

발전소 주변 표층퇴적물 내 중금속원소 분산 특성

이두호·전병열·이창복¹·김범수¹
전력연구원 환경그룹, ¹서울대학교 해양학과

Characteristics of Heavy Metal Distribution in Marine Surface Sediments around Power Plant

DOO-HO LEE, BYEONG-YEOL JEON, CHANG-BOK LEE¹ AND BUM-SOO KIM¹

Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380, Korea
¹Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

발전소 가동에 따른 퇴적물내 중금속원소의 오염 가능성을 알아보기 위하여 삼천포화력발전소와 영광원자력 발전소 주변해역의 표층퇴적물을 대상으로 중금속 함량 분석을 실시하였으며 선정된 일부 퇴적물에 대해서는 화학적 존재형태를 파악하기 위해 연속추출분석을 실시하였다. 퇴적물 중의 금속원소 함량 분포는 대체적으로 평균입도에 의해 조절되고 있으며 탄산염 함량 및 유기물 함량에 의해서도 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 또한 화학적 존재형태별 분석에서도 Mn을 제외한 대부분의 중금속이 잔류상으로 존재하고 있어 인위적인 오염에 의해서라기 보다는 자연적인 분산에 의해 존재하고 있는 것으로 나타났다.

In order to examine the degree of heavy metal pollutions around Samcheonpo and Youngkwang power plants, marine sediment samples were analyzed to determine heavy metal contents. Some of these sediment samples were also analyzed by using of a sequential extraction technique to know geochemical forms of the metals. The results showed that the spatial distribution of heavy metals coincided very well with those of mean grain size, carbonates and organic matters. The chemical speciation data using sequential extraction analysis also showed that a considerable amount of heavy metals except for Mn were bounded in the residual fraction, which mode of occurrence of heavy metals was generally interpreted as being the result of the lithogenic origin.

서 론

중금속원소는 일반적으로 비중이 6 이상인 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 등의 원소로 일부는 생물체 내에 생리적으로 일정 양이 꼭 필요한 경우도 있으나 대부분은 인간 및 동식물에 피해를 주는 유독성 원소들로 주로 급격한 산업화에 의한 환경오염에 기인한다(Alloway, 1995). 이러한 중금속 원소는 먹이사슬을 통하여 우리 몸에 들어와 오랜 기간에 걸쳐 장기나 세포조직에 축적되어 만성 중독증세를 나타내며 때로는 급성 중독증세를 나타내기도 한다(송, 1984).

해양퇴적물은 해수에 비해 중금속 함량이 높으며 그 변화가 적어 과거 또는 현재에 오염원이 존재하는 지역에서 중금속 분포에 의한 지속적인 환경영향을 평가할 수 있는 보다 적절한 지구화학적 매개체이다(Thornton, 1983). 특히 퇴적물에 함유된 중금속은 물리화학적 환경의 변화에 의해 물-퇴적물의 경계면에서 수증으로 재용출이 일어날 수 있으며 오염을 발생시키는 원인이 제거된 후에도 계속적인 수질오염을 야기시키며 그곳에 존재하는 생물체에도 영향을 미치게 된다. 그러므로 퇴적물의 중금속 오염에 대한 연구는 현재 뿐만아니라 앞으로의 중금속

오염을 평가·예측하는데 필요한 정보를 제공해 줄 수 있을 것이다. 본 연구에서는 삼천포화력발전소와 영광원자력발전소 주변해역의 해양퇴적물을 대상으로 하여 중금속의 오염정도 및 분산의 조절인자를 파악하고자 하였으며, 발전소 가동에 따른 중금속 오염특성과 분산양상의 규명을 통해 환경오염의 대책 마련을 위한 기초 자료를 제공함과 동시에 앞으로의 연구를 위한 예비자료로 활용하고자 하였다.

시료채취 및 분석방법

삼천포화력발전소의 경우 배수구를 중심으로 반경 5 km 이내에서 11 개의 퇴적물 시료를, 영광원자력발전소의 경우 배수구를 중심으로 반경 8 km 이내에서 10 개의 시료를 각각 1997년 3월 25일과 5월 7일에 채취하였다(Fig. 1). 시료는 반반 채니기(Van-veen grab sampler)를 이용하여 채취하였으며, 채취된 표층퇴적물을 대상으로 퇴적물의 입도분석과 화학분석을 실시하였다.

퇴적물의 입도분석을 위한 시료는 먼저 염산과 과산화수소로 탄산염과 유기물을 각각 제거한 후, 62.5 μm (4 Φ) 표준체로 물체질하여 사질부분과 니질부분을 구분하였다. 사질부분의 입도

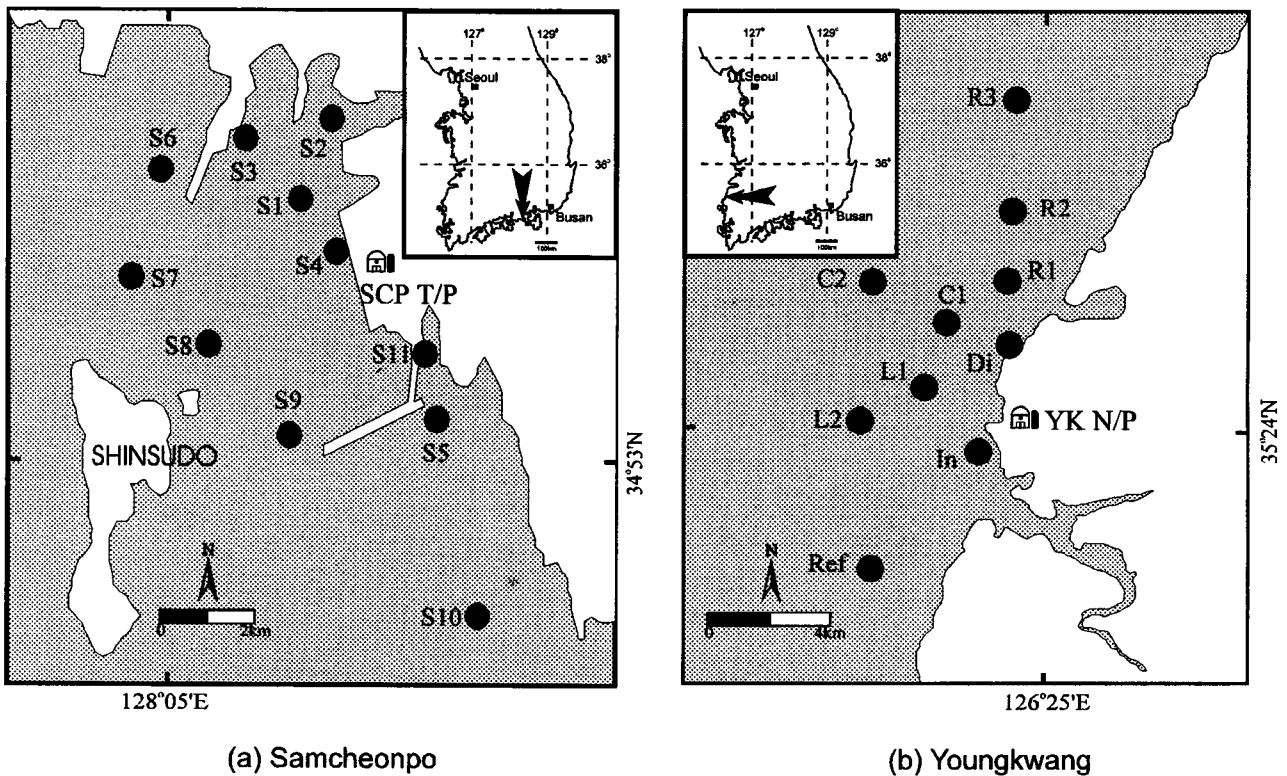


Fig. 1. Map showing the study areas and location of the surface sediment samples.

분석은 표준체를 이용하여, 그리고 니질부분의 분석은 11 메스 실린더에 넣고 확산제로 2% 칼콘용액을 첨가한 후 파이(phi)간격으로 확산법칙(Stokes' law)에 따라 실험조건에 맞게 계산된 시간에 맞추어 50 ml 피펫으로 부시료를 채취하였다. 채취된 부시료는 건조시켜 각 크기에 해당하는 퇴적물의 무게를 측정 한 후, 사질과 니질에서 측정한 각 크기별 퇴적물 무게를 이용하여 Fork and Ward(1957)의 식으로 통계 처리하였다. 또한 강열감량(Ignition Loss)은 건조기에서 50~60°C로 충분히 말린 시료 약 5 g을 도가니에 넣은 후 550°C의 전자로에서 4 시간동안 가열 한 다음 실온으로 식힌 후 측정 한 무게와 원시료와의 무게 차이를 원시료의 무게에 대한 백분율로 구하였다.

탄산염 함량과 금속원소의 함량 분석을 위한 시료는 먼저 110°C로 건조시킨 후 마노유발(agate mortar)을 이용하여 분마 하였다. 퇴적물의 탄산염 함량은 이렇게 건조분마된 시료 1 g을 취하여 Bernard calcimeter로 측정하였으며, 또한 퇴적물의 금속원소 함량을 측정하기 위해서는 건조분마된 시료 1 g을 테프론 용기 내에서 HF-HNO₃-HClO₄ 혼합용액으로 반응시켜 Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn를 대상으로 원자흡광분광기(AAS: Atomic Absorption Spectrometer)를 이용하여 전함량 분석을 실시하였다. 모든 화학분석과정에서 표준시료, 중복시료, 공시료를 이용하여 분석데이터 검증(quality control)을 수행하였다. 한편 Tessier *et al.*(1979)이 제안한 추출방법을 이용하여 중금속 화학종 규명을 위한 연속추출분석을 실시하였다 (Table 1). 그 결과 중금속은 1) 교환가능한 형태 2) 탄산염 형태 3) 철-망간 산화물 형태 4) 유기물과 결합된 형태 5) 잔류상 형태 등 5 가지 존재형태로 구별되었다.

Table 1. Sequential extraction scheme for partitioning of sediment samples

Fraction	Extractant	Extracted Component
Exchangeable	1M NaOAc, pH 8.2	Exchangeable ions
Carbonatic	1M NaOAc, pH 5.0 with HOAc	Carbonates
Reducible	0.04M NH ₂ OH · HCl in 25% (v/v) HOAc	Fe and Mn oxides
Organic matters	0.02M HNO ₃ +30% H ₂ O ₂ with HNO ₃	Organic matters
Residual	HNO ₃ +HClO ₄	Lithogenic material

결과 및 토의

퇴적물 분포와 조성

삼천포화력발전소 주변해역 표층퇴적물의 평균입도는 0.2~8.6 Φ로, 자갈이 섞인 사질(gravelly sand)에서 니질(mud)까지 다양한 종류의 퇴적물이 분포하였다. 자갈의 함량은 0.1~30.2%, 사질함량은 3.0~87.8%, 실트질함량은 1.7~38.2%, 점토질함량은 2.9~59.8%로 다양한 입자의 퇴적물이 분포하였으나, S1, S8, S10번 정점을 제외하고는 주로 니질의 세립한 퇴적물이 분포하였다. 영광원자력발전소 표층퇴적물의 평균입도는 2.8~6.3 Φ로, 연안은 사질(sand)로 구성되어 있으나 외해쪽으로 가면서 입도가 작아져 사질 실트(sandy silt)로 퇴적물이 구성되었다.

삼천포화력발전소 주변해역 표층퇴적물에서 측정 한 강열감량은 3.3~11.4%로 그 양이 비교적 많았으며, 영광원자력발전소 주변해역 표층퇴적물의 경우 1.3~5.9%로 삼천포에 비해 함

Table 2. Analytical results of surface sediments from Samcheonpo and Youngkwang area

Area	Sample ID	IL (%)	CaCO ₃ (%)	Mz (phi)	Fe (%)	Cd (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	PI ¹⁾
SCP	S1	7.5	61.9	0.3	— ²⁾	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	S2	6.1	12.3	6.5	3.6	1.2	7	50	19	502	27	21	64	1.2
	S3	9.4	9.6	7.8	5.0	1.6	9	77	22	645	42	25	102	1.7
	S4	11.4	11.5	8.0	3.0	1.0	6	68	22	390	32	19	78	1.1
	S6	9.8	11.5	7.6	4.1	1.4	9	77	22	582	42	25	90	1.5
	S7	7.2	9.6	8.2	2.2	1.5	7	45	14	472	27	19	63	1.3
	S8	3.3	46.7	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	S9	6.1	15.5	5.0	1.9	2.0	8	37	13	509	26	21	58	1.6
	S10	10.3	9.3	8.6	2.1	1.6	11	85	19	555	40	21	81	1.5
	S11	11.2	58.9	2.9	1.6	3.4	8	33	12	665	31	27	38	2.4
		Mean	7.9	24.4	5.6	2.8	1.8	8	59	18	553	33	22	72
YK	In	3.4	1.7	3.2	2.7	0.2	7	51	7	317	26	20	39	0.7
	Di	1.3	0.9	2.8	4.2	0.1	3	23	3	495	13	14	18	0.5
	Ref	3.1	1.1	5.4	2.3	0.2	5	79	7	232	23	15	41	0.4
	C1	5.9	1.4	5.0	3.2	0.3	9	89	11	300	34	22	59	0.6
	C2	3.6	1.1	5.1	2.4	0.2	5	75	8	112	22	15	41	0.6
	L1	4.1	1.6	4.4	3.0	0.2	7	74	9	407	27	19	48	0.6
	L2	5.4	1.4	6.3	2.8	0.2	6	73	11	135	13	17	52	0.4
	R1	2.2	1.3	2.8	2.2	0.1	5	40	4	152	16	16	28	0.7
	R2	4.2	0.9	3.4	3.1	0.2	8	71	9	519	29	20	65	0.5
	R3	3.2	0.8	3.1	2.4	0.2	6	55	6	90	23	17	39	0.5
	Mean	3.6	1.2	4.1	2.8	0.2	6	63	8	276	23	18	43	0.6
Average Crust ³⁾					5.6	0.2	25	100	55	950	75	13	70	

¹⁾ PI: Pollution Index

²⁾ -: no data(rocky sample)

³⁾ Taylor, 1964

량과 변동폭이 그다지 크지 않았다(Table 2). 이는 강열감량의 공간적 분포가 평균입도의 분포와 비슷해 영광 퇴적물시료의 평균입도 분산범위가 삼천포에 비해 상대적으로 작기 때문으로 해석된다. 평균입도와 강열감량의 관계를 나타낸 Fig. 2와 Table 3, 4에서도 알 수 있듯이(삼천포, $r=0.42$; 영광, $r=0.68$) 평균입도가 세립해지면서 강열감량이 증가하는 경향이 잘 나타나고 있으며 이는 세립한 퇴적물 표면에 흡착되어 있는 유기물에 의한 영향으로 해석된다.

삼천포화력발전소 주변해역 표층퇴적물 중의 탄산염 함량은 9.6~61.9%로 정점별 변동이 컸으며, 특히 조립한 퇴적물이 분포하는 정점에서 50% 내외의 높은 값을 보였다. 이는 이 정점에서 채취한 퇴적물 중 사질이 거의 패각편으로 이루어져 있기 때문으로 생각된다. 탄산염 함량은 패각편의 양에 의해 주로 영향을 받으므로 조립한 퇴적물에서 높게 나타나는데, 이러한 분포의 특징을 평균입도와 탄산염 함량의 관계를 도시한 그림과 상관관계 분석표에서 잘 알 수 있다(Fig. 2, Table 3; $r=-0.92$). 한편 영광원자력발전소 표층퇴적물 중의 탄산염 함량은 0.8~1.7%의 값을 가지고 있으며, 그 값의 범위가 아주 작아 특별한 분포 경향성을 보이지 않았다.

중금속 함량 분포특성

분석된 퇴적물에서 나타난 중금속의 평균 함량과 그 범위를 Table 2에 제시하였다. 제시된 대부분의 중금속의 평균 함량은 Cd와 Pb를 제외하면 지각물질 중의 자연적인 배경값에 못미치는 수준으로서 오염의 영향을 받지 않았음을 시사해준다.

입도에 따른 중금속원소의 함량변화를 살펴보기 위하여 평균 입도와의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 삼천포의 경우 Co($r=0.15$)는 입도와의 관계가 뚜렷하지 않으나 Cr($r=0.77$), Cu($r=0.70$), Fe($r=0.46$), Ni($r=0.43$), Zn($r=0.77$) 등은 정도의 차이는 있지만 입도의 영향을 받고 있으며, 입도가 세립화함에 따라 점차 함량이 증가하는 일반적인 현상을 보여주고 있다. 이러한 입도의존적 함량변화는 여러 연구자들에 의해서도 보고되어 온 현상으로서(Forstner and Salomons, 1981; Horowitz, 1991; 조 등, 1994), 퇴적물의 입도가 중금속 함량을 조절하는 중요한 인자임을 암시한다. 한편 Cd, Mn, Pb 등은 평균입도와 음의 상관관계(각각 $r=-0.85, -0.42, -0.48$)를 나타내어 다른 중금속원소들과는 구별되는 분포 경향을 보이고 있으며, 탄산염 함량과의 높은 상관관계(각각 $r=0.92, 0.51, 0.61$)로 미루어 보아 이들 원소의 함량은 탄산염 물질에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

영광의 경우에는 퇴적물 중의 중금속 함량과 입도와의 관련성이 Cr, Cu, Zn(각각 $r=0.77, 0.72, 0.48$)을 제외하고는 낮게 나타났다. 이는 영광 주변해역 표층퇴적물의 경우 대부분 사질(sand)이어서 입도에 따른 경향성이 약하게 나타난 것으로 파악된다. 한편 대부분의 원소들이 유기물의 함량을 나타내는 강열감량과 높은 관련성을 가지고 있어 이 지역의 중금속 함량의 분포는 입도에 따른 영향과 함께 퇴적물 내의 유기물 함량에 의해서도 조절되고 있음을 시사해 준다(Table 4). 퇴적물 내의 유기물과 중금속간의 결합은 쉽게 치환될 수 있는 형태(adsorption)에서부터 화학적으로 강하게 결합된 형태(chemically bonded form)까지 다양하며(Saxby, 1969), 퇴적물 내의 Co, Cu, Fe, Pb,

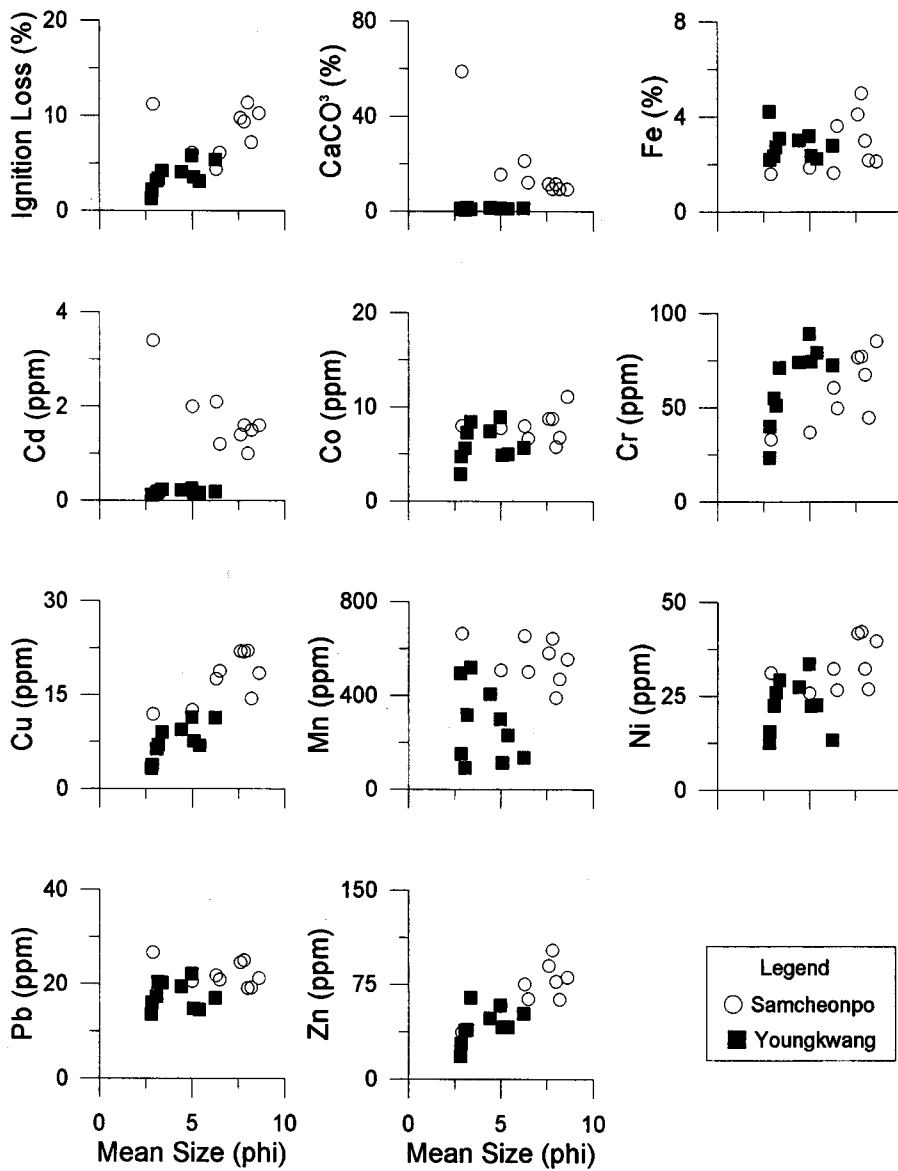


Fig. 2. Correlation plot of heavy metals against mean grain size of the study area.

Table 3. The correlation matrix of element concentration and textural characteristics in sediment samples of Samcheonpo

	Mz	CaCO ₃	IL	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Mz	1.00											
CaCO ₃	-0.92	1.00										
IL	0.42	-0.13	1.00									
Cd	-0.85	0.92	0.07	1.00								
Co	0.15	-0.03	0.20	0.20	1.00							
Cr	0.77	-0.58	0.33	-0.55	0.54	1.00						
Cu	0.70	-0.59	0.27	-0.72	0.06	0.85	1.00					
Fe	0.46	-0.47	0.23	-0.55	0.01	0.54	0.78	1.00				
Mn	-0.42	0.51	-0.07	0.67	0.55	0.05	-0.14	0.00	1.00			
Ni	0.43	-0.19	0.52	-0.13	0.67	0.85	0.67	0.56	0.43	1.00		
Pb	-0.48	0.61	0.36	0.63	0.41	0.03	-0.02	0.26	0.83	0.52	1.00	
Zn	0.77	-0.71	0.10	-0.64	0.34	0.89	0.86	0.73	0.05	0.76	0.01	1.00

Mn, Ni, Zn 함량의 1~10%를 축적하는 경우도 있다(Swanson et al., 1966; Himer et al., 1990).

요인분석은 변수들간의 상관관계를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 묶어주는 방법으로서 주로 자료의 복잡성을 줄이고

몇 개의 요인으로 정보를 요약하려는 목적으로 사용된다. 본 연구에서는 퇴적물의 중금속원소 함량을 조절하는 요인들을 보다 객관적으로 파악하기 위하여 분석된 퇴적물의 평균입도, 탄산염 함량, 강열감량(IL: Ignition Loss), Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn,

Table 4. The correlation matrix of element concentration and textural characteristics in sediment samples of Youngkwang

	Mz	CaCO ₃	IL	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Mz	1.00											
CaCO ₃	0.30	1.00										
IL	0.68	0.41	1.00									
Cd	0.34	0.32	0.83	1.00								
Co	0.14	0.38	0.76	0.93	1.00							
Cr	0.77	0.23	0.84	0.74	0.64	1.00						
Cu	0.72	0.39	0.98	0.86	0.74	0.86	1.00					
Fe	-0.22	-0.09	-0.11	0.12	-0.03	-0.33	-0.03	1.00				
Mn	-0.35	-0.04	-0.12	0.31	0.27	-0.16	-0.02	0.77	1.00			
Ni	0.06	0.19	0.55	0.84	0.88	0.66	0.54	-0.07	0.27	1.00		
Pb	-0.01	0.46	0.69	0.87	0.96	0.46	0.64	0.07	0.28	0.79	1.00	
Zn	0.48	0.16	0.88	0.89	0.86	0.84	0.89	-0.11	0.13	0.70	0.72	1.00

Table 5. Varimax factor matrix of variables and factor score for surface sediments in Samcheonpo region

Variables	Factor			Communality
	1	2	3	
Mz	0.93			0.89
CaCO ₃	-0.89			0.96
IL			0.84	0.71
Fe	0.63		0.52	0.68
Cr	0.87			0.93
Zn	0.92			0.94
Cd	-0.86	0.49		0.98
Cu	0.85		0.41	0.89
Ni	0.58	0.64	0.48	0.98
Co		0.85		0.79
Mn		0.90		0.89
Pb		0.71	0.57	0.92
Eigenvalue	5.81	3.54	1.19	
Percent of variance explained by factor	48.4	29.5	10.0	
Cumulative percent of variance	48.4	77.9	87.8	

(Factor loadings less than 0.4 are omitted.)

Table 6. Varimax factor matrix of variables and factor score for surface sediments in Youngkwang region

Variables	Factor			Communality
	1	2	3	
Mz		0.96		0.97
CaCO ₃				0.19
IL	0.58	0.78		0.94
Fe			0.97	0.95
Cr	0.50	0.77		0.89
Zn	0.72	0.60		0.88
Cd	0.83	0.49		0.98
Cu	0.53	0.83		0.97
Ni	0.91			0.84
Co	0.96			0.99
Mn			0.89	0.90
Pb	0.95			0.93
Eigenvalue	6.87	2.40	1.16	
Percent of variance explained by factor	57.3	20.0	9.7	
Cumulative percent of variance	57.3	77.3	86.9	

(Factor loadings less than 0.4 are omitted.)

Ni, Pb, Zn의 함량을 변수로 하여 R-mode 요인분석을 실시하였다. 요인분석의 결과는 Table 5와 6에 나타냈으며, 각각 3 개의 요인으로 총분산의 87.8%, 86.9%가 설명되었다. 삼천포의 경우 Factor 1은 총분산의 48.4%를 설명하는 요인으로서, 평균입도와 Fe, Cr, Zn, Cu, Ni의 함량에 있어 매우 높은 적재량을 보인다. 이들 변수들은 모두 입도에 의한 요인으로 해석되며 앞선 고찰과 마찬가지로 평균입도에 의한 영향이 중금속 함량을 조절하는 주요 인자라는 사실을 말해주고 있다. Factor 2는 총분산의 29.5%를 설명하는 요인으로 Co, Mn, Pb, Cd, Ni에서 유의한 적재량을 보였다. 해양환경에서 Mn 및 Pb, Cd, Co는 Ca와 치환됨으로써 탄산염 물질 내에 자생적으로 축적될 수 있으며(Kitano *et al.*, 1980; Pedersen and Price, 1982; Zhang *et al.*, 1988), 이러한 이유로 이들 원소의 함량은 퇴적물에 존재하는 탄산염 함량에 의해 조절되고 있다고 볼 수 있다. 이 결과는 앞서 언급한 바와 같이 탄산염 함량과 이들 원소와의 높은 상관관계에 의해서도 확인할 수 있다(Table 3). Factor 3은 강열감량, Fe, Pb, Cu, Ni에서 유의한 적재량을 보여 이들 원소의 분산이 유기물의 함량변화에 의해서도 영향을 받고 있음을 시사해준다. 영광의 경

우 Factor 1은 총분산의 57.3%를 설명하는 요인으로서 강열감량, Co, Pb, Cr, Zn, Cd, Cu, Ni에 있어 매우 높은 적재량을 보여 유기물 함량이 본 지역의 퇴적물 내 중금속 함량을 조절하는 주요한 인자임을 반영하고 있다. Factor 2는 평균입도와 강열감량, 그리고 Cr, Zn, Cu에 있어 유의한 적재량을 보이고 있으며 이는 평균입도에 의한 요인으로 해석할 수 있다. 한편 Factor 3은 Fe와 Mn에서만 유의한 적재량을 나타내며, 이들 두 원소의 지화학적 공통성으로 미루어볼 때 산화물에 의한 요인으로 해석이 가능한 것으로 판단된다. 이러한 요인분석의 결과 역시 앞서 언급한 바와 같이 평균입도에 의한 영향이 두 지역 모두에서 중금속원소의 분산에 있어 주요한 인자임을 알 수 있으며, 더불어 유기물 함량과 탄산염 함량 역시 중금속원소 함량변화에 영향을 미치는 주요한 인자임을 반영하고 있다.

중금속의 존재형태

최근의 생물학적, 환경학적 연구에 있어 많은 부분이 화학종 규명에 초점을 맞추고 있다. 이는 중금속원소들의 분포, 이동도 (mobility) 및 생물학적 흡수정도(bioavailability)는 그 원소의 총

함량보다는 실제로 자연계에서 나타나는 물리적, 화학적 형태에 의존한다는 사실이 널리 인식되어지고 있다는 증거이다. 자연적이든 인위적이든 환경조건의 변화는 필수원소나 독성원소의 존재형태를 변화시킴으로써 그 거동에 영향을 줄 수 있으며, 이러한 변화조절요소로는 pH, 산화환원전위, 착염을 형성하게 하는 리간드와 흡착이 일어나는 입자 표면의 유용도 등을 들 수 있다(Ure and Davidson, 1995). 본 연구에서는 삼천포화력발전소와 영광원자력발전소의 퇴적물 중 관심대상 지점인 취수구와

배수구의 시료, 그리고 함량이 높게 나타난 시료를 선별하여 각각 화학종 규명을 위한 연속추출분석을 실시하였으며, 분석결과에 의해 기능적으로 구분된 중금속원소들의 존재형태를 Fig. 3에 도시하였다.

퇴적물 내의 Fe 함량은 그 자체에 의한 유기물의 폐해 요인도 중요하지만 Mn과 함께 산화물의 형태로서 수중의 많은 미량 중금속을 흡착, 공침전하는 기질로서의 역할도 주관심의 대상이 된다. 연구지역의 Fe는 퇴적물 내에서 주로 유기물과 결합된 형

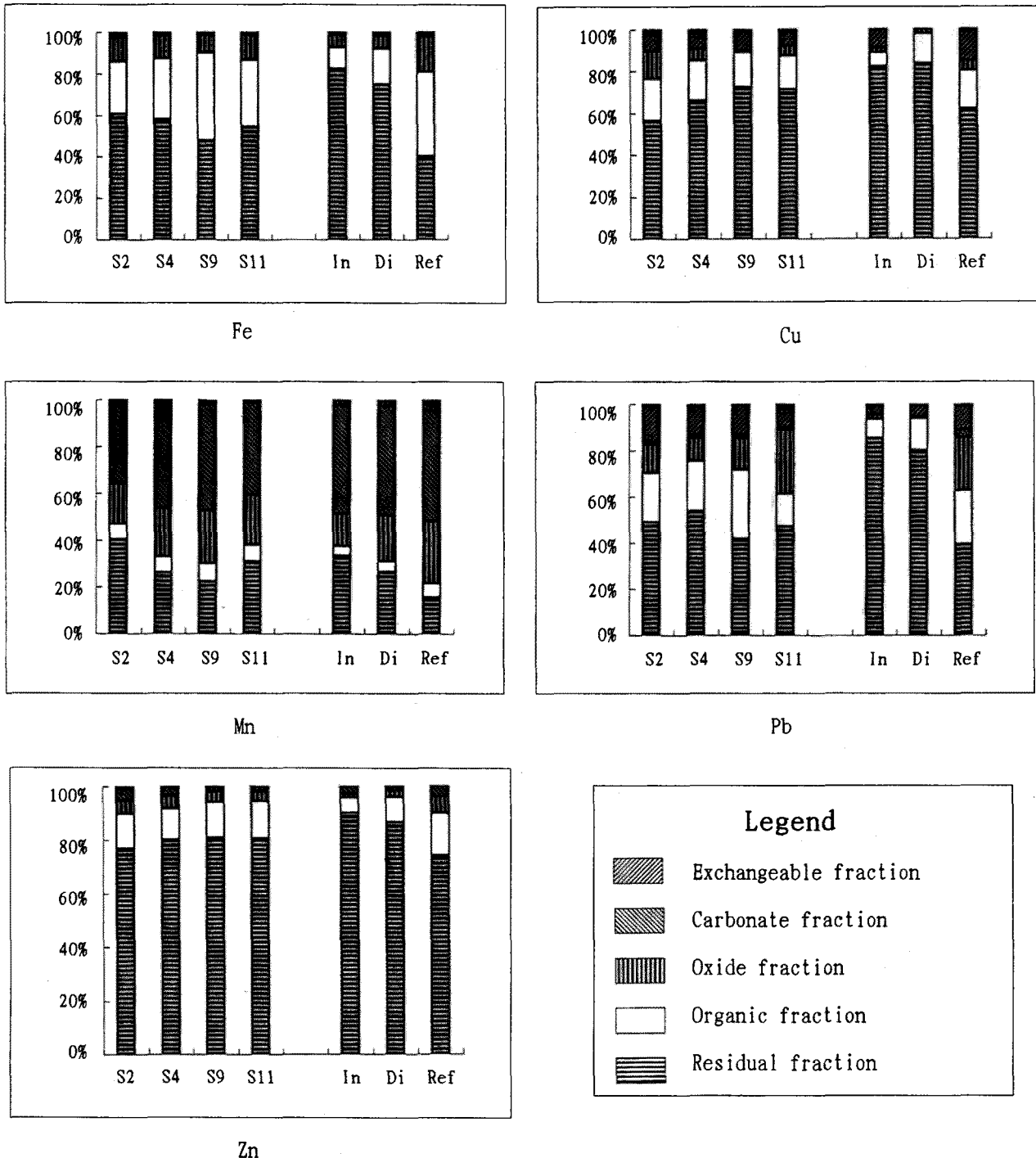


Fig. 3. Partitionings of sequentially extracted metal contents in surface sediments (S2, S4, S9, S11: SCP/In, Di, Ref: YK).

태와 잔류상의 형태로 존재하였다. 삼천포의 경우 잔류상으로 존재하는 부분이 48.0~60.7%, 유기물과 결합된 형태의 부분도 25.1~42.0%를 차지하고 있으며, 영광의 경우 Ref를 제외한 정점들에서 잔류상으로 존재하는 부분이 월등히 많았다. Cu와 Zn의 경우는 Fe와 비슷한 존재형태를 가지고 있으며, 잔류상으로 존재하는 부분이 다른 존재형태에 비해 특히 많은 부분을 차지하고 있었다. Pb는 영광의 In과 Di 시료의 경우 잔류상으로 존재하는 부분이 월등히 많으나 영광의 Ref 시료와 삼천포 시료들에서는 유기물과 결합된 형태(14.0~29.7%)와 산화물의 형태로 존재하는 부분(10.1~28.0%)도 상당량 존재하고 있다. Mn의 경우 다른 원소와는 아주 다른 양상을 나타내고 있는데 잔류상으로 존재하는 부분에 비해 탄산염 형태로 존재하는 부분(삼천포: 32.9~45.3%, 영광: 46.3~47.3%)이 많았다.

전반적으로 살펴볼 때 대부분의 시료에서 중금속들의 잔류상의 형태가 월등히 많은 부분을 차지하고 있어 인위적인(anthropogenic) 오염에 의한 영향을 받지 않았음을 알 수 있다. 또한 삼천포의 S2번, S4번, S9번, S11번 시료와 영광의 Ref 시료는 서로 비슷한 화학적 존재형태비를 가지고 있으며, 한편 영광의 In, Di 시료 역시 서로 비슷한 존재 양상을 나타내고 있다. 이는 두 집단간의 입도에 의한 차이에서 기인한 것으로 파악할 수 있는데, 전자의 경우는 주로 실트질이나 점토질의 입도 조성을 보이고 있으며, 후자의 경우는 주로 사질의 입도 조성을 가지고 있다. 따라서 In, Di 시료의 경우 대부분의 중금속들이 사질의 광물 격자 내에 존재하고 있어 잔류상으로 존재하는 부분의 비율이 높으며, Ref 시료와 삼천포 시료의 경우 중금속이 유기물과 결합된 형태와 산화물의 형태로 존재하는 부분도 높은 비율을 차지하고 있는데 이는 점토광물이 광물 격자 내에 중금속을 함유하고 있기도 하지만 중금속의 농축요인으로 작용하는 유기물이나 철-망간 산화물 등의 지화학 물질들을 집적시키는 기질로 작용하고 있음을 의미한다.

연속추출분석에서는 추출단계가 진행됨에 따라 결합정도가 더 강하게 이루어지는 것을 의미하므로 이동도와 생물흡수도는 점점 감소하는 것으로 간주하는 것이 타당하다. 따라서 두 지역 모두에서 Mn의 경우 교환가능한 형태와 탄산염 형태가 다른 중금속에 비해 높게 나타나므로 이동도와 생물흡수도가 가장 높을 것으로 예상할 수 있다. 삼천포의 경우에는 Pb 역시 기타 중금속에 비하여 생물흡수도가 높은 원소로 나타났다.

오염지수 산출

일반적으로 오염현상이라는 것은 단일 중금속의 오염보다는 여러 원소들이 복합적으로 오염될 가능성이 있기 때문에 각 퇴적물시료에 대한 종합적인 환경오염 여부를 조사하기 위하여 오염지수(PI: Pollution Index)를 구하였다. 오염지수란 퇴적물 내의 각 원소의 함량을 각각의 배경값 함량으로 나누어준 후, 이들을 합한 값을 지수에 투여된 원소의 수로 나눈 값으로서, 오염지수가 1 보다 크다는 것은 자연적인 배경값 함량을 넘어서는 오염지역임을, 그리고 1 이하는 비오염지역임을 나타내게 된다. 그러나 연구지역에서의 중금속원소들의 분포가 평균입도와 탄산염 함량, 유기물 함량 등에 의해 조절되고 있다는 앞선 고찰에서 알 수 있듯이 이 지수값은 조절요인들에 대한 공간적

인 변화양상만을 재구성한 결과일 수도 있다. 하지만 환경문제는 상대적인 함량보다는 절대적인 함량이 더 중요한 의미를 가지기 때문에 어느 지역의 퇴적물 입도가 세립이어서 그 곳에서 중금속의 축적이 계속해서 일어난다면 그 지역은 오염의 영향을 받는다고 할 수 있기 때문에 오염지수를 통한 고찰은 환경학적인 측면에서 본다면 의미를 갖을 수 있다고 판단된다.

중금속원소의 함량을 지각 중의 평균 원소함량인 5.6% Fe, 0.2µg/g Cd, 25µg/g Co, 100µg/g Cr, 55µg/g Cu, 950µg/g Mn, 75µg/g Ni, 13µg/g Pb와 70µg/g Zn(Taylor, 1964)에 대한 비를 구하여 이를 평균한 오염지수로 나타내면 삼천포의 경우 1.1~2.4 (평균 1.6)의 오염지수의 값을 나타내고 있으며, 영광의 경우 대부분 정점에서 1 이하의 값을 보이고 있다(Table 2). 삼천포에서 오염지수 값이 다소 높게 나타나는 것은 대부분 높은 Cd 함량에 의한 것으로서, 이는 앞서 언급한 바와 같이 탄산염 물질에 의한 영향으로 해석된다.

이러한 오염평가방법은 단지 경향성만을 제시해주는 초보적인 단계로 생각되며, 여기서 배경값 함량의 선정, 입도와 탄산염 함량에 대한 보정, 산추출방법 및 생물체로의 농축 등의 인자들을 고려한 해양퇴적물에서의 중금속 오염을 정량화할 수 있는 방법에 대한 추가적인 연구의 필요성이 제기된다고 할 수 있다.

결론

발전소의 가동에 따른 중금속원소들의 분산양상과 오염특성을 파악하고, 중금속원소들의 화학종 규명을 위하여 삼천포화력발전소와 영광원자력발전소 주변해역의 표층퇴적물을 대상으로 중금속의 총 함량(Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)과 연속추출분석(Cu, Fe, Mn, Pb, Zn)을 통한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 삼천포화력발전소 주변해역 표층퇴적물의 입도 조성은 자갈이 섞인 사질에서 니질까지 다양한 종류의 퇴적물이 분포하고 있었으며, 영광원자력발전소의 경우 연안은 사질로 구성되어 있으나 외해쪽으로 가면서 입도가 작아져 사질 실트로 퇴적물이 구성되어있다. 이러한 퇴적물의 입도 조성 분포에 따라 강열감량과 탄산염 함량의 차이가 존재하여 입도 조성이 다양한 삼천포 주변해역에서 더 넓은 범위의 함량 변화를 나타냈다.

2. 중금속 함량은 평균적으로 낮은 반면에 공간적으로는 매우 큰 폭의 변화를 보인다. 중금속의 공간적인 분포는 퇴적물의 입도와 탄산염 물질, 그리고 유기물 함량에 의한 영향을 많이 받고 있으며, 특히 입도에 의한 영향은 유기물, 산화물 등의 지화학 성분 변화에도 작용하므로 퇴적물의 중금속 함량을 조절하는 주요 인자인 것으로 나타났다.

3. 연속추출분석 결과 삼천포/영광 주변해역의 표층퇴적물 시료 모두 잔류상 형태가 많은 부분을 차지하여 인위적인 오염의 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있었다. 또한 화학적 존재형태비 역시 입도에 의한 영향이 지배적이어서 사질의 입도 조성을 가지고 있는 영광의 In, Di 시료의 경우 중금속의 존재형태가 잔류상인 부분이 월등히 많으며 영광의 Ref 시료와 삼천포 시료의 경우 유기물과 결합된 형태와 산화물의 형태도 많은 부분을 차

지하고 있다.

4. 연구지역 퇴적물 내의 중금속원소 함량을 지각 중의 평균 원소함량으로 나누어 이를 평균한 오염지수는 영광의 경우 평균 0.6, 삼천포의 경우 평균 1.6의 값을 나타내고 있으며, 특히 삼천포의 경우 오염지수 값이 다소 높게 나타나는 것은 높은 Cd 함량에 의한 것으로서 이는 탄산염 물질에 의한 영향으로 해석된다.

참고문헌

- 승정자, 1984. 극미량원소의 영양. 민음사, 11-25 pp.
- 조영길, 이창복, 최만식, 1994. 남해 대륙붕 표층퇴적물중 중금속 원소의 분포 특성. 한국해양학회지, **29**: 338-356.
- Alloway, B.J., 1995. Heavy metals in soils (2nd ed.). Chapman & Hall, Glasgow, 368 pp.
- Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brozos river: A study in the significance of grain-size parameters. *J. Sed. Petrology*, **27**: 3-27.
- Forstner, U. and W. Salomons, 1981. Trace metal analysis on polluted sediments. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **1**: 494-517.
- Hirner, A., K. Kritsotakis and H. Tobschall, 1990. Metal-organic associations in sediments-I, comparison of unpolluted recent and ancient sediments and sediments affected by anthropogenic pollution. *Applied Geochemistry*, **5**: 497-506.
- Horowitz, A.J., 1991. A primer on sediment-trace element chemistry (2nd ed.). Lewis Publishers, Michigan, 136 pp.
- Kitano, Y., M. Sakata and E. Matsumoto, 1980. Partitioning of heavy metals into mineral and organic fractions in a sediment core from Tokyo Bay. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**: 1279-1285.
- Pedersen, T.F. and N.B. Price, 1982. The geochemistry of manganese carbonate in Panama Basin sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**: 59-68.
- Saxby, J., 1969. Metal-organic chemistry of the geochemical cycle. *Reviews of Pure and Applied Chemistry*, **19**: 131-150.
- Swanson, V., L. Frist, R. Radar, Jr. and C. Huffman, Jr., 1966. Metal sorption by northwest Florida humate. U.S. Geological Survey Professional Paper **550(C)**: 174-177.
- Taylor, S.R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **28**: 1274-1285.
- 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.
- Thornton, I., 1983. Applied environmental geochemistry. Academic Press, London, 501 pp.
- Ure, A.M. and C.M. Davidson, 1995. Chemical speciation in the environment. Chapman & Hall, Glasgow, 408 pp.
- Zhang, J., W.W. Huang and J.M. Martin, 1988. Trace metals distribution in Huanghe (Yellow river) estuarine sediments. *Estuar. Cost. and Shelf Sci.*, **26**: 499-516.

1998년 7월 7일 원고 접수

1998년 11월 30일 수정본 채택