

한국 서해 경기만 영흥도 주변 해역의 수질 및 표층 퇴적물 특성

원중호¹ · 이용우^{2,†} · 박미옥³ · 선철인⁴

¹해양환경공단 해양수질팀 대리

²해양환경공단 교육개발팀 차장

³해양환경공단 해양수질팀 과장

⁴해양환경공단 해양수질팀 대리

Characteristics of Seawater Quality and Surface Sediments around Youngheung Island in Gyeonggi Bay, the Western Coast of Korea

Jong-Ho Won¹, Yong-Woo Lee^{2,†}, Mi-Ok Park³, and Chul-In Sun⁴

¹Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

²Senior Researcher, Education Planning Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

³Senior Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

⁴Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

요 약

본 연구에서는 경기만 영흥도 서부해역을 중심으로 하계와 동계에 해수 환경 특성과 퇴적물의 중금속 오염도를 평가하였다. 하계에 영흥도 북동해역에서 나타나는 고온·저염의 수괴가 영흥도 서부연안을 따라 유입되는 현상이 뚜렷하게 나타났다. 고온·저염 수괴의 유입과 함께 영양염과 엽록소(chlorophyll *a*) 농도가 높게 나타났다. 해수 수질(WQI: Water Quality Index)은 영흥도 북동해역의 정점(동계: II등급)을 제외하고 모든 정점에서 I등급에 해당하며, 표층 퇴적물의 중금속(Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb) 농도는 국내 해양환경기준과 비교했을 때 주의기준(TEL) 이하로 평가되었다. 농집지수(I_{geo}), 오염부하량지수(PLI), 생태계위해도지수(ERI)를 이용하여 퇴적물의 중금속 오염도 및 위해도를 평가한 결과, 대부분의 정점에서 저서생물에 영향을 주지 않는 농도 수준으로 영흥도 서부해역의 해수 수질과 표층 퇴적물의 중금속 오염 상태는 양호한 것으로 해석된다.

Abstract – The characteristics of the seawater environment and the degree of heavy metal pollution of surface sediments in the western region of Youngheung Island in Gyeonggi Bay were investigated during summer and winter seasons. During the summer season, water masses with high temperature and low salinity that appear in the north-eastern area of the island were found to be heading towards the south alongside the western coast. With the inflow of these water masses, the concentrations of dissolved inorganic nutrients and chlorophyll *a* increased. The quality of seawater (WQI: Water Quality Index) was excellent (I grade: very good) at every station except for one station (II grade: good, during the winter season) in the northeastern area of the island. The heavy metal concentrations (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, and Pb) of surface sediments were below than lower criteria (TEL: Threshold Effects Level) in Korean sediment quality guidelines. The heavy metal pollution degree and ecological risk assessment of sediments by using geo-accumulation index (I_{geo}), pollution load index (PLI), and ecological risk index (ERI) showed no significant impact on benthic organisms. This study shows that the seawater quality and the heavy metal of surface sediments in the western region of Youngheung Island are good condition.

Keywords: Youngheung Island(영흥도), Water quality(수질), Surface sediment(표층 퇴적물), Heavy metal(중금속), Pollution(오염)

[†]Corresponding author: wbluesea@koem.or.kr

1. 서 론

서해 경기만에는 크고 작은 유인·무인도서가 산재해 있으며, 조차가 커 넓은 갯벌이 발달하고 있다. 해저지형은 남-북, 남서-북동 방향으로 흐르는 강한 조류로 인하여 수로를 따라 깊은 골이 형성되어 있다(Incheon Metropolitan City[2013]). 영흥도 주변 갯벌 해역에는 바지락 등 패류 양식이 넓게 발달하고 있으나 최근 간척사업 및 영흥화력발전소의 영향으로 환경오염 및 생태계 변화가 나타나고 있다(Kim *et al.*[2013]). 또한 북동쪽 7 km 거리에 시화호가 위치하고 있어 시화호 조력발전소 가동 및 방류구를 통해 유출된 오염물질의 영향이 미칠 우려가 있으며, 육상으로부터 인천 연안으로 강, 하천 등을 통해서 유출된 오염물질은 영흥도 주변 해역까지 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*[2005]).

시화호는 1985년 담수화 계획이 확정됨에 따라 시화호 방조제 공사가 1994년 완료 되었으나, 인근 공업단지로부터 대규모 오염물질의 유입으로 수질이 악화되었다. 이에 1996년부터 시화호 담수 일부를 방류하기 시작하였으며, 시화호 조력발전소는 2004년 공사를 시작하여 2011년에 완공되었다. 시화호 조력발전소의 운영에 따라 배수시 시화호 외측에서는 체류시간의 변화가 발생하고 이에 따라 해수의 수평 혼합이 더욱 활발해 질 것으로 예상된다(Bae *et al.*[2017]). 시화호 조력발전소 가동에 따른 시화호 내·외측 해역의 수질을 평

가한 결과, 시화호 내측 해수의 방류에 의한 외측 해역의 수질에 미치는 영향은 미비하나, 시화호 내측은 여름철 집중 강우에 의해 수질이 악화되고 있는 것으로 나타났다(Ra *et al.*[2013]).

영흥도 서남연안에는 영흥화력발전소가 1999년에 착공되어 2004년에 1, 2기가 준공되었으며, 현재 6호기까지 가동중이며, 매년 54억톤의 온배수를 배출하고 있다. 2004-2005년 영흥도 주변 해역에서 영흥화력발전소 온배수 영향 정밀조사 및 모델링 결과에 따르면 1~4호기 가동시에 전 계절 초과 수온 1°C의 최대 확산범위는 북측으로 7.0 km, 남측으로는 5.1 km이며, 최대 확산면적은 23.7 km²인 것으로 나타났다(KOEN[2006])(Fig. 1).

Kang *et al.*[2016]은 영흥도 동부해역의 조간대 갯벌에서 저서 먹이망 구조에 대한 연구를 실시하였으며, Kang *et al.*[2017]은 영흥도 동부해역과 북부해역을 중심으로 수질과 퇴적환경을 조사하여 어장관리해역 해제 및 변경 타당성 평가를 실시하였다. 서해안 지역에서 바지락 폐사가 지속적으로 발생하고 있으며, 영흥도 주변 해역도 바지락, 굴 폐사 뿐만 아니라 다시마 등의 해조류의 수확량도 계속적으로 감소하고 있다(NFRDI[2009]). 이러한 생물들의 폐사 원인 규명을 위한 연구들이 진행되고 있으나, 폐사의 직접적인 원인을 파악하는데 어려움이 있으며, 영흥도 주변 해역에서 해양환경변화 양상 등을 조사한 자료 또한 매우 부족한 실정이다(Kim *et al.*[2013]; Ongjin-gun[2008]; Ongjin-gun[2015]).

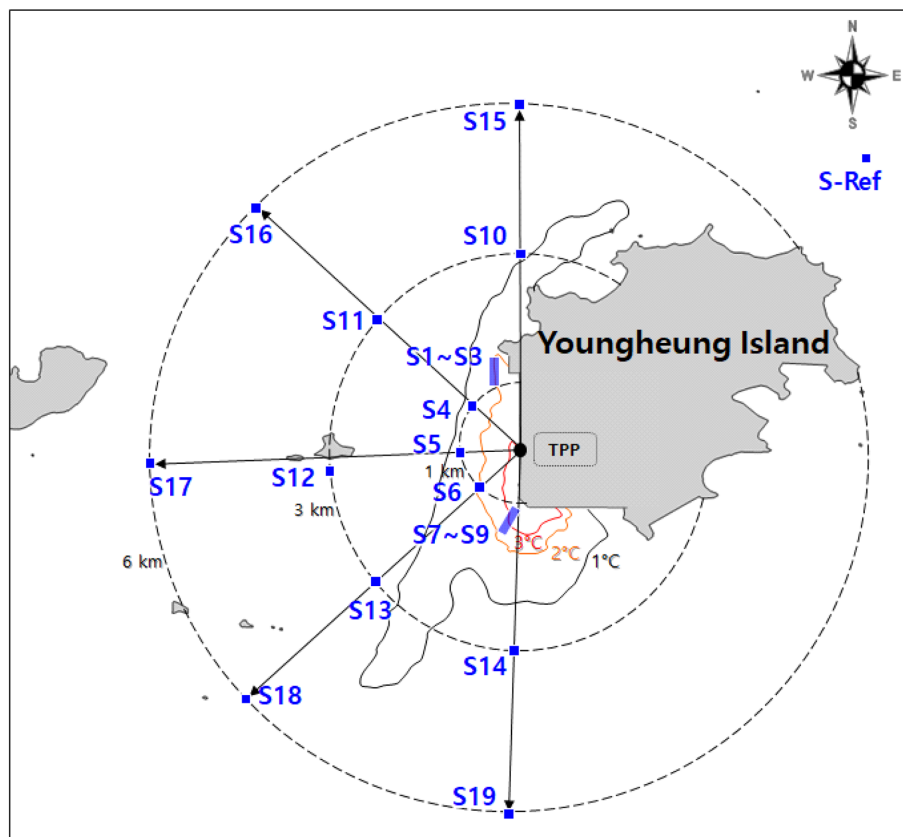


Fig. 1. A map showing the sampling locations around Youngheung Island. The solid lines indicate the annual maximum excess temperature (°C) extent of hot waste water discharged from the thermoelectric power plant (TPP) in surface layer (KOEN[2006]).

본 연구에서는 영흥도 서부해역을 중심으로 하계와 동계에 해양 환경 주요 인자들의 분포 특성을 파악하고 해수 수질 및 표층 퇴적물의 중금속 오염도를 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 현장조사

영흥도 주변 해역에서 해양환경을 대표하는 주요 인자들의 분포 특성을 살펴보기 위해 해양환경공단 소속의 아라미1호를 이용하여 2017년 7월(하계)과 2018년 1월(동계)에 각각 1회 현장조사 및 시료를 채취하였다. 해수 시료는 16개 정점에서 로켓 샘플러를 이용하여 채취하였으며, 표층 퇴적물(상부 2 cm) 시료는 20개 정점에서 van Veen 그림을 이용하여 채취하였다(Fig. 1).

2.2 분석방법

수온과 염분은 CTD(SBE 19plus V2, Sea-Bird Electronics, USA)를 이용하여 측정하였고, 수소이온농도(pH)는 채수시 기포가 발생하지 않도록 시료병에 옮겨 담은 후 pH meter(Orion Star A329, Thermo Scientific, USA)로 현장에서 측정하였다. 해수 중 용존산소(DO)는 윙클러-아지드화나트륨 적정법으로 측정하였으며, 투명도는 지름 30 cm 백색 원판(Secchi disk)을 이용하여 측정하였다.

영양염(NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , $\text{Si}(\text{OH})_4$) 분석을 위해서 해수 시료는 GF/F 여과지로 여과한 후, 여과된 해수 100 mL를 채취하여 분석 전까지 냉동 보관하였다. 암모늄(NH_4^+) 측정을 위한 시료는 여과 과정에서 오염을 최소화하기 위해서 여과를 하지 않은 원수를 취하여 즉시 냉동 보관하였다. 영양염 농도는 영양염자동분석기(QuAatro, Seal Analytical GmbH, Germany)를 이용하여 분석하였다.

해수 중 chlorophyll *a* 농도는 해수를 여과하기 전에 330 μm mesh로 동물플랑크톤을 제거한 후 membrane 여과지(공경 0.45 μm)를 이용하여 여과하고 여과지는 90% 아세톤으로 추출한 후 형광광도계(10-AU, Turner Designs, USA)로 측정하였다.

표층 퇴적물 내 입도는 Ingram[1971]의 표준입도분석 방법에 따라 분석하였다. 표층 퇴적물 시료는 과산화수소(H_2O_2)와 염산(HCl)을 이용하여 유기물과 탄산염을 제거한 후 습식체질에 의해 조립질과 세립질로 분리하였다. 40 이하의 조립질 시료는 sieve shaker를 이용하여 체질한 후 입도별(10 간격) 무게 백분율을 구하였고, 40 이상의 세립질 퇴적물은 약 2 g을 취한 후 자동입도분석기(Sedigraph III 5120, Micromeritics, USA)를 이용하여 측정하였다.

표층 퇴적물 중 총유기탄소(TOC)는 동결건조된 시료를 분말화한 다음 1 M 염산으로 전처리한 후 CHN analyzer(Thermo FLASH 2000 Series, Thermo Scientific, USA)를 이용하여 측정하였다.

표층 퇴적물 내 중금속의 농도 분석은 균질화된 시료 약 0.2 g에 혼합산($\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{HClO}_4 = 2:2:1$)을 가하여 완전히 가열 분해한 다음 증발·건조하고, 1% HNO_3 용액으로 재용해 하였다. 산분해를 통해 얻어진 용액 중 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Li의 농도는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, NexION 300D, PerkinElmer

Inc., USA)를 이용하였고, Hg의 농도는 균질화된 시료를 전처리 없이 자동수은분석기(Direct Mercury Analyzer, DMA-80, Milestone S&T Co., Italy)를 이용하여 분석하였다. 분석자료의 신뢰성을 확보하기 위해서 인증표준물질인 MESS-4(marine sediment reference material, National Research Council Canada)를 시료와 함께 분석하였다. 각 원소별 회수율은 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb, Li에 대해서 각각 평균 $84\pm4\%$, $92\pm3\%$, $89\pm4\%$, $87\pm2\%$, $96\pm3\%$, $90\pm4\%$, $97\pm3\%$, $93\pm3\%$, $85\pm4\%$ 이다.

2.3 해수 수질 및 퇴적물 중금속 오염도 평가

해수 수질은 해양환경기준 생태기반 해수 수질 기준에 의거(해양수산부 고시 2018-10호)하여 5등급으로 평가하였다(수질평가 항목: 저층산소포화도, 투명도, 표층 식물플랑크톤 농도, 표층 용존무기질소(DIN) 농도, 표층 용존무기인(DIP) 농도).

표층 퇴적물의 중금속 오염도 평가는 농축인자(EF: enrichment factor, I_{geo} : geo-accumulation index)와 오염부하량 지수(PLI: pollution load index)를 이용하였고, 중금속의 생태위해성 평가는 국내 해양환경기준(해양수산부 고시 2018-10호)과 생태계위해도지수(ERI: ecological risk index)를 활용하였다.

EF는 퇴적물 내 금속원소의 기원과 인위적 오염도를 평가하는 방법으로 보존성 원소인 Li를 이용하여 아래와 같이 계산하였다(Zhang and Liu[2002]).

$$EF = (C_i/Li)_{\text{sample}} / (C_i/Li)_{\text{background}} \quad (1)$$

$(C_i/Li)_{\text{sample}}$ 는 시료 중 Li에 대한 각 금속원소의 농도, $(C_i/Li)_{\text{background}}$ 는 Li에 대한 각 금속원소의 배경농도를 나타낸다. 각 중금속에 대한 배경농도는 Woo *et al.*[2019]에 의해서 입도 지시자 Li으로 표준화된 한반도 연안 퇴적물의 중금속 배경농도(Cr: 46.1 mg kg^{-1} , Ni: 20 mg kg^{-1} , Cu: 14.7 mg kg^{-1} , Zn: 69.8 mg kg^{-1} , As: 7.4 mg kg^{-1} , Cd: 0.134 mg kg^{-1} , Hg: 0.0159 mg kg^{-1} , Pb: 25.2 mg kg^{-1})를 이용하였다.

I_{geo} 는 퇴적물 내 중금속 오염도를 총 7단계로 구분하여 평가하는 방법이다(Muller[1981]).

$$I_{\text{geo}} = \log(C_i/1.5C_b) \quad (2)$$

여기서 C_i 는 시료 내 측정된 각 중금속의 농도, C_b 는 각 중금속의 배경농도를 나타내며, 상수 1.5는 서로 다른 지각에서 존재하는 중금속의 배경농도를 보정하기 위해 사용되었다(Ghani *et al.*[2013]).

퇴적물 내 중금속에 대한 전체적인 오염도를 평가하기 위해 PLI 방법을 이용하였으며, 다음의 식 (3)으로 계산하였다(Tomlinson *et al.*[1980]).

$$PLI = \sqrt[n]{(CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)} \quad (3)$$

여기서 $CF(C_{\text{metal}}/B_{\text{metal}})$ 는 각 중금속의 배경농도(B_{metal})에 대한 시료의 중금속 농도(C_{metal}) 비, n 은 시료의 총 수를 나타낸다.

각 금속원소의 독성계수(toxic coefficient)를 이용하여 퇴적물 내

모든 중금속 농도에 대한 저서생물의 위해도를 ERI 방법으로 평가하였다(Hakanson[1980]).

$$E_i = T_{\text{metal}} \times CF \quad (4)$$

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

여기서 CF는 식 (3)의 CF와 동일하며, T_{metal} 은 각 중금속의 독성 계수, n 은 분석된 중금속 시료의 개수이다. 생태독성계수는 널리 사용되고 있는 8종(Cr: 2, Ni: 5, Cu: 5, Zn: 1, As: 10, Cd: 30, Hg: 40, Pb: 5)의 중금속에 대해서 적용하였다(Koo *et al.*[2019]; Lim *et al.*[2013]; Sheykhi and Moore[2013]).

3. 결과 및 고찰

3.1 해양환경 인자의 분포 특성

영흥도 주변 해역(대조구 정점 제외)에서 하계(7월)와 동계(1월)에 표층 수온은 각각 21.29~23.85°C(평균 22.85±0.74°C), 1.60~3.46°C

(평균 2.59±0.44°C) 범위로 동계보다 하계에 평균 약 9배 높았다(Table 1, Fig. 2). 표층 염분은 하계와 동계에 각각 29.35~31.22(평균 30.58±0.50), 31.61~31.74(평균 31.70±0.04)의 범위에서 변화였고, 하계보다 동계에 평균 약 1.12 높았다.

표층수의 분포 양상을 살펴보면 하계에 영흥도 북동해역에 나타난 고온·저염의 수괴가 영흥도 서부연안을 따라서 유입되는 양상이 뚜렷하게 나타났다(Figs. 2, 3). 영흥도 북동해역(대조구 정점, 염분 29.81)에 비해 영흥도 서부연안에 위치한 정점 4(염분 29.35)에서 염분이 상대적으로 낮은 값을 보여 주변 육상으로부터 담수의 유입이 있는 것으로 판단된다. 동계에는 하계에 비해 정점간 염분의 변화가 적으며, 영흥도의 북동해역(대조구 정점)에서 상대적으로 낮게 나타났다(Figs. 4, 5). 하계에는 표층수와 저층수 모두에서 수온과 염분 사이에 매우 양호한 음의 상관관계($r^2=0.7$)를 보이는 반면, 동계에는 정점간 염분의 변화가 적어 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다(Figs. 4, 5).

하계에 표층수의 pH와 DO 농도는 각각 8.03~8.10(평균 8.07±0.02)와 7.24~7.71 mg L⁻¹(평균 7.48±0.14 mg L⁻¹) 범위이며, 표층수와 비교하여 저층수에서 pH와 DO 농도는 염분과 좋은 양의 상

Table 1. Maximum, minimum, and average contents of temperature, salinity, pH, DO, DIN, DIP, Si(OH)₄, and chlorophyll *a* in surface seawater of Youngheung Island. Seawater samples were not collected at stations 1, 3, 7, and 9

Sampling	St.	Depth	Temperature (°C)	Salinity	pH	DO (mg L ⁻¹)	DIN (μg L ⁻¹)	DIP (μg L ⁻¹)	Si(OH) ₄ (μg L ⁻¹)	Chl <i>a</i> (μg L ⁻¹)
Jul. 2017	1-19 (n=15)	Surface	21.29-23.85 (22.85±0.74)	29.35-31.22 (30.58±0.50)	8.03-8.10 (8.07±0.02)	7.24-7.71 (7.48±0.14)	105-208 (145±27)	18.6-23.6 (21.2±1.3)	238-504 (357±73)	0.95-1.82 (1.27±0.29)
		Bottom	20.96-22.87 (21.91±0.57)	30.68-31.33 (31.05±0.19)	8.05-8.12 (8.09±0.02)	7.28-7.78 (7.53±0.13)	97-151 (122±18)	16.7-21.1 (18.6±1.4)	213-367 (295±51)	0.86-1.26 (1.07±0.13)
	Ref.	Surface	23.85	29.81	8.05	6.96	246	27.8	528	2.16
		Bottom	23.14	30.49	8.06	7.11	182	21.7	419	1.22
Jan. 2018	1-19 (n=15)	Surface	1.60-3.46 (2.59±0.44)	31.61-31.74 (31.70±0.04)	8.12-8.18 (8.17±0.02)	10.47-11.20 (10.87±0.25)	127-340 (177±67)	29.2-32.6 (30.5±1.0)	390-439 (405±12)	0.68-0.93 (0.79±0.07)
		Bottom	1.29-3.04 (2.41±0.49)	31.20-31.99 (31.69±0.16)	8.08-8.18 (8.16±0.03)	10.68-11.17 (10.95±0.14)	141-1696 (279±394)	25.0-31.0 (28.9±1.4)	361-432 (401±15)	0.64-1.05 (0.88±0.11)
	Ref.	Surface	0.37	31.43	8.12	12.01	410	35.3	449	1.07
		Bottom	0.27	31.32	8.15	11.7	490	33.8	446	1.01

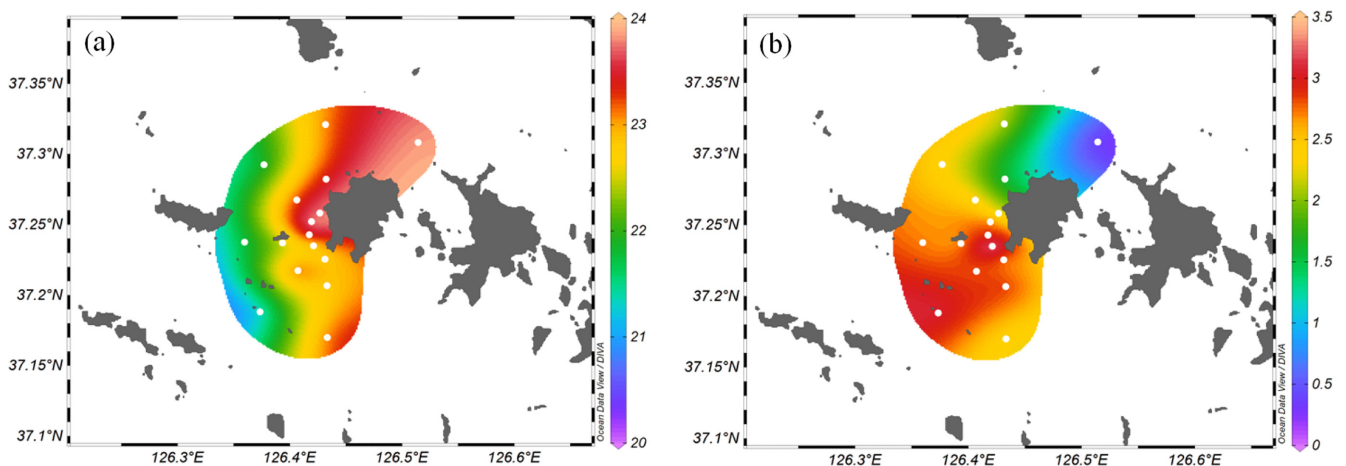


Fig. 2. The horizontal distributions of seasurface temperature around Youngheung Island during (a) summer and (b) winter seasons, respectively.

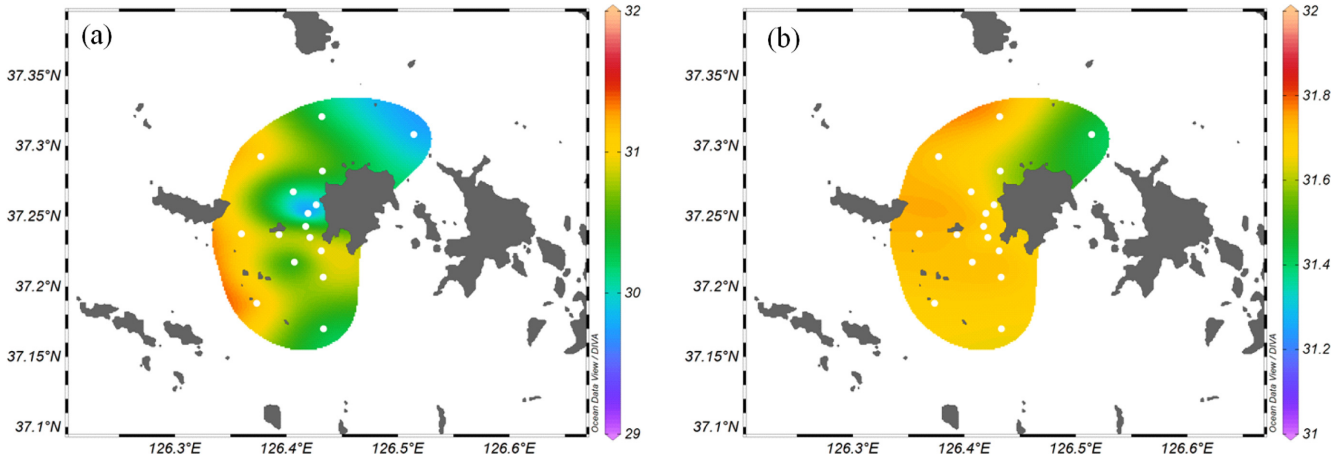


Fig. 3. The horizontal distributions of seafloor salinity around Youngheung Island during (a) summer and (b) winter seasons, respectively.

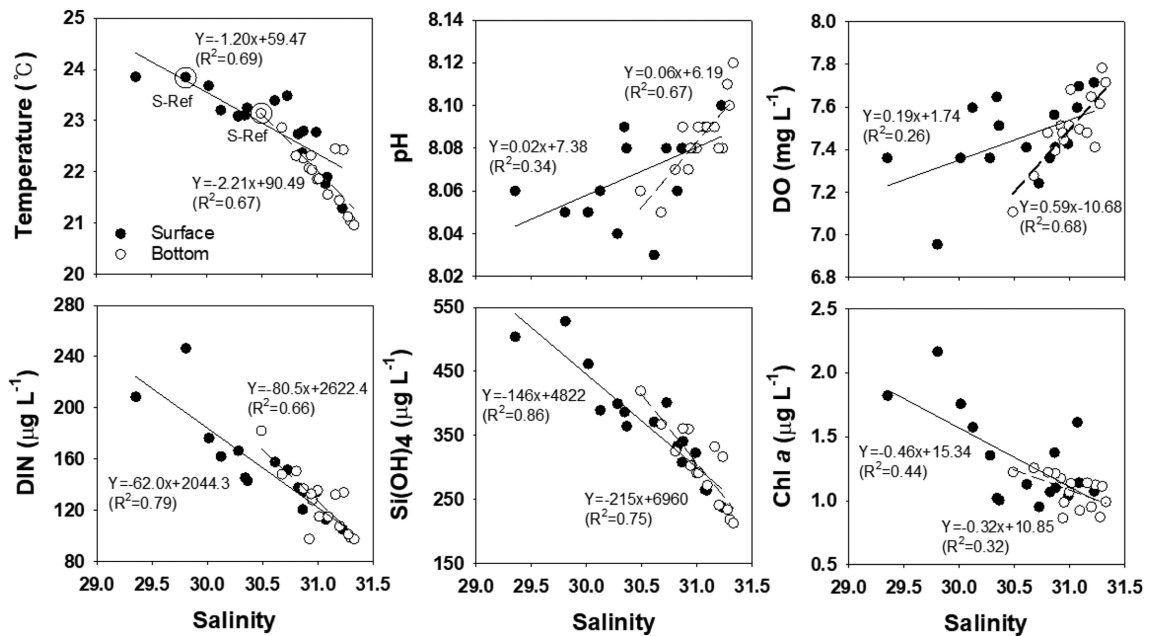


Fig. 4. Plots of salinity versus environmental parameters (temperature, pH, DO, DIN, Si(OH)₄, and chlorophyll *a*) in surface and bottom seawater around Youngheung Island during summer season.

관관계를 보인다(Fig. 4). 동계에 표층수의 pH와 DO 농도는 각각 평균 8.17 ± 0.02 와 10.87 ± 0.25 mg L⁻¹로 하계보다 상대적으로 높았다. 하계와 동계에 표층수의 DO 포화도는 각각 평균 103%, 99%로 하계에 활발한 식물플랑크톤의 광합성으로 인해 과포화 상태였다(Cole *et al.*[1992]). 저층수 중 DO 농도는 수온 변화에 의한 기체 포화도 차이로 DO 농도의 분포가 조절되고 DO 농도의 변화에 따라 pH가 영향을 받은 것으로 해석된다. 반면 표층수의 pH와 DO 농도는 수온 및 염분과 낮은 상관성을 보인다(Fig. 4). 이는 식물플랑크톤의 광합성 과정에서 생성된 산소가 표층수 중 DO 농도 분포에 반영되어 나타난 현상으로 해석된다. 반면, 동계에는 pH와 DO 농도 사이에는 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았다(Fig. 5).

3.2 영양염과 chlorophyll *a*의 분포 특성

영흥도 주변 해역에서 하계와 동계에 DIN(NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺의 합), DIP(PO₄³⁻) 그리고 DSi(Si(OH)₄) 농도의 분포 특성을 조사하였다(Figs. 4, 5). 하계 표층수에서 DIN, DIP, DSi 농도는 염분과 좋은 음의 상관관계를 보이며, 이는 영양염이 주로 육상 담수 기원임을 지시한다(Fig. 4)(Lee and Kim[2007]). 또한 표층수의 염분과 chlorophyll *a* 농도 사이에도 좋은 음의 상관관계를 보이는 바, 하계에 담수의 유입시 공급된 영양염에 의해 식물플랑크톤의 광합성도 활발하게 이루어진 것으로 해석된다. 따라서 하계에는 한강 유출수와 시화호 방류수, 인천 연안으로부터 유입된 염분이 낮고 영양염이 풍부한 수괴가 영흥도 주변 해역까지 영향을 미치는 것으로 판단된다. 반면 동계에는 이들 사이에 뚜렷한 상관성을 보이지 않는다

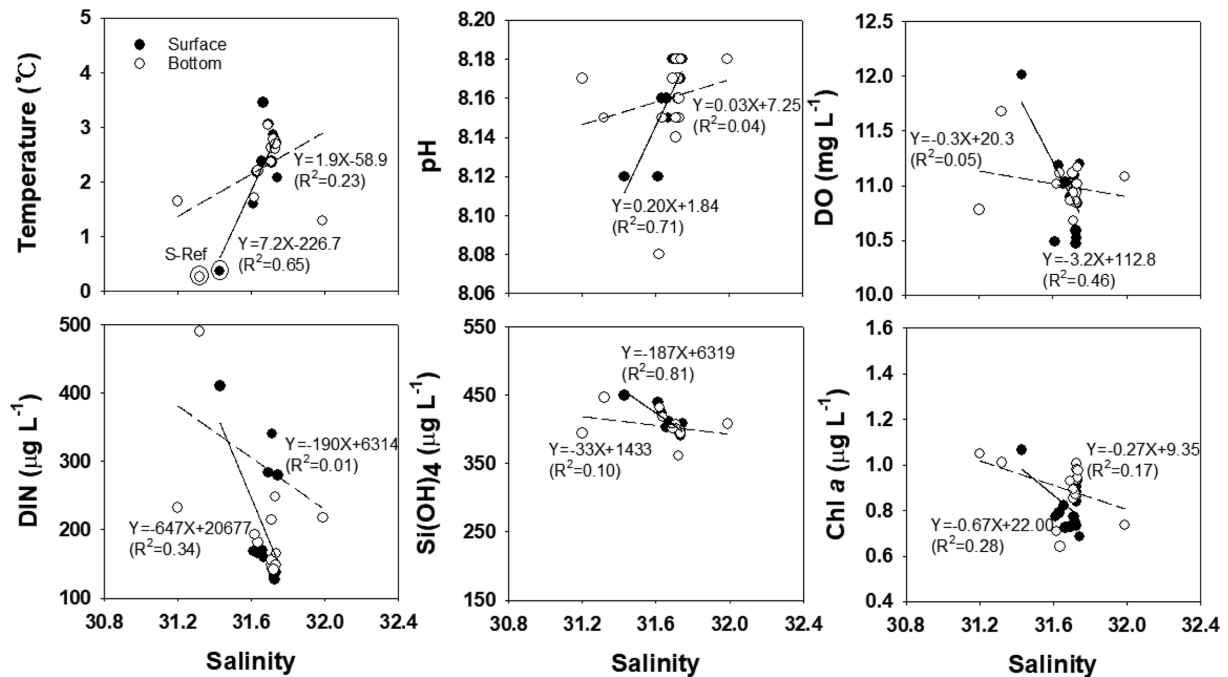


Fig. 5. Plots of salinity versus environmental parameters (temperature, pH, DO, DIN, Si(OH)₄, and chlorophyll *a*) in surface and bottom seawater around Youngheung Island during winter season.

(Fig. 5). 표층수와 저층수간 농도 차이는 동계에 비해 하계에 상대적으로 크게 나타났으며, 하계에는 저층수에 비해 표층수에서 영양염 농도가 상대적으로 높다. 계절별 해수 중 영양염 농도는 하계에 비해 동계에 상대적으로 높다(Table 1). 동계에 영흥도 북동해역(대조구 정점)에서 상대적으로 낮은 염분을 보였으며(Fig. 5), 이는 주로 인천 연안으로 유입된 담수의 영향인 것으로 판단된다. 또한 동계에 표·저층간 염분 차이가 상대적으로 작다. 따라서 본 연구해역에서 동계에 표층수 중 높은 영양염은 인천 연안으로부터 유입된 영양염과 활발한 수직혼합에 의한 저층으로부터 공급된 영양염에 의한 것으로 추측된다(Fig. 5). DIN/DIP 몰농도 비는 동계(13.7)에 비해 하계(15.3)에 상대적으로 높았으며, 동계에 정점별로 편차(5.72)가 크게 나타났다. 표층수 중 평균 chlorophyll *a* 농도는 동계(평균 0.79 ± 0.07 mg L⁻¹)에 비해 하계(평균 1.27 ± 0.29 mg L⁻¹)에 상대적으로 높게 나타났다.

3.3 해수 중 수질 평가 결과

국내 연안에서 수질 평가를 위해 Lim *et al.*[2011]은 통계적 접근방법으로 수질성분(COD, DIN, DIP, chlorophyll *a*)들의 해역별 농도 특성을 근거로 등급화를 시도하였으며, Rho *et al.*[2012]은 해역별 환경특성을 고려하여 개별 평가항목들을 하나의 지수로 표현할 수 있는 수질지수를 개발하였다. 본 연구에서는 Rho *et al.*[2012]의 연구결과를 바탕으로 설정된 생태기반 해수 수질평가 지수(해양수산부 고시 2018-10호)를 이용하여 영흥도 주변 해역의 수질을 평가하였다.

수질평가 결과 동계에 영흥도 북동쪽에 위치한 대조구 정점(II등

급: 좋음)을 제외하고 하계와 동계 모든 정점에서 수질 I등급(매우 좋음) 수준이었다. 하계에는 수질평가 항목들의 점수가 모두 1점으로 총 평가점수가 20점이었으며, 동계에도 대부분의 정점에서 모든 항목이 1점으로 매우 양호한 수준이었으나 일부 정점에서 DIP의 농도가 2점과 3점으로 나타났다. 동계에 수질 II등급으로 나타난 대조구 정점에서 DIP 농도가 $35.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 3점(기준: $>33 \mu\text{g L}^{-1}$, $<37.5 \mu\text{g L}^{-1}$)으로 나타났다. 대조구를 제외한 영흥도 주변 해역의 동계에 DIP 평균 농도는 $30.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이었다(Table 1). 영흥도 주변 해역의 수질은 대체로 양호한 것으로 나타났으나 인천 연안 및 시화호부터 방류되는 유출수의 영향을 직간접적으로 받고 있는 것으로 판단된다. 영흥도 주변 해역에 대한 관리를 위해서는 육상으로부터 유입되는 오염물질에 대한 지속적인 관찰이 필요할 것으로 판단된다.

3.4 표층 퇴적물 분포 특성

영흥도 서부해역에서 표층 퇴적물의 입도를 분석한 결과, 하계와 동계 모두 모래의 함량이 각각 평균 57.0%, 59.4%로 가장 높았으며, 실트(평균 21.2%, 23.7%), 자갈(평균 11.7%, 7.3%)과 점토(평균 10.1%, 9.5%) 순이었다(Fig. 6). TOC 함량은 0.0~0.64%(평균 0.23%) 범위이며, 영흥도 남쪽 연안에서 상대적으로 높고, 남서쪽 외곽에 위치한 정점들에서 낮다. 하계에는 평균 입도와 TOC 농도 사이에 유의한 상관관계를 보이지 않았다($p > 0.05$, $r = 0.38$)(Table 2). 동계에 표층 퇴적물의 TOC 농도는 0.05~0.54%(평균 0.21%) 범위에 분포하였으며, 영흥도 남쪽 외곽에서 상대적으로 높은 함량을 보였다. 동계에 입도와 TOC 농도 사이의 상관계수는 하계에 비해 상대적으로 높게 나타났다($p < 0.01$, $r = 0.62$)(Table 2). 하계와 동계에 TOC 농도는 큰

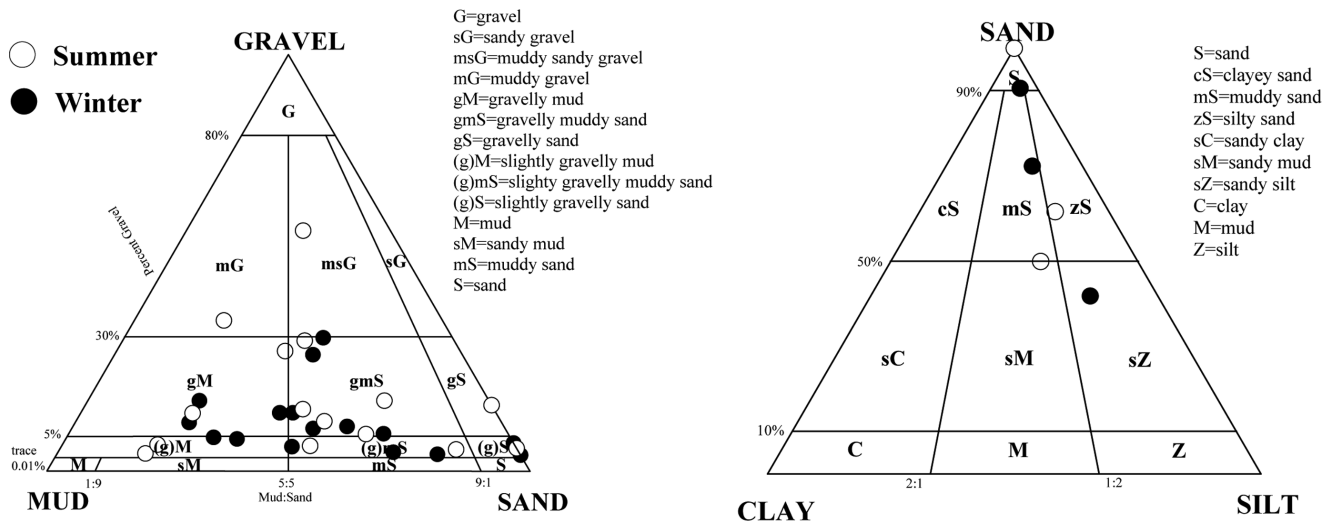


Fig. 6. The ternary diagrams showing the major sediment type of surface sediments around Youngheung Island.

차이를 보이지 않았으며, Kim *et al.*[2013]에 의해 2011년에 영흥도 주변 해역에서 조사했던 결과(평균 0.26%)와 유사하였다.

3.5 중금속 분포 특성 및 생태계 위해성 평가

표층 퇴적물의 중금속 농도를 측정하기 위하여 하계와 동계에 각각 조사를 실시하였으며, 표층 퇴적물의 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb 농도는 각각 3.01~62.91 mg kg⁻¹, 1.20~25.24 mg kg⁻¹, 0.74~17.16 mg

kg⁻¹, 5.41~79.96 mg kg⁻¹, 3.23~9.62 mg kg⁻¹, 0.01~0.18 mg kg⁻¹, 18.7~36.1 mg kg⁻¹, 0.001~0.019 mg kg⁻¹ 범위였다(Table 3). 하계와 동계에 표층 퇴적물의 중금속 평균 농도는 Zn(하계: 46.6 mg kg⁻¹, 동계: 41.6 mg kg⁻¹)이 가장 높으며, Hg(하계: 0.009 mg kg⁻¹, 동계: 0.008 mg kg⁻¹)이 가장 낮다. 중금속별 평균 농도는 동계에 비해 하계에 상대적으로 높게 나타났으나(Table 3), 통계적으로 유의한 차이는 없었다(P<0.05).

Table 2. Pearson correlation matrix among mean grain size (Mz), TOC, and heavy metals

Summer	Mz	TOC	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	Li
Mz	1										
TOC	.384	1									
Cr	.753*	.539*	1								
Ni	.733**	.476*	.986**	1							
Cu	.685**	.420	.966**	.987**	1						
Zn	.685**	.395	.955**	.942**	.952**	1					
As	.660**	.370	.811**	.864**	.854**	.761**	1				
Cd	.418	.194	.585**	.557*	.592**	.602**	.370	1			
Hg	.553*	.255	.834**	.846**	.900**	.916**	.661**	.574**	1		
Pb	-.082	.026	.197	.169	.233	.301	-.037	.214	.337	1	
Li	.709**	.479*	.985**	.990**	.987**	.955**	.844**	.571**	.861**	.260	1
Winter	Mz	TOC	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	Li
Mz	1										
TOC	.623**	1									
Cr	.670**	.821**	1								
Ni	.761**	.818**	.949**	1							
Cu	.763**	.834**	.929**	.975**	1						
Zn	.720**	.636**	.827**	.862**	.872**	1					
As	.663**	.698**	.830**	.897**	.859**	.678**	1				
Cd	.349	.581**	.717**	.723**	.752**	.680**	.640**	1			
Hg	.692**	.673**	.720**	.836**	.845**	.853**	.723**	.538*	1		
Pb	.505*	.497*	.509*	.589**	.596**	.560*	.449*	.477*	.662**	1	
Li	.755**	.761**	.926**	.969**	.970**	.871**	.877**	.745**	.857**	.549*	1

*, p < 0.05, **, p < 0.01

Table 3. Comparison of trace metal concentrations (range and average) between this study area and other coastal region sediments of Korea (unit : mg kg⁻¹)

Study area	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	Li
Ulsan-Onsan coast ¹⁾	54-80 (64)	26-38 (30)	20-249 (92)	103-1160 (317)	10-21 (16)	0.14-1.02 (0.46)	0.03-1.53 (0.34)	26-531 (103)	51-75 (62)
Masan Bay ²⁾	-	27-34 (31)	21-76 (46)	118-327 (200)	-	0.1-1.1 (0.6)	-	34-76 (50)	-
Jinhae Bay ³⁾	23-82 (58)	22-39 (34)	18-91 (42)	67-352 (125)	8-16 (10)	0.20-1.84 (0.57)	-	10-69 (29)	-
Gwangyang Bay ⁴⁾	18-76 (51)	7-35 (24)	6-34 (18)	23-126 (86)	-	0.01-0.27 (0.15)	-	13-35 (28)	24-107 (72)
Shihwa Lake ⁵⁾	38-176 (82)	18-74 (40)	13-318 (76)	57-523 (186)	-	0.09-1.40 (0.42)	-	15-68 (30)	-
Southwestern FRPA ^{*6)}	60-74 (70)	-	13-17 (15)	81-104 (99)	6.6-8.0 (7.5)	0.03-0.05 (0.04)	0.01-0.02 (0.01)	20-27 (25)	-
Ongjin-gun ⁷⁾	22.7-93.7 (58.9)	-	3.4-21.3 (10.3)	34-138 (82)	2.7-7.7 (4.4)	0.028-0.101 (0.055)	0.006-0.014 (0.008)	15.6-26.1 (19.3)	-
This study (summer season)	6.78-62.91 (36.43)	3.98-25.24 (14.42)	1.54-17.16 (8.87)	8.71-79.96 (46.55)	4.07-9.62 (6.37)	0.02-0.13 (0.07)	0.002-0.019 (0.009)	19.33-36.14 (23.84)	5.82-51.68 (28.73)
This study (winter season)	3.01-56.88 (33.31)	1.20-23.17 (11.94)	0.74-14.67 (7.03)	5.41-65.94 (41.64)	3.23-8.42 (5.79)	0.01-0.18 (0.06)	0.001-0.018 (0.008)	18.73-32.31 (23.89)	4.59-47.05 (24.50)

¹⁾Sun *et al.*[2015]; ²⁾Sun *et al.*[2014]; ³⁾Cho and Lee[2012]; ⁴⁾Hyun *et al.*[2003]; ⁵⁾Kim *et al.*[2003]; ⁶⁾Koo *et al.*[2019]; ⁷⁾Kim *et al.*[2013]

*FRPA: Fisheries Resource Protection Area

퇴적물 입도와 원소별 상관성을 살펴보기 위해서 SPSS(ver. 21)를 이용하여 Pearson 상관분석을 실시하였다(Table 2). 하계에는 표층 퇴적물 입도와 Cr, Ni, Li 원소 사이에 상관계수(r)가 0.7 이상으로 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 동계에는 Ni, Cu, Zn, Li의 상관계수 0.7 이상으로 나타났다(Table 2). 퇴적물의 입도와 TOC 농도는 하계에 비해 동계에 상대적으로 상관계수($r=0.623$, $p<0.01$)가 높게 나타났으며, 중금속과 TOC 농도와의 상관성 역시 동계에 높은 상관성을 보였다(Table 2). 조사시기와 금속 원소별로 서로 다른 양상을 보이지만 본 연구해역에서 표층 퇴적물 중금속의 시공간적 분포는 주로 입도에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다(Zhang and Gao[2015]; Sun *et al.*[2018]).

본 연구해역에서 조사된 중금속 농도를 국내 해저퇴적물 해양환경기준(해양수산부 고시 2018-10호) 중금속 농도(주의 및 관리기준)와 비교한 결과, 모든 조사 정점의 모든 항목에서 주의기준(부정적인 생태 영향이 없을 것으로 예측되는 농도) 이하로 나타났다(Fig. 7). Kim *et al.*[2013]은 2011년에 영흥도를 비롯한 웅진군 어장관리해역에서 표층 퇴적물 중 중금속 농도를 측정하였으며, 모든 정점에서 NOAA에서 권고하는 퇴적물 하위권고기준인 ERL(Effects Range Low) 이하로 나타났으나, 영흥도 주변 1개 정점에서 Cr 농도가 ERL(Cr: 81 mg kg⁻¹)을 초과한 것으로 나타났다. 그러나 국내 주의기준(Cr: 116 mg kg⁻¹) 보다는 낮은 수준이었다. 우리나라 퇴적물 중 중금속이 오염되어 있는 주요해역에서 조사된 결과에 비해 낮은 수준이며, 남서해 연안의 수산자원보호구역 표층 퇴적물 중 중금속 농도와 비교해서도 유사하거나 낮은 수준이었다(Table 3).

EF로 인위적 오염도를 평가한 결과, As와 Pb를 제외한 모든 금

속원소들은 하계와 동계에 평균 1.5 이하로 지각물질 또는 자연적 풍화작용에 의해 농도가 조절되고 인위적인 공급은 없는 것으로 판단된다(Zhang and Liu[2002]). As와 Pb는 일부 정점에서 1.5 이상으로 나타나 이들 정점에서 비 지각물질에 의해 조절되는 것으로 나타났으며(Tables 4, 5), 하계와 동계 모두 영흥도와 인접한 정점 보다는 바깥쪽에 위치한 정점들(정점 10, 11, 12, 13, 17, 18)에서 상대적으로 높은 값을 보였다.

I_{geo} 방법을 이용하여 퇴적물의 중금속 오염도를 평가한 결과, Cr, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb은 하계와 동계의 모든 정점에서 0 이하(unpolluted)로 나타났다(Fig. 8)(Muller[1981], Sun *et al.*[2015]).

중금속 분석 결과(Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb)를 이용하여 PLI로 오염도를 평가한 결과, 하계에는 정점 7(PLI: 1.02), 동계에는 정점 14(PLI: 1.03), 정점 19(PLI: 1.01)를 제외하고 모든 정점에서 1 미만(no pollution)으로 나타났다(Tables 4, 5).

하계와 동계에 표층 퇴적물 중 ERI는 각각 23.3~104.3(평균 60.3), 17.0~96.8(평균 53.9)의 범위였으며, 대부분의 정점에서 100 미만으로 저서생물에 위해성을 줄 가능성이 낮은 상태였다(low risk)(Tables 4, 5). 하계에 일부 정점(정점 7과 19)에서 저서생물에 어느 정도 위해를 줄 수 있는 범위($100 < ERI < 150$, moderate risk)로 나타났다. 금속원소별 상대적 기여도를 살펴보았을 때 하계와 동계 모두 Hg의 기여도가(하계: 평균 32.9%, 동계: 평균 34.7%) 가장 큰 것으로 나타났다. 다음으로 Cd(하계: 평균 27.7%, 동계: 평균 24.7%), As(하계: 평균 16.0%, 동계: 15.6%), Pb(하계: 평균 9.5%, 동계: 10.9%) 순이었으며, Cr, Ni, Cu, Zn의 기여도는 평균 5% 내외였다. 따라서 영흥도 서부해역에서 조사한 퇴적물의 중금속 농도는 대체로 저서생물에 미치는 영향이 적을 것으로 판단된다.

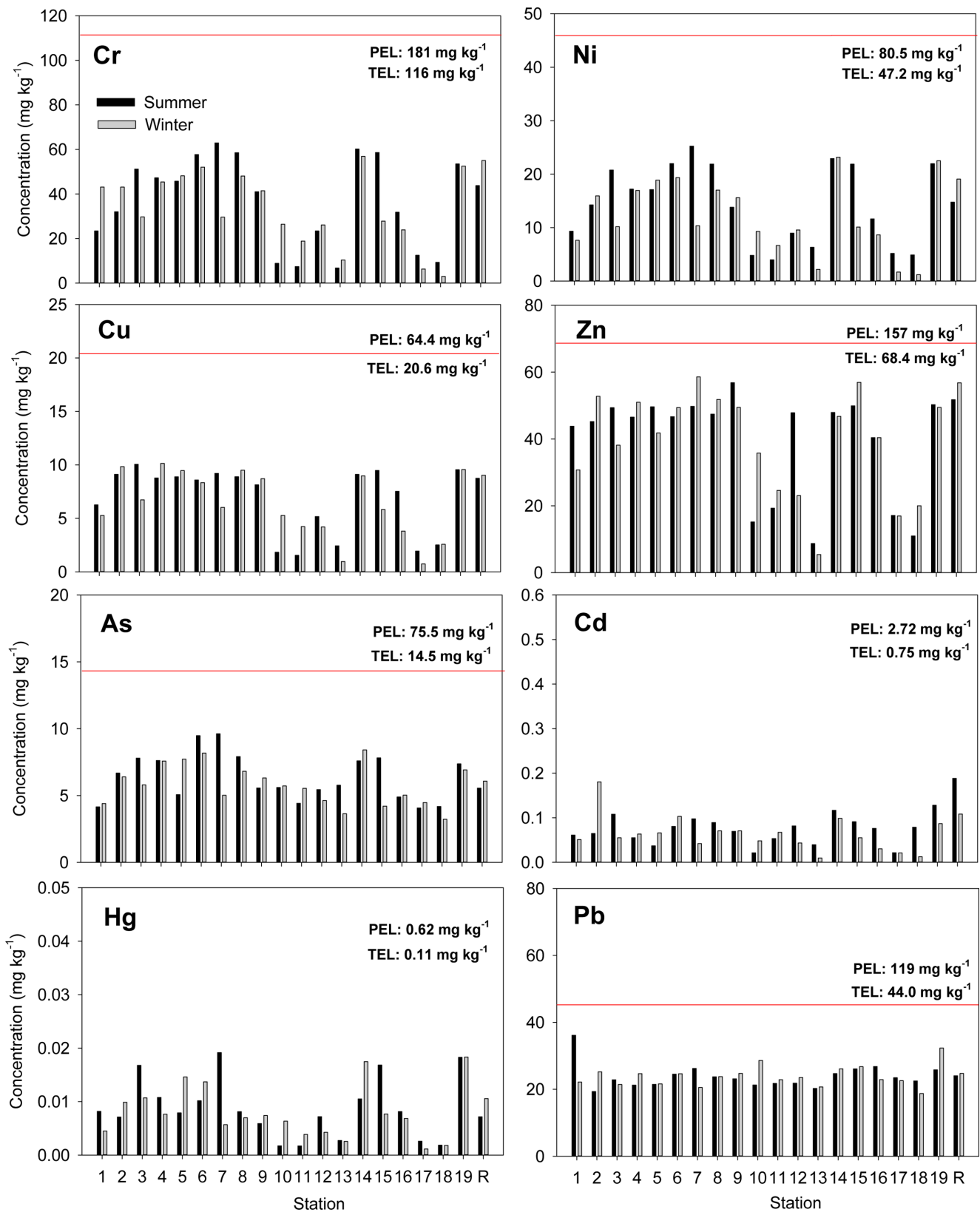


Fig. 7. Temporal and spatial variations of trace metals in surface sediments around Youngheung Island. The solid lines represent the value of threshold effects level (TEL) in Korean sediment quality guidelines. Cu and Zn concentrations were corrected for sediment grain size (Li concentration).

Table 4. Enrichment factor (EF), pollution load index (PLI), and ecological risk index (ERI) of heavy metals for surface sediments around Youngheung Island during summer season

St.	Enrichment factor (EF)								PLI	ERI
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb		
1	0.97	0.89	0.81	1.19	1.07	0.87	0.98	2.73	0.52	53.1
2	1.19	1.22	1.06	1.11	1.55	0.83	0.77	1.32	0.58	54.0
3	1.13	1.06	1.03	0.95	1.07	0.82	1.07	0.92	0.89	94.8
4	1.21	1.02	0.83	0.87	1.22	0.49	0.80	1.00	0.68	64.5
5	1.34	1.16	0.82	0.96	0.93	0.37	0.67	1.15	0.58	49.3
6	1.19	1.05	0.87	0.87	1.22	0.57	0.61	0.93	0.84	74.7
7	1.15	1.06	0.99	0.97	1.10	0.61	1.02	0.88	1.02	104.3
8	1.27	1.09	0.89	0.89	1.07	0.66	0.51	0.94	0.80	69.2
9	1.49	1.15	0.92	1.36	1.25	0.86	0.62	1.53	0.60	51.3
10	0.96	1.20	0.62	1.08	3.77	0.79	0.54	4.21	0.22	23.3
11	0.84	1.04	0.55	1.45	3.13	2.09	0.56	4.52	0.23	28.6
12	1.30	1.15	0.90	1.76	1.89	1.56	1.16	2.22	0.50	53.7
13	1.10	2.37	1.24	0.93	5.84	2.20	1.28	6.02	0.25	30.3
14	1.24	1.09	0.94	0.91	0.98	0.83	0.63	0.93	0.88	81.9
15	1.25	1.07	0.97	0.96	1.04	0.67	1.04	1.02	0.91	92.4
16	1.26	1.06	0.93	1.06	1.21	1.04	0.93	1.94	0.57	56.9
17	1.20	1.15	0.59	1.09	2.44	0.72	0.73	4.14	0.25	24.2
18	0.99	1.19	0.83	0.77	2.75	2.87	0.57	4.35	0.26	35.0
19	1.11	1.05	0.99	0.97	0.95	0.91	1.10	0.98	0.95	103.7
Ref.	1.38	1.07	0.87	1.08	1.09	2.05	0.66	1.39	0.70	81.8

Table 5. Enrichment factor (EF), pollution load index (PLI), and ecological risk index (ERI) of heavy metals for surface sediments around Youngheung Island during winter season

St.	Enrichment factor (EF)								PLI	ERI
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb		
1	2.47	1.01	0.95	1.16	1.57	1.00	0.75	2.32	0.49	39.1
2	1.20	1.03	0.89	1.00	1.11	1.73	0.80	1.29	0.86	88.9
3	0.88	0.69	0.62	0.74	1.07	0.56	0.91	1.16	0.59	58.0
4	1.28	1.10	0.92	0.96	1.33	0.61	0.62	1.27	0.75	59.1
5	1.45	1.31	0.89	0.83	1.44	0.68	1.27	1.19	0.79	76.9
6	1.24	1.07	0.80	0.94	1.22	0.85	0.95	1.08	0.91	85.0
7	1.31	1.06	0.84	1.72	1.39	0.64	0.73	1.67	0.54	41.3
8	1.40	1.14	0.87	1.00	1.24	0.71	0.59	1.27	0.74	57.6
9	1.32	1.14	0.87	1.04	1.25	0.77	0.68	1.44	0.70	57.2
10	1.44	1.16	0.90	1.28	1.94	0.90	1.00	2.84	0.53	45.9
11	1.40	1.14	0.99	1.21	2.57	1.72	0.83	3.11	0.43	41.1
12	1.46	1.23	0.74	0.85	1.61	0.83	0.69	2.40	0.44	36.6
13	1.52	0.73	0.44	0.52	3.31	0.48	1.07	5.52	0.17	19.0
14	1.14	1.07	0.93	0.88	1.05	0.68	1.02	0.96	1.03	96.8
15	1.27	1.07	0.84	1.72	1.20	0.87	1.02	2.24	0.57	49.2
16	1.20	1.00	0.60	1.34	1.58	0.53	1.00	2.11	0.46	40.4
17	0.86	0.53	0.32	1.53	3.82	0.99	0.45	5.65	0.17	19.3
18	0.62	0.57	1.66	2.72	4.14	0.89	1.08	7.07	0.17	17.0
19	1.15	1.13	0.98	0.95	0.94	0.65	1.16	1.29	1.01	94.9
Ref.	1.34	1.07	0.87	1.12	0.92	0.90	0.74	1.10	0.89	76.0

4. 결 론

영흥도 주변 해역에서 수질과 표층 퇴적물의 건강도를 평가하기 위해서 하계와 동계에 현장조사를 실시하였다. 하계에 영흥도 북동

해역에서 고온·저염의 수괴가 나타났으며, 영흥도 서부연안을 따라 유입되는 양상이 뚜렷하게 나타났다. 고온·저염의 수괴의 유입과 함께 영양염의 공급으로 chlorophyll *a* 농도 역시 높게 나타났다. 따라서 하계에는 한강 유출수와 시화호 방류수, 인천 연안으로부터

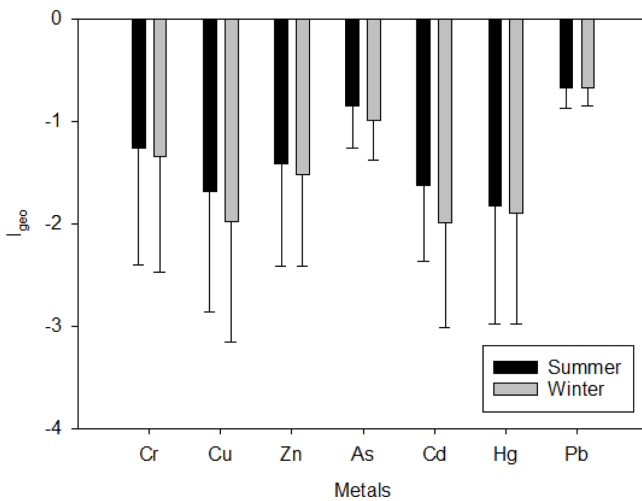


Fig. 8. Geo-accumulation index (I_{geo}) of heavy metals in surface sediments around Youngheung Island. Bar and error bar represent average and standard deviation, respectively.

유입된 영양염이 풍부한 담수가 영흥도 서부연안까지 영향을 미치는 것으로 판단된다. 국지적으로 영흥도 서부연안으로부터 담수의 유입도 관찰되었다. 해수 수질은 영흥도 서부해역의 모든 정점에서 I 등급 수준으로 대체로 양호한 상태였다. 표층 퇴적물의 중금속(Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg, Pb) 농도는 하계와 동계에 국내 해양환경 기준의 주의기준(TEL)을 초과하지 않아 저서생물에 부정적인 영향은 적을 것으로 판단된다. 퇴적물의 중금속 오염도 및 위해성을 I_{geo} , PLI, ERI를 이용하여 평가한 결과, 대부분의 정점에서 저서생물에 영향을 주지 않는 농도 수준이었다. 따라서 영흥도 주변해역 해수와 표층 퇴적물 중 중금속의 오염 정도는 대체로 양호한 것으로 평가되었으나, 영흥도 주변 해역은 국지적 뿐만 아니라 서해 연안으로 유입된 담수의 직간접적인 영향을 받고 있어 해양환경 변화에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다.

후 기

이 연구는 한국남동발전의 현장기술연구개발과제로 수행되었습니다. 현장조사 및 시료 채취에 도움을 주신 해양수질팀원 및 아라미 1호 직원들께 감사드립니다.

References

- [1] Bae, Y.H., Yoon, B.I., Seo, C.H., Park, S.J., Bang, K.Y., Kwon, H.K. and Woo, S.B., 2017, Residence time variation by operation of Sihwa tidal power plant in outer sea of Sihwa Lake, J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., 29(5), 247-259.
- [2] Cho, Y.G. and Lee, C.B., 2012, Heavy metal concentration in surface sediments from Masan and Jinhae Bay, southeast coast of Korea, J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng., 15(4), 302-313.
- [3] Cole, J.J., Caraco, N.F. and Peierls, B.L., 1992, Can phytoplankton maintain a positive carbon balance in a turbid, freshwater, tidal estuary? Limnol. Oceanogr., 37, 1608-1617.
- [4] Ghani, S.A., El Zokm, G., Shobier, A., Othman, T. and Shreadah, M., 2013, Metal pollution in surface sediments of Abu-Qir Bay and eastern harbour of Alexandria, Egypt, Egyptian J. Aquat. Res., 39, 1-12.
- [5] Hakanson, L., 1980, An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach, Water Res., 14, 975-1001.
- [6] Hyun, S.M., Lee, T.H., Choi, J.S., Choi, D.L. and Woo, H.J., 2003, Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea, J. Kor. Soc. Oceanogr., 8(4), 380-391.
- [7] Incheon Metropolitan City, 2013, The environmental white paper of Incheon city.
- [8] Ingram, R.L., 1971, Sieve analysis. In: Carver, R.E. (ed.) Procedures in sedimentary petrology, Wiley-Interscience, New York, pp. 49-67.
- [9] Kang, S., Choi, B., Han, Y. and Shin, K.H., 2016, Ecological importance of benthic microalgae in the intertidal mud flat of Yeongheung Island; Application of stable isotope analysis (SIA), Korean Soc. Limnol., 49(2), 80-88.
- [10] Kang, S., Kim, H.C., Hwang, U.K., Sim, B.R., Kim, C.S., Lee, W.C. and Hong, J., 2017, Feasibility of changing and canceling designated mariculture management areas in Ongjin-gun, Korea, Korean J. Fish. Aquat. Sci., 50(5), 576-588.
- [11] Kim, S.Y., Choi, J.H., Na, E.H. and Park, S.S., 2005, A waste load allocation study for water quality management of the Incheon coastal environment, J. Korean Soc. Environ. Eng., 27(1), 43-51.
- [12] Kim, K.T., Kim, E.S., Cho, S.R., Park, J.K. and Park, C.K., 2003, Change of heavy metals in the surface sediments of the Lake Shihwa and its tributaries, Ocean Polar Res., 25(4), 447-457.
- [13] Kim, S.Y., Kim, H.C., Lee, W.C., Hwang, D.W., Hong, S.J., Kim, J.B., Cho, Y.S. and Kim, C.S., 2013, Environmental characteristics of seawater and sediment in mariculture management area in Ongjin-gun, Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 19(6), 570-581.
- [14] KOEN, 2006, Detailed investigation and modeling verification on the effect of heated effluents (marine physics) in Youngheung thermal power plant, Korea South-East Power Corporation.
- [15] Koo, J.H., Lee, G., Hwang, H., Kim, J.B., Kim, S.S. and Hwang, D.W., 2019, Distribution of organic matter and heavy metals in the surface sediments from fishery resources protection areas in the southwestern coast of Korea, Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 25(6), 666-677.
- [16] Lee, Y.W. and Kim, G., 2007, Linking groundwater-borne nutrients and dinoflagellate red-tide outbreaks in the southern sea of Korea using a Ra tracer, Estuar. Coast. Shelf Sci., 71, 309-317.
- [17] Lim, D.I., Choi, H.W., Kim, Y.O., Jung, H.S. and Kang, Y.S., 2011, Concentration level and grading of water quality components (COD, DIN, DIP, Chlorophyll-*a*) in Korean coastal waters:

- A statistical approach, *Ocean Polar Res.*, 33(1), 13-20.
- [18] Lim, D.I., Choi, J.W., Shin, H.H., Jeong, D.H. and Jung, H.S., 2013, Toxicological impact assessment of heavy metal contamination on macrobenthic communities in southern coastal sediments of Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, 73(1), 362-368.
- [19] Muller, G., 1981, Schwarmmetallbelastung der sedimente des neckars und seiner Nebenflüsse: eine Estandsaufnahme, *Chem. Zeitung*, 105, 157-164.
- [20] NFRDI, 2009, Investigation report of manila clam mortality in Seonjae-ri, Yeongheung-myeon, Ongjin-gun, Incheon, Korea, National Fisheries Research & Development Institute.
- [21] Ongjin-gun, 2008, A site selection of aquaculture and a reduction measures of clam dead in island of Ongjin-gun, Ongjin-gun Incheon, Korea.
- [22] Ongjin-gun, 2015, Shellfish mortality report In: Investigation report of mass mortality of shellfish, Ongjin-gun, Incheon, Korea.
- [23] Ra, K., Kim, J.K., Kim, E.S., Kim, K.T., Lee, J.M., Kim, S.K., Kim, E.Y., Lee, S.Y. and Park, E.J., 2013, Evaluation of spatial and temporal variations of water quality in lake Shihwa and outer sea by using water quality index in Korea: A case study of influence of tidal power plant operation, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Energy*, 16, 102-114.
- [24] Rho, T.K., Lee, T.S., Lee, S.R., Choi, M.S., Park, C., Lee, J.H., Lee, J.Y. and Kim, S.S., 2012, Reference values and water quality assessment based on the regional environmental characteristics, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 17(2), 45-58.
- [25] 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(4), 3219-3232.
- [26] Sun, C.I., Kim, D.J., Lee, Y.W. and Kim, S.S., 2015, Pollution and ecological risk assessment of trace metals in surface sediments of the Ulsan-Onsan coast, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 18(4), 245-253.
- [27] Sun, C.I., Lee, Y.J., An, J.H. and Lee, Y.W., 2014, Speciation and ecological risk assessment of trace metals in surface sediments of the Masan Bay, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 19(2), 155-163.
- [28] Sun, C.I., Park, G.W., Park, H.S., Park, J.G., Kim, S.G. and Choi, M.S., 2018, Distribution of heavy metal concentrations in surface sediments of the eastern Yellow Sea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 23(4), 179-191.
- [29] Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R. and Jeffrey, D.W., 1980, Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index, *Helgoländer Meeresunters.*, 33, 566-575.
- [30] Woo, J., Lee, H., Park, J., Park, K., Cho, D., Jang, D., Park, S., Choi, M. and Yoo, J., 2019, Background concentration and contamination assessment of heavy metals in Korean coastal sediments, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 24(1), 64-78.
- [31] Zhang, J. and Gao, X., 2015, Heavy metals in surface sediments of the intertidal Laizhou Bay, Bohai Sea, China: distributions, sources and contamination assessment, *Mar. Pollut. Bull.*, 98, 320-327.
- [32] Zhang, J. and Liu, C.L., 2002, Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 54(6), 1051-1070.

Received 30 July 2020

1st Revised 3 September 2020, 2nd Revised 9 November 2020

Accepted 16 November 2020