

## 인천 H항 표층 퇴적물의 오염도 평가

김정호\* · 남세용\*\*†

\*, \*\* 국립한경대학교 토목안전환경공학과

## Estimation of Pollution Degree of Surface Sediment from Incheon H Wharf

Jeong-Ho Kim\* · Se-Yong Nam\*\*†

\*, \*\* Department of Civil, Safety and Environmental Engineering Hankyong Nation University, Gyeonggi 456-749, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 2014년 03월에 인천 H항의 5개 정점(S1~S5)에서 채취된 표층 퇴적물의 물리화학적 특성을 조사하고, COD, AVS, IL 및 중금속(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Hg)을 분석하여 오염도를 평가하였다. 입도분석, 비표면적분석, XRD 및 XRF 분석을 통하여 채취된 퇴적물 시료 모두 거의 동일한 산화물과 광물로 구성되었음을 확인하였다. 국내기준으로 COD, AVS 및 IL 세 항목의 총점에 대한 오염도는 S2, S3, S5 지점은 2등급으로 S1, S4 지점은 3등급으로 평가되었다. 중금속 오염의 경우 Cd, Ni, Pb은 USEPA 기준으로 중간 오염에 해당하였고, Cu, Zn 및 Cr은 심한오염으로 분류되었다. 농집지수를 이용한 오염도 평가결과 Cd가 Class 3으로 평가되었고, 농축계수를 이용한 평가결과 모든 지점에서 Cd, Pb, Zn의 경우 1보다 큰 것으로 나타났다. 또한 총농축계수는 S4지점이 3.1로 가장 높은 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 표층퇴적물, 중금속, 농집지수, 농축계수, 총농축계수

**Abstract** : In this study, physico-chemical properties and pollution degree of surface sediments collected at 5 stations(S1~S5) of Incheon H wharf in March 2014 were investigated. From particle size, surface area, XRD and XRF analyses, the sediment samples consisted of similar oxides and minerals. Considering total score of COD, AVS and IL, pollution level ranged between 2 and 3 based on domestic standards. In case of heavy metal contamination, Cd, Ni and Pb were classified as moderately polluted by USEPA standards. However, Cu, Zn and Cr were classified as heavily polluted. With geoaccumulation index value( $I_{geo}$ ), Cd contamination was estimated as class 3. In addition, the calculated enrichment factors of Cd, Pb and Zn were exceeded a value of 1. Site S4 was high as 3.1 in total enrichment factor.

**Key Words** : Surface sediments, Heavy metal, Index of geoaccumulation, Enrichment factor, Total enrichment factor

## 1. 서 론

산업 활동에 따라 중금속, 유기물을 포함한 각종 오염물질들이 대기, 하천 등 다양한 경로를 통해 해양에 유입되고 있다. 유입된 오염물질들은 확산, 이동, 침강 및 재부유등을 통해 해저퇴적물의 오염을 야기하며 오랜 기간 동안 축적된다. 따라서 퇴적물 내에 축적된 오염물질의 농도에 대한 평가는 해양생태계의 건강도를 예측하고 확인하는데 매우 중요하다고 볼 수 있다(Lim et al., 2007).

국내 해양오염퇴적물의 오염도 평가는 정화·복원범위를 결정하기 위하여 오염퇴적물에 관한 기준을 설정하고 있는

데 관련 항목들의 평가 점수를 합산하여 산출하며, 이를 정화지수(CI: Cleanup Index)라 한다. 정화지수는 중금속, 폴리클로리네이티드비페닐(PCBs), 다환방향족탄화수소(PAHs)등을 포함한 유해화학물질의 정화지수( $CI_{HC}$ )와 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산화발성황화물(AVS)을 포함한 부영양화 정화지수( $CI_{EF}$ )를 이용하여 오염도를 평가하고 있다. 또한 해양환경관리법 제 8조(Ministry of Oceans and Fisheries, 2013)에 따르면 해수수질과 해저퇴적물에 대해 환경기준을 정하고 있는데 그 중 해저퇴적물은 중금속(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)에 대하여 주의기준(Threshold Effects Level)이하, 주의기준과 관리기준 사이, 관리기준(Probable Effects Level)이상으로 구분하고 있으며 NFRDI(2007)은 해저퇴적물의 COD와 AVS를 분석하여 그 농도 범위를 7단계로 나누어 5등급으로 산정하고 오염도를 평가하였다.

\* First Author : kimjh@hknu.ac.kr, 031-670-5535

† Corresponding Author : namsy@hknu.ac.kr, 031-670-5177

국외의 경우 Müller(1979)가 제시한 배경농도에 대한 지역과 해당 지역의 상대적인 오염도를 평가 하는 방법으로 index of geoaccumulation(농집지수,  $I_{geo}$ )과 enrichment factor(농축계수, EF)를 이용하여 평가하는 기법이 많이 사용되고 있으며, USEPA sediment quality guidelines와 Ontario sediment quality guidelines(OSQG), NOAA(ERL, ERM) 등 국외 오염퇴적물 기준과 비교 평가하는 방법도 함께 사용되고 있다(Kim et al., 2011).

본 연구에서는 해저퇴적물의 중금속(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg)과 부영양화 관련 평가항목(IL, COD, AVS)에 대하여 국내 평가기준 및 미국환경보호청에서 설정한 sediment quality guidelines와 캐나다 온타리오 환경기준(Ontario sediment quality guidelines)을 이용하여 오염도를 평가하였다. 또한 농집지수( $I_{geo}$ )와 농축계수(EF)를 산출하여 중금속의 축적과 오염도를 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 시료채취 방법 및 실험방법

인천 H항(37° 29' N, 126° 37' E)의 표층퇴적물을 2014년 03월에 간조 시 5개의 정점(S1~S5)에서 산으로 세척한 플라스틱 샘플러로 채취하였다(Fig. 1). 시료의 물리적특성을 파악하기 위해서 입도분석은 Microtrac사의 Bluewave를 이용하여 습식법으로 측정하였으며, 비표면적 측정(비표면적, 기공크기, 총 기공부피)은 Quantachrome Inc사의 QUADRASORB SI를 이용하여 분석하였다. 또한 퇴적물의 광물 조성은 XRD 회절분석(Rigaku, D/max-2500U/PC)을 통해 규명되었고, 물리화학적 특성은 XRF 분석(Rigaku, ZSX Primus)을 실시하여 퇴적물에 포함된 산화물의 함량을 조사하였다. 함수율은 해양환경공정시험기준(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)에 따라 분석하였다.

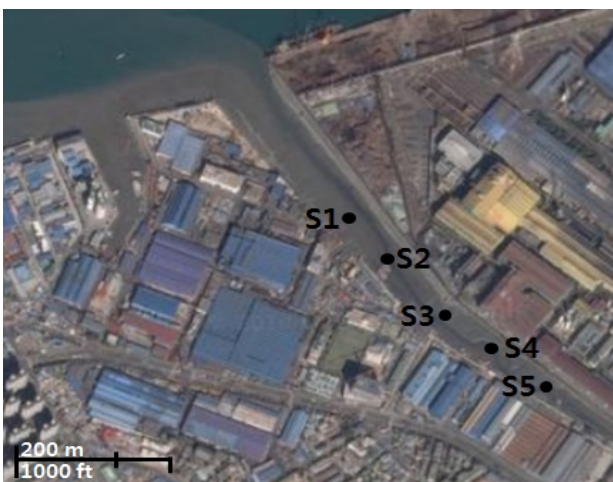


Fig. 1. Map showing the sampling sites.

퇴적물의 유기물 함량을 나타내는 강열감량(IL)은 110℃에서 항량으로 될 때 까지 건조된 시료를 사용하였고 화학적 산소요구량(COD), 총 유기탄소(TOC), 산취발성황화물(AVS)은 해양환경공정시험기준(2010)에 따라 분석하였다. 산취발성황화물(AVS)는 함수율을 보정하여 건조량으로 계산하였다. 중금속(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr)은 해양환경공정시험기준에서 제시한 완전분해법으로 전처리한 후 1N 질산용액 100 ml로 정용하여 유도결합 플라즈마분광분석기(Perkinelmer, Optima8300)로 분석하였다. 또한 Hg은 수은분석기(MILESTON, DMA-80)를 이용하여 분석하였으며 중금속분석의 신뢰성을 확보하기 위해 퇴적물 표준물질(Standard Reference material, SRM-1944)을 사용하여 중금속의 회수율을 구하였다.

### 2.2 퇴적물의 오염도 평가 및 산정방법

국내 기준의 평가방법으로 해양환경관리법에 따라 Cd, Cr, Hg, Ni, Pb은 각 기준 농도를 직접 비교하였으며 Cu와 Zn은 Li으로 측정 농도를 입도 보정하여 기준 농도와 비교하였고 TEL과 PEL로 구분하여 평가하였다(Table 1). 여기서 TEL이하는 부정적인 영향이 거의 없을 것으로 예측되는 범위이며 TEL과 PEL사이는 부정적인 생태영향이 발현될 가능성이 있는 범위, PEL이상은 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 범위로 지정하고 있다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2013).

또한 본 연구에서는 Table 2(NFRDI, 2007; Kim et al., 2011)에 제시한 바와 같이 COD와 AVS를 분석 후 농도의 범위를 7단계로 나누고 이를 점수화하여 5등급으로 평가하였고(NFRDI, 2007), 여기에 IL을 추가하여 Table 2, 3에 오염도를 등급화 하였다(Kim et al., 2011).

국외 기준의 평가방법으로 많이 인용되고 있는 퇴적물 환경기준인 미국환경보호청에서 설정한 오대호 퇴적물 분류기준과 캐나다 온타리오 환경부 퇴적물 환경기준을 적용하였다(Pekey et al., 2004; Woo et., 2013). 중금속(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)과 TOC, 강열감량을 기준으로 비오염, 중간오염, 심한오염으로 분류하였다(Perin et al., 1997; OME, 2008). Müller(1979)는 퇴적물의 중금속을 측정 후 중금속 오염을 농집지수( $I_{geo}$ )를 이용하여 등급화 하였으며 이를 총 7등급으로 분류 하였고 이를 Table 4에 나타내었다(Müller, 1979). 농집지수는 중금속의 농집정도를 등급화하고 이를 간접적으로 평가를 할 수 있다. 농집정도를 평가하기 위한 배경농도( $B_n$ )값은 대상지역에서 제시된 바탕 값을 사용하거나 지각물질의 평균농도를 사용하는데 본 연구에서는 일반적으로 활용되고 있는 Taylor(1964)가 제시한 원소함량을 적용하여 계산하였고(Public Health and Environment Research Institute of Incheon Metropolitan City, 2010) 농집지수는 식 1에 나타내었다(Chandia and Salamanca, 2012; Kim and Um, 2013). 또

Table 1. Heavy metal contamination criteria of sediment(Ministry of Oceans and Fisheries, 2013)

(Unit: mg/kg)

Criteria	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

\*TEL: Threshold Effects Level

\*\*PEL: Probable Effects Level

Table 2. Score according to concentration of COD, AVS and IL of sediment(NFRDI, 2007; Kim et al., 2011)

COD	mg/g, dry	<5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	>30
	Score	0	8.3	16.7	25.0	33.3	41.7	50
AVS	mg/g, dry	<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
IL	%	<5	5~7	7~9	9~11	11~12		
	Score	0	8.3	16.7	25.0	33.3		

Table 3. Total score and corresponding level(NFRDI, 2007; Kim et al., 2011)

Level	Score (AVS/COD)	Score (AVS/COD/IL)	Sediment condition
1	0~20	0~30	Low pollution
2	20~40	31~60	
3	40~60	61~90	
4	60~80	91~120	
5	80~100	121~150	High pollution

Table 4. Scale of pollution intensity for geoaccumulation index (Müller, 1979)

I <sub>geo</sub>	Class	Pollution intensity
>5	6	Very highly polluted
4~5	5	Highly polluted to very highly polluted
3~4	4	Highly polluted
2~3	3	Moderately polluted to highly polluted
1~2	2	Moderately polluted
0~1	1	Unpolluted to moderately polluted
0	0	Unpolluted

한 농축계수(EF)값을 계산하여 오염도를 평가하였는데 이는 1보다 크면 대기나 하천 등에 의한 외부오염 가능성이 있고 퇴적물 내에 상당히 농축되었다는 것을 의미하고 1에 가까울수록 오염이 되지 않은 농도를 의미한다(Kang et al., 2012). 농축계수의 합에서 중금속항목의 개수를 나누어 총

농축계수(R)를 구할 수 있는데 R값이 1보다 작으면 비오염, 1<R<2의 경우 약한 오염, 2<R<3은 중간오염, R>3의 경우 심한오염으로 분류할 수 있다(Public Health and Environment Research Institute of Incheon Metropolitan City, 2010; Woo et al., 2013). 중농축계수(EF)와 총농축계수(R)는 각각 식 2와 식 3에 나타내었다(Woo et al., 2013).

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{(1.5 \times B_n)} \quad (1)$$

I<sub>geo</sub>: 농집지수

C<sub>n</sub>: n지점에서의 중금속 함량

B<sub>n</sub>: 해당 금속원소의 배경농도

$$EF = \frac{(C_{sed} - C_{back})}{C_{back}} \quad (2)$$

EF: 농축계수

C<sub>sed</sub>: 각각의 중금속 농도

C<sub>back</sub>: 해당되는 중금속 배경농도

$$R = \frac{(\sum EF)}{n} \quad (3)$$

R: 총농축계수

∑EF: 각각의 중금속에 대한 농축계수(EF)의 합

n: 고려대상의 중금속 숫자개수

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 퇴적물의 물리·화학적 특성

채취된 시료에 대한 입도분석( $d_{50}$ ) 결과  $0.221 \mu\text{m} \sim 0.223 \mu\text{m}$ 로 거의 일치하는 것으로 나타났다. 비표면적 측정결과  $14.509 \text{ m}^2/\text{g} \sim 22.039 \text{ m}^2/\text{g}$ , 기공의 평균크기는  $3.656 \text{ nm} \sim 3.706 \text{ nm}$ 으로 조사되었으며, 총 기공부피는  $0.04495 \text{ ml/g} \sim 0.06026 \text{ ml/g}$ 으로 거의 비슷하게 조사되었다(Table 5). 퇴적물의 XRD 분석결과 시료 모두 비슷한 광물구성을 가지고 있는 것으로 조사되었다(Fig. 2). 또한 XRF를 이용하여 퇴적물에 포함된 산화물의 함량을 조사한 결과를 Table 6에 나타내었으며 모든 시료에서  $\text{SiO}_2$  함량이 53% 이상으로 가장 많이 포함되어 있는 것으로 조사되었으며  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 15% 이상으로 두 번째로 많

은 것으로 조사되었다. 이를 포함하여  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ 가 95% 이상으로 구성하는 것으로 조사되었다.

#### 3.2 퇴적물 오염도 분석 및 평가

시료채취지점에 따른 중금속 함량의 분석(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Hg, Li)과 TOC 분석결과를 Table 7에 나타내었다. 조사된 퇴적물의 오염농도를 이용하여 국내 해양환경기준과 비교한 결과 Cd, Pb의 경우 모든 지점에서 TEL~PEL로 조사되었고 Cr과 Ni의 경우 TEL이하로 조사되었다. 또한 Cu, Hg,

Table 5. Results of particle size and surface area of sediments

Site	Particle Size ( $\mu\text{m}$ , $d_{50}$ )	Surface Area ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Pore Size (nm, diameter)	Total pore Volume ( $\text{ml/g}$ )	Water Content (%)
S1	0.2220	16.216	3.706	0.04552	49.8
S2	0.2220	19.445	3.702	0.05926	46.0
S3	0.2230	14.509	3.656	0.04495	50.3
S4	0.2220	20.695	3.702	0.06026	52.2
S5	0.2210	22.039	3.698	0.05665	47.5

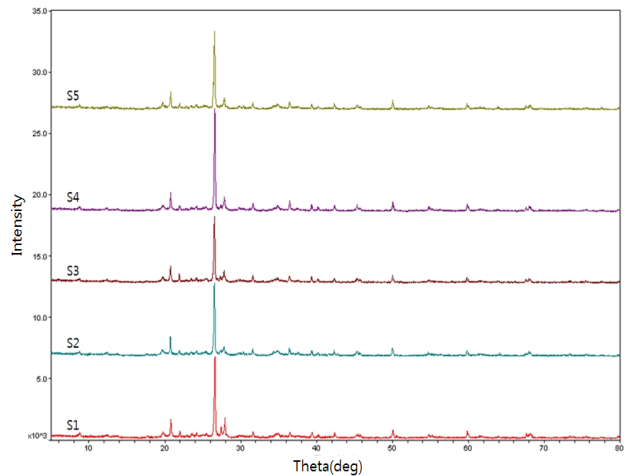


Fig. 2. XRD diagram of sediment samples.

Table 6. Contents of major component of sediments

(wt, %)

Component	S1	S2	S3	S4	S5
$\text{SiO}_2$	54.4733	53.3132	53.5779	54.0289	54.7248
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15.7134	16.1781	15.7901	15.6997	15.9616
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	13.7657	14.7282	13.9978	13.9362	14.0430
$\text{K}_2\text{O}$	5.6823	5.6739	5.6141	5.6819	5.7178
Cl	2.4721	2.4246	2.8070	3.0855	2.3493
CaO	1.7943	1.6276	1.8296	1.7291	1.6918
$\text{TiO}_2$	1.6263	1.6111	1.5321	1.6349	1.5706
MgO	1.4638	1.5920	1.5172	1.5241	1.4820
$\text{SO}_3$	1.2719	1.0621	1.6355	0.9481	0.8164
$\text{Na}_2\text{O}$	0.8335	0.8167	0.8706	0.9610	0.7970
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.3378	0.3830	0.2840	0.2723	0.2488
MnO	0.1721	0.2295	0.1715	0.2137	0.3211
ZnO	0.1546	0.1401	0.1572	0.0884	0.0793
$\text{ZrO}_2$	0.0777	0.0732	0.0674	0.0699	0.0615
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.0565	0.0523	0.0466	0.0415	0.0462
CuO	0.0444	0.0504	0.0482	0.0309	0.0406
PbO	0.0394	0.0201	0.0297	0.0280	0.0270
NiO	0.0209	0.0241	0.0234	0.0259	0.0211

Table 7. Concentrations of heavy metals, TOC, background value and recovery rate in the sediments

Sites	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Li (mg/kg)	TOC (%)
S1	1.65	96.1	41.1	56.9	357.9	104.4	0.22	99.0	2.81
S2	1.73	107.2	35.1	56.7	393.5	101.5	0.20	83.9	3.13
S3	1.43	104.6	37.0	47.6	278.2	93.4	0.13	96.3	2.99
S4	2.12	105.1	34.0	71.2	463.5	94.2	0.18	86.5	3.10
S5	1.48	87.2	35.8	39.9	204.9	86.5	0.09	95.9	3.08
Background value	0.2	55	75	12.5	70	100	0.08		
Recovery rate	75.2 %	96.2%	81.8%	91.4%	91.3%	86.6%	105.1 %		

Table 8. Results of total score and corresponding pollution level of sediments

Site	COD		AVS		IL		Total score		Level	
	mg/g	Score	mg/g	Score	%	Score	COD/AVS	COD/AVS/IL	COD/AVS	COD/AVS/IL
S1	17.4	25	0.38	50	6.41	8.3	75	83.3	4	3
S2	20.5	25	0.17	25	7.72	16.7	50	66.7	3	3
S3	18.8	25	0.16	25	6.65	8.3	50	58.3	3	2
S4	15.0	16.7	0.53	50	6.79	8.3	66.7	75	4	3
S5	15.9	25	0.14	16.7	6.54	8.3	41.7	50	3	2

Zn의 경우 S1~S4 지점에서 TEL~PEL로 조사되었고 S5 지점에서는 TEL 이하로 조사되었다.

해양퇴적물에 대한 오염도 등급화 방법을 참고하여 COD와 AVS에 대하여 등급을 평가한 결과 S1, S4지점에서 4등급, S2, S3, S5는 3등급으로 조사되었고 COD와 AVS, IL에 대하여 등급을 평가한 결과 S1, S2, S4지점에서 3등급, S3, S5 지점에서는 2등급으로 조사되어 고려하는 항목 수에 따라 등급에 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다(Table 8).

또한 미국의 USEPA 퇴적물 기준과 캐나다 Ontario 퇴적물 기준에 따라 오염도를 평가한 결과 USEPA 기준으로 보았을 때 중금속(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr)과 강열감량(IL) 평가결과 Cd의 경우 모든 지점에서 비오염으로 평가되었고 Cu, Zn 및 Cr의 경우 심한오염으로 평가되었다. S5지점에서 Pb가 비오염으로 평가된 것을 제외하고 Pb, Ni의 경우 중간오염인 것으로 평가되었다. 캐나다 기준으로 평가하였을 경우 Hg를 제외한 모든 지점에서의 중금속은 최소영향수준으로 분류되었다. Hg의 경우 S1, S2지점에서 최소영향수준으로 평가되었으며 S3~S5지점에서는 비오염으로 평가되었고 TOC의 경우 2.81%~3.13%로 모든 지점에서 최소영향수준으로 평가되었다. 지점별 평가결과와 USEPA, 캐나다 기준은 Table 9에 정리하였다.

### 3.3 농집지수(I<sub>geo</sub>), 농축계수(EF), 총농축계수(R)를 이용한 오염도 평가

본 연구에 사용된 퇴적물의 중금속 분석에 대한 농집지수(I<sub>geo</sub>)와 농축계수(EF), 총농축계수(R)를 Table 10에 요약하였다. 농집지수를 조사한 결과 Cd의 경우 모든 지점에서 중간오염에서 높은 오염단계(Class 3)로 평가되었고, Cu는 모든 지점에서 비오염에서 중간오염단계(Class 2)로 평가되었다. 또한 Pb는 모든 지점에서 중간오염단계(Class 2)로 분류되었고, Zn은 S4에서 중간오염에서 높은 오염단계(Class 3)인 것을 제외하고 나머지 지점에서 Moderately polluted(Class 2)로 평가되었으며 Ni, Cr은 비오염(Class 0), Hg는 S1~S4지점에서 비오염에서 중간오염단계(Class 1), S5는 비오염(Class 0)으로 조사되었다. 농축계수(EF)를 이용한 오염도 평가결과 Cu, Ni, Cr의 경우 농축계수 값이 1보다 작으므로 외부로부터의 오염의 영향이 적은 것으로 평가되었으나 Cd, Pb 및 Zn의 경우 1보다 큰 것으로 평가되었다(Table 10).

또한 총농축계수(R)를 이용한 오염도 평가결과 지점마다 다소 차이를 보이는 것으로 나타났는데 S4지점이 3.1로 심한오염으로 평가되어 상대적으로 오염도가 높은 것으로 평가되었고 S1, S2지점의 경우 중간오염, S3, S5 지점은 약한오염으로 평가되었다.

인천 H항 표층 퇴적물의 오염도 평가

Table 9. Concentrations of heavy metals, IL and TOC of sediments and pollution criteria proposed by USEPA and Canada

Item	USEPA Sediment Quality Guidelines			Ontario Sediment Quality Guidelines		
	Non polluted	Moderately polluted	Heavily polluted	No Effect Level	Lowest Effect level	Severe level
Cd (mg/kg)	-*		>6	-	0.6	10
	S1,2,3,4,5				S1,2,3,4,5	
Cu (mg/kg)	<25	25-50	>50	-	16	110
			S1,2,3,4,5		S1,2,3,4,5	
Ni (mg/kg)	<20	20-50	>50	-	16	75
		S1,2,3,4,5			S1,2,3,4,5	
Pb (mg/kg)	<40	40-60	>60	-	31	250
	S5	S1,2,3	S4		S1,2,3,4,5	
Zn (mg/kg)	<90	90-200	>200	-	120	820
			S1,2,3,4,5		S1,2,3,4,5	
Cr (mg/kg)	<25	25-75	>75	-	26	110
			S1,2,3,4,5		S1,2,3,4,5	
Hg (mg/kg)	-			-	0.2	2
				S3,4,5	S1,2	
IL (%)	<5	5-8	>8	-		
		S1,2,3,4,5				
TOC (%)	-			-	1-10	10
					S1,2,3,4,5	

\*denotes insufficient data/no suitable method

Table 10. Values of geoaccumulation index(I<sub>geo</sub>), enrichment factor(EF) and total enrichment factor(R) of sediments

Item	S1		S2		S3		S4		S5	
	I <sub>geo</sub>	EF	I <sub>geo</sub>	EF	I <sub>geo</sub>	EF	I <sub>geo</sub>	EF	I <sub>geo</sub>	EF
Cd	2.5	7.2	2.5	7.7	2.3	6.2	2.8	6.2	2.3	6.4
Cu	0.2	0.7	0.4	0.9	0.3	0.9	0.3	0.9	0.1	0.6
Ni	-1.5	-0.45	-1.7	-0.5	-1.6	-0.51	-1.7	-0.55	-1.7	-0.52
Pb	1.6	3.5	1.6	3.5	1.3	2.8	1.9	2.8	1.1	2.2
Zn	1.8	4.1	1.9	4.6	1.4	3.0	2.1	3.0	1.0	1.9
Cr	-0.5	0.04	-0.6	0.0	-0.7	-0.1	-0.7	-0.1	-0.8	-0.1
Hg	0.9	1.7	0.8	1.5	0.1	0.6	0.5	0.6	-0.4	0.1
R	2.4		2.5		1.8		3.1		1.5	

4. 결론

본 연구에서는 인천 부두 표층퇴적물의 오염도를 평가하기 위해 총 5개 정점에서 채취한 퇴적물의 물리·화학적 특성을 조사하였으며 중금속, COD, TOC 및 IL을 분석하여 퇴적물에 대한 국내·외 기준을 활용하여 오염도를 평가하였다.

퇴적물의 물리·화학적 특성을 조사한 결과 입도분석은 모

든 지점의 샘플이 거의 동일하게 측정되었고, 비표면적은 14.509~22.039 m<sup>2</sup>/g, 기공의 크기는 3.656~3.706 nm, 총 기공 부피는 0.04495~0.6026 ml/g으로 분석되었다. 또한 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 산화물로 구성되어 있는 것으로 조사되었다.

또한 국내 기준(해양환경기준)에 따른 오염도는 Cd, Pb의 경우 모든 지점에서 TEL~PEL로 조사되었고 Cr과 Ni의 경우 TEL이하, Cu, Hg, Zn는 S1~S4 지점에서 TEL~PEL, S5 지점은

TEL 이하로 조사되어 관리기준 이상의 오염도를 가지고 있지 않는 것으로 평가되었다. COD, AVS, IL을 기준으로 평가한 결과 S1, S2, S4지점이 S3, S5지점보다 오염도가 높은 것으로 조사되었다. USEPA에 따른 평가결과, Cu, Zn, Cr의 경우 심한오염으로 평가되었으나 Cd과 Ni은 거의 모든 지점에서 중간오염단계로 평가되었다. 캐나다 기준으로 평가하였을 경우 Hg을 제외한 중금속과 TOC에서 최소영향 수준으로 평가되었다.

농집지수를 이용한 오염도 평가결과는 Cd의 경우 모든 지점에서 Class 3, Pb, Zn의 경우 Class 2, Cu, Hg는 Class 1로 평가되었다. 또한 Ni의 경우 모든 지점에서 Unpolluted(Class 0)으로 평가되었다. 농축계수를 이용한 평가결과 Cd, Pb, Zn의 경우 1을 초과하였다. 또한 총농축계수를 이용한 평가결과 S4지점이 심한오염, S3, S5지점이 약한오염, 나머지 지점에서 중간오염으로 평가되었다. 퇴적물의 오염도 평가와 관련하여 몇 가지 방법들이 제시되어 있으나, 항목 선정이나 적용 기준에 따라 평가 결과가 달라질 수 있으므로 구체적인 평가체계의 수립과 합리적인 평가지표의 개발이 필요하다고 사료된다.

## 감 사

This work was supported by a research grant from Hankyong National University for an academic exchange program in 2012.

## References

- [1] Chandia, C. and M. Salamanca(2012), Long-term Monitoring of heavy metals in Chilean coastal sediments in the eastern South Pacific Ocean, *Journal of Marine Pollution Bulletin*, Vol. 64, pp. 2254-2260.
- [2] Kang, J. H., S. J. Lee, W. G. Jeong and S. M. Cho(2012), Geochemical Characteristics and Heavy Metal Pollutions in the Surface Sediments of Oyster Farms in Goseong Bay, *The Korean Journal of Malacology*, Vol. 28, No. 3, pp. 233-244.
- [3] Kim, D. H. and H. H. Um(2013), Estimation of the Sediment Pollution in Coast of Gwangyang, Mokpo and Shinan, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 19, No. 4, pp. 303-308.
- [4] Kim, D. H., I. K. Kim and H. H. Um(2011), Conference of Korean Society for Marine Environmental Engineering, pp. 103-107.
- [5] Lim, D. I., J. Y. Choi, H. S. Jung, H. W. Choi and Y. O.

- Kim(2007), Natural Background Level Analysis of Heavy Metal Concentration in Korean Coastal Sediments, *Ocean and polar research*, Vol. 29, No. 4, 379-389.
- [6] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2010), Standard method for examination of Maritime Environment
- [7] Ministry of Oceans and Fisheries(2013), Marine Environment Management Act(2013-186).
- [8] Müller, G.(1979), Schwernmetalle in den Sediment des Rheins-Ver-deryngen Seit. Umxchau Press, pp. 778-783.
- [9] NFRDI(2007), National Fisheries Research & Development Institute, Coastal environmental assessment and management, Work Report(study environmental field).
- [10] OME(2008), Ontario Ministry of the Environment, Guidelines for Identifying, Assessing and Managing Contaminated Sediments in Ontario: An Integrated Approach.
- [11] Pekey, H., D. Karakas, S. Ayberk, L. Tolun and M. Bakoglu(2004), Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay(Northeastern Marmara Sea) Turkey, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 48, pp. 946-953.
- [12] Perin, G., M. Bonardi, R. Fabris, B. Simoncini, S. Manente, L. Tosi and S. Scotto(1997), Heavy Metal Pollution in Central Venice Lagoon Bottom Sediments: Evaluation of the Metal Bioavailability by Geochemical Speciation Procedure. *Environmental Technology*, Vol. 18, No. 3, 593-604.
- [13] Public Health and Environment Research Institute of Incheon Metropolitan City(2010), Study on the Environmental Characteristics of Major Foreshore of Incheon.
- [14] Taylor, S. R.(1964), Abundance of Chemical Elements in the Continental Crust: a New Table, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 28, No. 9, 1273-1285.
- [15] Woo, H. Y., J. H. Lim, J. K. Lee, J. H. Lee, K. S. Han and T. Y. Lee(2013), Characterization and Estimation of Heavy Metal Contents of Tongyong Marine Products Breeding Ground Sediments, *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 30, No. 3, pp. 213-219.

원고접수일 : 2014년 07월 25일

원고수정일 : 2014년 10월 13일 (1차)

2014년 10월 24일 (2차)

게재확정일 : 2014년 10월 28일