

소규모 어항 수질개선을 통한 해양친수도시 조성

이정민*, 서상원, 박선영, 황수연, 이연희, 유희중, 성지홍, 권문주
인천보건환경연구원 해양조사과

Assessment of Seawater and Sediment in Small Scale Fishery Harbors, Incheon

Chong-min Lee, Sang-won Seo, Sun-young Park, Su-yeon Hwang, Yeon-hee Lee,
Hee-jong Yoo, Ji-hong Seong, Mun-ju Kwon

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

Abstract

The purpose of this study is to assess marine environment including water quality and sediments with various assessment indices and standards in 10 small scale fishery harbors, which are close and easy to access to Incheon citizen and to find ways to improve the marine environment through the temporal-spatial analysis. The Hwasu and Sorae harbors had the highest levels in both organic matters such as COD, TOC and Nutrients like TN, TP. but also showed the lowest levels in Dissolved Oxygen and Salinity, which means those harbors had high possibility to be contaminated by river sources. The levels of heavy metals including copper, lead, zinc, mercury, etc. from seawater samples satisfied the marine environmental standards. We could find out the WQI from 22 to 54, which ranged from I to IV and the CIET from 0 ~ 6 (cleanup and restoration needed over 6). Through the analysis of PAHs with 16 items, we could understand that most of target harbors had emission origins from combustion sources except one harbor, which is related to emission origin from oil spill. And the kriging method using spatial interpolation led us to expect the spatial-temporal WQI trend and characteristics in the study area.

Key words: Assessment indices, Heavy metals, WQI, CIET, PAHs, Kriging

I. 서론

21세기 해양환경시대로 접어들면서 해양 환경 보전을 위한 국가나 사회의 다양한 활동이나 정책 등이 제시되고 있는 반면, 이에 대한 합리적인 수질관리와 효율적인 환경진단을 위한 기초자료 축적이 매우 미흡한 상황이며 이를 위한 체계적인 연구계획과 지속적인 모니터링 방안이 검토되는 것도 충분히 고려되어야 한다. 또한, 해양환경의 이용에 따른 훼손에 대해 면밀히 조사하고 친환경적인 대책을 마련하는 것도 필수불가결한 사항이다.

인천 연안은 한강, 임진강, 예성강으로부터 유입되는 다량의 토사와 외해에서 유입되는 퇴적물이 해수의 순환에 의해 연안에 퇴적되는 곳으로 복잡한 리아스시식 해안과 저서생물의 서식지가 되고 인근해역에 영양소를 공급하는 해양환경이 잘 발달된 지역이다.¹⁾

우리나라 해역은 해양환경관리법 제8종에 따른 해양환경기준을 연안해역과 근해역을 분류인자에 의해 동해생태구, 대한해협생태구, 서남해역생태구, 서해중부생태구, 제주생태구로 크게 5개 구역, 세부적으로 65개의 연안으로 나누었으며, 각각의 해역에 분류인자를 고려해 각기 다른 기준값을 적용하여 수질평가지수(WQI, Water Quality Index)에 의한 등급평가가 마련되어 있다.²⁾

해외에서는 해양환경을 효과적으로 파악하기 위해 지수를 빈번히 활용하고 있으며, 분야별로 다양한 지수를 이용하고 있다. 해양수질 평가를 위하여 부영양화지수(eutrophication index), 수질오염지수(water pollution index)를 사용하고 있다.³⁾ 해양저질 평가에서는 오염유입지수(pollution load index), 농집지수(geoaccumulation index) 등을 적용하고 있는 추세이다.⁴⁾

아울러 최근에 해수나 퇴적물 가운데 주로 수계로 유입되어 주로 퇴적물에 축적되어 해

양환경에 지대한 영향을 주고 있는 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAHs)에 대한 관심도 증가하고 있는데, PAHs는 대규모 산업단지와 인구 밀집지역인 도시 지역의 퇴적물에서 높게 나타나고, 저분자 PAHs는 해양생물에 독성을 나타내고, 고분자 PAHs는 발암성 및 돌연변이성 등의 영향을 보여 상당한 주목을 받고 있는 물질이다.

따라서 본 연구에서는 본 연구에서는 해양 환경보전과 더불어 친수도시 조성을 위하여 시민들의 접근이 많은 인천시 소재의 항·포구를 대상으로 해양환경관리법에서 적용하고 있는 다양한 지수(WQI, CIET 등)와 PAHs 항목들에 대한 오염도 평가와 시·공간적인 오염원을 파악하여 그에 따른 원인분석과 개선방안 마련을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 조사대상 및 방법

2.1. 조사대상

본 연구에서는 2021년도 1월부터 11월까지 시민의 접근성이 높고 인천을 대표하는 소래포구 등 주요 항·포구 10개 지점(Table 1)을 선정하여 해수 및 해저퇴적물을 채취하여 분석하였다.

Table 1. GPS Information of Target area in this study

No	Target area	north latitude	east latitude
1	Soraepogu	37° 23' 56"	126° 44' 27"
2	Manseok	37° 29' 31"	126° 37' 18"
3	Hwasu	37° 29' 20"	126° 37' 49"
4	Yeonan	37° 27' 22"	126° 36' 04"
5	Bukseong	37° 28' 59"	126° 36' 52"
6	NamHangyueoseon	37° 27' 10"	126° 36' 44"
7	Sammok	37° 29' 60"	126° 27' 15"
8	Oepo	37° 41' 59"	126° 22' 46"
9	Eoryujeong	37° 38' 37"	126° 20' 42"
10	Jindu	37° 15' 16"	126° 29' 54"



Fig. 1. Target harbors in Incheon area

2.2. 조사방법

2.2.1. 시료 채취 방법

시료 채취는 분기별로 1회씩(1, 4, 7, 11월) 현장조사와 더불어 시료채취를 진행하였으며, 해양환경공정시험방법에 준하여 소규모 어항의 해수질 파악을 위해 항목별로 해수시료를 2L 무균 채수병, plastic 무균병, amber 유리병 등에 채수하였고, 동시에 Grab을 이용하여 해저퇴적물을 현장에서 약 1kg을 채취하여 투명백 등에 밀봉하고 실험실로 운반하여 곧바로 분석을 실시하였다.

2.2.2. 분석 항목 및 방법

본 연구에서는 Table 2에서 보는바와 같이 총인, 총질소 등 해양수질 항목 24종과 TOC, AVS, 강열감량 등 해저퇴적물 13종에 대하여 국립수산물과학원고시(2021-06호) 「해양환경공정시험기준」의 항목별 시험기준 중 해수 및 퇴적물 시험기준에 준하여 분석이 이루어졌다. 또한 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)는 총 16개의 세부 항목으로 나누어 분석하였다.

전체 채취시료는 80건이며, 이중 해수 40건, 해저 퇴적물 40건으로 구성이 되어있고,

Table 2. Analysis items for this study

	Analysis items
seawater (24)	Temperature, pH, DO, Salinity, COD, Transparency, Chl-a, T-N, T-P, CN, Phenols, Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, ⁶⁺ As, PAHs Hg, Ni, DIN, DIP, TOC, DO Saturation
sediments (13)	TOC, COD, AVS, IL, Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, As, Hg, Ni, PAHs

해수시료 분석에 있어서 수온, pH, 용존산소, 염분, 전기전도도, 저층산소포화도 등의 현장측정항목은 다항목측정기(YSI, ProDSS)를 사용하여 분석하였고, 투명도는 30cm 투명도판(Secchi disk)을 이용하여 측정하였고 COD는 알칼리성 과망간산칼륨법으로 측정하였고, 클로로필-a는 UV 분광광도계를 이용하여 663, 645, 630, 750nm에서 흡광도를 측정하였고, 총인, 총질소, 시안, 암모니아성질소, 질산성질소, 페놀, 인산염인 등은 연속흐름법에 준하여 수질자동분석기(SKALAR)를 이용하였고, 구리, 납, 아연 등 중금속류는

유도결합플라즈마-질량분석기(NexION 2000)로 분석하였고, 다환방향족 탄화수소(PAHs)는 가스 크로마토그래프 질량분석기(GCMS, Agilent)를 이용하여 분석하였다.

해저퇴적물 시료에 대한 주요항목별 분석법은 함수율은 건조기법, 산화발성황화물은 황검지관법, 강열감량은 고온연소법, 총유기탄소는 TOC analyzer, 중금속은 ICP-MS를 이용하였고, 수은 분석은 고형수은분석기(MA-2)를 활용하였으며, PAHs는 GC/MS법을 이용하여 분석하였으며, 자세한 특징과 세부 분석조건은 아래와(Table 3, 4) 같다.

또한 각 항목들의 농도분포의 경향과 특성을

알아보기 위해 연구지역의 모든 구역을 측정하여야 하지만 이는 많은 시간과 비용이 소모됨에 따라 실측되지 않은 공간은 공간보간법(Spatial Interpolation)을 사용하였다. 공간보간법은 공간상 근접해 있는 지점들일수록 멀리 떨어져 있는 지점들 보다 유사한 값을 가지는 강한 긍정적 자기상관성에 따라 실측되지 않는 지점의 값을 추정하는 것이다.

이러한 추정을 위해 국지적 보간법이면서 정밀보간법의 가장 대표적인 크리깅(Kriging) 방법을 채택하였으며, GIS소프트웨어의 정규 크리깅(Ordinary kriging)법을 이용하였다.⁶⁾

Table 3. Analysis condition for PAHs using GC/MSMS

Instrument	Operation Condition	
GC/MSMS	column	Db-5MS(30m × 0.25mm × 0.25μm)
	filling	5% phenyl, 95% methyl polysiloxane
	carrier gas & flow	He(1.5 mL/min)
	detector gas & velocity	nitrogen(30ml/min)
	Injection temperature	270℃
	transfer line temperature	230℃
	ion source temperature	230℃
	Oven initial temperature	90℃ (2min)
	Oven condition	90℃ (2min)→260℃ (2min)→300℃ (6min)
	heating velocity	4.0~10℃/min

Table 4. Physical and Chemical Characteristics of PAHs items

PAHs	chemical formula	melting point (℃)	boiling point (℃)	vapor pressure (mmHg, 25℃)	water solubility(ug/L)
Naphthalene	C ₁₀ H ₈	80	218	7.1×10 ⁻²	31700
Acenaphthylene	C ₁₂ H ₈	93	275	6.7×10 ⁻³	NR
Acenaphthene	C ₁₂ H ₁₀	96	279	2.2×10 ⁻³	3330
Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	117	295	6.0×10 ⁻⁴	1980
Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀	100	340	1.2×10 ⁻⁴	1290
Anthracene	C ₁₄ H ₁₀	218	342	6.0×10 ⁻⁶	73
Fluoranthene	C ₁₆ H ₁₀	110	333	9.2×10 ⁻⁶	260
Pyrene	C ₁₆ H ₁₀	156	404	4.5×10 ⁻⁶	135
Benzo[a]anthracene	C ₁₈ H ₁₂	159	435	2.1×10 ⁻⁷	14
Chrysene	C ₁₈ H ₁₂	256	448	6.4×10 ⁻⁹	20
Benzo[b]fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	168	393	NR	20
Benzo[k]fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	217	480	9.6×10 ⁻¹¹	800
Benzo[a]pyrene	C ₂₀ H ₁₂	177	496	5.6×10 ⁻⁹	1.6
Dibenzo[a,h]anthracene	C ₂₂ H ₁₂	162	534	NR	NR
Indeno[1,2,3-c,d]pyrene	C ₂₂ H ₁₄	262	535	NR	0.3
Benzo[g,h,i]perylene	C ₂₂ H ₁₂	273	542	1.01×10 ⁻¹⁰	2.5×10 ⁻³

III. 결과 및 고찰

3.1. 해수질 결과

3.1.1. 해수질 일반항목

연구대상지역의 일반적인 해수질 조사결과를 살펴보면, 염분이나 용존산소 등의 현장 측정 항목과 유기물, 질소나 인등의 영양성분 항목에 있어서 화수부두와 소래포구에서 특징적인 점을 보였다. 즉, 타 지점에 비해 두 지점에서 최고 대비 염분 농도(27%)와 용존산소(15%) 낮게 나타났고, COD(98%)나 TOC(90%) 같은 유기물질 농도는 타 지점 대비 높은 상황을 보였으며, 총인과 총질소 같은 영양물질은 최저 농도대비 각각 5.1배, 8.9배 정도 높은 수치를 나타내었다. 다시 말하면, 이 두 지점은 타 지점에 비해 용존산소가 낮고 유기물질과 영양물질이 많으며, 해수 보다는 담수나 외부영향을 많이 받은 것으로 판단된다(Table 5).

Table 5. Water quality of study area

habors	pH	DO (mg/L)	염분 (psu)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
Sammok	7.7	9.50	26.06	2.50	1.038	0.039
Bukseong	7.8	8.98	25.87	3.15	1.781	0.072
Hwasu	7.6	8.12	22.51	4.48	3.889	0.162
Manseok	7.8	9.11	27.08	3.74	2.014	0.088
Yeonan	8.0	9.12	29.59	2.35	0.661	0.039
Oepo	7.8	9.42	26.97	3.37	0.860	0.068
Eoryujeong	7.9	9.38	27.88	2.56	0.712	0.048
Jindu	7.8	8.96	30.70	2.38	0.439	0.037
Soraepogu	7.7	8.16	22.72	4.30	2.758	0.189
NamHang yueoseon	7.8	9.07	29.80	2.26	0.660	0.044

반면, 진두항의 경우 타 지점에 비해 염분이 높고 영양물질과 유기물질의 농도가 현저히 낮은 매우 양호한 해수 수질을 보였다(Fig 2).

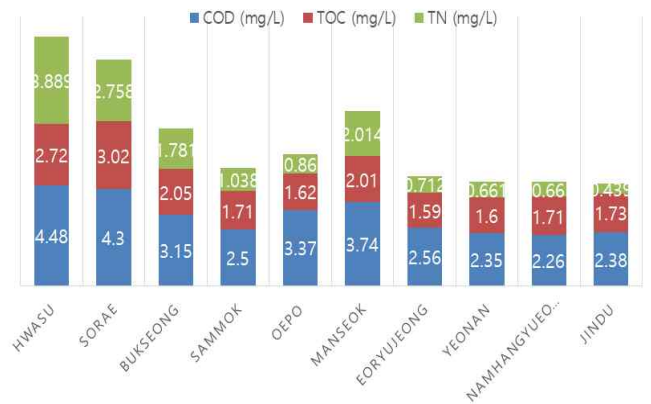


Fig. 2. accumulated levels of organic matters and nutrients

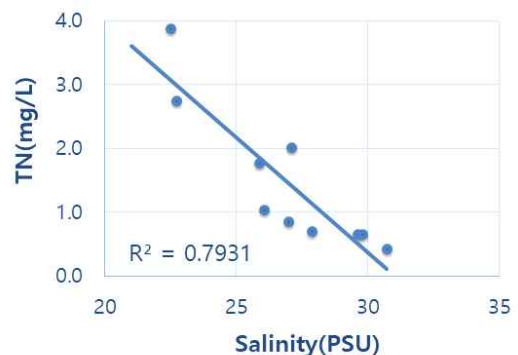
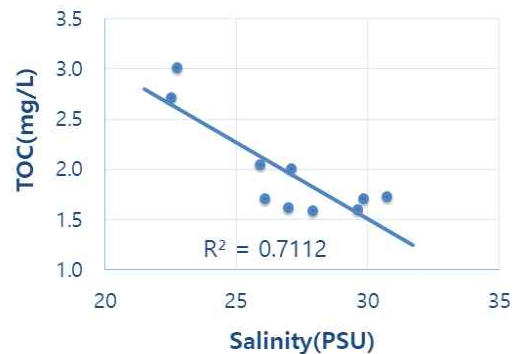
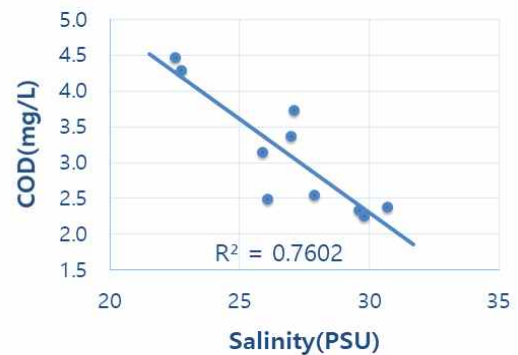


Fig. 3. The correlation between salinity and analysis items

해수질 일반항목 중 염분과 유기물질 및 영양물질간의 상관성을 살펴보니, 주로 COD, 총유탄소, 총질소와 높은 상관성이 파악되었고, 특히, 염분과 총질소가 가장 높은 역의 상관성($R^2=0.7931$)을 보여, 염분이 낮은 해수에서는 총질소 같은 영양물질 농도가 높은 담수가 많이 유입됨을 예측할 수 있었다(Fig 3).

3.1.2. 해수질 중금속

연구지역 해수에서의 중금속 농도는 아래 표 6과 같으며, 해양생태계 보호기준 중 단기기준을 모두 만족하였고, 장기기준의 경우, 화수부두와 소래포구에서 구리, 아연, 니켈 항목이 기준을 초과하였고, 만석부두와 북성포구에서 구리와 니켈이 기준을 넘어섰고, 남항유어선부두의 경우는 구리와 아연이 초과하였고, 연안부두의 경우는 구리항목에서 장기기준을 초과하였다.

대상 10지점 가운데 화수부두의 경우 타 지점 보다 많은 초과항목(3종)을 보였고, 해당항목의 농도수준 또한 장기기준의 2.2 ~ 4.5배를 상회하는 높은 수준을 보였다. 소래포구의 경우도 3가지 항목에서 장기기준을 초과하였으며, 특히 니켈의 경우 기준대비 1.3 ~ 4.3배 높은 결과를 보였다.

Table 6. Heavy metal levels in seawater (unit : $\mu\text{g/L}$)

	Cu	Pb	Zn	As	Cd	Hg	Ni	Cr ⁶⁺
short term	3.0	7.6	34	9.4	19	1.8	11	200
long term	1.2	1.6	11	3.4	2.2	1.0	1.8	2.8
Sammok	0.93	0.03	6.99	1.20	0.12	0.19	1.25	0.08
Bukseong	1.71	0.03	8.51	1.48	0.08	0.19	2.10	0.22
Hwasu	2.66	0.03	24.22	2.14	0.19	0.20	8.04	0.54
Manseok	1.52	0.03	9.37	1.33	0.12	0.17	4.40	0.37
Yeonan	1.48	0.03	8.64	1.37	0.11	0.17	1.70	0.15
Oepo	0.87	0.03	5.07	1.19	0.09	0.20	0.80	0.11
Eoryujeong	0.80	0.03	4.47	1.20	0.09	0.21	0.80	0.13
Jindu	1.10	0.05	9.94	1.40	0.09	0.18	1.18	0.19
Soraeopogu	1.56	0.05	20.12	1.34	0.14	0.19	7.76	0.18
NamHang yueseon	2.61	0.04	16.86	1.31	0.10	0.23	1.60	0.16

* 단기기준 : 1회성 관측값과 비교 적용

** 장기기준 : 연간평균값(최소 사계절 조사 자료)과 비교 적용

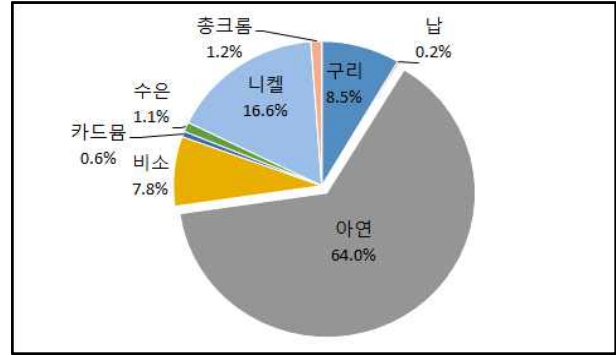


Fig. 4. The mean portion of heavy metal in seawater

그림 4와 같이 해수 중의 중금속 성분 8종의 평균 분율을 살펴보면, 대부분이 아연 > 니켈 > 구리 > 비소 > 총크롬 > 수은 순으로 높게 나타남을 알 수 있었다.

또한, 해수수질기준 가운데 사람의 건강보호기준에 해당하는 중금속 8종에 대해서도 모두 기준을 만족시키는 결과를 보였다.

Table 7. Standard for protecting human health

(unit : mg/L)

items	As	Cd	Pb	Zn	Cu	CN	Hg	Cr ⁶⁺
	0.05	0.01	0.05	0.1	0.02	0.01	0.005	0.005

3.1.3. 해양수질평가

수질평가지수(WQI)는 해역의 수질을 진단·평가하는데 많이 사용되어지는 지수로서, 용존무기질소(DIN), 용존무기인(DIP), Chl-a, 투명도, 저층산소포화도 항목별 가중치를 고려하여 아래와 같이 산정한다.

$$\begin{aligned} \text{수질평가지수(WQI, Water Quality Index)} \\ = 10 \times (\text{DO}) + 6 \times [(\text{Chl-a}) + (\text{SD})/2] + \\ 4 \times [(\text{DIN}) + (\text{DIP})/2] \end{aligned}$$

여기서, DO는 저층산소포화도, Chl-a는 식물성 플랑크톤 농도, SD는 투명도, DIN은 용존무기질소, DIP는 용존무기인이다.

WQI를 통해 산정된 값을 활용하여 수질등급을 점수별로 매우 좋음(I 등급) ~ 아주 나쁨(V 등급)까지 5단계로 나뉜다(Table 8).

Table 8. Grade and Level of WQI

Grade	Level of Water Quality Index
I (very good)	under 23
II (good)	24 ~ 33
III (normal)	34 ~ 46
IV (bad)	47 ~ 59
V (very bad)	over 60

WQI는 해역별로 기준값이 상이하하며, 기준값은 「수질평가지수 항목의 해역별 기준값」 중 「서해중부」 생태구역을 적용한다(Table 9).

Table 9. WQI Score criteria based on mid-west sea

SCORE	DIN ($\mu\text{g/L}$)	DIP ($\mu\text{g/L}$)	Chl-a ($\mu\text{g/L}$)	DO SAT(%)	SD(m)
1	≤ 425	≤ 30	≤ 2.2	≥ 90	≥ 1
2	< 467.5	< 33	< 2.42	> 81	> 0.9
3	< 531.25	< 37.5	< 2.75	> 67.5	> 0.75
4	< 637.5	< 45	< 3.3	> 45	> 0.5
5	≥ 637.5	≥ 45	≥ 3.3	≤ 45	≤ 0.5

본 연구에서 지점별 해양수질평가지수(WQI)의 평균값은 22~54 수준(I~IV)등급으로 주로 2,3분기에 대체적으로 해양수질평가지수가 상승하는 경향을 보였다(Fig 5).

WQI 등급 분포는 I 등급 2지점, II 등급 1지점, III 등급 1지점, IV 등급 6지점을 보였고, 가장 좋게 나타난 I 등급은 연안부두였고, 가장 좋지 않게 나타난 곳은 IV 등급으로 삼목항, 북성포구, 화수부두, 외포항, 어류정항, 소래포구가 해당 되었다.

각 지점에서 항목별 등급의 결정인자로서 I 등급의 경우 연안부두에서는 낮은 Chl-a 농도의 기여도가 컸으며, IV 등급의 경우 화수부두와 소래포구는 높은 DIN, DIP, Chl-a가 주로 기여하였으며, 외포항과 어류정항의 경우는 낮은 투명도로 파악되었으며 삼목항과 북성포구는 높은 Chl-a와 DIP가

결정인자가 되었다(Fig 6).

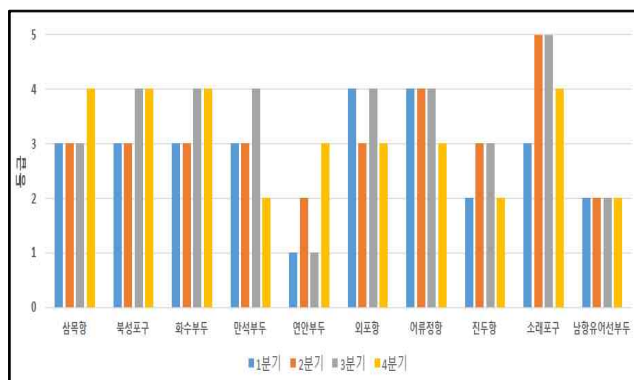


Fig. 5. WQI level for each fishery harbor

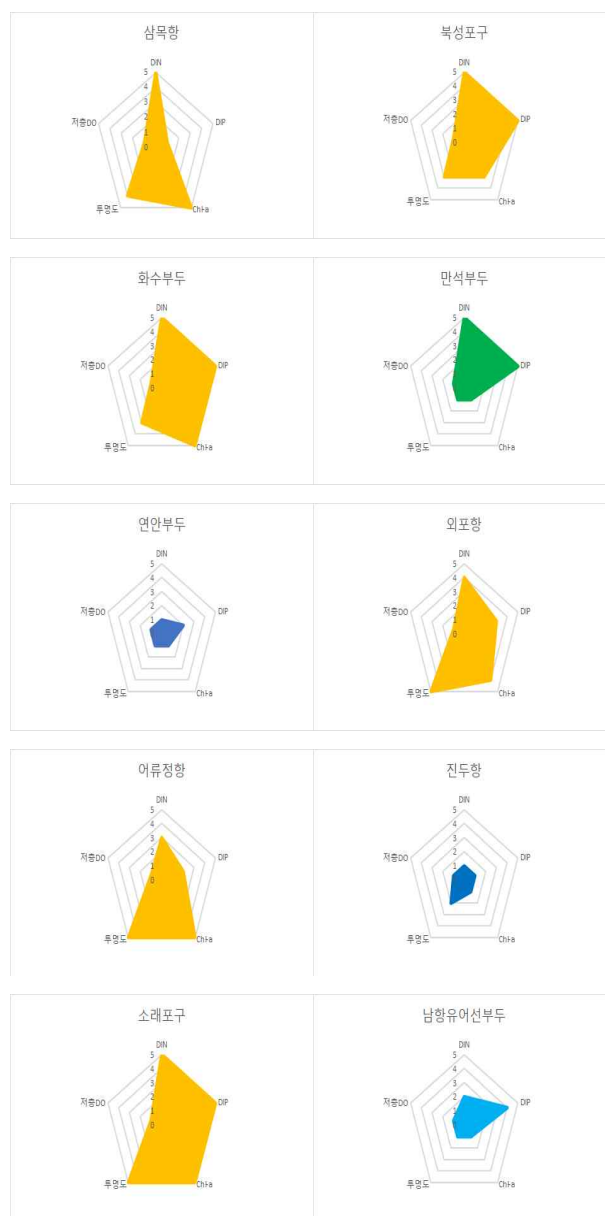


Fig. 6. various factors affecting on WQI



Fig. 7. WQI level and meaning depending on grade

3.1.4. 해수 중 다환방향족탄화수소(PAHs)

분석된 PAHs의 16개 성분별로 살펴보았을 때, Fluoranthene > Pyrene > Phenanthrene > Chrysene 순으로 높은 농도를 보였고, 지점별로는 삼목항 > 외포항 > 진두항 > 연안부두 > 어류정항 > 화수부두 순으로 높았다(Fig 8). 해수 중 PAHs의 오염 발생원, 즉 유류나 연소기원에 관한 기준(Yunker, Magi 2002)을 적용해 보면, $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr}) \geq 0.4$ 이면 연소기원이며, $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr}) < 0.4$ 이면 유류기원임을 알 수 있는데, 여기서는 $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr})$ 의 값이 모든 지점에서 0.50~0.63으로 나타나 연소기원 발생원임을 확인할 수 있었다.

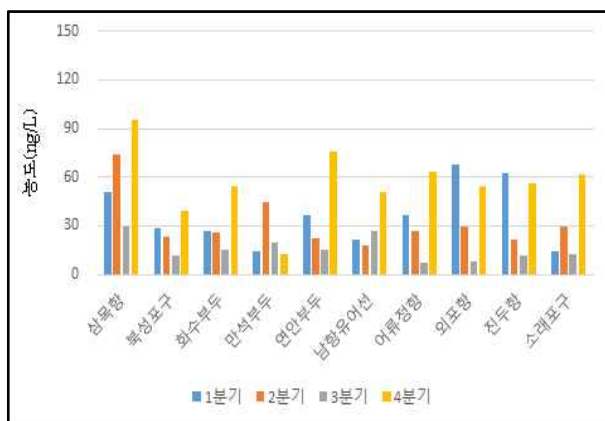


Fig. 8. PAHs levels from seawater in each fishery

3.2. 해저퇴적물 결과

3.2.1. 해저퇴적물 중금속

grab을 이용하여 채취한 퇴적물 중의 중금속 농도는 아래 표 9와 같으며, 분석 결과 항목별로 아연 > 구리 > 크롬 > 니켈 > 납 순으로 높게 나타났으며, 지점별로는 화수부두에서

카드뮴, 구리, 아연이 해저퇴적물의 관리기준(PEL)을 초과하였고 아연의 경우 관리기준의 약 2.2배를 초과하였다. 그 외 만석부두와 연안부두에서도 각각 카드뮴과 구리, 카드뮴이 관리기준을 넘어섰다(Table 9).

Table 9. Heavy metal levels in sediments

(unit : mg/kg)

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Sammok	14.45	1.85	37.65	56.53	0.04	24.15	20.28	94.23
Bukseong	18.90	2.53	53.00	64.23	0.07	31.88	32.03	111.63
Hwasu	22.35	2.98	76.73	77.70	0.16	38.95	60.95	337.38
Manseok	17.35	3.00	51.53	66.98	0.06	30.90	25.88	85.35
Yeonan	17.05	2.85	48.20	63.70	0.05	30.33	24.18	84.75
Oepo	8.43	1.45	30.13	47.48	0.03	17.60	13.73	45.05
Eoryujeong	8.95	1.58	29.63	49.88	0.03	17.48	13.63	57.03
Jindu	9.55	1.80	39.65	49.78	0.04	25.08	15.48	62.38
Soraepogu	12.85	2.60	56.00	59.88	0.04	31.15	22.58	92.38
NamHang yueoseon	16.05	2.33	43.73	59.93	0.06	25.90	26.70	123.53

Table 10. Heavy metal standards in sediments

(unit : mg/kg)

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
TEL	14.5	0.75	116	20.6	0.11	47.2	44.0	68.4
PEL	75.5	2.72	181	64.4	0.62	80.5	119	157

* 주의기준(TEL) : 부정적인 생태 영향이 일부 발현될 개연성이 있을 것으로 예측되는 농도

** 관리기준(PEL) : 부정적인 생태 영향이 발현될 개연성이 매우 높은 농도

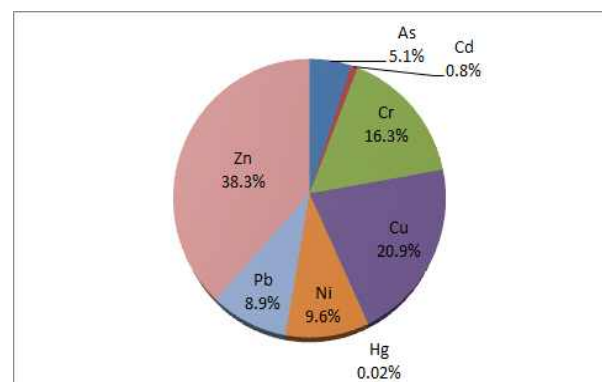


Fig. 9. The mean portion of heavy metal in sediments

3.2.2. 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 정화지수를 일컫는다.

부영양화 관련 정화의 범위는 부영양화물질 평가항목별로 산출된 평가점수를 합산한 값이 6 이상인 구역이다.

산출방법(산출식)

$$\text{CIET} = \text{강열감량(IL) 평가점수} + \text{화학적산소요구량(COD) 평가점수} + \text{산취발성황화물(AVS) 평가점수}$$

Table 11. CIET calculation method for each item

Item	Unit	Criteria	Score
IL	%(dry)	less than 5	0
		less than 15	3
		more than 15	6
COD	mg/g(dry)	less than 13	0
		less than 20	1
		less than 30	2
		less than 40	4
		more than 40	6
AVS	mg/g(dry)	less than 0.6	0
		less than 1	1
		less than 5	2
		less than 10	4
		more than 10	6

본 연구에서는 표 10에서와 같이 해저퇴적물의 CIET 평균값은 0 ~ 6점 수준을 보였고, 점수 분포는 0점 3지점, 4점이 4지점, 5점이 1지점, 6점이 2지점으로 나타났다.

정화·복원의 대상으로 6점 이상 산정된 지점들은 화수부두와 남항유어선부두로 강열감량(IL)과 화학적산소요구량(COD)은 남항유어선부두의 결정인자로 작용했고, 강열감량(IL)과 산취발성황화물(AVS)은 화수부두의 결정인자로 나타났다.

Table 12. CIET levels for target area

	IL(%)	COD(mg/g)	AVS(mg/g)	CIET
Sammok	6.22	14.2	0.04	4
Bukseong	7.29	17.0	0.48	4
Hwasu	7.45	17.6	1.24	6
Manseok	6.80	18.0	0.39	4
Yeonan	7.02	18.5	0.70	5
Oepo	3.18	8.9	0.00	0
Eoryujeong	3.50	9.3	0.04	0
Jindu	3.94	9.0	0.10	0
Soraepogu	6.43	16.4	0.21	4
NamHang yueoseon	6.33	20.9	0.85	6

3.2.3. 퇴적물 중 다환방향족탄화수소(PAHs)

성분별로는 플로란센(Fluoranthene)과 파이렌(Pyrene)이 주성분(평균 12~13%)으로 나타났고, 지점별로는 화수부두에서 가장 높은 평균 농도를 보였고(136.7ng/g-dw), 남항유어선부두, 만석부두, 북성포구의 순으로 높았다.

퇴적물 중 PAHs 발생원은 대부분 연소기원이었고, 남항유어선부두에서만 Flu/(Flu+Pyr)값이 0.27~0.39를 보여 유류기원으로 판단되었다.

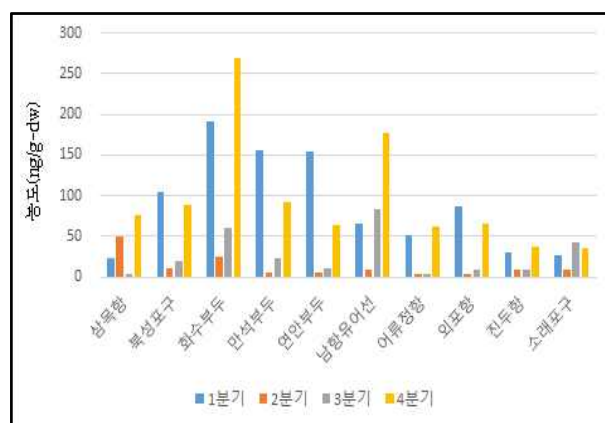


Fig. 10. PAHs from sediments in each fishery

3.3. 지수 오염도 종합평가

앞서 산정된 WQI와 CIET 값을 바탕으로 하여 x축에는 WQI 변수를, y축에는 CIET 변수를 놓고 아래와 같이 도식화 하였다. 두 변수가 동시에 높은 지점은 화수부두로서 앞서 언급된

해수질 일반항목도 오염도가 높은 지점이었다. 즉, 주변의 인천교 유수지를 통한 가좌하수처리장 방류수와 주변 생활하수 유입 등으로 해수질에 대한 지속적인 모니터링과 관리가 필요한 상황으로 판단된다. 또한, 높은 CIET 값으로 인해 정화 및 복원의 대상지역으로서 오염원인과 정화사업 수행과 관련한 지속적인 정밀조사가 필요한 것으로 보인다.

그리고, 소래포구의 경우 시장활동이나 생활하수 등에 의한 오염 유입가능성으로 인해 해수질은 수질평가지수값이 높게 형성되어 꾸준한 수질관리가 필요한 반면에, 해저 퇴적물의 경우는 CIET값이 6 이하로서 정기적인 조사와 모니터링으로 관리되어야 할 것으로 보인다.

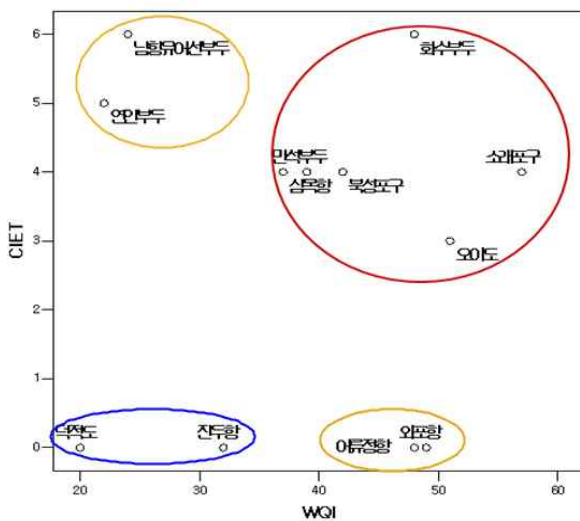


Fig. 11. Indices for accessing seawater and sediments

3.4. WQI 분포지도

3.4.1 해양측정망과 연구지점 분포경향

해양수질측정망 34지점과 소규모 어항 10지점을 대상으로 공간보간법인 Kriging을 GIS소프트웨어를 이용하여 계절별로 예측해 보았다(Fig 11 ~ 14). WQI를 지역·시기별로 살펴본 결과, 한강유역의 영향을 받는 강화지역과 유동인구가 많은 소래포구 등에서 높게 나타났고, 시기별로는 3분기와 4분기에 특정지역에서 높은 경향을 나타내었다.

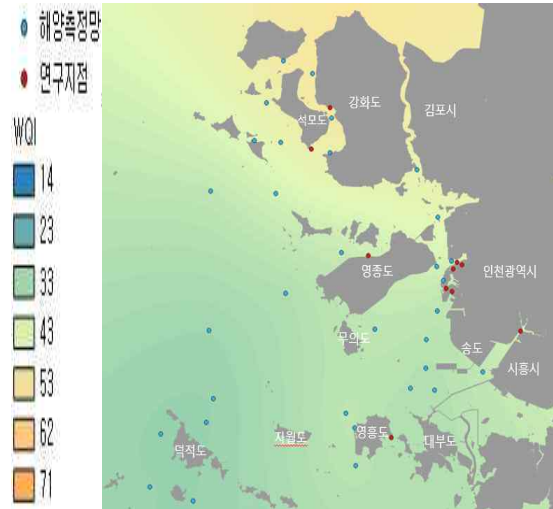


Fig. 12. Spatial-temporal distribution of WQI(1Q)

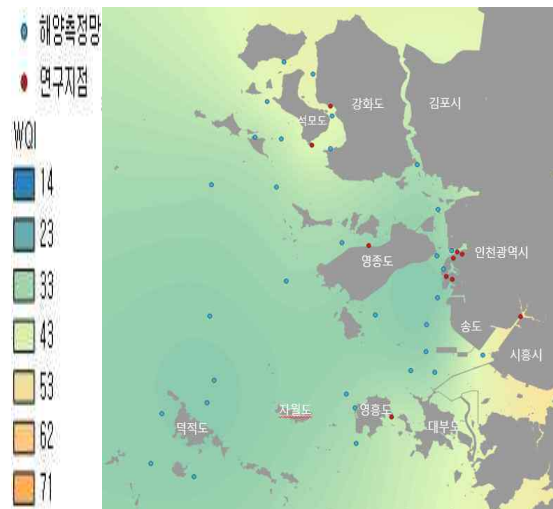


Fig. 13. Spatial-temporal distribution of WQI(2Q)

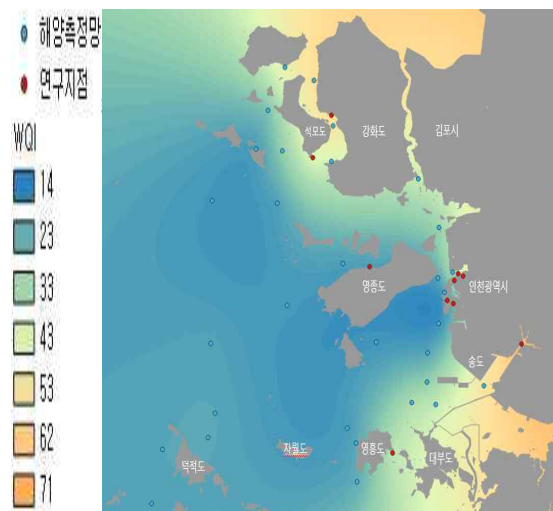


Fig. 14. Spatial-temporal distribution of WQI(3Q)

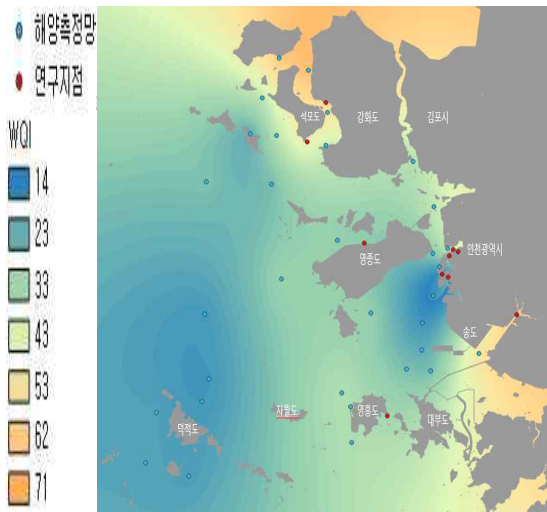


Fig. 15 Spatial-temporal distribution of WQI(4Q)

IV. 결론

본 연구는 시민의 접근성이 높은 인천 관내 주요 항·포구에서 다양한 지수와 오염인자에 대한 실태조사를 통하여 해양친수도시 조성을 위한 수질개선 방안을 모색하고자 수행되었으며, 분기별 해수와 해저퇴적물 시료 총 80건에 대하여 해수 24항목과 퇴적물 13항목을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 해수질의 일반항목 분석결과, 화수부두와 소래포구에서 염분(27%)과 용존산소(15%)가 낮게 나타났고, COD(98%)나 TOC(90%) 같은 유기물질 농도는 타 지점 대비 높은 상황이며, 영양물질은 각각 5.1배, 8.9배 정도 높은 수치로 이들 지점은 해수 보다는 담수나 외 부오염원 영향을 많이 받은 것으로 판단된다.
2. 해수질 중금속 분석결과, 해수수질기준 중 사람의 건강보호 기준에 해당하는 중금속 8종에 대해서 모든 지점에서 기준을 만족하였고, 해양생태계 보호기준 중 단기기준도 모두 만족하였으나 화수부두의 경우 장기기준을 3종 초과했고, 장기기준의 2.2 ~ 4.5배를 상회

하는 높은 수준을 보였다. 소래포구의 경우도 3가지 항목에서 장기기준을 초과하였으며, 특히 니켈의 경우 기준대비 1.3 ~ 4.3배 높은 결과를 보였다.

3. 지점별 해양수질평가지수(WQI)의 평균값은 22~54 수준(I~IV)등급으로 WQI 등급 분포는 I 등급 2지점, II 등급 1지점, III 등급 1지점, IV 등급 6지점을 보였다.
4. 해수 및 해저퇴적물 중 다환방향족탄화수소(PAHs) 분석결과 해수 시료는 모두 연소기원 발생원($\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr}) \geq 0.4$)이며, 퇴적물의 경우는 남향유어선부두를 제외하고 모두 연소기원 발생원으로 판단된다.
5. 해저퇴적물 중금속은 지점별로 화수부두에서 카드뮴, 구리, 아연이 해저퇴적물의 관리기준(PEL)을 초과하였고 아연의 경우 관리기준의 약 2.2배를 초과하였다. 그 외 만석부두와 연안부두에서도 각각 카드뮴과 구리, 카드뮴이 관리기준을 넘게 나타났다.
6. 해저퇴적물의 CIET 평균값은 0 ~ 6점 수준을 보였고, 점수 분포는 0점 3지점, 4점이 4지점, 5점이 1지점, 6점이 2지점으로 나타났다.
7. 지수오염도 종합평가지 두 가지 변수(WQI, CIET)가 동시에 높은 지점은 화수부두로서 해수질 일반항목 오염도가 높다. 즉, 주변의 인천교 유수지를 통한 가좌하수처리장 방류수와 주변 생활하수 유입 등으로 해수질에 대한 지속적인 모니터링과 관리가 필요한 상황으로 판단된다.
8. WQI를 공간보간법(kriging)을 통해 추정해 본 결과, 한강의 영향을 많이 받는 강화지역과 유동인구가 많은 소래포구에서 주로 3,4분기에 높게 나타남을 알 수 있었다.

위와 같이 본 연구에서는 소규모 어항에서의 해수와 퇴적물에 대한 실태조사를 기초로 수질 개선 방안을 모색하고자 하였다. 이를 위해 다양한 오염도 평가지수를 활용하고 측정망 자료와 연계해 시각화 및 추정을 통해 연구지역의 농도분포 경향과 특성을 파악하였다. 본 자료를 기초자료로 활용함과 동시에 좀 더 촘촘하고 꾸준한 모니터링이 지속된다면 해당 지역의 수질개선을 통한 친수도시 조성에도 큰 기여를 할 수 있을 것이라 기대한다.

V. 참고문헌

1. 인천광역시, 2020 환경백서
2. Ministry of ocean and fisheries, Notice 2013-186, 2013.
3. 임동일 외 4명, 한국 연안 퇴적물 내 중금속 원소의 자연적 배경농도 연구, Ocean and Polar research 29권 4호(2007): pp.379-389
4. 서진성 외 5명, 서남해 해상풍력 실증단지 해역의 해양 환경 특성, 한국환경영향평가학회, 제28권 제5호(2019), pp.457-470.
5. 박정환 외 2명, 인천연안 갯벌의 다환방향족 탄화수소의 농도분포와 발생원 평가, 한국습지학회, 제15권 제4호(2013), pp.441-451
6. 이종현 외 4명, 경기만 퇴적물의 중금속 분포 특성, 한국해양학회, 제3권(1998), pp.103-111.
7. 신상은 외 5명, 순천만 갯벌 복원 이전의 수질환경, 한국도서연구학회, 제31권 제1호(2019), pp.133-148.
8. 정희호 외 12명, 2017년 가막만 북서내만해역 표층 해저퇴적물의 부영양화 현황 및 정화·복원 방향, 한국해양환경에너지학회, 제22권 제2호(2019), pp.105-113.
9. 원종호 외 3명, 한국 서해 경기만 영흥도 주변 해역의 수질 및 표층 퇴적물 특성, 한국해양환경에너지학회, 제23권 제4호, pp.246-257.
10. 장민석, (2013). 정박지 주변해역의 해수 및 해저 퇴적물의 화학적 환경특성. 해양환경안전학회 춘계학술발표회
11. 국립수산물과학원, 2012. 해수, 해저퇴적물, 수산생물 중 잔류하는 다환방향족탄화수소(PAHs)의 정성·정량을 위한 분석매뉴얼
12. 해양수산부, 2018. 해양환경공정시험기준
13. 해양수산부, 2018. 해양환경기준. 제2018-10호
14. 해양환경공단, 2020년 한국해양환경 조사연보(25권)
15. 해양수산부, 2021. 해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정(해양수산부 고시, 2021-79호)
16. 부산광역시 보건환경연구원보(2020)
17. Baumard, P, Budzinsk, H, Garrigues, P Dizer, H and Henzen, PD (1999). polycyclic aromatic hydrocarbon(PAHs) in recent sediments and mussels from the Western Baltic Sea; Occurrence, bioavailability and seasonal variation, Marine Environmental Research, 47(1), pp. 17-47.
18. Hakanson, L., 1980, An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach, Water Res., 14, 975-1001.
19. Han GM, Hong SH, Shim WJ, Ra KT, Kim KT. 2016. Assessment pf Persistent Organics and Heavy Metal Contamination in Busan Coast: Application of Sediment Quality Index. Ocean and Polar Research, 38(3): 171-184.
20. Kong BW, Lee WJ, Ra DG, Cheong CJ. 2016. Analysis of Temporal-spatial Characteristics of Water Quality Using Water Quality Index in the Suncheon Bay. Journal of Korean Society of Environmental Technology, 17(2): 96-104.
21. Lee, WS, Park, SY, Kim, PJ, SB, An, KH, Choi, YS (2010). Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbon(PAHs) in seawater and marine sediments from ammyundo coastal area after oil spill, Journal of the Environmental Sciences, 19(12), pp. 1421-1430.
22. Lee, H, Y., Shim, J .H., GIS Geographic

- Information Systems 2nd, Bubmunsu, 2011.
23. Liu S, Lou S, Kuang C, Huang W, Chen W, Zhong G, 2011. Water Quality assessment by pollution-index method in the coastal waters of Hebei Province in western Bohai, China. *Marine pollution bulletin* 62: 2220-2229.
 24. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2001. Nation-wide monitoring of persistent organic pollutants from coastal environment of Korea. BSPM. 00070-1336-3, pp.123.
 25. Reilly, T.I. Roberta, R.K., Guidance on sensory Testing and Monitoring of seafood for presence of Petroleum Taint Follow an oil spill, 2001, Seattle: National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA). 107pp.
 26. Sun, C., Park, G.W., Park, H.S., Park, J.G., 2018. Distribution of heavy metal concentrations in surface sediments of eastern yellow sea, *J.Korean Soc. Oceanogr.*, 23(4), 179-191.
 27. US EPA, Provisional guidance for quantitative risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon. EPA/600/R-93/089. Final Draft. Cincinnati: Environmental criteria and assessment office, US EPA(1993), 20pp.
 28. Wardiatno Y, Qonita Y, Mursalin, Zulmi R, Effendi H, Krisanti M, Masher A, Hakim AA, Sahidin A, 2017. Determining Ecological status of two coastal waters in Western Java using Macrozoobenthic community: a comparison between north part and south part. *Earth and Environmental Science* 54: 012071.
 29. Yan, W, Chi, J., Huang, W. and Zhang, G., 2009. Spatial and Temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon(PAHs) in sediments from Daya bay, South China. *Environmental Pollution*, 157:1823-1830.
 30. Yim UH, Hong SH, Shim WJ, 2007. Distribution and characteristics of PAHs in sediments from

the marine environment of Korea. *Chemosphere* 68:85-92.