

마산만 오염 준설토사의 생태회복

이찬원 · 전홍표 · 하경애

경남대학교 환경공학과

(2007년 5월 23일 접수; 2007년 12월 11일 채택)

Ecological Recovery of Contaminated Dredged Materials in Masan Bay, Korea

Chan Won Lee, Hong Pyo Jeon and Kyung Ae Ha

Department of Environmental Engineering, Kyungnam University, Gyeongsan 631-701, Korea

(Manuscript received 23 May, 2007; accepted 11 December, 2007)

Abstract

A large amount of $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ of polluted sediment was dredged from the Masan Bay and deposited in Gapo confined area, Masan, Korea. The six representative sediments were obtained and analyzed for issue components. The data was discussed with the species of benthos and their distribution. 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 dredging index (DI) of sediments stabilized for 10 years since dumping the confined site was calculated and compared with the DI values of dredged sediment itself. DI values decreased from 0.67 to 0.07 ~ 0.18, which reflects DI value less than 0.2 is good for benthos in the sediment by the natural recovery of dredged materials. The ecological recovery was confirmed in this confined area as a habitat of benthic organisms.

Key Words : Dredged Materials, Natural Recovery, Heavy Metal, Dredging Index

1. 서론

마산만은 1986년에 이미 해양수질기준 등급 III에도 못미치고 있었다. 특히 만 내 퇴적물 오염은 더욱 심각하여, 퇴적물 상부 저층수는 무산소 상태를 나타내기도 하며 대형 저서군집은 일부 오염에 강한 종들로만 구성되어 있다¹⁾. 이처럼 마산만의 오염이 심화되면서 오염물질의 준설에 대한 필요성이 제기 되어 1988년 12월부터 준설을 위한 기초조사가 이

루어졌다. 이후 1990년 6월부터 1994년 10월까지 5차에 걸쳐 오염물질 준설사업이 시행되었다. 1994년에 완료된 마산만 오염퇴적물 준설 공사시 오염퇴적물($2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$)은 인근 가포지구에 투기되었다. 본 연구에서는 10년전 가포지구에 투기된 오염퇴적물 변화를 이전의 자료들과 비교 검토함으로써 오염준설토 투기 후의 투기지역 환경 변화를 알아보고자 하였다.

마산만 내만의 해외측에 위치하고 있는 가포만의 오염퇴적물 투기지역은 약 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 의 폐쇄된 지역으로서 호안 내부 지역에 갯벌이 형성되어 있으며, 매립지역 둘레로는 석축이 쌓여 있어 인근 바

Corresponding Author: Chan-Won Lee, Department of Environmental Engineering, Kyungnam University, Gyeongsan 631-701, Korea
Phone: +82-55-249-2988
E-mail: water@kyungnam.ac.kr

다로 퇴적물의 유출이 차단되어 있다. 그러나 어선의 출입을 위해 호안 일부(약 40 m)가 개방되어 있어 해수의 유출입이 일어나고 있다. 마산만 준설토가 투기된 지역은 Fig. 1의 실선으로 표시된 직사각형 지역에 집중 투기되었다. 점선 부분은 간조시 바닥이 드러나는 부분이다. 이 지역은 국내에서 유일하게 오염퇴적물이 대량으로 투기된 지역으로서 인공 갯벌의 유기오염 정화능력과 생태 변화를 살펴볼 수 있는 이상적인 환경을 제공하고 있다. 퇴적물

투기이후 10년이 경과하여 어느정도 안정된 저층이 형성되어 있을 것으로 예상된다.

마산만 수질 개선을 위한 준설사업의 직접적인 배경이 된 퇴적물의 오염 물질 농도는 Table 1과 같다. 오염물질의 농도는 준설 지역 $5.2 \times 10^3 \text{ m}^2$ 에서 55개 지점을 선정하여 조사한 범위를 나타낸 것으로 COD 28,920~55,128 및 Zn 149~2,610 mg/kg dry wt.로 Table 2에 나타난 미국의 USEPA 기준과 비교해 볼 때 오염도가 극심함을 알 수 있다²⁾. 이러한 오염 퇴적물이 준설되어 가포만에 투기되었고 이후의 자연정화에 의한 환경 변화를 알아보고자 한다.

준설 공사는 1990년 6월에서 1994년 10월까지 5년간에 걸쳐 총 면적 $5.2 \times 10^3 \text{ m}^2$ 에서 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^2$ 의 오염퇴적물을 제거하였으며, 이를 위해 국비 201억원과 지방비 86억원 총 287억원이 투자되었다. 준설 대상지역 오염퇴적물층의 두께는 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. 투기된 이후 일부 구간의 해수유동만 이루어지면서 약 10년의 기간이 경과하여 자가정화 능력에 의하여 준설토사의 자연정화가 진행되었다. 국외의 사례에서 살펴보면 해당해역의 수리적 특성, 자연정화에 소요되는 시간 및 경제성 등을 고려하여 퇴적물을 현장에서 정화하는 환경친화적 방법을 선택하고 있는 것이 추세이다. 오염된 준설토사를 장기간 자연정화 하게 된 경우는 매우 드물다. 본

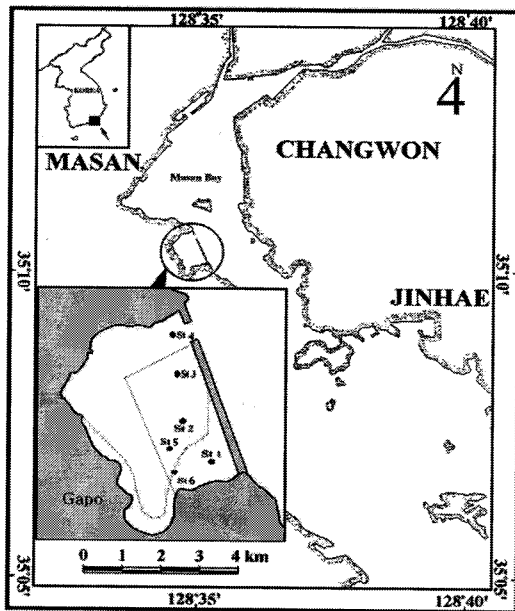


Fig. 1. Study site in the Gapo confined area, sediments dumped from 1990 to 1994.

Table 1. Pollutants concentration in sediment of dredged area, Masan Bay (mg/kg dry wt.)

COD	IL(%)	Zn	Cd	Pb
28,920~55,128	7.21~39.44	149~2,610	0.75~12.20	22.4~109.0
Cu	Ni	Cr	Hg	
45.7~336.0	24.4~141.0	39.7~278.0	0.08~1.19	

(※ IL : Ignition Loss)

Table 2. Sediment Quality Criteria of USEPA

		Zn	Pb	Cd	Mn	Cu	Cr	Hg	IL(%)
S	N-polluted	<90	<40	-	<300	<25	<25	<1.0	<5
Q	M-polluted	90-200	40-60	-	300-500	25-50	25-75	N.A	5-8
C	H-polluted	>200	>60	6	>500	>50	>75	>1.0	>8

연구에서는 준설토사의 자연정화에 의한 생태 위해도 변화를 알아보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사방법 및 시료채취

마산시 가포만의 오염퇴적물 투기지역은 호안 내 부지역에 갯벌이 형성되어 있으며 호안 일부가 개방되어 있어 간조시와 만조시에 해수의 유출입이 일어나는 지역이다. 퇴적물 시료를 채취하기 위해 2004년 10월에 투기지역 중 대표성이 있다고 판단 되는 6지점을 선정하였다.

시료채취를 위해 간조시점을 기다렸다가 선박을 이용하여 이동하면서 지점별 채취를 하였다. 퇴적층을 60 cm 이상 채취한 후 깊이별(0~20, 20~40, 40~60, 60 cm 이상)로 현장에서 절취하여 1지점 당 4개의 시료로 분류 총 24개의 시료를 취하였다. 퇴적물 시료 채취 방법은 Grab Sampling, Dredge Sampling, Core Sampling 등이 있는데 본 실험에서는 Core Sampling 방법으로 하고자 하였다. 그러나 퇴적층의 응집 정도가 낮아 Core Sampler에 의한 채취가 어려워 Ø3 cm의 PVC관을 이용하여 채취하고 관의 위, 아래 부분은 램으로 밀봉하였다. 채취한 시료는 즉시 실험실로 운반 후 깊이별로 분류하여 냉동 보관하였다.

2.2. 분석항목 및 실험방법

본 연구를 위한 분석항목 중 Cd, As, Pb, Cr, Cu, Fe, Zn, Mn, Ni 등은 원자흡광분광광도계(Shimazu, AA, AA-680)를 이용하여 측정하였다. 퇴적물의 중금속 측정을 위한 전처리 방법은 해양환경 공정시험법³⁾에 의거하였다. 냉동 보관된 시료를 -45℃ 이하에서 동결건조시킨 후 시료내 최대한 이물질(조개 껍데기 등)을 제거하였다. 분리시킨 시료는 막자사발을 이용하여 분쇄 후 230 메쉬(0.063 mm) seive를

이용하였다. 그 후 시료를 코니칼 비커에 각각 0.5 g씩 취하고 여기에 HNO₃ 20 ml 과 HCl 10 ml를 첨가하였다. 준비된 시료를 Hot plate상에서 150℃로 분해 후 방냉하였고, 이를 5B 여과지로 여과후 50 mL 메스 플라스크에 정량하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물의 오염변화

3.1.1. 입도

퇴적물내 오염물질은 일반적으로 큰 입자(sand and gravel)에 비하여 작은 입자(silt and clay)에 강하게 흡착되어 있다. 따라서 가포지역에 투기된 입도를 분석해 봄으로써 오염도를 추정하고자 하였다. 입자의 크기는 자갈과 모래, 그리고 뿔로 크게 나눌 수 있다. 이 중 본 연구의 실험대상인 뿔의 입자 크기를 나누는 기준은 Table 3과 같다.

입도분석장치(LS230 & N4PLUS)로 분석한 가포지역 준설토의 입도 분석 결과는 Table 4와 같다. 각 지점별 평균치를 나타내고 있으며 31 µm 이하의 입도까지만 누적 %기준으로 표시하고 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 일반적으로 퇴적층내의

Table 3. Particle size class and particle diameter

	Size class	Particle siz	Φ
SILT	very coarse silt	1/32 mm ↑ (31 µm)	5
	coarse silt	1/64 mm ↑ (16 µm)	6
	medium silt	1/128 mm ↑ (8 µm)	7
	fine silt	1/256 mm ↑ (4 µm)	8
CLAY	very fine silt	1/512 mm ↑ (2 µm)	9
	clay	1/512 mm ↓ (2 µm)	≤ 9

Table 4. Results in analyzing grain size

[Unit : %]

Station	2 µm	4 µm	8 µm	16 µm	31 µm
1	9.8	16.3	24.6	37.0	52.2
2	13.4	22.2	33.4	50.0	68.8
3	10.8	17.9	26.7	38.6	53.6
4	15.7	25.8	38.8	58.2	79.7
5	14.2	23.7	35.9	52.8	70.5
6	13.3	22.2	33.0	47.4	63.6

중금속 함량은 주로 평균입도에 의해 좌우된다. 즉 자연상태의 퇴적물은 입자가 조립해 질수록 중금속 함량이 감소하는 경향이 존재한다. 결국 자연상태의 퇴적물에서는 평균입도로 중금속 함량을 보정한 경우 상호간에 직선적인 관계를 보이지만, 인위적으로 오염된 퇴적물의 경우는 이러한 직선적인 관계를 벗어나게 된다⁴⁾. 이를 고려하여 본 연구에서의 입도와 중금속 농도와의 상관성을 비교해 보면 2번 지점과 5번, 6번 지점의 입도가 비교적 세립질로 구성되어 있고 항목에 상관없이 전체적인 중금속 농도 또한 2번 지점과 5번, 6번 지점에서 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 곧 퇴적층 내 중금속 함량은 입도와 상관 관계를 가지고 있음을 잘 보여준다. 4번 지점의 경우는 지형적 특성상 유실에 따른 경향성 파악이 어렵다.

지점별 입도 및 중금속과의 상관성을 Fig. 2에 나타내 보았다.

3.1.2. 퇴적물내 중금속 농도

가포만에서 채취된 저질의 중금속 함량은 Table 5에 나타내었다. 깊이에 관계없이 각 지점별 평균치로 나타내었으며, 원소의 함량 분포를 살펴보면 우선 Zn의 경우 2번 지점에서 173.35 mg/kg로 가장 높았으며, 1번 지점이 130.66 mg/kg로 가장 낮았다. Cr의 경우 6번 지점에서 53.51 mg/kg로 가장 높은 값을 나타내었으며, 3번 지점에서 34.98 mg/kg로 가장

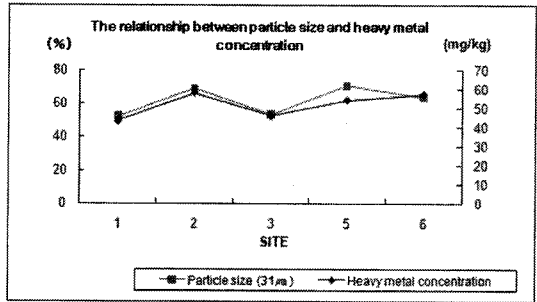


Fig. 2. The relationship between particle size and heavy metal concentration.

낮은 값을 나타내었다. 이 외에 여러 분석항목들의 측정값들에서 대체적으로 4번 지점이 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 4번 지점이 지형적 특성상 외만으로의 이동이 자유롭기 때문에 퇴적층의 유동에 따른 것으로 추정된다.

측정값들을 비교 분석하기 위해 마산만 준설전 퇴적물(준설대상지역)내 중금속 농도(1988년)와 이 퇴적물이 가포만에 준설투기 된 후 퇴적물 내의 중금속 농도(2003년)를 분석한 자료를 인용, 본 연구의 실험 결과와 구분하여 Table 6에 나타내었다. 각 분석 측정값은 지점 및 깊이를 항목별로 평균하여 나타내었다.

2003년(1번, 2번 지점)과 2004년(3번, 5번 지점) 자료는 가포만 투기 지역의 일치되는 두 지점을 깊

Table 5. Concentration of heavy metals in sediment of Gapo confined area by site and depth (mg/kg dry wt.)

Station	Cu	Ni	Cr	Zn	Cd	Pb	Mn
1	33.01	21.71	38.57	130.66	0.46	34.57	476.91
2	47.78	25.30	48.90	173.35	0.67	50.67	414.46
3	31.46	18.11	34.98	150.05	0.64	39.10	450.95
4	43.70	22.85	40.09	146.03	0.54	46.80	457.13
5	49.73	22.11	46.18	158.60	0.64	47.06	431.32
6	47.36	27.42	53.51	161.73	1.02	52.88	503.81

Table 6. Heavy metals concentration in the dredged sediments (1988) and recovered sediments (2003, 2004) (mg/kg)

Year	Element						Average	
	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Cr		
1988	1203.0	83.4	51.5	4.01	56.9	80.0		
2003	180.2	44.5	35.3	1.5	24.2	36.4		
2004	154.33	40.59	4.08	0.64	20.11	40.58		
Ratio	2003/1988	0.15	0.53	0.68	0.36	0.43	0.45	0.44
	2004/1988	0.13	0.49	0.84	0.16	0.35	0.51	0.41
	2004/2003	0.86	0.91	22	0.44	0.83	1.12	0.90

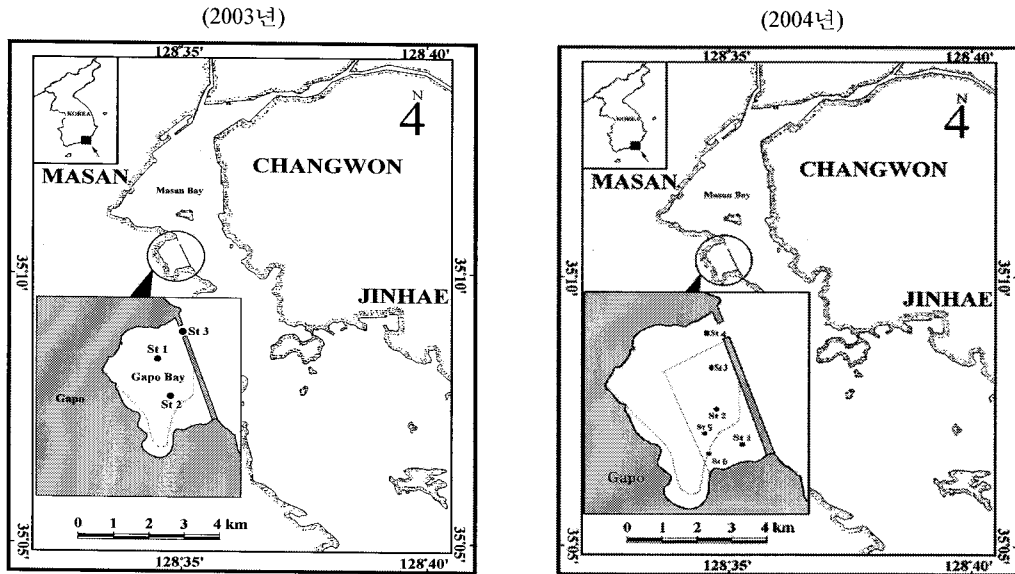


Fig. 3. Sampling site maps in 2003²⁾ and 2004 (this study).

이별로 구분하지 않고 평균을 내어 나타내었다.

4.2. 준설지수(Dredging Index, DI) 와 저서생물 개체 분포에 의한 환경 변화 분석

4.2.1 준설지수(Dredging Index, DI) 및 Quadrodiagram을 이용한 분석

본 연구를 통해 나온 결과들을 토대로 준설토 투기 지역의 오염도를 판단하는 한 가지 방법으로 이 등⁵⁾이 개발한 준설지수(DI)를 이용해 보았다. 연안 퇴적물의 오염도 개선을 위해 수행되는 준설의 시행 여부 판단을 위해서는 합리적인 준설지수(DI) 설정이 필수적이다. 현재 국내에는 법제화된 이러한 DI가 없는 실정이다. 외국에서 사용되는 DI는 국가별 경제수준, 자연환경 특성, 해역의 이용 목적 등이 상이한 까닭에 국내 환경에 직접 활용되는 것은 비합리적이다. 따라서 이 등⁵⁾은 그 동안 축적된 국

내 자료를 활용하여 DI를 개발하였다. 준설지수(DI)는 선진 외국의 기준들 중 4개(USEPA SQC, 캐나다의 PSQG, Sediment Bioassay의 데이터로 정리된 ABE(Adverse Biological Effect), background level이 고려된 Contamination factor(Cf)와 Degree of contamination)를 선정하여 이들을 Quadrodiagram의 내 변으로 하여 나타낸 것이다. 각 면에 주요오염대상 물질에 관한 각각의 criteria line을 설정하고 오염물질의 종류에 따라 농도가 각각 다르기 때문에 criteria 농도를 unit로 하여 그 농도비율을 막대 그래프로 작성한다. 이때 criteria 농도를 초과하는 오염물질은 그 비율에 따라 criteria 농도를 연결한 Box에 들어오게 된다⁵⁾.

DI = 기준 Box내 막대그래프면적의 합 / Box내의 총 유효면적

DI = Dredging Index

Table 7. Dredging Index of sediments in study area by depth

Depth(cm) \ Site	1	2	3	4	5	6
0-20	0.04	0.12	0.11	0.07	0.10	0.17
20-40	0.05	0.13	0.08	0.08	0.16	0.15
40-60	0.10	0.15	0.05	0.11	0.15	0.14
60이상	0.04	0.21	0.03	0.16	0.16	0.22
Average	0.06	0.15	0.07	0.11	0.14	0.17

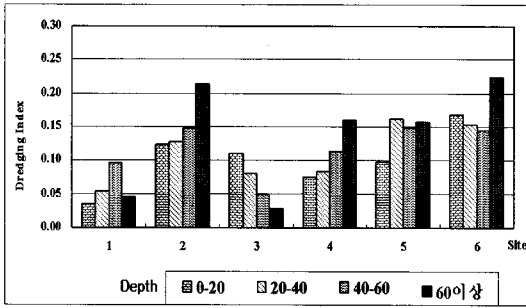


Fig. 4. Dredging Index of 6 sediments by depth.

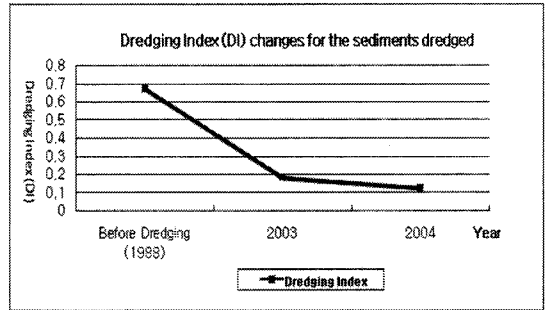


Fig. 5. Dredging Index changes for the sediments dredged (1988) and recovered (2003 and 2004).

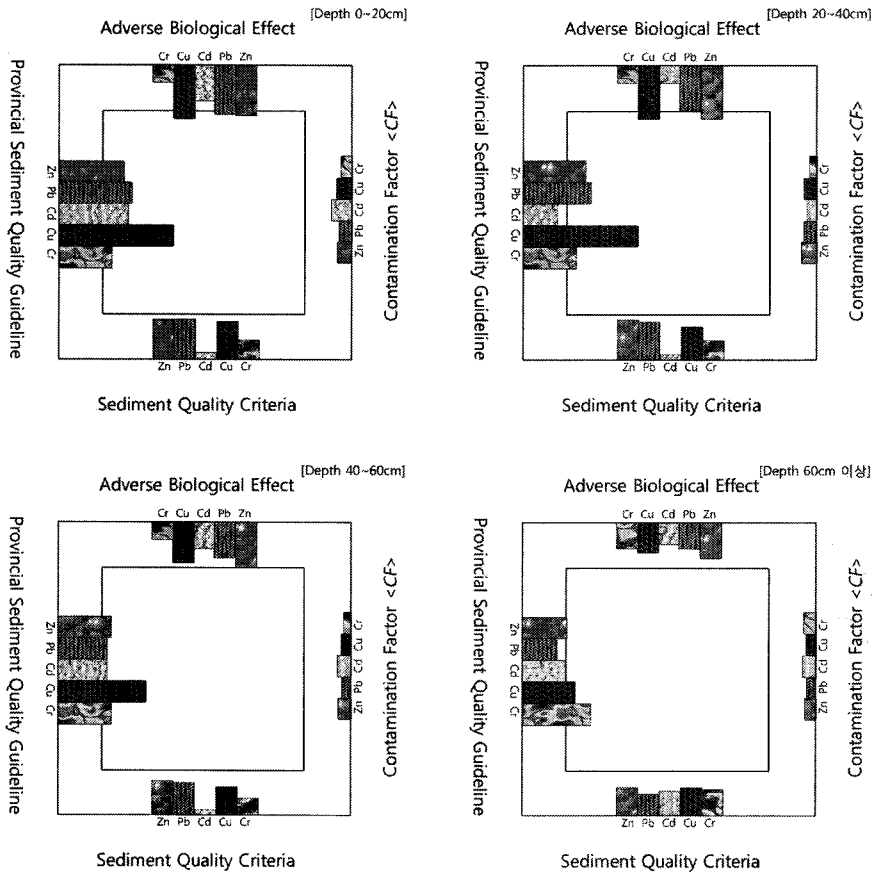


Fig. 6. Quadrodigram of Dredging Index by depth at site 3.

따라서 본 연구에서는 개발된 DI를 이용하여 가포만의 퇴적층을 분석하였다. 또한 Quadrodigram을 이용하여 DI를 나타내 보았다. 본 연구에서 얻은 결과데이터를 DI 프로그램에 입력하였을 때 나온 DI

값과 그래프를 Table 7과 Fig. 4에 각각 나타내었다. 여기서 나온 DI 값의 전체 평균은 0.12를 나타내고 있다. 이는 준설전 0.67과 2003년 0.18보다 낮아졌음을 보여준다⁵⁾. 이를 Fig. 5에 나타내보았다. 또

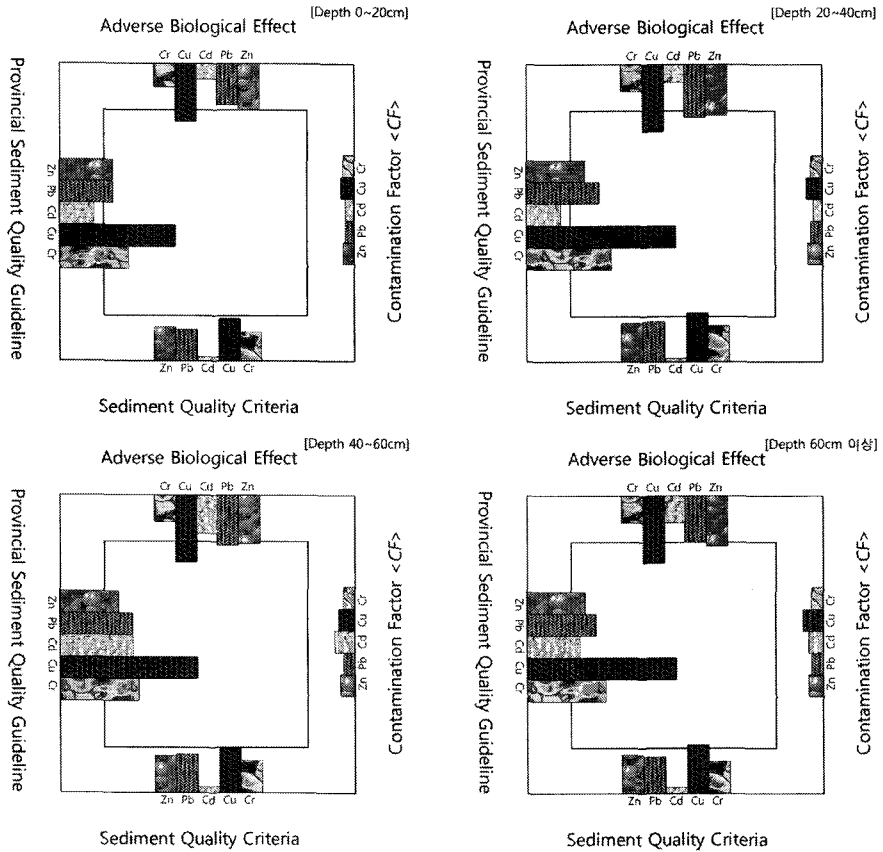


Fig. 7. Quadri-diagram of Dredging Index by depth at site 5.

한, 도출된 지점별 DI 값 중 3번, 5번 지점을 여러 외국의 퇴적물 분류기준(SQC, ABE, PSQG, CF 등)에 적용하여 Fig. 6~Fig. 7에 Quadri-diagram으로 나타내보았다.

4.2.2. 저서동물의 개체 분포 및 동태 조사

안 등⁶⁾은 마산만의 인공갯벌인 가포갯벌의 대형 저서동물 공간분포양상과 조위에 따른 수직분포양상을 보기 위하여 2002년 3월부터 3개 조사정점을 선정하여 조사를 하였다(Fig. 8)⁵⁾. 각 조사정점에서는 4개의 반복시료가 채집되었다. 수로지역을 포함한 3개 정점에서의 저서생물 조사는 2002년 3월부터 2개월 간격으로 주기적으로 채집을 하고 있다. 모든 조사정점의 퇴적물시료는 망목크기가 0.5 mm 인 체를 사용하였고, 해수를 사용하여 저서생물을 분리하였다. 분리된 저서생물은 해수로 중화된 10% 포르말린으로 고정하였다. 저서동물군집에 대한

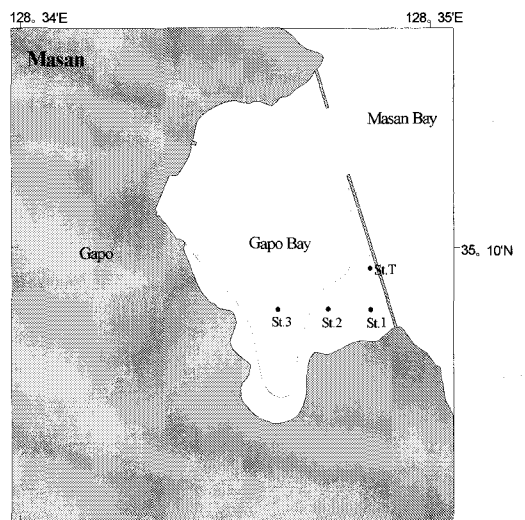


Fig. 8. Sampling sites for benthos in the confined Gampo area(St.T : inhabitation of a short-necked).

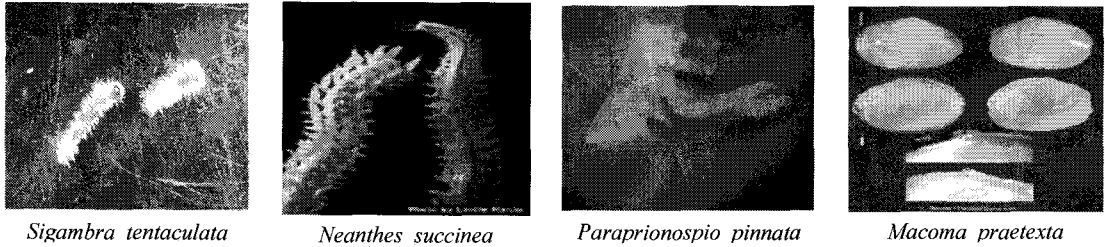


Fig. 9. Pictures of some species inhabited in the Gapo tidal flat.

주요 분석결과는 다음과 같다⁹⁾.

조사갯벌에서 조사기간 중에 출현한 대형저서동물군집의 종조성을 보면 다음과 같다. 총 32종이 출현하였으며, 조간대 상부에 위치한 정점 1에서 18종으로 가장 적었고, 정점 2와 정점 3에서 각각 26종씩 출현하였다. 이 중 다모류가 22종으로 가장 다양한 종조성을 보였다. 가포 인공갯벌에서의 주요 우점종의 조성비율은 조사정점에 따라 약간씩 차이를 보였다. 정점 1에서는 다모류의 *Prionospio japonicus* (납작얼굴갯지렁이) (33.7%), *Sigambra tentaculata* (투구갯지렁이) (25.9%), *Neanthes succinea* (두줄박이참갯지렁이) (10.9%), 이매패류인 *Theora fragilis* (아기반투명조개) (7.0%) 등이었다. 정점 2에서는 다모류의 *Neanthes succinea* (두줄박이참갯지렁이) (20.8%), 이매패류인 *Ruditapes philippinarum* (바지락) (18.8%), *Musculus senhousia* (중뿔) (16.2%) 등으로 정점 1과 차이를 보였다. 수로역의 정점 3에서는 다모류인 *Sigambra tentaculata* (투구갯지렁이) (27.6%), *Paraprionospio pinnata* (모자예쁜얼굴갯지렁이) (26.1%), *Lumbrineris longifolia* (10.5%), 이매패류인 *Macoma praetexta* (얇은대양조개) (9.6%), *Theora fragilis* (아기반투명조개) (4.6%) 등이었다.

4. 결 론

마산만의 심각한 오염에 따른 정화사업의 일환으로 1990년부터 1994년에 걸쳐 준설을 시작했고 이에 따른 준설토를 가포해역에 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 투기하였다.

본 연구에서는 이렇게 투기된 준설토사의 생태 위해도 변화를 알아봄으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 퇴적층의 입도와 중금속 농도와의 상관성을 분석해 본 결과 퇴적층이 세립질로 많이 구성되어 있을수록 중금속 농도가 높게 나타났다. 이는 곧 다

른 오염원의 유입이 없음을 시사하고 있다. 연구지역의 입도 분포는 50% 이상이 $32 \mu\text{m}$ 이하였다.

2) 퇴적물의 화학적조성, 생태위해도, Background level을 고려하여 개발된 준설지수를 적용하여 준설 당시의 퇴적물과 10년동안 안정화된 퇴적물을 비교하였다. 그 결과 전체 평균으로 계산된 준설지수 DI는 0.67(준설전 마산만)에서 0.18(2003년 가포만), 2004년 가포만에서 0.12로 낮아졌다.

3) 준설당시 상당한 오염도를 나타내었던 준설토사에서의 저서생물종이 다양화되었다. 오염준설토의 생태환경은 외부로부터의 오염원이 더 이상 유입되지 않는다면 자연정화에 의한 회복이 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구결과물은 2007학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원에 의하여 이루어졌음.

참 고 문 헌

- 1) 안순모, 2003a, 마산만 가포지역 인공갯벌의 유기물 및 영양염 수치 한국과학재단특정 기초 연구 2차년도 중간 보고서, p.1-8.
- 2) 권영택, 2004, 마산만 오염퇴적물 준설토 투기해역의 중금속 오염평가, 한국해양환경공학회지, 72(2), 75-81.
- 3) 해양수산부, 2002, 해양환경공정시험방법.
- 4) 이종현, 1996, 경기 내만 및 시화호의 저서동물군집의 특성과 퇴적물 내 유기물 및 중금속의 농축에 관한 연구, 서울대학교 보건대학원 석사학위논문, 1-15.
- 5) 이찬원, 권영택, 윤지훈, 2004, 연안해역 오염퇴적물 개선을 위한 준설판단지수(Dredging Index, DI) 개발, 한국해양환경공학회지, 72(2), 70-74.
- 6) 안순모, 2003b, 인공 갯벌을 이용한 마산만 오염물질의 자연정화 연구, 한국과학재단 특정 기초 연구 2차년도 중간 보고서, p.1-13.