

# 2002년 하계 마산만의 수질개선을 위한 환경용량산정 모델링

홍 석 진\* / 이 원 찬\*\* / 박 성 은\*\*\* / 정 래 홍\*\*\*\*  
조 윤 식\*\*\*\*\* / 박 종 수\*\*\*\*\* / 김 동 명\*\*\*\*\*<sup>†</sup>

The Ecological Modeling for Estimation of Carrying Capacity  
in Masan Bay in 2002 summer

Sok Jin Hong\* / Won Chan Lee\*\*<sup>†</sup> / Sung Eun Park\*\*\* / Rea Hong Jung\*\*\*  
Yoon Sik Cho\*\*\*\* / Jong Su Park\*\*\*\*\* / Dong Myung Kim\*\*\*\*\*<sup>†</sup>

**요약** : 본 연구는 마산만에서 육상기원 오염부하와 퇴적물로부터의 부하에 의한 해수 수질의 응답특성과 환경용량을 2002년 하계의 관측 자료를 바탕으로, 생태계 모델링을 이용하여 산정하였다. 만 내측의 잔차류는 0.1 ~ 1.5 cm/s의 크기로 비교적 현상과 유사하게 재현되었는데, 표층에서는 잔차류가 남향으로 저층에서는 북향류를 이루고 있어서, 육상으로부터 유입된 오염물질이 쉽게 만 외부로 빠져나가는 것이 힘들다. 모델링결과 COD 분포는 육상오염부하가 큰 만 내측에서 3 mg/L이상의 높은 값을 나타내고 있다. 목표수질 해역 I 등급(COD 1 mg/L)을 달성하기 위한 오염원별 삭감 부하량은 유기물(COD)과 영양염을 80%이상 삭감해야하는 것으로 나타났다. 또한, 해역 II등급(COD 2 mg/L)을 달성하기 위한 오염원별 삭감 부하량은 유기물(COD)과 영양염을 50%이상 삭감하여야 하는 것으로 나타났다. 각각의 경우 COD의 환경용량은 2.32 ton/day 와 7.16 ton/day로 나타났다.

**핵심용어** : 해수수질, 육상기원 오염부하, 환경용량, COD, 마산만

**Abstract** : This study focused on coastal water quality response to land-based and sediment pollution loads and estimation of the carrying capacity in Masan Bay using an ecological model with the data in summer of 2002. A residual current was simulated to have a slightly complicated pattern with ranging from 0.1 to 1.5 cm/s. In Masan Bay, pollutant materials cannot flow from the inner to the outer bay easily because of residual currents flow southward at surface and northward at the bottom. The simulation results of COD distribution showed high concentrations over 3 mg/L in the inner part of Masan Bay related pollutant discharge. For improvement seawater quality grade I in Masan Bay, it is necessary to reduce the organic and inorganic loads from point sources by more than 80% . For improvement seawater quality grade II, it is necessary to reduce the organic and inorganic loads from point sources by more than 50% and ameliorate severe polluted sediment. The carrying capacity for COD is 2.32 ton/day and 7.16 ton/day for each grade.

**Keywords** : coastal water quality, land-based pollution load, carrying capacity, COD, Masan Bay

+ Corresponding author : dmkim@pknu.ac.kr  
\* 국립수산과학원 환경연구팀  
\*\* 국립수산과학원 환경연구팀  
\*\*\* 국립수산과학원 환경연구팀  
\*\*\*\* 국립수산과학원 환경연구팀  
\*\*\*\*\* 국립수산과학원 환경연구팀  
\*\*\*\*\* 부경대학교 생태공학과 교수

## 1. 서 론

마산만은 만 중앙부에 소모도, 부도가 위치하고, 만 입구에 잠도, 초리도, 실리도 등이 위치한 좁고 기다란 형태이며 남북길이 8.5 km, 최대폭 1.5 km, 평균조사 1.3 m에 불과한 폐쇄성이 강한 내만으로서 해양면적 70.94 km<sup>2</sup>, 육지면적 129.51 km<sup>2</sup>로 만입구를 제외한 해역의 수심이 10~15 m 미만의 얕은 해역이며 내만 전체 평균유속은 5 cm/sec 내외이다(해양수산부, 2002). 마산시, 창원시 및 진해시로 둘러싸인 전형적인 반 폐쇄성 해역으로 수산 활동이 활발한 해역이었으나, 1960년대부터 마산수출자유지역 및 창원공업단지의 형성, 급속한 도시개발에 의한 인구증가, 과일 증양식 등으로 인하여 수질 및 저질이 심하게 오염되고 있는 지역이다(조흥연과 채장연, 1998, 1999; 김종구 등, 1994). 특히, 마산만은 소량의 오염물질이 유입되어도 수질이 크게 악화되는 해역으로, 만내에서 증식한 식물플랑크톤과 하천을 통하여 유입된 오염물질은 해저에 침강되고, 침강 퇴적된 오염물질은 분해·무기화로 인해 영양염이 다시 수중으로 공급되어 부영양화, 적조, 빈산소 등을 유발하여 생태계 건강도를 악화시키고 있다(이무강 등, 1996). 정부는 해양오염방지를 위하여 마산만을 특별 관리해역으로 지정하였고, 수질 개선을 위해 마산만 정화사업의 일환으로 1990년부터 1994년까지 준설과 하수처리장을 건설·운영하고 있다. 그러나, 유역의 지속적인 인구증가 및 오염배출시설의 증가, 간척·매립 사업 등 각종 개발사업의 영향으로 인하여 화학적산소요구량(COD), 총인(T-P) 등의 수질 항목은 해역 III 등급 수준을 유지하고 있는 실정이다. 이렇게 악화된 연안해역의 수질을 개선하기 위해서는 해역 자체가 지닌 자정능력의 환경용량에 적합하도록 육상으로부터 유입되는 오염물질의 양을 줄이는 것이 매우 중요하며, 목표수질 달성을 위해 종합적이고 합리적인 해양환경정책 의사결정을 위해서는 환경용량을 과학적 근거에 맞도록 산정해야만 한다. 환경용량을 산정하는 도구로, 최근에는 생태

계 모델이 많이 사용되고 있는데, 특히, 연안생태계의 기초 생산자를 중심으로 한 생태계모델은 육상에서 유입되는 영양염과 식물플랑크톤의 생산성, 입자유기물 생성, 분해, 침강 및 영양염 재생산 등을 포함하는 물질순환 과정을 해석한다. 국내외 많은 연구자들이 생태계모델을 이용하여 연안해역의 오염현상의 해석에 관한 연구를 진행하고 있다(Lung, 1988; Takeshi, 1988; Mark & Bunch, 1992; Takeoka & Murao, 1997; 김광수 등, 1996; 김광수 등, 1999). 따라서, 본 연구는 마산만의 해양환경 개선을 위해 생태계 모델링 기법을 이용하여 목표수질을 달성할 수 있는 오염부하량 삭감 시나리오 분석을 통해 환경용량을 산정하였다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 생태-유체역학모델(Eco-hydrodynamic model)

본 연구에 사용된 생태-유체역학모델은 해수유동 모델과 생태계 모델로 구성되어 있으며, 해수유동 모델은 中田 등(1985)에 의해 개발 적용되어진 다층모델이며 생태계 모델은 Kremer와 Nixon(1978)에 의해 개발, 적용된 모델의 지배방정식을 바탕으로 Nakata(1982) 등에 의해 grid 모델 형태로 구성되어 있다. 이 모델링 시스템은 최우정 등(1994), 김광수 등(2000)에 의하여 국내 연안환경에 적합하도록 연구 개량되어 그 적용성이 검토되었고, 해역의 기초생산생태계와 환경용량산정에 주로 이용되어왔다.

### 2.2 해수 유동 모델의 입력자료

모델 영역은 마산만 칠천도와 마산시 구산면을 잇는 선, 그리고 거제도과 가덕도 남단을 잇는 선을 개방 경계로 하였으며 가로방향으로 86개 격자, 세로 방향으로 78개 격자로 하였고 격자 사이의 간격은 345 m, 수층은 5개의 층을 고려하여 조석류와 잔차류 성분을 계산하였다(Fig. 2).

해수 유동 모델의 입력 자료를 Table 1에 제시

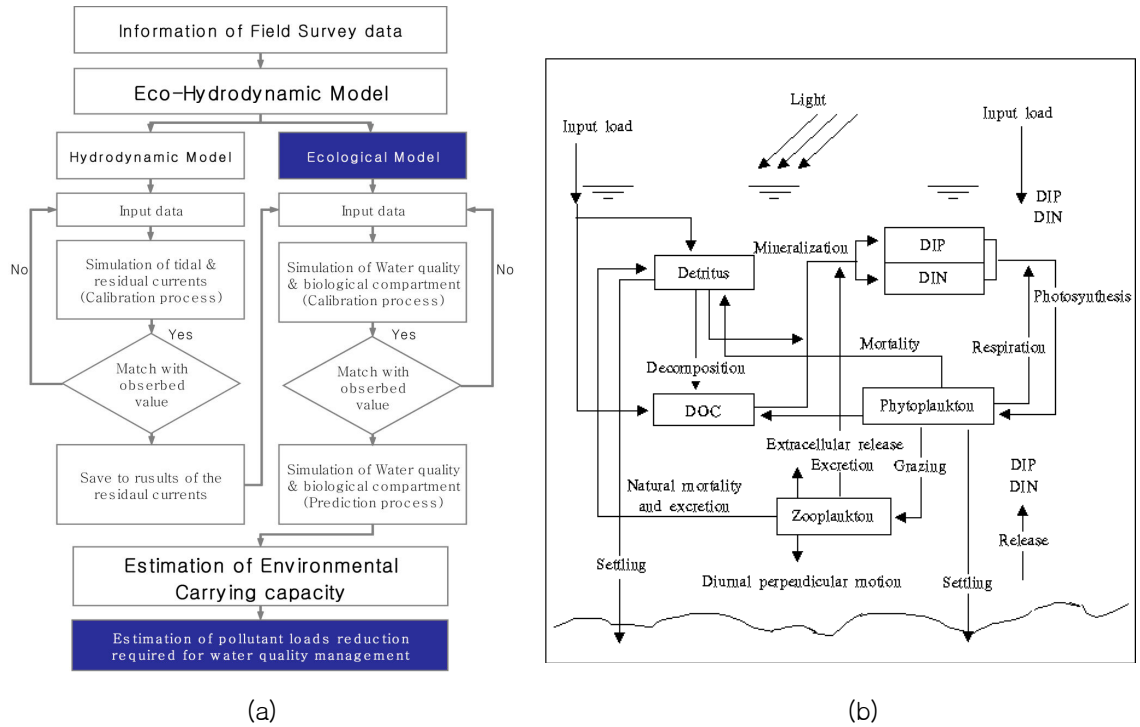


Fig. 1. Schematic diagram of eco-hydrodynamic model(a) and biogeochemical cycle(b) in the ecological model

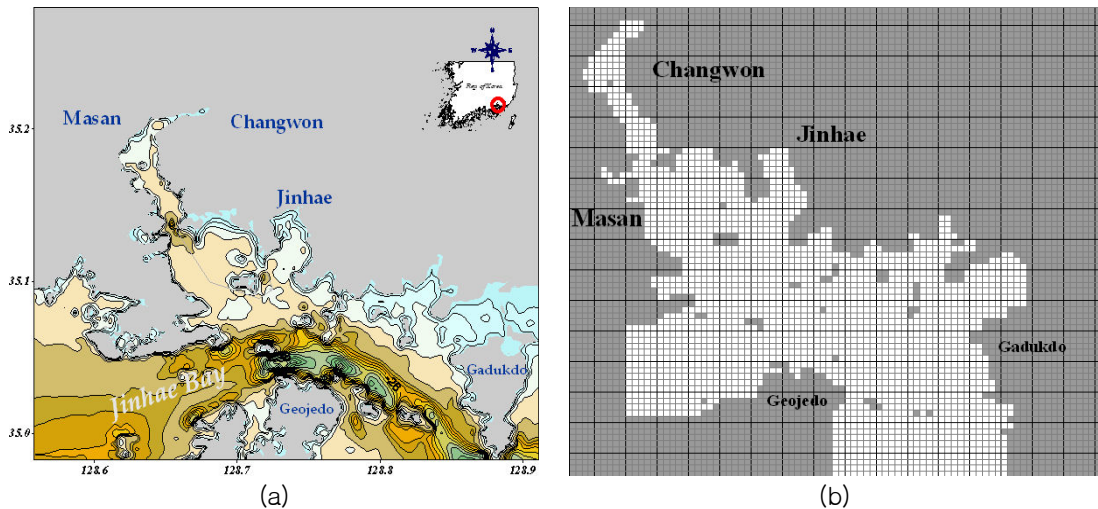


Fig. 2. Model area(a) and grid system(b)

하였다. 연안역에서 연중 가장 안정한 유동이 조류이고 가장 탁월한 조석이 반일 주조이므로 모델 영역내에서 해수 유동을 재현하기 위해서  $M_2$ 와  $S_2$ 분조를 이용하였으며, 각 분조의 진폭과 위상의

외해 경계치는 해양수산부(2002)의 자료를 이용하였다. 수심은 해도상의 수심에 평균 해면고를 더하여 입력하였고 수층은 총 5개 층, 각 층의 두께는 4 m로 하였다. 바람은 무풍상태로 가정하고

Table 1. Input data for a hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 345 \text{ m}$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	4 sec
Level	L1 (0~4m), L2(4~8m), L3(8~12m) L4 (12~16m), L5(below 16m)
Tidal level and degree at open boundary	refer to Kyongsangnamdo(2000)
Coriolis coefficient	$f = 2\omega \sin\psi$ ( $\psi=34^\circ 55' N$ )
Surface & Internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0025
Horizontal viscosity/Diffusion coefficient	$3.0E4 \text{ (cm}^2\text{/sec)} / 3.0E4 \text{ (cm}^2\text{/sec)}$
Wind speed	0.0
Calculation time	90 tidal cycles

총 계산 시간은 90조석을 적용하였으며 주요 하천으로부터 유입하는 유량은 해양수산부(2002)의 자료를 이용하였다. 해저 마찰 계수는 일반적으로 해의 안정성을 주는  $k=0.0025$ 를 적용하였으며, 수평 와동 확산 계수와 수평 와동 점성 계수는  $3.0 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 연직 와동 확산 계수는 표층에서  $0.2 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 중저층에서  $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 값을 적용하였다.

### 2.3 해수유동장 재현 및 검증

3차원 해수유동모델을 이용하여 재현한 조석류는 창조시 표층 (Fig. 3(a))에서 유량은 가덕수도를 통하여 유입하여 주 수로를 따라 북서진 하다가 잠도 및 지리도 부근 수역에서 대부분 진해만 서부 해역으로 서진하여 유입하고, 나머지는 마산만으로 향한다.

유속의 크기는 거제도 북단과 저도사이 및 저도와 대죽도 사이 협수로에서  $60 \text{ cm/sec}$  내외로 가장 빠른 유속을 나타내었으며, 좌측 개방경계 부근 수역에서도  $50 \text{ cm/sec}$  정도로 유속의 크기가 비교적 크게 나타났다. 그러나, 마산만 내측은  $10 \sim 20 \text{ cm/sec}$  크기의 흐름을 나타내었다. 저층 (Fig. 3(b))의 유량은 표층과 유사하였고, 유속의 크기는 전반적으로 표층에 비해 작게 나타났으며 마산만 내측은 유속의 감소폭이 크게 나타났다.

낙조시의 유동(Fig. 4)은 창조시와 반대의 유동 형태를 보이는 전형적인 왕복조류의 형태를 나타내고 있었는데 마산만과 진해만 서부 해역에서 빠져나온 흐름이 남동방향으로 흘러가는 양상을 나타내었다. 유속은 전반적으로 창조시보다 빠른 경향을 보이고 있었는데 만 내측으로부터의 하천수와 하수처리장방류수의 유입에 따른 담수의 영향으로 판단된다. 최강 유속을 보이는 수역은 저도와 대죽도 사이의 협수로로  $70 \text{ cm/sec}$  내외의 유속을 나타내었다.

연안해역의 물질분포에 큰 영향을 미치는 잔차류(Fig. 5)의 흐름 형태는 만 내측에서 만 입구의 부도를 지나 진해만의 서부해역으로 유출하는 흐름과 거제도 북단의 저도와 대죽도부근 수역에서 외해로 유출하는 흐름으로 구분되며 만 내측에서는 밀도성층에 의한 밀도류의 흐름이 나타났다. 대상수역 내의 부도부근에서는 시계방향의 환류가 존재하였고, 그이외의 잠도, 저도 등 섬 주변에서 와류가 형성되고 있음을 알 수 있다. 유속의 크기는 대부분  $10 \text{ cm/sec}$  내외이며 가덕수도 부근 수역과 좌측 개방 경계 수역에서  $20 \text{ cm/sec}$  내외로 비교적 큰 유속을 보이나 마산만 내측은  $5 \text{ cm/sec}$  내외로 흐름이 약한 편이다. 저층의 잔차류 형태는 표층과는 반대로 만 입구에서 만 내측으로 향하는 양상이 나타났으며, 가덕수도 좌측에서는

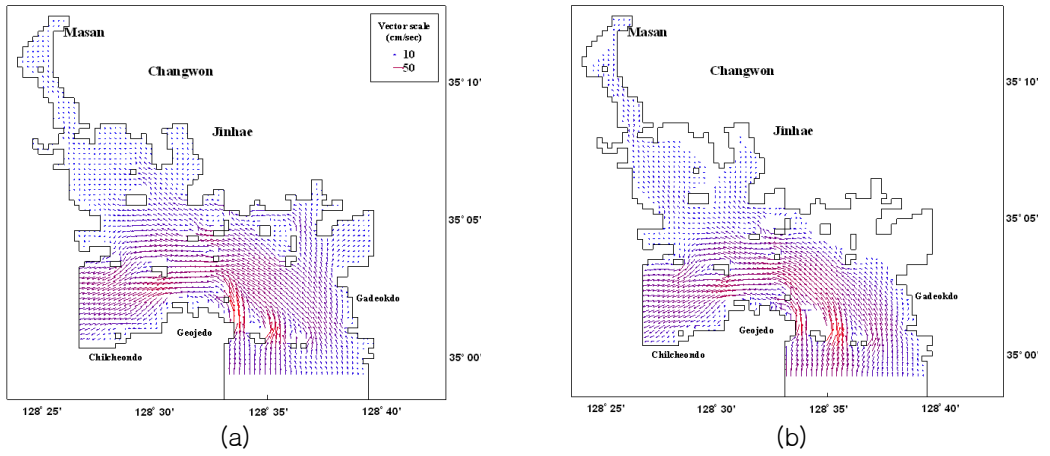


Fig. 3. Tidal current vectors at surface during the flood flow at surface(a) and bottom(b)

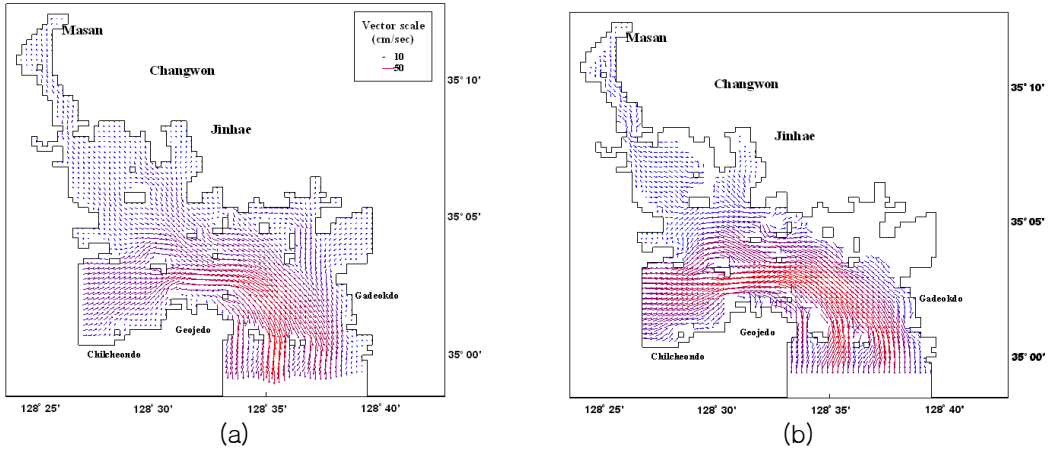


Fig. 4. Tidal current vectors at surface during the ebb flow at surface(a) and bottom(b)

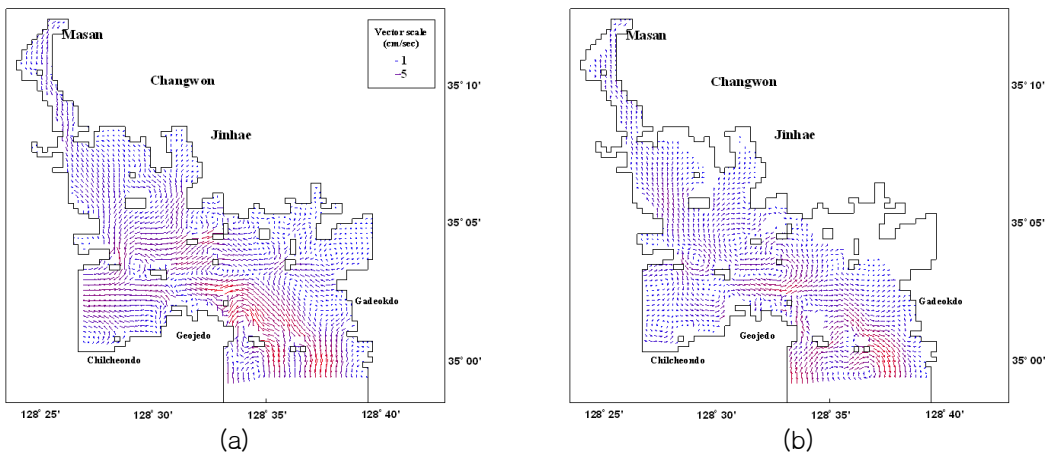


Fig. 5. The computed residual currents at surface(a) and bottom(b)

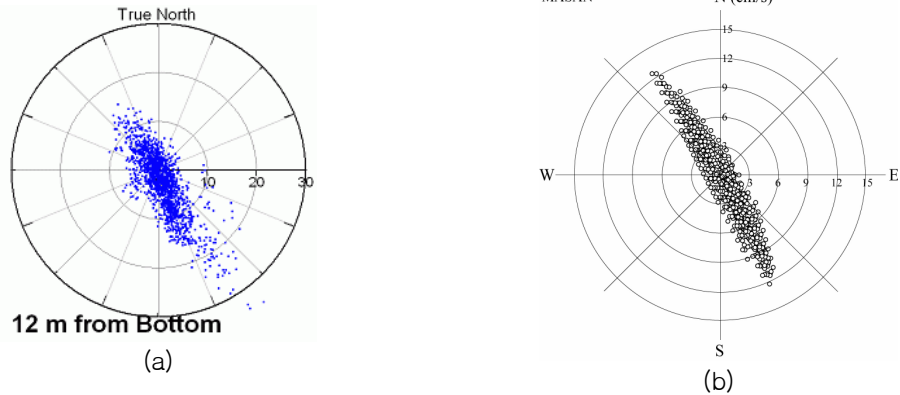


Fig. 6. Comparison of tidal current ellipses between observed(a) and computed(b) result

유입, 우측에서는 유출하는 흐름 형태를 보이고 가덕수도에서 만 좌측에서 개방 경계에 이르는 주수로 부근에서는 와류가 형성되는 매우 복잡한 흐름 형태를 나타내었으며 유속의 크기는 표층과 같이 가덕수도 부근 수역은 20 cm/sec 내외, 마산만 내측은 5 cm/sec 내외였다. 마산만의 잔차류 흐름 형태로 볼 때 하천 등을 통하여 유입된 유기물이 표층을 따라 서서히 만 입구 쪽으로 이동하면서 침강하고, 저층에 도달하면 만 내측으로 이동하여 내측의 수질을 더욱 악화시킬 수 있는 형태를 보여주고 있다.

해수 유동 시뮬레이션 결과의 타당성을 검토하기 위하여 특정 시각에 재현된 조류 타원도의 계산 결과를 관측치와 비교하였다. 국립수산과학원에서 1999년 8월 1~2일에 관측한 조류 타원도와

계산된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 관측 결과와 비교해 볼 때 흐름의 주축 방향 및 유속의 크기에 있어 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 생태계 모델 보정

#### 3.1 생태계 모델의 입력자료

생태계모델의 입력자료 중 초기치 및 경계치는 Table 2와 같으며 격자간격은 해수유동모델과 동일하게 입력하였다. 초기치 및 경계치 농도는 2002년 여름철의 자료를 참고하여 입력하였다.

모델에 적용된 parameter는 기존 측정된 자료 및 문헌 조사를 통하여 선정하였다(Table 2). 육상기인 오염부하량(Table 3)은 2002년 마산만으로

Table 2. Input data for an ecosystem model

Parameters		Input values						
Mesh size		$\Delta x = \Delta y = 345m$						
Water depth		chart datum + MSL						
Time interval/Calculation time		600sec / 200 tidal cycles						
level	Phyto (mgC/m <sup>3</sup> )	Zoo (mgC/m <sup>3</sup> )	POC (mgC/m <sup>3</sup> )	DOC (mgC/m <sup>3</sup> )	DIP ( $\mu g-at/L$ )	DIN ( $\mu g-at/L$ )	DO (mg/L)	COD (mg/L)
A, 1~5	400.0	40.0	800.0	2500.0	1.50	15.00	7.00	2.40
B, 1~5	150.0	15.0	400.0	1500.0	1.00	10.00	8.00	1.50
C, 1~5	150.0	15.0	450.0	1500.0	1.00	10.00	8.00	2.50

(A: Initial condition for compartment, B: Boundary condition for Chilgendo, C: Boundary condition for Gadukdo)

Table 3. Parameters in used ecological model

Item	Parameter definition	Unit	Value
Phyto-plankton	Maximum growth rate, $\alpha_1$	day <sup>-1</sup>	0.54 exp(0.0633T)
	Half saturation constants for nutrient, $K_{NP}$	$\mu\text{g/L}$	P 0.3, N 3.0
	Optimal light intensity, $I_{opt}$	ly/day	180
	Light extinction coefficient, $k$	m <sup>-1</sup>	0.40+0.0179×Chl. <i>a</i>
	Fraction of extracellular release, Ext	-	0.135 exp(-0.002 Chl. <i>a</i> )
	Respiration rate, $\alpha_2$	day <sup>-1</sup>	0.01 exp(0.0524T)
	Sinking rate of living cells, $W_P$	m/day	0.15
	Rate of nature mortality, $\alpha_4$	day <sup>-1</sup>	0.054 exp(0.0693T)
Zoo-plankton	Maximum grazing rate, $\alpha_3$	day <sup>-1</sup>	0.18 exp(0.0693T)
	Ivlev constant, $\lambda$	(mg C/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	0.01
	Feeding threshold, $P^*$	mg C/m <sup>3</sup>	75
	Energy expenditure in grazing activity, $v$	-	30% of daily carbon
	Assimilation efficiency, $\mu$	%	70
	Rate of natural mortality, $\alpha_5$	day <sup>-1</sup>	0.054 exp(0.0693T)
Organic Carbon	Mineralization rate of detritus, $\alpha_6$	day <sup>-1</sup>	0.01 exp(0.0693T)
	Sinking rate of detritus, $W_{POC}$	m/day	0.4
	Mineralization rate of DOM, $\alpha_7$	day <sup>-1</sup>	0.004 exp(0.0693T)

로 유입되는 하천 중 16개 하천과 덕동 하수처리장의 유량 및 농도로부터 산정하였으며, Table 4에 나타내었다. 마산만에 유입되는 총 담수 유입량은 마산창원에서 63%로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며 해중 방류 유입량은 31%, 행암만의 유입량은 6%이었다. 조흥연과 채장원(1998)은 95~96년의 조사에서 마산창원 유역의 담수 유입량이 약 69%, 해양방류 유입량은 약 20%, 행암만 담수유입량이 약 10%를 차지하고 있다고 하였다. 이처럼 마산만의 담수 유입량은 진해만 유역에 비하면 계절적 차이가 크지 않다. 이는 평상시의 담수 유입량이 도시 및 공장 지역에서 사용되는 용수사용량과 관련성을 가지고 있기 때문

이다(조흥연와 채장원, 1997). 마산만의 오염부하량 또한 담수유입량과 동일하게 마산창원과 해중방류에서 같은 비율을 보여주었고, 특히 해중방류에 의한 부하량은 조흥연와 채장원(1998)의 결과에 비해 해양수산부(2002)의 결과가 다소 높은 값을 보여주고 있다. 퇴적물에서의 영양염 용출 속도는 인산 인이 8 mg/m<sup>2</sup>/day, 암모니아 질소가 36 mg/m<sup>2</sup>/day(김중구 등, 1994), 인산 인이 13 mg/m<sup>2</sup>/day, 암모니아 질소가 91 mg/m<sup>2</sup>/day(조흥연과 채장원, 1998)로 그 차이가 크게 나타나 이는 측정시기와 위치의 차이와 표준화된 측정법의 부재로 인한 것으로 판단된다.

Table 4. Characterization of input loading in Masan Bay, 2002

regions	flow rate(ton/day)		COD(ton/day)		DIP(kg/day)		DIN(kg/day)	
	loading	percent	loading	percent	loading	percent	loading	percent
Masan	225,606	29	7.2	44	103.9	23	2,820.7	24
Changwon	257,159	34	0.6	4	58.1	13	2,468.5	21
Jinhae	42,481	6	1.7	10	20.5	5	474.7	4
outfall	240,000	31	6.8	42	266.4	59	6,218.4	52
total	765,246	100	16.2	100	448.9	100	11,982.3	100

### 3.2 생태계모델의 보정

생태계모델의 적용성을 검토하기 위해서 해양수산부(2002)의 수질자료를 이용하여 보정하였는데 계산치와 관측치의 상대오차는 각각 화학적산소요구량 7%, 용존무기질소 11% 및 용존무기인 7%로 양호함에 따라 모델의 계산 결과는 마산만의 여름철 수질을 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

### 3.3 생태계모델의 민감도 분석

환경용량 산정 모델 내 구성요소, 즉 식물플랑크톤, 화학적산소요구량, 용존인 및 용존무기질소의 농도변화가 어떤 인자들과 가장 민감하게 반응하는가를 평가하기 위한 수치실험을 수행하였다. 민감도 분석에 사용된 생물인자들의 초기치 자료는 Table 3에 나타낸 바와 같다. 모델의 상태변수에 영향을 미치는 인자에 대한 민감도는 초기치를 이용하여 시뮬레이션 한 계산 값과 초기치 인자를 ±10%로 조절하여 시뮬레이션 한 계산 값을 아래와 같은 식을 통해 도출된 민감도 계수를 계산하여 평가하였음 (Dowd, 1997)

$$S = \left| \frac{\Delta V/V}{\Delta \text{parameter}/\text{parameter}} \right| \quad (1)$$

여기서, S : 민감도 계수

V : 초기치를 이용한 상태변수 결과 값

$\Delta V$  : 초기치와 초기치 변화에 의한 상태변수 증감 값

denominator : 초기치의 변화폭

식 (1)은 단순히 모델인자의 변화에 따른 상태변수들의 민감성을 비교하는 것으로, 각 인자들의 민감도 계수 (S)를 비교하여 상태변수에 영향을 미치는 각 인자들의 상대적인 민감도를 평가하는데 사용된다. 민감도 계수는 양의 변화와 음의 변화에 대한 평균값으로 모델의 주요변수인 식물플랑크톤, 화학적산소요구량, 용존인 및 용존무기질소와 모델의 생화학 인자와의 민감도 계산 결과를 나타내었다(Table 5).

생물 서식환경 중의 식물플랑크톤과 높은 민감도계수를 가진 인자는 식물플랑크톤의 성장, 사망속도, 동물플랑크톤 포식 및 고사속도 그리고 퇴적물로부터 인의 용출속도였다. 서식환경 중의 용존무기질소 (DIN)는 동물플랑크톤의 포식 및 고사속도에 민감성을 나타내었다. 용존무기인 (DIP)과 높은 민감도계수를 가진 인자는 식물플랑크톤의 성장, 사망속도, 동물플랑크톤 포식 및 고사속도 그리고 퇴적물로부터 인의 용출속도였다. 서식환경 중의 화학적산소요구량 (COD)과 높은 민감도계수를 가진 인자는 식물플랑크톤의 성장, 사망

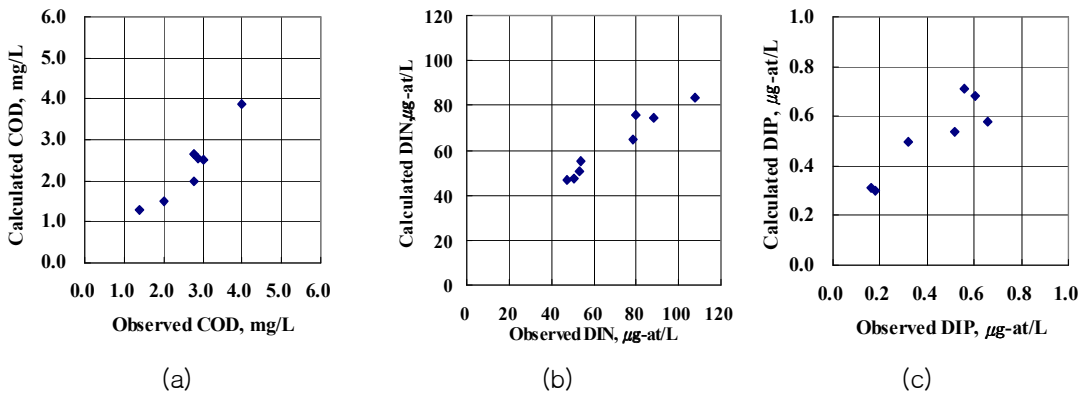


Fig. 7. Comparison between simulated and observed COD, DIN, DIP



Table 5. Sensitivity coefficients of the model variables to 10% change of parameters

Parameter	Phyto-plankton	DIN	DIP	COD
Phytoplankton mortality	0.582	0.011	0.491	0.151
Phytoplankton growth rate	0.788	0.045	3.133	0.714
Detritus mineralization rate	0.077	0.067	0.063	0.134
Dissolved organic matter mineralization rate	0.088	0.106	0.063	0.323
Zooplankton grazing rate	3.480	0.290	3.750	1.297
Zooplankton death rate	2.972	0.253	2.769	1.008
Benthic nutrient release rate(nitrogen)	0.000	0.091	0.000	0.000
Benthic nutrient release rate(phosphorus)	0.306	0.001	0.316	0.168

속도, 용존유기물질 분해속도, 동물플랑크톤 포식 속도 그리고 퇴적물로부터 인의 용출속도였다. 민감도 분석 결과는 생태계 모델 보정 시 생물학적인자에 대한 현장관측의 중요성이 강조되고 있다고 판단된다.

### 3.4 수질의 재현

생태계모델을 이용하여 2002년 하계를 대상으로 마산만의 수질 환경을 재현하였다. 생태계 구성 요소 중 화학적산소요구량, 식물플랑크톤, 용존무기질소, 용존무기인에 대하여 재현된 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 화학적산소요구량의 분포는 마산만 입구에 위치한 부도를 중심으로 하여 내측 수역은 2 mg/L 이상의 농도 분포를 보였고, 덕동 하수처리장의 방류구가 위치한 구산면 육계리 부근 수역과 행암만, 그리고 묘도 내측 수역이 3 mg/L 이상의 높은 농도 분포를 나타내었다.

마산만 내측의 오염은 구산면 남단을 따라 진해만 서부 수역으로 그 영향을 미치는 것으로 나타났다. Chl. *a*의 농도 분포는 해수의 흐름이 정체되고, 하천의 유입으로 인한 영양염류의 유입량이 많은 관계로 식물플랑크톤의 증식이 매우 활발한 묘도 내측 수역은 10  $\mu\text{g/L}$  이상의 농도 분포를 보였고 덕동 하수처리장의 방류구가 위치한 구산면 육계리 부근 수역도 역시 식물플랑크톤의 활발한 증식으로 12  $\mu\text{g/L}$ 의 높은 농도였으며 그 이외에 행암만 등이 높게 나타나 화학적산소요구량

과 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 가덕수로에서 진해만서부해역으로의 주 수로와 마산만 입구 쪽은 상대적으로 낮은 Chl. *a* 농도 분포를 보였다. 용존무기질소는 내측 수역과 덕동 하수처리장의 방류구 부근 수역에서는 40~60  $\mu\text{g-at/L}$ 의 농도 분포를 보였고, 또한 행암만의 내측에서 높았다. 방류구 부근 수역에서는 동심원 형태로 농도가 높아지는 경향을 보이는데 방류수의 유출 영향인 것으로 판단된다. 용존무기인도 용존무기인과 유사하게 내측 수역과 덕동 하수처리장의 방류구 부근 수역에서 0.6  $\mu\text{g-at/L}$  이상의 높은 농도 분포를 보였고, 마찬가지로 덕동 하수처리장의 방류구가 위치한 구산면 육계리 부근 수역에서 동심원 형태로 농도가 높아지는 경향이 재현되었다.

## 4. 환경용량 산정

### 4.1 부하삭감 시나리오

연안 해역의 환경 관리를 위해서는 환경용량 산정을 통하여 환경용량을 초과하지 않도록 오염물질의 유입을 조절해야 하는 것이 매우 중요하기 때문에, 마산만 오염에 기여하는 오염 부하량 삭감량에 따른 가용한 3가지의 시나리오를 설정하였고, 이를 바탕으로 수치시뮬을 수행하였다 (Table 6). 각각의 시나리오에서는 육상 유기물 부하를 60~80%, 해중방류에 의한 유기물 부하를 50~80% 정도 삭감하도록 하였으며, 저질 용

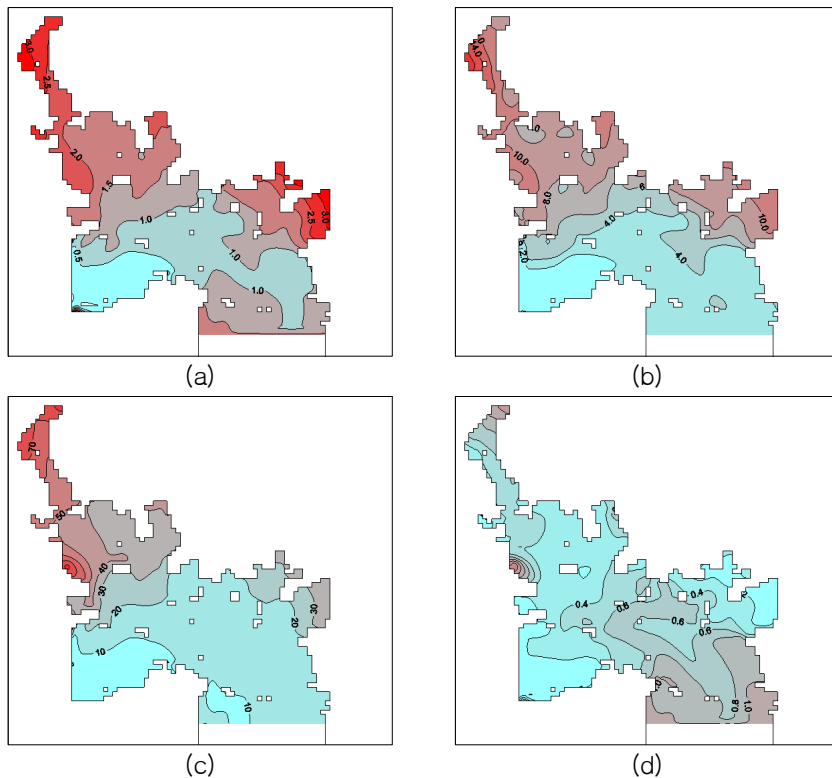


Fig. 8. The distribution of simulated COD(a), Chl *a*(b), dissolved inorganic nitrogen (c), dissolved inorganic phosphate(d) at surface in Mansan Bay

Table 6. Scenario for estimating carrying capacity in Masan Bay

Item	Reduction percentage (%)							
	riverine load			outfall load			sediment load	
	Organic	DIP	DIN	Organic	DIP	DIN	DIP	DIN
Scenario I	60	50	10	50	50	10	-	-
Scenario II	60	50	10	50	50	10	50	10
Scenario III	90	90	30	80	80	30	80	30

출을 포함한 영양염의 부하량 삭감도 0~90%가 포함되도록 하였다. 각각의 시나리오로부터 해역 I, II 등급(각각 COD 1, 2 mg/L)을 만족하는 환경 용량을 산정하여 마산만의 수질 개선을 위해 삭감해야 할 오염 부하량을 산정하였다.

시나리오 I에 따른 수질 예측 결과를 살펴보면, 마산만 묘도 내측의 화학적산소요구량 농도분포가 2 mg/L 이상으로 해역 II등급의 수질 달성

이 어려운 것으로 나타났다(Fig. 9).

시나리오 II에 따른 수질예측 결과 화학적산소 요구량 농도분포는 2.0 mg/L 이상을 나타내는 곳이 마산만 내측에 존재하였다(Fig. 10).

시나리오 III에 따른 수질예측 결과 마산만의 화학적산소요구량 농도분포가 1.0~1.5 mg/L 범위로 해역 II등급 달성 가능한 것으로 나타났다 (Fig. 11).

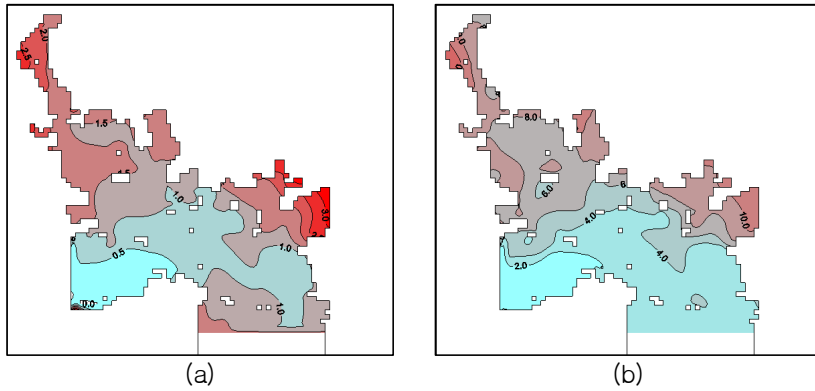


Fig. 9. Horizontal distributions of COD(a) and Chl. a(b) in the Masan bay from scenario I

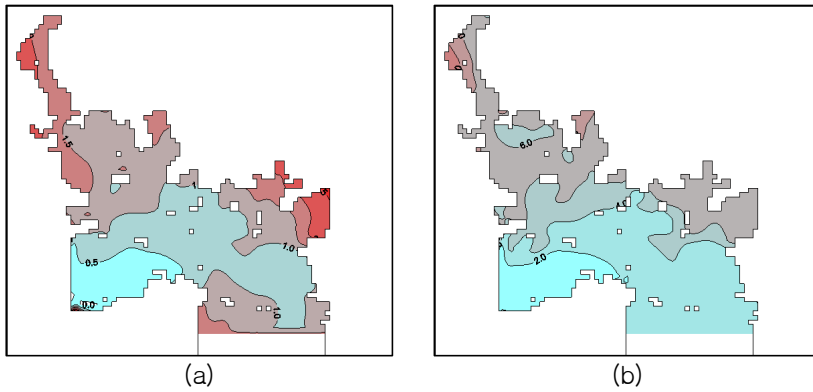


Fig. 10. Horizontal distributions of COD(a) and Chl. a(b) in the Masan bay from scenario II

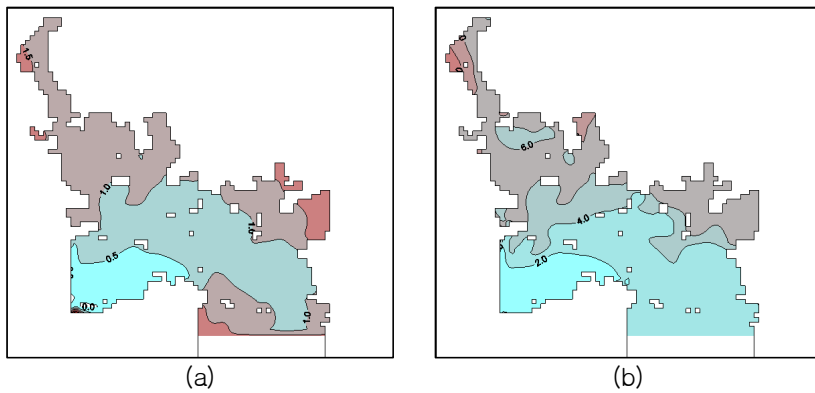


Fig. 11. Horizontal distributions of COD(a) and Chl. a(b) in the Masan bay from scenario III

#### 4.2 수질관리를 위한 오염부하 삭감 방안 및 환경용량 산정

육상 및 해양기인 오염부하 유입에 따른 마산

만 내측의 COD 농도는 3.0 mg/L 이상으로 해양 환경을 개선하고 목표 수질달성을 위한 환경용량을 분석하였다(Table 7).

목표수질 해역 I 등급(COD 1 mg/L)을 달성

Table 7. Carrying capacity for accomplishing seawater grade I and II based on chemical oxygen demand

Parameter	source	Loading rate	reduction load		carrying capacity	
			grade I	grade II	grade I	grade II
COD (ton/day)	<b>Sum</b>	<b>16.24</b>	<b>13.92</b>	<b>9.08</b>	<b>2.32</b>	<b>7.16</b>
	stream	9.48	8.53 (90%)	5.69 (60%)		
	Outfall	6.76	5.40 (80%)	3.39 (50%)		
	sediment	-	-	-		
DIP (kg/day)	<b>Sum</b>	<b>1,148.9</b>	<b>937.4</b>	<b>574.5</b>	<b>211.5</b>	<b>574.4</b>
	Stream	182.5	164.3 (90%)	91.3 (50%)		
	Outfall	266.4	213.1 (80%)	133.2 (50%)		
	sediment	700	560.0 (80%)	350 (50%)		
DIN (kg/day)	<b>Sum</b>	<b>14,082.3</b>	<b>4,224.7</b>	<b>1,408.2</b>	<b>9,857.6</b>	<b>12,674.1</b>
	Stream	5,763.9	1,729.2 (30%)	576.4 (10%)		
	Outfall	6,218.4	1,865.5 (30%)	621.8 (10%)		
	sediment	2,100	630.0 (30%)	210.0 (10%)		

( ) : reduction rate

하기 위한 오염원별 삭감 부하량은 유기물(COD)이 13.9 ton/day, DIP은 937.4 kg/day, DIN은 4,224.7 kg/day였다. 해역 I 등급을 유지하기 위해 마산만이 받아들일 수 있는 오염부하량의 한계 즉, 환경용량은 COD 부하 2.3 ton/day, DIP 211.5 kg/day 그리고 DIN 9,857.6 kg/day였다. 그리고 해역 II 등급을 달성하기 위한 환경용량은 COD 7.16 ton/day, DIP 및 DIN은 각각 574.4 kg/day, 12,674.1 kg/day로 삭감해야 할 오염부하량은 COD 9.08 ton/day, DIP와 DIN은 각각 574.5 kg/day, 1,408.2 kg/day로 나타났다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

김광수, 김동명, 박청길 (1999). 해수유동모델을 이용한 황해 환경용량의 개략 산정, 한국해양

환경학회지, 제2권, 제1호, pp. 63-73  
 김광수, 박청길, 조은일 (1996). 생태계 모델을 이용한 황해의 환경용량 산정, 한국수질보전학회지, 제12권, 제4호, pp. 383-399  
 김광수, 최영찬 (2000). 생태계 모델을 이용한 제주도 남부연안해역의 환경용량 산정, 한국해양환경공학회지, 제3권, 제1호, pp. 52-61  
 김종구, 박청길, 김광수 (1994). 하계 마산만의 부영양화 제어를 위한 생태계모델의 적용, 한국환경과학회지, 제3권, 제3호, pp. 185-195,  
 이무강, 황정옥, 최영광 (1996). 다변량 해석에 의한 마산만 저층수의 수질평가, 한국환경과학회지, 제5권, 제1호, pp. 15-23  
 조흥연, 채장원 (1997). 마산만의 장기간 물수지 및 해수교환 특성, 한국해양·해양공학회지, 제2권, 제9호, pp. 74-85,  
 조흥연, 채장원 (1998). 진해·마산만의 오염부하량의 특성분석, 한국해양·해양공학회지, 제10권, 제3호, pp. 132-140,  
 조흥연, 채장원 (1999). 진해·마산만의 환경관리를 위한 수질모델링, 한국해양·해양공학회지, 제11권, 제1호, pp. 41-49

- 최우정, 박청길, 이석모 (1994). 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 제27권, 제4호, 413-433
- 해양수산부 (2002). 환경관리해역 환경개선방안 연구, pp. 305-353
- 中田喜三郎, 石川公敏, 松川康夫 (1985). 内灣の流動場の數値實驗. 沿岸海洋研究ノート, Vol. 22. No. 2, pp. 96-108
- Dowd, M. (1997). On predicting the growth of cultured bivalves. *Ecological Modeling*, 104, pp. 113-131
- Kremer, J., S.Nixon (1978). A coastal marine ecosystem: Simulation and analysis, Springer-Verlag, p. 16
- Lung, W. S. (1988). The role of estuarine modeling in nutrient control. *Water Science and Technology* Vol. 20, pp. 243-252
- Mark, D.J., Bunch, B.W. (1992). Hydrodynamic and water quality modeling of Lower Green Bay. Estuarine and coastal modeling, In: Proceedings of the Second International Conference, ASCE 1992, pp. 657-668
- Ménesguen A. (1990). Eutrophication along the French coasts. In *Eutrophication-related Phenomena in the Adriatic Sea and in other Mediterranean Coastal Zones* (Barth, H. & Fegan, L., eds). *Water Pollution Report No. 16*, pp. 63-82
- Nakata, K., Taguchi, K. (1982). Numerical simulation of eutrophication process in coastal bay by eco-hydrodynamic model, (2)Ecological modeling, *Bulletin of the National Research Institute Pollution and Resources* 12, pp. 17-36
- Nixon, S.W. (1995). Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, Vol. 41, pp. 199-219
- Okaichi, T. (1985). The Cause of red-tide in Neritic Waters, *Japan Fisheries Resources Conversation Association*, pp. 58-75
- Takeshi, H. (1988). The role of modelling in the control of seawater pollution. *Water Science and Technology* Vol. 20, pp. 277-286
- Takeoka, H., Murao, H. (1997). Response of water quality to the reduction of nitrogen or phosphorus load from the land. *Bulletin on Coastal Oceanography* Vol. 34, pp. 183-190