

만경강 퇴적물의 중금속 함량 및 분포

조 영 길

목포대학교 해양자원학과

(2007년 3월 13일 접수; 2007년 5월 4일 채택)

Heavy Metals in Fine-Grained Bed Sediments of the Mangyeong River, Korea

Yeong-Gil Cho

Department of Marine Resources, Mokpo National University, Jeonnam 534-729, Korea

(Manuscript received 13 March, 2007; accepted 4 May, 2007)

The content and distribution of some heavy metals (Fe, Mn, Cr, Co, Cu, Ni, Zn and Pb) were investigated in the $<63 \mu\text{m}$ bed sediments of the Mangyeong river to recognize the extent of contamination. Results showed that a wide range of concentrations was apparent for every metal. These variations were particularly significant at the confluence of tributaries. High levels of metals occur mainly in the confluence of tributaries. Geoaccumulation indexes have been calculated to assess whether the concentration observed represent background or contaminated levels. It is proved that the Mangyeong River is moderately to strongly polluted for Mn, Cr, Cu, Zn and Pb. The spatial extent of pollution was examined, and it was found that the most polluted area is located in the confluence of Iksan and Jeonju tributaries.

Key Words : Mangyeong river, Sediments, $<63 \mu\text{m}$ fraction, Heavy metal, Geoaccumulation index, Pollution

1. 서 론

새만금 간척사업이 시작된 1991년 이후 새만금 해역에 대한 관심이 고조되면서 공사로 인한 환경변화를 예측, 감시해야 될 필요성이 제기되었고, 지금까지 사업지구를 중심으로 다양한 측면의 해양학적 연구가 진행되었다¹⁻¹⁴⁾. 해수유동과 퇴적작용, 부유 및 저서 생태의 환경변화 가능성이 여러 연구에서 제시되었으며^{11,14,15)}, 메조코즘을 이용한 담수화과정의 모의실험은 방조제 내부에 조성될 소위 만경수역과 동진수역의 수질변화가 어떻게 전개될 것인지에 대한 단편을 보여 준다¹²⁾.

2006년 완공된 방조제로 바다와 단절된 새만금호는 앞으로 만경강과 동진강을 통해 운반되는 육지 배출수의 영향을 직접 받을 것으로 예상된다. 유역면적 1,602 km², 유로연장 99 km의 사행 하천인 만경강은 전주시, 익산시 등의 도시와 농경지를 배수

하며, 유역면적 1,148 km²의 비교적 소하천인 동진강은 유로연장 49 km를 통해 김제평야를 가로질러 주로 농경지를 배수한다. 그러나 평야의 주 용수 공급원인 두 하천은 지난 수십 년간 강 상류역의 인구 증가와 급속한 산업화로 인해 오염물의 배출이 크게 증가하여 본류의 오염이 날로 심화되는 하천으로 변모하고 있다¹⁶⁾. 결국 새로 조성된 새만금 수역은 육상 오염원으로부터 각종 오염성분이 하천을 통해 여과 없이 유입되어 가중되는 오염의 위협에 직면해 있다.

하천의 퇴적물은 배수분지에서 배출된 중금속과 같은 오염성분을 수주로부터 침전시키거나 운반하는 역할을 한다. 그러나 퇴적물에 편입된 오염성분은 생물학적, 화학적 매체에 의해 환경으로 재순환되기 때문에 오염된 하천 퇴적물은 그 자체로서 수자원 악화를 유발한다는데 문제의 심각성이 있다¹⁷⁻¹⁹⁾. 따라서 하천의 오염양상을 파악하기 위해서는 유출된 오염물질의 흔적이 집적된 퇴적물 연구가 필수적이며, 그러한 인식 하에 외국에서는 이미 오래 전부터 퇴적물에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다²⁰⁻²⁵⁾.

국내 하천의 퇴적물을 대상으로 오염성분을 다룬

Corresponding Author : Yeong-Gil Cho, Department of Marine Resources, Mokpo National University, Jeonnam 534-729, Korea
Phone: +82-61-450-2393
E-mail: ygcho@mokpo.ac.kr

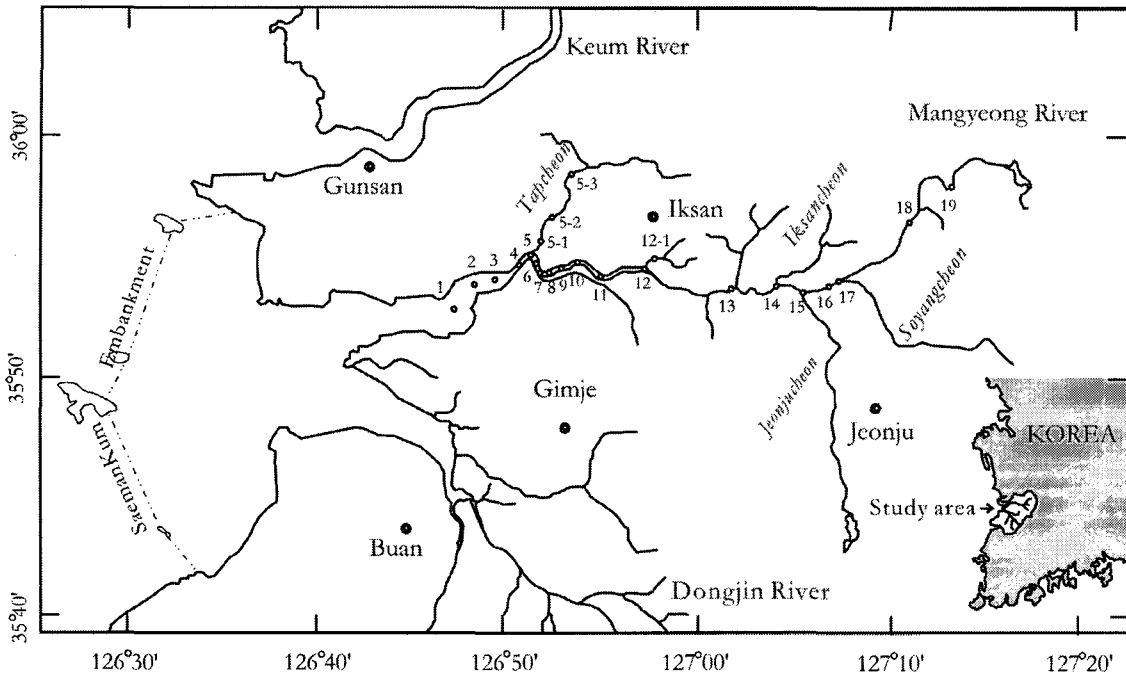


Fig. 1. Sediment sampling sites along the Mangyeong River.

연구는 아직 미흡하며, 금강 및 영산강에서 이루어진 몇몇 연구는²⁶⁻³⁰⁾ 하천의 환경변화에 따라 하천 자체의 오염원이 될 수 있는 오염성분을 정량적으로 제시함으로써 우리나라 하천 퇴적물 연구의 필요성을 부각시키고 있다. 본 연구는 만경강에 분포하는 퇴적물을 대상으로 수종의 유해 중금속을 분석하고 그것의 함량 및 분포를 파악함으로써 본류로 유입되는 중금속의 공급원과 이에 따른 중금속 축적 양상을 밝히는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

새만금 해역으로 유입하는 만경강 퇴적물의 중금속 함량을 파악하기 위하여 1997년 9월에 강 하구에서 상류까지 총 23개 하상퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 퇴적물은 수로의 중간지점에서 채취하였으며, 수심이 깊어 접근이 어려운 하류에서는 소형 모터보트를 이용하여 La-Fond 채니기로 채취하였다.

하천의 전 구간에서 채취된 퇴적물은 하천의 특성상 점토에서 모래에 이르기까지 입도의 변화가 컸다. 본 연구에서는 중금속 분석을 위한 시료를 확보하고 아울러 중금속 함량에 대한 입도의 영향을 제거하기 위해 현장에서 채취된 원시료를 직경이 63 μm인 나일론 체로 습식 체질하여 조립부분과 세립부분으로 구분하였다^{17,31,32)}. 분리된 세립부분의 시료는 냉동건조한 후 마노유발에서 분말화하였으며, 이를 화학분석에 사용하였다. 유기탄소는 중크롬산

칼륨(K₂Cr₂O₇)과 황산(H₂SO₄)을 혼합한 용액을 산화제로 하여 퇴적물 내의 유기물을 산화시키고 남은 산화제 양을 황산암모늄제2철[Fe(NH₄)₂(SO₄)₂]로 역적정하는 습식산화법으로 분석하였다³³⁾. 퇴적물의 중금속은 분말시료를 테프론 용기에 넣고 고온의 혼합산(HF/HClO₄)으로 산분해한 다음 0.1N 질산으로 원소를 용출하여 유도결합플라즈마 방출분광기(ICP-AES)로 측정하였다^{34,35)}. 중금속 분석시에는 자료의 신뢰도를 검증하기 위해 시료와 표준

Table 1. Heavy metal concentrations in <63 μm bed sediments of the Mangyeong River¹

	Range	Average ²	Variance ³	Crust ⁴
Fe	2.4-5.0	3.3(±0.7)	19.8	3.6
Mn	462-5698	922(±1069)	115.9	720
Co	9-17	12(±2)	18.9	13
Cr	33-138	63(±25)	39.2	71
Cu	16-91	32(±18)	56.2	32
Ni	17-56	30(±10)	33.3	49
Zn	42-308	112(±75)	66.9	127
Pb	16-64	31(±12)	37.5	16
POC	0.4-3.0	1.2(±0.8)	65.4	-

¹In mg/kg-dry wt. (or ppm), except Fe and POC are in percentage

²n=23

³% of variance = $\sigma/\bar{x} * 100$

⁴Martin and Whitfield³⁶⁾

물질(NRC의 MESS-1)을 병행분석 하였으며, 그 결과 측정값의 정밀도는 $\pm 5\%$ (반복측정의 상대표준편차), 정확도는 $\pm 10\%$ (표준물질 MESS-1에 대한 상대오차) 이내로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물의 중금속 함량 및 분포

분석된 23개 만경강 퇴적물의 중금속 함량은 Fe 2.7~5.0% (평균 3.3%), Mn 462~5698 ppm (평균 922 ppm), Co 9~17 ppm (평균 12 ppm), Cu 16~91 ppm (평균 32 ppm), Cr 33~138 ppm (평균 63 ppm), Ni 17~56 ppm (평균 30 ppm), Zn 42~308

ppm (평균 112 ppm), Pb 16~64 ppm (평균 31 ppm) 이었다(Table 1). 시료간 중금속 함량의 변화 (σ/\bar{x})는 Mn, Zn 및 Cu가 각각 116%, 67% 및 56%로 가장 컸고 Cr 39%, Pb 38%, Ni 33%, Fe 20%, Co 19% 순으로 감소하였다. 최대와 최소 함량의 차이는 Co, Fe, Ni가 각각 1.9 배, 2.1 배, 3.2 배로 가장 낮았고, Pb 4.0 배, Cr 4.2 배, Cu 5.8 배, Zn 7.3 배 순으로 증가하여 Mn의 경우 격차가 12.3 배에 달했다.

Fig. 2에는 수로의 상류방향으로 중금속 함량이 도시되었다. 모든 금속의 함량이 전반적으로 강의 상류로 갈수록 높아지며, 익산시와 전주시의 영향을 받

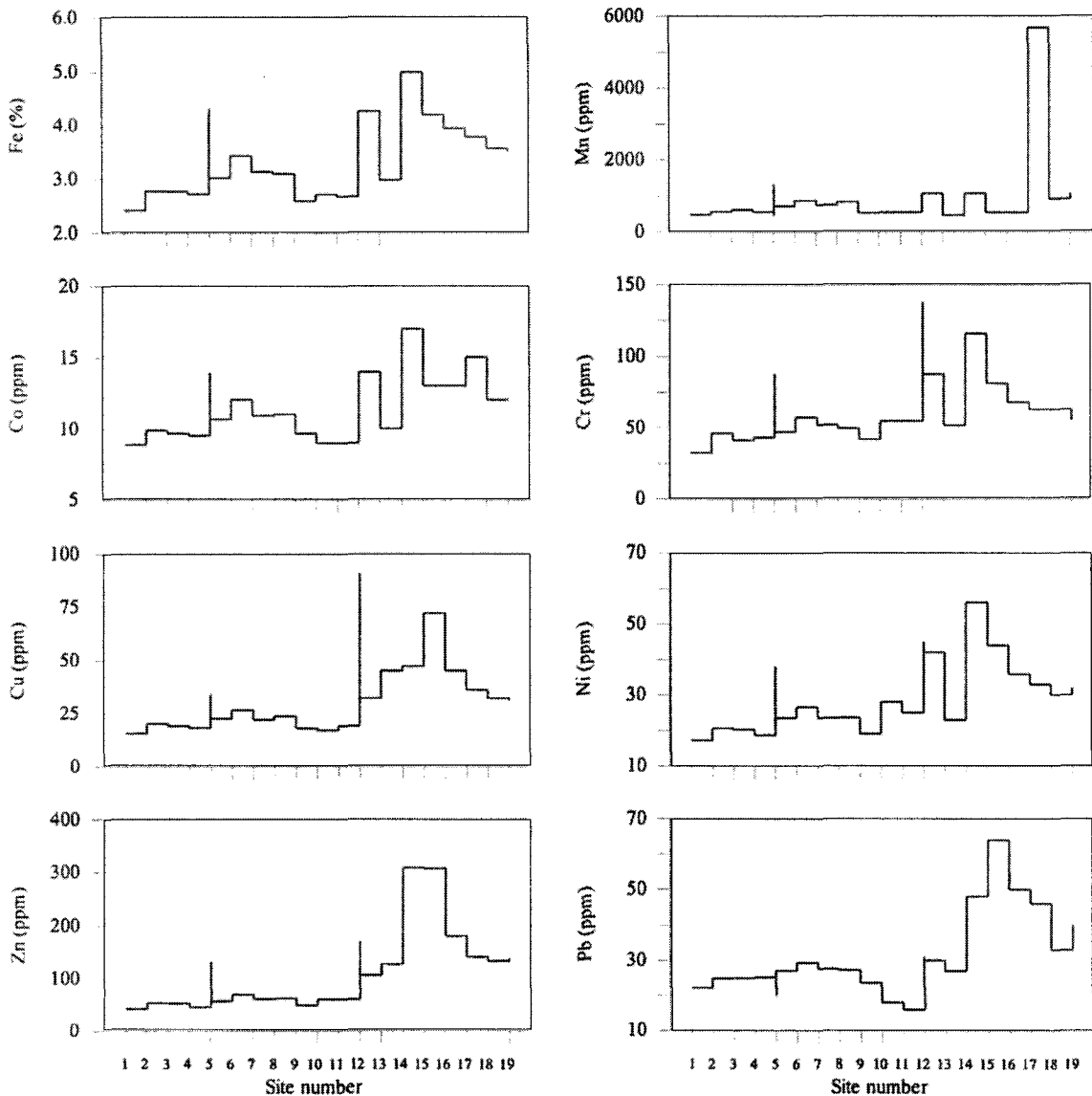


Fig. 2. Upstream variation of heavy metals in $<63 \mu\text{m}$ bed sediments of the Mangyeong River.

는 정점에서 급증하는 경향을 나타낸다. 분류구간에서 Fe, Co, Cr, Ni 및 Zn 함량은 익산천이 유입하는 정점 14에서 높으며, Zn을 포함한 Cu 및 Pb 함량은 전주천이 유입하는 정점 15에서 높다. 특히 Cu 및 Cr은 익산 도심을 배수하는 지류인 정점 12-1에서 각각 91 ppm 및 138 ppm으로 연구지역 가운데 최대를 기록하여 익산시의 배수 하천이 두 중금속의 주된 배출 경로임을 지시한다. 정점 5와 연결된 탑천 또한 Pb를 제외한 나머지 중금속의 함량이 높아 강하류역의 주요 오염물질 유입원임을 보여준다. 한편, Mn은 타 금속의 분포와 달리 전주시의 북쪽에 위치한 소양천 합류지점인 정점 17에서 무려 5698 ppm으로 특히 높으며, 정점 5-1, 12, 14 및 19에서 또한 1000 ppm 이상의 높은 함량이 관찰되었다.

3.2. 중금속의 농축지수

퇴적물에 존재하는 중금속은 퇴적물을 구성하는 입자에 골고루 분포하지 않는다³¹⁾. 즉, 중금속 함량은 퇴적물의 입도에 따라 다르며, 조립한 입자는 중금속 함량을 희석시키는 주 요인에 해당된다^{17,31,32)}. 따라서 퇴적물에 포함된 중금속으로부터 자연현상을 해석하기 위해서는 조립한 입자를 분리 후 분석하는 소위 입도의 영향을 제거하는 과정을 거칠 필요가 있다. 본 연구에서는 몇 가지 과학적 사실에 근거해 제안된 방법에 따라 입도의 영향을 제거하고 퇴적물의 중금속 농축을 정량적으로 평가하기 위하여 직경 63 μm 이하의 입자를 분리, 분석하였으며³⁷⁾ 이를 바탕으로 농축지수(geoaccumulation index, I_{geo})를 계산하였다. 주어진 시스템에서 금속의 상대적인 농축정도를 나타내는 농축지수 I_{geo} 는 다음과 같이 표현된다³⁸⁾.

$$I_{geo} = \log_2 C_n/B_n \times 1.5$$

식에서 C_n 은 시료의 중금속 농도를, B_n 은 표준농도인 바탕값(background value)을 의미한다. 바탕값은 흔히 세일이나 지각물질의 평균함량을 이용하는 데^{36,39)} 본 연구에서는 지각물질의 평균농도를 바탕값으로 간주하여 농축지수를 구하고 Table 2와 같은 기준에 따라 중금속 농축을 평가하였다.

농축지수에 따른 금속별 시료의 오염등급은 Fig. 3에 제시되었다. Ni, Zn, Cu, Cr 및 Mn은 시료의 각각 70%, 48%, 30%, 26%, 13%가 오염의 흔적이 없는 Class 0에 속하였으며, 약간의 오염정후가 있는 Class 1에 해당된 시료는 Pb 13%, Ni 30%, Zn 39%, Cu 48%, Cr 및 Mn 65%, Fe 96%, 그리고 Co는 100% 였다. 보통 이상의 오염수준을 나타낸 금속별 시료의 비율은 Fe 4%, Cr 9%, Zn 13%, Mn 및 Cu 17%, Pb 70%로 나타났으며, Mn은 시료의

Table 2. Geoaccumulation indices (after Müller³⁸⁾)

I_{geo}	Class	Pollution intensity
> 5	6	Very strong polluted
4-5	5	Strongly to strong polluted
3-4	4	Strongly polluted
2-3	3	Moderately to strongly polluted
1-2	2	Moderately polluted
0-1	1	Unpolluted to moderately polluted
0	0	Unpolluted

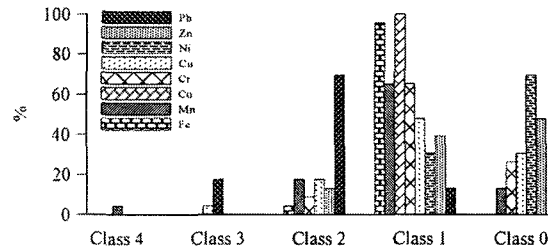


Fig. 3. Percentage of samples in Müller³⁸⁾ I_{geo} classes 4, 3, 2, 1 and 0 for each heavy metal using background values from average crust³⁶⁾.

4%가 Class 4에 해당되는 강한 오염단계, Cu 및 Pb는 시료의 각각 4% 및 17%가 강한 오염단계에 진입하는 Class 3에 속하였다. 따라서 조사된 중금속은 오염화 기준을 I_{geo} 1로 했을 때 Mn, Cr, Cu, Zn 및 Pb가 오염금속으로 분류되며, 특히 Mn, Cu 및 Pb는 하천의 일부 구간에서 비교적 강도 높게, 그리고 Pb는 보다 더 광범위한 지역에 걸쳐 오염이 진행된 것으로 나타난다.

Fig. 4에는 정점별 농축지수가 도시되었다. 그림에 나타난 농축지수의 분포양상은 전반적으로 중금속 오염이 도시가 발달된 강의 상류에서 이루어지고 있음을 보여준다. 탑천과 소양천 입구에서 Mn, 익산시 배수 하천에서 Cr 및 Cu, 익산천 및 전주천 입구에서 Cu, Zn 및 Pb의 농축지수가 높다. 이러한 농축지수의 분포는 주로 도시를 배수하는 하천이 중금속 농축의 가장 큰 공급원임을 지시한다.

3.3. 중금속의 거동 및 분포의 조절요인

중금속 사이의 유사성은 연구지역내 중금속 분포가 서로 어떻게 관련되어 변하는지 보여주는 중요한 정보를 제공한다. Fig. 5에는 중금속의 유사성을 토대로 중금속 변수가 병합 또는 분리되는 과정을 나타낸 덴드로그램이 도시되었다. 변수의 군집구조는 Fe, Co가 밀접한 관련성을 갖는 하나의 독립된 집단과 Cu, Zn, Cr, Ni, Pb가 병합된 집단, 그리고 두 번째 집단과 다소 미약한 관련성을 나타내는 Mn으로 구성된다. 중금속의 이러한 군집구조는 Fig. 2에 제

만경강 퇴적물의 중금속 함량 및 분포

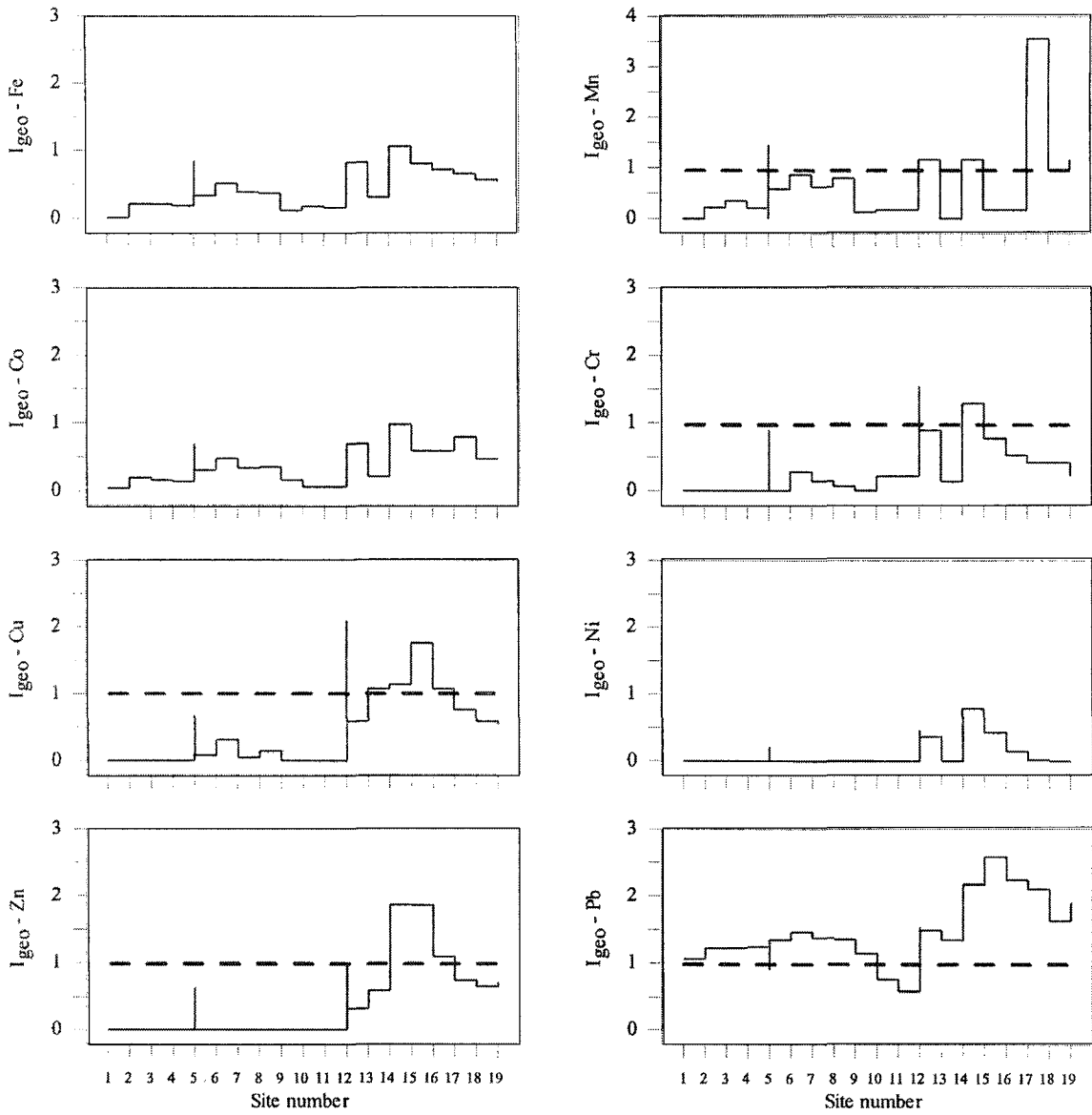


Fig. 4. Upstream variation of geoaccumulation index (I_{geo}) in bed sediments of the Mangyeong River.

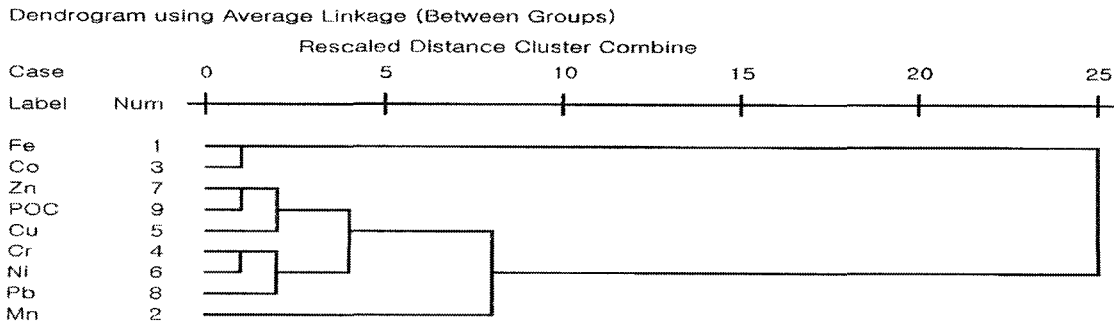


Fig. 5. Dendrogram of the heavy metals.

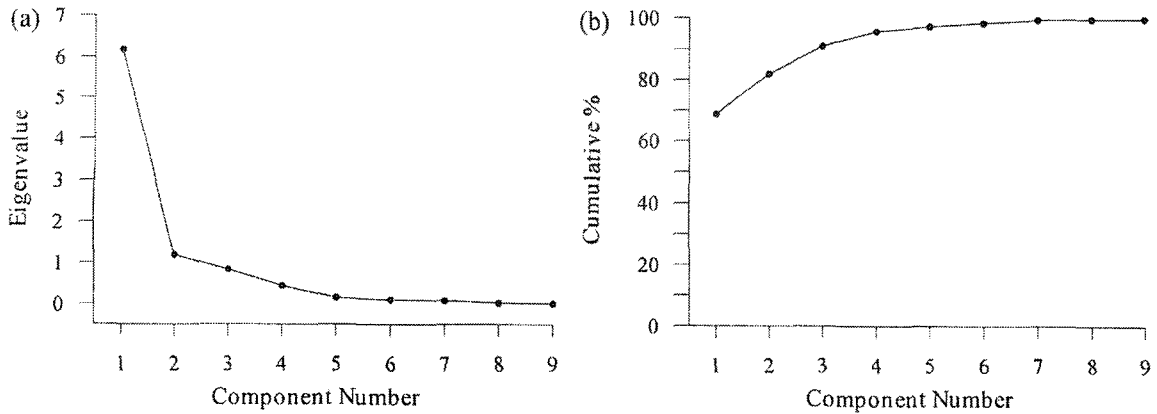


Fig. 6. Principal component analysis results: (a) Scree plot and (b) cumulative percent of variance.

시된 정점별 함량 변화의 경향을 잘 설명해 준다. 즉, 상류방향의 Fe, Co 변화는 증가 혹은 감소의 양상으로서 비슷하며, Cr과 Ni, 그리고 Cu, Zn, Pb 또한 상호 유사한 형태로 변화하는 거동을 보인다.

중금속 사이의 복잡한 상호관계와 분포 특성을 설명할 수 있는 공통요인을 추정하기 위하여 요인 분석을 실시하였다. 금속 변수의 분산을 설명해주는 최적 요인은 대개 고유값(eigenvalue) 1 이상을 기준으로 추출하나 본 연구에서는 고유값이 1에 가깝고 분산을 설명하는 비율 또한 상위 인접 요인과 큰 차이가 없음을 고려하여 1개 요인을 추가로 추출하였으며, 추출된 3개 요인은 전체 분산의 91%를 설명한다(Fig. 6).

요인 1은 총 분산의 69%를 설명하는 요인으로 Fe, Co, Cr, Ni의 적재값(loading value)이 높으며, Cu 또한 유의한 수준의 적재값을 갖는다(Table 3). 이 그룹의 중금속은 비록 Cu의 경우 익산천에 의한 영향이 크지 않지만 익산시 배수 하천과 익산천 합류지점에서 함량이 높은 공통점이 있다. 총 분산의 13%를 설명하는 요인 2는 Zn, Pb 및 POC(유기탄소)의 적재값이 크며, Cu에 대해서도 무시할 수 없는 적재값을 나타낸다(Table 3). Zn 및 Pb는 Cu와 함께 공히 전주천에 의한 영향을 가장 크게 반영한다. 전주시를 배수하는 전주천은 생활폐기물은 물론 각종 산업폐기물이 포함되어 있을 것이며, 그러한 오염성분은 결국 만경강 본류의 수질은 물론 저질에도 영향을 미칠 것이다. 전주천의 합류지점에서 소위 오염형 중금속인 Cu, Zn, Pb의 농축비가 높은 현상은 만경강 퇴적물에서 이들 중금속의 농축이 전주천을 통해 배출된 물질에 의해서 비교적 활발하게 이루어지고 있음을 지시한다. 한편, 요인 3은 총 분산의 9%를 설명하는 요인으로 Mn에 대해서만 높은 적재값을 갖는다(Table 3). Mn은 요인 1 그룹

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

	Factor loadings		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Fe	0.787	0.457	0.267
Mn	0.047	0.140	0.946
Co	0.784	0.362	0.410
Cr	0.963	0.170	-0.032
Cu	0.684	0.502	-0.206
Ni	0.882	0.413	0.097
Zn	0.590	0.773	-0.014
Pb	0.242	0.927	0.163
POC	0.366	0.829	0.267

의 중금속처럼 익산시 배수 하천과 익산천에서 역시 함량이 높으나 특징적으로 소양천 합류지점에서 유난히 고농축 되어 있으며, 이러한 분포는 타 중금속과 뚜렷한 대조를 이룬다. 3개 요인으로 총 분산의 90% 이상을 설명하는 요인분석 결과는 각 요인에 높게 적재된 중금속 그룹의 공통된 분포 형태로 볼 때 무엇보다 지류에 의한 영향이 중금속 함량에 영향을 미치는 중요한 인자이며, 결국 지류의 특성이 각각의 차별화된 독립 요인으로 작용하고 있음을 지시한다.

4. 결 론

만경강 하상 퇴적물의 중금속 함량 및 분포를 파악하기 위하여 본류의 전 구간에 걸쳐 23개 퇴적물을 채취하였으며, 이 퇴적물에서 직경 63 μm 이하의 입자를 분리하여 Fe, Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Zn 및 Pb를 분석하였다.

중금속의 함량은 전반적으로 강의 상류로 갈수록 증가하였으며, 익산시와 전주시를 배수하는 하천 구간에서 급증하는 경향을 나타냈다. 금속별로는 익산

천이 유입되는 지역에서 Fe, Co, Cr, Ni 및 Zn 함량이, 전주천이 유입하는 지역에서 Cu, Zn 및 Pb 함량이 높았다. 특히 Cu 및 Cr 함량은 익산시를 배수하는 지류에서 최대로 나타나 익산시가 두 중금속의 주된 배출원으로 확인되었으며, Mn은 소양천 합류 지점에서 월등히 높은 함량이 관찰되었다.

중금속 함량을 농축지수(geoaccumulation index, I_{geo})에 준거하여 농축정도를 평가한 결과 Mn, Cr, Cu, Zn 및 Pb가 보통오염 이상의 등급($I_{geo} > 1$, >class 2)으로 분류되었으며, Pb는 전체시료의 87%, Mn 및 Cu 22%, Zn 13%, Cr의 경우 9%가 이 기준에 해당되었다. 농축지수의 공간적 분포로 볼 때 중금속 오염은 강의 상류에서 진행되고 있었으며, 주로 도시를 배수하는 지류가 중금속 농축의 가장 큰 공급원이라는 사실이 확인되었다.

요인분석을 통해 중금속 함량의 변화 및 분포에 영향을 미치는 잠재요인을 추정된 결과 만경강 본류로 유입하는 지류의 특성이 각각의 차별화된 조절요인으로 작용하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 Fe, Co, Cr, Ni 및 Cu는 주로 익산시 배수 하천과 익산천에 의해, Mn은 소양천에 의해, 그리고 Zn, Pb 및 Cu는 전주천에 의해 함량이 조절되는 것으로 파악되었다.

감사의 글

본 연구는 목포대학교 학술연구비 지원에 의한 것입니다. 원고를 검토해 주신 세 분의 심사위원께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 안순모, 고철환, 1992, 서해 만경·동진 조간대의 환경과 저서동물 분포, 한국해양학회지, 27, 78-90.
- 2) 심재형, 신윤근, 조병철, 1993, 만경·동진강 하구에서의 박테리아 및 식물플랑크톤의 역할과 상호관계, 한국해양학회지, 28, 107-113.
- 3) 심재형, 조병철, 박명길, 1994, 만경·동진강 하구계에서 요소와 요소 분해속도의 분포, 한국해양학회지, 29, 402-413.
- 4) 심재형, 윤성화, 윤상선, 최동한, 조병철, 1995, 만경·동진강 염하구에서 종속영양성 및 혼합영양성 미소편모류의 수도와 박테리아 섭식, 한국해양학회지, 30, 413-425.
- 5) 심재형, 박수영, 조병철, 이원호, 1995, 만경·동진강 염하구에서 섬모충류에 의한 박테리아 섭식에 관하여, 한국해양학회지, 30, 426-435.
- 6) 이영길, 박용안, 최진용, 1995, 한국 서해 만경·동진강 하구역 및 연안역 조간대 퇴적층의 퇴적상과 미고생물학적 연구, 한국해양학회지, 30, 77-90.
- 7) 오재경, 최규홍, 1999, 변산반도 연근해 표층 퇴적물의 특성과 퇴적환경, 한국해양학회지 바다, 4, 107-116.
- 8) 조영길, 류상옥, 구영경, 김주용, 2001, 새만금 조간대 표층퇴적물의 성분원소 함량과 지화학적 특성, 한국해양학회지 바다, 6, 27-34.
- 9) 유영두, 정해진, 심재형, 박재연, 이경재, 이원호, 권효근, 배세진, 박종규, 2002, 전북 새만금 남쪽해역의 유해성 적조 발생연구 1. 1999년도 여름-가을 식물플랑크톤의 시공간적 변화, 한국해양학회지 바다, 7, 129-139.
- 10) 정해진, 유영두, 김재성, 2002, 전북 새만금 남쪽해역의 유해성 적조 발생연구 2. 1999년도 여름-가을 종속영양성 와편모류와 섬모충류의 시간적 변화, 한국해양학회지 바다, 7, 140-147.
- 11) 이상호, 최현용, 손영태, 권효근, 김영곤, 양재삼, 정해진, 김종구, 2003, 하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수와 순환, 한국해양학회지 바다, 8, 138-150.
- 12) 김영태, 정용훈, 채윤주, 이충원, 김소영, 최강원, 양재삼, 2006, 메조코즘을 이용한 갯벌의 담수화 과정 중 수질 변화, 한국해양학회지 바다, 11, 49-67.
- 13) 김진삼, 김강주, 한찬, 황갑수, 박성민, 이상호, 오창환, 박은규, 2006, 하수처리장 방류수를 이용한 추적자 시험: 만경강 유역에 대한 사례 연구, 한국해양학회지 바다, 11, 82-91.
- 14) 김창수, 이상호, 손영태, 권효근, 이광희, 김영배, 정우진, 2006, 새만금 4호 방조제 완성 전·후 HF 레이더로 관측된 표층 M2 조류의 변화, 한국해양학회지 바다, 2, 37-48.
- 15) 박창규, 이남호, 2001, 수치모형을 이용한 새만금 방조제 축조후의 조석 운동 예측, 농촌계획, 7, 61-76.
- 16) 수자원공사, 1992, 전국하천조사서.
- 17) Förstner U., Wittmann G. T. W., 1981, Metal Pollution in the Aquatic Environment, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 486pp.
- 18) Calmano W., Hong J., Förstner U., 1993, Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential, Water Sci. Technol., 28, 223-235.
- 19) van den Berg G. A., Gustav Loch J. P., van der

- Heijdt L. M., Zwolsman J. J. G., 2000, Geochemical behaviour of trace metals in freshwater sediments. In: Trace Elements - Their Distribution and Effects in the Environment, edited by Markert B., Friese K., Elsevier Science, pp. 517-533.
- 20) Müller G., Förstner U., 1975, Heavy metals in sediments of the Rhine and Elbe Estuaries: mobilization or mixing effect, *Environ. Geol.*, 1, 33-39.
- 21) Förstner U., Müller G., 1981, The concentration of trace metals and polynuclear aromatic hydrocarbon in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact, *GeoJournal*, 5, 417-432.
- 22) Salomons W., Eysink W. D., 1981, Pathways of mud and particulate trace metals from rivers to the southern North Sea, *Int. Assoc. Sediment Spec. Pap.*, 5, 429-450.
- 23) Yeats P. A., Bowers J. M., 1982, Discharge of metals from the St. Lawrence river, *Can. J. Earth Sci.*, 19, 982-992.
- 24) Prusty B. G., Sahu K. C., Godgul G., 1994, Metal contamination due to mining activities at the Zawar zinc mine, Rajasthan, India, 1. Contamination of stream sediments, *Chem. Geol.*, 112, 275-291.
- 25) Calmano W., Förstner U., 1996, Sediments and Toxic Substances : Environmental Effects and Ecotoxicity, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 335pp.
- 26) Lee C. B., 1985, Sedimentary processes of fine sediments and the behaviour of associated metals in the Keum Estuary, Korea. In: Marine and Estuarine Geochemistry, edited by Sigleo A. C., Hattori A., Lewis Publishers, Inc., Chelsea(MI), pp. 209-225.
- 27) 최만식, 이창복, 조영길, 1995, 금강 부유물질 중 미량금속의 함량과 이동, *한국해양학회지*, 30, 371-381.
- 28) 최만식, 이석훈, 이창복, 조영길, 1996, 금강 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성, *한국계4기학회지*, 10, 27-52.
- 29) 조영길, 김주용, 1998, 영산강 하상퇴적물의 중금속 함량, *한국환경과학회지*, 7, 281-290.
- 30) Cha H. J., Cho Y. G., 2002, Transport and loadings of nutrients and dissolved major and trace elements in the Yeongsan River, Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 37, 66-75.
- 31) Salomons W., Förstner U., 1984, Metals in the Hydrocycle, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 349pp.
- 32) Horowitz A. J., 1991, A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry, Lewis Publishers, Inc., Chelsea(MI), 136pp.
- 33) Strickland J. D. H., Parsons T. R., 1972, A Practical Handbook of Seawater Analysis, Fish. Res. Board of Canada, Ottawa, 310pp.
- 34) Totland M., Jarvis I., Jarvis K. E., 1992, An assessment of dissolution techniques for the analysis of geologic samples by plasma spectrometry, *Chem. Geol.*, 95, 35-62.
- 35) 최만식, 정창식, 박계현, 1994, 암석 용해방법에 따른 미량원소 분석결과 비교, *암석학회지*, 3, 41-48.
- 36) Martin J. M., Whitfield M., 1983, The significance of river input of chemical elements to the ocean. In: Trace Metals in Sea Water, edited by Wang C. S., Boyle E., Bruland K. W., Burton J. D., Goldberg E. D., Plenum, New York, pp. 265-298.
- 37) Förstner U., Salomons W., 1980, Trace metal analysis on polluted sediments. I. Assessment of sources and intensities, *Environ. Technol. Lett.*, 1, 494-505.
- 38) Müller G., 1979, Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins, Veränderungen seit 1971, *Umschau*, 79, 778-783.
- 39) Turekian K. K., Wedepohl K. H., 1961, Distribution of the elements in some major units of the earth's crust, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 72, 175-192.