

마산만 오염퇴적물 준설토 투기해역의 중금속 오염평가

권영택[†]
경남대학교 토목환경공학부

Evaluation of Heavy Metal Pollution in the Dumping Site of the Dredged Sediment, Masan Bay

Young-Tack Kwon[†]

*Kyungnam University Civil & Environmental Engineering 449 Wulyoung-Dong,
Masan KyungNam 631-701 South Korea*

요 약

고농도로 오염된 마산만 퇴적물 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이 마산시 가포해역에 투기되었다. 준설토가 투기된 가포해역의 한 조석 주기 동안 해수 중금속 농도는 Zn 1.15~2.59, Cu 1.08~1.96, Pb ND~0.42 그리고 Ni 0.57~1.35 $\mu\text{g/l}$ 로서 진해만의 평균 농도인 Zn 0.80, Cu 1.02, Pb 0.01 그리고 Ni 0.70 $\mu\text{g/l}$ 와 비교할 때 높은 농도이었다. 가포지역 퇴적물 표층의 중금속 오염 수준을 미국 EPA 기준으로 평가한 결과 Non polluted~Moderately polluted level 이었으며, Adverse Biological Effects 기준으로 평가하였을 때 Cu와 Zn은 ERL~ERM, Cd, Cr, Pb 그리고 Ni은 ERL 수준이었다. 퇴적층별 중금속 함량은 상층부보다 하층부에서 중금속 농도가 높게 나타났으며 이러한 오염도 분포 경향은 상대적으로 오염도가 낮은 지역의 준설토가 투기지역 퇴적물의 상층부를 형성하고 있기 때문이다. 가포지역에서 채집된 굴에서 Zn 238.96, Cu 5.29, 바지락에서 Zn 17.71, Cu 1.00, 진주담치에서 Zn 187.98, Pb 0.28, Cr 0.15, Mn 4.23, Sr 1.45 그리고 Fe 100.33 $\mu\text{g/g wet wt.}$ 이 검출되어 투기장 외부 호안에서 채취된 시료보다 높은 경향을 나타내었다. 그러나 이와 같은 패류의 중금속 측정결과는 국립수산물품질검사원의 정밀검사기준(패류)인 Pb 2.0 및 Cd 2.0 $\mu\text{g/g}$ 과 비교하였을 때 기준치 이하에 해당하였다.

Abstract – A large amount $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ of the polluted sediment was dredged from the Masan Bay and deposited in Gapo confined area, Masan. The dissolved metal concentrations of seawater in the dumping site (Gapo area) were observed during one tidal cycle and compared with those of seawater obtained from Jinhae Bay. The sediment was evaluated as from Non polluted to Moderately polluted by USEPA standards. It was judged that toxicological effects of sediment analyzed ranged from ERL to ERM with copper and zinc, and ERL with cadmium, chrome, lead, and nickel by the Adverse Biological Effects. The pollutant concentration was low in surface sediment compared to deeper sediment since the sediments with relatively low concentrations of pollutant were dumped to the surface. The pollutant concentration was low in surface sediment compared to deeper sediment since the sediments with relatively low concentrations of pollutant were dumped to the surface. The benthic organisms in Gapo area had higher concentrations of trace metals (Oyster: Zn 238.96, Cu 5.29 $\mu\text{g/g wet wt.}$, Clam: Zn 17.71, Cu 1.00 $\mu\text{g/g wet wt.}$, Mussel: Zn 187.98, Pb 0.28, Cr 0.15, Mn 4.23, Sr 1.45 and Fe 100.33 $\mu\text{g/g wet wt.}$) compared to outside of dumping site. However, the trace metal level in the bivalves was less than the NFPQIS (National Fisheries Products Quality Inspection Service) standard.

Keywords: Masan bay(마산만), Sediment(퇴적물), Metal(중금속), Dumping site(투기지역)

[†]Corresponding author: kwonyt@kyungnam.ac.kr

1. 서론

마산만은 폐쇄성이 강한 해역으로 매년 반복되는 적조 현상 및 퇴적물의 극심한 오염 상태를 개선시킬 목적으로 우리나라에서 최초로 준설을 통한 정화사업이 실시된 지역이다(마산시[1988] [1989]).

설전 마산만 퇴적물의 오염도는 COD 15,128 mg/kg dry wt., $PO_4^{3-}-P$ 및 T-N은 0.732와 9.832 mg/kg wet wt. 그리고 휘발성 유기물 함량으로써 강열감량이 최고 39.44% 이었다. 또한 중금속은 Zn 2,610, Cd 12.2, Pb 109, Cu 336 그리고 Cr 278 mg/kg dry wt. 이었다(마산시[1989]).

이와 같은 퇴적물의 오염 원인은 1992~1994년에 조사한 마산시와 창원시의 하천 유입 부하량 측정 결과를 볼 때, 이 지역의 생활하수 및 공장폐수의 영향이 절대적인 것으로 생각된다. 즉 건기와 우기로 구분하여 조사한 결과 마산만 내만에 부하되는 오염 물질의 량은 COD 29,878, T-N 10,704, Zn 59.1 kg/day 등이었다(이와 권[1995]). 이와 같이 오염도가 극심한 마산만의 퇴적물을 1990~1994년에 5차에 걸쳐 총 2.1×10^6 m³를 pump 흡인방식으로 준설하여 준설토를 마산시 가포해역에 투기처리 하였다. 가포해역 투기장은 호안이 설치되어 있었으며 호안의 일부가 선박 출입을 위하여 개방되어 있다. 간조와 만조시에 해수의 유출입이 자유로운 상태이며 승어의 어획 및 간조시에는 준설토의 투기로 형성된 갯벌에서 바지락의 채취가 이루어지고 있다.

본 연구는 마산만 오염 퇴적물 준설토가 가포해역에 투기된 이후 10년이 경과된 현재 시점의 투기장 해양환경 구성 요소들의 중금속 오염 상황을 평가하고자 한다.

2. 연구의 배경

본 연구의 배경이 되는 준설전 마산만 퇴적물의 오염상황 및 정화계획은 다음과 같다(이와 권[1995], 마산시[1989]).

2.1 마산만 내만의 오염부하량

준설 대상지역인 마산만 내만에 부하되는 오염물질의 량을 파악하기 위해서 1992~1994년에 건기와 우기로 구분하여 마산만 내만지역의 오염물질 유입경로인 12개의 유입하천(마산시지역 9개소, 창원시지역 3개소)에서 총 10회 조사되었다. 부하량 산정을 위한 유량 측정은 하천의 단면적(수면폭×평균수심)과 유속계(Countert

Table 1. Pollutants load in inner Masan Bay.

						(kg/day)
COD	T-P	T-N	T-SS	ABS		
29,878	739	10,704	21,724	4,491		
Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Cr	
59.1	1.73	3.07	11.52	8.68	3.66	

C-500A, Japan)로 측정되었으며, 평균유량은 마산지역 1.8×10^5 m³/day 그리고 창원지역 3.5×10^5 m³/day이었다. 조사결과 일일 평균 오염 물질의 부하량은 Table 1과 같이 COD 29,878, T-P 739, T-N 10,704, T-SS 21,724, ABS 4,491, Zn 59.1, Cu 11.52, Ni 8.68 그리고 Cr 3.66 kg/day 등으로 육상으로부터의 유입부하가 아주 높음을 알 수 있다.

2.2 퇴적물의 오염도

마산만 수질 개선을 위한 준설사업의 직접적인 배경이 된 퇴적물의 오염 물질 농도는 Table 2와 같다. 오염물질의 농도는 준설 예정지역 5.2×10^3 m²에서 55개 지점을 선정하여 조사한 범위를 나타낸 것으로 COD 28,920~55,128 및 Zn 149~2,610 mg/kg dry wt.로 오염도가 극심함을 알 수 있다.

2.3 오염퇴적물 준설 및 준설토 처리

준설 공사는 1990년 6월에서 1994년 10월까지 5년간에 걸쳐 총 면적 5.2×10^3 m²에서 2.1×10^6 m³의 오염퇴적물을 제거하였으며, 예산은 287억원 이었다. 준설대상지역 오염퇴적물의 층후는 20 cm~181 cm로 지역에 따라 큰 차이를 보였으며 도시 하천수 유입부에 특히 오염층이 깊었다. 준설공법은 pump 준설선을 사용하여 흡인된 퇴적물을 배사관을 통하여 마산시 가포만 투기장으로 가압 이송 후 배출 위치에서 침전제 1883A와 577C로 응집처리 후 투기되었다. 준설토 투기장은 호안이 설치되어 있었으나 투기장 내부에 위치한 어촌의 선박 출입을 위하여 일부지역이 개방되어 있어 해수의 유출입이 가능하였다(Fig. 1).

2.4 준설지역 중금속 농도감소

준설이 실시되기 전 마산만 퇴적물의 중금속 함량과 오염퇴적물 제거 후의 중금속 함량 비교에 의한 농도 감소율(준설 전 농도/준설 후 농도/준설 전 농도×100)은 Zn 55.8, Cd 73.3, Ni 75.3,

Table 2. Pollutants concentration in sediment of dredged area, Masan Bay.

							(mg/kg dry wt.)
COD	$PO_4^{3-}-P^*$			T-N*		I.L.(%)	
28,920~55,128	0.315~0.732			1,875~9,832		7.21~39.44	
Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Cr	Hg	
149~2,610	0.75~12.20	22.4~109.0	45.7~336.0	24.4~141.0	39.7~278.0	0.08~1.19	

*mg/kg wet wt.

I.L.: Ignition loss

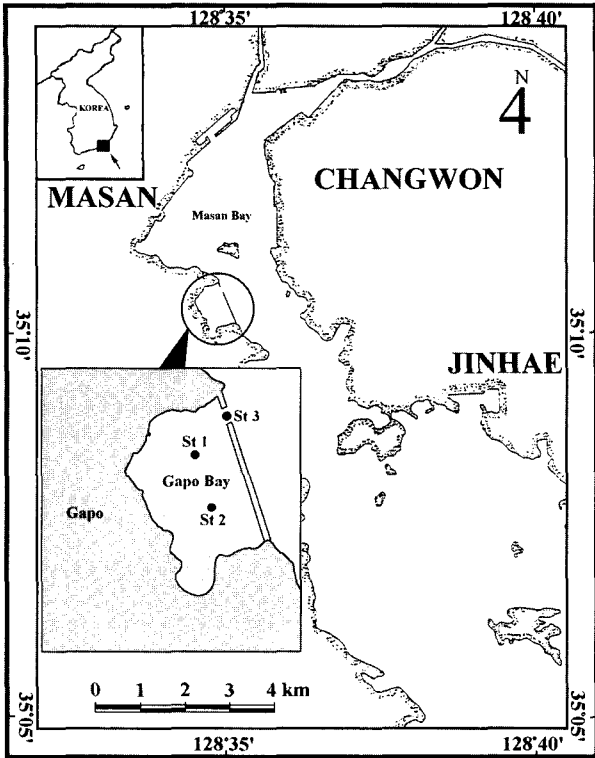


Fig. 1. Station map in Gapo tidal flat, Masan.

Cu 46.6, Cr 55.6, Fe 12.5 그리고 Hg 66.7% 이었다. 이와 같은 중금속 및 기타 오염 물질들의 농도 감소는 오염 성분들이 가포만 해역으로의 물리적 이동에 따른 것이다.

따라서 대량의 오염 물질 투기가 이루어진 가포해역의 해수와 퇴적물 그리고 생체 시료의 중금속 오염도를 평가하고자 하였다.

3. 재료 및 방법

오염퇴적물 준설토 투기지역의 환경오염을 평가 하기위한 시료의 채취, 분석방법 그리고 중금속 오염도 평가 방법은 다음과 같다.

3.1 시료 채취

마산시 가포만의 오염퇴적물 투기지역(Fig. 1)은 호안 내부 지역에 갯벌이 형성되어 있으며, 호안의 일부가 개방되어 있어 창조시와 낙조시에 해수의 유출입이 자유로운 지역이다. 투기장의 수문학적 조건으로 만조시 최대수심 5 m, 침수면적은 $1 \times 10^6 \text{ m}^2$ 그리고 호안 내부 물의 부피는 $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 계산되었다. 한 조석주기 동안의 해수의 수질변화를 조사하기 위해서 만조시를 기점으로 하여 간조시까지 그리고 다시 만조에 이르는 동안에 한시간 간격으로 방조제 절단부분(St. 3)에서 채수를 실시하였다. 투기장 내의 퇴적물 시료는 St. 1과 St. 2에서 Core sampler를 사용하여 70 cm 깊이 시료를 채취하고 현장에서 10 cm 깊이 단위로 절취하였다. 생체 시료는 투기장 호안 내벽과 외벽에서 진주담치를 채집하였고, 굴, 바지락, 코끼리 조개 그리고 갯가재는 투기장 내부 갯벌에서 채집하였다.

3.2 분석방법

해수, 퇴적물 그리고 생체 시료의 중금속 측정을 위한 전처리 방법은 해양환경공정시험방법(해양수산부[2002])에 의거하였으며 중금속 측정은 원자흡광광도법(Shimadzu AA-680)으로 측정하였다. 이때 중금속 분석에 사용된 초자류 및 시료채취 용기는 1N 질산과 1% APDC 용액으로 세정 처리하였으며, 시약은 유해금속측정용을 사용하였다. 해수시료의 전처리는 1N 질산으로 세정 처리된 $0.45 \mu\text{m}$ 여과지로 여과후 2%의 APDC/DDDC와 MIBK를 사용한 용매추출법으로 농축후 측정하였다. 퇴적물 및 생체시료 분석결과와 신뢰성 확보를 위하여 일본국립공해연구소(NIES)의 환경표준시료(SRM)인 Pond sediment(NIES No. 2)와 Mussel(NIES No. 6)을 사용하여 분석하고 회수율을 구하였다.

표준시료는 각각 3반복 분석하여 평균값으로 표시하였으며, Pond sediment와 Mussel 시료의 중금속 회수율은 각각 95.0~104.8%와 95.2~105.9% 이었다(Table 3).

3.3 퇴적물 중금속 오염도 평가 방법

3.3.1 Sediment Quality Criteria(SQC)에 의한 오염 평가

Table 3. Certified and analyzed values of NIES Pond sediment and Mussel tissue.

Element	NIES No. 2 ond sediment			NIES No. 6 Mussel		
	Certified values	Analyzed* values	Recovery ratio(%)	Certified values	Analyzed* values	Recovery ratio(%)
Zn	343±17	339	98.8	106±6	103	97.2
Pb	105±6	109	103.8	0.91±0.04	0.89	97.8
Cd	0.82±0.06	0.86	104.8	0.82±0.03	0.85	103.7
Ni	40±3	38	95.0	0.93±0.06	0.92	98.9
Cu	210±12	207	98.6	4.9±0.3	4.7	95.9
Cr	75±5	77	102.7	0.63±0.07	0.60	95.2
Mn	770**	762	98.9	16.3±1.2	17.2	105.5
Fe	6.53±0.35(%)	6.49(%)	99.4	158±8	164	103.8
Sr**	110	113	102.7	17	18	105.9

*Average values of 3 times analysis

**Reference value

NIES: National Institute for Environmental Studies, Japan

미국 환경보호청(USEPA)에서 퇴적물 환경오염 지침으로 사용하고 있는 Giesy and Hoke[1990]의 퇴적물 오염 분류기준을 적용하여 Nonpolluted, Moderately polluted 그리고 Heavily polluted 로 구분 평가하였다.

3.3.2 Adverse Biological Effects의 평가

퇴적물에 함유되어 있는 중금속이 수생생물들에게 미치는 위해성에 대하여 Long et al.[1995]과 NOAA[1991] 보고서에서 제시한 평가 기준에 따라 Effect range-low(ERL)와 Effect range- median(ERM)으로 구분하여 평가하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 준설토 투기지역 해수의 중금속

한 조석 주기 동안의 준설토 투기지역 해수의 용존성 중금속 농도를 Table 4에 나타내었다. 그리고 조사지역 해수의 중금속 함량을 해역 수질환경기준(환경정책기본법 시행령 별표 1)과 비교 고찰하기 위하여 표의 하단에 환경기준을 표시하였다.

준설토 투기이후 10년이 경과한 현재시점의 해수 중 중금속 농도를 Table 4에 나타낸 바와 같이 Zn 1.15~2.59, Cu 1.08~1.96, Pb 불검출~0.42 그리고 Ni 0.57~1.35 $\mu\text{g/l}$ 이었다. 준설토 투기장 해수의 중금속 함량을 2003년에 조사한 진해만 조사결과(여수대학교 수산과학연구소[2003])인 Zn 0.08~0.74, Pb 불검출~0.6, Cu 0.03~0.17 $\mu\text{g/l}$ 등과 비교하였을 때 본 연구지역 해수에서 다소 높은 결과를 나타내었다. 그러나 이와 같은 해수의 중금속 농도를 해역 수질환경기준인 Zn 100, Cu 20 그리고 Pb 100 $\mu\text{g/l}$ 와 비교할 때 아주 낮은 수준이다.

창조시와 낙조시에 측정된 해수 중금속 평균농도는 다음과 같다.

낙조시 즉, 10:00시(만조)~16:00시(간조)까지 채수된 해수는 호안 내부에서 퇴적물과 접촉 후 호안 외부로 유출되는 시기의 해수이며 측정된 평균값이 Zn 1.76, Cd 0.13, Pb 0.24, Cu 1.58 그리고 Ni 0.75 $\mu\text{g/l}$ 이었다. 한편 창조시기인 17:00시(간조)~21:00시(만조)까지는 호안 외부의 마산만 해수가 투기장 내부로 유입되는 시기이므로 마산만 내만지역의 해수이다. 이때의 평균값은 Zn 1.92, Cd 0.19, Pb 0.14, Cu 1.57 그리고 Ni 1.03 $\mu\text{g/l}$ 이었다. 준설토 투기장 유출입 해수의 중금속 원소별 평균 농도를 비교하여 볼 때 투기장 내부 지역 퇴적물 표층으로부터의 용출에 의한 해수 중금속 농도 증가 효과는 거의 없었다. 그래서 준설토 투기이후 10년이 경과된 현재시점의 투기장내 퇴적물은 물리화학적으로 안정화되어 있는 것으로 생각된다.

4.2 준설토 투기장 퇴적물의 중금속

4.2.1 표층 퇴적물의 오염도 평가

준설토 투기장 해역에는 준설토가 침강 퇴적되어 갯벌을 형성하고 있으며 준설완료 후 10년이 경과된 지금 외형적으로 안정된 조건대를 이루고 있다. 오염준설토의 투기로 형성된 가포지역 퇴

Table 4. Heavy metals concentration in seawater for the one tidal cycle in dumping area.

Time	Element				
	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni
10:00*	1.65	0.04	0.20	1.48	0.72
11:00	1.80	0.19	0.33	1.73	0.73
12:00	2.38	0.12	0.09	1.96	0.64
13:00	1.84	0.17	0.39	1.88	0.81
14:00	1.31	0.11	0.16	1.34	0.89
15:00	1.58	0.16	0.43	1.30	0.64
16:00**	1.75	0.11	0.07	1.40	0.82
17:00	1.88	0.18	0.12	1.58	1.03
18:00	2.59	0.17	ND	1.74	1.27
19:00	1.15	0.13	0.06	1.08	1.35
20:00	2.37	0.21	0.38	1.72	0.91
21:00*	1.59	0.24	0.14	1.75	0.57
Standard	100	10	100	20	-

ND: Not detected

*High tide, **Low tide

적물의 중금속 오염도를 평가하기 위해서 조사한 퇴적층별 중금속 측정결과는 Table 5와 같다.

가. Sediment Quality Criteria(SQC)에 의한 오염도 평가

미국 EPA에서는 퇴적물에 함유된 화학성분들의 농도에 따라 퇴적물의 오염도를 Non polluted, Moderately polluted 그리고 Heavily polluted로 구분하고 있다. 이와 같은 미국 EPA의 오염도 구분기준을 인용하여 가포해역 표층(0~10 cm) 퇴적물 중금속 오염도를 평가하여 Table 6에 비교하여 나타내었다.

퇴적층의 평균 중금속 농도는 Zn 175.12, Cu 46.25 그리고 Cr 32.1 mg/kg으로 Moderately polluted 수준으로 평가되었다. 그러나 Pb, Cd, Ni의 경우 Non polluted level로써 중금속 원소에 따라 차이를 나타내었다.

나. Adverse Biological Effects 기준에 의한 생물영향 평가

퇴적물에 함유된 중금속이 생물에게 미치는 영향 정도에 따라 Effect range-low(ERL)와 Effect range-median(ERM)으로 구분하여 제시하고 있다(Long et al.[1995], NOAA[1991]). 이 가이드 라인을 준설토 투기지역 표층 퇴적물(0~10 cm)의 평균 중금속 함량(Table 5)에 적용하여 평가한 결과 투기지역 퇴적물의 경우 Cu와 Zn이 ERL~ERM 수준이었다(Table 7). 즉 Cu와 Zn의 오염 수준은 퇴적물에 함유된 이들 원소에 의하여 해양 생물들이 29.1~47%의 생물영향을 받을 수 있음을 의미한다. 그러나 Cd, Cr, Pb, Ni 등의 중금속은 ERL 이하의 오염수준으로 1.9~8.0% 이하의 생물영향을 나타내는 것으로 평가되었다.

4.2.2 퇴적층별 중금속 농도 분포

준설토 투기로 형성된 가포지역 퇴적물의 깊이별 중금속 함량

Table 5. Depth profile of heavy metals in Sediment of Gapo-tidal flat.

(mg/kg dry wt.)									
Depth (cm)	Station	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Cr	Mn	Fe(%)
0-10	1	177.14	0.78	42.51	47.65	21.93	30.94	507.88	3.79
	2	173.11	1.16	34.85	44.85	14.24	33.26	515.46	3.74
	Avg.	175.12	0.97	38.68	46.25	18.09	32.10	511.67	3.77
10-20	1	159.01	-	42.30	45.84	17.10	27.65	522.04	3.96
	2	153.48	-	28.68	45.04	23.32	33.04	519.35	3.68
	Avg.	156.24	-	35.49	45.44	20.21	30.35	520.70	3.82
20-30	1	156.90	-	37.81	45.32	25.47	28.89	529.84	3.88
	2	155.01	0.25	29.06	42.87	22.87	31.76	542.48	3.66
	Avg.	155.95	0.25	33.43	44.10	24.17	30.32	536.16	3.77
30-40	1	141.72	0.87	42.14	35.22	16.63	27.98	541.11	3.86
	2	147.74	0.58	39.05	36.55	25.40	36.54	546.22	3.92
	Avg.	144.73	0.73	40.60	35.89	21.01	32.26	543.66	3.89
40-50	1	111.75	0.92	28.29	27.04	19.64	32.16	627.61	3.95
	2	107.83	0.91	22.37	24.71	20.17	36.30	609.29	3.80
	Avg.	109.79	0.92	25.33	25.87	19.91	34.23	618.45	3.87
50-60	1	113.53	1.37	32.97	26.93	24.93	30.09	595.97	4.05
	2	102.77	1.32	25.35	25.39	28.17	32.98	602.08	3.78
	Avg.	108.15	1.35	29.16	26.16	26.55	31.53	599.02	3.92
60-70	1	418.89	4.54	45.71	90.22	43.12	63.22	401.23	3.90
	2	404.05	4.49	42.38	84.78	36.10	64.69	398.00	3.56
	Avg.	411.47	4.51	44.05	87.50	39.61	63.95	399.62	3.73

Table 6. Classification of surface sediments obtained from the Gapo-tidal areas by sediment quality criteria

Metal	Polluted level			Gapo area
	N.P.	M.P.	H.P.	
Zn	<90	90-200	>200	175.12
Pb	<40	40-60	>60	38.68
Cd	-	-	>6	0.97
Ni	<20	20-50	>50	18.09
Cu	<25	25-50	>50	46.25
Cr	<25	25-75	>75	32.10

N.P. Non polluted, M.P. Moderately polluted
H.P. Heavily polluted

Table 7. Toxicological effects of surface sediments by guideline values for the incidence of biological adverse effects.

	Guidelines (mg/Kg)		Incidence of effects(%)			Gapo area
	ERL	ERM	<ERL	ERL~ERM	>ERM	
Cd	1.2	9.6	6.6	36.6	65.7	0.97
Cr	81.0	370.0	2.9	21.1	95.0	32.10
Cu	34.0	270.0	9.4	29.1	83.7	46.25
Pb	46.7	218.0	8.0	35.8	90.2	38.68
Ni	20.9	51.6	1.9	16.7	16.9	18.09
Zn	150	410	6.1	47.0	69.8	175.12

ERL: Effect range low, ERM: Effect range median

변화를 Fig. 2에 나타내었다. 조사된 2개 지역 퇴적층 0~60 cm 깊이에서는 측정된 원소별로 약간의 차이는 있으나 특별한 경향을 보이지 않고 있다. 그러나 60 cm 이하의 깊이에서는 Mn과 Fe를

제외한 Zn, Pb, Ni, Cu, Cr 그리고 Cd의 농도가 상당히 높음을 알 수 있다. 이와 같은 경향을 보이는 이유는 오염도가 가장 높은 삼호천과 창원시 봉암천 하구 지역을 1990년에 가장먼저 준설했으며 그 이후 상대적으로 오염도가 낮은 지역을 준설했었다. 투기장에 이송된 고수분의 퇴적물은 응집체 처리를 병행하여 미세입자의 부유확산을 최대한 억제하였다. 따라서 투기지역 하층부에는 오염물질의 농도가 높은 준설토 초기의 준설토가 집중적으로 퇴적되었으며, 상층부에는 준설후기의 비교적 오염도가 낮은 준설토가 투기되었기 때문이다.

4.3 준설토 투기지역 생체시료의 중금속

오염 준설토 투기로 형성된 갯벌에서 채취된 바지락과 어획된 숭어는 마산시 일대에서 판매되고 있다. 그래서 오염도가 높은 대량의 준설토가 투기된 가포 지역 퇴적물의 중금속 농도 분포와 이 지역에 서식하고 있는 생물체의 중금속 함량 분석 및 오염도 평가는 매우 중요하다. 준설토 투기지역에서 채집된 생체 시료의 중금속 분석 결과는 Table 8과 같다.

중금속 분석결과를 보면 굴에서 Zn이 평균 238.96 µg/g wet wt. 로 높게 검출되었으며 Cu는 5.29 µg/g wet wt. 이었다. 굴에는 일반적으로 Zn 함량이 아주 높고 세포 내에 과립상으로 Zn을 저장하며 무독화 기작 또한 잘 발달되어 있다(Phillips and Rainbow [1993]). 바지락의 경우 Zn 17.71, Cu 1.00, Pb 0.20 µg/g wet wt. 등이었다.

그러나 호안을 경계로 한 투기장 내부 지역과 외부 지역에서 채취된 진주담치의 중금속 함량을 비교하여 보면 내부 지역에서 Zn

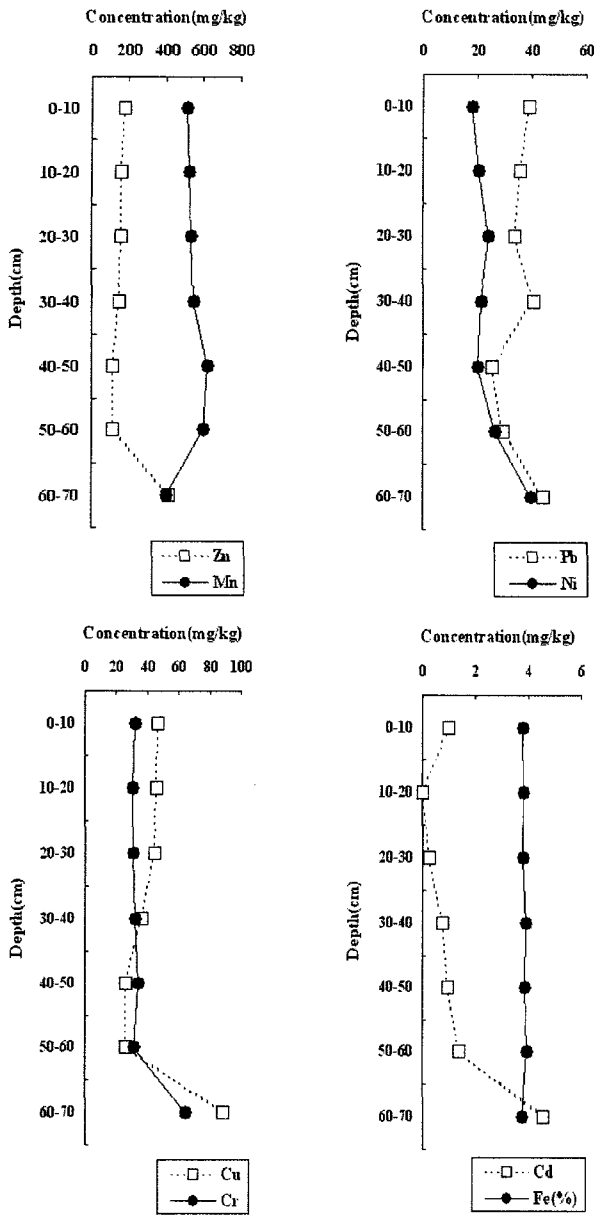


Fig. 2. Depth profile of heavy metals in Gapo-tidal flat.

187.98, Pb 0.28, Cr 0.15, Mn 4.23, Sr 1.45 그리고 Fe 100.33 $\mu\text{g/g}$ 이 검출되어 외부 호안에서 채취된 시료에서보다 높은 경향을 나타내었으나 국립수산물품질검사원의 정밀검사기준(패류)인 Pb 2.0 및 Cd 2.0 $\mu\text{g/g}$ 보다는 낮다(국립수산물품질검사원[2001]).

본 조사에서 측정된 결과를 과거에 측정된 가포 지역의 조사 결과(이와 권[1995])와 우리나라 연안 조사결과(한국해양연구소[1990]) 그리고 미국의 서해안(NOAA[1987]) 및 일본 연안 지역 조사결과(田中[1974]) 등과 비교하여 Table 8에 나타내었다.

진주담치의 경우 미국 서해안 지역이 Zn, Pb, Cd, Cu의 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 그러나 본 조사 결과인 투기장 내의 측정 결과를 한국 연안 평균 함량 결과와 비교하였을 때 Zn을 제외하고는 투기장 내에 서식하는 진주담치의 중금속 함량이 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

특히 투기장내 바지락과 진주담치의 중금속 함량 측정결과를 1995년에 보고된 본 연구와 동일지역의 중금속 조사결과(이와 권 [1995])와 비교하였을 때 측정된 대부분의 중금속 함량이 낮게 나타났다.

5. 결 론

마산시 가포해역에 마산만 정화사업 실시로 준설된 오염퇴적물 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 가 투기처리 되었다. 준설토에 함유된 오염물질의 최고 농도는 유기물질로서 COD 55,128 그리고 중금속으로 Zn 2,610, Pb 109, Cu 336 그리고 Hg 1.19 mg/kg dry wt. 이었다. 고농도로 오염된 준설토가 대량으로 투기된 이후 10년이 경과 된 현재 가포해역의 중금속 오염상황을 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 준설토가 투기된 가포해역의 한 조석주기 동안 해수의 중금속 농도는 Zn 1.15~2.59, Cu 1.08~1.96, Pb ND~0.42, 그리고 Ni 0.57~1.35 $\mu\text{g/l}$ 로 진해만의 평균농도인 Zn 0.80, Cu 1.02, Pb 0.01, Ni 0.70 $\mu\text{g/l}$ 와 비교할 때 조사해역이 다소 높은 농도이었다.
- 2) 가포지역 퇴적물 표층의 중금속 오염 수준을 미국 EPA 기준으로 평가한 결과 Zn, Cu 그리고 Cr은 Moderately polluted 수준으로 평가되었다. 그러나 Pb, Cd, Ni의 경우 Non polluted level로

Table 8. Heavy metals concentration in biomass obtained from Gapo dumping area.

Site	Sample	Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Cr	Mn	Sr	Fe
Inside* area	mantis shrimp	29.68	0.09	0.15	0.17	11.63	0.02	0.95	2.33	12.97
	crab	35.73	0.08	0.05	0.28	9.90	0.05	8.50	11.88	76.42
	oyster	238.97	0.30	0.19	0.16	5.29	0.07	5.83	1.30	72.01
	baby clam	17.71	0.20	0.05	1.07	1.00	0.10	2.32	1.30	79.90
	geoduck calm	12.51	0.14	0.02	0.14	2.80	0.10	2.62	1.79	76.84
	blue mussel	187.98	0.28	0.14	0.27	0.96	0.15	4.23	1.45	100.33
Outside* area	blue mussel	20.04	0.07	0.20	0.22	1.02	0.09	2.58	0.95	32.47
Standard(shellfish)**		-	2.0	2.0	-	-	-	-	-	-

*Gapo dumping site

**National fisheries products quality inspection service, Korea

써 중금속 원소에 따라 차이를 나타내었다.

3) 해양생태계의 영향을 Adverse Biological Effects 기준으로 평가하였을 때 Cu와 Zn은 ERL ~ ERM 수준으로 29.1~47%의 생태위해도를 나타내었으며, Cd, Cr, Pb 그리고 Ni은 ERL 수준으로 위해도가 1.9~8.0% 이었다.

4) 퇴적층별 중금속 함량은 상층부보다 하층부에서 중금속 농도가 높게 나타났다. 이러한 오염도 분포 경향은 준설사업이 오염도가 높은 내만에서부터 외만 방향으로 진행되었기 때문에 상대적으로 오염도가 낮은 준설도가 투기지역 상층부에 투기되었기 때문으로 판단되었다.

5) 가포지역에서 채집된 생물시료인 굴에서 Zn 238.96, Cu 5.29 µg/g wet wt., 바지락 Zn 17.71, Cu 1.00 µg/g wet wt., 진주담치 Zn 187.98, Pb 0.28, Cr 0.15, Mn 4.23, Sr 1.45 그리고 Fe 100.33 µg/g wet wt.가 검출되어 투기장 외부 호안에서 채취된 시료와 비교하였을 때 다소 높은 경향을 나타내었다. 그러나 이와 같은 패류의 중금속 측정결과는 국립수산물품질검사원의 정밀검사기준(패류)과 비교하였을 때 기준치 이하에 해당하였다.

후 기

본 연구는 2003학년도 경남대학교 학술논문 게재 연구비 지원으로 이루어졌음.

참고문헌

[1] 국립수산물품질검사원, 2001, 수산물·수산가공품검사기준및이식용수산물검역기준, 국립수산물품질검사원 고시 제2001-15호.
 [2] 마산시, 1988, 마산만 정화사업 기본 및 실시설계보고서(기본설계편), 1-36.

[3] 마산시, 1989, 마산만 정화사업 기본 및 실시설계보고서(부록), 1-392.
 [4] 여수대학교 수산과학연구소, 2003, 진해국가산업단지 주변지역 해양실태 조사, 154-184.
 [5] 이찬원, 권영택, 1995, 퇴적오니준설과 해양환경변화, 아카데미 예원, 1-264.
 [6] 한국해양연구소, 1990, 연안환경보전기술 개발 연구, 7-91.
 [7] 해양수산부, 2002, 해양환경공정시험방법, 해양수산부 고시 제 2002-84호, 1-330.
 [8] Giesy, J. P., and R. A. Hoke, 1990, ed Baudo, R., Giesy, J. P., and M. Muntao. Freshwater sediment quality criteria: toxicity bioassessment in sediment: Chemistry and toxicity of in-place pollutants, Ann Arbor, MI: lewis publishers, 391.
 [9] Long, E. R., Macdonald, D. D., Smith, S. L., and F. D. Calder, 1995, "Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentration in marine and estuarine sediments", Environmental Management Vol. 19, 81-97.
 [10] NOAA, 1991, Technical Memorandum NOS OMA 52, The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the national status and trends program(edited by Long, E. R., and Morgan, L.G.), 8-60.
 [11] NOAA Report, 1987, National status and trends program for marine environmental quality, NOAA Technical Memorandum NOS OMA 38, USA.
 [12] Phillips, D. T. H., and P. S. Rainbow, 1993, Biomonitoring of trace Aquatic Contaminants. Chapman & Hall Publ. London, 371.
 [13] 田中之雄 등, 1974, 食品中-重金屬-含有量--, 食品衛生學會誌, Vol. 15, 39.

2004년 2월 19일 원고접수

2004년 3월 1일 수정본 채택