

# 마산만의 자생 유기물 저감을 위한 단순 박스모델의 적용

홍석진\* · 이원찬\* · 윤상필\* · 박성은\* · 조운식\* · 권정노\* · 김동명\*\*

\* 국립수산물품질관리원 환경연구팀, \*\* 부경대학교 생태공학과

## Reduction of Autochthonous Organics in Masan Bay using a Simple Box Model

Sok Jin Hong\* · Won Chan Lee\* · Sang Pil Yoon\* · Sung Eun Park\* · Yoon Sik Cho\*  
· Jung No Kwon\* · Dong Myung Kim\*\*

\* Environmental Research Team, National Fisheries Research Development Institute

\*\* Major of Ecological Engineering , Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

**요 약 :** 단순 박스모델을 이용하여 2005~2006년 마산만의 담수 유량, 염분, 영양염, COD 등 물질 수지를 산정하였다. 담수수지 계산 결과 계절별로  $307.4 \times 10^3 \sim 1,210 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 이 시기에는 5월이 가장 높았다. 하천과 생활하수에 의한 DIP과 DIN의 유입flux는 각각 410.8~795.7kg/day 및 4081.4~6525.3kg/day 범위로 마산만 내부에서 질소의 축적이 예상된다. 순 기초생산(net primary production)은 연 평균  $0.028 \text{ mol/m}^2/\text{day}$ 로  $14.4 \sim 517.8 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$ 의 범위로 분포하였으며, 평균  $330.7 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$ 였다. 해저 퇴적물로부터의 영양염 공급을 100% 제거할 경우 COD 농도는 2.79mg/L에서 2.20mg/L로 감소하여 COD의 21.0%의 제거 효과가 있는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 물질수지, 단순 박스모델, 순 기초생산, 영양염 수치, 마산만

**ABSTRACT :** Simple box budgets models are useful tools to understand the phenomena of natural system and to provide an insight into the complex processes including physical, chemical and biological processes occurring in natural system. Budgets of fresh water, salt and nutrients were estimated in order to clarify the characteristics of seasonal material cycle in the Masan Bay. Outflow volume of freshwater into system was approximately  $307.4 \times 10^3 \sim 1,210 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ . Inflow masses of DIP and DIN were approximately 410.8~795.7 kg/day and 4081.4~6525.3 kg/day, respectively. DIN is expected to accumulate in the system. The removal of nutrients from bottom sediments will contribute to the reduction of 21.0% of COD concentration in the system.

**KEY WORDS :** Material budget, Simple box model, Net primary production, Nutrient budget, Masan Bay

### 1. 서 론

한반도 남동쪽 진해만 가장 안쪽에 위치한 마산만은 1970년대를 거쳐 마산 수출자유지역과 창원 기계공업단지의 조성으로 인하여 인구가 증가하고, 산업단지와 도시지역에서 배출되는 다량의 산업폐수와 생활하수 유입량의 증가로 인해 해역 자체의 자정능력이 상실되어 부영양화가 진행되어 왔다(황 등, 2006). 특히 마산만은 1999~2004년 기간 평균 COD 농도는 III 등급에 해당하는 수질을 나타내고 있으며(해양수산부, 2005), 하계에는 수질이 악화되어, 저층의 빈산소화와 상시 적조가 발생하고 있는 해역이다. 이와 같은 이유로 마산만의 해양환경을 개선하기 위해 2004년 12월 관계부처 합동으로 '마산만 특별관

리해역 관리 기본계획'을 수립하였고, 동 계획의 일환으로 연안 오염총량 관리제도를 도입·시행하고 있다.

특히 마산만의 하수도 보급률은 97.6%로 전국 하수도 보급률 평균인 81.4%에 비해 매우 높지만 이러한 육상기인 점오염물질 저감 노력에도 불구하고 해양수질환경 개선효과는 여전히 미미한 실정이다(환경백서, 2005). 이는 마산만의 수질관리가 현행의 산소를 소모하는 유기물질의 양을 나타내는 COD를 기준으로 이루어지고 있을 경우, 점오염원에 의한 육상오염부하 유입에 의존하는 것은 한계가 있으며, 비점오염원 부하의 제어와 해저 퇴적물에 의한 부하 유입에 의한 자생 유기물부하의 삭감에 더 관심을 기울여야 한다는 것을 의미한다.

그러나, 이러한 비점오염원 부하와 해저 퇴적물부하, 영양염 유입부하의 삭감에 대한 효과를 분석하는 것은 인력과 시간, 비용을 요구하기 때문에 최근에는 생태계 모델 혹은 부영양화 모델을 이용한 시뮬레이션 작업이 손쉽게 이용되고 있는 추세이

\* 대표저자 : 정희원, eutro@paran.com, 051)720-2255

다. 그러나 현재까지 생태계 모델은 퇴적물과 수층간의 경계면에서의 물질순환의 제 과정이 명확하게 정의되지 않고 정확도와 정밀도가 다소 떨어지며, 오히려 판단에 혼란스러움을 줄 수 있기 때문에 단순화시킨 물질수지의 산정을 통한 물질의 유출입을 고려한 접근방법에 의한 물질순환 해석이 유리할 것으로 생각된다.

Gordon 등(1996)은 복잡한 자연현상을 단순화하고 모든 개개의 과정을 거시적으로 포괄하여 양적인 흐름을 전체적으로 파악할 수 있는 장점을 지닌 단순 박스모델(simple box model)의 활용이 매우 유용하다고 밝힌 바 있으며, 최근에는 LOICZ(Land-Ocean Interaction in Coastal Zone)에서 미래의 상태를 정량적으로 예측하기 위하여 불확실한 항을 감소시킨다는 목적으로 연안역 물질 flux 또는 물질수송에 관한 연구가 진행 중인데, 세토내해(柳, 1997)를 비롯한 양자강 유역(Shen et al., 2000), 동경만, 이세만, 오사카만(Smith and Yanagi, 1997), Gulf of Riga(Savchuk and Swaney, 1999), 체사피크만(Boynton, et al., 1995)등 많은 해역을 대상으로 적용되었

요인을 내재하고 있는 마산만을 대상으로 2005년~2006년 계절별 물질수지(담수유량수지, 염분수지, 비보존성 물질수지)를 산정하였으며, 화학 양론적인 고찰을 통해 퇴적물로부터의 영양염 공급을 제거 하였을 경우에 COD 농도의 변동에 관한 거시적 이동 특성을 고찰하고, 마산만의 수질관리를 위한 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 단순 박스모델

### 2.1 단순 박스모델 개요

단순 박스모델(Simple Box model)인 물질수지모델(LOICZ, Land-Ocean Interaction in Coastal Zone)은 미래의 상태를 정량적으로 예측하기 위해 불확실한 항을 감소시킨다는 목적으로 연안역의 물질 flux를 간단히 계산하는 방법으로 그 개념과 계산 수행 방법을 Fig. 1 에 나타낸 바와 같다. 수지모델(Budget model)은 대상해역의 시스템구간 해역내 일정기간 동안 대상인자의 물질수지를 계산하기 위하여 실측자료를 이용하

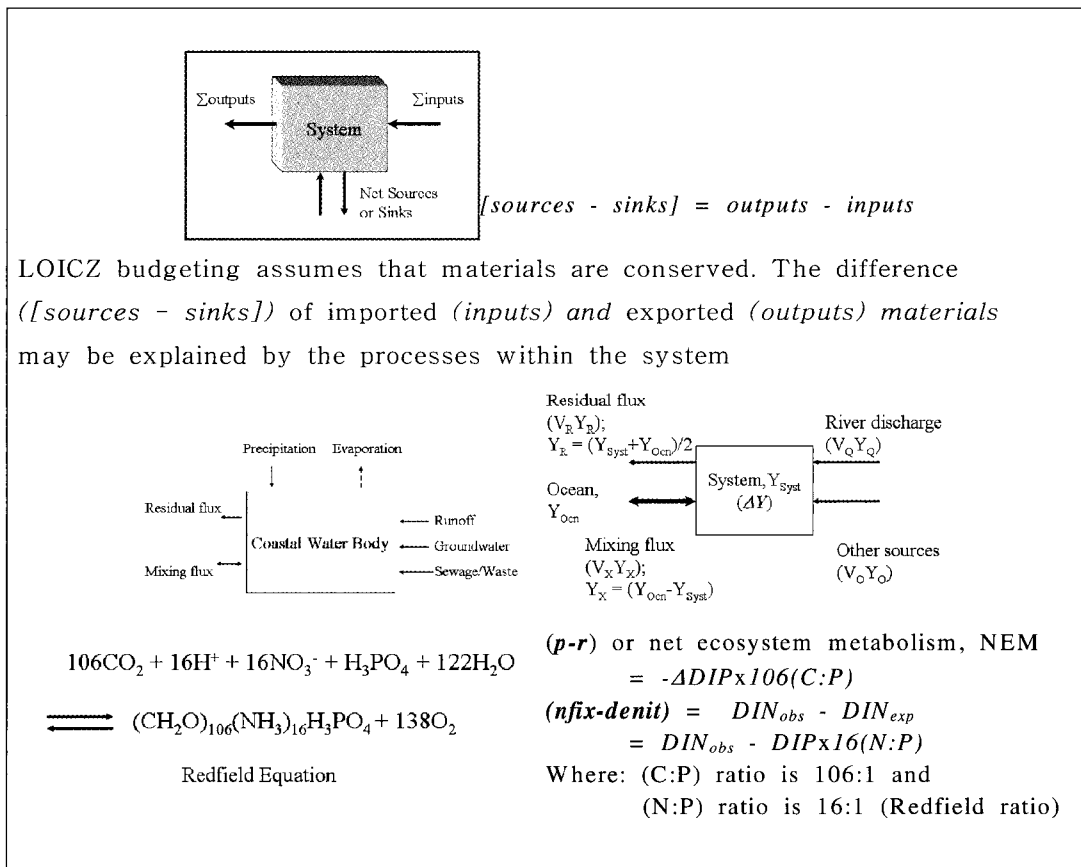


Fig. 1. Conceptual diagram of simple box model(Gordon et al., 1996).

으며, 국내에서도 낙동강 하구해역(홍 등, 2000)과 금강 하구해역(김 등, 2000)에서 물질수지 계산에 적용된 바가 있다.

본 연구에서는 연안 해역의 물질수송 해석을 위한 박스모델 형태의 물질수지 모델을 이용하여, 주변의 다양한 환경적 변화

여 물질 유입flux와 유출flux를 구하고 그 결과를 해석하여 대상해역에서의 물질의 순환 및 이동특성을 밝히는데 이용할 수 있다. 즉, 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dM}{dt} = \sum inputs - \sum outputs + \sum [sources - sinks] \quad (1)$$

시간에 따른 물질의 변화량은 (1)식과 같이 단순화할 수 있으며, 좌변은 일정한 것으로 가정한다. 물질수지모델은 대상물질의 유·출입을 직접적으로 관찰하고 거동을 표현하는 것이 아니므로 대상해역 내부에서의 물질순환과 이송과정을 밝힐 수 없다. 그러나 개방경계를 통한 물질의 유·출입 flux를 알면 시스템 내부해역에서의 물질의 물리, 화학 및 생물학적 과정의 결과를 추정하는 것은 가능하다.

따라서 모델의 단순화 작업을 통하여 시스템 내의 반응을 하나의 total reaction으로 보고 물질의 변환을 해석함으로써 차후 복잡한 구조를 가진 생태계로의 접근이 용이해진다. 따라서 단순화, 종합화된 box모델은 해수교환이 많고 물질의 체류시간이 짧아 오염물질의 분자확산에 의한 변화보다 이류에 의한 기여도가 큰 만이나 하구해역에 적용이 적합한 특성을 가진다. 연안해역에서는 물질수지에는 담수유량의 수지와 보존성물질인 염분의 변화 그리고 질소, 인과 같은 용존성 및 입자성 물질 사이의 비보존적 변화, 탄소와 같이 해면의 가스교환을 통한 변화 등 다양한 물질순환 과정이 존재한다. 이들의 물질수지계산은 각각 다르다.

## 2.2 담수유량수지

시스템의 체적(V)은 유입과 유출에 있어 균형을 이루므로 보존된다고 가정한다.

$$\frac{dV}{dt} = Q + P + G + O - E - R \quad (2)$$

여기서,  $dV/dt$ 는 모델화한 연안해역 유량의 시간변동량( $m^3/month$ ), Q는 하천수 유입량( $m^3/month$ ), P는 해면으로의 강수량( $m^3/month$ ), G는 지하수 유입량( $m^3/month$ ), O는 공장폐수·하수유입량( $m^3/month$ ), E는 해면에서의 증발량( $m^3/month$ ), R은 외양경계를 통한 유출수량( $m^3/month$ )을 나타낸다.(2)식의 우변항 중 직접 관측 또는 계산이 불가능한 R은 전체 물수지 계산에서 산정한다.

대상해역의 담수 존재량( $V_f$ )을 담수 유출량(R)으로 나누어 정의한 담수의 평균체류시간  $\tau_f$ 는 물질수지모델에서의 시간 scale의 결정요인이 된다.

$$\tau_f = \frac{V_f}{R} \quad (3)$$

모델 해역내 담수 존재량  $V_f$ 는 식(4)와 같고, S1은 시스템내 평균농도, S2는 외양의 대표염분을 나타낸다.

$$V_f = \frac{(S_2 - S_1)}{S_2} V \quad (4)$$

## 2.3 염분수지(보존성물질)

모델 영역내에서의 염분변동을 (5)식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d(SV)}{dt} = QS_Q + PS_P + GS_G + OS_O - ES_E - RS_1 - V_X(S_1 - S_2) \quad (5)$$

여기서, S1은 모델영역내 평균염분농도(%), SQ는 하천수의 염분농도(%), SP는 강수의 염분농도(%), SG는 지하수의 염분농도(%), SO는 공장폐수 및 하수중 염분농도(%), SE는 증발에 의해 소실되는 염분농도(%), VX는 외양경계를 통한 해수교환량, S2는 외양의 염분농도(%)를 나타낸다.

S1과 S2를 제외한 값들은 통상 0로 가정될 수 있으며, V를 일정하다고 가정할 때 (5)식은 (6)식으로 표현할 수 있다.

$$V \frac{dS_1}{dt} = -RS_1 - V_X(S_1 - S_2) \quad (6)$$

(6)식의 미지항은 개방경계에서의 해수교환량 VX로서 정상상태에서의 평균염분자료를 이용하여 (7)식으로 구한다.

$$V_X = \frac{RS_1}{S_2 - S_1} \quad (7)$$

만의 체적 V를 VX로 나누면 외양수에 의한 만내수의 평균교환시간  $\tau^*$ 를 구할 수 있다.

## 2.4 영양염 수지(비보존성물질)

비보존성물질인 영양염류의 수지를 나타내는 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 영양염류의 농도를 Y로 보았을 때 Y의 박스내에서의 변동을 (8)식으로 표현할 수 있다.

$$V \frac{dY_1}{dt} = QY_Q + PY_P + GY_G + OY_O + RY_1 - V_X(Y_1 - Y_2) + \Delta Y \quad (8)$$

Y는 물질의 농도( $mg/L$ ), Y1은 시스템내 비보존성 물질의 농도( $mg/L$ ), Y2는 외양의 농도( $mg/L$ )를 의미한다. 첨자는 염분과 같이 하천유출(Q), 강수(P), 증발(E), 하수(O)를 의미하고,  $\Delta Y$ 는 비보존성물질의 생성 및 소멸항이다. 관측자료로부터  $\Delta Y$ 를 제외한 모든 자료를 구하여 (8)식에서  $\Delta Y$ 를 추정한다.  $\Delta Y$ 가 (+)면 생성을, (-)면 소실을 의미한다.  $\Delta Y$ 에는 광합성, 섭식, 포식, 사망, 분해, 퇴적, 용출 등 전체의 화학, 생물학적 과정에 의한 변환과정을 포함하고 있다.

## 2.5 COD 수지

Fig. 2에는 마산만의 COD 농도에 관한 물질의 수지를 산정하기 위한 유입과 유출의 개념을 나타내었다. 마산만의 COD 농도는 물리적 과정과 생물학적 과정으로 구분할 수 있다.

물리적 과정에 의해서는 육상오염원인 하천이나 하수처리장의 유출수, 대기 강하유기물 혹은 지하수의 유출 등에 의한 직접유입에 따른 희석 확산의 과정이 포함될 수 있다.

현재 해역 수질 기준항목으로 사용되는 COD는 특정한 물질이 아니라 수중에서 산소를 소모하는 유기물질의 양을 나타내므로 단순한 유·출입구조로 설명하기는 힘들다(김, 2005). 모델에서 제외로부터 유입되는 COD 부하량은, 현탁성 및 용존성 유기물의 유입 부하량과의 관계로 정의되며, 해역의 특성에 따라 식물플랑크톤의 양으로 단순화할 수 있다.

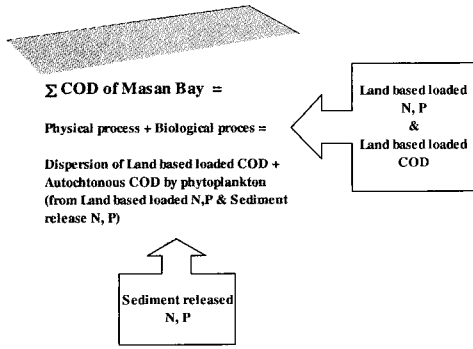


Fig. 2. Conceptual diagram of COD formation in simple box model.

생물학적 과정에서는 육상오염부하에 의한 영양염과 저질 용출영양염 혹은 기타 유입원에 의한 영양염이 식물플랑크톤에 의해 흡수되고, 동물플랑크톤에 의한 포식과 자연사멸, 침강 등의 재 과정이 포함된다. 그러므로, 저질 용출영양염에 의한 COD 농도의 기여를 고려하기 위해서는 영양염 섭취에 의한 자생 COD의 증감에 대해 고려하여야 한다. 즉, 육상부하에 의한 질소를 N(Land), 저층용출에 의한 질소를 N(Sed)라 할 때 COD(Land)와 COD(Sed)의 값을 이해하기 위해서는, COD(Sed)로 표현할 수 있는 영양염의 COD로의 변환을 설명하여야 한다. 이에 관해서는 현장실험을 통하지 않을 경우 몇 가지의 과정을 통해 추정 하기는 어렵지만, 몇 가지의 가정과 단순화를 통하여 전체 과정을 개략적으로나마 이해할 수 있을 것이다. 따라서, 생태계 모델과 현장관측결과 또는 simple box의 생물생산추정(Gordon 등, 1996)등을 이용하여 산정된 영양염과 NEM(net ecosystem metabolism)과의 관계를 통해 마산만의 내부생산량 변화요인인 퇴적물의 준설 효과를 추정하였다.

### 3. 물질수지 계산결과

#### 3.1 계산의 입력조건

대상 영역의 면적은 약 74.0km<sup>2</sup>로, 평균 수심은 약 10m로 만 내측과 외측의 수심차가 다소 크며, 수체의 체적은 7.5×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>이다. 전체적인 모델영역은 반 폐쇄적 내만영역을 기준으로 하였으며(Fig. 3), 계산에서 적용된 조건은 Table 1에 나타내었다.

강우량은 마산지역의 해당 월 강우량에 계산영역의 표면적을 곱하여 산정하였고, 증발량의 경우는 논란이 많으나 동일한 조건으로 계산하였으며, 지하수 유출량도 강우량 및 계절별로 큰 차이가 있겠지만, 동일하게 적용하였다. 시스템내의 염분, 영양염 농도는 해당시기의 관측자료를 입력하였으며, 외양의 염분, 영양염은 해당시기의 연안 정선관측자료(2005~2006, NFRDI)를 이용하였다. 또한, 계절적으로 차이가 있을 수 있는 영양염 용출의 자료도 계절적 구성이 부족함으로 계절별로 동일한 값을 적용하였다. 유입하천의 영양염 농도는 관측 값을 사용하였는데, 하천수 중의 인산인 농도는 총인(TP)으로 측정되어 수치계산을 위하여 TP에 대한 DIP의 비율을 계절별로 적용

하였다. 적용비율은 신 등(1995)이 낙동강에서 측정한 TP와 DIP의 비율을 계절별로 적용하였는데, 춘계~동계의 값이 각각 24.0%, 24.1%, 34.9%, 52.6%를 적용하였다.

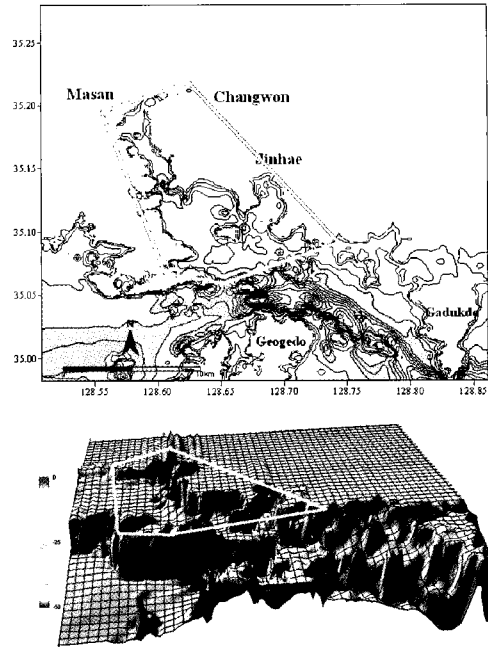


Fig. 3. Map of the system boundaries and 3D depth in the Masan bay.

#### 3.2 조건에 따른 물질수지의 계산 결과

담수수지 계산 결과 담수유출량은 계절별로 307.4×10<sup>3</sup>~1,210×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day 으로, 강우량이 제일 크게 나타난 5월에 담수 유출이 가장 많았다. 염분수지의 계산결과 담수의 체류시간은 건기에 21.6~97.0 일로 넓게 분포하였으며 연 평균 60.7 일로 계산되었다. 이는 같은 방법으로 계산된 낙동강 하구에서의 2.0 일(홍, 1998), 금강하구(김 등, 2000)에서의 2.2~11.9 일의 범위에 비해 내만적인 특성을 보이고 있다. 개방경계에서의 해수 교환량은 건기에 7.2×10<sup>3</sup>~32.3×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day 으로 계절별로 다소의 차이가 있다.

대상해역 내 DIP의 평균농도는 0.34~1.74mmol/m<sup>3</sup>의 범위였고, 외해역의 DIP 평균농도는 0.23~0.99mmol/m<sup>3</sup>이었다. 하천수의 DIP 유입농도는 0.34~1.74mmol/m<sup>3</sup>로서, 하천과 생활하수에 의한 DIP의 유입flux의 범위는 410.8~795.7kg/day 이었다.

대상해역의 DIN의 평균농도는 8.54~33.30mmol/m<sup>3</sup>의 범위였고, 외해역의 DIN 평균농도는 4.29~13.71mmol/m<sup>3</sup>이었다. 하천수의 DIN 유입농도는 493.43~709.87mmol/m<sup>3</sup>로서, 하천과 생활하수에 의한 DIN의 유입 flux의 범위는 4081.4~6525.3 kg/day 이었다.

마산만의 자생 유기물 저감을 위한 Simple Box Model의 적용

Table 1. Input data for material budget

Item		Nov, 2005	Feb, 2006	MAY, 2006	Aug, 2006
Precipitation	$V_p, m^3/d$	78,687	83,867	702,753	378,633
Evaporation	$V_e, m^3/d$	220,763	220,763	220,763	220,763
River inflow	$V_r, m^3/d$	422,034	444,844	696,769	944,591
Groundwater inflow	$V_g, m^3/d$	27,397	27,397	27,397	27,397
Salinity & Nutrients	$Sal_{sys}, psu$	31.72	32.88	32.36	22.25
	$DIN_{sys}, mmol/m^3$	18.15	8.54	11.08	33.30
	$DIP_{sys}, mmol/m^3$	1.12	0.34	1.13	1.74
	$Sal_{ocn}, psu$	33.11	33.68	33.59	28.57
	$DIN_{ocn}, mmol/m^3$	10.31	4.29	13.71	8.60
	$DIP_{ocn}, mmol/m^3$	0.79	0.40	0.99	0.23
	$Sal_{input}, psu$	0.00	0.00	0.00	0.00
	$DIN_{input}, mmol/m^3$	709.87	655.34	570.63	493.43
	$DIP_{ocn}, mmol/m^3$	31.4	30.14	30.30	27.17

Table 2. Calculated nutrients fluxes of DIP in the Masan bay system

Season	Benthic Flux condition		No Benthic Flux condition		Ratio
	$\Delta Y(\Delta DIP)$	p-r(NEM)	$\Delta Y(\Delta DIP)$	p-r(NEM)	
	ton/month	mol/m <sup>2</sup> /day	ton/month	mol/m <sup>2</sup> /day	
Nov, 2005	-16.84	0.026	-8.41	0.013	49.9%
Feb, 2006	-9.82	0.016	-1.94	0.003	19.8%
May, 2006	-16.73	0.025	-8.01	0.012	47.9%
Aug, 2006	-28.95	<b>0.043</b>	-20.23	<b>0.030</b>	<b>69.9%</b>
Avg.	-18.09	0.028	-9.65	0.015	52.8%

Table 3. Calculated nutrients fluxes of DIN in the Masan bay system

Season	Benthic Flux condition		No Benthic Flux condition		Ratio
	$\Delta Y(\Delta DIN)$	Nfix-Dnit	$\Delta Y(\Delta DIN)$	Nfix-Dnit	
	ton/month	mol/m <sup>2</sup> /day	ton/month	mol/m <sup>2</sup> /day	
Nov, 2005	-172.61	-0.002	-123.99	-0.002	124.4%
Feb, 2006	-158.81	-0.003	-113.43	-0.003	113.2%
May, 2006	-216.31	-0.003	-166.07	-0.003	113.5%
Aug, 2006	-242.25	-0.001	-192.01	-0.001	138.8%
Avg.	-197.49	-0.002	-148.88	-0.003	118.5%

대상해역 내에서 DIN과 DIP의 유입량 및 유출량의 변화와 단위면적당 변화량을 Table 2~3에 나타내었다. 여기서 비보존성물질의 생성 및 소멸을 의미하는  $\Delta Y$ 는 (+)항일 경우 생성을, (-)항일 경우 소멸을 의미한다. 생성의 경우 유기체의 사망과 분해, 용출, 유입 등에 의한 영양염의 증가를 의미하고, 소멸의 경우 광합성, 생물의 섭식, 퇴적, 유출 등의 영양염 감소를 나타낸다. DIP와 DIN 모두의 경우에서 조류의 광합성에 의한 소비와 강우 시 부유사 유출에 의한 퇴적 그리고 외해로의 유출 증가로 인하여 영양염의 소멸이 일어남을 알 수 있다.

$\Delta DIP$ 의 경우 하계 소실된 양이 모두 광합성에 의한 것으로 가정하여 Redfield 비(N:P=16:1)를 적용하여 동일량의 DIN으로 바꾸면 289.38ton/month가 되는데, 이 값은  $\Delta DIN$ 의 소실량인 197.49ton/month(Table. 3)와 큰 차이가 없다.

이는 DIP의 소실이 외해로의 유출과 퇴적작용에 의한 영향을 받을 뿐만 아니라, 마산만에서는 식물플랑크톤에 의해 주도되는 구조임을 짐작할 수 있으며, 장기적으로 시스템 내부에서의 질소의 축적이 예상된다고 볼 수 있다.

또한, Fig. 1의 모델의 정의에서 나타난 바와 같이 마산만에

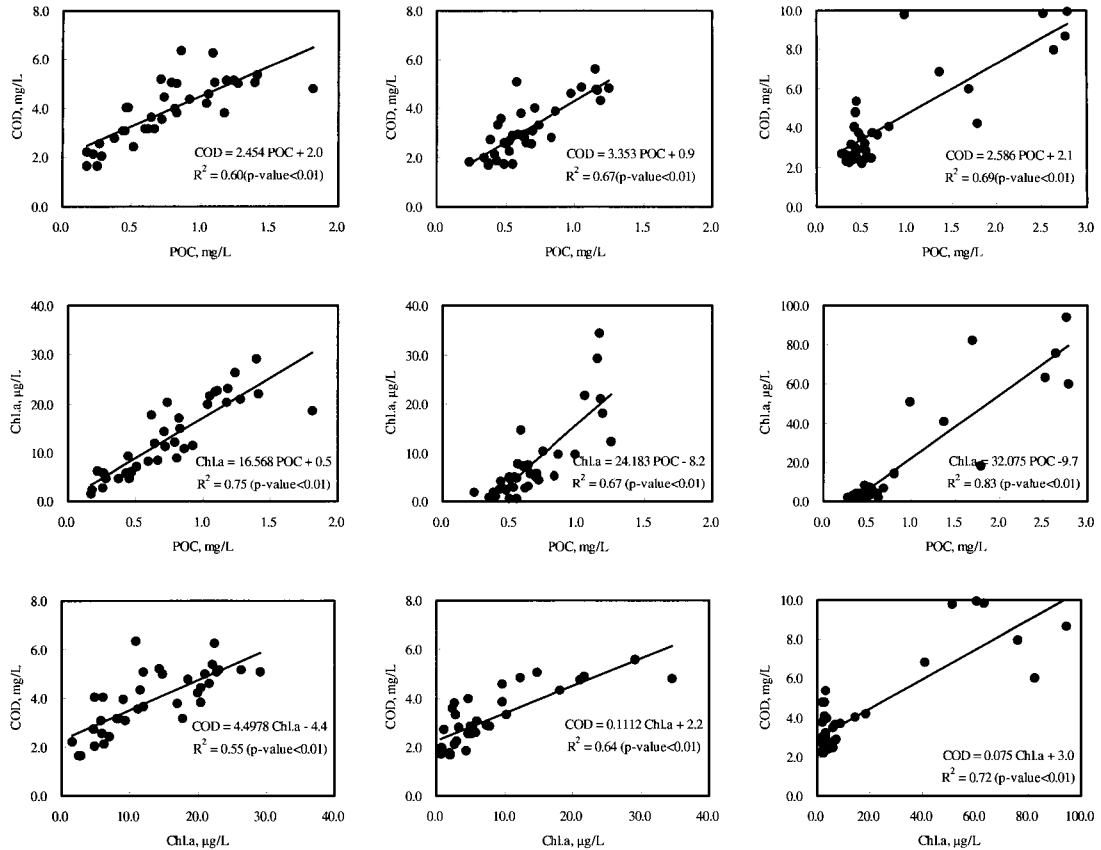


Fig. 4. Correlation among COD, Chl.a and POC in Masan bay, Feb.~Aug., 2006.

서의 주된 기초생산자를 식물플랑크톤이라고 가정하고, Redfield ratio, C:P = 106:1, 이라고 할때, 순 기초생산(net primary production) 은 연 평균 (p-r) = 0.028mol/m<sup>2</sup>/day로

14.4~517.8mgC/m<sup>2</sup>/day의 범위로 분포하였으며, 평균 330.7 mgC/m<sup>2</sup>/day으로 계산되었다. 이 값은 김(2003)이 생태계 모델로부터 산정한 마산만 평균값인 200mgC/m<sup>2</sup>/day, 마산만 중심부의 400~1,000mgC/m<sup>2</sup>/day의 값에 범위의 크게 차이가 나지 않으나, 심과 박(1986)이 관측한 한국 동남해역의 700~2,700mgC/m<sup>2</sup>/day의 값과는 다소 차이가 있다. 질소 고정-탈질(Nitrogen fixation minus denitrification, nfix-denit) flux는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 다음의 식에서 추정할 수 있다.

$$(nfix-denit) = (\Delta DIN) - (\Delta DIP)(N:P)part \quad (9)$$

여기서, (N:P)part 는 마산만에서의 DIN과 DIP의 몰 비(mol ratio)를 말하는데, 이 식을 이용하여 질소 고정-탈질을 계산한 결과는 탈질이 0.001~0.003mol/m<sup>2</sup>/day가 일어나고 있다. 이는 만의 면적이 10배 정도 작고, 체류시간이 20여일로 마산만에 비해 규모가 작은 Dokai 만(Yanagi and Yamada, 2000)의 0.0006 mol/m<sup>2</sup>/day에 비해 5배 정도 큰 값이다.

### 3.3 퇴적물로 부터의 영양염 공급의 삭감

Fig. 4에는 2006년의 2월, 5월, 8월의 관측값을 바탕으로 한 마산만의 COD와 Chl.a, POC 농도 간의 상관관계를 나타내었다. 이것은 마산만의 COD 농도는 입자 유기물질의 양과 관계가 깊으며, 특히 하계로 진행될 수록 높은 상관관계를 보이고 있다. 또한, 입자 유기물질은 식물플랑크톤의 생체량과 상관관계가 높고, COD 값 자체도 식물플랑크톤 농도와 높은 상관관계를 나타내고 있다.

따라서, 마산만의 산소를 소모하는 유기물질의 양을 제어하기 위해서는 식물플랑크톤의 성장을 제어하는 방안을 강구해야 하는데, 여러 가지 방안 중에서 퇴적물로부터 공급되는 영양염을 차단하는 것이 하나의 효과적인 방안이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서의 마산만 내의 물질순환은 완전혼합으로 가정하였기 때문에, 5월이 지나면서 마산만 전역에 나타나는 수온성층에 의한 물질 전달의 저해 등은 없다고 볼 수 있으며, 이 경우 퇴적물로부터의 용출되는 영양염은 100% 표층부근에서의 기초생산에 이용된다고 가정할 수 있다. 이때, 퇴적물로부터의 공급되는 영양염의 영향을 추정하기 위해, 공급항을 0으로 하여 비교하였다. 이 경우 NEM에 의한 기초 생산량의 값은 38.5~361.9mg C/m<sup>2</sup>/day 로 평균 174.8mg C/m<sup>2</sup>/day의 값을 보였다. 본 연구에서 적용한 용출자료는 2006년 6~10월 관측 자료를

사용하였는데, 동계, 춘계 및 추계의 자료가 부족하여 평균값으로 전 계절에 적용하였다. 퇴적물로부터의 영양염 용출량은 일반적으로 온도의 함수이기 때문에 계절변화에 따라 값이 달라질 것이라고 판단되기 때문에 절대적인 값은 8월의 수치 값으로 비교하였다.

8월의 NEM에 의한 기초 생산량의 값은 517.8 mgC/m<sup>2</sup>/day 이었으며, 퇴적물로부터의 영양염의 Benthic flux가 없다고 가정할 경우에는 361.9mgC/m<sup>2</sup>/day 로 NEM에 의한 기초 생산량의 값의 약 30%가 줄어든다.

NEM에 의한 기초 생산량의 값은 유기물인 탄소량을 나타내는데, 이 값은 정확히 COD의 농도를 대변한다고는 볼 수 없고, 외부의 COD 유입에 의한 영향을 제외한 순 내부 생산량만을 나타낸다고 볼 수 있다.

식 내부의 값에서 NEM에 의한 기초 생산량의 값을 자생 COD의 값을 나타낸다고 볼 때 낙동강하구에서의 자생 COD(신 등, 1995)는 전체 COD의 30.6~46.2%에 해당하였고, 마산만을 포함한 전체 진해만의 경우 자생 COD 값은(엄, 2007) 산정 방법에 따라 전체 COD 값의 약 42 ~70 % 정도를 차지한다고 하였다.

마산만의 기초생산에 의한 생물학적 과정에서의 COD 값은 생태계 모델 연구를 통해 검증을 받아야 하겠지만, 대략적으로 진해만 전역에서 계산 되었던 70%를 적용할 경우, 마산만의 최근 10년 평균 COD 농도인 2.79 mg/L에서 1.95 mg/L 가 자생 COD라고 할 때, 퇴적물로부터의 영양염 공급을 100% 제거 할 경우 2.20 mg/L 으로 COD의 21.0%의 제거 효과가 있는 것으로 나타났다.

이때, 퇴적물로부터의 영양염 공급을 0~100 % 삭감하였을 경우의 NEM 변화를 Fig. 6에 나타내었으며, 자생 COD로부터 추정되는 COD의 양의 변화를 Table 4와 Fig. 5에 나타내었다. 이에 따르면, Simple box model의 물질수지 계산을 통해 추정하였을 때 저질 용출로부터의 영양염 공급을 100% 제거 할 경우 2.20 mg/L 으로 COD의 21.0%의 제거 효과가 있는 것으로 나타났다.

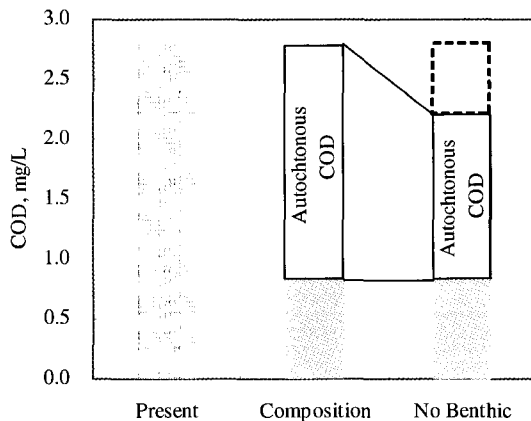


Fig. 5. Concept of COD reduction efficiency by cut down of benthic nutrients flux.

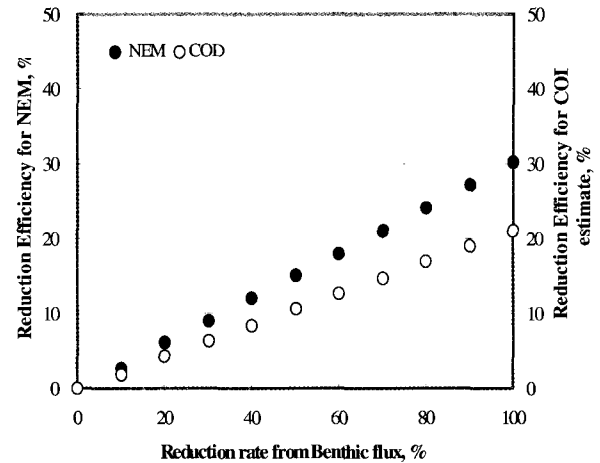


Fig. 6. Relationship Reduction rate from benthic flux and Reduction Efficiency for COD.

Table 4. Relationship Reduction rate from benthic flux and Reduction Efficiency for COD

Reduction rate from Benthic flux	Autochthonous COD	Total COD	Reduction Efficiency for COD estimate
%	mg/L	mg/L	%
0	1.95	2.79	0.0
10	1.90	2.74	1.9
20	1.84	2.67	4.2
30	1.78	2.61	6.3
40	1.72	2.56	8.4
50	1.66	2.50	10.5
60	1.60	2.44	12.6
70	1.54	2.38	14.7
80	1.48	2.32	16.9
90	1.42	2.26	19.0
100	1.37	2.20	21.1

#### 4. 결론

담수수지 계산 결과 담수유출량은 계절별로 307.4×10<sup>3</sup>~1,210×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day 로 나타났으며 개방경계에서의 해수 교환량은 건기에 7.2×10<sup>3</sup>~32.3×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day 으로 계절별로 다소의 차이가 있다. 하천과 생활하수에 의한 DIP의 유입flux의 범위는 410.8~795.7kg/day 이었고, DIN의 유입 flux의 범위는 4081.4~6525.3kg/day 이었다. DIP의 소실이 외해로의 유출과 퇴적작용에 의한 영향을 받을 뿐만 아니라, 마산만에서는 식물플랑크톤에 의해 주도되는 구조임을 짐작할 수 있으며, 장기적으로 시스템 내부에서의 질소의 축적이 예상된다고 볼 수 있다. 마산만에서의 주된 기초생산자를 식물플랑크톤이라고 가정하고, Redfield ratio, C:P = 106:1, 이라고 할때, 순 기초생산(net

primary production) 은 연 평균  $(p-r) = 0.028 \text{ mol/m}^2/\text{day}$ 로  $14.4 \sim 517.8 \text{ mgC/m}^2/\text{day}$ 의 범위로 분포하였으며, 평균  $330.7 \text{ mg C/m}^2/\text{day}$ 으로 계산되었다. 이에 따르면, Simple box model의 물질수지 계산을 통해 추정하였을 때 저질 용출로부터의 영양염 공급을 100% 제거 할 경우  $2.20 \text{ mg/L}$ 으로 COD의 21.0%의 제거 효과가 있는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(연안어장환경용량산정연구, RP-2007-ME-026)의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] 국립수산과학원 홈페이지, <http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata>, 국가해양오염 측정망 및 정선해양관측 자료, 2005~2006.
- [2] 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr>, 강우량 및 증발량 자료, 2005~2006.
- [3] 김동명(2003), 생태계모형을 이용한 마산만의 환경특성 평가, 한국환경과학회지, 제12권, 제8호, pp. 841-846.
- [4] 김종구, 김동명, 양재삼(2000), Box 모델을 이용한 금강 하구해역의 물질수지 산정, 한국해양환경공학회지, 제3권, 제4호, pp. 76-90.
- [5] 신성교, 박청길, 송교욱(1995), 낙동강 하구해역의 자생 COD평가, 한국수산학회지, 제28권, 제3호, pp. 263-269.
- [6] 심제형, 박용철(1986), 한국 동남해역의 해양기초생산력 ( $C^{14}$ )과 질소계영양염 동적 관계, 한국해양학회지, 제21권, 제 1호, pp. 13-24.
- [7] 엄기혁(2007), 이매패의 생물정화기작을 이용한 마산만의 수질개선방안, 박사학위논문, 부경대학교, 환경공학과, 부산, pp. 32.
- [8] 홍석진(1998), 낙동강 하구해역의 담수, 질소 및 인수지, 석사학위논문, 부경대학교, 환경공학과, 부산, pp. 25.
- [9] 홍석진, 이대인, 김동명, 박청길(2000), 낙동강 하구해역에서의 단순 박스모델에 의한 물질수지, 2000년 한국해양환경공학회지 제3권 제3호, pp. 50-57.
- [10] 환경백서(2005), 환경부, 11-1480000-000586-10, pp. 504
- [11] 황동운, 진현국, 김성수, 김정대, 박종수, 김성길(2006), 마산항 표층 퇴적물의 유기물 및 금속원소의 분포, 한국수산학회지, 제39권, 제2호, pp. 106-117.
- [12] 해양수산부(2005), 해양오염 퇴적물 조사 정화·복원체계 구축(Ⅱ), pp. 1-65.
- [13] 柳哲雄(1997), “東京灣, 伊勢灣, 大阪灣の 淡水・鹽分・DIP・DIN 收支”, 沿岸海洋研究ノト, Vol. 35, No. 1, pp. 25-33.
- [14] Boynton, W.R., J.H. Garber, R. Summers, W.M. Kemp. (1995), Inputs, transformations, and transport of nitrogen and phosphorus in Chesapeake Bay and selected tributaries, Estuaries, Vol. 18(1B), pp. 285-314.
- [15] Gordon, D.C. Jr., P.R. Boudreau, K.H. Mann, J.-E. Ong, W.L. Silvert, S.V. Smith, G. Wattayakorn, F. Wulff, T. Yanagi(1996), LOICZ “Biogeochemical Modelling Guideline”, LOICZ Reports & Studies No. 5. Second Edition, LOICZ, Texel, The Netherlands, pp. 99.
- [16] Savchuk O. P., Swaney D. P.(1999), Water and Nutrient Budgets of the Gulf of Riga, <http://nest.su.se/mnode/Europe/Gulf%20of%20Riga/rigabud.htm>
- [17] Shen Huan-Ting, Huang Qing-Hui, Liu Xin-Cheng(2000), Fluxes of the dissolved inorganic nitrogen and phosphorus through the key interfaces in the Changjiang estuary, <http://nest.su.se/mnode/Asia/SEASIA/HTML>
- [18] Smith S, Wulff F.(1998), Description of Budgets Worldwide map, LOICZ Bio-geochemical Modelling Node, <http://data.ecology.su.se/MNODE/>.
- [19] Smith S. V. Yanagi T.(1997), NP Budgets for three Japanese Bays, <http://nest.su.se/mnode/Asia/Japan/threebays/JFBudHTML>
- [20] Yanagi, T., Yamada, M.(2000), Budgets of water, salt and nutrients during summer in Dokai Bay. <http://nest.su.se/mnode/Asia/Japan/dokai/dokai.htm>, LOICZ Bio-geo chemical Modelling Node by IGBP.

원고접수일 : 2007 년 6월 10 일

원고채택일 : 2007 년 6월 27 일