

인천 주요 갯벌의 입도 및 건강상태 조사

신문기[†], 박은경, 이정민, 김수지, 신현서, 최미진, 조영민, 유희중, 성지홍, 권문주
인천보건환경연구원 해양조사과

Investigation of particle size and health status in tidal flat sediments of Incheon

Moon-khee Shin[†], Eun-kyung Park, Chong-min Lee, Su-ji Kim, Hyun-seo Shin,
Mi-jin Choi, Young-min Cho, Hee-jong Yoo, Ji-hong Seong, Mun-ju Kwon

Division of Marine Research
Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

The Health condition of tidal flat by linking sea water quality has not been investigated widely on the western coast of Incheon. In this study, we have analyzed the particle size distribution and physicochemical composition of tidal flat sediments in Janghwa-ri, Dongmak-ri, Yeongjong, and Songdo at each quarter, and water quality analysis was carried out simultaneously against the surrounding environment. The particle composition of flat tidal sediments was in the order of silt (75.0%) > sand (22.5%) > clay (2.5%). Also, health-affecting substances such as germanium, selenium, and lithium showed a similar or somewhat higher ratio than the average abundance of the earth's crust. Whereas, the concentration of eight heavy metals satisfied both Threshold Effects Level (TEL) and Probable Effects Level (PEL) for the marine environment. The concentration of TOC in the surface layer sediments was 36–44% of the minimum impact standard (1.0%) in Ontario, Canada, suggesting that most marine benthic organisms could live. While the marine water quality index (WQI) of Yeongjong was 1st grade (very good), two tidal flats (Janghwa and Dongmak) were 3rd grade (Normal), that of Songdo was 4th grade (bad) due to DIN, DIP, Chl-a, and transparency. Moreover, the surface layer sediments' eutrophication index (CIET) was investigated below the minimum standard concentration in all tidal flats. But the Songdo tidal flat showed higher accumulation of various pollutants such as heavy metals and TOC, compared with other areas. We confirmed the environmental importance of the Incheon tidal flat as a World Cultural Heritage and sought management plans to preserve the Incheon coastal marine environment.

Key words: Incheon tidal flat, Sediment, Trace metal, Pollution, WQI, CIET.

I. 서론

유네스코 세계유산위원회는 충남 서천, 전북 고창, 전남 신안, 그리고 전남 보성·순천 갯벌 등 4구역을 유네스코 세계유산으로 등재(2021년 7월)하면서 2025년까지 한국 갯벌의 핵심지역에 해당하는 인천(강화, 영종, 송도)갯벌의 유산구역 확대를 권고하였다. 이는 인천갯벌이 지구 생물 다양성 보존을 위한 중요한 서식지이며, 멸종위기 철새의 기착지로서 가치가 크기 때문에 유네스코 세계문화유산 등재 기준인 ‘탁월한 보편적 가치’(Outstanding Universal Value, OUV)에 부합하는 것으로 평가된다.

이러한 인천 갯벌의 면적은 728.3km²로 우리나라 남한 갯벌 면적 2,482 km²(해양수산부, 2018a)의 29.3%로 전남(42.5%)에 이어 두 번째로 넓다. 또한 인천갯벌은 저서생물 등 다양한 해양생물이 공존하는 생태계 보고이며, 수도권 일대의 오염물질을 정화하는 바다의 허파 역할을 하며, 그리고 다양한 철새들의 이동경로이자 중요한 서식지이다. 국제 관문도시인 인천 서쪽에는 송도·영종도 갯벌 그리고 강화도 동막리·장화리 등에 드넓은 갯벌이 아름답게 펼쳐져 있다. 송도갯벌은 2009년 습지보호구역으로 지정됐고, 동아시아 철새 이동경로일 뿐만 아니라 저어새 등이 매년 둥지를 트는 곳으로 생태적 보전가치가 매우 높다. 인천국제공항이 위치한 영종갯벌은 멸종위기종인 흰발농게의 국내 최대 서식지로 알려져 있다(권문주, 2022).

갯벌은 지형적으로 하구형 갯벌, 만형 갯벌, 외해형 갯벌, 그리고 섬 갯벌 등으로 나뉘고, 퇴적물의 특성에 따라 펄갯벌, 모래갯벌, 혼성갯벌 등으로 분류된다. 이러한 차이들이 종합되어 각 단위갯벌의 고유한 퇴적학적 성질이 나타난다. 퇴적물은 갯벌을 구성하는 가장 기본적인 요소일 뿐만 아니라 해당 지역의 물리적 특성을 반영하고 환경을 이해하는데 중요한 요소이다. 조수와 파랑에 의해 이동하는 퇴적

물의 조성을 통해 갯벌의 퇴적환경을 이해할 수 있고, 퇴적물 분석을 통해서 유기물 및 중금속에 의한 갯벌의 오염정도를 파악할 수 있다. 또한 퇴적물의 조성은 저서생물의 분포와 밀접한 상관관계를 갖는다. 단위갯벌에서 조사되는 기본적인 퇴적물의 입도와 일반항목 분석, 중금속 분석과 지형특징으로 갯벌 환경의 변화를 종합적으로 감지할 수 있다(해양수산부 2021).

따라서 본 연구에서는 인천 갯벌 퇴적물의 입도 분포 및 이화학적 성분을 분석하고, 해양수질과 갯벌 등급분류를 연계하여 갯벌 건강상태 조사·진단을 실시하고자 한다. 이를 통해 인천 갯벌이 세계문화유산으로서의 환경적 중요성을 확인하고 인천연안 해양환경 보전을 위한 관리방안을 모색하고자 한다.

II. 조사대상 및 방법

2.1. 조사대상

Table 1. GPS Coordinates of investigation point.

Area	Point	Latitude	Longitude	Distance from land
Jang-hwa (JH)	JH-A1	37°37'10.12"	126°22'24.32"	150m
	JH-A2	37°37'09.89"	126°22'10.10"	500m
	JH-B1	37°37'14.93"	126°22'24.18"	150m
	JH-B2	37°37'14.81"	126°22'09.94"	500m
	JH-C1	37°37'19.84"	126°22'24.07"	150m
	JH-C2	37°37'19.81"	126°22'09.74"	500m
Dong-mak (DM)	DM-A1	37°35'25.16"	126°27'34.11"	170m
	DM-A2	37°35'15.56"	126°27'28.04"	500m
	DM-B1	37°35'27.90"	126°27'26.80"	170m
	DM-B2	37°35'18.18"	126°27'20.61"	500m
	DM-C1	37°35'30.04"	126°27'19.06"	170m
	DM-C2	37°35'21.02"	126°27'13.02"	500m
Song-do (SD)	SD-A1	37°22'49.23"	126°42'47.39"	150m
	SD-A2	37°22'44.43"	126°42'45.80"	300m
	SD-B1	37°22'50.79"	126°42'41.36"	150m
	SD-B2	37°22'46.27"	126°42'40.01"	300m
	SD-C1	37°22'52.18"	126°42'35.72"	150m
	SD-C2	37°22'47.37"	126°42'34.33"	300m
Young-Jong (YJ)	YJ-A1	37°26' 5.35"	126°28'16.43"	200m
	YJ-A2	37°25'57.72"	126°28'22.04"	450m
	YJ-B1	37°26' 1.58"	126°28' 9.55"	200m
	YJ-B2	37°25'54.43"	126°28'14.83"	450m
	YJ-C1	37°25'58.00"	126°28' 2.89"	200m
	YJ-C2	37°25'50.91"	126°28' 8.28"	450m

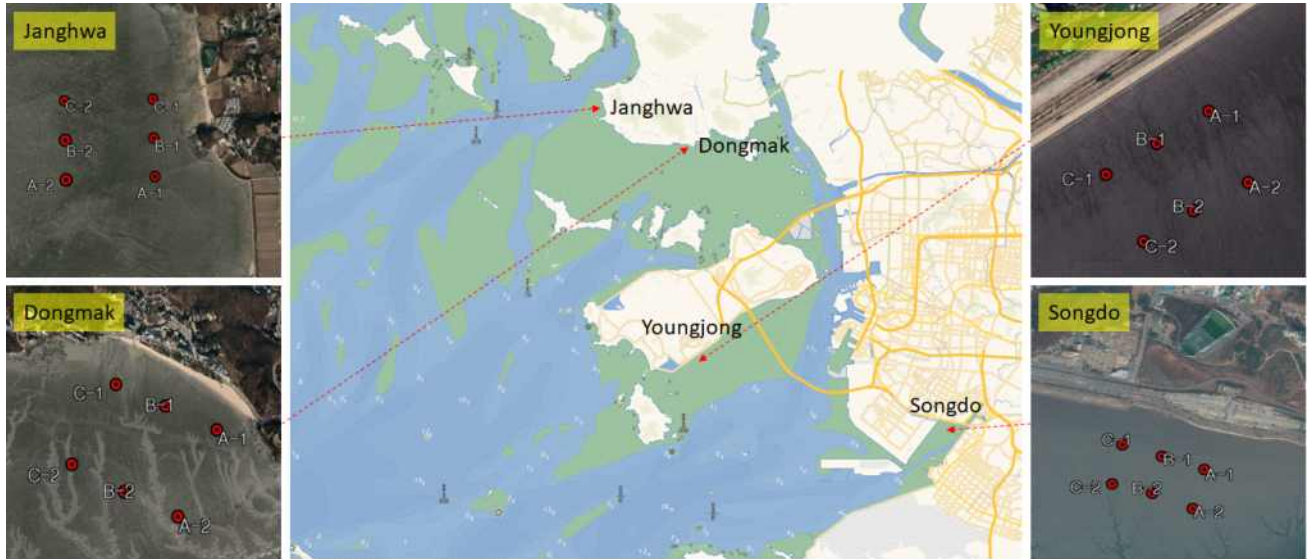


Fig. 1. Map showing the sampling area of four tidal flats [Jangwha(JH), Dongmak(DM), Youngjong(YJ), and Songdo(SD)] in Incheon. The green color means tidal flat areas.

유네스코 유산구역 확대 대상갯벌(강화, 영종 및 송도 갯벌)을 고려하여 강화연안 장화리 및 동막리 갯벌, 인천연안 영종 및 송도 갯벌을 대상으로 총 24개 정점에서 분기 1회 조사하였으며 구체적인 시료채취 정점의 정보는 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

2.2. 조사방법

2.2.1. 시료 채취



Fig. 2. Picture of tidal flat sediment sampling at Songdo.

시료 채취는 대상 지역의 해수와 갯벌 퇴적물을 채취하였다. 해수는 해양조사선(인천광역시 시크린호 및 강화군 행정선)을 이용하여

각 갯벌 인근해역 3개 정점에서 현장조사를 실시하고 시료 총 48건을 채수하였다. 또한 갯벌 퇴적물은 입도 및 특성을 조사하기 위해 표층(0~2 cm) 및 중층(20~30 cm) 시료를 총 108건을 채취하였다. 퇴적물 시료는 코어(Core sampler)를 사용하여 약 1 kg을 채취하였으며 실험실로 운반하며 냉동 보관하였다(Fig 2).

2.2.2. 분석 항목 및 방법

Table 2. Analysis items for this study.

	Analysis items
sea water (23)	Temperature, pH, DO, Salinity, Transparency, COD, Chl-a, T-N, T-P, CN, Phenols, Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, As, Hg, Ni, DIN, DIP, TOC, bottom dissolved oxygen saturation
sediments (16)	TOC, COD, AVS, IL, Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, As, Ni, Hg, Ge, Se, Li, Grain size

본 연구에서는 Table 2와 같이 중금속 등 해양수질 항목 23종과 TOC, AVS, 강열감량 등 해저퇴적물 항목 16종에 대하여 국립수산물품질관리원(2021-06호) 「해양환경공정시험기준」의 항목별 시험기준 중 해수 및 퇴적물 시험기준에 준하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 갯벌 퇴적물 입도 및 이화학적 특성

3.1.1 입도

갯벌로 대표되는 연안습지는 육상환경과 해양환경사이에 위치한 전이지대로 강수, 바람 등과 같은 기상 요소들과 파랑, 조석 등과 같은 해양의 다양한 요소들의 영향을 받아 해수 및 퇴적물의 물리, 화학, 생물, 지질학적 특성이 시공간적으로 급격한 변화를 보이는 곳이다. 갯벌을 구성하는 가장 기본적인 환경요소는 퇴적물로서, 퇴적물의 입도분포는 생물의 분포 및 성장과 갯벌의 건강성에 매우 중요한 영향을 미치며, 수리에너지 특성에 따라 그 분포가 좌우된다(해양수산부 2013).

Table 3. Grain size distribution of the sediments at four tidal flats.

Area	Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Sediment type*
JH	0~2	28.3	69.9	1.8	sandy mud
	20~30	28.7	69.9	1.4	sandy mud
DM	0~2	15.6	80.9	3.5	sandy mud
	20~30	17.2	79.9	2.9	sandy mud
SD	0~2	11.8	83.9	4.3	sandy mud
	20~30	13.3	82.9	3.8	sandy mud
YJ	0~2	29.9	68.6	1.5	sandy mud
	20~30	34.9	64.0	1.1	muddy sand

* : Classification of grain size statistics by Folk(1968) method

조사대상 4개 갯벌의 퇴적물을 표층과 중층으로 구분하고 입도분석 결과를 Sand(모래), Silt(실트), Clay(점토)로 분류하여 Table 3 및 Fig. 3과 같이 나타내었다. 표층퇴적물의 평균입도는 1.5~9.3 Φ 의 범위로 분포하고 있으며, 4개 갯벌 퇴적물 조성은 silt가 64.0~83.9% 범위로 silt 성분이 많은 sandy

silt(sZ) 유형으로 평가되었으며, 평균입도의 분포는 실트(75.0%) > 모래(22.5%) > 점토(2.5%) 순으로 높게 조사되었다. 갯벌 중층(20~30 cm 깊이)의 sand 비율은 표층(0~2 cm 깊이)에 비해 1.5%~16.6% 높고, clay는 중층이 표층대비 10.7%~24.4% 낮게 분포하였다.

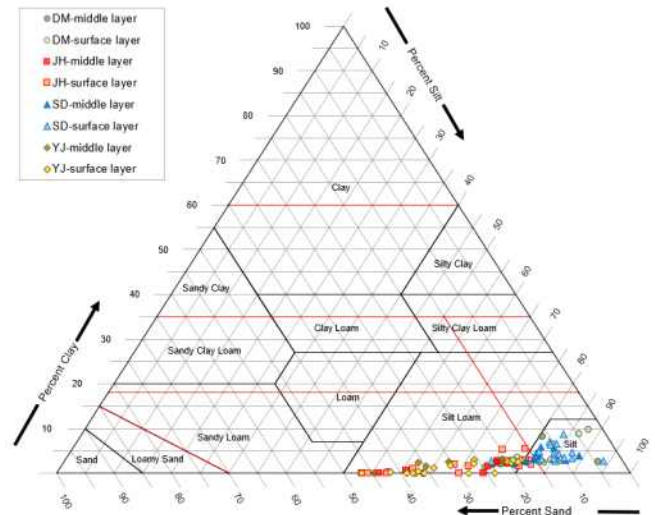


Fig. 3. USDA* soil textural triangle chart by tidal flat sediments.

* : The USDA(United States Department of Agriculture) classifies soil types according to a soil texture triangle chart which gives names to various combinations of clay, sand, and silt(The Soil Triangle, 2022).

장화갯벌은 강화도 서쪽 석모수로에 해역에 위치하여 수심이 얇고 조류가 강한 특성을 가지고 있다. 장화갯벌은 이러한 지리적 특성으로 침식의 영향을 많이 받기 때문에 비중이 큰 sand의 비율이 인근 지역에 비해 높고, 비중이 작은 silt와 clay 퇴적물은 외해로 빠져나가거나 연안류에 의해 강화남단 동막갯벌 등으로 이동하여 낮은 비율을 나타낸 것으로 평가된다. 장화갯벌의 표층 퇴적상 유형은 sandy mud가 12회(67%), muddy sand가 6회(33%), 중층은 sandy mud가 6회(67%), muddy sand가 3회(33.3%)로 분류되었다.

동막갯벌은 강화남단에 중간에 위치하고

있으며, 강화도 서쪽 장화갯벌 및 여차리갯벌에서 이동한 퇴적물이 동막 및 인근 선두리갯벌에서 퇴적된 것으로 알려졌다(우한준, 2013). 동막갯벌은 이러한 퇴적 특성에 의해 표층 sand 함량이 15.6%로 인근 장화리 갯벌보다 12.7% point 낮았으며, silt의 비율은 11.1% point 더 높았다. 동막갯벌의 표층 퇴적상 유형은 sandy mud가 16회(88.9%), mud가 2회(11.1%), 중층(9회)은 모두 sandy mud로 분류되었다.

송도갯벌은 인천 연수구에 위치하고 있으며 퇴적물은 한강 및 인접한 승기천으로부터 유래하며 저질 및 퇴적환경은 펄 우세 저질 특성을 보이고 있다(EAAFP, 2017). 송도갯벌은 sand의 비율이 11.8%(표층)로 가장 낮았고 silt는 표층 83.9%, 중층 82.9%로 가장 높게 분석되었다. 송도갯벌의 표층(18회) 및 중층(9회) 퇴적상 유형은 모두 sandy mud로 분류되었다.

영종갯벌은 영종도 남단에 위치하고 있으며, 영종도 대규모 간척사업에 의해 인공적으로 조성된 좌우가 개방된 일자형 해안이다. 영종갯벌의 sand 비율은 표층 29.9%, 중층 34.9%로 다른 갯벌에 비해 높은 비율을 나타내었는데 sand 비율이 높은 이유는 영종도 서쪽 을왕리해수욕장, 마시안해변 등 모래가 많은 해변에서 연안류의 영향으로 모래성분이 수송되어 영종도 남단 영종갯벌에 퇴적한 것으로 추측된다. 영종갯벌의 표층 퇴적상 유형은 sandy mud가 11회(61.1%), muddy sand가 7회(38.9%), 중층은 sandy mud가 2회(22.2%), muddy sand가 7회(77.8%)로 분류되었다.

3.1.2 건강영향물질(게르마늄, 셀레늄, 리튬) Poly-trans-[(2-carboxyethyl)germasquioxane

] (Ge-132)은 가장 일반적인 유기 게르마늄 화합물이다. Ge-132는 수용성이며 안전성이 확인되었다(Sugiya et al., 1986). Ge-132는 항암, 항 고혈압, 류머티즘 완화, 간질환 예방 등 많은 치료효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Aso et al., 1989; Prnai and Arimori, 1991; Sato et al., 1988; Nakamura, 2012). 셀레늄은 인체 건강에 필수 미량 미네랄이다. 셀레늄 결핍은 심혈관 질환, 불임, 근퇴행성 질환 및 인지 기능 저하와 관련이 있고, 암 치료에 있어서 셀레늄의 효능은 현재 연구 진행중이다(Aparna et al., 2022). 리튬은 우울증 및 자살 예방, 인지 장애 및 치매 발병률 감소에 긍정적인 영향을 미치며, 노화방지와 관련된 텔로미어(telomere)의 길이를 늘리고 일부 의학적 질병을 예방하는 데 긍정적인 효과가 있는 것으로 보고되고 있다(Post, 2018).

각 지역별 갯벌 표층 퇴적물에 함유된 게르마늄(Ge), 셀레늄(Se) 및 리튬(Li) 평균 농도를 Table 4와 같이 나타내었다.

Table 4. Concentration of health-beneficial substances (Ge, Se and Li) in surface sediments by tidal flat.

Items	Area	Range (mg/kg)	Average (mg/kg)	S.D. (mg/kg)
Ge	JH	1.387 ~ 2.502	1.981	0.324
	DM	1.694 ~ 2.565	1.992	0.213
	SD	0.176 ~ 3.291	2.072	0.567
	YJ	1.248 ~ 2.076	1.605	0.192
Se	JH	0.034 ~ 0.202	0.138	0.056
	DM	0.059 ~ 0.192	0.146	0.040
	SD	0.019 ~ 0.228	0.170	0.047
	YJ	0.076 ~ 0.174	0.123	0.026
Li	JH	13.209 ~ 32.293	22.254	6.450
	DM	19.246 ~ 42.206	28.722	7.424
	SD	2.408 ~ 52.079	32.622	11.047
	YJ	12.010 ~ 35.852	22.656	6.723

Ge의 지각 함유량(UCC: abundances in the upper continental crust)는 1.34~1.6 mg/kg(Rudnick et al., 2003)로 알려져 있다. 대상 갯벌의 평균 Ge 농도는 1.605(영종)~2.072(송도) mg/kg으로 조사되어 지각 평균 풍부도 보다 다소 높은 함유량을 나타내었으며, 풍부도는 송도 > 동막 > 장화 > 영종 순으로 조사되었다.

Se의 평균 지각함유량은 0.05~0.15 mg/kg(Rudnick et al., 2003)이고 송도 0.170 > 동막 0.146 > 장화 0.138 > 영종 0.123 mg/kg 순으로 조사되어 지각 함유량과 유사하였다.

Li의 평균 지각 함유량은 20~22 mg/kg(Rudnick et al., 2003)이다. sand 비율이 높은 장화 및 영종은 지각 함유량과 유사하였고 동막은 30.1% 송도는 48.3% 각각 더 높은 농도를 나타내었고 송도 > 동막 > 영종 > 장화 순으로 농도가 높았다.

3.1.3 중금속

연안 퇴적물의 중금속 농도는 인위적인 공급과 함께 자연적인 퇴적물의 구성 성분 및 물리 화학적 요소에 따라 결정된다(Förstner and Wittmann, 1981). 일반적으로 해양 퇴적물에서 중금속은 퇴적물 입자에 흡착되어 침전하기 때문에, 퇴적물 입자가 작을수록 흡착할 수 있는 표면적이 넓어져 퇴적물의 금속 농도는 증가하게 된다(Horowitz, 1991). 또한

탄산칼슘, 철수산화물, 유기물, 점토광물 등 퇴적물 입자의 구성 성분에 따라 변화할 수 있으며, 퇴적물 입자 크기 외에도 혐기성 환경이 조성될 경우 금속 황화물의 형성과 함께 축적될 가능성이 있다. 해양 퇴적물 내 중금속의 분포 특성을 파악하기 위해서는 이러한 지화학적 요소들을 고려하여야 한다(우준식 등, 2019).

갯벌 표층 퇴적물의 중금속 오염도를 Table 5와 같이 나타내었다. 해양환경기준(해저퇴적물)은 As 등 8개 항목에 대하여 주의기준(Threshold Effects Level, TEL: 부정적인 생태영향이 일부 발현된 개연성이 있을 것으로 예측되는 농도)과 관리기준(Probable Effects Level, PEL: 부정적인 생태영향이 발현된 개연성이 매우 높은 농도)으로 구분하고 있다.

중금속 분석결과 해양환경 주의기준(TEL) 및 관리기준(PEL)을 모든 항목에서 만족하는 것으로 조사되었다. 비소의 평균농도는 4.85(장화)~6.60(송도) mg/kg 범위를 보이고 있으며 지각 함유량(4.8 mg/kg) 대비 평균 101~137% 수준이며, 주의기준 대비 33~46% 수준으로 나타났다. Cd는 0.29(영종)~0.42(송도) mg/kg으로 조사되었고 주의기준 대비 39~56% 수준이나, 지각 함유량 0.09 mg/kg 대비 약 3.2~4.7배 수준으로 농도가 높았다. Cr의 농도범위는 26.73(영종)~40.93(송도) mg/kg으로 주의기준 92 mg/kg 대비 23~35% 수준이며 지각 함유량

Table 5. Concentrations of heavy metals in surface sediments by tidal flat. (unit: mg/kg)

Element	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
UCC*	4.8	0.09	92	28	0.05	47	17	67
TEL	14.5	0.75	116	20.6	0.11	47.2	44	68.4
PEL	75.5	2.72	181	64.4	0.62	805	119	157
JH	4.85	0.32	27.61	15.39	0.02	12.73	9.51	47.33
DM	6.27	0.39	30.69	13.78	0.04	15.60	11.86	66.64
SD	6.60	0.42	40.93	18.54	0.03	19.80	13.15	59.79
YJ	4.92	0.29	26.73	12.04	0.02	13.07	8.41	40.37

* : UCC : Abundances in the upper continental crust(Rudnick et al., 2003).

92 mg/kg의 29~44%로 조사되었다. Cu의 평균 농도는 13.78(동막)~18.54(송도) mg/kg으로 지각 함유량(28 mg/kg) 대비 43~66% 수준이며, 주의 기준(20.6 mg/kg) 대비 58~90% 수준으로 나타났다. Hg 평균농도는 0.02(장화 및 영종)~0.04(동막) mg/kg로 지각 함유량(0.05 mg/kg) 대비 40~80% 수준이며, 주의기준 0.11 mg/kg 대비 15~27%로 조사되었다. Ni의 농도범위는 12.73(장화)~19.80(송도) mg/kg으로 지각 함유량(47 mg/kg) 대비 27~42%, 주의기준(47.2 mg/kg) 대비 28~42% 수준으로 평가된다. Pb는 8.41(영종)~13.15(송도) mg/kg 농도로 지각 함유량(17 mg/kg)과 비교시 49~77%, 주의기준 44 mg/kg 대비 19~30% 농도로 조사되었다. Zn은 40.37(영종)~66.64(동막) mg/kg의 농도 범위로 지각 함유량(67 mg/kg) 대비 60~99%, 주의기준(68.4 mg/kg) 대비 59~87%로 나타났다.

3.1.4 총유기탄소 (TOC)

표층퇴적물의 TOC 농도 분포를 Fig 4와 같이 나타내었다. 박스그래프는 아래로부터 5, 10, 25, median, 75, 90, 95-percentile을 나타내고 있다. 지역별 갯벌 퇴적물 TOC 농도는 장화 0.40 ± 0.13 , 동막 0.41 ± 0.18 , 송도 0.44 ± 0.22 , 영종 $0.36 \pm 0.10\%$ 로 조사되었다. 캐나다 온타리오주에서는 해양 퇴적물 TOC 농도를 최저영향기준(LEL, Lowest Effect Level) 및 심각영향기준(SEL, Severe Effect Level)으로 관리하고 있다(D. Persaud et al., 1993). 최저영향기준은 퇴적물에서 서식하는 생물 중 대다수가 견딜수 있는 오염수준으로 1.0 TOC %이며 심각영향기준은 퇴적물에서 서식하는 생물 중 대다수의 생물에게 유해할 것으로 예상되는 오염수준으로 10.0 TOC %이다. 갯벌내 TOC 농도는 최저영향기준 대비 36~44% 수준으로 대다수 해양저서생물이 서식 가능한 오염수준으로 평가된다.

3.1.5 강열감량, 화학적산소요구량 및 산화환원성황화합물

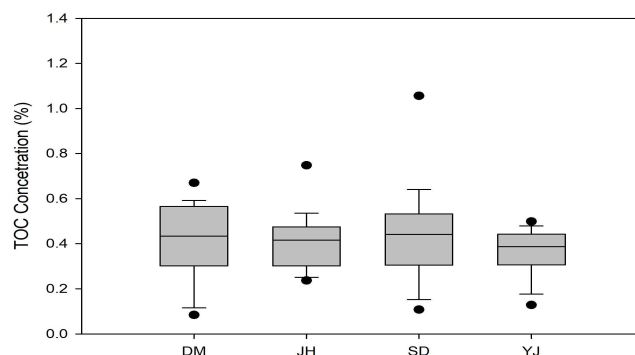


Fig 4. Distribution of TOC concentrations in surface sediments by tidal flat.

갯벌 표층 퇴적물의 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산화환원성황화합물(AVS) 분석 결과를 Tabel 6에 요약하였다.

Table 6. Concentration of COD, AVS and IL in surface sediments by tidal flat.

Items	Area	Range	Average	S.D.
COD (mg/g)	JH	1.9~5.4	3.5	0.8
	DM	1.4~4.5	2.7	0.8
	SD	1.7~4.9	3.2	0.9
	YJ	1.8~8.0	4.0	1.8
AVS (mg/g)	JH	0.000~0.027	0.008	0.005
	DM	0.005~0.065	0.025	0.018
	SD	0.000~0.014	0.002	0.004
	YJ	0.001~0.013	0.004	0.002
IL (%)	JH	2.0~3.5	2.4	0.3
	DM	2.1~3.9	3.1	0.3
	SD	2.8~4.8	3.8	0.5
	YJ	1.9~3.3	2.5	0.4

퇴적물의 COD는 영종 4.0 ± 1.8 > 장화 3.5 ± 0.8 > 송도 3.2 ± 0.9 > 동막 2.7 ± 0.8 mg/g 순으로 조사되었으며, AVS는 동막 0.025 ± 0.018 > 장화 0.008 ± 0.005 > 영종 0.004 ± 0.002 > 송도 0.002 ± 0.004 mg/g 순으로 조사되었고, IL은 2.4~3.8% 수준으로 송도 > 동막 > 영종 > 장화 순으로 조사되었다.

Table 7. Concentration of water quality in nearby sea areas by tidal flat.

Area	pH	DO (mg/L)	Salinity (psu)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	TN ($\mu\text{g/L}$)	TP ($\mu\text{g/L}$)	DIN ($\mu\text{g/L}$)	DIP ($\mu\text{g/L}$)	Chl-a ($\mu\text{g/L}$)	SD* (m)	DO (%)
JH	8.0	8.9	27.1	3.1	1.4	604.2	29.2	507.6	25.2	3.2	0.9	102.1
DM	8.1	8.9	28.4	2.7	1.4	491.4	25.8	404.3	22.2	4.1	0.8	104.3
SD	8.1	8.6	28.5	3.0	2.0	697.2	62.5	610.4	46.9	5.0	0.6	104.8
YJ	8.0	8.6	29.7	2.8	1.5	307.3	23.4	246.3	16.3	2.0	1.6	106.7

* : Secchi depth(Transparency)

3.2 해양수질 및 갯벌특성 연계 해양환경 건강성 평가

3.2.1 해수질 일반항목

갯벌 인근 해역 12개 수질항목 측정 및 분석결과를 Table 7로 요약하였다.

pH 8.0~8.1의 농도범위로 해수수질 생활환경 기준(6.5~8.5)을 만족하였으며, DO는 8.6~8.9 mg/L, 염분 27.1~29.7 psu로 조사되었다. 유기물 지표인 COD는 2.7~3.1 mg/L의 범위로 장화 > 송도 > 영종 > 동막 순으로 농도가 높았고, TOC는 1.4~2.0 mg/L 범위, 송도 > 영종 > 장화·동막 순으로 농도가 높았다. TN은 307.3~697.2 $\mu\text{g/L}$ 범위로 송도 > 장화 > 동막 > 영종 순으로 농도가 높았고, TP는 23.4~62.5 $\mu\text{g/L}$, 송도 > 장화 > 동막 > 영종 순으로 농도가 높았다. DIN은 246.3~640.4 $\mu\text{g/L}$ 범위로 송도 > 장화 > 동막 > 영종 순으로 농도가 높았고, DIP는 16.4~46.9 $\mu\text{g/L}$, 송도 > 장화 > 동막 > 영종 순으로 농도가 높았다. 클로로필-a는 2.0~5.0 $\mu\text{g/L}$ 범위로 송도 > 동막 > 장화 > 영종 순으로 조사되었고, 투명도는 영종이 1.6 m로 투명도가 높았고 이외 지역은 0.6~0.9 m로 1 m 미만의 평균 투명도를 나타내었고, 저층 DO 포화도는 모든지역에서 100% 이상으로 양호하였다.

3.2.2. 해양수질평가지수 (WQI)

해수수질은 해양수산부 고시(해양환경기준-생태기반 해수수질 기준)에 따라 1~5등급(매우 좋음-좋음-보통-나쁨-아주나쁨)으로 구분하여 평가된다(해양수산부, 2018b). 본 연구지역

인 인천·강화연안은 서해중부 생태구역에 해당한다. 항목별 기준값은 Chl-a 2.2 $\mu\text{g/L}$, 저층 DO 포화도 90%, 표층 DIN 425 $\mu\text{g/L}$, 표층 DIP 30 $\mu\text{g/L}$, 투명도 1.0 m를 설정하였으며, Table 6의 각 지역별 DIN, DIP, Chl-a, 투명도, 저층 DO 포화도 수질자료를 이용하여 산정하였다. 해양수질평가지수 계산식은 식 (1)과 같다.

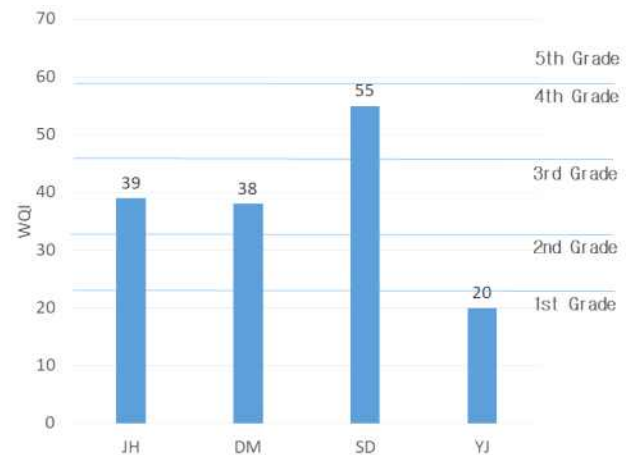


Fig. 5. Water Quality Index(WQI) by sea area.

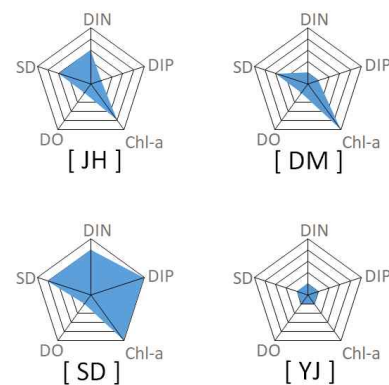


Fig. 6. Factor analysis for each item of WQI.

Table 8. Sediment contamination grade and addition score for estimating tidal flat contamination.

Item	COD(mg/g · dry weight)							AVS(mg/g · dry weight)						
grade	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Conc.	≤ 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	25 ~ 30	> 30	≤ 0.05	0.05 ~ 0.10	0.10 ~ 0.15	0.15 ~ 0.20	0.20 ~ 0.25	0.25 ~ 0.30	> 0.30
Score	0	8.3	16.7	25.0	33.3	41.7	50.0	0	8.3	16.7	25.0	33.3	41.7	50.0

Table 9. Seawater pollution grade and addition score for tidal flat pollution calculation.

Item	COD(mg/L)							DIN(mg/L)							DIP(mg/L)						
grade	1st		2nd		3rd		etc	1st		2nd		3rd		etc	1st		2nd		3rd		etc
Conc.	≤	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	>	≤	0.15	0.30	0.45	0.60	0.80	>	≤	0.015	0.030	0.040	0.050	0.070	>
	0.5	~ 1.0	~ 1.5	~ 2.0	~ 2.5	~ 3.0	3.0	0.15	~ 0.30	~ 0.45	~ 0.60	~ 0.80	~ 1.00	1.00	0.01 5	~ 0.030	~ 0.040	~ 0.050	~ 0.070	~ 0.090	0.090
Score	0	5.55	11.1	16.65	22.2	27.75	33.3	0	5.55	11.1	16.65	22.2	27.75	33.3	0	5.55	11.1	16.65	22.2	27.75	33.3

(1) 수질평가지수 (WQI, Water Quality Index)

$$= 10 \times [\text{저층산소포화도}(DO)] + 6 \times$$

$$[(\text{식물플랑크톤 농도}(Chl-a) + \text{투명도}(SD))/2]$$

$$+ 4 \times [(\text{용존무기질소 농도}(DIN) +$$

$$\text{용존무기인 농도}(DIP))/2]$$

갯벌 인근 해역의 수질평가지수 결과를 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 나타내었다. 각 해역별 WQI는 영종 20점(1등급, 매우 좋음) < 동막 38점(3등급, 보통) < 장화(39점, 보통) < 송도 55점(4등급, 나쁨) 순으로 평가되었다. 요인분석 결과 송도갯벌 해역은 Chl-a, DIP, DIN 및 투명도 항목, 장화갯벌 해역은 DIN, Chl-a와 투명도, 동막갯벌 해역은 Chl-a 및 투명도가 수질등급 하락에 큰 영향을 준 것으로 평가되었다. 영종갯벌 해역은 5개 항목 모두 최저점수로 1등급(매우 좋음)으로 평가되었다.

3.2.3. 부영양화정화지수(CIET)

부영양화정화지수(CIET, Cleanup Index of Eutrophication)는 부영양화 물질에 의한 해양 퇴적물의 오염정도를 가늠하는 척도로서, 부영양화 관련 3항목(IL, COD, AVS)로부터 산출된 정화

지수를 일컫는다. 부영양화 관련 정화의 범위는 부영양화물질 평가항목별로 산출된 평가점수를 합산한 값이 6 이상인 구역이다(해양수산부, 2018c; 이정민 등, 2021). 부영양화정화지수 계산식은 식 (2), 각 항목별 평가점수는 Table 10과 같다.

(2) 부영양화정화지수 (CIET)

$$= \text{강열감량}(IL) \text{ 평가점수} +$$

$$\text{화학적산소요구량}(COD) \text{ 평가점수} +$$

$$\text{산취발성황화물}(ABS) \text{ 평가점수}$$

Table 10. Evaluation score for each sediment item concentration used in CIET calculation.

Item	Concentration	Score
IL (%)	< 5	0
	< 15	3
	≥ 15	6
COD (mg/g)	< 13	0
	< 20	1
	< 30	2
	< 40	4
	≥ 40	6
AVS (mg/g)	< 0.6	0
	< 1	1
	< 5	2
	< 10	4
	≥ 10	6

Table 5. 갯벌 표층 퇴적물의 COD, AVS 및 장열감량 결과를 이용하여 부영양화물질 정화 지수를 산출한 결과 모두 최저기준농도 이하로 나타나 CIET '0'으로 산정되었다.

3.2.4. 갯벌 건강상태(오염도 등급)

국토해양부 '갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용방안 연구(2005)'에서 제시한 방법으로 갯벌 퇴적물 건강상태 등급을 평가하였다. 입력자료는 앞서 제시한 갯벌 인근 해역 수질(COD, DIN 및 DIP)과 갯벌 퇴적물(COD 및 AVS)자료를 이용하였으며 각 항목별 점수의 합산으로 등급을 평가하였다. 등급 산정에 필요한 수질 및 퇴적물의 오염등급 구분과 가산 점수 기준을 Table 8~9와 같이 나타내었다. 수질 및 퇴적물의 항목별 가산 점수의 합에 수질(20%) 및 퇴적물(80%)의 가중치를 곱하여 총 점수로 갯벌 퇴적물 오염등급을 평가하였다. 0~20 점은 I 등급으로 오염도가 가장 낮은 수준이며, 40점 이하 II등급, 60점 이하 III등급, 80점 이하 IV등급 그리고 81~100점은 V등급으로 오염도가 가장 높은 등급이다.

조사지역 갯벌의 항목별 가산 점수 및 최종 평가된 건강상태(오염도 등급)를 Table 11과 같이 나타내었다.

Table 11. Result of tidal Flat Health Status Rating.

Area	Water quality			Sediment		Total	Grade
	COD	DIN	DIP	COD	AVS		
JH	33.30	16.65	5.55	0	0	11.1	I
DM	27.75	11.10	5.55	0	0	8.9	I
SD	33.30	22.20	16.65	0	0	14.4	I
YJ	27.75	5.55	5.55	0	0	7.8	I

해수질 및 퇴적물 오염도를 이용한 갯벌 건강상태 평가결과 모든 지역에서 I 등급으로 오염도가 가장 낮은 수준으로 조사되었으며 총점은 영종 > 동막 > 장화 > 송도 순으로 건강상태가 양호한 것으로 평가된다.

IV. 결론

유네스코 유산구역 확대 대상 강화연안 장화리 및 동막리 갯벌, 인천연안 영종 및 송도 갯벌을 대상으로 갯벌 퇴적물의 입도 및 이화학적 특성과 해양수질 및 갯벌특성을 연계한 해양환경 건강성을 평가하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

조사대상 갯벌 퇴적물의 입도 및 이화학적 특성을 살펴본 결과, 퇴적물의 조성은 평균적으로 silt 성분이 많은 sandy silt(sZ) 유형으로 모래 펄 퇴적물이 우세하였으며, 실트(75.0%) > 모래(22.5%) > 점토(2.5%) 순으로 높은 비율을 나타내었다. 장화 및 영종 갯벌은 강한 조류영향 또는 연안류 등에 의해 모래 비율이 상대적으로 높았으며, 동막과 송도 갯벌은 지리적 특성에 의해 실트 비율이 다른 두지역에 비해 높게 분석되었다. 게르마늄, 셀레늄, 리튬 등의 건강영향물질은 지각 평균 풍부도와 유사하거나 다소 높은 비율을 나타내었으며, 실트 비율이 높은 동막과 송도갯벌 퇴적물에서 건강영향물질 풍부도가 더 높았다. 갯벌 퇴적물 중금속 분석결과, 비소 등 8개 항목 모두 해양환경 주의기준(TEL) 및 관리기준(PEL)을 만족하는 것으로 조사되었다. 반면 Cd의 농도는 해양환경 주의기준(TEL) 대비 39~56% 수준이지만 지각 함유량 대비 3.2~4.7 배 수준으로 높게 분석되었고, Cu의 경우 주의기준(20.6 mg/kg) 대비 58~90% 수준으로 나타나 중금속 오염이 우려된다. 표층 퇴적물의 TOC 농도는 캐나다 온타리오주 최저영향기준(1.0%)의 36~44% 수준으로 대다수 해양저서생물이 서식 가능한 수준으로 조사되었다.

해양수질과 갯벌특성을 연계한 해양환경 건강성을 평가하였다. 영종 갯벌 해역의 해양수질평가지수(WQI)는 1등급(매우 좋음), 강화

(장화 및 동막)갯벌 해역은 3등급(보통), 송도갯벌 해역은 4등급(나쁨)으로 조사되었다, 요인분석 결과 송도 갯벌 해역은 Chl-a, DIP, DIN 및 투명도 항목에서 오염도가 높았으며 인근 하수처리시설, 항·포구, 시화호 등의 육상오염원의 영향으로 추정된다. 강화갯벌(장화·동막) 해역은 DIN과 투명도가 수질등급 하락에 주요한 영향을 미쳤으며 한강 및 임진강 등의 영양염류와 강한 조류의 영향으로 투명도가 낮은 것으로 평가되었다. 영종갯벌은 1등급(매우 좋음)으로 선정되었다. 갯벌 표층 퇴적물 부영양화지수(CIET)는 모든 갯벌에서 최저기준농도 이하로 나타나 CIET '0'으로 평가되었고, 갯벌 퇴적물 건강상태를 조사한 결과 모든 갯벌에서 I 등급으로 오염도가 가장 낮은 청정한 상태임을 확인하였다.

인천 지역 주요 갯벌의 입도 및 건강상태를 조사한 결과를 종합해 보면, 조사대상 전체 갯벌의 퇴적물 건강상태는 오염도가 낮은 청정한 상태로 조사되었다. 그러나 송도갯벌은 silt 와 clay의 비율이 높아 입자의 표면적이 넓고 오염물질 축적 가능성이 크기 때문에 중금속과 TOC 등의 오염도가 타 지역에 비해 높은 것으로 평가되며, 향후 인접한 환경기초시설, 유수지 및 인천신항 등의 육상오염원 관리가 지속적으로 요구된다.

참고문헌

- Aparna P. Shreenath, Muhammad Atif Ameer, Jennifer Dooley. (2022) Selenium Deficiency, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482260/> Last Update: July 19, 2022, accessed Dec 16, 2022.
- Aso H, Suzuki F, Ebina T, Ishida N. (1989) Antiviral activity of carboxyethylgermanium sesquioxide (Ge-132) in mice infected with influenza virus. *J Biol Resp. Modif* 8: 180-189.
- D. Persaud, R. Jaagumagi and A. Hayton (1993) Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario, ISBN 0-7778-9248-7.
- EAAFP (2017) Incheon Songdo Tidal Flat, EAAF145.
- Förstner, U. and G.T.W. Wittmann (1981) Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer, Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Horowitz, A.J., (1991) A primer on sediment-trace element chemistry. Lewis Publishers.
- Nakamura T, Nagura T, Sato K, Ohnishi M. (2012) Evaluation of the effects of dietary organic germanium, ge-132, and raffinose supplementation on caecal flora in rats. *Biosci Microbiota Food Health*. 2012;31(2):37-45. doi: 10.12938/bmfh.31.37. Epub 2012 Apr 20. PMID: 24936347; PMCID: PMC4034287.
- Post, R. M. (2018). The New News about Lithium: An Underutilized Treatment in the United States. *Neuropsychopharmacology*, 43(5), 1174-1179. <https://doi.org/10.1038/npp.2017.238>.
- Prnai L, Arimori S. (1991) Protective effect of carboxyethylgermanium sesquioxide (Ge-132) on superoxide generation by 60Co-irradiated leukocytes. *Biotherapy*, 3: 273-279.
- Rudnick, R. L., Gao, S., Holland, H. D., & Turekian, K. K. (2003) Composition of the continental crust. *The crust*, 3, 1-64.
- Sato I, Nishimura T, Kakimoto N, Suzuki H, Tanaka N. (1988) Prevention of pulmonary metastasis of Lewis Lung carcinoma and activation of murine macrophages by a novel organic germanium compound. *PCAGeS J Biol Resp Modif* 7: 1-5.
- Sugiya Y, Sakamaki S, Sugita T, Abo Y, Satoh H. (1986) Subacute oral toxicity of carboxyethylgermanium sesquioxide (Ge-132) in rats. *Ouyou Yakuri* 31:

- 1181-1190.
- The Soil Triangle (2022) earthwiseagriculture.net, accessed Dec 3, 2022, <https://earthwiseagriculture.net/the-soil-triangle/>.
- 국토해양부 (2005) 갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용방안 연구
- 권문주 (2022) 소중한 자연 유산, '갯벌', 기호일보 2022. 6. 13. 19면.
- 우준식, 이효진, 박종규, 박경규, 조동진, 장동준, 박소정, 최만식 and 유정규. (2019). 한반도 연안 퇴적물의 중금속 배경농도 및 오염도 평가. 바다, 24(1), 64-78.
- 우한준 (2013) 한국 서해안 강화 남부 갯벌 퇴적물 및 지형의 장기적인 변화, 한국습지학회지 제 15권 제4호 (2013), 493-500.
- 이정민, 서상원, 박선영, 황수연, 이연희, 유희중, 성지홍, 권문주 (2021) 소규모 어항 수질개선을 통한 해양친수도시 조성, 2022 인천보건환경연구원보 제 18권, 370-382.
- 해양수산부 (2013) 2012년 연안습지 기초조사 (기본조사), 11-1192000-000004-10.
- 해양수산부 (2018a) 2018 전국갯벌면적조사.
- 해양수산부 (2018b) 해양환경기준, [시행 2018. 1. 23.] [해양수산부고시 제2018-10호, 2018. 1. 23., 일부개정.].
- 해양수산부 (2018c) 해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정, [시행 2018. 2. 14.] [해양수산부고시 제2018-15호, 2018. 2. 14., 전부개정.].
- 해양수산부 (2021) 국가 해양생태계 종합조사 2021 [서해·남해서부], 11-1192000-000476-10.