

폐쇄성 해역의 오염부하 특성과 해역환경변화

이찬원⁽¹⁾, 권영택⁽¹⁾, 양기섭⁽¹⁾, 장풍국⁽¹⁾, 한성대⁽²⁾

Loading Characteristics and Environmental Changes in Closed Coastal Water

by

Chan-Won Lee⁽¹⁾, Young-Tack Kwon⁽¹⁾, Ki-Sup Yang⁽¹⁾,
Pung-Guk Jang⁽¹⁾ and Sung-Dae Han⁽²⁾

요 약

국내에서 가장 전형적인 폐쇄성 해역인 마산만은 연안도시인 마산시와 창원시의 배수지역이다. 유역인구가 약 100만명으로 증가된 시점인 1993년 11월에 마산시 덕동하폐수종말처리장이 가동되기 시작하였으며, 그 유출수는 마산내만에서 약 15km 떨어진 옥계해역에 방류되기 시작하였다.

본 연구에서는 마산만 유입부하의 분포가 어떻게 변화하였으며, 유입부하량과 유입오염물질의 성상은 어떠한 가를 규명하였다. 또한 마산만 유입부하 특성의 변화가 폐쇄성 연안 수질에 어떠한 영향을 주고 있는가를 연구하였다.

Abstract

Masan Bay is a typical enclosed coastal sea and receiving body of discharges from Masan city and Changwon city. A POTW(Publicly Owned Treatment Works) started operation from November 1993 when the population of drainage area increased abcent 1.0 million and the effluent from this plant has being discharged to the enclosed sea where is located at 15km distance from inner Masan Bay. Thus the inflow pattern to Masan Bay has been changed.

The main objective of this research is to evaluate the relationship between urban wastewater discharge and water quality change in a typical coastal zone. It is necessary a) to evaluate the change of input loadings, b) to determine the effect on water quality changes, and c) to find the respective importance of improvement options that must be controlled in the wastewater treatment plant. It was concluded that the sea water quality has being

(1) 경남대학교 환경보호학과

(2) 경남대학교 토목공학과

adversely affected by the discharge of insufficiently treated urban wastewater and the nutrient removal in wastewater treatment was very important and urgent.

Keywords: enclosed coastal sea, inflow pattern, wastewater discharge, nutrient removal

1. 서론

우리 나라 남동지역의 행정 및 산업 중심도시인 마산·창원지역에 위치한 마산만은 그 지역 특성상 광범위한 유역면적에 산재되어 있는 각종 오염원 즉, 생활하수, 산업폐수 등으로부터의 오염물에 의하여 직·간접적인 영향을 받고 있다. 1982년 10월 부산연안, 울산연안, 광양만 등과 함께 연안오염특별관리해역으로 지정된 이래 공유수면 매립, 대규모 간척사업 등의 해안역 개발에 대한 규제가 강화되고 있다(과학기술처[1996]).

마산만은 우리 나라의 연안 해역중 가장 대표

적인 폐쇄성 해역의 지형적, 물리적 특성을 지니며 외해와의 해수교환이 제한되어 적은 양의 오염물질이 유입되어도 유입부하가 지속될 경우 그 축적 가능성이 매우 큰 해역이며, 또한 그 오염물질들이 계속 축적되어 그 악영향이 순환적으로 되풀이 된다. 마산내만의 평균수심은 10m~20m의 천해로서 해수유동이 10cm/sec로 오염물질이 유입된 후 돌섬까지의 약 4.4km를 왕복하고 있으며, 그 체류시간이 10~12시간에 해당한다. 그리고 내륙으로부터 유입되는 오염물질은 주로 하천등을 통해서 담수와 함께 내만으로 들어오기 때문에 내만으로 부터 빠져나가기 어려워 마산내만

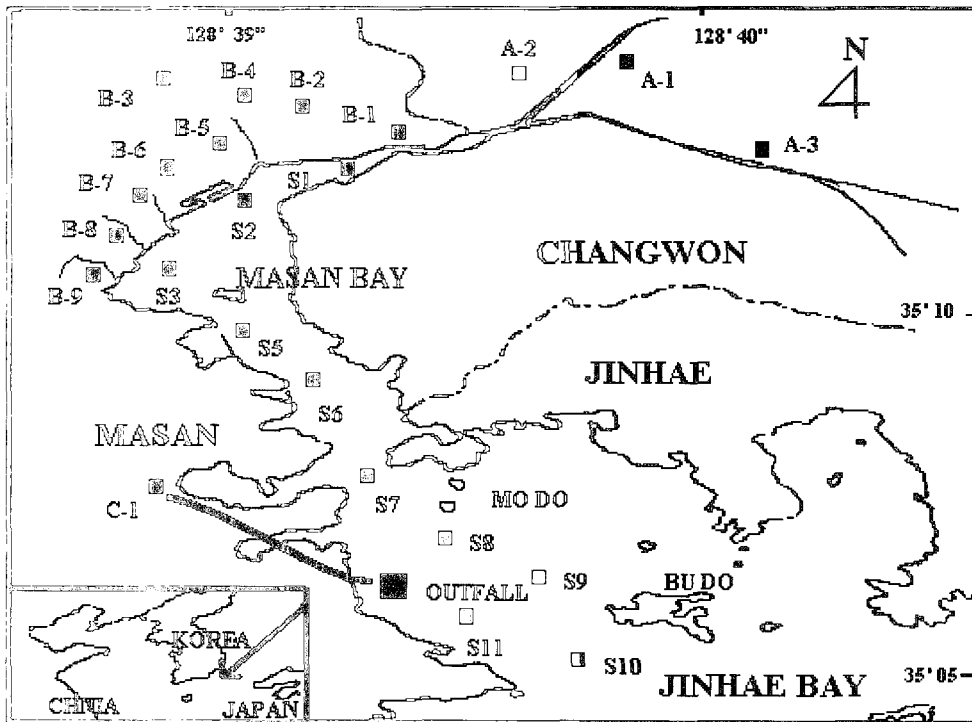


Fig. 1 Map of sampling sites in Masan Bay area

의 해수수질을 악화시키거나 해저에 퇴적하게 된다. 특히 하절기에는 해수의 수직적 온도분포로 인해 나타나는 성층화현상과 봄·가을의 전도현상으로 수질을 더욱 더 악화시킨다. 또한 수온이 3월부터 상승하기 시작하여 4월이면 평균 10℃ 이상으로 증가하고, 6~10월까지 20℃ 이상을 유지하여 11월에서 다음해 2월 중순까지의 약 3개월을 제외한 나머지 9개월은 적조가 계절에 관계 없이 발생하고 있다.

마산만 유역을 용도별로 구분해 본 결과 (Table 1) 녹지가 80.3%로 가장 많은 면적을 차지하고 있으나(건설교통부, 부산·경남권 광역개발계획[1995]), 지역 특성상 공통적으로 경사가 급한 지형이기 때문에 이용이 어려우며, 인간활동에 의해 오·폐수가 발생하는 주거, 상업, 공업 지역은 해안선을 따라 밀집되어 있고, 여기에서 배출되는 각종 오·폐수 등이 마산만으로 직접 투입되고 있다. 특히 우기의 Runoff시에 다량의 토사와 유기물이 하천으로 유입된다고 보고하고 있다(이찬원 등[1994]).

이러한 마산만 유입하천의 하상 대부분은 유기물 및 점토성인 세립, 중립의 모래로 구성되어 있으며, 이를 토질별로 구분한다면 점토질이 3%, 실트질이 27%, 모래가 67%, 자갈이 3%인 구성비로 나타나고 있다(마산시[1989]). 마산만 내만의 해저 토질구성은 점토질 22%, 실트질이 77%, 모래가 1%, 자갈이 0%로 구성되어 있으며 주로 실트와 점토질로서 유입하천보다 훨씬 미세한 입자로 구성되어 있다. 미세립의 저질은 굵은 입자로 된 저질과 질량비로 비교하면 비교적 거대한 표면적을 가지고 있으며, 많은 오염물들은 미세립의 저질에 간단하게 흡착되고 그들과 함께 수송된다. 이러한 흡착의 용량 때문에 바닥의 저질은 인, 중금속, 독성탄화수소 등과 같은 오염물의 주요한 저장고로서 수중에 많은 침전오염물을 수용하지만 고농도의 다양한 오염원으로 작용할 수

있다. 그리고 이와 같은 미세립의 입자성 점토와 Silt의 주요 Source는 육지의 강과 하천으로서 서해안과 같은 강력한 조석의 흐름이 있는 경우에는 세립 점토와 실트는 침전, 재부유의 빈번한 Cycle을 통해 해양으로 전달되지만(Kang, et al., [1987]) 마산만과 같은 폐쇄성 해역에서는 계속해서 축적되며 그로 인하여 해양환경의 변화가 나타날 것이다

인과 질소 및 중금속류를 포함한 오염물질들은 하천 등의 오염경로를 통해 입자성 혹은 용존성으로 유입되며, 입자성 물질은 유입하는 즉시 퇴적하는 경우가 많고, 용존성 물질은 입자성 물질에 흡착 공침되거나 생물체에게 흡수 이용된 후 그 사체들이 저층으로 퇴적하게 된다(이찬원 등[1991], Bostrom[1988], Forstner and Salomann [1991]). 특히 질소와 인은 폐쇄성 해역의 저질로부터 용출되는 것보다는 하천이나 강으로부터 유입되는 것이 주요한 원인으로 분석되고 있으며 (Ebise & Goda[1985]), 실제로 육상유입원의 영향을 직접 받는 마산내만이 우리나라 연안해역 중 수질이 가장 나쁜 것으로 나타났다(환경부 [1997]). 또한 마산만 입구로 유출입되는 해수의 약 10%만이 마산내만에서 통과하고 있어 마산만의 오염상황을 해수의 물리적인 특성면에서 잘 나타내고 있다(이찬원 등[1994]).

그리고, 97년 현재 일 방류량이 20만톤 정도에 달하는 덕동 하수처리장의 1차 처리수가 해양 방류되고 있다. 특히 현실적으로 방류해역이 적조다발해역이기 때문에 인근해역까지도 영향을 미칠 것으로 우려된다.

폐쇄성 해역은 외부의 오염원 및 부하량에 따라 수질의 변화가 심하며, 오염물질이 계속 퇴적되어 그 악영향이 순환적으로 되풀이된다. 특히 마산만과 같이 부영양화가 이미 상당히 진행된 해역을 회복하기 위해서는 부영양화 물질의 적정

Table 1 Classification of area in Masan city and Changwon city (Unit : km²(%))

Area City	Residencial	Commercial	Industrial	Green belt	Not classified	Total
Masan	10.85	3.41	4.14	115.22	13.00	146.62
Changwon	15.23	2.88	19.30	180.46	3.65	221.52
Total	26.08(7.11)	6.29(1.71)	23.44(6.37)	295.68(80.30)	16.65(4.51)	368.14(100)

기준이 확립되고, 폐수처리 방법 및 기술이 뒷받침되어야 함은 물론, 이에 앞서 오염원 및 부하량에 대한 정확한 평가와 관리, 그리고 대책이 필요하다.

이에 본 연구는 해역 수질을 악화시키는 주요 원인이 되고, 마산만 유역에 산재되어 있는 오염원의 특성과 분포, 성상을 정량화하였고, 하수처리장의 해양방류로 인한 해양환경변화를 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

하천수는 13개 지점에서 1992년 12월에서 1996년 10월에 걸쳐 2개월마다 조사하여 총 24회 관측하였으며, 해수는 1990년 5월부터 1996년 8월까지 월별로 조사하였고, 그 조사지점은 Fig.1과 같다.

하천수는 정확한 유량을 산정하기 위하여 다른 하천이나 해수와 혼합되지 않는 각 하천의 최하류부에서 채수하였다. 하천의 유량은 수질 분석용의 시료채취와 동시에 하천의 원단면에 관계없이 실제 물이 흐르는 단면을 수면폭으로 하여 줄자로 측정하였으며, 수심은 pole을 사용하여 수면폭의 크기에 따라 3~5개의 지점에서 측정하여

그 평균치를 취하였다. 따라서 통수 단면적은 수면폭 × 평균수심으로 계산하였다. 하천의 유속은 유속계 (C-500A, Japan)를 사용하여 측정하였으며, 위와 같이 계산된 통수 단면적과 유속을 기준으로 유량을 산정하였다. 해수는 총 11개 지점을 표·상·하층으로 구분하여 Van Dorn 채수기로 채취하였고, 투명도는 직경 10인치 의 Secchi disc를 사용하였으며, 시료의 항목별 시험방법은 Standard Methods(APHA[1992])와 수질오염공정시험방법[1992]에 준하였다.

3. 결과 및 고찰

1993년 11월부터 하·폐수처리장이 가동함에 따라 마산만 유입부하의 특징이 어떻게 달라졌으며, 그로 인하여 마산만 수질에 어떠한 영향을 미치고 있는가를 고찰하였다.

3.1 오염물질의 농도 및 유입형태

각 지역별 오염의 분포를 나타내기 위해 창원지역을 A, 마산지역을 B, 하수종말처리장을 C지역으로 나누어 비교 분석하였다. 유입오염물질의

Table 2 The percents of dissolved and particulate component relative to each total component (Unit : %)

Area \ Element	D*-COD	P**-COD	D*-TP	P**-TP	D*-TN	P**-TN
A	67	33	70	30	83	17
B	67	33	65	35	82	18
C	55	45	74	26	83	17

D* : Dissolved, P** : Particle

Table 3 Comparisons of TSS, COD, TN and TP concentration of streams flowing into Masan Bay among three grouped areas (Unit : mg/L ± S. D.)

Site, Year \ Ele.	TSS	COD	TN	TP	
A	93~94	34 ± 19	49 ± 20	21 ± 10.9	1.08 ± 0.46
	95~96	52 ± 25	85 ± 21	31 ± 11.5	2.09 ± 0.63
B	93~94	42 ± 22	72 ± 29	33 ± 14.2	1.82 ± 0.54
	95~96	53 ± 35	91 ± 28	35 ± 18.2	1.89 ± 0.81
C	93~94	87 ± 25	87 ± 25	35 ± 18.2	2.09 ± 1.52
	95~96	45 ± 17	118 ± 59	49 ± 15.9	2.49 ± 0.96

Table 4 Water quality of streams flowing into Masan Bay from Dec. 1994 to Oct. 1996

Ele. Site	pH	DO (mg/L)	Temp (°C)	EC (μ mhos/cm)	TSS (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
A-1	7.72±0.45	4.7±2.5	19.5±8.7	709±149	79.6±51.6	111±52	34.920±12.491	2.893±1.197
A-2	8.00±0.57	7.7±2.6	19.5±8.8	1298±1937	46.6±34.9	88±48	32.925±16.679	2.083±1.382
A-3	7.36±0.41	5.3±1.6	18.1±9.2	576±125	28.9±19.1	56±22	24.489±9.860	1.300±0.710
B-1	7.06±0.44	3.8±2.9	18.2±8.1	1265±263	38.6±28.5	98±38	32.184±14.333	1.656±0.697
B-2	7.45±0.33	3.9±3.1	18.3±7.8	702±143	54.1±29.2	106±35	37.069±22.599	2.179±0.951
B-3	7.58±0.39	5.0±3.4	19.5±7.2	644±118	47.4±33.9	85±32	29.802±20.329	1.902±1.026
B-4	7.52±0.41	4.8±2.8	17.9±7.8	646±185	45.9±30.3	89±33	30.236±11.695	2.065±1.008
B-5	7.52±0.41	5.9±3.4	17.4±8.0	593±155	48.5±28.3	90±22	31.561±16.573	1.640±0.750
B-6	7.53±0.28	6.6±2.8	17.3±8.1	530±148	49.7±36.1	82±25	32.736±17.376	1.704±0.907
B-7	7.53±0.35	5.4±3.4	18.4±8.4	544±123	46.7±30.2	68±22	31.041±16.571	1.563±0.963
B-8	7.47±0.30	5.4±2.7	17.1±7.6	609±213	48.4±44.5	76±25	33.040±11.062	2.150±0.814
B-9	7.92±0.50	6.1±2.4	18.1±8.8	939±473	94.4±94.9	129±127	37.598±17.454	2.201±1.074
C-1	7.43±0.28	5.6±1.9	20.3±6.4	4,455±2669	45±17.0	118±59	48.771±15.919	2.493±0.962

수중 존재형태를 구분하기 위해 GF/C 여과지(1.2 μ m)로 여과하여 용존성 성분과 입자성 성분으로 구분하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 유입 하천의 SS 평균농도는 A, B, C 지역에서 각각 52mg/L, 53mg/L, 45mg/L였으며, COD 평균농도는 약 98mg/L로서 입자성 상태와 용존성 상태로 구분하여 본 결과 A, B지역이 67% 정도가 용존상태로 유입되며, C 지역은 55%인 것으로 조사되었다.

질소(TN)는 C 지역에서는 평균 48.8mg/L, A, B 지역은 각각 31.1mg/L, 31.2mg/L로 조사되었으며, 질소(TN)의 유입형태는 A, B, C 지역에서 각각 83%정도가 용존성 성분으로 유입되며, 건·우기에 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 인(TP)의 농도를 조사해 본 결과, A지역의 평균농도는 2.09mg/L, B지역은 1.90mg/L, C 지역은 2.49mg/L로 나타났다. 마산만 유입하천수의 인의 존재 형태별 분석결과는 A지역의 경우 입자성 성분이 30% 이며 우기의 Runoff시에만 약 50% 정도의 비율로서 유입되는 것으로 나타나고 있다. 이는 일본의 Hinuma강 유역의 Runoff시 입자성 인의 비율이 72% 정도로 유입되는 것과는 다소 차이가 있었다(Takanobuine & Senichieise, [1991]). B지역에서는 35% 정도가 입자성 성분으로 유입되며, C 지역에서는 26%가 입자성 성분으로 유입되는 것으로 나타나는 것으로 조사되었다.

해양방류 전·후의 각각 2년간의 유입지역별 유입수 농도변화를 Table 3에 제시하였다. 93년 11월부터 방류를 시작하였지만 94년 말까지도 정상적으로 가동이 되지 않았고 마산만으로의 유입 유량 또한 적어 해양방류 전과 후로 구분하였다.

오염물질의 농도는 각 지역 모두가 시간에 따라 증가하는 경향이며 B지역의 총인(TP) 농도는 1.82mg/L에서 1.89mg/L로 큰 변화가 없었고, C 지역의 TSS 농도는 감소한 것으로 나타났다 (Table 3).

마산만 유입수의 수질특성을 Table 4에 나타낸 바와 같이 pH는 약 7.54였으며, DO는 5.6mg/L였다. 전기전도도는 A, B, C 지역 각각 861 μ mhos/cm, 719 μ ohms/cm, 4,455 μ mhos/cm로, C지역에서 특히 높게 나타난 것은 C 지역 하수 차집관로로의 해수유입이 원인으로서 각 펌프장에서의 실제 측정결과 해수유입이 관측된 바 있으며, 가동 초기에는 해수의 농도가 7‰에서 96년 10월 현재에는 2~3‰ 정도로 해수성분의 유입이 있는 것으로 조사되었다.

3.2 마산만 유역의 오염부하량

각 하천 및 덕동 하·폐수 처리장에 의한 유량과 부하량들을 Table 5에 나타내었고, 지역별 오염물질 부하량과 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 본

폐쇄성 해역의 오염부하 특성과 해역환경변화

Table 5 Pollutant loadings to Masan Bay

(Unit : kg/day)

Site	Ele.	Flow rate, m ³ /day	TSS	COD	TN	TP
A-1		80,476 ± 58,417	6,406 ± 3,014	8,932 ± 3,038	2,810 ± 730	233 ± 70
A-2		83,206 ± 55,954	3,877 ± 1,953	7,322 ± 2,686	2,740 ± 933	173 ± 77
A-3		104,095 ± 65,194	3,008 ± 1,275	5,829 ± 1,434	2,549 ± 643	135 ± 46
B-1		23,219 ± 13,686	896 ± 261	2,275 ± 520	747 ± 196	38 ± 10
B-2		73,290 ± 39,695	3,961 ± 1,159	7,769 ± 1,389	2,717 ± 897	160 ± 38
B-3		58,730 ± 50,528	2,784 ± 1,713	4,992 ± 1,617	1,750 ± 1,027	112 ± 52
B-4		26,791 ± 16,211	1,230 ± 491	2,384 ± 535	810 ± 190	55 ± 16
B-5		69,438 ± 45,676	3,368 ± 1,293	6,249 ± 1,005	2,192 ± 757	114 ± 34
B-6		50,932 ± 28,596	2,531 ± 1,032	4,176 ± 715	1,649 ± 497	87 ± 26
B-7		58,934 ± 37,070	2,752 ± 1,120	4,008 ± 816	1,829 ± 614	92 ± 36
B-8		14,731 ± 13,540	713 ± 603	1,120 ± 339	487 ± 150	32 ± 11
B-9		6,535 ± 5,995	617 ± 569	843 ± 761	246 ± 105	14 ± 6
C-1		193,608 ± 24,944	8,712 ± 424	22,846 ± 1,472	9,442 ± 397	483 ± 24

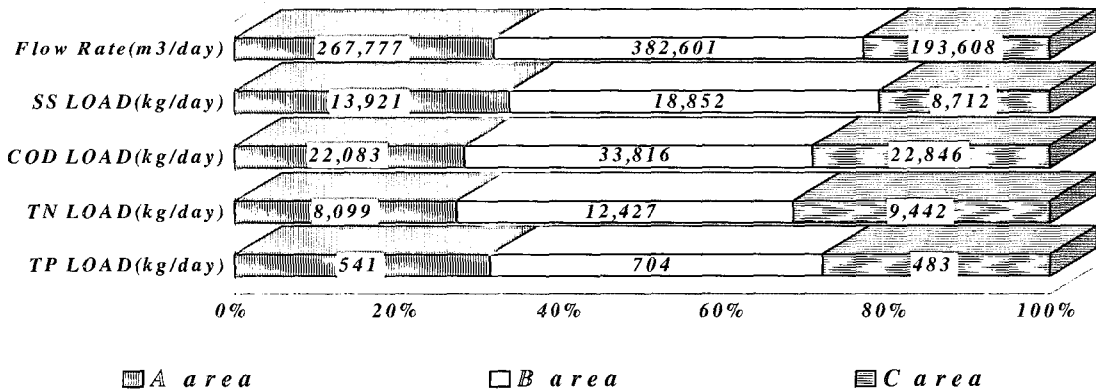


Fig. 2 Area characteristics of input loadings to Masan Bay

Table 6 A comparison of input loadings to Masan Bay

Year	Element	Flow rate (m ³ /day)	TSS (kg/day)	COD (kg/day)	TP (kg/day)	TN (kg/day)
93~94		648,305 ± 264,740	31,945 ± 18,940	40,697 ± 15,180	999 ± 590	15,015 ± 8,159
95~96		843,985 ± 455,506	40,855 ± 14,877	78,745 ± 16,327	1,728 ± 446	29,968 ± 7,136

조사기간 동안의 마산만 유입 총 평균 유량은 821,649 m³/day였으며, 94년 10월 이전보다 이후에 약 27%의 유량증가가 나타났다(Table 6). TSS는 40,855kg/day 정도가 마산만으로 유입되

고 있다. 건·우기를 비교할 때 우기가 건기보다 약 3.8배 높고, 94년 이전과 비교했을 때 이후가 약 28%의 증가가 있는 것으로 나타났다(Table 6). 본 조사결과와 분포현황은 창원지역이 13,921kg/day

로 전체량의 약 33%가 유입되고 있으며, 마산지역에서는 18,852kg/day로 약 46%가 유입되고 있다(Fig. 2). 그리고 94년 10월 이전의 창원지역이 약 45%의 분포를 나타낸 것과 관련하여 이 지역에서의 비율이 현저히 감소했으며, 이는 창원지역에서 발생한 하·폐수가 차집관로를 통하여 덕동하·폐수처리장으로 이송되는 유량이 상대적으로 마산지역보다 많기 때문인 것으로 판단된다.

일일 유입 COD는 총 78,745kg으로 건·우기 비교시 2배 이상의 유량차이에도 불구하고 전체적인 부하량의 변화는 없는 것으로 나타났다(양기섭[1995]). 지역별 분포로는 마산지역에서 43%를 차지해 그 비중이 상당히 큼을 알 수 있었고, 하·폐수처리장 방류수가 29%로서 창원지역과 비슷한 비율로 나타났다(Fig. 2). 마산만으로 유입되는 TP의 총 부하량은 1,728kg/day 정도이며, 지역별로는 창원지역이 31%, 마산지역이 41%를 차지하고 있다. TN의 총부하량은 일일 약 29,968kg 정도로서 용존성 성분이 80%이상을 차지해 우기의 Runoff에 의한 농도변화가 있을 뿐 거의 동일하게 유입되고 있음이 본 조사기간 동안에 관측되었다. 지역별 분포는 창원, 마산지역에서 각각 27%, 42%를 나타내었고, 하·폐수처리장방류수가 31%로서 창원지역보다도 더 많은 영향을 미침을 알 수 있었다(Fig. 2). 94년 이전과 비교했을 때 전체적으로 유량과 오염물질의 부하량은 증가했으나, 유량의 편차가 크에도 오염물질 부하량의 편차는 상대적으로 줄어들어 일정한 양의 오염물질이 지속적으로 만에 유입됨을 알 수 있었다(Table 5). 또, 이 등[1996]에 의해 원단위를 적용하여 추정된 창원지역의 1995년도의 SS 부하량은 33,587kg/day(생활오수 24,830kg/day, 공

장폐수 13,291kg/day)로서 본 조사결과 창원지역의 SS부하량 13,291kg/day와 창원지역에서 하·폐수처리장으로 이동한 부하량 5,227kg/day의 합인 18,518kg/day와는 많은 차이가 있었다. 이는 실제로 원단위를 적용하여 추정된 부하량의 SS 성분이 발생원에서 배출되어 하천을 흐르면서 분해되어 용존상태로 되거나 침전되기 때문에 실제 유입부하량은 낮아지고, 또한 원단위 적용 부하량 적용의 한계점을 알 수 있었다. 실제로 마산만 유역의 하천에서 이런 침전상태의 SS성분들은 우기의 Runoff시의 농도가 년평균 농도보다 15배 이상 높게 나타난 것으로 이러한 시기에 다량의 SS성분들이 만으로 유입됨을 양[1995]은 보고하고 있다.

3.3 하수처리장의 해양방류로 인한 환경변화

93년 11월부터 가동되어 점차 그 처리량이 증가하고 있는 하·폐수종말처리장은 그 계획시점이 15년전인 1980년이고, 계획 당시 1차처리 및 해양방류에 의한 하수처리이기 때문에 목적인 사업의 효과를 기대할 수 없을 뿐만 아니라 계획구역내의 인구증가, 산업활성화 등에 따라 하수 및 폐수발생량이 증가하여 마산만으로의 유입부하가 상당히 우려되고 있는 실정이다. 실제로 창원지역의 인구추세를 84~94년 기준으로 할 때 전국 1.2%, 경남지역 1.1%에 비해 8.9%로서 인구가 급성장 추세에 있다(창원시[1996]). 이에 96~99년에 총사업비 620억원을 투자하여 현 하루 처리량 28만톤에서 50만톤 처리용량으로 증설하며 2차처리 시설을 도입

Table 7 Changes of sea water quality after the operation of wastewater treatment plant

Ele. Site	Salinity, ‰		COD, mg/L		SS, mg/L		TIN, mg/L		PO ₄ -P, mg/L		Trans, m	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
S1	29.1	30.6	7.41	5.50	13.4	8.7	1.728	1.422	0.051	0.052	0.8	1.4
S5	30.0	30.8	5.68	4.68	9.7	8.4	1.007	0.897	0.029	0.040	1.2	1.8
S7	30.3	31.0	5.68	4.55	8.8	6.9	0.788	1.401	0.021	0.071	1.7	1.7
S8	30.4	31.1	4.61	3.81	8.2	6.8	0.788	0.798	0.024	0.056	1.9	2.4
S9	30.7	31.1	4.42	3.58	7.6	6.5	0.730	0.700	0.020	0.024	2.1	2.6

A : After discharging, 1994. Jan.~1996. Aug., B : Before discharging, 1990. May.~1993. Dec.

폐쇄성 해역의 오염부하 특성과 해역환경변화

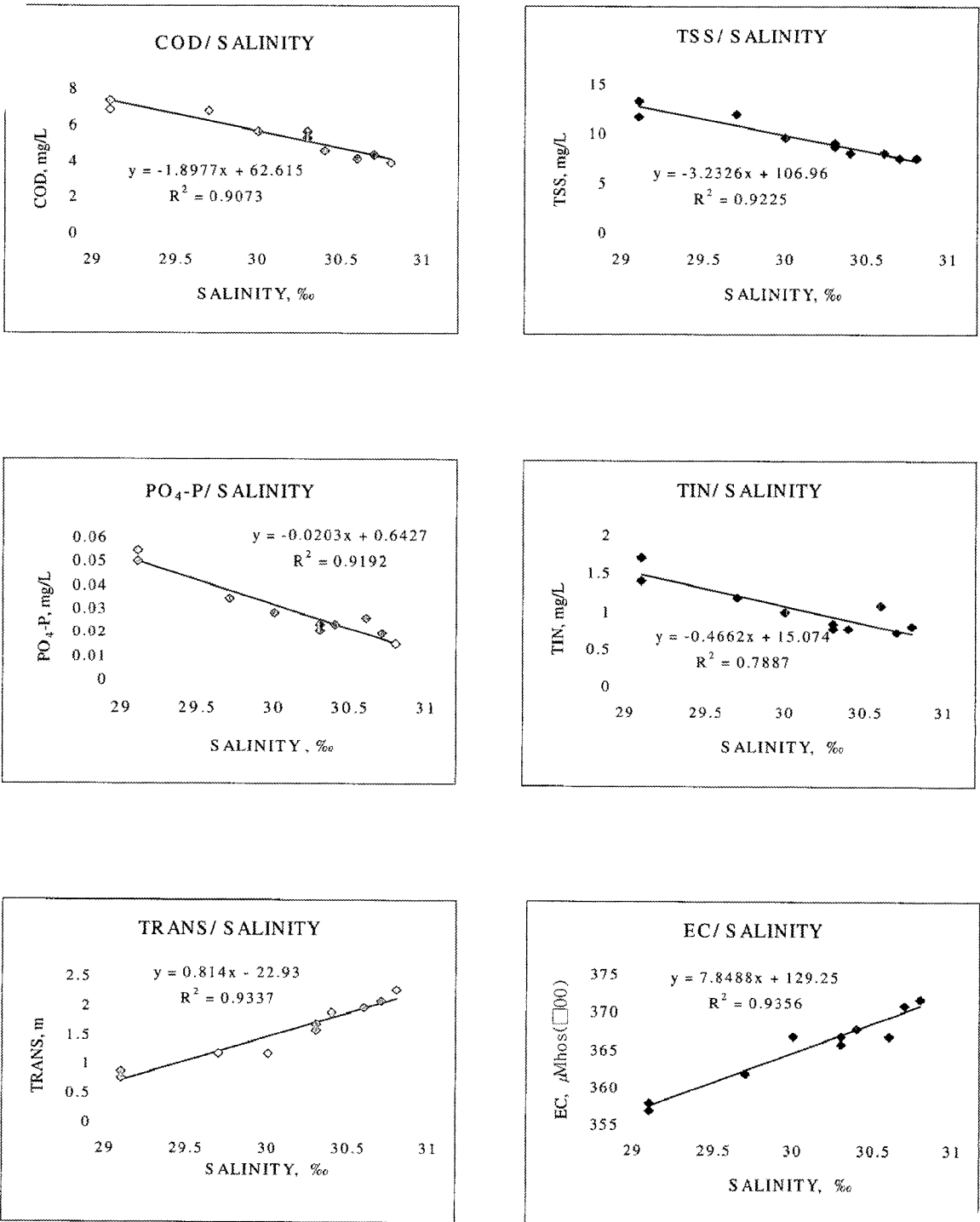


Fig. 3 Analysis of sea water quality data in Masan Bay

할 예정이다. 1993년 환경부에 의한 하수처리장처리장의 운영상태가 설계대로 운영되지 않는 처리장이 상당히 많음을 알 수 있는데 국내 하수처리장 유입하수 BOD와 SS의 평균 농도는 각각 111mg/L, 127mg/L이나 선진국인 미국의 경우 유입수의 BOD와 SS의 평균 농도는 각각 200mg/L, 240mg/L로 국내 유입하수농도보다 상당히 높음을 알 수 있다. 유입하수의 성상 차이에도 불구하고, 국내 하수처리장의 설계, 운영 지침은 선진국인 미국과 일본의 설계지침서를 그대로 이용하고 있으며(환경처[1994]), 본 조사지역의 마산시 덕동 하·폐수처리장도 국내 다른 하수처리장과 마찬가지로 BOD 및 COD, SS의 실제 유입수질은 설계수질의 50%에도 미치지 못하고 있다.

하·폐수처리장 유입수 중의 용존성 COD 분율은 45~82%까지 매우 큰 폭으로 변화하고 있으며, 자연침강법에 의한 1차 침전지를 통해서는 입자성 COD의 일부만이 제거되어 약 20~30%의 제거율을 보였다. 더우기 크롬법 COD와 망간법 COD의 실험결과 농도에 많은 차이를 보여 Chloride에 의한 오차를 고려하더라도 크롬법 COD가 약 3배정도 높게 측정되었다. 이로써 하수종말처리장의 유입수에 상대적으로 난분해성 물질이 다량 포함된 것으로 생각된다(1995[양기섭]). 또한 유량은 마산만 전체 유입유량의 23%를 차지하나, COD 그리고 TN, TP 등의 영양염 농도도 다른 지역보다 높아 적조다발해역인 마산만에 적조의 발생빈도를 증가시킬 우려가 있다. 이에 해양 각 지점별 해수수질 변화를 Fig. 3에서 비교분석하였고, 하수처리장 방류 전·후의 변화를 Table 7에 나타내었다.

그리고, Fig. 3의 S₁에서 S₁₀으로 갈수록 육상기원 오염부하의 영향을 적게 받고, 외해로 이류·확산하여 해역에서 COD, SS, TN, TP 등의 오염물질 농도는 낮아지고, EC, Salinity, 투명도 등은 높아지는 일정한 경향을 가지고 있다. 그러나 하수처리장 방류해역인 S₁₁지점은 이런 일정한 경향과는 관계없이 해수수질 농도가 높아지는 경향을 보여주고 있다. 이를 Fig. 3에서 S₁₁ 지점의 인근 지점인 S₈, S₉, S₁₀ 지점등과 비교하여 보면 그 변화를 관찰할 수 있다. 또한 마산만의 해수유동 특성상 내만해역으로 확산될 가능성이 높고, 진해만 전체해역으로도 확산될 가능성이 있어 해양환경의 점차적인 변화가 예상된다. 방류 인근해역에서 방류전인 1990년 5월에서 1993년 12월까지의 Salinity 평균

농도 31.1‰가 방류후에는 최고 30.4‰로 낮아졌다. Chiaro & Burke[1980]의 연구에 의하면 해수질은 해저의 퇴적물로부터 PO₄-P가 해수중으로 유리되어 나오는 것 보다는 육상으로부터의 유입에 더 큰 영향을 받는다고 보고하고 있으며, 실제로 S₁₁ 방류해역에서의 PO₄-P 농도 증가를 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 특히, 적조를 유발하는 영양염인 질소와 인이 이 해역에서 높게 나타나는 것은 주목할 만한 사항이다.

Fig. 3의 염분-오염물질농도 좌표에 나타난 바와 같이 마산만의 특징은 주요염원이 분포하고 있는 내만에서 외만으로 갈수록 점점 오염물질의 농도가 감소하는, 상관계수 R²의 값이 0.9 이상인 분명한 경향을 갖고 있다. 방류해역지점(S₁₁)의 수질이 S₉를 기준으로 회귀직선상에 좌측 및 상측으로 변화하고 있는데, 이는 염분도의 차이가 비록 0.3‰의 수준이지만 담수(방류수) 유입의 영향을 받고 있고, 오염물질의 농도는 점차 증가하는 경향을 잘 나타내고 있다. 특히 하·폐수처리장에서 거의 제거되지 않은 인과 질소의 농도는 눈에 띄게 증가하였다. 부유물질의 농도와 투명도는 내만방향의 특정수질로 접근하고 있다. 옥계앞 해역에서의 방류는 상당한 문제점들을 안고 있다. 따라서 방류지점의 위치가 재검토되어야 하지만 이것이 현실적으로 불가능하기 때문에 방류수의 농도를 대폭 낮출 수 있는 하수처리방법을 추가로 강구하여야 한다고 사료된다. 특히 적조의 원인 물질인 질소와 인의 농도가 방류해역에서 점점 증가하고 있는 경향이 현장관측에서 뚜렷이 나타났는데, 이러한 오염도가 높은 방류수는 진해만 전체해역에도 영향을 미칠 것으로 보여지므로 방류수의 농도 저감대책은 시급히 고려되어야만 한다.

4. 결 론

국내에서 가장 전형적인 폐쇄성 해역인 마산만은 연안도시인 마산시와 창원시의 배수지역이다. 유역인구가 약 100만명으로 증가된 시점인 1993년 11월에 마산시 덕동 하·폐수 종말처리장이 가동되기 시작하였으며, 그 유출수는 마산내만에서 약 15km 떨어진 옥계 해역에 방류되기 시작하였다.

본 연구에서는 마산만 유입부하의 분포가 어

떻게 변화하였으며, 유입부하량과 유입오염물질의 성상은 어떠한가를 규명하였다. 또한 마산만 유입부하 특성의 변화가 폐쇄성 연안 수질에 어떠한 영향을 주고 있는가를 연구하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 마산만으로 유입되는 유량과 오염물질의 총 부하량은 계속해서 증가하고 있으며, 일일평균 유량은 843,985m³/d, TSS 40,855kg/d, COD 78,745kg/d, TN 29,968kg/d, TP 1,728kg/d이었다. 이 중에서 하수처리장 방류지점인 옥계해역에 유출되는 양은 마산만 전체 유입량에 대해 유량 약 23%, TSS 21%, COD 29%, TN 31%, TP 28%를 차지하고 있다.

2. 오염물질의 유입형태는 마산, 창원지역에서 COD 67%, TN 83%, TP 68%가 용존성분으로 유입되며, 하수처리장에서는 55%의 COD가 용존성분으로 유입되고, TN과 TP는 마산, 창원지역과 비슷한 형태로 유입되고 있었다. 또한 하수종말처리장은 가동초기에 염분의 농도가 7‰에서 96년 10월 현재에는 2~3‰ 정도로 해수유입이 있는 것으로 조사되었다.

3. 마산만 유입물질의 부하량을 건·우기로 나누어 비교하면 TSS가 우기에 약 3.8배 높게 유입되며, TP의 경우 우기의 Runoff시에 입자성 성분이 약 50% 정도로 유입되어 타 지역의 Runoff시 유입형태와 구별되는 지역적인 특성을 나타내었다. 또한 우기의 Runoff시를 제외한 오염물질의 부하량은 농도변화만 있을뿐 년중 거의 동일하게 유입됨이 조사되었다.

4. 하수처리장 방류수의 해양방류로 인한 해양환경변화는 방류수의 상당 부분이 방류해역의 해수에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 인과 질소는 하·폐수처리장에서 거의 제거되지 않음으로써 방류해역에서의 해수중 인과 질소의 농도는 뚜렷하게 증가하였다.

5. 이에 해수질의 성분변화, 저질, 플랑크톤, 생물서식현황, 생체오염 등의 환경특성과 관련된 다방면의 연구가 병행되어야 하며, 현재 설치 가동중인 하수처리장의 2차 처리시설 완공이 이루어지기 전에 현 시설을 가장 효율적이며 경제적으로 활용할 수 있는 방안을 모색하여 영양물질의 제거효율을 높이는 것이 바람직 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 과학기술처, 1996, 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구(Ⅱ,Ⅲ), pp. 71~75.
- [2] 마산시, 1989, 마산만 정화사업 기본 및 실시 설계서, pp. 140.
- [3] 수질오염공정시험법, 1992, 동화기술.
- [4] 양기섭, 1995, 마산만 수질에 영향을 미치는 오염부하 특성, 경남대학교 석사학위 논문.
- [5] 이찬원 등, 1991, 진해만 일원 오염실태 조사, 환경처, pp. 120~130.
- [6] 이찬원, 권영택, 1994, 퇴적오니 준설과 해양환경변화, 아카데미 예원.
- [7] 이택순 등, 1996, 창원시의 폐수배출 및 처리 현황에 관한 연구, 창원대학교 환경문제연구소 논문집, pp. 229~240.
- [8] 환경부, 과학기술처, 1997, 연안환경개선기술, pp. 112~116.
- [9] 환경처, 1994, 환경백서.
- [10] 창원시, 1996, 2016년을 향한 창원도시계획(안).
- [11] APHA, AWWA, 1992, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 18th Ed.
- [12] Bostrom, B., Persson, G. & B. Broberg, 1988, Bioavailability of different phosphorus forms in freshwater system. Hydrobiologic, Vol. 170, pp 133~155.
- [13] Chiaro, P. S. and Burke, D. A., 1980, Sediment Oxygen Demand and nutrient release, J. Envir. Eng., 106(1), pp. 177~195.
- [14] Ebise & Goda, T., 1985, Regression models for estimating storm runoff load and its application to Lake Kasumigaura. Intern. J. Environmental Studies Vol. 26, pp 73~85.
- [15] Forstner, U. & W. Salomons, 1991, Mobilization of metals from sediment ; Metal and their compounds in the environment. ; Occurrence, Analysis and Biological Relevance, Cambridge, New York, pp. 379~398.
- [16] See Whan Kang, Carl K. Ziegler and Wilbert Lick, 1987, A numerical analysis of sediment transport in an estuary, The Journal

of the Oceanological Society of Korea, Vol. 22,
No. 1, pp. 25~33.

[17] Takanobuinoue and Senichiebise, 1991,
Runoff Characteristics of COD, BOD, C, N, and
P Loadings from Rivers to Enclosed Coastal
Seas. EMECS(90) Vol. 23, pp. 11~14.