

동/서해병 해역 표층 퇴적물의 중금속 분포 특성 비교

김필근¹ · 박맹언² · 성규열^{3*} · 임성택² · 오설미²

¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부, ²부경대학교 환경지질학과, ³한국해양대학교 에너지자원공학과

Comparative Study on Distribution of Heavy Metals of the Surface Sediments in East/West Oceanic Dumping Areas

Pil-Geun Kim¹, Maeng-Eon Park², Kyu-Youl Sung^{3*}, Sung Taek Lim² and Sul-Mi Oh²

¹Petroleum & Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

³Department of Energy and Resources Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

The distribution characteristics of heavy metals for surface sediments in east oceanic dumping area (EDA) and west oceanic dumping area (WDA) are evaluated by grain sizes, minerals, sedimentation rates and compositions of heavy metals. The mean grain sizes in EDA and WDA range from 7.95 Φ to 8.51 Φ and 7.42 Φ to 8.15 Φ , respectively. These are mostly belonging to the M (mud) type. Minerals in the surface sediments consist of illite with chlorite, smectite, and kaolinite. Sedimentation rates estimated by ²¹⁰Pb method in EDA and WDA are 1.11 mm/yr~1.73 mm/yr and 1.87 mm/yr, respectively. According to the interrelationship, concentrations of Ni, Cu, Cr, and Zn are closely associated with mean grain size, Al, and Fe, whereas concentrations of Cd and Pb are poorly associated with ones. The enrichment factors of these elements are higher than 1.5, suggesting that the concentrations of Cd and Pb in the surface sediments are affected by anthropogenic sources. The I_{geo} -class numbers of Cd and Pb in the surface sediments are mostly classified in 2 to 4, showing moderate to strongly polluted. These numbers in EDA are higher than that of WDA, and the highest number is 4, indicative of the strongly polluted class. Our results show that the disposed wastes at EDA include mineralogical wastes, dredged materials from sewage disposals, and sludges from constructions having materials of WDA. The annual amount of oceanic dumping in EDA is double than that in WDA.

Key words : oceanic dumping, heavy metals, sediments, enrichment factors, I_{geo}

폐기물 해양 투기 지역인 동해병과 서해병 해역 표층퇴적물의 입도, 광물학적 특성, 퇴적속도 및 중금속 함량을 분석하여 중금속 분포 특성을 비교하였다. 동해병과 서해병 해역의 입도는 각각 7.95~8.51 Φ 와 7.42~8.15 Φ 의 범위이며, 동해병 해역의 일부 정점을 제외한 모든 정점의 퇴적상은 니질 퇴적물에 속한다. 연구지역 표층퇴적물의 주 구성 점토광물은 일라이트이며, 카올린 계열 광물과 녹니석, 스멕타이트로 소량 구성되어 있다. ²¹⁰Pb에 의해 추정된 동해병해역 표층퇴적물의 퇴적속도는 1.11 mm/yr~1.73 mm/yr이며, 서해병해역 퇴적물의 퇴적속도는 1.87 mm/yr이다. 상관성 분석 결과, 니켈, 구리, 크롬 및 아연은 평균입도, 알루미늄 및 철과 밀접한 상관성을 보인다. 반면, 연구지역 퇴적물의 카드뮴과 납은 이들 요소들과 상관성이 결여되어 있을 뿐만 아니라, 부화지수가 1.5이상으로 인위적인 오염의 징후를 보인다. 그리고 카드뮴과 납의 I_{geo} -class 역시 대부분 2~4로 moderately polluted~strongly polluted로 분류된다. 특히, 동해병의 I_{geo} -class가 최대 4인 strongly polluted로 분류되어 서해병 해역보다 높다. 이는 동해병 해역에 투기되는 폐기물이 서해병 해역에 투기되는 폐기물뿐만 아니라, 광물성폐기물, 하수도준설토사, 건설공사 오니 등이 추가로 배출되고 있으며, 양적으로도 서해병 보다 두 배 이상 투여되기 때문인 것으로 판단된다.

주요어 : 해양폐기, 중금속, 퇴적물, 부화지수, I_{geo}

*Corresponding author: geochemsky@hhu.ac.kr

1. 서 론

과거 해양은 오염체를 무한대로 희석시킬 수 있는 거대한 수용체로 인식되어 폐기물 해양투기를 선호하였으 며, 국토이용 전략 중의 하나로서 해양을 폐기물 처리의 최종 장소로 이용하였다. 그러나 1970년대 이 후, 해양은 오염원을 수용할 수 있는 수용체가 아니며, 폐기물의 투기가 해양환경에 영향을 줄 수 있다는 인 식이 자리잡게 되어 세계 각국에서 해양투기를 제한하 거나 금지하기 시작하였다(Kite-Powell *et al.*, 1998). 그리고 '72 런던협약'과 '96 의정서' 등의 시행으로 인 해 폐기물 해양투기에 대한 국제규제가 강화되었다. 특 히, 1996년에 채택된 '96 의정서'는 '72 런던협약'의 실효성 확보와 해양배출조건을 강화하기 위해 개정되 었으며, 이 의정서는 2006년에 발효되었다.

우리나라의 해양투기는 1998년 이전에는 소규모였으 며, 1998년 이후 동해병, 동해정 및 서해병 해역을 폐 기물 배출 해역으로 지정하여 국가적인 차원에서 운영 하고 있다. 해양으로 투기된 폐기물의 총량은 1988년 552,000 m³을 시작으로 매년 증가하여 2002년에는 8,475,000 m³으로 1988년에 비해 약 15배 증가하였다. 그리고 2005년에는 9,928,000 m³으로 가장 많은 폐기 물을 배출하였으며, 2006년 이후부터 8,812,000 m³으로 다소 감소하기 시작하였다(KCG, 2007). 해양 폐기 물 투기장 중 동해병 해역은 포항에서 동쪽으로 약 125 km에 위치하고 있으며, 면적은 3,700 km², 수심은 약 200-2,000 m이다. 동해병 해역의 주 배출 폐기물은 분뇨, 축산폐수, 유기성 폐수, 수산물 가공잔재물, 수저 준설토사, 폐수·하수처리오니, 원료사용동식물 폐기물 및 정수·건설오니이다. 그리고 군산 서방 200 km 지 점에 위치한 서해병 해역의 면적은 3,165 km²이며, 수심은 약 80 m이다. 이 지역의 주 배출 폐기물은 분 뇨, 축산폐수, 유기성 폐수, 폐수·하수처리오니 및 원 료사용동식물폐기물이다(KCG, 2007).

해양투입물질 관리체제 구축과 관련된 연구와 폐기 장 내 퇴적상에 대한 연구 등 해양투기해역에 대한 많 은 연구가 수행되었으며, 해양경찰청의 지속적인 모니 터링이 수행되어왔다(KORDI, 1997; Park *et al.*, 1998; Chun *et al.*, 1999; Hong *et al.*, 2002; MLTM, 2005; Chung and Kim, 2008). 그러나 폐기물 배출에 따른 표층 퇴적물의 중금속 분포 특성에 관한 체계적인 연 구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 폐기물 관리해역 중 서해병과 동해병 해역 표층퇴적물의 중금 속 분포 특성을 비교 평가하였다.

2. 시료채취 및 연구방법

동해병과 서해병 해역에 대한 탐사는 각각 2005년 9월과 10월에 시행되었으며, 피스톤 코어와 중력식 코 어를 이용하여 각각 7개 지점의 코어시료를 회수하였 다(Fig. 1). 퇴적물의 입도분석을 위해 일정량의 시료를 취하여 1N 염산과 10% 과산화수소로 탄산염과 유기 물을 제거하였으며, 증류수를 이용하여 용해성 염분을 제거한 후 4Φ(0.062 mm) 체로 습식 체질을 하였다. 4Φ 이상의 입자들은 로템요동기를 이용하여 1Φ 간격 으로 분석하여 입도의 중량 백분율을 구하였다. 4Φ 이 하의 입자들은 확산제를 이용하여 확산시킨 후 자동입 도분석기(Sedigraph 5100, Micromeritics)로 분석하였 다. 분석 결과는 Folk (1968)의 모멘트 방법에 따라 분류하였다.

연구지역의 광물학적 특성을 파악하기 위하여 원심 분리기를 이용하여 점토광물을 농집한 후 X-선 회절분 석(Rigaku, Geigerflex 2301)을 실시하였다. 분석조건 은 전압 40 kV, 전류 95 mA이며, 타겟은 Cu 타겟을 이용하였다.

퇴적속도는 ²¹⁰Pb(반감기 22.3년)를 이용하여 산출하 였다. 일반적으로 ²¹⁰Pb는 자연적 기원과 인위적인 기 원으로부터 유래하며, 자연적인 기원에는 supported ²¹⁰Pb와 unsupported ²¹⁰Pb로 나눌 수 있다. supported ²¹⁰Pb는 퇴적물 내에 존재하는 ²²⁶Ra로부터 기원된다 (Lee *et al.*, 2005; Di Gregorio *et al.*, 2007). 그리고 대기 중의 unsupported ²¹⁰Pb는 암석이나 토양내의 ²²²Rn에 의해 형성되며, 그 후 해양퇴적물로 이동하게 된

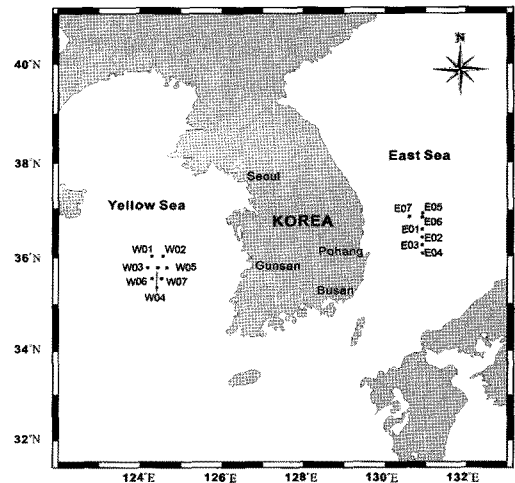


Fig. 1. Sample locations of core in the ocean dumping areas.

다(Appleby and Oldfield, 1992). ^{210}Pb 의 분석은 부산대 학교의 고순도 게르마늄 검출기(High-purity Germanium detector)를 이용하였으며, 분해능은 1.33 MeV에서 1.95 keV, 상대효율 30%, 결정직경 60.4 mm, Peak/Compton 비는 55/1이며, 검출기의 인가전압은 -3,000 Volt, 측정 시간은 시료별 40,000초, 30,000초로 측정하였다.

퇴적물의 중금속 농도는 시료를 혼합산(질산·과염소산·불산)으로 완전분해한 후, 한국기초과학지원연구원의 유도결합플라즈마 방출 분광기(ICP-AES, Perkin Elmer사의 Optima 4300DU)와 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Thermo Elemental사의 X5)를 이용하여 분석하였다.

연구지역 중금속의 오염정도를 평가하기 위하여 부화지수(Enrichment factor: EF)와 Geo accumulation Index (I_{geo})를 산정하였다. 부화지수의 값이 0.5에서 1.5사이일 경우 퇴적물 내의 중금속들은 지각 또는 풍화기원으로, 1.5이상이면, 인위적인 기원으로 간주될 수 있다(Zhang and Liu, 2002). 부화지수는 퇴적물의 구성광물 중에서 점토광물의 구성비율을 고려하여 중금속의 함량을 보정하는 방법으로 퇴적물 내 중금속의 인위적인 영향을 평가할 수 있다(Zollar *et al.*, 1974; Eby, 2004). 일반적으로 점토광물의 상대적인 비율로 나누어 중금속 함량을 보정하지만, 점토광물의 구성비율을 직접적으로 구하는 방법이 없으므로 점토광물을 대신할 수 있는 Al이나 Fe의 함량으로 나누어서 보정하는 것이 일반적이다(Jung *et al.*, 2007). 연구지역의

부화지수는 완전분해법에 의한 퇴적물의 중금속함량과 Al 함량을 이용하였으며, 식 (1)을 이용하여 산출하였다(Eby, 2004).

$$EF = \frac{(X/Al)_{sediment}}{(X/Al)_{crust}} \quad (1)$$

식 (1)에서 $(X/Al)_{sediment}$ 는 각시료의 중금속 함량과 Al 함량의 비율이며, $(X/Al)_{crust}$ 는 지각의 평균 중금속 함량과 Al 함량의 비율이다. 지각의 평균 함량은 Martin and Whitfield (1983)의 함량을 이용하였으며, 중금속의 함량은 Cd 0.2 mg/kg, Pb 16 mg/kg, Ni 50 mg/kg, Cu 32 mg/kg, Cr 71 mg/kg, Zn 127 mg/kg, Al 69,000 mg/kg 이다.

I_{geo} 는 중금속 오염정도를 7단계로 분류할 수 있으며, 식 (2)를 이용하여 산출하였다(Müller, 1979).

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n) \quad (2)$$

식 (2)에서 C_n 은 연구지역 퇴적물의 중금속 함량이며, B_n 은 지각의 평균 중금속 함량이며, 본 연구에서는 Martin and Whitfield (1983)의 값을 이용하였다.

3. 연구결과

3.1. 입도분포

동해병 해역 퇴적물의 평균입도 분포는 7.95~8.51 Φ 로서, 크게 니질 퇴적물(M)과 점토질 퇴적물(C)로 구

Table 1. Mean grain size of surface sediments from the study area

Station No.	Mz (Φ)	Standard deviation	Contents (%)			Type	
			Sand	Silt	Clay		
EDA	E01	8.09	2.25	0.12	42.11	57.77	M
	E02	8.14	2.17	0.15	37.39	62.46	M
	E03	8.51	1.89	0.15	31.47	68.38	C
	E04	8.22	2.07	0.04	36.59	63.37	M
	E05	8.44	1.86	0.05	33.07	66.88	C
	E06	8.22	2.00	0.45	35.74	63.81	M
	E07	7.95	2.15	0.14	48.04	51.82	M
	Ave.	8.22	2.06	0.16	37.77	62.07	-
WDA	W01	8.05	1.74	0.02	44.89	55.09	M
	W02	7.83	1.72	0.27	50.13	49.6	M
	W03	7.74	1.75	0.26	53.27	46.47	M
	W04	7.84	1.82	0.06	49.73	50.21	M
	W05	7.78	1.89	0.18	49.26	50.56	M
	W06	7.89	1.83	0.02	45.13	54.85	M
	W07	7.42	2.17	5.93	47.48	46.58	M
	Ave.	7.79	1.85	0.96	48.56	50.48	-

Abbreviations: M=mud, C=clay

분된다(Table 1). 모든 정점에서 점토의 함량은 51.82~68.38%로 가장 우세하며, 소량의 모래(1% 미만)가 함유되어 있다. 서해 병해역의 퇴적물의 평균입도 분포는 7.42~8.15 ϕ 으로 니질 퇴적물(M)로 구성되어 있다(Table 1). 모든 정점에서 점토함량(46.47%~55.09%)과 실트의 함량(44.89~53.27%)이 유사하며, W07(5.93%)을 제외한 나머지 정점은 소량의 모래(1% 미만)가 함유되어 있다.

3.2. 광물학적 특성

서해병 해역 퇴적물의 점토광물은 일라이트가 주를 이루고 있으며, 소량의 카올린 계열 광물과 녹니석, 스멕타이트로 구성되어 있다(Table 2). 동해병 해역 역시 서해병 해역과 유사한 경향을 보인다. 서해 해역 퇴적물 내 점토광물의 함량은 일라이트가 70%로 주를 이루고 있으며, 녹니석, 카올리나이트 및 스멕타이트가 소량 함유되어 있는 것으로 보고하였다(Khim, 1988). 그리고 동해 남부해역과 울릉분지 지역의 점토광물 함량 역시 일라이트가 주를 이루며, 녹니석, 카올린 계열 광물 및 스멕타이트가 소량 분포하고 있는 것으로 보고되어 있으며(Lee and Kim, 2007), 이번 연구와 유사한 결과를 보인다.

3.3. ^{210}Pb 을 이용한 퇴적속도 산정

동해병과 서해병 해역 코어 시료에 대한 ^{210}Pb 의 농도 값은 Table 3과 같다. 동해병과 서해병 해역의 ^{210}Pb 농도는 각각 1.38~363.94 mBq/kg와 14.37~199.10 mBq/kg의 범위를 보이며, 각 정점별 깊이에서 다른 ^{210}Pb 의 농도 변화는 전반적으로 부(-)의 상관관계를 보

인다. 깊이에 따른 ^{210}Pb excess activity ('unsupported ^{210}Pb activity)값의 상관계수가 0.9 이상으로 매우 양호한 시료들(E02, 03, 05, W01)의 상관관계에 대한 기울기를 구하였다(Fig. 2). 이 기울기를 이용하여 식(3)에 의해 퇴적속도를 산정하였다.

$$a = -\frac{\lambda}{m} \quad (3)$$

식(3)에서, λ 는 ^{210}Pb 의 붕괴상수(0.0311 year⁻¹)이며, m 은 일차선형 관계에 대한 기울기이다. 동해병 해역 퇴적물의 퇴적속도는 1.11 mm/yr~1.73 mm/yr이며, 서해병 해역의 퇴적속도는 1.87 mm/yr로 추정된다.

Table 3. ^{210}Pb contents of core as a function of depth

		Depth(cm)		
		0-1.0	1.0-2.0	2.0-4.0
EDA	E01	114.58	95.31	67.39
	E02	178.90	68.18	146.50
	E03	363.94	151.69	181.64
	E04	94.22	92.02	48.35
	E05	80.82	1.38	44.81
	E06	293.20	275.57	189.74
	E07	347.02	115.36	97.47
WDA	W01	199.10	145.37	129.07
	W02	137.49	58.55	88.05
	W03	118.40	60.91	n.d.
	W04	74.29	n.d.	n.d.
	W05	83.11	95.87	23.98
	W06	33.84	20.48	141.22
	W07	14.37	n.d.	n.d.

n.d.: not detected

Table 2. Mineral assemblages in sediments sample from the study area

Station No.	qtz	Feldspar		Clay mineral		
		K-fs	plag	chl, vrm, smc	ill	kao
E01	+++		?	+	++	+
E02	+++			+	++	+
E03	+++		?	+	+	+
E04	+++			+	++	+
E07	+++		?	+	+	+
W01	+++		+	+	+	+
W02	+++	+	+	+	++	+
W03	+++		+	+	++	+
W04	+++		?	+	++	+
W06	+++		+	+	+	+

Abbreviations: qtz=quartz, k-fs=K-feldspar, plag=plagioclase, chl=chlorite, vrm=vermiculite, smc=smectite, ill=illite, kao=kaolinite. +++: major, ++: minor, +: accessory

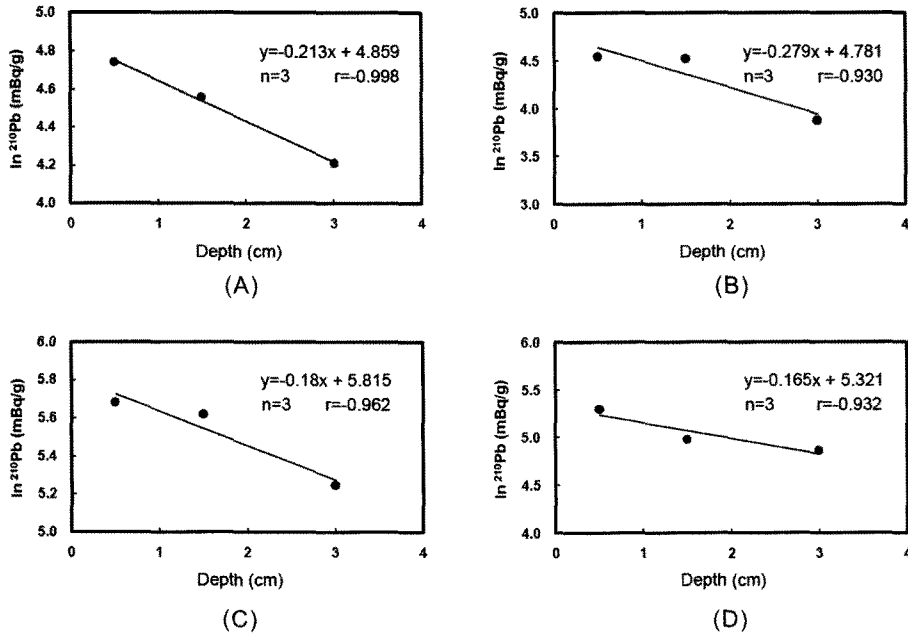


Fig. 2. The ^{210}Pb excess logarithmic profile in the sediment layers of Station E02 (A), E03 (B), E05 (C) and W01 (D).

Table 4. Heavy metal contents of surface sediments from study area

Station	Cd	Pb	Ni	Cu	Cr	Zn
E01	0.76	50.89	37.58	30.70	55.38	90.07
E02	0.25	27.53	38.47	31.24	57.11	100.50
E03	0.45	34.33	38.56	29.92	57.19	105.01
E04	1.13	103.40	35.40	27.68	59.18	103.07
E05	0.51	36.07	37.67	27.11	54.09	110.35
E06	0.12	27.91	32.68	22.40	62.19	125.11
E07	0.52	38.02	38.01	28.65	48.41	104.03
Average	0.53	45.45	36.91	28.24	56.22	105.45
W01	0.14	39.59	38.03	33.96	91.53	92.41
W02	0.23	49.37	26.44	20.76	56.15	61.74
W03	0.20	27.60	30.80	21.16	59.83	67.23
W04	0.23	33.33	37.89	26.08	66.60	88.84
W05	0.38	37.88	41.25	29.02	81.26	91.85
W06	0.19	43.05	41.04	34.79	100.03	99.95
W07	0.38	24.07	32.75	20.28	64.87	66.28
Average	0.25	36.41	35.46	26.58	74.32	81.19

3.4. 중금속 함량

동해병과 서해병 해역 표층 퇴적물의 중금속 함량은 Table 4와 같다. 동해병 해역의 평균 니켈 함량은 36.91 ppm으로 서해병 해역의 평균농도(35.46 ppm)와 유사하며, 구리 함량도 28.24 ppm(동해병)과 26.58 ppm(서해병)으로 두 해역에서 유사한 값을 보인다. 서해병 해역의 크롬 평균농도는 74.32 ppm으로 동해병 해역

(56.22 ppm) 보다 높은 값을 보이는 반면에, 구리, 납 및 아연의 함량은 서해병 해역보다 동해병 해역에서 높게 나타난다. 특히, 동해병 해역의 카드뮴 평균 함량은 0.53 ppm으로 서해병 해역의 평균 함량보다 2배 이상 높다. 또한 동해병 해역의 납 평균 함량은 서해병 해역의 평균 함량보다 약 10 ppm 높으며, 특히 정점 E04에서 103.40 ppm으로 평균 함량의 2배 이상의

값을 보인다.

4. 토 의

4.1. 입도와 점토광물의 분포특성

서해병 해역의 입도분포는 동해병 해역보다 다소 조립한 경향을 보인다. 그러나 퇴적상은 동해병 해역의 일부 정점을 제외하고는 모두 니질 퇴적물로 구성되어 있어 동해병과 서해병 해역의 입도분포는 유사함을 알 수 있다. 또한 서해병과 동해병 해역의 점토광물 조성도 유사한 특징을 보인다. Khim (1988)은 서해의 퇴적상은 인접한 지역의 강 및 하천을 통해 직접적인 영향을 받는 것으로 보고하였다. 반면, 동해의 경우, 인접 지역의 강인 태화강의 퇴적물 공급량이 매우 작고, 대만난류를 통해 이동한 서해의 세립질 퇴적물이 남동해안 연안지역과 울릉분지 일원에 퇴적되는 것으로 추

정하고 있다(Han and Choi, 2007; Lee and Kim, 2007). 따라서 두 해역 광물상의 유사성은 해류에 의해 동해가 서해의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 해석된다.

4.2. 퇴적속도

동해병 해역의 경우, E02, E03, 그리고 E05를 제외한 4개의 정점에서 ^{210}Pb 에 대한 등시선이 구해지지 않았다. 특히 서해병의 경우는 W01을 제외한 모든 정점에서 ^{210}Pb 에 대한 등시선이 구해지지 않았다. 이는 연구지역의 퇴적물이 조석 파랑에 의한 물리적 혼합, 저저생물에 의한 교란 또는 육지성 기원 오염원의 유입 등의 영향을 받은 것으로 해석될 수 있다. Han and Choi (2007)는 동해지역이 저서 생물에 의한 교란의 영향이 미미함을 보고한 반면, Alexander (1991)는 서해병 해역에 해당하는 황해 중앙해역은 퇴적물 혼합 작용의 영향이 큰 지역으로 보고하였다. 따라서 동해

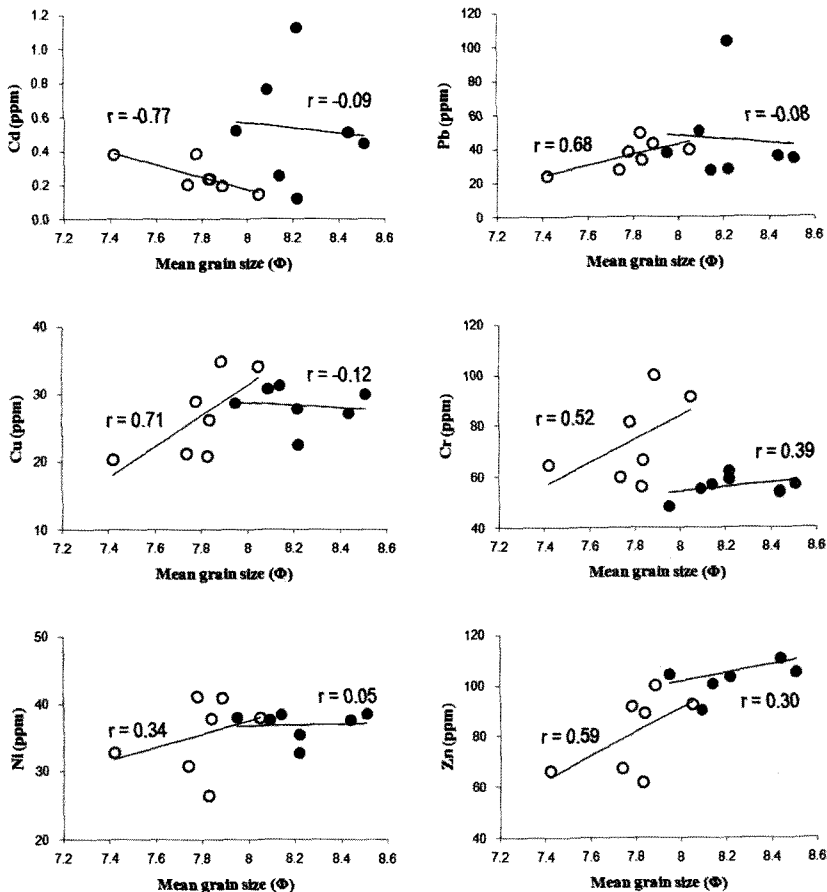


Fig. 3. Bivariate plots between mean grain size and heavy metals for surface sediment samples obtained from EDA and WDA. Closed circles indicate value from EDA, and the open circles indicate value from WDA.

병 해역보다 서해병 해역의 퇴적속도 산정이 어려운 이유는 오염원의 유입보다는 퇴적물 혼합작용에 의한 결과로 해석된다.

4.3. 원소간의 상관성 및 중금속 부화

상관성이 높은 원소들은 일반적으로 지구화학적 특성이나 환경 내에서 거동 방식이 유사함을 보여준다(Harman, 1967; Summerhayes, 1972). 그리고 상관계수 분석은 원소들의 함량과 분포를 조절하는 요인을 평가할 수 있다(Um *et al.*, 2003). 이번 연구에서는 동해병 해역과 서해병 해역 표층퇴적물의 입도, 알루미늄, 철, 그리고 중금속들의 상관계수를 구하였으며, 두 지역의 중금속들의 상관계수를 비교 평가하였다.

중금속과 입도와의 상관성 분석에서 서해병 해역의 납, 크롬, 구리, 아연 등은 정(+)의 상관관계를 보이며, 상관계수도 양호하다. 반면, 동해병 해역 중금속들은

대부분 입도와 상관성이 낮다(Fig. 3). 그리고, 서해병 해역의 니켈, 구리, 크롬 및 아연 등은 알루미늄 및 철과 양호한 상관성을 보인다(Fig. 4와 5). 일반적으로 퇴적물 내 구리, 납 및 아연은 철-망간 수산화물(Fe-Mn hydroxide)과 유기탄소의 농도에 의해 조절될 수 있으며, 니켈과 크롬은 퇴적물 내에서 철과 함께 거동을 한다(Balkis and Cagatay, 2001; Youn *et al.*, 1999). 서해병 해역의 니켈, 구리, 크롬 및 아연 역시 철에 의해 조절되어짐을 알 수 있으며, 철뿐만 아니라 알루미늄과 양의 상관관계를 보이는 것은 이들 중금속이 연구지역의 점토광물에 의해 조절되어지는 것으로 해석된다. 반면, 서해병 해역의 납과 카드뮴은 철 및 알루미늄과 상관계수가 아주 낮게 나타나는데, 이러한 결과는 납과 카드뮴은 점토광물에 의해 조절되기보다 다른 지배요인이 존재하는 것으로 해석될 수 있다. 특히 동해병 해역의 모든 중금속들은 서해병 해역의 상관관

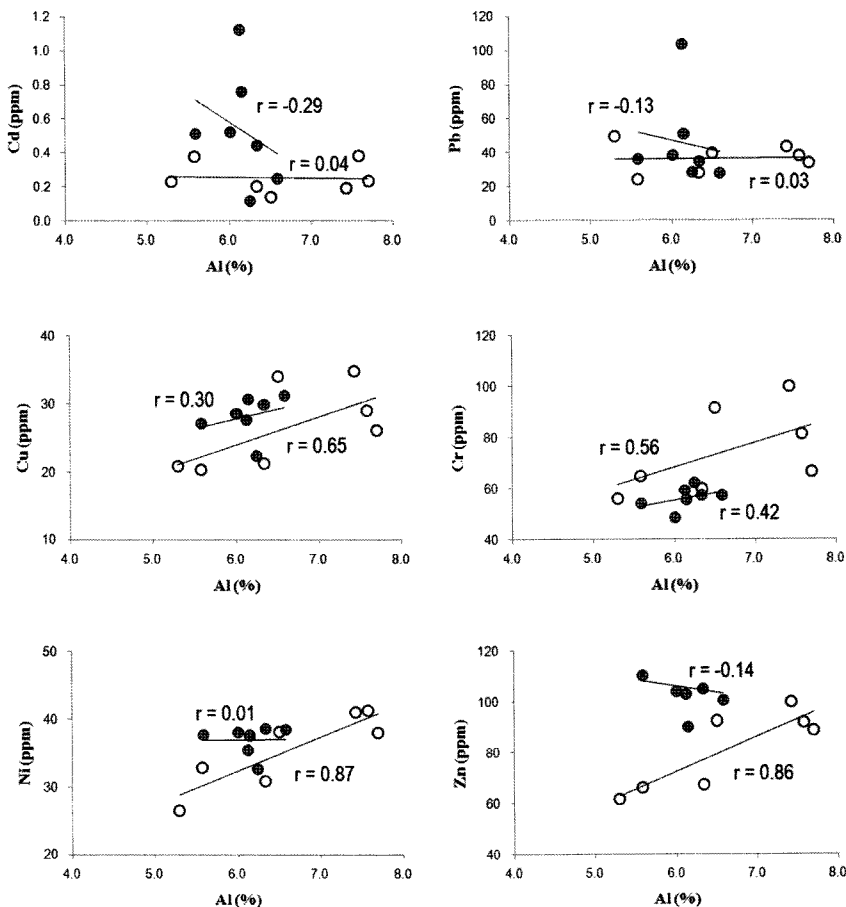


Fig. 4. Bivariate plots between aluminium and heavy metals for surface sediment samples obtained from EDA and WDA. Symbols are same with Figure 3.

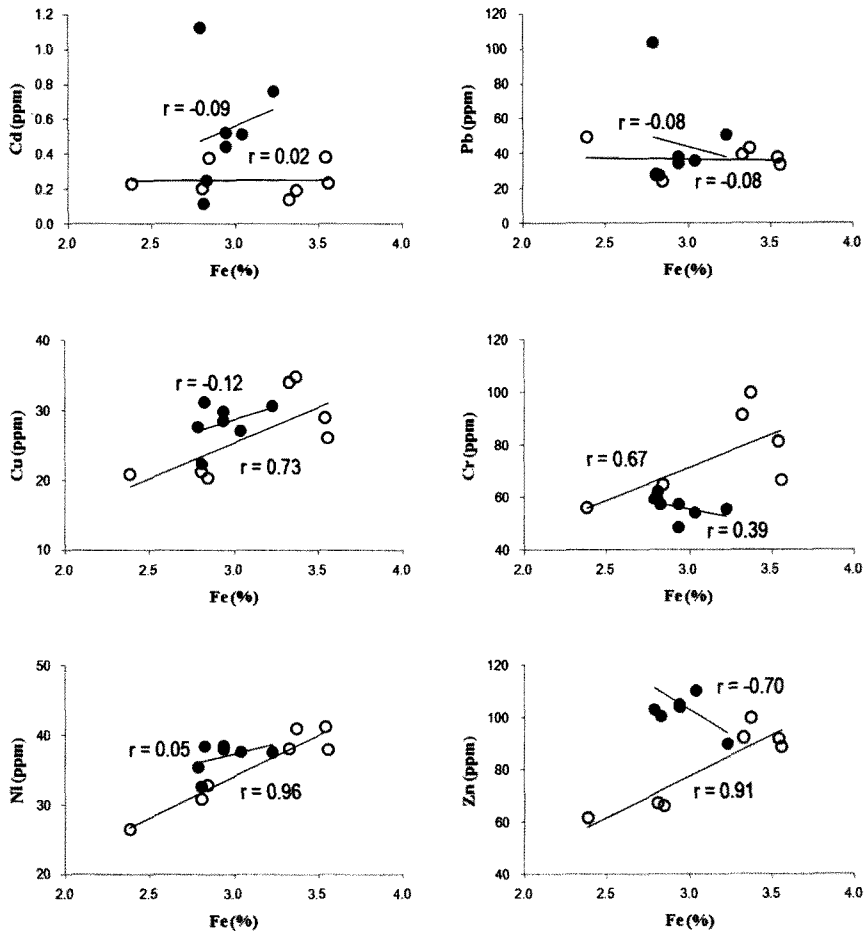


Fig. 5. Bivariate plots iron and heavy metals for surface sediment samples obtained from EDA and WDA. Symbols are same with Figure 3.

계에 비해 대체적으로 낮게 나타난다. 따라서 동해병해역 퇴적물의 중금속들은 서해병해역의 중금속들에 비해 외부의 영향이 큰 것으로 판단된다.

이러한 영향은 폐기물의 양과 특성에 기인한 것으로 여겨진다. 동해병해역은 서해병해역에서 배출 가능한 폐기물들을 포함하여 광물성폐기물, 하수도준설토사, 건설공사 오니 등을 추가로 배출할 뿐만 아니라, 해양배출 총량이 5,262,000 m³으로(2005년 기준) 서해병해역보다(2,383,000 m³) 두 배 이상 많다(KCG, 2007). 또한, 이들 해역 내 카드뮴과 납의 부화지수는 대부분의 지역에서 1.5이상을 초과하여 자연기원이 아닌 인위적인 기원에 의해 부화된 것으로 해석되어진다(Fig. 6).

4.4. 오염평가 및 오염원의 기원

동해병과 서해병해역 표층퇴적물의 I_{geo} 를 이용하여

오염정도를 평가하였다(Table 5). 이 두 해역의 니켈, 구리, 크롬 및 아연의 I_{geo} 는 1이하의 값을 보이며, I_{geo} -class가 0 또는 1인 unpolluted 또는 unpolluted to moderately polluted로 분류될 수 있다. 반면, 동해병해역 내 카드뮴의 I_{geo} 는 -0.16~3.08의 영역으로 I_{geo} -class가 0~4에 포함되며, 정점 E04 퇴적물의 오염정도는 strongly polluted(I_{geo} -class 4)로 분류된다. 서해병해역 카드뮴의 I_{geo} -class는 동해병해역보다 낮은 0~2에 포함되며, 동해병해역보다 오염정도가 낮다. 남역시 동해병해역의 I_{geo} -class는 2~4의 영역으로 정점 E04에서 strongly polluted로 가장 높게 분류된 반면, 서해병해역의 I_{geo} -class는 2~3의 영역으로 정점 W02에서 moderately to strongly polluted로 동해병해역보다 한 단계 낮게 나타난다. 따라서 동해병과 서해병해역은 일부지역에서 카드뮴과 납의 부하가 나타나며,

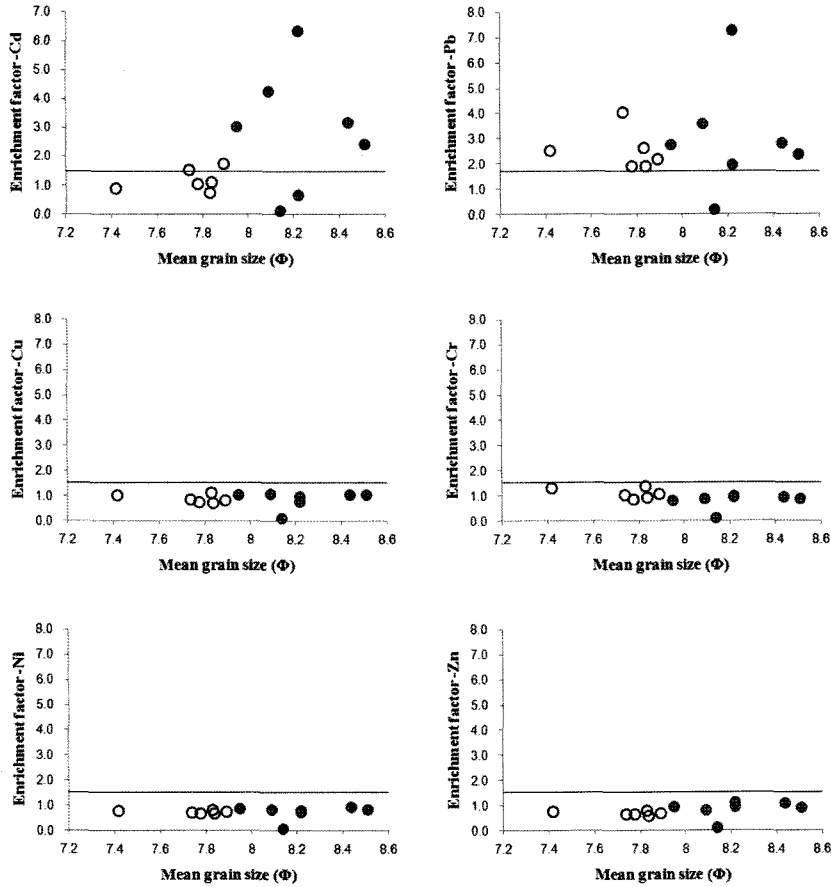


Fig. 6. Enrichment factors (EFs) of heavy metals in the study area. The lines in the figure indicate the equilibrium crust value of unity. Symbols are same with Figure 3.

Table 5. I_{geo} -class for heavy metals in ocean dumping areas

Station No.	Cd	Pb	Ni	Cu	Cr	Zn
EDA E01	3	3	1	1	1	1
E02	1	2	1	1	1	1
E03	2	2	1	1	1	1
E04	4	4	1	1	1	1
E05	2	2	1	1	1	1
E06	0	2	0	1	1	1
E07	2	2	1	1	1	1
WDA W01	1	2	1	1	1	1
W02	1	3	0	0	1	0
W03	1	2	0	0	1	0
W04	1	2	1	1	1	1
W05	2	2	1	1	1	1
W06	1	3	1	1	2	1
W07	2	2	0	0	1	0

I_{geo} class value: 0=unpolluted, 1=unpolluted to moderately polluted, 2=moderately polluted, 3=moderately to strongly polluted, 4=strongly polluted, 5=strongly to very strongly polluted, 6=very strongly polluted.

동해병 해역 카드뮴과 납의 오염정도가 서해병 해역보다 높음을 알 수 있다.

해양퇴적물 오염은 폐기물의 해양폐기 뿐만 아니라, 대기오염원의 유입 및 강과 하천을 통한 육상오염원의 이동 등에 의해 기인 될 수 있다(Zhang *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2009). 따라서 동해병과 서해병해역의 카드뮴과 납의 부화를 해양폐기에 의한 결과만으로 단정 지을 수는 없다. Choi *et al.*, (2006)는 동해 남부 해역 퇴적물 내 납의 축적은 해양학적 특성에 의해 용해 및 입자 제거 그리고 이동에 의해 축적되었거나, 연안역에 위치한 대규모 제철소, 제련소 및 정류공장에 등이 원인인 것으로 추정하기도 하였다. 또한 인접한 강들로부터 점토광물이 다량 유입되는 서해 퇴적물도 점토광물이 운반될 당시 오염원이 함께 유입되었을 가능성도 간과할 수 없다. 그러나 폐기물 해역에는 연간 최소 5,976,000 m³에서 최대 9,928,000 m³의 폐기물이 배출되고 있으며, 카드뮴과 납의 인위적인 기원에 의

한 부하가 나타난다. 따라서 폐기물 배출 해역에서 나타나는 중금속 이상은 폐기물의 해양폐기에 의한 영향을 배제할 수 없을 것이다. 그러므로 보다 정확한 오염 분포 특성을 파악하기 위해서는 지금 단계에서 수행되는 현장에 대한 모니터링과 함께 유입 폐기물에 대한 보다 체계적이고 정밀한 모니터링도 병행되어야 할 것이다.

5. 결 론

해양 폐기물 처리장인 동해병과 서해병 해역 퇴적물의 지화학적 특성과 중금속 오염을 비교한 결과는 다음과 같다.

1. 동해병과 서해병 해역의 입도는 각각 7.95~8.51 Φ 와 7.42~8.15 Φ 의 영역이며, 두 해역 모두 대부분 니질 퇴적물로 구성되어 있다. 또한, 점토광물의 분포는 두 해역 모두 일라이트가 주를 이루며, 소량의 카올린 계열 광물과 클로라이트, 스�멕타이트로 구성되어 유사한 경향을 보인다.

2. 동해병 해역 퇴적물의 퇴적속도는 1.1~1.73 mm/yr이며, 서해병 해역은 1.87 mm/yr로 추정된다.

3. 연구지역 퇴적물 내 니켈, 구리, 크롬 및 아연은 평균입도, 알루미늄 및 철과 밀접한 상관성을 보인다. 반면, 카드뮴과 납은 다른 중금속들에 비해 상관성이 결여되어 있으며, 부화지수가 1.5 이상을 초과하여 인위적인 기원으로 해석될 수 있다.

4. 연구지역 표층퇴적물의 니켈, 구리, 크롬 및 아연의 I_{geo} -class는 0~1으로 unpolluted 또는 unpolluted to moderately polluted로 분류된 반면, 카드뮴과 납의 I_{geo} -class는 2~4로 moderately polluted ~ strongly polluted 분류되었다. 특히, 동해병 해역의 카드뮴과 납의 오염정도가 서해병 해역 보다 높게 나타나며, I_{geo} -class 가 최대 4로 strongly polluted로 분류되었다.

5. 이는 동해병 해역에 투기되는 폐기물이 서해병 해역에 투기되는 폐기물뿐만 아니라, 광물성폐기물, 하수도준설토사, 건설공사 오니 등이 추가로 배출되고 있으며, 양적으로도 서해병 보다 두 배 이상 투여되기 때문인 것으로 판단된다.

사 사

원고의 심사과정에서 세심한 수정과 지적을 해 주신 이영재 교수님과 익명의 심사위원들께 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

- Alexander, C.R., DeMaster, D.J., and Nittrouer, C.A. (1991) Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: The Yellow Sea. *Marine Geology*, v. 98, p. 51-72.
- Appleby, P.G., and Oldfield, F. (1992) Applications of ^{210}Pb to sedimentation studies. In: Ivanovich, M., Harmon, R.S. (Eds.), *Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences*, seconded. Clared on Press, Oxford, 731p (Chapter 21).
- Balkis, N., and Cagatay, M.N. (2001) Factors controlling metal distribution in the surface sediments of the Erdek Bay, Sea of Marmara, Turkey. *Environment international*, v. 27, p. 1-13.
- Choi, M.S., Cheong, C.S., Han, J.H., and Park, K.H. (2006) Distribution and Sources of Pb in Southern East/Japan Sea Sediments using Pb isotope. *Econ. Environ. Geol.*, v. 39, p. 63-74.
- Chun, J.H., Huh, S., Han, S.J., Shin, D.H., Cheong, D.K., Hong, K.H., and Kim, S.H. (1999) Sediment Characteristics of Waste Disposal Sites in the Southwestern Ulleung Basin, the East sea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, v. 4, p. 312-322.
- Chung, S.C., and Kim, Y.I. (2008) A Legal Improvement to Reduce a Disposal of Livestock Sludge at Sea. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, v. 11, p. 132-137.
- Di Gregorio, D.E., Fernandez Niello, J.O., Huck, H., Somacal, H., and Curutchet, G. (2007) ^{210}Pb dating of sediments in a heavily contaminated drainage channel to the La Plata estuary in Buenos Aires, Argentina. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 65, p. 126-130.
- Eby, G. N., (2004) Principle of environmental geochemistry. Thomson brooks/cole, 514p.
- Folk, R.L., (1968) *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill's Austin, Texas, 170p.
- Han, J.H. and Choi, M.S. (2007) Estimation of ^{210}Pb -derived Sedimentation rates in the Southwestern East Sea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, v. 12, p. 273-279.
- Harman, H.N. (1967) *Modern Factor Analysis*. Univ. Chicago Press, 2nd ed., 469p.
- Hong, D.U., Kim, J.K., Ryu, C.R. (2002) Diffusion Characteristics of Ocean Dumping Material in the South-eastern Coastal Waters of Korea. *The Korean Society of Ocean Engineers*, v. 16, p. 16-21.
- Jung, C.H., Park, H.J., Chung, I.H., Na, C.K. (2007) Pollution Property of Heavy Metal in Goseong Cu Mine Area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 40, p. 347-360.
- KCG (2007) 2007 Maritime police white paper. Korea Coast Guard, 474p. (InKorean)
- Khim, B.K. (1988) Sedimentological study of the muddy deposits in the Yellow Sea. MS thesis, Seoul National University, Seoul, Korea. 106p.
- Kim, P.G., Park, M.E., and Sung, K.Y. (2009) Distribution of heavy metals in marine sediments at the ocean waste disposal site in the Yellow Sea, Korea. *Geosciences Journal*, v. 13, p. 15-24.
- Kite-Powell, H.L., Hoagland, P., and Jin, D. (1998) Policy,

- law, and public opposition: the prospects for abyssal ocean waste disposal in the United States. *Journal of Marine System*, v. 14, p. 377-396.
- KORDI (1997) Development of monitoring technology for the waste disposal sea areas. Korea Ocean Research & Development Institute, BSPN 96340-001012-4, 414p.
- Lee, B.K., and Kim, S.Y. (2007) Sedimentary Facies and Processes in the Ulleung Basin and Southern East Sea. *J. Kor. Fish. Soc.*, v. 40, p. 160-166.
- Lee, P.K., Youm, S.J., Shin, Y.S., Chi, S.J., Kim, J.W., and Kim, S.O. (2005) Vertical Distribution of Heavy Metal Concentrations in Sediment Cores and Sedimentation Rate Using ^{210}Pb Dating Technique in the Juam Reservoir. *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, v. 10, p. 43-57. (In Korean with English abstract)
- Martin, J.M., and Whitfield, M. (1983) The significance of the river input of chemical elements to the ocean. In: Wong, C.S., Boyle, E., Brul, K.W., Burton, J. D. and Goldberg, E. D. (Eds), *Trace Metal in Sea Water*. Plenum Press, New York, p. 265-296.
- MTLM (2005) A preliminary study on the development of management scheme for the materials and items placed into the marine area, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 515p.
- Müller, G. (1979) Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau*, v. 79, p. 778-783.
- Park, Y.C., Lee, H.J., Son, J.W., and Son, S.K. (1998) Chemical Environment of Ocean Dumping Site in the Yellow Sea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, v. 3, p. 203-213.
- Summerhayes, C.P. (1972) Geochemistry of continental margin sediments from northwest Africa. *Chemical Geology*, v. 10, p. 137-156.
- Um, I.K., Lee, M.K., Jeon, S.K., and Jung, H.S. (2003) Spatial Variability and Contents of Metals in the Surficial Sediments of Youngil Bay, East Coast of Korea. *Jour. Korea Earth Science Society*, v. 24, p. 477-490.
- Youn, S.T., Koh, Y.K., and Ryu, S.O. (1999) Distribution characteristics of surface sediments and metal elements in Hampyong Bay, the southwestern coast of Korea. *Journal of the environmental science*, v. 8, p. 677-684. (In Korean with English abstract)
- Zhang, J., and Liu, C.L. (2002) Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-Weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 54, p. 1051-1070.
- Zhang, L., Ye, X., Feng, H., Jing, Y., Ouyang, T., Yu, X., Liang, R., Gao, C., and Chen, W. (2007) Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China. *Marine Pollution Bulletin*, v. 54, p. 974-982.
- Zollar, W.H., E.S. Gladney, G.E. Gordon and J.H. Bors (1974) Emissions of trace elements from coal fired power plants. *Trace substances in environmental health*, v. 8, p. 167-172.