

제주외항 퇴적토 오염도 평가

Estimation of Contamination Level of Sediments Obtained from the Outport of Jeju Harbor

이상민 · 김동수* · 이태윤[†]

Sangmin Lee · Dongsoo Kim* · Tae-yoon Lee[†]

국립부경대학교 환경공학과 · *국립부경대학교 바이오신소재공학과

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

*Department of Marine Bio-Materials & Aquaculture, Pukyong National University

(Received January 14, 2015; Revised March 12, 2015; Accepted March 23, 2015)

Abstract : In this study, physico-chemical properties and heavy metal contents of sediment samples were determined to characterize the current pollution levels of the sediments. Ignition loss of the samples obtained from outside of the harbor was relatively lower than that from the samples obtained inside of the harbor. Heavy metal pollution was not serious except Ni. Concentrations of Ni for J1, J3, and J4 exceeded 16 mg/kg. Thus, these areas were classified as lowest effect level according to Ontario sediment quality guidelines. Evaluation of sediments pollution using I_{geo} and R resulted as non-pollution for all considered metals, which indicated that no outer pollutants entered in the Jeju outport harbor. However, drastic increase of Cu concentrations was observed. Its concentration obviously increased toward the inside of the outport harbor. Therefore, careful attention and plan for the protection and remediation of sediments is required to maintain the cleanness of the Jeju outport harbor.

Key Words : Jeju Outport Harbor, Sediments, Evaluation of Pollution, Heavy Metals, Ignition Loss

요약 : 본 연구에서는 해양에서 채취한 퇴적토의 오염도를 평가하기 위해 물리화학적 특성 및 중금속 농도를 측정하여 오염도를 산정하였다. 제주외항 퇴적토 중 항구 외부에서 측정된 강열감량은 항구 내부의 강열감량보다 낮게 측정이 되었다. 중금속의 경우 Ni를 제외하고는 기준치를 초과하지 않았다. Ni의 경우 J1, J2, J3 지점에서 기준치인 16 mg/kg을 초과한 것으로 판명되었다. 따라서, 이 세지점은 온타리오 퇴적토 관리 지침에 따라 최소영향수준으로 분류되었다. I_{geo} 와 R 분석 결과를 통해 시료 채취 지점은 외부의 오염원의 유입이 없는 것으로 판명되었으나, 항만 외부에서 내부쪽으로 구리의 농도가 급격하게 증가하는 것이 관측되었다. 따라서, 향후 제주외항 퇴적토의 환경관리를 위해서는 구리를 포함한 중금속의 오염 증가 양상을 지속적으로 모니터링 하여 퇴적토 오염관리를 할 필요성이 있다고 본다.

주제어 : 제주외항, 퇴적토, 오염도 산정, 중금속, 강열감량

1. 서론

제주시의 국제 자유도시 개발계획이 확정된 후 국내의 관광 및 화물량의 증가에 대비하여 제주외항 1, 2단계 개발 사업이 10년간의 공사를 통해 2011년 12월에 완공되었다. 제주외항은 제주시 건입동 화북지역 전면해상에 위치하며 외곽시설은 서방파제 1,425 m와 동방파제 390 m로 구성되어 있으며 접안시설은 80,000톤급의 대형유람선이 접안할 수 있는 국제 유람선 부두 1선석 및 여객·화물부두 6선석으로 구성되어 있다.

항만건설은 재화의 이동과 보관에 중요한 역할을 하지만 건설 활동으로 인해 해양환경에 악영향을 주기도 한다. 항만건설은 다음과 같은 부정적인 환경영향을 미칠 수 있는데, (1) 방파제의 설치는 해양퇴적물의 이송을 변동시키며, (2) 선박의 부식방지를 위한 방청페인트의 유출, 선박으로부터의 유류오염의 가능성이 있으며, (3) 선박평형수(ballast water)에 포함된 외래종의 유입에 의한 생태계 교란의 우려가 있다.¹⁾ 일반적으로 항만활동을 통해 오염이 발생하는 경

우가 많으며, 외부 해수, 퇴적토, 그리고 바다생물의 유입으로 인해 오염이 확산되는 경우도 종종 발생한다.^{2,3)}

이 중 퇴적토에 대해서는 특별한 관리가 필요한데, 이는 해수에 비해 많은 양의 오염물질이 축적되어 있으며 퇴적토로부터 오염물질이 다시 용출되어 환경을 오염시키는 2차 오염원의 역할을 하기 때문이다.⁴⁾ 제주외항의 향후 운영 시 항구수심 확보 및 퇴적토 오염제거를 위해 준설작업이 필요한데, 이는 준설작업으로 인한 퇴적토의 부상으로 생태계에 영향을 미칠뿐더러 해류에 따라 부유물이 넓은 지역으로 확산될 수 있기 때문이다. 또한 준설된 퇴적토의 처리는 또 다른 환경문제를 야기할 수가 있다. 이와 같이 항만퇴적토의 관리 및 오염여부의 판별은 항만운영에 있어 중요한 환경관리 수단이 될 수 있다. 이에, 퇴적토의 오염여부를 가리기 위해 세계 각국에서 퇴적토 오염기준을 제시하고 있는데, 그중 미국과 캐나다에서 제시한 기준이 널리 사용되고 있다.^{5,6)} 미국과 캐나다에서 제시한 기준은 중금속과 유기물질 함량을 기준으로 오염도 정도를 분류하는 방법이며, 오염되지 않은 지역을 기준으로 해당 지역의 상대적인 오염도

[†] Corresponding author E-mail: badger74w@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6530 Fax: 051-629-6523

를 평가하는 기법인 지화학적 농축계수인 index of geoaccumulation (I_{geo})과 중농축계수법인 enrichment factor (EF)도 널리 사용된다.^{7,8)}

본 연구에서는 제주시 인근에 위치한 제주외항의 퇴적토를 채취하여 유기물 및 중금속 함량을 측정하였고, 미국, 캐나다에서 제시한 절대적 기준치와 상대적 평가기법인 I_{geo} 와 EF를 이용하여 오염여부를 판명하고자 하였다. 이는 향후 제주외항 퇴적토 관리에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 시료채취 및 연구범위

제주외항 저층의 퇴적토를 채취하기 위해 부산 소재 P대학교의 600톤급 해양탐사선을 2013년 11월에 투입하여 외항 외부 2곳과 외항 내부 2곳의 시료채취 장소를 설정한 후 Vanveen grab sampler로 시료를 채취하였다. 샘플러의 용량은 9 L이며, 320×270 mm의 크기에 무게는 25 kg이었다. 퇴적물 시료는 시료의 균일성 확보를 위해 각 시료채취 장소를 기준으로 동서남북 50 m에 위치한 4지점에서 채취하여 균일하게 혼합 후 실험실로 운반하여 4℃에서 냉장보관 후 해양환경 공정시험방법에 의거하여 분석을 실시하였다. 4개의 시료채취 장소는 Fig. 1에 표시되었다. 시료채취 장소는 채취 순서대로 J1에서 J2로 명명하였다.

2.2. 실험방법

퇴적토의 유기물 함량을 나타내는 강열감량은 해양오염 공정시험법의 강열감량 시험방법에 따라 충분히 건조된 시료 5 g을 550℃ 전기로에서 2시간 동안 강열시킨 후 시료를 데시케이터 속에서 항량이 되도록 건조한 후, 강열 전·후의 무게 차로 계산하였다. 퇴적물의 원소분석은 충분히 건조된 시료를 200 mesh 이하로 분쇄한 후 Vario Macro and

Micro Elemental Analyzer (Elementar, Germany)를 이용하여 수행되었다.

퇴적토의 중금속 함량은 해양오염공정시험방법의 중금속 분석방법(유도결합플라즈마발광광도법)에 따라 분석하였다. 퇴적토 시료 1.0 g을 테플론 비이커에 넣고 진한 질산 10 mL, 과염소산 10 mL를 첨가한 후 가열판 온도를 서서히 130℃까지 증가시켜 시료를 분해시켰다. 발연이 끝난 후 실온까지 방치한 후 100 mL 메스플라스크에 유리섬유지를 이용하여 잔사를 분리한 후 시료용액을 담은 후 1N 질산용액으로 정용하여 측정용 시료용액을 준비하였다. 본 연구에서는 Optima 3300XL Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer (Perkin elmer, USA)를 사용하여 중금속 항목을 분석하였다.

퇴적물의 광물조성은 XRD 회절분석을 통해 조사되었고, 물리화학적 특성은 XRF 분석을 실시하여 퇴적물에 포함된 산화물의 함량을 조사하여 규명하였다.

2.3. 오염도 산정방법

본 연구에서는 현재 세계적으로 가장 많이 인용되고 있는 퇴적물 환경기준인 USEPA에서 설정한 오대호 퇴적물 분류기준과 캐나다 온타리오 환경부 퇴적물 환경기준(OSQG)을 적용하여 오염도를 평가하였다. USEPA에서는 5개의 중금속(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn), 퇴적물 COD, 강열감량을 기준으로 비오염, 중간오염, 심한오염으로 분류하고 있다. 캐나다의 경우에는 5개의 중금속(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn)과 TOC를 기준으로 비오염, 최소영향수준, 심각영향수준으로 분류하고 있다. 중금속 오염도 평가는 퇴적물 시료의 중금속 농도를 측정 한 후, 각 중금속에 대해 I_{geo} 값을 계산하여 퇴적물의 오염도를 산정한다.⁷⁾ I_{geo} 값은 식 (1)로 계산하였다.

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

여기서, C_n 은 퇴적물 시료에서 측정된 중금속 n의 농도이고,

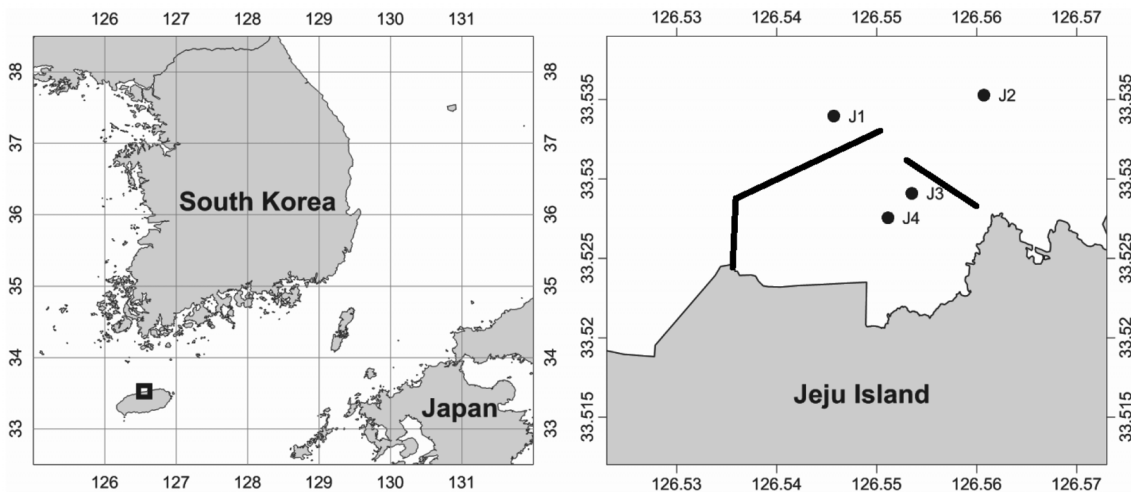


Fig. 1. Map showing the sampling sites of the outport of Jeju harbor.

Table 1. Scale of pollution intensity for Geoaccumulation index values (I_{geo})

I_{geo}	Class	Pollution intensity
>5	6	Very strongly polluted
4-5	5	Strongly polluted
3-4	4	Moderately to strongly polluted
2-3	3	Moderately polluted
1-2	2	Unpolluted to moderately polluted
0-1	1	Unpolluted
<0	0	Background levels

B_n 은 중금속 n의 배경농도를 의미한다. 배경농도의 변동성을 고려하여 보정 상수 1.5를 곱하여 전체적으로 값을 보정하여 준다. I_{geo} 값을 이용한 퇴적물의 오염도 산정은 Table 1에 요약되어 있다.

퇴적물 시료에서 측정된 각각의 중금속 항목들에 대한 중농축계수(EF)는 식 (2)로 계산하였다.

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

여기서, C_{sed} 는 퇴적물 시료에서 측정된 각각의 중금속 농도이며, C_{back} 는 해당되는 중금속의 배경농도를 의미한다. 여기서, EF의 값이 1보다 크면 인간 활동에 의한 외부오염의 가능성이 있는 것으로 산정한다. 모든 중금속에 대한 영향은 각 시료에서 측정된 각각의 EF 값을 모두 더한 값을 총중농축계수(R)라고 하여 식 (3)으로 계산하였다.

$$R = (\sum EF)/n \quad (3)$$

여기서, n은 고려대상 중금속 숫자이며, R값이 1보다 작으면 비오염, $1 < R < 2$ 은 경우에는 약한 오염, $2 < R < 3$ 은 경우에는 중간 오염, 그리고 $R > 3$ 경우에는 심한 오염으로 분류한다.

3. 실험결과 및 해석

3.1. 퇴적토 성분분석

제주외항 내부와 외부에서 채취한 4개 시료에 대한 원소 분석 및 강열감량 값이 Table 2에 요약되어 있다. C의 경우 3.3~7.5%, N은 0.6~0.8%의 값을 가졌다. S의 경우 0.3 (J1)~1.0% (J4)로 다른 원소들에 비해 채취 장소에 따른 편차가 큰 것으로 밝혀졌다. 강열감량의 경우 J2 시료의 경우 4.5%

Table 2. Results of elemental analyses and ignition loss of sediments obtained from outport of Jeju harbor

Sampling sites	Elemental analyses (wt, %)				Ignition loss (wt, %)
	N	C	H	S	
J1	0.64	7.46	0.365	0.385	7.3
J2	0.59	5.43	0.181	0.272	4.5
J3	0.73	3.33	0.255	0.357	8.5
J4	0.80	4.17	0.558	0.956	10.6

로 가장 낮은 값을 나타내었고 인근에 위치한 J1은 7.3%의 값을 보였다. 이에 반해 항만 내부에서 채취한 시료의 경우 8.5% (J3)와 10.6% (J4)로 외부에서 채취한 두 곳의 시료보다 높은 값을 나타내었다. 미국환경보호청에서 제시한 강열감량 기준은 <5%(비오염지역), 5~8%(중간오염지역), >8%(심하게 오염된 지역)로 제시하였는데, 이 기준에 따르면 J1은 중간오염지역, J2는 비오염지역, 그리고 J3와 J4는 심하게 오염된 지역으로 분류된다. 강열감량 기준은 미세입자들의 함량이 높을수록 오염물질 중 특히 중금속오염의 가능성이 높다는 것을 의미하지만, 모든 지역에 일률적으로 위의 기준으로 오염도를 판별하는 것은 다소 무리가 있다고 판단된다.

퇴적토 시료에 포함된 산화물에 대한 분석결과는 Table 3에 요약되어 있다. 모든 시료에서 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, Fe_2O_3 , K_2O , MgO, Na_2O 의 합이 95% 이상이었으며, SiO_2 와 CaO의 함량은 전체의 60% 이상이었다. 산화물 중 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 는 항만 외부에서 내부 쪽으로 이동할수록 증가하는 양상을 보였으며, 이에 반해 CaO는 항만 내부로 이동함에 따라 급격히 감소하는 경향을 보여주었다(Fig. 2). 이 분석을 통해 과거 항만공사를 수행하는 과정에서 항만 내부의 준설로 인해 항만내부와 항만외부의 퇴적토가 서로 다른 성분을 가지게 되었다고 판단된다.

3.2. 퇴적토 중금속 농도 및 오염도 평가

제주외항 내부와 외부 퇴적토에 대한 중금속 함량 분석(As, Be, Cr, Cd, Cu, Fe, Ni, Zn, Sb, Ti, Pb)을 실시하였고 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

중금속의 경우에는 USEPA와 캐나다 온타리오 퇴적토 오염기준에 포함된 5개의 중금속(Cd, Cu, Ni, Zn, Pb)을 이용해 퇴적물 오염도를 평가하였다. Cd의 경우, 4개 시료 모두 0.6 mg/kg 이하이므로 비오염으로 평가되었다. Cu의 경우에는 J2에서는 검출되지 않았고 나머지 지역도 모두 기준치 이하이므로 비오염으로 분류되었다. Ni의 경우에는 J3가 비오염기준인 20 mg/kg을 초과하는 23.6 mg/kg이므로 중간정도 오염으로 평가되었고 나머지 지역들은 모두 비오염

Table 3. Results of oxides, total organic carbon, and ignition loss of sediments collected from sediments of Gwangan bridge (wt, %)

Sampling sites	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	MgO	Cl	Na_2O	SO_3	TiO_2	P_2O_5	MnO	ZnO	SrO
J1	25.45	8.04	5.12	1.45	45.03	4.34	3.47	4.16	1.20	1.07	0.36	0.09	ND	0.23
J2	28.75	9.35	6.83	1.47	37.05	4.04	3.32	5.62	0.92	1.81	0.55	0.08	ND	0.21
J3	39.79	12.80	7.91	1.81	20.75	3.99	3.27	5.73	0.94	2.11	0.68	0.10	ND	0.11
J4	42.85	12.78	8.54	2.12	17.67	4.86	2.76	3.11	2.99	1.59	0.54	0.10	ND	0.08

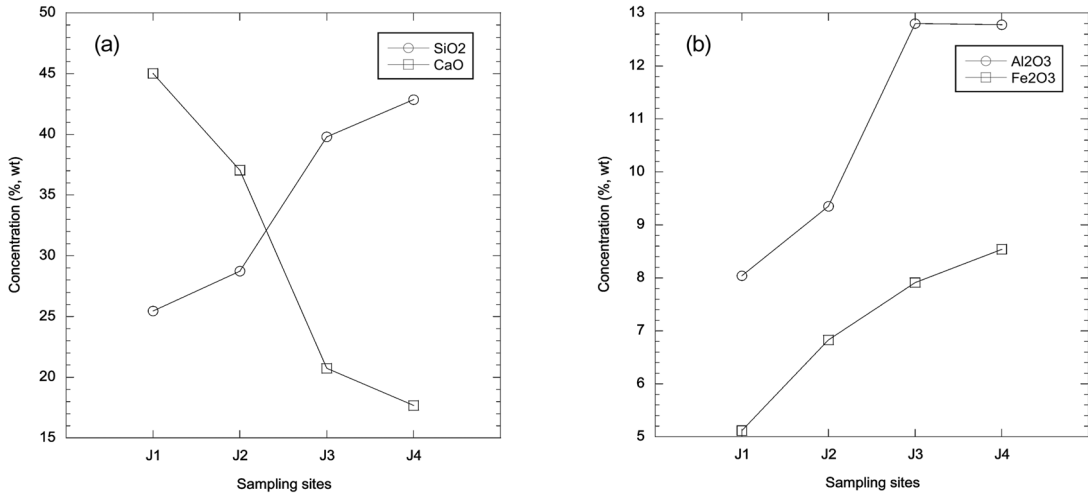


Fig. 2. Concentrations of (a) SiO₂ and CaO and (b) Al₂O₃ and Fe₂O₃ measured at Sampling sites between J1 and J4.

Table 4. Concentrations of heavy metals (mg/kg) in sediments and pollution criteria proposed by USEPA and Canada

		As	Be	Cr	Cd	Cu	Fe	Ni	Zn	Sb	Ti	Pb	Ignition loss (wt, %)
USEPA sediment quality standards	Non polluted	-	-	-	-	<25	-	<20	<90	-	-	<40	<5
	Moderately polluted	-	-	-	-	25~50	-	20~50	90~200	-	-	40~60	5~8
	Heavily polluted	-	-	-	>8	>50	-	>50	>200	-	-	>60	>8
Ontario sediment quality guidelines	No effect level	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Lowest effect level	-	-	-	0.6	166	-	16	120	-	-	31	-
	Severe effect level	-	-	-	10	110	-	75	820	-	-	250	-
	J1	5.1	ND	8.8	0.3	0.4	13240	17.9	28.7	ND	681	4.4	7.3
	J2	15.2	ND	7.0	0.5	ND	16190	15.8	34.1	ND	978	5.8	4.5
	J3	8.3	ND	9.8	0.4	5.6	22530	23.6	31.1	ND	1120	4.9	8.5
	J4	12.5	ND	4.8	0.6	10.6	7157	18.8	54.5	ND	1293	10.3	10.6

으로 분류되었다(USEPA 기준). 캐나다 온타리오 퇴적물 오염기준을 적용하면 J2는 영향 없음으로 분류되고 나머지는 16 mg/kg을 초과하므로 최소영향수준과 심각영향수준 중간단계로 분류되었다. Zn과 Pb의 경우에는 USEPA와 캐나다 온타리오 퇴적물 오염기준을 모두 적용해도 비오염으로

분류되었다.

중금속 각각에 대해 오염기준을 적용하여 오염여부를 판별해 보았으며, 항만내부와 외부의 중금속 결과에 대한 비교를 통해 항만운영을 통한 중금속 농도 변화를 살펴보기 위해 Fig. 3에 해당 중금속 농도변화를 도시하였다.

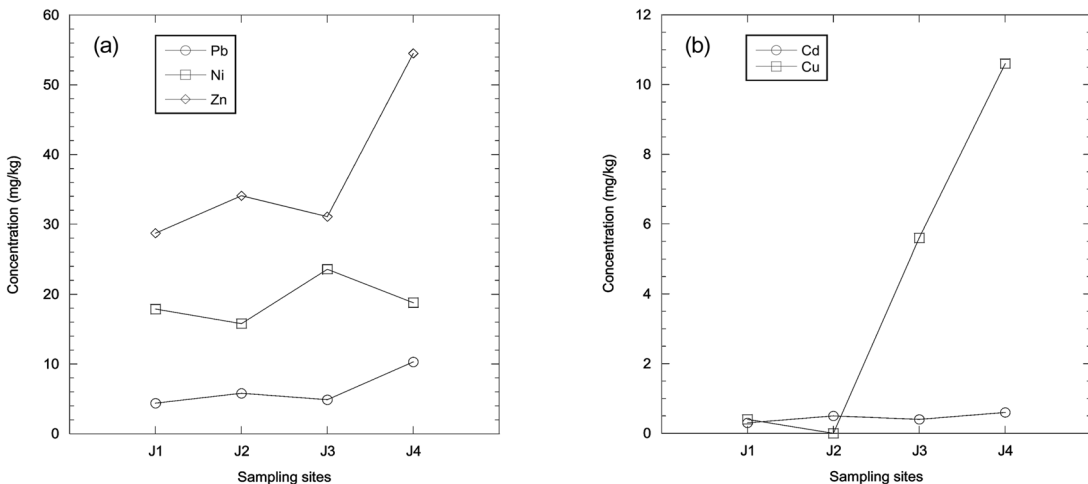


Fig. 3. Distributions of Metals measured at Jeju Harbor: (a) Concentrations of Pb, Ni, Zn and (b) Cd and Cu.

Ni의 경우 항만 내부와 외부의 농도변화가 거의 없었지만, Pb과 Zn의 경우 외부에서 내부로 이동 시 농도가 증가하는 것이 관측되었다. J1의 Pb 농도는 4.4 mg/kg이지만 가장 내부에 위치한 J4의 경우 10.3 mg/kg으로 두 배 이상 농도가 증가하였다. Zn의 경우도 J1의 28.7 mg/kg에서 J4의 54.5 mg/kg으로 급격히 증가한 것을 알 수 있었다. Cd의 경우도 J1에서는 0.3 mg/kg이었지만 J4에서 0.6 mg/kg으로 두배 증가하였다. Cu의 경우 가장 큰 농도변화를 보였는데, J1에서 0.4 mg/kg이었지만 J4에서 10.6 mg/kg으로 20배 이상 증가한 것을 확인하였다. 항만 내부와 외부의 중금속 농도 차이는 항만활동에 따른 영향으로 판단되는데, 이와 유사한 사례가 부산북항,⁹⁾ 부산남항,¹⁰⁾ 통영항 및 인근 수역¹¹⁾의 퇴적토 연구에서 관측되었다. 부산 북항과 남항의 경우 전체적으로 중금속 함량이 높았으며, 통영항의 경우에는 항만 근처 퇴적토에서 높은 농도의 Cu가 검출되었다. Cu의 농도는 항만에서 멀어질수록 점차 감소하였는데 이는 본 연구결과와 유사하다고 볼 수 있다.

3.3. 지화학적 농축계수(I_{geo})와 중농축계수법(R)에 의한 오염도 평가

제주외항 퇴적토 시료에서 분석된 중금속들에 대한 지하학적 농축계수와 중농축계수가 Table 5에 요약되어 있다. 배경농도에 대한 자료를 구할 수 있었던 Cr, Cu, Fe, Ni, Zn에 대해 분석을 수행하였다.¹²⁾ 먼저 I_{geo} 결과 값에 의하면, Cr, Cu, Fe, Ni, Zn는 0과 1의 사이 값을 나타내어 1그룹으로 분류된다. 1그룹은 비오염으로 분류되기 때문에 7개 시료 모두 상기 5개 중금속에 대해 비오염이라고 판단된다. 1보다 작기 때문에 Class 1로 분류되며, 이는 상기 중금속에 대해 오염이 없음을 알려주고 있다.

중농축계수(EF)가 1보다 클 경우에는 인간 활동에 의한 외부오염의 영향이 있다고 판단되는데, 본 연구결과에서는 Cr, Cu, Fe, Ni, Zn의 경우, 모든 지역에서 음의 값이 도출되었으므로 외부에서 유입되는 오염원은 없는 것으로 판단된다. 총 중농축계수(R)를 이용하여 퇴적물의 오염도를 평가하면 모든 항목에 대해 음의 값을 보이므로 4개 지점은 오염되지 않은 것으로 판단된다.

Table 5. Concentrations of background levels for heavy metals (mg/kg) in southern sea of Korea and results of Index of geoaccumulation and enrichment factor for samples obtained from sediments of Gwangan bridge

	Cr		Cu		Fe		Ni		Zn			
Average concentrations of metals for sediments of south sea	53		11		25,500		25		61			
Index of geoaccumulation (I _{geo}) and enrichment factor (EF)	I _{geo}	EF	I _{geo}	EF	I _{geo}	EF	I _{geo}	EF	I _{geo}	EF	Total enrichment factor (R)	
Sediment samples	J1	0.03	-0.83	0.01	-0.96	0.00	-0.48	0.14	-0.28	0.09	-0.53	-3.09
	J2	0.03	-0.87	0.00	-0.99	0.00	-0.37	0.13	-0.37	0.11	-0.44	-3.03
	J3	0.04	-0.82	0.10	-0.49	0.00	-0.12	0.19	-0.06	0.10	-0.49	-1.97
	J4	0.02	-0.91	0.19	-0.04	0.00	-0.72	0.15	-0.25	0.18	-0.11	-2.02

Table 6. Comparison of qualitative classification of sediments based on different interpretative approaches

Sampling sites	Geochemical approach		USEPA	Canadian standard
	I _{geo}	R		
J1	Unpolluted	Unpolluted	Moderately polluted	Lowest effect level
J2	Unpolluted	Unpolluted	Non polluted	No effect level
J3	Unpolluted	Unpolluted	Heavily polluted	Lowest effect level
J4	Unpolluted	Unpolluted	Heavily polluted	Lowest effect level

3.4. 제주외항 퇴적토 오염도 평가 요약

4개 지점의 퇴적토에 대한 오염도 평가 결과가 Table 6에 요약되어 있다. 중금속에 대한 평가 결과 I_{geo}와 R값 모두 기준치 이하의 값으로 비오염으로 판명되었다. USEPA 기준으로 분류하면 중금속의 경우에는 Ni에 의해 J3 지역이 중간오염으로 분류되고 나머지 지역은 비오염으로 분류되었다. 하지만, 강열감량의 값을 적용하면 J3와 J4는 심한오염으로 분류되었으며 J1은 중간오염, 그리고 J2는 비오염으로 분류되었다. 캐나다 기준으로 분류할 경우에는 높은 Ni의 농도로 인해 J2를 제외한 나머지 지역은 최소영향수준으로 분류되었다.

4. 결론

본 연구에서는 제주외항의 퇴적토 오염도를 조사하기 위해 외항 내부 2곳과 외부 2곳을 선정하여 퇴적토 시료를 채취한 후 기본 물성치 및 중금속 함량을 측정하였다. 강열감량과 중금속 농도를 기준으로 다양한 퇴적토 오염기준을 적용하여 이 지역 퇴적물의 오염도를 평가하고자 하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 4개 지역에 대한 강열감량 분석 결과 강열감량의 경우 4.5~10.6%의 분포를 보였다. J2의 경우 4.5%로 USEPA 기준으로 볼 때 비오염이었으며, J1은 7.3%로 중간오염으로 분류되었다. 이에 반해 제주외항 내부인 J3와 J4는 8.5%와

10.6%로 심한 오염으로 분류되었다. 따라서, 외항 내부의 경우 외부에 비해 퇴적토에 유기물 함량이 높게 포함되어 있는 것을 알 수 있었다.

2) 퇴적물 시료에 포함된 산화물에 대한 분석결과를 통해 모든 시료에서 SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃, K₂O, MgO, Na₂O의 합이 95% 이상이었으며, SiO₂와 CaO의 함량은 60% 이상이었다. 산화물 중 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃는 항만 외부에서 내부쪽으로 이동할수록 증가하는 양상을 보였으며, 이에 반해 CaO는 항만 내부로 이동함에 따라 급격히 감소하는 경향을 보여주었다. 이는 항만 내부와 외부의 퇴적토 조성성분이 다르다는 것을 의미하며, 항만공사 시 혹은 운영과정을 통해 다른 성분의 물질이 퇴적토에 퇴적된 것으로 사료된다.

3) USEPA의 기준에 따라 중금속 오염도를 산정할 결과, J3 지역의 Ni 농도가 기준치를 초과하여 중간정도 오염으로 분류되었고 나머지 지역은 모두 비오염으로 분류되었다. 캐나다 온타리오 퇴적물 오염기준을 적용하면, Ni의 경우 J2는 영향없음으로 분류되고 나머지는 16 mg/kg을 초과하므로 최소영향수준과 심각영향수준 중간단계로 분류되었다.

4) I_{geo}를 이용한 중금속 오염도 평가에서는 모든 지역에서 1보다 작은 값이 나와 1지역(비오염)으로 분류되었으며, 총중농축계수(R)를 이용한 중금속 오염도 평가에서도 모든 지역이 비오염으로 평가되었다.

5) 분석결과 제주의항의 퇴적토 중금속 오염도는 우려할 수준은 아니라고 판단되나, Ni의 경우 기준치를 초과하였으므로 이에 대한 대책을 강구할 필요가 있다. 또한, 강열감량 값이 외항 내부의 경우 USEPA의 기준보다 큰 값이 나왔으므로 합리적인 준설계획을 세워 과도한 유기물이 축적되는 것을 막을 필요가 있다고 본다. 또한, 일부 중금속 중 Cu의 경우 외항 외부에 비해 내부 퇴적토에서의 농도가 급격히 증가하는 것을 확인하였으므로, 항만시설 중 특히 하폐수 방출 현황에 대한 문제점 및 이를 통한 해결방안을 모색하여야 한다고 본다.

Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단 중견연구지원사업(C-D-2014-1310)으로 수행이 되었습니다.

KSEE

References

1. National Research Council, "Contaminated Sediments in Ports and Waterways: Cleanup Strategies and Technologies," Committee on Contaminated Marine Sediments, Marine Board, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, Washington, DC, p. 320(1997).
2. Riba, I., Blasco, J., Jimenez-Tenorio, N. and Delvalls, T., "Heavy metal bioavailability and effects: I. Bioaccumulation caused by mining activities in the Gulf of Cadiz (SW, Spain)," *Chemosphere*, **58**(4), 659~669(2005).
3. Pereira, C., Abessa, D., Zaroni, L., Gasparro, M., Bainy, A., Bicego, M., Taniguchi, S., Furlley, T. and Sousa, E., "Integrated assessment of multilevel biomarker responses and chemical analysis in mussels from Brazil," *Environ. Toxicol. Chem.*, **26**(2), 462~469(2007).
4. Burton, G., "Assessing contaminated aquatic sediments," *Environ. Sci. Technol.*, **26**(4), 1862~1875(1992).
5. United States Environmental Protection Agency., "Evaluation of Dredged Material Proposed for Ocean Disposal-Testing Manual," Environmental Protection Agency Office of Marine and Estuarine Protection, Washington, DC, p. 214(1991).
6. Canadian Council of Ministers of the Environment., "Protocol for the Derivation of Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life," Protocol, CCME EPC-98E. pp. 220~230(1995).
7. Muller, G., "Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit," *Umschan*, **79**(2), 778~783(2002).
8. Cho, Y., Lee, C. and Choi, M., "Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea," *Mar. Geol.*, **159**(2), 11~129(1999).
9. Choi, B. and Lee, T., "Evaluation of Organic Compounds and Heavy Metals in Sediments from the Busan Harbor," *J. Korea Soc. Waste Manage.*, **28**(3), 269~274(2011).
10. Lee, T., "Evaluation of Contamination Levels of Sediments Obtained from the Southern Busan Harbor," *J. Korea Soc. Waste Manage.*, **30**(2), 119~123(2013).
11. Woo, H., Lim, J., Lee, J., Lee, J., Han, K. and Lee, T., "Characterization and Estimation of Heavy Metal Contents of Tongyong Marine Products Breeding Ground Sediments," *J. Korea Soc. Waste Manage.*, **30**(3), 213~219(2013).
12. Adamo, P., Arienzo, M., Imperato, M., Naimo, D., Nardi, G. and Stanzione, D., "Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port," *Chemosphere*, **61**(1), 800~809(2005).