

## Research Paper

# Pollution Intensity Assessment of Sediments Obtained Near Jeodo Ocean Research Station Using Pollution Index for Heavy Metals

Junho Lee<sup>1</sup> · Kyungsoo Han<sup>2</sup> · Dongmyung Kim<sup>3</sup> · Taeyoon Lee<sup>4,†</sup>

<sup>1</sup>Ship Practical Training Center, Pukyong National University

<sup>2</sup>Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University

<sup>3</sup>Department of Ecological Engineering, Pukyong National University

<sup>4</sup>Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

(Received January 7, 2020; Revised February 17, 2020; Accepted February 26, 2020)

**Objectives :** The purpose of this study was to evaluate the heavy metal contamination level by analyzing heavy metals in sediments near Jeodo ocean research station located in southwestern Jeju Island.

**Methods :** Sixteen sediments samples were collected from Jeodo ocean research station, and two and three sediment samples were collected from the southwestern region and between Jeodo and Jeju Island. These samples were used for heavy metal content analysis according to the marine pollution process test method, and contamination level of sediments was calculated using the measured heavy metal concentration.

**Results and Discussion :** All heavy metals except Ni were evaluated as non-contamination level, and Ni was found to have high pollution level. According to the US Environmental Protection Agency guideline, samples 6, 9, 15, and 22 were classified as severe contamination, and according to the geoaccumulation index, samples 15 and 22 were classified as slightly contaminated for Ni. When classified by the Enrichment factor value, Ni contamination was categorized as moderately severe enrichment for samples 15 and 22. Using the potential ecological risk factor value, the ecological risks of the heavy metals in all samples were classified as low risk. The mean PEL quotient value for all six heavy metals in samples was a maximum of 0.60, indicating a 21% probability of toxicity for heavy metals in all samples.

**Conclusions :** It was confirmed that there was no contamination by Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn, but contamination by Ni was found to be a serious level. Compared with previous studies, the concentration of Ni in the Jeodo was found to be high, which may be due to the inflow of ocean research station or the Yangzu river runoff in China.

**Key Words :** *Sediments, Heavy Metals, Jeodo Ocean Research Station, Pollution Assessment, Ecological Risk*

연구논문

# 중금속 오염도 평가지표를 이용한 이어도 과학기지 인근 퇴적토의 오염도 평가

이준호<sup>1</sup> · 한경수<sup>2</sup> · 김동명<sup>3</sup> · 이태윤<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 선박실습센터

<sup>2</sup>부경대학교 공간정보시스템공학과

<sup>3</sup>부경대학교 생태공학과

<sup>4</sup>부경대학교 환경공학과

**목적:** 본 연구에서는 제주도 서남방에 위치한 이어도 해양과학기지 주변의 퇴적토에 포함된 중금속을 분석하여 중금속 오염도를 평가하고자 하였다.

**방법:** 이어도 해양과학기지 주변에서 16개의 퇴적토 시료를 채취하였고 비교시료로 이어도 서남방 및 이어도와 제주도 사이의 지역을 선정하여 각각 2개와 3개의 퇴적토 시료를 채취하였다. 이들 시료는 해양오염공정시험법에 따라 중금속 함량 분석에 사용되었으며, 도출된 중금속 농도를 이용하여 퇴적토 오염도 산정을 하였다.

**결과 및 토의:** Ni을 제외한 모든 중금속 농도는 비오염으로 평가되었고, Ni의 경우 오염도가 높은 것으로 파악되었다. 미국 환경청 기준에 의하면 6번, 9번, 15번, 22번 시료의 경우 심각한 오염으로 분류되었고, geoaccumulation index에 의하면 15번, 22번 시료는 Ni에 대해 약간 오염으로 분류되었다. Enrichment factor 값으로 분류하면 15번과 22번 시료의 경우 Ni 오염은 외부요인을 상당히 심각하게 받음으로 분류되었다. Potential ecological risk factor 값을 이용하면 모든 지역에 대해 대상 중금속들의 생태학적 위해성은 낮음으로 분류되었다. 6개 중금속 모두를 같이 고려한 mean PEL quotient 값은 최대 0.60으로 모든 지역에서 중금속이 독성을 유발할 확률이 21%인 것으로 판명되었다.

**결론:** Cd, Cu, Cu, Pb, Zn에 의한 오염은 없는 것으로 확인되었으나, Ni에 의한 오염은 심각한 수준인 것으로 파악되었다. 기존 해양퇴적토 연구결과와 비교하면 이어도 지역의 Ni 농도가 높은 것으로 파악되었고 이는 해양과학기지 혹은 중국 양자강 유출수의 유입으로 오염이 발생하였을 가능성이 있다고 판단된다.

**주제어:** 퇴적토, 중금속, 이어도 해양과학기지, 오염도 평가, 생태학적 위해성

## 1. 서론

국립해양조사원의 자료에 따르면 이어도는 1900년 영국 상선인 소코트라(Socotra)호가 처음 발견한 수중 암초로 가장 얇은 곳은 해수면 아래 약 4.6 m이며, 수심 40 m를 기준으로 할 경우 남북으로 약 600 m, 동서로 약 750 m에 이르는 것으로 보고되었다. 이어도는 일본 나가사키현 도리시마에서 서쪽으로 276 km, 중국 서산다오에서 북동쪽으로 287 km, 그리고 마라도에서 서남쪽으로 149 km 떨어진 지점에 위치하고 있다(Fig. 1). 해양수산부는 해양연구, 기상관측, 어업활동을 지원하기 위한 해양과학기지를 2003년 6월에 완공하여 활용하고 있다(Fig. 1). 이 과학기지는 높이 76 m이며 이중 수상구조물의 높이는 36 m이다. 이 기지의 총 중량은

3,400톤이고 총 면적은 1,320 m<sup>2</sup>이다.

이어도 해양과학기지를 이용한 환경연구는 최근까지 꾸준히 이어지고 있으며 많은 연구성과를 도출하고 있다. 이어도 해양과학기지는 중국과 제주도의 중간 지점에 위치하고 있어 양자강에서 유출되는 저염분수의 이동 및 농도를 측정하기에 유리하다.<sup>2)</sup> 양자강 유출 저염분수는 여름철에는 북쪽과 북동쪽 방향으로 확장되면서 동중국해로 유입이 되어 우리나라의 서해와 남해 해역에 적조현상을 유발시키는 것으로 알려져 있다.<sup>3-5)</sup> 1996년에는 양자강 저염분수가 제주도 연안까지 유입이 되어 어폐류의 집단 폐사가 일어나 제주도 양식산업에 큰 피해를 입힌 사례도 있었다.<sup>6)</sup> 이어도 해양과학기지에 설치된 해양환경모니터링시스템을 이용하여 양자강 저염분수의 이동경로 및 예측을 위한 연구가 수



Fig. 1. Maps showing location of leodo (left) and picture of leodo ocean research station (right) (adopted from Hwang et al.<sup>1)</sup>).

행되었고 이를 통해 저염분수의 예측 및 경보시스템 구축에 중요한 자료를 제공하기도 하였다.<sup>2)</sup> 또한, 대기오염의 중요한 지표로 사용되는 PM<sub>2.5</sub>의 발생원, 농도와 이온조성을 밝히는 연구도 진행이 되었다.<sup>1)</sup> PM<sub>2.5</sub>의 경우 대기 중 체류시간이 PM<sub>10</sub>의 2-3배인 7일에 달하며 석탄을 많이 사용하는 중국에서 발생할 경우 편서풍의 영향으로 우리나라에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.<sup>7-9)</sup>

최근 국내와 주변 국가의 급격한 산업활동으로 인해 다양한 오염물질이 발생을 하는데, 이 중에서 중금속은 생체축적 현상으로 인해 작은 양으로도 주변 생태계에 큰 영향을 주기 때문에 지속적으로 관리할 필요성이 있다. 대기나 하천을 통해 해양으로 유출된 중금속은 해양 퇴적물에 강하게 흡착되는 특성을 보이고 있다.<sup>10-12)</sup>

본 연구에서는 이어도 해양과학기지 인근의 표층 퇴적토를 채취하여 중금속 농도를 분석하여 중금속 오염도를 평가하고자 한다. 이어도는 양자강 유입 저염분수의 이동경로 중간에 위치하기 때문에 중금속 오염도 조사가 필요하다고 판단되며, 퇴적토에 포함된 중금속의 오염도는 미국환경청(USEPA)에서 제시한 퇴적토 관리 가이드라인, 인간활동(anthropogenic activities)이 중금속 오염의 원인인지를 판별하는 Enrichment factor,<sup>13)</sup> 퇴적토에 포함된 중금속이 자생적으로 발생했는지 혹은 외부적 요인에 의해 유입되었는지를 정량적으로 표현하는 Geoaccumulation index,<sup>14)</sup> 측정된 중금속의 오염도가 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 표시한 Potential ecological risk factor<sup>15)</sup>를, 그리고 다수의 중금속으로 인한 독성발생 확률을 나타내는 mean probable effects level quotient<sup>15)</sup>를 이용하여 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 시료채취 및 장소

이어도 해양과학기지 인근의 해양표층 퇴적토는 국립 P대학교의 탐사선을 2019년 4월에 투입하여 채취하였다. 총 21 곳의 시료채취 장소는 채취 순서대로 1에서 25로 명명하였고 Fig. 2에 표시하였다. 이 중 5, 7, 8, 12, 13, 14, 18, 그리

고 23번은 해양과학기지과 인접한 지역으로 시료채취를 하지 못하였다. 비교 시료로 사용하기 위해 과학기지를 기준으로 서남방 지역에서 C1과 C2 시료를 채취하였고 또한 과학기지와 제주도 사이에서 19JO1, 19JO2, 19JO3 시료를 채취하였으며, 비교 시료 채취장소는 Fig. 2에 표시하였다. 시료채취는 9 L 용량의 Vanveen grab sampler를 이용하였으며 대상 지점을 기준으로 동서남북 20 m 지점의 시료를 채취한 후 균질시료(composite sample)로 만든 후 분석 전까지 4℃에서 냉장 보관하였다.

### 2.2. 실험방법

퇴적토의 유기물 함량을 측정하기 위해 퇴적토의 강열감량(ignition loss)을 측정하였으며, 강열감량은 해양오염공정시험법에서 제시한 방법에 따라 측정되었다. 먼저 젖은 시료 약 50 g을 플라스틱 손가락으로 시료용기에서 털어내 125 mL 광구 플라스틱병에 넣었으며 병에 담긴 시료를 냉동고에서 완전히 동결시킨 후 동결된 시료는 동결건조기에 넣고 완전히 건조시켰다. 건조된 시료는 막자사발을 이용하여 곱게 분말한 후 230 메쉬 크기의 체를 통과시켜 통과된 시료를 강열감량 분석에 사용하였다. 230 메쉬 체를 통과한 시료는 건조기에서 60℃로 48시간 동안 건조하여 수분을 완전히 증발시킨 후 수분을 제거한 건조 시료 5 g을 전기로에서 550℃로 2시간 가열하여 유기물 연소로 인한 가열 전후의 무게차로 시료의 강열감량을 계산하였다. 시료에 포함된 C, H, N, S의 함량을 분석하기 위해 원소분석기(Macro and Micro Elemental Analyzer, Elementar, Germany)를 사용하였으며 분석은 ASTM D5291-93 실험방법에 따라 진행이 되었다. 시료는 1,150℃로 가열하여 각종 원소를 함유한 가스로 분해하고 열전도도 검출기를 이용하여 원소의 종류와 함량을 알아내었다. 퇴적토의 중금속 함량은 해양오염공정시험법에서 제시하고 있는 중금속 분석방법을 이용하여 측정하였다. 퇴적토 1 g을 비이커에 넣은 후 질산, 과염소산 및 불소산을 이용하여 완전 분해한 후 1 N 질산용액으로 재용해한 후 중금속 성분을 분석하였다. 본 연구에서는 Optima 3300XL Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometer (Perkin elmer, USA)를 이용하여 6개의 중금속(Cu, Pb, Ni, Zn, Cd, 그리고 Cr)에 대해 분석을 수행하였다.

### 2.3. 오염도 산정방법

중금속오염도 평가는 먼저 미국 환경청(US Environmental Protection Agency)에서 제시하는 기준치를 이용하여 평가하였다. 이 평가에서는 대상 퇴적토를 비오염, 중간오염, 심한오염으로 분류하는 방법을 설명하고 있으며, 사용하는 지표는 5개의 중금속 농도(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn)와 퇴적토의 강열감량이다. 또한, 각각의 중금속에 대한 Enrichment factor (EF)는 산업활동을 포함한 인간 활동으로(anthropogenic

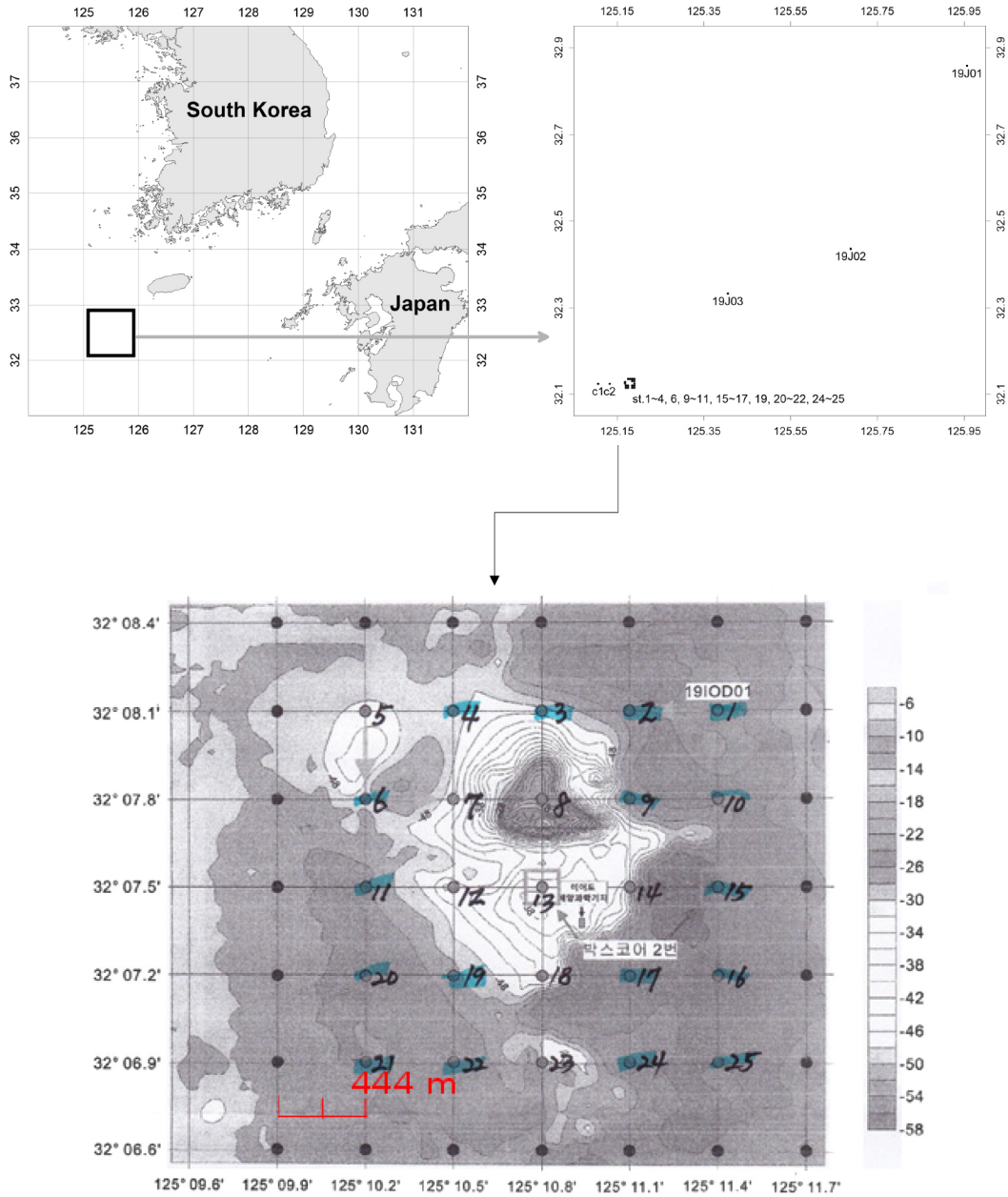


Fig. 2. Maps showing sampling sites of sediments collected from near leodo ocean research station.

activities) 인해 유발된 중금속의 오염정도를 평가하는데 사용된다.<sup>13)</sup> 각 중금속에 대한 EF 값은 다음과 같이 계산된다.

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

여기서,  $C_x$ 는 퇴적토에 포함된 해당 중금속의 농도,  $C_{back}$ 는 해당 중금속의 배경농도를 의미한다. 본 연구에서는 6개의 중금속(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)에 대해 EF 값을 계산하였다. 6개 중금속의 배경농도는 기존 연구결과를 참조하여 국제적으로 통용되는 threshold effect level (TEL) 값을 사용하였다.<sup>16)</sup> 각 중금속의 TEL 농도는 Cd: 0.68 mg/kg, Cr: 52.3 mg/kg, Cu: 18.7 mg/kg, Ni: 15.9 mg/kg, Pb: 30.2 mg/kg, Zn: 124

mg/kg이었다. EF 값에 따른 오염도 평가 가이드라인은 Table 1에 정리하였다.

퇴적토에 포함된 중금속의 발생원이 자연발생적인지 혹은 외부로부터 유입이 된 것인지를 정량적으로 판단하기 위해 Geoaccumulation index ( $I_{geo}$ )를 이용하였으며, 아래 식으로 표현된다.

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_x}{1.5C_{back}} \right) \quad (2)$$

여기서,  $C_x$ 는 퇴적토에 포함된 해당 중금속 x의 농도이고  $C_{back}$ 는 해당 중금속의 자연발생농도(배경농도)를 의미한다. 각  $I_{geo}$  값에 대한 해당 퇴적토에 포함된 해당 중금속의 오



**Table 1.** Summary for scale of pollution intensities for enrichment factor (EF), geoaccumulation index values ( $I_{geo}$ ), potential ecological risk factor (PERF), and mean probable effects level quotient (mean PEL quotient) (obtained from Lee et al.<sup>17)</sup>).

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		
10-25	severe enrichment	3-4	moderately to strongly polluted			> 2.3	73
25-50	very severe enrichment	4-5	strongly polluted	> 320	very high risk		
> 50	extremely severe enrichment	> 5	very strongly polluted				

염도의 분류범위 및 오염도평가는 **Table 1**에 정리하였다.  $I_{geo}$  값이 < 0인 경우에는 해당 중금속은 배경농도와 같은 효과를 가지며 > 2인 경우에는 오염된 것으로 분류가 되는데 숫자가 커질수록 해당 중금속으로 인해 오염이 심한 것으로 분류가 된다.

Potential ecological risk factor (PERF)는 퇴적토에 포함된 중금속으로 인해 발생할 수 있는 생태학적 위해성을 정량적으로 표시하는 인자이며, PERF는 아래와 같이 표현된다.<sup>15)</sup>

$$PERF^i = T_r^i \left( \frac{C_{x^i}}{C_{back}^i} \right) \quad (3)$$

여기서,  $PERF^i$ 는 해당 중금속에 대한 생태학적 위험인자를 나타내며,  $T_r^i$ 는 해당 중금속의 독성반응 인자를 의미하는데, 6가지 중금속에 대한  $T_r^i$ 는 기존의 연구를 참조하여 다음의 값을 사용하였다(i.e., Zn = 1, Cr = 2, Cu, Pb, Ni = 5, 그리고 Cd = 30).<sup>11,18)</sup> 독성반응 인자 값이 클수록 생태학적 위해성이 큰 것을 의미하는 데, Zn과 Cr은 각각 1과 2로 생태학적 위해성이 상대적으로 낮음을 의미하고 Cu, Pb, Ni은 5로써 Zn과 Cr에 비해 생태학적 위해성이 높음을 알 수 있다. Cd의 경우 30으로 고려한 5가지 중금속 중 가장 큰 값을 보이고 있어 생태학적 위해성이 가장 크다는 것을 의미한다.  $C_x^i$ 와  $C_{back}^i$ 는 각각 퇴적토 내에 포함된 해당 중금속과 TEL 농도를 의미한다. PERF 값에 따른 대상 퇴적토의 생태학적 위해성 분류는 **Table 1**에 요약하였다. PERF 값이 40 이하인 경우에는 해당 중금속으로 인한 생태학적 위해성이 상대적으로 낮음으로 분류가 되고, 160-320의 경우에는 위해성이 매우 높음으로 분류가 된다. 그리고 PERF 값이 320 이상인 경우에는 생태학적 위해성이 극히 매우 높음(very high risk)으로 분류가 된다.

해수 중에는 염소, 황산염 등과 같은 음이온이 존재하는데 이들 음이온들은 해양퇴적토에 포함된 중금속과 결합하여 복합체(complex) 형태로 존재하게 된다. 중금속이 복합

체를 형성할 경우에는 중금속이 순수 이온으로 존재할 때와는 다른 생물학적 독성 및 위해성을 보이는 경우가 있다. 중금속이 복합체의 형태를 가진 경우의 중금속의 잠재적 생물학적 위해성을 정확히 평가하기 위해 각 중금속의 mean quotients를 고려하는 평가방법이 제시되었고, mean PEL quotient는 다음과 같은 식으로 표현된다.<sup>15)</sup>

$$\text{mean PEL quotient} = \sum (C_x / \text{PEL}_x) / n \quad (4)$$

여기서, n은 위 계산식에 사용된 중금속의 숫자를 의미하고,  $C_x$ 는 퇴적토에 포함된 각 중금속의 절대농도를 의미한다.  $\text{PEL}_x$  (Probable effects level)는 해당 중금속의 영향을 줄 수 있는 가능성 수준을 나타낸다. 본 연구에서는 6가지 중금속을 고려하였으므로 n 값으로는 6을 사용하였다. 각각의 중금속에 대한 PEL 값을 이용하면 각 중금속이 생태계에 영향을 주는 확율을 파악할 수 있지만 여러 개의 중금속이 같이 존재할 경우에는 포함된 모든 중금속의 복합적 영향을 고려한 mean PEL quotient 식을 사용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 계산된 mean PEL quotient 값에 따른 해당 퇴적토의 분류기준 및 범위는 **Table 1**에 요약하였다.<sup>17)</sup> mean PEL quotient 값이 0.1 이하이면 주변에 독성을 미칠 확률이 8% 이하이고, 0.11-1.5 값일 경우에는 21%, 1.51-2.3 값일 경우에는 49%, 그리고 2.3 이상일 경우에는 주변에 독성을 미칠 확률이 73% 이상이라는 것을 의미한다.

### 3. 실험결과 및 해석

#### 3.1. 퇴적토 성분분석

원소분석기를 이용하여 분석한 퇴적토의 원소분석 결과 및 퇴적토의 강열감량 결과는 **Table 2**에 정리하였다. N, H, S의 경우 미량으로 존재하였으며 C의 경우 N, H, S의 합보다 큰 것으로 파악되었다. N의 경우 0에서 0.11%, H는 0.29

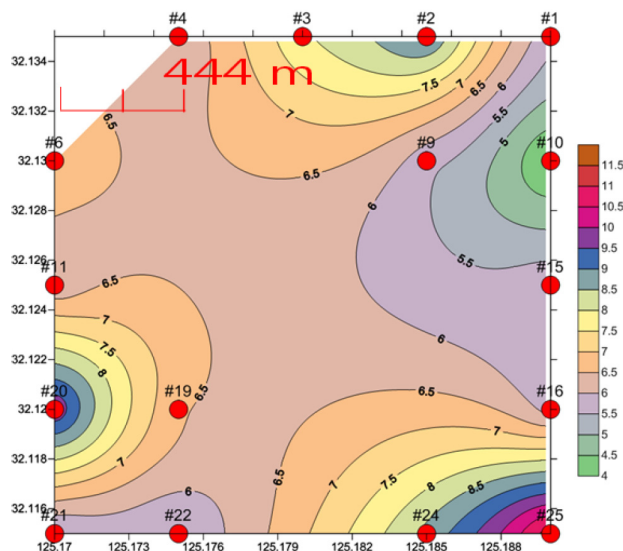
**Table 2.** Results of elemental analyses of sediments collected from near leodo ocean research station (wt, %).

Sampling sites	N	C	H	S	Ignition loss
1	0.06	3.91	0.69	0.18	5.6
2	0.11	2.99	0.76	0.17	9.2
3	0.09	3.66	0.71	0.09	7.9
4	0	13.39	0.52	0.22	6.1
6	0	6.81	0.46	0.24	6.9
9	0	2.21	0.77	0.07	5.7
10	0	1.09	0.38	0.04	3.9
11	0.02	2.29	0.73	0.14	6.1
15	0	0.27	0.57	0.07	5.9
16	0	3.02	0.62	0.21	5.8
19	0	2.22	0.52	0.18	6.6
20	0.06	2.29	0.73	0.25	10.1
21	0	1.98	0.52	0.26	5.4
22	0	8.47	0.40	0.29	5.5
24	0.10	3.90	0.84	0.22	8.7
25	0.05	2.86	0.79	0.31	11.3
C1	0	4.08	0.55	0.23	6.8
C2	0	1.07	0.21	1.23	4.1
19JO1	0.02	2.51	0.32	0.85	6.9
19JO2	0.1	2.35	0.29	0.23	4.6
19JO3	0.05	0.99	0.35	0.08	5.3

에서 0.84%, S는 0.04에서 1.23%의 값을 가졌다. C의 경우 0.99에서 13.39%로 각 지역마다 큰 차이를 보였다. 이는 시료 채취장소에 따라 퇴적토의 원소조성이 N, H, S의 경우에는 크게 차이가 나지 않지만 C의 경우는 큰 차이를 보인다는 것을 의미한다. 강열감량의 경우 해양과학기지가 위치한 중간지점을 제외한 나머지 지역의 값을 이용하여 Fig. 3에 contour line으로 표시하였다. 기지 주변은 낮은 값을 보여주었고 기지 외곽으로 갈수록 강열감량의 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기지가 위치한 지역이 수심이 낮은 암반지대이므로 강열감량 값이 낮은 것이며 외곽은 수심이 깊은 지역으로 퇴적토가 많이 존재하는 지역이기 때문에 판단된다. 25번 지역의 강열감량은 11.3%로 가장 높았으며 다음은 20번 지역의 10.0%, 그리고 2번 지역은 9.2%였다. 이 세 지역을 중심으로 기지 쪽으로 접근할수록 강열감량이 감소하는 양상을 확인할 수 있다.

### 3.2. 퇴적토 중금속 분석 결과

총 21개 시료에 대한 6개의 중금속 분석결과(Cu, Pb, Ni, Zn, Cd, Cr)와 미국환경청에서 제시한 퇴적물 오염분류기준을 Table 3에 요약하였다. 각 시료에 대한 중금속 분석은 3회 실시한 후 평균값을 사용하였으며, 각 중금속 분석값의 표준편차는 < 3%로 판명되었다. 중금속 분석결과는 먼저 미국환경청에서 제시한 퇴적토 오염분류기준을 이용하여 퇴적토의 중금속 오염여부를 확인하였다. Cu, Pb, Zn, Cd의



**Fig. 3.** Contour lines of ignition loss obtained from sediments collected from near leodo ocean research station.

경우 모두 비오염(non polluted)으로 분류되었고 Cr의 경우 오염분류기준이 없어 평가하지 못하였다. 반면, Ni의 경우 대부분의 지역에서 약간 혹은 심각한 오염으로 분류되었다. 해양과학기지 주변 시료 중 10번과 19번의 경우 < 20 mg/kg으로 비오염이었고, 6번, 9번, 15번, 22번 시료의 경우 > 50 mg/kg으로 심각한 오염으로 분류되었다. 나머지 시료는 모두 약간 오염으로 분류되었다. 이에 반해 기지에서 서남쪽으로 멀리 떨어진 C1과 C2는 각각 약간오염 그리고 비오염으로 분류되었다. 기지와 제주도 사이에서 채취한 19JO1, 19JO2, 19JO3 중 앞의 두시료는 비오염이고 19JO3는 약간 오염으로 분류가 되었으나 비오염과 약간 오염의 경계치에 위치하고 있었다. Table 3에 표시된 TEL guideline은 threshold effect level을 뜻하며 이는 중금속의 농도가 TEL 값 이하일 경우 이 중금속으로 인해 생태계에 악영향을 미칠 가능성이 거의 없다는 것을 의미한다.<sup>19)</sup> PEL guideline은 probable effect level을 뜻하며 이는 어떤 중금속의 농도가 PEL 값 이상일 경우 생태계에 악영향을 미치는 경우가 종종 발생한다는 것을 의미한다.<sup>19)</sup> TEL과 PEL 기준을 적용하면 모든 지역에서 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr의 경우 PEL 기준 이하인 것을 확인하였으나, Ni의 경우에는 6번, 9번, 15번, 16번, 22번 시료에서 PEL을 초과하는 결과가 도출되었다. 특히 15번과 22번의 경우 각각 109.1, 108 mg/kg으로 가장 높은 농도값을 나타내었다. 위의 결과를 통해 과학기지 주변은 Ni에 의한 오염이 있다는 것을 알 수 있었으며, 더욱 정확한 평가를 위해 I<sub>geo</sub>, EF, PERF, PEL mean quotient 지수 산정을 하였고 이 결과를 Table 4에 요약하였다. Fig. 4의 결과를 통해 해양과학기지 우측과 남서방향 두 군데 지점에서 I<sub>geo</sub>, EF, PERF, PEL mean quotient 값이 공통적으로 높게 나오기 때문에 오염지점을 쉽게 파악할 수가 있다.

**Table 3.** Summary of heavy metal concentrations (mg/kg) in sediments and pollution criteria obtained from USEPA (C1, C2, 19JO1, 19JO2, 19JO3 represent sampling sites around leodo ocean research station).

		Cu	Pb	Ni	Zn	Cd	Cr	Ignition loss (wt, %)
USEPA sediment quality standards	Non polluted	< 25	< 40	< 20	< 90	-	-	< 5
	Moderately polluted	25~50	40~60	20~50	90~200	-	-	5~8
	Heavily polluted	> 50	> 60	> 50	> 200	> 8	-	> 8
TEL guideline		18.7	30.2	15.9	124	0.68	52.3	
PEL guideline		108	112	42.8	271	4.2	160	
UCC		25	20	20	71	0.098	35	
Sample Number	1	11.7	12.2	21.2	51.5	0.3	30.1	5.6
	2	22	20.1	28.8	79.2	0.4	39.7	9.2
	3	20.9	13.8	25.9	63.8	0.5	33.5	7.9
	4	3.6	14.6	42.3	19.7	0.7	24.3	6.1
	6	7.1	9.3	78.8	42.3	0.2	29.9	6.9
	9	21	9.2	76.5	47.5	1.2	46	5.7
	10	11	11.1	17.8	47.8	0.2	27.4	3.9
	11	21.5	18.5	30.3	81.4	0.4	42.8	6.1
	15	38.8	9.6	109.1	58	1.7	60.2	5.9
	16	16.1	13.3	44.9	62.8	0.3	41.8	5.8
	19	9.6	10.6	17.7	48.4	0.3	25.2	6.6
	20	21	17.9	28.7	73.2	0.3	41.5	10.1
	21	14.5	11.9	28	56.2	0.4	32.6	5.4
	22	6.8	8.9	108	40.4	0.3	33.4	5.5
	24	19.8	16	29.5	68.1	0.3	36.7	8.7
	25	20.9	17.5	28.1	72.2	0.4	37.1	11.3
	C1	14.8	12.9	24.4	56.9	0.6	30.2	6.8
	C2	7.4	10.7	16.5	37.3	0.2	30.7	4.1
19JO1	0.6	3.4	11.4	30.3	0.2	16.7	6.9	
19JO2	6.7	8.7	17.3	52.3	0.2	24.1	4.6	
19JO3	11.2	12.6	21.2	54.2	0.2	32.4	5.3	

### 3.2.1. Geoaccumulation index ( $I_{geo}$ )

Cd, Cr, Cu, Pb, Zn에 대한  $I_{geo}$  계산값은 모두 <0이므로 오염수준은 자연배경농도(background level)로 평가가 되었으나, Ni의 경우에는 다른 중금속과 다르게 오염수준이 높은 것으로 확인되었다. 15번과 22번 시료의 경우  $I_{geo}$  계산값은 모두 >2이므로 약간 오염(moderately polluted)이고, 6번과 9번의  $I_{geo}$  계산값은 1과 2 사이이므로 비오염과 약간 오염 단계로 분류되었다. 나머지 지역은 모두 1 이하이므로 비오염으로 분류되었다. 특히, 대조군으로 사용된 C1, C2, 19JO1, 19JO2, 19JO3의 경우에는 모두 (-) 값을 나타내어 청정지역인 것으로 파악이 되었다. 해양기지 주변 퇴적토의 Ni에 대한  $I_{geo}$  계산값은 Fig. 4(a)에 나타내었다.

### 3.2.2. Enrichment Factor (EF)

6개 중금속의 EF 값 중 Cd, Cr, Cu, Pb, Zn의 EF 값은 모

두 < 1로 외부영향 없음으로 분류가 되었으나, Ni의 경우에는 4번, 16번의 EF 값이 1 - 3 사이로 약간 영향있음(minor enrichment)으로 분류되었고, 6번, 9번은 EF 값이 3 - 5 사이로 상당한 영향있음(moderate enrichment)으로 그리고 15번과 22번은 EF 값이 5보다 크므로 상당히 심각하게 영향있음(moderately severe enrichment)으로 분류되었다.<sup>13)</sup> Ni에 대한 EF 값은 Fig. 4(b)에 표시하였다.

### 3.2.3. Potential ecological risk factor (PERF)

위의 분류에 따르면 6개 중금속 모두에 대한 생태학적 위해성은 낮은 위험으로 분류할 수가 있다. 그러나, Cd과 Ni의 경우에는 비록 PERF가 40 이하지만 일부 지점에서는 40에 근접한 값을 나타내고 있으므로 향후 지속적인 모니터링을 할 필요가 있다고 판단된다. Ni에 대한 PERF 값은 Fig. 4(c)에 표시하였다.

**Table 4.** Results of enrichment factor, geoaccumulation index, potential ecological risk factor, and mean PEL for samples obtained from leodo ocean research station.

Sample Number	Cd		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn								
	I <sub>geo</sub>	PERF	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							
TEL guideline	0.68	52.3	18.7	15.9	30.2	124													
PEL guideline	4.2	160	108	42.8	112	271						mean PEL							
UCC	0.098	35	25	20	20	71													
1	-1.77	13.24	-1.38	-0.42	1.15	-1.26	-0.37	3.13	-0.17	0.33	6.67	-1.89	-0.60	2.02	-1.85	-0.58	0.42	0.19	
2	-1.35	-0.41	17.65	-0.98	-0.24	1.52	-0.35	0.18	5.88	0.27	0.81	9.06	-1.17	-0.33	3.33	-1.23	-0.36	0.64	0.28
3	-1.03	-0.26	22.06	-1.23	-0.36	1.28	-0.42	0.12	5.59	0.12	0.63	8.14	-1.71	-0.54	2.28	-1.54	-0.49	0.51	0.25
4	-0.54	0.03	30.88	-1.69	-0.54	0.93	-2.96	-0.81	0.96	0.83	1.66	13.30	-1.63	-0.52	2.42	-3.24	-0.84	0.16	0.26
6	-2.35	-0.71	8.82	-1.39	-0.43	1.14	-1.98	-0.62	1.90	1.72	3.96	24.78	-2.28	-0.69	1.54	-2.14	-0.66	0.34	0.40
9	-0.18	0.32	39.71	-0.77	-0.12	1.76	-0.42	0.12	5.61	1.68	3.81	24.06	-2.30	-0.70	1.52	-1.97	-0.62	0.38	0.46
10	-2.35	-0.71	8.82	-1.52	-0.48	1.05	-1.35	-0.41	2.94	-0.42	0.12	5.60	-2.03	-0.63	1.84	-1.96	-0.61	0.39	0.17
11	-1.35	-0.41	17.65	-0.87	-0.18	1.64	-0.38	0.15	5.75	0.35	0.91	9.53	-1.29	-0.39	3.06	-1.19	-0.34	0.66	0.29
15	-3.35	-0.85	4.41	-0.38	0.15	2.30	0.47	1.07	10.37	2.19	5.86	34.31	-2.24	-0.68	1.59	-1.68	-0.53	0.47	0.60
16	-1.77	-0.56	13.24	-0.91	-0.20	1.60	-0.80	-0.14	4.30	0.91	1.82	14.12	-1.77	-0.56	2.20	-1.57	-0.49	0.51	0.31
19	-1.77	-0.56	13.24	-1.64	-0.52	0.96	-1.55	-0.49	2.57	-0.43	0.11	5.57	-2.10	-0.65	1.75	-1.94	-0.61	0.39	0.17
20	-1.77	-0.56	13.24	-0.92	-0.21	1.59	-0.42	0.12	5.61	0.27	0.81	9.03	-1.34	-0.41	2.96	-1.35	-0.41	0.59	0.27
21	-1.35	-0.41	17.65	-1.27	-0.38	1.25	-0.95	-0.22	3.88	0.23	0.76	8.81	-1.93	-0.61	1.97	-1.73	-0.55	0.45	0.23
22	-1.77	-0.56	13.24	-1.23	-0.36	1.28	-2.04	-0.64	1.82	2.18	5.79	33.96	-2.35	-0.71	1.47	-2.20	-0.67	0.33	0.52
24	-1.77	-0.56	13.24	-1.10	-0.30	1.40	-0.50	0.06	5.29	0.31	0.86	9.28	-1.50	-0.47	2.65	-1.45	-0.45	0.55	0.26
25	-1.35	-0.41	17.65	-1.08	-0.29	1.42	-0.42	0.12	5.59	0.24	0.77	8.84	-1.37	-0.42	2.90	-1.37	-0.42	0.58	0.27
c1	-0.77	-0.12	26.47	-1.38	-0.42	1.15	-0.92	-0.21	3.96	0.03	0.53	7.67	-1.81	-0.57	2.14	-1.71	-0.54	0.46	0.23
C2	-2.35	-0.71	8.82	-1.35	-0.41	1.17	-1.92	-0.60	1.98	-0.53	0.04	5.19	-2.08	-0.65	1.77	-2.32	-0.70	0.30	0.15
19J01	-2.35	-0.71	8.82	-2.23	-0.68	0.64	-5.55	-0.97	0.16	-1.06	-0.28	3.58	-3.74	-0.89	0.56	-2.62	-0.76	0.24	0.09
19J02	-2.35	-0.71	8.82	-1.70	-0.54	0.92	-2.07	-0.64	1.79	-0.46	0.09	5.44	-2.38	-0.71	1.44	-1.83	-0.58	0.42	0.16
19J03	-2.35	-0.71	8.82	-1.28	-0.38	1.24	-1.32	-0.40	2.99	-0.17	0.33	6.67	-1.85	-0.58	2.09	-1.78	-0.56	0.44	0.19



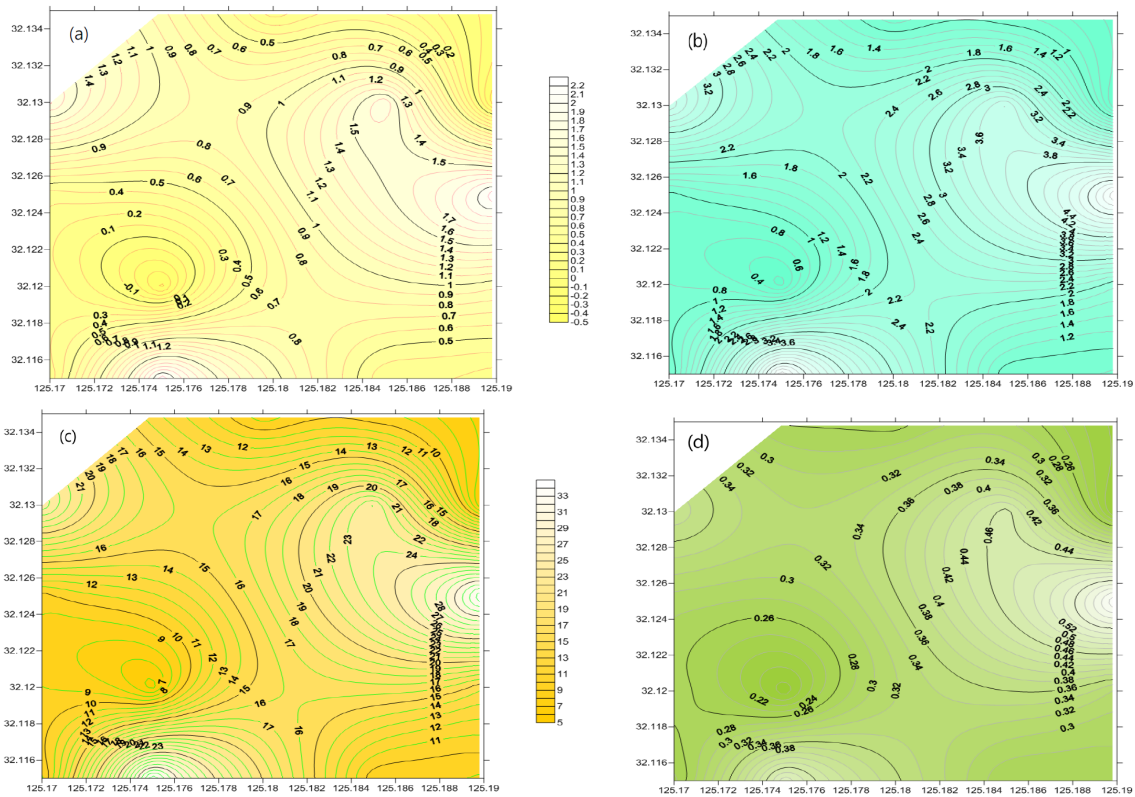


Fig. 4. Contour lines for  $I_{geo}$ , EF, PERF for Ni and mean PEL quotient for sampling sites at leodo ocean research station: (a)  $I_{geo}$ , (b) EF, (c) PERF, and (d) mean PEL quotient.

### 3.2.4. Mean PEL quotient

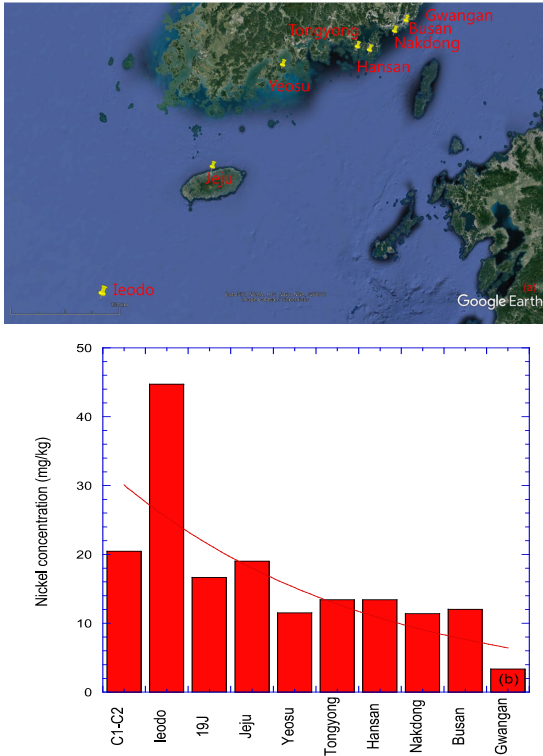
연구에 사용된 퇴적토에 포함된 6개의 중금속에 대해 계산한 mean PEL quotient 값을 Fig. 4(d)에 표시하였다. 모든 지역에서 mean PEL quotient 값이 0.17 - 0.60 사이의 값을 가지므로 독성유발 확률은 21%로 판명되었다. 15번과 22번의 경우 각각 0.60과 0.52로 다른 지역보다 높은 값을 나타내는 것에 유의할 필요가 있다.

### 3.2.5. Discussion of PERF, EF, $I_{geo}$ for heavy metals

이어도 과학기지 인근 16개 지점과 기지 남서쪽과 북동쪽에서 각각 2군데 지점에서 총 21개의 퇴적토 시료를 채취하였고, 이들 시료에 대해 원소분석과 중금속 함량을 측정하였다. 측정된 중금속 농도값을 이용하여  $I_{geo}$ , EF, PERF, mean PEL quotient를 계산하였다. 미국 환경청 퇴적토 오염분류기준을 적용할 경우에는 Cd, Cu, Pb, Zn은 모두 비오염으로 분류되었고 Cr의 경우 분류기준이 없어 평가하지 못하였다. Ni의 경우에는 일부 지점은 심각한 오염으로 분류되었다.  $I_{geo}$ 의 경우에는 Cd, Cr, Cu, Pb, Zn에 대해서 모두 (-)의 값을 나타내었으므로 오염수준은 자연배경농도 수준으로 평가되었으나, Ni의 경우에는 일부 지역에서 약간 오염의 수준으로 평가되었다. EF의 경우에도 Ni을 제외한 중금속들은 외부영향 없음으로 평가되었으며, 일부 지역(15번, 22번)의 경우에는 Ni 오염이 외부로부터 심각하게 영향 받았으므로 평가되었다.

생태학적 위해성 분류 지표인 PERF의 경우에는 6개 중금속 모두에 대해 모든 지역에서 생태학적 위해성은 낮음으로 분류되었다. 6개 중금속 모두를 고려한 독성유발 확률 지표인 mean PEL quotient 값을 통해 모든 지역에서 중금속을 통해 발생할 수 있는 독성유발 확률은 21%로 판명되었다.

국내 다른 지역에서 측정된 퇴적토 내의 중금속 함량과 비교하면 Cd, Cr, Cu, Pb, Zn의 경우에는 모두 타지역보다 낮은 값을 보였으나 Ni의 경우에는 비교대상 지역보다 높은 값을 나타내었다(Fig. 5). 본 연구 결과와 비교 대상 지역 퇴적토의 Ni 농도(mg/kg)는 다음과 같다. C1-C2 (20.5±5.6), 이어도 (44.7±30.8), 19J01-19J03 (16.6±4.9), 제주외항(19.0±3.3),<sup>20)</sup> 여수항(11.5±2.8),<sup>21)</sup> 통영수로(13.4±2.6),<sup>22)</sup> 한산도(13.4±2.9),<sup>23)</sup> 낙동강 하구역(11.4±4.9),<sup>24)</sup> 부산 남항(12.0±2.3),<sup>25)</sup> 부산 광안대교 인근(3.4±1.0)<sup>26)</sup>의 순으로 Ni의 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 앞에서 나열한 지역의 순서는 이어도에서 우리나라 쪽으로 멀어지는 순서대로 나열을 하였다. 이 결과를 통해 Ni의 농도는 이어도 인근에서 가장 높았고 이어도를 기준으로 멀어질수록 점점 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 일반적으로 중금속 오염은 항만 혹은 공업시설이 위치한 지역에서 발생할 것으로 예상되었으나 본 연구지역은 항만과 공업시설이 전혀 없는 지역으로 특이한 결과라고 할 수 있겠다. 비교 지역 중 통영과 부산 남항은 조선소와 관련 시설이 있어 중금속 오염이 있을 것으로 예상되었으나 Ni의



**Fig. 5.** Sample locations of sediments for comparison of Ni concentration: (a) sampling locations and (b) comparison of Ni concentration.

경우 이어도 지역보다 훨씬 낮은 값을 나타내었다.<sup>22,25)</sup> 광안리 해수욕장이 위치한 부산 광안대교 인근의 퇴적토에서는 가장 낮은 Ni 농도가 검출된 것을 확인할 수가 있다.<sup>26)</sup>

따라서, 이어도와 이어도 인근에서 검출된 Ni의 경우 국외에서 유입이 되었을 가능성이 있다고 할 수 있다. 해류의 흐름을 고려하면 중국에서 유출된 중금속이 이어도를 통해 국내 해안으로 유입될 가능성을 배제할 수 없기 때문이다. 양자강에서 유출된 저염분수가 실제로 제주도 연안까지 영향을 준 연구결과<sup>2,3)</sup>를 통해 중금속도 해류를 통해 이어도까지 이동할 가능성도 있다고 볼 수 있다. 최근의 연구에 의하면 중국 연안의 퇴적토는 급격한 산업활동의 증가로 심각하게 오염된 것으로 보고되었다.<sup>27)</sup> 대부분의 중금속은 강을 통해 해양으로 유입이 되고, 최근 중국 남부지방에 위치한 Pearl 강의 퇴적토에 포함된 중금속 측정연구를 통해 Ni의 농도가 최대 42.1 mg/kg인 것으로 알려졌다.<sup>27)</sup> 중국 연안 지역의 Ni 오염의 경우, 발해만 지역 퇴적토에 포함 된 Ni 농도는 32.7 mg/kg으로 매우 높은 값을 나타내었다.<sup>28)</sup> 홍콩 해안에서 검출된 어류에 포함된 Ni의 경우 7.3-20.03 mg/kg으로 보고되었고 이를 통해 해수 및 특히 퇴적토의 경우 Ni에 의해 심각하게 오염이 되었음을 추측할 수 있다.<sup>29)</sup> 하지만, 본 연구에서 측정된 Ni의 농도가 15번 지역에서 109.1 mg/kg으로 다른 비교지역보다 훨씬 큰 값을 가지는 것으로 보아 해상연구기지에서 자체적으로 유출되었을 가능성이 더 높은 것으로 판단한다.

#### 4. 결론

이어도 해양과학기지 주변에서 채취한 퇴적토 시료 16개와 대조군으로 기지 주변에서 채취한 5개의 시료에 대해 원소분석과 중금속 농도를 측정하였고, 이를 이용하여 퇴적토의 오염도를 평가하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 미국환경청 기준에 의하면 Ni을 제외한 Cd, Cu, Pb, Zn는 모두 비오염으로 분류되었다. Ni의 경우 대부분의 지역에서 중간정도의 오염으로 분류되었고 일부 지역은 심하게 오염된 것으로 평가되었다.
- 2)  $I_{geo}$ 를 이용한 평가에 의하면 Cr, Cu, Ni, Pb, Zn의 경우에는 모두 비오염으로 분류되어 오염의 영향이 거의 없는 것으로 확인되었으나, Ni의 경우 15번과 22번 시료에서 약간 오염으로 분류되었다.
- 3) Ni의 경우 6번, 9번 시료의 EF 값이 3~5 사이로 상당한 영향있음(moderate enrichment)으로 그리고 15번과 22번은 EF 값이 5보다 큰 값으로 상당히 심각하게 영향있음(moderately severe enrichment)로 분류되었다.
- 4) 모든 시료에 대해 PERF 값이 40 이하로 모든 중금속에 대해 위해성 낮음으로 분류되었다.
- 5) mean PEL quotient를 이용한 평가에서는 대조군 시료를 포함한 이어도 모든 지역에서 중금속으로 인한 생태계에 미칠 독성확률은 21%로 확인되었다.
- 6) 국내 퇴적토 연구 결과와 비교 시 이어도 주변 퇴적토는 Ni에 의한 오염이 있는 것으로 판단되었다.

#### Acknowledgements

이 연구는 2019학년도 부경대학교 국립대학육성사업 지원비 및 한국연구재단 지역대학우수과학자 지원사업(C-D-2018-0411)에 의하여 연구되었습니다.

#### References

1. G. Hwang, M. Lee, B. Shin, G. Lee, J. Lee, J. Shim, Mass concentration and ionic composition of PM2.5 observed at Ieodo ocean research station, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 24(5), 501-511(2008).
2. K. Oh, Y. Park, D. Lim, H. Jung, J. Shim, Characteristics of temperature and salinity observed at the Ieodo ocean research station, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 9(4), 225-234(2006).
3. I. Kim, H. Rho, A study on China coastal water appeared in the neighbouring seas of Cheju Island, Korean J. Fish. Aquat. Sci., 27(5), 515-528(1994).
4. L. Pang, K. Hyun, H. Rho, Preliminary study on abnormally low salinity waters around Cheju Island in summer, in

- Preceeding of 2nd International workshop on Oceanography and Fisheries in the East China Sea, Nagasaki, Japan, pp. 25-26(1999).
5. P. Chang, A. Isobe, A numerical study on the Changjiang diluted water in the Yellow and East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 108(C9), 3329(2003).
  6. S. Kim, W. Go, Y. Jo, P. Lee, K. Jeon, Low salinity anomaly and nutrient distribution at surface waters of the South Sea of Korea during 1996 summer, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 3(3), 165-169(1998).
  7. T. Ohara, H. Akimoto, J. Kurokawa, N. Horii, K. Yanaji, X. Yan, T. Hayasaka, An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4419-4444(2007).
  8. X. Yao, C. K. Chan, M. Fang, S. Cadle, T. Chan, P. Mulawa, K. He, B. Ye, The water-soluble ionic composition of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai and Beijing, China, *Atmos. Environ.*, 36(26), 4223-4234(2002).
  9. Y. P. Kim, K.-C. Moon, J. H. Lee, N. J. Baik, Concentrations of carbonaceous species in particles at Seoul and Cheju in Korea, *Atmos. Environ.*, 33(17), 2751-2758(1999).
  10. N. Balkis, M. N. Cagatay, Factors controlling metal distributions in the surface sediments of the Erdek Bay, sea of Marmara, Turkey, *Environ. Int.*, 27(1), 1-13(2001).
  11. H.-S. Jung, C.-B. Lee, Y.-G. Cho, J.-K. Kang, A mechanism for the enrichment of Cu and depletion of Mn in anoxic marine sediments, Banweol intertidal flat, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, 32(11), 782-787(1996).
  12. L. Zaggia, R. Zonta, Metal-sulphide formation in the contaminated anoxic sludge of the Venice canals, *Appl. Geochem.*, 12(4), 527-536(1997).
  13. R. Chester, J. H. Stoner, Pb in particulates from the lower atmosphere of the eastern Atlantic, *Nature*, 245, 27-28(1973).
  14. G. Müller, Index of geoaccumulation in sediments for the Rhine River, *Geosci. J.*, 2(2), 108-118(1969).
  15. L. Hakanson, An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach, *Water Res.*, 14(8), 975-1001(1980).
  16. E. R. Long, D. D. MacDonald, C. G. Severn, C. B. Hong, Classifying probabilities of acute toxicity in marine sediments with empirically derived sediment quality guidelines, *Environ. Toxicol. Chem.*, 19(10), 2598-2601(2000).
  17. J. Lee, C. Yang, T. Lee, Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments near Gwangan Bridge, *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, 19(11), 15-22(2018).
  18. Z. Gu, M. Wu, K. Li, P. Ning, Variation of heavy metal speciation during the pyrolysis of sediment collected from Dianchi Lake, China, *Arab. J. Chem.*, 10(2), S2196-S2204(2017).
  19. D. D. Macdonald, R. S. Carr, F. D. Calder, E. R. Long, C. G. Ingersoll, Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters, *Ecotoxicology*, 5, 253-278(1996).
  20. S. Lee, D. Kim, T. Lee, Estimation of contaminated level of sediments obtained from the outport of Jeju Harbor, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37(3), 191-196(2015).
  21. S. Lee, K. Han, D. Kim, S. Kim, T. Lee, Characterization and estimation of heavy metal contents of Yeosu harbor sediments, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 32(2), 153-160(2015).
  22. H. Woo, J. Lim, J. Lee, J. Lee, K. Han, T. Lee, Characterization and estimation of heavy metal contents of Tongyong marine products breeding ground sediments, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 30(3), 213-219(2013).
  23. J. Lee, J. Lim, K. Han, I. Hwang, S. Kang, S. Kim, J. Ahn, T. Lee, Characterization of marine sediments obtained near Hansan Island of South Sea, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 31(4), 436-443(2014).
  24. T. Lee, Pollution intensity assessment of sediments obtained near Nakdong Estuary using pollution index for heavy metals, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 41(2), 100-108(2019).
  25. T. Lee, Evaluation of contaminated levels of dediments obtained from the Southern Busan Harbor, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, 30(2), 119-123(2013).
  26. S.-K. Kim, J.-W. Ahn, S.-W. Kang, S.-L. Yun, J. Lee, J.-K. Lee, J.-H. Lim, D.-S. Kim, T. Lee, Estimation of contaminated level of dediments at the below of Busan Gwang-an Bridge, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 35(11), 809-814(2013).
  27. Z. Ye, J. Chen, L. Gao, Z. Liang, S. Li, R. Li, G. Jin, Y. Shimizu, S. Onodera, M. Saito, G. Gopalakrishnan, <sup>210</sup>Pb dating to investigate the historical variations and identification of different sources of heavy metal pollution in sediments of the Pearl River Estuary, Southern China, *Mar. Pollut. Bull.*, 150, 110670(2020).
  28. N.-Q. Song, N. Wang, W.-N. Lin, N. Wu, Use of pollution risk and ecosystem service values in marine management strategies in Bohai Sea, China, *Hum. Ecol. Risk Assess.*, 23(5), 1041-1055(2017).
  29. Y.-G. Gu, J.-J. Ning, C.-L. Ke, H.-H. Huang, Bioaccessibility and human health implications of heavy metals in different trophic level marine organisms: A case study of the south China Sea, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 163, 551-557(2018).

## Authors

### Junho Lee

Ship Practical Training Center, Pukyong National University, Professor, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-3747-167X

### Kyungsoo Han

Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University, Professor, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-5031-0256

### Dongmyung Kim

Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Professor, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-1234-7189

### Taeyoon Lee

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Professor, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-7456-8227