

경기만 퇴적물의 중금속 분포 특성

이중현 · 이정석 · 김범수 · 이창복 · 고철환
서울대학교 해양학과

Characteristics of Metal Distribution in the Sediment in Kyeonggi Bay, Korea

JONG-HYEON LEE, JUNG-SUK YI, BUM-SU KIM, CHANG-BOK LEE AND CHUL-HWAN KOH
Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

본 연구는 경기만 표층 퇴적물의 지화학적 특징과 입도분포와의 관계를 조사하기 위해서 수행되었다. 1995년 12월에 채집한 총 90 개 퇴적물 시료를 대상으로 입도분포, 유기탄소와 중금속 함량(Al, Fe, Mn, V, Co, Ni, Cr, Zn, Cu)을 분석하였다. 또한 1981년에 조사된 자료와 비교함으로써 그 동안의 변화를 파악하고자 하였다. 퇴적물 입자의 크기는 몇몇 지역에서 1981년과는 다른 양상을 보였다. 1994년에 완공된 시화방조제 부근의 퇴적물은 이전에 비해서 세립해졌다. 공항건설을 위한 매립공사가 진행되고 있는 영종도 부근의 퇴적물의 경우 세립한 퇴적상에서 혼합 퇴적상으로 변화하였다. 유기물과 중금속 함량은 전반적으로 입도에 의존적인 분포를 보이고 있지만, 인천북항의 퇴적물에서는 입도와 무관하게 유기물과 Ni, Cr, Zn 그리고 Cu 등의 중금속이 높은 농도로 농축되어 있었다.

This paper reports the sediment geochemistry and its relation to the grain size distribution in Kyeonggi Bay, Korea. Sediment samples were collected from 90 stations during the cruise crossing the bay in December 1995. Variables investigated were the sediment grain size, organic carbon content, and concentrations of Al, Fe, Mn, V, Co, Ni, Cr, Zn and Cu in the sediment. We followed the change in these variables by comparing the data obtained from this region in 1981. Distribution pattern of sediment grain size was modified from that in 1981 in some places. Near the Shihwa Dike which was completed in 1994, sediment had got finer grained. Sediment facies changed from fine to mixed facies near Youngjong Island where the tidal flat has been reclaimed for airport construction. Contents of organic matter and metals in the sediment were mostly dependent upon the sediment grain size, but an exception was found in the harbor area. The sediment in the Incheon North Harbor showed higher accumulation of organic matter and metals such as Ni, Cr, Zn and Cu.

서 론

한국 서해연안의 대표적인 내만인 경기만은 대조차 환경으로서, 조석뿐만 아니라 한강으로부터 유입되는 담수와 육상기원의 오염물질의 영향을 많이 받는 해역이다(Choi and Shim, 1988; 인하대해양과학기술연구소, 1993). 경기만의 수리학적, 퇴적학적, 지화학적 특징과 해양 생태계의 특징에 대해서는 이미 여러 연구 결과들이 발표된 바 있다(이, 1972; Choi and Shim, 1986, 1988; Shin *et al.*, 1989; 정과 박, 1989; Lee *et al.*, 1992; Yoo and Hong, 1996). 최근에는 점점 악화되는 경기만 해수의 부영양화, 적조, 중금속오염, 그리고 유기물오염의 부하량 등에 대한 연구가 이루어졌다(인하대해양과학기술연구소, 1993; 국립환경연구원, 1996). 그러나 조간대와 조하대 지역을 포함하는 경기만의 저서환경과 저서생태계의 교란에 대해서는 조사가 상대적으로 적게 이루어졌다(한국해양연구소, 1995; Lee and Koh, 1998).

경기만 주변과 한강유역에는 약 2 천만 명이 거주하며, 강화수로 주변에 위치한 김포 쓰레기매립장, 인천항, 남동공단 등의 다양한 종류의 오염원이 산재해 있다. 경기만 해수는 질소 대인의 비율(N/P, mol/mol)이 평균 65.2로서 과도한 부영양화 상태이다(인하대해양과학기술연구소, 1993). 경기만 내로 유입되는 화학적 산소요구량(COD)의 부하량 중 약 60% 정도가 한강으로부터, 나머지 40%는 인근 도시, 항만 및 산업시설로부터 유입되는 것으로 추정된다. 인천북항 일대에서는 인접한 산업공장에서 배출된 폐수의 영향으로, 해수 내에 Cr과 Cu가 많이 농축되어 있다. 경기만 일대의 조간대와 조하대 지역은 매립공사의 영향으로 급격한 퇴적물 집적 또는 표층 퇴적물의 세립화 과정을 겪고 있는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 1992). 또한 반월공단 주위의 조간대에서는 Cu, Ni, Co 등의 중금속 오염의 징후가 확인되었다. 이들 여러 오염원들로부터 경기만으로 유입되는 유기물과 중금속은 결국 해저 퇴적물에 쌓이기 때문에, 이에 따른 저서생태계의 변화가 예상된다. 따라서 경기만 내의 매립

공사장 인근 조간대 지역이나 한강하구와 접하고 있는 강화수로 지역, 그리고 항만 지역 등 퇴적환경의 교란이 예상되거나 오염원에 인접한 지역을 포함한 경기만 전지역의 저서환경에 대한 집중적인 연구가 필요하다고 하겠다.

본 연구는 경기만의 조간대 및 조하대 해역과 항만 해역에서 얻어진 총 90 개 표본을 대상으로 표층 퇴적물의 입도와 유기물 및 중금속 함량을 측정하였다. 이들 오염물질의 분포특성을 밝히고 그 조절요인을 평가하는 것이 본 연구의 목적이다.

재료 및 방법

조사지역

경기만은 여러 수로 사이에 놓인 섬들을 경계로 경기내만과 외해로 구분된다. 수로는 주로 북동-남서 방향으로 발달되어 있

고, 수심은 10~30 m 범위이다. 인천항에서의 조석은 반일주조가 우세하며 평균조차는 6.5 m이다. 대조기와 소조기의 조차는 각각 8 m, 4 m이고, 창조류와 낙조류의 최대 유속은 각각 1.8 m/s와 2.3 m/s이다(이, 1972). 인천항 부근에 위치한 주수로에서 추정된 조석에 따른 해수의 일일유출입량은 창조류의 경우 소조시 $260 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이고, 대조시 $570 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이다. 낙조류의 경우는 각각 $200 \times 10^6 \text{ m}^3$, $470 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이다. 염분확산 모델을 이용해서 추정한 한강으로부터 강화수로로 유입되는 담수유입량은 일일 평균 $18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 이고 이는 일일 평균 해수유입량($500 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$)의 3.6%를 차지한다(인하대해양과학기술연구소, 1993).

경기만 표층 퇴적물은 전반적으로 해안에 가까워질수록 세립화하는 특징을 보인다(Lee et al., 1992). 이러한 분포경향은 조간대 내에서도 다시 반복되며, 결과적으로 간조선 부근에서 입도분포의 불연속성이 나타난다. 외해쪽에서부터 북동-남서 방

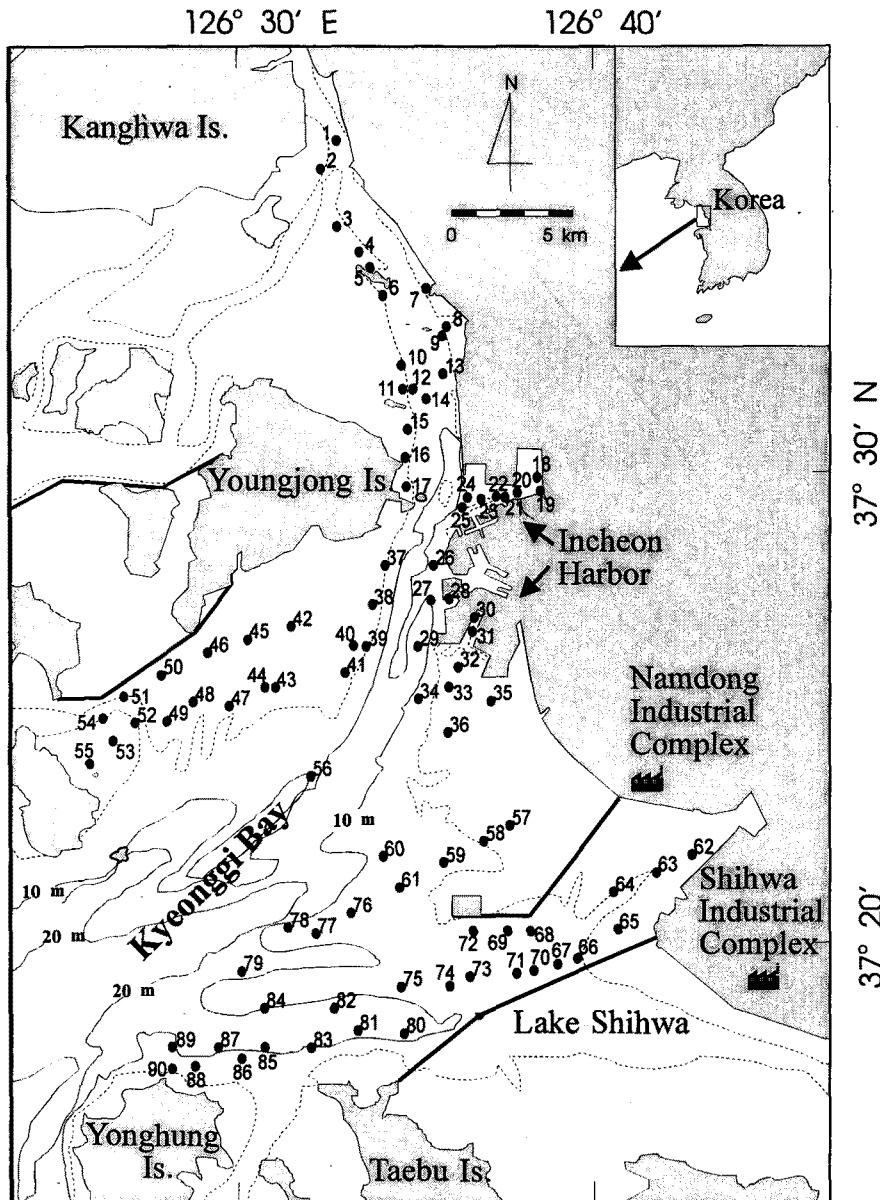


Fig. 1. A map showing the study area, sampling stations and bathymetry in Kyeonggi Bay. Dotted lines represent the lowest water level which separates the intertidal from the subtidal areas. Solid lines represent isodepth contours. Thick solid lines without any marks represent dikes constructed for the reclamation of the tidal flat. Sampling stations are from Kanghwa Suro (Stations 1-17), Incheon Harbor (Stations 18-32), Songdo intertidal flat (Stations 33-36, 57-61), Youngjongdo intertidal flat (Stations 37-56), and the outside of Lake Shihwa (Stations 62-90).

Table 1. Sediment facies, mean grain size (Mz), organic carbon content (OC) and metal concentrations in surface sediments collected from Kyeonggi Bay in December 1995 (KS=Kanghwa Suro, IH=Incheon Harbor, SIF=Songdo intertidal flat, YIF=Youngjongdo intertidal flat, OLS=outside of Lake Shihwa; gS=gravelly sand, (g)S=slightly gravelly sand, S=sand, zS=silty sand, mS=muddy sand, sZ=sandy silt, sM=sandy mud, M=mud, Z=silt)

St. no	Location	Sed. facies	Mz (ϕ)	OC (%)	Al (%)	Fe (%)	Mn (mg/kg)	V (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Co (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
1	KS	sZ	6.4	0.2	6.8	2.7	467	101	79	34	17	94	16
2	KS	zS	3.6	0.3	5.9	2.2	385	78	58	17	11	60	8
3	KS	sZ	6.3	0.4	6.9	2.9	469	91	77	26	15	99	21
4	KS	Z	6.1	0.2	6.4	2.5	421	75	64	20	13	77	13
5	KS	zS	5.1	0.3	6.5	-	544	89	74	21	14	78	14
6	KS	(g)S	4.4	0.2	6.0	2.4	531	81	68	21	13	74	10
8	KS	-	-	0.3	6.3	2.7	610	90	79	23	13	91	18
9	KS	sZ	6.1	0.1	6.2	2.7	536	102	79	21	16	83	13
10	KS	mS	3.9	0.3	6.3	2.5	448	79	71	20	13	75	11
11	KS	sZ	6.0	0.1	6.2	-	489	85	51	20	13	68	7
12	KS	zS	3.9	0.3	6.7	2.7	602	82	71	23	15	91	24
13	KS	S	1.2	0.0	3.1	1.2	2106	33	33	13	7	31	5
14	KS	gS	0.3	0.2	3.4	1.1	2365	34	32	14	7	37	5
15	KS	sZ	6.8	0.2	6.5	2.6	428	81	68	22	15	78	18
16	KS	sZ	5.5	0.4	6.7	2.7	437	85	72	24	13	86	14
17	KS	zS	4.7	0.3	6.6	2.7	476	84	68	21	13	81	14
18	IH	zS	7.1	1.2	7.9	4.2	603	122	363	10	21	538	515
19	IH	sZ	6.1	0.9	8.0	4.1	539	113	233	68	18	544	301
20	IH	M	7.2	0.7	7.5	3.6	509	101	142	43	18	257	105
21	IH	sM	7.8	0.7	7.7	3.7	656	113	119	39	18	342	85
22	IH	sZ	6.6	0.5	7.1	3.1	692	90	83	28	16	116	33
23	IH	sZ	5.8	0.3	6.9	2.9	652	81	80	26	14	100	24
24	IH	sZ	6.7	0.3	6.6	2.7	644	83	77	22	14	91	19
25	IH	sZ	5.5	0.3	6.6	2.7	582	83	70	24	15	95	25
26	IH	S	3.3	0.2	6.3	2.3	578	71	59	18	11	68	16
27	IH	zS	5.0	0.3	6.8	2.8	702	97	77	41	18	100	19
28	IH	Z	7.2	0.5	-	-	-	99	85	29	17	139	28
29	IH	zS	3.7	0.3	5.7	2.0	352	63	45	17	9	68	15
30	IH	M	8.8	0.5	8.0	3.5	799	112	94	38	21	172	45
31	IH	Z	7.0	0.5	7.5	3.2	498	112	92	36	21	151	33
32	IH	zS	4.8	0.1	6.2	2.0	401	65	49	15	8	54	5
33	SIF	S	2.4	0.1	5.0	1.4	408	40	35	19	8	39	2
34	SIF	zS	5.1	0.1	5.5	2.0	442	72	40	17	13	54	12
35	SIF	zS	4.1	0.1	5.6	1.8	348	60	45	14	11	50	11
36	SIF	S	3.0	0.1	5.9	1.8	472	59	47	16	12	65	13
37	YIF	sZ	6.2	0.2	6.3	2.4	361	74	61	22	15	69	14
38	YIF	(g)S	3.9	0.1	5.3	1.9	418	72	50	12	8	42	3
39	YIF	zS	4.2	0.2	6.6	2.5	369	97	74	28	19	82	18
40	YIF	zS	4.6	0.2	6.0	2.2	415	85	67	21	16	71	14
41	YIF	zS	3.8	0.2	4.1	2.0	405	78	53	13	11	44	3
42	YIF	zS	4.1	0.2	6.2	2.3	438	83	68	23	16	85	15
43	YIF	sZ	7.3	0.4	6.5	2.4	409	80	62	24	15	93	16
44	YIF	(g)S	2.5	0.1	4.9	1.2	699	47	31	15	11	47	14
45	YIF	sZ	5.5	0.2	6.4	2.3	354	84	70	23	16	69	14
46	YIF	zS	4.1	0.1	6.2	2.1	478	80	63	22	16	84	14
47	YIF	zS	4.1	0.2	5.5	1.9	389	57	44	23	11	53	3
49	YIF	zS	3.9	0.1	6.0	2.2	622	83	62	20	15	65	12
50	YIF	zS	4.1	0.2	6.1	2.4	498	78	63	20	12	64	8
51	YIF	sZ	6.6	0.3	6.7	2.5	456	84	70	28	18	89	18
52	YIF	zS	4.0	0.3	5.8	2.4	467	96	63	17	12	57	6
53	YIF	zS	4.2	0.2	6.6	2.4	605	80	64	27	15	68	5
55	YIF	zS	4.6	0.1	5.9	2.0	375	72	58	20	16	66	13
56	YIF	sZ	6.1	0.2	6.9	2.7	548	95	75	27	17	101	23
57	SIF	S	2.6	0.1	5.4	1.4	329	37	31	11	6	31	1
58	SIF	S	2.9	0.1	5.0	1.7	360	57	45	14	10	55	11
59	SIF	(g)S	2.1	0.1	4.2	1.0	518	38	23	10	7	42	11
60	SIF	(g)S	2.7	0.1	5.3	1.8	387	61	49	16	11	55	12
61	SIF	S	2.8	0.1	5.6	1.8	521	57	42	16	12	54	12
63	OLS	sZ	6.1	0.3	7.6	2.6	458	79	65	30	15	84	29

Table 1. Continued

St. no	Location	Sed. facies	Mz (ϕ)	OC (%)	Al (%)	Fe (%)	Mn (mg/kg)	V (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Co (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
64	OLS	gS	4.3	0.2	6.8	2.7	371	93	75	36	16	79	9
65	OLS	sZ	5.8	0.1	5.1	1.9	336	74	46	13	11	42	2
66	OLS	sZ	4.8	0.3	6.4	2.5	393	88	66	22	14	67	8
67	OLS	sZ	6.1	0.3	6.8	2.8	449	-	71	25	17	90	20
68	OLS	zS	4.2	0.1	5.9	2.0	398	70	50	22	15	70	14
69	OLS	zS	3.9	0.2	3.2	1.3	199	83	51	22	17	72	16
70	OLS	sZ	6.1	0.3	6.6	2.7	486	89	72	25	14	82	18
71	OLS	Z	6.4	0.3	7.8	3.0	619	87	71	31	16	91	19
73	OLS	sZ	4.8	0.4	7.2	3.0	533	99	82	29	16	101	20
74	OLS	sZ	6.8	0.4	7.3	3.3	663	100	81	31	18	117	26
75	OLS	sZ	6.0	0.3	6.7	2.8	566	85	66	24	13	87	18
76	OLS	zS	4.6	0.4	7.7	2.8	701	84	71	33	13	87	14
77	OLS	zS	4.8	0.2	6.6	2.5	529	84	71	26	17	89	18
78	OLS	S	3.3	0.1	5.2	1.8	303	63	51	23	12	52	3
79	OLS	m	4.1	0.1	5.9	2.1	661	58	46	19	12	60	13
80	OLS	sZ	6.2	0.4	6.8	3.1	862	97	79	29	15	96	18
81	OLS	sZ	5.8	0.3	5.6	2.3	459	75	63	21	12	64	9
82	OLS	zS	5.4	0.2	6.4	2.5	614	73	61	23	13	67	16
83	OLS	gS	3.7	0.3	4.5	1.8	454	54	46	15	9	44	6
85	OLS	gS	3.5	0.3	6.4	2.5	410	87	68	33	16	78	10
86	OLS	sZ	6.0	0.3	6.2	2.4	360	74	64	27	15	66	6
87	OLS	-	-	0.3	5.9	2.4	404	82	63	21	13	69	8
88	OLS	-	-	0.2	6.1	2.5	444	85	66	20	13	65	8
89	OLS	zS	5.0	0.4	6.5	2.5	484	84	66	31	16	73	9
90	OLS	(g)S	4.9	0.4	6.2	2.5	372	83	66	22	13	66	9

향으로 사퇴가 발달하고, 조류의 유속이 큰 주수로에는 곳에 따라 자갈이 분포한다. 경기만 전체 면적의 약 60%를 차지하고 있는 조간대 지역은 지난 15년 동안에 간척에 의해 그 면적이 크게 감소하였다. 방조제 등의 연안 구조물의 축조로 퇴적환경이 급격히 변화하였다.

인천항 남쪽의 송도 조간대에서는 방조제 건설로 1986~1988년 사이에 10~30 cm 정도의 퇴적층이 새롭게 쌓인 것이 확인된 바 있다(유 등, 1989). 또한 시화호 방조제 건설도 인근 표층 퇴적물의 세립화를 초래하였다(Lee et al., 1992).

1994년과 1995년에 경기만 해수 내 부유퇴적물의 공간적 분포를 위성사진자료를 통해서 분석한 바에 따르면 부유퇴적물의 농도가 수심이 깊은 중앙수로에 비해서 영종도 신공항과 인천 LNG기지 등 건설공사장 주위 해역에서 약 3배 이상 높았다(국립환경연구원, 1996). 특히 LNG기지와 남동공단을 잇는 방조제의 서쪽 해역이 동쪽 해역에 비해서 뚜렷이 높은 경향을 보이는 것은 주변 공사장으로부터 토사의 유입이 있었기 때문으로 간주된다.

시료 채집 및 분석 방법

1995년 12월에 총 90 개의 표층 퇴적물 시료를 채취하였다(Fig. 1). 반반 채니기(van Veen grab)를 이용하여 표층 5 cm 이내에서 시료를 취하였다. 입도, 유기물 및 중금속 분석을 위한 시료들은 모두 동일한 채니기에서 취하였고, 입도분석을 위한 시료 이외에는 실험실에서 건조기로 말린 후 분마해서 분석에 이용하였다.

퇴적물의 입도는 유기물과 염분을 제거한 후, 63 μ m 이상의 입자는 표준체를 이용한 체질방법으로, 63 μ m이하의 입자는 피

펫방법으로 분석하였다. 피펫분석시 확산제는 칼콘($(\text{NaPO}_3)_6$)을 사용하였으며, 입자의 크기는 1 ϕ 간격으로 분석하였다. 분석결과는 Folk and Ward(1957)의 방법에 따라 통계 처리하였으며, 퇴적상의 분류는 Folk(1954)의 삼각다이아그램을 이용하였다.

유기탄소 함량은 일정량의 0.1N 중크롬산칼륨($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)과 진한 황산 혼합용액을 약 0.5 g의 분말 시료에 넣어서 90~100°C에서 30분간 가열하면서 시료 중의 유기탄소를 산화시키고 난 후, 남은 산화제의 양을 0.1N 황산암모늄 제 II철($\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)로 정량하는 역적정법을 이용하여 분석하였다. 매회 실험마다 분석값의 신뢰도 검증을 위해서 글루코오스($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)를 시료와 병행하여 분석하였다(Jackson, 1967). 적정에 이용한 뷰렛의 눈금오차는 ± 0.01 ml이었고, 유기탄소 함량의 단위는 퇴적물 건중량에 대한 무게비율(%)로서 반올림해서 소수점 첫째 자리까지 나타내었다.

중금속 농도는 혼합산 추출법을 이용하여 측정하였다(Kitano and Hujiyoshi, 1980). 잘 분마된 퇴적물 시료 약 0.5 g을 정량하여 테플론bomb(Teflon bomb)에 넣고, 진한 질산(HNO_3), 불산(HF) 및 과염소산(HClO_4)을 각각 6, 4, 3 ml씩 첨가해서 밀봉한 채로 가열판 위에서 175°C를 유지하면서 약 12 시간 동안 반응을 시킨 다음, 뚜껑을 개봉하여 산을 증발시켰다. 이 과정을 두 번 반복하여 잔류물을 완전히 용해시킨 후, 시료에 1N HNO_3 40 ml를 넣어 중금속 원소를 용출, 희석하였다. 중금속 농도의 측정에는 ICP-AES로 하였다. 표준물질은 염하구 퇴적물로 분말제조된 NIST 1646A를 사용하였다. 각 중금속 원소별 회수율은 Al(93%), Fe(97%), Mn(92%), Ni(85%), Cr(108%), Cu(89%), Zn(106%) 등으로 대체로 양호하였으나, V과 Co의 경우 회수율이 각각 126%와 136%로 정량적인 자료해석에 다소 제한을 둘 필

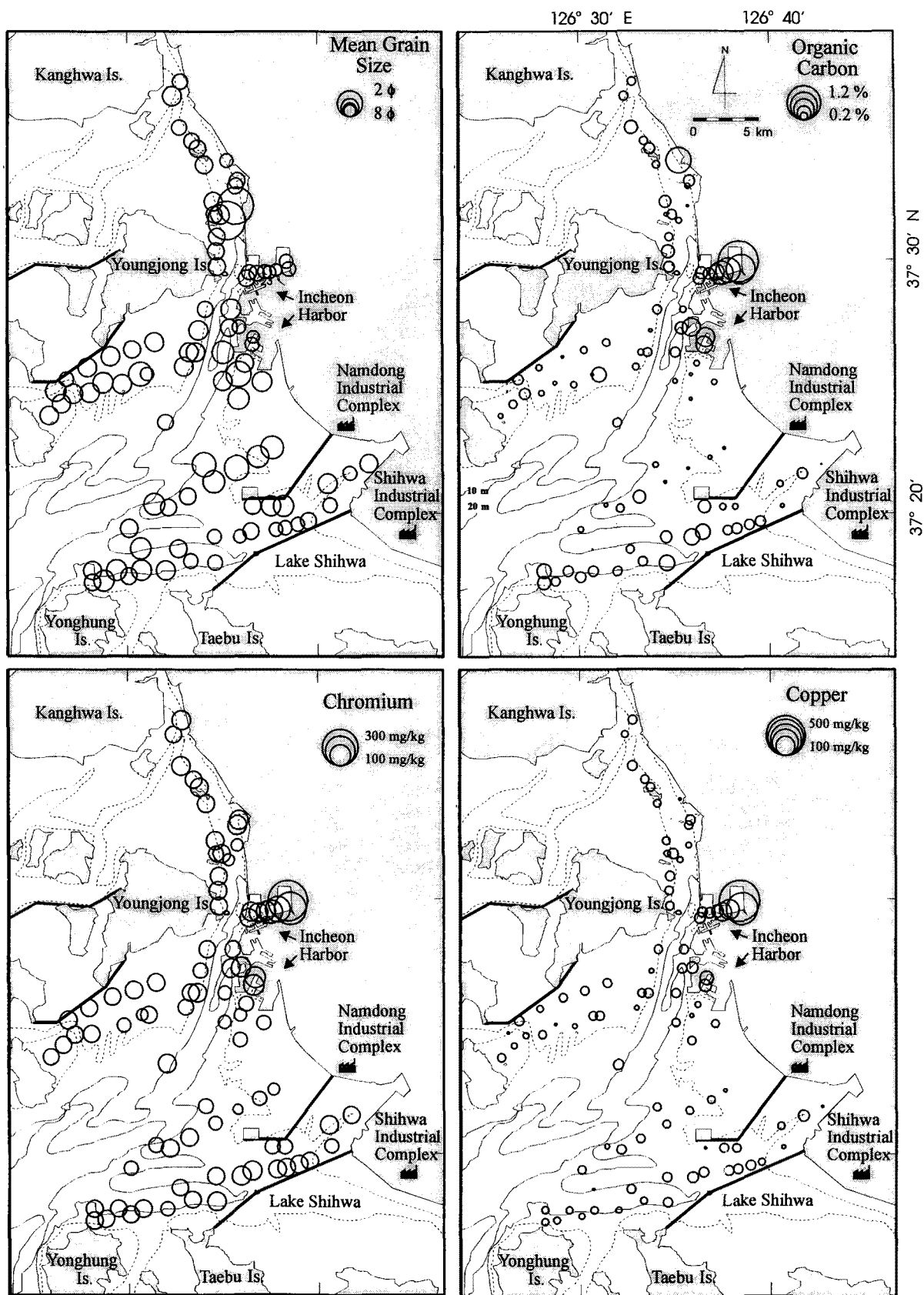


Fig. 2. Spatial distributions of mean grain size (ϕ), organic carbon content (% sediment dry weight), chromium and copper concentrations (mg/kg) in Kyeonggi Bay.

요가 있었다. 그러나, 각 금속 원소에 대해서 총 4 개의 표준물질 시료를 분석한 결과, 상대표준편차가 Cr(9.0%)과 Cu(6.3%)를 제외하면 모두 3% 이하의 값을 보였기 때문에, 앞의 회수율을 고려해서 모든 금속원소의 농도를 계산하였다.

결 과

표층 퇴적물의 평균입도는 0.3~7.7 φ(평균 4.4±1.4 φ)의 범위를 보였다(Table 1). 평균입도가 모래(4 φ 이하)에 해당되는 정점들로는 강화수로(정점 2, 10, 12~14)와 인천항부근 수로(정점 26, 29), 송도 갯벌(정점 32~36, 57~61), 영종도 남쪽의 갯벌(정점 38~42, 44, 46~50, 52~55), 소래포구(정점 62, 64, 68, 69), 경기만 주수로(정점 78), 그리고 대부도와 영종도 사이의 수로(정점 83, 85, 89) 등에 위치한 정점들이었다. 평균입도가 니토(4~8 φ)에 해당되는 정점들은 강화수로 가장자리, 인천항부근 그리고 시화방조제 부근 정점이었다(Fig. 2).

표층 퇴적물의 퇴적상은 역질 모래(gravelly sand), 모래(sand), 실트질 모래(silty sand), 사질 실트(sandy silt), 실트(silt)가 주종을 이루었고, 일부 니질 모래(muddy sand), 사질 니토(sandy

mud) 그리고 니토(mud)도 나타났다(Table 1). 경기만 주수로 해역은 주로 실트질 모래였고, 강화수로 부근의 일부 수심이 깊고 조류가 강한 곳에서는 역질 모래와 모래가 우세하였다. 송도 갯벌에서는 평균 3 φ 정도의 세립질 모래가 우세하였다. 영종도 갯벌은 주로 실트질 모래였지만 신공항방조제 부근에서는 모래 또는 실트 등이 확인되었다. 경기만 남쪽의 조하대 지역은 수심이 깊은 일부 정점들에서 역질 모래가 나타났지만, 전체적으로 시화방조제에 가까울수록 실트질 모래에서 사질 실트와 실트로 세립해짐을 알 수 있었다. 항만의 경우 항만 입구가 상대적으로 넓은 인천북항에서는 주로 사질 실트가 우세하였고, 항만 입구가 상대적으로 협소한 인천항에서는 보다 세립한 실트나 니토가 우세하였다.

퇴적물 내 유기탄소 함량(0.1~1.2%)의 공간적 분포는 평균입도와 유사한 분포경향을 보였다(Fig. 2). 유기탄소 함량은 인천북항의 가장 안쪽에 위치한 정점 18(1.2%)에서 가장 높았고, 다음으로 강화수로 가장자리에 위치한 김포매립지 부근(정점 7)과 인천항, 그리고 시화방조제 부근 정점들에서 0.4% 이상으로 상대적으로 높게 나타났다. 반면에 강화수로, 영종도 갯벌과 송도 갯벌에 위치한 정점들, 그리고 경기만 주수로 해역 등에서는

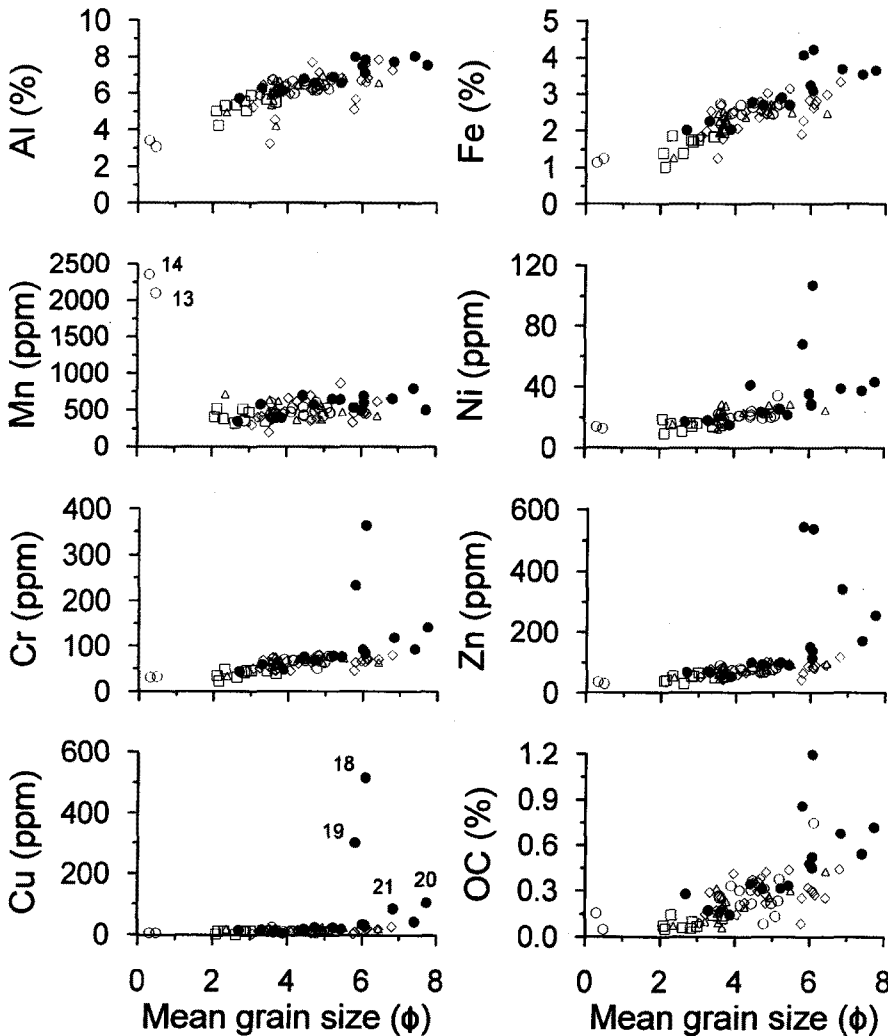


Fig. 3. Metal concentrations (Al, Fe, Mn, V, Co, Ni, Cr, Zn, and Cu) and organic carbon content (% sediment dry weight) vs. mean grain size (φ) in surface sediment from Kyeonggi Bay: ○=Kanghai suro, ●=Incheon Harbor, △=Songdo intertidal flat, □=Youngjongdo intertidal flat, ◇=outside of Lake Shihwa.

0.4% 이하의 낮은 값을 보였다. 유기탄소 함량과 퇴적물의 평균입도 간에는 유의한 상관성을 보였다($r=0.66$; Fig 3). 다만 인천북항에 위치한 정점들(정점 18~22)에서는 비슷한 평균입도를 보이는 다른 정점들에 비해 유기탄소 함량이 상대적으로 높았다.

각 원소별 중금속 함량은 Al의 경우 3.1~8.0%(평균±표준편차: 6.2 ± 1.0), Fe는 1.0~4.2%(2.4 ± 0.6), Mn은 199~2365 mg/kg(532 ± 293), V은 33~122 mg/kg(80 ± 18), Co는 6~22 mg/kg(14 ± 3), Ni은 10~107 mg/kg(25 ± 12), Cr은 24~363 mg/kg(70 ± 41), Cu는 2~515 mg/kg(25 ± 64), 그리고 Zn은 31~544 mg/kg(92 ± 82)이었다(Table 1). 중금속 농도의 변화폭이 가장 큰 원소는 Cu(표준편차/평균=2.52)이었고, Zn(0.90), Cr(0.59), Mn(0.55), Ni(0.51) 순으로 변화폭이 작아졌다. 중금속 원소의 함량은 대체로 인천항이 가장 높았고, 그 다음으로는 시화방조제 주변, 강화수로, 송도 조간대, 영종도 조간대 순이었다. 특히 Cr과 Cu는 인천북항에서 다른 해역에 비해서 평균 수 배에서 수십 배 이상의 높은 농도를 보였다(Fig. 2). Mn은 예외적으로 강화수로에서 가장 높은 값을 보였다.

평균입도와 각 원소별 중금속 함량은 원소간에 다소 차이는 있지만 밀접한 상관성을 보였다(Fig 3). Al과 Fe의 농도는 퇴적물입자가 세립해질수록 증가하였다(Al: $r=0.77$; Fe: $r=0.81$). 반면 Mn은 강화수로에 위치한 김포 쓰레기매립지 주변의 두 정점(정점 13, 14)에서 2000 mg/kg 이상의 높은 값을 보였고, 나머지 정점들에서는 퇴적물입자가 세립해질수록 증가하는 경향을 보였다($r=0.40$). Ni($r=0.51$), Cr($r=0.49$), Cu($r=0.49$) 그리고

Zn($r=0.31$) 등도 전반적으로 입도의존적 분포를 보였지만 인천북항 안쪽에 위치한 정점들(정점 18, 19, 20, 21)에서 평균입도가 비슷한 다른 정점들에 비해 상대적으로 높은 값을 보였다.

중금속 함량은 유기탄소 함량과도 밀접한 상관성을 보였다(Al: $r=0.65$; Fe: $r=0.85$; Mn: $r=0.37$; V: $r=0.71$; Co: $r=0.63$; Ni: $r=0.86$; Cr: $r=0.87$; Cu: $r=0.77$; Zn: $r=0.86$). 더우기 중금속 원소들 중 Fe, Ni, Cr, Zn, Cu 등은 퇴적물의 입도보다 유기물 함량과 상관성이 더 높게 나타났다. 특히 항만지역의 정점들에서 거의 모든 중금속 원소들의 함량이 유기탄소 함량이 높아 질수록 뚜렷하게 증가하였다. 이러한 결과는 이들 중금속 원소들이 상당부분 유기물과 결합된 형태로 존재할 가능성을 지시한다.

유기탄소 함량 자체가 입도에 대한 의존성을 보이기 때문에 입도에 의한 영향을 보정할 필요가 있다. 이를 위해 Al 함량을 기준으로 평균세일에 대한 각 중금속 원소의 농축비(enrichment factor; $EF_{shale} = (M/Al)_{sample} / (M/Al)_{shale}$)를 유기탄소 함량에 대해 도시해 보았다(Fig. 4). Fe과 Mn은 유기탄소 함량에 따라서 거의 변하지 않았고, 정점 13, 14의 Mn을 제외하면 두 원소 모두 농축비가 1에 가까운 값을 보였다. Fe의 경우 인천항에 위치한 정점들에서 유기탄소 함량이 증가할수록 농축비가 증가하는 경향이 나타났다($r=0.77$). 반면 Ni, Cr, Zn, Cu는 유기탄소 함량이 0.6% 이상인 인천북항에 위치한 정점들(정점 18, 19, 20, 21)에서 유기탄소 함량이 증가할수록 같이 증가하는 경향을 보였다. Ni의 농축비는 최대 1.5인 반면 Cr, Zn, Cu는 각각 최대 4, 7, 12로 높은 농축비를 보였다.

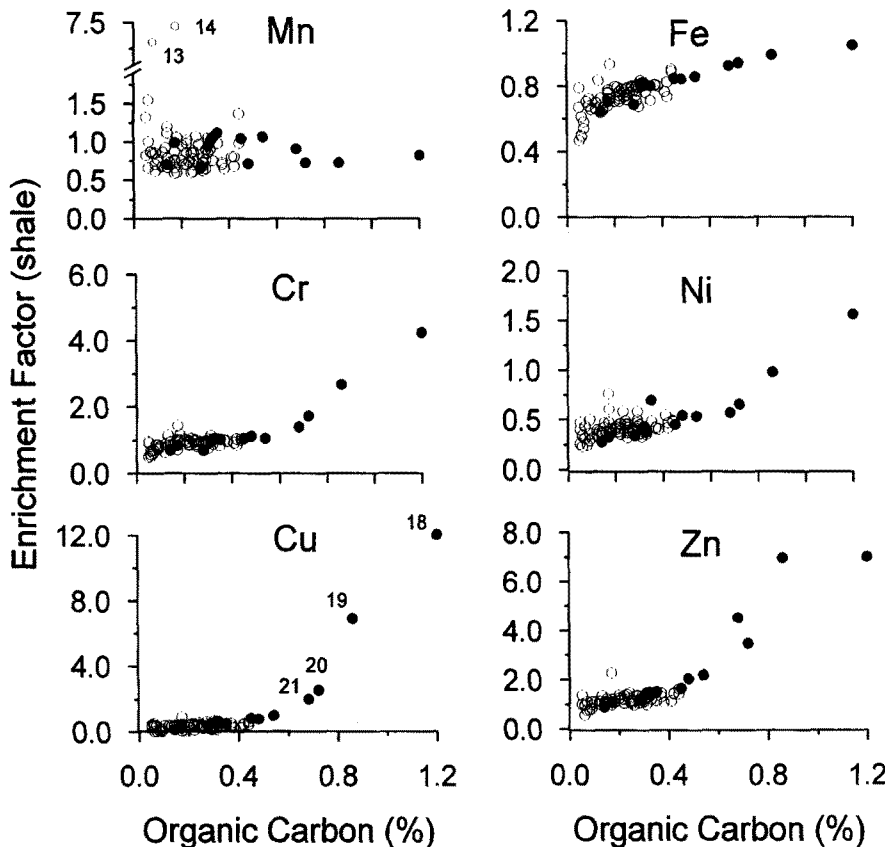


Fig. 4. Enrichment Factor (shale) of Fe, Mn, Ni, Cr, Zn, and Cu vs. organic carbon content (% sediment dry weight) in surface sediment from the Kyeonggi Bay: ○=Kyeonggi Bay except Incheon Harbor, ●=Incheon Harbor.

토 의

본 연구를 통해서 지난 15년간 경기만 일대 저서환경교란의 여러 징후들을 확인할 수 있었다. 우선 영종도 조간대에서는 Lee *et al.*(1992)의 결과와 비교해 볼 때, 전반적으로 사질 실트에서 실트질 모래로 조립화 되었고 곳에 따라 모래와 실트 퇴적상이 불규칙하게 나타났다. 시화방조제 인근 해역은 방조제 공사 이전에는 사질 실트가 넓게 자리잡고 있었지만, 본 연구 결과에서는 실트질 모래에서 사질 실트, 그리고 실트 등의 퇴적상이 연속해서 나타나는 등 방조제 쪽으로 세립화하는 경향이 뚜렷하였다. 이러한 변화는 신공항건설과 시화호조성 등을 위한 방조제 및 준설공사에 의한 영향으로 판단된다. 이들 해역에서의 퇴적물 내 유기탄소와 중금속 함량은 입도의존적인 분포 특성을 보이는 것으로 보아 아직까지는 자연적인 상태와 크게 다르지 않다고 여겨진다. 반면, 기존에 조사가 미흡했던 인천북항에서는 유기물과 함께 Cr, Cu, Zn, Ni 등이 인위적으로 축적된 징후가 확인되었다(Figs. 3, 4).

유기탄소 함량은 Lee *et al.*(1992)의 결과에서는 0.08~1.24% (평균 0.55%) 수준으로 비교적 낮은 편이었고, 이는 현재까지도 거의 변동이 없는 것으로 나타났다(Table 1; Fig. 2). Lee *et al.*(1992)에 의하면 중금속 함량 또한 사강 조간대와 반월 조간대를 제외한 나머지 경기만 일대에서는 자연적인 수준이었다(Mn: 455 mg/kg, Zn: 167 mg/kg, Cu: 12 mg/kg, Ni: 26 mg/kg, Co: 7 mg/kg). 반면에 반월 조간대에서는 경기만에 비해서 Mn은 비슷한 수준이었고, Zn, Cu, Ni 등이 약 2 배 정도 그리고 Co는 약 10 배 정도 높았다. 본 연구결과는 인천북항을 제외한 대부분의 경기만에서 예전에 비해 Mn(524 mg/kg)과 Co(14 mg/kg)가 증가하였고, Cu(13 mg/kg)와 Ni(22 mg/kg)는 거의 비슷한 수준이었으며, Zn(74 mg/kg)은 감소하였다. 인천북항에서는 나머지 경기만에 비해서 Mn(603 mg/kg)은 비슷한 수준이었고, Co(22 mg/kg), Ni(45 mg/kg)은 2 배 정도, Zn(260 mg/kg)과 Cu(138 mg/kg)는 약 10 배 정도 높았다.

퇴적물 내의 유기탄소와 중금속 원소들의 분포를 조절하는 요인들을 추정하기 위하여 각 중금속 원소들과 퇴적물의 평균 입도 그리고 유기탄소 함량 등 총 8 개의 변수들에 대해서 R모드 요인분석(R-mode factor analysis)을 실시하였다. 각 변수들은 제곱근 변환을 한 후 각 요인(factor)에 대한 각 변수의 상대적인 기여도를 균일하게 하기 위해서 z 점수($z=(x-\mu)/\sigma$)를 이용하여 정규화시킨 후 자료분석에 이용하였다. 분석 결과 총 3 개의 요인이 자료의 총분산에 대해 91.8%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다(Table 2).

요인 1은 72.6%의 설명력을 보였는데 유기탄소와 함께 Cu, Zn, Cr 그리고 Ni 등이 높은 적재량(factor loading)을 보였다($0.66 < r < 0.95$). 이들 중금속 원소들 중 Cu, Zn, Ni은 일반 해양환경에서 주로 유기물과 친화성이 높은 원소들로 알려져 있다. 11.9%의 설명력을 보인 요인 2는 평균입도를 비롯해서 Fe, Al 등이 중요한 변수들로 나타났다($0.75 < r < 0.89$). 이들 변수들은 쇄설성 점토광물 기원의 원소들과 주로 관련이 있다. 유기탄소의 경우 요인 1($r=0.67$)과 함께 요인 2($r=0.63$)에서도 높은 적재량을 보이고 있다. 이러한 결과는 Fig. 3에서도 나타나듯

Table 2. R-mode factor analysis by varimax rotation method, Data was normalized using mean and standard deviation of each variable, which transformed by square root. Among the data of Mn, those of two stations above 2000 mg/kg were excluded

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Communality
Copper	0.95	0.18	0.15	0.96
Zinc	0.90	0.36	0.16	0.95
Chromium	0.88	0.41	0.10	0.96
Nikel	0.83	0.43	0.15	0.90
Organic carbon	0.67	0.63	0.12	0.86
Mean grain size	0.26	0.89	0.11	0.87
Iron	0.51	0.78	0.27	0.95
Aluminium	0.35	0.76	0.38	0.84
Manganese	0.15	0.24	0.95	0.98
Eigenvalue	6.53	1.10	0.65	
% of variance	72.6	11.9	7.2	
Cumulative % of variance	72.6	84.6	91.8	

이, 해역에 따라서 유기물의 분포특성이 입도의존적인 경우와 그렇지 않은 경우로 대별되는 현상과 관련이 있는 것으로 보인다. Fe의 경우도 마찬가지로 요인 2와 함께 요인 1($r=0.51$)에서도 다소 높은 적재량을 보이는 것은 인천북항 내의 정점 18, 19에서의 높은 함량(Fig. 3) 그리고 유기물 함량과 일정한 상관성(Fig. 4)의 결과로 여겨진다. 요인 3에서는 Mn만이 높은 적재량을 보였다($r=0.95$). 김포매립지 부근의 정점 13, 14를 제외한 자료를 이용해서 얻어진 결과임을 고려할 때, 경기만에서의 Mn의 분포특성은 다른 중금속들과는 달리 상대적으로 독립적인 지화학적 요인에 의해서 조절되는 것으로 사료된다.

본 연구와 동시에 진행되었던 Kim *et al.*(1998)의 연구에 따르면, 단단계 추출방법을 이용해서 각 존재형태(speciation)별로 중금속 농도를 분석한 결과 Mn 함량이 2000 mg/kg 이상인 두 정점에서 Mn의 상당한 부분(최고 87.9%)이 CaCO₃ fraction과 결합되어 있는 것으로 나타났다. 이러한 Mn의 분포특성은 경기만의 특징적인 현상으로 좀 더 자세한 연구가 필요한 부분이다.

Fig. 4에 나타나는 유기물에 의한 중금속 분포의 조절은, 우선 유기물의 표면적이 상대적으로 넓고, 대부분의 금속원소들과 높은 결합력을 갖기 때문으로 생각된다. 일반적으로 유기물에 의한 중금속 분포의 조절작용은 유기물 분해과정에 수반되는 퇴적물의 초기속성과정으로서 이해되고 있다(Sawlan and Murray, 1983). 즉 퇴적물 내에서 유기물이 분해되면서 산소가 소모되어 환원상태가 형성됨에 따라서 입자상으로 존재하던 중금속 원소들이 공극수 내로 용출된다. 그 결과 일반적으로 Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, V, U, Mo 등의 중금속 원소들이 표층 부근의 산화환원 경계층까지 확산되다가 재산화되어 퇴적물 내에 입자상으로 침전된다(Chester, 1990). 이러한 과정에서 철-망간 산화물(Fe-Mn oxides)은 용존 미량 중금속 원소들을 흡착함으로써 공극수로부터 중금속 원소들을 제거하는 역할(scavenger)을 한다. 특히 염하구에서는 철 산화물과 수산화물의 흡착(flocculation)과 유기물-금속 착화합물(organic matter-metal complex)이 중금

속 분포에 중요한 영향을 끼친다(Moore *et al.*, 1979; Tanizaki *et al.*, 1992).

본 연구의 결과는 Ni, Cr, Zn, Cu의 경우 유기탄소 함량이 높아질수록 농축비가 증가하였고(Fig. 4), 나머지 Fe, Mn은 유기탄소 함량의 변화에 거의 영향을 받지 않았다. 이러한 결과는 유기물 축적에 의한 퇴적물의 초기속성작용과 관련된 농축현상(diagenetic spike signal)이라기 보다는 Ni, Cr, Zn, Cu 그리고 유기물 등이 인천북항 인근에 공통 오염원을 갖고 있을 가능성을 지지한다. 인천북항 인근에 위치한 제지, 목재, 금속, 기계, 제철 공장 등에서 배출된 산업폐수가 공통 오염원일 가능성이 크다. 따라서, 본 연구 결과는 Cu와 Cr가 인근 가좌천을 통해서 인천북항으로 유입될 가능성을 제시한 인하대해양과학기술연구소(1993)의 연구와 일치한다.

결 론

경기만 일대 표층 퇴적물 내 유기물 및 중금속의 분포특성과 조절요인에 대한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 경기만 일대 조간대 및 조하대에서는 지난 15년 동안에 퇴적환경의 급격한 변화가 있었다. 영종도 조간대는 사질 실트(sandy silt)에서 실트질 모래(silty sand)로 조립화되었고, 곳에 따라 사질이나 실트질 퇴적상으로 불규칙하게 변화했다. 시화방조제 부근에서는 방조제쪽으로 퇴적물이 세립화되는 경향이 뚜렷하였다.
2. 중금속 원소들 중 Al, Fe, V, Co 등의 분포는 쇄설성 기원의 광물에 의해 조절되고 있고, Cu, Zn, Cr, Ni 등의 분포는 유기물 함량과 관련이 깊었다. Mn의 경우는 이와 독립적인 지화학적 요인에 의해서 조절되고 있는 것으로 나타났다.
3. 인천북항 지역에서는 Cu, Zn, Cr, Ni 등의 분포가 유기물에 의해 주로 조절되는데, 이는 이들 중금속들이 유기물과 결합된 형태로 존재할 가능성을 시사한다. 인천북항 주위 공단폐수가 공통의 오염원으로 작용한 것으로 추정된다.

사 사

본 연구는 과학기술처의 'G7 프로젝트: 저서환경 건강성 평가 기법 개발(code no. 95-9412)'의 연구비 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

국립환경연구원, 1996. 해양오염감시망 구축 및 오염실태 변화에 관한 연구 III. 제 1단계 최종보고서. 환경부, 과학기술처, 9-4-1, 343 pp.

유홍룡, 한상준, 홍기훈, 이희준, 신동혁, 안충현, 이경국, 윤호일, 제종길, 지상범, 석봉출, 홍재상, 1989. 한국 서·남해연안 조간대의 종합 조사연구 (I). 한국해양연구소, BSPG 00073-227-5, 239 pp.

이석우, 1972. 인천항의 조성, 조류 및 조량에 대하여. 한국해양학회지, 7: 86-97.

인하대해양과학기술연구소, 1993. 연안 해역 오염도 조사. 인천 지역의 수질보전대책 수립을 위한 실태조사용역보고서. 인천시, 520 pp.

정경호, 박용철, 1988. 서해 경기만의 기초생산력 및 질소계 영양염의 재생산에 관한 연구. 한국해양학회지, 23: 194-206.

한국해양연구소, 1995. 해양저서생물상에 의한 환경평가. 제 1단계 최종보고서. 환경부, 과학기술처, 9-4-1, 339 pp.

Chester, R., 1990. Marine Geochemistry. Unwin Hyman, London, 698 pp.

Choi, J.G. and J.H. Shim, 1986. The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. III. Phytoplankton composition, standing crops, Tycho pelagic plankton. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 21: 156-170.

Choi, J.G. and J.H. Shim, 1988. The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. IV. The successional mechanism and the structure of the phytoplankton community. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 23: 1-12.

Folk, R.L., 1954. The distribution between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. *J. Geol.*, 62: 334-359.

Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brazos river bar, a study in the significance of grain size parameters. *J. Sed. Petrol.*, 27: 3-26.

Jackson, M.L., 1967. Soil Chemical Analysis. Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, 485 pp.

Kim, B.S., C.B. Lee and C.H. Koh, 1988. Speciation of heavy metals in surface sediments of Kyeonggi Bay. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, (Submitted).

Kitano, Y. and R. Hujiyoshi, 1980. Selective chemical leaching of cadmium, copper, manganese and iron in marine sediments. *Geochem. J.*, 14: 113-122.

Lee, J.H. and C.H. Koh, 1998. Soft bottom fauna in a saline lake stressed by industrial discharges on the west coast of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, (submitted).

Lee, C.B., H.R. Yoo and K.S. Park, 1992. Distribution and properties of intertidal surface sediments of Kyeonggi Bay, west coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 27: 277-289.

Moore, R.M., J.D. Burton, P.J. LeB. Williams and M.L. Young, 1979. The behavior of dissolved organic material, iron and manganese in estuarine mixing. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43: 919-926.

Sawlan, J.J. and J.W. Murray, 1983. Trace metal remobilization in the interstitial waters of red clay and hemipelagic marine sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 64: 213-230.

Shin, H.C., J.W. Choi and C.H. Koh, 1989. Faunal assemblages of benthic macrofauna in the inter- and subtidal region of the inner Kyeonggi Bay, west coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 24: 184-193.

Tanizake, Y., T. Shimokawa and M. Nakamura, 1992. Physico-chemical speciation of trace elements in river waters by size fraction. *Environ. Sci. Tech.*, 26: 1433-1457.

Yoo, J.W. and J.S. Hong, 1996. Community structures of the benthic macrofaunal assemblages in Kyeonggi Bay and Han Estuary, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 31: 7-18.

1997년 9월 13일 원고 접수

1998년 7월 20일 수정본 채택