「The Sea」 Journal of the Korean Society of Oceanography
Vol. 5, No. 2, pp. 131—140, May 2000

광양만 표층퇴적물의 중금속 함량 및 분포

조영길* · 이창복[1] · 고철환[1]
목포대학교 해양자원학과, [1]서울대학교 해양학과

Heavy Metals in Surface Sediments from Kwangyang Bay, South Coast of Korea

YEONG-GIL CHO*, CHANG-BOK LEE[1] AND CHUL-HWAN KOH[1]
Department of Marine Resources, Mokpo National University, Chonnam 534-729, Korea
[1]Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

광양만에서 채취된 91개 표층퇴적물에서 철, 망간, 크롬, 코발트, 구리, 니켈, 아연 및 납의 함량을 측정하였다. 분석된 금속 가운데 철, 크롬, 니켈 및 아연의 함량은 대부분의 시료에서 입도 의존적인 경향을 나타낸 반면 망간, 코발트, 구리 및 납은 입도와의 관련성이 뚜렷하지 않고 육지에 인접한 해역에서 국지적인 증가를 보였다. 평균입도, 유기탄소 및 각 금속을 변수로 한 R-mode 요인분석 결과도 철, 크롬, 니켈 및 아연이 입도, 유기탄소와 함께 총 분산의 약 61%를 설명하는 factor 1에서 높은 적재값을 나타내 나머지 금속의 함량을 조절하는 요인과 구분되었다. 각 금속의 공간적 분포와 퇴적물의 입도, 유기탄소 및 금속간의 관련성 등을 종합적으로 검토한 결과 철, 크롬, 니켈 및 아연은 퇴적물의 입도에 의해서, 그리고 망간, 코발트, 구리 및 납은 해당 중금속의 배출과 관련된 해안 및 육지의 오염활동에 의해서 그 함량이 지배되는 것으로 파악되었다. 한편, 섬진강 부유물을 표준으로 삼아 계산된 농축비의 공간적 분포를 토대로 중금속의 축적이 활발한 지역이 구분되었는 바, 여수반도 북서쪽 연안에는 특히 아연 및 납이, 묘도 남수로를 포함한 여수반도 중북부 해안에는 망간, 코발트 및 구리가 농축된 것으로 드러났다.

Heavy metals (Fe, Mn, Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Pb) were determined in ninety-one surface sediments collected from Kwangyang Bay, south coast of Korea. The data show that the Fe, Cr, Ni, and Zn distribution in the bay can be described by metal vs. grain size relationship. However, the distribution pattern of Mn, Co, Cu and Pb were found to be changed because they are anthropogenically enriched to sediment. Correlation matrix and R-mode factor analyses revealed that two important factors controlling the distribution of metals in the bay are grain size and anthropogenic input.

서 론

1970년대 이후 지금까지 광양만 주변의 해안 및 육지에는 국토종합개발사업의 일환으로 남해서부권역 거점항만 및 국가공업단지 조성을 위한 공사가 지속되어 왔다. 그 결과 만의 북부에는 광양제철소와 광양공단, 태인공단, 황금공단 및 초남공단이 개발되었고, 서부와 남부에는 각각 율촌공단과 여천공단이 조성되었다. 해안 곳곳에는 컨테이너부두를 비롯한 각종 접안시설이 확장 및 신설되었으며, 현재에도 임해공업벨트 조성을 위한 계속사업으로 대규모 산업시설이 건설 중에 있거나 계획에 있다.

그러나 해안의 지형을 인위적으로 변형하여 단지화하는 임해공단 개발사업은 개발이 주는 혜택만큼 자연을 돌이킬 수 없는 상태로 변화시키며, 그러한 변화는 개발 이전의 가시적인 것뿐만 아니라 해양환경 및 생태계와 같은 실로 다양한 형태의 변화를 수반한다. 예컨대, 광양제철소 건설을 위한 섬진강 삼각주의 간척사업과 항로개설에 따른 수로의 준설은 개발의 초기부터 조류의 특성을 변화시켰으며, 결국 해저 퇴적상 변화와 함께 저서환경의 생태계 변화를 초래하였다(Choi and Koh, 1984; 포항종합제철, 1988; 신과 고, 1990). 또한 대규모의 간척과 매립으로 인해 만 전체의 자정능력은 급격히 저하되었고, 인, 질소 및 COD 등을 지표로 한 오염도 분석자료는 광양만을 이미 환경보전 장해지역으로 진단하기에 이르렀다. 해안의 크고 작은 공단과 제철소, 화력발전소 등의 각종 산업시설에서 배출되는 폐기물 양은 급증하고 있으며, 지난 1982년 '특별관리해역'으로 지정된 이후로 해수의 수질은 3등급으로 저하되었고, 외해로 연결되는 여수해만 또한 2등급 해수로 수질이 악화되어 어획량 감소와 같은 오염피해를 경험하고 있다(포항종합제철, 1982, 1988; 환경부, 1996).

육지로부터 광양만으로 배출되는 산업폐수 중에는 중금속을 포함한 각종 오염 성분이 포함되어 있을 것이며, 그러한 성분은 해수와 접하면서 자연스럽게 수주에 확산될 것이다. 시간이 감에

*Corresponding author: ygcho@chungkye.mokpo.ac.kr

따라 해수내의 오염성분은 물리 · 화학적인 과정을 통해 수주로부터 침전되어 결국 퇴적물의 일부를 구성하게 되며, 따라서 광양만 해저에 쌓인 퇴적물에는 해수와 달리 오염물질 유입에 따른 장기적인 오염의 흔적을 반영할 수 있다. 이러한 퇴적물에서 오염성분을 분석하고 그것의 분포 및 함량을 연구하는 것은 시·공간적 변화가 큰 수질에 비해 만 전체의 보다 오랜 기간 동안의 오염양상이 파악될 수 있다는 점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 본 연구는 퇴적물의 오염성분 중 수종의 중금속 원소를 분석함으로써 그것의 분포특성을 파악하고 아울러 중금속을 지표로 광양만의 저서환경 건강을 평가하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

연구에 사용된 시료는 연안 저서환경 건강평가를 위한 연구의 일환으로 1997년 2월과 4월에 광양만 해저에서 채취된 표층퇴적물로 총 91개가 분석에 선정되었다(Fig. 1). 해저 퇴적물은 van-Veen 채니기를 이용하여 채취하였으며, 이 퇴적물에서 분석항목에 따라 별도의 부시료를 취한 후 실험실에서 분석에 필요한 처리를 추가하였다.

퇴적물의 입도는 적당량의 원시료에 과산화수소와 묽은 염산을 차례로 넣어 유기물과 탄산염을 제거한 후 먼저 4ϕ 체를 이용하여 조립질과 세립질 퇴적물로 분리하였다. 분리된 조립질 부분의 시료는 표준체를 이용한 건식체질 방법으로 분석하였으며, 세립질 부분에 대해서는 Micromeritics사의 자동입도분석기(Sedigraph-5100)로 분석하였다. 분석결과는 시료 전체를 1ϕ 간격으로 입도별 백분비를 구한 후 Folk(1968)와 McBride(1971)의 방법에 따라 통계처리 하였다.

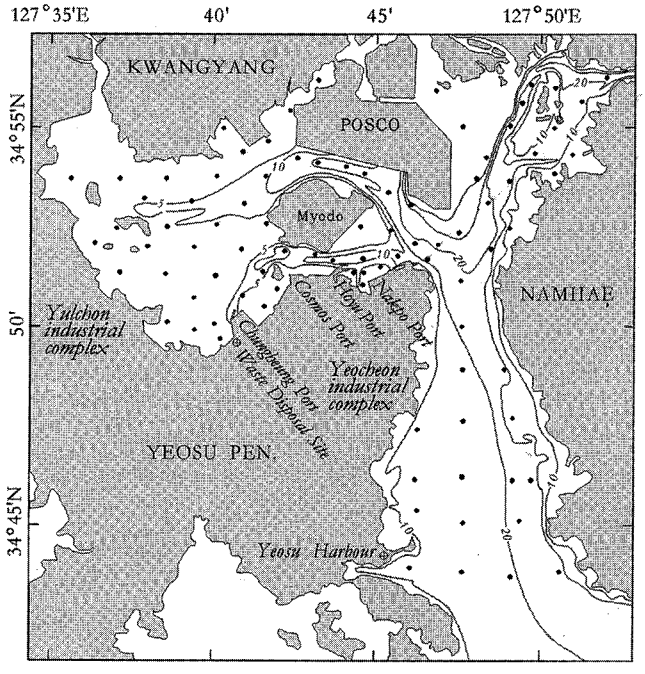

Fig. 1. Map of the Kwangyang Bay, showing the sampling sites and the depth contours (in meter).

퇴적물의 화학분석은 유기탄소 및 중금속 원소에 대해서 이루어 졌으며, 분석에는 원시료를 70°C 이하의 건조로에서 말린 후 연마한 것을 사용하였다. 유기탄소는 일정량의 분말시료에 중크롬산칼륨($K_2Cr_2O_7$)과 황산(H_2SO_4)을 혼합하여 만든 산화제를 과량으로 넣어 유기탄소를 산화시키고 남은 잔여 산화제 양을 황산암모늄제2철[$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$]로 적정하는 역적정법으로 분석하였다(Strickland and Parsons, 1972). 퇴적물내 중금속은 약 0.2 g의 분말시료를 180°C 가열판에서 혼합산(HF/$HClO_4$) 원액으로 산분해하고 건조시킨 다음 0.1 N 질산으로 중금속을 용출한 용액을(Totland, 1992; 최 등, 1994) 유도결합 플라즈마 방출분광기(ICP-AES)로 측정하였다.

결과 및 고찰

퇴적물의 입도

광양만에 분포하는 해저퇴적물은 시료 전체의 93%가 4ϕ (63.5 μm) 보다 작은 입도에 해당되어 전반적으로 세립퇴적물이 우세하였다. 실트입도에 해당되는 4~8ϕ 퇴적물은 약 30%를 차지하였으며, 전체의 64%가 점토입도인 8~10ϕ 범위에 속하였다. 입도성분 중 모래의 함량은 0.2~79.4%로 변화하였고(평균 14.1%), 실트와 점토는 각각 7.9~54.0%(평균 37.5%)와 11.3~68.4%(평균 48.4%) 범위의 함량을 보였다.

퇴적물의 입도성분을 Folk(1968)의 삼각좌표에 도시하면 연구지역 표층퇴적물은 크게 점토질퇴적상(clay facies), 니질퇴적상(mud facies), 사니질퇴적상(sandy mud facies), 니사질퇴적상(muddy sand facies) 등 4개 퇴적상으로 구분되며, 시료의 ⅔ 이상이 모래가 10% 미만인 니질퇴적상에 해당된다. 가장 조립한 니사질퇴적상은 섬진강 하구역을 비롯한 광양제철소 주변해저와 여수해만 남해도 해안에 국지적으로 분포하며, 모래의 함량이 10~50%인 사니질퇴적상은 주로 만 내의 수로를 따라 발달되어 있다. 그 밖의 대부분 지역은 실트와 점토의 비가 비슷한 니질퇴적상으로 이루어져 있으며, 이 퇴적상은 여수반도 해안을 따라 여수해만으로 이어진다(Fig. 2).

조수 퇴적환경에서 퇴적물 분포는 무엇보다 조류에너지의 세기에 따라 결정되어지며, 이와 관련하여 박 등(1984)은 광양만내 퇴적상 분포를 역질, 사질, 니사질, 사니질 및 니질로 구분하여 설명한 바 있다. 그러나 섬진강 삼각주에 광양제철소가 건설되고 이후 부수적인 매립 및 수로의 준설로 인해 만 내 조류에너지 분포는 공간적으로 크게 변하였으며(포항종합제철, 1988), 해수유동의 변화에 따른 해저지형 및 퇴적상 변화가 보고되었다(김과 김, 1991; 김 등, 1996). 본 연구에서 드러난 표층퇴적상은 광양제철소 건설 이전에 비해(박 등, 1984) 사질 및 역질의 퇴적상이 쇠퇴하고 만 서부의 안쪽에서 점토질 퇴적상이 발달되는 등 만 전체에 걸쳐서 입도의 세립화가 진행되고 있음을 보여주고 있다. 이러한 현상은 광양만에서 퇴적물의 이동 및 퇴적이 일차적으로 매립에 따른 조수면, 조량 및 조류속의 감소효과와 낙조류 우세의 비대칭 현상을(포항종합제철, 1988) 받고 있는 것으로 해석된다.

유기탄소 함량

퇴적물 중의 유기탄소 함량은 0.4~2.0% 범위로 나타났으며,

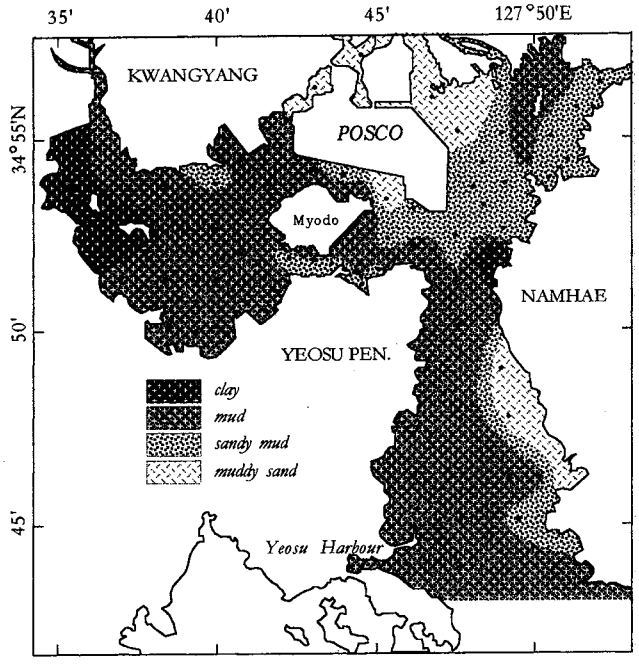

Fig. 2. Distribution of surface sedimentary facies.

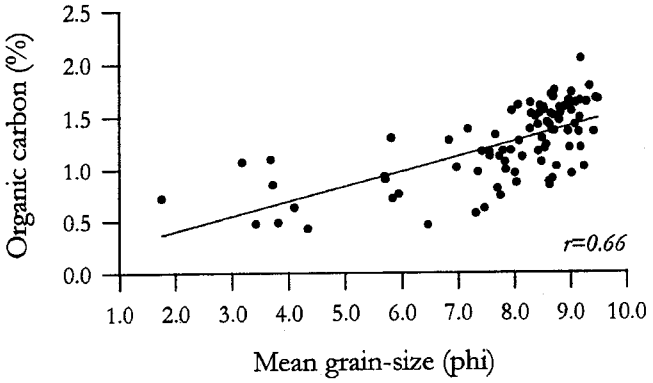

Fig. 3. Pair diagram between organic carbon and mean grain-size of sediments.

평균함량은 1.2%로 경기만 및 서해안 조간대 퇴적물에 비해(Lee *et al.*, 1985; 조 등, 1993) 높았다(Table 1). 시료간에는 약 30% ($\sigma_n/\bar{x}$)의 함량 변화를 보였으며, 모래가 50% 이상 포함된 시료에서 유기탄소 함량은 평균 0.7%, 모래가 10~50%인 시료에서 평균 1.0%, 그리고 10% 이하의 모래를 포함한 시료에서는 평균 1.4%로 모래의 함량이 낮아지면서 증가하였다.

퇴적물의 세립성분 함량이 높아짐에 따라 유기물 함량이 점차 증가하는 입도관련성은 국내외 여러 연구를 통해 보고된 현상으로(Bordovskiy, 1965; 이 등, 1989; Cho *et al.*, 1999), Fig. 3에 도시된 유기탄소 함량과 입도와의 관계는 광양만 퇴적물에서도 유기물 함량이 입도의 영향을 받고 있음을 지시한다. 따라서 유기탄소의 공간적인 분포는 퇴적물의 입도분포와 유사하게 만의 서쪽 해안에 인접한 지역에서 >1.5%로 가장 높고, 만의 입구와 동부지역에서 낮은 함량을 보이다가 여수해만을 따라 외해로 가면서 약간 높아지는 모습으로 특징지워진다. 그러나 비록 같은 입도범위의 퇴적물이라 하더라도 여수해만 시료에 비해 광양만 서부의 시료에서 상대적으로 높은 유기탄소 함량을 나타내며, 이러한 차이는 국지적으로 유기물 분포에 영향을 미치는 또 다른 요인이 내재되어 있음을 시사한다.

수질기준 3등급 수역으로 지정된 광양만 서부해역은 단위 면적당 오염부하량이 약 202 kgBOD/km^2/day로 전국평균보다 5배 높다(환경부, 1995). 오염수역에서 유기물의 분해속도는 일반적으로 오염부하량에 반비례하며(Degens and Mopper, 1976), 따라서 만의 서부해역 퇴적물에서 유기물의 보존효율은 오염부하량이 낮고 해수의 이동이 더 원활한 광양만 동부해역 및 여수해만과 다를 수 있다. 이렇게 볼 때 광양만 퇴적물 중의 유기탄소 함량은 결국 퇴적환경의 차이와 입도에 의한 영향을 동시에 받은 것으로 여겨지며, Fig. 3에 나타난 입도에 따른 유기탄소 함량의 다소 폭넓은 변화도 그러한 현상을 반영한 것으로 판단된다.

중금속의 함량 및 분포

총 91개 퇴적물에서 나타난 각 금속별 함량의 범위와 평균은 철 1.0~5.0%(평균 3.8%), 망간 308~1463 ppm(909 ppm), 코발트 4~17 ppm(13 ppm), 크롬 16~93 ppm(67 ppm), 구리 4~44 ppm (19 ppm), 니켈 7~42 ppm(33 ppm), 아연 25~184 ppm(95 ppm), 그리고 납이 9~765 ppm(35 ppm)이었다. 따라서 광양만 퇴적물의 중금속 함량은 한반도 주변의 타 지역 퇴적물에 비할 때 철, 망간 및 납은 높으며 구리는 낮은 값이다(Table 1). 시료간 함량의 변화는 납이 219%($\sigma_n/\bar{x}$)로 가장 컸고, 구리와 망간, 아연 및 크롬은 20~30% 그리고 나머지 금속은 20% 이내로 비교적 작았다.

Table 1. Average metal contents of sediments from the Kwangyang Bay, together with those of other areas for comparison (unit in [1]%, [2]ppm, [3]phi)

	[1]Al	[1]Fe	[2]Mn	[2]Cr	[2]Co	[2]Ni	[2]Cu	[2]Zn	[2]Pb	[1]C_{org}	[3]Mz	n
Keum Estuary[a]	7.7	2.9	655	67	13	34	23	79	-	0.7	5.4	12
Youngsan Estuary[b]	8.3	4.1	673	77	13	37	23	96	28	1.1	9.1	39
Kyeonggi Bay[c]	8.8	3.5	693	-	74	67	33	-	31	0.4	-	7
Jinhae Bay[d]	-	3.6	386	59	12	27	30	128	37	-	-	23
Kwangyang Bay[e]	8.2	3.8	909	67	13	33	19	95	35	1.2	7.9	91
South Sea[f]	5.1	2.5	409	53	12	26	11	62	27	0.6	5.2	89
Seomjin River SPM[g]	11.8	4.5	1343	44	15	27	33	123	49	-	-	-

Source of data: [a]조 등(1993); [b]조와 박(1998); [c]Lee *et al.*(1985); [d]Lee and Lee(1983); [e]This study; [f]조 등(1994); [g]조(unpublished data)

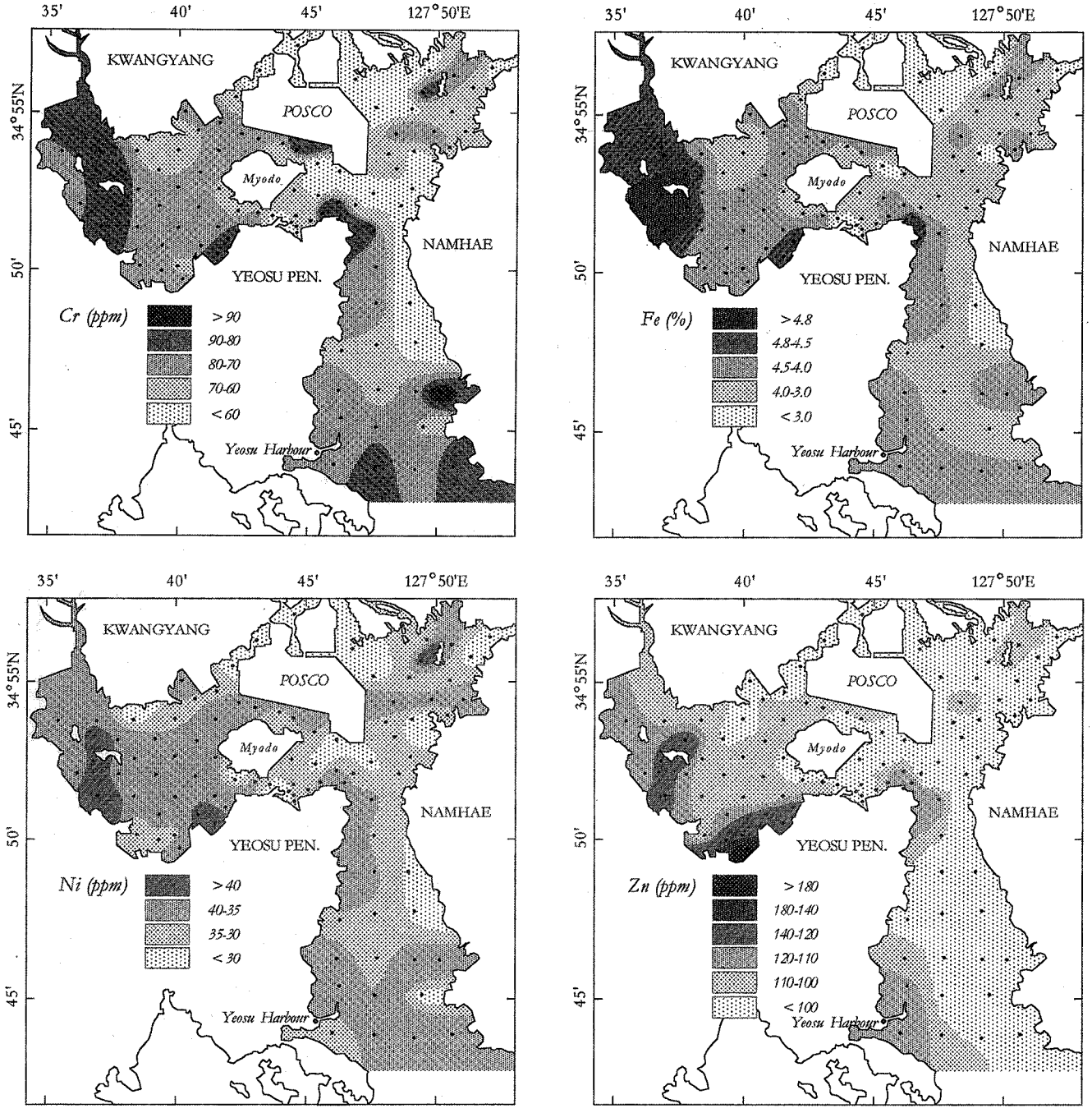

Fig. 4. Schematic maps showing the distribution of the analysed metals.

Fig. 4에는 중금속의 공간적 분포가 도시되었다. 각 금속의 함량은 국지적으로 높은 지역을 제외하면 전반적으로 만의 서부와 여수반도에 인접한 해역에서 높고 광양제철 북부해역, 묘도 동쪽에서 동부로 이어지는 해역과 남해도 연안에서 낮아지는 경향을 나타낸다. 철은 만의 서부해안에서 >4.8%로 가장 높으며, 니켈은 만의 서쪽해안 및 중흥부두에서, 그리고 크롬은 남해도 남서부 해안의 한 정점을 제외하면 철과 비슷하게 만의 서쪽해안과 중흥부두 및 여수반도 북동부 해안에서 높은 함량을 보인다. 아연의 함량은 여수반도 북서부 해안과 만의 서쪽 해안에서 높고, 남은 여수반도 북서부 해안에서 765 ppm의 매우 높은 함량이 특징적이다. 망간 또한 여수반도 북서부 해안에서 1463 ppm의 높은 함량을 나타내며, 여수반도 북동부 해안 및 여수항 주변에서도 >1300 ppm으로 높다. 구리의 함량은 타 금속과 달리 호유부두가 위치한 여수반도 북부해안과 여수항 주변해역에서 가장 높으며, 코발트는 광양만 북동부 해역과 묘도 서부해역에서 다소 높은 함량을 나타낸다.

퇴적물에서 금속의 함량은 일반적으로 퇴적물 입자의 크기에 따라 차이를 보이며(Salomons and Förstner, 1984; Horowitz,

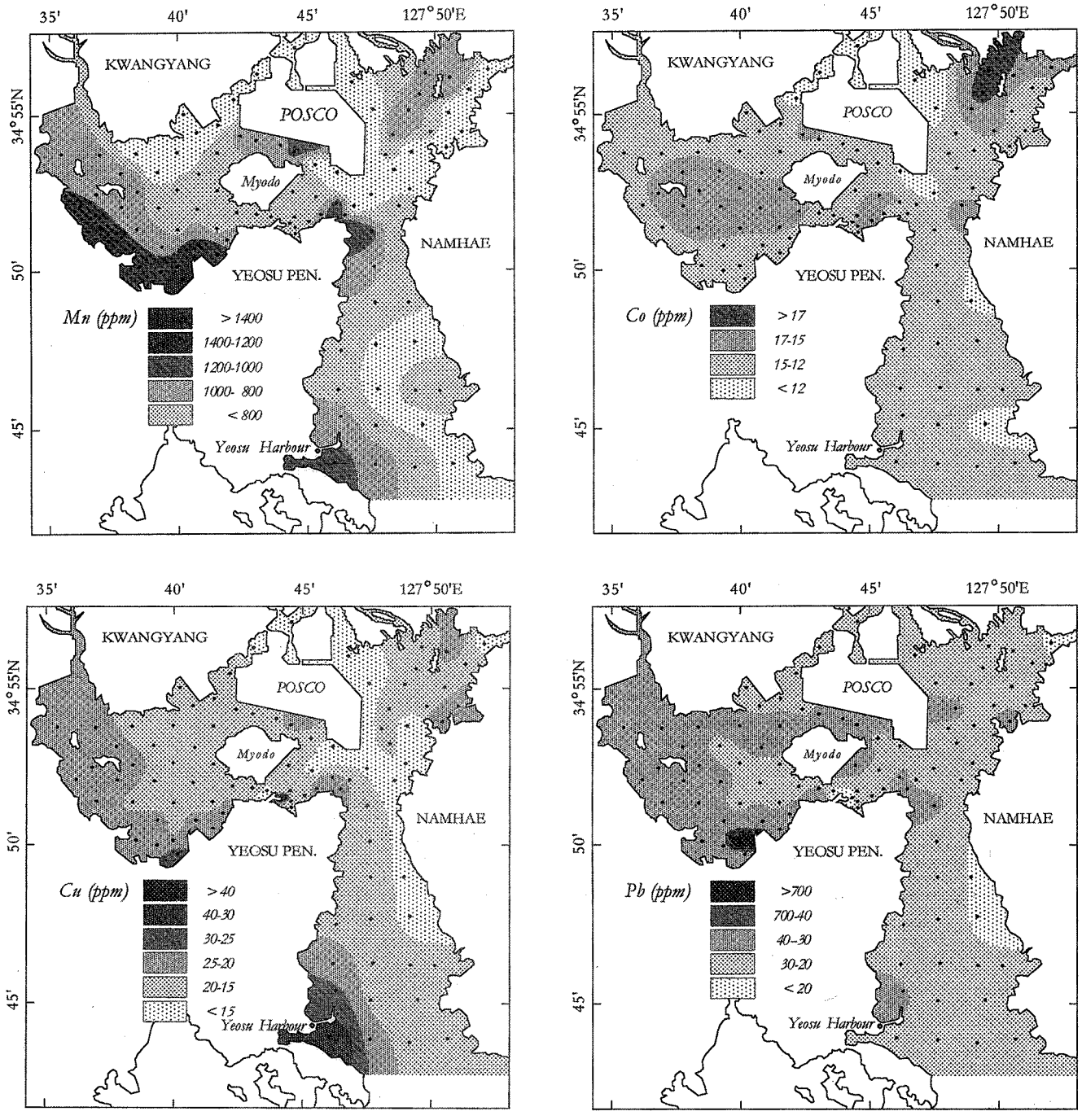

Fig. 5. Pair diagrams between heavy metals and mean grain-size of sediments.

1991; Cho *et al.*, 1999), 그렇기 때문에 금속의 공간적 분포는 퇴적물의 입도에 의해 조절될 수 있다. Fig. 5에 도시된 중금속 함량과 입도의 관계는 비록 뚜렷하진 않으나 연구지역에서도 금속의 분포가 대체로 입도의 영향을 받고 있음을 보여준다. 그러나 망간, 코발트, 구리 및 납에 있어서는 철, 크롬, 니켈 및 아연에 비해 입도와의 관련성이 미약하며, 특히 망간 및 코발트의 경우 대다수의 시료가 선형의 관계로부터 크게 벗어난다. 이러한 현상은 여수반도 연안에 인접한 시료에서 함량이 높은 결과에 기인된 것으로 퇴적물내 중금속의 유입이 국지적으로 입도와 무관하게 이루어지고 있음을 시사한다.

한편, Table 2에는 유기탄소 및 금속들 사이의 상관계수가 수록되었다. 철, 크롬, 니켈 및 아연은 금속간에 서로 양호한 상관관계를 나타내나 망간 및 구리는 그다지 뚜렷하지 않으며, 특히 코발트 및 납은 타 금속과 아무런 관련성을 보이지 않는다. 금속들 사이의 이러한 관계는 유기탄소에 대해서도 마찬가지며, 유기탄소와 상관계수가 0.80 및 0.75로 가장 양호한 아연 및 철과

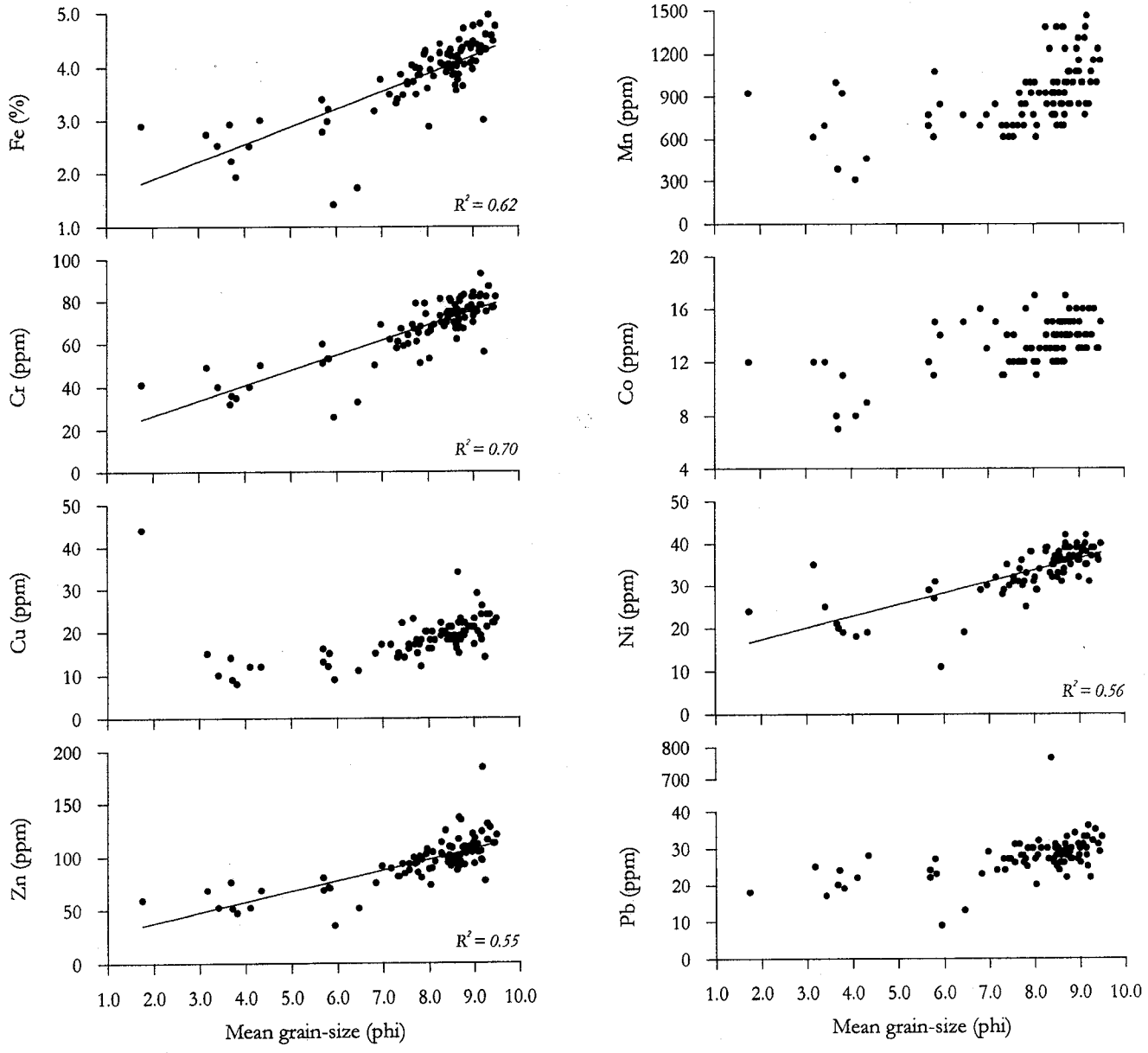

Fig. 5. Pair diagrams between heavy metals and mean grain-size of sediments.

대조적으로 코발트 및 구리는 각각 0.43과 0.11로 매우 불량한 상관관계를 보인다. 이와 같은 사실에 근거할 때 연구지역에서 망간과 구리, 그리고 코발트 및 납의 함량은 퇴적물의 입도나 유기물에 의해 지배되지 않는 것으로 판단되며, 따라서 Fig. 4에 도시된 이들 금속의 공간적 분포는 육지로부터의 유입 가능성을 뒷받침한다.

중금속 분포의 조절요인

광양만 퇴적물의 중금속 함량은 앞서 토의된 바와 같이 금속별로 입도 및 유기물의 영향을 달리 반영하고 있으며, 아울러 국지적으로 오염물질 유입의 가능성이 내재된 것으로 나타났다. 따라서 각 금속의 함량을 조절하는 보다 지배적인 요인을 파악하기 위해서는 드러난 사실을 종합적으로 검토할 필요가 있으며, 본 연구에서는 R-mode 요인분석을 통해 그러한 접근을 시도하였다.

요인분석의 결과는 Table 3 및 Table 4에 요약하였으며, 총 분산의 92%를 설명하는 5개 factor를 취하였다. factor 1은 총 분산의 60.6%를 설명하는 요인으로 철, 크롬, 니켈 및 아연이 높은 적재값(loading value)을 나타낸다. factor 1에서 적재값이 높은 금속들은 금속간에는 물론 퇴적물의 입도와도 양호한 관련성을 갖는 공통된 특징을 보이며(Table 2, Fig. 5), 따라서 이들 금속의 함량을 공통으로 조절하는 factor 1은 입도요인으로 해석된다. factor 2는 특히 망간의 적재값이 높은 요인으로 총 분산의 10.8%를 설명한다. 연구지역에서 망간의 함량이 높은 지역은 연안활동이 비교적 활발한 곳으로(Fig. 4) 가장 높은 함량을 나타낸 여수반도 북서 해안에는 폐기물 투기장 및 중흥부두가, 그리고 여수반도 북동 해안에는 낙포부두가 위치해 있다. 이와 같

Table 2. Correlation coefficients among the heavy metals

	Fe	Mn	Cr	Co	Cu	Ni	Zn	Pb	C_{org}
Fe	1.00								
Mn	0.54	1.00							
Cr	0.94	0.53	1.00						
Co	0.37	0.40	0.40	1.00					
Cu	0.58	0.56	0.54	0.27	1.00				
Ni	0.85	0.52	0.89	0.55	0.51	1.00			
Zn	0.87	0.69	0.82	0.32	0.61	0.74	1.00		
Pb	0.08	0.17	0.05	−0.01	0.05	0.03	0.19	1.00	
C_{org}	0.75	0.57	0.69	0.43	0.55	0.68	0.80	0.11	1.00

Table 3. Eigenvalues of the correlation matrix

Eigenvalues	Cumulative % of total variance explained	Proportion
6.05738	60.6	60.6
1.08162	71.4	10.8
0.85579	79.9	8.6
0.76528	87.6	7.7
0.43860	92.0	4.4
0.35777		
0.21217		
0.10145		
0.08915		
0.04078		
Sum 10.00000		

Table 4. The Varimax-rotated R-mode factor pattern

	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5	Communality
Fe	**0.91**	0.18	0.08	0.27	0.03	0.94
Mn	0.31	**0.86**	0.20	0.25	0.09	0.94
Cr	**0.93**	0.14	0.13	0.21	−0.00	0.94
Co	0.26	0.15	**0.94**	0.08	−0.02	0.99
Cu	0.32	0.27	0.08	**0.89**	0.01	0.98
Ni	**0.83**	0.10	0.33	0.25	−0.00	0.87
Zn	**0.79**	0.47	−0.00	0.25	0.12	0.92
Pb	0.04	0.07	−0.01	0.01	**0.99**	0.99
C_{org}	**0.67**	0.42	0.17	0.25	0.06	0.72
Mz	**0.84**	0.22	0.36	−0.09	0.03	0.89

은 환경에서 망간의 함량은 해안의 산업활동 및 오염물 투기에 의한 인위적인 영향을 받았을 가능성이 크며, 오염행위가 지속되면서 퇴적물내 망간의 공급이 이루어진 것으로 판단된다.

한편, factor 3은 코발트에 대해서만, 그리고 factor 4는 구리에 대해서만 높은 적재값을 나타내는 요인으로 총 분산의 각각 8.6%와 7.7%를 설명한다. 이 두 요인은 eigenvalue가 모두 1 이하로 총 분산의 작은 비율을 설명하기 때문에 다변량 분석의 통계적 의미는 제한된다고 하겠다. 그러나 각 요인이 한 변수에 대해서만 유의한 적재값을 나타낸다는 사실은 각각의 변수가 서로 독립적인 요인에 의해서 조절되고 있음을 지시하며, 이러한 사실은 타 금속과 달리 특히 광양만 북동부 해안에서 함량이 높은 코발트 분포와 호유부두 및 여천시 쓰레기 매립장이 위치한 여수반도 북부해안, 그리고 여수항에서 높은 함량을 나타낸 구리의 분포에서 뒷받침된다(Fig. 4). 국지적으로 높은 중금속 함량은 특정 중금속의 배출과 관련된 오염활동으로부터 기인할 수 있으며, 따라서 factor 3과 4는 코발트 및 구리의 농축을 지배하는 오염요인으로 생각된다.

factor 5 또한 납에 대해서만 높은 적재값을 나타내는 요인으로 총 분산의 4.4%를 설명한다. 특히 765 ppm으로 높은 한 정점을 제외하면 주로 해안에 인접한 지역에서 함량이 증가된 납의 분포는 망간, 코발트 및 구리와 같이 육지의 영향을 지시하나, 납 변수의 분산이 다른 오염요인에 의해 설명되지 않는다는 사실은 납의 유입이 타 금속과 다른 경로를 통해서 이루어지고 있음을 시사한다. 납은 다량이 대기를 통해 환경으로 유입되는 원소로 알려져 있으며(Lantzy and Mackenzie, 1979; Chester, 1990; Cochran et al., 1998), 그렇기 때문에 해저 퇴적물내 납의 함량은 별개의 독립적인 요인에 의해 조절될 수 있다. 한반도 주변 해저 퇴적물에서 중금속에 대한 연구는 납의 분포를 조절하는 요인으로 대기를 통한 오염물질의 유입 가능성을 제시하고 있으며(이 등, 1992; 조 등, 1994; Cho *et al.*, 1997), 타 금속과 다른 납의 분포는 연구지역에서도 납의 그와 같은 거동이 반영된 것으로 판단된다.

중금속의 농축비

퇴적물의 중금속 함량은 표준물질에서 나타난 값과 비교함으로써 농축의 정도를 추정할 수 있으며, 이러한 표준물질로는 흔히 지각물질이나 셰일을(Turekian and Wedepohl, 1961; Martin and Whitfield, 1983) 이용하여 왔다. 그러나 중금속 배출과 관련된 오염행위는 산업화 이후에 진행된 지역적인 현상이기 때문에 인간활동에 따른 중금속 농축은 해당지역의 근원지 물질이나 또는 기준시점 이전에 쌓인 퇴적물 중의 금속함량과 비교 및 평가되어야 한다. 본 연구에서는 근원지 물질의 중금속 함량을 파악하기 위하여 1998년 7월 광양만으로 유입하는 섬진강에서 부유퇴적물을 채취, 분석하였다(see Table 1).

섬진강 부유물은 근원지 물질의 특성을 대표한다고 볼 수 없으나, 수 차례의 강수 후 집중호우 때 채취된 까닭에 오염의 흔적이 어느 정도 제거된 하천 공급물질로 간주할 수 있다. 그러한 부유물 중의 금속함량은 하천유입물질이 퇴적된 광양만 퇴적물 중의 금속함량을 평가할 수 있는 하나의 기준이 될 수 있으며, 따라서 시료의 Al에 대한 함량비를 표준물질에서 나타나는 Al에 대한 함량비로 나눈 값을 농축비로 정의할 때 부유물을 표준물질로 삼아 각 시료에 대한 중금속의 농축비를 구할 수 있다.

Fig. 6에는 광양만 퇴적물의 금속/Al 함량비를 섬진강 부유물의 금속/Al 함량비로 나눈 각 금속의 농축비(Enrichment ratio)가 도시되었다. 금속별 농축비는 크롬과 니켈이 각각 평균 2.2와 1.8로 가장 높으며, 1.4의 농축비를 나타낸 코발트를 제외하면 나머지 금속 모두 평균 0.8~1.1 범위로 낮은 값을 나타낸다. 그러나 시료간 농축비의 변화는 철, 크롬, 니켈 및 아연이 12~16%

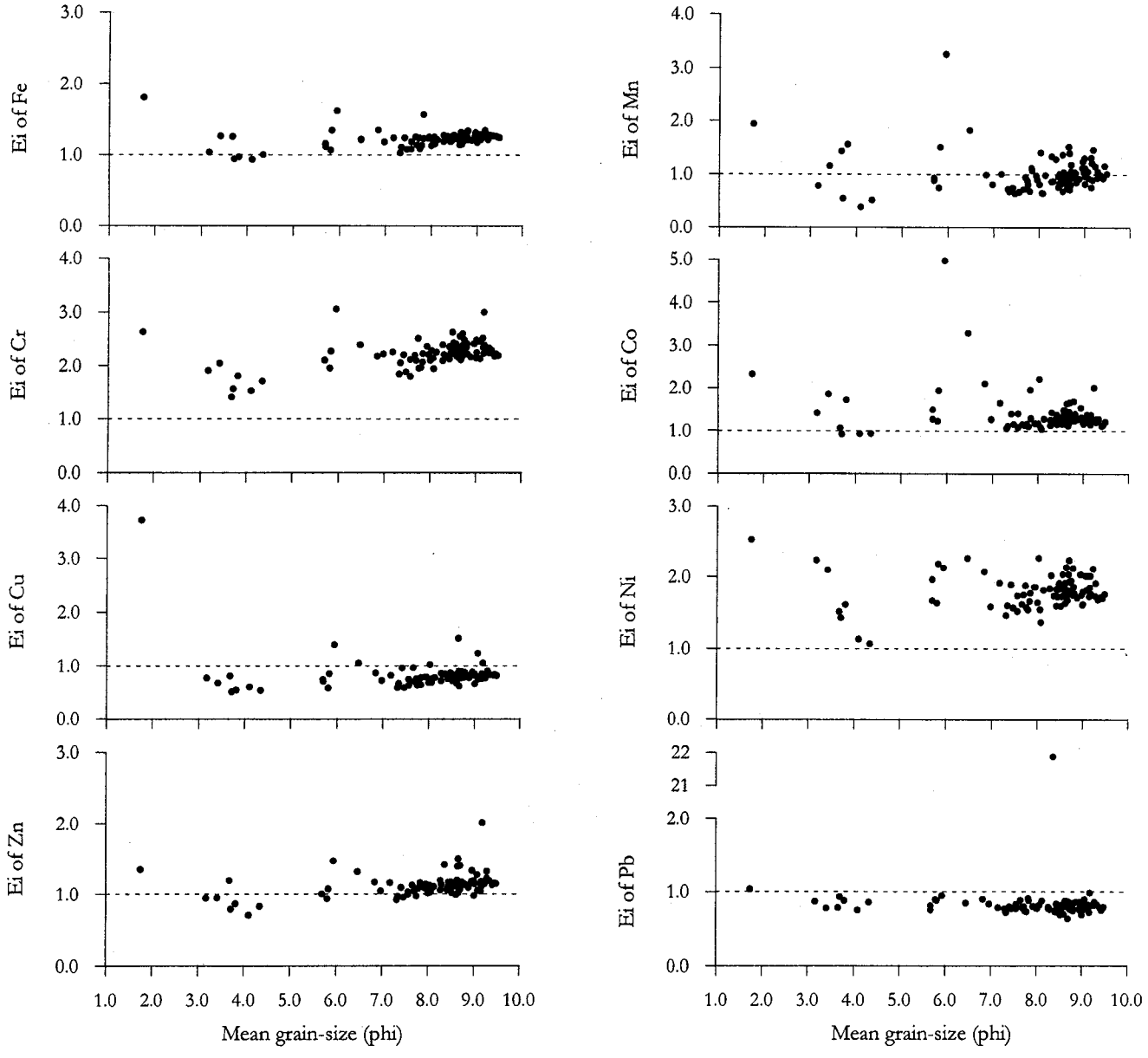

Fig. 6. Enrichment ratios (*Ei*) of heavy metals. $Ei = [(C_i/C_{Al})_{sample}]/[(C_i/C_{Al})_{standard}]$, Data of standard from Seomjin River suspended matters.

($\sigma_x/\bar{x}$) 범위로 비교적 작은 반면 납, 구리, 코발트 및 망간은 각각 213%, 42%, 37% 및 36%로 나타나 국지적으로 이들 중금속이 농축되고 있음을 지시한다.

금속별 농축비의 공간적 분포는 Fig. 4에 도시된 함량분포와 비슷하게 전반적으로 해당 금속의 함량이 높은 지역에서 높은 경향을 나타낸다. 하지만 농축비의 최대값이 나타나는 지역은 계산된 농축비 자체가 입도의 영향이 제거된 까닭에 각 금속의 함량분포와 다소 다르며, 이러한 현상은 입도의 영향을 크게 받는 금속에서 더 뚜렷하다. 분석된 금속은 농축비의 분포경향에 기초하여 여수반도 북서해안에서 가장 높은 값을 나타낸 금속과 묘도 남수로를 포함하는 여수반도 중북부 해안에서 가장 높은 값을 나타내는 금속의 두 유형으로 구분된다. 전자에는 아연 및 납이 해당되며, 아연은 평균의 2배에 해당되는 2.0의 농축비를, 납은 평균의 약 22배에 해당되는 21.9의 농축비를 보인다. 두 금속을 제외한 나머지 금속은 후자에 속하며, 각 금속별 최대농축비는 여수반도 북부 및 북동부 연안의 호유부두 및 남수로에서 망간 3.3, 코발트 5.0, 크롬 3.1이며, 호유부두 동편해역에서 철 1.8, 구리 3.7, 니켈 2.5이다. 따라서 광양만은 주로 여천공단이 위치한 여수반도 북부의 해안을 중심으로 중금속의 축적이 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 묘도 남수로를 포함하는 호유부두 연안해역에서는 이미 중금속 오염이 상당히 진행된 것으로 판단된다.

결 론

광양만의 저서환경 건강을 평가할 목적으로 1997년 2월 및 4월에 총 91개의 표층퇴적물을 채취하였으며, 이 퇴적물에서 입

도와 유기탄소 및 9개 금속(Al, Fe, Mn, Cr, Co, Cu, Ni, Zn, Pb)을 분석하였다. 분석된 중금속 가운데 철 및 망간의 함량은 한반도 주변의 타 지역 퇴적물과 지각의 평균함량에 비해 높게 나타났으며 크롬, 니켈 및 구리는 비교적 낮은 함량을 보였다. 그러나 금속에 따라 국지적으로 높고 낮은 분포의 차이를 보였으며, 이러한 분포경향에는 분석원소의 대부분이 해당되었다. 또한 특정해역에서 해당 금속의 함량이 상대적으로 높은 시료는 퇴적물의 입도 및 유기물과의 관련성이 미약한 시료가 포함되었다.

퇴적물 입도의 영향을 최소화한 각 금속의 공간적 분포와 섬진강 부유물 중의 금속함량을 표준으로 삼아 계산된 농축비의 공간적 분포를 토대로 중금속의 축적이 활발하게 진행되고 있는 지역이 구분되었으며, 아울러 특정 중금속에 대해서만 축적이 이루어진 지역의 구분도 가능하였다. 즉 여수반도 북서쪽 폐기물 투기장 및 중흥부두 해안을 따라 묘도 남수로 및 호유부두 연안에 이르기까지 여수반도와 인접한 해역은 분석된 중금속 전체가 국지적으로 혹은 보다 넓은 범위에 걸쳐서 농축되고 있으며, 여수반도 북서해안에는 아연 및 납이, 묘도 남수로에는 망간 및 코발트가, 그리고 호유부두 동편해역에는 구리의 농축이 선택적으로 진행된 것으로 파악되었다.

사 사

원고를 자세히 검토하여 주시고 건설적인 의견을 주신 부경대학교 양한섭 교수님과 부산대학교 이동섭 교수님께 감사드립니다. 본 연구는 선도기술개발사업(G-7 프로젝트) '연안 저서환경 건강평가 기술(Code No. 96-941-2)' 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김대철, 김길영, 1991. 광양만 미고결 퇴적물의 물리적 및 음향학적 성질: 북태평양 대륙붕 및 사면 자료와의 비교. 한국수산학회지, **24**: 289－302.

김신정, 김대철, 이희일, 신임철, 1996. 광양만 동부해역의 퇴적과정 변화와 저서성 유공충 군집분포. 한국해양학회지, **1**: 32－45.

박용안, 이창복, 최진혁, 1984. 광양만의 퇴적환경에 관한 연구. 한국해양학회지, **19**: 82－88.

신현출, 고철환, 1990. 광양만 다모류 군집의 시공간적 변화. 한국해양학회지, **25**: 205－216.

이창복, 박용안, 최진용, 김기범, 1989. 한국 동남해역 대륙붕과 대륙사면 표면퇴적물의 분포와 특성. 한국해양학회지, **24**: 39－51.

이창복, 정회수, 정갑식, 1992. 황해 남동해역 표층퇴적물 중 수종 금속원소의 분포 특성에 관한 연구. 한국해양학회지, **27**: 55－65.

조영길, 박경양, 1998. 영산강 하구 표층 퇴적물의 중금속 함량 및 분포. 한국환경과학회지, **7**: 549－557.

조영길, 이창복, 박용안, 김대철, 강효진, 1993. 황해 동부대륙붕과 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, 정창식, 박계헌, 1994. 암석 용해방법에 따른 미량원소 분석결과 비교. 암석학회지. **3**: 41－48.

포항종합제철주식회사, 1982. 광양만 수리모형실험 및 해양조사보고서.

포항종합제철주식회사, 1988. 광양제철소 부지조성 환경영향 평가.

환경부, 1995. 환경통계연감.

환경부, 1996. 전국 폐기물 발생 및 처리현황('95).

Bordovskiy, O.K., 1965, Sources of organic matter in marine basins, *Mar. Geol.*, **3**: 5－32.

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

Cho, Y.G., S.R. Yang and K.Y. Park, 1997. Metals in coastal sediments adjacent to the Youngkwang Nuclear Power Plant, West Coast of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **32**: 112－119.

Cho, Y.G., C.B. Lee and M.S. Choi, 1999. Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea. *Mar. Geol.*, **159**: 111－129.

Choi, J.W. and C.H. Koh, 1984. A study on the polychaete community in Kwangyang Bay, southern coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **19**: 153－162.

Cochran, J.K., M. Frignani, M. Salamanca, L.G. Bellucci and S. Guerzoni, 1998. Lead-210 as a tracer of atmospheric input of heavy metals in the northern Venice Lagoon. *Mar. Chem.*, **62**: 15－29.

Degens, E.T. and K. Mopper, 1976. Factors controlling the distribution and early diagenesis of organic material in marine sediments. In: Chemical Oceanography edited by Riley, J.P. and R. Chester, Academic Press, London, 59－113 pp.

Folk, R.L., 1968. Petrology of sedimentary rock. Hemphill's, Drawer M. University Station, 170 pp.

Horowitz, A.J., 1991. A primer on sediment-trace element chemistry. Lewis Publishers, INC., Michigan, 136 pp.

Lantzy, R.J. and F.T. Mackenzie, 1979, Atmospheric trace metals: global cycles and assessment of man's impact. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**: 511－525.

Lee, C.B., Y.A. Park and C.H. Koh, 1985. Sedimentology and geochemical properties of intertidal surface sediments of the southeastern Kyeonggi Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **20**: 20－29.

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.

Martin, J.M. and M. Whitfield, 1983. The significance of the river input of chemical elements to the ocean. In: Trace Metals in Sea Water edited by Wong, C.S., E.A. Boyle, K.W. Bruland, J.D. Burton and E.D. Goldberg, New York: Plenum, 265－296 pp.

McBride, E.F., 1971. Mathematical treatment of size distribution data. In: Procedures in Sedimentary Petrology edited by Carver, R. E., Wiley- Interscience, New York, 109－127 pp.

Salomons, W. and U. F rstner, 1984. Metals in the Hydrocycle. Springer-Verlag. Berlin, 349 pp.

Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons, 1972. A Practical Handbook of

Seawater Analysis. Fish. Res. Board of Canada, Ottawa, 310 pp.

Totland, M., Jarvis, I. and Jarvis, K.E., 1992. An assessment of dissolution techniques for the analysis of geologic samples by plasma spectrometry. *Chem. Geol.*, **95**: 35−62.

Turekian, K.K. and K.H. Wedepohl, 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **72**: 175−192.

1999년 9월 16일 원고 접수
2000년 1월 7일 수정본 채택
담당편집위원: 양한섭