Journal of the Korean Geo-Environmental Society
19(11): 15～22. (November 2018) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI https://doi.org/10.14481/jkges.2018.19.11.15

광안대교 인근 퇴적토 중의 중금속 농도 및 오염도 조사 연구

Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments Near Gwangan Bridge

이 준 호[1] · 양 창 근[2] · 이 태 윤†
Junho Lee · Changgeun Yang · Taeyoon Lee

Received: August 16th, 2018; Revised: August 22nd, 2018; Accepted: October 24th, 2018

ABSTRACT : The main objective of this study was to analyse heavy metals in sediments obtained from Gwangan bridge and to evaluate pollution intensity of the sites. To evaluate pollution intensity of the sites, we used enrichment factor (EF), geoaccumulation index, potential ecological risk factor (PERF), and mean PEL quotient. Pollution intensities of these sites were evaluated by above methods, and we found most dangerous heavy metal and polluted sites. All sites showed non polluted or low risk for the heavy metals such as Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn, but all sites were categorized as minor enrichment for Cd. G4 was evaluated as moderately polluted by Cd (I_{geo}) but other sites were unpolluted by heavy metals. In summary, Cd was found to be higher concentrations for all sites. For G4 and G5 sites, Pb and Zn in addition to Cd were higher than other sites.

Keywords : Heavy metals, Enrichment factor, Geoaccumulation factor, Potential ecological risk factor, Probability of toxicity

요 지 : 본 연구는 광안대교 인근의 해저퇴적토에 포함된 중금속을 분석하여 퇴적토의 오염도를 평가하고자 하였다. 오염도 평가를 위해 Enrichment Factor(EF), Geoaccumulation index, Potential ecological risk factor(PERF), mean PEL quotient와 같은 평가방법을 사용하였다. 각 평가방법에 따라 대상 지역의 중금속 오염 정도를 확인하였고 이를 종합적으로 고려하여 어떤 지역에서 어떤 중금속이 문제가 되는지를 확인하였다. Cr, Cu, Ni, Pb, Zn의 경우 전 지역에서 비오염 혹은 영향없음으로 판별되었으나(EF<1) Cd의 경우에는 모든 지역에서 외부영향으로 인한 농도증가 양상을 보여주었다(1<EF<3). I_{geo}에 의한 평가에서는 Cd의 경우 G4에서 다소 오염으로 분류되었으나 다른 지역에서는 모두 비오염으로 평가되었다. 각 평가방법에 의한 결과를 요약하면 Cd의 경우 전 지역에서 높게 검출되었고 지역별로는 G4와 G5 지역에서 Cd를 비롯하여 Pb와 Zn의 농도가 다른 지역보다 다소 높은 것으로 확인되었다.

주요어 : 중금속, 농축계수, Igeo, 생태학적 위해성지수, 독성확률

1. 서 론

산업의 발달로 인한 대도시화는 산업폐수와 생활하수의 발생을 유발하고 이들 폐수는 도시하천을 통해 인근 바다로 유입이 된다. 대한민국 남해 동단에 위치하고 있는 부산광역시는 인구 350만의 대도시이며, 도시 내부와 외부에 많은 산업시설이 위치하고 있다. 도시내부에서 발생한 생활하수는 대부분이 하수처리를 통해 해양으로 방류되고 있지만 비점오염원을 통해 강우 시 오염물질이 적절한 처리과정 없이 해양으로 유입이 되고 있는 실정이다. 광안리 해수욕장은 부산의 대표적인 관광지나 광안만으로 유입되는 수영강과 인근 생활하수의 유입으로 인해 수질이 악화되는 실정이다(Choi et al., 1995; Choi et al., 2009). 해양으로 유입되는 폐수에 포함된 유기물 및 영양염류는 연안 해역의 부영양화를 유발할 수 있으며, 중금속의 경우에는 해저 퇴적토에 농축이 되어 잠재적 오염원이 될 수 있다(Chapman et al., 1999; Riba et al., 2003).

중금속 함유 폐수의 주요 발생원은 금속산업, 촉매산업, 배터리 생산과 같은 여러 공정에서 배출되고 있다(Aguado et al., 2009). 유기물과는 다르게 중금속은 생태계 내에서 분해가 되지 않고 생물체 내에 축적이 되어 인간의 생리 및 생물학적으로 해로운 영향을 미칠 수 있다. 여러 중금속 중에서 구리, 납, 그리고 카드뮴 등은 가장 심각한 공해물질로 분류되며, 특히 구리는 전자 산업에서 가장 널리 쓰이는 것으로 알려져 있어 많은 양의 구리가 생태계 내에 축적이 된 것으로 파악된다(El-Bayaa et al., 2009).

우리나라 연안해역의 오염도 조사는 남해에서는 마산만과 진해만을 중심으로 이루어졌고 부산 연안 해역에 대한

1) Captain, Ship Practical Training Center, Pukyong National University
2) Chief Officer, Ship Practical Training Center, Pukyong National University
† Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University (Corresponding Author : badger74w@pknu.ac.kr)

연구는 상대적으로 부족한 상황이다(Kim et al., 2013). 부산 연안 해역에 대한 연구로는 수영강 유역에서의 퇴적토 중금속 농도 조사(Yang & Kim, 1994), 광안대교 하부 퇴적토에 포함된 중금속 및 유기물 농도 조사(Kim et al., 2013), 수영만의 비점오염원 오염부하의 특성과 영향 조사(Choi et al., 1995) 등이 있다.

퇴적토에 포함된 중금속의 오염도는 Enrichment factor (Chester & Stoner, 1973), Geoaccumulation index(Müller, 1969), Potential ecological risk factor(Hakanson, 1980)를 이용하여 대상 퇴적토가 중금속에 대하여 오염된 정도를 객관적으로 평가하고 있다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 시료채취 및 분석방법

부산 광안대교 인근의 퇴적토를 채취하기 위해 부산 소재 국립 P대학교의 해양탐사선을 2017년 9월에 투입하여 300미터 당 하나의 시료를 채취하여 총 6개의 시료를 확보하였다. 시료채취는 Vanveen grab sampler를 이용하였고 샘플러의 용량은 9L에 무게는 25kg이었다. 채취한 시료는 분석 전까지 섭씨 4도에서 냉장보관하였다. 6개 시료 채취 장소는 Fig. 1에 표시하였으며 채취 순서에 따라 G1에서 G6로 명명하였다.

퇴적토의 강열감량은 해양오염공정시험법의 강열감량 시험방법에 따라 측정하였다. 퇴적토의 중금속 함량은 해양오염공정시험법의 중금속 분석방법(유도결합플라즈마발광광도법)에 따라 분석하였다. 본 연구에서는 Optima 3300XL Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer(Perkin elmer, USA)를 이용하여 11개의 중금속 분석(Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)에 사용하였다. 퇴적토의 물리화학적 특성은 XRF 분석을 통하여 퇴적토에 포함된 산화물의 조성을 이용하여 규명하였다.

2.2 오염도 산정방법

2.2.1 Enrichment Factor (EF)

EF는 인간 활동으로(anthropogenic activities) 인해 발생된 중금속의 오염 정도를 평가하는데 사용된다(Chester & Stoner, 1973; Sharareh et al., 2017). 개별 중금속에 대한 EF 값은 Eq. (1)과 같이 계산된다.

$$EF = (C_x - C_{back}) / C_{back} \quad (1)$$

여기서, C_x와 C_{back}는 각각 시료에서의 해당 중금속의 농도와 자연계에서 일반적으로 존재하는 해당 중금속의 농도(배경농도)를 의미한다. 본 연구에서는 11개의 중금속 중 6개의 중금속(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)에 대해 EF 값을 계산하였다. 6개 중금속의 배경농도는 기존 연구결과를 참조하여 결정하였다(Lee et al., 2014). 위의 배경농도는 남해안 지역 중 해안에서 멀리 떨어진 지역의 중금속 농도를 평균

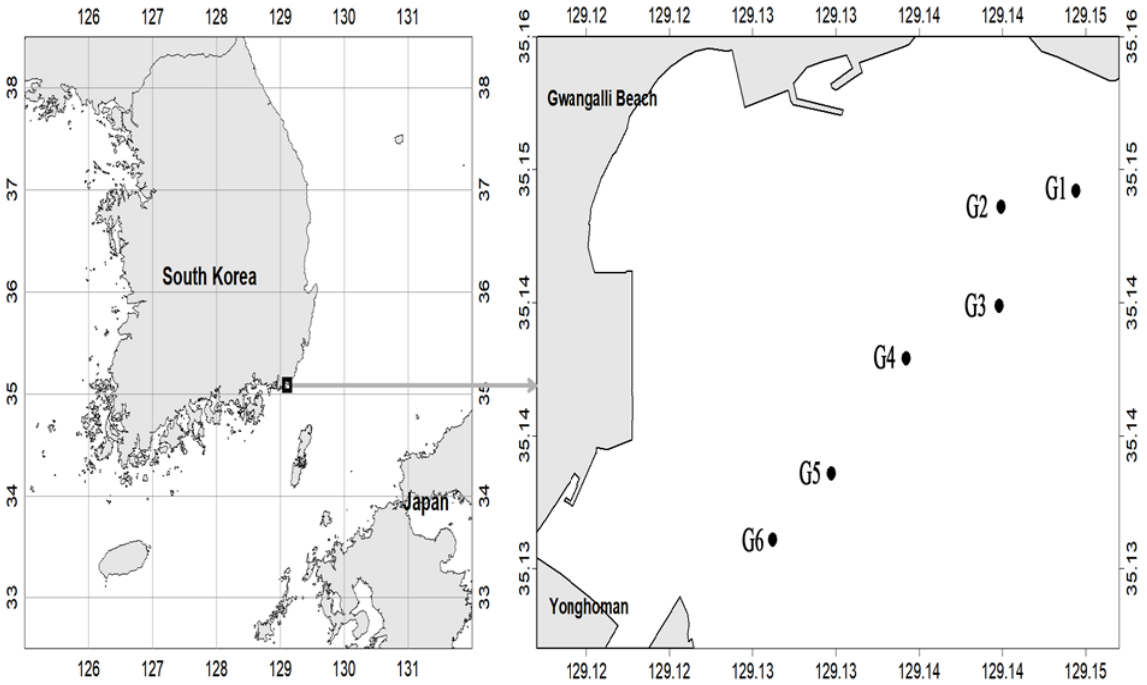

Fig. 1. Map showing the sampling sites of Gwanganlli

Table 1. Scale of pollution intensity for Enrichment Factor (EF) and geoaccumulation index values (I_{geo})

EF	Pollution intensity	I_{geo}	Pollution intensity	PERF	Ecological risks	Mean PEL quotient	Probability of toxicity (%)
<1	No enrichment	<0	Background level	<40	Low risk	<0.1	8
1-3	Minor enrichment	0-1	Unpolluted	40-80	Moderate risk	0.11-1.5	21
3-5	Moderate enrichment	1-2	Unpolluted to moderately polluted	80-160	Considerable risk	1.51-2.3	49
5-10	Moderately severe enrichment	2-3	Moderately polluted	160-320	High risk	>2.3	73
10-25	Severe enrichment	3-4	Moderately to strongly polluted	<320	Very high risk		
25-50	Very severe enrichment	4-5	Strongly polluted				
>50	Extremely severe enrichment	>5	Very strongly polluted				

한 값을 의미하는데, 오염원으로 인한 농도증가를 최대한 배제한 값으로 추정한다. 일부 지역의 경우 지질적 기원에 의해 특정원소의 농도가 높아서 자료의 왜곡이 발생할 수도 있으나 다양한 지역의 자료를 평균하였기에 일부 지역에서 발생할 수 있는 자료왜곡 현상을 최대한 배제하였다. EF 값에 따른 오염도 평가는 Table 1에 정리하였다.

2.2.2 Geoaccumulation index (I_{geo})

I_{geo}는 퇴적토에 포함된 중금속이 외부적 요인에 의해 유입된 정도를 정량적으로 표현하는 지수이며 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$I_{geo} = \log_2(C_i/1.5B_i) \quad (2)$$

여기서, C_i는 퇴적토에 포함된 중금속 i의 농도이고 B_i는 해당 중금속의 배경농도를 의미한다. 각 I_{geo} 값에 대한 오염도의 분류는 Table 1에 정리하였다.

2.2.3 Potential ecological risk factor (PERF)

PERF 지수는 시간변화에 따른 중금속오염이 환경 및 생태학적 위험성에 미치는 영향을 정량적으로 표시할 수 있다. PERF는 Eq. (3)과 같이 표현된다(Hakanson, 1980).

$$E_f^i = T_r^i\left(\frac{C_S^i}{C_{bkg}^i}\right) \quad (3)$$

여기서, E_f^i는 각 중금속에 대한 생태학적 위험인자이며, T_r^i는 각 중금속의 독성반응 인자를 의미한다. 5가지 중금속에 대한 T_r^i는 다음과 같다(i.e., Cd = 30, Cu, Pb, Ni = 5, Cr = 2, Zn = 1). C_s^i와 C_{bkg}^i는 퇴적토에 포함된 각 중금속의 농도와 배경 농도를 표시한다. PERF 값에 따른 대상 퇴적토의 환경 및 생태학적 위험성 구분은 Table 1에 요약하였다.

2.2.4 mean PEL quotient

해양 퇴적토에 포함된 중금속의 경우 해수 중에 존재하는 음이온과 결합하여 복합체(complex)의 형태로 존재한다. 이러한 요인을 고려하여 중금속의 잠재적 생물학적 위험성을 정확히 평가하기 위해 각 중금속의 mean quotients를 고려하는 평가방법이 있다. mean PEL quotient는 Eq. (4)와 같이 표현된다(Long et al., 2000).

$$\text{meanPELquotient} = \sum(C_x/PEL_x)/n \quad (4)$$

여기서, C_x는 각 중금속의 농도를 의미하고, PEL_x는 해당 중금속의 probable effects level을 나타낸다. 그리고, n은 계산에 사용된 모든 중금속의 총 숫자를 의미한다. mean PEL quotient 값에 따른 퇴적토의 분류기준은 Table 1에 요약하였다. mean PEL quotient 값이 2.3 보다 크면 이 지역은 중금속으로 인해 독성이 주변에 미칠 확률이 73% 이상이고 값이 2.3 이하일 경우에는 독성이 영향을 미칠 확률이 줄어들게 된다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 퇴적토 성분분석

XRF 분석을 통해 퇴적토에 포함된 산화물의 조성을 분석하였다(Table 2). SiO_2, Al_2O_3, CaO, Fe_2O_3의 순으로 함량이 높았으며 6개 시료 모두 조성에 있어 특이점은 없었다. 강열감량의 경우 G-2에서 4.63%로 가장 낮았고 G-2에서 9.95%로 가장 높은 값을 보였다.

Table 2. Results of oxides and ignition loss of sediments obtained from Gwangan Bridge (wt, %)

Sampling sites	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	Cl	SO_3	TiO_2	P_2O_5	MnO	SrO	Ignition loss
G-1	56.63	16.21	8.23	5.89	3.74	2.86	1.88	1.66	1.61	0.91	0.28	0.10	-	7.71
G-2	55.01	15.48	9.80	5.38	3.75	3.23	2.46	2.37	1.18	0.90	0.32	0.11	-	4.63
G-3	47.10	12.67	13.16	4.28	3.51	2.40	7.92	6.69	1.31	0.69	0.19	-	0.08	9.95
G-4	55.59	14.85	11.24	5.45	3.93	2.73	2.11	1.89	0.96	0.86	0.27	0.12	-	5.95
G-5	37.46	10.75	6.04	4.88	3.19	2.22	18.42	15.34	0.77	0.68	0.15	0.09	-	8.40
G-6	55.23	16.22	8.72	5.91	4.26	3.07	2.16	2.26	0.97	0.81	0.28	0.12	-	7.76

3.2 퇴적토 중금속 분석 결과

6개 시료에 대한 중금속 측정결과는 Table 3에 요약하였다. 분석된 중금속 중 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb와 Zn 만이 I_{geo}, EF, PERF 지수 산정에 사용이 되었고 계산값은 Table 4에 요약하였다.

3.2.1 Enrichment Factor (EF)

6개 중금속의 EF 값 중 Cd, Cr, Cu, Ni에 대해서 Fig. 2에 나타내었다. EF 값이 <1 경우에는 외부영향이 없는 것으로 분류되며 EF 값이 1-3 사이이면 미세한 외부영향으로 분류된다(Chester & Stoner, 1973; Liu et al., 2013; Sharareh et al., 2017). Cd의 경우에는 6개 지역 모두에서 미세한 외부영향이 있는 것으로 보이며 Cr의 경우에는 G5만 미세한 외부영향 값을 보이고 나머지 지역은 모두 외부영향 없음으로 나타났다. Cu와 Ni도 6개 지역 모두에서 외부영향 없음으로 분류되었다. Pb와 Zn의 경우에는 G4와 G5 지역에서 미세한 외부영향이 있었으며 나머지 지역은 모두 외부영향 없음으로 분류되었다(Table 4). Fig. 2와 Table 4의 결과를 요약하면 G4와 G5 지역에서 Pb와 Zn에 의해 미세한 외부영향이 있는 것으로 파악되며 Cd의 경우 전 지역에서 미세한 외부영향이 있는 것으로 파악되었다.

3.2.2 Geoaccumulation index (I_{geo})

Cd, Cr, Cu, Ni에 대한 I_{geo} 값을 Fig. 3에 표시하였다. Pb과 Zn 값은 Table 4에 요약하였다. Cd의 경우 G4에서 다소 오염으로 분류되었고 나머지 지역은 모두 비오염으로 분류되었다. Cr, Ni, Cu, Pb, Zn의 경우에는 모든 지역에서 비오염으로 분류되었으나 G4의 중금속 농도가 다른 지역보다 높은 것으로 판단된다.

Table 3. Concentrations of heavy metals (mg/kg) in sediments for G (1–6)

		Cu	Pb	Ni	Mn	Zn	Cd	Co	Cr	As	Al	Fe	Ignition loss (wt, %)
Sediments from Gwangan Bridge	G1	16.2	22.9	11.1	194.5	79.4	1.3	4.7	21.9	5.3	9344	13300	7.71
	G2	9.4	17.3	10.9	341.6	61.7	1.2	5.1	18.3	6.4	9086	14080	4.63
	G3	12.4	19.4	11.8	273.9	78.6	1.2	5.4	17.5	4.2	9327	14680	9.95
	G4	13.2	31.6	15.0	380.1	154.4	1.5	7.0	23.8	6.1	12110	19340	5.95
	G5	20.8	26.9	21.3	407.6	113.5	1.3	9.3	29.7	6.7	18390	26790	8.40
	G6	7.9	15.3	10.2	220.8	57.1	1.1	4.6	11.9	3.1	6424	9578	7.76

Table 4. Results of index of enrichment factor, geoaccumulation and potential ecological risk factor for samples obtained from Gwangalli

Heavy metals		Cd			Cr			Cu			Ni			Pb			Zn			
Index of Igeo, EF and PERF		I_{geo}	EF	PERF	I_{geo}	EF	PERF	I_{geo}	EF	PERF	I_{geo}	EF	PERF	I_{geo}	EF	PERF	I_{geo}	EF	PERF	Total enrichment factor (R)
Sample No.	G1	1.0	2.0	90.0	0.32	0.9	3.7	-0.5	0.03	5.2	-1.1	-0.3	3.5	0.4	1.0	10.0	0.1	0.6	1.6	4.2
	G2	0.9	1.8	83.1	0.1	0.6	3.1	-1.3	-0.4	3.0	-1.1	-0.3	3.4	0.1	0.5	7.6	-0.3	0.3	1.3	2.4
	G3	0.9	1.8	83.1	-0.1	0.5	2.9	-0.9	-0.2	3.9	-1.0	-0.2	3.7	0.1	0.7	8.5	0.1	0.6	1.6	3.1
	G4	1.2	2.4	103.8	0.4	1.0	4.1	-0.8	-0.2	4.2	-0.7	-0.1	4.7	0.8	1.7	13.8	1.1	2.1	3.1	7.2
	G5	1.0	2.0	90.0	0.8	1.5	5.1	-0.2	0.3	6.6	-0.1	0.3	6.7	0.6	1.3	11.8	0.6	1.2	2.2	6.8
	G6	0.7	1.5	76.1	-0.5	0.1	2.0	-1.5	-0.5	2.5	-1.2	-0.3	3.2	-0.1	0.3	6.7	-0.3	0.1	1.1	1.1

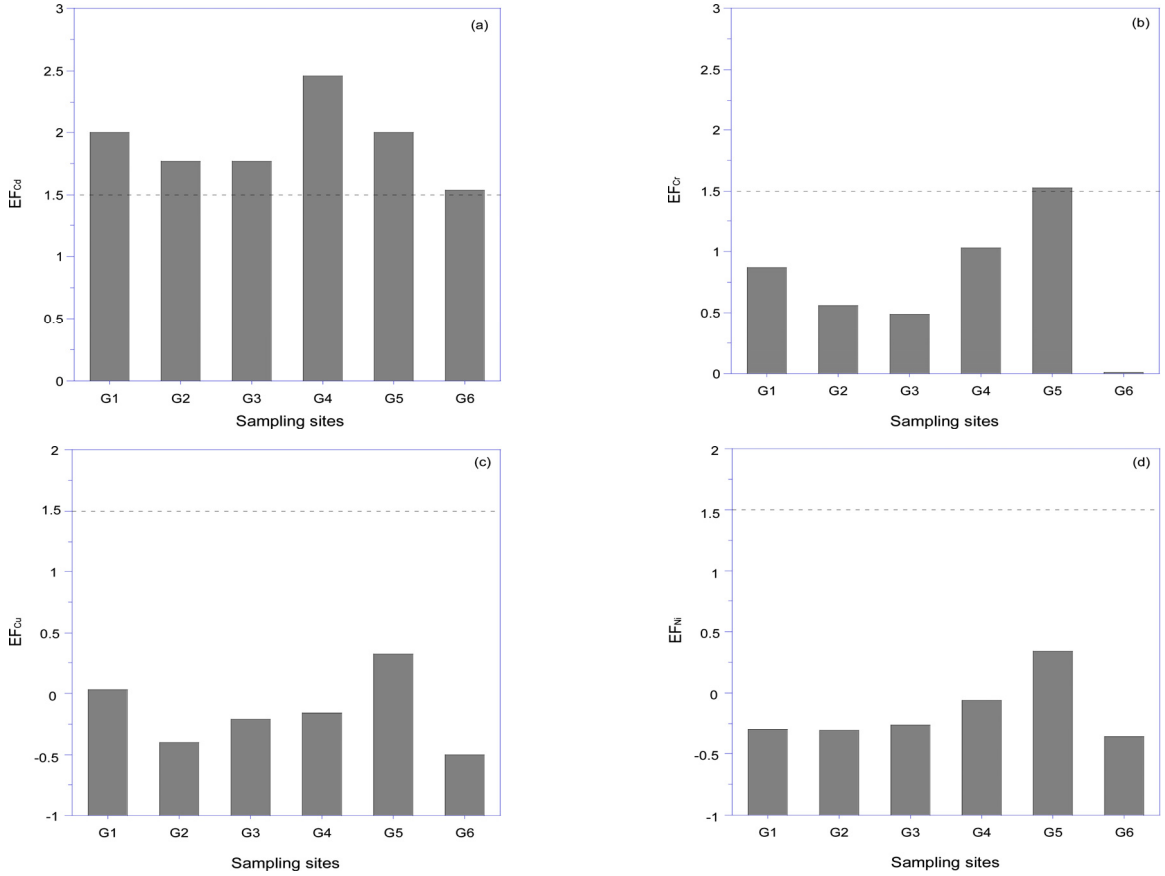

Fig. 2. The EF values of 6 sampling sites from Gwangalli for Cd (a), Cr (b), Cu (c), Ni (d). The horizontal dash line represent 1.5 of EF value

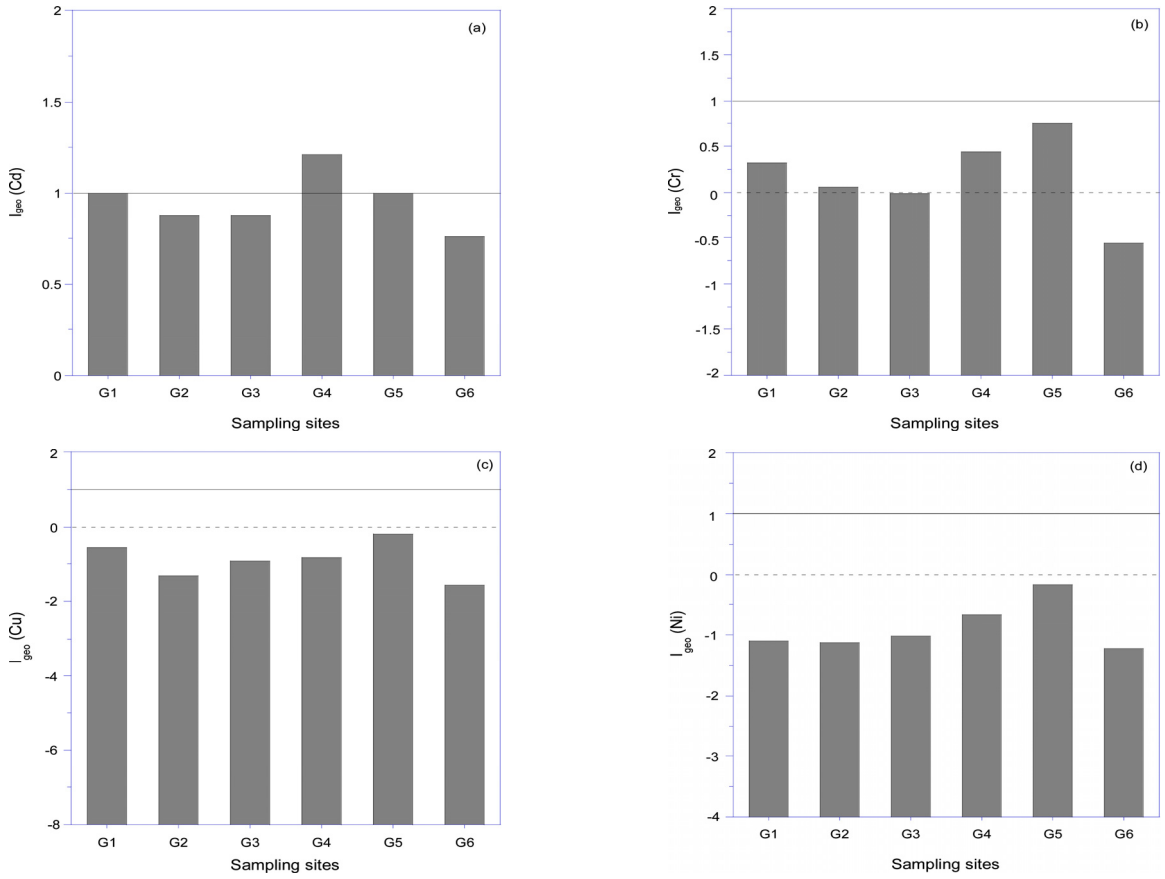

Fig. 3. The I_{geo} values of 6 sampling sites from Gwangalli for Cd (a), Cr (b), Cu (c), Ni (d)

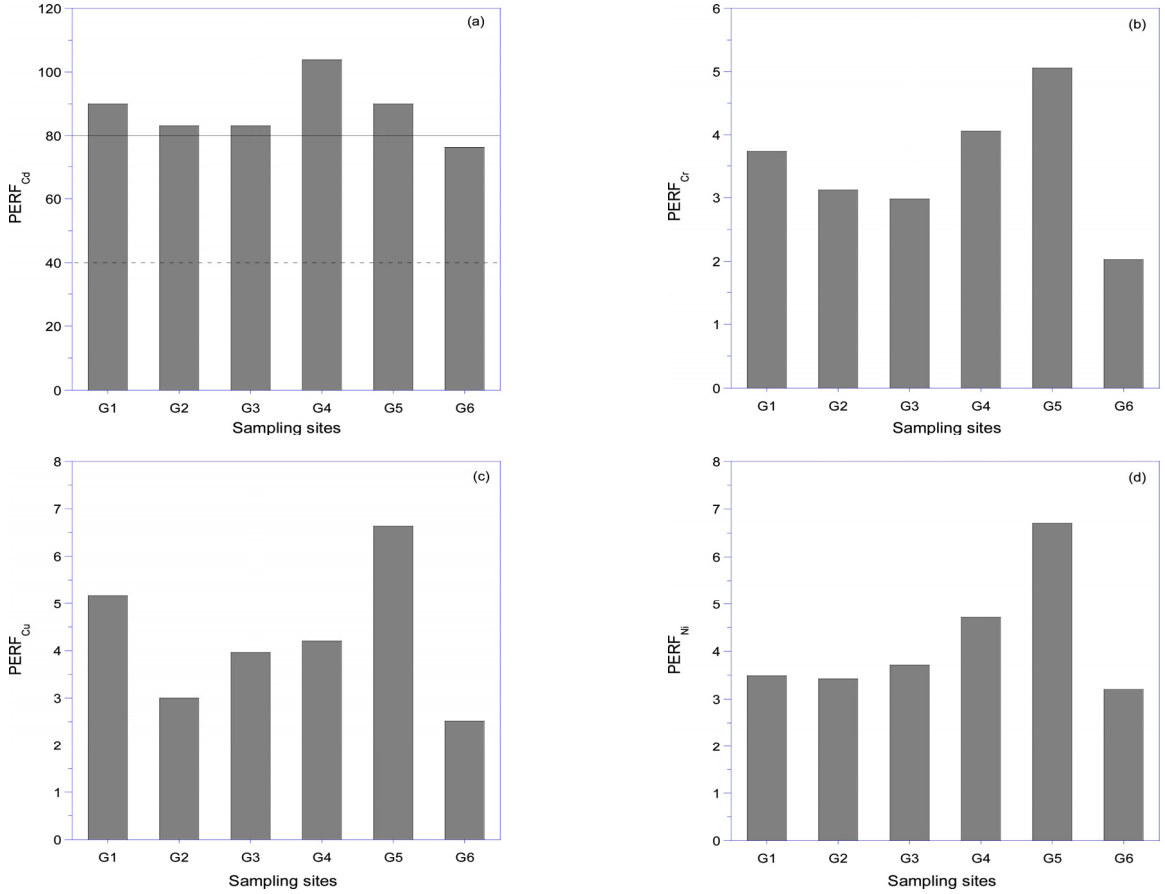

Fig. 4. The distribution of PERF values in Gwangalli sampling sites for Cd (a), Cr (b), Cu (c), Ni (d). The histogram showed the PERF values for heavy metals in sediments of Gwangalli. The horizontal solid and dash line mean the PERF values of 40 and 80, respectively

3.2.3 Potential ecological risk factor (PERF)

Cd, Cr, Cu, Ni에 대한 PERF 값을 Fig. 4에 표시하였다. PERF 값이 <40 인 경우에는 위해성 낮음으로 분류가 되는데 Cd를 제외한 5개 중금속 모두 위해성 낮음으로 분류되었다(Hakanson, 1980; Nsikak et al., 2017). Cd의 경우 G1에서 G5 지역까지 모두 심각한 위해성으로 분류되었고 G6의 경우 <80의 값을 나타내 중간 정도의 위해성으로 분류가 되었다.

3.2.4 mean PEL quotient

각 지역에서 채취한 퇴적토에 포함된 6개의 중금속에 대해 계산한 mean PEL quotient 값을 Fig. 5에 표시하였다. G4와 G5의 경우 0.3의 값을 가졌고 나머지 지역은 0.22 이하의 값을 나타내었다. Table 1의 분류표에 따르면 mean PEL quotient 값이 0.11-1.5 사이인 경우 중금속으로 인해 독성영향을 미칠 확률이 21%이므로 위 6개 지역 모두 독성영향 확률은 21%로 확인되었다(Long et al., 2000).

3.2.5 summary of PERF, EF, I_{geo} for heavy metals

각 지역에서 채취한 퇴적토에 대하여 PERF, EF, I_{geo}를 계산하였다. Fig. 6은 각 지역에서 분석된 각각의 중금속에 대해 평균 PERF, EF, I_{geo}를 계산한 값을 나타내었다. 각 중금속의 절대 농도는 Cd, Cu, Ni, Cr, Pb, Zn 순으로 증가하였지만 위해도와 오염도 지표를 나타내는 PERF, EF, I_{geo}는 절대 농도와는 다르게 변화하였다. PERF의 경우 Cd의 값이 가장 높았고 이후 다른 중금속에 대해서는 급격히 감소한 값을 보여주었다. EF와 I_{geo}의 경우에도 Cd에서 가장 높

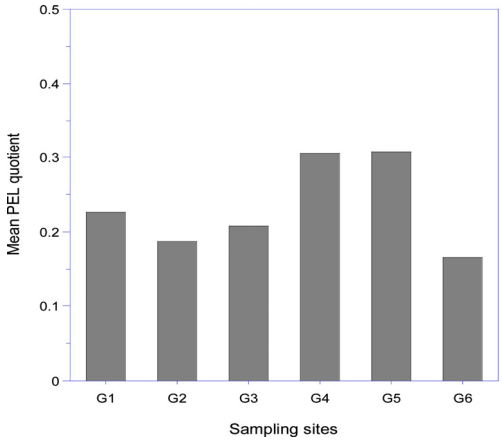

Fig. 5. The mean PEL quotient values in the surface sediments from Gwangalli

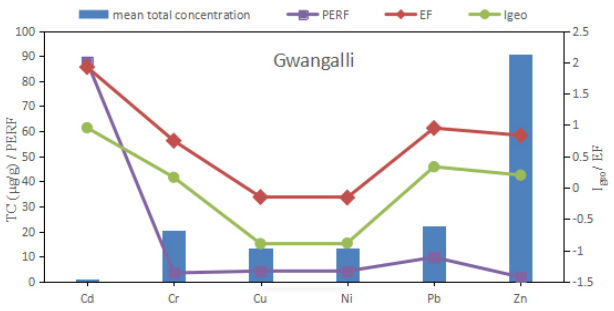

Fig. 6. The mean values of EF, I_{geo}, PERF and total concentration for metals in Gwangalli

은 값을 보였고 다른 중금속에서는 감소한 값을 보여주었다. 본 결과를 통해 광안리 지역은 Cd에 의한 오염도가 다른 중금속에 비해 비교적 높다는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 국립환경과학원에서 제시한 하천 퇴적물의 중금속 오염평가 기준을 적용하면(구리, 납, 니켈, 비소, 수은, 아연, 카드뮴, 크롬), 카드뮴을 제외한 모든 중금속은 I 등급으로 분류되어 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없음으로 분류되었다. 카드뮴의 경우는 II 등급으로 분류되어 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있음으로 분류되어 본 연구에서 제시한 해석결과와 일치함을 알 수 있었다.

4. 결 론

광안리 근처의 6개 지역에서 채취한 퇴적토에 대한 성분분석과 중금속 함량을 측정하였고, 이 자료를 바탕으로 다양한 해석방법을 이용하여 퇴적토의 오염도와 위해성을 판단하였다. 본 연구결과를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) EF를 이용한 평가에 따르면 G4와 G5 지역의 Pb와 Zn의 경우 미세한 외부영향을 받은 것으로 보이며 Cd의 경우 6개 지역 모두에서 미세한 외부영향을 받은 것으로 보인다.

(2) I_{geo}를 이용한 평가에 따르면 Cr, Ni, Cu, Pb, Zn의 경우 모든 지역에서 비오염으로 분류되었으나, Cd의 경우에는 G4에서 다소 오염으로 분류되었고 나머지 지역은 모두 비오염으로 분류되었다.

(3) 잠재적 생태위험성 지수(PERF)를 이용한 평가에 의하면 Cd를 제외한 5개 중금속 모두 전 지역에서 생태위험성 낮음으로 분류되었다. Cd의 경우 G1-G5 지역까지 심각한 생태위험성 있음으로 분류되었고 G6 지역은 중간 정도의 생태위험성으로 분류가 되었다.

(4) mean PEL quotient를 이용한 평가에서는 모든 지역에서 중금속으로 인해 독성영향을 미칠 확률이 21%로 확인되었다.

(5) 6개 지역에서 측정된 각 중금속들의 평균값을 이용하여 위 지수값들을 계산한 결과 Cd에 의한 오염도가 다른 중금속에 의한 오염도 보다 높게 나온 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 부경대학교 대학회계 자율창의연구비(C-D-2017-0376)와 한국연구재단 지역대학우수과학자 지원사업(C-D-2018-0411)의 지원으로 수행이 되었습니다.

References

1. Aguado, J., Arsuaga, J. M., Arencibia, A., Lindo, M. and Gascón, V. (2009), Aqueous heavy metals removal by adsorption on amine-functionalized mesoporous silica, Journal of Hazardous Materials, Vol. 163, No. 1, pp. 213~221.
2. Chapman, P., Wang, F., Adams, W. and Green, A. (1999), Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids, Environmental Science and Technology, Vol. 33, No. 2, pp. 3937~3941.
3. Chester, R. and Stoner, J. H. (1973), Pb in particulates from the lower atmopshere of the eastern Atlantic, Nature, Vol. 245, No. 1, pp. 27~28.
4. Choi, E. I., Lee, S. M. and Park, C. K. (1995), The characteristics and effects of pollutant loadings from nonpoint sources on water quality in Suyeong bay, Journal of Korean Fishery Society, Vol. 23, No. 3, pp. 279~293 (In Korean).
5. Choi, C. J., Oh, C. Y. and Lee, C. H. (2009), The coastline change on Gwangalli using spatial information, Journal of Spatial Information, Vol. 17, No. 1, pp. 13~19 (In Korean).
6. El-Bayaa, A. A., Badawy, N. A. and Abd AlKhalik, E. (2009), Effect of ionic strength on the adsorption of copper and chromium ions by vermiculite pure clay mineral, Journal of Hazardous Materials, Vol. 170, No. 2-3, pp. 1204~1209.
7. Hakanson, L. (1980), An ecological risk index for aquatic pollution control, A dedimentological approach, Water Research, Vol. 14, No. 10, pp. 975~1001.
8. Kim, S. K., Ahn, J. W., Kang, S. W., Yun, S. L., Lee, J. W., Lee, J. K., Lim, J. H., Kim, D. S. and Lee, T. Y. (2013), Estimation of contamination level of sediments at the below of Busan Gwang-an Bridge, Vol. 35, No. 11, pp. 1~6 (In Korean).
9. Lee, J. K., Lim, J. H., Han, K. S. and Lee, T. Y. (2014), Characterization of marine sediments obtained near Hansan Island of South Sea, Journal of Korea Society of Waste Management, Vol. 31, No. 4, pp. 1~8 (In Korean).
10. Liu, Q., Liang, L., Wang, F. and Liu, F. (2013), Characteristics of heavy metals pollution in sediment of the hydro-fluctuation belt in the Liao River of Liaoning, Chinese Environmental

Science, Vol. 33, No. 12, pp. 2220~2227.
11. Long, E. R., MacDonald, D. D., Severn, C. G. and Hong, C. B. (2000), Classifying probabilities of acute toxicity in marine sediments with empirically derived sediment quality guideline, Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 19, No. 7, pp. 2598~2601.
12. Müller, G. (1969), Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River, Geoscience Journal, Vol. 2, No. 2, pp. 108~118.
13. Nsikak, U. B., Essien, D. U. and Joseph, P. E. (2017), Geochemical fractionation and ecological risks assessment of benthic sediment-bound heavy metals from coastal ecosystems off the Equatorial Atlantic Ocean, International Journal of Sediment Research, Vol. 32, No. 3, pp. 410~420.
14. Riba, I., Blasco, J. and DelValls, T. (2003), Bioavailability of heavy metals bound to estuarine sediments as a function of pH and salinity values, Chemical Speciation Bioavailability, Vol. 15, No. 3, pp. 101~114.
15. Sharareh, K., Misni, S., Wan, M. and Reza, D. (2017), Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Bayan Lepas area, Penang, Malaysia, Marine Pollution Bulletin, Vol. 114, No. 1, pp. 615~622.
16. Yang, H. S. and Kim, S. S. (1994), Pollution of heavy metals and sedimentation rate in the sediments of Suyeong Bay, Pusan, Bulletine of Korean Fishery Society, Vol. 27, No. 5, pp. 643~658 (In Korean).