

하수종말 처리장 처리수의 해양 방류와 퇴적물의 중금속 오염

권영택⁽¹⁾, 이찬원⁽¹⁾

Heavy metals contamination in coastal sediments by the large discharge from wastewater treatment plant

by

Young Tack Kwon⁽¹⁾ and Chan Won Lee⁽¹⁾

요약

마산시 하수 종말처리장의 연간 방류량은 $63 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이며 처리수의 해양방류로 인하여 방류위치에 부하되는 중금속의량은 연간 Zn 8,645 Kg, Ni 3,291 Kg, Cu 1,636 Kg 그리고 Pb 1,250 Kg으로 방류지점 표층 퇴적물의 중금속 오염이 급속히 진행되고 있다. 특히 Zn과 Cu는 동일 위치의 비오염층과 비교할 때 3배 정도 오염되었다. 다양한 오염도 평가방법으로 방류지역 퇴적물을 평가한 결과 USEPA의 퇴적물 오염도 기준과 비교하였을 때 "극심한 오염 수준"이었으며, 다종의 중금속 측정결과에 의한 종합적인 오염도 판단 결과는 "상당한 오염수준"으로 오염이 증가되었다. 이와같이 오염이 증가된 방류해역 표층 퇴적물의 중금속 함량을 생태위해성 기준을 적용하여 평가하였을 때 16~47%의 생육저해를 유발할 수 있는 오염수준으로 평가되었다.

Abstract

Heavy metals concentration in superficial sediment of effluent discharging area was rapidly increased by annual loadings of Zn(8,465 Kg), Ni(3,291 Kg), Cu(1,636 Kg) and Pb(1,250 Kg) from sewage effluent of $63 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$. In a consequent result, specially the concentrations of Zn and Cu in the sediment were three times higher than preindustrial reference values. The evaluation by multiple ecological risk indices showed that heavy metals contamination in sediment of discharging area was "heavily polluted level" by sediment quality criteria and increased 2.6 times by the degree of contamination. It was also judged that toxicological effects of sediment receiving the primary effluent would occasionally (16~47%) occur by guidelines for adverse biological effect.

Keywords : 해양방류, 퇴적물 오염, 중금속, Heavy Metals Contamination, Discharging Area, Contamination evaluation

(1) 경남대학교 환경보호학과

1. 서론

마산시와 창원시의 도시하수 및 공장폐수의 종말처리장이 1993년 11월부터 가동되었다. 이 처리장은 일일평균 20만톤의 하수(마산시[1997])를 일차 침전 처리후 파이프 라인을 통하여 마산만 입구 해역에 수중 방류하고 있다. 우리나라에서는 최초로 처리수의 해양 방류가 실시되고 있으며 이 해역에는 현재 패류 양식장이 산재하고 있다.

본 연구는 도시하수의 1차 처리수가 방류관을 통하여 폐쇄성이 강한 해역에 육지로부터 550~780m 이격된 수심 13m 해저로부터 방류(건설부, 부산지방국토관리청[1993]) 되었을 때, 방류지점 및 그 주변 해역환경 오염에 미치는 영향을 파악하기 위하여 하수처리장 유입수 및 유출수의 중금속 농도, 오염 부하량 산정, 방류해역 해수의 중금속 농도 변화를 조사하였다. 그리고 방류수가 퇴적물의 중금속 오염도 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 방류지점을 중심으로 공간적인 오염도를 비교하였다. 동시에 방류에 따른 경년적인 오염도 변화를 파악하기 위해서 퇴적층별 오염도를 조사하였으며 그 결과를 통하여 조사지역 퇴적물의 수직적인 오염진행 추이를 비교 분석하였다. 또한 방류해역 표층 퇴적물의 중금속 오염도를 Sediment Quality Criteria(SQC)(Giesy and Hoke[1990])와 비교 평가 하였으며, 그리고 동일지점의 비오염층 중금속 함량을 Background level로 하여 오염농도계수(Sediment Contamination Factor, C_f) 산정과 조사된 여러종류의 중금속에 의한 총합적인 오염도 지수(Degree of Contamination, C_d)(Hakanson[1980], Premazzi *et al.*[1984])를 구했다. 그리고 생태위해도 지표(Biological Adverse Effect Level)(Long *et al.*[1995], NOAA[1991])를 이용하여 저서생물들의 생육에 직접적으로 영향을 미치는 표층 퇴적물의 생태 위해성을 방류해역과 인접해역으로 구분하여 비교평가 하였다. 해양수질과 퇴적물의 중금속 오염이 심각한 해역으로 알려진 마산만(홍기훈 등[1989], 이와 권[1995])에 대규모의 오염물질 유입부하 위치 변화에 따른 본 연구의 결과가 향후 처리수의 해양방류를 전제한 하수종말처리장 건설 계획시 참고자료가 되었으면 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료 채취 및 중금속 분석방법

마산시 덕동하수처리장의 유입수와 유출수를 1994년 1월에서부터 1996년 12월까지 채취 분석하였다. 해수 측정은 하수종말처리시설 계획단계인 1992년부터 격월 내지 계절별로 채취 분석하였다. 퇴적물은 1996년 5월에 Fig. 1에 표시한 4개 지점(A, B, C, D)에서 Core sampler로 채취된 원주상의 시료를 층별로 절취하여 퇴적층별 중금속 함량과 유기물 함량지표로 강열감량(Ignition loss, I.L.)을 측정 하였다. 그리고 처리수 방류전인 1993년 1월부터 1997년 4월까지 방류해역의 표층 퇴적물을 비정기적으로 채취 분석된 결과를 참고하였다. 퇴적물의 분석은 일본 환경청의 “저질분석방법”(일본환경청[1988])을 원칙으로 하여 우리나라의 퇴적물 오염공정시험법으로 제안된 방법(권영택[1997], 권영택 등[1997])에 따라 전처리 후 원자흡광분석(Shimadzu AA-680)하였다. 그리고 수은의 측정은 장광로 석영 흡수셀을 장착시킨 Mercury vaporizer unit(Shimadzu MVU-1A)를 사용하여 환원기화법으로 측정하였다.

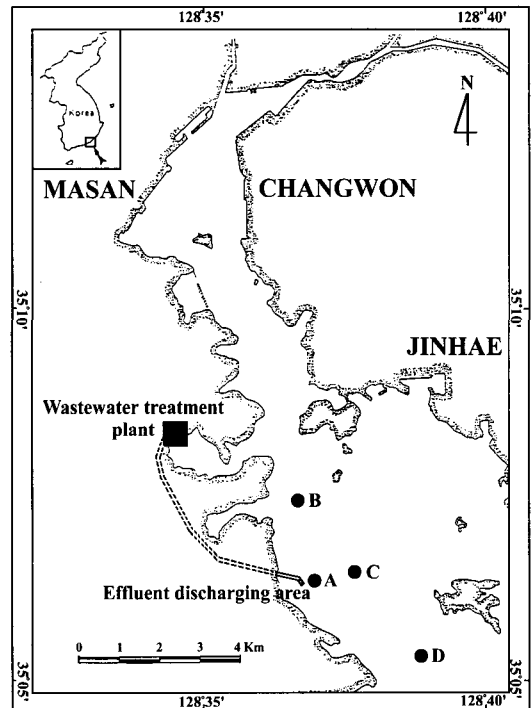


Fig. 1 Map of sampling sites and discharging area of wastewater treatment plant of Masan city.

2.2 퇴적물의 중금속 오염도 평가방법

2.2.1 Sediment Quality Criteria(SQC)에 의한 오염도 평가

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

2.2.2 Sediment Contamination Factor(C_f)와 Degree of Contamination(C_d)의 산정에 의한 평가

Hakanson[1980]과 Premazzi *et al.*[1984]의 방법에 따라 조사지점의 15~20Cm 깊이층을 Background level로 하였으며, 이 측정값과 최근 형성된 표층(0~2Cm) 퇴적물의 측정값을 비교하여 각각 원소의 C_f 값 및 측정된 원소들의 총합적인 오염도 즉 C_d 값을 구하고 그 결과에 의해 방류지점 퇴적물의 오염도를 평가 하였다.

2.2.3 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.

3. 결과 및 고찰

3.1 하수 및 방류해역 해수의 중금속 농도

마산시 덕동 하수처리장 유입수와 유출수의 중금속 평균 농도를 Table 1에 나타내었다. 1994년에서 1996년까지 측정된 결과를 보면 하수처리장 유입수의 Zn 농도는 170.55, Pb 20.61, Cu 30.78 $\mu\text{g/L}$ 등이었으며, 1차 침전 처리후 방류되는 유출수의 농도는 Zn 133.97, Pb 19.76 그리고 Cu 25.87 $\mu\text{g/L}$ 등으로 유입수 농도와 비교하였을 때 약간의 감소를 나타내었으나 Cd와 Ni의 경우는 특별한 처리효과를 인정할 수 없었다. 이와 같이 낮은 하수 처리효과는 마산시의 하수처리장이 1

차 침전처리 시설이기 때문이며, 현재 50만톤/일의 2차 처리시설을 추진중에 있다(마산시[1996]).

Table 1. Heavy metals concentration in influent and effluent of wastewater treatment plant from 1994 to 1996

Sample	Metal($\mu\text{g/L}$)					
	Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Cr
Influent	170.6	20.6	1.2	51.0	30.8	12.4
Effluent	134.0	19.8	1.3	52.1	25.9	10.8

Table 2에 처리수가 방류되기 전인 1992년에서부터 1996년까지 5년간의 방류해역 해수 중금속 평균 농도를 나타내었다. 방류해역의 해수 중금속 농도의 경년적 변화를 보면 마산시 하수처리장이 본격적으로 가동된 1994년 이후 뚜렷한 농도 차이를 나타내지 않고 있다. 그 이유는 조류에 의한 이동과 확산등으로 방류위치 해수 자체의 중금속 농도 변화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

Table 2. The trend of heavy metals content in seawater at the discharging area from 1992 to 1996

Metal	Year					Avg.
	'92	'93	'94	'95	'96	
Zinc	8.5	5.3	3.4	5.9	8.2	6.3
Lead	0.5	0.5	0.6	0.6	0.4	0.5
Cadmium	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Nickel	1.6	0.3	0.6	0.5	1.2	0.8
Copper	0.9	1.1	0.7	1.8	1.3	1.2
Chromium	0.2	0.6	0.3	0.2	0.3	0.3

3.2 하수처리장 유출수에 의한 중금속 부하

마산시와 창원시의 생활하수 및 단위 배출시설별로 처리된 산업폐수를 최종적으로 유입 처리하고 있는 마산시 하수처리장의 연평균 처리량은 63×10^6 톤/년(Table 3)이었으며(마산시[1997]), 1994년에서 1996년까지 측정된 방류수의 평균 중금속 농도는 Zn 134.0, Ni 52.1, Cu 25.9 그리고 Pb 19.8 $\mu\text{g/L}$ 등이었다(Table 1). 따라서 처리수의 방류에 따른 방류해역 중금속 부하량은 Zn 8,465, Ni 3,291, Cu 1,636 그리고 Pb 1,250 Kg/년 등으

로 나타났다.

Table 3 Heavy metals input loadings to the discharging area from wastewater treatment plant

Metal	Effluent (μg/L)	Flowrate (m ³ /yr)	Input loading (Kg/yr)
Zinc	134.0		8,465
Lead	19.8		1,250
Cadmium	1.3	63,172,288	82
Nickel	52.1		3,291
Copper	25.9		1,636
Chromium	10.8		682

3.3 방류해역 퇴적물의 중금속 오염도 변화

3.3.1 퇴적층별 중금속 오염도 변화

하수처리장 방류수에 의한 중금속의 지속적인 부하가 방류해역 및 주변해역 퇴적물의 오염에 미치는 영향을 파악하기 위하여 원추상으로 채취된 퇴적물 시료를 층별로 절취하여 측정 한 결과를 Table 4에 나타내었으며 방류지점(Site A)과 인접해역을 동시에 비교 표시하였다.

방류해역의 표층시료인 0~2 Cm 구분에 Zn, Pb, Cd, Ni, Cu 그리고 Cr이 동일 지점의 15~20Cm 깊이 시료와 비교할 때 상당히 높은 오염도를 나타내었다. 또한 방류위치와 동일 해역이며 마산만 외만 지점인 Site C와 D의 측정결과와 비교하였을 때 현저한 오염도 차이를 나타내었다. 이러한 오염도의 차이는 방류수에 의한 중금속 부하의 영향으로 생각된다. 퇴적층별 중금속 함량 조사 결과는 퇴적층 형성 기간중의 오염도 변화를 추정 할 수 있는 근거자료가 되는 것으로 Fig. 2에 퇴적층별 오염도 변화를 나타내었다. 조사된 여러 원소 중에서 Zn과 Cu의 오염도 변화를 대표적으로 나타내었으며, Zn의 경우 Site A의 표층 퇴적물은 15~20Cm 깊이의 퇴적물과 비교할 때 298.6%의 오염도 증가를 나타내었으며, Cu의 경우 303.5%의 오염도를 나타내어 최근에 형성된 퇴적층에서 뚜렷한 중금속 함량 증가를 알 수 있었다. 깊이별 측정결과 비교에서 2~4 Cm 층에서부터 각종 중금속의 함량이 현저히 증가하고 있는 것은 1993년 후반부에서부터 가동한 처리수의 방류에 의한 영향으로 판단되며, 방류해역에서 측정된 0.51Cm/년의 침강을 측정결과(노장규 [1996])와도 거의 일치하고 있다.

한편 Site C의 표층에서는 Zn 150.3%, Cu 167.7%로 퇴적층별 중금속 함량 변화가 방류 위치

보다 크지 않았다.

Table 4 Depth profiles of heavy metals content in sediments obtained from the discharging area(Site A) and adjacent areas in 1996

Site	Depth (Cm)	Metal (mg/Kg, Dry weight base)					
		Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Cr
A	0-2	305.1	46.8	2.7	34.9	54.9	57.6
	2-4	254.4	43.5	1.1	28.2	47.3	47.7
	4-6	132.2	38.9	0.5	18.9	23.0	33.2
	6-8	123.3	32.5	0.9	23.5	21.3	36.3
	8-10	113.5	27.3	0.6	25.6	20.0	35.4
	10-15	106.4	23.6	0.7	21.3	19.7	35.5
B	15-20	102.2	20.0	-	20.4	18.1	35.0
	0-2	243.9	34.4	1.0	23.3	46.3	47.6
	2-4	164.7	35.8	1.0	22.3	32.5	38.6
	4-6	130.3	35.9	1.0	22.5	26.3	36.1
	6-8	113.2	29.7	1.0	22.8	23.0	32.3
	8-10	113.6	20.1	-	25.8	20.8	30.3
C	10-15	110.5	10.2	0.3	22.5	21.3	36.0
	15-20	100.5	11.0	-	20.0	19.2	31.9
	0-2	148.2	22.9	0.4	24.3	27.4	42.6
	2-4	142.9	22.6	0.8	30.1	27.8	37.3
	4-6	123.4	19.1	0.7	21.6	23.0	36.5
	6-8	132.8	33.1	1.0	26.5	23.9	35.7
D	8-10	103.5	21.2	0.7	16.7	18.2	36.1
	10-15	98.6	21.4	0.4	20.4	16.3	32.7
	0-2	127.0	30.0	-	19.9	24.7	36.7
	2-4	103.4	21.8	0.3	20.2	20.5	29.9
	4-6	107.5	19.5	0.9	27.0	23.1	34.7
	6-8	94.0	20.8	-	22.4	17.8	34.2
D	8-10	121.9	17.7	0.1	23.5	19.0	31.2
	10-15	102.0	11.1	0.6	30.2	17.0	35.8

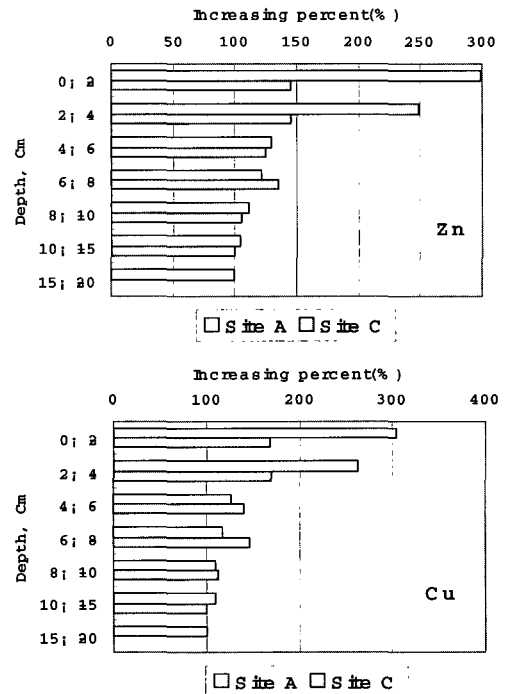


Fig. 2 Depth profiles of zinc and copper increasing percent in sediments obtained from the discharging area(Site A) and adjacent area(Site C).

3.3.2 방류해역과 주변해역의 오염도 비교

하수처리장의 방류수 이외 특별한 오염원이 존재하지 않는 해역에서 처리수의 방류가 방류지점 퇴적물의 중금속 오염에 미치는 영향을 파악하기 위해서 방류지점(Site A)을 중심으로 Fig. 1에 표시된 3개 지점(Site B, C, D)을 선정하여 공간적인 퇴적물의 오염도를 조사하였다.

Table 5에 각 지점 표층(0~2Cm) 퇴적물의 중금속 함량 및 유기물함량 지표로 측정된 강열감량(Ignition loss, I.L.)을 나타내었다. 방류지점(Site A)의 Zn, Pb, Cd, Ni, Cu, Cr, Hg의 농도는 주변 3개 해역의 퇴적물 중금속 함량보다 상당히 높은 농도를 나타내고 있으며, Fig. 3에 나타낸 4개 조사 지점간의 비교에서 볼 때 방류지점 퇴적물의 오염도가 상대적으로 아주 높음을 알 수 있다. 특히 방류지점의 표층 퇴적물 중금속 농도가 Table 4와 Fig. 2의 퇴적층별 조사 결과에서도 나타난 바와같이 최근에 형성된 퇴적 표층에서 주변 해역(Site B, C, D)과 비교할 때 급격한 오염도 증가를 나타내고 있어 방류수의 방류에 의한 퇴적물의 오염 심화현상을 관찰할 수 있었다. 이와같이 방류지점 퇴적물에 집중적으로 중금속 농도가 증가되고 있는 것은 Table 3에 나타낸 각종 중금속들의 연간 부하량 조사결과에서 알 수 있듯이 처리수의 방류로 이 해역에 부하된 중금속의 총부하량이 상당량에 달하고 있으며, 이들 중금속은 물리·화학적 요인에 의하여 방류지점을 중심으로 제한된 지역에 퇴적되었기 때문으로 생각된다. 즉 처리장 방류수에 존재하는 중금속들이 염분 농도 3% 이상의 방류지역 해수와 혼합되었을 때 염소 이온과의 화학적인 반응으로 착물을 형성하게 되고 그 결과 방류지점 퇴적물에 고농도의 중금속이 존재하게 되었다고 생각된다. 착물형성에 의한 육수와 해수간의 중금속 이동현상은 육수와 해수가 혼합되는 하구지역의 수 환경에서 일반적으로 관찰되는 현상이다(de Groot [1995]). 그리고 방류지점 퇴적물의 중금속 농도가 급속히 높아지는 또 하나의 중요한 이유는 방류해역의 해저지형이 거의 평면 상태이지만 이 해역의 평균조석시 최강 창조류 및 최강 낙조류의 흐름이 0.2 knot 정도(마산시[1996])에 불과할 뿐만 아니라 조류의 방향이 마산만 내외 방향으로 반복되고 있기 때문에 방류된 오염물질

의 물리적 이동은 크지 않을 것이다. 따라서 조류의 이동에 의한 오염물질의 확산 효과를 기대한 해양 방류는 방류해역의 해수유동 특성상 확산효과가 미미하여 방류지점을 중심으로 오염물질의 퇴적현상이 계속되고 있는 것으로 생각된다.

Table 5. Comparisons of heavy metals content and ignition loss in the superficial sediment obtained from the discharging area and the other adjacent sites

Site	Metal(mg/Kg)							I.L. (%)
	Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Cr	Hg	
A	305.1	46.8	2.73	34.9	54.9	57.6	0.18	13.37
B	243.9	34.4	0.98	23.3	46.3	47.6	0.15	14.89
C	148.2	22.9	0.42	24.3	27.4	42.6	0.10	11.18
D	127.0	30.0	-	19.0	24.7	36.7	0.08	10.05

I.L. Ignition loss

Fig. 3의 위치별 비교에서 조사지점 B는 표층 퇴적물의 중금속 함량이 방류지점을 제외한 C와 D지점 보다 상대적으로 높다. 그 이유는 B지점이 조사된 다른 지점들과 비교 할 때 Fig. 1에 표시된 바와같이 마산만 내만 지역과 가장 가까운 위치이다. 마산만 내만은 중금속으로 심하게 오염된 지역이며 내만에서 외만으로 갈수록 중금속 오염농도가 순차적으로 낮아지는 특성을 갖고 있으며 이와 같은 오염도 변화 경향은 과거의 연구결과들에서 입증된바 있다(홍기훈 등[1989], 이와 권[1995]). 따라서 B지점에 중금속 함량이 높은 것은 Table 5의 강열감량을 감안하면 방류의 영향 보다는 마산만 내만에서 외만으로 이류·확산된 오염물질의 영향이 크기 때문으로 판단된다.

3.4 방류해역 퇴적물의 오염도 평가

3.4.1 Sediment Quality Criteria(SQC)에 의한 오염도 평가

미국 EPA에서는 퇴적물에 함유된 화학성분들의 농도에 따라 퇴적물의 오염도를 Nonpolluted, Moderately polluted 그리고 Heavily polluted로 구분하고 있다. 우리나라에는 이와같은 퇴적물 오염도 구분 기준이 설정되어 있지 않으므로 미국 EPA의 오염도 구분기준을 인용하여 방류해역 및 인접지역의 표층(0~2Cm) 퇴적물 중금속

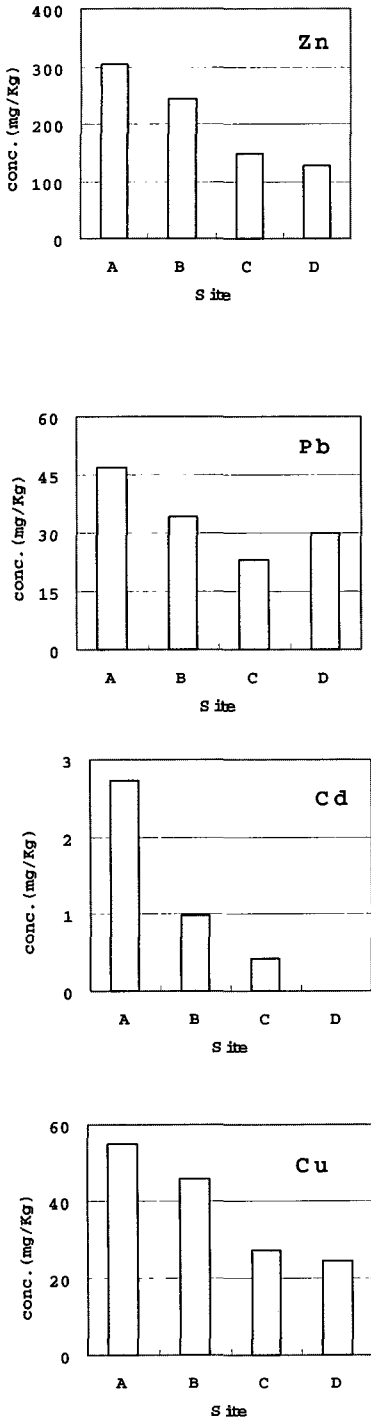


Fig. 3 Comparisons of zinc, lead, cadmium and copper content in superficial sediment from the discharging area(site A) and the other adjacent sites.

오염도를 평가하여 Table 6에 비교하여 나타내었다. 방류해역의 Zn 함량은 305 mg/Kg으로 Heavily polluted 기준인 200 mg/Kg을 훨씬 초과하였으며, Cu 역시 55 mg/Kg으로 Heavily polluted 기준을 상회하는 오염도를 나타내었다 (Fig. 4). 그리고 Pb, Ni, Cr은 Moderately polluted 수준으로 평가되었다. 그러나 방류지역과 인접한 해역인 Site C와 D에서는 Zn, Ni, Cu, Cr이 Moderately polluted 수준이었으며, Pb와 Cd은 비오염 수준을 유지하고 있어 방류해역 퇴적물의 높은 오염 수준과는 대조를 이루고 있다.

Table 6. Classification of superficial sediments obtained from the discharging(Site A) and adjacent areas by sediment quality criteria (mg/Kg)

Metal	Polluted level			Site			
	N.P.	M.P.	H.P.	A	B	C	D
Zn	<90	90-200	>200	305	244	148	127
Pb	<40	40-60	>60	47	34	23	30
Cd	-	-	>6	2.7	1.0	0.4	-
Ni	<20	20-50	>50	35	23	24	19
Cu	<25	25-50	>50	55	46	27	25
Cr	<25	25-75	>75	58	48	43	37

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

3.4.2 Sediment Contamination Factor(C_f)와 De gree of Contamination(C_d)에 의한 오염도 평가

방류해역 퇴적물에 함유된 중금속의 오염도를 평가하기 위해서는 그 지역의 지질학적 특성을 고려하여 천연부존량에 해당하는 Background level을 감안한 함량을 가지고 방류에 의한 오염증가를 평가할 필요가 있다. 그 이유는 방류 위치가 중금속 함량이 높더라도 주변지역의 광물조성에 있어서 특정원소가 풍부할 경우 퇴적물에 고농도로 검출될 가능성이 있으며 이러한 경우 처리수의 방류와는 무관할 수 있기 때문이다.

따라서 본 항목에서는 조사지역의 심층(15~20Cm) 측정 결과를 이용하여 자연 상태의 함량치를 보정하는 방법(Hakanson[1980], Premazzi

et al.[1984])으로 다음과 같이 방류해역 및 인접

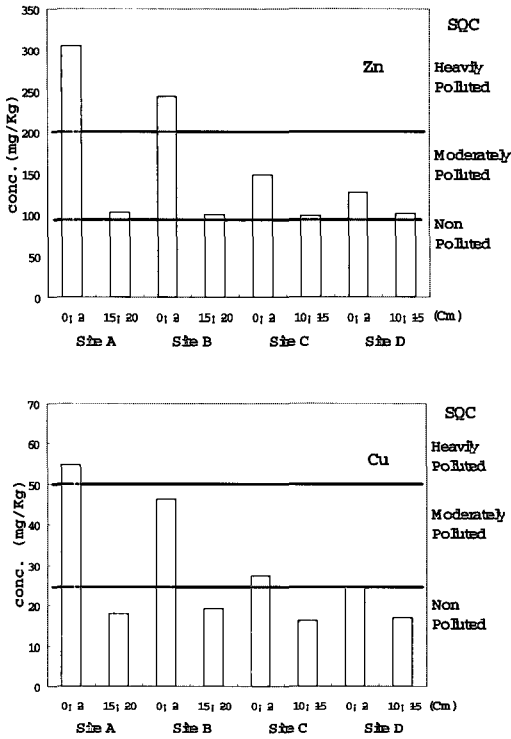


Fig. 4 Evaluation of zinc and copper contamination in superficial sediments obtained from the discharging(Site A) and the other adjacent sites.

해역의 오염도를 평가하였다.

즉, Contamination factor(C_f)의 산정방법은 다음과 같다.

$$C_f^i = \frac{\bar{C}_{o-2}^i}{C_n^i} \quad (1)$$

\bar{C}_{o-2}^i = the mean content of substance
(i = Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, Ni)

C_n^i = the preindustrial reference value
for the substance.

여기에서 얻어진 C_f 값에 따라 특정원소에 의한 오염도 수준을 다음과 같이 판단한다

$C_f < 1 \Rightarrow$ low contamination factor(LCF)

$1 \leq C_f < 3 \Rightarrow$ moderate contamination factor(MCF)

$3 \leq C_f < 6 \Rightarrow$ considerable contamination factor(CCF)

$C_f \geq 6 \Rightarrow$ very high contamination factor(VHCF)

상기와 같이 특정원소에 대한 오염수준 평가 방법에 의거하여 방류해역 및 인접해역 표층 퇴적물의 중금속 오염도를 평가한 결과를 Table 7에 나타내었다.

원소별 상대적인 오염도 평가 결과를 보면 방류해역 퇴적물의 C_f 값이 Zn, Cd, Cu가 각각 2.99, 3.85 그리고 3.04로서 상당한 오염 수준($CCF, 3 \leq C_f < 6$)에 달하고 있다. 그러나 측정지점 C에서는 C_f 값이 1.07~1.68로서 방류해역과 비교할 때 각각의 원소가 상당히 낮은 오염수준으로 평가 되었다.

Table 7. Heavy metals contamination factor(C_f^i) in superficial sediments obtained from the discharging and adjacent areas

Site	C_f^i - value					
	Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Cr
A	2.99	2.34	3.85	1.71	3.04	1.65
B	2.43	3.13	3.50	1.16	2.41	1.49
C	1.50	1.07	1.17	1.19	1.68	1.30
D	1.25	2.70	1.00	1.00	1.45	1.03
Reference	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

그리고 위와 같은 개별적인 특정 원소들의 상대적인 오염도 평가 결과(C_f 값)를 이용하여 측정된 원소들의 총합적인 오염도를 평가하기 위하여 다음과 같이 Degree of Contamination, C_d 값을 산정하였다.

$$C_d = \sum_{i=1}^6 C_f^i = \sum_{i=1}^6 \frac{\bar{C}_{o-2}^i}{C_n^i} \quad (2)$$

$C_d < 6 \Rightarrow$ low degree of contamination(LDC)

$6 \leq C_d < 12 \Rightarrow$ moderate degree of contamination(MDC)

$12 \leq C_d < 24 \Rightarrow$ considerable degree of contamination(CDC)

$C_d \geq 24 \Rightarrow$ very high degree of contamination(VHDC)

이와같은 방법에 의거하여 평가된 총합적인 오염도 결과를 Table 8에 나타내었으며 $C_{11} \sim C_{16}$ 의 순서는 측정된 원소들 중에서 background level과 비교하였을 때 상대적인 오염도 순위를 의미한다. 따라서 방류해역의 원소별 오염도 순위는 Cd, Cu, Zn, Pb, Ni 그리고 Cr 순으로 상대

적인 오염도를 나타내었다. 그러나 인접해역의 평가 결과는 방류해역과 원소별 오염도 순위가 일치하지 않았다. 한편 방류해역의 총합적인 오염도 지수는 15.58로서 background level 지수인 6과 비교할 때 약 2.6배 높았으며 C_d 값에 의한 오염도 판단기준과 비교하였을 때 상당히 높은 오염수준(CDC, $12 \leq C_d < 24$)으로 평가 되었다(Fig. 5). 그러나 동일한 방법으로 오염도를 평가한 인접해역은 C_d 값이 7.91로서 방류후 약 3년이 경과된 현재까지 매우 낮은 오염 수준을 유지하고 있었다.

Table 8. The degree of contamination(C_d) in superficial sediments obtained from the discharging area and adjacent sites

Site	$C_d = \sum_{i=1}^6 C_i$	Sequence of C_i					
		C_{i1}	C_{i2}	C_{i3}	C_{i4}	C_{i5}	C_{i6}
A	15.58	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr
		3.85	3.04	2.99	2.34	1.71	1.65
B	14.12	Cd	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni
		3.50	3.13	2.43	2.41	1.49	1.16
C	7.91	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
		1.68	1.50	1.30	1.19	1.17	1.07
D	8.43	Pb	Cu	Zn	Cr	Cd	Ni
		2.70	1.45	1.25	1.03	1.00	1.00
Reference	6.00						

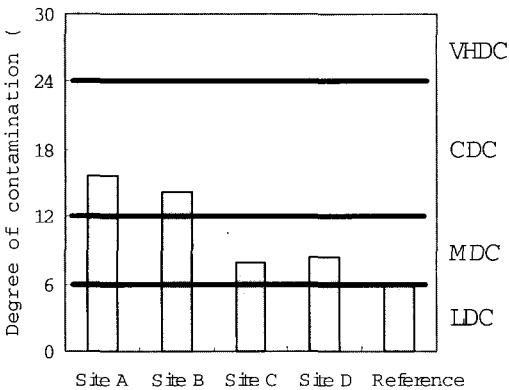


Fig. 5 The level of heavy metal contamination of superficial sediments by the method of degree of contamination(C_d).

3.4.3 Adverse biological effects 기준에 의한 생태위해성 평가

퇴적물에 존재하는 화학성분이 해양과 하구 생태계에 미치는 영향에 관한 연구는 다양한 분야에 걸쳐 아주 많으며(Hakanson[1980], Long *et al.*[1995], NOAA[1991]), 이와 같은 각각의 화학물질 또는 생물의 종류들을 대상으로 수행된 350여편의 연구결과를 바탕으로 퇴적환경에서 화학물질이 생태계에 미치는 영향에 관한 데이터 베이스(Biological effects database for sediments, BEDS)가 구축되었다. 이러한 데이터 베이스의 구축과 연구결과의 종합적인 해석을 통하여 퇴적물에 존재하는 중금속이 생태계에 미치는 가이드 라인을 설정하였으며(Long *et al.*[1995], NOAA [1991]), 퇴적물에 함유된 중금속의 영향 정도에 따라 Effect range-low(ERL)와 Efecct range-median(ERM)으로 구분하여 제시하고 있다(Table 9). 이 가이드 라인을 방류해역 표층 퇴적물 중금속 함량(Table 4)에 적용하여 평가한 결과 방류해역(Site A) 퇴적물의 경우 Cr을 제외한 Cd, Cu, Pb, Ni 그리고 Zn이 ERL~ERM 수준이었다. 이와 같은 오염 수준은 퇴적물에 함유된 중금속에 의하여 해양 생물들이 16~47%의 생육저해를 받게 되는 것을 의미하는 것으로서 처리수의 방류에 의한 퇴적물의 급속한 오염도 상승과 생태위해성 증가에 대한 특별한 주의가 요망되고 있다.

한편 Site C 와 D에서는 Cd, Cr, Cu, Pb, Zn 등이 ERL이하의 수준으로 평가되어 생태위해도가 낮게 나타났다.

Table 9. Toxicological effects of superficial sediments by guideline values for the incidence of biological adverse effects

	Guidelines (mg/Kg)	Incidence of effects(%)				Site			
		ERL		>ERM		A	B	C	D
	ERL	ERM	<ERL	>ERM					
Cd	1.2	9.6	6.6	36.6	65.7	2.7	1.0	0.4	-
Cr	81.0	370.0	2.9	21.1	95.0	57.6	47.6	42.6	36.7
Cu	34.0	270.0	9.4	29.1	83.7	54.9	46.3	27.4	24.7
Pb	46.7	218.0	8.0	35.8	90.2	46.8	34.4	22.9	30.0
Ni	20.9	51.6	1.9	16.7	16.9	34.9	23.3	24.3	19.0
Zn	150	410	6.1	47.0	69.8	305	244	148	127

ERL : Effect range low, ERM : Effect range median

4. 결 론

대규모 하수종말 처리장의 처리수가 반폐쇄성 해역에 수중방류 되었을 때 방류해역 해수 및 퇴적물의 중금속 오염도 변화에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1차 침전 처리방식에 의한 하수처리에서 중금속의 처리효율은 아주 낮았으며, 처리수의 방류에 따른 방류해역 해수의 중금속 농도 증가는 거의 없었다. 그러나 방류해역에 부하되는 중금속의 총량은 Zn 8,465, Ni 3,291, Cu 1,636, Pb 1,250 Kg/년 등이었으며, 이와 같은 부하로 인하여 방류지점 표층 퇴적물의 중금속 농도는 급격히 증가하였으며 Zn과 Cu의 경우 비오염층에 비하여 3배 정도 높아졌다. 이와 같이 오염도 증가율이 급격한 방류해역 표층 퇴적물의 중금속 함량을 퇴적물 오염도 기준(SQC)과 비교할 때 Zn과 Cu는 극심한 오염수준으로 나타났으며, 비오염층과 비교한 상대적인 오염도 판단(C_d 값)결과 오염도가 2.6배 증가된 상당한 오염수준을 나타내었다. 또한 생태위해성 기준에 의한 방류해역 표층퇴적물의 위해도는 16~47%의 생육저해를 유발할 수 있는 오염수준으로 평가되어 처리수의 해양방류에 의한 퇴적물의 오염과 생태위해성 증가에 대한 특별한 주의가 요망되고 있다.

후기

이 논문은 1996년도 경남대학교 특별 학술연구 조성비 지원에 의하여 씌어진 것임.

참고문헌

[1] 건설부, 1993, 부산지방국토관리청, 창원·마산 하수처리장 건설사업 건설지, 96~97
 [2] 권영택, 1997, 연안 퇴적물 분석기술 연구 - 환경부, 과학기술처, 해양오염 방지 및 환경회복 기술, 연안환경 개선기술, G7 제2 단계 2차년도 연차보고서, BSPN 96343-001013-2, 122~141
 [3] 권영택, 이찬원, 안병영, 윤지훈, 1997, 퇴적물 중금속 분석을 위한 공정시험법 제안 및 오염도 평가, 한국분석과학회 학술대회 논

문집(제19회), 35

[4] 노장규, 1995, 마산·진해만 해역 환경 구성인자의 중금속 오염 특성, 경남대학교 석사학위논문, 53
 [5] 마산시, 1996, 마산·창원 하수처리장 2차 확장사업 환경영향평가서, 123~142
 [6] 마산시, 1997, 마산시 덕동하수종말처리장 작업일지(1993년11월 ~ 1997년10월)
 [7] 이찬원, 권영택, 1995, 퇴적오니 준설과 해양환경 변화, 아카데미 예원, 217-223
 [8] 홍기훈, 조성록, 강성현, 정창수, 김종근, 1989, 마산만의 오염현황 - 연안환경 보전기술 개발연구, 한국과학기술원 해양연구소, BSPG 00083-242-4, 134-144
 [9] de Groot, A. J., 1995, Metals and sediments : A global perspective : Metal contaminated aquatic sediments(Edited by Allen, H.E.) Ann arbor Press, 5~6
 [10] Giesy, J. P., and Hoke, R. A., 1990, Fresh water sediment quality criteria : toxicity bioassessment in sediment : chemistry and toxicity of in place pollutants (edited by Baudo, R., Giesy, J. P., and Muntao, M.), Lewis publishers, Ann Arbor, MI, 391
 [11] Hakanson, 1980, An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach, Water Research, Vol. 14, 975~1001
 [12] Long, E. R., Macdonald, D. D., Smith, S. L., and Calder, F. D., 1995, Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments, Environmental Management, Vol. 19, No. 1, 81~97
 [13] 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
 [14] Premazzi, G., Provini, A., Gaggino, G. F., and Parise, G., 1984, Geochemical trends in sediments from 13 Italian subalpine lakes : Sediments and Water Interaction (edited by Peter G. Sly) Springer-verlag,

157~165

- [15] 日本環境廳, 1988, 低質調査方法 とその解説,
日本環境測定分析協會, 1~168