

# 마산만의 물수지 및 오염물질 수지분석

○조홍연\* · 채장원\* · 정신태\*\*

## 1. 서론

마산만은 우리나라의 대표적인 폐쇄성 해역(면적 10km<sup>2</sup>)으로, 수려한 경관 및 풍부한 수산자원으로 유명하였다. 그러나, 도시화·산업화의 영향에 의한 과도한 오염물질 부하로 수질 및 저질의 오염문제가 심각한 실정이다. 정부 및 지방자치단체에서는 마산만의 수질을 개선하기 위하여 하수처리장 건설(1993), 퇴적오니 준설(1990-1994) 사업 등을 추진하였으나, 오염물질 부하의 지속적인 증가, 오염물질부하에 대한 상세한 정량적 분석 미흡, 해역 수질항목의 큰 계절별·연별 변동성 등의 영향으로 수질개선 효과에 대한 평가가 명확하게 규명되지 않고 있다.

해역의 수질개선사업은 주로 오염물질의 삭감에 중점을 두어 수행되고 있으므로, 사업의 효과분석은 유역·해역의 물수지 및 오염물질 수지분석에 대한 정량적인 분석을 통하여 효율적으로 수행할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 해역의 수질개선효과를 파악하기 위한 작업의 일환으로, 마산만으로 유입되는 담수 및 오염물질의 정량적인 평가·추정을 통하여 해역에서의 물수지 및 오염물질 수지분석을 수행하였다.

## 2. 물질수지모형의 지배방정식

오염물질 수지모형의 지배방정식은 질량보존식([유입량] - [유출량] = 0)으로 표현할 수 있다. 해역에서의 오염물질량은 수지분석 기간동안은 일정한 값(대표값)을 유지한다고 가정한다. 따라서, 물질수지모형 지배방정식의 풀이과정상 어려움은 수치기법상의 문제가 아니라 유입량 및 유출량을 적절하게 측정·산정하는 방법이 가장 중요한 부분이다.

---

\* 한국해양연구소 연안·항만공학연구센터(경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호, 425-600)

\*\* 원광대학교 토목환경공학과(전라북도 익산시 원광대학교 토목환경공학과 570-749)

입지의 영역(연구대상해역의 분할구획, Fig. 1 & Table 1 참조)에 대한 물질의 유입량 및 유출량은 구획으로 유입(구획의 질량을 증가시키는 방향의 입력) 또는 구획에서 유출(구획의 질량을 감소시키는 방향의 입력)되는 물질의 양으로 구분할 수 있다(Fig. 2 참조).

●  $P_i$  :  $i$  구획의 오염부하량

- ① P : 하천 및 인공적인 시설물(하수관, 하수방류관, 도수관 등)을 통하여 유입, 차단 또는 이동되는 오염부하량 및 기타 점오염원
- ② NP : 강우에 의한 일시적인 오염부하량 및 기타 비점오염원
- ③ TI : 수질개선공법의 적용에 의한 인위적인 물질의 유입 또는 유출

●  $A_i$  :  $i$  구획의 대기와의 오염물질 교환량

- ① AI : 대기로부터의 유입(대기중 오염물질 침강 및 산소공급)
- ② AO : 대기로의 유출량(증발 또는 탈질산화 반응에 의한 대기유출 등)

●  $S_i$  :  $i$  구획(수층)과 퇴적물층(sediment layer)의 오염물질 교환량

- ① BS : 저층의 오염퇴적물로부터의 오염물질의 용출
- ② D : 입자성 물질(particulate matter)의 침전량

●  $R_i$  : 반응 및 분해 등으로 인한 변환량

●  $AE_i$  :  $i$  구획에서 인접한 구획으로의 질량이동량(이송 · 확산에 의한 이동량)

물질수지분석을 수행하기 위하여 가용한 기존자료를 수집하고, 마산 · 창원 유역에서 마산만으로 유입되는 하천의 오염부하량(COD, SS, TN, TP 항목)을 월별로 측정하였으며, 해양방류관에 의한 오염부하량 및 저면 퇴적물로부터의 오염부하량(오염물질 용출량)도 측정 · 수집하였다. 모형의 적용을 위하여, 마산만을 포함한 연구대상 해역을 구획으로 분할하였으며, 분할 영역에 대하여 준설 및 하수처리장 건설 전 · 후의 기간(1990년, 1995년)에 대하여 물수지 및 오염물질 수지양상을 계산하였다. 또한, 마산만의 장기적인 물수지분석을 수행하였으며, 유역의 유출량과 오염물질 부하량의 상관관계도 분석하였다.

### 3. 모형의 입력자료 및 물질수지 양상

#### 3.1 월별 유역유출량 추정

물수지분석 모형에서 가장 중요한 과정은 강우 및 용수공급 자료를 이용한 해역의 유입량(유역의 유출량)의 추정이다. 연안해역으로 유입되는 소하천은 유량 측정 자료가 일시적인 자료에 국한되어 있거나 전무한 실정이므로, 강우자료를 이

용한 간편한 추정방법에 주로 의존한다. 따라서, 본 연구에서는 강우에 의한 유역 유출의 복잡한 과정을 유출계수를 이용하여 표현하는 개념적인 식([유역유출량]=[강우에 의한 유출량]+[공급용수에 의한 유출량])으로 월평균 유역유출량을 추정하였다.

강우 및 용수의 유출계수( $\alpha, \beta$ )는 1995, 1996년 마산만 주요 유입하천인 봉암천, 삼호천 등에 대하여 측정한 하천유출량 자료를 이용하여, 측정된 유출량과 추정식으로 계산된 유역유출량과의 절대편차가 최소가 되는 조건하에서 강우성분의 유출계수를 시행착오법으로 추정하였다. 추정된 유출계수  $\alpha=0.7, \beta=1.0$ 이다.

### 3.2 월별 유역 오염부하량 추정

유역의 오염부하량은 가용한 오염부하량 측정자료를 이용하여, 유량과 오염부하량의 상관관계를 분석한 결과를 토대로 추정하였다. COD, SS 항목은 유역유출량과의 상관계수가 큰 반면, 토지이용도 및 인구 등의 영향을 받는 TN, TP 항목은 유역유출량과의 상관계수가 작은 것으로 분석되었다.

### 3.3 마산만의 물질수지 양상

마산만의 물수지 및 오염물질 수지는 월별로 수행하였으며, 수질개선사업(건설 및 하수처리장 건설) 전·후의 영향을 전반적으로 파악하기 위하여 담수 및 오염물질의 양을 월별로 합산하여 제시하였다(Table 2, 3, 4 참조). 제시한 값의 단위는 일일 유입량으로, 해당기간의 연평균된 값이다.

## 4. 결론 및 토의

마산만 및 인접해역의 물수지에 주요한 영향을 미치는 요소는 강우량, 용수 공급량, 하수처리량이다. 여기서, 강우에 의한 유역유출량의 시기적 변동성이 가장 큰 반면, 용수공급량은 1977년 이후로 꾸준히 증가하다가 1992년 이후 약 380,000톤/일로 급증하여 현재에 이르고 있다. 또한, 하수처리량은 1996년 현재 약 210,000톤/일로, 최대처리용량(250,000톤/일)에 근접하여 하수처리장 증설이 없는 한 큰 변동이 없을 것으로 판단된다. 따라서, 1985년 이전에는 강우에 의한 유출기여율이 지배적이었으나, 1992년 이후는 강우와 용수에 의한 유출기여율이 대등한 수준이나, 계절별(동계·하계) 유출기여율의 상대적인 변화는 매우 크다.

한편, 오염물질의 수지는 유역유출량의 변화에 의하여 오염물질의 총 유입량이 결정되며, 오염물질 유입량이 증가하는 영역은 III 영역이다. 마산·창원 유역에서 발생·배출되는 오염물질이 하수처리장으로 이동·처리·방류되기 때문에, 방류해역인 옥계해역의 오염부하가 발생하였으며, 유입되는 오염물질의 대부분은 침전·회석되고 있는 것으로 추정되었다.

참고문헌

조홍연, 채장원, 1997. 6. 마산만의 장기간 물수지 및 해수교환 특성, 한국해양·해양공학회지, 제9권, 제2호, pp.74-85.  
 한국해양연구소, 1997. 1. 연안환경 개선기술, 제1차년도보고서, 환경부, 과학기술처.  
 한국해양연구소, 1997. 12. 연안환경 개선기술, 제2차년도보고서, 환경부.  
 한국해양연구소, 1995. 5. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구, 제1차년도보고서, 과학기술처.  
 한국해양연구소, 1996. 12. 연안역 이용 및 통합관리를 위한 연구, 제2·3차년도 보고서, 과학기술처.

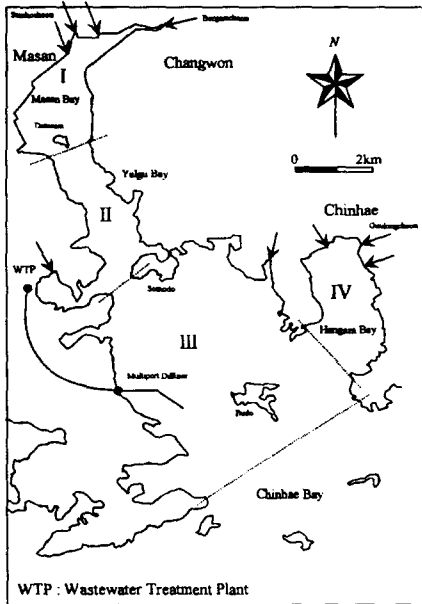
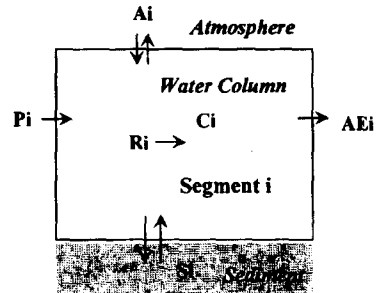


Fig. 1 Zonation of the Masan Bay



Description

- Pi : Point and/or Nonpoint Sources from River, Effluent Pipe and Segments
- Ai : Atmospheric Budget
- Si : Sediment Budget
- AEi : Advection and Diffusion Rate
- Ri : Reaction Rate
- Ci : Conc. of the i-th Segment

Fig. 2 Schematic Diagram of Pollutant Budget Model

Table 1 Zone Information of the Masan Bay

Zone No.	Surface Area ( $\times 10^6 m^2$ )	Ratio of Surface Area	Mean Depth (m)	Water Volume ( $\times 10^7 m^3$ )	Watershed Area ( $km^2$ )	Remark
I (Masan Bay)	9.28	0.125	7.5	6.96	193	I -> II
II (Yulgu Bay)	9.42	0.127	11.1	10.46	-	I -> II -> III
III (Chinhae Bay)	45.85	0.619	11.7	53.65	-	II -> III -->
IV (Hangam Bay)	9.56	0.129	7.7	7.36	46	IV -> III
Sum	74.11	1.000	-	78.43	239	

Table 2. Water Budget Pattern in the Masan Bay

Zone 1 (1990.5 - 1991.4)

Water	Quantity(Ton/Day)	Percentage(%) to Inflow Discharge
Watershed Runoff & Artificial Runoff (WTP Wastewater)	974,866	100
Atmospheric Budget (Precipitation, Evaporation)	7,633	0.8
Zone Outflow Discharge	-982,529	-100.8

Zone 1 (1995.5-1996.4)

Water	Quantity(Ton/Day)	Percentage(%) to Inflow Discharge
Watershed Runoff & Artificial Runoff (WTP Wastewater)	563,158	100
Atmospheric Budget (Precipitation, Evaporation)	-5,619	-0.9
Zone Outflow Discharge	-587,539	-99.1

Zone 3 (1990.5 - 1991.4)

Water	Quantity(Ton/Day)	Percentage(%) to Inflow Discharge
Watershed Runoff & Artificial Runoff (WTP Wastewater)	[+990,308]	100
Atmospheric Budget (Precipitation, Evaporation)	37,861	3.8
Zone Outflow Discharge	-1,028,169	-103.8

Zone 3 (1995.5-1996.4)

Water	Quantity(Ton/Day)	Percentage(%) to Inflow Discharge
Watershed Runoff & Artificial Runoff (WTP Wastewater)	178,818 [+581,836]	100
Atmospheric Budget (Precipitation, Evaporation)	-27,762	-3.6
Zone Outflow Discharge	-732,892	-96.4

Table 3. The major estimated results by the water budget model

Item \ Zone No.	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
Inflow component	watershed runoff precipitation(*)	Zone I outflow precipitation(*)	Zone II, IV outflow effluent discharge precipitation(*)	watershed runoff precipitation(*)
Outflow component	Zone II inflow evaporation(**) wastewater(\$)	Zone III inflow evaporation(**)	open sea outflow evaporation(**)	Zone III inflow evaporation(**)
Daily inflow (DI)	708,329 1,174,298 370,181	716,248 1,206,533 362,950	1,151,040 1,803,856 686,117	205,844 316,917 125,246
Precipitation (P)	37,132 69,136 13,904	37,726 70,242 14,126	183,877 342,361 68,853	38,320 71,348 14,349
Evaporation (E)	29,213 36,091 21,135	29,680 36,668 21,473	144,663 178,723 104,661	30,148 37,246 21,811
Daily outflow (DO=DI+P-E)	716,248 1,206,533 362,950	724,294 1,240,107 355,603	1,190,254 1,967,494 650,309	214,016 351,019 117,784
Ratio(DI/DO) (Dimensionless)	0.989 0.973 1.020	0.989 0.973 1.021	0.967 0.917 1.055	0.962 0.903 1.063
Detention time (Water Vol./DO)	97.2 57.7 191.8	144.4 84.3 294.1	450.7 272.7 825.0	343.9 209.7 624.9

Table 4. Pollutants Budget Pattern in the Masan Bay

COD : Zone 1 (1990.5 - 1991.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Watershed Loads (WTP Wastewater)	83,820	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-76,095	-90.8
Zone Outflow Loads	-7,725	-9.2

Zone 1 (1995.5-1996.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Watershed Loads (WTP Wastewater)	50,878	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-46,130	-90.7
Zone Outflow Loads	-4,748	-9.3

COD : Zone 3 (1990.5 - 1991.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Effluent Loads (WTP Wastewater)	[+7,111]	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-652	-9.2
Zone Outflow Loads	-6,459	-90.8

Zone 3 (1995.5-1996.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Effluent Loads (WTP Wastewater)	15,121 [+3,764]	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-15,496	82.1
Zone Outflow Loads	-3,389	17.9

SS : Zone 1 (1990.5 - 1991.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Watershed Loads (WTP Wastewater)	84,843	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-74,160	-87.4
Zone Outflow Loads	-10,683	-12.6

Zone 1 (1995.5-1996.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Watershed Loads (WTP Wastewater)	48,554	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-42,298	-87.1
Zone Outflow Loads	-6,256	-12.9

SS : Zone 3 (1990.5 - 1991.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Effluent Loads (WTP Wastewater)	[+11,294]	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-2,489	-22.0
Zone Outflow Loads	-8,804	-78.0

Zone 3 (1995.5-1996.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Effluent Loads (WTP Wastewater)	6,054 [+8,979]	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-9,701	-64.5
Zone Outflow Loads	-5,333	-35.5

TN : Zone 1 (1990.5 - 1991.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Watershed Loads (WTP Wastewater)	22,977	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-21,766	-94.7
Zone Outflow Loads	-1,211	-5.3

Zone 1 (1995.5-1996.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Watershed Loads (WTP Wastewater)	14,824	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-13,936	-94.0
Zone Outflow Loads	-888	-6.0

TN : Zone 3 (1990.5 - 1991.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Effluent Loads (WTP Wastewater)	[+884]	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-76	-8.6
Zone Outflow Loads	-808	-91.4

Zone 3 (1995.5-1996.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Effluent Loads (WTP Wastewater)	5,973 [+555]	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-5,987	-91.7
Zone Outflow Loads	-542	-8.3

TP : Zone 1 (1990.5 - 1991.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Watershed Loads (WTP Wastewater)	1,527	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-1,446	-94.7
Zone Outflow Loads	-81	-5.3

Zone 1 (1995.5-1996.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Watershed Loads (WTP Wastewater)	974	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-942	-96.7
Zone Outflow Loads	-32	-3.3

TP : Zone 3 (1990.5 - 1991.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Effluent Loads (WTP Wastewater)	[+73]	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-13	-17.8
Zone Outflow Loads	-61	-82.2

Zone 3 (1995.5-1996.4)

Pollutants	Loads(kg/Day)	Percentage(%)
Effluent Loads (WTP Wastewater)	373 [+18]	100
Source/Sink Budget (Settling & Release)	-376	-96.2
Zone Outflow Loads	-16	-3.8