

ORIGINAL ARTICLE

황해 폐기물 투기해역(서해병) 표층 퇴적물의 금속원소 분포

고혁준 · 최영찬¹⁾ · 박성은* · 차형기 · 장대수²⁾ · 이충일³⁾ · 윤한삼⁴⁾

국립수산과학원 남서해수산연구소 아열대수산연구센터, ¹⁾제주대학교 지구해양학과,

²⁾국립수산과학원 남서해수산연구소, ³⁾강릉원주대학교 해양자원육성학과, ⁴⁾부경대학교 해양산업개발연구소

Concentration of metallic elements in surface sediments at a waste disposal site in the Yellow Sea

Hyuk-Joon Koh, Young-Chan Choi¹⁾, Sung-Eun Park*, Hyung-Kee Cha, Dae-Soo Chang²⁾,
Chung-Il Lee³⁾, Han-Sam Yoon⁴⁾

Subtropical Fisheries Research Center, Southwest Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Jeju 690-192, Korea

¹⁾*Dept of Earth and Ocean Science, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea*

²⁾*Southwest Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yeosu 556-823, Korea*

³⁾*Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 201-702, Korea*

⁴⁾*Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National Univ., Busan 608-737, Korea*

Abstract

The aim of this study was to investigate the accumulation of metallic elements and the control effect of marine pollution caused by ocean dumping in the sediments at a waste disposal area in the Yellow Sea. In July 2009, concentrations of organic matter and metallic elements (Al, Fe, As, Cd, Cr, Co, Hg, Ni, Mn, Pb, and Zn) were measured in surface sediments at the site. The ignition loss (IL) in the surface sediments showed a mean value of 15.4%, about 1.5 times higher than the mean value of the sediments in the coastal areas of Korea. The chemical oxygen demand (COD) at some disposal sites exceeded 20 mg O₂/g-dry, which signifies the initial concentration of marine sediment pollutants in Japan. The disposal sites contain higher concentrations of Cr, Cu and Zn than the sediments of bays and estuaries that might be contaminated. The magnitude of both metal enrichment factors (EF) and adverse biological effects suggest that pollution with Cr and Ni occurred due to the dumping of waste in the study area. In addition, the geoaccumulation index (Igeo) showed that the surface sediments were moderately contaminated. By the mid-2000s, when the amount of waste dumped at this site was the highest, the concentration of metallic elements was higher than ever recorded. On the other hand, in 2008-09, the need for environmental management was relatively low compare with the peak. As a result, the quality of marine sediment has been enhanced, considering the effect of waste reduction and natural dilution in the disposal area.

Key words : Ocean dumping, Metallic elements, Surface sediment, Yellow sea

1. 서론

과거 폐기물의 해양배출은 육상처리 시 발생하는

다양한 문제점을 해결하기 위해 오랜 기간 동안 불가 피한 조치로 인식되어 왔다. 그러나 장기간 해양투기가 누적되면서 향후 폐기물의 해양 투기량을 조절하

Received 4 October, 2012; Revised 8 April, 2013;

Accepted 8 May, 2013

*Corresponding author : Sung-Eun Park, Subtropical Fisheries Research Center, Southwest Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Jeju 690-192, Korea

Phone: +82-64-750-4380

E-mail: separk04@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지 않을 경우 해양환경이 치명적으로 악화될 수 있다는 인식이 1970년대부터 전 세계적으로 확산되기 시작하였다. 1972년 런던협약은 폐기물의 해양투기 및 해상소각 규제를 목적으로 채택되었고 당사국간 폐기물의 해양투기방지 의무를 부과함으로써 해양환경 및 생물자원을 보호하기 위한 해양오염규제 조치가 국제적으로 요구되기 시작하였다.

한국도 런던협약 가입국으로 해양오염방지를 위한 국가 간의 노력에 참여하였으나 경제발전이 따른 폐기물의 육상처리가 여전히 해결되기 어려운 상황에서 당장 해양투기의 규제만 강화할 수는 없게 되었다. 결국 1988년에 폐기물의 해양투기제도는 시행되었고, 완화된 규제정책 방향으로 진행되며 배출량은 급속도로 증가하였다. 그러나 2005년 한국의 투기해역에서 잡은 수산물의 중금속 오염에 대한 기사가 보도되어, 장기화된 해양투기로 인한 해양환경 오염문제의 심각성을 국내에 널리 알리게 되었다(KBS, 2005). 뿐만 아니라 2006년에는 런던협약 96의정서의 국제 발효로 해양오염규제 강화에 대한 국제적인 움직임이 맞물려 우리나라도 본격적으로 제도적 해양투기량 감소를 시작하는 계기가 되었다. 그래서 해양투기와 관련된 정책은 육상처리 우선 원칙으로 개정되며, 그 결과 면적 3,165 km²의 '서해병' 해역에 배출된 폐기물의 양은 1988년 55만 톤에서 2005년에는 4배 이상인 240만 톤으로 증가되었으나, 2006년부터 188만 톤으로 감소하게 된다(www.oceandumping.re.kr).

한편, 군산 서방 200 km의 황해 중앙해역에 위치한 서해병 해역은 면적 3,165 km², 평균 수심이 50 m로 비교적 얇은 반폐쇄성 해역으로 주로 배출되던 폐기물 종류는 분뇨, 축산폐수, 그리고 산업폐수 및 하수처리오니류가 대부분이었다. 저질오염은 주로 배출 슬러지에 함유된 금속원소와 유기물 퇴적이 지속되면서 발생하며, 이 중 금속원소는 용존 및 입자형태로 해수 중에 존재하다가 응집 또는 침강하여 해저에 퇴적되고, 해양생물에 직·간접적으로 악영향을 미치게 된다. 특히 오염성분의 물리·화학적 성질, 생물체의 조직특성, 그리고 서식 환경에 따라 다양한 생물농축계수를 보일 수 있으며, 수질 및 저서 생태계에도 장기적으로 악영향을 미치게 된다(Kim, 2003b, 2007). 뿐만 아니라, 해저에 퇴적된 유기물은 무기화과정의 영양

염 용출로 부영양화를 일으켜 투기해역에 간헐적인 적조 발생이 이어질 수 있다(Song 등, 2007).

황해 투기해역에 표층 퇴적물의 중금속 분포 및 특징에 관한 연구는 2006년 이전에 조사되어 대부분 오염도의 증가를 제시하였으나(kim 등, 2009a, 2009b; MMAF, 2004, 2005a; Shin, 2008), 폐기물의 해양배출농도를 저감시키려는 제도개선이 집중적으로 이루어진 2006년 이후 해양환경에 대한 개선효과가 예상됨에도 불구하고 이를 검토한 연구는 매우 부족하다. 따라서 본 연구는 1988년부터 시작된 해양투기가 20년 이상 지속된 2009년 관측결과 및 서해병 해역의 퇴적물 자료를 수집하여 표층 퇴적물의 유기물 및 금속원소의 오염 정도와 변화를 알아보고, 인위적·제도적 해양투기량 저감효과를 검토하여 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구해역

폐기물 배출해역 중 서해병 해역은 황해의 중앙부에 위치한 전형적인 반폐쇄성 해역이고, 평균조차가 4 m 이상으로 대조차 환경을 나타내는 곳이다. 서해병 해역의 수심은 80 m 내외로 해저는 대체로 평탄한 형태이며, 황해저층냉수괴 및 황해난류수, 한국남해연안수, 중국대륙연안수, 양자강희석수 등이 복합적으로 영향을 미친다. 연구해역의 동쪽으로는 조건대가 발달하고, 서쪽으로는 산둥반도의 기반암 지역이 분포하고 있다. 또한 여러 하천으로부터 쇄설성 퇴적물이 유입되며, 그 가입량은 기상조건과 물리적 환경에 따라 다르게 나타난다(MST, 2001). 퇴적물 조성은 서쪽으로는 니질과 점토질의 퇴적상이 124° 30'E 지점까지 발달하여 있고, 동쪽으로 갈수록 점차 조립해지는 분포를 보인다. 평균 입도분포는 7.42~8.15 Φ 로 주로 니질 퇴적물(M)로 구성되어 있다(Kim 등, 2001, 2009a).

연구해역의 조사 범위는 동경 124.05°-124.8°, 북위 35.28-36.33°으로 표층 퇴적물의 유기물과 금속원소의 분포 특성 및 오염도를 알아보기 위해 2009년 7월 17일부터 7월 26일까지 제주대학교 실습선 아라호를 이용하여 투기구역(Disposal Site)과 휴식년 구역

(Restoration Site), 그리고 대조구역(Reference Site)의 총 9개 정점에서 퇴적물을 채집하였다(Fig. 1). 투기해역에서 대조정점까지의 거리는 약 20 km이며, 투기해역간의 거리는 약 15 km이다. 휴식년 구역인 RZ4 정점은 폐기물 배출해역 정밀모니터링 결과 오염 정도가 심각한 구역을 서식 생물들의 건강 악화 방지 및 수산물 오염에 따른 국민건강 보호를 위해 2006년 6월부터 폐기물 해양배출을 금지한 곳이다.

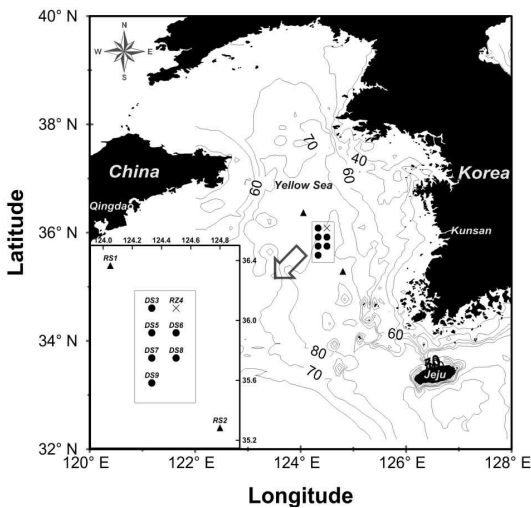


Fig. 1. Study area and location of sampling sites (filled circles) in 2009. Cross, filled triangle, and filled circle indicate restoration site, reference sites, and dumping sites, respectively.

2.2. 시료분석

표층 퇴적물 시료는 그랩 채니기를 이용하여 HDPE sample bottle에 공기가 차 있는 공간을 최소화하여 넣고, 바로 냉동 보관하여 실험실로 옮긴 후 해양환경공정시험방법(2005b)에 따라 분석하였다. 함수율(Water Content, WC)은 해저 퇴적물의 건조 전·후 무게 차이로 구하였고, 강열감량(Ignition Loss, IL)은 분말시료 10 g을 평량하여 550°C 회화로에서 완전 회화하여 원분말시료와의 무게 차이로 구하였다. 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD)은 퇴적물 습시료 약 1~2 g을 250 ml 삼각 플라스크에 옮긴 후 시약첨가 및 증탕과정을 거쳐 이를 적정·분석하였다.

퇴적물 내의 금속 원소는 분말 시료 0.5 g 을 테프

론 용기에 넣고, 혼합산(질산, 과염소산, 불산)을 첨가한 다음 완전분해 및 휘발과정을 거쳐 2% 질산용액으로 100 ml 정용하였다. 이 용액은 국립수산과학원의 유도결합플라즈마 질량분석기(ELAN 6000, Perkin Elmer)를 이용하여 분석하였고, 수은은 수은전용분석기(AMA-254, Milestone)로 분석하였다. 한편 금속원소의 분석값은 표준물질 시료와 함께 분석하여 신뢰성이 검증되어야 한다. 하지만 분석결과를 제공받는 과정에서 분석의 타당성에 대한 근거자료가 확보되지 않아 정량적인 비교자료로서의 활용이 제한되는 한계점이 있다. 그러나 분석값에 대한 타당성은 제시할 수 없지만 분석기관의 장비나 기술은 인증된 기관으로 제한된 자료의 활용은 가능할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 연구해역은 시료의 확보가 쉽지 않은 해역이며, 최근 해양투기제도가 급변하는 상황에 따른 투기해역의 환경 변화에 대한 연구결과가 매우 부족한 실정으로서 서해병 해역 환경의 변화를 이해하는데 의미가 있을 것으로 판단된다.

2.3. 오염도 평가

퇴적물 내 금속원소의 함량은 자연적인 농도와와의 비교를 통해 증가한 정도를 평가할 수 있다. EF (Enrichment Factor)는 퇴적물에 함유되어 있는 금속원소의 농축정도를 자연적인 것 혹은 인위적인 것인 지에 대한 기준에 따라 수치로만 제시할 뿐이어서 수생생물에 미치는 영향과의 관계를 이용하여 함께 오염도를 평가하였다(Muñoz-Barbosa 등, 2012). 그리고 퇴적물 오염도를 보다 구체적으로 알아보기 위해 I_{geo} 방법을 이용하여 평가하였다. 생물에 부정적 영향을 미치는 지수(AEI; Adverse Effects Index)를 계산하기 위해서는 미국해양대기관리청(NOAA)의 평가기준(SQG; Sediment Quality Guidelines) 중 Effects Range-Low(ERL)의 금속원소 기준함량을 이용하였다(Long 등, 1995). ERL의 금속함량 기준은 As 8.2 mg/kg, Cd 1.2 mg/kg, Cr 81mg/kg, Cu 34 mg/kg, Hg 0.15 mg/kg, Ni 20.9 mg/kg, Pb 46.7 mg/kg, Zn 150 mg/kg이며, ERL은 수산생물에 대해 영향을 미칠 수 있는 농도값의 10%를 의미한다. AEI는 (1)과 같이 계산하고, 여기서 X_{sample} 은 시료의 금속원소 함량, X_{ERL} 은 ERL 기준의 금속원소 함량을 의미한다.

$$AEI = X_{sample} / X_{ERL} \quad (1)$$

만약, 시료의 AEI의 수치가 1이하일 때는 생태에 부정적 영향을 미치지 않음을 의미하며, 1이상인 경우는 금속원소가 생태에 ERL 수준의 부정적 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

한편, EF(Enrichment Factor)는 퇴적물내의 금속원소와 입도와 관련성이 높은 보존성 원소를 이용하여 농축정도를 평가하는 방법이다(Choi 등, 2010). 이것은 시료의 원소가 보존성 원소의 비를 지각평균 혹은 퇴적물 평균값으로 나누어 (2)와 같이 계산할 수 있다. EF를 계산하기 위한 보존성 원소로는 퇴적물 이동에 따른 변화가 없고, 한반도 주변에서 입도 의존성을 나타내는 Al을 이용하여 계산하였다(Cho, 1994). 배경농도는 Taylor and McLennan (1995)의 대륙붕 금속원소 평균 함량을 이용하였고, 그 함량은 As 1.5 mg/kg, Cd 0.098 mg/kg, Cr 35 mg/kg, Cu 25 mg/kg, Hg 0.08 mg/kg, Ni 20 mg/kg, Pb 20 mg/kg, Zn 71 mg/kg 과 같다. EF의 값이 0.5~1.5 사이일 경우 퇴적물 내의 중금속들은 지각 또는 풍화기원을 의미하며, 1.5 이상이면 인위적인 기원이 있음을 의미한다(Zhang and Liu, 2002). 또한 퇴적물 오염도를 보다 구체적으로 알아보기 위해 I_{geo} (Geoaccumulation Index)식을 (3)과 같이 계산하였고, 배경농도는 Taylor and McLennan (1995)의 기준에 근거하여 중금속의 오염도를 파악하였다.

$$EF = [(X/Al)_{sample} / (X/Al)_{background}] \quad (2)$$

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / B_n \times 1.5] \quad (3)$$

여기서, $(X/Al)_{sample}$ 는 시료 중 Al에 대한 금속원소의 함량비를 나타내며, $(X/Al)_{background}$ 는 배경농도 중 Al에 대한 금속원소의 함량비를 말한다. C_n 은 시료의 금속함량을, B_n 은 배경농도의 금속원소 함량을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 표층 퇴적물의 유기물 함량

연구해역의 퇴적물을 분석한 유기물의 함량은 Fig.

2에 나타났다. 퇴적물에 유기물이 집적되어 보존될 수 있는 정도를 나타내는 WC는 연구해역의 대조정점에서 39.9~64.0%(평균 52.0%)의 범위를 보였으며, 투기해역에서는 51.1~70.0% (평균 59.2%)의 범위로 대조정점 RS2를 제외한 모든 정점에서 50% 이상으로 비교적 높게 나타났다. 퇴적물 내 유기물 함량 및 특성을 나타내는 인자 중 IL과 COD의 농도를 알아보았다. IL은 대조정점에서 4.9~19.4%(평균 12.1%), 투기해역에서 9.2~28.8%(평균 15.4%)의 범위로 대조정점 RS2에서 최소값을 보였고, 투기해역정점 DS7에서 최대값을 나타냈다. 다른 해역과 비교해 보면 마산항은 7.2~14.3%, 부산항은 6.3~18.5% 범위로 투기해역의 함량이 1.5~2배 높았고, 우리나라 주변의 연안 표층 퇴적물 내 평균 함량은 1.4~10.8% 범위로 투기해역에서 1.5배 높은 함량을 나타냈다(Hwang 등, 2006; Kang 등, 1993; Park 등, 1995). COD는 대조정점에서 6.2~17.1 mgO₂/g-dry(평균 11.7 mgO₂/g-dry) 범위였으며, 투기해역에서는 12.8~22.9 mgO₂/g-dry(평균 17.4 mgO₂/g-dry)의 범위로 대조정점 RS2에서 최소값을 보였고, 투기해역 정점 DS5에서 최대값을 나타냈다. 이는 마산항과 부산항에서 각각 조사된 표층 퇴적물의 농도 11.3~29.9 mgO₂/g-dry, 5.1~43.8 mgO₂/g-dry 범위보다는 다소 낮은 농도이지만, Kang 등(1993)이 제시한 경계만, 아산만, 군산연안 등과 같은 서해안의 표층 퇴적물 중에서 관측된 COD 농도 3.2~8.4 mgO₂/g-dry 범위보다는 2배 이상 높은 함량을 보였다. 전반적으로 유기물 함량의 공간분포는 투기해역 내 서쪽 정점에서 상대적으로 높게 나타났다.

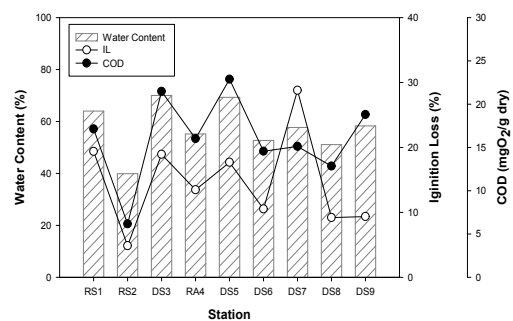


Fig. 2. The content of WC, and IL, COD of surface sediments with each station.

COD는 연안해역에서 퇴적물내 유기물 오염을 평가하는 기준으로 널리 이용되어 왔다(Hyun 등, 2003a, 2003b; Yoon, 2000). 일본의 경우 COD에 대한 퇴적물의 기준으로 20 mgO₂/g-dry 은 저서생물의 정상적인 활동에 제한을 가져오는 부영양화 및 오염의 초기 상태의 기준값이고, 30 mgO₂/g-dry 은 오염이 진행된 상태임을 나타내는 기준값으로 제시하고 있다(Hwang 등, 2006; Izawa, 1993; Yoon, 2003). 이를 기준으로 유기오염 정도를 살펴보면 투기해역 정점 DS3과 DS5에서 각각 21.5 mgO₂/g-dry, 22.9 mgO₂/g-dry 로 일본의 초기 오염 상태의 기준값보다 높은 농도를 나타내고 있어 일부 연구해역의 저서환경은 오염이 진

행된 상태임을 시사하고 있다.

3.2. 금속원소 분포 특성

연구해역에 표층 퇴적물 중의 금속 원소별 함량을 조사한 결과 알루미늄(Al)이 4.9~6.9%(평균 5.8%), 철(Fe) 2.2~3.6%(평균 2.9%), 망간(Mn) 273.5~355.1 mg/kg(평균 311.9 mg/kg), 구리(Cu) 11.5~29.5 mg/kg(평균 23.6 mg/kg), 아연(Zn) 62.1~107.7 mg/kg(평균 92.1 mg/kg), 납(Pb) 21.0~30.1 mg/kg(평균 24.9 mg/kg), 크롬(Cr) 43.9~84.8 mg/kg(평균 70.8 mg/kg), 니켈(Ni) 19.4~35.0 mg/kg(평균 30.7 mg/kg), 수은(Hg) 0.012~0.053 mg/kg(평균 0.026 mg/kg), 코발트(Co) 8.1~15.0 mg/kg(평균 12.6 mg/kg), 카드뮴(Cd) 0.07~

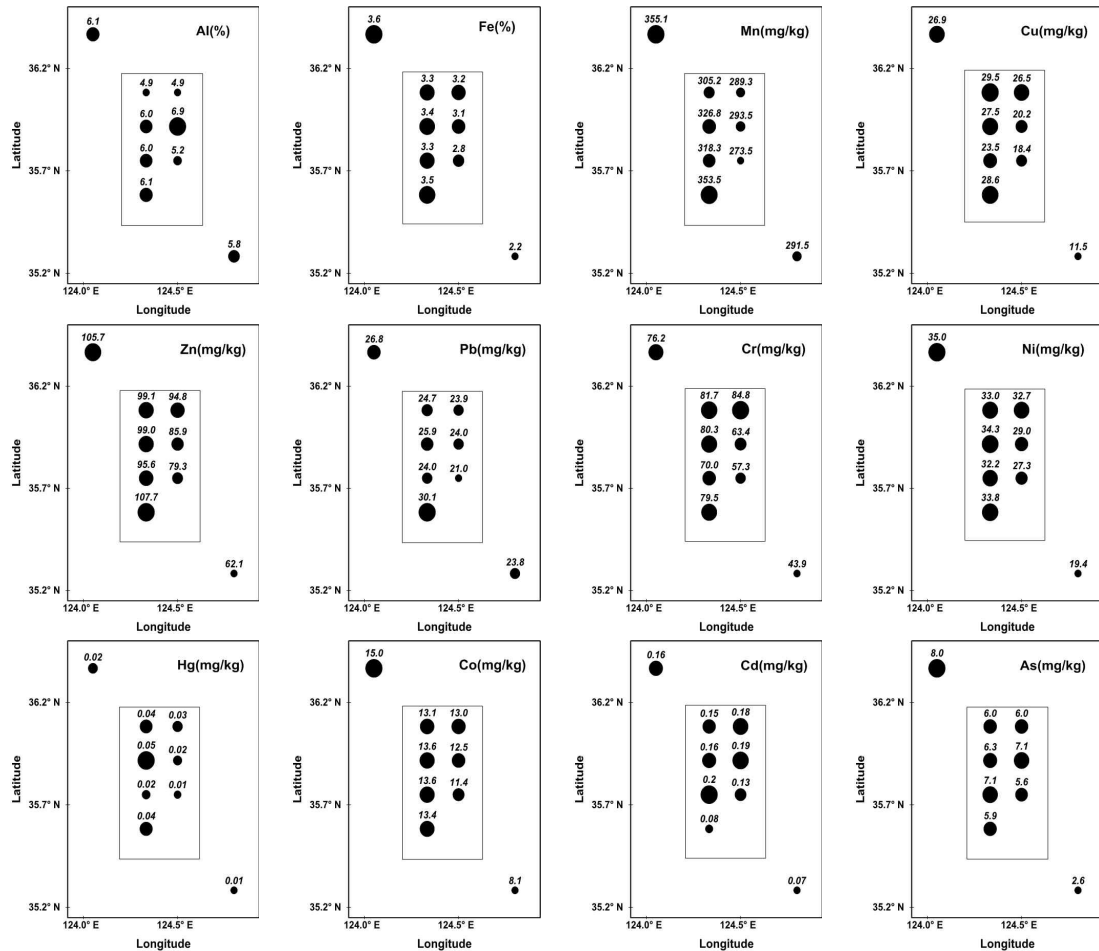


Fig. 3. The horizontal distributions of metallic elements concentration in surface sediments.

Table 1. The average concentration of metallic elements in coastal surface sediment of Korea

Region	Metals (%)		Metals (mg/kg)										Reference
	Al	Fe	As	Cd	Cr	Co	Cu	Hg	Ni	Mn	Pb	Zn	
Youngsan River Estuary	8.3	4.1		0.2	77	13	23		37	673	28	96	Cho and Park (1998)
Hampyeong Bay	6.1	2.2			34	7	12		15	321	20	45	Youn et al. (1999)
Saemanguem	7.1	2.7			47		21			610	26	85	Kim et al. (2003)
Shihwa (outer part)	6.9	3.2	7.9	0.5	81	14	55		33	494	29	122	Choi et al. (1999)
Kyounggi Bay	6.2	2.4			70	14	25		25	532		92	Lee et al. (1998)
Yellow Sea	5.8	2.2			37	7	9		17	360	22	40	Cho et al. (1993)
West Ocean Dumping Area	5.8	3.2	6.1	0.2	71	13	24	0.026	31	312	25	92	This study

0.20 mg/kg(평균 0.15 mg/kg), 그리고 비소(As)의 함량은 2.6~8.0 mg/kg(평균 5.3 mg/kg) 범위를 나타냈다(Fig. 3). 공간적인 분포패턴은 Al, Hg, Cd를 제외한 대부분의 금속원소들 농도는 연구해역의 북서쪽이 높고 남동쪽이 낮은 경향이 뚜렷하게 나타났다. 금속원소의 평균함량을 다른 해역과 비교해 보면 서해연안 중 함평만의 퇴적물에 비해 Cr, Cu, Zn의 함량이 2배 높은 반면, 시화호 외측의 퇴적물에 비해서는 Cd, Cu, Zn의 함량이 각각 2.5배, 2배, 1.3배 낮게 나타났다. 황해의 평균함량에 비해 Cr, Cu, Ni, Zn은 2배 높은 값을 보였고, 영산강 하구역과 새만금의 퇴적물 금속원소 함량과는 Mn을 제외하고 유사한 함량을 나타냈다(Table 1).

일반적으로 퇴적물의 금속원소 공간분포는 퇴적물의 입자크기와 유기물 함량, 초기속성작용, 인위적인 오염 등과 같은 조건에 의해 결정되며, 특히 금속원소의 농축은 퇴적물이 세립질일수록, 유기물이 많이 존재할수록 농축되기 쉽다(Adriano, 1986; Cho 등, 2001; Hyun과 Choi, 1997). 그러나 이번 연구에서는 퇴적물의 입도에 대한 조사는 이루어지지 않아 유기물 및 금속원소의 함량과 입도와의 관련성은 알 수 없었다. 따라서 한국 주변에서 입도의 의존성을 보이는 원소 중 Al과 금속원소와의 상관성을 살펴보았는데(Cho, 1994), 유의적인 관계는 나타나지 않았다(Table 2). 즉 퇴적물 내 금속원소를 조절하는 주요인이 점토

Table 2. Correlation matrix of sediment environmental variables from the sampling site

Item	Al	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Al	1											
As	.31	1										
Cd	.10	.68*	1									
Co	.13	.92**	.64	1								
Cr	-.21	.62	.58	.84**	1							
Cu	-.15	.65	.52	.88**	.97**	1						
Fe	.15	.85**	.58	.98**	.88**	.93**	1					
Hg	.01	.24	.32	.50	.71*	.73*	.62	1				
Mn	.39	.46	.15	.63	.49	.60	.72*	.49	1			
Ni	.00	.82**	.60	.97**	.93**	.96**	.98**	.64	.62	1		
Pb	.35	.23	-.02	.46	.51	.58	.61	.56	.90**	.52	1	
Zn	.06	.76*	.48	.94**	.91**	.96**	.98**	.63	.75*	.97**	.68*	1

**P<0.01, *P<0.05

광물보다는 다른 요인이 작용했음을 시사한다.

분석된 금속원소 중 Cr은 대조정점에 비해 투기해역 정점에서 1.3~2배 높은 함량을 나타냈다. Cu, Cd, Pb, Hg도 투기해역에서 최대값을 보였고, 그 함량은 각각 28.6 mg/kg, 0.19 mg/kg, 30.1 mg/kg, 0.05 mg/kg로 대조정점에 비해 각각 1.5배, 1.2배, 1.3배, 1.5배 이상의 함량을 나타냈다. Cu, Zn의 함량 또한 투기해역에서 각각 29.5 mg/kg, 107.7 mg/kg로 최대값을 나타냈고, 대조정점보다는 각각 1.5~2.7배, 1.2~1.7배 높았다. 전반적으로 투기해역 내 북서부 정점에서 최대값을 보였고, 남동부 정점에서는 최소값을 나타냈다. 한편 대조정점 RS1은 모든 금속원소의 함량이 투기해역 정점과 유사한 반면, 대조정점 RS2에서 금속원소의 함량은 비교적 낮은 분포를 나타냈다. 따라서 투기해역을 중심으로 금속원소의 증가분포가 나타나고 있어 인위적 폐기물 배출활동에 의한 것으로 추정되며, 북서부 인근해역까지 증가의 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

3.3. 금속원소의 오염도 평가

퇴적물 내 금속들의 오염도를 농축비와 생태적 관점에서 파악하기 위해 농축지수(EF)와 생태에 부정적 영향을 미치는 지수(AEI)와의 관계를 이용하여 평가

하였다(Fig. 4). As와 Cu의 경우 AEI는 두 원소 모두 평균 0.7 ± 0.2 , EF는 각각 평균 5.7 ± 1.3 , 평균 1.3 ± 0.4 로 As는 금속원소 중 가장 높은 농축지수를 나타냈다. AEI와 EF의 관련성은 As($r=0.88$, $p<0.01$)와 Cu($r=0.92$, $r=0.01$)에서 모두 높게 나타났다. As는 EF 1.5를 초과하여 인위적 요인에 의한 농축이 활발했음에도 불구하고, AEI는 1 이하로 생태에 부정적 영향을 미치는 수준에는 미달하는 것으로 나타났다. Cu의 EF도 투기해역 RZ4, 정점 DS3, 5, 9에서만 1.5이상으로 인위적 요인에 의한 농축정도로 나타났으나, 생태에 부정적 영향을 미치는 수준에는 미달하였다. 하지만 As와 Cu는 투기해역 일부 정점에서 생태에 부정적 영향을 미치는 수준에 인접해 있어 잠재적으로 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. Cd, Pb, Zn은 AEI가 각각 평균 0.1 ± 0.04 , 평균 0.5 ± 0.1 , 평균 0.6 ± 0.1 이었고, EF는 각각 평균 2.1 ± 0.6 , 평균 1.8 ± 0.2 , 평균 1.8 ± 0.3 으로 AEI는 1이하로 낮은 반면, EF는 비교적 높게 나타났다. 두 지수의 관련성은 Cd($r=0.81$, $p<0.01$), Zn($r=0.78$, $p<0.05$)은 높았으나, Pb($r=0.48$)은 다소 낮게 나타났다. 따라서 Cd, Pb, Zn은 EF가 1.5 이상을 상회하여 농축 정도가 강하게 나타났으나, 생태에 부정적 영향을 미치기에는 어려운 요소로 나타났다. Cr의 AEI는

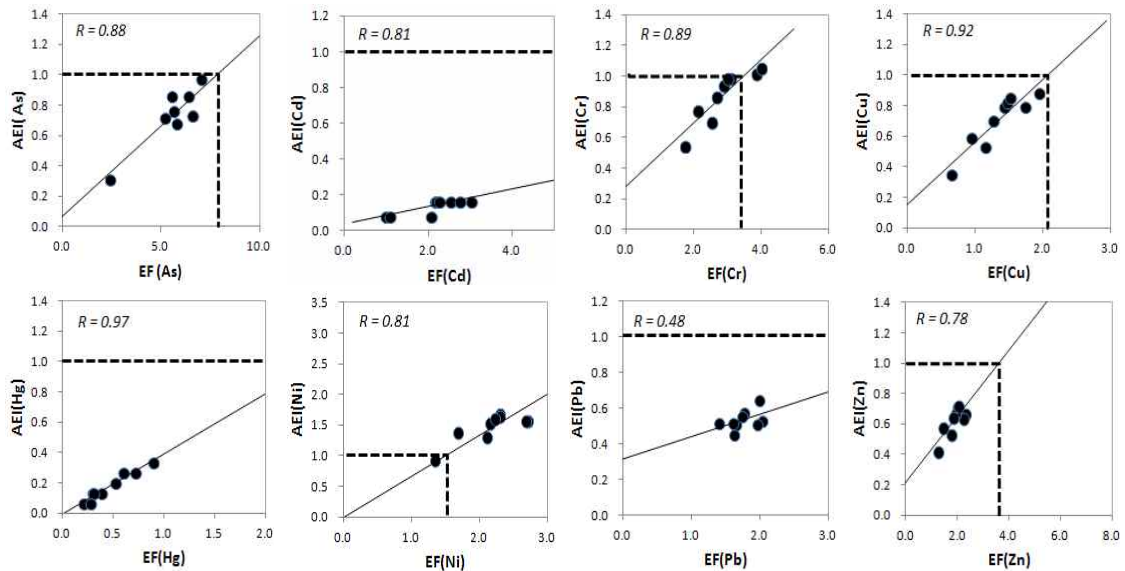


Fig. 4. Relationship between Enrichment Factors(EF) and Adverse Effect Index(AEI) in surface sediments.

평균 0.9 ± 0.2 , EF는 2.9 ± 0.7 로 AEI는 일부 투기해역 정점에서 1을 초과하였고, EF는 모든 정점에서 1.5를 초과하고 있었다. 두 지수의 관련성($r=0.89$, $p<0.01$)도 높게 나타났다. 따라서 인위적 농축이 활발하고, ERL 수준의 생태에 부정적 영향을 미치는 투기해역 정점 RZ4, DS3, 5, 9는 Cr의 오염이 뚜렷해 외부요인의 영향을 받고 있음을 지시한다. Hg의 AEI는 평균 0.2 ± 0.1 , EF는 0.5 ± 0.2 로 두 지수의 관련성($r=0.97$, $p<0.01$)도 매우 높게 나타났다. 연구해역의 모든 정점에서 생태에 부정적 영향 수준 및 인위적 기원의 농축 기준에 미달되어 있었다. Ni의 AEI는 평균 1.5 ± 0.2 , EF는 2.2 ± 0.4 로 AEI, EF는 대조정점 RS2를 제외한 모든 정점에서 각각 1, 1.5를 초과하였다. 두 지수의 관련성($r=0.81$, $p<0.01$)도 높게 나타났다. 따라서 Ni은 대조정점 RS2를 제외한 연구해역에서 외부요인의 영향으로 Ni이 오염상태임을 지시한다.

EF와 AEI를 이용한 연구해역의 오염을 보다 구체적으로 알아보기 위해 I_{geo} 방법을 이용하여 파악해 보았다. I_{geo} 는 퇴적물에 함유된 금속함량을 오염되지 않은 금속함량과 비교하는 방법으로 그 수치에 따라 7등급으로 구분한다(Müller, 1979). 연구해역에서 I_{geo} 를 계산한 결과는 Table 3에 정리하였다. 표층 퇴적물의 금속원소 중 Mn, Hg은 우려할 만한 수준이 아니었으나, Fe, Cu, Zn, Pb, Ni, Co는 대조정점 RS2를 제외한 시료의 50%~100% 가 I_{geo} class 1을 나타냄으로써 오염단계에 진입하는 수준을 나타냈다. Cr, Cd은 각각 시료의 67%, 22%가 I_{geo} class 2로 약한 오염단계에 진입한 수준을 보였으며, As의 경우는 대조정점 RS2를

제외한 시료의 75% 가 I_{geo} class 3으로 강한 오염단계에 진입하는 수준을 나타냈다.

결과적으로 서해병 해역에 표층 퇴적물의 오염도는 Cr, Ni이 농축정도가 높고 ERL수준의 생태에 부정적인 영향을 미칠 수 있어, 외부요인에 의해 오염되어 있음을 나타냈다. 뿐만 아니라 As, Cu도 농축정도 수준이 매우 높고, 생태에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 수준에 진입하고 있어 오염요인의 관리가 요구된다.

금속원소의 함량은 자연적인 현상과 인위적 활동 혹은 두 경우가 결부되어 결정된다(Muñoz-Barbosa 등, 2012). 특히 황해의 경우는 중국과 한국의 여러 하천으로부터 퇴적물이 유입되어 지화학적 공간분포에 영향을 미친다. 그러나 서해병 해역이 위치한 황해의 중앙부에서는 퇴적물 축적율이 연간 0.3~0.9 mm 로 황해해역 중 가장 낮다(Hong 등, 1999). 따라서 서해병 해역은 인위적인 폐기물 배출활동에 의해 금속원소의 분포에 영향을 미칠 수 있는 환경조건을 갖고 있다. 이러한 서해병 해역에 배출되는 폐기물은 주로 폐수 및 하수처리오니, 분뇨와 축산폐수가 있다. 특히 폐수처리오니는 섬유 및 염색, 제지, 화학, 피혁업종에서 생물화학적 처리 과정에 발생된다. 폐수처리오니 배출 폐기물의 금속원소 함량은 업종에 따라 차이가 크게 나타나는 한계점이 있으나, 평균적인 금속함량의 비율은 유사할 것으로 판단된다. 배출 폐기물의 금속원소 평균 함량은 폐수처리오니에서 Cr(평균 2,390 mg/kg)이 최대함량을 보였고, Zn(평균 1,130 mg/kg), Ni(평균 500 mg/kg), Cu(평균 180 mg/kg)가 비교적 높은 함량을 나타냈다. 하수처리오니는 Zn(평균 3,670

Table 3. Classment of geoaccumulation index(Muller, 1979) and the number of I_{geo} -class for the concentrations of metallic elements in surface sediments

I_{geo}	I_{geo} -Class	Designation of sediment quality	I_{geo}											
			Fe	As	Cd	Cr	Co	Cu	Hg	Ni	Mn	Pb	Zn	
>5	6	Very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	5	Strong/very strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-4	4	Strongly polluted	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	3	Moderately/strongly polluted	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-2	2	Moderately polluted	0	1	2	6	0	0	0	0	0	0	0	0
0-1	1	Practically unpolluted/moderately polluted	5	1	5	3	8	5	0	8	0	9	8	
0	0	Practically unpolluted	4	0	2	0	1	4	9	1	9	0	1	

mg/kg)이 최대 함량을 나타내고, Cu(평균 990 mg/kg), Cr(평균 223 mg/kg), Ni(평균 180 mg/kg), As(평균 10.1 mg/kg)가 비교적 높은 함량을 보였다(MMAF, 2004). 축산폐수는 Cu(평균 510 mg/kg), Zn(평균 2,450 mg/kg)의 함량이 액상류 폐기물 중 비교적 높게 나타나는데, 성장을 촉진시키는 사료첨가제의 영향으로 축산폐수에 형태로 배출되기 때문이다(Choi와 Kim, 2008; Lim, 2003). 이와 같은 특성을 갖는 폐수처리오니는 2008년까지 누적배출량이 522만 톤, 하수처리오니는 740만 톤, 축산폐수는 210만 톤으로 총누적배출량에 대한 비율은 각각 15%, 21%, 6%에 달하며 배출시에는 입자형태로 빠르게 침강한다. 따라서 서해병 해역에서 퇴적물 금속원소의 주된 오염요인은 배출성상 중 오니류의 집중 배출로 인한 영향으로 판단된다.

3.4. 금속원소의 함량비교

서해병 해역은 1988년 투기제도 시행 이후 다량의 폐기물 배출로 인해 As, Cr, Cu, Zn의 축적되어 있었

으나(MMAF, 2004), 2006년 이후 배출량 감축, 육상 오염 우선처리원칙 및 감시강화 등 투기해역 정책 방향이 전환됨에 따라 퇴적물 중 금속원소의 함량변화가 예상된다. 따라서 서해병 해역에서 시기별 금속원소 함량 변화를 이해하기 위해 기존 연구들의 표층 퇴적물 자료(KCG research institute, 2008; Kim 등, 2001; Shin, 2008; Youn 등, 2001)와 비교하여 보았다(Table 4). 기존 연구와는 조사정점, 시료의 수, 분석방법 등의 차이가 있어 정량적인 함량변화를 수치로 제시할 수는 없는 한계점은 있으나, 이를 무시하였을 때 시간적으로 금속원소의 축적이나 개선 효과는 간접적으로 추정 가능할 것으로 판단된다. 투기제도의 시행 초기인 1991, 1996년에 제시된 금속원소의 함량은 전반적으로 2000년 이후의 함량보다는 낮은 분포를 보였다. 반면 배출량이 절정에 이르던 2004, 2005년의 As, Cu, Cr, Hg, Zn 함량은 1991년에 비해 2배 이상 높은 함량을 나타냈다. 시간적으로 1991년은 투기제도 시행 초기로 폐수와 같은 액상류가 주로 배출되며

Table 4. Comparison of metal concentration in disposal site and reference site in the Yellow Sea

Date	Region	Metals(mg/kg)								References
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
Nov, 1991	RS and DS(n=19)	-	-	28.1~100.2 (55.2)	6.3~33.5 (16.4)	-	10.7~46.0 (24.4)	22.3~31.0 (26.1)	31.3~128.0 (67.4)	Kim et al.(2001)
Aug, 1996	DS (n=1)	-	-	47.7	14.4	-	48.2	36.9	59.6	Youn and Kim(2001)
Aug, 2001		4.6~7.5 (5.5)	-	35.2~303.6 (111.9)	18.3~33.7 (24.4)	0.02~0.08 (0.04)	-	15.3~19.3 (18.0)	86.0~129.0 (101.8)	
Aug, 2002	DS (n=8)	4.8~7.1 (6.4)	ND~0.1 (ND)	72.1~179.2 (111.3)	20.6~38.3 (28.0)	0.02~0.04 (0.03)	-	15.2~19.7 (17.4)	80.7~125.1 (105.9)	Shin (2008)
Aug, 2003		7.7~11.0 (8.6)	0.1~0.2 (0.2)	85.3~285.7 (139.2)	25.8~43.9 (31.5)	0.02~0.10 (0.05)	-	26.0~34.3 (29.6)	104.1~144.6 (117.6)	
Aug, 2004		7.0~9.9 (8.2)	0.1~0.6 (0.2)	81.4~903.5 (182.1)	19.2~69.1 (30.4)	0.03~0.20 (0.07)	-	12.9~26.9 (20.7)	80.2~257.4 (114.2)	
Aug, 2005	RS (n=2)	7.0~8.5 (7.8)	0.10~0.17 (0.13)	86.1~93.7 (89.9)	21.4~24.7 (23.0)	0.024~0.027 (0.026)	-	23.8~23.8 (23.8)	110.4~114.4 (112.4)	KCG Research Institute (2005)
	DS (n=8)	7.4~10.7 (8.4)	0.07~0.23 (0.14)	94.2~223.9 (151.3)	24.1~57.1 (32.5)	0.024~0.074 (0.045)	-	23.6~30.7 (25.3)	116.2~181.3 (131.6)	
Aug, 2008	RS (n=1)	7.1	0.32	104.8	35.0	0.025	-	29.9	144.3	KCG Research Institute (2008)
	DS (n=13)	6.7~11.9 (8.3)	0.30~0.33 (0.32)	98.9~133.3 (115.1)	30.6~42.8 (37.1)	0.013~0.038 (0.031)	-	26.2~31.9 (29.3)	133.9~158.4 (146.5)	
Jul, 2009	RS (n=2)	2.6~8.0 (5.3)	0.07~0.16 (0.12)	43.9~76.2 (60.0)	11.5~26.9 (19.2)	0.012~0.023 (0.018)	19.4~35.0 (27.2)	23.8~26.8 (25.3)	62.1~105.7 (83.9)	This study
	DS (n=7)	2.6~8.0 (6.1)	0.07~0.20 (0.15)	43.9~84.8 (70.8)	11.5~29.5 (23.6)	0.012~0.053 (0.026)	19.4~35.0 (30.7)	21.0~30.1 (24.9)	62.1~107.7 (92.1)	

누적투기량은 310만 톤이었으며, 유기성 오폐수는 전혀 배출되지 않았다. 그러나 13년 후의 2003년에는 금속원소의 부하량이 높은 유기성 오폐수 및 축산폐수의 배출량이 급격히 증가하고, 누적량은 각각 95만 톤, 730 만 톤에 달한다(www.oceandumping.re.kr). 따라서 투기해역에서의 금속원소 함량을 비교해 보았을 때 Cu, Cr, Zn은 인위적 폐기물 배출이 직접적으로 반영되는 환경조건에서 활발한 투기행위로 인해 금속원소의 축적이 지속되었음을 시사한다.

한편 2006년에 런던협약 '96 의정서의 국제발효 및 해양환경에 대한 인식의 변화에 따라 매년 10% 가량의 투기량 감축 및 휴식년제 도입(2006년), 축산폐수의 투기량 축소(2007년), 그리고 폐기물성분검사방법 변경(2008년) 등과 같은 단계적인 제도의 관리 강화를 시작하게 된다(Lee 등, 2006). 제도 개선 시행 후 2008년에 금속원소의 함량은 2005년에 비해 Cr과 Hg만이 25%정도 낮았으며, 이를 제외한 나머지 금속원소는 2005년과 유사한 함량을 나타냈다. 특히 이번 2009년의 연구조사는 투기해역 금속원소 중 As, Cu, Cr, Hg, Zn 함량은 2008년에 비해 35%정도 낮은 분포를 나타냈다. 투기해역 폐기물의 총배출량도 2005년에는 240만 톤으로 최대 배출 허용기준(243만 톤) 정도였으나, 2007년과 2008년은 폐수와 유기성 오폐수의 배출량이 현저히 축소되며 각각 총배출량이 188만 톤, 159만 톤으로 감소하였다. 결국 투기해역 표층 퇴적물의 금속원소의 함량은 감축정책 시행 후 오염원의 가입량이 감소하면서 금속원소의 함량도 자연회석되며 점차 낮아진 것으로 해석된다. 이는 폐기물의 배출기준 강화시에 폐기물 배출량 10% 이상의 자연감축과 이에 따른 환경개선 효과를 예측한 연구와도 잘 부합한다(Jang 등, 2007).

서해병 해역에 금속원소 함량의 국지적 상승은 제도개선을 통해 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 이미 진행된 오염은 수산자원의 생태 혹은 수산물의 안전성에 영향을 미칠 수도 있다. 현재에도 투기해역에는 인위적인 배출 행위가 지속되고 있고, 정부는 2014년에 해양투기를 전면 금지시키는 계획을 추진하고 있다. 따라서 앞으로도 적극적으로 지속적인 환경개선 정책을 통해 환경과 생태계에 미칠 영향을 저감시키고, 폐기물의 자원화와 더불어 오염된 퇴적층의 정

화를 통해 해역의 자정능력을 회복시키기 위한 검토가 필요하겠다.

4. 결론

서해병 해역의 표층 퇴적물에서 유기물 및 금속원소의 오염도와 시기별 함량 변화를 알아보기 위해 9개 퇴적물의 유기물(IL, COD) 및 금속원소(Al, Fe, As, Cd, Cr, Co, Hg, Ni, Mn, Pb, Zn)를 분석하고, 서해병 해역의 지난 연구 자료와 비교하였다.

1. 표층 퇴적물의 유기물의 함량은 전반적으로 투기해역에서 높았다. IL은 투기해역에서 평균 15.4%로 우리나라 주변연안 평균 함량 10.8%보다 1.5배 높았으며, COD는 투기해역에서 최대값이 29.9 mgO₂/g-dry로 일본의 퇴적물 COD 기준값(20.0 mgO₂/g-dry)을 1.5배 초과하고 있어 유기물의 오염이 진행된 저질환경을 나타냈다.

2. 금속원소의 함량은 대조정점에 비해 투기해역 정점에서 높았고, 오염의 가능성 있는 한국의 다른 해역과 비교하면 Cr, Cu, Zn이 높거나 유사한 함량을 나타냈다. 금속원소 공간분포 조절요인에 대해서는 입도조사가 이루어지지 않아 관련성은 알 수 없었으나, 입도의존성 원소인 Al과 금속원소의 관련성을 분석한 결과, 유의적 관계가 나타나지 않아 금속원소의 공간분포가 점토광물보다는 다른 요인이 작용하고 있음을 보였다. 따라서 투기해역은 인위적 폐기물 배출행위로 인한 농도 증가로 추정되며, 북서부에 대조정점은 투기해역의 함량과 유사한 함량을 나타내 인근해역까지 영향이 미칠 수 있음을 나타냈다.

3. 퇴적물의 금속원소 농축지수와 생물에 부정적 영향수준을 이용하여 평가한 결과 As, Cu, Pb, Zn은 인위적인 농축이 나타났음에도 불구하고, 생태에 부정적 영향을 미치는 수준은 미달되어 있었다. 그러나 As와 Cu의 경우는 투기해역을 중심으로 생태에 부정적 수준에 인접해 있어 잠재적인 영향 가능성을 나타냈다. Cr, Ni은 투기해역에서 높은 농축지수와 ERL수준의 생태에 부정적 영향 기준을 초과하여 오염상태임이 파악되었다. I_{geo} 평가결과는 Cu, Pb, Ni, Zn이 오염단계에 진입하였으며, 특히 Cr과 As가 각각 약한 오염단계와 강한 오염단계 상태로 파악되었다. 투기해

역에 주된 금속원소 오염요인은 폐기물 정상형태 중 금속함량이 많고, 총누적배출량의 36%를 차지한 오니류에 의한 것으로 판단된다.

4. 투기제도 시행 초기와 활발했던 시기, 제도개선 이후의 금속원소 함량변화를 간접적으로 추정해보기 위해 지난 연구 자료와 비교해 보았다. 그 결과 시행 초기에는 주로 액상류와 적은 배출량으로 비교적 낮은 함량을 나타냈고, 배출행위가 매우 활발했던 2000년대 중반에는 금속함량 또한 매우 크게 증가하여 축적이 지속되고 있음을 나타냈다. 단계적인 환경 관리 강화 이후인 2008년에는 폐기물에 함량이 높은 Cr, Hg의 함량이 감소하였고, 2009년에도 As, Cu, Cr, Hg, Zn의 함량이 더욱 감소하고 있어 제도개선 이후 배출량의 감축 및 자연회색의 효과가 나타난 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립수산과학원 아열대수산연구센터 시험연구사업(RP-2013-ME-029)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- Adriano, D.C., 1986, Trace Elements in the Terrestrial Environment, Springer-Verlag, 533.
- Cho, Y. G., 1994, Distribution and origin of metallic elements in marine sediments around Korean peninsula, Ph. D. Dissertation, Seoul National University.
- Cho, Y. G., Lee, C. B., Park, Y. A., Kim, D. C., Kang, H. J., 1993, Geochemical characteristics of surface sediments in the easter part of the Yellow Sea and the Korean West Coast, The Kor. J. Quaternary Research, 7(1), 69-92.
- Cho, Y. G., Park, K. Y., 1998, Heavy metals in surface sediments of the Youngsan Estuary, west coast of Korea, J. Kor. Environ. Sci. Soc., 7(4), 549-557.
- Cho, Y. G., Ryu, S. O., Khu, Y. K., Kim, J. Y., 2001, Geochemical composition of surface sediments from the Saemangeum tidal flat, west coast of Korea, J. Kor. Soc. Oceanogr., 6, 27-34.
- Choi, K. Y., Kim, S. H., 2008, Heavy metal distributions in livestock sludges in Korea, 2008, Proceedings of the Korean Ocean Science and Technology Societies Conferences.
- Choi, M. S., Chun, J. H., Woo, H. J., Yi, H. I., 1999, Change of heavy metals and sediment facies in surface sediments of the Shihwa Lake, J. Kor. Environ. Sci. Soc., 8(5), 593-600.
- Choi, S. W., Oh, K. H., Youn, S. T., Kim, H. G., Koh, Y. K., 2010, Sedimentary environments and geochemistry characteristics of tidal flat sediments in semi-enclosed Cheonggye Bay, Korea. J. Kor. Island, 22, 175-187.
- Hong, G. H.(eds.), Ahn, Y. H., Lee, J. H., Chung, C. S.(eds.), Lee, H. J., Kim, S. K., Kim, Y. I., Park, J. K., Ahn, B. W., 1999, Suspended particulate matter in the Yellow Sea, In biogeochemical processes in the Bohai and Yellow Sea, Dongjin Publication Association, Seoul, 249-274.
- Hyun, S. M., Choi, J. W., Choi, J. S., Lee, T. H., 2003a, Surface sediment characteristics and benthic environments in the mouth of Jinhae Bay, Korea, J. Kor. Fish. Soc., 36(6), 700-707.
- Hyun, S. M., Choi, Y. C., 1997, Behavior of chemical elements and biological activity in seawater, Bull of the Mar. and Environ. Res. Ins., 21, 187-198.
- Hyun, S. M., Lee, T. H., Choi, J. S., Choi, D. L., Woo, H. J., 2003b, Geochemical characteristics and heavy metal pollutions in the surface sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea, J. of the Kor. Soc. Oceanogr., 8, 380-391.
- Hwang, D. W., Jin, H. G., Kim, S. S., Kim, J. D., Park, J. S., Kim, K. S., 2006, Distribution of organic matters and metallic elements in the surface sediments of Masan Habor, Korea, J. Kor. Fish. Soc., 39(2), 106-117.
- Izawa, H., 1993, Sampling of sediment, Water Sci. Technol., 16(2), 6-10.
- Jang, S. H., Park, G. S., Shin, S. K., Yeum, K. S., Lee, S. E., 2007, Prediction on the reduction effect of pollution according to analytical methods for Ocean Dumping Wastes, Proceedings of the Korean Ocean Science and Technology Societies Conferences.
- Kang, C. K., Lee, P. Y., Park, J. S., Kim, P. J., 1993, On the distribution of organic matter in the nearshore surface sediment of Korea, Bull. Korean Fish. Soc., 26, 557-566.

- KBS, 2005, http://news.kbs.co.kr/event/kbs_special_20051106.html.
- Kim, D. H., 2007, Study on the sediment quality in bottom water (I), 13(1), 93-102.
- Kim, J. G., You, S. J., Cho, E. I., Ahn, W. S., 2003a, Distribution characteristics of heavy metals for tidal flat sediments in the Saemankeum area, J. Kor. Fish. Soc., 36(1), 55-61.
- Kim, P. G., Park, M. E., Sung, K. Y., Lim, S. T., Oh, S. M., 2009a, Comparative study on distribution of heavy metals of the surface sediments in East/West Oceanic Dumping Areas, Econ., Environ. Geol., 42(2), 121-131.
- Kim, P. G., Park, M. E., Sung, K. Y., 2009b, Distribution of heavy metals in marine sediments at the ocean waste disposal site in the Yellow Sea, South Korea, Geosciences journal, 13(1), 15-24.
- Kim, P. S., 2003b, Study of sequential extraction for the evaluation of ecological risk in sea-dumping wastewater sludge, Master's Dissertation, Kyungnam University.
- Kim, S. H., Hong, G. H., Chung, C. S., Kim, Y. I., Jin, Y. H., 2001, Distribution of trace metals and organic carbon in the sediment of the waste disposal area in the Yellow Sea, 1991, Proceedings of the Korean Marine Environmental Engineering Conferences.
- Korea Coast Guard Research Institute, 2008, <http://rnd.kcg.go.kr>.
- Lee, B. G., Kim, S. W., Kim, Y. H., Hyun, C. G., Lee, H. S., Kim, K. J., 2006, The condition and management measure of marine disposal of wastes, Proceedings of the Kor. Mar. Environ. and Safety Conferences.
- Lee, J. H., Lee, J. S., Kim, B. S., Lee, C. B., Koh, C. H., 1998, Characteristics of metal distribution in the sediment in Kyeonggi Bay, Korea, J. of the Korean Soc. Oceanogr., 3(3), 103-111.
- Lim, S. H., 2003, Utilization of Mineral Chelate and the Korean Hog Industry(III), Pigplus, 12(6), 77-79.
- Long, E. R., MacDonald, D. D., Smith, S. L., Calder, F. D., 1995, Incidence of adverse effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments, Environ Manage, 19(1), 81-97.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2004, Monitoring for the wastes disposal sea areas : Seohae Byung (I).
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005a, Development of management system for Ocean Disposal 2.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005b, Standard methods of marine environment in Korea.
- Ministry of Science and Technology, 2001, Assessment of environmental fate of contaminants in the Yellow Sea for Yellow Sea Science Program.
- Müller, G., 1979, Schwermetalle in den sedimenten des RheineVeränderungen seit, 1971, Umschau, 79, 778-783.
- Muñoz-Barbosa, A., Gutiérrez-Galindo, E. A., Daesslé, L. W., Orozco-Borbón, M. V., Segovia-Zavala, J. A., 2012, Relationship between metal enrichments and a biological adverse effects index in sediments from Todos Santos Bay, northwest coast of Baja California, Mexico, Marine Pollution Bulletin, 64, 405-409.
- Ocean dumping management system, 2009, <http://www.oceandumping.re.kr>.
- Park, Y. C., Yang, H. S., Lee, P. Y., Kim, P. J., 1995, Environmental characteristics of the seawater and surface sediment in the vicinity of Pusan Harbor Area in winter, J. Kor. Fish. Soc., 28(5), 577-588.
- Shin, 2008, A Study of Environmental Changes Based on Pollution Parameters in the Waste Disposal Area of Yellow Sea, Master's thesis, Inha University.
- Song, K. M., Lee, S. R., Lee, S., Ahn, A. H., 2007, Ecological Model Experiments of the Spring Bloom at a Dumping Site in the Yellow Sea, Ocean and Polar Research, 29(3), 217-231.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1995, The continental crust, Rev Geophys, 33, 241-265.
- Yoon, Y. H., 2000, A study on the Distribution characteristic of organic matters on the surface sediments and its origin in Keogeum-sudo, Southern part of Korean peninsula, J. Kor. Environ. Sci. Soc., 9(2), 137-144.
- Yoon, Y. H., 2003, Spatio-temporal distribution of organic matters in surface sediments and its origin Deukryang Bay, Korea, J. Kor. Environ. Sci. Soc., 12(7), 735-744.
- Youn, J. S., Koh, Y. Y., Lee, H. J., 2001, Characteristics of Metallic Elements Distribution in Surface Sediments of the Central Yellow Sea, Bulletin of the Marine and Environmental Research Institute, 25, 1-10.

Youn, S. T., Koh, Y. G., Ryu, S. O., 1999, Distribution characteristics of surface sediments and metal elements in Hampyong Bay, the Southwestern Coast of Korea, *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 8(6), 677-684.

Zhang, J., Liu, C. L., 2002, Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes, *Estuarine, Coast Shelf Sci.*, 54(6), 1051-1070.