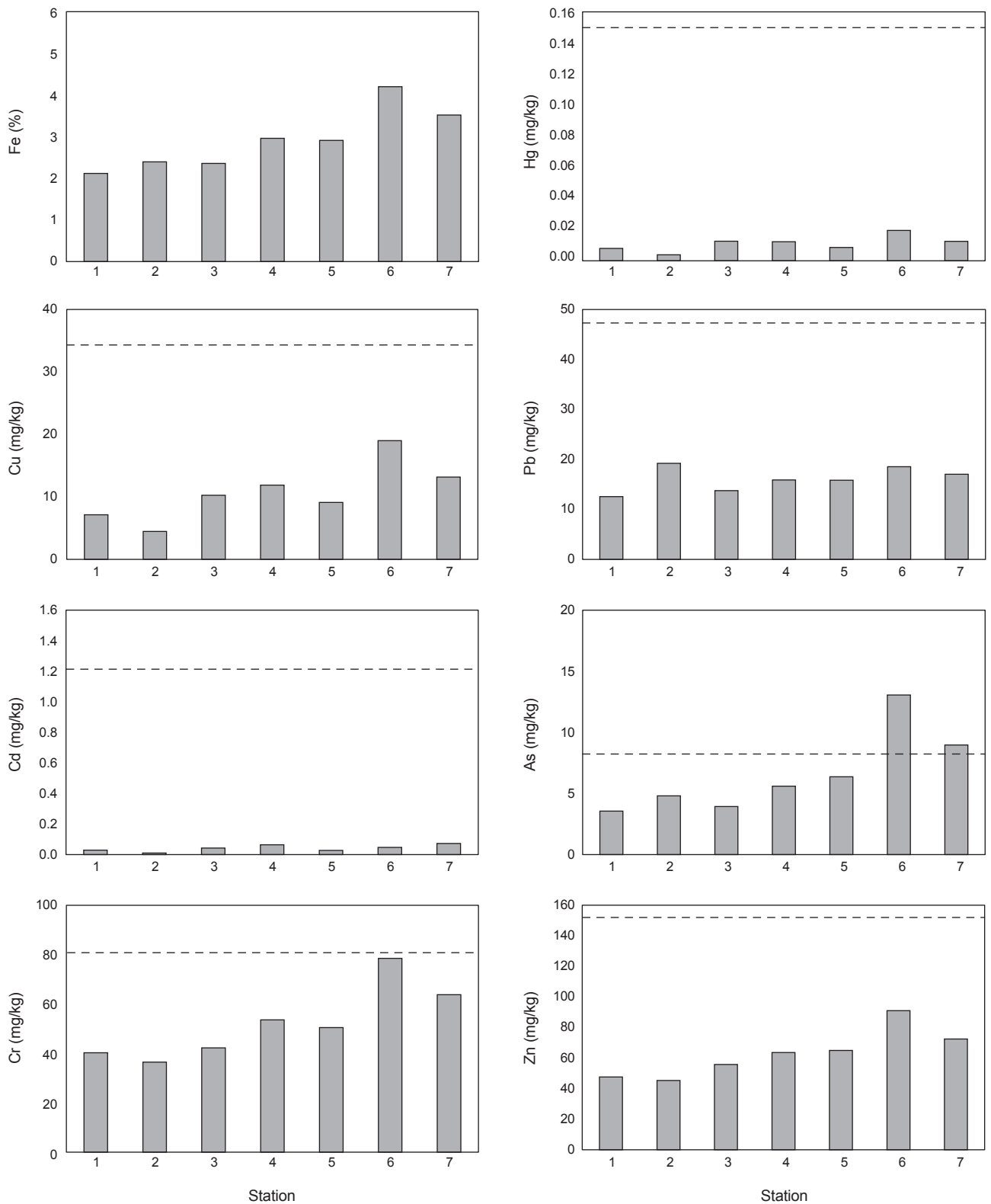


Fig. 2. Concentrations of Trace metals on surface sediment in each station of Gomso Bay. The dotted and solid lines represent the values of Effect Range Low (ERL) as the sediment quality guidelines.

Table 5. Classification of PLI and ERI assessment of trace metals and PLI and ERI values of trace metal in surface sediments of Gomso Bay

Index	Pollution levels	St.	PLI	ERI
Pollution load index (PLI) ¹	> 1 : polluted	1	0.52	44.0
	< 1 : no pollution	2	0.43	45.6
Ecological risk index (ERI) ²	ERI (Ei) < 100 (30) : low risk	3	0.66	54.1
	100 (30) < ERI (Ei) < 150 (50) : moderate risk	4	0.82	73.0
	150 (50) < ERI (Ei) < 200 (100) : considerable risk	5	0.69	64.4
	200 (100) < ERI (Ei) < 300 (150) : very high risk	6	1.17	125.2
	ERI (Ei) ≥ 300 (150) : disastrous risk	7	0.96	99.4

¹Chakravarty and patgiri (2009). ²Zhang et al. (2012).

나타났지만 Cr과 As의 경우에는 EF 값이 1.5 이상으로 인위적인 오염의 영향을 받고 있는 것으로 평가되었다.

I_{geo} 값과 비교하여 7단계의 오염 평가기준에 적용해보면 곰소만 외측에서 미량금속 오염도가 상대적으로 크고, Cr, As를 제외한 원소들은 I_{geo} class가 0를 보여 오염되지 않은 수준(practically unpolluted)으로 평가되었다. Cr은 정점 4, 6, 7에서 I_{geo} class가 1로 오염되지 않은 수준(practically unpolluted)과 약간 오염된 수준(moderately polluted)의 중간으로 나타났다. As는 I_{geo} class가 3로 정점 7에서 오염된 수준(moderately/strongly polluted)의 오염을 보였고, 그 외 정점에서는 오염되지 않은 수준(practically unpolluted)과 약간 오염된 수준(moderately polluted)의 중간으로 나타났다.

측정된 미량금속에 의한 전체적인 오염도를 평가하기 위해 본 연구에서는 Fe를 제외하고 8개의 원소를 이용하여 PLI를 계산하였다(Table 5). PLI 값은 0.43-1.17(평균 0.72)로 만 외측으로 갈수록 상대적으로 높은 결과를 보였다. 만 외측 정점 6은 PLI 값이 1 이상으로 오염된 것으로 나타났으며, 그 외는 PLI 값이 1보다 작아 오염되지 않은 것으로 평가되었다.

ERI는 44-125.2 (평균 72.2) 범위였으며, 곰소만 만 외측에 위치한 정점 6에서 125.2로 국지적인 오염상태인(moderate risk)을 보였고, 그 외 정점들은 100 이하로 낮은 위험도(low risk) 상태를 나타내었다(Table 5).

본 연구지역의 퇴적물의 미량금속은 남해안의 득량만, 가막만, 여자만, 강진만보다 전반적으로 낮은 경향을 나타내었다(Choi et al., 2015). 퇴적물 내 미량금속 농도를 미국 NOAA에서 권고하는 퇴적물 기준(ERL)을 적용한 결과, As가 정점 6, 7에서 NOAA의 하위권고기준인 ERL (As 8.2 mg/kg-dry)을 초과하였으나, 그 외 모든 정점에서 미량금속 농도는 ERL 미만

이었다. 특히 Cd과 Hg은 ERL 농도 기준의 1/5 이하의 매우 낮은 농도인 것으로 보아 연구지역 내 표층 퇴적물의 금속원소들의 농도는 저서동물에게 큰 영향을 주지 않는 것으로 사료된다(Fig 3). As는 크게 변성퇴적암과 화산암 등으로부터 산출되는 자연적인 요인과 농약 사용, 목재 방부제, 유리 제작, 산업 및 광산 활동 등과 같은 인위적인 요인으로 나눌 수 있는데, 일반적으로 인위적인 요인보다 광물과 암반으로 발생하는 지질 등에 의한 자연적인 요인이 광범위하게 나타나고 있다(MEV 2011; Kim et al., 2012). 곰소만 지역 내 As는 인위적인 요인보다 자연적인 지질의 영향을 받는 것으로 판단된다.

미량금속의 오염도를 국내 환경기준과 다양한 평가방법을 이용한 결과, 곰소만 내측보다 만 외측에서 오염 등급이 상대적으로 높았지만 오염을 우려할 만한 정도를 보이지는 않았다.

종합하면 곰소만의 퇴적물 내 오염도는 낮고 퇴적환경이 양호한 것으로 판단되나, 본 연구는 단기간의 결과로써 곰소만 지역의 퇴적환경 특성을 명확하게 평가하는데 어려움이 있다. 곰소만 등 서해 연안의 지속적인 양식생산성 유지와 어장환경 관리를 위해서는 퇴적물 이동 조사와 함께 양식생물의 서식환경 등 생태계에 미치는 영향에 대한 지속적인 조사가 이루어져야 하고, 이에 따른 적절한 관리계획 수립이 필요하다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원의 수산과학연구과제(R2017055)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- Baek MJ, Lee YJ, Choi KS, Lee W.C, Park HJ, Kwak JH and Kang CK. 2014. Physiological disturbance of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*, by altered environmental conditions in a tidal flat on the west coast of Korea. *Mar pollut bull* 78, 137-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.050>.
- Bastami KD, Hossein B, Sarah H, Farzaneh S, Ali H and Mousa DB. 2012. Geochemical and geo-statistical assessment of selected heavy metals in the surface sediments of the Gorgan Bay, Iran. *Mar Pollut Bul* 64, 2877-2884. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.08.015>.
- Buchman MF. 2008. NOAA screening quick reference tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA, Office of response and restoration division. National Oceanic and Atmospheric Administration 34.
- Chakravarty M and Patgiri AD. 2009. Metal pollution assessment in sediments of the Dikong River, N. E. India. *J Hum Ecol* 27, 63-67.
- Chang JH and Choi JY. 1998. Seasonal accumulation pattern and preservation potential of tidal flat sediments; Gomso Bay, West Coast of Korea. *J Korean Soc Oceanogr* 3, 149-

- 157.
- Chang JH, Ryu SO and Jo JY. 2007. Long-term Variation of Tidal-flat Sediments in Gomso Bay, West Coast of Korea. *Jour Korean Earth Sciences Society* 28, 357-366. <https://doi.org/10.5467/JKESS.2007.28.3.357>.
- Chang JH, Chun SS, Kwon SJ, Shin DH, Han SJ and Park YA. 1993. Sedimentary characteristics and evolution history of chenier, Gomso-Bay tidal flat, western coast of Korea. *J Korean Soc Oceanogr* 28, 212-228.
- Cho TC, Lee SB and Kim SY. 2001. Sedimentological and Hydromechanical Characteristics of Bed Deposits for the Cultivation of Manila clam, *Ruditapes philippinarum* in Gomso Tidal Flat. *Korean J Fish Aquat Sci* 34, 245-253.
- Chen CW, Kao CM, Chen CF and Dong CD. 2007. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere* 66, 1431-1440. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.030>.
- Choi MK, Kim HC, Hwang DW, Lee IS, Kim YS, Jung YJ and Choi HG. 2013. Organic Enrichment and Pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeoja Bay and Gangjin Bay, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 424-436. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0424>.
- Choi MK, Lee IS, Kim CS, Kim HC and Hwang DW. 2015. 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 Aquat Sci* 48, 555-563. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0555>.
- Danovaro R, Gambi C, Luna GM and Mirto S. 2004. Sustainable impact of mussel farming in the Adriatic Sea (Mediterranean Sea): evidence from biochemical, microbial and meiofaunal indicators. *Mar Pollut Bull* 49, 325-333. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.02.038>.
- Diaz-de Alba M, Galindo-Riano MD, Casanueva-Marengo MJ, Garcia-Vargas M and Kosore CM. 2011. Assessment of the metal pollution, potential toxicity and speciation of sediment from Algeciras Bay (South of Spain) using chemometric tools. *J Hazard Mater* 190, 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.020>.
- Folk RL. 1968. Petrology of sedimentary rock. Hemphill Publishing Co. Austin, TX, U.S.A., 170.
- 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. *J Kor Fish Soc* 39, 106-117.
- Hwang DW and Kim SG. 2011. Evaluation of heavy metal contamination in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jellanam province using geochemical assessment techniques. *Korean J Fish Aquat Sci* 44, 772-784. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2011.0772>.
- Hwang DW, Lee IS, Choi MG, Kim CS and Kim HC. 2015a. 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. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0542>.
- Hwang DW, Lee IS, Choi MG, Kim and Shim JH. 2015b. Distribution of Organic Matter and Trace Metal Concentrations in Surface Sediments around the Hansan-Geoje Bay. *J Korean Soc Environ Analy* 18, 131-143.
- 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. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2011.0759>.
- Jeong YH, Kim YT, Kim KH, Kim SY, Kim BH and Yang JS. 2006. Mass Balance of Salts, DIP, DIN and DON in the Gomso Tidal Flat. *J Korean Soc Oceanogr* 11, 68-81.
- JFRCA (Japan Fisheries Resources Conservation Association). 1983. Water quality criteria for the protection of aquatic living resources. JFRCA, Tokyo, Japan, 29.
- KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Administration). 2012. 2011 Technical reports of oceanographic research. KHOA, Incheon, Korea, 527.
- Kim JS, Yang WH, Han SH and Kim HS. 2006. A Short Seismic Reflection Survey for Delineating the Basement and the Upper Units of the Gomso Bay, Yellow Sea. *J Eng Geol* 16, 161-169.
- Kim PJ, Shon SG, Park SY, Kim SS, Jang SJ, Jeon SB and Ju JS. 2012. Biogeochemistry of Metal and Nonmetal Elements in the Surface Sediment of the Gamak Bay. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 18, 67-83. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2012.18.2.067>.
- Kodama K, Lee JH, Oyama M, Shiraishi H and Horiguchi T. 2012. Disturbance of benthic macrofauna in relation to hypoxia and organic enrichment in a eutrophic coastal bay. *Mar environ res* 76, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2011.08.007>.
- Lee YH. 2006. Tidal Flats and Their Resident Life: The Case of Garolim Bay, Gomso Bay, Youngwang Tidal Flat. *J Kor Associ Regi Geo* 12, 339-351.
- Lee YW, Park MO, Yoon JH and Hur SB. 2012. Temporal and Spatial Variation of Microalgal Biomass and Community Structure in Seawater and Surface Sediment of the Gomso Bay as Determined by Chemotaxonomic Analysis. *The Kor Soc of Ocean* 17, 87-94. <https://doi.org/10.7850/jkso.2012.17.2.087>.
- Lim DI, Choi JW, Shin HH, Jeong DH and Jung HS. 2013. Toxicological impact assessment of heavy metal contamination on macrobenthic communities in southern coastal sediments of Korea. *Mar Poll Bull* 73, 362-368. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.05.037>.

- Llansó RJ. 1992. Effects of hypoxia on estuarine benthos: the lower Rappahannock River (Chesapeake Bay), a case study. *Est Coastal Shelf Sci* 35, 491-515. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(05\)80027-7](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(05)80027-7).
- MEV (Ministry of Environment). 2011. Development of riparian groundwater management system for ecosystem conservation. MEV, Gwacheon, Korea, 266.
- MIFAFF (Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2008. Report on water quality status in farming areas of Korea in 2008. MIFAFF, Busan, Korea, 1-243.
- MIFAFF (Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2009. Report on water quality status in farming areas of Korea in 2009. MIFAFF, Busan, Korea, 1-443.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). 2010. Standard Method of Oceanic Environment. MLTM, Busan, Korea, 495.
- MLTM (Ministry of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2011. Basic Survey of Coastal Wetland(2010). MLTM, Busan, Korea, 278.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2017. Ministry of Oceans and Fisheries. Retrieved from <http://m.mof.go.kr/article/view> on Oct 14.
- Muller PJ. 1977. C/N ratio in Pacific deep-sea sediments: effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 765-776.
- Muller G. 1979. Schwermetalle in den sediments des Rheins-Veränderungen Seit. *Umschau* 79, 778-783.
- NGI (National Geography Institute). 1981. Basic research report on nearshore environments of Korea (Seokpo). NGI, Incheon, Korea, 56.
- Noh IH, Yoon YH, Kim DI and Park JS. 2006. The Spatio-temporal Distribution of Organic Matter on the Surface Sediment and Its Origin in Gamak Bay, Korea. *J Korean Soc Mar Environ Eng* 9, 1-13.
- Oh HK and Rho JH. 2013. Distribution Characteristics of Halophytes Resource in Wetland Protected Area at the Gomso Bay. *J Kor Forest Res Ins* 17, 127-140.
- Park BK and Lee KS. 1994. Stable Isotopic Compositions of Foraminifera of the Tidal Flat in the Gomso Bay of the Western Coast of Korea. *J Korean Soc Oceanogr* 29, 183-187.
- Park KJ, Kim SK, Kang DY and Song JH. 2015. Oil spil Hebei spirit and Change of Manila Calm, Ruditapes philippinarum beds in the West coast of Korea. *Korean J Malacol* 31, 213-220. <http://dx.doi.org/10.9710/kjm.2015.31.3.213>.
- Ra KT, Kim ES, Kim JK, Kim KT, Lee JM and Kim EY. 2013. Distribution and Pollution Assessment of trace metals in core sediments from the artificial lake shihwa, Korea. *Ocean and Polar Res* 35, 69-83. <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2013.35.2.069>.
- Ralph PJ and Burchett MD. 1998. Photosynthetic response of *Halophila ovalis* to heavy metal stress. *Environ pollut* 103, 91-101. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00121-3).
- Ruy SO, Kim JY and Chang JH. 2001. Distribution of Surface Sediments and Sedimentation Rates on the Tidal Flat of Muan Bay, Southwestern Coast. *J Kor Earth Sci Soc* 22, 30-39.
- Sheykhi V and Moore F., Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor river, southwest Iran. *Env Moni Assess* 185, 3219-3232. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2785-8>.
- Shon CS. 2001. Depositional characteristics in the bay-middle area of the gomso-bay tidal flat, southwestern coast of Korea. Master's thesis. National University, Yeosu, Korea, 5-12.
- Sinex SA and Helz GR. 1981. Regional geochemistry of trace element in Chesapeake Bay sediments. *Environ Geol* 3, 315-323. <https://doi.org/10.1007/BF02473521>.
- Taylor SR. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table. *Geochim Cosmochim Acta* 28, 1273-1285. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(64\)90129-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90129-2).
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev Geophys* 33, 241-265. <https://doi.org/10.1029/95RG00262>.
- 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. *Helgol Meeresunters* 33, 566. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>.
- Woo HJ, Chang JH and Han SJ. 1995. Characteristics of Recent foraminifera and surface sediments in Gomso-Bay tidal flat, West Coast of Korea; potential for paleoenvironmental interpretation. *J Korean Soc Ocean* 30, 184-196.
- Yang JS and Kim YT. 2002. The Distribution of phosphorus in the Gomso Bay Tidal Flat. *J Korean Soc Oceanogr* 7, 171-180.
- Yoon YH. 2003. Spatio-temporal distribution of organic matters in surface sediments and its origin in Deukryang Bay. *J Korean Environ Sci soci* 12, 735-744.
- Zhang HN, Yuan XZ, Zeng GM, Jiang M, Liang J, Zhang C, Yin J, Huang HJ, Liu ZF and Jiang HW. 2012. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index. *Trans Nonferrous Met Soc China* 22, 1470-1477. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61343-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61343-5).
- Zhang J and Liu CL. 2002. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China- weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuar Coast Shelf Sic* 54, 1051-1070. <https://doi.org/10.1006/eess.2001.0879>.
- Zhang W, Feng H, Chang J, Qu J, Xie H and Yu L. 2009. Heavy metal contamination in surface sediment of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes. *Environ Pollut* 157, 1533-1543. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2009.01.007>.