

영산강 하구 표층 퇴적물의 중금속 함량 및 분포

조영길·박경양
목포대학교 해양자원학과
(1998년 2월 5일 접수)

Heavy Metals in Surface Sediments of the Youngsan Estuary, West Coast of Korea

Yeong-Gil Cho and Kyung-Yang Park
Dept. of Marine Resources, Mokpo National University
(Manuscript received 5 February 1998)

To determine the distribution of heavy metals in estuarine sediments, forty surface sediment samples were collected from the Youngsan estuary, and analysed for their contents of Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Zn and Pb. Contents of most analysed metals were comparable to those in the near shore environment around Korean peninsula, and little anthropogenic effect was identified. However, there was a contrasting behavior among the metals with respect to their relationship with the grain-size of sediments. Contents of Fe, Co, Cr and Ni demonstrated a fairly linear relationship with the grain-size of sediments whereas those of Mn, Cu, Zn and Pb did not. This different behavior in these metals was interpreted as being the result of the additional inputs. The R-mode factor analysis also confirmed the different behavior of Cu, Zn, Pb and Mn from that of Fe, Co, Cr and Ni.

Key words : heavy metals, sediments, distribution, factor analysis, Youngsan estuary

1. 서론

한반도 남서해안에 위치한 영산강 하구 및 인접해역에는 1973년부터 시작된 영산강유역 개발사업의 일환으로 농경지개발 및 임해공단 조성을 위한 사업이 지속적으로 추진되어 왔다. 영산강 상류역 개발에 역점을 둔 제1단계 사업에 이어 1981년에 제2단계 사업의 하나로 무안반도와 영암반도를 잇는 약 2.5km 길이의 영산강 하구언이 건설되었으며, 이에 따라 하구언 안쪽에 저수량이 약 250만 톤에 달하는 동양 최대의 인공호가 조성되었다. 1992년에는 공유수면 매립을 위한 제3단계 사업으로 하구 남쪽의 영암반도와 달도, 금호도 및 화원반도를 잇는 3개의 방조제가 완공되었으며, 계속사업으로 약 23,500ha에 이르는 간석지의 농경화 및 담수호 조성이 추진 중이다.

그러나, 호안공사나 방조제 축조 및 매립을 통한 해안의 개발사업은 개발로 인한 이득만큼 자연이 주는 혜택을 감소시키며, 해양조건을 비롯한 기존 생태계의 자연적 질서를 파괴시킨다. 하구언 건설 이후 영산강 하구는 연안어족자원의 산란 및 생육장으로서의 기능이 이미 상실되었고, 하구의 연안 곳곳에는 해양 생태계의 공황이라 일컬어지는 갯벌이 개발이라는 이름 아래 파괴되면서 바다의 10배에 달하는 갯벌의 높은 생산성도 함께 사라져 버렸다. 뿐만 아니라 하구 일대는 간척과 매립에

다른 수류의 변형으로 조량과 조류속의 감소 및 조위 상승의 해황 변화가 초래되었으며 (최, 1984; 정, 1992), 하천 및 외해와의 물질 교환이 차단된 반폐쇄적인 만으로 변하면서 하구의 자정능력이 급격히 저하되었다.

기존의 자연환경을 인위적으로 변형 및 개발하는 경우 자연적 기본요소 외에 필연적으로 수반되는 것은 인간활동에 의한 영향이다. 영산강 하구는 북쪽으로 목포시의 도심과 목포항 및 기존 산업시설과 접해 있으며, 남쪽의 영암반도에는 개발사업과 병행하여 조성된 대불공단 및 삼호공단이 접안해 있다. 따라서 하구 일대는 각종 산업 오·폐수 및 생활하수 유입에 따른 환경오염의 위협을 받고 있으며, 아울러 개발로 인한 해양조건의 변화는 하구내 오염물 축적을 더욱 가중시키고 있다 (수산진흥원, 1983). 하구로 유입된 각종 오염물질은 재반물리·화학적 과정을 통해 퇴적물의 형태로 쌓일 것이며, 이러한 퇴적물에는 결국 인간활동에 따른 오염물질의 배출흔적이 반영되어 있을 것이다. 따라서, 본 연구는 영산강 하구에 쌓인 퇴적물에서 문형의 부산물인 중금속을 분석함으로써 그것의 함량 및 분포 특성을 밝히고, 개발 후 인간활동에 따른 영향을 파악할 목적으로 추진되었다.

2. 재료 및 방법

조영길·박경양

Table 1. Analytical results of 39 surface sediments from the Youngsan Estuary

STN	Al (%)	Fe (%)	Mn (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	C _{ORG} (%)	Mz (Ø)
1	8.3	4.4	770	14	80	19	37	87	26	1.03	9.4
2	8.4	4.0	462	12	73	21	34	98	26	1.23	9.3
3	8.7	4.2	539	12	74	21	37	98	29	1.13	8.9
4	7.7	3.5	539	12	67	16	30	72	26	0.94	8.3
5	9.1	4.7	693	15	87	23	40	108	29	1.18	9.9
6	8.8	4.5	539	13	82	23	40	104	30	1.33	9.6
7	8.6	4.2	539	12	76	22	38	98	31	1.26	9.4
8	7.2	3.1	616	9	60	15	29	62	27	0.85	7.9
9	8.4	4.3	847	13	81	19	40	87	28	1.02	9.3
10	8.8	4.8	693	15	87	24	39	104	27	1.30	9.8
11	8.3	4.1	693	13	75	21	34	90	26	1.19	8.8
12	8.5	4.3	693	14	78	19	38	88	28	1.03	9.4
13	8.3	3.9	462	12	71	22	34	93	30	1.00	9.2
14	9.0	4.4	539	14	81	25	38	106	36	1.24	9.5
15	8.8	4.5	616	14	83	28	41	106	31	1.28	9.5
16	9.0	4.5	616	14	81	30	40	111	37	1.20	9.6
17	8.8	4.5	693	14	83	28	40	112	37	1.25	9.4
18	8.5	4.2	847	13	78	23	38	95	23	1.05	9.1
19	8.8	4.5	616	14	82	34	43	114	27	1.22	9.6
20	8.6	4.3	693	14	82	25	38	101	26	1.13	9.4
21	8.0	3.9	539	12	73	22	34	90	24	0.99	8.8
22	8.5	4.2	616	13	77	37	36	130	33	1.39	9.3
23	7.7	3.6	693	11	67	22	32	83	28	1.03	9.0
24	7.8	3.9	693	13	75	29	40	176	33	0.95	9.0
25	7.7	3.7	847	12	70	19	35	83	26	0.61	9.0
26	8.3	4.1	770	14	80	25	37	96	30	1.09	9.3
27	8.4	4.2	1078	14	83	23	40	97	31	0.99	9.4
28	8.6	4.3	1078	14	83	26	38	101	30	1.13	9.3
29	8.5	4.2	693	14	81	20	37	91	22	0.90	9.2
30	8.2	3.8	616	12	75	24	33	87	23	0.90	8.6
31	8.1	4.0	770	13	76	20	36	88	29	1.03	9.0
32	7.8	3.8	616	12	72	19	35	83	19	1.00	8.7
33	8.0	3.9	616	13	76	19	37	86	22	1.00	9.0
34	7.6	3.6	539	12	69	16	33	77	17	0.91	8.3
35	8.2	4.1	693	14	79	20	37	91	24	1.18	9.3
36	8.0	3.9	693	13	76	21	36	87	26	1.04	9.1
38	8.4	4.3	847	15	81	21	37	95	36	0.86	9.4
39	7.9	3.9	539	12	69	18	32	79	23	1.04	7.9
40	8.6	4.3	616	14	82	22	40	94	22	1.06	9.4

08), 크롬(0.08) 및 알루미늄(0.05)은 10% 이내의 변화를 보였다.

Fig. 3에는 중금속 함량과 입도와의 관계가 도시되었다. 그림에 나타난 바와 같이 철, 크롬, 코발트 및 니켈의 함량은 퇴적물의 입도와 양호한 관련성을 보여 입도가 세립해짐에 따라 증가하는 경향을 나타내나 나머지 금속은 입도와의 관계가 그다지 뚜렷하지 않다. 구리와 아연은 같은 입도의 일부 시료에서 높은 함량을 보이며, 망간 및 구리의 함량은 입도와 거의 무관하게 변화한다. 입도와 관련성이 작은 망간, 구리, 아연 및 납은 시료간 함량의 변화가 비교적 큰 금속으로 연구지역 퇴적물의 입도변화가 작다는 사실을 고려할 때 입도 이외의 다른 요인이 이들 금속에 대해서 중요하게 작용하고 있음을 시사한다.

퇴적물의 입도와 관련된 중금속 함량의 차이는 일차적으로 퇴적물을 구성하는 광물성분의 변화에서 기인된 것이나 금속의 흡착능력이 큰 화학성분 함량의 차이에서도 비롯될 수 있다 (Luoma, 1990; Horowitz, 1991). 그러한 화학성분 중에 특히 유기물은 표면적이 크고 대부분의 중금속과 친화력이 큰 것으로 알려져 있다 (Montoura et al., 1978). Fig. 4에 제시된 유기탄소와 중금속 함량 사이의 관계에서 어느 정도 관련성을 나타낸 철, 크롬, 구리 및 니켈은 유기물 사이의 친화력을 반영할 수 있으며, 이러한 사실은 연구지역에서 금속의 일부가 유기물과 결합되어 있을 가능성을 지시한다.

3.3 중금속의 공간적 분포 특성

분석에 선정된 퇴적물의 평균입도는 7.9~9.9Ø 범위

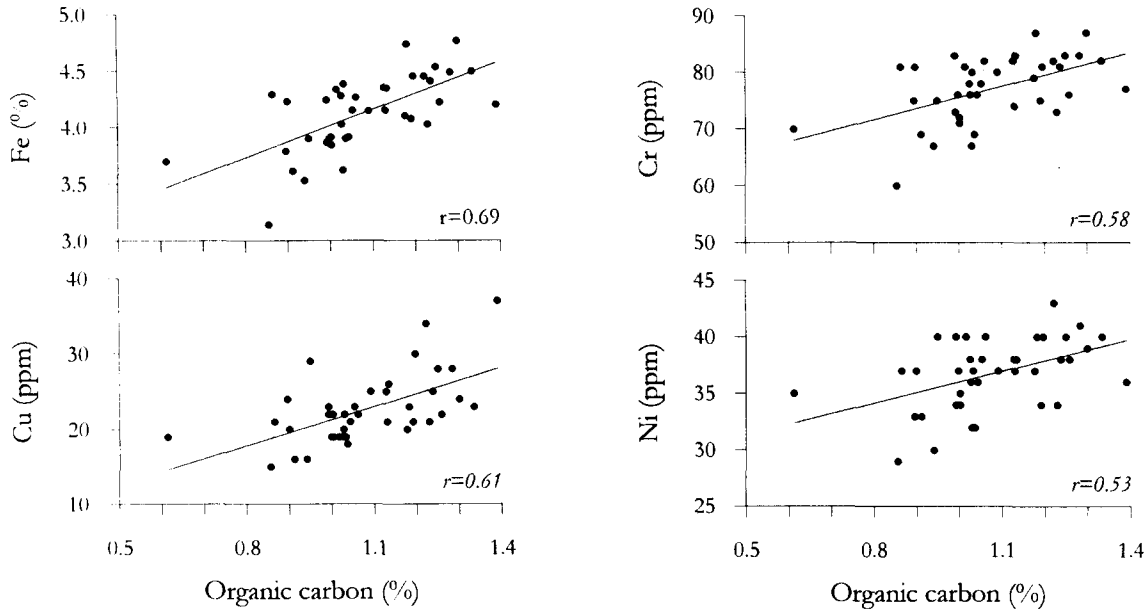


Fig. 4. Relationship between the content of metal (Fe, Cr, Cu, Ni) and that of organic carbon. Lines in figures are best fit regression line.

Table 2. Correlation coefficients among the metallic elements

	Al	Fe	Mn	Co	Cr	Cu	Ni	Zn	Pb
Al	1.00	0.94	0.05	0.73	0.85	0.59	0.79	0.47	0.53
Fe		1.00	0.22	0.84	0.94	0.55	0.87	0.50	0.47
Mn			1.00	0.39	0.35	0.06	0.30	0.05	0.17
Co				1.00	0.84	0.43	0.74	0.43	0.34
Cr					1.00	0.53	0.90	0.50	0.39
Cu						1.00	0.60	0.78	0.57
Ni							1.00	0.64	0.44
Zn								1.00	0.55
Pb									1.00

로서 모두 점토입도에 해당되어 입도성분의 공간적 변화가 크지 않으며, 유기물 또한 유기탄소 함량에 내재된 입도의존성을 고려할 때 (Fig. 2) 전반적으로 입도분포의 경향을 따른다고 볼 수 있다. 따라서 퇴적물의 입도 및 유기물과 관련성이 없는 금속은 퇴적물에 내재되지 않은 외부요인의 영향을 반영할 수 있다. 이러한 외적인 요인을 파악하기 위해서는 우선 드러난 입도의 영향을 제거할 필요가 있으며, 본 연구에서는 금속의 함량을 보존성 원소인 알루미늄 함량으로 나누어줌으로써 입도의 영향을 제거하였다. 알루미늄은 평균입도와와의 관계가 양호하며 (Fig. 5, $r=0.82$) 또한 입도와 양호한 관계를 나타낸 금속들과도 밀접한 관련성을 보여 (Table 2) 입도의 영향을 제거하는 적절한 원소로 판단된다. 따라서, 금속/알루미늄 함량비는 입도의 영향이 제거된 각 금속의 분포경향을 제시해 준다.

금속/알루미늄 함량비에 기초하여 분석된 금속은 시료간 함량비의 변화가 작은 금속과 비교적 큰 금속으로 구분된다. 철, 크롬, 니켈 및 코발트는 함량비의 변화

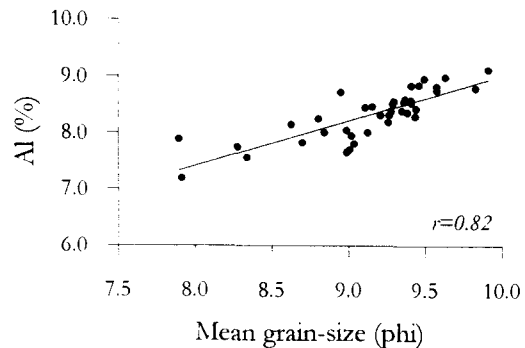


Fig. 5. Relationship between the content of Al and the mean grain-size. Line in figure is best fit regression line.

σ_x/\bar{x})가 각각 3.9%, 4.3%, 5.8% 및 6.7%로 전자에 속하며, 공간적으로도 변화의 경향이 그다지 뚜렷하지 않다. 반면에 납, 구리, 아연 및 망간의 함량비 변화는 각각 15.1%, 17.9%, 18.2% 및 21.1%로 비교적 크며, Fig. 6에 도시된 함량비의 공간적 분포는 금속별로 특정한 경향을 제시해 준다. 망간의 함량비는 산업체 및 선착장이 위치한 영암반도의 북서부 연안에서 가장 높으며 이곳으로부터 멀어지면서 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 구리 및 아연의 함량비는 목포항 주변에서 가장 높으며, 이곳에서 남서방향의 바닷쪽과 북동방향의 연안을 따라 높은 분포를 보여 근원지로부터의 이동경로를 제시해 준다. 구리 및 아연의 함량비 분포는 서로 비슷한 것이 특징적이며, 이는 두 금속의 근원 및 퇴적과 관련된 현상이 같음을 지시한다. 한편, 납/알루미늄 함량비는 항구, 조선소 및 부두시설이 위치한 목포연안과 화원반도 연안에서 높아 육지로부터의 영향을 시사한

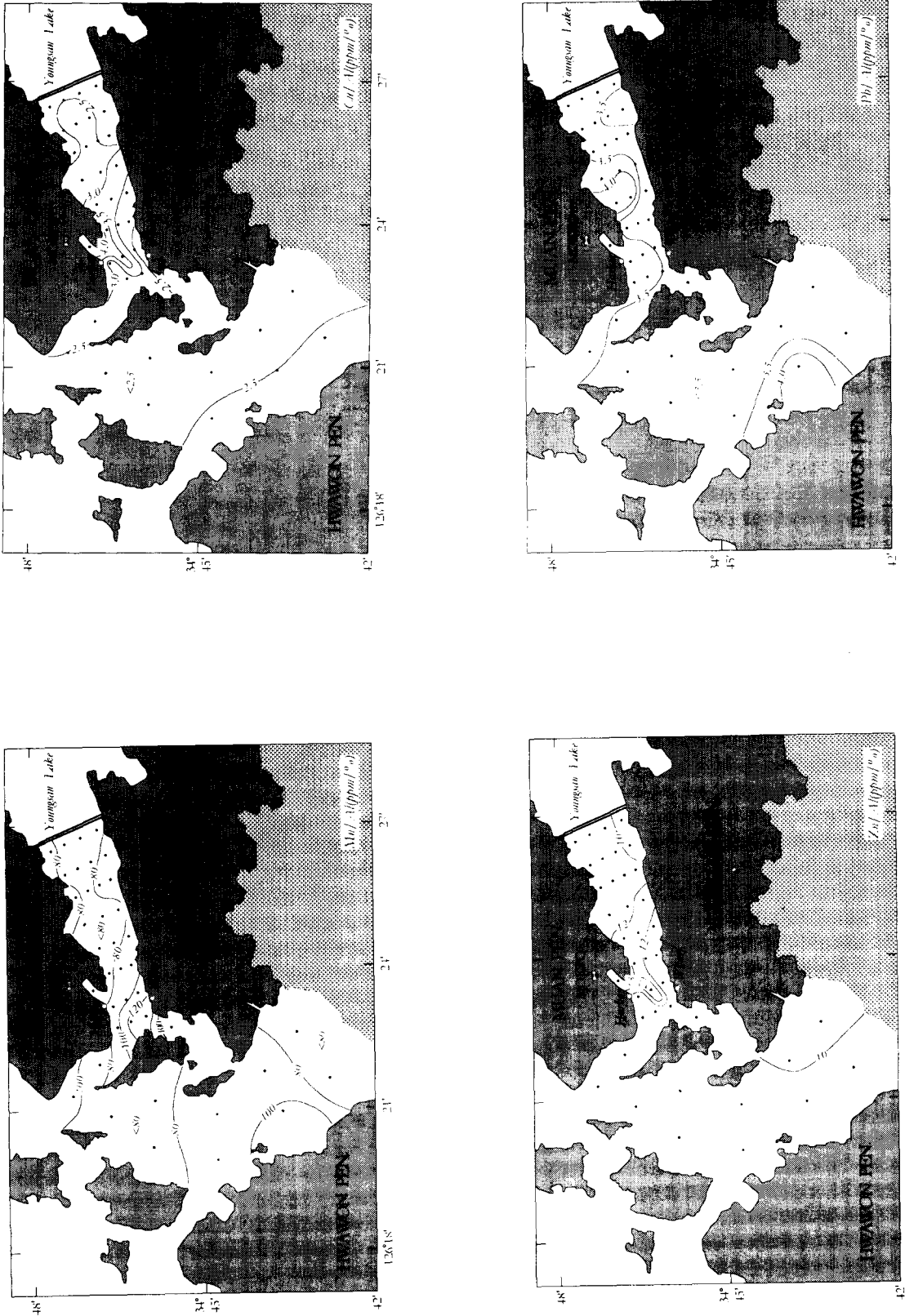


Fig. 6. Schematic maps showing the distribution of metal/Al ratios for Mn, Cu, Zn and Pb in surface sediments of the Youngsan Estuary.

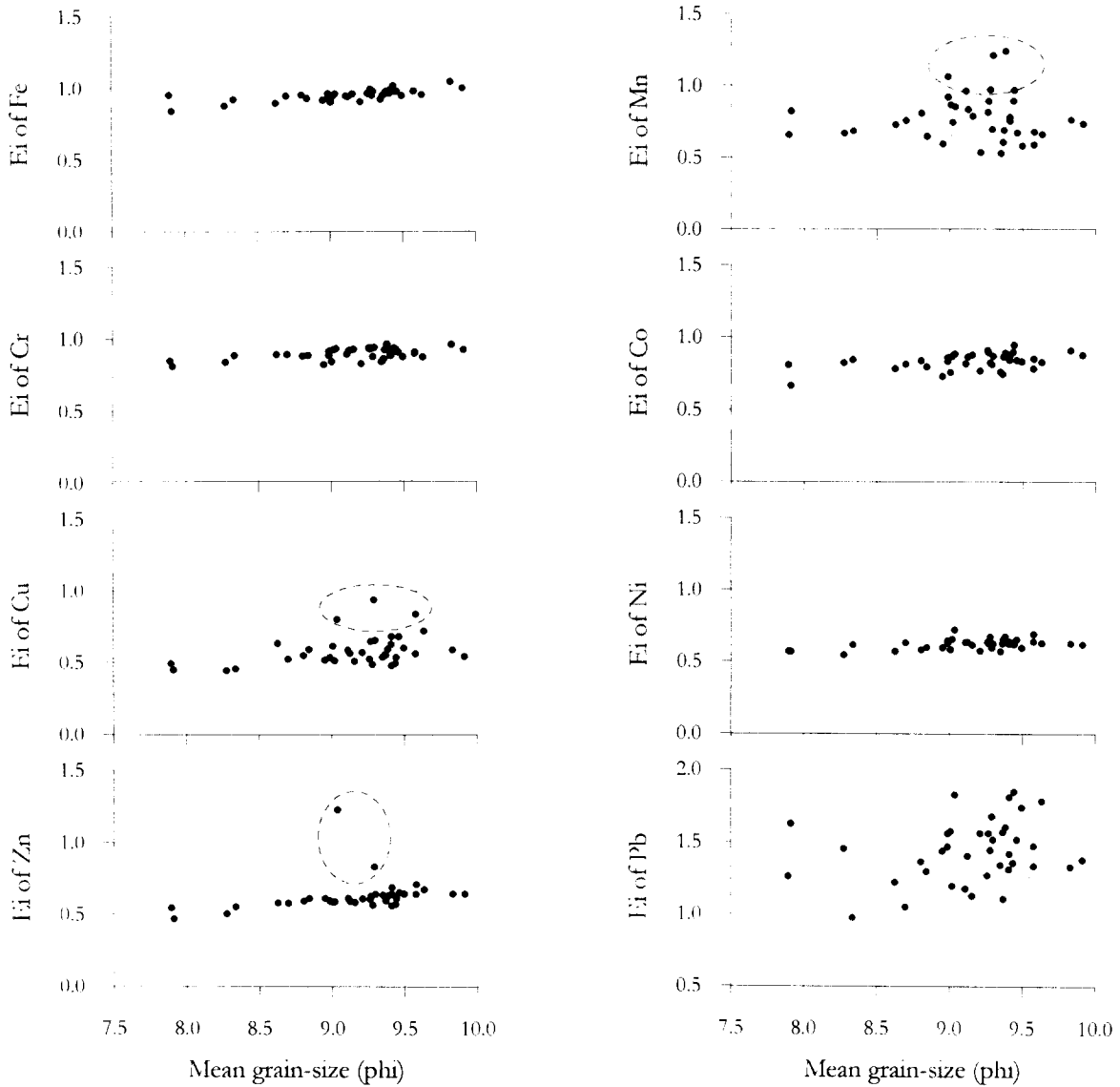


Fig. 7. The enrichment ratios (E_i) of each analysed metal in the Youngsan estuarine sediments.

다.

한편, 퇴적물에서 중금속 함량은 오염물질의 유입과 같은 인위적인 영향을 받을 경우 자연 상태보다 더 농축되어 있을 수 있으며, 이러한 경우 농축비를 이용함으로써 인위적인 영향을 파악할 수 있다 (Li, 1981; 조 등, 1993). 본 연구에서는 지각물질 중의 중금속 함량을 (Martin and Whitfield, 1983) 표준으로 삼아 퇴적물의 중금속 농축비를 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 금속의 농축비는 납을 제외하면 대부분의 시료에서 1 이하로 나타나 오염물질 유입에 의한 농축이 연구지역에서 활발하지 않음을 보여준다. 그러나, 망간의 경우 영암반도 선착장 주변의 시료에서, 그리고 구리와 아연의 경우 목포항에 인접한 시료에서 상대적으로 높은 농축비를 보여 중금속

의 오염이 국지적으로 진행되고 있음을 시사한다. 대부분의 시료에서 1 이상의 농축비를 나타낸 납은 산업화 이후에 주로 대기를 통해 환경으로 다량 유출된 원소로서 (Bruland et al., 1974; Nriagu, 1978), 제시된 납의 농축비는 특히 화석연료 사용 등으로 인한 납의 유입이 지속적으로 이루어진 결과로 판단된다.

3.4 중금속 분포의 조절요인

연구지역 퇴적물의 중금속 함량을 조절하는 요인을 보다 객관적으로 해석하기 위하여 R-mode 요인분석을 실시하였다. 요인분석의 결과는 Table 3에 나타내었으며, 총 분산의 84.8%를 설명하는 3개의 요인을 취하였다.

Factor 1은 총 분산의 60.9%를 설명하는 요인으로서

Table 3. The Varimax-rotated R-mode factor pattern

	Factor1	Factor2	Factor3	Communality
Al	0.87	0.31	-0.25	0.91
Fe	0.94	0.26	-0.06	0.97
Mn	0.26	0.06	0.90	0.88
Co	0.88	0.18	0.23	0.86
Cr	0.95	0.23	0.14	0.97
Cu	0.32	0.83	-0.14	0.82
Ni	0.80	0.41	0.13	0.83
Zn	0.25	0.86	-0.02	0.80
Pb	0.22	0.76	0.06	0.64
Mz	0.84	0.36	0.03	0.83
C _{org}	0.54	0.38	-0.61	0.81
variance	60.9	13.9	10.0	
cumulative		74.8	84.8	

알루미늄, 철, 코발트, 크롬 및 니켈이 평균입도와 함께 높은 적재값(loadings value)을 나타낸다. 이 금속들은 앞서 토의된 바와 같이 퇴적물의 입도는 물론 금속간에도 서로 밀접한 관련성을 보이며 (Fig. 3, Table 2), 따라서 이들 금속의 함량을 공통적으로 조절하는 Factor 1은 입도요인으로 해석된다.

Factor 2는 구리, 아연 및 납의 적재값이 높은 요인으로 총 분산의 13.9%를 설명한다. 구리, 아연 및 납은 소위 오염형 원소로서 인간활동에 의해 환경으로 쉽게 유출되며, 오염으로 인한 이들 금속의 농축은 여러 연구를 통해 보고되어 왔다 (Förstner and Wittmann, 1981; Jung et al., 1996; 조와 김, 1998). 연구지역에서 구리, 아연, 납의 알루미늄 함량비는 오염물질의 배출 가능성이 큰 목포항과 항구 주변의 산업시설, 접안시설 및 조선소와 인접한 지역의 시료에서 높으며 (see Fig. 6), 입도와의 미약한 관련성, 농축비의 공간적 분포에서 나타난 현상을 종합해 볼 때 Factor 2는 오염요인으로 판단된다.

한편, Factor 3은 망간에 대해서만 높은 적재값을 갖는 요인으로 총 분산의 10.0%를 설명한다. 퇴적물에서 망간은 다량이 산화물 성분과 결합되어 있으며 (Gibbs, 1973; Zhang et al., 1988), 우리나라의 금강 하구 및 남해 연안 퇴적물에서 망간의 화학적 존재형태는 산화물 부분이 전체의 각각 67%와 56%를 차지하는 것으로 보고된 바 있다 (조 등, 1994; 최 등, 1996). 연구지역 퇴적물에서 망간은 퇴적물의 입도 및 유기탄소 함량, 그리고 타 금속간에 아무런 관련성을 보이지 않으며 (Table 2), 이러한 현상은 아마도 퇴적물내 망간의 존재형태가 타 금속과 다른데서 기인한 것으로 판단된다. 따라서 Factor 3은 망간의 존재형태와 관련되는 망간산화물 요인으로 해석될 수 있을 것이다.

4. 요약 및 결론

영산강 하구에 분포하는 퇴적물내 중금속의 함량 및 분포를 이해하기 위하여 40개의 표층퇴적물을 채취하

였으며, 이 퇴적물을 대상으로 입도, 유기탄소 및 중금속(Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Zn 및 Pb)을 분석하였다.

퇴적물의 입도는 영암반도 남서쪽에 위치한 1개의 사실 퇴적물을 제외하면 7.9~9.9 ϕ 범위로 매우 세립하고 단조로우며, 이는 하구연 건설로 인해 연구지역이 자연적인 하구 환경에서 반폐쇄적인 만의 형태로 변한 후의 퇴적작용을 반영한 것으로 판단된다. 퇴적물의 유기탄소 함량은 평균 1.07%로 우리나라 주변의 다른 지역 퇴적물보다 비교적 높으며, 퇴적물의 입도와 관련성을 보여 이 환경에서 미세한 세립 퇴적물의 영향을 반영하였다.

중금속의 함량은 우리나라 연안 퇴적물에서 보고된 것에 비할 때 철 및 크롬이 약간 높고 나머지 금속은 비슷한 수준이다. 분석된 중금속 가운데 철, 코발트, 크롬 및 니켈은 입도와 양호한 관련성을 나타내었으며, 반면에 망간, 구리, 아연 및 납은 입도와의 관련성이 미약한 대조적인 양상을 보였다. 입도와 불량한 관계를 나타낸 중금속의 알루미늄 함량비를 검토한 결과 망간은 영암반도의 북서부 해역에서, 구리와 아연은 목포항 주변해역에서, 그리고 납은 목포항 연안과 화원반도 연안에서 높은 함량비를 보여 육지로부터의 영향을 시사하였다.

연구지역 퇴적물에서 중금속의 함량과 분포를 조절하는 요인을 객관적으로 해석하기 위하여 R-mode 요인분석을 실시한 결과 철, 코발트, 크롬 및 니켈은 입도의 영향을, 그리고 구리, 아연 및 납은 오염의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 한편, 망간은 육지로부터 유입되는 물질의 영향을 받고 있으나 앞의 두 가지 요인에 의해 설명될 수 없고 하나의 독립적인 요인에 의해 설명된다. 이는 망간의 지구화학적 특성이 타 금속과 다른 현상에서 비롯된 것으로 퇴적물내 존재형태와 관련되는 망간산화물 요인으로 해석되었다.

감사의 글

바쁘신 중에도 자동입도분석기를 이용할 수 있도록 협조해 주신 광주대학교 양성렬 교수께 감사드립니다. 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- 수산진흥원, 1983, 한국연안 어장 보전을 위한 환경오염 조사, 사업보고, 58호.
- 이창복, 박용안, 최진용, 김기범, 1989, 한국 동남해역 대륙붕과 대륙사면 표면퇴적물의 분포와 특성, 한국해양학회지, 24, 39~51.
- 정명선, 1992, 목포 연안역 개발에 따른 연안수역 변화에 관한 연구, 한국해양대학교 박사학위논문, 124pp.
- 조영길, 1994, 한반도 주변해역 퇴적물 중 금속원소의 분포와 기원에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 262pp.
- 조영길, 김주용, 1998, 영산강 하상퇴적물의 중금속 함량, 한국환경과학회지, 7권 3호 281~290.
- 조영길, 이창복, 박용안, 김대철, 강효진, 1993, 황해 동

- 부 대륙붕과 한반도 서해안 표층퇴적물의 지구화학적 특성, 한국제4기학회지, 7, 69~92.
- 조영길, 이창복, 최만식, 1994, 남해 대륙붕 표층퇴적물 중 중금속 원소의 분포 특성, 한국해양학회지, 29, 338~356.
- 최만식, 이석훈, 이창복, 조영길, 1996, 금강 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성, 한국제4기학회지, 10, 27~52.
- 최병호, 1984, 영산강 하구의 방조제 건설에 따른 조위 변화, 대한토목학회 논문집, 4, 113~124.
- Bordovskiy, O.K., 1965, Sources of organic matter in marine basins, *Mar. Geol.*, 3, 5~32.
- Bruland, K.W., K.K. Bertine, M. Koide and E.D. Goldberg, 1974, History of metal pollution in Southern California coastal zone, *Environ. Sci. Technol.*, 8, 425~431.
- Folk, R.L., 1968, *Petrology of Sedimentary Rock*, Hemphill's, Austin, Texas, 170pp.
- Förstner, U. and G.T.W. Wittmann, 1981, *Metal Pollution in the Aquatic Environment*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 486pp.
- Gibbs, R.J., 1973, Mechanisms of trace metal transport in rivers, *Science*, 180, 71~73
- Horowitz, A.J., 1991, *A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry*, Lewis Publishers, Inc., Chelsea(MI), 136pp.
- Jung, H.S., C.B. Lee, Y.G. Cho and J.K. Kang, 1996, A mechanism for the enrichments of Cu and depletion of Mn in anoxic marine sediments, Banweol intertidal flat in Korea, *Mar. Pollution Bull.*, 32, 782~787.
- 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.
- Lee, C.B., Y.A. Park, H.J. Kang and D.C. Kim, 1991, Geochemical Characteristics of the continental shelf and slope sediments off the southeastern coast of Korea, *Korean J. Quat. Res.*, 5, 15~31.
- Lee, S.H. and K.W. Lee, 1983, Heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea, *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18, 49~54.
- Li, Y.H., 1981, Geochemical cycles of elements and human perturbation, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, 2073~2084.
- Luoma, S.N., 1990, Processes affecting metal concentrations in estuarine and coastal marine environments. In: *Heavy Metals in the Marine Environment*, edited by R.W. Furness and P. S. Rainbow, CRC Press, INC., Boca Raton, Florida, pp. 51~66.
- Martin, J.M. and M. Whitfield, 1983, The significance of river input of chemical elements to the ocean. In: *Trace Metals in Sea Water*, edited by C.S. Wang, E. Boyle, K.W. Bruland, J.D. Burton and E.D. Goldberg, Plenum, New York, pp. 265~298.
- McBride, E.F., 1971, Mathematical treatment of size distribution data. In: *Procedures in Sedimentary Petrology*, edited by R.E. Carver, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 109~127.
- Montoura, R.F.C., A. Dickson and J.P. Riley, 1978, Complexation of metals with humic materials in natural water, *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 6, 387~408.
- Nriagu, J.O., 1978, *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*, Elsevier, Amsterdam.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons, 1972, *A Practical Handbook of Seawater Analysis*, Fish. Res. Board of Canada, 310pp.
- Zhang, J., W.W. Huang and J.M. Martin, 1988, Trace metals distribution in Huanghe (Yellow River) estuarine sediments, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 26, 499~516.