

한국 동해안 영일만 표층 퇴적물의 금속 함량과 공간 변화 특성

엄인권¹ · 임동일^{2,*} · 이미경² · 전수경² · 정희수²

¹한국해양연구원 극지연구본부, ²한국해양연구원 지구환경연구본부

Spatial Variability and Contents of Metals in the Surficial Sediments of Youngil Bay, East Coast of Korea

I. K. Um¹ · D. I. Lim^{2,*} · M. K. Lee² · S. K. Jeon² · H. S. Jung²

¹Polar Research Lab. Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Global Environment Research Lab. Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract: Bottom sediments from Youngil Bay, East Coast of Korea, were analyzed for grain size composition as well as elemental compositions and total organic carbon (TOC) content in order to investigate the spatial variability and content of metal elements. Grain size distribution of the sediments seems to be controlled by anticlockwise current pattern with bottom topography of the study area. Spatial variability of TOC and all elemental contents reflects those of grain size, but an exception was found in the harbor area (Old-Port): their contents are high in the central part of the bay with the muddy sediment and decreases toward the sand-dominated coastal zone. However, contents of Ca, Sr, K are high in the sand-dominated coastal zone and contents of some heavy metals (Cd, Cu, Zn) are high in the Old-Port area and the mouth of Hyeongsan River. The correlation matrix and R-mode factor analyses reveal that four important factors controlling the distribution of metals in the bay are sediment grain size (or quartz dilution effect), the formation of sulfide minerals associated with decomposition of organic matters under anoxic geochemical environment, calcium carbonate (mainly shell fragments) and coarse-grained feldspar mineral. According to the metal content of labile fraction and CER (concentration enrichment ratio) value, high accumulation of some heavy metals in the harbor area seems to result not from the their anthropogenic input but from the diagenetic spike signal, that is, the accumulation of sulfide minerals formed by early diagenetic processes under anoxic environment.

Keywords: Elemental compositions, R-mode factor analysis, CER, sulfide minerals, Youngil Bay

요약: 한국 동해안 영일만 해역에서 퇴적물의 금속 함량과 공간 변화 특성을 연구하기 위해 총 27개의 표층 퇴적물을 채취하여, 입자조직, 유기탄소, 금속 원소들의 함량을 분석하였다. 연구해역에서 표층 퇴적물의 입도는 전반적으로 해안선 부근에서 조립하고 만의 중앙부에서 세립하며, 이러한 공간 변화는 해저지형과 반시계방향의 해류 패턴에 의한 것으로 해석된다. 유기탄소와 금속 원소들의 함량은 대부분 퇴적물의 입도 변화에 수반되어 니질 함량이 높은 만의 중앙부에서 높고 사질 함량이 높은 해안선 쪽으로 갈수록 낮아진다. 그러나 칼슘, 스트론튬, 칼륨의 함량은 조립한 퇴적물이 우세한 해안선 부근 퇴적물에서 높고, 몇몇 중금속(구리, 아연, 카드뮴) 함량 또한 유기물 함량이 매우 높은 구항과 형산강 입구의 퇴적물에서 높은 특징을 보인다. 상관관계 및 요인분석 결과에 의하면, 대부분의 금속 원소들의 함량과 공간 변화는 퇴적물의 입도에 의해 조절되는 것으로 보이나, 카드뮴, 구리, 아연, 주석 등은 퇴적층의 무산소 환경에서 일어나는 지화학적 메카니즘이 이들의 함량과 공간 변화를 조절하는 일차적인 요인으로 제시된다. 약산추출 부분(labile fraction)의 함량과 농축비(concentration enrichment ratio) 연구결과에 의하면, 중금속 원소들의 존재 형태가 대부분 "sulfide minerals"와 관련된 것으로써, 이들의 형성과 축적이 일부 연구해역에서 중금속 오염의 주원인으로 제시된다. 한편, 칼슘과 스트론튬 경우에는 퇴적물에 함유된 패각 함량에 의해, 그리고 칼륨은 사질 퇴적물에 우세한 장석

*Corresponding author: oceanlim@kordi.re.kr

Tel: 82-31-400-6192

Fax: 82-31-400-6288

(feldspar) 광물에 의해 조절되는 것으로 해석된다.

주요어: 금속함량, 요인분석, 농축(CER), 중금속오염, 영일만

서론

한반도 동해 남부에 위치한 영일만은 경북 포항시와 접하고 있으며, 크기가 작은 울산만을 제외하면 동해에서 유일한 만으로써 육지방향으로 길게 만입된 반폐쇄된 지형적 특성을 갖는다(Fig. 1). 만의 안쪽으로는 포항시를 배수하는 형산강이 유입되고 형산강 주변으로 포항제철과 배후 공업단지 그리고 여객선 터미널 등의 항만 시설들이 위치하고 있다. 영일만내 조석간만의 차는 미약하며, 만내의 해류는 대체로 북쪽에서 만 내부 남남서 방향으로 흐르고 다시 형산강 입구에서 장기갑을 향해 남남동 방향으로 흐른다. (수로국 보고서, 1971; 이 등, 1995). 영일만 입구의 외해역은 대마난류가 대한해협으로부터 북쪽으로 흐르며, 반대로 북한한류가 북쪽에서 남쪽으로 흐르고 있어 두 해류가 만나 혼합되는 지역이다(양 등, 1991; 나와 팽, 1992).

우리나라 10대 강으로 분류되는 형산강의 유입과 함께 세계 최대의 제철소 단지와 상업시설이 위치하고 있는 영일만은 오염에 의한 해양환경 변화가 예상되는 해역이다. 또한 반폐쇄된 연구해역은 파랑의 영향이 적고 해수의 순환이 느려 육상으로부터 공급되는 오염물질의 확산이 상대적으로 낮을 것으로 추정된다. 연구해역과 유사한 지형적 특성과 함께 대구

모 산업시설 및 배후 공업단지가 조성된 광양만, 마산만, 인천 북항 등에서는 퇴적물의 오염현상이 심각한 것으로 평가되고 있다. 특히 이들 해역에서 구리, 아연, 납은 그 오염 정도가 다른 해역과 비교하여 크게 높고 심각한 농축현상을 보이고 있다(이 등, 1998; 조 등, 2000; 진 등, 2000). 이러한 측면에서 영일만은 주변의 여러 오염원(형산강, 공업단지, 항구, 위락지역)으로부터 많은 유기물질과 함께 중금속 오염물질들이 유입될 가능성이 높아 시간이 지남에 따라 이들이 퇴적물 내로 축적될 것으로 예상된다. 따라서 영일만은 지속적인 오염 모니터링과 함께 체계적인 관리가 요구되는 해역이다. 더욱이 김 등(2001)과 강 등(2002)은 형산강을 통한 공장폐수 및 생활용수의 유입증가 등으로 인해 영일만 내 수질의 오염도가 가중되어 왔다고 보고한 바 있다. 영일만에 대한 기존의 연구는 퇴적물의 입도(박과 송, 1972), 용존 금속의 분포(곽, 1977), 다모류의 군집 변화(신 등, 1992), 해수유동의 구조 및 확산(이 등, 1995; 김 등, 2001) 등 주로 일반 해양 현황과 물리적 환경에 대한 연구가 있었을 뿐, 퇴적물의 오염특성에 대한 연구는 아직까지 보고 된 바 없다. 따라서 이번 연구에서는 영일만 표층 퇴적물의 금속 원소의 함량과 공간적 변화를 파악하고 그 원인을 밝히고자 한다.

연구방법

이번 연구를 위해 형산강 하구역과 구항(Old-Port)을 포함한 영일만 해역에서 총 27개의 표층 퇴적물 시료를 채취하였다(Fig. 1). 퇴적물의 입자조직은 회석된 과산화수소수와 염산을 이용하여 유기물과 탄산염을 제거한 후 4φ체를 이용하여 조립질과 세립질로 분리하였다. 조립질 퇴적물은 건조 후 건식 체질 방법으로, 그리고 세립질 퇴적물은 확산제를 첨가한 후 피펫방법으로 분석하였다(Folk, 1968). 분석한 시료는 1φ 간격으로 입도별 백분비를 구하여 Folk and Ward(1957)가 제시한 도표계산법에 따라 입도 조직 상수를 계산하였다. 퇴적물의 총 탄소 함량은 분말화된 시료를 주석 캡슐에 넣어 CHN-분석기(CE Instrument; Flash-1120)를 이용하여 측정하였으며, 무

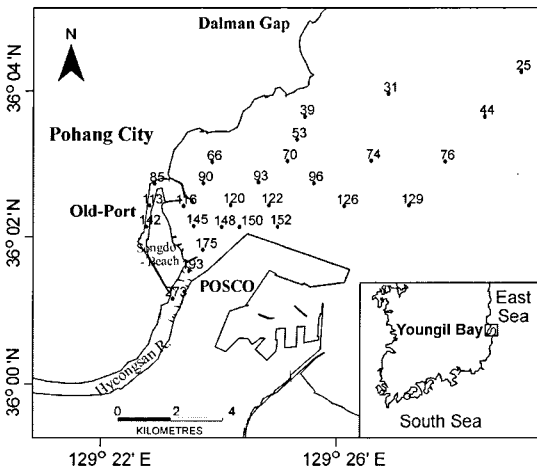


Fig. 1. Map showing the study area and the sampling sites.

기탄소 함량은 시료에 아황산(sulfurous acid)을 첨가하여 유기탄소를 제거한 후 같은 방법으로 측정하였다. 유기탄소 함량은 총 탄소의 함량에서 무기탄소 함량을 뺀 값으로 하였다. 자료의 정확도를 검증하기 위해 설파닐아미드(sulfanilamide) 표준시료(SRM)가 사용되었다.

퇴적물의 금속 농도는 테프론용기에 분말화된 퇴적물시료 0.2 g과 함께 질산과 과염소산을 3:1로 혼합한 산 5 ml 넣어 가열한 후 유기물을 완전히 산화시켰다. 건조시킨 시료는 불산과 과염소산을 4:1로 혼합한 산을 5 ml 넣고 가열하여 완전히 녹였다. 이 시료에 과염소산 1 ml, 붕산 4 ml, 과염소산 1 ml를 순차적으로 넣고 건조시킨 후 1 N 질산 20 ml를 넣어 가열판에서 10분 동안 반응시켜 액체상태가 되도록 처리하였다(Tessier *et al.*, 1979). 전처리된 시료들에 대한 금속 원소의 정량은 기초과학지원연구원의 유도 결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS; VG PlasmaQuad ICP-MS)를 이용하여 측정하였으며, 분석값의 신뢰도를 구하기 위해 표준시료 MAG-1(USGS)을 사용하였다. 그 결과 금속 원소의 회수율은 크롬과 스트론튬이 각각 82%와 84%로 낮고, 카드뮴, 구리, 납이 각각 115%, 108%, 114%로 다소 높았으며, 나머지 원소들의 회수율은 88~99% 범위로 양호하였다.

한편 이번 연구에서는 Fang and Hong(1999) 방법에 따라 1N 염산으로 추출되는 함량을 약산추출 부분(광물비격자 부분 또는 labile fraction)으로 정의하였으며, 원소별 함량은 분말화된 시료 0.4g에 1N 염산 20ml를 넣고 50°C에서 6시간동안 100rpm의 속도로 흔들면서 중탕한 후 원심 분리하여 상등액을 총 농도와 같은 방법으로 분석하였다. 이러한 약산추출 부분의 함량은 연구해역에서의 금속 원소들의 존재 형태와 오염 여부를 판단하는데 부가적인 자료로 이용하였다.

결과 및 토의

퇴적물 조직

연구해역의 표층 퇴적물은 전체 시료의 61%가 4φ보다 조립한 입도에 해당되며, 4φ보다 세립한 입도는 39%를 차지하여 전반적으로 조립한 퇴적물이 우세하였다. 퇴적물의 평균입도는 1.6~6.8φ 범위로 공간적으로 넓은 변화 폭을 보인다(Table 1, Fig. 2). 모래의

함량은 2~97%(평균 54%) 범위이며, 실트와 점토의 함량은 각각 1~61%(평균 25%)와 0~52%(평균 21%) 범위이다(Table 1). 퇴적물의 입도조직을 Folk(1968)의 삼각도표에 도시하면, 표층 퇴적물은 크게 사질 퇴적상, 니질사 퇴적상, 사질니 퇴적상, 니질 퇴적상 등 4개의 퇴적상으로 구분되며 가장 조립한 사질 퇴적상은 형산강 하구역, 송도해빈 및 구항을 따라 만의 북쪽 가장자리에 분포한다(Fig. 2). 모래의 함량이 20~50%인 사니질 퇴적상은 만의 중앙부에 우세하게 발달하며, 모래의 함량이 10% 미만인 세립한 니질 퇴적상은 만의 중앙에 분포하여 지역적으로 뚜렷한 입도 변화를 보인다. 평균입도 또한 만의 중앙에서 6φ 내외로 세립하나 해안선으로 갈수록 2φ 미만으로 조립해지는 경향을 보인다.

이러한 표층 퇴적물 입도의 분포 변화는 영일만 해역 내의 전반적인 해류 패턴과 세기 그리고 하천 수 유입에 의해 조절되는 것으로 해석된다. 영일만의 해류는 만 북서쪽의 달만갑(Dalman Gap)에서 시작하여 해안을 따라 만의 안쪽으로 흐르며, 다시 형산강의 흐름과 합류하여 만의 남동측 해안을 따라 외해로 흘러가는 반시계방향의 환류대를 형성하고 있다(이 등, 1995; 김 등, 2001). 연구해역의 달만갑에서 시작하여 해안선을 따라 만의 내부로 흐르는 해류는 유속이 강하고 수심이 얕아 사질 입자의 퇴적이 우세하나, 세립 퇴적물은 수심이 깊고 해류의 세기가 약해지는 만의 중앙부로 이동되어 퇴적되는 것으로 보인다(박과 송, 1972). 이러한 해석은 퇴적물의 공간 분포 형태가 연구지역의 수심 변화와 밀접한 관련이 있음을 보여주는데, 수심이 낮은 곳에는 사질퇴적물이 우세하고 상대적으로 수심이 깊은 만의 중앙부에는 니질 퇴적물이 우세하게 분포하는 것을 의미한다. 또한 연구해역에서는 많은 양의 부유 퇴적물을 함유한 형산강의 유입수가 만의 중앙까지 이어지고, 동시에 이 곳의 해류의 속도는 느려서 만의 중앙부에 니질 퇴적상이 형성되는 것으로 해석된다. 한편 기존 자료(박과 송, 1972)와 비교하면, 형산강 하구역에 존재하는 니질 퇴적상은 1972년 이후에 새로 형성된 것으로 판단되는데, 이는 최근에 형산강 하류에서 이루어진 대규모의 모래채취와 송도백사장 주변의 방사제, 포항제철 투기장 건설 등의 인위적 개발에 따른 만내 해류의 유동변동 등이 그 원인으로 제시되나, 향후 세밀한 퇴적학적 연구가 요구된다.

Table 1. Elemental composition, grain size, and TOC of 27 surficial sediments from Yeongil Bay, East Coast of Korea

St. No.	Al (%)		Fe (%)		Ca (%)		K (%)		Cr (ppm)		Zn (ppm)		Cu (ppm)		Cd (ppm)		Sn (ppm)		Pb (ppm)		Sr (ppm)		Li (ppm)		Sand %		Silt %		Clay %		Mz phi		TOC %		
	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	Total	Labile	%	%	%	%	%	%	%	%	%
25	3.1	0.07	0.77	0.33	0.46	0.13	1.87	0.01	15.5	3.1	35	19	6.8	1.4	0.17	0.05	2.30	1.74	26.4	6.5	106	8	12.6	2.6	96.9	1.3	1.8	2.21	0.05						
31	4.1	0.15	1.18	0.50	2.00	1.75	1.96	0.04	18.1	3.9	41	29	8.3	3.0	0.13	0.11	2.00	1.79	24.2	11.7	220	117	16.8	4.3	85.7	7.5	6.8	2.52	0.29						
39	4.8	0.14	1.65	0.56	4.16	3.81	2.04	0.03	16.0	3.1	46	30	8.8	2.1	0.15	0.10	2.39	1.80	25.2	14.0	378	258	16.9	4.2	88.7	6.9	2.5	2.95	0.14						
44	6.9	0.62	3.00	1.32	0.96	0.66	1.93	0.16	42.4	10.0	153	122	32.2	21.3	0.54	0.52	4.42	2.59	49.1	38.8	162	54	41.1	11.8	13.3	44.8	41.9	5.90	1.24						
53	4.9	0.19	1.77	0.69	2.54	2.12	2.16	0.04	19.2	4.0	55	38	8.9	3.0	0.18	0.15	2.24	1.81	23.0	15.1	268	147	20.2	5.3	78.4	14.7	6.6	3.37	0.14						
66	5.6	0.17	1.88	0.74	1.94	1.44	2.34	0.04	18.3	4.0	65	48	8.6	2.8	0.15	0.14	2.22	1.94	24.8	17.0	246	101	19.1	5.0	88.7	7.5	3.8	2.87	0.16						
70	4.9	0.17	2.02	0.65	3.22	2.70	2.00	0.03	23.7	3.9	50	34	9.3	2.8	0.12	0.12	2.56	1.87	22.5	12.2	328	186	17.0	4.7	90.2	5.3	4.5	2.75	0.13						
74	6.6	0.45	2.84	1.08	1.44	1.04	1.90	0.13	36.6	7.5	118	88	26.6	14.1	0.39	0.35	3.96	2.18	46.6	33.3	206	78	35.3	9.3	12.0	56.5	31.5	5.59	1.08						
76	6.8	0.49	3.04	1.23	1.03	0.66	1.85	0.14	40.8	8.6	132	104	29.2	16.5	0.50	0.45	4.12	2.44	45.8	37.3	168	50	39.3	10.3	5.3	58.1	36.6	6.13	1.22						
85	6.0	0.76	2.78	1.46	1.26	1.18	1.60	0.18	44.7	10.8	353	340	94.5	84.2	4.50	4.44	4.89	3.39	49.8	38.9	162	98	49.1	19.3	15.8	33.5	50.7	5.64	2.16						
90	5.6	0.19	1.97	0.85	2.10	1.64	2.32	0.05	18.8	4.2	72	60	13.2	3.2	0.29	0.17	4.49	2.04	41.8	21.3	254	110	19.2	5.4	89.0	6.6	4.4	2.81	0.18						
93	5.8	0.24	2.22	0.70	1.83	1.07	2.04	0.07	23.1	4.5	69	50	16.3	5.2	0.26	0.21	4.13	1.95	33.9	27.7	246	73	21.2	6.3	76.9	12.3	10.8	3.35	0.37						
96	6.1	0.30	2.30	0.85	1.96	1.37	2.04	0.10	25.7	5.6	78	60	19.0	8.8	0.24	0.19	3.80	2.00	34.5	20.4	254	95	25.3	7.6	48.2	33.6	18.2	3.87	0.45						
113	5.5	0.48	2.14	1.03	1.69	1.50	1.90	0.10	29.6	9.0	361	305	192.1	136.4	3.15	3.14	8.48	3.96	51.5	36.4	200	109	36.8	13.8	48.3	17.3	34.3	3.79	1.24						
116	6.4	0.41	2.78	1.14	1.65	1.30	1.97	0.11	33.0	7.6	145	134	23.9	17.2	0.48	0.47	3.46	2.52	34.6	31.1	218	95	32.5	8.7	27.4	39.2	33.4	4.77	1.18						
120	7.4	0.71	3.54	1.50	0.83	0.47	1.83	0.18	41.9	9.8	178	162	34.0	23.3	0.68	0.66	4.25	2.62	46.8	41.5	162	45	44.0	13.1	2.2	49.1	48.7	6.81	1.47						
122	6.4	0.35	2.46	0.93	1.32	0.76	2.04	0.08	25.8	6.7	164	76	15.5	8.5	0.23	0.21	2.86	2.47	30.4	23.4	212	55	26.7	7.7	50.6	32.7	16.7	3.85	0.62						
126	5.3	0.27	2.38	0.86	1.38	0.86	1.97	0.09	28.2	5.5	93	77	13.8	6.1	0.27	0.25	3.01	1.98	29.7	24.5	160	58	33.2	7.1	37.7	37.4	24.9	4.53	0.52						
129	6.6	0.36	2.82	0.94	1.07	0.60	1.91	0.11	34.3	6.2	107	81	18.9	9.7	0.33	0.31	3.26	1.97	38.5	29.2	176	44	33.3	8.5	4.1	61.2	34.7	5.96	1.00						
142	5.9	0.55	2.46	1.27	1.06	0.93	1.55	0.13	43.4	10.0	380	361	114.5	75.6	4.37	3.99	8.03	3.81	58.3	39.2	150	81	42.2	8.9	16.0	32.4	51.6	5.49	2.08						
145	5.3	0.17	1.76	0.73	1.96	1.53	2.18	0.03	14.7	3.8	64	56	7.6	3.0	0.15	0.13	2.38	1.91	22.9	16.3	246	101	17.2	4.9	89.3	7.2	3.5	2.95	0.10						
148	7.1	0.59	3.32	1.40	0.95	0.57	1.87	0.15	39.6	9.2	168	157	31.8	22.3	0.68	0.67	4.17	2.61	42.9	36.2	166	45	36.7	10.5	9.5	42.2	48.3	6.45	1.52						
150	2.3	0.19	1.27	0.52	0.57	0.47	2.46	0.03	10.9	3.2	46	34	7.3	2.3	0.12	0.06	2.03	1.92	15.9	9.2	98	30	15.1	4.5	96.4	2.0	1.6	2.53	0.07						
152	6.7	0.51	3.20	1.31	1.06	0.73	1.83	0.16	39.0	8.9	156	136	27.9	17.1	0.53	0.51	3.83	2.49	58.9	52.1	172	61	36.6	10.4	10.3	47.3	42.4	6.17	1.70						
175	5.8	0.45	2.18	1.37	1.64	0.71	2.12	0.17	20.5	8.7	277	225	40.0	31.5	1.38	1.31	3.25	2.98	25.0	23.7	236	63	19.2	8.7	84.3	10.7	5.0	2.94	0.21						
193	6.3	0.23	1.72	0.75	0.93	0.48	2.66	0.05	13.1	4.1	88	76	8.6	4.2	0.15	0.13	2.12	2.01	20.9	17.6	192	35	15.9	5.2	88.6	5.0	6.4	2.36	0.23						
273	5.6	0.19	1.52	0.51	0.75	0.19	2.52	0.04	11.4	3.5	74	65	8.7	4.5	0.17	0.17	2.16	1.96	20.1	13.3	160	14	14.8	4.0	90.1	3.2	5.2	1.57	0.25						
Min	2.3	0.07	0.77	0.33	0.46	0.13	1.55	0.01	10.9	3.1	35	19	6.8	1.4	0.12	0.05	2.00	1.74	15.9	6.5	98	8	12.6	2.6	2.2	1.3	1.6	1.6	0.05						
Max	7.4	0.76	3.54	1.50	4.16	3.81	2.66	0.18	44.7	10.8	380	361	192.1	136.4	4.50	4.44	8.48	3.96	58.9	52.1	378	258	49.1	19.3	96.9	61.2	51.6	6.8	2.16						
Ave.	5.7	0.35	2.26	0.93	1.55	1.14	2.03	0.09	27.0	6.2	132	110	30.6	19.6	0.75	0.70	3.59	2.32	35.0	25.5	205	82	27.3	7.8	53.5	25.0	21.4	4.1	0.73						

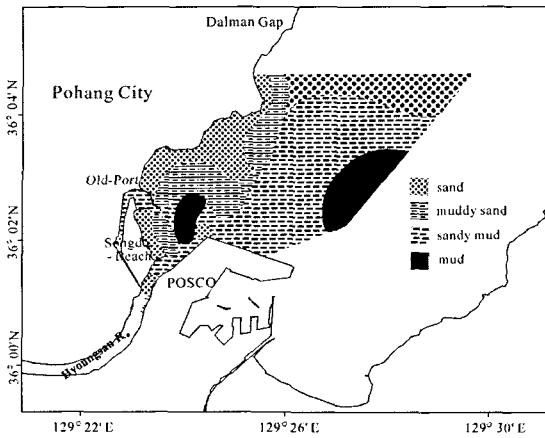


Fig. 2. Spatial distribution of sediment textural facies. Note that sedimentary textures coarsen toward coastal zone of study area.

유기탄소 함량

퇴적물의 유기탄소 함량은 0.1~2.2% 범위(평균 0.7%)이며(Table 1), 공간 분포는 퇴적물의 입도 변화와 잘 일치한다. 니질 함량이 높은 만의 중앙부와 형산강 하구역에서 유기탄소의 함량은 0.8% 이상으로 높고 해안으로 갈수록 감소하여 사질 퇴적물이 우세한 북쪽 해안선 부근의 해역에서는 0.4% 미만으로 낮다(Fig. 3). 퇴적물의 입도가 세립화함에 따라 유기물 함량의 증가는 일반적인 현상으로, 이번 분석결과에서도 퇴적물의 입자 크기와 유기탄소 함량 사이에 유의한 상관관계($r^2=0.88$)를 보인다(Fig. 4). 그러나 구항 지역의 정점 113, 85, 116, 142, 그리고 형산강 입구의 정점 273에서는 평균입도에 비해 유기탄소의 함량이 상대적으로 높은 특징을 보이는데(Fig. 3 and 4), 이는 유기물 함량에 영향을 미치는 입도 이외의 또 다른 요인이 내재되어 있음을 의미한다.

금속 원소들의 함량 변화와 원인

금속 원소의 함량 및 공간 변화: 연구해역에서 퇴적물 내 금속 원소들의 함량은 알루미늄 2.3~7.4%(평균 5.6%), 철 0.8~3.5%(평균 2.2%), 칼륨 1.6~2.7%(평균 2.0%), 칼슘 0.5~5.3%(평균 1.7%), 스트론튬 98~378ppm(평균 212ppm), 아연 35~380ppm(평균 132ppm), 구리 5~192ppm(평균 30ppm), 납 16~59ppm(평균 34ppm), 리튬 12~49ppm(평균 27ppm), 크롬 11~45ppm(평균 27ppm), 카드뮴 0.1~4.5ppm(평균 0.7ppm) 그리고 주석 1.9~8.5ppm(평균 3.5ppm) 범위

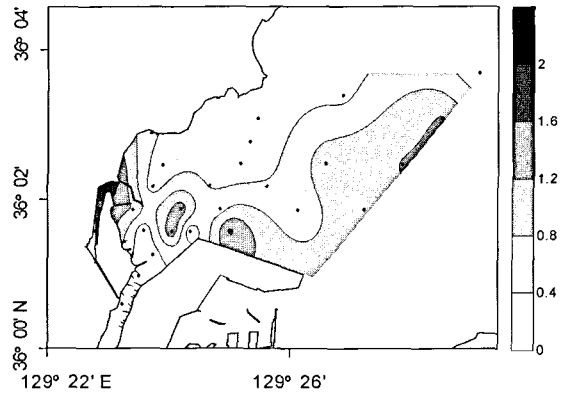


Fig. 3. Spatial distributions of TOC (total organic carbon) contents (%). Note that the highest content of TOC was found in the Old-Port sediments.

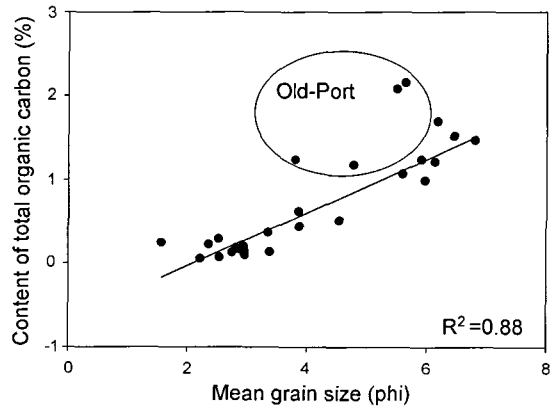


Fig. 4. Pair diagram between TOC content and mean grain size of sediments.

이다(Table 1). 평균입도와 유기탄소, 그리고 대부분의 금속 원소들이 정점별로 큰 함량 변화를 나타냈으며, 특히 아연, 구리, 카드뮴 등은 정점에 따라 매우 높은 함량이 존재하여 함량 범위가 매우 크게 나타났다.

퇴적물의 평균입도가 비슷하고 오염현상이 유사한 다른 해역과 비교할 때, 연구해역에서 철과 크롬의 함량은 광양만, 진해만, 시화호, 인천북항보다 절반 이하로 낮았다(Table 2). 그러나 카드뮴의 경우 형산강 하구역에 위치한 정점 175(1.4ppm)와 구항 지역(4.0ppm)은 진해만(0.7ppm)이나 시화호(0.4ppm)보다 두배 이상, 그리고 구리는 구항 지역에서 134ppm으로 인천 북항(138ppm)이나 시화호(115ppm)와 비슷하였다. 아연 함량 또한 구항 지역과 정점 175에서

Table 2. Comparison of average metal contents between Yeongil Bay sediments and other polluted bay sediments

Area		Al	Fe	Cr	Cd	Cu	Zn	Pb	Sn	Mz
		%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Phi
Saemangeum tidal flat ¹⁾		6.6	2.7	49	-	12	43	24	-	4.4
Inner part of the Incheon North Harbor ²⁾		-	-	214	-	251	420	56	-	4.4
Incheon North Harbor ²⁾		-	-	136	-	138	260	38	-	6.2
Jinhae Bay ³⁾		-	3.6	59	0.7	30	128	37	-	-
Kwangyang Bay ⁴⁾		8.2	3.8	67	-	19	95	35	-	7.9
Shihwa Lake ⁵⁾		7.0	3.0	85	0.4	115	158	26	-	-
This study	Youngil Bay	5.5	2.2	26	0.3	17	94	34	3.2	4.2
	Old Port area	5.8	2.5	39	4.0	134	365	53	7.1	4.9
	Hyongsan Estuary (St. 175)	5.8	2.2	21	1.4	40	377	25	3.3	2.9

¹⁾Cho et al., 2001; ²⁾Lee et al., 2001; ³⁾Lee and Lee, 1983; ⁴⁾Cho et al., 2000; ⁵⁾Hyun et al., 1999

상대적으로 높았으며, 납의 경우 구항 지역에서 53 ppm으로 인천 북항과 비슷하고 광양만이나 진해만보다는 높았다.

연구해역에서 퇴적물 내 금속 원소들의 함량 분포는 크게 4가지 변화 형태를 보인다(Fig. 5). 첫째, 알루미늄, 철, 크롬, 납, 리튬 등과 같은 금속 원소들은 전반적으로 만의 중앙부 해역에서 가장 높은 함량을 보인다. 이러한 분포특성은 전반적으로 세립질 표층 퇴적상 및 유기탄소 함량 분포와 일치한다. 둘째, 아연, 구리, 카드뮴, 주석 등의 중금속은 만의 중앙부에 위치한 니질 퇴적물보다 구항과 형산강 입구의 퇴적물에서 가장 높은 함량을 기록하고 있다. 이들 원소들의 공간분포는 퇴적상과는 미미한 관계를 보이나 유기탄소 함량이 높은 해역에서 높은 특성을 보인다. 셋째, 칼슘과 스트론튬은 위의 원소들과는 대조적으로 사질 퇴적물이 우세한 해안선 부근에서 높은 함량을 보이며, 세립질 퇴적물이 우세한 만의 중앙부로부터 크게 낮아진다. 마지막으로 칼륨의 경우 특별한 분포형태를 보이지 않으나 북쪽 해안선 주변과 형산강 하구역에서 높은 특징을 보이며, 니질 퇴적물이 우세한 중앙부 해역에서 다소 낮다.

금속 원소의 함량 및 분포 조절요인: 일반적으로 상관분석에서 상관계수가 큰 원소들은 대체로 그 지화학적 특성이나 환경 내에서의 거동 방식 등에서 서로 밀접한 관련성을 가진다(Harman, 1967; Summerhayes, 1972). 따라서 이러한 상관계수 분석은 중금속 원소들의 함량과 분포를 조절하는 일차적 요인을 이해하는데 유용하다. 이번 연구에서 퇴적물의 입도, 유기탄소, 그리고 금속 원소들 사이의 상관

분석에 결과에 의하면 크게 3개의 그룹으로 분류가 가능하며, 그룹 내의 원소들 사이에서는 서로 양호한 상관계수를 갖는다(Table 3). 유기탄소, 알루미늄, 철, 크롬, 납, 리튬 등은 서로 양호한 상관관계를 보이며, 이들은 입도와도 밀접한 관계를 나타낸다. 아연, 구리, 카드뮴, 주석 등도 서로 양호한 상관관계를 보이며, 유기탄소와도 밀접한 관계를 나타낸다. 칼슘과 스트론튬도 서로 양호한 관계를 보이며, 입도나 유기탄소와는 관계가 다소 불량하다. 각 원소의 함량과 분포에 영향을 미치는 조절요인을 보다 객관적으로 추정하기 위하여 퇴적물의 입도를 비롯한 14개 분석항목에 대한 R-mode 요인 분석을 실시하였다. 요인 분석 결과, 총 분산의 94%를 설명하는 4개의 요인을 도출하였다(Table 4). Factor 1은 총 분산의 62%를 설명하는 요인으로 평균입도, 유기탄소, 알루미늄, 철, 크롬, 리튬, 납 등에 대하여 높은 적재값(loading value)을 보였다. Factor 1에 대한 적재값이 높은 금속들은 Table 3에서 제시된 것처럼 원소들 사이는 물론 공통적으로 퇴적물의 입도와 밀접한 관련성을 나타낸다. 각 금속 원소의 공간적 변화 또한 서로 높은 공통적 특징을 갖는다. 즉 세립질 퇴적물이 우세한 만의 중앙부와 형산강 하구역에서 이들 원소들의 함량이 뚜렷이 높다(Fig. 5). 이러한 결과는 Factor 1이 퇴적물의 세립성분, 특히 점토광물의 영향을 받고 있음을 지지하며, 결과적으로 알루미늄-구산염 광물 요인으로 해석된다.

Factor 2는 카드뮴, 구리, 아연, 주석에 대해 적재값이 높은 요인으로 총 분산의 16%를 설명한다. 유기탄소와 납 원소 또한 Factor 2에서 다소 높은 적재값을 갖는다. 유기물 함량이 이례적으로 높은 구항에

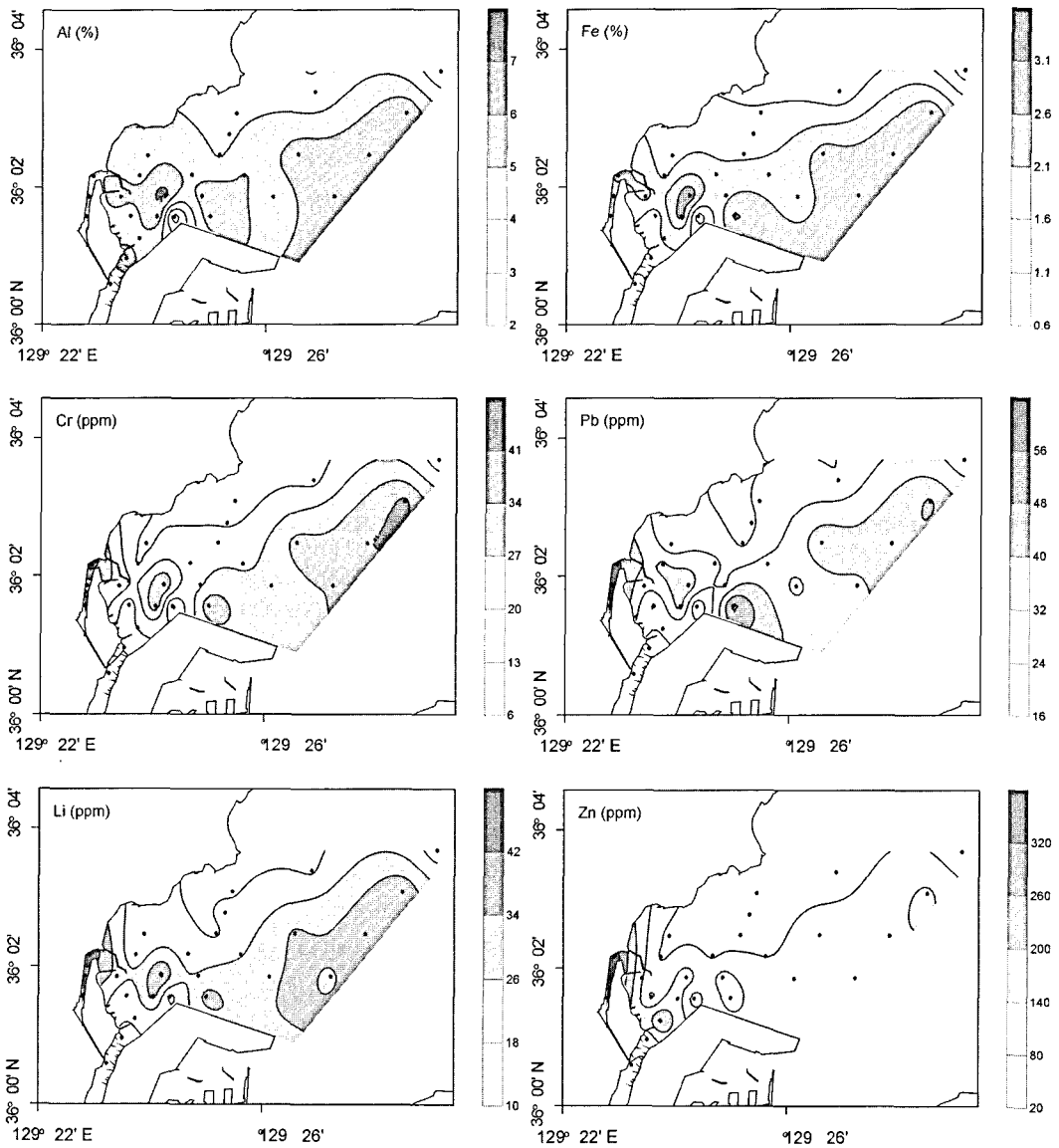


Fig. 5. Spatial variations of metal contents in study area.

서 이들 중금속 원소들의 함량이 높다(Fig. 4 and 5). 한편 구항에서 채취된 퇴적물의 색상은 짙은 흑색이며, 시료 채취 당시 감지되는 황화수소 가스에 근거할 때 저층 퇴적물의 화학적 환경이 산소가 고갈된 환원상태인 것으로 판단된다. 이러한 결과들은 유기물 함량이 높고 환원환경으로 판단되는 구항에서 Factor 2에 대해 높은 적재값을 보이는 중금속 원소들이 유기물 및 황화물에 흡착하여 존재할 가능성을 시사해준다. 일반적으로 카드뮴, 구리, 아연 등의 중금속 원소들은 유기물과 친화력이 높은 원소들로 알

려져 있으며, 유기물에 의한 함량 조절작용은 유기물 분해과정을 수반하는 퇴적물의 초기 숙성과정으로 이해되고 있다(Sawlan and Murray, 1983; 이 등, 1998). 따라서 이들 중금속 원소들의 농축은 직접적인 점 오염원에 의한 현상이라기보다는 유기물 축적과 분해과정에 일어나는 퇴적물의 초기숙성작용과 관련된 농축현상(diagenetic spike signal)에 의한 것으로 해석된다. 즉, 많은 양의 유기물이 공급되는 무산소 환경의 구항 해역에서는 산화물의 분해와 유기물 분해에 따라 용출된 금속 원소들이 황산염 환원의

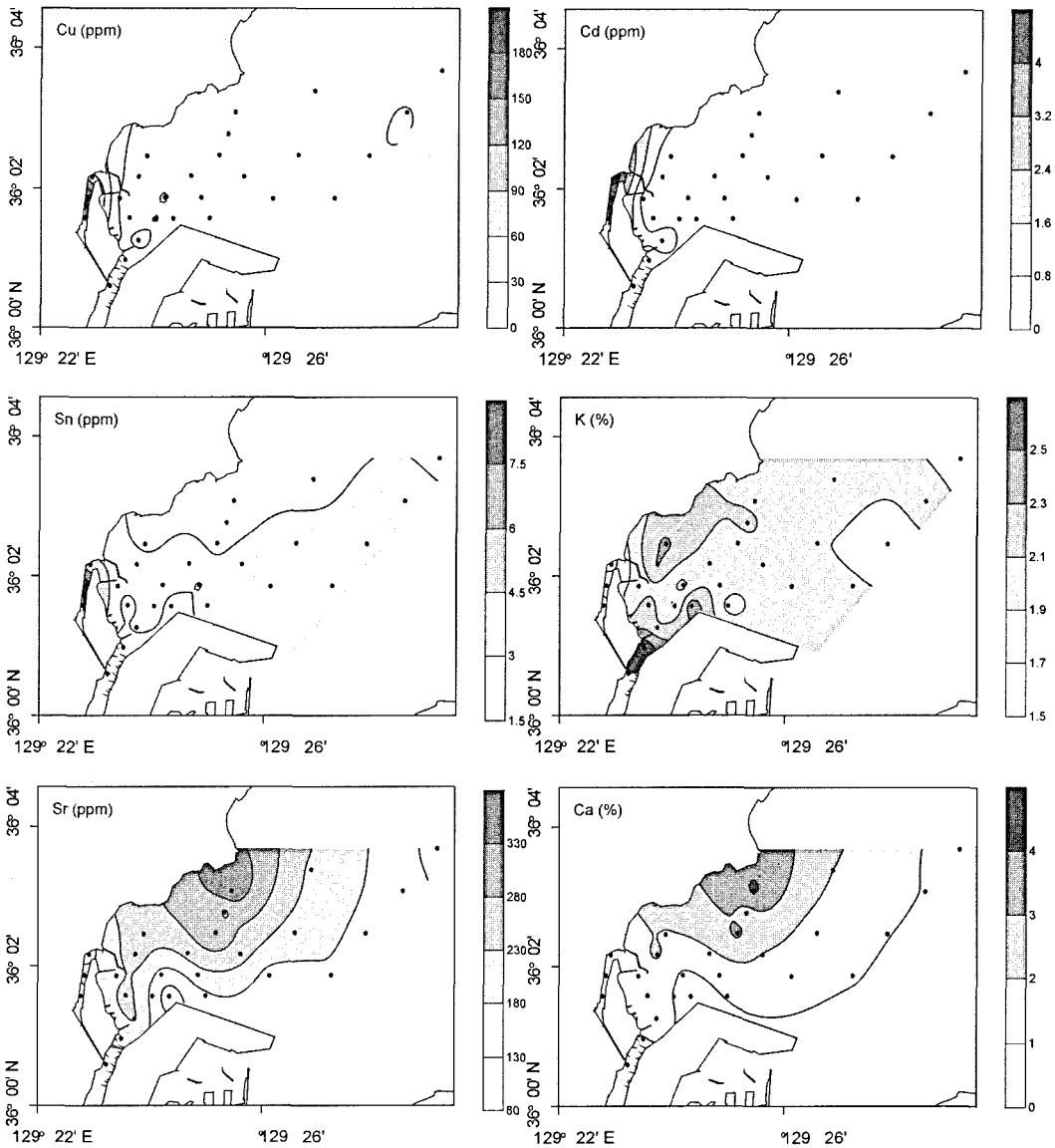


Fig. 5. Continued.

부산물인 황화물과 결합하여 다른 금속-황 광물(sulfide minerals)을 형성하여 퇴적물내에 농축되는 것으로 추정된다. 더욱이 황화물과 결합력이 높은 카드뮴, 구리, 아연, 주석 등이 약산추출 부분에서 높은 함량(총 함량의 50% 이상; Fig. 6)을 보이고 있어 이러한 해석을 뒷받침한다. 따라서 구항 지역에 제한된 현상이긴 하지만 Factor 2는 무산소 환경에서 금속 원소들이 공극수로 용해·유입되어 황산염의 분해 산물인 황화물과 결합하여 새로운 금속-황 광물(sulfide minerals)을 형성하는 지화학적 메카니즘 요인으로 제

시된다. 결과적으로 Factor 2의 요인은 퇴적물 내에 지속적인 금속 원소들을 농축시키는 중금속 오염의 중요한 원인으로 판단된다.

Factor 3은 칼슘과 스트론튬 두 원소에서만 높은 적재값을 보인 요인으로 총 분산의 11.5%를 설명한다. 연구해역에서 이들 서로간의 상관관계는 높고 타 원소와는 아무런 관련성을 보이지 않으며, 입도와 약한 음의 상관관계를 보인다. 일반적으로 칼슘과 스트론튬은 탄산염물질에서 서로 치환이 가능한 원소들이며, 해양 퇴적물에서는 주로 패각에서 높은 함량을

Table 3. Correlation coefficients among the mean grain size (Mz), TOC and elemental composition.

	Mz	TOC	Al	Fe	Cr	Zn	Cu	Cd	Sn	Pb	Ca	Sr	Li	Na	K
Mz	1.00														
TOC	0.84	1.00													
Al	0.76	0.62	1.00												
Fe	0.92	0.79	0.88	1.00											
Cr	0.94	0.93	0.72	0.90	1.00										
Zn	0.50	0.76	0.42	0.49	0.64	1.00									
Cu	0.31	0.62	0.20	0.27	0.47	0.87	1.00								
Cd	0.33	0.69	0.17	0.26	0.52	0.91	0.86	1.00							
Sn	0.51	0.72	0.40	0.48	0.65	0.83	0.87	0.78	1.00						
Pb	0.81	0.89	0.64	0.76	0.89	0.68	0.62	0.59	0.82	1.00					
Ca	-0.52	-0.42	-0.38	-0.37	-0.43	-0.32	-0.17	-0.18	-0.25	-0.36	1.00				
Sr	-0.47	-0.45	-0.18	-0.28	-0.41	-0.33	-0.23	-0.26	-0.27	-0.36	0.95	1.00			
Li	0.91	0.94	0.69	0.87	0.96	0.71	0.57	0.60	0.69	0.88	-0.42	-0.44	1.00		
Na	0.44	0.22	0.60	0.56	0.30	0.17	-0.02	-0.02	0.12	0.19	-0.46	-0.26	0.32	1.00	
K	-0.50	-0.67	-0.17	-0.43	-0.67	-0.49	-0.44	-0.53	-0.51	-0.63	-0.11	0.03	-0.64	0.33	1.00

Table 4. Correlation coefficients among factor loadings for each of the four factors used in the Varimax-rotated R-mode factor analysis. Underlined values are significant at $p < 0.01$.

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Communalities
Mz	0.85	0.16	0.33	0.32	0.96
TOC	0.65	0.52	0.26	0.43	0.94
Al	0.95	0.13	0.05	-0.18	0.95
Fe	0.95	0.14	0.12	0.16	0.97
Cr	0.79	0.34	0.23	0.43	0.98
Li	0.74	0.44	0.24	0.40	0.96
Pb	0.67	0.52	0.17	0.35	0.87
Cd	0.08	0.91	0.11	0.26	0.91
Cu	0.11	0.96	0.06	0.10	0.94
Sn	0.35	0.86	0.08	0.14	0.88
Zn	0.32	0.88	0.16	0.12	0.92
Sr	-0.13	-0.15	-0.97	-0.09	0.99
Ca	-0.29	-0.10	-0.93	0.13	0.98
K	-0.27	-0.35	0.13	-0.86	0.96
Cumulative (%)	61.90	77.60	89.10	94.40	

가지는 특징으로 미루어 볼 때(Emelyanov and Shimkus, 1986; Cho *et al.*, 1999) Factor 3은 탄산염(주로 패각편) 함량에 의해 지배되는 요인으로 판단된다. 이러한 결론은 이들 두 원소에서 약산추출 부분의 함량이 조절된 해안선 방향으로 갈수록 크게 증가하는 분포 패턴에서도 이해가 가능하다(Fig. 6). Factor 4는 칼륨에 대해서만 높은 적재값을 나타내는 요인으로 총 분산의 5.3%를 설명한다. 칼륨의 함량은 입도, 유기탄소 그리고 대부분의 다른 원소들과 음의 상관관계를 보이며(Table 3), 공간적으로도 퇴적물의 입도가 조절된(주로 사질 퇴적물) 북쪽 해안선 주변과 형산강 하구에서 높아 하나의 독립된 요인에

의해 조절되고 있는 특징을 갖는다. 이러한 결과는 퇴적물 중 칼륨의 함량이 조절된 사질 퇴적물에 풍부한 장석(Feldspar) 광물 성분에 의해 조절되고 있음을 시사하며, Cho *et al.*(1999)의 연구에 의해서도 밝혀진 바 있다.

약산추출 부분의 중금속 함량(1N 염산 용출 농도): 퇴적물에 포함된 금속 원소는 화학적 존재형태에 따라 퇴적환경변화에 수반되어 다양한 거동을 보이는데, 금속 원소의 존재형태가 달라짐에 따라 주변 환경변화에 영향을 미치는 정도를 평가하기 위하여 단일시약추출법(1N 염산)을 이용하여 금속 원소들의 함량

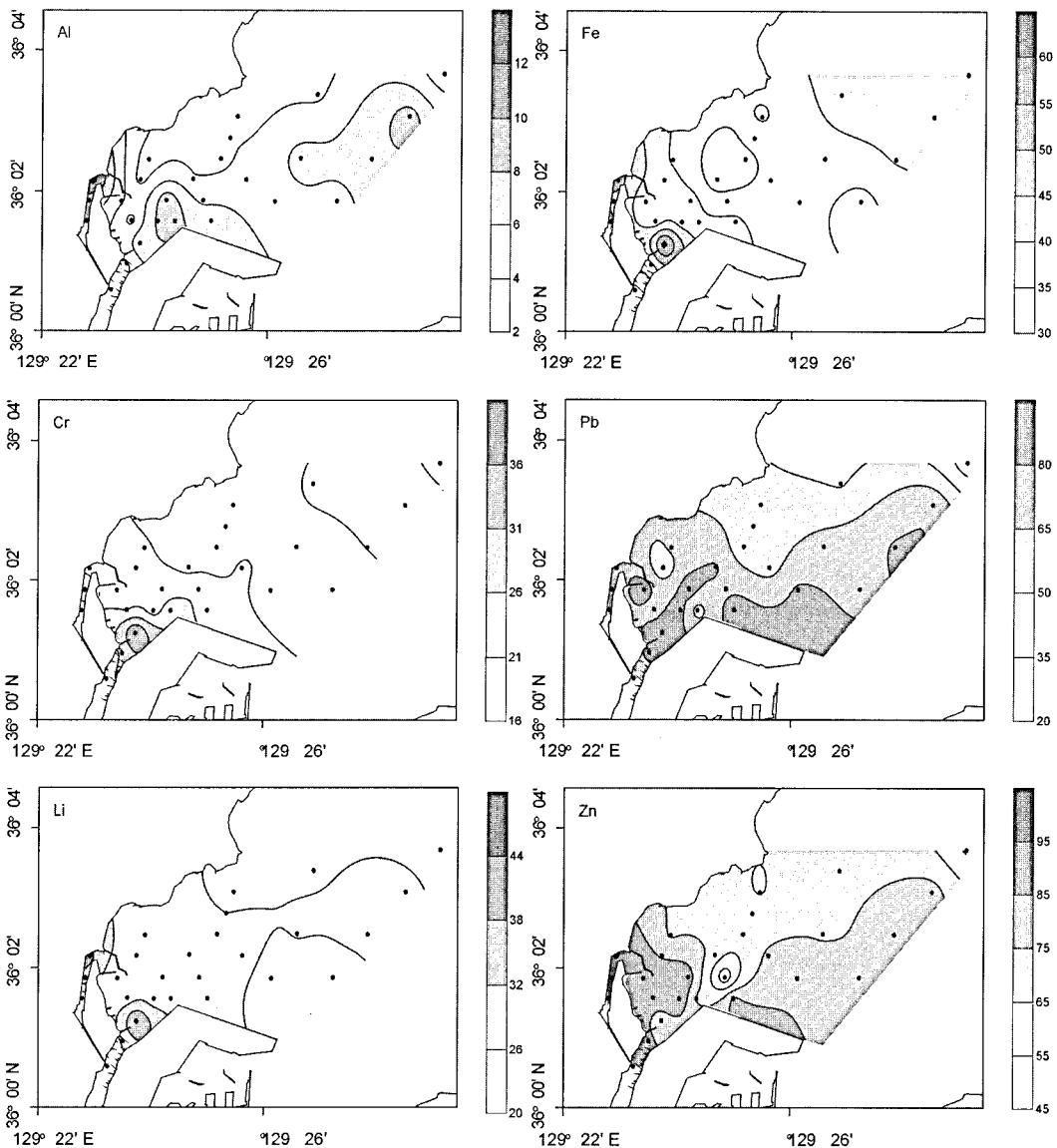


Fig. 6. Relative percent(%) of labile fraction to total content of elements.

을 분석하였다. 이러한 방법은 퇴적물 중 비광물격자부분(labile fraction)에 해당되는 금속원소 함량만을 얻을 수 있어 인위적인 금속 오염을 판단하는데 유용하다(Chester and Voutsinou, 1981). 이번 연구에서 1N 염산 추출부분의 금속 원소의 함량은 총 함량에 대해 알루미늄 2~13%(평균 6%), 철 31~63%(평균 41%), 칼슘 25~94%(평균 69%), 칼륨 1~11(평균 5%), 크롬 16~42%(평균 24%), 아연 46~96%(평균 79%), 구리 21~89%(평균 50%), 카드뮴 31~100%(평균 86%), 주석 45~95%(평균 70%), 납 25~95%(평균

71%), 스트론튬 8~68%(평균 37%) 그리고 리튬은 21~45%(평균 29%)를 차지하고 있다(Fig. 6). 대조적으로 퇴적 후 환경변화와 무관하게 농도 및 존재형태가 변하지 않는 광물격자부분의 함량은 칼륨 및 알루미늄이 95%와 94%로 가장 높으며, 크롬 및 리튬이 70% 이상, 스트론튬 63%, 철 59%, 구리 50% 그리고 칼슘 및 주석이 30%, 납 27%, 아연 21%, 카드뮴 14% 순으로 감소한다. 비광물격자부분(labile fraction)의 함량은 카드뮴, 아연 및 납이 73% 이상으로 높으며, 이 값은 경기만(34%), 울산만(65%)보다

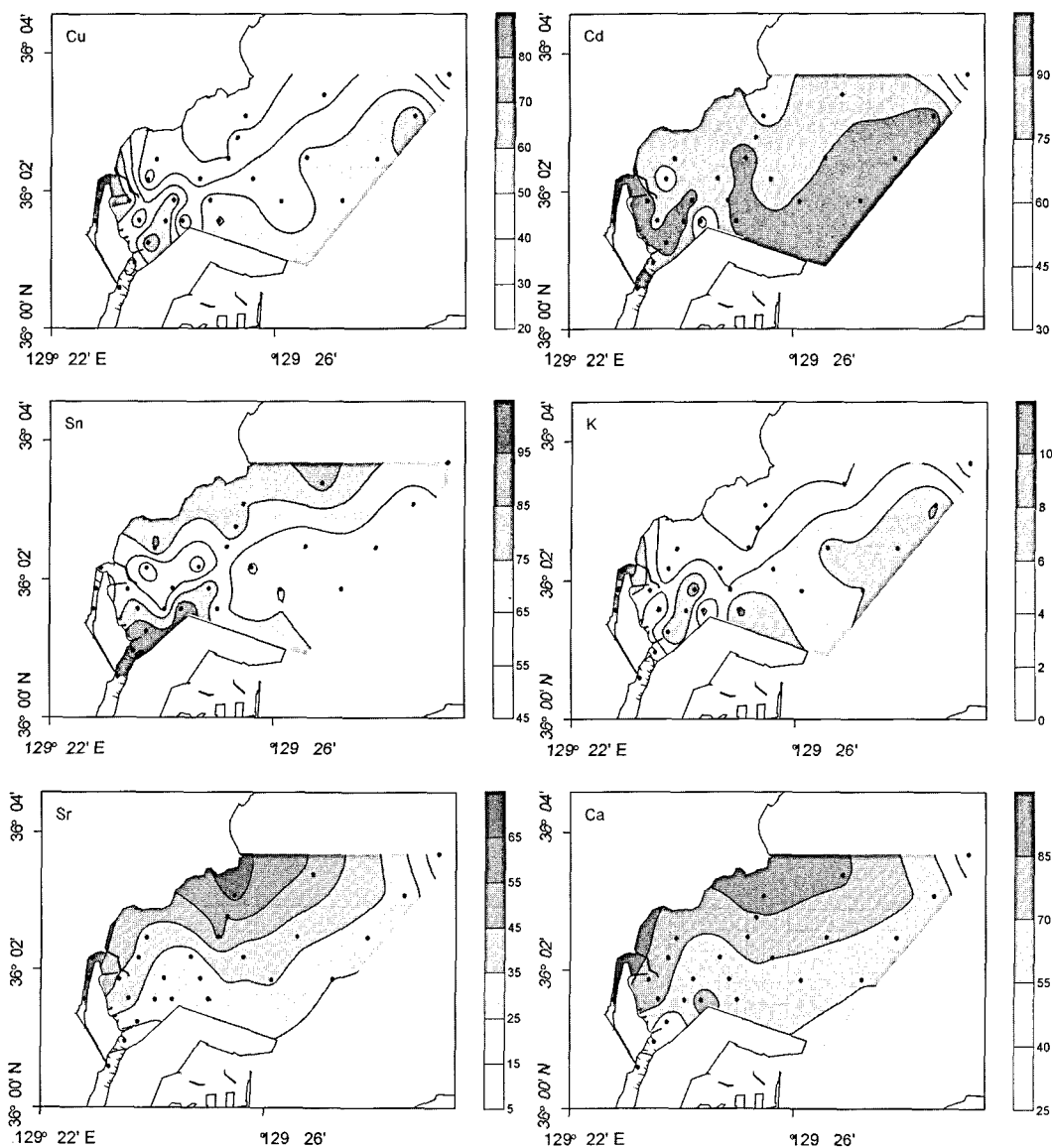


Fig. 6. Continued.

크게 높고, 마산만(70%)(김, 2001) 및 진해만(73%)(Hong *et al.*, 1983)과는 비슷하다. 낮은 대개 약산의 추출에 의해서도 인위적 기원의 납이 효과적으로 분리되는 것을 고려할 때(Ng and Patterson, 1982), 추출된 납 함량 중 상당 부분은 인위적으로 이차 유입 되었을 가능성을 배제할 수 없다.

한편 IN 염산 추출 실험으로부터 금속 원소들의 농축 정도를 파악하기 위하여 다음과 같은 concentration enrichment ratio(CER)를 구하였다(Sutherland, 2000, 2002).

$$CER_n = C_n \text{ sample} / C_n \text{ background}$$

여기서 $C_n \text{ sample}$ 은 IN 염산에 추출된 금속 농도를, $C_n \text{ background}$ 는 바탕값을 나타낸다. 바탕값은 육지로부터 인위적인 영향이 가장 적은 것으로 판단되는 2개 지점(정점 96 및 122)을 선정하여 이들의 평균값을 적용하였다. 선정된 2개의 정점은 모래, 실트 및 점토의 함량이 편중되어 있지 않고, 실트 및 점토 함량이 각각 52%와 50%로 연구지역 전체 니질 함량의 평균값에 해당되는 지점이다. 계산 결과

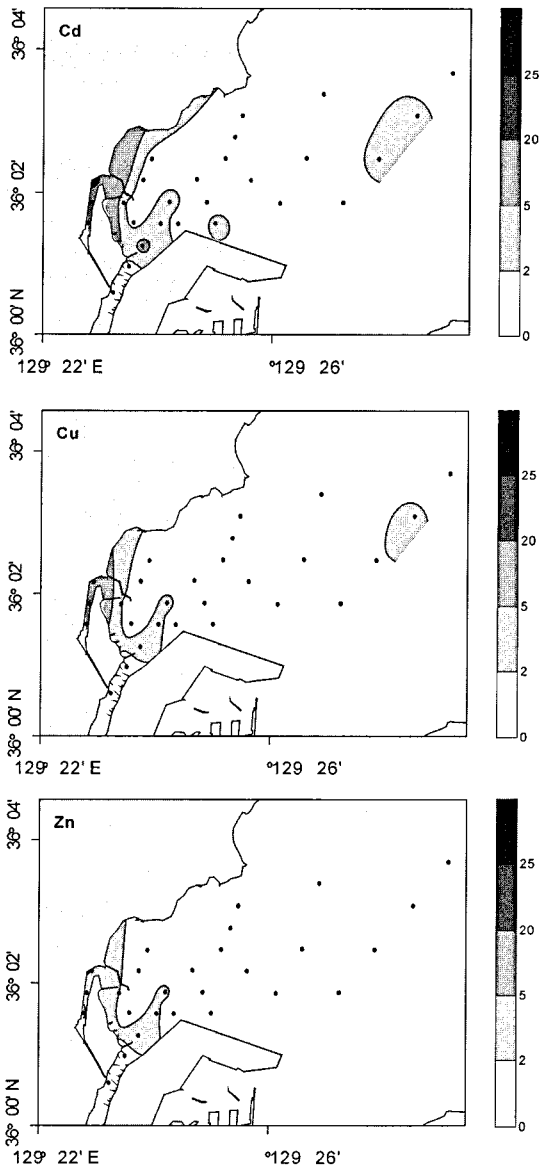


Fig. 7. Spatial distribution of CER value in some heavy metals. Note the high CER value in Pohang Old-Port and the mouth of Hyeongsan River.

CER 값이 2보다 작을 때는 인위적인 영향이 없거나 미약함을 의미하며, 2~5사이의 값은 어느 정도 오염의 영향이 있음을, 5~20은 상당한 오염의 영향이 있음을, 그리고 40이상은 심각한 인위적 오염징후를 지시하는 것으로 평가된다. 연구지역의 시료를 바탕으로 적용한 까닭에 비록 결과가 상대적이긴 하지만 철, 칼륨, 크롬 및 주석의 CER 값은 모든 정점에서 2이하의 값을 보여 이들 금속들의 인위적 유입은 아

직 미미한 것으로 판단된다. 알루미늄, 칼슘, 납, 스트론튬 및 리튬은 대부분 시료가 2이하의 CER 값을 나타내나 일부 몇 개 시료에서는 2~5사이의 값을 보여 국지적인 오염의 징후를 보여준다. 그러나 아연, 구리, 카드뮴은 구항, 형산강 입구 그리고 송도 해변 주변 해역에서 5~20 범위로 매우 높은 CER 값을 나타내며, 카드뮴의 경우에는 시료에서 CER값이 20이 넘는 정점들도 관찰된다(Fig. 7). 이러한 결과들은 영일만 해역의 일부 지역(특히, 구항에서 형산강 입구에 이르는 해안선 부근)에서 아연, 구리, 카드뮴의 농축이 상당히 진행되었음을 지시한다. 비록 이들 중금속의 농축 원인이 인위적 유입보다는 무산소 환경에서 이루어지는 지화학적 메카니즘 때문인 것으로 해석되나, 연구해역의 가속화되는 중금속 오염 현상을 줄이기 위해서는 해양환경의 개선과 함께 이들에 대한 지속적인 모니터링과 체계적인 관리가 필요한 것으로 생각된다.

결론

한국 동해안 영일만 표층 퇴적물의 유기물 및 금속 원소의 분포 특성과 조절요인에 대한 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 연구해역의 퇴적물 중 유기탄소와 금속 함량 그리고 이들의 분포 특성은 주로 점토광물, 조질질 장석 그리고 패각편에 의해 조절되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 아연, 구리, 카드뮴, 주석, 납 등은 구항 지역과 형산강 하부 일부지역에서 입도와 관계없이 높으며, 유기물 함량과 밀접한 상관관계를 보인다.

2. 약산추출부분의 함량은 카드뮴, 아연, 납이 총함량의 73% 이상, 그리고 칼슘, 주석 및 구리가 50~70% 범위로 높았으며, 나머지 금속 원소들은 6~40% 범위로 낮았다. 오염의 정도를 지시하는 CER 값은 연구해역에서 대부분의 원소들이 2이하로 낮아 오염 현상은 적은 편이었으나, 아연, 구리, 카드뮴은 5~20 사이의 값을 보여 지역적으로 높은 농축현상을 보이고 있다. 특히, 구항에서 송도해빈 주변에 이르는 정점들에서의 높은 CER 값은 중금속 오염현상이 상당히 진행되었음을 지시한다. 더욱이 납을 포함한 이들 금속 원소들의 함량은 다른 해역에서 보고된 오염 퇴적물보다 높거나 비슷하다. 따라서 이들 해역에 대한 중금속 오염의 지속적인 모니터링과 체계적인 관리가 필요한 것으로 사료된다.

3. 일부 중금속의 국지적 농축은 주변 시설들로부터 직접적으로 배출되는 점오염원에 의한 것보다는 무산소 환경에서 이루어지는 지하화적 메카니즘 (sulfide mineral의 형성)과 관련된 농축현상 (diagenetic spike signal)에 의한 것으로 해석된다.

사 사

본 연구를 위해 야외조사 및 실내분석에 많은 도움을 주신 노혜진 연구원께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 “소형무인탐사선 핵심기술 개발 사업”의 지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- 강양순, 김귀영, 심정민, 성기탁, 박진일, 공재열, 2002, 영일만 수질의 시공간적 변동. 한국수산학회지, 35(4), 431-437.
- 김범수, 2001, 한반도 주변 연안 표층퇴적물의 중금속 오염 평가. 서울대학교 박사학위논문, 178 pp.
- 김현덕, 김종인, 류청로, 2001, 영일만내의 유동과 수질특성에 관한 연구. 한국해양공학회지, 15(4), 28-37.
- 곽희상, 1977, 가을철 영일만 해수중의 철분량과 그 분포. 한국해양학회지, 12(1), 48-53.
- 나정열, 팽동국, 1992, 동해 남서해역의 해류 및 열구조에 미치는 해상풍의 영향. 한국수산학회지, 25(1), 15-28.
- 박병권, 송무영, 1972, 한국 영일만 해저퇴적물의 입도분석. 한국해양학회지, 7(2), 74-85.
- 신현출, 최성순, 고철환, 1992, 영일만 다모류 군집의 계절별, 공간적 변화. 한국해양학회지, 27(1), 46-54.
- 수로국, 1971, 영일만 및 부근 일대 해양관측 결과보고서. 90 p.
- 양한섭, 김성수, 강창안, 조규대, 1991, 한반도 근해의 해류와 해수특성. 한국수산학회지, 24(3), 185-192.
- 이종섭, 김차경, 김종화, 임기봉, 1995, 영일만의 해수유동 구조 및 확산특성. 한국해양학회지, 30(5), 467-479.
- 이종현, 이정석, 김범수, 이창복, 고철환, 1998, 경기만 퇴적물의 중금속 분포 특성. 한국해양학회지, 3(3), 103-111.
- 조영길, 이창복, 고철환, 2000, 광양만 표층퇴적물의 중금속 함량 및 분포. 한국해양학회지, 5(2), 131-140.
- 진용현, 김경태, 정창수, 김석현, 양동범, 홍기훈, 이광우, 2000, 하계 마산만 혐기성 환경에서의 미량금속의 거동. 한국해양환경공학회지, 3(4), 56-64.
- Chester, R. and F.G. Voutsinou, 1981, The initial assessment of trace metal pollution in coastal sediment. Marine Pollution Bulletin, 12, 84-91.
- Cho, Y.G., C.B. Lee and M.S. Choi, 1999, Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea. Marine Geology, 159, 111-129.
- Cho, Y.G., C.B. Lee and C.H. Koh, 2000, Heavy metals in surface sediments from Kwangyang Bay, South Coast of Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography, 5, 131-140.
- Cho, Y.G., S.O. Ryu, Y.K. Khu and J.Y. Kim, 2001, Geochemical Composition of Surface Sediments from the Saemangeum Tidal Flat, West Coast of Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography, 6, 27-34.
- Emelyanov, E.M. and K.M. Shimkus, 1986, Geochemistry and Sedimentology of the Mediterranean Sea. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 553 p.
- Fang, T.H. and E. Hong, 1999, Mechanisms Influencing the Spatial Distribution of Trace Metals in Surficial Sediments off the South-Western Taiwan. Marine Pollution Bulletin, 38, 1026-1037.
- Folk, R.L., 1968, Petrology of sediment trace elementary rock. Hemphill's, Drawer M. University Station, 170 p.
- Falk, R.L. and W.C. Ward, 1975, Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-26.
- Harman, H.N., 1967, Modern Factor Analysis. Univ. Chicago Press, 2nd ed., 469 p.
- Hong, G.H, Y.A. Park and K.W. Lee, 1983, Partitioning of heavy metals in sediments from Jinhae bay, Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography, 18, 180-184.
- Hyun, S.M., J.H. Chun and H.I. Yi, 1999, Sedimentary Environments and Heavy Metallic Pollution at Shihwa Lake. Journal of the Korean Society of Oceanography, 4, 198-207.
- Lee, C.B., B.S. Kim and C.H. Koh, 2001, Speciation of some Heavy Metals in Surface and Core Sediments of Kyeonggi Bay, West Coast of Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography, 36, 9-18.
- Lee, S.H. and K.W. Lee, 1983, Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea. Journal of the Korean Society of Oceanography, 18, 49-54.
- Ng, A. and C.C. Patterson, 1982, Change of lead and barium with time in California off-shore basin sediments. Geochimica Costmochimica Acta, 46, 2307-2321.
- Sawlan, J.J. and J.W. Murray, 1983, Trace metal remobilization in the interstitial waters of red clay and hemipelagic marine sediments. Earth Planetary Science Letter, 64, 213-230.
- Summerhayes, C.P., 1972, Geochemistry of continental margin sediments from northwest Africa. Chemical Geology, 10, 137-156.
- Sutherland, R.A., 2000, Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. Environmental Geology, 39, 611-627.
- Sutherland, R.A., 2002, Comparison between non-residual Al, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn released by a

three-step sequential extraction procedure and a dilute hydrochloric acid leach for soil and road deposited sediment. *Applied Geochemistry*, 27, 353-365.

Tessier, A., P.G.C. Campbell and M. Bisson, 1979, Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry*, 51, 844-851.

2003년 6월 27일 원고 접수
2003년 7월 19일 수정원고 접수
2003년 7월 25일 원고 채택