

# 삼척항 표층퇴적물 내 유기물 및 중금속 분포 특성

신우석 · 김영기<sup>\*,†</sup>

충남연구원 서해안기후환경연구소, \*한경대학교 식품생명화학공학부  
(2020년 7월 15일 접수, 2020년 7월 28일 수정, 2020년 7월 29일 채택)

## Distribution Characteristics of Organic Matters and Heavy Metals in Surface Sediments of Samcheok Port

Woo-Seok Shin and Young-Kee Kim<sup>\*,†</sup>

Seohaean Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong 32258, Korea

<sup>\*</sup>Faculty of Food Biotechnology and Chemical Engineering, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea

(Received July 15, 2020; Revised July 28, 2020; Accepted July 29, 2020)

### 초 록

삼척항 내 표층 퇴적물에 대한 지화학적 특성을 파악하기 위하여 입도, 유기물 및 중금속 분포 특성을 조사하였다. 삼척항 퇴적물은 sand, silt, clay가 혼재된 특성을 보였으며, 내항에는 세립질이 우세하였고, 외항에는 조립질이 우세한 것으로 나타났다. 표층 퇴적물의 유기물(COD, TOC, IL) 오염정도는 내항이 외항보다 더 심한 것으로 나타났으며, 총 질소 및 총인 농도도 내항이 더 높은 것으로 나타나고 있다. 또한 중금속 농도도 외항보다 내항에서 더 높았다(As 제외). 내항 표층 퇴적물의 높은 유기물 농도 및 C/N비로 보아 육상 유래 유기물의 오염 기여가 큰 것으로 판단된다. 표층 퇴적물의 입도, 이화학적 성분, 중금속 간의 상관성 분석에서 silt-clay는 중금속과 높은 상관성을 보였고, 유기물 지표와 중금속간의 상관성도 대체적으로 높게 나타났다. 중금속 연속추출결과에 따르면 Ni, Zn, Cu, Pb, Cd 및 As는 이온교환, 탄산염, 산화물 형태를 합한 평균 존재비가 각각 14.8, 49.8, 39.1, 32.2, 51.8 및 26.6%이었다.

### Abstract

To evaluate geochemical characteristics of surface sediments in Samcheok Port, the distribution characteristics of particle sizes, organic matters and heavy metals were investigated. The sediments showed a mixed property of sand, silt, and clay, however fine-grains dominated at the inner port and coarse-grains dominated at the outer port. The organic (COD, TOC, and IL) contamination of the sediment at the inner port were higher than that of the outer port, and the concentrations of total nitrogen and total phosphorus at the inner port was higher than those of the outer port. Also, heavy metals contamination of surface sediments at the inner port was higher than those of the outer port (except for As). From the results of high organic matter concentrations and C/N ratio at the inner port, it is considered that the contamination of organic matters was mainly derived from the land. The correlation analysis among the particle size, chemical composition, and heavy metals resulted in high correlation between silt-clay and heavy metals, and between organic matters and heavy metals. The sequential extraction results of heavy metals showed the sum of exchangeable, carbonate, and oxide fractions of Ni, Zn, Cu, Pb, Cd, and As were 14.8, 49.8, 39.1, 32.2, 51.8 and 26.6%, respectively.

**Keywords:** Surface sediment, Organic contamination, Heavy metals

## 1. 서 론

항만은 천연 또는 인공의 시설을 갖춘 수산업 근거지로서 국가어항, 지방어항, 어촌 정주어항 및 소규모 항으로 구분되며, 이 중에서 국가

어항은 이용범위가 전국적인 어항 또는 도서 벽지에 소재하여 어장의 개발 및 어선의 대피에 필요한 어항을 말한다. 또한, 항만은 선박의 출입, 사람의 승하선, 화물의 하역, 해양친수활동 등을 위한 시설 등이 갖추어진 곳으로 우리나라에서는 무역항(29개)과 연안항(25개)으로 크게 구분되고 있다[1]. 항만은 그 이용 특성상 선박의 출입 등 인위적 활동이 활발한 구역이며, 정온성을 위한 외관 구조물 설치로 인해 중장기적으로 폐쇄성이 강화되어 해양환경의 질이 다른 연안 환경에 비해 상대적으로 저하된 것이 현실이다.

삼척항은 1976년도에 무역항으로 지정되어 배후 시멘트 공장에서 생산되는 시멘트 수송 및 연근해 어업 전진 기지의 역할을 수행하고

<sup>†</sup> Corresponding Author: Hankyong National University, Faculty of Food Biotechnology and Chemical Engineering, Anseong 17579, Korea  
Tel: +82-31-670-5206 e-mail: kim@hknu.ac.kr

Table 1. Extraction Conditions according to the Fractionation Scheme of Tessier *et al.*[6]

Step	Fraction	Reagents (per g sediment)/conditions
1	F1: Exchangeable	8 mL 1 M MgCl <sub>2</sub> (pH 7), 1 h, room temperature, continuous agitation
2	F2: Carbonate	8 mL 1 M NaOAc (pH 5), 5 h, room temperature, continuous agitation
3	F3: Oxide	20 mL 0.04 M NH <sub>2</sub> OH · HCl in 25% HOAc, 5 h, 96 °C, some agitation
4	F4: Organic	3 mL 0.02 M HNO <sub>3</sub> and 2 mL 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pH 2), 2 h, 85 °C, some agitation; additional 3 mL 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 3 h, 85 °C, some agitation; 5 mL 3.2 M NH <sub>4</sub> OAc in 20% HNO <sub>3</sub> , 0.5 h, room temperature, continuous agitation
5	F5: Residual	0.5 mL conc. HNO <sub>3</sub> , 5 mL HF and 2 mL HCl, digestion in Teflon bomb, dissolution in 15% HCl

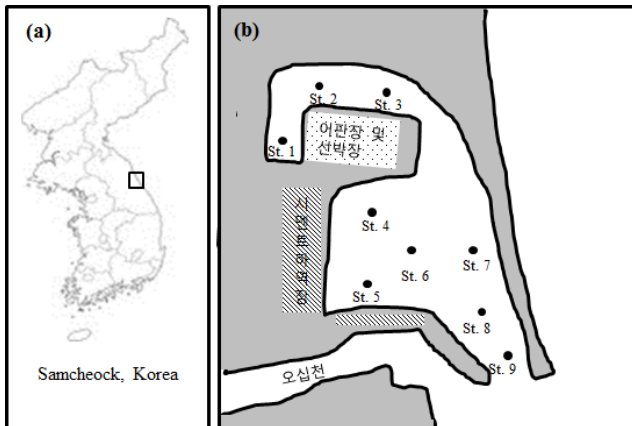


Figure 1. Study site on Samcheok Port, Korea.

있으며, 내항 측으로는 어판장이 형성되어 있어 지역수산물 유통의 중심지 역할을 담당하고 있다. 삼척항은 부두 길이가 776 m로 항계 내 수면적은 996천 m<sup>2</sup>이며 수심은 3~10 m의 분포를 보이고 있고, 연간 하역능력은 8694천톤을 가지고 있다[2]. 삼척항 및 인접수역에 관한 연구로는 동해 국가 어항과 지정항만의 수질 특성 조사연구[3]에서 동해 여러 연안 수질 농도 분포를 서로 비교한 결과, 삼척항 해수는 해양환경기준에서 유기물(COD) 및 영양염류(T-N, T-P)는 각각 I등급 및 II등급의 수질을 나타내었다. 이러한 수질 특성은 외부에서 유입되는 오염원의 영향을 받기도 하지만 저서 오염퇴적물로부터의 오염물질 용출 및 재부유 등에 의해 수질에 영향을 미치기도 하며 또한 주변 생태계에도 급성·만성적인 영향을 미치기도 한다[4]. 따라서 저서 퇴적물에 대한 유기물 및 중금속 용출에 대한 체계적이고 과학적인 분석을 통해 퇴적물의 특성을 조사할 필요성이 높다[5]. 하지만 삼척항 내 표층 퇴적물의 유기물 및 중금속 분포 특성에 관한 조사 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 삼척항 구역 내 9개 정점에서 표층 퇴적물의 지화학적 특성에 관하여 조사를 수행하였으며, 삼척항 수역의 환경관리를 위한 기초자료로 유기물 및 중금속 분포에 대한 조사 결과를 제공하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. 연구지역 특성

동해 삼척항은 길이 약 1 km, 평균 수심 약 10 m 내외의 항만으로, 삼척항 내 해저 퇴적물의 지화학적 특성, 중금속 오염도를 조사하기 위하여 정점 9곳을 선정하여 조사를 실시하였다(Figure 1). 또한, 정점들을 크게 세 군데로 나눠 구분하였다. 삼척항 내항 측에 있는 정점

1~3은 어판장과 어선 선박장 시설이 자리 잡고 있으며, 자동차 도로와 주차장이 인접해 있고, 시멘트 하역장이 있는 항 중앙에 정점 4~7을 설정하였으며, 마지막으로 외항 측에 정점 8, 9를 선정하였다(Figure 1(b)).

### 2.2. 퇴적물 조사

#### 2.2.1. 시료 채취

삼척항 내 퇴적물 시료는 2014년 10월 각 조사정점에서 그랩 채취기를 이용하여 표층 퇴적물을 채취하였다. 현장에서 채취된 퇴적물을 냉장상태로 운반하였으며, 유기물 오염지표 분석항목은 운반 후 즉시 분석하였으며, 중금속 분석 전까지 시료를 냉동 보관하였다.

#### 2.2.2. 물리화학적 성상 분석

퇴적물은 상온에서 풍건 후 체(< 1 mm)를 사용하여 이물질을 제거한 후 실험에 사용하였다. 퇴적물의 pH 측정은 풍건한 시료 10.0 g을 취한 후 증류수 50 mL를 가하여 간헐적으로 저어 주면서 1 h 경과 후 pH meter를 이용하여 측정하였다[6]. 입도 분석은 입도 분석기(Blue-wave, Microtrac, USA)를 이용하여 수행하였다. 강열감량(ignition loss, IL)은 퇴적물 시료 건조 후 550 °C의 강열에 의해 소실된 무게의 차를 이용하여 계산하였다. 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand, COD)은 퇴적물 시료를 과망간산칼륨, 수산화나트륨, 옥살산용액 및 황산용액을 이용해 산화·발색 시킨 후 용소화칼륨을 이용해 요소를 유리시키고, 전분지시약을 이용해 티오황산나트륨 용액으로 적정하였다. 총 유기 탄소(total organic carbon, TOC) 및 총질소(total nitrogen, TN)는 염산을 이용한 전처리 후, CHNS/O analyzer (EA-1110, CE Instruments, Milan, Italy)를 이용해 분석하였다[7]. 총인(total phosphorus, TP)은 회화법을 이용하여 분해한 후 아스크로빈산에 의한 몰리브덴 청법에 의거하여 분석하였다. 이상에서 언급한 분석은 해양환경공정시험기준(해양수산부고시 제2013-230호)에 근거하여 수행하였다. 모든 분석 결과는 시료 당 3번을 분석한 후 평균값을 이용하였다.

오염퇴적물 내에 존재하는 중금속들의 존재형태 차이를 분석하기 위해 Tessier[8]가 제안한 연속추출법을 적용하였다(Table 1). 1단계는 이온교환(exchangeable) 형태, 2단계는 탄산염(carbonate) 형태, 3단계는 철·망간(수)산화물(oxide) 형태, 4단계는 유기물 결합(organic) 형태, 5단계는 잔류물(residual) 형태로 구분하였으며, 중금속의 총량은 1단계부터 5단계까지 분석된 존재량을 더하여 사용하였다. 모든 중금속 분석은 Whatman 0.45 μm PTFE syringe filter로 거른 후 여과액을 ICP-OES (Optima 8300 ICP-OES, PerkinElmer, Waltham, MA, USA)를 이용하여 분석하였다.

Table 2. The Contamination Characteristics of Organic Matter in Sediment

		IL (%)	COD (g/kg)	TOC (%)	T-N (%)	T-P (g/kg)	C/N ratio
Inner	St. 1	9.9	72.2	3.8	0.16	0.15	23.8
	St. 2	5.8	62.3	2.7	0.15	0.11	18.0
	St. 3	5.8	50.3	5.6	0.17	0.09	32.9
Center	St. 4	2.6	17.0	1.4	0.08	0.01	17.5
	St. 5	3.2	16.6	0.6	0.04	0.01	15.0
	St. 6	7.8	39.7	2.0	0.12	0.03	16.7
	St. 7	5.2	30.5	2.1	0.13	0.01	16.2
Outer	St. 8	2.1	28.3	0.1	0.01	0.01	10.0
	St. 9	2.1	21.9	0.4	0.02	0.01	20.0

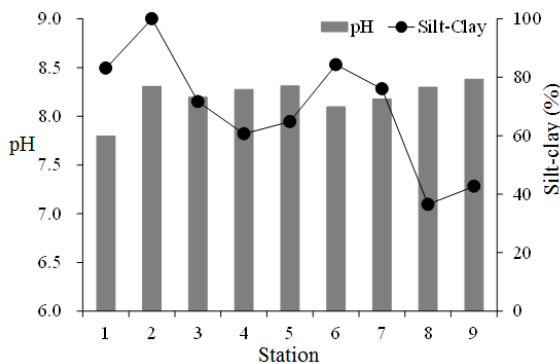


Figure 2. pH and silt-clay contents in surface sediments.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 퇴적물의 물리적 특성

삼척항 퇴적물의 pH와 입도 분석 결과를 Figure 2에 나타내었다. 조사된 퇴적물들의 pH는 7.8~8.4의 범위를 보여, 약알칼리성의 특성을 보였다. 한편, 퇴적물의 입도 특성은 내항에서 silt-clay가 71.7~100%로 높은 함량을 보였으며 중앙항 및 외항에서의 silt-clay 함량은 각각 60.6~84.3 및 36.5~42.7%의 비율을 보였다(Figure 2). 즉, 내항에서 외항으로 갈수록 입도가 큰 퇴적물이 쌓여 있음을 알 수 있다. 이러한 경향으로 볼 때 내항 측에서는 해류의 흐름이 원활하지 않아 외부로부터 유입되는 silt-clay 입자들이 그대로 내항 저서 퇴적층에 쌓여 있는 것으로 판단된다.

#### 3.2. 퇴적물 내 유기물 분포 특성

삼척항 퇴적물에 대한 유기물 함량의 정점별 분포 특성을 Table 2에 나타내었다. 유기오염의 지표인 강열감량(IL)은 전체 조사 정점에서 2.1~9.9% 범위로 평균 4.9%의 분포 특성을 보였다. 또한, 퇴적물의 화학적 산소요구량(COD)은 16.6~72.2 g/kg 범위로 평균 37.6 g/kg을 나타내었다. 이 결과를 국립수산과학원 동해수산연구소의 2001년 사업보고서에 제시된 ‘동해 해양환경측정망 조사 결과’ 중 삼척 연안에서 조사된 퇴적물의 IL (1.55%) 및 COD (8.28 mg/g · d) 평균 농도와 비교해 보면 매우 높은 수치를 보이고 있는 것을 알 수 있다[9]. 이러한 경향은 선행 연구자가 조사한 지역이 삼척항 내 저서 퇴적물이 아닌 삼척항으로부터 일정 거리 떨어져 있는 정점의 저서 퇴적물 시료의 IL 및 COD 농도이기 때문에 큰 차이를 보인 것으로 판단된다. 퇴

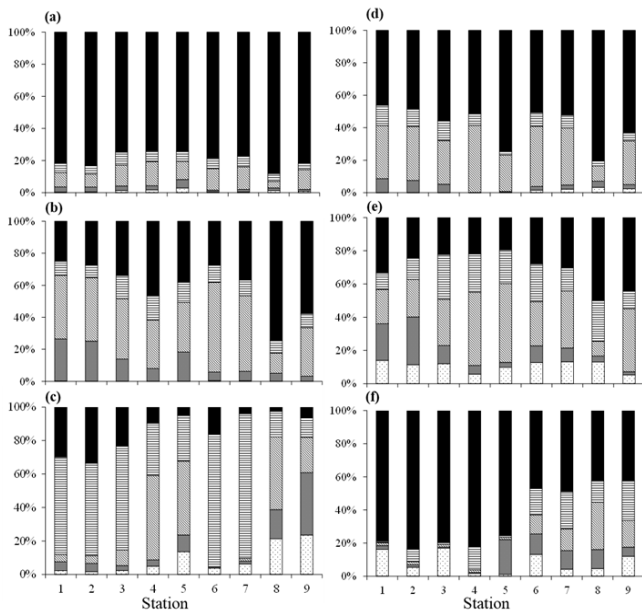
적물 총유기탄소(TOC) 농도는 0.1~3.8%의 범위로 평균 2.1%를 나타내었다. 영양염류인 총질소(T-N)과 총인(T-P) 농도는 조사 정점에서 각각 0.01~0.17 및 0.01~0.15 g/kg의 범위로 평균은 각각 0.09% 및 0.04 g/kg 값을 보였다. 마지막으로 총질소에 대한 총유기탄소의 비(C/N ratio)는 전체적으로 10.0~32.9의 범위로 평균은 18.9를 나타내었다. 총질소에 대한 총유기탄소의 비는 해수 및 퇴적물 내로 유입되는 유기물질에 대한 육상 또는 해양기원을 입증하는 수단으로 널리 이용된다[10,11]. 해양생물의 기초 생산에 의해 형성된 유기물은 C/N비가 5 이상 10 이하이고, 육상으로부터 공급된 유기물의 경우 C/N 비가 10을 초과하는 것으로 알려져 있다[12,13]. 이를 고려하여 삼척항 내 저서 퇴적물의 C/N 비 결과(Table 2)를 분석하면, 외항 정점 8을 제외한 모든 정점에서 육상으로부터 외부유입의 영향을 많이 받는 것으로 추정되고 있다. 따라서 본 연구 조사 대상인 삼척항은 육상으로부터 다양한 유기물이 항내로 유입되고 있는 것으로 판단되고 이러한 육상 유래 유기물은 해수 교환이 원활하지 않아 항 내에 퇴적되고 있을 가능성이 크다고 판단된다. 또한 육상 유래 유기물은 해양 유래 유기물보다 탄소비율이 높아 분해속도가 느려 긴 시간동안 퇴적물 내에 존재할 가능성이 높다[13,14]. 최근 해양퇴적물 내 미세플라스틱에 대한 연구에서 유기고분자인 미세플라스틱은 탄소함량이 높고 분해에 소요되는 시간이 길어 해양퇴적물에 유입되면 오랜 시간 분해되지 않고 잔존한다고 보고하고 있어[15], 미세플라스틱의 존재 여부에 대한 추가 연구도 필요할 것으로 보인다. 또한, 육지로부터 유입 여부의 정확한 판단을 위한 지질학적 평가도 필요하다.

#### 3.3. 퇴적물 내 중금속 농도 및 존재 형태 특성

삼척항 퇴적물에 대한 중금속 농도 및 존재 형태 특성을 Table 3 및 Figure 3에 나타내었다. 퇴적물의 Ni 함량은 8.2~26.6 mg/kg의 범위로 평균 16.0 mg/kg, Zn 함량은 24.7~186.2 mg/kg의 범위로 평균 81.5 mg/kg, Cu 함량은 1.0~95.5 mg/kg의 범위로 평균 36.1 mg/kg, Pb 함량은 8.3~54.1 mg/kg의 범위로 평균 26.5 mg/kg, Cd 함량은 0.2~1.7 mg/kg의 범위로 평균 0.7 mg/kg, As 함량은 1.6~3.8 mg/kg의 범위로 평균 2.4 mg/kg으로 나타났다. 대부분의 중금속 농도는 내항에서 외항으로 갈수록 감소하였지만 As 농도는 외항으로 갈수록 더 높아지는 반대현상을 보였다(Table 3). 이러한 중금속 농도 평균값과 중금속 오염기준을 비교해 보면, Cu (36.1 mg/kg)를 제외한 Ni (16.0 mg/kg), Zn (81.5 mg/kg), Pb (26.5 mg/kg), Cd (0.7 mg/kg), As (2.4 mg/kg)는 NOAA[16]의 effects range low (ERL) 기준보다 낮은 특성을 보이고 있다(Table 3). 하지만 조사 정점별 결과를 보면 Ni인 경우는 정점 1

**Table 3. Mean Values of Heavy Metals in Sediment**

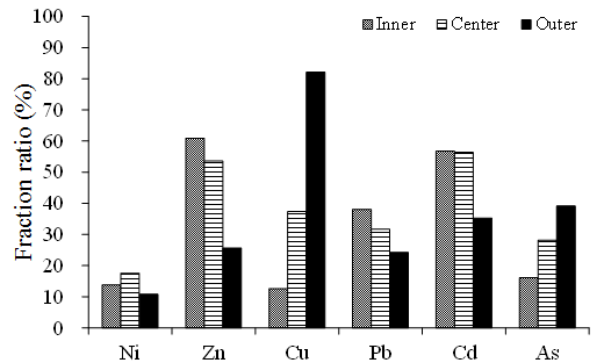
		Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As
Inner	St. 1	25.3	186.2	94.4	54.1	1.7	2.0
	St. 2	26.6	186.1	95.5	50.6	1.3	1.6
	St. 3	13.2	77.7	49.2	29.3	0.7	1.8
Center	St. 4	9.7	39.7	22.8	8.3	0.5	1.9
	St. 5	10.0	26.8	13.1	8.8	0.6	2.1
	St. 6	22.3	91.4	35.4	34.9	0.5	3.2
	St. 7	17.6	65.3	11.7	24.2	0.5	2.7
Outer	St. 8	8.2	24.7	1.7	13.6	0.2	3.8
	St. 9	11.3	35.3	1.0	14.3	0.3	3.0
NOAA standards	ERL	20.9	150	34	46.7	1.2	8.2
	ERM	51.6	410	270	218	9.6	70



**Figure 3. Fractionation of heavy metals in the surface sediment. (a) Ni, (b) Zn, (c) Cu, (d) Pb, (e) Cd, (f) As. Legend: (a) exchangeable, (b) carbonate, (c) oxides, (d) organic, and (e) residual.**

(25.3 mg/kg), 2 (26.6 mg/kg), 6 (22.3 mg/kg)에서 ERL보다 높은 값을 보였고, Zn (186.2 mg/kg, 186.1 mg/kg), Pb (54.1 mg/kg, 50.6 mg/kg), Cd (1.7 mg/kg, 1.3 mg/kg)은 각각 조사 정점 1 및 2에서 ERL보다 높은 값을 보였다. 또한, Cu는 정점 1(94.4 mg/kg), 2(95.5 mg/kg), 3(49.2 mg/kg), 6(35.4 mg/kg)에서 ERL보다 높은 농도를 보였다(Table 3).

한편 조사 정점별 중금속 존재 형태비를 분석하였으며, 각 중금속의 이온교환(exchangeable) 형태부터 잔류물(residual) 형태까지 중금속의 화학적 존재형태별 함량을 도시하였다(Figure 3). 이온교환(exchangeable), 탄산염(carbonate) 및 산화물(oxide) 형태는 외부 환경변화(온도, pH, 산화·환원전위 등)에 의해 쉽게 주변 수 환경으로 용출이 가능하고 이렇게 용출된 중금속은 잠재적으로 형성된 생태계에 영향을 줄 수 있다[17,18]. Figure 3을 보면, 9개 정점에서 Ni, Zn, Cu, Pb, Cd 및 As는 외부 환경의 변화에 의해서 비교적 용출이 쉽게 일어날 수 있는 형태인 이온교환, 탄산염, 산화물 형태를 합한 중금속의 평균 존



**Figure 4. The sum of exchangeable, carbonate, and oxide fractions of heavy metals in surface sediment according to position.**

재비가 각각 14.8, 49.8, 39.1, 32.2, 51.8 및 26.6%를 나타내고 있어, 중금속 중 Zn과 Cd이 환경변화에 따라 중금속이 주변 수층으로 용출될 가능성이 높은 것으로 판단된다. 게다가 이러한 형태의 중금속들은 인위적인 오염과 상관관계가 높은 것으로 보고되고 있다[19]. 즉, 외부에서 중금속을 포함한 인위적인 오염물질 유입이 많은 퇴적환경에서는 이온교환, 탄산염 및 산화물 형태의 중금속 존재 비율이 높게 나타나는 결과가 보고되어 있다[18]. 한편, 쉽게 용출될 수 있는 이온교환, 탄산염 및 산화물 형태의 중금속 존재비를 내향, 중앙 항 및 외향에서 평균값으로 나타낸 결과를 보면(Figure 4), Ni, Zn, Pb, Cd은 내향 측에서 높은 존재 비율을 나타낸 반면, Cu와 As는 외향에서 더 높은 존재 비율을 나타내고 있다. 이러한 결과로 볼 때 Cu와 As인 경우는 내향 측이 아닌 중앙 항 및 외향 측에서 유입 퇴적되었을 가능성도 있다고 판단된다.

**3.4. 삼척항 내 퇴적물 지화학적 특성 간 상관관계**

퇴적물의 입도, 유기물 및 중금속 간의 상관성을 평가하기 위하여 통계분석을 실시하였다. 통계분석은 SPSS 18.0 version으로 수행하였으며, 변수간의 상관분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 입도특성 및 유기물, 중금속간의 상관성 분석 결과를 보면, 퇴적물 세립자인 silt-clay와 강열감량(IL), 화학적 산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC), 총질소(T-N) 및 총인(T-P)과의 상관성이 0.601~0.850으로 높게 나타났다. 입도 특성은 유기물보다 중금속과 더 높은 상관관계를 보여 주었으며

Table 4. Correlation Coefficients among Sedimentary Texture, IL, COD, TOC, TN, TP, and Heavy Metals of Surface Sediments

	Silt-clay	IL	COD	TOC	TN	TP	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As
Silt-clay	1.000											
IL	0.766	1										
COD	0.690	0.836	1									
TOC	0.601	0.690	0.731	1								
TN	0.850	0.815	0.783	0.903	1							
TP	0.647	0.766	0.959	0.751	0.750	1						
Ni	0.877	0.848	0.832	0.483	0.743	0.735	1					
Zn	0.813	0.807	0.832	0.585	0.757	0.911	0.931	1				
Cu	0.799	0.766	0.936	0.675	0.778	0.951	0.832	0.964	1			
Pb	0.794	0.875	0.966	0.636	0.784	0.894	0.946	0.972	0.915	1		
Cd	0.722	0.749	0.871	0.586	0.689	0.938	0.777	0.930	0.957	0.858	1	
As	0.876	0.800	0.876	0.565	0.738	0.849	0.933	0.949	0.911	0.939	0.879	1

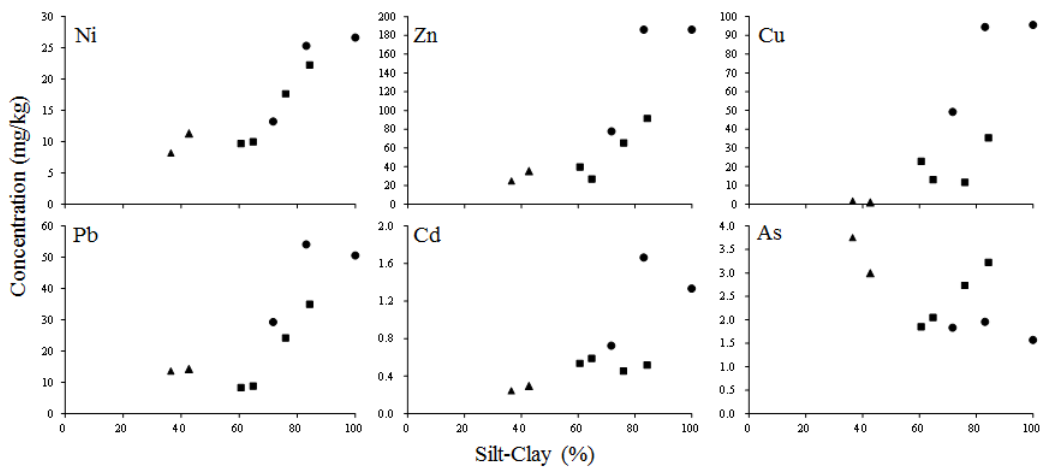


Figure 5. Correlation diagram between silt-clay content and heavy metal concentration in surface sediment. Legend: (●) inner port, (■) center port, (▲) outer port.

(Table 4), silt-clay 성분 함량이 높을수록 중금속 농도가 높아지는 것을 알 수 있었다(Figure 5). 단, As의 경우 내항(정점 1~3)보다 외항(정점 8, 9)과 중앙항(정점 4~7) 측에서 더 높은 농도를 보였고, 그 이유에 대해서는 추가적인 조사 및 연구가 필요하다고 사료된다. 한편, 유기물과 중금속 인자와의 상관성에서도 모든 중금속 인자에 대해 0.722~0.877의 높은 상관성을 나타내고 있다(Table 4).

3.5. 삼척항 내 유기물 및 중금속의 분포 특성과 오염의 잠재적 평가

삼척항 내 저서 퇴적물의 유기물 및 중금속 분포 특성을 조사한 결과 내항 측에서 외항 측으로 갈수록 유기물 및 중금속 농도가 감소하는 경향을 보이고 있다(Tables 2, 3). 또한, 퇴적된 유기물 기원을 보더라도 외항 일부를 제외한 모든 정점에서 육상 유래 유기물이 퇴적하고 있는 것으로 판단할 수 있었다. 이러한 결과에 비추어 볼 때, 삼척항 내 유기물 및 중금속은 내항 측 주변도로와 어관장 등 주변에서 상당 부분 유입되어 퇴적되는 것으로 보이며, 해류의 교환이 원활하지 않아 이러한 퇴적 현상은 점점 증가할 가능성이 높은 것으로 판단된다. 특히, 강우 시 육상유래 오염물질(중금속)과 유기물이 내항 측으로 유입되고 해저에 퇴적하는 악순환이 계속되고 있는 것으로 판단된다.

다. 한편, 중금속 중 As는 다른 중금속들과 달리 퇴적 농도가 내항보다 외항 및 중앙항에서 높은 경향을 보여주고 있는데, 중앙항 주변 시멘트 하역장에서의 유입과 내항에서 유출된 일부 As가 중앙항에 장기적으로 퇴적하고 있는 것으로 사료되며 이 부분에 대해서는 좀 더 체계적인 조사 연구가 필요하다. 따라서 삼척항 내 저서 퇴적물에서의 유기물 및 중금속 농도의 저감을 위해서는 내항 측에 위치해 있는 어관장 및 주변 도로에서 유입과 중앙항 주변에 위치해 있는 시멘트 하역장에서의 유입 등 점오염원과 비점오염원을 체계적으로 관리할 수 있는 방법을 모색해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

삼척항 내 저서 표층 퇴적물에 대한 기본적 특성을 조사하고, 퇴적물의 유기물과 중금속과의 관계 및 중금속 오염도를 평가함으로써 어항을 관리하기 위한 체계적이고 과학적인 기본 자료를 제공하고자 하였다. 삼척항 저서 표층 퇴적물은 pH 7.8~8.4를 보여 대부분 약알칼리성 특성을 보였으며, silt-clay 함량 분포를 보면 어관장이 있는 내항에서는 71~100%의 silt-clay 함량을 보였지만 중앙항(60.6~84.3%)과 외

항(36.5~42%)으로 갈수록 그 함량이 감소하는 분포 특성을 보였다. 또한 표층 퇴적물의 유기물 지표인 IL과 COD는 어판장이 있는 내항 측(7.2%, 61.6 g/kg)이 시멘트 하역장이 있는 중앙(4.7%, 26.0 g/kg) 및 외항 측(2.1%, 25.1 g/kg)보다 더 높은 것으로 나타났으며, 표층 퇴적물 내 총질소(T-N) 및 총인(T-P)도 내항 측(0.16%, 0.12 g/kg)이 더 높은 것으로 나타났다. 표층 퇴적물의 중금속 함량을 내항과 외항 측에 대해 비교해 보면, As를 제외한 모든 항목에서 내항 측이 높은 농도를 나타내고 있다(Table 3). 미국해양대기청(NOAA) 퇴적물 기준과 비교하면 모든 정점에서 As는 ERL 이하의 오염 수준이고, 나머지 중금속 별 기준에서는 내항에서 ERL~ERM 사이의 오염수준을 나타내고 있다(Table 3). 주변 환경변화 시 쉽게 용출 가능한 중금속 존재 형태(이온교환, 탄산염 및 산화물 형태) 분석 결과에서도 대부분의 중금속이 내항 측에서 높은 비율을 나타내고 있으나, Cu와 As의 경우에는 외항에서 더 높은 존재 비율을 보여주고 있었다. 퇴적물의 입도, 이화학적 성분, 중금속 간 상관성 분석에서 silt-clay 함량과 중금속 농도와 높은 상관관계를 보였다(As는 제외). 또한, 유기물 항목과 중금속 농도와도 높은 상관성을 보였다.

## References

1. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, *Guidance for Remediation · Restoration of Marine Contaminated Sediment* (2010).
2. Donghae Regional Maritime Affairs and Fisheries Office, <http://donghae.mof.go.kr/index.do> (2015)
3. D. I. Lee, G. Y. Kim, J. H. Moon, and K. H. Eom, The policy review and water quality characteristics of national fishing harbors and designated ports in East coast of Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energ.*, **14**, 213-223 (2011).
4. J. S. Gray, R. S. Wu, and Y. Y. Or, Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **238**, 249-279 (2002)
5. C. W. Song, H. J. Han, and J. U. Lee, Investigation on heavy metal distribution in soils around Boryeong coal-fired power plant, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, **56**, 10-22 (2019)
6. G. O. Park and S. H. Jun, Chemical forms and release potential of heavy metals from the lime treated sediments, *Korean J. Limnol.*, **41**, 166-173 (2018).
7. T. R. Parsons, M. Takahashi, and B. Hargrave, *Biological Oceanographic Processes*, 3<sup>rd</sup> ed., Pergamon Press, Oxford, England (1984).
8. A. Tessier, P. G. C. Campbell, and M. Bisson, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Anal. Chem.*, **51**, 844-851 (1979).
9. National Institutes of Fisheries Science, *2001 Annual Report of East Sea Fisheries Research Institute*, 104, Report No. GOVP12002-14476, National Institutes of Fisheries Science, Korea (2002).
10. P. J. Muller, C/N ratio in Pacific deep sea sediments: Effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays, *Cosmochim. Acta*, **41**, 765-776 (1977).
11. R. Stein, *Accumulation of Organic Carbon in Marine Sediments, Results from the Deep sea Drilling Project/ocean Drilling Program (DSDP/ODP)*, Vol. 34, 217, Springer-Verlag, Berlin, Germany (1991).
12. K. Sabbe and W. Vyverman, Distribution of benthic diatom assemblages in the Westerhelde (Zeeland, the Netherlands), *Belg. J. Bot.*, **124**, 91-101 (1991).
13. S. Enriquez, S. M. Duarte, and K. Sand-Jensen, Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: The importance of detritus C:N:P content, *Oecologia*, **94**, 457-471 (1993).
14. W. S. Shin, Y. Aikawa, and O. Nishimura, Chemical properties of sediment in Nanakita Estuarine tidal flat: Estimation of sedimentary organic matter origin by stable isotope and fatty acid, *Environ. Eng. Res.*, **17**, 77-82 (2012).
15. J. Martin, A. Lusher, R. C. Thompson, and A. Morley, The deposition and accumulation of microplastics in marine sediments and bottom water from the Irish continental shelf, *Sci. Rep.*, **7**, 10772 (2017).
16. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), *Sediment Quality Guidelines Developed for the National Status and Trends Program*, <http://ccma.nos.noaa.gov/publications/sqg.pdf> (1999).
17. J. Bacon and C. M. Davidson, Is there a future for sequential chemical extraction?, *Analyst*, **133**, 25-46 (2008).
18. T. Batjargal, E. Otgonjargal, K. Baek, and J. S. Yang, Assessment of metals contamination of soils in Ulaanbaatar Mongolia, *J. Hazard. Mater.*, **184**, 872-876 (2010).
19. E. A. Passos, J. C. Alves, I. S. Santos, J. P. H. Alves, C. A. B. Garcia, and A. C. S. Costa, Assessment of trace metals contamination in estuarine sediments using a sequential extraction technique and principal component analysis, *Microchem. J.*, **96**, 50-57 (2010).

## Authors

Woo-Seok Shin, Ph.D., Senior Researcher, Seohaean Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong 32258, Korea; swooseok77@cni.re.kr

Young-Kee Kim, Ph.D., Professor, Faculty of Food Biotechnology and Chemical Engineering, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea; kim@hknu.ac.kr